



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


Nathalia de Almeida Castelo Branco

**Investigação sobre o comportamento dinâmico de pisos mistos
submetidos a ações humanas rítmicas considerando-se
metodologias distintas para análise do conforto humano**

Rio de Janeiro
2021

Nathalia de Almeida Castelo Branco

Investigação sobre o comportamento dinâmico de pisos mistos submetidos a ações humanas rítmicas considerando-se metodologias distintas para análise do conforto humano



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

2021

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

C349 Castelo Branco, Nathalia de Almeida.
Investigação sobre o comportamento dinâmico de pisos mistos submetidos a ações humanas rítmicas considerando-se metodologias distintas para análise do conforto humano / Nathalia de Almeida Castelo Branco. – 2021.
117f.

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

1. Engenharia civil - Teses. 2. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 3. Construção mista - Teses. 4. Pavimentos - Teses. 5. Conforto humano - Teses. 6. Método 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

Data

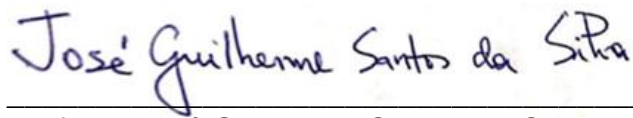
Nathália de Almeida Castelo Branco

Investigação sobre o comportamento dinâmico de pisos mistos submetidos a ações humanas rítmicas considerando-se metodologias distintas para análise do conforto humano

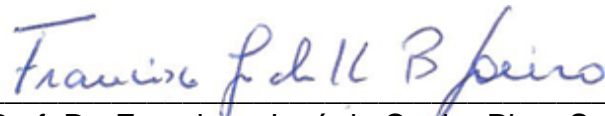
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 09 de dezembro de 2021.

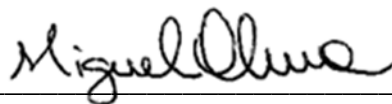
Banca Examinadora:



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. Miguel Henrique de Oliveira Costa
Universidade Estácio de Sá - UNESA



Prof. Dr. Gilvan Lunz Debona
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

Rio de Janeiro
2021

DEDICATÓRIA

A meus avós, Wilma e Newton.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde, pelas oportunidades e por me dar forças para alcançar essa conquista.

Aos meus avós, Wilma (*in memorian*) e Newton, por todo amor, por todo carinho e suporte em todas as áreas da minha vida. Obrigada por sempre me mostrarem que é possível ir além e conseguir atingir nossos sonhos.

A minha família, meus pais Christine e Lauro (*in memorian*), meus tios Christian e Gicela, meus primos Heitor e Heloise. Obrigada por todo amor, apoio, carinho e incentivo.

Ao meu orientador, professor José Guilherme, pela paciência, convívio, incentivo e todos os ensinamentos transmitidos no decorrer dessa jornada. Obrigada por me ensinar tanto!

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PGECIV, pelos conhecimentos e sabedoria transmitidos.

Aos amigos e companheiros de curso do PGECIV, pelo convívio, amizade e risadas.

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

Somos mais do que a soma total de nossas escolhas e todos os caminhos que poderíamos ter trilhado influem de algum modo na matemática da nossa identidade.

Blake Crouch

RESUMO

CASTELO BRANCO, Nathalia de Almeida. *Investigação sobre o comportamento dinâmico de pisos mistos submetidos a ações humanas rítmicas considerando-se metodologias distintas para análise do conforto humano*. 2021. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

A aplicação de técnicas construtivas envolvendo pisos mistos (aço-concreto) leves tem crescido nos últimos anos devido à otimização com referência ao tempo de construção e a flexibilidade do uso final da estrutura. No entanto, esta prática apresenta como tendência a redução das frequências naturais e do amortecimento destes pisos, gerando preocupação quanto à resposta dinâmica quando estes são submetidos a atividades humanas rítmicas. Desta maneira, este trabalho de pesquisa visa 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, foram utilizadas formulações matemáticas tradicionais para a representação do carregamento dinâmico (modelos de “força dura”); e, também, considerando-se o emprego de sistemas biodinâmicos associados a sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor”, com um grau de liberdade (S1GL), objetivando representar as ações dinâmicas produzidas por pessoas praticando atividades humanas rítmicas. O piso misto (aço-concreto) analisado neste estudo possui dimensões de 22,5 m x 14 m, totalizando 315 m² de área, sendo apoiado por treliças de aço do tipo *joists* com 14 m de vão, e as lajes de concreto possuem espessura de 6,5 cm. O modelo numérico em elementos finitos foi desenvolvido com base no emprego do programa computacional ANSYS. Inicialmente, mediante análise modal (autovalores e autovetores), verifica-se que frequência fundamental da estrutura encontra-se em faixa próxima aos harmônicos da frequência de excitação humana, indicando uma tendência de vibração excessiva e desconforto humano. Diante do exposto, ao avaliar o comportamento estrutural dinâmico do piso, percebe-se que os modelos de carregamento de “força-dura” produzem deslocamentos e acelerações bastante superiores àquelas encontradas com base no uso dos sistemas biodinâmicos, que incorporam as características dinâmicas dos indivíduos. Observa-se que em todas as situações de projeto investigadas, os limites para as acelerações de pico não foram atendidos, resultando em desconforto humano para os ocupantes. Por outro lado, mediante os critérios de projeto associados aos valores de RMS e VDV, ressalta-se que houve violação em todas as situações, exceto para o modelo matemático que considera o uso dos sistemas biodinâmicos, com atenuações importantes da resposta dinâmica do piso misto (aço-concreto).

Palavras-chave: Pisos mistos de edificações. Modelagem em elementos finitos. Análise estrutural dinâmica. Modelos biodinâmicos. Conforto humano.

ABSTRACT

CASTELO BRANCO, Nathalia de Almeida. *Investigation on the dynamic behavior of composite floors on rhythmic human actions considering different methodologies for the analysis of human comfort*. 2021. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

The use of construction techniques with lightweight steel-concrete composite floors has increased in recent years due to the optimization of construction time and flexibility in end use. However, this practice leads to a reduction in the natural frequencies and damping of these floors, which raises concerns about their dynamic response when exposed to human rhythmic activities. Therefore, this research work aims to analyse the structural dynamic behaviour of a steel-concrete composite floor when subjected to human rhythmic activities and evaluate the human comfort. In this context, traditional mathematical functions were used to represent the dynamic loading models (force-only models). Moreover, the use of biodynamic systems "mass-spring-damper" with one degree of freedom (SDOF) was considered to represent the dynamic actions produced by humans during aerobics. The steel-concrete composite floor studied has dimensions of 22.5 m x 14 m with a total area of 315 m², with support steel joists with 14 m in length, and the concrete slab has a thickness of 6.5 cm. The finite element numerical model was developed using ANSYS software. From the modal analysis (eigenvalues and eigenvectors), it can be firstly observed that the fundamental frequency of the structure is in the frequency range of human excitation harmonics, indicating a tendency to excessive vibration and human discomfort. When evaluating the dynamic structural dynamic behaviour of the composite floor, it is observed that the loading models based on the "force-only" have significantly higher displacements and accelerations than the models based on the use of biodynamic systems, where the dynamic characteristics of each individual are taken into account. It can be observed that in all the design situations studied, the peak acceleration limits are exceeded, causing discomfort to the users. Regarding the comfort criteria associated with RMS and VDV, it should be emphasized that all the studied situations exceed the limits, except for the mathematical model that considers the use of biodynamic systems with a significant damping of the dynamic response of the steel concrete composite floor.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edifício The One - São Paulo/SP [1]	20
Figura 2 - Shopping Estação BH - Belo Horizonte/MG [1]	21
Figura 3 - Direção das vibrações conforme ISO 2631-1 [43]	40
Figura 4 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixo z) [40]	43
Figura 5 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixos x, y) [40] ...	43
Figura 6 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada (eixos x, y e z) [40]	44
Figura 7 - Movimentos do corpo durante um salto [51]	47
Figura 8 - Aceleração no domínio do tempo durante o salto [51]	47
Figura 9 - Força no domínio do tempo durante um salto [51]	48
Figura 10 - Comportamento da carga em função do tempo para diferentes atividades [39]	50
Figura 11 - Redução do coeficiente de Fourier em relação ao número de participantes [39]	52
Figura 12 - Função representativa de uma atividade com perda de contato [51]	52
Figura 13 - Coeficiente de defasagem para atividades humanas [51]	53
Figura 14 - Representação da modelagem do sistema biodinâmico [54]	55
Figura 15 - Comparativo entre o modelo biodinâmico e o modelo de força-dura	56
Figura 16 - Validação do modelo biodinâmico proposto [52]	56
Figura 17 - Fluxograma referente ao processo do modelo biodinâmico [52]	57
Figura 18 - Sistema estrutural do piso misto (aço-concreto). Dimensões em m.	59
Figura 19 - Corte A-A do piso misto (aço-concreto). Dimensões em mm.	59
Figura 20 - Detalhe do apoio do piso misto. Dimensões em mm.	60
Figura 21 - Seis disposições do carregamento analisado. Dimensões em m.	60
Figura 22 - Modelo de carregamento I (MC-I). Dimensões em m.	61
Figura 23 - Modelo de carregamento II (MC-II). Dimensões em m.	61
Figura 24 - Modelo de carregamento III (MC-III). Dimensões em m.	62
Figura 25 - Modelo de carregamento IV (MC-IV). Dimensões em m.	62
Figura 26 - Modelo de carregamento V (MC-V). Dimensões em m.	62
Figura 27 - Modelo de carregamento VI (MC-VI). Dimensões em m.	63
Figura 28 - Detalhamento da carga dinâmica. Dimensões em m.	63

Figura 29 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto)	65
Figura 30 - Características geométricas do elemento BEAM44 [55].....	66
Figura 31 - Características geométricas do elemento SHELL63 [55]	67
Figura 32 - 1º modo: $f_{01} = 5,61$ Hz [55].....	72
Figura 33 - 2º modo: $f_{02} = 5,65$ Hz [55].....	73
Figura 34 - 3º modo: $f_{03} = 5,77$ Hz [55].....	74
Figura 35 - 4º modo: $f_{04} = 6,01$ Hz [55].....	75
Figura 36 - 5º modo: $f_{05} = 6,40$ Hz [55].....	76
Figura 37 - 6º modo: $f_{06} = 6,97$ Hz [55].....	77
Figura 38 - 7º modo: $f_{07} = 7,73$ Hz [55].....	78
Figura 39 - 8º modo: $f_{08} = 7,83$ Hz [55].....	79
Figura 40 - 9º modo: $f_{09} = 8,63$ Hz [55].....	80
Figura 41 - 10º modo: $f_{10} = 8,75$ Hz [55].....	81
Figura 42 - Análise harmônica do piso misto (aço-concreto)	83
Figura 43 - Carga dinâmica modelada através do AISC [36].....	86
Figura 44 - Carga dinâmica modelada através do SCI [39]	86
Figura 45 - Carga dinâmica modelada através do FAISCA [51]	86
Figura 46 - Carga dinâmica do sistema biodinâmico [52]	87
Figura 47 - Localização da carga para o MC-I	89
Figura 48 - Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-I.....	89
Figura 49 - Aceleração na seção A para o modelo AISC para MC-I.....	89
Figura 50 - Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-I	90
Figura 51 - Aceleração na seção A para o modelo SCI para MC-I	90
Figura 52 - Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-I.....	90
Figura 53 - Aceleração na seção A para o modelo Faisca para MC-I.....	90
Figura 54 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-I.....	91
Figura 55 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-I.....	91
Figura 56 - Localização da carga para o MC-II.....	92
Figura 57 - Deslocamento na seção D para o modelo AISC para MC-II.....	92
Figura 58 - Aceleração na seção D para o modelo AISC para MC-II.....	92
Figura 59 - Deslocamento na seção D para o modelo SCI para MC-II	93
Figura 60 - Aceleração na seção D para o modelo SCI para MC-II	93
Figura 61 - Deslocamento na seção D para o modelo Faisca para MC-II	93
Figura 62 - Aceleração na seção D para o modelo Faisca para MC-II	93

Figura 63 - Deslocamento na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-II.....	94
Figura 64 - Aceleração na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-II.....	94
Figura 65 - Localização da carga para o MC-III.....	95
Figura 66 - Deslocamento na seção C para o modelo AISC para MC-III.....	95
Figura 67 - Aceleração na seção C para o modelo AISC para MC-III.....	95
Figura 68 - Deslocamento na seção C para o modelo SCI para MC-III.....	96
Figura 69 - Aceleração na seção C para o modelo SCI para MC-III.....	96
Figura 70 - Deslocamento na seção C para o modelo Faisca para MC-III.....	96
Figura 71 - Aceleração na seção C para o modelo Faisca para MC-III.....	96
Figura 72 - Deslocamento na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-III.....	97
Figura 73 - Aceleração na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-III.....	97
Figura 74 - Localização da carga para o MC-IV.....	98
Figura 75 - Deslocamento na seção E para o modelo AISC para MC-IV.....	98
Figura 76 - Aceleração na seção E para o modelo AISC para MC-IV.....	98
Figura 77 - Deslocamento na seção E para o modelo SCI para MC-IV.....	99
Figura 78 - Aceleração na seção E para o modelo SCI para MC-IV.....	99
Figura 79 - Deslocamento na seção E para o modelo Faisca para MC-IV.....	99
Figura 80 - Aceleração na seção E para o modelo Faisca para MC-IV.....	99
Figura 81 - Deslocamento na seção E para o modelo Biodinâmico para MC-IV.....	100
Figura 82 - Aceleração na seção E para o modelo Biodinâmico para MC-IV.....	100
Figura 83 - Localização da carga para o MC-V.....	101
Figura 84 - Deslocamento na seção D para o modelo AISC para MC-V.....	101
Figura 85 - Aceleração na seção D para o modelo AISC para MC-V.....	101
Figura 86 - Deslocamento na seção D para o modelo SCI para MC-V.....	102
Figura 87 - Aceleração na seção D para o modelo SCI para MC-V.....	102
Figura 88 - Deslocamento na seção D para o modelo Faisca para MC-V.....	102
Figura 89 - Aceleração na seção D para o modelo Faisca para MC-V.....	102
Figura 90 - Deslocamento na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-V.....	103
Figura 91 - Aceleração na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-V.....	103
Figura 92 - Localização da carga para o MC-VI.....	104
Figura 93 - Deslocamento na seção C para o modelo AISC para MC-VI.....	104
Figura 94 - Aceleração na seção C para o modelo AISC para MC-VI.....	104
Figura 95 - Deslocamento na seção C para o modelo SCI para MC-VI.....	105
Figura 96 - Aceleração na seção C para o modelo SCI para MC-VI.....	105

Figura 97 - Deslocamento na seção C para o modelo Faisca para MC-VI	105
Figura 98 - Aceleração na seção C para o modelo Faisca para MC-VI	105
Figura 99 - Deslocamento na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-VI	106
Figura 100 - Aceleração na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-VI	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de carregamento dinâmico para atividades rítmicas	32
Tabela 2 - Limites de aceleração recomendados para atividades rítmicas	32
Tabela 3 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [37].....	34
Tabela 4 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades de comentários adversos [41]	38
Tabela 5 - Faixa dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta [40].....	41
Tabela 6 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades de comentários adversos [40]	45
Tabela 7 - Tolerância para VDV	45
Tabela 8 - Parâmetros de carregamento dinâmico para atividades rítmicas [36].....	49
Tabela 9 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para diferentes atividades [39]	51
Tabela 10 - Parâmetros analíticos para atividades humanas [51]	54
Tabela 11 - Coeficiente de defasagem em relação ao número de pessoas [51].....	54
Tabela 12 - Características do modelo de elementos finitos do piso misto.....	66
Tabela 13 - Taxas de amortecimento para o primeiro modo de pisos mistos [40]	70
Tabela 14 - Parâmetros utilizados no amortecimento de Rayleigh	70
Tabela 15 - Características modais do piso misto	71
Tabela 16 - Frequências fundamentais mínimas para prática de atividade rítmica...	82
Tabela 17 - Parâmetros utilizados para a representação tradicional da carga dinâmica	85
Tabela 18 - Características dinâmicas das 20 pessoas participantes da atividade [52]	88
Tabela 19 - Resposta dinâmica estrutural MC-I	91
Tabela 20 - Resposta dinâmica estrutural MC-II	94
Tabela 21 - Resposta dinâmica estrutural MC-III	97
Tabela 22 - Resposta dinâmica estrutural MC-IV	100
Tabela 23 - Resposta dinâmica estrutural MC-V	103

Tabela 24 - Resposta dinâmica estrutural MC-VI	106
Tabela 25 - Comparativo entre os modelos “força-dura” e biodinâmico (a_p)	107
Tabela 26 - Resumo das acelerações de pico nas seções críticas.....	110
Tabela 27 - Resumo das acelerações RMS nas seções críticas	110
Tabela 28 - Resumo dos valores de dose de vibração nas seções críticas.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
AG	Algoritmo genético
ANSYS	Swanson Analysis Systems
BS	British Standard
CEB	Comité Euro-International du Béton
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
FDN	Força dinâmica normalizada
ISO	International Organization for Standardization
MC	Modelo de carregamento
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
S1GL	Sistema de um grau de liberdade
VDV	Valor de dose de vibração

LISTA DE SÍMBOLOS

$a(t)$	aceleração
a_c	taxa de contato
a_i	aceleração do indivíduo
a_o/p	valor limite para razão entre a aceleração de pico e gravidade
a_p	aceleração de pico
a_p/g	razão entre a aceleração de pico e gravidade
$a_w(t)$	aceleração ponderada em função do tempo
$a_{w,rms}$	aceleração RMS ponderada
CD	coeficiente de defasagem
c_i	amortecimento do indivíduo
dB	decibéis
E_{cs}	módulo de elasticidade secante
E_s	módulo de elasticidade
eVDV	valor de dose de vibração estimado
$F(t)$	função do carregamento dinâmico
f_{ck}	resistência a compressão
$f_{crítica}$	frequência crítica da estrutura
f_n	frequência natural da estrutura
f_p	frequência de excitação (Hz)
f_{step}	frequência de excitação
f_y	tensão de escoamento
h	hora
H	número de termos de Fourier
Hz	Hertz
i	número do harmônico
k_i	rigidez do indivíduo
K_p	coeficiente de impacto
$m/s^{1,75}$	metro por segundo elevado a 1,75
m/s^2	metro por segundo ao quadrado
m_i	massa do indivíduo

min	minutos
mm	milímetros
N	Newton
N	Número de harmônicos
p	número de participantes da atividade rítmica
P	peso do indivíduo
Q	peso do indivíduo
s	segundo
SE	seção estrutural
T	período fundamental da atividade
t	tempo
T	período
T_c	período de contato da atividade
t_{dia}	duração da exposição por dia
t_n	duração da vibração para “n” episódios
$VDV_{b/d,\tau}$	valor de dose de vibração em função de “ w_b ” ou “ w_d ” e a amostra representativa de tempo “ τ ”
$VDV_{b/d,dia/noite}$	valor de dose de vibração em função de “ w_b ” ou “ w_d ” e o período do dia (dia ou noite)
$VDV_{d/d,t_n}$	valor de dose de vibração em função de “ w_b ” ou “ w_d ” e a duração da vibração “ t_n ”
v_i	velocidade do indivíduo
W_b	coeficiente de ponderação para acelerações verticais
W_d	coeficiente de ponderação para acelerações horizontais
x_i	deslocamento do indivíduo
ν	coeficiente de Poisson
π	pi
ξ	taxa de amortecimento modal
ω_{0i}	frequência natural circular referente ao modo i
γ_c	peso específico do concreto
ϕ_h	ângulo de fase do h-ésimo harmônico
α_h	coeficiente de Fourier do h-ésimo harmônico
ϕ_i	ângulo de fase para o i-ésimo harmônico

α_i

coeficiente dinâmico para o i -ésimo harmônico

γ_s

peso específico do aço

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.1 Análise de vibrações e avaliação do conforto humano em pisos mistos	24
2. AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES E CONFORTO HUMANO EM PISOS	31
2.1 Guia de Projeto AISC:2016 Volume 11	31
2.2 Norma Brasileira NBR 6118:2014	33
2.3 Guia de Projeto SCI: 2009	34
2.4 Norma Brasileira NBR 8800:2008	35
2.5 Norma Britânica BS 6472-1:2008.....	36
2.6 Norma ISO 10137:2007	39
2.7 Outros critérios de conforto humano	45
3. CARACTERIZAÇÃO DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS	46
3.1 Considerações iniciais	46
3.2 Caracterização das atividades humanas rítmicas	47
3.3 Modelo de carregamento proposto no Guia AISC (2016).....	48
3.4 Modelo de carregamento proposto no Guia SCI (2009)	49
3.5 Modelo de carregamento proposto por Faisca (2003)	52
3.6 Modelo biodinâmico proposto por Campista (2019)	54
4. MODELAGEM ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO DAS CARGAS DINÂMICAS	58
4.1 Considerações iniciais	58
4.2 Modelo estrutural	58
4.3 Posicionamento do carregamento dinâmico.....	60
5. MODELAGEM NUMÉRICA DO PISO MISTO (AÇO-CONCRETO)	64
5.1 Considerações iniciais	64
5.3 Elemento finito de viga tridimensional - BEAM44	66
5.4 Elemento finito de casca - SHELL63.....	67
5.5 Hipóteses simplificadoras	67
5.6 Modelagem do amortecimento estrutural	68
6. ANÁLISE ESTRUTURAL	71
6.1 Generalidades.....	71
6.2 Análise modal	71

6.3 Análise harmônica	83
6.4 Análise de vibração forçada	84
6.4.1 Cargas dinâmicas	85
6.4.2 Modelo de carregamento I	89
6.4.3 Modelo de carregamento II	92
6.4.4 Modelo de carregamento III	95
6.4.5 Modelo de carregamento IV	98
6.4.6 Modelo de carregamento V	101
6.4.7 Modelo de carregamento VI	104
6.4.8 Comparação dos resultados	107
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
7.1. Conclusões	108
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	111
REFERÊNCIAS	112

INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se a expansão de projetos de edifícios com arquiteturas arrojadas e modernas. Tendo em mente este crescimento exponencial, os engenheiros estruturais devem estar atentos às novas tendências construtivas e aos novos desafios relacionados. Dentro deste contexto, a aplicação de técnicas construtivas envolvendo pisos mistos (aço-concreto) tem crescido nos últimos anos devido à otimização com referência ao tempo de construção e a flexibilidade do uso final da estrutura.

O desenvolvimento de projetos de edificações a partir da técnica de pisos mistos leves, resulta em estruturas mais leves e esbeltas, influenciando diretamente na redução das frequências naturais e do amortecimento destes pisos, gerando preocupação quanto à resposta dinâmica quando estes são submetidos a atividades humanas rítmicas. Em referência ao uso das técnicas construtivas descritas, podem ser ilustrados os projetos do Edifício *The One*, localizado em São Paulo/SP (Figura 1) e o Shopping Estação BH, em Belo Horizonte/MG, conforme Figura 2.



Figura 1 - Edifício *The One* - São Paulo/SP [1]



Figura 2 - Shopping Estação BH - Belo Horizonte/MG [1]

Cabe ressaltar que a tendência de redução nas características dinâmicas da estrutura como frequência e amortecimento, resultam na aproximação das frequências naturais com as frequências associadas às atividades humanas, como o caminhar, saltos, ginástica aeróbica e danças, tornando as edificações mais suscetíveis a vibrações excessivas e conseqüentemente ao desconforto humano.

Com base nesse contexto, a avaliação da influência das atividades humanas nas edificações torna-se fundamental. No que concerne à análise estrutural, deve-se realizar à análise dinâmica e realizar as verificações necessárias quanto ao estado limite de serviço sob o ponto de vista do conforto humano. Para tal, as cargas provenientes da atividade humana rítmica devem ser modeladas, para posterior comparação das respostas dinâmicas com normas e critérios de projeto, afim de averiguar o conforto humano na estrutura.

Considerando o estado limite de serviço, as estruturas desenvolvidas a partir dos métodos construtivos descritos anteriormente tendem a apresentar frequências naturais no intervalo de frequência da percepção humana, entre 4 a 8 Hz [2][1], tornando-se mais suscetível ao fenômeno da ressonância e ao desconforto humano.

Desta maneira, considerando todos os aspectos descritos anteriormente, este trabalho de pesquisa visa 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. Para tal, 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

A motivação principal para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa é de apresentar a importância da consideração das atividades humanas rítmicas no projeto estrutural, ainda na sua concepção. Para tal, pretende-se fornecer orientações quanto à identificação e prevenção de vibrações excessivas, objetivando garantir o conforto das pessoas que utilizam as edificações.

Objetivos

Este estudo objetiva investigar o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) quando submetidos a atividades humanas rítmicas. No que concerne a representação das atividades humanas, funções baseadas nos modelos tradicionais de “força-dura” são utilizadas e assim como a modelagem matemática via emprego de sistemas biodinâmicos que incorporam o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura. Finalmente, a resposta estrutural dinâmica obtida é confrontada com as normas e critérios de projetos.

Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo é realizada uma revisão bibliográfica, onde são apresentados os trabalhos relacionados a pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações rítmicas, atenuação e controle de vibrações e avaliação do conforto humano.

No segundo capítulo os critérios e normas de projeto utilizados para avaliação do conforto humano são apresentados de maneira decrescente no que diz respeito ao

ano de publicação, sendo os primeiros métodos de avaliação utilizados por menos tempo quando comparado aos últimos.

No terceiro capítulo são caracterizadas inicialmente as atividades humanas rítmicas. Seguinte a isto, as formulações matemáticas utilizadas na representação da ação humana rítmica são descritas.

No quarto capítulo 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 carregamento analisados é representado.

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

O sexto capítulo 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 sétimo capítulo apresentam-se as conclusões alcançadas com este estudo, contendo as considerações e sugestões para continuação do trabalho aqui desenvolvido.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica referente ao trabalho de diversos autores no que concerne ao conforto humano de estruturas mistas (aço-concreto) quando há atividades humanas rítmicas.

1.1 Análise de vibrações e avaliação do conforto humano em pisos mistos

Bachmann [3] realizou estudos relacionados ao comportamento dinâmico de passarelas, ginásios, salas de esporte, de dança e locais de shows quando submetidos a carregamentos provenientes de atividades humanas, com o intuito de estabelecer recomendações para minimizar vibrações excessivas. Com 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.

Murray, Allen e Ungar [2] desenvolveram o guia de projeto AISC (*Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series, Volume 11*) visando apresentar limites de conforto humano em estruturas submetidas às atividades de caminhar e rítmicas. Neste guia, o foco consiste em expor cálculos analíticos e recomendações com o objetivo de avaliar e minimizar as vibrações estruturais nas situações descritas.

Hanagan e Murray [4] em seu trabalho de pesquisa, apresentaram a implementação de um sistema de controle de vibrações ativo baseado em um atenuador eletromagnético onde uma força de controle é transmitida ao sistema estrutural, para então a redução das vibrações ser analisada experimentalmente e analiticamente. Os resultados obtidos apresentaram redução na faixa de 2,5% a 40% de aumento do amortecimento estrutural.

Alves [5] analisou experimentalmente a influência da atividade humana em uma plataforma rígida. Com base em seus experimentos, obteve valores dos coeficientes de Fourier para os primeiros harmônicos da carga dinâmica, e em comparação com

os valores recomendados no CEB [6], obteve 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.

Laman [7] apresenta uma revisão de critérios de projetos, concedendo orientações e especificações de guias e normativas para minimização das vibrações em pisos, além de estudos relacionados às respostas humanas sob o ponto de vista de vibrações. Neste contexto, os critérios de aceitabilidade de vibrações nos pisos são determinados.

El-Dardiry et al. [8] 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 apontam para uma melhor aproximação entre o experimental e o numérico no modelo que considera a rigidez real das colunas.

Silva et al. [9] relataram um aumento nos problemas de vibrações indesejáveis em estruturas associados as tendências construtivas. Com objetivo de avaliar estes problemas, os autores analisaram um piso de uma edificação submetido a ação rítmica humana a partir de uma análise dinâmica com auxílio do programa ANSYS [55]. Com base nos resultados obtidos, após comparação da resposta dinâmica com valores limites propostos por autores e guias de projeto, observou-se o cumprimento dos critérios, o que determina o conforto dos ocupantes do piso analisado.

Reynolds e Pavic [10] avaliaram o impacto do uso de pisos falsos nas propriedades dinâmicas de pisos de concreto com vãos longos. Neste cenário, 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. Com base nesta análise, verificou-se o aumento de até 89% do amortecimento modal da estrutura devido a adição de pisos falsos, assim como o aumento significativo da rigidez dos pisos de concreto. Entretanto, estas mudanças nas propriedades modais não foram constantes em todos os modos avaliados, não sendo possível prever para quais modos a instalação dos pisos falsos se tornaria benéfica. Além disto, verificou-se na existência de pisos falsos, a redução na resposta de vibração dos pisos de concreto quando submetido a atividade de caminhar.

Moreira [11] analisou a influência da variação de vãos e rigidez de vigas, a partir da modelagem numérica de painéis típicos com o auxílio do programa ANSYS. Baseado nos resultados obtidos, o autor realizou uma comparação com as normas e recomendações internacionais.

Hanagan [12] analisou 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. No mesmo contexto, a autora observou a resistência de proprietários de construções e projetistas quanto a inserção de recomendações relativas à avaliação de vibrações. Devido a esta resistência, o custo de reparo se torna maior do que se fosse implementado em fase de projeto.

Ebrahimpour e Sack [13] realizaram um levantamento histórico dos modelos representativos da ação dinâmica humana, dos critérios de percepção humana e das técnicas de atenuação das vibrações. Em complemento, foram explanadas duas técnicas de controle de vibração utilizando materiais compósitos e visco elásticos.

Loose [14] avaliou a resposta dinâmica dos pisos mistos quando submetidos a atividades humanas rítmicas, como ginástica aeróbica e saltos a vontade. Com base nisso, a resposta dinâmica em termos de aceleração de pico foi comparada com as recomendações internacionais relacionadas a diferentes ocupações da estrutura.

Melo et al. [15] discorre 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 contexto, são aplicados quatro modelos representativos do caminhar humano. Com base nos resultados obtidos, as respostas dinâmicas sob o ponto de vista das acelerações de pico foram comparadas com as recomendações das normas e guias de projeto.

Silva et al. [16] 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 [17] em contraste com a maioria dos autores, avaliaram estruturas rígidas com frequências superiores a 10 Hz e relataram respostas dinâmicas significativas confrontando os relatos de desconforto humano de outros autores para frequências abaixo de 8 Hz. Esta descoberta demonstra a influência dos mais altos harmônicos do caminhar humano, afirmando a importância de não subestimar a resposta de frequências naturais de até 20 Hz sob o ponto de vista do conforto humano. Além disso, os autores observam a necessidade da consideração de outros harmônicos além dos comumente propostos na avaliação do caminhar.

De Silva e Thambiratnam [18][19] analisaram as características de vibrações de um piso misto composto por múltiplos painéis, sob a influência de atividades rítmicas e consideração do amortecimento estrutural. Com base nos resultados, 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. [20] apresenta limites de aceleração vertical para pisos submetidos ao caminhar humano e a saltos, baseado em testes experimentais desenvolvidos com 20 coreanos. Para isto, 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, trazendo este fato como associação ao tipo de uso da estrutura e estilo de vida dos indivíduos.

Loose et al. [21] investigaram um piso misto (aço-concreto) e compararam as respostas dinâmicas com as recomendações relacionadas ao conforto humano. Com base na análise e comparação, os resultados mostram uma violação dos limites recomendados para a maioria dos casos de atividade humana consideradas, expondo o desconforto humano do sistema estrutural quando submetido a estes carregamentos.

Zhen et al. [22] analisaram a importância da imperfeição da continuidade entre painéis de um piso misto através de uma análise experimental em laboratório e a comparação com o modelo numérico. Para isto, 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 medidos experimentalmente.

Setareh [23] examinou medições experimentais de um escritório com estrutura em balanço com disposição a vibrações excessivas, obtendo as respostas dinâmicas das frequências naturais e modos de vibração. A partir disto, os resultados foram comparados com os obtidos do modelo numérico computacional, identificando uma defasagem do segundo e terceiro modo de vibração. Enfim, o autor considera esta descoberta devido ao fato de existirem número insuficientes de pontos de medições e limitações dos testes devido ao grande porte da estrutura.

Cretu et al. [24] demonstraram 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. Com base nos resultados obtidos, as respostas foram comparadas e foi constatada a proximidade entre as respostas reais e analíticas.

Varela e Batista [25] avaliaram experimentalmente um protótipo em escala 1:1, desenvolvido em laboratório, quando submetido a atividades humanas rítmicas, em especial o caminhar aleatório. De maneira a atenuar 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 [26] apresentam o aumento da ocorrência de violação dos níveis de vibração recomendados gerados por ações rítmicas humanas em estruturas. Com o objetivo 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. Ademais, o trabalho investiga aspectos ambientais e econômicos da incorporação do mesmo na estrutura.

Lee et al. [27] avaliaram uma vibração atípica nos andares superiores de um edifício localizado na Coreia. Para isto foram simuladas atividades rítmicas no 12º andar experimentalmente e analiticamente, com objetivo de comprar 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. [28] analisaram o comportamento de estruturas mistas cujas dimensões variavam entre 4 e 10 m, a partir da utilização de dois modelos representativos da carga proveniente da atividade humana rítmica. Com base nisto, as respostas dinâmicas em termos de acelerações de pico se mostraram inaceitáveis. Em contrapartida, os deslocamentos se apresentaram aceitáveis quando também foram comparados às normas e critérios de projetos.

Silva, Andrade e Lopes [29] investigaram o comportamento de um piso misto (aço-concreto) de 1600 m² de um edifício comercial. Com base 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. Além disso, quando considerada a interação aço-concreto e a diminuição da rigidez das conexões, verificou-se uma redução nas frequências naturais do piso. Portanto, esta investigação demonstrou que as atividades humanas rítmicas podem induzir o piso misto a níveis inaceitáveis de vibrações, levando a violação dos critérios de conforto humano.

Gaspar e Silva [30] analisaram a resposta dinâmica de um piso misto de 10 x 10 m quando submetido a atividades humanas rítmicas. Neste contexto foram avaliadas as respostas dinâmicas em termos de aceleração de pico, aceleração RMS e VDV, obtendo resultados de vibração excessiva que excedem os limites normativos. Além disto, os autores afirmam que o uso da representação da carga dinâmica a partir da função matemática desenvolvida por Faisca representa em uma economia para o projeto quando comparado as outras representações do carregamento dinâmico.

Shahabpoor et al. [31] avaliaram a influência das propriedades dinâmicas na interação humano-estrutura com base em testes experimentais com vários participantes caminhando de maneira aleatória sobre a estrutura em análise. Contrário 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. Com base no estudo realizado, os autores concluíram que tanto as características

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

Martínez et al. [32] relataram três modelos de carregamento representativo para saltos. Além disso, investigaram a resposta dinâmica estrutural de uma academia a partir da análise experimental da estrutura real e da numérica, desenvolvida a partir do método dos elementos finitos, onde foi identificada a presença das frequências naturais da estrutura no intervalo de excitação da atividade rítmica.

Gaspar et al. [33] afirmam que a consideração das características dinâmicas dos participantes pode levar 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 performa atividades rítmicas de saltos e da rigidez e amortecimento do indivíduo a partir da resolução de um problema de otimização.

Campista e Silva [34] investigaram a resposta dinâmica de um piso misto (aço-concreto) quando submetido a atividade rítmica aeróbica a partir da representação da carga de maneira tradicional, chamada de força-dura e posteriormente, a partir da inclusão de 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. [35] 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. Baseado nos testes, o modelo numérico desenvolvido a partir do método dos elementos finitos foi calibrado e então, as respostas dinâmicas associadas a atividade rítmica aeróbica foram obtidas a partir da aplicação de quatro modelos de representação da carga humana dinâmica. 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. AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES E CONFORTO HUMANO EM PISOS

Este capítulo objetiva expor as normas de projeto e limites quando o assunto consiste na avaliação de vibrações em estruturas do ponto de vista do conforto humano. As normas de projeto são descritas em ordem cronológica decrescente.

2.1 Guia de Projeto AISC:2016 Volume 11

Este guia possui o objetivo de apresentar os princípios básicos e as ferramentas analíticas para avaliação dos sistemas estruturais de aço submetidos a vibrações provenientes de atividades humanas. Além disso, visa guiar o uso do método dos elementos finitos e medidas de reparo em sistemas de pisos [36].

A avaliação da resposta dinâmica definida a partir do guia inicia com a previsão dos modos de vibração e suas respectivas frequências naturais, amortecimento e massa modal. Para isto, a frequência fundamental determina a resposta dinâmica devido às atividades humanas. Se esta frequência é baixa o suficiente para 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).

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

Onde:

- N: número de harmônicos considerados relevantes (para atividades rítmicas aeróbicas são considerados 3 harmônicos);
- Q: peso do indivíduo (N);
- f_{step} : frequência de excitação (Hz);
- i: número do harmônico;
- t: tempo (s);
- α_i : coeficiente dinâmico para o i-ésimo harmônico;
- ϕ_i : ângulo de fase para o i-ésimo harmônico.

O parâmetro mais importante a ser considerado na prevenção de problemas de vibrações estruturais devido a atividades humanas rítmicas é a 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. A Tabela 1 apresenta os valores de frequência de excitação (f_{step}), coeficientes dinâmicos (α_i) e os ângulos de fase (ϕ_i) relacionados a diferentes tipos de atividades.

Tabela 1 - Parâmetros de carregamento dinâmico para atividades rítmicas

Atividade	Frequência de excitação (f_{step}) - Hz	Coefficiente dinâmico (α_i)	Ângulo de fase (ϕ_i) - rad
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	-

O critério de avaliação recomendado por este guia é baseado relação entre aceleração de pico e da gravidade (a_p/g). Esta relação é determinada por uma inequação, onde o valor obtido deve ser menor que o valor limite (a_o/p), sendo os limites recomendados vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de aceleração recomendados para atividades rítmicas

Local afetado	Aceleração limite	
	(% gravidade)	m/s ² (g = 9,81m/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

A Tabela 2 determina os limites recomendados de aceleração e é proveniente de *2010 National Building Code of Canada*. O termo local afetado faz referência ao local onde a atividade rítmica é realizada e a locais adjacentes.

2.2 Norma Brasileira NBR 6118:2014

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

Em relação a vibrações de pisos, a norma estabelece limites quanto a aceitabilidade sensorial no item 13.3, através da tabela 13.3 [37]. Este limite é caracterizado por 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. Tendo como objetivo prevenir estas vibrações em situações especiais de utilização, a limitação da flecha deve ser realizada conforme estabelecido no item 13.3 [37].

No caso de estruturas usuais, a verificação das vibrações pode ser realizada em regime linear conforme item 23.3. Para garantir o comportamento satisfatório das estruturas submetidas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura (f_n) da frequência crítica ($f_{crítica}$). A relação entre a frequência natural (f_n) e a crítica ($f_{crítica}$) da estrutura é determinada segundo a equação (2).

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

Esta equação (2) é verificada de maneira a afastar a frequência natural da estrutura da frequência crítica, tendo como finalidade evitar o fenômeno da ressonância entre a estrutura e a ação dinâmica atuante sobre a mesma, e, portanto, o desconforto dos usuários. Na ausência de valores determinados experimentalmente, os valores indicados na Tabela 3 podem ser adotados para $f_{crítica}$.

Em casos especiais, 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.

Tabela 3 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [37]

Caso	$f_{\text{crítica}}$ (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

Esta norma brasileira é baseada apenas no critério de frequência fundamental mínima da estrutura, entretanto, é afirmado por Varela [38]: “Um método baseado 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

A partir de uma publicação do Steel Construction Institute (SCI), a P354, consolida-se este guia que orienta o desenvolvimento de projetos de pisos submetidos a vibrações.

No contexto deste guia de projeto [39], 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 [40] e pela norma britânica BS 6472-1 [41], 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 [42] e ISO 2631-1 [43].

Em situações onde 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 [40] e BS 6472 [44]. 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 [36].

2.4 Norma Brasileira NBR 8800:2008

Esta norma estabelece os requisitos básicos que devem ser considerados nos projetos de estruturas de aço e mistas (aço-concreto) de edificações. Quanto a verificação do estado limite de serviço (ELS) referente as vibrações de pisos, o item 11.4.1 [45] 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 forma a evitar o aparecimento de vibrações transientes inaceitáveis, devido ao caminhar humano ou outras fontes, conforme o seu anexo L.

O item seguinte, 11.4.2 [45], considera 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 perspectiva do conforto humano e o bom funcionamento de equipamentos, o anexo L [45] determina 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.

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 [45].

Logo, a avaliação 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.

Estes critérios são apresentados em função do tipo de atividade exercida, conforme item L.3 do anexo L [45]. 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. Já em pisos onde existe 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 normativo visa guiar o conforto humano quando em edifícios submetidos a vibrações na faixa de frequência de 0,5 Hz a 80 Hz [41]. Esta norma considera a percepção das vibrações dependente de vários fatores, como a frequência de vibração e a sua direção. Com base nisto, a norma expõe que as acelerações devem ser filtradas de acordo com os coeficientes de ponderação W_b (para acelerações verticais) e W_d (para acelerações horizontais), cujo desenvolvimento matemático é descrito na norma BS 6841 [42]. 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.

De acordo com esta norma [41], a percepção da vibração contínua varia muito entre os indivíduos. Aproximadamente metade da população, quando em pé ou sentada, consegue perceber uma aceleração de pico na direção vertical de $0,015\text{m/s}^2$. Outro um quarto da população consegue perceber a aceleração de pico a partir de $0,01\text{ m/s}^2$ e o restante apenas consegue perceber a partir do valor de $0,02\text{m/s}^2$. Estes

valores podem se apresentar ligeiramente maiores em situações com período de vibração menor que 1s.

O método de avaliação do efeito da vibração nas pessoas é feito 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 define 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 [41], conforme equação (3) a seguir.

$$VDV_{b/d,dia/noite} = \left(\int_0^T a^4 t dt \right)^{0,25} \quad (3)$$

Onde:

- $VDV_{b/d,dia/noite}$: valor de dose de vibração ($m/s^{1,75}$);
- $a(t)$: aceleração ponderada a partir dos coeficientes W_b e W_d , conforme apropriado (m/s^2);
- T : período total de tempo (s) do dia ou da noite, onde a vibração pode ocorrer.

Porém quando a vibração é constante e regularmente repetida, apenas uma amostra representativa de τ segundos necessita ser medida. Se o valor de dose de vibração for $VDV_{b/d,\tau}$, então o valor total de dose de vibração para o dia é dado pela equação (4).

$$VDV_{b/d,dia} = \left(\frac{t_{dia}}{t_{\tau}} \right)^{0,25} \times VDV_{b/d,\tau} \quad (4)$$

Onde t_{dia} 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_n) existir, cada um com seu respectivo valor de dose de vibração de $VDV_{d/d,t_n}$, então, o valor de dose de viração para dia ou noite é dado pela equação (5)

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

No caso de vibrações contínuas, de 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.

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

Em relação a vibrações em pisos, 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. Em alternativa, 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 [41] apresenta os valores vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades de comentários adversos [41]

Local e tempo	Baixa probabilidade de comentários adversos ¹ (m/s ^{1,75})	Possíveis comentários adversos (m/s ^{1,75})	Prováveis comentários adversos ² (m/s ^{1,75})
Edifícios residenciais 16 horas diurnas	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais 8 horas noturnas	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8
¹ Comentários não são esperados abaixo desta faixa. ² Comentários são muito prováveis acima desta faixa.			

No caso de escritórios e oficinas, os fatores de multiplicação de 2 e 4, devem respectivamente, ser aplicados nos valores da Tabela 4 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 pessoais 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.

Cabe ressaltar que mesmo esta norma não sendo mais usual ainda apresenta informações importantíssimas para o entendimento dos critérios de conforto humano. Atualmente, utiliza-se o Eurocode 0 [46] que dispõe de recomendações quanto às frequências naturais e faz referência às normas ISO 10137 [40] e a ISO 2631 [43] para maiores desenvolvimentos quanto às avaliações e percepção das vibrações.

2.6 Norma ISO 10137:2007

Esta norma da International Organization for Standardization apresenta recomendações quanto a avaliação de vibrações em edifícios e passarelas. Os critérios e limites de vibrações relativos à aceitabilidade sensorial humana são encontrados no anexo C. Diferente da norma descrita na seção anterior, a ISO 10137 [40] estabelece o critério de avaliação usual como a aceleração *rms*.

Assim como a norma britânica BS 6274-1 [41] afirma que a percepção da vibração depende de fatores como a frequência e direção da vibração, a norma ISO mantém esta afirmação. As acelerações na direção vertical estão na faixa de 4 a 8 Hz e são as mais perceptíveis aos humanos.

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 [43].

$$a_w(t) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (7)$$

Onde,

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

O valor limite da aceleração ponderada é determinado 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 3.

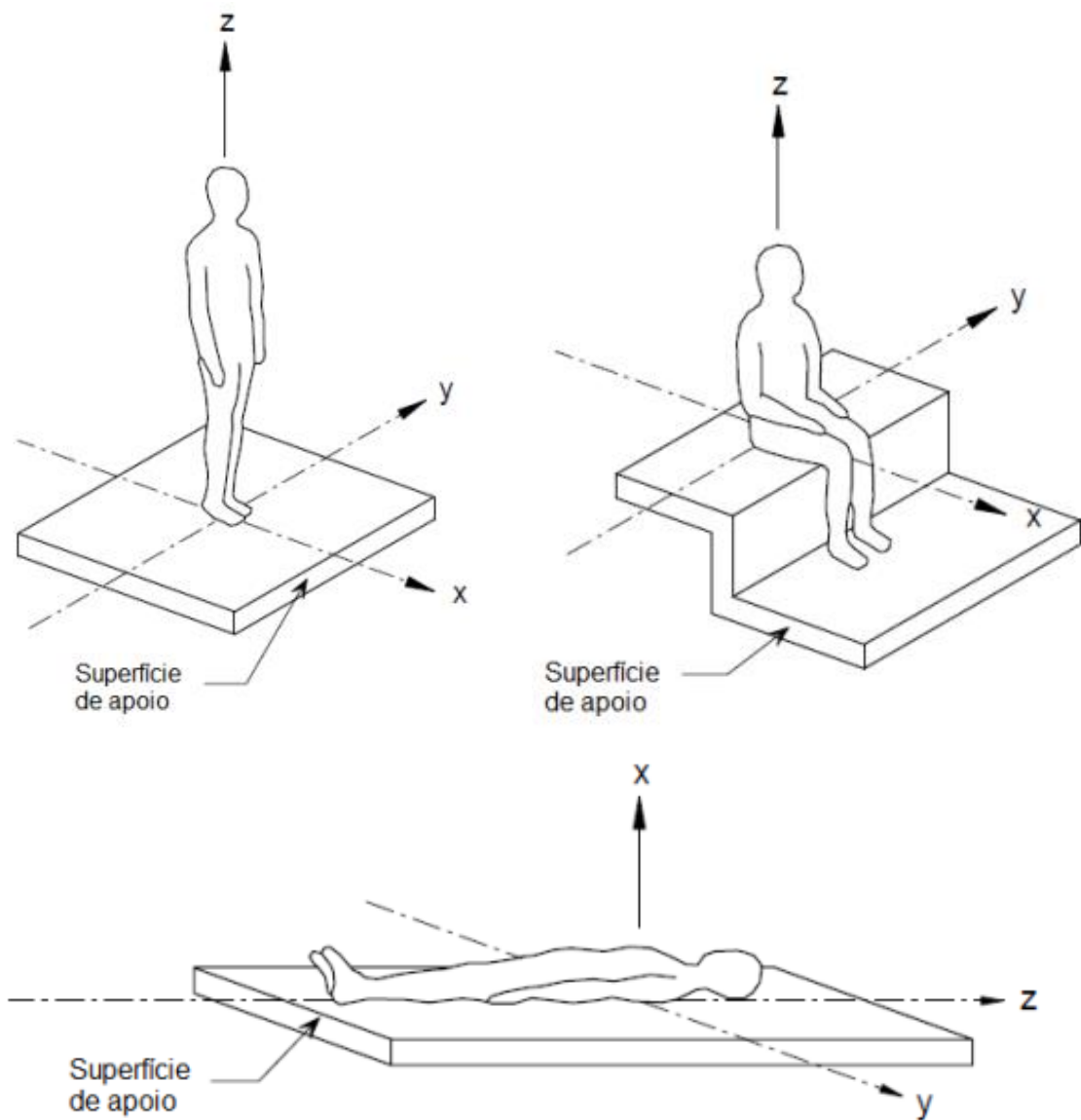


Figura 3 - Direção das vibrações conforme ISO 2631-1 [43]

Tabela 5 - Faixa dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta [40]

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

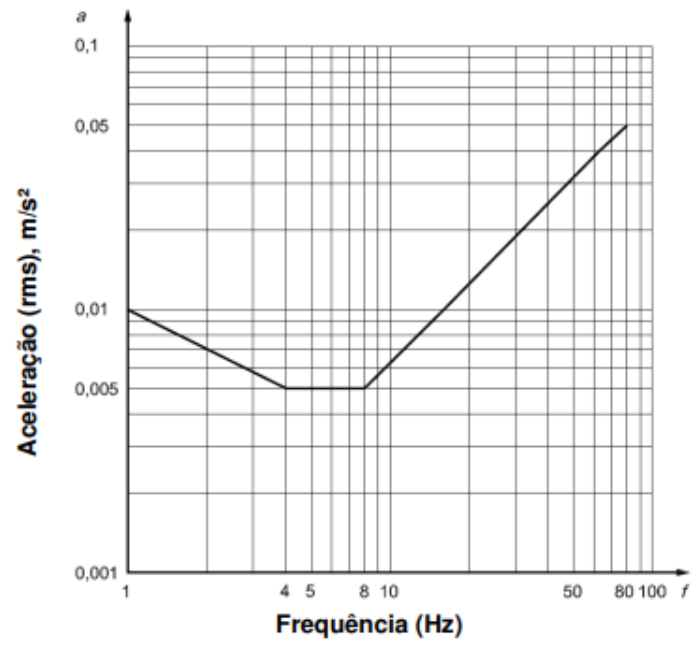


Figura 4 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixo z) [40]

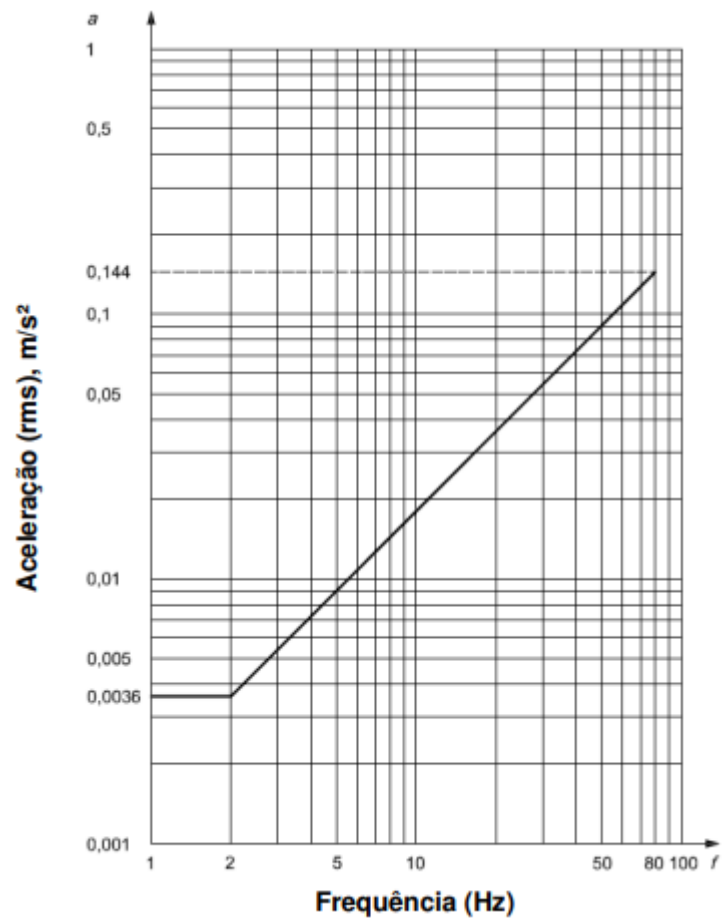


Figura 5 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixos x, y) [40]

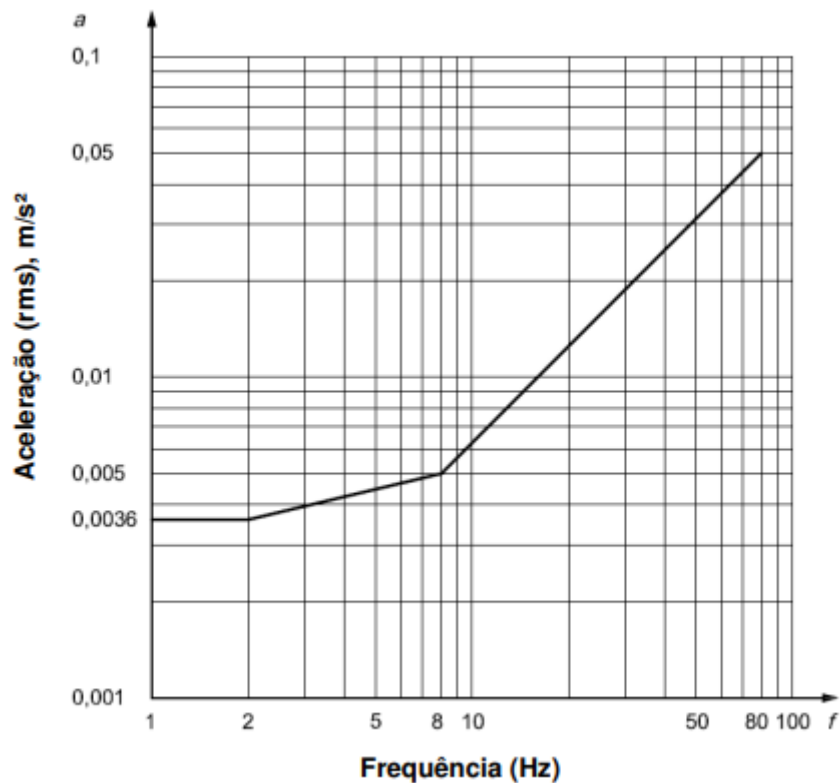


Figura 6 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada (eixos x, y e z) [40]

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 [43], conforme visto na equação (8). Os valores limites para aceitabilidade sensorial em valor de dose de vibração são vistos na Tabela 6.

$$VDV = \left(\int_0^T (a_w(t))^4 dt \right)^{1/4} \quad (8)$$

Onde:

- $a_w(t)$: 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 [40] recomenda a avaliação proposta por Murray et al. [47] e Wyatt [48].

Tabela 6 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades de comentários adversos [40]

Local e tempo	Baixa probabilidade de comentários adversos ¹ (m/s ^{1,75})	Possíveis comentários adversos (m/s ^{1,75})	Prováveis comentários adversos ² (m/s ^{1,75})
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

2.7 Outros critérios de conforto humano

Em seu trabalho de pesquisa, Setareh [49] analisou 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 nisso, o autor propõe limites relacionados ao conforto humano. Ellis e Littler [50] 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 usuários	VDV (m/s ^{1,75}) Setareh [49]	VDV (m/s ^{1,75}) Ellis e Littler [50]
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

Quando analisadas objetivando projetos estruturais, as ações humanas sobre pisos são tratadas de maneira geral, como cargas estáticas. Esta avaliação 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.

No entanto, a representação da vibração proveniente de atividades humanas é uma tarefa mais complexa quando comparado a apenas considerar como uma carga estática devido ao fato de as características de cada indivíduo praticante da atividade influenciar diretamente na resposta dinâmica. Além disto, o tipo de atividade performada também tem influência direta na resposta, por exemplo, 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, por exemplo, ser: caminhar, saltos, corridas, danças e atividades aeróbicas.

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 de representação da carga, conhecida como “força-dura”, 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 explicar quatro diferentes métodos de representação e modelagem do carregamento humano rítmico, presentes nos guias AISC [36] e SCI [39] e nos trabalhos de Faisca [51] e Campista [52], 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 característica de alternância entre o contato dos pés do indivíduo e a perda do mesmo com a estrutura. Logo, por um período de tempo, o indivíduo encontra-se no ar e em outro instante, está em contato com a estrutura. A Figura 7 mostra os movimentos do corpo humano durante um salto.

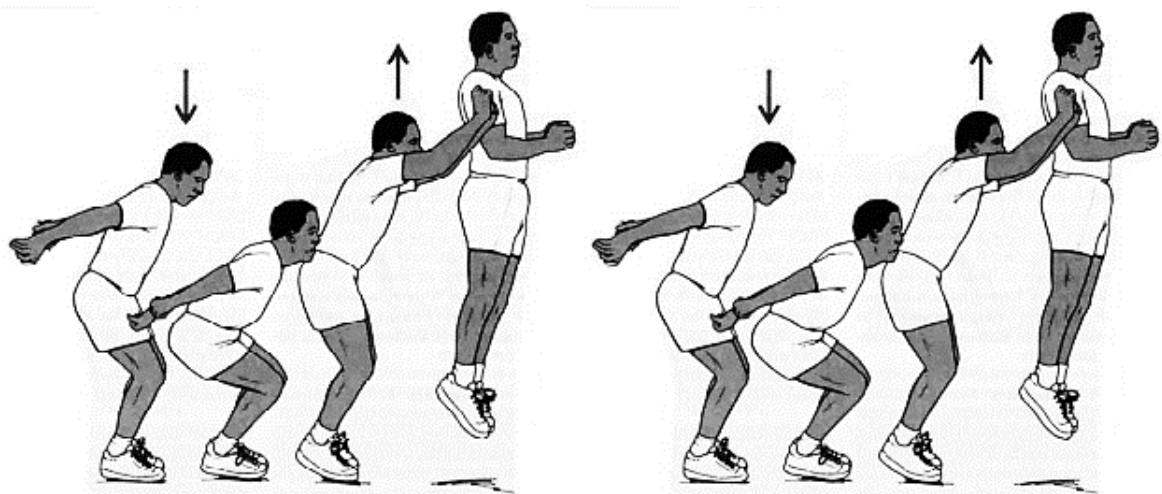


Figura 7 - Movimentos do corpo durante um salto [51]

A partir do entendimento da atividade de um salto, é possível ilustrar o comportamento graficamente em termos de força e aceleração durante a prática da atividade, conforme Figura 8 e Figura 9.

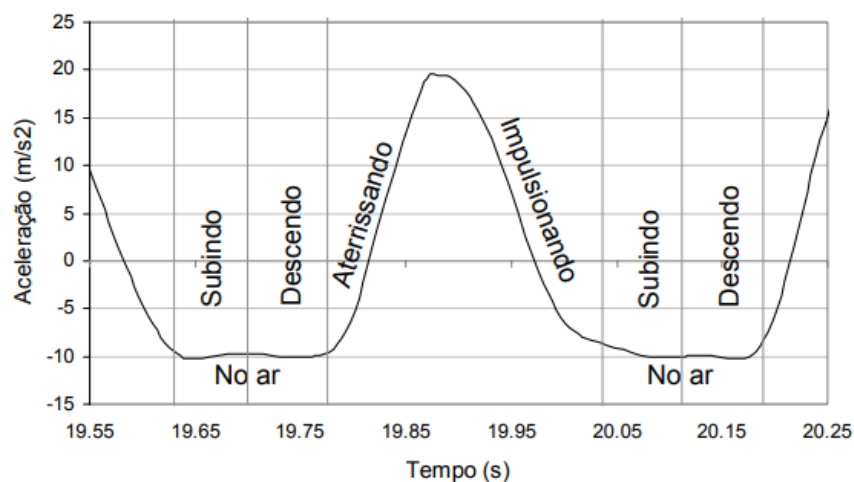


Figura 8 - Aceleração no domínio do tempo durante o salto [51]

Durante o momento em que está no ar, o indivíduo está submetido a uma aceleração de aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$ e assim que toca a estrutura totalmente, atinge uma velocidade de aproximadamente 19 m/s^2 , conforme estudo de Faisca [51], visto na Figura 8. Já o comportamento da força aplicada sobre a estrutura onde o indivíduo realiza o salto pode ser visto na Figura 9.

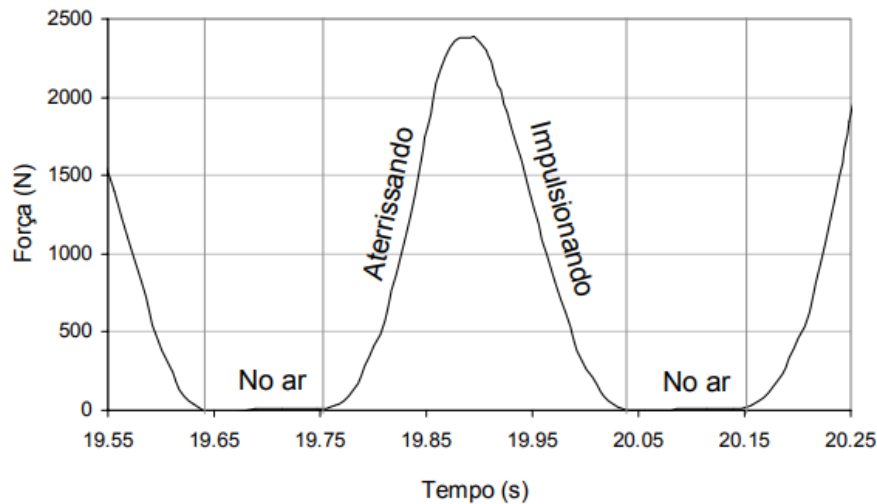


Figura 9 - Força no domínio do tempo durante um salto [51]

3.3 Modelo de carregamento proposto no Guia AISC (2016)

O modelo de carregamento do guia de projeto AISC para atividades rítmicas é representado por uma série de Fourier e leva em consideração três harmônicos associados à frequência de excitação produzida pela ação das pessoas, assim como um coeficiente dinâmico para cada harmônico [36].

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).

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

Onde:

- $F(t)$: função do carregamento dinâmico (N);
- N : número de harmônicos;
- Q : peso do indivíduo (N);
- f_{step} : frequência de excitação (Hz);
- i : número do harmônico;
- t : tempo (s);
- α_i : coeficiente dinâmico para o i -ésimo harmônico;
- ϕ_i : ângulo de fase para o i -ésimo harmônico.

O parâmetro mais importante 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 realizadas são de extrema importância, tendo sido definido previamente [36]. A Tabela 8 apresenta os valores de frequência de excitação (f_{step}), coeficientes dinâmicos (α_i) e ângulos de fase (ϕ_i) relacionados a diferentes tipos de atividades.

Tabela 8 - Parâmetros de carregamento dinâmico para atividades rítmicas [36]

Atividade	Frequência de excitação (f_{step}) - Hz	Coefficiente dinâmico (α_i)	Ângulo de fase (ϕ_i) - rad
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	-

3.4 Modelo de carregamento proposto no Guia SCI (2009)

O modelo de carregamento proposto neste guia considera um esforço de multidão sobre o piso quando submetido a atividades sincronizadas, como o caso de dança e atividades aeróbicas. Ellis e Ji [53] recomendam avaliar e considerar as

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 [39].

O carregamento em função do tempo é representado por uma função semi-seno, 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 (α_c), 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 10 mostra o comportamento da função, conforme o guia SCI [39].

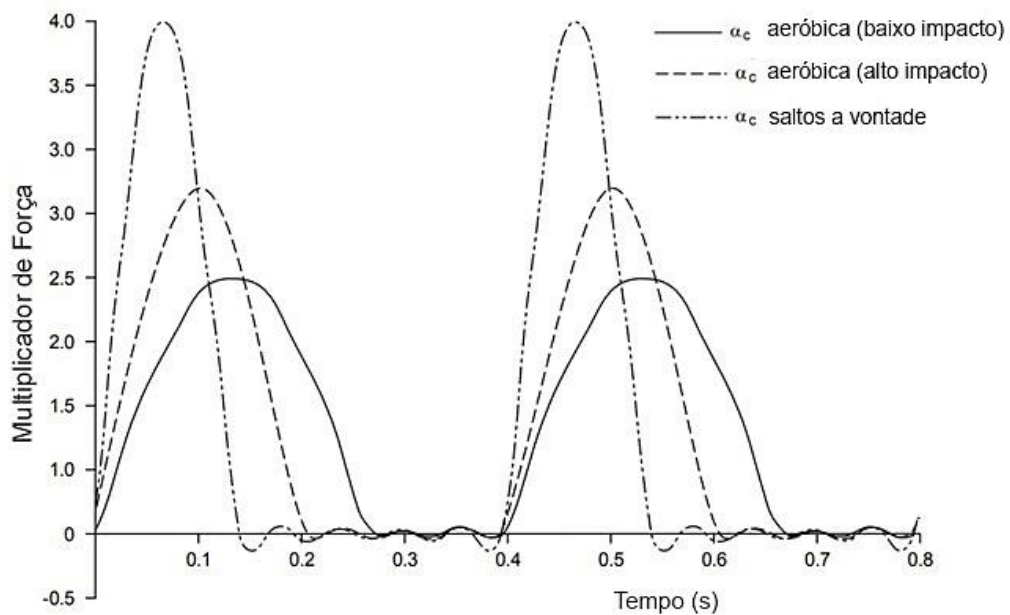


Figura 10 - Comportamento da carga em função do tempo para diferentes atividades [39]

Quanto 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.

$$F(t) = Q \left\{ 1 + \sum_{h=1}^h \alpha_h \text{sen} [2h\pi f_p t + \phi_h] \right\} \quad (10)$$

Onde:

- $F(t)$: função do carregamento dinâmico (N);
- Q : peso do indivíduo (N);
- h : número de termos de Fourier;
- α_h : coeficiente de Fourier do h -ésimo harmônico;
- f_p : frequência de excitação (Hz);
- ϕ_h : ângulo de fase do h -ésimo harmônico.

Tabela 9 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para diferentes atividades [39]

Atividade	Taxa de contato (a_c)		Harmônicos		
			1º	2º	3º
Aeróbica de baixo impacto	2/3	α_h	9/7	9/55	2/15
		ϕ_h	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$
Aeróbica de alto impacto	1/2	α_h	$\pi/2$	2/3	0
		ϕ_h	0	$-\pi/2$	0
Saltos a vontade	1/3	α_h	9/5	9/7	2/3
		ϕ_h	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

Para análises no estado limite último, apenas os três primeiros harmônicos necessitam serem considerados. Além disso, os coeficientes de Fourier (α_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 [39]. Logo, 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.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 1,61 \cdot p^{-0,082} \\ \alpha_2 &= 0,94 \cdot p^{-0,24} \\ \alpha_3 &= 0,44 \cdot p^{-0,31} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Onde p representa o número de participantes na atividade rítmica, variando entre 2 e 64 participantes. A Figura 11 representa esta tendência de redução do coeficiente de Fourier com o aumento de praticantes da atividade.

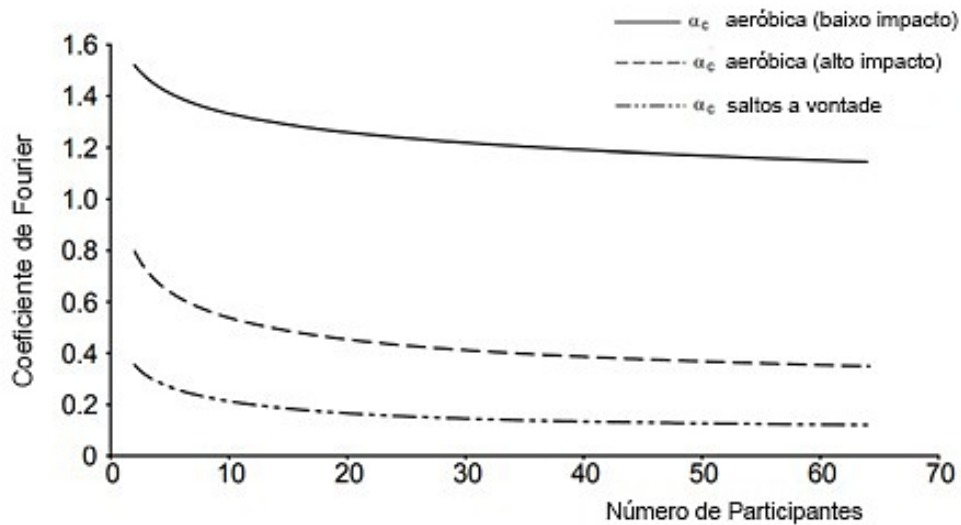


Figura 11 - Redução do coeficiente de Fourier em relação ao número de participantes [39]

3.5 Modelo de carregamento proposto por Faisca (2003)

O modelo desenvolvido por Faisca [51] foi formulado com base em testes experimentais, sendo desenvolvido uma função de carregamento baseado na 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, conforme Figura 12, onde FDN significa força dinâmica normalizada, que é a relação entre a força dinâmica e a força estática.

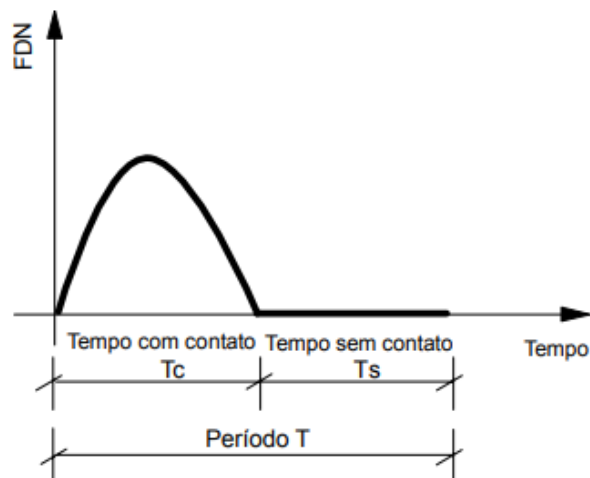


Figura 12 - Função representativa de uma atividade com perda de contato [51]

No entanto, no desenvolvimento de sua pesquisa, Faisca identificou uma melhor representação por uma função Hanning do sinal medido experimentalmente [51]. 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_p : coeficiente de impacto;
- P : peso do indivíduo (N);
- T : período fundamental da atividade (s);
- T_c : período de contato da atividade (s);
- T : tempo (s).

No contexto dos parâmetros apresentados na função, o coeficiente de defasagem (CD) leva em consideração 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 13.

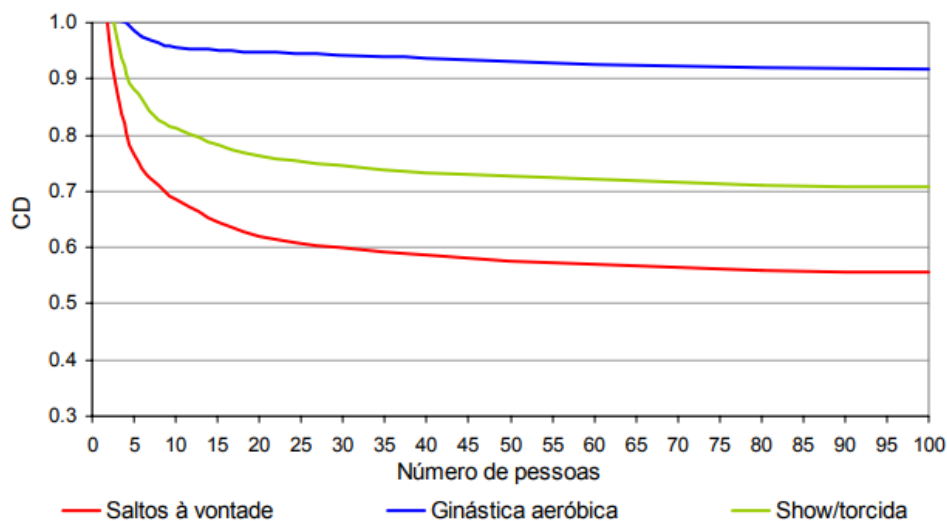


Figura 13 - Coeficiente de defasagem para atividades humanas [51]

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_c) e coeficiente de impacto (K_p). Para atividades aeróbicas, o coeficiente de defasagem foi desenvolvido conforme Figura 13, seus valores podem ser obtidos na Tabela 11 relacionado ao número de praticantes.

Tabela 10 - Parâmetros analíticos para atividades humanas [51]

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

Tabela 11 - Coeficiente de defasagem em relação ao número de pessoas [51]

Número de pessoas	CD analítico
1	$0,99 \pm 0,22$
2	$0,95 \pm 0,16$
6	$0,91 \pm 0,12$
8	$0,90 \pm 0,10$
10	$0,91 \pm 0,09$
16	$0,91 \pm 0,06$
20	$0,90 \pm 0,04$

3.6 Modelo biodinâmico proposto por Campista (2019)

O modelo desenvolvido por Campista [52] 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.

Assim, obtêm-se os valores de força, aceleração, velocidade e deslocamento a partir das campanhas de testes experimentais desenvolvidos por Campista [52]. Por outro lado, as características dinâmicas do modelo biodinâmico, ou seja, rigidez (k_i) e amortecimento (c_i) do indivíduo foram determinadas a partir da resolução de um problema clássico de otimização, com base no uso do algoritmo genético (AG) via

MATLAB [52]. Em relação a massa do indivíduo (m_i), considerou-se a massa determinada através da pesagem durante os testes experimentais. Observam-se os parâmetros obtidos a partir da série de testes e desenvolvidos a partir da solução do problema de otimização, conforme Figura 14.

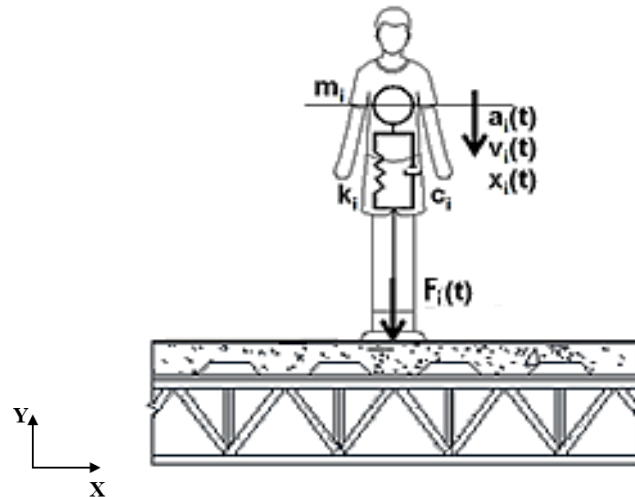


Figura 14 - Representação da modelagem do sistema biodinâmico [54]

No que concerne a aplicação 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).

$$F_i(t) = k_i x_i(t) + c_i v_i(t) + m_i a_i(t) \quad (13)$$

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \quad (14)$$

$$c_i = 4\pi m_i \xi f_i \quad (15)$$

Onde:

- k_i : rigidez do indivíduo i (N/m);
- c_i : amortecimento do indivíduo i (Ns/m);
- m_i : massa do indivíduo i (kg);
- x_i : deslocamento do indivíduo (m);
- v_i : velocidade do indivíduo (m/s);
- a_i : aceleração do indivíduo (m/s²);
- f_i : força do indivíduo;
- ξ : taxa de amortecimento modal.

Em contraste 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 das pessoas o que inclui a interação humano-estrutura à análise. A Figura 15 demonstra a diferença entre os modelos.

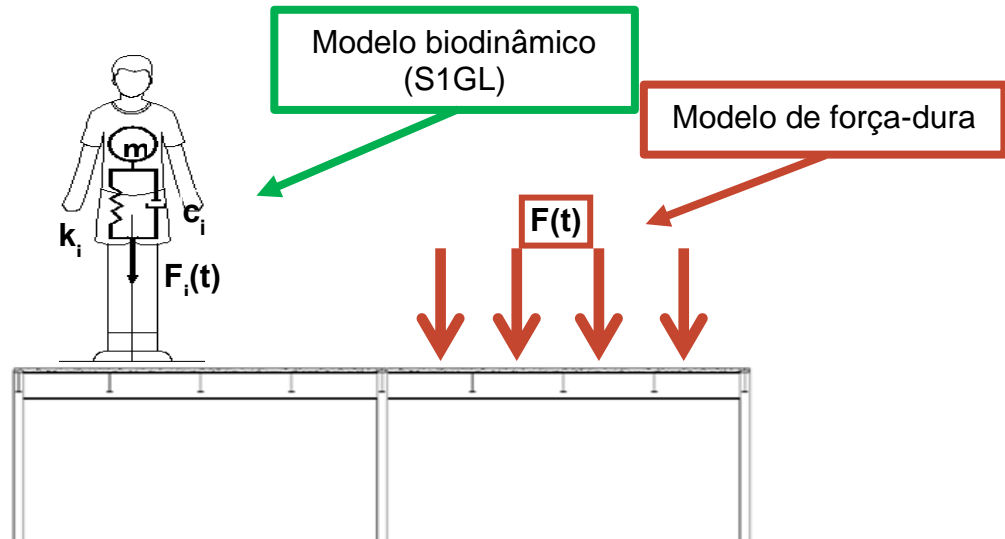


Figura 15 - Comparativo entre o modelo biodinâmico e o modelo de força-dura

O modelo biodinâmico proposto [52] foi validado a partir da comparação entre o resultado obtido experimentalmente e o resultado calculado numericamente. Inicialmente 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.

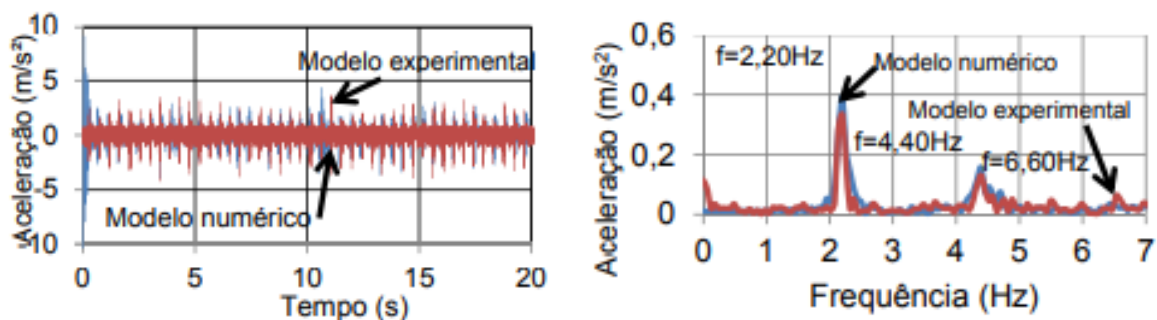


Figura 16 - Validação do modelo biodinâmico proposto [52]

O fluxograma a seguir apresenta a metodologia de obtenção do modelo biodinâmico proposto, onde foi desenvolvida uma campanha de ensaios experimentais para a frequência de excitação de 2,20 Hz, obtendo via ensaios e calculando via otimização por algoritmos genéticos as características dinâmicas relacionados a 100 pessoas.

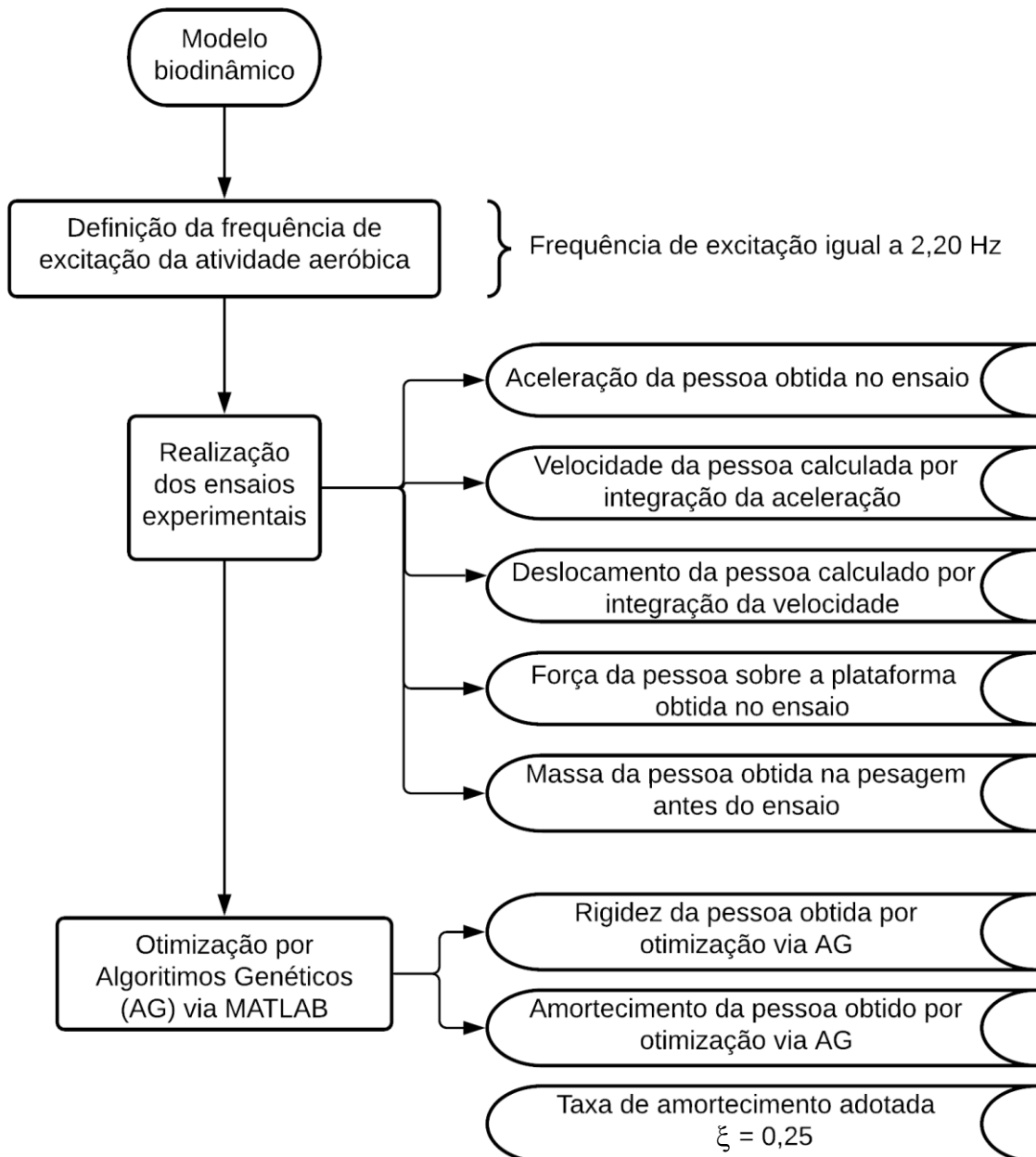


Figura 17 - Fluxograma referente ao processo do modelo biodinâmico [52]

4. MODELAGEM ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO DAS CARGAS DINÂMICAS

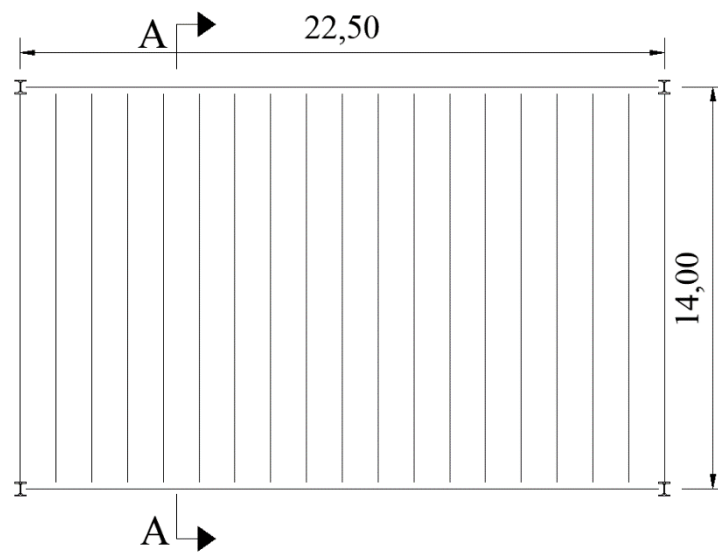
4.1 Considerações iniciais

No presente capítulo, são descritas as características do projeto estrutural do piso misto investigado, cujo propósito de uso consiste em uma área destinada para atividades humana rítmicas. Também são apresentados o posicionamento das cargas dinâmicas na estrutura e as seções investigadas para obtenção das respostas.

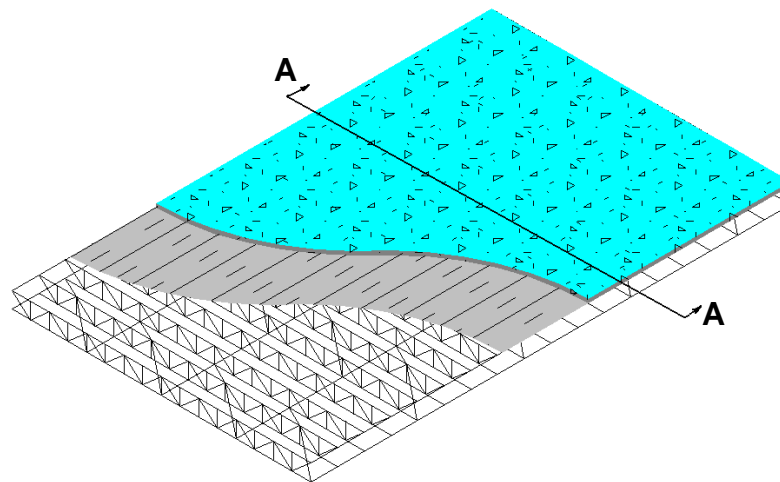
4.2 Modelo estrutural

O sistema estrutural investigado consiste em um piso misto, composto por vigas treliçadas (*joists*) e uma laje de concreto armado. O piso possui dimensões de 14 x 22,5 m, totalizando uma área de 315m², conforme visto na Figura 18. As treliças são formadas por perfis laminados de aço do tipo L, sendo os banzos superiores (L50,8x3,18) e inferiores (L38,1x3,18) compostos por cantoneiras duplas, e os montantes e as diagonais (L12,7x3,18) compostos por cantoneiras únicas, com o momento de inércia total igual a $1,10 \times 10^6 \text{ mm}^4$ (Figura 19). O aço utilizado é do tipo ASTM A572. A laje de concreto armado possui espessura de 6,5 cm.

Em relação às propriedades físicas, o concreto utilizado no modelo possui resistência à compressão (f_{ck}) igual a 30 MPa, módulo de elasticidade (E_{cs}) igual a 26 GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2 e peso específico (γ_c) de 25 kN/m³. O aço utilizado possui tensão de escoamento (f_y) de 345 MPa, módulo de elasticidade (E_s) de 205 GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3 e peso específico (γ_s) de 78,5kN/m³. É importante notar que a estrutura atende aos critérios de dimensionamento no estado limite último (ELU) segundo a NBR 8800 [45].



a) Planta baixa



b) Vista isométrica

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

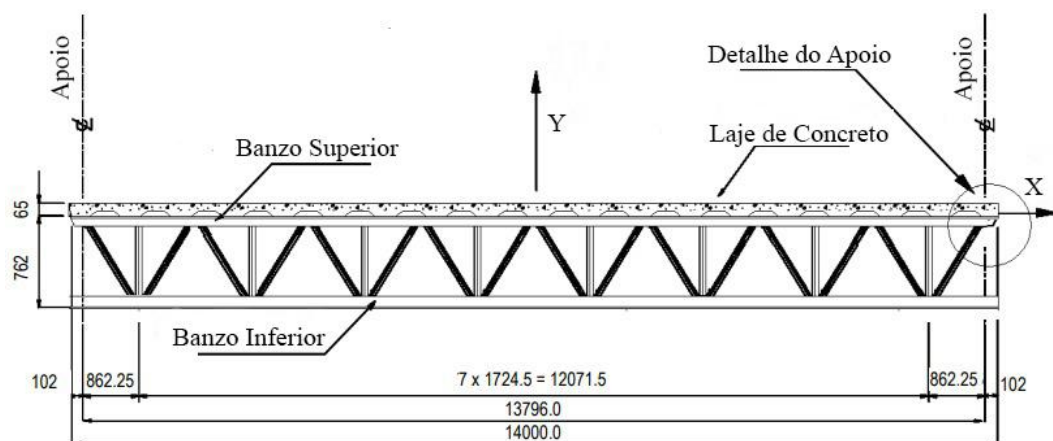


Figura 19 - Corte A-A do piso misto (aço-concreto). Dimensões em mm.

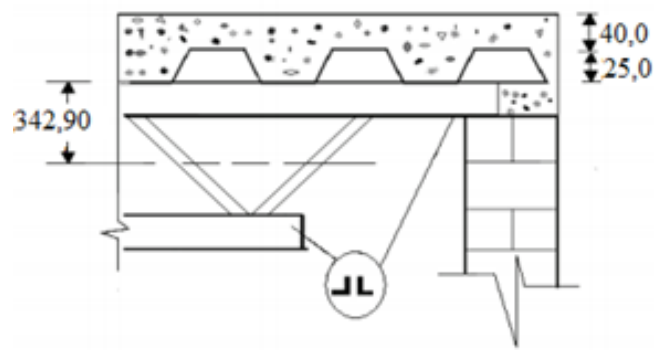


Figura 20 - Detalhe do apoio do piso misto. Dimensões em mm.

4.3 Posicionamento do carregamento dinâmico

Com o objetivo de simular o comportamento dinâmico da atividade humana rítmica, foram distribuídas seis áreas em diferentes localizações da laje do piso misto (aço-concreto), gerando seis modelos de carregamento (MC), conforme Figura 21. 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 por as letras de “A” a “G” (Figura 22 a Figura 27).

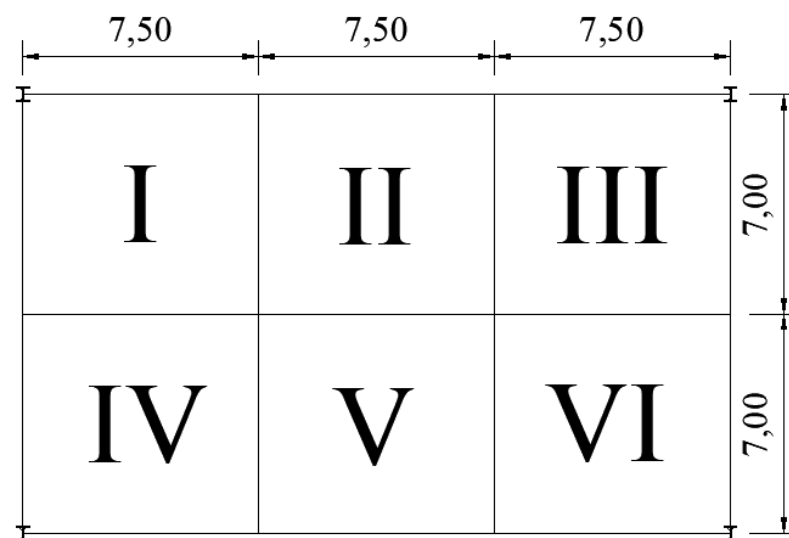


Figura 21 - Seis disposições do carregamento analisado. Dimensões em m.

As simulações das seis situações descritas na Figura 21 são analisadas conforme a modelagem da carga dinâmica, de acordo com os modelos tradicionais de “força-dura” e com o modelo biodinâmico, que visa incorporar as características dinâmicas dos participantes da atividade aeróbica. Da Figura 22 até a Figura 27 são vistos os modelos de carregamento (MC I a VI) onde as seis situações de localização da carga são estudadas.

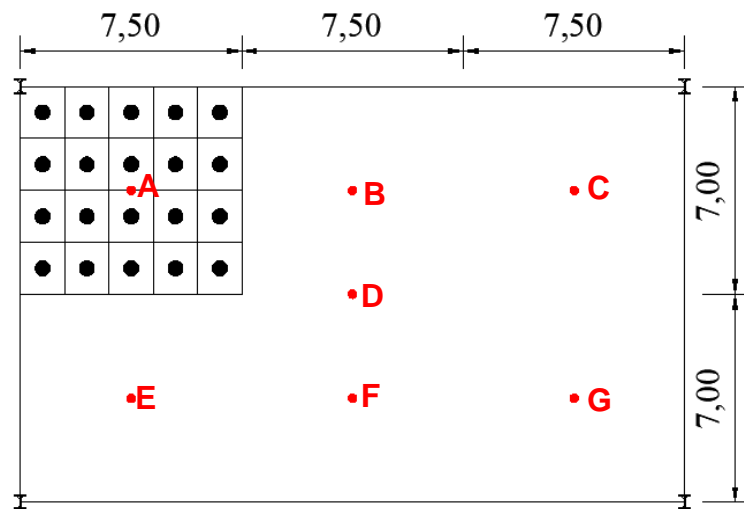


Figura 22 - Modelo de carregamento I (MC-I). Dimensões em m.

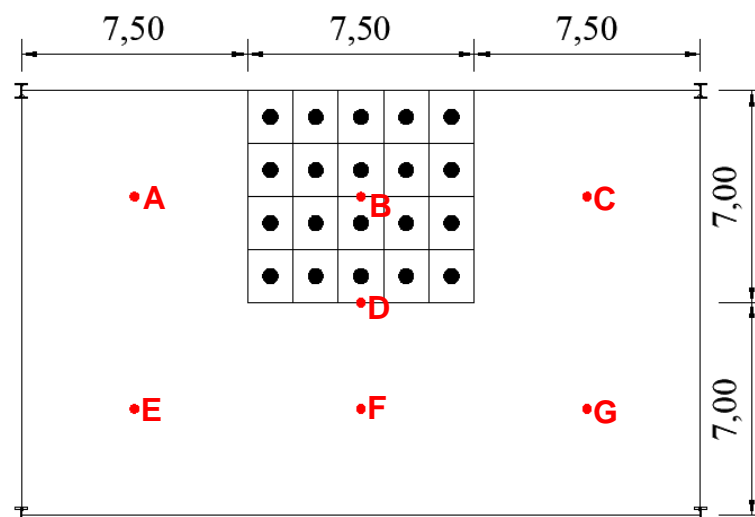


Figura 23 - Modelo de carregamento II (MC-II). Dimensões em m.

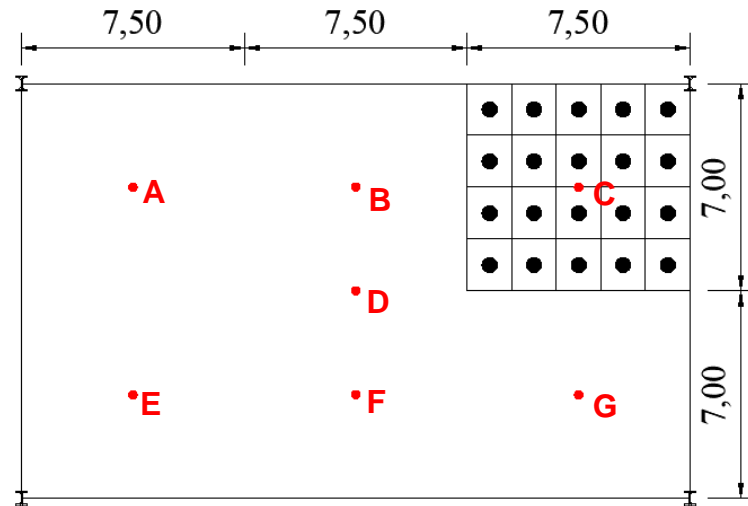


Figura 24 - Modelo de carregamento III (MC-III). Dimensões em m.

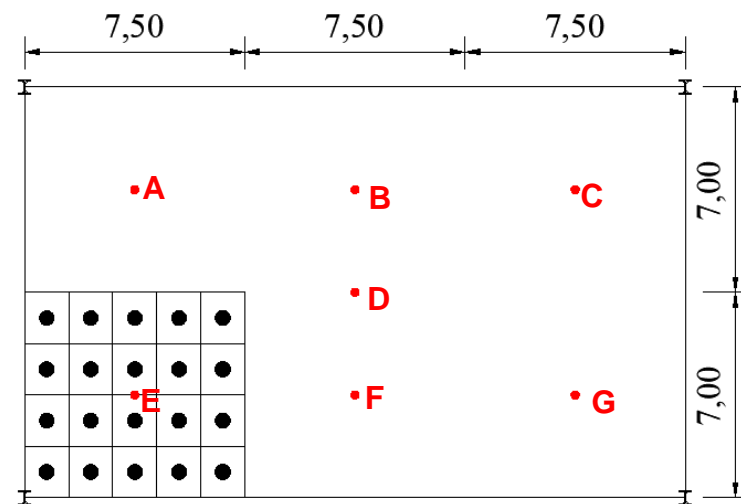


Figura 25 - Modelo de carregamento IV (MC-IV). Dimensões em m.

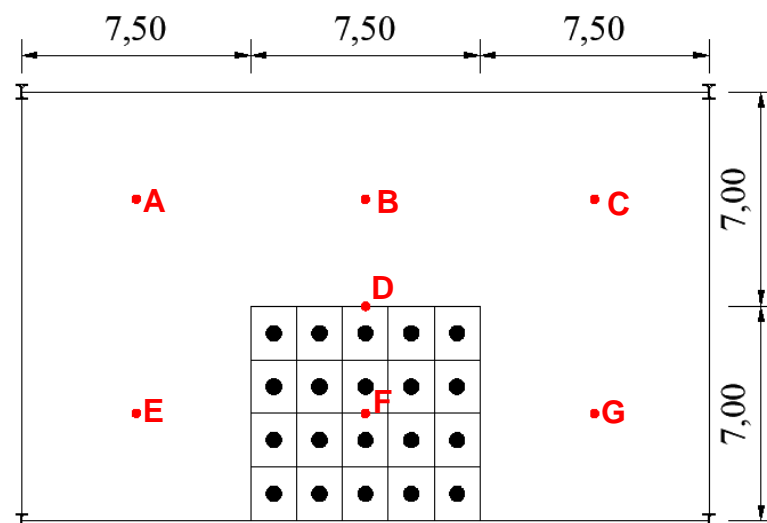


Figura 26 - Modelo de carregamento V (MC-V). Dimensões em m.

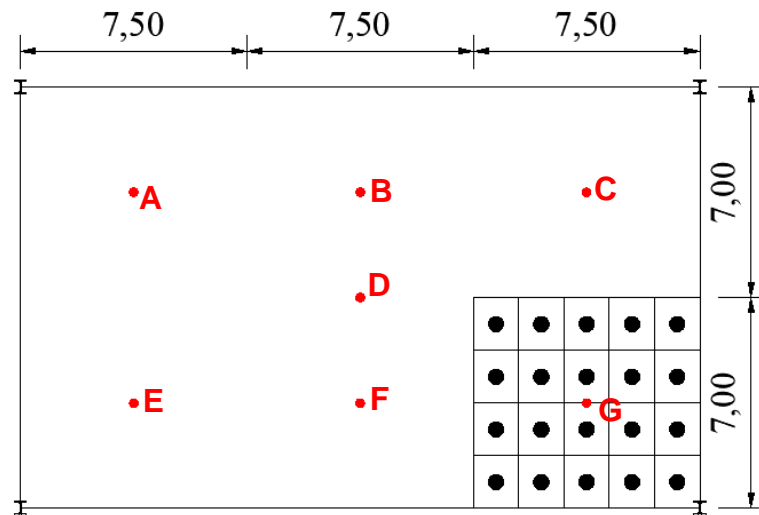
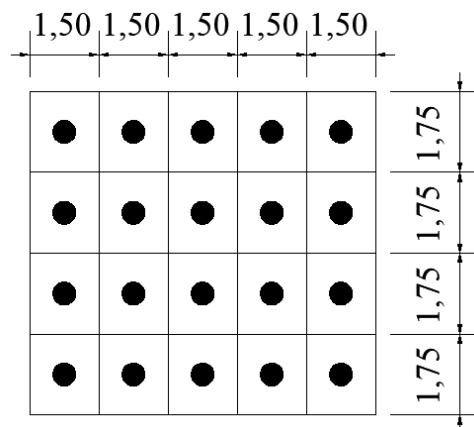


Figura 27 - Modelo de carregamento VI (MC-VI). Dimensões em m.

A modelagem da carga dinâmica foi desenvolvida a partir da consideração de vinte pessoas posicionadas simetricamente praticando a atividade rítmica, onde foi determinado o peso de cada pessoa igual a 798N (0,798 kN) nos modelos tradicionais (força-dura) de representação do carregamento dinâmico. O detalhamento da disposição das pessoas nas seis regiões estudadas é visto na Figura 28.



● Carga dinâmica representada por uma pessoa

Figura 28 - Detalhamento da carga dinâmica. 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). As características apresentadas tornam possível o desenvolvimento do modelo numérico-computacional descrito no presente capítulo. O modelo desenvolvido visa representar de maneira mais realista possível o comportamento estrutural do piso em estudo, onde foram empregadas as técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, a partir do emprego do software ANSYS [55].

5.2 Modelo numérico-computacional

No desenvolvimento do modelo computacional do piso misto investigado, foram empregadas técnicas usuais de discretização presente no método dos elementos finitos implementadas por meio do emprego do programa ANSYS [55]. Na modelagem das barras que constituem as vigas treliçadas (*joists*), o elemento definido para representação foi o BEAM44 e para a modelagem da laje de concreto armado foi utilizado o elemento de casca SHELL63. A Figura 29 mostra o modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) e seguinte, a Tabela 12 detalha as características do modelo desenvolvido para este trabalho de pesquisa.

Em relação a discretização da malha de elementos finitos, utilizou-se para o piso misto o tamanho aproximado de 0,25 m para os *joists* e para o piso de concreto o tamanho de 0,22 m. Portanto, o modelo numérico computacional desenvolvido possui um grau de refinamento adequado, possibilitando uma boa representação do comportamento estrutural.

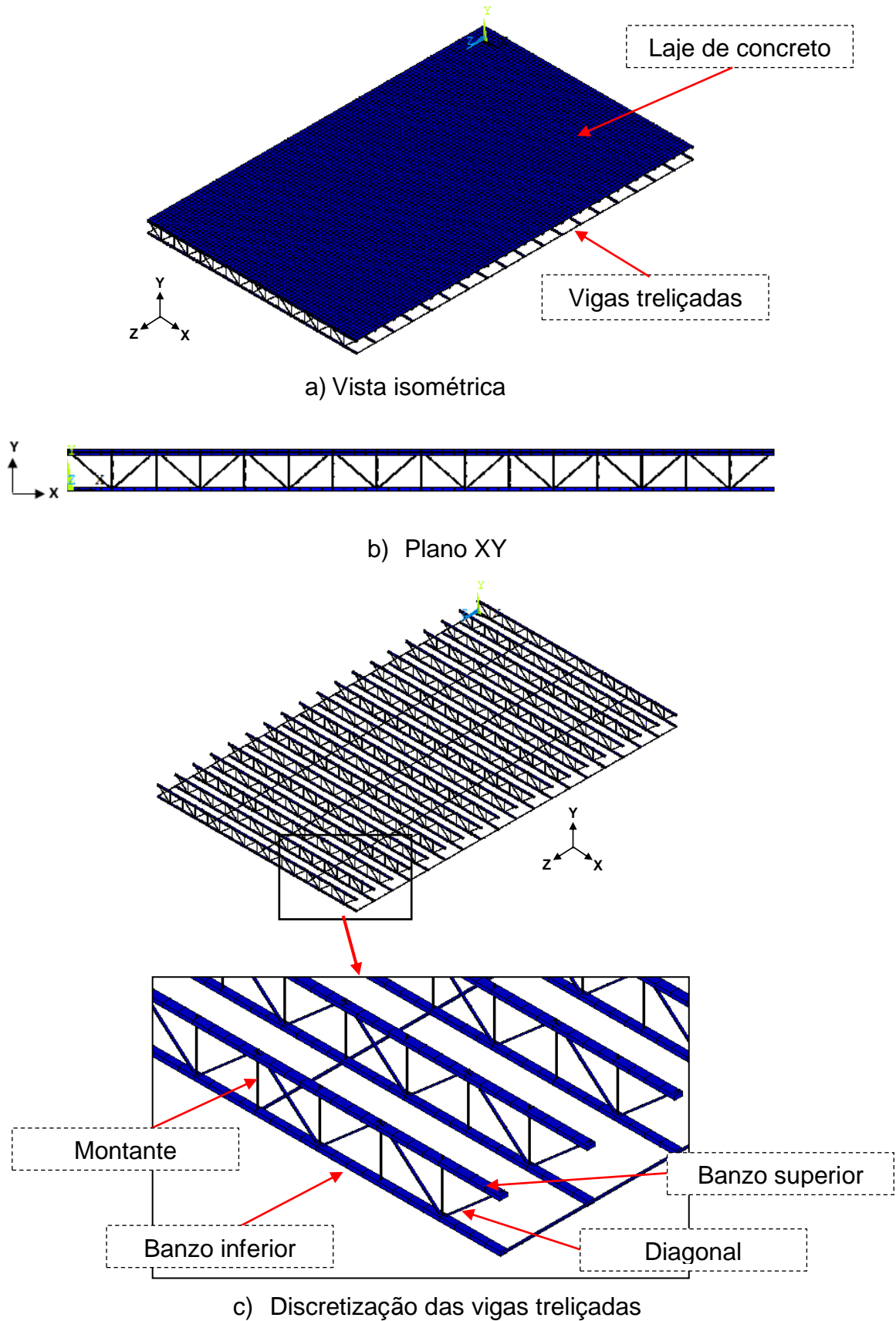


Figura 29 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto)

Tabela 12 - Características do modelo de elementos finitos do piso misto

Descrição		Quantidade
Elementos	BEAM44	5.267
	SHELL63	6.912
	Total	12.179
Nós		11.673
Graus de liberdade		62.568

5.3 Elemento finito de viga tridimensional - BEAM44

O elemento BEAM44 [55], apresentado na Figura 30, consiste em um elemento uniaxial com propriedades de esforços de tensão, compressão, torção e flexão. O mesmo possui seis graus de liberdade por nó, sendo divididos em três translações e três rotações nos eixos x , y e z .

Ele possui 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].

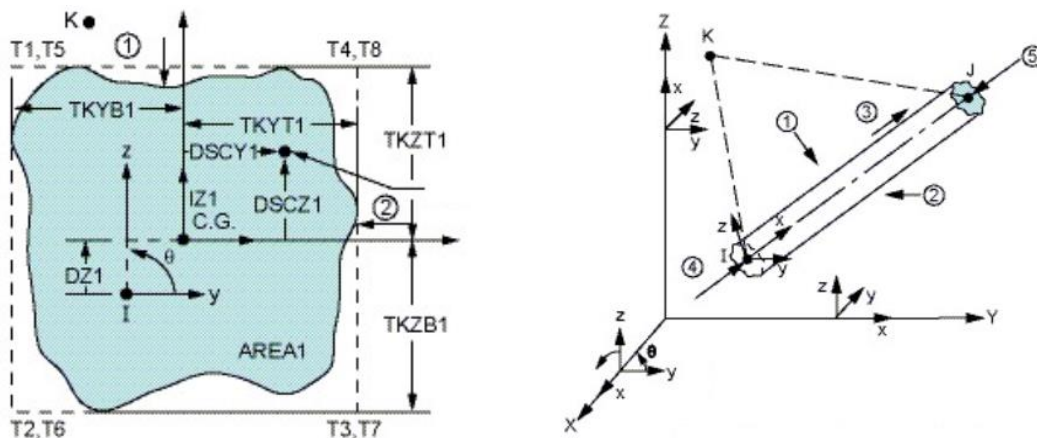


Figura 30 - Características geométricas do elemento BEAM44 [55]

5.4 Elemento finito de casca - SHELL63

Para 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 permitido 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 31.

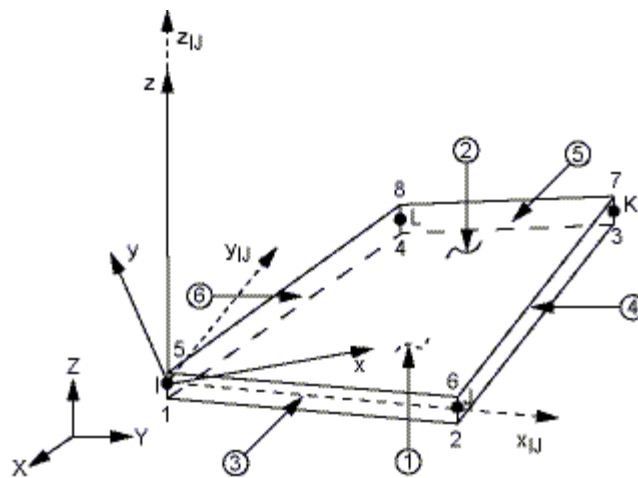


Figura 31 - Características geométricas do elemento SHELL63 [55]

5.5 Hipóteses simplificadoras

A análise estrutural é feita baseada em algumas etapas até a geração do modelo numérico-computacional, onde a estrutura real é simplificada a partir da idealização de seu comportamento.

Na concepção do modelo estrutural, adota-se hipóteses simplificadoras baseadas em teorias físicas, resultados experimentais e estatísticos. Logo, para a elaboração deste estudo, foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Material homogêneo, isotrópico e elástico;
- Seções planas permanecem planas após a deformação;
- Trabalha no domínio de pequenas deformações e deslocamentos;
- Amortecimento proporcional: modelo de Rayleigh.

5.6 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento consiste em um processo de dissipação de energia de uma estrutura submetida a vibrações. No entanto, sua definição é uma tarefa difícil e não é possível determinar esta característica apenas analisando os fatores geométricos da estrutura ou o amortecimento dos materiais empregados [56].

A determinação 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 (α) e outra à da matriz de rigidez (β), 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].

$$C = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K] \quad (16)$$

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

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

Isolando os coeficientes de contribuição de massa e rigidez da equação (17), α e β , obtemos as equações (18) e (19) levando em consideração as duas frequências mais importantes (ω_{01} e ω_{02}).

$$\alpha = 2 \cdot \xi_i \cdot \omega_{01} - \beta \cdot \omega_{01} \cdot \omega_{01} \quad (18)$$

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

A partir das duas frequências mais importantes se torna possível determinar os parâmetros α e β . A primeira frequência é chamada de frequência fundamental e consiste na menor frequência da estrutura, sendo a ω_{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 (ξ) adequada ao sistema em estudo. A literatura apresenta diversas maneiras de abordagem quanto a recomendação das taxas de amortecimento seguras.

Conforme a ISO 10137 [40], 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 13, de acordo com a norma ISO 10137 [40].

Segundo o guia SCI [39], em geral 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 [39]. A partir do exposto, foi definida a taxa de amortecimento estrutural para o piso misto em estudo como 1% ($\xi = 0,01$).

Tabela 13 - Taxas de amortecimento para o primeiro modo de pisos mistos [40]

Tipo de piso	Faixa de vãos avaliados (m)	Taxa de amortecimento (ξ)		
		Faixa		Valores da fase preliminar do projeto
		Típica	Extrema	
<i>Steel Joist</i> /laje de concreto simplesmente apoiada	9 a 15	0,8 a 3	0,6 a 7,4	1,3
<i>Steel Joist</i> /laje de concreto contínua	4 a 8	1 a 5	0,8 a 8,6	1,5
Viga mista com interação total	6 a 20	1,5 a 5	0,5 a 8	1,8

A Tabela 14 apresenta os parâmetros α e β utilizados na modelagem do amortecimento estrutural nas análises de vibração forçada, a partir da implementação do método dos elementos finitos.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados no amortecimento de Rayleigh

Frequências em Hz		Frequência em rad/s		Parâmetros Rayleigh	
f_{01}	f_{02}	ω_{01}	ω_{02}	α	β
5,605	5,650	35,220	35,501	0,000282799	0,353602667

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 de suma importância 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 32 a Figura 37. Cabe ressaltar a ocorrência de modos de vibração específicos, onde apenas os perfis metálicos participam da contribuição modal do sistema, referentes a oitava e nona frequências naturais, de acordo com os valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Características modais do piso misto

Frequências (Hz)	Período natural (s)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/s)	Amortecimento modal (Ns/m)	
f ₀₁	5,61	0,18	8385,68	1,04 × 10 ⁷	5906,95
f ₀₂	5,65	0,18	8440,75	1,06 × 10 ⁷	5993,15
f ₀₃	5,77	0,17	8645,60	1,14 × 10 ⁷	6269,55
f ₀₄	6,01	0,17	8552,17	1,22 × 10 ⁷	6470,97
f ₀₅	6,40	0,16	7670,83	1,24 × 10 ⁷	6223,56
f ₀₆	6,97	0,14	5332,95	1,02 × 10 ⁷	4778,63
f ₀₇	7,73	0,13	3659,61	8,64 × 10 ⁶	3737,77
f ₀₈	7,83	0,13	181,36	4,38 × 10 ⁵	188,13
f ₀₉	8,63	0,12	124,60	3,66 × 10 ⁵	147,69
f ₁₀	8,75	0,11	3151,19	9,52 × 10 ⁶	3807,10

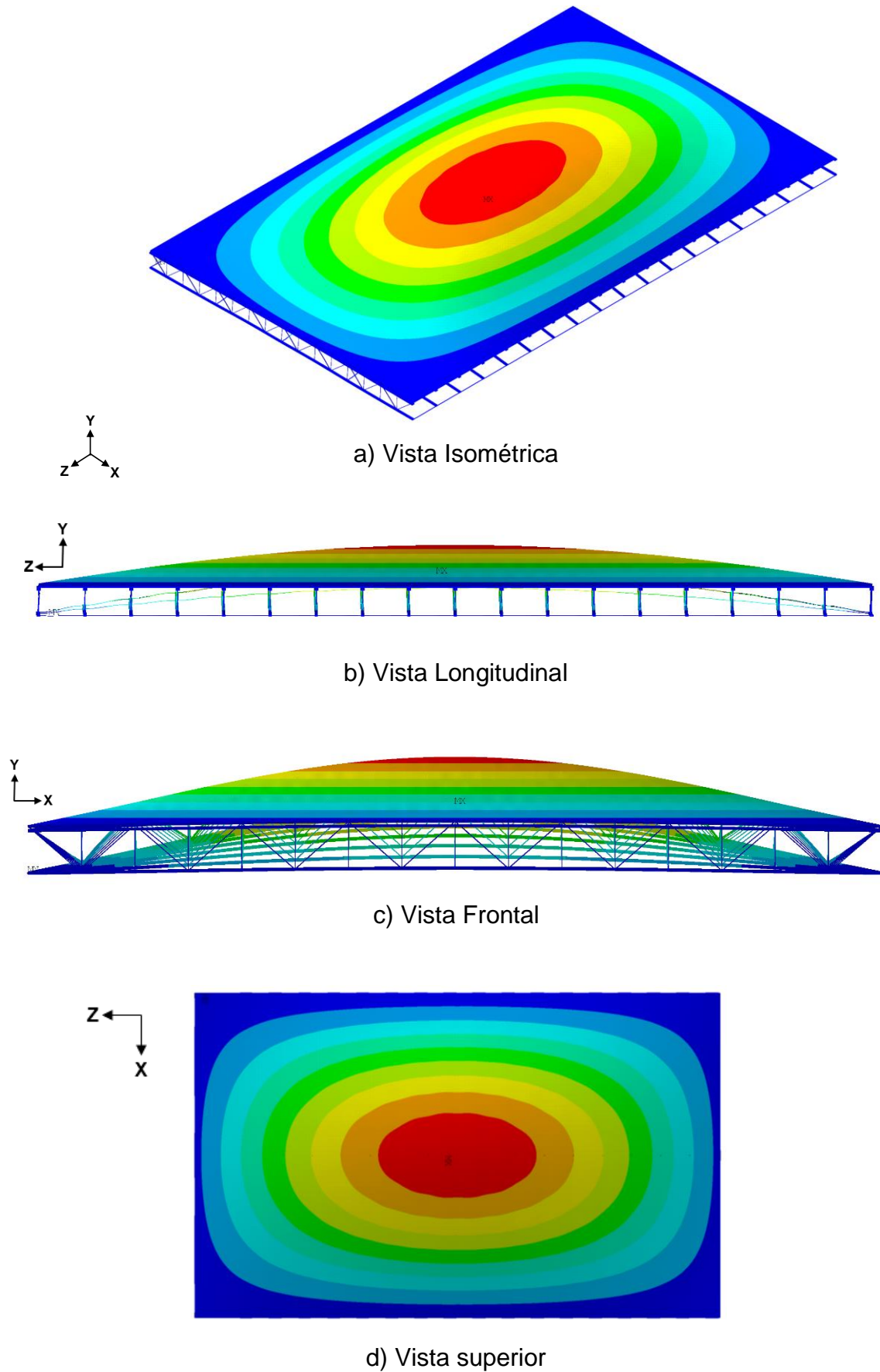
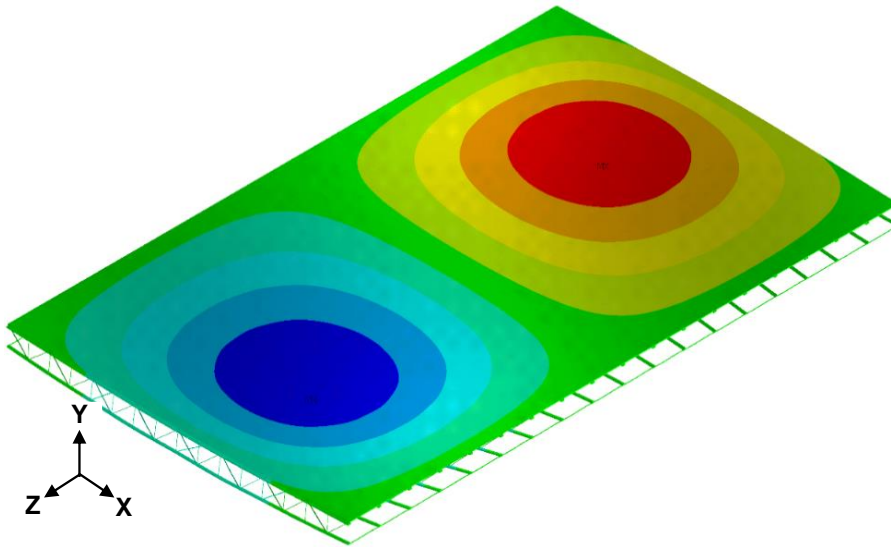
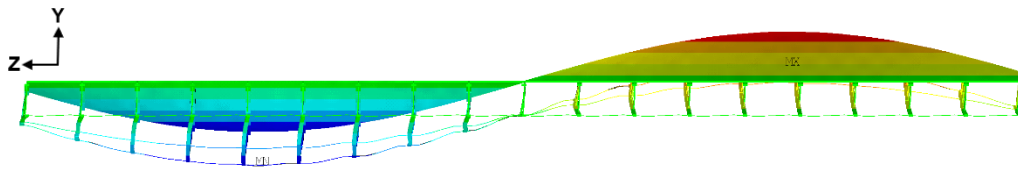


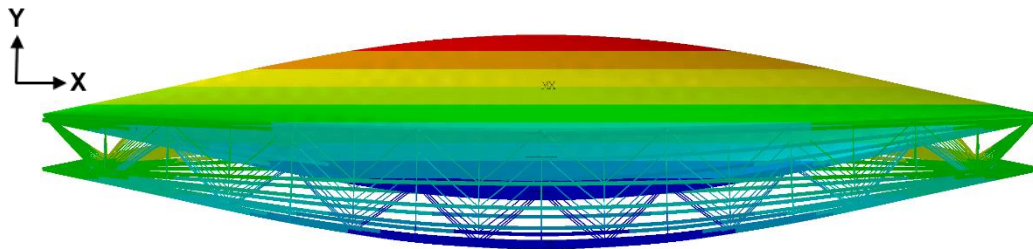
Figura 32 - 1º modo: $f_{01} = 5,61$ Hz [55]



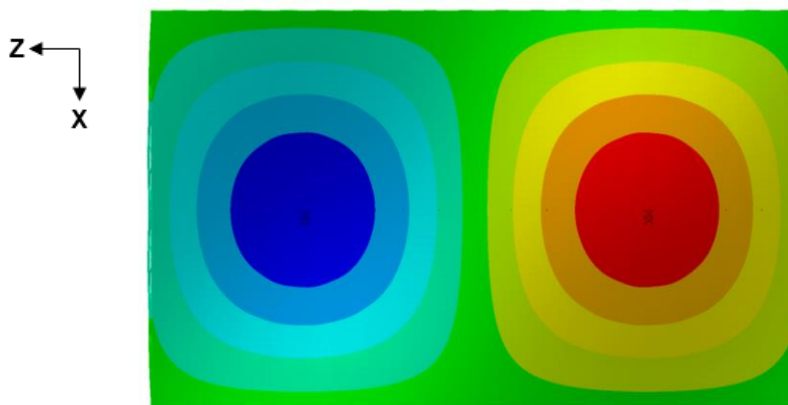
a) Vista Isométrica



b) Vista Longitudinal



c) Vista Frontal



d) Vista superior

Figura 33 - 2º modo: $f_{02} = 5,65$ Hz [55]

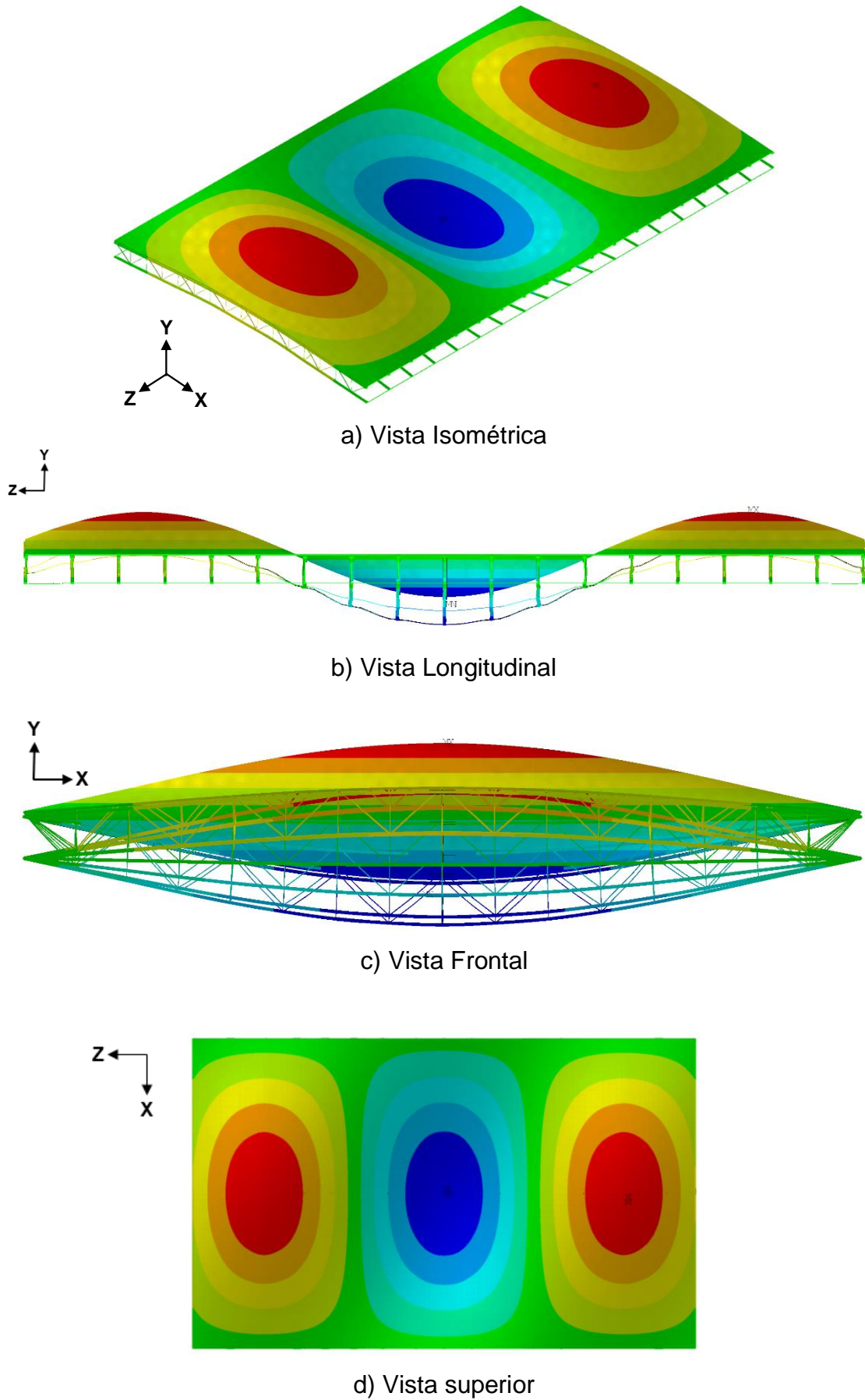


Figura 34 - 3º modo: $f_{03} = 5,77$ Hz [55]

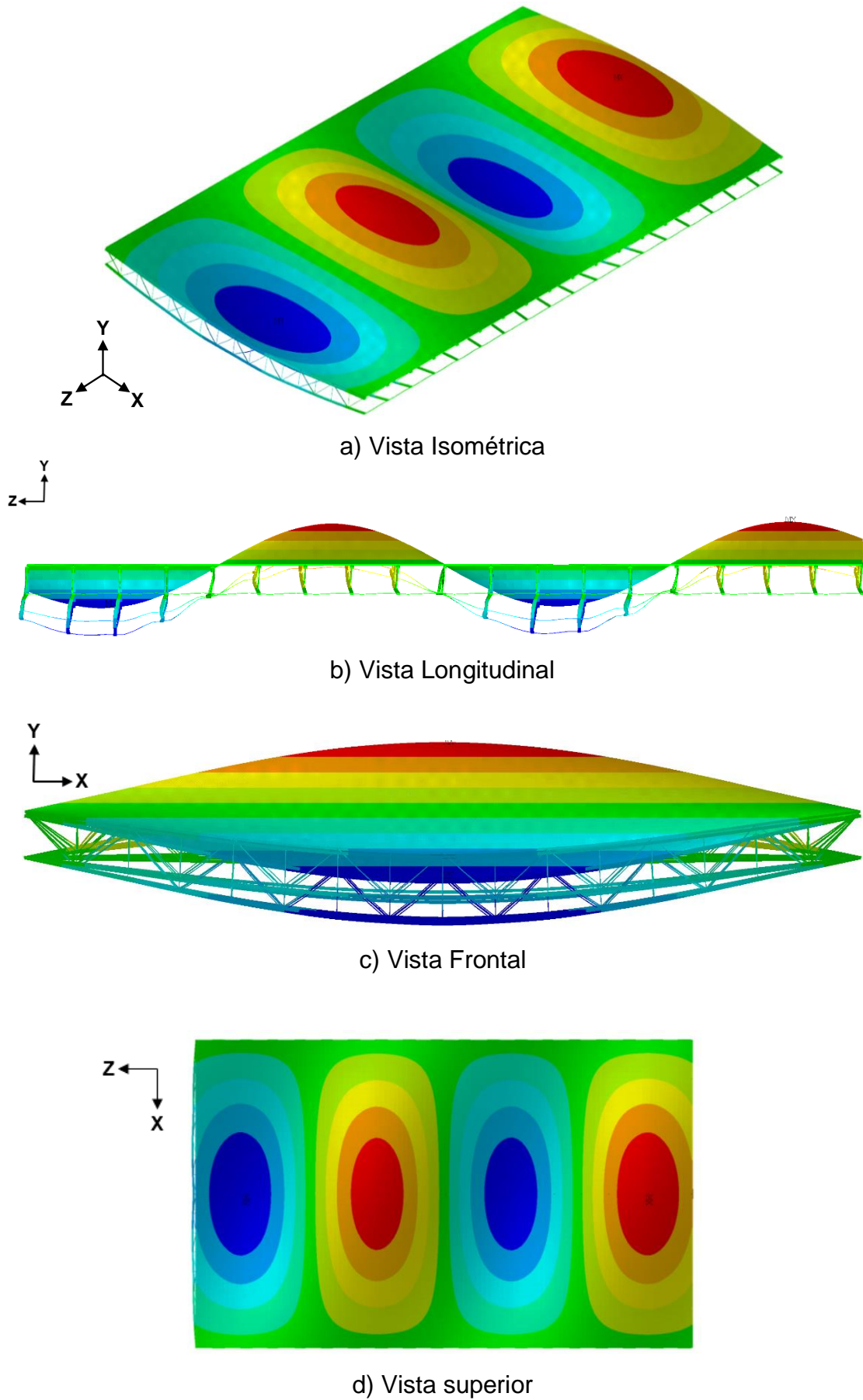


Figura 35 - 4º modo: $f_{04} = 6,01$ Hz [55]

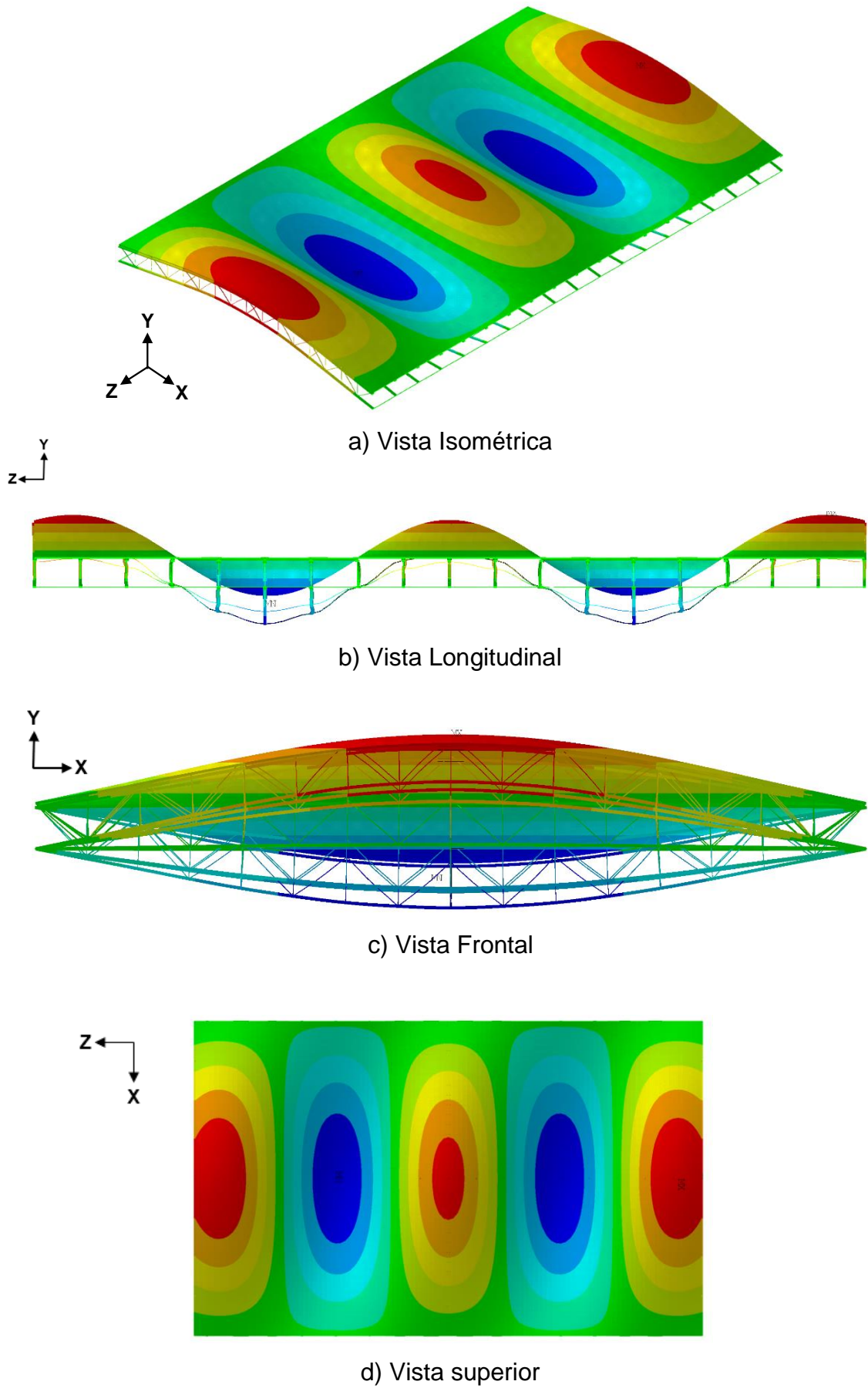


Figura 36 - 5º modo: $f_{05} = 6,40$ Hz [55]

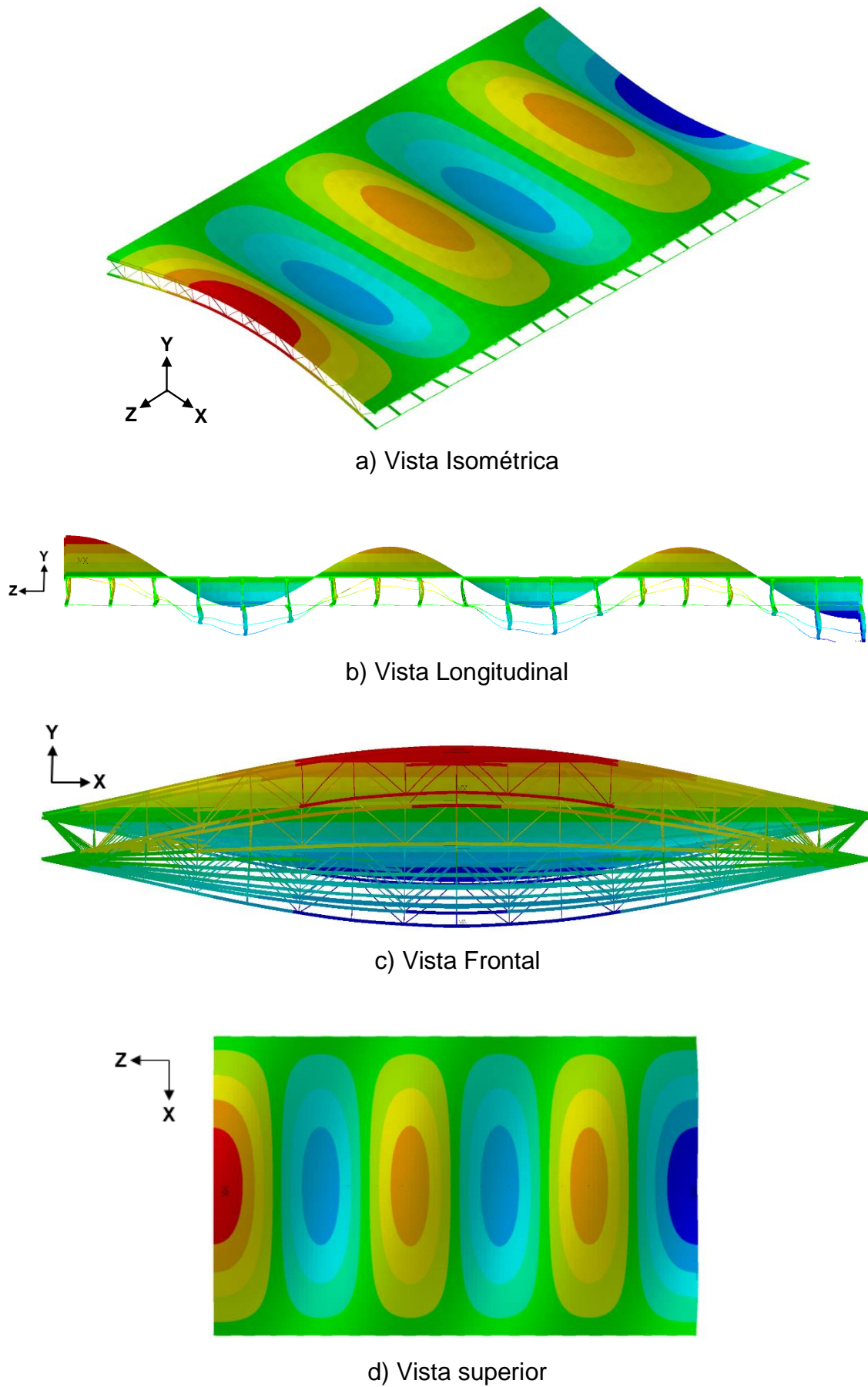


Figura 37 - 6º modo: $f_{06} = 6,97$ Hz [55]

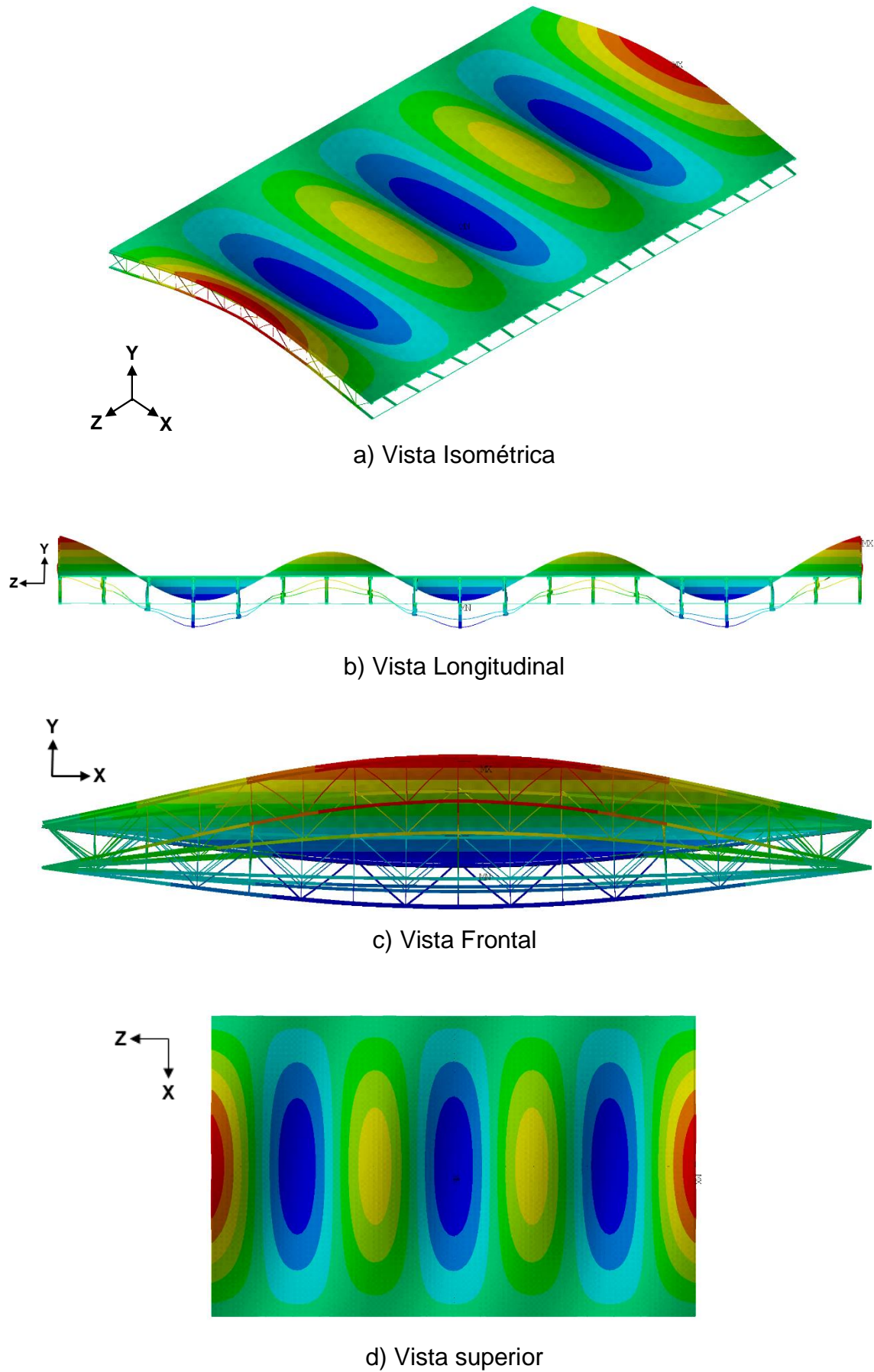


Figura 38 - 7º modo: $f_{07} = 7,73$ Hz [55]

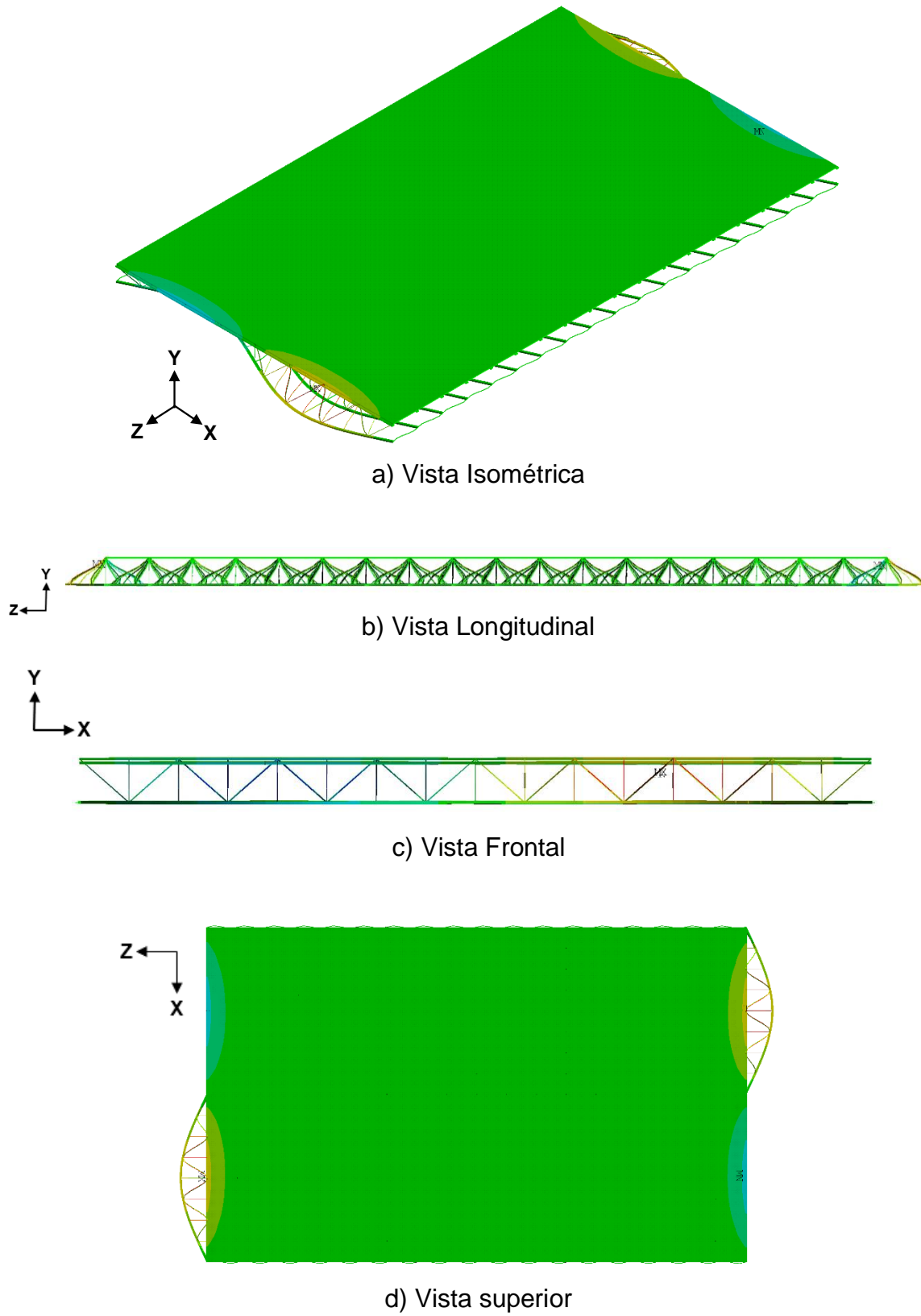


Figura 39 - 8º modo: $f_{08} = 7,83$ Hz [55]

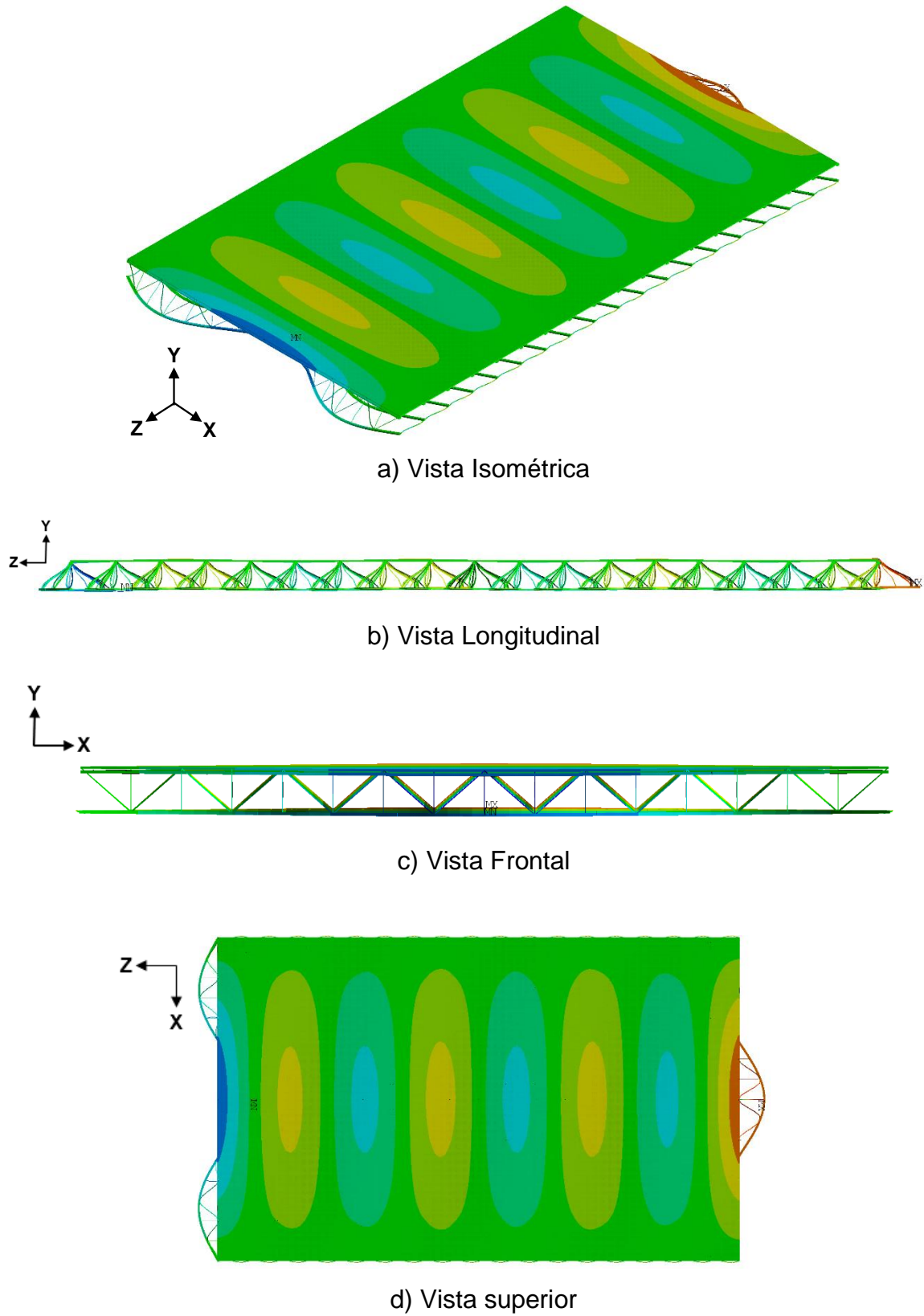
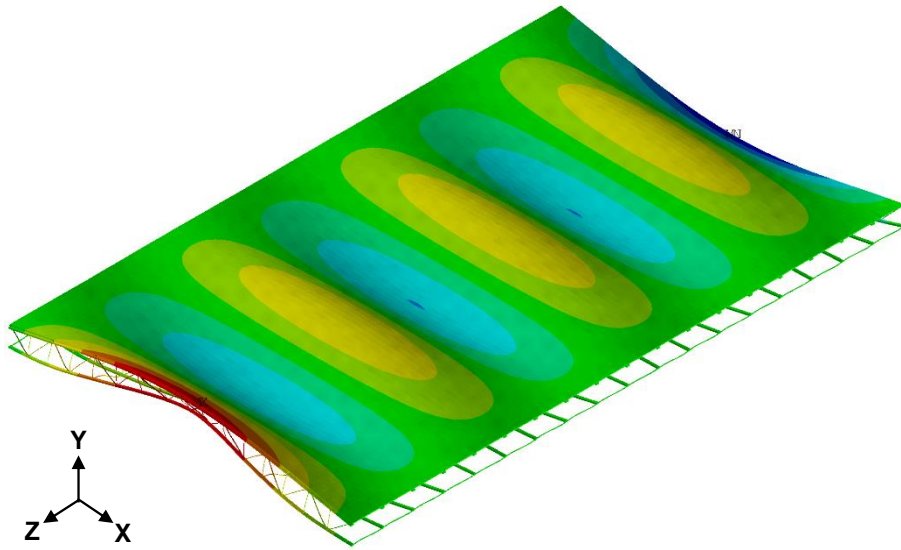
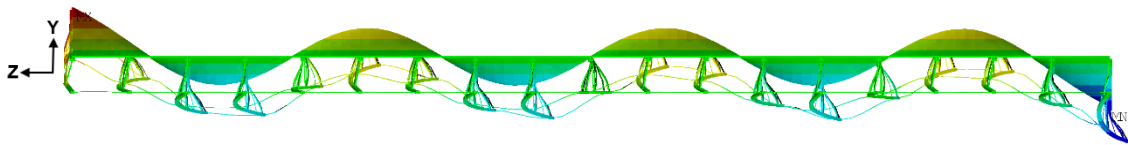


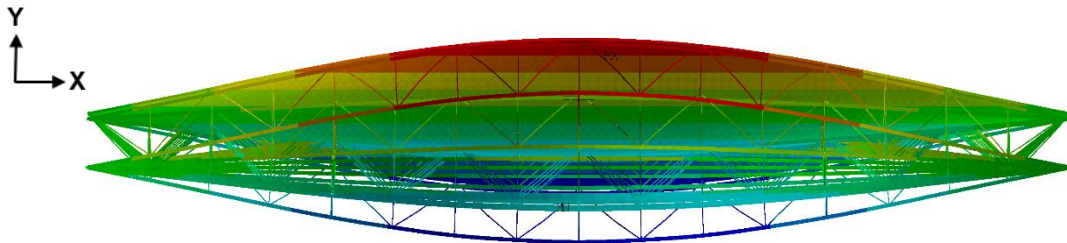
Figura 40 - 9º modo: $f_{09} = 8,63$ Hz [55]



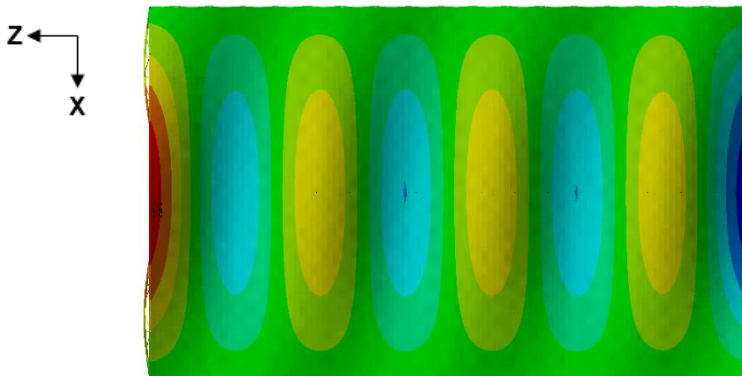
a) Vista Isométrica



b) Vista Longitudinal



c) Vista Frontal



d) Vista superior

Figura 41 - 10º modo: $f_{10} = 8,75$ 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 5,61 Hz a 8,75 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 [51] e 4,5 a 8,4 Hz de acordo com Ellis e Ji [53]. 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, visando recomendar um valor referência para o uso de uma estrutura para atividades aeróbicas.

Tabela 16 - Frequências fundamentais mínimas para prática de atividade rítmica

Norma / Guia de projeto	Atividade	Frequência fundamental mínima recomendada (Hz)
NBR 8800 (2008) [45]	Ginástica aeróbica	8
NBR 6118 (2014) [37]	Ginásio de esportes	9,6
AISC (2016) [36]	Ginástica aeróbica para pisos leves	9,2

Com base nos valores das frequências mínimas apresentados na Tabela 16, percebe-se que a frequência fundamental do piso ($f_{01} = 5,61$ Hz), assim como as outras sete frequências seguintes apresentadas na Tabela 15 encontram-se abaixo dos valores mínimos recomendados nas normas brasileiras e no guia de projeto AISC. Conseqüentemente, 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

Objetivando avaliar os modos de vibração que possuem a maior contribuição na resposta dinâmica estrutural uma análise harmônica foi desenvolvida. Para este propósito, uma carga variando harmonicamente no tempo foi aplicada no piso misto em estudo para obtenção dos resultados dos deslocamentos nodais em termos de frequência.

Diante do exposto, uma carga senoidal de 798N (0,798 kN) (equivalente ao peso de uma pessoa) foi aplicada no ponto de maior amplitude modal da estrutura (seção D). Esta análise foi realizada com a frequência variando entre 0 e 9 Hz com um intervalo de integração de 0,01 considerando a contribuição da taxa de amortecimento estrutural de 1% [39].

A partir desta análise, observa-se a existência de quatro picos de resposta bem definidos coincidentes com a primeira, terceira, quinta e sétima frequência natural do piso misto em estudo, possuindo a maior amplitude de deslocamento no segundo pico de resposta ($f_{03} = 5,77$ Hz), conforme pode ser visto conforme Figura 42. Desta forma, é necessário ter maior atenção nestas frequências, visto que os maiores picos se encontram em uma faixa de frequência onde existe uma tendência de vibrações excessivas devido a atividades rítmicas humanas.

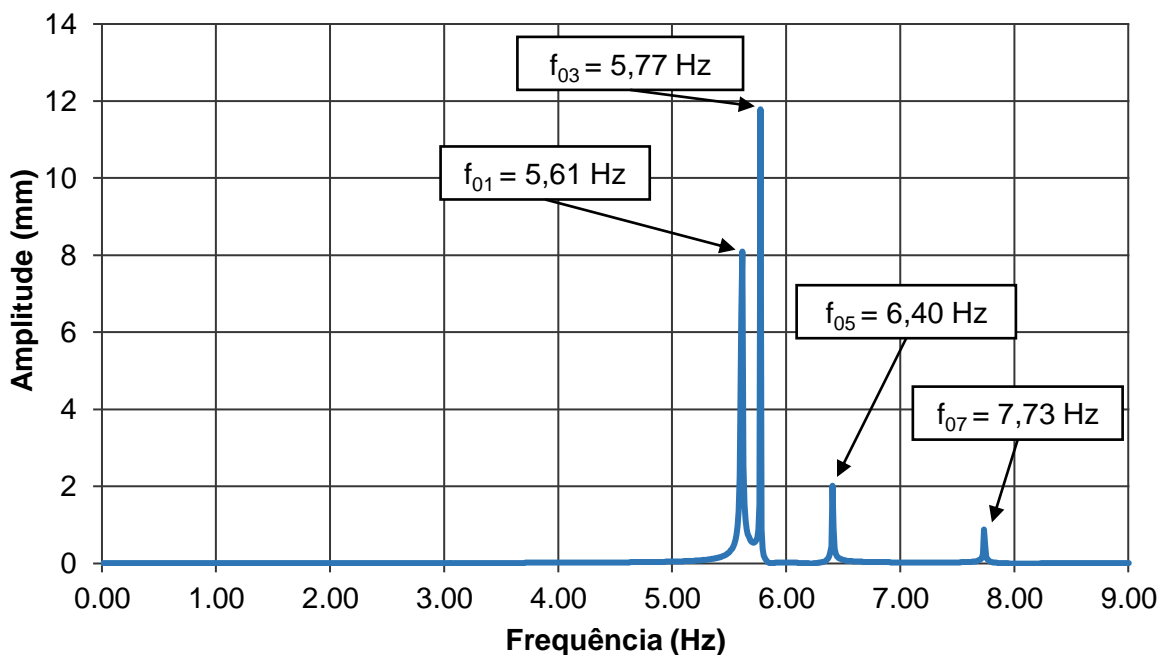


Figura 42 - Análise harmônica do piso misto (aço-concreto)

6.4 Análise de vibração forçada

Esta seção apresenta os resultados calculados através 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). 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 pessoas praticando atividades aeróbicas foi aplicado no piso misto, onde foi levado em conta as localizações descritas no mesmo item (MC I ao VI).

É importante destacar que a modelagem da carga dinâmica referente a cada indivíduo é representada nos guias AISC [36], SCI [39] e no trabalho de Faisca [51] e Campista [52], 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_p), aceleração RMS ($a_{w,rms}$) 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

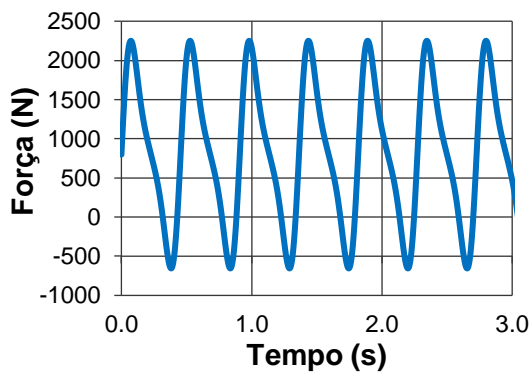
A modelagem das cargas dinâmicas foi realizada tendo como base o Capítulo 3. A análise dinâmica transiente foi realizada através do software computacional ANSYS [55], com base no emprego do método de integração direta de Newmark [59]. A frequência de excitação utilizada foi 2,20 Hz, o tempo total de 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. Para os guias AISC [36] e SCI [39] temos a frequência do passo representada por f_{step} e f_p , respectivamente. O peso do indivíduo é representado por Q, q e P, conforme AISC, SCI e Faisca, nesta ordem. Para o guia SCI [39] também é necessário determinar o número de pessoas praticando a atividade aeróbica, sendo representado pela letra p, de acordo com a Tabela 17. Todavia, para o modelo desenvolvido por Faisca [51], temos os parâmetros de período natural (T), período de contato (T_c), coeficiente de impacto (K_p) e coeficiente de defasagem (CD) conforme tabela a seguir.

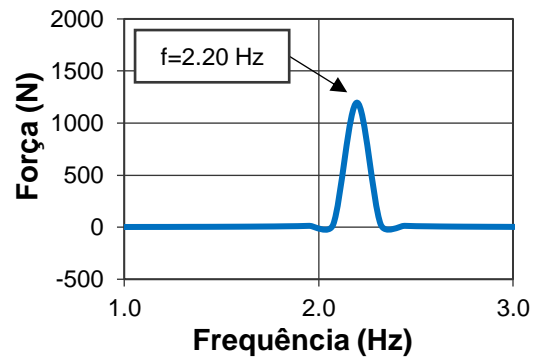
Tabela 17 - Parâmetros utilizados para a representação tradicional da carga dinâmica

AISC [36]	SCI [39]	Faisca [51]
$f_{\text{step}} = 2,20 \text{ Hz}$ $Q = 798 \text{ N}$	$f_p = 2,20 \text{ Hz}$ $q = 798 \text{ N}$ $p = 20$	$T = 0,45 \text{ s}$ $T_c = 0,34 \text{ s}$ $P = 798 \text{ N}$ $K_p = 2,78$ $CD = 0,95$

Baseado nos parâmetros vistos conforme Tabela 17, para atividades rítmicas aeróbicas onde a representação da carga é a de força-dura (AISC, SCI e Faisca), obtemos a carga dinâmica representada por um indivíduo, conforme Figura 43, Figura 44 e Figura 45, respectivamente. Objetivando a melhor visualização do pico de força na frequência de excitação analisada, as figuras representativas das forças no domínio da frequência iniciam em 1 Hz.

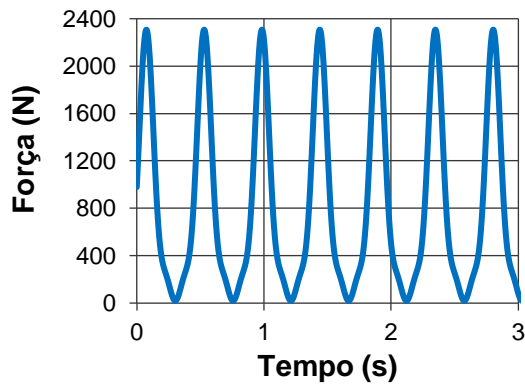


a) Domínio do tempo

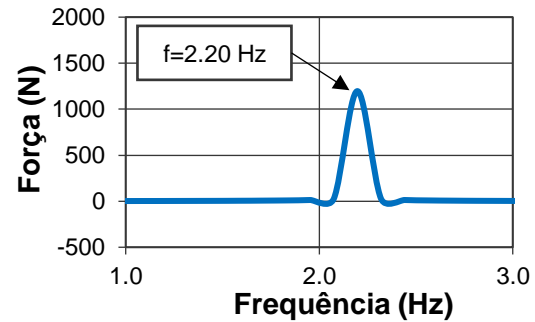


b) Domínio da frequência

Figura 43 - Carga dinâmica modelada através do AISC [36]

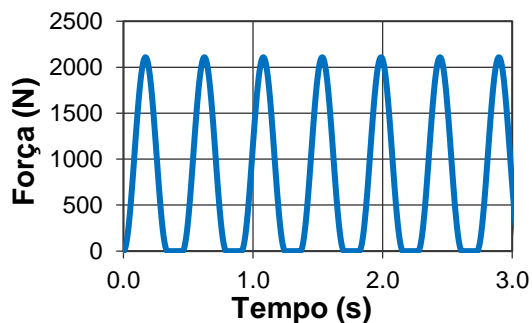


a) Domínio do tempo

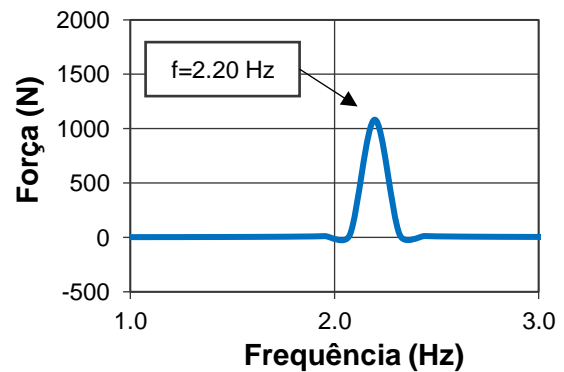


b) Domínio da frequência

Figura 44 - Carga dinâmica modelada através do SCI [39]



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 45 - Carga dinâmica modelada através do FAISCA [51]

No que diz respeito ao modelo biodinâmico, as cargas dinâmicas foram inseridas conforme o modelo de Campista [52]. O Figura 46 apresenta a variação da carga dinâmica no domínio do tempo e da frequência de uma pessoa participante da atividade aeróbica. É importante mencionar a natureza do sistema biodinâmico, que envolve além da força, a aceleração, velocidade e o deslocamento. As características dinâmicas das vinte pessoas praticantes da atividade aeróbica analisada são mostradas conforme Tabela 18, 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.

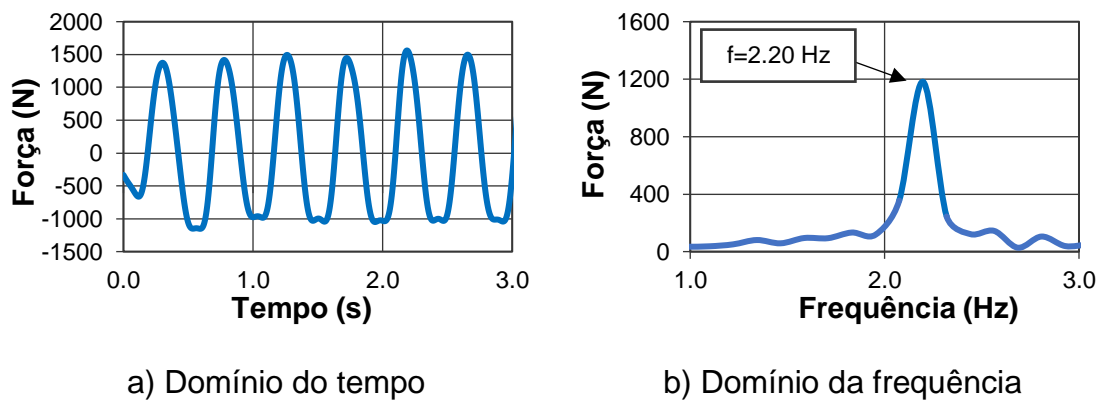


Figura 46 - Carga dinâmica do sistema biodinâmico [52]

Nas próximas seções, as respostas dinâmicas referentes às seis localizações das cargas dinâmicas descritas neste item são descritas. É possível visualizar as seguintes respostas dinâmicas: aceleração de pico (a_p), valor de dose de vibração (VDV) e aceleração RMS ($a_{w,rms}$). Os deslocamentos e acelerações são representados no domínio do tempo e da frequência para as seções críticas de cada localização das vinte pessoas praticando atividade aeróbica (MC-I a MC-VI).

A metodologia de apresentação dos resultados será a mesma para os seis casos de localização da carga dinâmica (modelos de carregamento ou MC). Inicialmente a localização da carga no piso misto é descrita. Logo, as respostas para deslocamento e aceleração da seção estrutural (SE) cujos valores são críticos são apresentadas no domínio do tempo e da frequência para os quatro modelos de carregamento estudados: AISC, SCI, Faisca e Biodinâmico, sendo representados

através das cores preto, azul, vermelho e verde, respectivamente. Seguente a isto, uma tabela resume as respostas dinâmicas (a_p , $a_{w,rms}$ e VDV) para cada seção estrutural.

Tabela 18 - Características dinâmicas das 20 pessoas participantes da atividade [52]

Indivíduo (i)	m_i (kg)	c_i (Ns/m)	k_i (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

6.4.2 Modelo de carregamento I

Na sequência do trabalho são apresentadas figuras contendo a localização da carga aplicada no modelo de carregamento I (MC-I) em uma ilustração (Figura 47a) e em planta (Figura 47b), assim como as seções analisadas (A a G). Nas figuras seguintes são apresentados os deslocamentos e acelerações (no domínio do tempo e da frequência) na seção crítica A para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Finalmente, a Tabela 19 apresenta todos os resultados calculados para o MC-I.

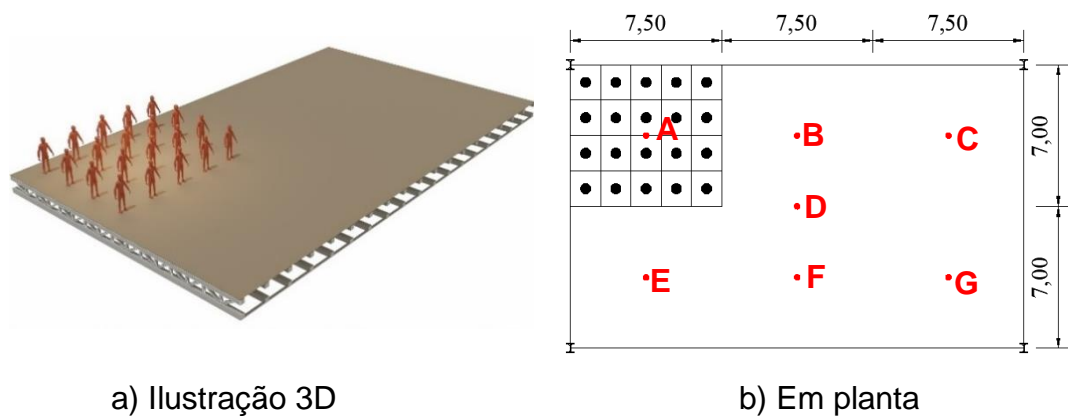


Figura 47 - Localização da carga para o MC-I

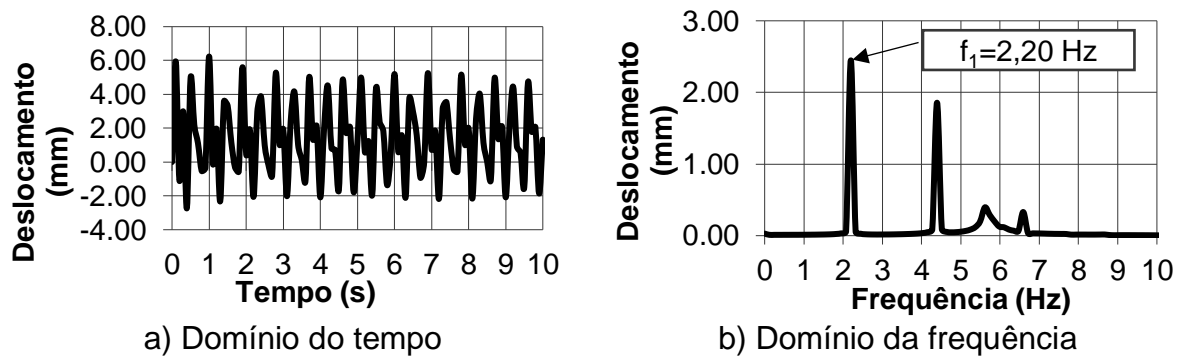


Figura 48 - Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-I

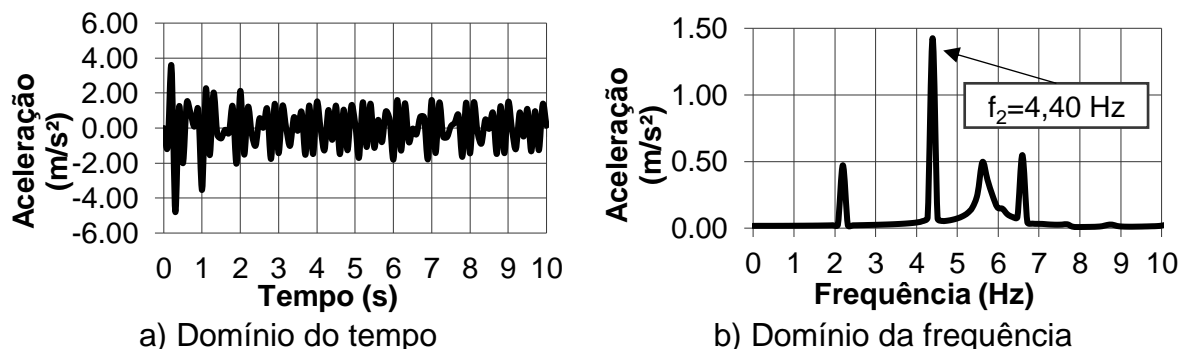
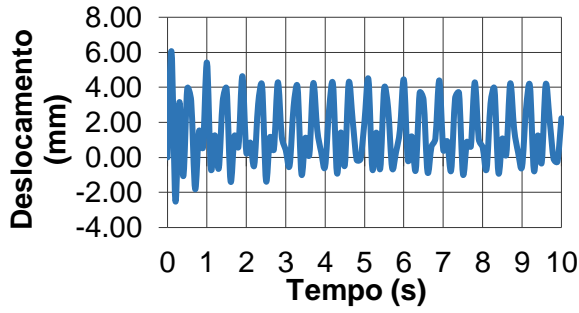
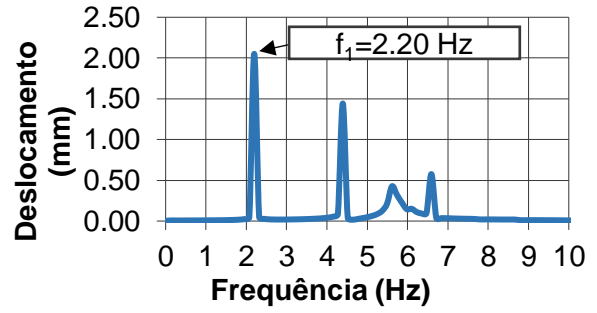


Figura 49 - Aceleração na seção A para o modelo AISC para MC-I

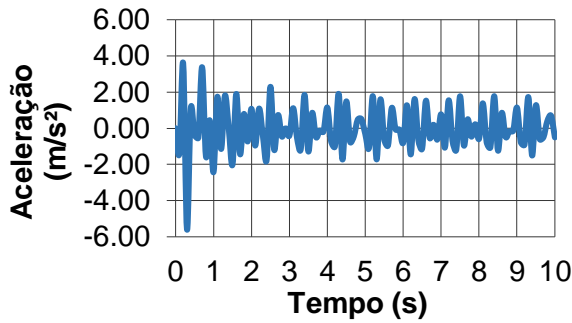


a) Domínio do tempo

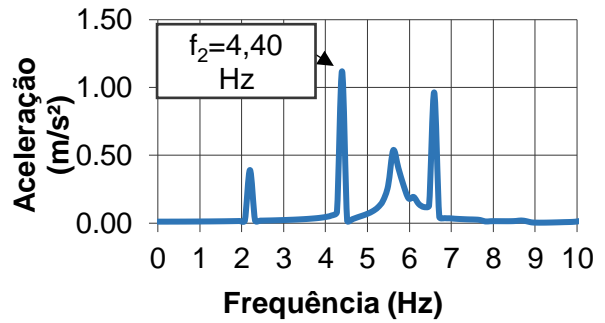


b) Domínio da frequência

Figura 50 - Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-I

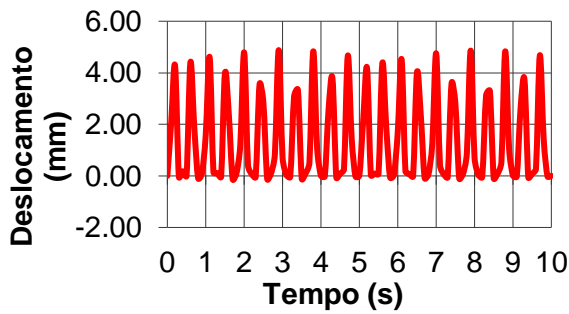


a) Domínio do tempo

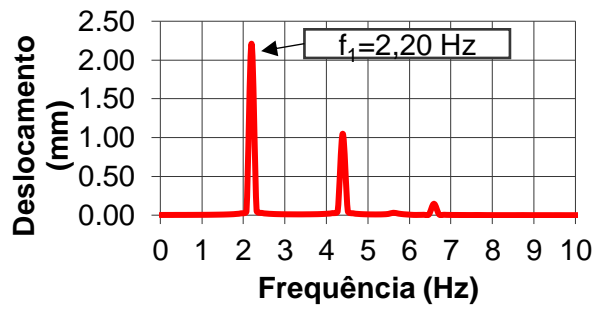


b) Domínio da frequência

Figura 51 - Aceleração na seção A para o modelo SCI para MC-I

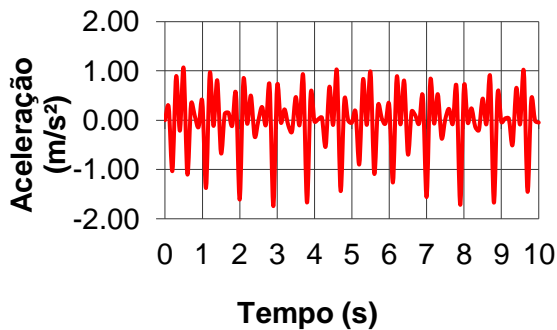


a) Domínio do tempo

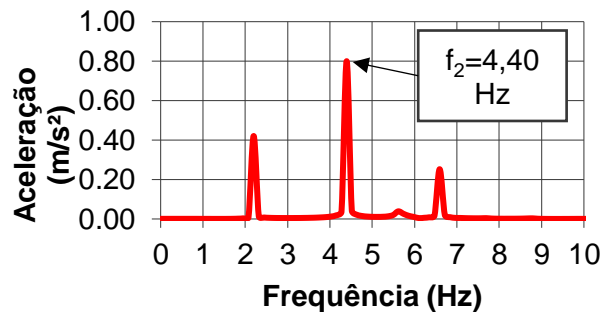


b) Domínio da frequência

Figura 52 - Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-I



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

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

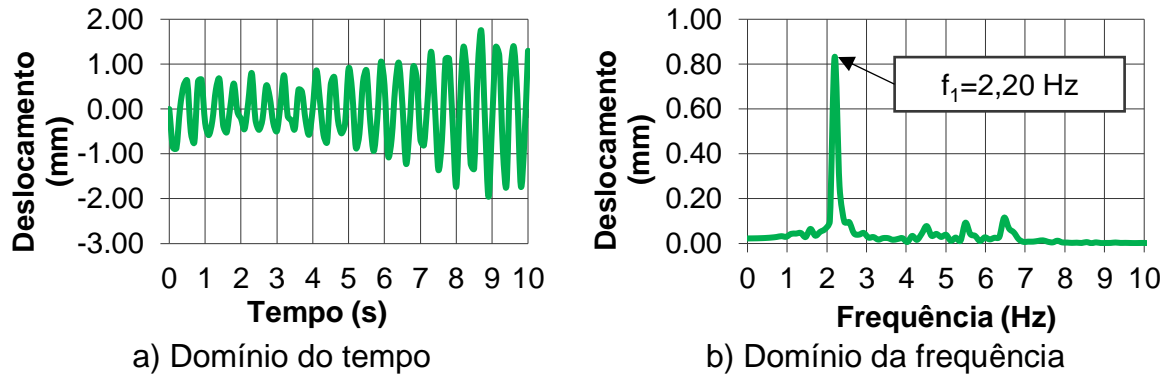


Figura 54 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-I

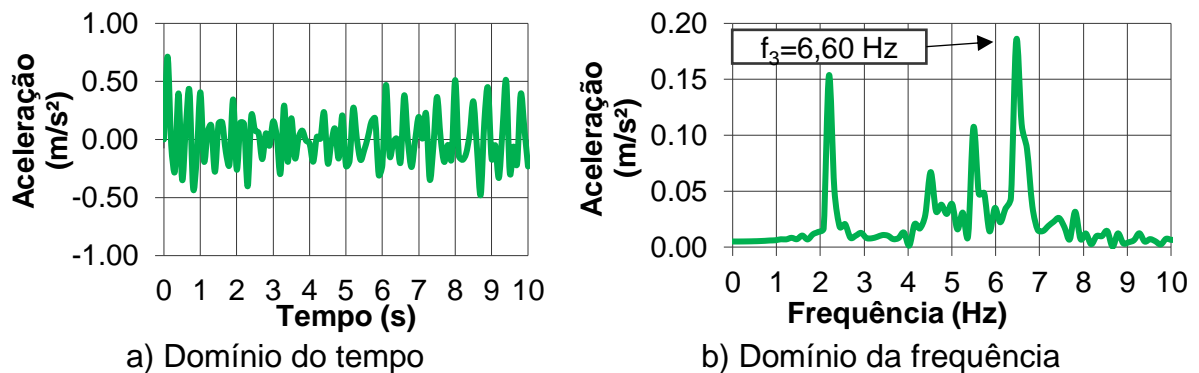


Figura 55 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-I

Tabela 19 - Resposta dinâmica estrutural MC-I

SE	AISC [36]			SCI [39]			Faisca [51]			Biodinâmico [52]		
	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV
	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}
A	6,20	1,31	3,02	6,21	1,30	3,18	1,10	0,66	1,56	0,66	0,22	0,49
B	0,95	0,30	0,78	1,02	0,35	0,91	0,09	0,02	0,06	0,82	0,17	0,40
C	0,58	0,24	0,58	0,71	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,36	0,12	0,29
D	1,08	0,42	1,06	1,30	0,50	1,27	0,11	0,03	0,08	0,96	0,23	0,55
E	5,15	1,14	2,82	6,33	1,34	3,25	1,02	0,54	1,19	0,56	0,21	0,47
F	5,15	1,14	2,82	6,33	1,34	3,25	1,02	0,54	1,19	0,56	0,21	0,47
G	5,15	1,14	2,82	6,33	1,34	3,25	1,02	0,54	1,19	0,51	0,21	0,47

Conforme Tabela 19 é possível visualizar as maiores respostas dinâmicas para o MC-I na seção A, correspondendo a seção crítica para os modelos tradicionais. No entanto, o modelo biodinâmico apresentou a maior resposta na seção D (seção localizada no centro geométrico da laje) devido a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos e suas respectivas localizações. Para fins de comparação, foram apresentadas as respostas do modelo biodinâmico também na seção A.

6.4.3 Modelo de carregamento II

Nesta seção são apresentadas figuras contendo a localização da carga aplicada no modelo de carregamento II (MC-II) em uma ilustração (Figura 56a) e em planta (Figura 56b), assim como as seções analisadas (A a G). Nas figuras seguintes são apresentados os deslocamentos e acelerações (no domínio do tempo e da frequência) na seção crítica D para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Finalmente, a Tabela 20 apresenta todos os resultados calculados para o MC-II.

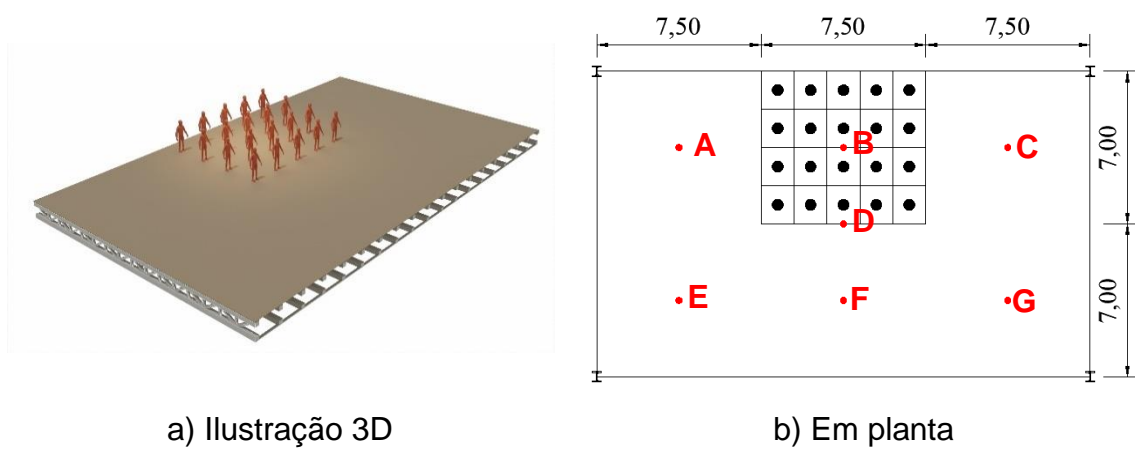


Figura 56 - Localização da carga para o MC-II

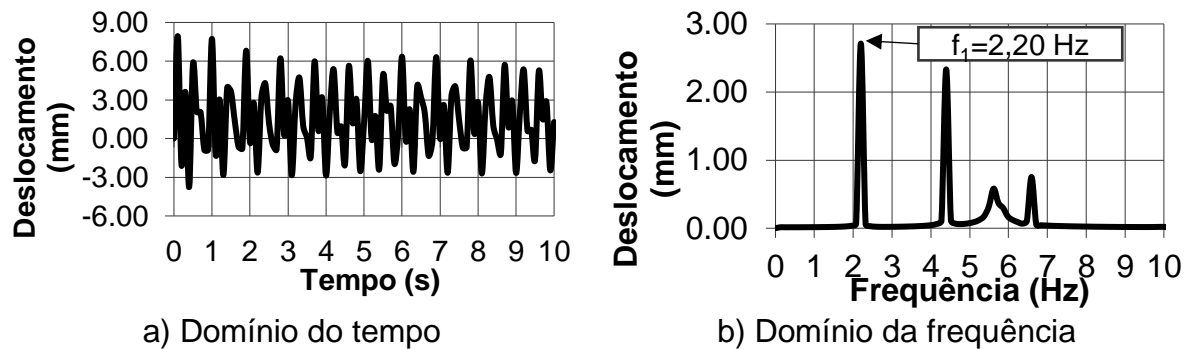


Figura 57 - Deslocamento na seção D para o modelo AISC para MC-II

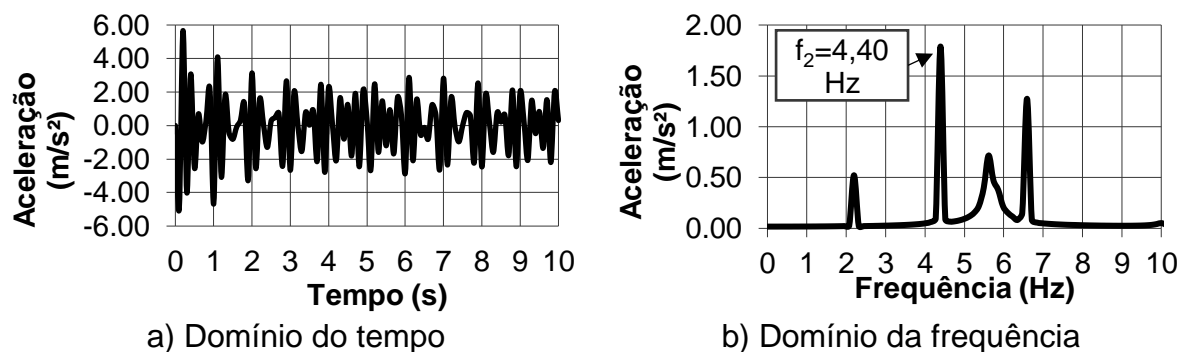
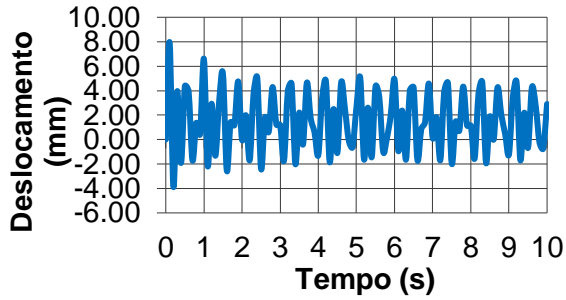
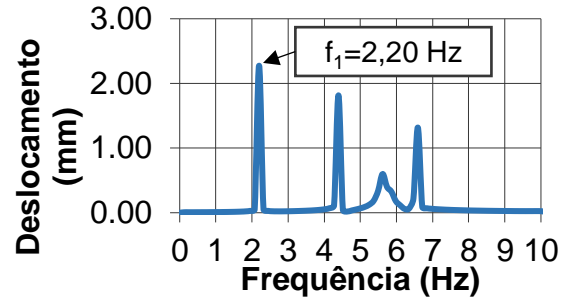


Figura 58 - Aceleração na seção D para o modelo AISC para MC-II

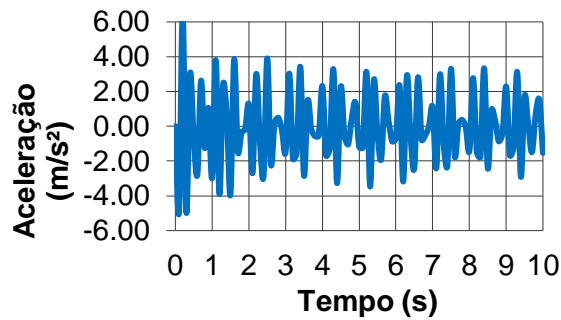


a) Domínio do tempo

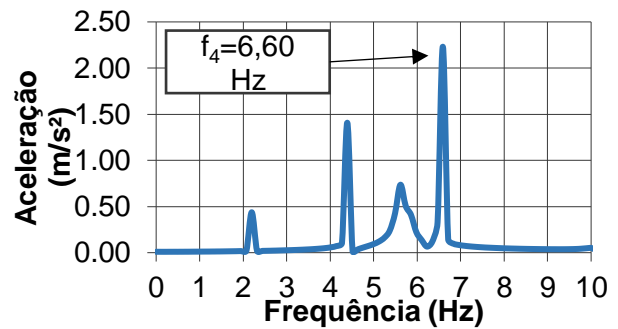


b) Domínio da frequência

Figura 59 - Deslocamento na seção D para o modelo SCI para MC-II

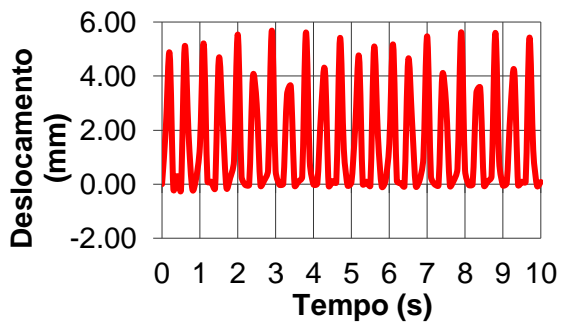


a) Domínio do tempo

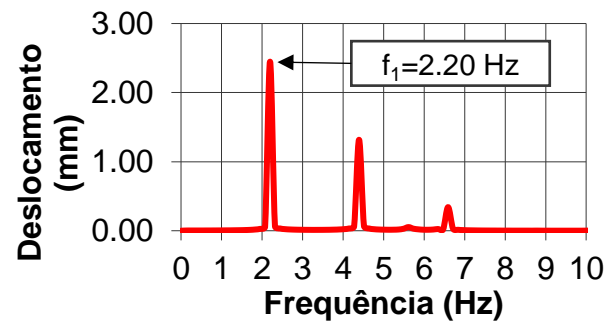


b) Domínio da frequência

Figura 60 - Aceleração na seção D para o modelo SCI para MC-II

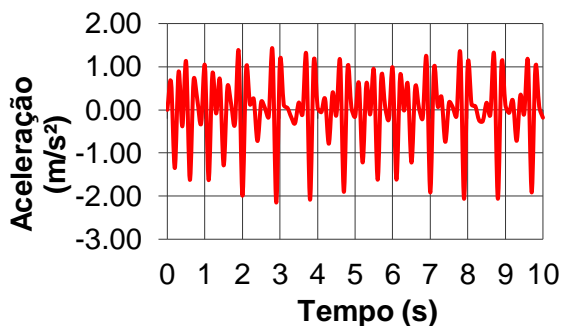


a) Domínio do tempo

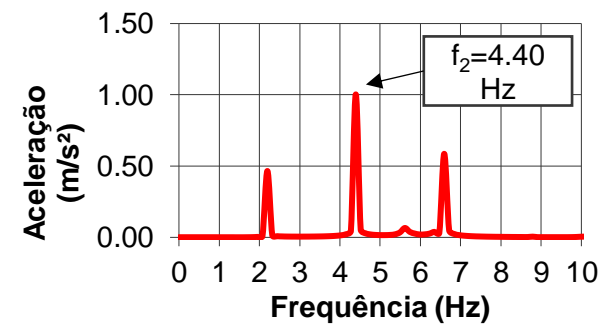


b) Domínio da frequência

Figura 61 - Deslocamento na seção D para o modelo Faisca para MC-II



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 62 - Aceleração na seção D para o modelo Faisca para MC-II

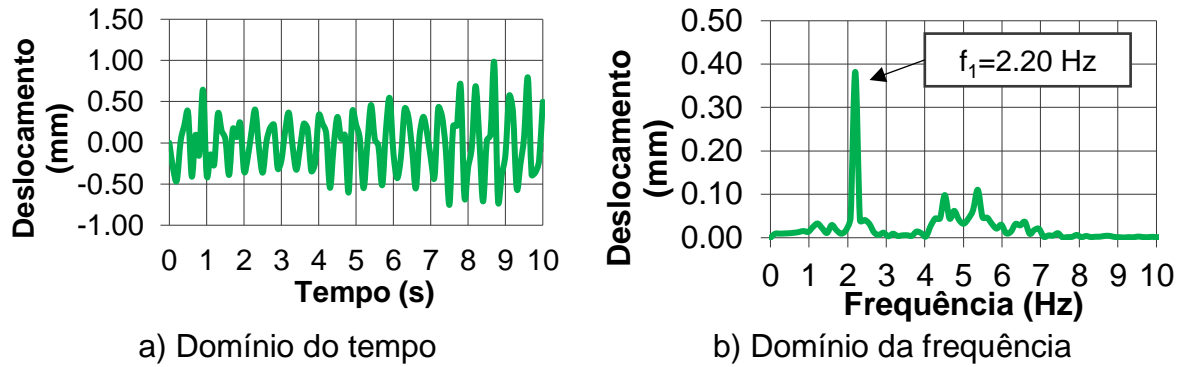


Figura 63 - Deslocamento na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-II

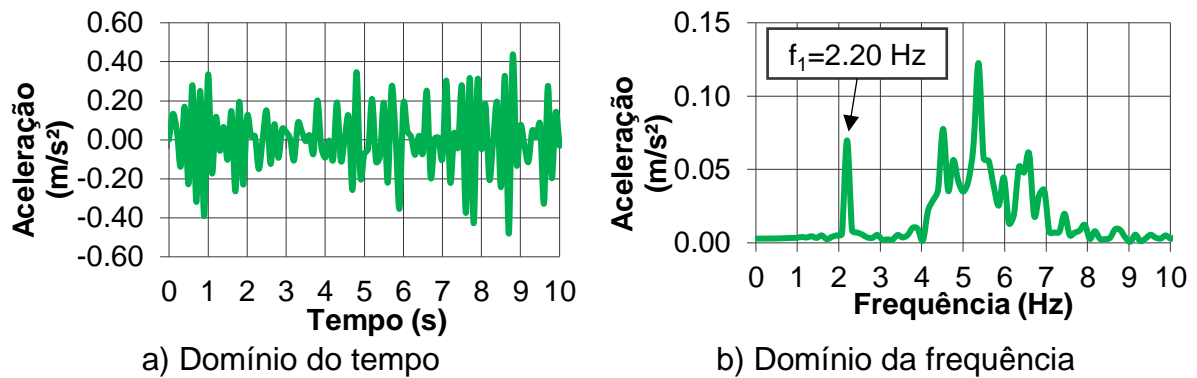


Figura 64 - Aceleração na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-II

Tabela 20 - Resposta dinâmica estrutural MC-II

SE	AISC [36]			SCI [39]			Faisca [51]			Biodinâmico [52]		
	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV
	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}
A	0,94	0,30	0,78	1,03	0,35	0,90	0,09	0,03	0,07	0,34	0,12	0,29
B	5,85	1,33	3,01	5,89	1,44	3,28	1,17	0,68	1,63	0,53	0,14	0,32
C	0,94	0,30	0,78	1,03	0,35	0,90	0,09	0,03	0,07	0,35	0,14	0,32
D	6,14	1,80	4,03	6,74	2,17	4,73	1,48	0,90	2,06	0,73	0,20	0,45
E	0,91	0,30	0,78	1,13	0,35	0,90	0,11	0,03	0,07	0,32	0,12	0,29
F	0,91	0,30	0,78	1,13	0,35	0,90	0,11	0,03	0,07	0,32	0,12	0,29
G	0,91	0,30	0,78	1,13	0,35	0,90	0,11	0,03	0,07	0,32	0,12	0,29

Conforme Tabela 20 é possível visualizar as maiores respostas dinâmicas para o MC-II na seção D, correspondendo a seção crítica para todos os modelos de representação da carga dinâmica de pessoas.

6.4.4 Modelo de carregamento III

Nesta continuidade são apresentadas figuras contendo a localização da carga aplicada no modelo de carregamento III (MC-III) em uma ilustração (Figura 65a) e em planta (Figura 65b), como também as seções analisadas (A a G). Seguinte, são apresentados os deslocamentos e acelerações (no domínio do tempo e da frequência) na seção crítica D para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Finalmente, a Tabela 21 apresenta todos os resultados calculados para o MC-III.

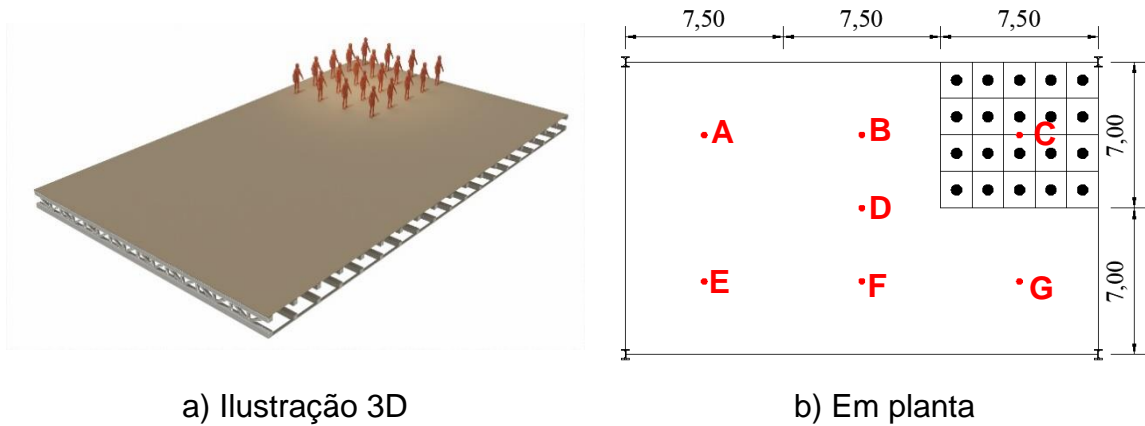


Figura 65 - Localização da carga para o MC-III

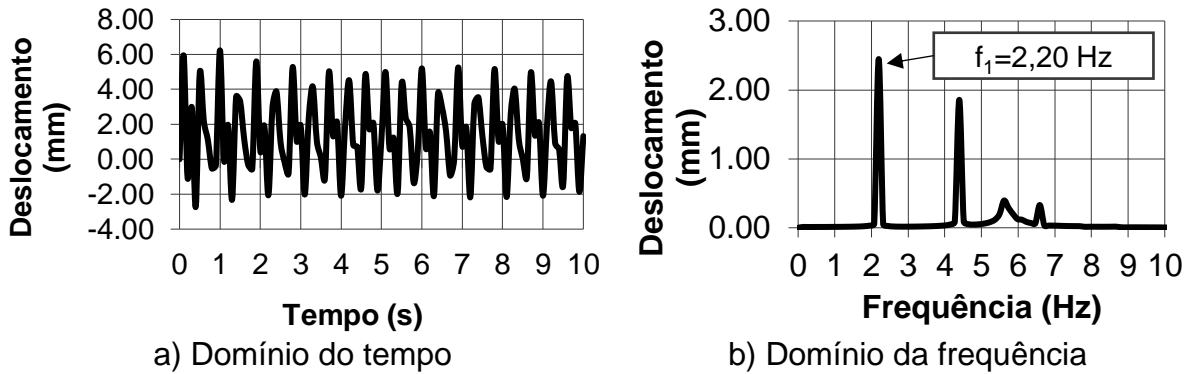


Figura 66 - Deslocamento na seção C para o modelo AISC para MC-III

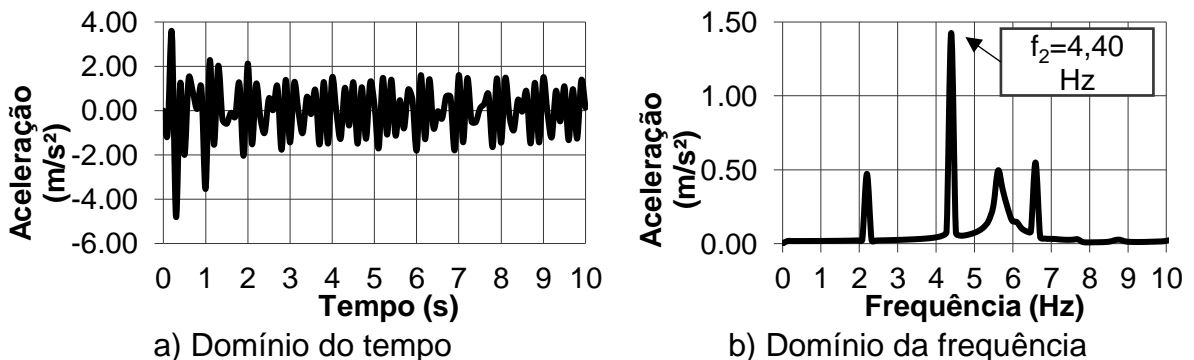
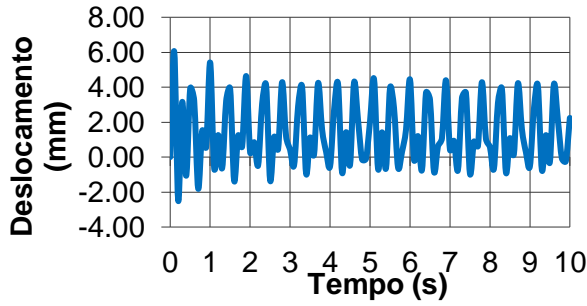
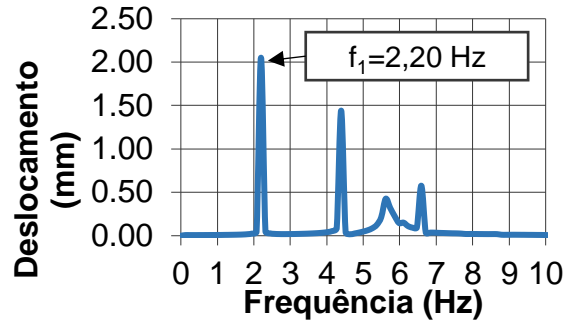


Figura 67 - Aceleração na seção C para o modelo AISC para MC-III

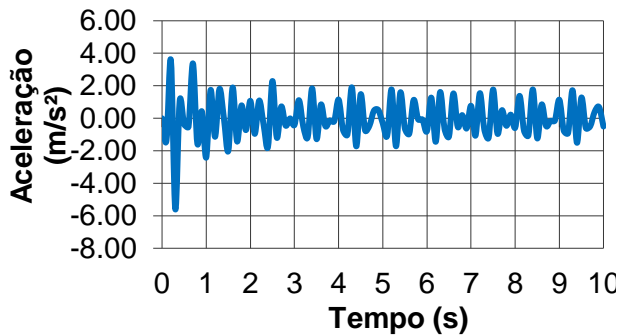


a) Domínio do tempo

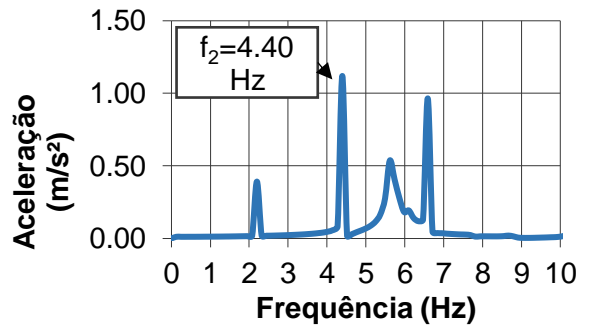


b) Domínio da frequência

Figura 68 - Deslocamento na seção C para o modelo SCI para MC-III

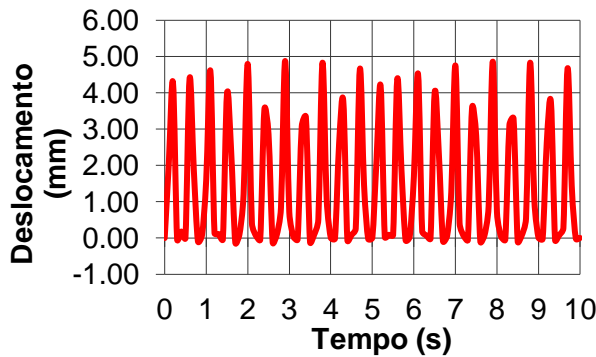


a) Domínio do tempo

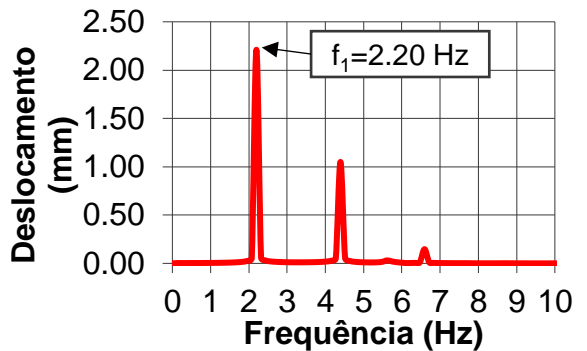


b) Domínio da frequência

Figura 69 - Aceleração na seção C para o modelo SCI para MC-III

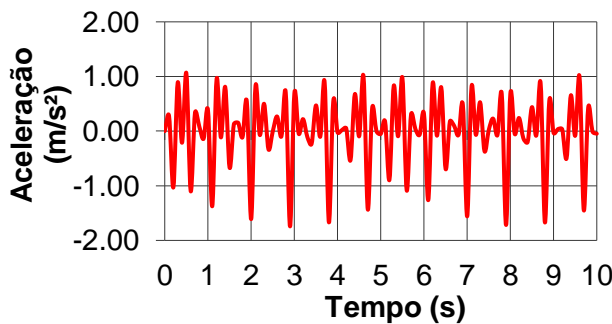


a) Domínio do tempo

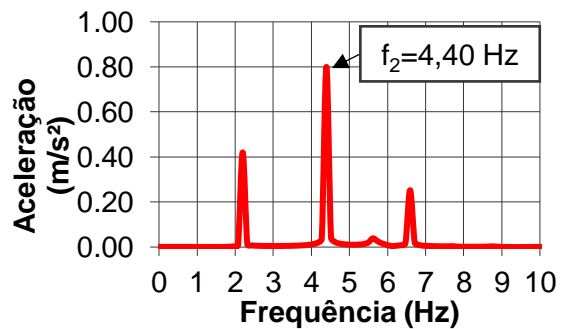


b) Domínio da frequência

Figura 70 - Deslocamento na seção C para o modelo Faisca para MC-III



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 71 - Aceleração na seção C para o modelo Faisca para MC-III

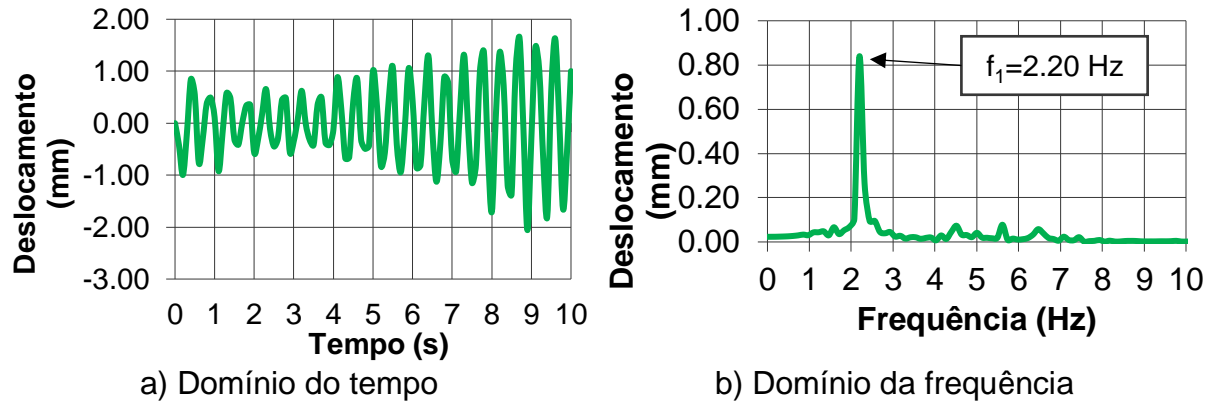


Figura 72 - Deslocamento na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-III

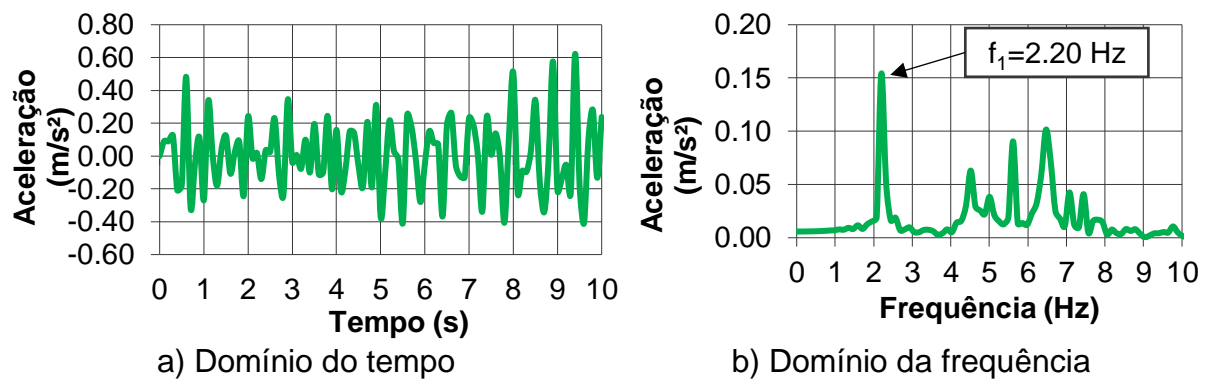


Figura 73 - Aceleração na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-III

Tabela 21 - Resposta dinâmica estrutural MC-III

SE	AISC [36]			SCI [39]			Faisca [51]			Biodinâmico [52]		
	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV
	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}
A	0,58	0,24	0,58	0,71	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,32	0,10	0,24
B	0,95	0,30	0,78	1,02	0,35	0,91	0,09	0,02	0,06	0,60	0,14	0,35
C	6,20	1,31	3,02	6,21	1,30	3,18	1,10	0,66	1,56	0,81	0,25	0,57
D	1,08	0,42	1,06	1,30	0,50	1,27	0,11	0,03	0,08	0,84	0,20	0,48
E	0,67	0,24	0,58	0,80	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,32	0,10	0,24
F	0,67	0,24	0,58	0,80	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,32	0,10	0,24
G	0,67	0,24	0,58	0,80	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,32	0,12	0,29

Conforme Tabela 21 é possível visualizar as maiores respostas dinâmicas para o MC-III na seção C, correspondendo a seção crítica para os modelos tradicionais. Entretanto, o modelo biodinâmico apresentou a maior resposta na seção D (seção localizada no centro geométrico da laje). Com fins comparativos, foram apresentadas as respostas do modelo biodinâmico também na seção C.

6.4.5 Modelo de carregamento IV

Na sequência são apresentadas figuras contendo a localização da carga aplicada no modelo de carregamento IV (MC-IV) em uma ilustração (Figura 74a) e em planta (Figura 74b), assim como as seções analisadas (A a G). Portanto, as figuras seguintes apresentam os deslocamentos e acelerações (no domínio do tempo e da frequência) na seção crítica E para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Finalmente, a Tabela 22 apresenta todos os resultados calculados para o MC-IV.

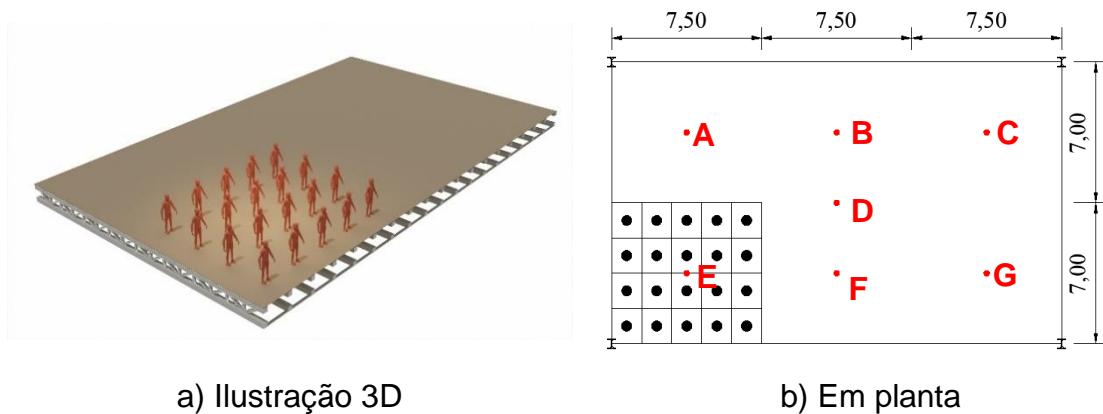


Figura 74 - Localização da carga para o MC-IV

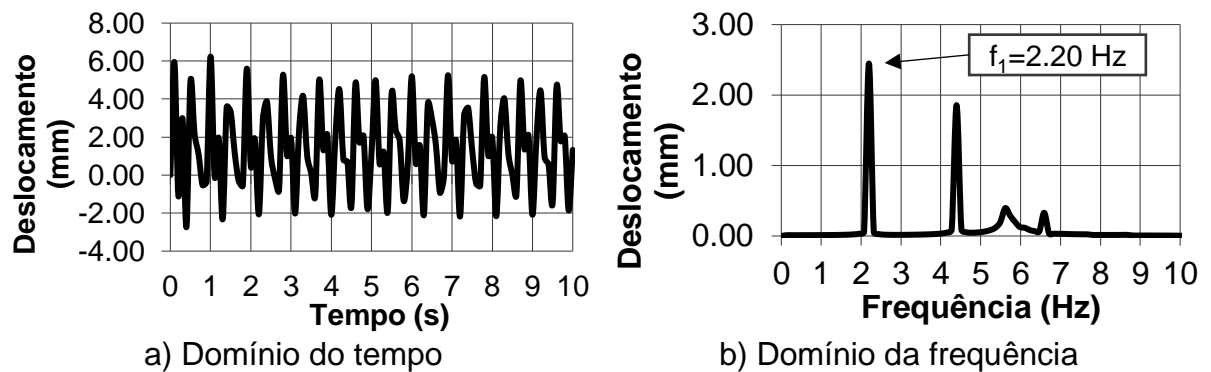


Figura 75 - Deslocamento na seção E para o modelo AISC para MC-IV

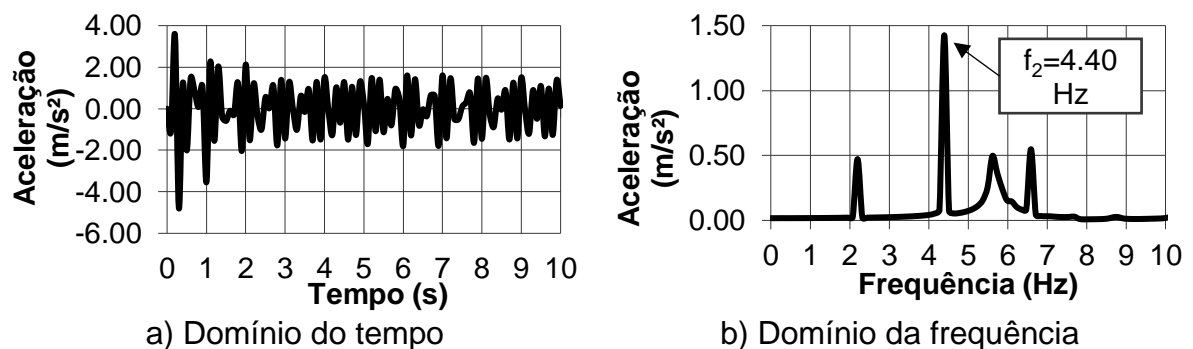
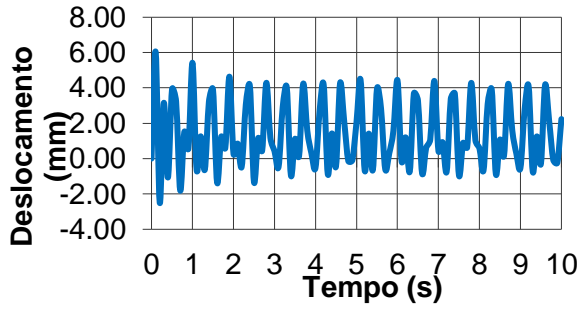
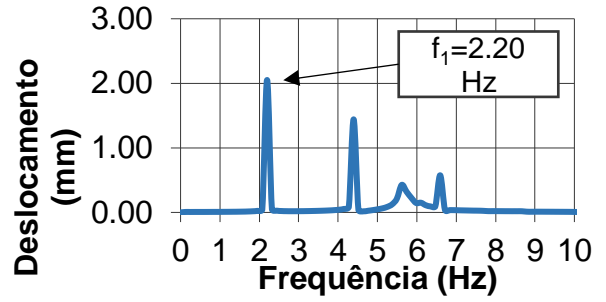


Figura 76 - Aceleração na seção E para o modelo AISC para MC-IV

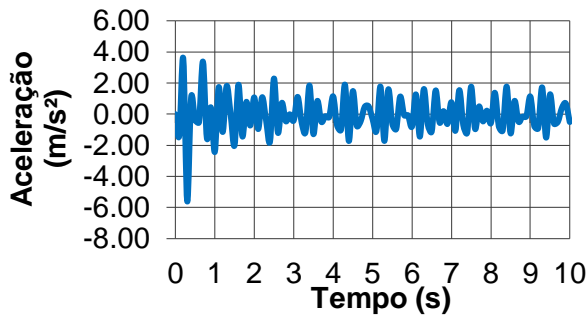


a) Domínio do tempo

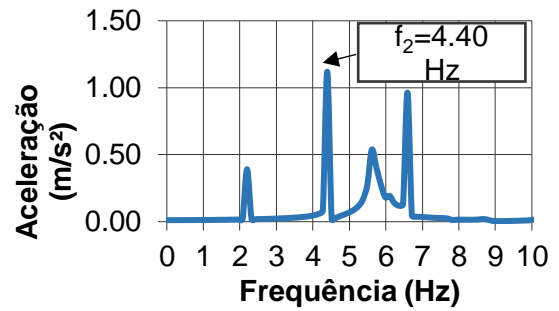


b) Domínio da frequência

Figura 77 - Deslocamento na seção E para o modelo SCI para MC-IV

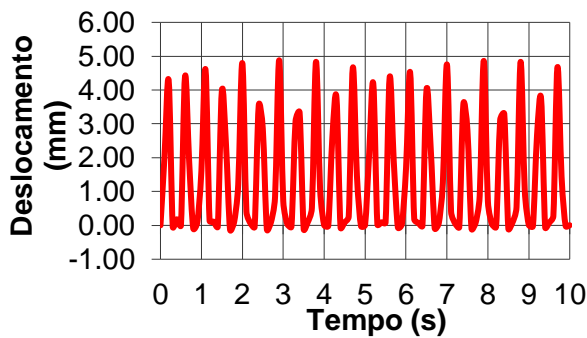


a) Domínio do tempo

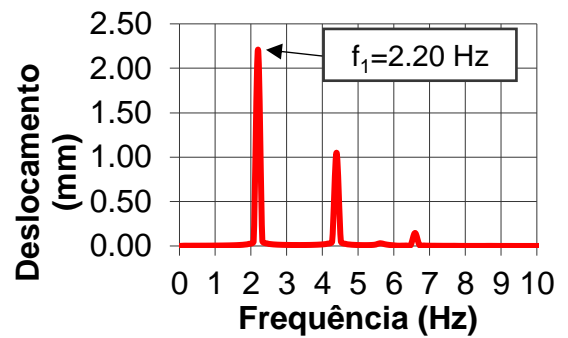


b) Domínio da frequência

Figura 78 - Aceleração na seção E para o modelo SCI para MC-IV

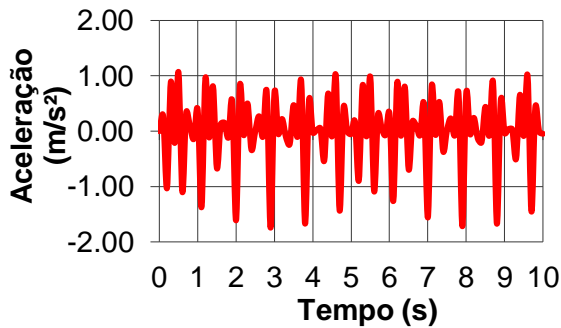


a) Domínio do tempo

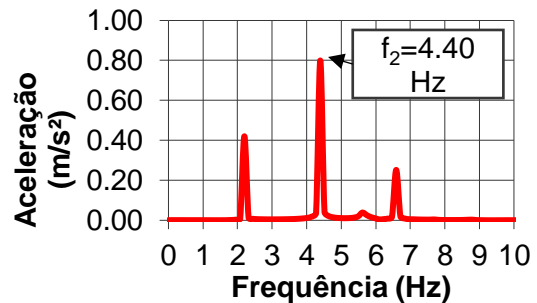


b) Domínio da frequência

Figura 79 - Deslocamento na seção E para o modelo Faisca para MC-IV



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 80 - Aceleração na seção E para o modelo Faisca para MC-IV

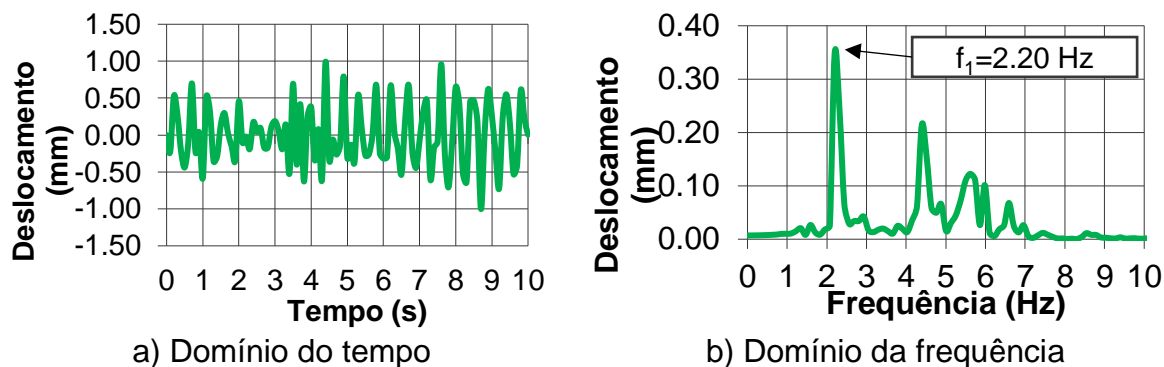


Figura 81 - Deslocamento na seção E para o modelo Biodinâmico para MC-IV

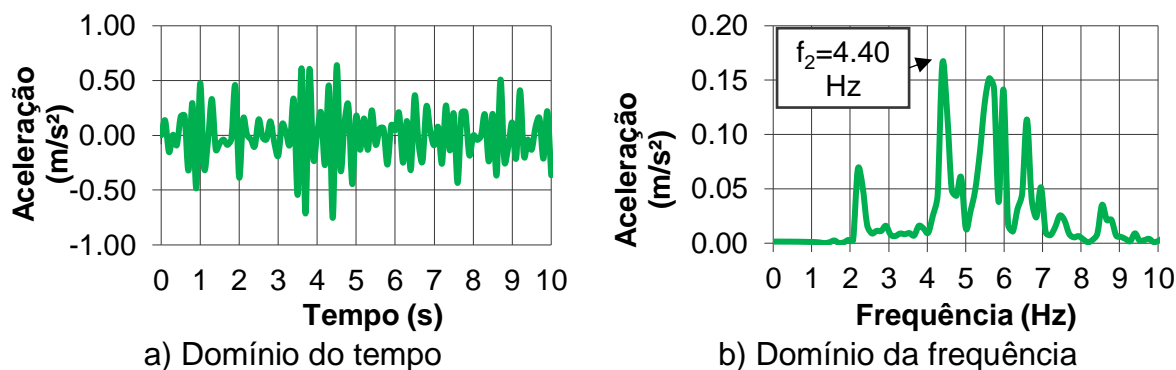


Figura 82 - Aceleração na seção E para o modelo Biodinâmico para MC-IV

Tabela 22 - Resposta dinâmica estrutural MC-IV

SE	AISC [36]			SCI [39]			Faisca [51]			Biodinâmico [52]		
	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV
	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}
A	5,16	1,14	2,82	6,33	1,34	3,25	1,02	0,54	1,19	0,97	0,31	0,76
B	1,01	0,30	0,78	1,24	0,35	0,91	0,10	0,03	0,07	0,89	0,16	0,40
C	0,67	0,24	0,58	0,80	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,33	0,13	0,30
D	1,08	0,42	1,06	1,30	0,50	1,27	0,11	0,03	0,08	0,99	0,22	0,54
E	6,20	1,31	3,02	6,21	1,30	3,18	1,10	0,66	1,56	0,96	0,32	0,79
F	6,20	1,31	3,02	6,21	1,30	3,18	1,10	0,66	1,56	0,96	0,32	0,79
G	6,20	1,31	3,02	6,21	1,30	3,18	1,10	0,66	1,56	0,96	0,32	0,79

Conforme Tabela 22 podemos visualizar as maiores respostas dinâmicas para o MC-IV na seção E, F e G correspondendo às seções críticas para os modelos tradicionais. É possível observar a igualdade das respostas calculadas para estas seções, este comportamento se dá devido a simetria e aos parâmetros modais da estrutura. Neste caso, o modelo biodinâmico apresentou a maior resposta na seção D, com valor máximo da resposta próximo da calculada para a seção E, que foi escolhida para fins comparativos.

6.4.6 Modelo de carregamento V

Nesta seção as figuras contendo a localização da carga aplicada no modelo de carregamento V (MC-V) são apresentadas em uma ilustração (Figura 83a) e em planta (Figura 83b), assim como as seções analisadas (A a G). Em continuidade, as figuras seguintes apresentam os deslocamentos e acelerações (no domínio do tempo e da frequência) na seção crítica D para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Enfim, a Tabela 23 apresenta todos os resultados calculados para o MC-V.

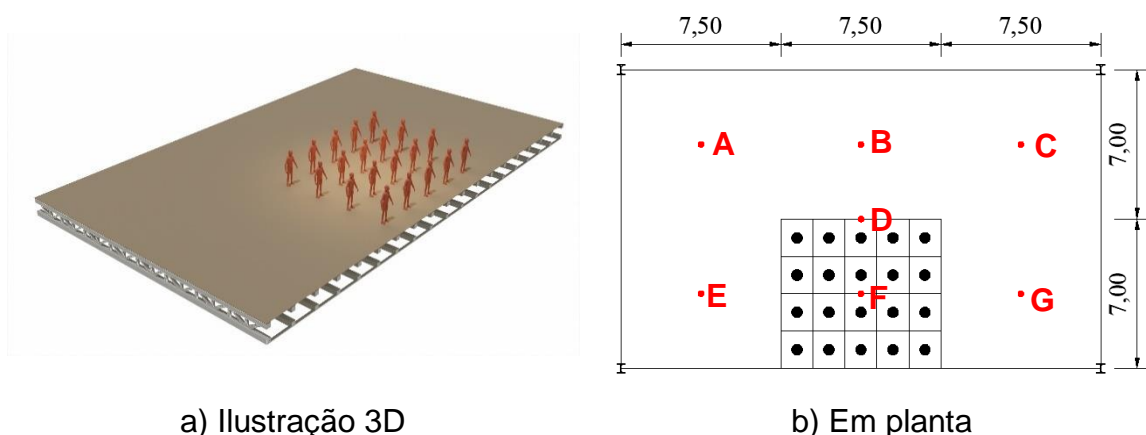


Figura 83 - Localização da carga para o MC-V

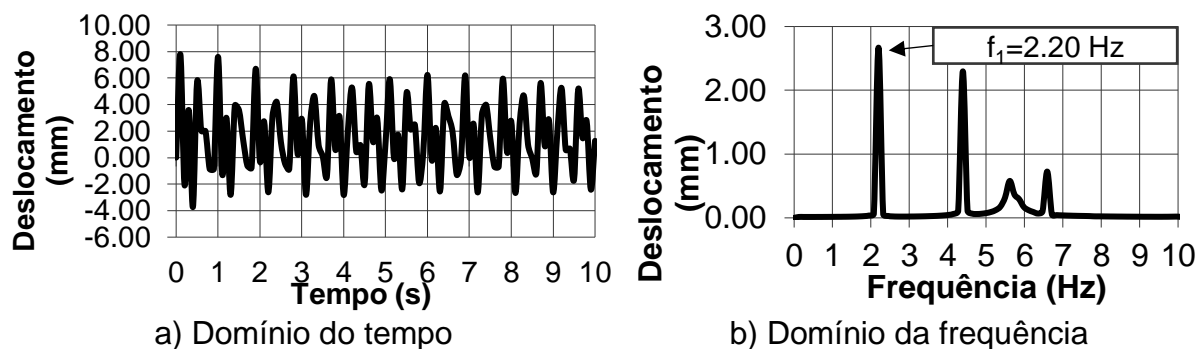


Figura 84 - Deslocamento na seção D para o modelo AISC para MC-V

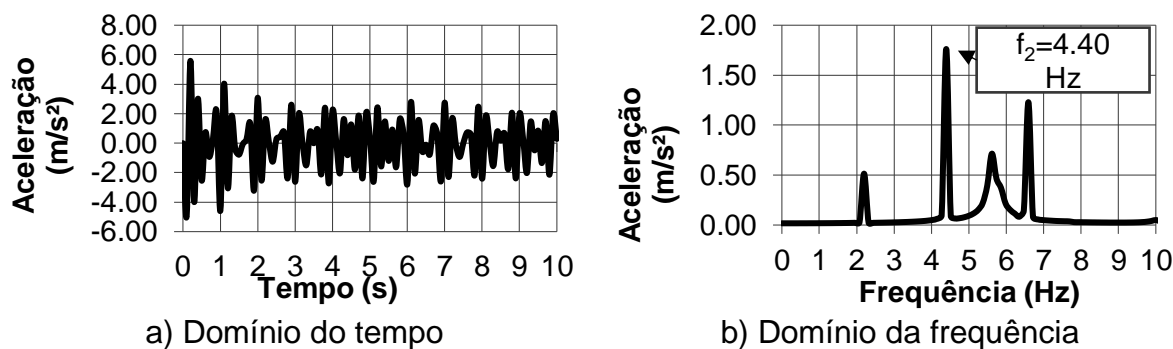


Figura 85 - Aceleração na seção D para o modelo AISC para MC-V

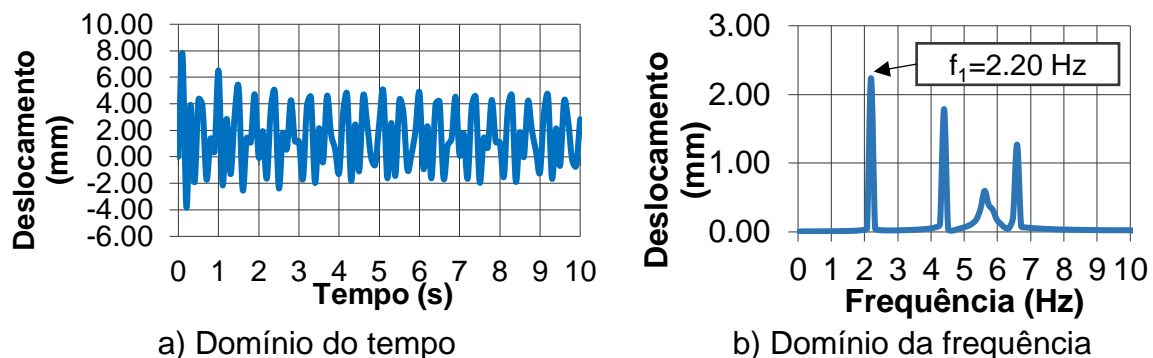


Figura 86 - Deslocamento na seção D para o modelo SCI para MC-V

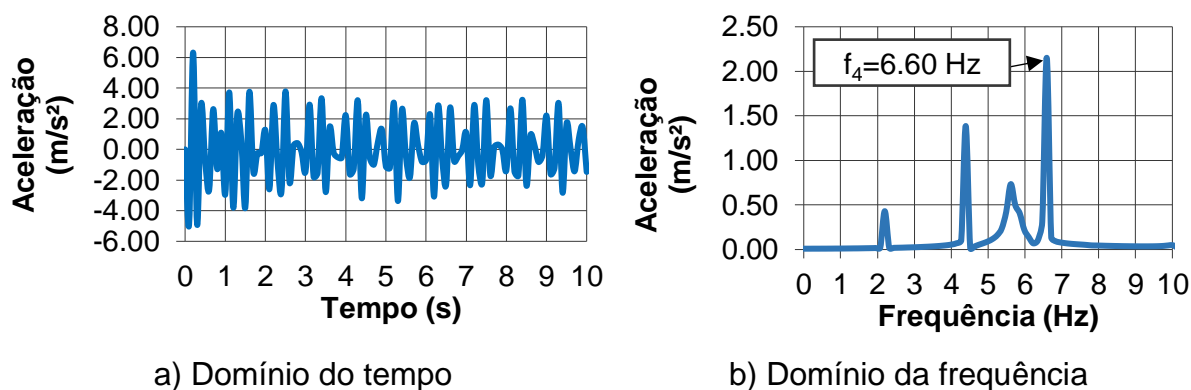


Figura 87 - Aceleração na seção D para o modelo SCI para MC-V

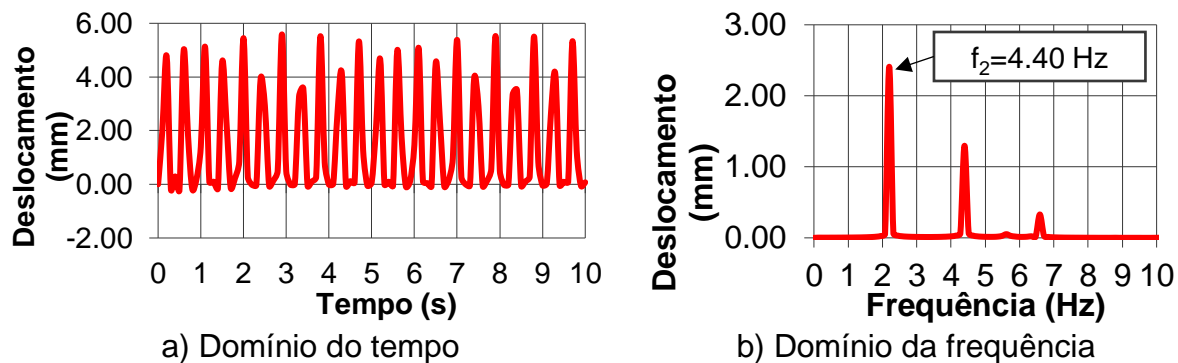


Figura 88 - Deslocamento na seção D para o modelo Faisca para MC-V

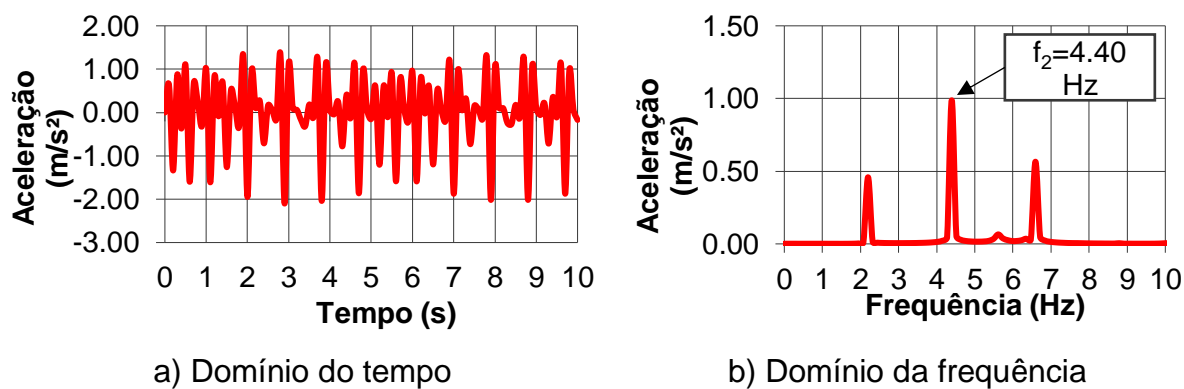


Figura 89 - Aceleração na seção D para o modelo Faisca para MC-V

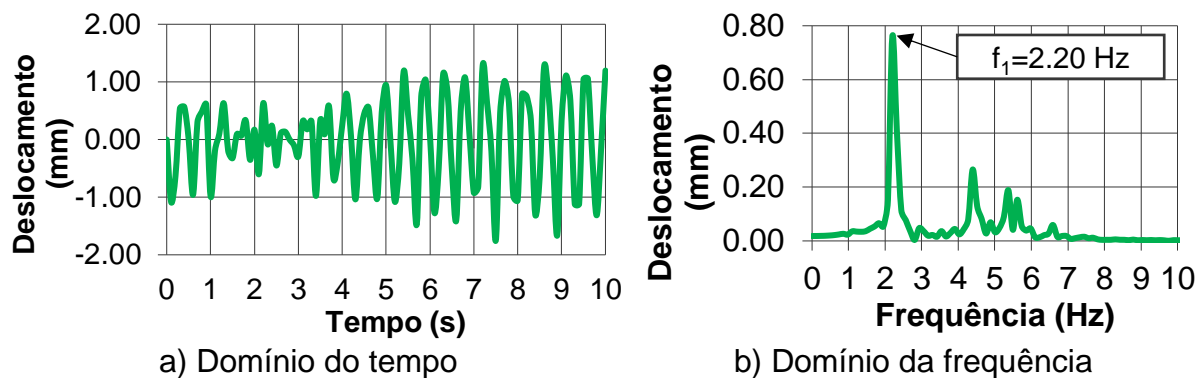


Figura 90 - Deslocamento na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-V

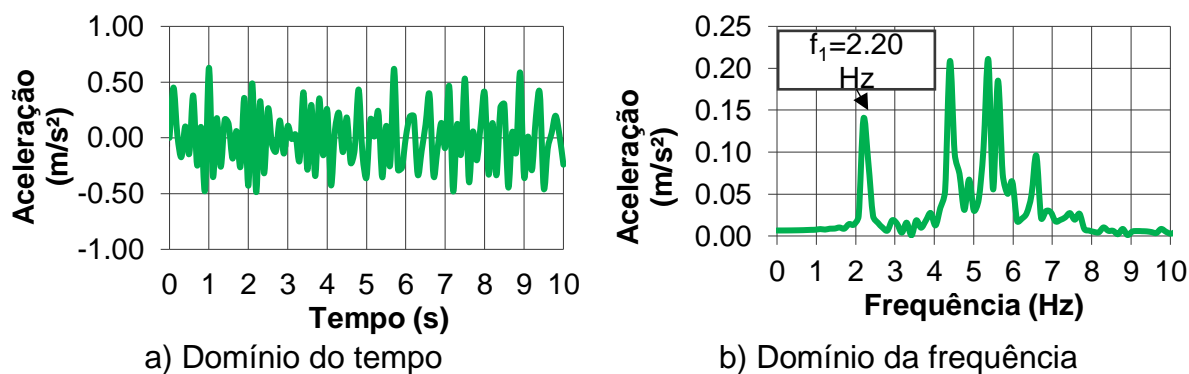


Figura 91 - Aceleração na seção D para o modelo Biodinâmico para MC-V

Tabela 23 - Resposta dinâmica estrutural MC-V

SE	AISC [36]			SCI [39]			Faisca [51]			Biodinâmico [52]		
	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV
	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}
A	0,92	0,29	0,77	1,08	0,34	0,88	0,10	0,03	0,07	0,30	0,10	0,23
B	4,41	1,16	2,75	5,58	1,48	3,28	1,10	0,56	1,25	0,63	0,22	0,51
C	0,91	0,29	0,77	1,11	0,34	0,88	0,10	0,03	0,07	0,33	0,11	0,25
D	5,99	1,77	3,96	6,60	2,11	4,61	1,43	0,88	2,02	0,95	0,34	0,78
E	0,93	0,29	0,77	1,00	0,34	0,89	0,08	0,03	0,06	0,30	0,10	0,23
F	0,93	0,29	0,77	1,00	0,34	0,89	0,08	0,03	0,06	0,30	0,10	0,23
G	0,93	0,29	0,77	1,00	0,34	0,89	0,08	0,03	0,06	0,30	0,10	0,23

De acordo com a Tabela 23, podemos visualizar as maiores respostas dinâmicas para o MC-V na seção D, correspondendo a seção crítica para todos os modelos de carga dinâmica representativo das pessoas.

6.4.7 Modelo de carregamento VI

Dando continuidade, esta seção apresenta as figuras contendo a localização da carga aplicada no modelo de carregamento VI (MC-VI) em uma ilustração (Figura 83^a) e em planta (Figura 83b), como também as seções analisadas (A a G). Em seguida, as próximas figuras apresentam os deslocamentos e acelerações (no domínio do tempo e da frequência) na seção crítica D para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Finalmente, a Tabela 24 apresenta todos os resultados calculados para o MC-VI.

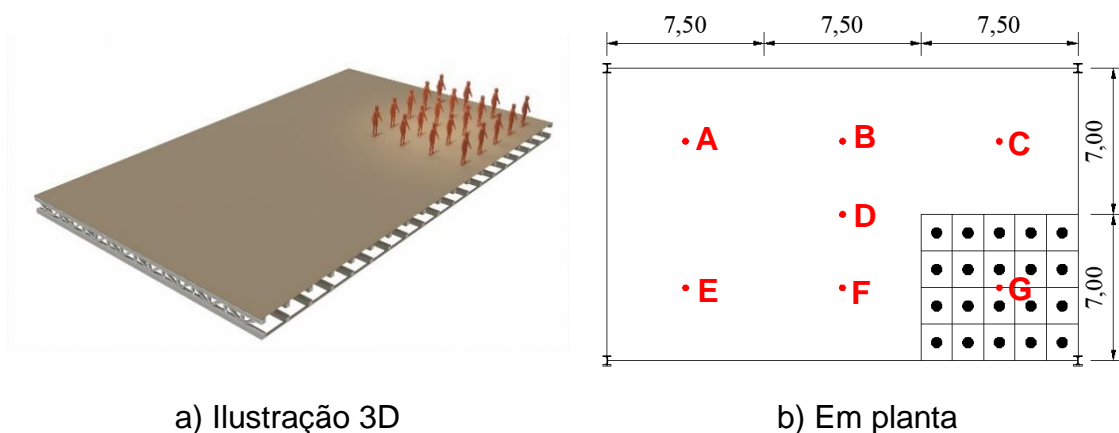


Figura 92 - Localização da carga para o MC-VI

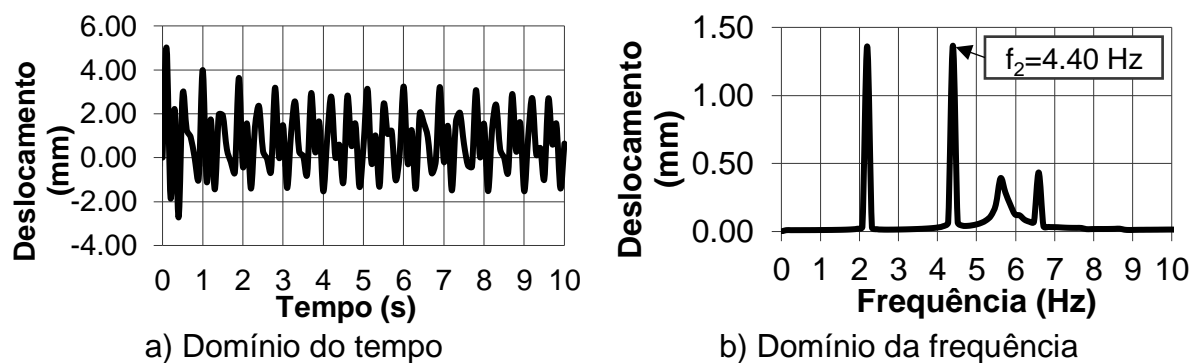


Figura 93 - Deslocamento na seção C para o modelo AISC para MC-VI

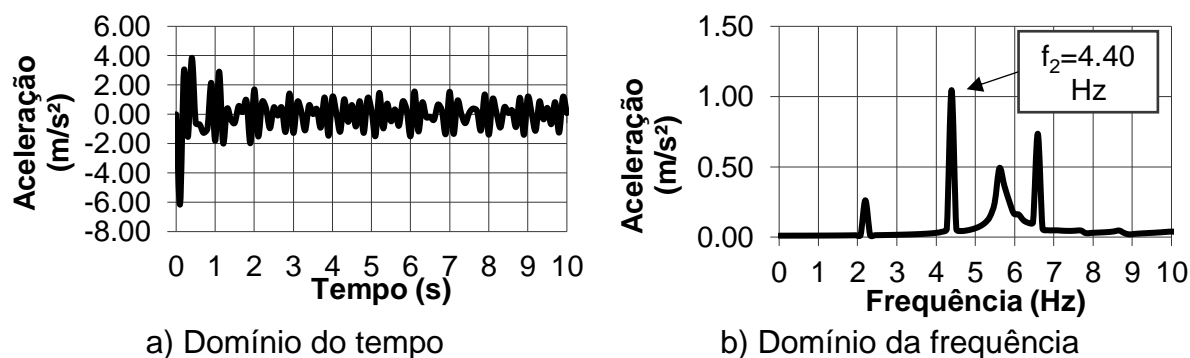
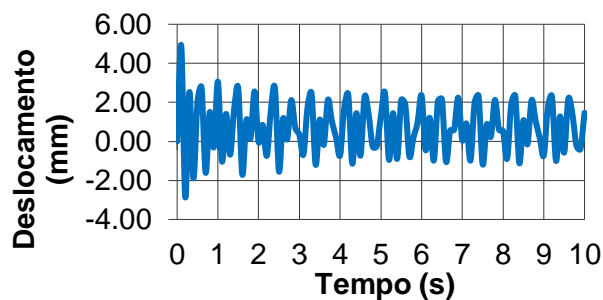
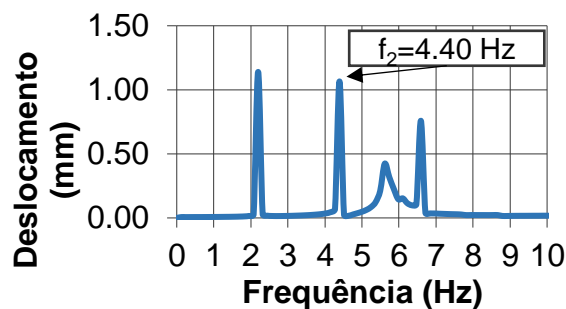


Figura 94 - Aceleração na seção C para o modelo AISC para MC-VI

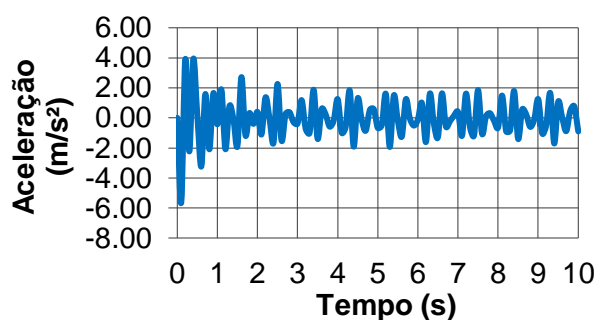


a) Domínio do tempo

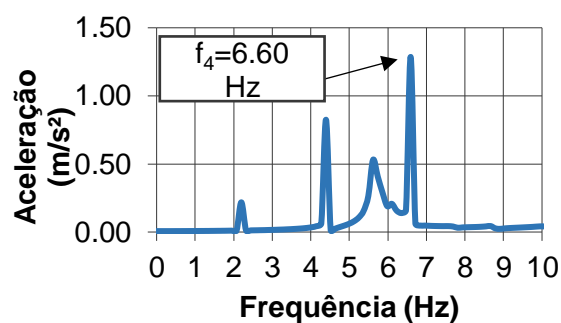


b) Domínio da frequência

Figura 95 - Deslocamento na seção C para o modelo SCI para MC-VI

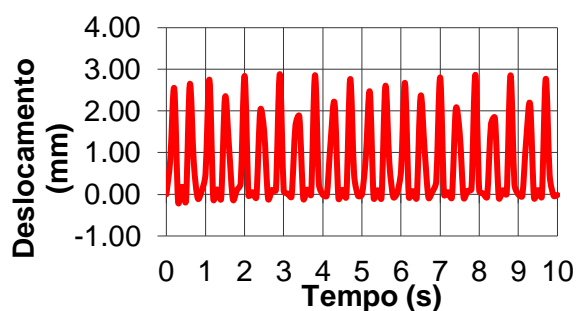


a) Domínio do tempo

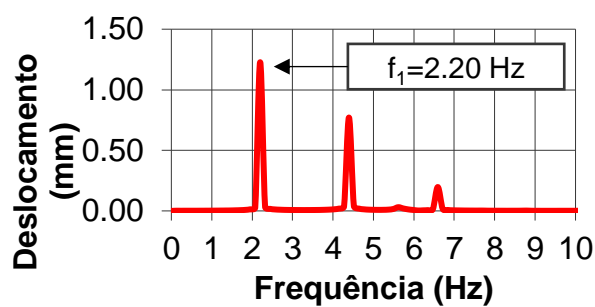


b) Domínio da frequência

Figura 96 - Aceleração na seção C para o modelo SCI para MC-VI

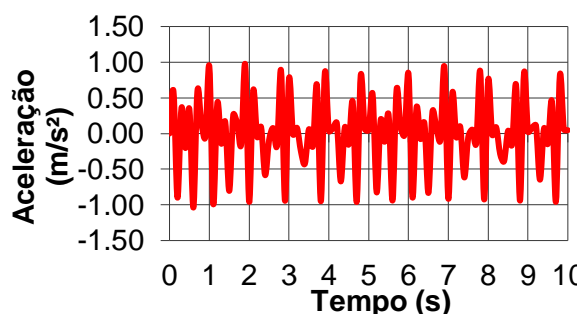


a) Domínio do tempo

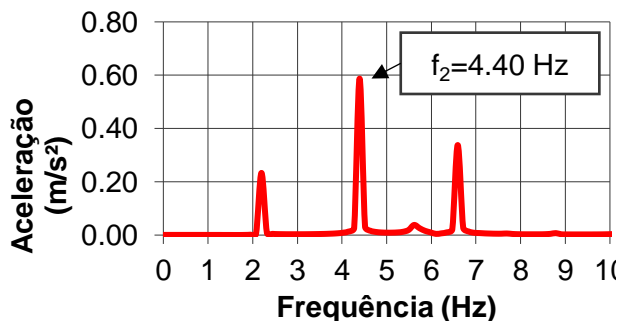


b) Domínio da frequência

Figura 97 - Deslocamento na seção C para o modelo Faisca para MC-VI



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 98 - Aceleração na seção C para o modelo Faisca para MC-VI

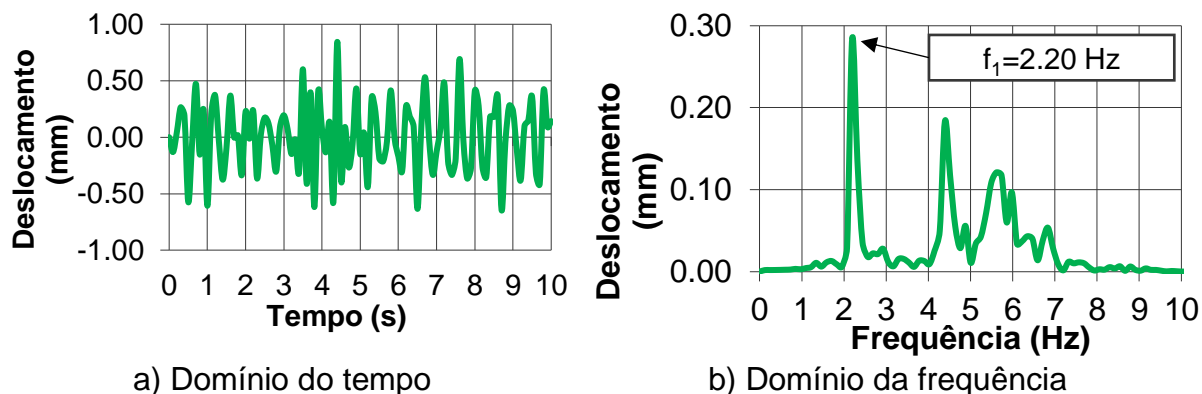


Figura 99 - Deslocamento na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-VI

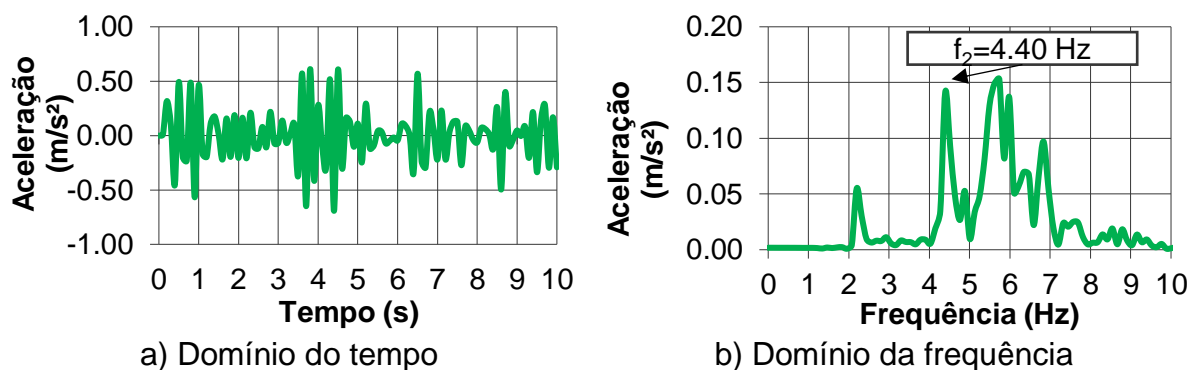


Figura 100 - Aceleração na seção C para o modelo Biodinâmico para MC-VI

Tabela 24 - Resposta dinâmica estrutural MC-VI

SE	AISC [36]			SCI [39]			Faisca [51]			Biodinâmico [52]		
	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV	a_p	$a_{w,rms}$	VDV
	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}	m/s ²	m/s ²	m/s ^{1,75}
A	0,67	0,24	0,58	0,80	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,36	0,12	0,28
B	1,01	0,30	0,78	1,24	0,35	0,91	0,10	0,03	0,07	0,71	0,18	0,42
C	5,16	1,14	2,82	6,34	1,34	3,26	1,02	0,54	1,19	0,90	0,32	0,76
D	1,08	0,42	1,06	1,30	0,50	1,27	0,11	0,03	0,08	0,96	0,25	0,58
E	0,58	0,24	0,58	0,71	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,37	0,12	0,28
F	0,58	0,24	0,58	0,71	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,37	0,12	0,28
G	0,58	0,24	0,58	0,71	0,29	0,72	0,05	0,02	0,04	0,37	0,12	0,28

Conforme Tabela 24 é possível visualizar as maiores respostas dinâmicas para o MC-VI na seção C, correspondendo a seção crítica para os modelos tradicionais. No entanto, o modelo biodinâmico apresentou a maior resposta na seção D. Com fins de comparação, foram apresentadas as respostas do modelo biodinâmico também na seção C.

6.4.8 Comparação dos resultados

Com base nos resultados apresentados neste capítulo, uma comparação entre a resposta dinâmica calculada através das funções tradicionais e a modelagem matemática do sistema biodinâmico é realizada.

No que tange a resposta dinâmica em termos de aceleração de pico (a_p), as respostas calculadas para os modelos de “força-dura” são comparadas com as calculadas para o modelo biodinâmico, conforme Tabela 25. Nesta tabela os resultados da comparação são apresentados para cada modelo de carregamento (MC) em estudo em sua respectiva seção estrutural analisada previamente.

Conforme esperado, os modelos de “força-dura” apresentam respostas muito mais conservadoras do que as calculadas a partir do emprego do modelo biodinâmico, apresentando a maior diferença (841%) no modelo SCI [39] quando comparadas as acelerações de pico para a mesma seção estrutural A [$a_{p\text{-biodinâmico}} = 0,66 \text{ m/s}^2$; $a_{p\text{-SCI}} = 6,21 \text{ m/s}^2$]. A menor diferença percentual entre as respostas foi para o modelo tradicional Faisca [51], onde a resposta de aceleração de pico para a seção estrutural C é apenas 13% maior do que a calculada com base no uso do modelo biodinâmico [$a_{p\text{-biodinâmico}} = 0,90 \text{ m/s}^2$; $a_{p\text{-Faisca}} = 1,02 \text{ m/s}^2$].

Tabela 25 - Comparativo entre os modelos “força-dura” e biodinâmico (a_p)

Modelo de carregamento (MC)	Seção Estrutural Avaliada	Diferença entre os modelos de “força-dura” e o modelo biodinâmico em termos de a_p		
		AISC [36]	SCI [39]	Faisca [51]
I	A	839%	841%	67%
II	D	741%	823%	103%
III	C	665%	667%	36%
IV	E	546%	547%	15%
V	D	531%	595%	51%
VI	C	473%	604%	13%

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho de pesquisa diz respeito a avaliação do comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) quando submetidos a atividades humanas rítmicas e do conforto humano. Para tal, um sistema estrutural misto foi investigado com base na modelagem numérico-computacional via método dos elementos finitos com emprego do programa ANSYS. Com base neste modelo, foram feitas uma análise modal (autovalores e autovetores), uma análise harmônica e uma série de análises transientes, incluindo nestas, a representação da carga produzida pela ação humana. Neste contexto, a representação da carga dinâmica induzida por atividades rítmicas humanas foi desenvolvida a partir de funções matemáticas tradicionais de “força-dura” e através do uso dos sistemas biodinâmicos, que visam incorporar as características de cada indivíduo a análise, além de inserir a interação humano-estrutura.

Portanto, considerando o contexto do problema relacionado a vibrações excessivas associadas a atividade humana, este estudo apresentou uma metodologia expositiva e comparativa, baseada em normas e guias de projeto, para avaliação da resposta dinâmica com objetivo de resguardar o conforto humano.

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas através do estudo paramétrico desenvolvido neste trabalho de pesquisa, quanto às respostas obtidas a partir da representação tradicional da carga dinâmica e a partir do uso dos sistemas biodinâmicos. Além disso, são avaliados os critérios de conforto humano, onde, baseado nas normativas, o piso misto em estudo não os atende.

7.1. Conclusões

Apresenta-se a seguir as conclusões obtidas ao longo deste estudo, onde foi realizada uma investigação de cunho numérico, em função das análises modal, harmônica e transiente do piso misto (aço-concreto), além da avaliação do conforto humano.

a) Análise modal (autovalores e autovetores)

A análise de frequências e modos de vibração indicou a tendência de possíveis problemas relacionados a vibrações excessivas. Tal fato se ocorre devido a frequência fundamental ($f_{01}=5,61$ Hz) estar abaixo do valor mínimo recomendado [$f_{\min\text{-NBR } 6118} = 9,6$ Hz; $f_{\min\text{-AISC}} = 9,2$ Hz; $f_{\min\text{-NBR } 8800} = 8$ Hz]. Além disso, os valores das dez primeiras frequências naturais (5,61 Hz a 8,75 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 [51] e 4,5 a 8,4 Hz de acordo com Ellis e Ji [53]. 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.

b) Análise harmônica

A partir desta análise, observou-se a existência de picos de resposta bem definidos coincidentes com a primeira, terceira, quinta e sétima frequência natural do piso misto investigado, sendo o terceiro modo de vibração ($f_{03} = 5,77$ Hz) o que apresentou a principal contribuição e transferência de energia na resposta dinâmica do piso misto (aço-concreto). Portanto, baseado na contribuição dos modos, é observada a tendência de prováveis problemas relacionados a vibrações excessivas.

c) Análise de vibração forçada

Esta análise foi performada a partir do uso dos modelos de representação da carga dinâmica por “força-dura” e por modelos biodinâmicos, este considerando a interação humano-estrutura, baseado no modelo numérico-computacional. Desse modo, foram obtidos os deslocamentos e as acelerações do piso misto (aço-concreto) com objetivo de avaliar o comportamento estrutural e o conforto humano.

Para tal, foram investigadas seis situações, nomeadas como modelo de carregamento (MC), onde a carga dinâmica de vinte pessoas praticando atividades aeróbicas foi aplicada. Neste contexto, a aceleração de pico (a_p), a aceleração RMS

($a_{w,rms}$) e os valores de dose de vibração (VDV) foram obtidos com objetivo de comparação com os valores limites para avaliar o conforto humano.

Em relação às acelerações de pico, esta análise indicou que o limite de conforto humano proposto no guia de projeto AISC [34] ($a_p < 0,50 \text{ m/s}^2$) foi excedido para todos os modelos de carregamento (MC I ao VI) quando aplicadas as cargas dinâmicas do guia AISC [36], guia SCI [39], do trabalho de pesquisa da Faisca [51] e da Campista [52]. O resumo dos valores críticos de aceleração de pico obtidos em cada MC investigado para cada representação da carga dinâmica é apresentado na Tabela 26, onde o vermelho claro representa um valor acima do limite e o verde dentro do limite.

Tabela 26 - Resumo das acelerações de pico nas seções críticas

Limite AISC [36]	MC - Seção	AISC [36] m/s ²	SCI [39] m/s ²	Faisca [51] m/s ²	Biodinâmico [52] m/s ²
$a_p < 0,50 \text{ m/s}^2$	MC I - A	6,20	6,21	1,10	0,66
	MC II - D	6,14	6,74	1,48	0,73
	MC III - C	6,20	6,21	1,10	0,81
	MC IV - E	6,20	6,21	1,10	0,96
	MC V - D	5,99	6,60	1,43	0,95
	MC VI - C	5,16	6,34	1,02	0,90

Em relação a aceleração RMS, esta análise indicou que o limite de conforto humano foi excedido para os modelos AISC [36], SCI [39] e Faisca [51], no entanto, apresentou resultados aceitáveis para o modelo biodinâmico [52]. Em termos de valor de dose de vibração (VDV), foram obtidos valores aceitáveis dentro dos limites de conforto humano [49][50] apenas para o modelo biodinâmico [52] nos MC I, II e III. O resumo dos valores críticos obtidos em termos de aceleração RMS e VDV para todos os MC pode ser visto na Tabela 27 e na Tabela 28, respectivamente.

Tabela 27 - Resumo das acelerações RMS nas seções críticas

Limite SCI [39]	MC - Seção	AISC [36] m/s ²	SCI [39] m/s ²	Faisca [51] m/s ²	Biodinâmico [52] m/s ²
$a_{w,rms} < 0,35 \text{ m/s}^2$	MC I - A	1,31	1,30	0,66	0,22
	MC II - D	1,80	2,17	0,90	0,20
	MC III - C	1,31	1,30	0,66	0,25
	MC IV - E	1,31	1,30	0,66	0,32
	MC V - D	1,77	2,11	0,88	0,34
	MC VI - C	1,14	1,34	0,54	0,32

Tabela 28 - Resumo dos valores de dose de vibração nas seções críticas

Limites	MC - Seção	AISC [36] m/s ²	SCI [39] m/s ²	Faisca [51] m/s ²	Biodinâmico [52] m/s ²
VDV < 0,50 m/s ^{1,75} [49]	MC I - A	3,02	3,18	1,56	0,49
	MC II - D	4,03	4,73	2,06	0,45
	MC III - C	3,02	3,18	1,56	0,57
VDV < 0,66 m/s ^{1,75} [50]	MC IV - E	3,02	3,18	1,56	0,79
	MC V - D	3,96	4,61	2,02	0,78
	MC VI - C	2,82	3,26	1,19	0,76

Portanto, baseado na análise dinâmica transiente foi comprovado os possíveis problemas relacionados a vibrações excessivas, podendo resultar em desconforto humano, conforme verificado anteriormente nas análises modal e harmônica.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

- a) Realizar novos conjuntos de análises experimentais sobre os pisos mistos investigados a fim de aumentar a base de dados;
- b) Variar a frequência de excitação da atividade rítmica objetivando observar a resposta estrutural;
- c) Implementar um sistema de controle de vibrações para redução da resposta dinâmica;
- d) Realizar estudos com outras distribuições de carregamento e quantidade de participantes;
- e) Modificar as dimensões da laje e a disposição dos perfis estruturais.

REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA, D. A. de. Estruturas mistas de aço e concreto. 56º congresso brasileiro do concreto, IBRACON, Natal, Brasil, 2014.
- [2] 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.
- [3] BACHMANN, H. Case studies of structures with man-induced vibrations. Journal of Structural Engineering, v. 118, n. 3, p. 631-647, mar. 1992.
- [4] 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
- [5] 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
- [6] CEB. Vibrations problems in structures – Practical guidelines. Bulletin d'information nº209. Comité Euro-International du Béton. Lausanne, Switzerland, 1991.
- [7] LAMAN, J.A.; MURRAY, T.M.; Design aids for walking vibrations in steel framed floors. Engineering Journal / Second Quarter, p.82-101,1999
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] MOREIRA, B. C., Avaliação Comparativa de Pisos e Edificações em Estrutura Metálica quanto ao Critério de Vibração, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, 2004

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

- [22] 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.
- [23] 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
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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
- [28] COSTA-NEVES, L.F.; SILVA, J.G.S. da.; de; LIMA, L.R.O.; JORDÃO, S. Multi-storey, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: the human comfort issue . *Journal of constructional steel research*, v.136, p. 34–46, 2014.
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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
- [32] MARTÍNEZ, J. F; HERMANNNS, L; LERMA, A. F; ÁLVARES, E.A. Jumping load models applied on a gymnasium floor. *Journal of Engineering Structures*, v. 125, p. 26-38. 2016

- [33]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
- [34]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.
- [35]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.
- [36]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.
- [37]ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- [38]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.
- [39]SMITH, A.L.; HICKS, S.J.; DEVINE, P.J. *Design of floors for vibrations: A new approach*. SCI Publication P354, Ascot, 2009.
- [40]INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations, Switzerland, 2007.
- [41]BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 6472-1: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings: Vibration sources other than blasting, United Kingdom, 2008.
- [42]BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 6841: Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock, United Kingdom, 1987.
- [43]INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, Switzerland, 1997.
- [44]BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 6472: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz to 80 Hz), United Kingdom, 1992.

- [45] 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.
- [46] European Committee for Standardization. Eurocode 0: Basis of structural design, London, UK, 2002.
- [47] 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.
- [48] WYATT, T.A. Design guide on the vibration of floors. SCI Publication 076. The Steel Construction Institute, Berkshire. UK, 1989, 32 p.
- [49] SETAREH, M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. Structures and Buildings, 165 (5), 219-231, 2012.
- [50] 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.
- [51] FAISCA, R. G. Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, 2003.
- [52] 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.
- [53] ELLIS, B. R, Ji T. Loads generated by jumping crowds: Numerical modelling. Structural Engineer, 82(17): 35-40, 2004.
- [54] BRANCO, N.A.C, SOUSA, F.A, SILVA, J.G.S. Dynamic structural behaviour of steel-concrete composite floors subjected to rhythmic human activities. Proceedings of the XLII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE 2021 PANACM (Online), Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- [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.