

LADIR ANTONIO DA SILVA JUNIOR

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES EM SISTEMAS DE PISO MISTO DE
AÇO E CONCRETO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO O
CONFORTO HUMANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586a
2015
Silva Junior, Ladir Antonio da, 1987-
Análise experimental de vibrações em sistemas de piso
misto de aço e concreto e avaliação de desempenho considerado
o conforto humano / Ladir Antonio da Silva Junior. – Viçosa,
MG, 2015.
xix, 170f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: José Luiz Rangel Paes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.165-170.

1. Piso -Análise. 2. Vibrações. 3. Conforto humano.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-graduação Engenharia Civil. II. Título.

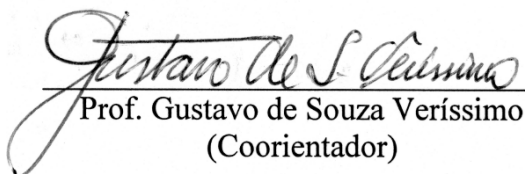
CDD 22. ed. 625.84

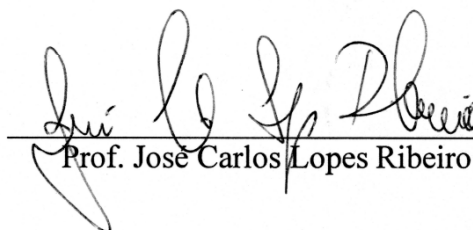
LADIR ANTONIO DA SILVA JUNIOR

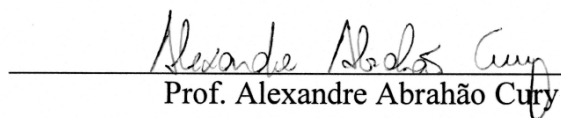
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES EM SISTEMAS DE PISO MISTO DE
AÇO E CONCRETO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO O
CONFORTO HUMANO**

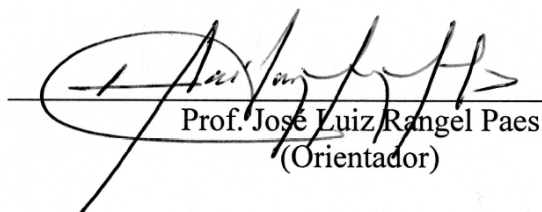
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2015.


Prof. Gustavo de Souza Veríssimo
(Coorientador)


Prof. José Carlos Lopes Ribeiro


Prof. Alexandre Abrahão Cury


Prof. José Luiz Rangel Paes
(Orientador)

Dedicatória

A Deus, à minha família e
a todos os meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por permitir mais esta vitória.

A família, pelo apoio e estrutura, participando ativamente desta trajetória e do crescimento profissional proporcionado nestes anos.

A minha namorada, pelo carinho, pelo apoio e companheirismo, que me deu forças para continuar.

A Universidade Federal de Viçosa pelo ensino de qualidade e oportunidade a mim concedidas.

Ao meu orientador Prof. Jose Luiz Rangel, por acreditar que eu seria capaz, mesmo nos momentos que eu não tinha certeza disso, pela amizade e os ensinamentos a mim passados.

Ao meu coorientador Prof. Gustavo de Souza Verissimo, sempre disposto a ajudar, com ensinamentos que levarei para minha vida.

Ao Prof. José Carlos Lopes Ribeiro por aceitar participar deste trabalho e pelos ensinamentos ao longo dos anos de convívio.

Ao Prof. Alexandre Abrahão Cury por aceitar participar deste trabalho.

Ao Prof. Paulo Cezar Büchner, que teve participação essencial neste trabalho, com os ensinamentos de dinâmica e pela ajuda no processamento das respostas.

Aos meus colegas de mestrado, que participaram e contribuíram para chegada ao final desta trajetória, pela amizade e auxílios concedidos, além da agradável convivência. Em especial o José Francisco, com quem eu trabalhei durante todo o mestrado, pela ajuda, paciência e amizade.

Aos meus grandes amigos, que apesar de não estarem presentes no dia-a-dia, sempre estão do meu lado me dando força e momentos de alegria.

Ao Departamento de Engenharia Civil, ao programa de pós-graduação e aos servidores, pela formação e pela oportunidade.

A CAPES, via programa REUNI, pelo apoio financeiro através da bolsa concedida.

E a todos que embora não tenham sido citados neste texto, contribuíram de alguma forma para esta realização.

A todos, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE TABELAS	xvi
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Justificativa	4
1.4 Estrutura da Dissertação	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 Considerações preliminares	8
2.2 Sensibilidade humana às vibrações	9
2.3 Estudos realizados por outros autores	14
2.3.1 <i>Hicks et al. (2000)</i>	15
2.3.2 <i>Varela (2004)</i>	16
2.3.3 <i>Zúñiga (2011)</i>	19
2.3.4 <i>Battista et al. (2012)</i>	20
2.4 Critérios de projeto para avaliação de vibrações	22
2.4.1 <i>ABNT NBR 8800:1986</i>	22
2.4.2 <i>ABNT NBR 8800:2008</i>	26
2.4.3 <i>ABNT NBR 6118:2014</i>	27
2.4.4 <i>ISO 2631 (1978)</i>	28
2.4.5 <i>ISO 2631/2 (1989)</i>	30

2.4.6	<i>AISC/CISC Design Guide 11 (2003)</i>	33
2.4.7	<i>HIVOSS (2008)</i>	38
2.4.7.1	Classificação das vibrações	39
2.4.7.2	Método de cálculo manual	40
2.4.8	<i>SCI PUBLICATION P354 (2009)</i>	42
2.4.8.1	Vibrações Intermitentes	43
2.4.8.2	Critério de aceitação	44
2.5	Ensaio dinâmico de estruturas	45
2.5.1	<i>Aspectos gerais dos ensaios</i>	45
2.5.2	<i>Equipamentos para monitoramento dinâmico</i>	47
2.5.3	<i>Ensaio de impacto</i>	48
2.5.4	<i>Ensaio de vibração forçada</i>	50
2.6	Avaliação experimental do amortecimento modal.....	51
2.6.1	<i>Método do decremento logarítmico</i>	53
3	MATERIAL E MÉTODOS	55
3.1	Considerações preliminares	55
3.2	Equipamentos de medição	55
3.3	Procedimentos de ensaios.....	57
3.3.1	<i>Ensaio de impacto</i>	58
3.3.2	<i>Ensaio de vibração forçada</i>	60
3.4	Procedimentos para processamento de resultados	61
3.4.1	<i>Filtro passa-banda</i>	63

3.4.2	<i>Controle estatístico</i>	67
3.5	Classificação do teste de caminhada quanto à excitação da estrutura.....	68
4	ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES EM SISTEMAS DE PISO MISTO	70
4.1	Considerações preliminares	70
4.2	Estrutura I – Pavilhão de Aulas II - PVB	71
4.2.1	<i>Sistemas de pisos estudados</i>	73
4.2.1.1	Região 1 – Rampa de acessibilidade entre os pavimentos.....	75
4.2.1.2	Região 2 – Sala de aula com vão livre de 12 metros nas duas direções 84	
4.2.1.3	Região 3 – Salas de uso múltiplo (salas de apoio).....	93
4.2.1.4	Região 4 - Corredor de acesso às salas de aula em balanço	98
4.3	Estrutura II – Rampa de acesso do edifício das quadras poliesportivas .	103
4.3.1	<i>Descrição da estrutura</i>	103
4.3.2	<i>Ensaio dinâmico</i>	107
4.3.3	<i>Resultados e discussão</i>	112
4.4	Estrutura III – Laticínios FUNARBE	126
4.4.1	<i>Descrição da estrutura</i>	126
4.4.2	<i>Ensaio dinâmico</i>	131
4.4.3	<i>Resultados e discussão</i>	133
4.5	Estrutura IV – Edifício das Licenciaturas.....	140
4.5.1	<i>Descrição da estrutura</i>	140
4.5.2	<i>Ensaio dinâmico</i>	144
4.5.3	<i>Resultados e discussão</i>	145

4.6	Estrutura V – Edifício comercial.....	150
4.6.1	<i>Descrição da estrutura</i>	151
4.6.2	<i>Ensaio dinâmico</i>	153
4.6.3	<i>Resultados e discussão</i>	154
5	CONCLUSÕES	161
5.1	Conclusões gerais.....	161
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	163
	Referências Bibliográficas	165

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 - Tipologia básica de um sistema de piso misto de aço e concreto.	2
Figura 2-1- Frequências naturais do corpo humano (ISO 5349, 1986 apud Almeida, 2008).	12
Figura 2-2 - Direções do sistema de coordenadas para vibrações mecânicas em seres humanos (ISO 2631-1, 1985).	13
Figura 2-3 – Curva de ponderação de frequência W_b (BS 6841 (1987)).	14
Figura 2-4 – Modelo 01 - Protótipo de estrutura reticulada espacial mista, montado no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.	17
Figura 2-5 – Modelo 02 - Estrutura do pavimento tipo do edifício.	17
Figura 2-6 - Vista lateral da passarela sobre as avenidas Osvaldo Aranha e Maracanã....	19
Figura 2-7 – Aspecto geral da pista dos “carrinhos de bate-bate”.	20
Figura 2-8 – Aspecto geral da varanda que apresentava vibrações excessivas.	21
Figura 2-9 - Modelo MEF-3D da estrutura contendo a região da pista de carrinhos bate- bate.....	21
Figura 2-10 - Modelo computacional da estrutura na região da varanda.....	22
Figura 2-11 - Limites de desconforto causado por vibrações em pisos de edifícios residenciais, escolares e comerciais, devidas ao caminhar humano.....	23
Figura 2-12 - Limite de aceleração longitudinal (a_z) como função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga).	29
Figura 2-13 - Limite de aceleração transversal (a_x e a_y) como função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga).	30
Figura 2-14 - Curva base de aceleração no eixo z.	32
Figura 2-15 - Curva base de aceleração nos eixos x e y.	32
Figura 2-16 - Curva base de aceleração nas direções combinadas (x, y e z).	33

Figura 2-17 – Amplitude máxima das acelerações recomendadas para o conforto humano para vibrações induzidas pelo caminhar humano.....	34
Figura 2-18 - Exemplo de determinação do valor $os-r.m.s_{90}$ e classificação de um pavimento.	42
Figura 2-19 - Resultados típicos de um ensaio dinâmico: a) resposta no domínio do tempo; b) espectro de resposta no domínio da frequência (GARAYGORDÓBIL, 2003).	46
Figura 2-20 - Vista geral de um sistema de aquisição de sinais dinâmicos portátil.	47
Figura 2-21 - Aspecto geral de um ensaio de impacto dos calcanhares sobre um sistema de piso.....	49
Figura 2-22 – Exemplo de martelo de excitação instrumentado.	49
Figura 2-23 - Gráfico de resposta sub-amortecida - deslocamento (ou aceleração) x tempo (http://pt.scribd.com/doc/58757911/DECREMENTO LOGARITMICO DA AMPLITUDE , acesso em 13/06/13).	53
Figura 2-24 – Amortecimento modal de uma estrutura real em função da frequência (VARELA, 2004).....	54
Figura 3-1 - Sistema de aquisição de sinais dinâmicos portátil GP2Lx USB da marca SENSR.....	56
Figura 3-2 – Exemplo de fixação do acelerômetro GP2Lx USB em estrutura metálica através da base magnética.	57
Figura 3-3 – Exemplo de heel-drop test.....	59
Figura 3-4 – Modelo esquemático de um ensaio de impacto com o saco de areia em um sistema de piso misto de aço e concreto.	60
Figura 3-5 - Exemplos de leitura no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b), com auxílio do programa computacional SensView.....	62
Figura 3-6 - Exemplo de heel-drop test com influência de ruídos externos.	64

Figura 3-7 – Exemplo comparativo entre o sinal original e o sinal filtrado para o domínio do tempo e domínio da frequência para um ensaio de heel-drop test.	66
Figura 3-8- Resultados de ensaios de vibração forçada por caminhar humano e correspondentes níveis de excitação produzidos, segundo classificação proposta.	69
Figura 4-1 – Aspecto geral do Edifício do PVB da UFV.	71
Figura 4-2 - Planta Baixa do 2º Pavimento – PVB.	72
Figura 4-3 – Plano das vigas do segundo pavimento com a demarcação das regiões críticas selecionadas.	74
Figura 4-4 – Plano das vigas dos níveis + 0 ao + 2800, com o posicionamento do acelerômetro.	76
Figura 4-5 - Elevação eixo D, com o posicionamento do acelerômetro.	76
Figura 4-6 – Posicionamento do acelerômetro no ponto P01 (AC 1169) na alma da viga longitudinal da rampa de acesso.	77
Figura 4-7 –Resposta no domínio do tempo (a) e domínio da frequência (b) para o terceiro impacto dos calcanhares no centro do vão da região 1 do PVB.	79
Figura 4-8 – Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto dos calcanhares na extremidade da região 1 do PVB.	80
Figura 4-9 – Curva aceleração versus tempo na região 1 do PVB, para uma frequência de caminhar de 2,12 Hz.	82
Figura 4-10 - Gráfico de comparação do valor da aceleração do ensaio experimental e os critérios de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para rampas internas.	83
Figura 4-11 – Plano das vigas da região 2 com posicionamento dos acelerômetros.	85
Figura 4-12 - Possíveis modos de vibração para a região 2 do PVB.	86
Figura 4-13 - Posicionamento dos acelerômetros da Região 2 do PVB.	87

Figura 4-14 – Espectro de resposta no domínio da frequência para os acelerômetros P01 – AC 1190 (a) e P02 - AC 1169 (b) para um heel-drop test na zona central da região 2.	88
Figura 4-15 – Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto dos calcanhares no centro da região 2 do PVB.	90
Figura 4-16 – Curva aceleração versus tempo da região 2 do PVB, para uma frequência do caminhar de 2,14 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P01.	92
Figura 4-17 – Comparação entre a curva aceleração versus tempo para uma frequência de caminhar de 2,14 Hz e de ruído para a região 2 do PVB.	92
Figura 4-18 – Plano das vigas da região 3 com posicionamento dos acelerômetros.	94
Figura 4-19 – Espectro de resposta no domínio da frequência para os acelerômetros P01 – AC 1190 (a) e P02 - AC 1169 (b) para um heel-drop test na zona central da estrutura.	95
Figura 4-20 - Curva aceleração versus tempo na região 3 do PVB, para uma frequência de caminhar de 2,13 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P02.	98
Figura 4-21 – Vista geral da região 4 do PVB.	99
Figura 4-22 – Plano das vigas da região 4 com o posicionamento do acelerômetro.	99
Figura 4-23 – Modo de vibração correspondente à frequência fundamental para a região 4 do PVB.	100
Figura 4-24 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1190 para um heel-drop test na zona central da região 4.	101
Figura 4-25 – Aspecto geral da maquete do edifício para fins esportivos, no qual se localiza a rampa de acesso.	103
Figura 4-26 - Vista geral da rampa de acesso.	104
Figura 4-27 – Plano das vigas do nível +2800 até +6400 para a rampa de acesso com o posicionamento dos acelerômetros.	105
Figura 4-28 – Vista Frontal da rampa de acesso.	106

Figura 4-29 – Posicionamento dos acelerômetros nos pontos P02 e P03 da rampa de acesso.	107
Figura 4-30- Primeiro ensaio de multidão com caminhar aleatório.....	110
Figura 4-31 – Segundo ensaio de multidão com caminhar aglomerado.....	110
Figura 4-32 – Quinto ensaio de multidão com pulos aleatórios de voluntários na zona do Ponto P02.	111
Figura 4-33 – Sexto ensaio de multidão com pulo simultâneo de voluntários na zona do Ponto P02.	111
Figura 4-34 – Sétimo ensaio de multidão com pulos subsequentes de voluntários na zona do Ponto P02.	112
Figura 4-35- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P01 da rampa de acesso.	113
Figura 4-36- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P02 da rampa de acesso.	113
Figura 4-37- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P03 da rampa de acesso.	114
Figura 4-38- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P04 da rampa de acesso.	114
Figura 4-39- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P05 da rampa de acesso.	115
Figura 4-40 - Patamar executado com enchimento de concreto na zona do ponto P02 da rampa de acesso.....	117
Figura 4-41- Patamar adjacente ao primeiro vão da rampa de acesso.	119
Figura 4-42 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 – AC 1190 para um teste de caminhada de duas pessoas com frequência de caminhar de 2,22 Hz na rampa de acesso.....	120

Figura 4-43- Gráfico comparativo dos valores críticos de acelerações dos ensaios experimentais e critérios de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para rampas internas.....	121
Figura 4-44 – Curva aceleração versus tempo da rampa de acesso, para o primeiro ensaio de multidão com caminhar aleatório, obtida a partir de leituras no ponto P02.	123
Figura 4-45- Aspecto geral das caminhadas com frequências aleatórias no primeiro e segundo ensaios de multidão respectivamente.....	124
Figura 4-46 - Gráfico de comparação dos valores das acelerações em r.m.s. dos ensaios de multidão e os valores limites dos critérios internacionais de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para rampas internas.....	125
Figura 4-47- Aspecto geral do Novo Laticínios FUNARBE.	126
Figura 4-48- Plano das vigas do terceiro pavimento (EL. + 6200) do Laticínios FUNARBE.	127
Figura 4-49- vista lateral esquerda da passarela.	128
Figura 4-50- Vista lateral direita da passarela.....	128
Figura 4-51- Plano das vigas da região crítica com o posicionamento dos acelerômetros.	130
Figura 4-52- Aspecto geral da passarela no momento dos ensaios dinâmicos.	131
Figura 4-53- Apoio elástico do terceiro trecho da passarela e posicionamento do acelerômetro AC 1190 no ponto P01.	132
Figura 4-54- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 – AC 1190 para um heel-drop test na zona central do ponto P01.....	133
Figura 4-55- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 – AC 1169 para um heel-drop test na zona central do ponto P02.....	133
Figura 4-56- Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto dos calcanhares na zona central do ponto P02.....	135

Figura 4-57- Curva aceleração versus tempo no Laticínios FUNARBE, para uma frequência de caminhar de 2,05 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P01.	137
Figura 4-58 - Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1190 para um teste de caminhada com frequência de caminhar de 2,05 Hz, no Laticínios FUNARBE.....	138
Figura 4-59 - Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 - AC 1190 para um teste de caminhada com frequência de caminhar de 1,95 Hz, no Laticínios FUNARBE.....	138
Figura 4-60- Gráfico de comparação dos valores de aceleração dos ensaios experimentais e os critérios de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para passarelas internas.....	139
Figura 4-61- Aspecto geral do Edifício das Licenciaturas da UFV.	141
Figura 4-62 – Plano das vigas do segundo pavimento (EL. +5850) do Edifício das Licenciaturas.	142
Figura 4-63 – Plano das vigas da região crítica e posicionamento dos acelerômetros.	143
Figura 4-64 – Posicionamento dos acelerômetros nos pontos P01 - AC 1169 (a) e P02 - AC 1190 (b).....	144
Figura 4-65 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1169, para um impacto do saco de areia na zona central da estrutura.....	145
Figura 4-66 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 - AC 1190, para um impacto do saco de areia na zona central da estrutura.....	146
Figura 4-67 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P03 - AC 1190, para um impacto do saco de areia na zona central da estrutura.....	146
Figura 4-68 – Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto do saco de areia na zona central da região crítica do Edifício das Licenciaturas.	148
Figura 4-69 – Comparação entre a curva aceleração versus tempo para uma frequência de caminhar de 2,24 Hz e de ruído para a região crítica do sistema de piso do Edifício das Licenciaturas.....	150

Figura 4-70 – Plano das vigas da região crítica e posicionamento dos acelerômetros. ...	152
Figura 4-71 – Posicionamento dos acelerômetros nos pontos P01 - AC 1190 e P02 - AC 1169.	153
Figura 4-72 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1190 para um heel-drop test na zona central do ponto P01.	154
Figura 4-73 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 - AC 1169 para um heel-drop test na zona central do ponto P02.	154
Figura 4-74 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P03 - AC 1169 para um heel-drop test na zona central do ponto P03.	155
Figura 4-75 – Curva aceleração versus tempo na zona correspondente ao salão do restaurante, para uma frequência de caminhar de 1,64 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P01.	157
Figura 4-76 – Curva aceleração versus tempo na zona correspondente ao salão do restaurante, para uma frequência de caminhar de 1,64 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P02.	158
Figura 4-77 – Curva aceleração versus tempo na zona do balanço, para uma frequência de caminhar de 2,34 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P03.	158
Figura 4-78 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P03 – AC 1169 para um teste de caminhada com frequência de 2,34 Hz na zona do balanço.	159
Figura 4-79 – Gráfico comparativo do valor crítico da aceleração em r.m.s. encontrada no ensaio experimental com os valores limites recomendados por critérios internacionais.	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Níveis de amortecimento.	25
Tabela 2-2 – Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.	28
Tabela 2-3 - Faixa dos fatores multiplicadores usados em vários países para estimar satisfatoriamente os níveis de vibrações.....	33
Tabela 2-4 - Coeficientes dinâmicos e frequência do caminhar humano para diferentes tipos de atividades dinâmicas.	35
Tabela 2-5 - Parâmetros utilizados na avaliação da resposta dinâmica estrutural.	37
Tabela 2-6 – Classificação da resposta do sistema de piso e recomendações de acordo com a utilização.....	40
Tabela 2-7 – Determinação do amortecimento.....	41
Tabela 2-8 – Valores dos fatores de multiplicação para excitação de uma única pessoa..	45
Tabela 2-9 – Valores dos fatores de multiplicação para hospitais de acordo com a HTM 08-01 (THE STATIONERY OFFICE, 2008).....	45
Tabela 2-10 - Características do caminhar humano (BACHMANN e AMMANN, 1995).	51
Tabela 3-1 – Caracterização das bandas de terço de oitava internacionalmente normalizadas (MOUTINHO, 1998) apud (MARGARIDO, 2013).....	65
Tabela 3-2 – Classificação geral do índice de precisão de experimentos com base no coeficiente de variação (GOMES, 2009).	67
Tabela 4-1 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).	80
Tabela 4-2 – Valores de amortecimento para a região 1 do PVB (AC 1169).....	81
Tabela 4-3 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).	89
Tabela 4-4 – Valores de amortecimento para a região 2 do PVB (AC 1169 e AC 1190). 91	

Tabela 4-5 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).	96
Tabela 4-6 – Valores de amortecimento para a região 3 do PVB (AC 1169 e AC 1190). 97	
Tabela 4-7 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).	101
Tabela 4-8 – Valores de amortecimento para a região 4 do PVB (AC 1190).....	102
Tabela 4-9 – Características dos ensaios de vibração forçada.....	108
Tabela 4-10 – Características dos ensaios de multidão.	109
Tabela 4-11 – Parâmetros para os filtros passa-banda (Hz).	116
Tabela 4-12- Valores de amortecimento para a rampa de acesso (AC 1169 e AC 1190).	116
Tabela 4-13- Resultados dos testes de caminhada para uma, duas e três pessoas na rampa de acesso.	118
Tabela 4-14 – Valores de aceleração em r.m.s. para diferentes números de pessoas.....	120
Tabela 4-15- Resultados dos ensaios de multidão.	122
Tabela 4-16 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).	134
Tabela 4-17- Valores de amortecimento para a região crítica do Laticínios FUNARBE (AC 1169 e AC 1190).	135
Tabela 4-18- Resultados dos testes de caminhada na passarela do Laticínios FUNARBE.	136
Tabela 4-19 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).	147
Tabela 4-20 – Valores de amortecimento para a região crítica do Edifício das Licenciaturas (AC 1169 e AC 1190).	149
Tabela 4-21 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).	155
Tabela 4-22 – Valores de amortecimento para a região crítica do mezanino (AC 1169 e AC 1190).	156

RESUMO

SILVA JUNIOR, Ladir Antonio da. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2015. **Análise experimental de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto e avaliação de desempenho considerando o conforto humano.** Orientador: José Luiz Rangel Paes. Coorientador: Gustavo de Souza Veríssimo.

À medida que as tecnologias construtivas avançaram e as características mecânicas dos materiais melhoraram, a busca pela redução da taxa de consumo de aço e por projetos arquitetônicos mais arrojados, com vãos cada vez maiores, fez com que as estruturas de aço diminuíssem sensivelmente sua rigidez e peso próprio. Os efeitos da vibração que antes não eram importantes, podem ser tornar fatores dimensionantes em uma estrutura nos dias atuais. O objetivo deste trabalho é realizar a análise experimental de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto pertencentes a edifícios de múltiplos andares e avaliar o desempenho dos mesmos considerando critérios de conforto humano. Para isto foi estabelecida uma metodologia para o desenvolvimento da análise experimental de vibrações induzidas por atividades humanas em sistemas de piso misto de aço e concreto, de acordo com as recomendações de normas e guias de projeto internacionais. Foi selecionado um conjunto de sistemas de piso misto pertencentes a edifícios de múltiplos andares, situados na cidade de Viçosa e definidas as estratégias para realização de ensaios de impacto e de vibração forçada nos sistemas de piso selecionados. Com o processamento do espectro de resposta dos ensaios realizados, foram determinadas as frequências naturais, o amortecimento experimental e as acelerações induzidas pelo caminhar humano. Os resultados obtidos por meio da análise experimental de vibrações foram avaliados em função das recomendações de critérios internacionais que consideram o conforto humano. Em síntese, pode-se afirmar que o controle das vibrações em sistemas de piso misto, que apresentam grandes vãos livres, rigidez reduzida e baixo amortecimento é um tema de grande importância na atualidade, já que as vibrações produzidas por atividades humanas podem efetivamente gerar desconforto aos seus usuários.

ABSTRACT

SILVA JUNIOR, Ladir Antonio da. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2015. **Experimental analysis of vibrations in composite floor systems of steel and concrete and performance evaluation considering human comfort.** Advisor: José Luiz Rangel Paes. Co-advisor: Gustavo de Souza Veríssimo.

As building technologies advanced and the mechanical characteristics of materials improved, the search for smaller steel rates and more sophisticated architecture designs, with longer spans, resulted in a substantial reduction of stiffness and self weight in steel design. The vibration effects that were not so important in the past, can now become a critical factor for modern structures. The aim of this work is to perform an experimental analysis of vibrations in multistory buildings with steel and concrete composite floor systems and to evaluate their performance under human comfort criteria. A methodology for experimental analysis of induced vibration by human activities on a composite floor system was established, in accordance with international code recommendations and design guides. A set of composite floor systems of multistory buildings was chosen in Viçosa - Brazil, and strategies to perform impact and walking tests on the selected floor systems were defined. The natural frequencies, the experimental damping, and the acceleration induced by human walking were determined after processing the spectrum of results obtained from the tests. The vibration experimental analysis results were assessed based on human comfort criteria. In summary, it can be affirmed that vibration control in composite floor systems with long spans, reduced stiffness, and low damping is currently an important procedure since the vibrations generated by human activities may cause discomfort among users.

1

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A construção metálica e mista vem se consolidando como uma forte alternativa tecnológica no cenário da construção civil brasileira. Este avanço está relacionado com os diversos aspectos positivos que, cada vez mais, são percebidos nestas técnicas construtivas pelos diversos segmentos envolvidos em um empreendimento.

Dentre os diversos aspectos relacionados à construção metálica, destacam-se a maior resistência mecânica do aço quando comparado aos outros materiais, a eficiência de uma construção industrializada, a flexibilidade das soluções arquitetônicas e estruturais, a facilidade de montagem e desmontagem, além da facilidade de reforço e ampliação. Como consequências diretas destas características, pode-se obter ganhos como alívio das fundações, aumento do espaço útil da construção, redução do tempo de construção, redução da área de canteiro de obras, dentre outros.

A construção mista representa um passo a mais neste contexto tecnológico, visto que permite aproveitar melhor as qualidades próprias do aço e do concreto, não só com relação à capacidade resistente, mas também sob o ponto de vista construtivo, funcional e estético, procurando minimizar as limitações intrínsecas de cada material.

Um sistema de piso misto de aço e concreto é composto por vigas metálicas e laje de concreto, sendo a laje disposta sobre a viga (Figura 1-1). Os conectores de cisalhamento que são colocados entre a viga e a laje têm a função de transferir o fluxo de cisalhamento que se desenvolve na interface entre o aço e o concreto e garantem o trabalho solidário entre ambos os materiais.

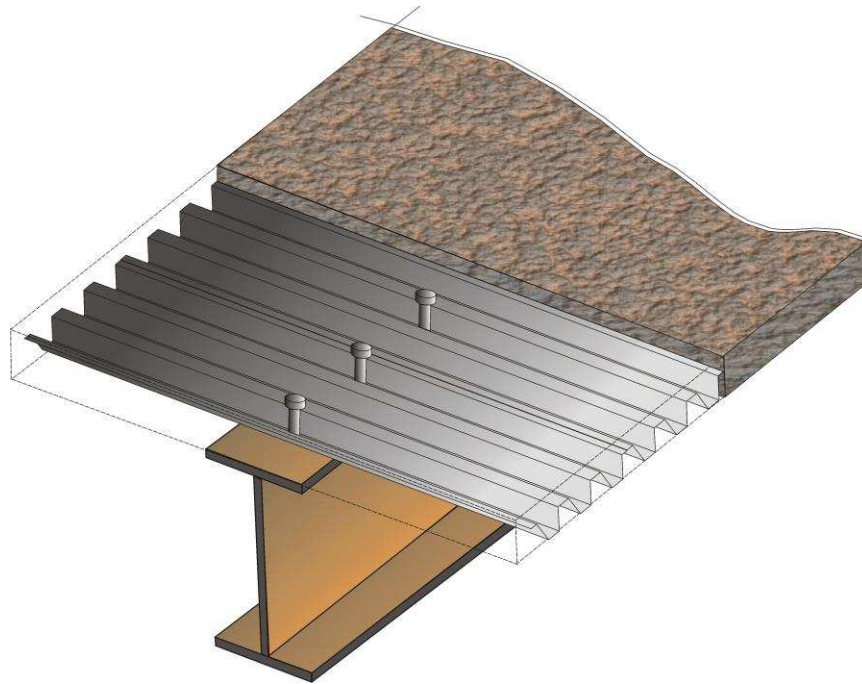


Figura 1-1 - Tipologia básica de um sistema de piso misto de aço e concreto.

Atualmente, a verificação de uma estrutura em condições de serviço tem um caráter muito mais importante que há algum tempo, uma vez que o cálculo era feito basicamente em função das condições de ruína. Com o arrojo das soluções estruturais, têm-se notado frequentemente nos edifícios de múltiplos andares em estruturas metálicas e mistas que as verificações relativas aos estados limites serviço podem controlar o dimensionamento de uma estrutura, em particular no caso dos sistemas de piso misto de aço e concreto.

O desenvolvimento científico ocorrido nos últimos anos e a transformação do conhecimento em tecnologia aplicada tem contribuído para o desenvolvimento de sofisticados métodos de dimensionamento, materiais com propriedades mecânicas mais resistentes, como consequência do conhecimento da sua microestrutura, e processos executivos diferenciados apoiados na versatilidade de equipamentos. A conjugação destes fatores possibilitou o desenvolvimento da tendência de se projetar estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis. Como consequência deste fato, estas estruturas ficaram mais sensíveis a solicitações dinâmicas provocadas entre outras por atividades humanas como dançar, caminhar ou pular que podem causar vibrações (ZÚÑIGA, 2011).

A análise de vibrações nos sistemas de piso misto tem se tornado cada vez mais importante à medida que as soluções estruturais têm permitido a obtenção de estruturas mais delgadas e menos rígidas. Associando isto ao arrojo das soluções arquitetônicas, tem sido crescente a demanda por uma avaliação criteriosa da vibração nestes sistemas de piso, mesmo para casos que não geravam grandes preocupações aos calculistas até então, como as vibrações produzidas pelo caminhar de pessoas e pela excitação rítmica.

À medida que se reduz a altura total de um sistema de piso e por consequência sua rigidez, maior será a sua deformabilidade, crescendo assim a importância das verificações relativas aos estados limites de serviço, em especial o controle de flechas e vibrações. Uma avaliação criteriosa destes aspectos é fundamental para evitar o mau funcionamento da estrutura e o desconforto de seus usuários devido as vibrações induzidas por atividades humanas.

Os ensaios dinâmicos se mostram convenientes para a avaliação de estruturas existentes pelo seu caráter não-destrutivo, permitindo a obtenção de informações em múltiplas regiões da estrutura a respeito de sua massa, rigidez e do seu amortecimento estrutural – este, impossível de ser quantificado via análise estática e ao longo de toda vida útil da estrutura. Mesmos nos casos onde não há problemas de vibração excessiva, os ensaios dinâmicos permitem a avaliação do estado de integridade estrutural da edificação.

Apesar das vantagens oferecidas pelos ensaios dinâmicos experimentais, sua utilização ainda é pouco conhecida no Brasil. O efeito das vibrações e os critérios de conforto humano também não são amplamente discutidos nas normas de estruturas e nos cursos de graduação em engenharia civil no Brasil, atualmente.

Estas constatações fazem com que a avaliação de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto assumam especial relevância para o desenvolvimento das estruturas mistas.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar a análise experimental de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto pertencentes a edifícios de múltiplos andares e avaliar o desempenho dos mesmos considerando critérios de conforto humano.

Para alcançar este objetivo geral são estabelecidos alguns objetivos específicos:

- identificar alguns sistemas de piso misto pertencentes a edifícios de múltiplos andares, situados na cidade de Viçosa;
- estabelecer uma metodologia para a realização de análises experimentais de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto;
- determinar as características dinâmicas (frequências naturais, amortecimentos e acelerações) dos sistemas de piso misto selecionados, por meio de ensaios dinâmicos;
- definir os limites de vibrações aceitáveis em sistemas de piso misto em função de critérios de conforto humano recomendados internacionalmente;
- avaliar os resultados obtidos por meio da análise experimental diante das recomendações internacionais de vibrações considerando o conforto humano.

1.3 Justificativa

Nas últimas décadas, em diversos países do primeiro mundo o aço tem sido o material preferido para construção. Na França, por exemplo, a parcela de mercado relativa ao setor de edifícios de andares múltiplos em aço apresentou um crescimento de 13,7% em 1991 para 31,5% em 1997. Descobertas recentes têm proporcionado excelente êxito na utilização de sistemas de piso com grandes vãos em edifícios de escritórios, atraindo a atenção do mercado. No Reino Unido o segmento de edifícios de andares múltiplos em aço cresceu de 33% em 1981 para 58,1% em 1991. Segundo estatísticas de 1998, 65,1% do mercado de edifícios multi-pavimento utiliza estrutura metálica. A velocidade e a

economia obtidas a partir do uso de sistemas de piso misto foram os fatores mais significativos para essa transformação (GALAMBOS, 2000).

No Brasil a utilização de estruturas mistas ficou restrita a alguns poucos edifícios entre os anos de 1950 e 1960, além de pequenas pontes. No entanto, nas últimas três décadas, com a queda dos custos da construção metálica, proporcionada principalmente pela redução do preço do aço estrutural e o alto nível tecnológico utilizado no projeto das estruturas mistas, a demanda por esses sistemas construtivos tem aumentado substancialmente.

As vantagens de utilizar os sistemas misto de aço e concreto são bem conhecidas e advêm do fato dos dois materiais, aço e concreto, trabalharem à tração e à compressão, respectivamente, situação em que se obtém o melhor desempenho de ambos os materiais estruturais.

Minas Gerais desempenha um papel singular no contexto brasileiro do desenvolvimento do uso do aço na construção civil. O estado produz cerca de 40% de todo o aço brasileiro e, com destaque para Belo Horizonte, é o maior centro de desenvolvimento de construções metálicas do Brasil. A boa experiência com a construção metálica no Brasil e, em particular, no Estado de Minas Gerais, vem incentivando o desenvolvimento desta tipologia construtiva em diversas regiões. Um bom exemplo desta situação se encontra na Zona da Mata mineira, no campus de Viçosa da Universidade Federal de Viçosa, servindo de referência para o desenvolvimento de novos empreendimentos.

Com o surgimento de aços de maior resistência mecânica, torna-se cada vez mais viável reduzir a altura total de um sistema de piso misto, tendo-se em consideração os critérios de resistência. No entanto, a redução de altura ao sistema implica em redução de rigidez, o que aumenta a importância do controle de flechas e vibrações. Assim, as limitações relativas à etapa de serviço podem controlar o dimensionamento de uma estrutura.

Neste contexto, a análise de vibrações nos sistemas de piso misto tem adquirido uma importância cada vez maior no projeto de estruturas. Por outro lado, geralmente as

normas técnicas brasileiras não definem procedimentos de cálculo simplificados para avaliação das características dinâmicas desses sistemas.

O monitoramento de estruturas existentes cresceu em todo o mundo nos últimos anos devido ao grande desenvolvimento da informática e dos sistemas de aquisição de sinais. No entanto, no Brasil a experiência com o monitoramento de estruturas ainda é muito recente, apesar da grande importância do assunto.

A realização de ensaios dinâmicos em sistemas de piso misto cria a possibilidade de aferir os modelos analíticos e permite monitorar a resposta da estrutura de maneira realística. A definição dos níveis de vibrações aceitáveis em função de critérios de conforto humano também se viabiliza com o monitoramento das estruturas.

Sob outro ponto de vista, a determinação das características dinâmicas em sistemas de piso através de ensaios permite avaliar objetivamente o efeito de eventuais modificações introduzidas numa estrutura para correção de problemas de vibração.

1.4 Estrutura da Dissertação

Com o intuito de atender aos objetivos descritos anteriormente, este trabalho está subdividido em cinco capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 2 – Fundamentação Teórica apresenta-se uma revisão de trabalhos relacionados à análise dinâmica de estruturas mistas de aço e concreto submetidas a ações induzidas por atividades humanas, bem como às normas e guias de projetos que tratam de recomendações referentes aos limites de vibrações para atendimento aos critérios de conforto humano. Apresentam-se também as principais características de alguns ensaios dinâmicos de estruturas que permitem determinar as propriedades dinâmicas de sistemas de piso.

No Capítulo 3 – Material e Métodos é apresentado o sistema de aquisição de dados que foi utilizado nos ensaios de impacto e de vibração forçada, bem como são descritos os procedimentos para realização dos ensaios dinâmicos e para o processamento das respostas obtidas nesses ensaios, com a utilização de filtros passa-banda e controle

estatístico. No final deste capítulo é proposta uma classificação dos ensaios de vibração induzidas quanto ao nível de excitação provocado pelo caminhar humano e a percepção da ocorrência do fenômeno de quase ressonância ou ressonância.

No Capítulo 4 – Análise Experimental de Vibrações em Sistemas de Piso Misto são apresentados e descritos os sistemas estruturais selecionados para realização deste trabalho, assim como são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio dos ensaios de impacto e vibração forçada pelo caminhar humano. Também é realizada a avaliação do desempenho dos sistemas de piso estudados, considerando-se critérios de conforto humano.

As principais conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros são apontadas no Capítulo 5.

2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações preliminares

A Engenharia Civil, tradicionalmente admitiu que as forças atuantes em suas estruturas são constantes no tempo. Esta premissa conduz à análise “estática”, assim chamada, exata quando são ponderadas ações como o peso próprio ou o peso de partes fixas, por exemplo. A principal preocupação do projetista sempre foi a de dimensionar a estrutura para que ela resistisse, com uma certa margem de segurança, às tensões geradas pelos carregamentos atuantes. O conforto do usuário, via de regra, não era item relevante nesta análise, sendo controlado indiretamente, na maioria das vezes, através da imposição de um limite de deslocamento (NÓBREGA, 2004).

A maioria dos problemas de vibração em sistemas de piso de edifícios de múltiplos andares ocorre devido à existência de cargas dinâmicas produzidas por equipamentos ou atividades humanas. Nos sistemas de piso misto de aço e concreto, a reduzida altura e os grandes vãos das vigas fazem com que o controle de vibrações provocadas por atividades humanas seja ainda mais importante. Alguns aspectos contribuem para que o controle de vibrações adquira uma maior importância nesses sistemas, como:

- a reduzida rigidez do sistema;
- o reduzido peso próprio da estrutura;
- o reduzido nível de amortecimento.

Nos edifícios de múltiplos andares destinados a habitações ou escritórios, as forças dinâmicas que produzem as vibrações nos sistemas de piso provêm principalmente do caminhar de pessoas e, ocasionalmente, de outras atividades como correr, saltar ou dançar (CEB, 1996).

Ao longo do tempo foram desenvolvidas algumas metodologias com o objetivo de avaliar o conforto humano frente às vibrações produzidas por determinadas atividades. Geralmente, essas metodologias requerem o cálculo da frequência natural do sistema de piso e da máxima amplitude da aceleração, velocidade ou deslocamento para uma excitação de referência. A avaliação da condição de serviço é feita em função de uma escala de conforto humano estabelecida em cada metodologia de cálculo.

Apesar dos critérios de conforto humano frente às vibrações serem conhecidos há alguns anos, somente recentemente se tornaram práticos o suficiente para permitir sua aplicação no projeto de sistemas de piso. A razão disso é a complexidade do problema, visto que as cargas são complexas e a resposta tampouco é simples, abrangendo um grande número de modos de vibração. Os resultados de investigações mais recentes e a experiência prática mostram que se pode simplificar o problema e estabelecer alguns critérios práticos para o projeto (MURRAY et al., 2003).

Nos últimos anos, o estudo sobre vibrações em sistemas de piso e a realização de ensaios dinâmicos com objetivo de analisar o conforto humano devido às vibrações induzidas pelo caminhar humano têm sido objeto de estudo de diversos pesquisadores em todo mundo, como Pavic e Reynolds (2002-a e 2002-b), Nobrega (2004), Varela (2004), Camposinhos et al. (2005), Homem (2007), Lima (2007), Johansson (2009), Berczynky (2010), Junges (2010), Zúñiga (2011), Batista et al. (2007-a, 2007-b, 2008, 2010-a e 2010-b), entre outros.

2.2 Sensibilidade humana às vibrações

Muitas pesquisas foram e estão sendo realizadas na área da percepção humana de vibração de corpo inteiro e resposta humana à vibração. De acordo com Holmlunf et al. (1998), as respostas humanas às vibrações podem ser divididas em cinco categorias: percepção, desconforto, interferência nas atividades, mal-estar e ocorrência de problemas de saúde devido às vibrações. No caso de vibrações em edifícios de múltiplos andares em estrutura mista de aço e concreto para fins residenciais ou comerciais, a resposta principal é o desconforto.

De acordo com Varela (2004) a sensibilidade humana às vibrações é um assunto complexo porque envolve tanto aspectos físicos quanto aspectos psicológicos. Sendo que os principais fatores que influenciam à sensibilidade humana às vibrações são:

- posição (em pé, sentado, deitado);
- orientação da espinha dorsal em relação à direção das vibrações;
- natureza das atividades que o indivíduo está exercendo;
- frequência de ocorrência;
- idade;
- etc.

Griffin (1990) apud Margarido (2013) afirma que as respostas humanas às vibrações dependem de fatores intrínsecos ao próprio movimento vibratório e a fatores extrínsecos, que estão relacionados com as características congênicas de cada indivíduo. Abaixo são apresentadas as principais variáveis destes fatores:

Variáveis intrínsecas ao movimento:

Variáveis da vibração:

- direção e/ou combinação de direções;
- frequência e/ou combinações de frequências;
- magnitude e/ou combinações de magnitudes;
- duração e/ou combinações de durações;
- posição de entrada da vibração e/ou combinações de posições.

Outras variáveis:

- outros fatores adversos (ruído, temperatura, etc.);
- dinâmica do assento (no caso de posição sentada).

Variáveis extrínsecas ao movimento:

Variáveis intersubjetivas:

- postura corporal;
- posição corporal;
- orientação corporal (sentado, em pé, deitado).

Variabilidade intersubjetiva:

- tamanho e peso corporal;
- resposta dinâmica corporal;
- idade;
- gênero;
- experiência, expectativa e atitude; personalidade;
- condicionamento físico (fitness).

A questão de determinar um limite de aceitação é complicada porque a percepção da vibração não é apenas uma função de "sentir a vibração". As vibrações podem ser detectadas por vários sistemas sensoriais, como o visual, o auditivo, o sistema nervoso e outros. Em outras palavras, as vibrações podem ser detectadas por vários meios, ela pode ser sentida, pode afetar algum órgão do equilíbrio ou pode ser ouvida (GRIFFIN, 1990 apud MARGARIDO, 2013).

De acordo com Pavic e Reynolds (2002-a) outro aspecto interessante para a percepção da vibração depende de o fato da pessoa estar em movimento ou parada, quando está submetida à vibração. Durante o processo de caminhar o corpo humano é submetido a acelerações de até 3 m/s^2 . No entanto, o sistema nervoso e o cérebro são utilizados para este tipo de situação, desprezando tais acelerações. Então, ao caminhar sobre um sistema de piso, as pequenas vibrações da estrutura podem não ser percebidas.

Alguns pesquisadores afirmam que a duração da exposição à vibração é um fator muito importante, pois a exposição prolongada aumentaria o desconforto. Outros estudos mostram que o valor do amortecimento da estrutura tem efeito sobre as respostas, especialmente nos casos de vibrações transitórias. Na medida em que se aumenta o decaimento das vibrações transitórias em estruturas de sistemas de piso, a aceitação a estas vibrações aumenta.

Estudos experimentais mostram que as pessoas reagem de uma forma especialmente adversa a frequências entre 5 e 8 Hz (HANES, 1970). De acordo com Bachmann et al. (1995), a percepção e o desconforto provocado pela vibração é proporcional à aceleração quando a frequência de vibração está na faixa de 1 a 10 Hz. Isto pode ser explicado pelo fato que cada parte do corpo humano possui uma frequência

fundamental própria e, portanto, apresenta uma maior ou menor sensibilidade a diferentes faixas de frequência (Figura 2-1). Além disso, cada indivíduo, devido às características extrínsecas, apresenta uma maior ou menor sensibilidade às vibrações.

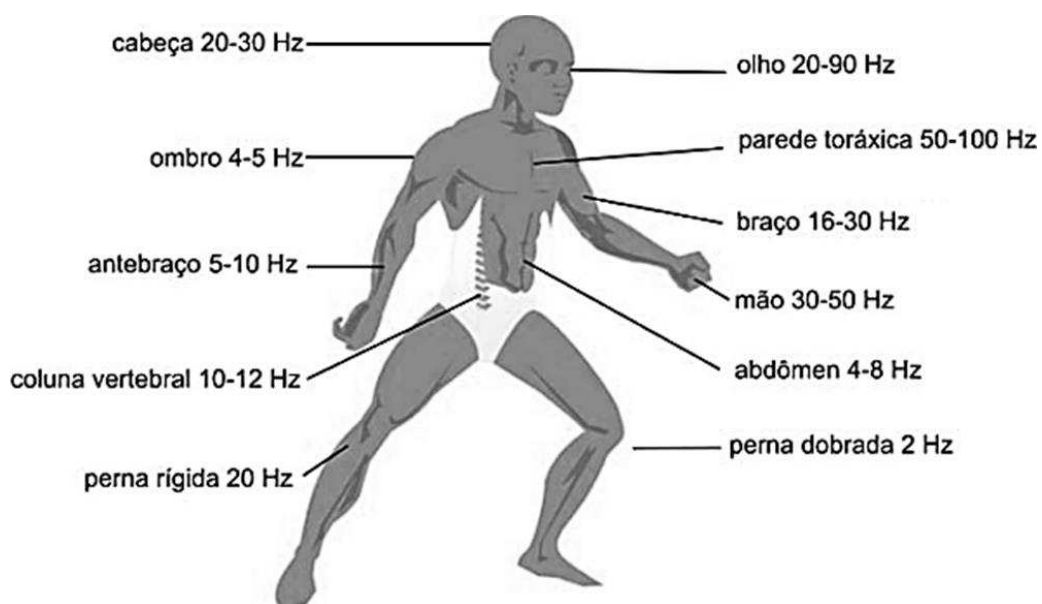


Figura 2-1- Frequências naturais do corpo humano (ISO 5349, 1986 apud Almeida, 2008).

Em analogia à direção da vibração em relação à coluna vertebral, as acelerações podem ser divididas em a_z , a_x e a_y , que representam respectivamente as acelerações verticais (eixo dos pés à cabeça), acelerações no eixo atrás e frente (costa/peito) e acelerações no eixo lateral (lado direito e esquerdo), como pode ser verificado na Figura 2-2.

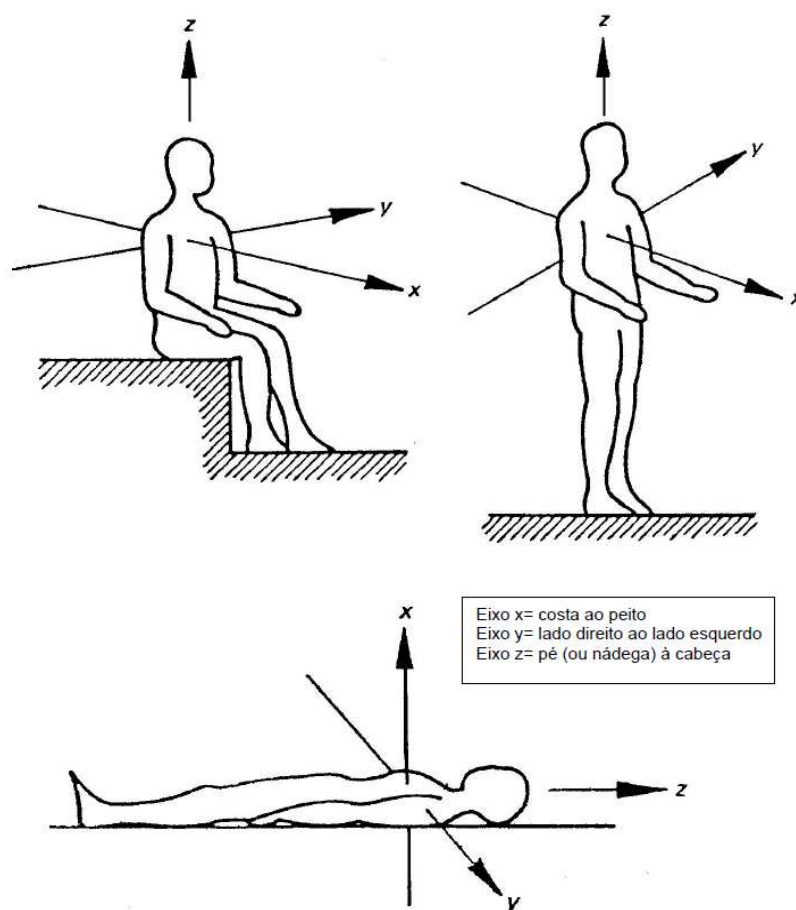


Figura 2-2 - Direções do sistema de coordenadas para vibrações mecânicas em seres humanos (ISO 2631-1, 1985).

De acordo com a ISO-2631/1 (1997) as bandas de frequências mais sensíveis ao ser humano estão entre 4 a 8 Hz para vibrações longitudinais (a_z) e abaixo de 2 Hz para vibrações transversais (a_x e a_y), e a tolerância à vibração decresce em função do aumento do tempo de exposição. A tolerância para vibrações transversais é mais baixa do que para vibrações longitudinais, sendo que o inverso ocorre para valores de frequências maiores do que 2,8 Hz. Tal fato pode ser visto nas curvas de ponderações de frequências da BS 6841 (1987), onde se pode observar para efeito de exemplificação, que para uma mesma onda sinusoidal, a sensação em 8 Hz é o dobro quando comparada com a sensação a 2,5 Hz ou 32 Hz (considerando a curva W_b que correspondente ao eixo z, (Figura 2-3).

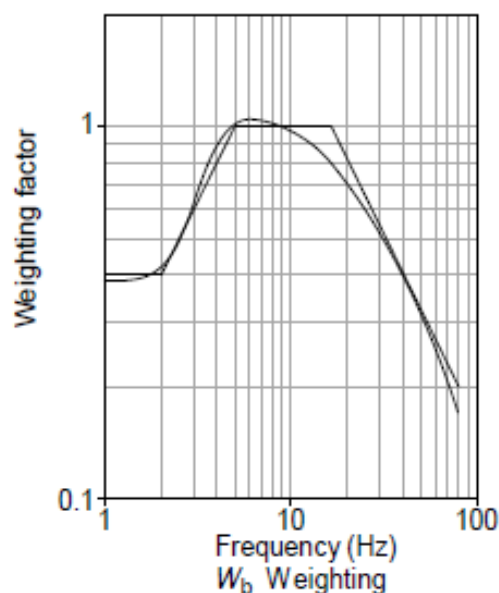


Figura 2-3 – Curva de ponderação de frequência W_b (BS 6841 (1987)).

2.3 Estudos realizados por outros autores

De acordo com Figueiredo (2005) a preocupação com os efeitos da carga dinâmica em estruturas não é algo recente. Desde o final do século XIX estudos sobre cargas geradas por atividades humanas vêm sendo conduzidos. Tredgold (1828) publicou o primeiro critério de rigidez para estruturas. Segundo ele, as vigas para grandes vãos deveriam ter altura suficientes para que as vibrações induzidas por atividades humanas não sejam capazes de excitar a sua frequência fundamental.

No início do século XX, aconteceu um significativo aumento nas pesquisas de vibrações induzidas pelo caminhar humano em sistemas de piso, devido ao aumento do número de reclamações dos usuários de escritórios sobre a percepção e o desconforto causado por este tipo de vibração (MIDDLETON e BROWNJOHN, 2008).

De acordo com Almeida (2008) desde a década de 30 tem sido estudada, em diversas escalas, as vibrações induzidas por seres humanos, avaliando desde as vibrações em sistemas de piso (em termos do movimento de vibração e de sua frequência natural) até as percepções subjetivas (classificando de imperceptível até definitivamente perceptível).

Nos meados da década de 60, a indústria aeronáutica foi a pioneira a tentar dominar os problemas de vibração em estruturas, devido ao grande avanço da informática e ao surgimento de novas técnicas de análise dinâmica e incluindo a discretização da estrutura pelo Método dos Elementos Finitos – MEF (SOMEER (2002) apud COSTA (2012)).

Nas décadas de 70 e 80 as pesquisas sobre as ações dinâmicas e seus efeitos tiveram um grande avanço. Tal fato decorre, do aparecimento das primeiras normas internacionais com critérios de aceitação de vibrações, como a ISO 2631-1 em 1978. Em 1989 a SCI publicou o Design Guide on the Vibration of Floors, baseado na ISO 12631/2 (1989), que foi amplamente utilizado nos projetos como critérios de aceitação e base para inúmeras pesquisas até nos dias atuais.

A seguir são detalhadas algumas pesquisas publicadas nos últimos anos, de relevância nacional e internacional no contexto discutido.

2.3.1 Hicks et al. (2000)

Hicks et al. (2000) realizaram uma série de ensaios dinâmicos experimentais em 17 edifícios comerciais com sistemas de piso misto de aço e concreto na França e Inglaterra. Para todos os modelos foram realizados ensaios de impacto para obtenção das características modais da estrutura e logo em seguida ensaios de vibração forçada através do walking test visando analisar a amplitude das acelerações induzidas pelo caminhar humano. Para efeito de comparação, os resultados obtidos através dos ensaios dinâmicos experimentais foram confrontados com os valores recomendados pelo SCI Design Guide (1989) e AISC Design Guide (1997).

Através das comparações realizadas por Hicks et al. (2000), pode-se observar que o método analítico fornecido pelo SCI Design Guide para cálculo da frequência fundamental possui uma alta correlação com os valores obtidos através dos ensaios dinâmicos, sugerindo que o método analítico é consistente, podendo então ser empregado para o cálculo de frequências fundamentais de sistemas de piso comuns, para efeito de projeto.

Em relação ao amortecimento, foi verificado que para pisos sem revestimento, pisos inacabados ou com baixa quantidade de mobília, o valor recomendado pelo SCI é

superestimado. Sendo que para estas condições é recomendado a utilização de um amortecimento igual a 1,1%. O valor de 3,0% recomendado pelo SCI pode ser utilizado para pisos normais e bem mobiliados e o valor de 4,5% somente em casos especiais, quando as divisórias forem posicionadas nos locais de máxima amplitude de aceleração do sistema de piso.

As respostas de aceleração obtidas através dos ensaios dinâmicos foram bem menores quando comparadas com as respostas obtidas através das formulações analíticas do SCI (1989) e AISC (1997). Este fato mostra que a metodologia para estimar a aceleração nos 2 guias é muito conservadora. Diante desta situação foi proposto um método simplificado para o cálculo das respostas dinâmicas em sistemas de piso misto em aço e concreto, onde se leva em conta as dimensões do sistema de piso. Para sistemas de piso muito longos, dificilmente o caminhar humano irá causar excitação ressonante em todo piso, e sim, somente em uma região, sendo que uma expressão bi-linear representa de forma mais digna da rigidez do sistema de piso.

Por último foi realizada uma análise do critério de aceitação da CSI comparando os fatores de multiplicação fornecidos pela norma com os resultados obtidos em suas análises dinâmicas e recomenda a inclusão de um fator igual a 12 para escritórios de grande concentração de pessoas, que possuam distrações visuais e sonoras de forma simultânea com as vibrações no sistema de piso.

2.3.2 Varela (2004)

Varela realizou um estudo teórico-experimental para analisar vibrações induzidas pelo caminhar humano em dois sistemas de piso misto de concreto e aço.

O primeiro modelo produzido em laboratório era composto por uma treliça espacial formada por perfis metálicos em uma laje de concreto com forma de aço incorporada e conectores de cisalhamento entre a laje a treliça espacial (Figura 2-4). Já o segundo modelo, consiste de um edifício de múltiplos andares formado por pilares e vigas metálicas e laje de concreto composta por uma pré-laje treliçada, isopor e a concretagem do restante in-loco formando assim lajes nervuradas (Figura 2-5).



Figura 2-4 – Modelo 01 - Protótipo de estrutura reticulada espacial mista, montado no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.

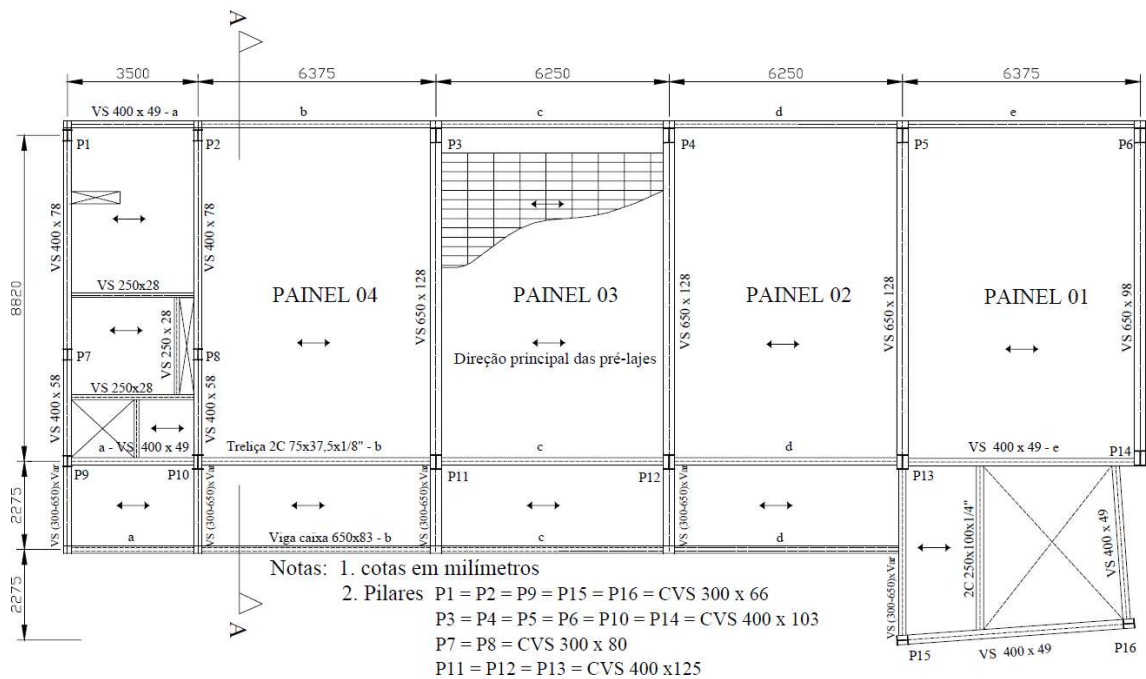


Figura 2-5 – Modelo 02 - Estrutura do pavimento tipo do edifício.

Os ensaios experimentais foram realizados em duas etapas, a primeira formada por um ensaio de impacto e a segunda por um ensaio de vibração forçada pelo caminhar humano de uma ou mais pessoas. A primeira etapa foi realizada para obtenção das características modais da estrutura, como frequências naturais e amortecimento, posicionando acelerômetros nas regiões de máximas amplitudes de deslocamento previamente determinadas através do modelo numérico teórico. A segunda etapa foi

realizada com objetivo de determinar os valores máximos das amplitudes da aceleração induzida pelo caminhar humano e comparar tais valores com os valores recomendados por normas internacionais de conforto humano a aceleração em estruturas.

Os resultados experimentais foram comparados com os resultados numéricos, com objetivo de validar o modelo. Com os modelos validados, foram efetuados novos ensaios e avaliada a utilização de ADS (Atenuadores Dinâmicos Sincronizados) para diminuir a amplitude das acelerações, adequando-as com os valores recomendados pelas normas de conforto.

A partir dos resultados obtidos foi proposta e executada a instalação de ADS nos pisos da edificação real estudada, obtendo-se uma redução considerável dos valores máximos das amplitudes das acelerações induzidas pelo caminhar humano, conduzindo a estrutura a valores aceitáveis de acelerações da estrutura devida à vibração induzida pelo caminhar humano.

Varela concluiu que com a tendência construtiva moderna de vãos cada vez mais longos, com utilização de materiais mais resistentes e mais esbeltos, a estrutura passa a ter cada vez menor rigidez, culminando em menores frequências fundamentais e maior vulnerabilidade às vibrações induzidas ao caminhar humano, ao ponto de as amplitudes das acelerações ultrapassarem os valores recomendados pelas normas internacionais de conforto humano. Deste modo, a utilização de mecanismos para amortecimento das acelerações (ADS, revestimentos visco-elásticos ou enrijecimento do sistema) se torna cada vez mais necessária para atingir os estados limites de serviço das normas vigentes e o conforto dos usuários.

Através de seus estudos, Varela também concluiu que para a realização dos ensaios de impacto por meio do heel-drop test, os impactos dos calcanhares devem ser realizados nas extremidades das regiões estudadas, distante do local de máxima amplitude de aceleração do sistema de piso. Assim evitando que após o impacto do heel-drop test, o corpo do voluntário funcione como um sistema massa-mola-amortecedor, aumentando de forma equivocada o valor do amortecimento crítico estimado.

2.3.3 Zúñiga (2011)

Em 2011 Zúñiga realizou uma análise modal experimental para uma passarela composta por uma estrutura de treliças tubulares metálicas e laje de concreto, formando um sistema misto de interação completa, com 82,5 m de extensão, sendo composta por três vãos (32,5 m, 17,5 m e 20,0 m) e dois balanços (7,5 m e 5,0 m), localizada sobre as avenidas Osvaldo Aranha e Maracanã em São Cristóvão na Cidade do Rio de Janeiro - RJ, Brasil, através de ensaios de impacto com a queda de um corpo com massa conhecida e ensaios de vibração forçada provocada pelo caminhar humano (lento, normal e rápido) com uma, duas e três pessoas e também para uma e duas pessoas correndo.

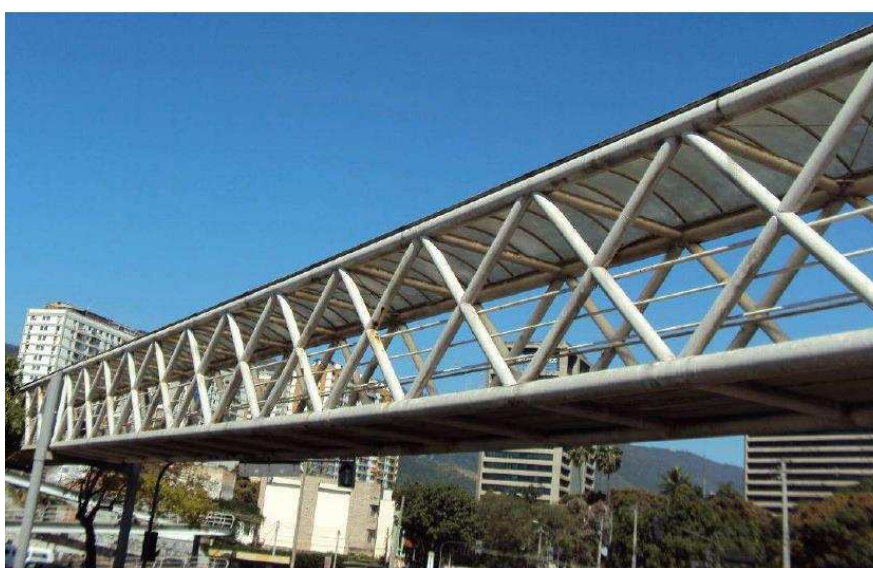


Figura 2-6 - Vista lateral da passarela sobre as avenidas Osvaldo Aranha e Maracanã.

A análise modal experimental foi realizada com a utilização de seis transdutores de aceleração capacitivos ligados a uma central de aquisição de dados, posicionados a $1/3$, $1/2$ e $2/3$ do vão em análise, com a repetição de cada ensaio para aquisição de sinais nos eixos x , y e z . Seus resultados foram comparados com resultados obtidos numericamente por Debona (2011) e com os valores limites para o conforto humano propostos por diversos autores e padrões de projetos internacionais. Os valores obtidos para as frequências e modos apresentaram boa correlação entre o ensaio experimental e o modelo numérico, sendo que as taxas de amortecimento estimadas através do método do decremento logaritmo tiveram boa coerência com os valores recomendados pelo CEB (1996) para estruturas de aço.

A 1ª frequência natural vertical obtida foi maior que as frequências mínimas exigidas pelas normas internacionais para avaliação do conforto humano. Em relação à frequência natural transversal, a estrutura teve valor inferior ao limite estabelecido pelo Eurocode 1990 – Basis of structural design. A amplitude da aceleração observada para todas as normas em pelo menos um dos casos ensaiados (caminhar de uma, duas ou três pessoas e correr de uma e duas pessoas), os valores obtidos foram superiores aos máximos estabelecidos. Desta maneira, pode-se concluir que a estrutura não apresenta condições de conforto em relação à sensibilidade humana às vibrações.

2.3.4 Battista et al. (2012)

Battista et al. (2012) apresentaram de maneira resumida as soluções para os principais problemas de vibração dos sistemas de piso de um edifício comercial em estrutura mista de aço e concreto localizado em Salvador - BA, desenvolvidas com base nas respostas dinâmicas obtidas por medições experimentais e simulações numéricas (Battista et al. 2007-b, 2008 e 2010-a).

As medições foram realizadas com o intuito de identificar as características dinâmicas da estrutura e as fontes de vibração. As ações dinâmicas que causavam vibrações excessivas na estrutura eram vibrações oriundas da operação de equipamentos eletromecânicos de uma estação de jogos em um sistema de piso misto (Figura 2-7), e também, pelo caminhar de pessoas em um trecho do balanço do sistema de piso na praça de alimentação (Figura 2-8).

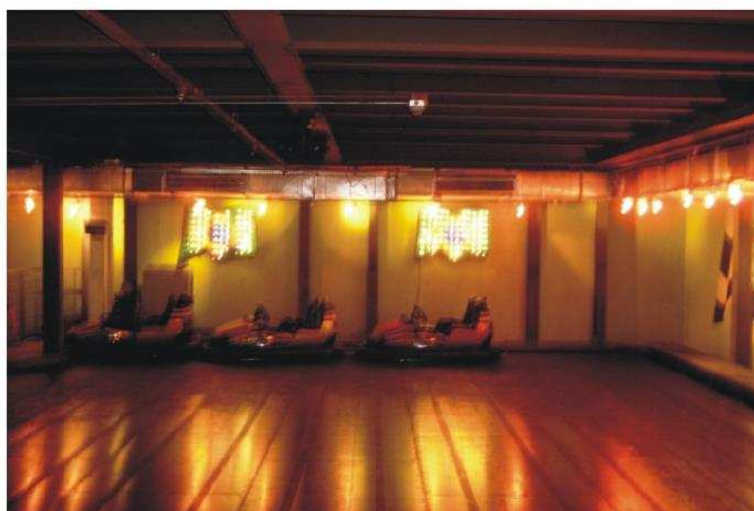


Figura 2-7 – Aspecto geral da pista dos “carrinhos de bate-bate”.



Figura 2-8 – Aspecto geral da varanda que apresentava vibrações excessivas.

As medições experimentais foram realizadas por meio da instrumentação com acelerômetros. Os ensaios de impacto para identificação das características dinâmicas da estrutura foram realizados por meio da aplicação de forças impulsivas sucessivas sobre os painéis de laje, produzidas por impacto dos calcanhares (heel-drop test).

Modelos numéricos tridimensionais em elementos finitos dos dois trechos das estruturas mistas foram elaborados com o auxílio do programa SAP2000 e de um programa computacional especialmente desenvolvido no Instituto COPPE e na empresa Controllato Ltda. para soluções de problemas de vibrações (Figura 2-9 e Figura 2-10). Os modelos foram calibrados e validados por meio da correlação com as medições experimentais realizadas. As respostas às ações dinâmicas foram assim utilizadas para conceber soluções alternativas para os problemas identificados, buscando projetar e fabricar os dispositivos dos sistemas de controle dinâmico.

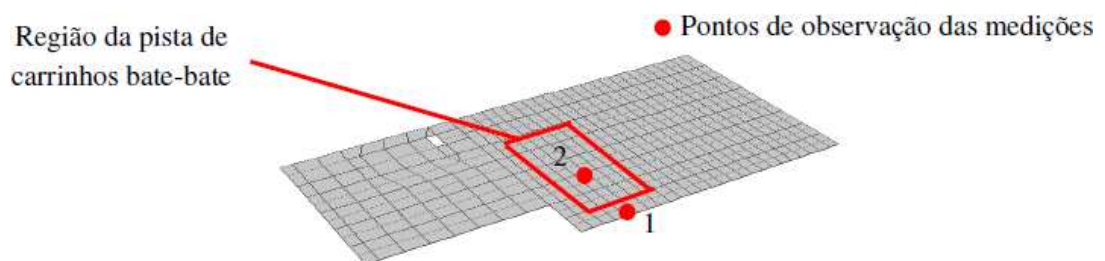


Figura 2-9 - Modelo MEF-3D da estrutura contendo a região da pista de carrinhos bate-bate.

● Ponto de observação dos resultados

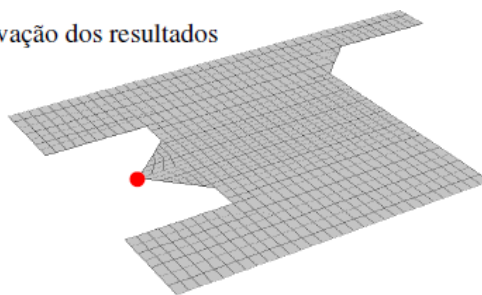


Figura 2-10 - Modelo computacional da estrutura na região da varanda.

2.4 Critérios de projeto para avaliação de vibrações

A capacidade de percepção da vibração e a sensibilidade que o usuário apresenta é algo subjetivo. Em função disso, foram criados, ao longo dos anos vários critérios internacionais com o objetivo de estabelecer métodos de aceitação às vibrações, definindo-se os níveis máximos de aceleração de forma a garantir condições de serviço aceitáveis para as edificações considerando o conforto humano.

Neste trabalho são apresentadas algumas das principais referências normativas nacionais e internacionais relacionadas aos efeitos das vibrações induzidas por atividade humana em edificações e sistemas de piso e metodologias relativas ao conforto humano, observando suas relevâncias no cenário nacional, mundial e contexto histórico.

2.4.1 ABNT NBR 8800:1986

Na ABNT NBR 8800:1986 – Projeto e Execução de estruturas de Aço foi introduzido o Anexo N, que trata de vibrações de sistemas de piso. Segundo esta norma, em geral as vibrações em pisos são desagradáveis, porém os indivíduos são mais susceptíveis àquelas na faixa de frequência entre 2 Hz e 8 Hz, onde o limite de percepção corresponde a algo em torno de 0,5% da aceleração da gravidade “g”. Os limites de percepção que são mostrados na Figura 2-11 podem ser utilizados como aproximação para determinação dos limites estabelecidos para projetos. Para locais sensíveis (como salas de cirurgias, laboratórios especiais) o limite de projeto deve ser inferior aos apresentados e para locais onde o efeito da vibração é menos importante (como indústrias) pode ser superior.

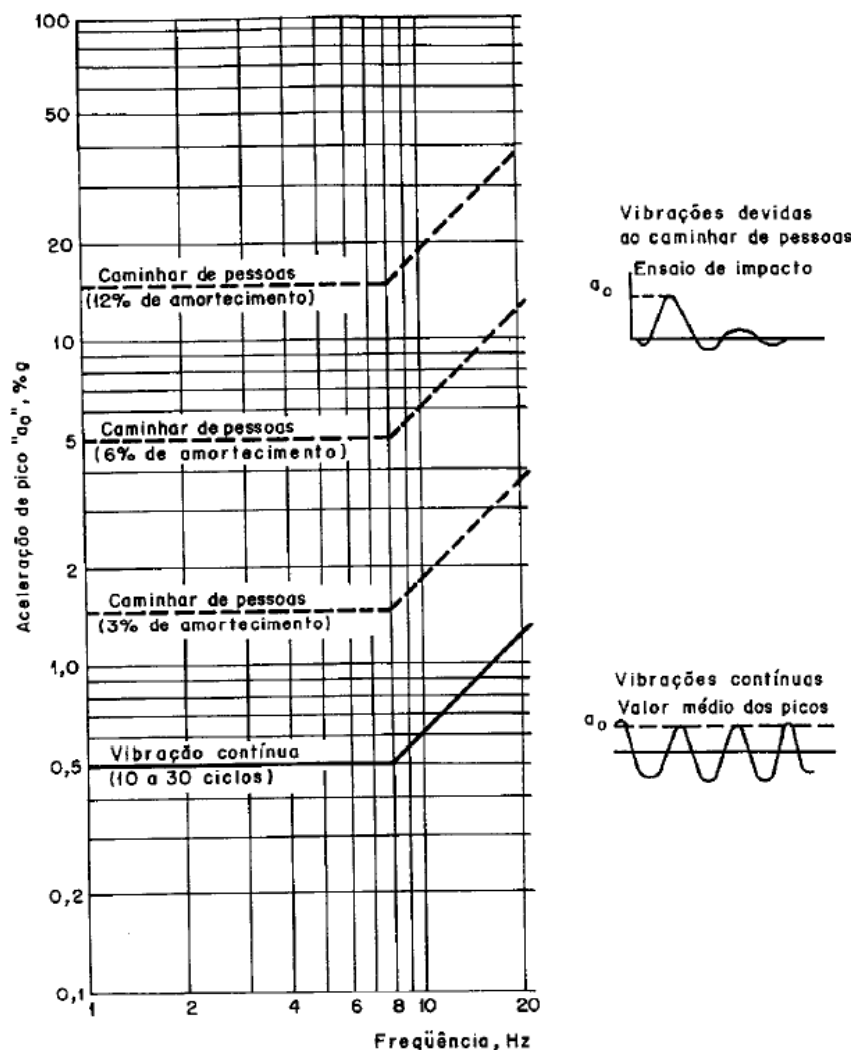


Figura 2-11 - Limites de desconforto causado por vibrações em pisos de edifícios residenciais, escolares e comerciais, devidas ao caminhar humano.

De acordo com a norma, o caminhar humano é considerado como uma vibração intermitente, e sua aceleração é determinada através de ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test). À medida que se aumenta o amortecimento o valor de pico admitido para a aceleração pode ser superior, levando em conta que quanto maior o amortecimento maior a velocidade de supressão da vibração pela estrutura, sendo menos desconfortável para o usuário. Isto pode ser visto na Figura 2-11, onde existem vários níveis de aceitação para as vibrações do caminhar humano para diferentes valores de amortecimento.

As vibrações oriundas do caminhar humano são capazes de gerar transtornos em alguns ambientes com grandes vãos. O impacto causado nesta situação é comum onde existe piso com amortecimento abaixo do adequado. A força gerada por esta atividade

humana tem capacidade de produzir uma frequência na faixa de 1,0Hz a 4,0Hz, aproximadamente. Deste modo, o indicado para pisos de regiões com esta atividade é de uma frequência natural superior a 5,0Hz. Em locais onde a prática de exercício humano seja repetitiva (dança, esporte, entre outros), existe a possibilidade de ocorrer ressonância. Porém, para impacto rítmico que ocorrer a cada dois ciclos de vibração do piso; portanto, para tal condição a frequência destes pisos deve ser no mínimo de 10,0Hz, garantindo o amortecimento ideal ao conforto. No caso de vibrações oriundas de grandes movimentos, como de máquinas, estas podem ser reduzidas e evitadas com um dimensionamento adequado da estrutura na fase de projeto.

No caso de vigas, mistas ou não, mais sensíveis, que possuem vãos de 7,5m a 20m em geral, a faixa de frequências é variável de 4,0Hz a 15,0Hz. Nestes casos de pisos, as divisórias são uma boa alternativa para fornecer o amortecimento necessário, levando ao maior conforto, uma vez que não há vibrações excessivas. Por outro lado, as vibrações intermitentes podem ser um problema em pisos sem divisórias e com baixo amortecimento inerente, o que ocorre com frequência na construção mista. A Figura 2-11 mostra que o limite de desconforto para um amortecimento de 12%, é cerca de dez vezes maior do que o limite correspondente a 3% de amortecimento.

A aceitabilidade da vibração do piso é avaliada conhecendo-se a frequência, o amortecimento e a aceleração de pico decorrente do impacto causado ao caminhar das pessoas. Diante da impossibilidade do uso de ensaios dinâmicos na estrutura estudada, a norma apresenta a expressão (2-1) para estimar a frequência fundamental, onde pode ser considerada a ação mista de interação total, mesmo no caso de construções não mistas (este fato pode ser admitido, uma vez que, os esforços considerados para o cálculo da frequência fundamental são os de serviços, esforços estes que não são capazes de mobilizar o atrito entre a viga e a laje, desta maneira podendo considerar o efeito misto também para sistemas de piso híbrido de aço e concreto).

$$f_1 = 1,57 \sqrt{\frac{E I_{ef}}{m L^4}} \quad (2-1)$$

onde:

E é o módulo de elasticidade longitudinal do aço, em MPa;

- I_{tf} é o momento de inércia da seção transformada (seção de concreto transformada para o aço), em mm^4 ;
- L é o vão da viga, em mm;
- m é a massa da seção mista considerada, por unidade de comprimento, ao longo do vão, em kN.

As vigas contínuas devem ser tratadas como simplesmente apoiadas, uma vez que seus vãos adjacentes vibram em direções opostas.

Em geral, é mais fácil estimar a frequência do que o amortecimento. Um piso em aço e concreto, sem divisórias, possui uma taxa de amortecimento da ordem de 3% a 4%, já uma construção não mista, apresenta uma taxa de amortecimento em média de 2%, para o caso de construção mista com interação total. A colocação de componentes como acabamentos de pisos (tapetes, mobiliários, forro, proteção contra incêndio e dutos) tem capacidade de aumentar o amortecimento em cerca de 3% ou mais.

As divisórias, independentes da direção em relação ao piso são capazes de proporcionar um amortecimento mais eficiente. Estas colocadas sobre os apoios, ou paralelas às vigas de apoio da laje, e com espaçamento superior a 6,0 m podem não ser eficientes, porque as linhas nodais de vibração se formam sob as próprias divisórias.

As pessoas também proporcionam amortecimento. O efeito deste amortecimento sobre o piso é variável com o peso do piso e o tamanho do vão, sendo mais eficiente para pisos mais leves e de menores vãos. Alguns valores de amortecimento estão na tabela 2-1, indicados para cálculo simplificado (em percentual do amortecimento crítico).

Tabela 2-1 - Níveis de amortecimento.

Tipo de piso	Amortecimento em % do crítico
Piso não acabado	3%
Piso acabado (incluindo revestimento, forro, dutos e mobiliário)	6%
Piso acabado com divisórias	12%

A aceleração de pico pode ser estimada considerando a variação dos diferentes tipos de piso, sendo importante considerar a rigidez da laje, a continuidade ou não da

mesma e também os contraventamentos, uma vez que o comportamento deste na vertical e entre vigas não tem mostrado diferença de efeito na distribuição transversal de carga quando comparado a uma laje contínua de concreto. De acordo com a NBR 8800:1986, a amplitude da aceleração de pico (a_0) pode ser determinada, aproximadamente, pelas seguintes expressões:

$$a_0 = \frac{68800 f}{L t_c (t_c + 25,4)} \quad (\text{para concretos comuns}) \quad (2-2)$$

$$a_0 = \frac{88500 f}{L t_c (t_c + 25,4)} \quad (\text{para concretos leves}) \quad (2-3)$$

onde:

f é a frequência, em Hz;

L é o vão, em metros;

t_c é a espessura efetiva da laje de concreto, em milímetros.

2.4.2 ABNT NBR 8800:2008

De acordo com a NBR 8800:2008, a utilização de estruturas com vãos muito grandes e amortecimento reduzido podem resultar em vibrações que causem desconforto ou prejuízo no funcionamento de equipamentos, quando submetidas a atividades humanas normais, sendo que em nenhum caso a frequência fundamental do sistema de piso deve ser inferior a 3 Hz.

Diferentemente da versão de 1986, onde eram definidos limites máximos de amplitudes de aceleração correlacionados com a frequência natural e amortecimento do sistema de piso, na versão de 2008 tais fatores foram suprimidos, deixando a critério do projetista a verificação da necessidade de uma avaliação precisa ou simplificada da estrutura projetada.

Em ambientes como escritórios, residências e similares, em que as pessoas caminham regularmente, uma avaliação simplificada pode ser realizada limitando a menor frequência natural a 4 Hz. Esta condição fica satisfeita se o deslocamento vertical total for menor que 20 mm. Esse deslocamento é calculado considerando as ações permanentes, incluindo a parcela dependente do tempo e as ações variáveis, considerando a viga simplesmente apoiada e usando as combinações frequentes de serviço.

Já em pisos onde as pessoas desenvolvem atividades rítmicas, como os de academias de ginástica, salões de dança, ginásios e estádios de esporte, a menor frequência natural não pode ser inferior 6 Hz e deve ser aumentada para 8 Hz quando a atividade é repetitiva, como ginásticas aeróbicas. Essas condições ficam satisfeitas se o deslocamento vertical total do piso não superar 9 mm e 5 mm respectivamente, calculado considerando as vigas como biapoiadas e usando as combinações frequentes de serviço. Deve-se ressaltar que esse deslocamento é causado pelas ações permanentes e variáveis, excluindo a parcela dependente do tempo.

Vale destacar que os critérios mencionados anteriormente representam somente uma avaliação simplificada de vibração em pisos causada pelas atividades humanas, podendo não representar de forma real uma solução adequada para o problema. Para a realização de uma avaliação mais criteriosa, o projetista deverá proceder a uma análise dinâmica que leve em conta os seguintes itens:

- as características e a natureza das excitações dinâmicas, como por exemplo, as decorrentes do caminhar das pessoas e de atividade rítmicas;
- os critérios de aceitação para o conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso;
- a frequência natural da estrutura do piso;
- a razão do amortecimento modal;
- os pesos efetivos do piso.

2.4.3 ABNT NBR 6118:2014

Segundo a norma brasileira para estrutura de concreto armado, a análise das vibrações pode ser realizada em regime linear no caso de estruturas usuais. Recomenda-se que a frequência natural (f_n) para estruturas sujeitas a vibração seja quanto maior possível da frequência crítica ($f_{crit.}$), que irá depender do tipo de atividade que será exercida sobre a estrutura, de acordo com a seguinte expressão:

$$f_n > 1,2 f_{crit.} \quad (2-4)$$

O comportamento das estruturas sujeitas a ações dinâmicas cíclicas que originam vibrações pode ser modificado por meio de alterações em alguns fatores tais como: ações dinâmicas, frequência natural (pela mudança da rigidez da estrutura ou da massa em vibração) e aumento das características de amortecimento.

Em casos especiais, pode não ser suficiente afastar as duas frequências, própria e crítica, sendo necessário aumentar a massa ou o amortecimento da estrutura para absorver parte da energia envolvida.

Nos casos em que as prescrições anteriores não puderem ser atendidas, deve ser feita uma análise dinâmica mais acurada, conforme estabelecido em normas internacionais, enquanto não existem normas brasileiras que tratem do assunto.

Na falta de valores determinados experimentalmente, pode-se adotar os valores indicados na Tabela 2-2 para a frequência crítica ($f_{crit.}$).

Tabela 2-2 – Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.

Caso	$f_{critica}$ (Hz)
Ginásio de esportes	8,0
Sala de dança ou de concertos sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

2.4.4 ISO 2631 (1978)

A norma ISO 2631 foi elaborada em 1974 e posteriormente revisada em 1978, com o objetivo de desenvolver uma metodologia que pudesse ser aplicada facilitando a avaliação e a comparação de respostas humanas às vibrações e apresentar um guia internacional inicial de limites de aceitação de exposição à vibração de corpo inteiro para vibrações de 1 a 80 Hz. Até sua data de criação já existiam algumas metodologias para classificar a gravidade da exposição do corpo humano às vibrações, porém para aplicações específicas, não podendo ser aplicadas em todas as situações e conseqüentemente, não aceitas internacionalmente.

Esta norma definiu valores numéricos a limites de exposição a vibrações transmitidas ao corpo humano, podendo ser utilizados para vibrações periódicas, não periódicas e intermitentes com um espectro difuso de frequência. Os limites definidos foram divididos em 3 classes: nível de conforto reduzido, nível de eficiência reduzida (fadiga) e limite de exposição. Estes limites estão relacionados com a preservação do conforto, eficiência de trabalho e segurança de saúde, respectivamente. De acordo com os critérios mencionados, estes limites estão especificados em termos de frequência vibratória, amplitude de aceleração, tempo de exposição e direção da vibração em relação à coluna vertebral.

Os limites de exposição recomendados são definidos de acordo com as três classes e divididos em acelerações longitudinais (a_z) e transversais (a_x e a_y). Na Figura 2-12 são representados graficamente os limites para o “nível reduzido de eficiência” (fadiga) para acelerações longitudinais e transversais.

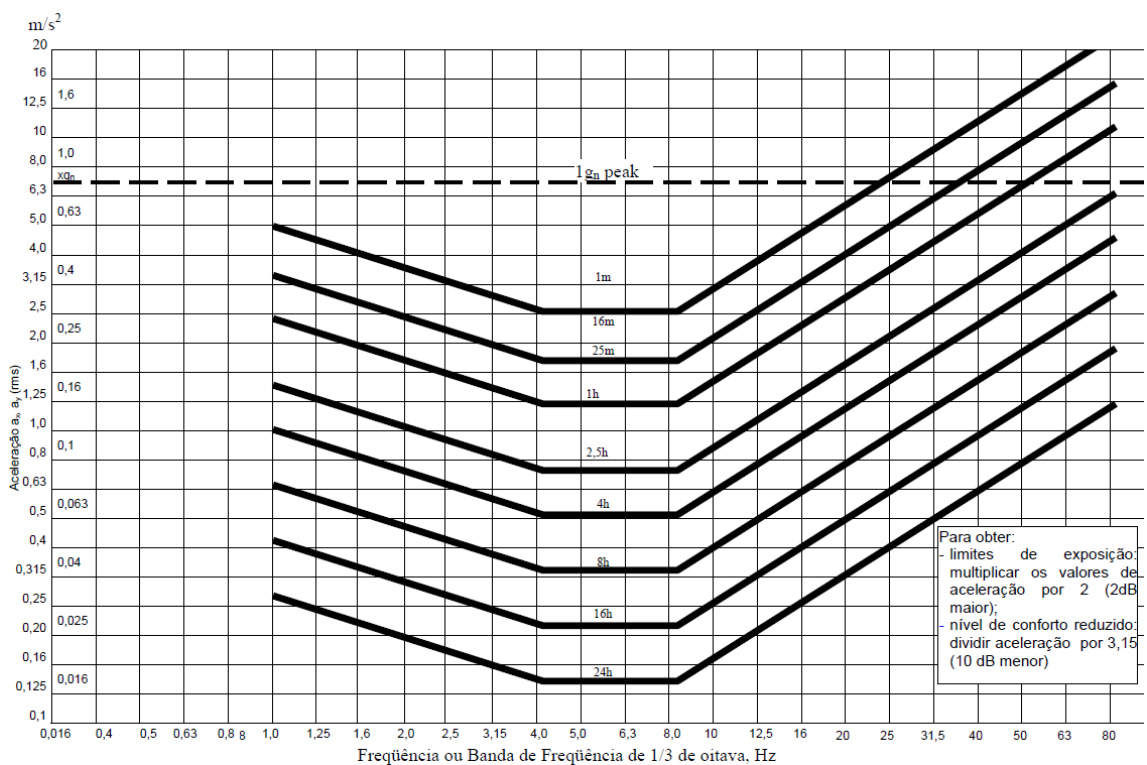


Figura 2-12 - Limite de aceleração longitudinal (a_z) como função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga).

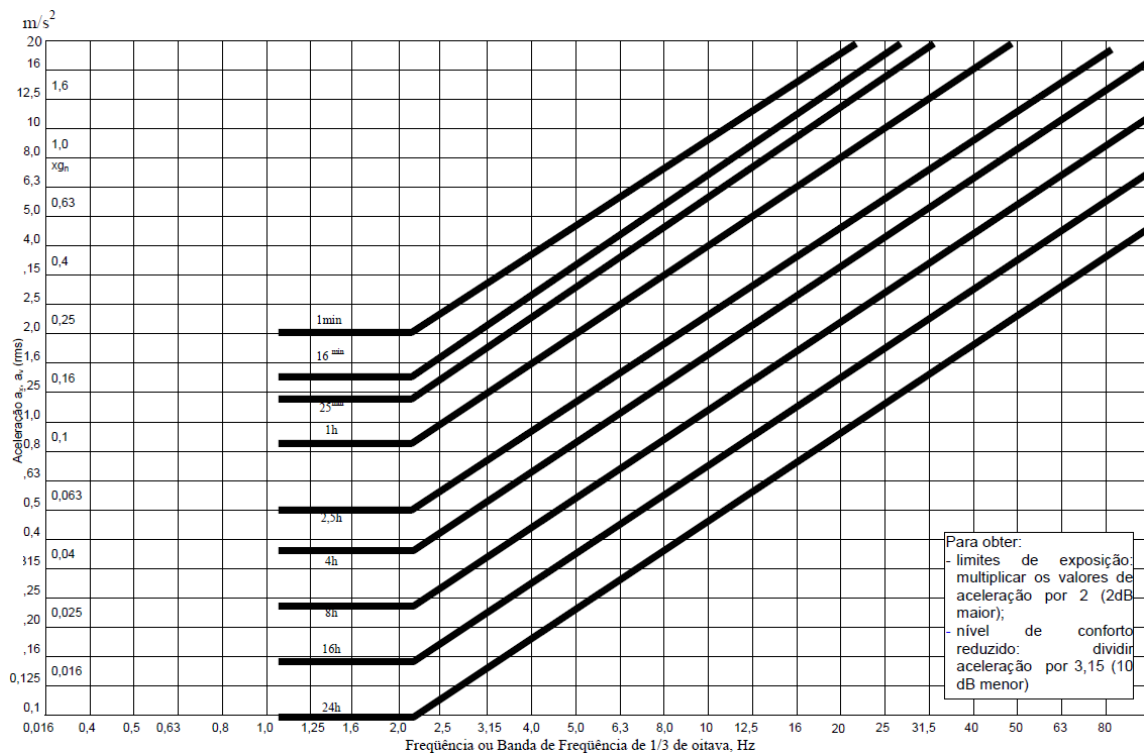


Figura 2-13 - Limite de aceleração transversal (a_x e a_y) como função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga).

Para determinação dos níveis de exposição e de conforto reduzido, basta multiplicar os valores limites da aceleração pelo nível reduzido de eficiência (fadiga) ou dividir os mesmos valores por 3,15, respectivamente.

Na prática, os valores propostos pela ISO não poderiam ser utilizados de forma direta para todos os casos, necessitando de valores de correção para avaliar as diferentes condições ambientais de exigências de trabalho. Eles podem ser aplicados de forma direta para vibrações devidas ao transporte e proximidades de equipamentos industriais. Porém para avaliação de distúrbios devido à vibração em edificações residenciais, escritórios e semelhantes, tais valores não são diretamente representativos.

2.4.5 ISO 2631/2 (1989)

Em 1985 a ISO 2631 foi atualizada, sendo renomeada como ISO 2631-1, Part. 1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration: General requirements, onde foram mantidas as classes de divisões dos tipos de vibrações, porém retirados os limites de aceitação propostos na norma de 1978. Então, em 1989 foi lançada a ISO2631-2, Part. 2: Human exposure to continuous and shock-induced vibrations in

buildings (1 to 80Hz), onde foram apresentados procedimentos de medição e critérios de aceitabilidade em edificações sujeitas a vibrações que podem gerar desconforto humano. Estabelecendo limites para a avaliação de vibrações, em função do tipo de vibração e do tipo de ocupação da edificação. Esta norma apresenta um guia para aplicação da ISO 2631-1 para respostas humanas as vibrações em edifícios.

De acordo com a norma, a medição da vibração deve ocorrer na região onde exista o contato do usuário com a estrutura, podendo ser em um ou em vários pontos, onde as vibrações ocorram com maior intensidade. A norma fornece valores numéricos para os limites de exposição às vibrações transmitidas ao corpo humano, para vibrações periódicas ou intermitentes com amplitude de frequência de 1 a 80 Hz.

Os limites de exposição às vibrações são apresentados em função da amplitude da aceleração, onde este é comparado com as acelerações efetivas medidas em r.m.s. (root mean square - raiz quadrada do erro quadrático médio das acelerações) da estrutura, dados por:

$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2-5)$$

onde:

a_{eff} é a aceleração em r.m.s.;

T é o período em segundos;

a é a aceleração ao longo do tempo (m/s²).

Por simplificação, a aceleração efetiva pode ser determinada pelo valor da aceleração de pico dividido por raiz quadrada de dois.

Os valores das acelerações medidas são comparados com os valores de acelerações aceitáveis, que são determinadas através dos valores encontrados nas curvas base (Figura 2-14 e Figura 2-15), os quais são corrigidos por fatores multiplicadores (Tabela 2-3) que levam em consideração o tipo de ocupação, período diurno ou noturno e o tipo de vibração.

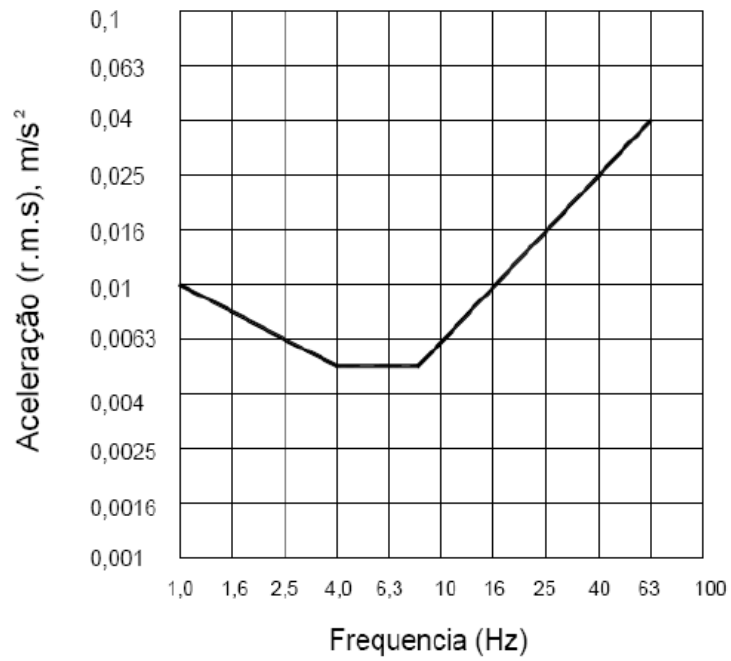


Figura 2-14 - Curva base de aceleração no eixo z.

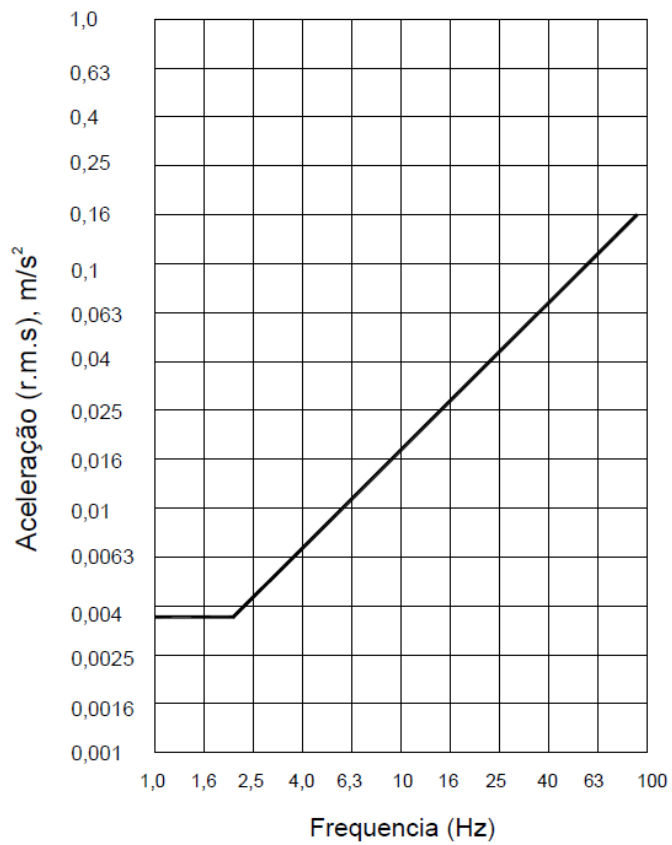


Figura 2-15 - Curva base de aceleração nos eixos x e y.

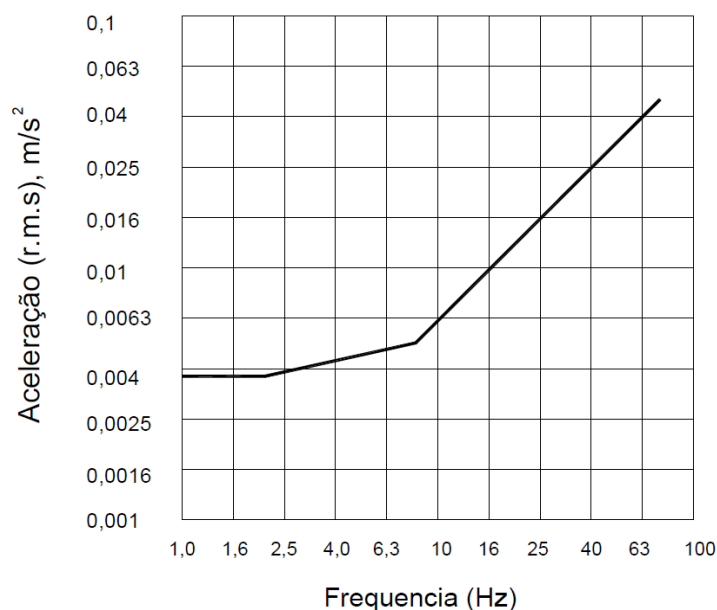


Figura 2-16 - Curva base de aceleração nas direções combinadas (x, y e z).

Tabela 2-3 - Faixa dos fatores multiplicadores usados em vários países para estimar satisfatoriamente os níveis de vibrações.

Local	Tempo	Vibrações contínuas ou intermitentes	Vibrações por excitação intermitente com várias ocorrências ao dia
Áreas de trabalho críticas (salas de operação de hospitais, laboratórios de precisão, etc.)	Dia e noite	1	1
Residências	Dia	2 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios	Dia e noite	4	60 a 128
Salões de conferência e oficinas	Dia e noite	8	90 a 128

2.4.6 AISC/CISC Design Guide 11 (2003)

Desenvolvido pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar em 1997 e atualizado em 2003, tem como objetivo fornecer os princípios básicos e ferramentas simples de análise para a verificação de sistemas de piso submetidos às atividades humanas. Seus critérios de aceitação para conforto humano podem ser empregados para análise das respostas dinâmicas de sistemas de piso de escritórios, passarelas e shoppings centers.

O Design Guide 11 do AISC propõe uma análise dinâmica em função das amplitudes máximas da aceleração no sistema de piso induzidas pelo caminhar humano,

sendo que seus valores são comparados com os valores da curva base da ISO 2631/2:1989 (Figura 2-17), que representa o limite no qual as acelerações começam a ser perceptíveis. A ISO sugere seus limites em termos de r.m.s., com um fator de multiplicação da curva base. Os fatores de multiplicação propostos neste critério levam em consideração o tipo de utilização da edificação, sendo expressos em relação aos valores de pico da aceleração calculados em r.m.s. através de ensaios dinâmicos, expressões analíticas simplificadas ou análise numérica. Para escritórios pode-se considerar um fator de multiplicação de 10 vezes, para shoppings e passarelas internas de 30 vezes e 100 vezes para atividades rítmicas e passarelas externas. Para fins de projetos, estes limites podem ser considerados em uma faixa entre 0,8 e 1,5 vezes os valores recomendados pela mesma, dependendo da duração da vibração e da frequência dos eventos à vibração.

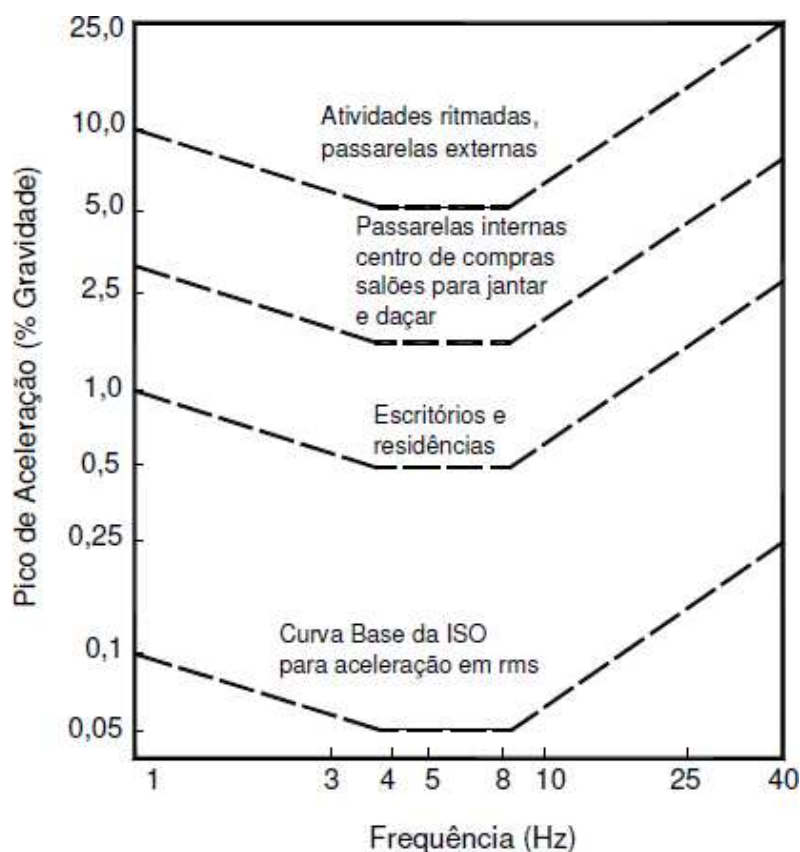


Figura 2-17 – Amplitude máxima das acelerações recomendadas para o conforto humano para vibrações induzidas pelo caminhar humano.

O valor de pico da aceleração pode ser definido através de ensaios dinâmicos experimentais ou estimado através de formulações analíticas que simulam o caminhar humano. Inicialmente para estimar a aceleração, é necessário que se defina a função do carregamento.

Para definição da função do carregamento a publicação americana apresenta uma função sinusoidal em função do harmônico da atividade dinâmica que provoca o estímulo ressonante na estrutura estudada, uma vez que a amplitude da aceleração será máxima para as frequências próximas as frequências fundamentais do elemento. Esta função também depende de um coeficiente dinâmico que é utilizado para definir o tipo de atividade dinâmica, como pode ser visto na Expressão 2-6.

$$F_i = P \alpha_i \cos (2\pi i f_p t) \quad (2-6)$$

onde:

P é o peso médio de uma pessoa (0,7 kN);

α_i é o coeficiente dinâmico (para o harmônico estudado);

i é o nº do harmônico;

f_p é a frequência do caminhar.

O Design Guide 11 do AISC divide as atividades humanas em caminhar, atividades aeróbicas e atividades rítmicas (danças). Sendo que seus intervalos de frequência, coeficiente α_i e números de harmônicos podem ser encontrados na Tabela 2-4.

Tabela 2-4 - Coeficientes dinâmicos e frequência do caminhar humano para diferentes tipos de atividades dinâmicas.

Harmônico	Atividade					
	Caminhar Humano		Atividades Aeróbicas		Atividades Rítmicas (dança)	
i	f (Hz)	α_i	f (Hz)	α_i	f (Hz)	α_i
1	1,6 – 2,2	0,5	2,0 – 2,75	1,5	1,5 – 3,0	0,5
2	3,2 – 4,4	0,2	4,0 – 5,5	0,6	-	-
3	4,8 – 6,6	0,1	6,0 – 8,25	0,1	-	-
4	6,4 – 8,8	0,05	-	-	-	-

O valor do pico da aceleração para o caminhar humano pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$\frac{a}{g} = \frac{R\alpha_i P}{\beta W} \cos(2\pi i f_p t) \quad (2-7)$$

onde:

R é o fator de redução;

β é o coeficiente de amortecimento modal;

W é a massa modal do pavimento;

P é o peso médio de uma pessoa (0,7 kN);

α_i é o coeficiente dinâmico (para o harmônico estudado);

i é o n° do harmônico;

f_p é a frequência do caminhar.

O fator de redução R, leva em consideração o fato que a pessoa que está a caminhar e a pessoa que irá perceber o estímulo de vibração não estarem simultaneamente no ponto de maior amplitude do deslocamento. O Design Guide 11 recomenda a utilização de um fator de redução de 0,5 para estruturas convencionais e 0,7 para passarelas.

O valor de pico também pode ser calculado através da expressão (2-8), sendo que de acordo com este guia de projeto, para o sistema de piso ser considerado satisfatório o valor do pico da aceleração excitado pelo caminhar humano (a_p) em função da aceleração da gravidade (g) terá que ser igual ou menor à aceleração limite (a_0/g) para cada ocupação apropriada de acordo com as curvas limites (Figura 2-17).

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(0,35 f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (2-8)$$

onde:

a_p/g é a razão entre a aceleração do piso e a aceleração da gravidade em (m/s²);

a_0/g é a aceleração limite recomendada de acordo com a curva limite em (% g);

f_n é a frequência natural do sistema estrutural em (Hz);

P_0 é a carga constante de valor igual a 0,29 kN para painéis de piso e 0,41 kN para passarelas.

Os parâmetros empregados na expressão (2-8) são obtidos na Tabela 2-5.

Tabela 2-5 - Parâmetros utilizados na avaliação da resposta dinâmica estrutural.

Local	Força constante (P ₀)	Taxa de amortecimento (β)	Aceleração limite $\frac{a_0}{g} \times 100\%$
Escritórios, residências e igrejas	0,29 kN	0,02 – 0,05*	0,5%
Centros de compras	0,29kN	0,02	1,5%
Passarelas internas	0,41kN	0,01	1,5%
Passarelas externas	0,41kN	0,01	5,0%

* 0,02 para pisos com poucos componentes não-estruturais (telhados, dutos, divisórias, etc.) como pode ocorrer em áreas de trabalho abertas e igrejas;
 0,03 para pisos sem componentes não-estruturais e móveis, mas com poucas divisórias desmontáveis, típicas de muitas áreas moduladas de escritórios;
 0,05 para divisórias em contato com os dois pisos de andares adjacentes

Para as atividades rítmicas o Design Guide 11 apresenta o critério proposto por Allen (1990-a) e (1990-b), levando em conta que nestas situações o nível de vibração é superior quando comparado com o caminhar humano. Allen (1990-a) propôs a seguinte expressão para a estimativa da aceleração de pico para atividades rítmicas:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1,3 \alpha_i \frac{W_p}{W_t}}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{f}\right) - 1\right]^2 + \left[\frac{2\beta f_n}{f}\right]^2}} \quad (2-9)$$

onde:

$\frac{a_p}{g}$ é a aceleração de pico (em função da gravidade);

α_i é o coeficiente dinâmico;

W_p é o peso distribuído em m² dos participantes da atividade rítmica;

W_t é o carga modal distribuída em m² incluindo os ocupantes;

β é o coeficiente de amortecimento modal;

f_n é a frequência natural do pavimento;

f é a frequência do harmônico estudado.

Allen (1990-b) propõe ainda que a resposta máxima da aceleração de pico pode ser definida para diferentes harmônicos, considerando que para as ações rítmicas, a contribuição de outros harmônicos além do ressonante é de grande relevância. Assim sendo o valor de pico da aceleração levando em conta outros harmônicos além do ressonante pode ser estimado através da expressão abaixo:

$$a_m = \left(\sum a_i^{1,5} \right)^{1/1,5} \quad (2-10)$$

onde:

i será o último harmônico estudado.

2.4.7 HIVOSS (2008)

Publicado no ano de 2008 pela Research Fund for Coal and Steel, este guia de projeto tem como objetivo fornecer uma metodologia para o dimensionamento de pavimentos mistos de aço e concreto considerando os efeitos das ações induzidas pelo caminhar humano. Juntamente com este guia de projeto foi publicado um “Documento Base”, com as definições e descrições de todos os métodos que este guia utilizou como referência para a metodologia de dimensionamento proposta.

A metodologia apresentada para verificação de um pavimento sujeito à vibração, é bastante simplificada e considera as vibrações induzidas pelo caminhar humano, determinando inicialmente as características ou parâmetros do pavimento. Através desses parâmetros associados a um conjunto de gráficos, obtém-se a resposta do pavimento à ação do caminhar humano, que por fim, é comparada com os valores recomendados para diferentes tipos de utilização.

A metodologia de verificação é esquematizada em três passos e pode ser utilizada em situações nas quais as características dinâmicas do pavimento tenham sido obtidas por via experimental, numérica ou analítica. Em todos os casos primeiramente deve ser feita a determinação das características dinâmicas do pavimento, avaliando a frequência natural, a massa modal e o amortecimento. Em seguida deve ser feita a extração do valor os-r.m.s₉₀ e por último deve ser feita a determinação e a verificação da classe do pavimento.

A metodologia de verificação pode ser aplicada por meio do método de cálculo manual baseado em medições experimentais, através do método da função de transferência ou sobreposição modal, que são detalhados nos Design Guide e no Documento Base publicado juntamente com a recomendação técnica.

2.4.7.1 Classificação das vibrações

As vibrações são classificadas de duas formas, pela grandeza de análise e pelas classes de pavimentos. Com relação à grandeza, a vibração é caracterizada pela adoção do valor “One-step r.m.s.”, que corresponde à vibração causada por um passo do caminhar de uma pessoa. Observa-se que o valor do os-r.m.s. irá depender de vários fatores, como o peso e a velocidade de deslocamento do caminhar, do tipo de calçado utilizado, entre outros. Assim sendo, recomenda-se a utilização do valor os-r.m.s 90% (os-r.m.s.90) nas quantificações das vibrações. Este valor é correspondente à porcentagem de 90% de todos os valores de os-r.m.s. possíveis para um sistema de piso, com a variação da frequência do caminhar e do peso do indivíduo que promove este caminhar. O os-r.m.s.90 pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$a_{r.m.s.} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \approx \frac{a_{Peak}}{\sqrt{2}} \quad (2-11)$$

onde:

$a_{r.m.s.}$ é a aceleração em r.m.s.;

T é o período de um passo em segundos;

a é a aceleração ao longo do tempo (m/s²);

a_{Peak} é a aceleração de pico (m/s²).

Na seguinte classificação, são fornecidas recomendações para as especificações a serem utilizadas em função da utilização do sistema de piso estudado, conforme a Tabela 2-6.

Tabela 2-6 – Classificação da resposta do sistema de piso e recomendações de acordo com a utilização.

Classe	OS-RMS ₉₀		Função do pavimento													
	Limite inferior	Limite superior	Espaço crítico	Saúde	Educação	Residencial	Escritório	Conferência	Retalho	Hotel	Prisão	Industrial			Desporto	
A	0.0	0.1														
B	0.1	0.2														
C	0.2	0.8														
D	0.8	3.2														
E	3.2	12.8														
F	12.8	51.2														

	Recomendado
	Crítico
	Não recomendado

2.4.7.2 Método de cálculo manual

Este método assume que a resposta dinâmica do sistema de piso pode ser simplificada para um sistema de um único grau de liberdade, e que a determinação da frequência e da massa modal pode ser efetuada utilizando os métodos de cálculo simples ou através da análise por elementos finitos. Os parâmetros modais podem ser obtidos através de ensaios experimentais, modelos de elementos finitos e equações analíticas. No caso de utilização de MEF ou formulações analíticas, o guia apresenta uma série de recomendações e formulações.

No caso da determinação do amortecimento, que é fortemente influenciado pelo comportamento vibratório, independentemente do modo de determinação da frequência natural e da massa modal, os valores para alguns sistemas vibratórios podem ser determinados conforme a Tabela 2-7.

Tabela 2-7 – Determinação do amortecimento.

Tipo	Amortecimento (% do amortecimento crítico)
Amortecimento estrutural – D_1	
Madeira	6%
Concreto	2%
Aço	1%
Estrutura mista aço e concreto	1%
Amortecimento devido ao mobiliário – D_2	
Escritório tradicional para 1 a 3 pessoas com paredes e divisórias	2%
Escritórios sem estantes	0%
Escritório tipo “ <i>open space</i> ”	1%
Biblioteca	1%
Residencial	1%
Escolas	0%
Edifícios para utilização esportiva	0%
Amortecimento devido ao revestimento – D_3	
Teto falso	1%
Piso falso	0%
Piso flutuante	1%
Amortecimento total $D = D_1 + D_2 + D_3$	

Ao se determinar a massa modal e a frequência natural fundamental do pavimento pode-se também obter o valor $os-r.m.s_{90}$, atribuindo-se assim uma classificação aos pavimentos através de diagramas, que são aplicados tendo como base as características de amortecimento do pavimento nas condições de utilização esperadas. Neste guia são apresentados diagramas de determinação do valor de $os-r.m.s_{90}$ para taxas de amortecimentos na faixa de 1% a 9%. Na Figura 2-18 é apresentado um exemplo destes diagramas com a demonstração de sua aplicação. De posse da massa modal e da frequência fundamental, pode-se verificar a classe que o sistema de piso se encontra, comparando este valor com Tabela 2-6, e assim, o avaliando quanto as vibrações induzidas pelo caminhar humano.

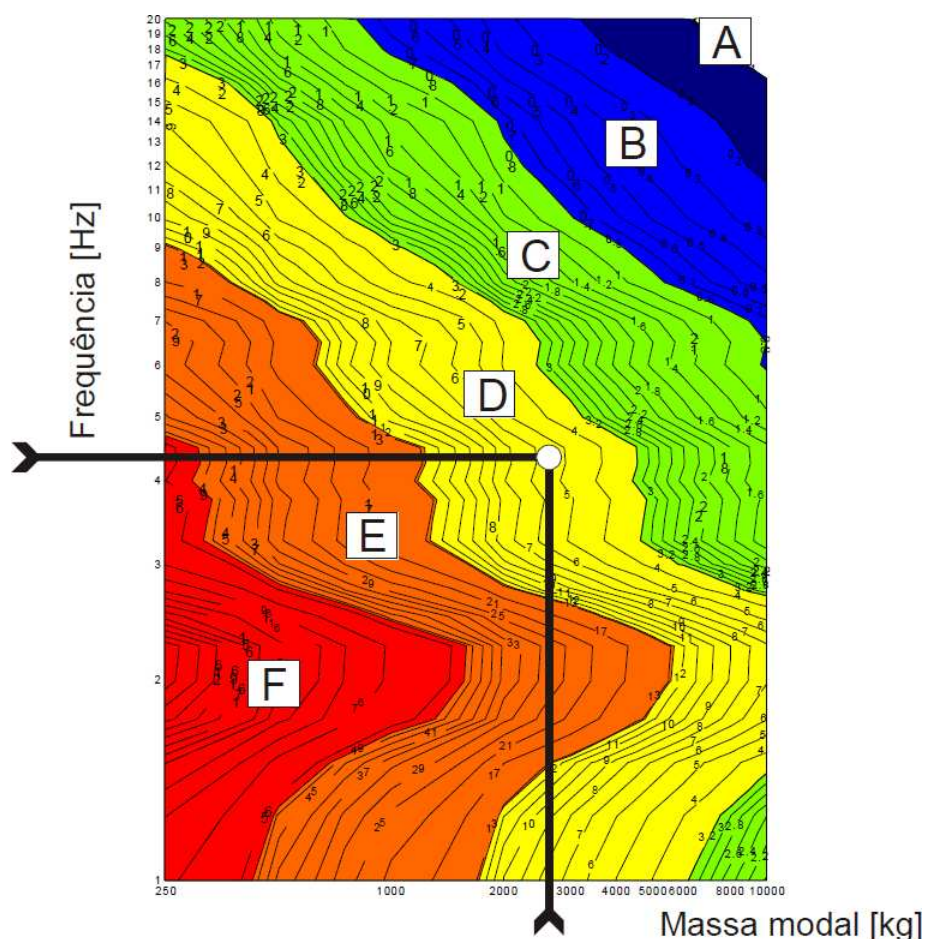


Figura 2-18 - Exemplo de determinação do valor $os-r.m.s_{90}$ e classificação de um pavimento.

2.4.8 SCI PUBLICATION P354 (2009)

Desenvolvido pelos pesquisadores A. L. Smith, S. J. Hicks e P. J. Devine e publicado pela The Steel Construction Institute – SCI no ano de 2009, este guia tem como objetivo atualizar as recomendações de projeto elaboradas pela SCI PUBLICATION 076 (1989) para limites de aceitação de vibrações em sistemas de piso considerando o conforto humano.

No primeiro guia publicado pelo SCI de 1989, eram relacionados critérios e orientações de limite de vibração para sistemas de piso considerados normais (edifícios residências e escritórios), sendo este amplamente utilizado nos últimos tempos. Este novo guia de recomendações foi desenvolvido com intuito de permitir aos projetistas determinar a resposta de vibrações de pisos sensíveis com maior precisão, permitindo que a resposta seja comparada com as normas BS 6472 (1992) e ISO 10137 (2007) para estruturas em geral, e com o padrão de desempenho NHS (National Health Service)

específico para hospitais, Health Technical Memorandum 08-01 (2008). Incluindo diretrizes de projetos para todos os tipos de sistemas de piso, como pisos submetidos a atividades rítmicas, pisos de hospitais, sistemas de pisos leves, estacionamentos e os demais sistemas de pisos que já eram abordados na primeira publicação.

No escopo deste trabalho são apresentadas técnicas para modelagem de estruturas em elementos finitos, uma vez que as condições de contornos utilizadas para a análise estática são diferentes quando comparadas com as de análise dinâmica. Também foram inseridos quatro apêndices que tratam respectivamente sobre a comparação de metodologias de análise dinâmica, estratégias de controle e correção de vibrações excessivas, ensaios dinâmicos em sistemas de piso e exemplos de trabalhos

2.4.8.1 Vibrações Intermitentes

Geralmente as atividades em pé (como o caminhar), por sua natureza, não são contínuas e sim intermitentes. Para vibrações intermitentes, uma medida cumulativa da resposta de vibração tem sido encontrada como uma fórmula mais confiável da determinação dos níveis de aceitação (GRIFFIN, 1990 apud MARGARIDO, 2013). As normas ISO 10137 (2007) e BS 6472 (1992) apresentam como orientação para vibrações intermitentes os valores de VDV_s (valores de dose de vibração), que descrevem os níveis de percepção, devido às eventuais vibrações de curta duração em uma estrutura. Este índice permite que os níveis de vibração sejam mais elevados, quando comparados com níveis aceitáveis de vibrações contínuas, desde que a ocorrência seja rara, onde é aplicada a seguinte expressão para o cálculo do VDV:

$$VDV = \left(\int_0^T a_w(t)^4 dt \right)^{1/4} \quad (2-12)$$

onde:

a_w é a aceleração ponderada;

T é o período total do dia, durante o qual pode ocorrer a vibração (em segundos).

Embora seja reconhecido que a abordagem VDV é uma medida mais fiável de resposta de vibração, ela é uma metodologia que não é amplamente utilizada na concepção de projetos de sistemas de piso misto. Este fato decorre de sua aplicação

demandar a cooperação entre todos os envolvidos no processo do projeto (incluindo o arquiteto, o cliente e o engenheiro) para poder estimar a frequência de utilização, a funcionalidade do sistema de piso para sua classificação e o posicionamento das excitações. Normalmente, na fase inicial de concepção do projeto estes dados não são conhecidos e a tendência do mercado atual faz com que o sistema de piso tenha uma ampla flexibilidade do posicionamento das divisórias, o que leva a uma variabilidade da localização dos corredores, principal local de ocorrência da excitação pelo caminhar humano.

A maioria dos guias de projeto modernos, portanto, conservadoramente assumem que as atividades em pé, como o caminhar, produzam vibrações contínuas nos sistemas de piso. Em locais muito sensíveis (como salas de cirurgia e laboratórios de precisão), normalmente não se faz a utilização da abordagem do VDV, devido à possibilidade de influência na utilização destes ambientes, caso os níveis de vibrações não sejam aceitados.

2.4.8.2 Critério de aceitação

De forma análoga à da ISO 10137 (2007) e à do AISC/CISC Design Guide 11 (2003), o critério de aceitação do SCI Publication P354 é baseado em fatores de multiplicação para as curvas bases. Estes fatores dependem da utilização do sistema de piso, horário de ocorrência e tipo de vibração. As curvas base são as mesmas apresentadas anteriormente da ISO 10137 (2007) e BS 6472 (1992).

Como explicado anteriormente, devido à complexibilidade de utilização de vibrações intermitentes, na prática se adotam os valores de multiplicação para vibrações contínuas, que são multiplicados pela curva base e comparados com os limites de resposta calculados. O valor da resposta calculado é então definido com a determinação da aceleração em r.m.s.. Nas Tabelas 2-8 e 2-9 são apresentados os fatores de multiplicação para sistemas de piso comuns e sistemas de piso para hospitais, respectivamente.

Tabela 2-8 – Valores dos fatores de multiplicação para excitação de uma única pessoa.

Local	Fator de multiplicação para vibrações contínuas
Escritórios	8
Shoppings	4
Edifícios comerciais	4
Escadas – para escritórios	32
Escadas – para locais públicos	24

Tabela 2-9 – Valores dos fatores de multiplicação para hospitais de acordo com a HTM 08-01 (THE STATIONERY OFFICE, 2008).

Tipo de sala	Fator de multiplicação para vibrações contínuas
Sala de Operação, laboratório de precisão, salas de teste audiômetros	1
Enfermarias	2
Laboratórios em geral e áreas de tratamento	4
Escritórios e salas de consulta	8

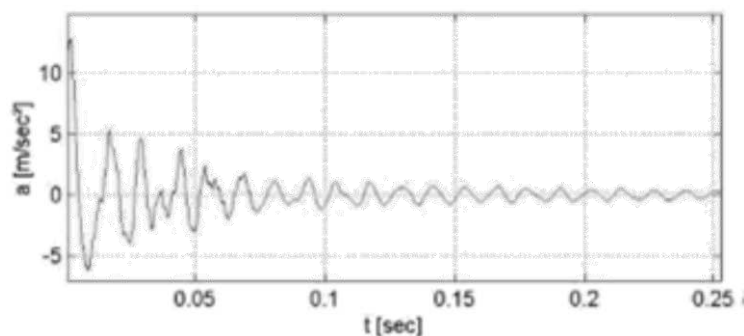
2.5 Ensaios dinâmicos de estruturas

2.5.1 Aspectos gerais dos ensaios

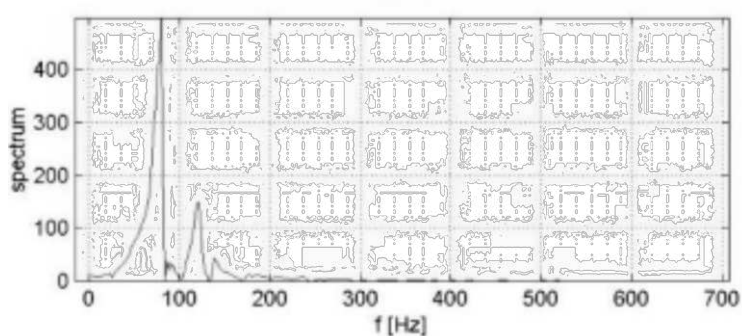
Em todo o mundo, a avaliação de estruturas através de ensaios dinâmicos experimentais vem sendo utilizada nas últimas décadas. A sua aplicação aos problemas de engenharia se tornou uma realidade com o surgimento dos computadores portáteis de grande capacidade de processamento e com o desenvolvimento de equipamentos de aquisição de sinais economicamente viáveis. Atualmente, o uso de ensaios dinâmicos vem crescendo em diferentes campos da engenharia. Uma das aplicações mais comum e bem-sucedida do uso de ensaios dinâmicos consiste na avaliação estrutural de pontes (CASAS, et al., 1988; DOEBLING et al., 1996 e PEETERS, 2000).

Os principais objetivos dos ensaios dinâmicos são determinar as frequências naturais associadas aos modos de vibração da estrutura, estimar as taxas de amortecimento e determinar a amplitude das acelerações/deslocamentos. Para isso, utiliza-se uma metodologia que permite transformar a resposta no domínio do tempo (Figura 2-19-a) para o domínio da frequência, aplicando-se a transformada rápida de

Fourier (FFT) (Figura 2-19-b). As frequências naturais da estrutura correspondem aos picos do espectro de resposta.



(a)



(b)

Figura 2-19 - Resultados típicos de um ensaio dinâmico: a) resposta no domínio do tempo; b) espectro de resposta no domínio da frequência (GARAYGORDÓBIL, 2003).

Ao longo do tempo, diversos autores estudaram e classificaram as fontes de excitação para realização de ensaios dinâmicos em estruturas. Com um enfoque especial para o caso de pontes, Salawu e Williams (1995) apresentam uma análise de ensaios dinâmicos em escala real para pontes, enfocando alguns métodos de excitação aplicáveis a este tipo de estrutura. Farrar et al. (1999) apresentam um resumo dos vários métodos utilizados para excitar a estrutura de pontes durante a realização de ensaios dinâmicos. Peeters e De Roeck (2000) avaliaram diferentes fontes de excitação que foram utilizadas na ponte Z24, na Suíça. Nos trabalhos de pesquisa citados anteriormente, avaliou-se a aplicabilidade de fontes artificiais de excitação (vibradores e pesos em queda) e fontes naturais de excitação (vento e tráfego de veículos).

No caso de avaliação estrutural de sistemas de piso misto de aço e concreto, a abordagem é um pouco diferente em relação aos ensaios dinâmicos em pontes,

mencionados anteriormente. Geralmente são empregados neste tipo de estudo dois tipos de ensaios dinâmicos: os ensaios de impacto e os ensaios de vibração forçada. Além das fontes de excitação já citadas, se dá grande ênfase nas vibrações induzidas pelo corpo humano. Tal fato pode ser observado nos trabalhos de Pavic e Reynolds (2002-a e 2002-b), Nobrega (2004), Homem (2007), Lima (2007), Johansson (2009), Berczynky (2010), Junges (2010), Varela (2004) e , Zúñiga (2011), Batista et al. (2007-a), Camposinhos et al. (2005), entre outros.

2.5.2 Equipamentos para monitoramento dinâmico

Um sistema de aquisição de sinais dinâmicos é composto basicamente por quatro partes: sensores, condicionador / amplificador de sinal, central de aquisição de dados e computador portátil (Figura 2-20).



Figura 2-20 - Vista geral de um sistema de aquisição de sinais dinâmicos portátil.

Para especificação de um sistema de aquisição de sinais dinâmicos para o monitoramento de estruturas é necessário selecionar os tipos de sensores adequados, determinar a posição e o número de sensores a serem utilizados em cada caso, além de definir a frequência de aquisição de dados. Porém as questões econômicas exercem grande influência na definição destes aspectos, devido ao custo gerado.

Os principais tipos de sensores utilizados para o monitoramento dinâmico de estruturas são os acelerômetros. Estes podem ser de diversos tipos como piezoelétrico, piezoresistivo, capacitivo, MEMS (micro-electro-mechanical systems), entre outros. Os sinais gerados pelos acelerômetros são condicionados e amplificados, captados pela central de aquisição de dados e enviados ao computador portátil para registro.

Um aspecto muito importante no momento da definição do sistema de aquisição de dados é a frequência de aquisição do aparelho. Pois, para que um sinal de aceleração possa ser analisado em termos de domínio de frequência, é necessário a aplicação da transformada rápida de Fourier. Sendo que, de acordo com o teorema de Nyquist-Shannon, para uma perfeita reconstituição de um sinal já transformado, através da transformada inversa, a frequência de aquisição tem que ser igual ou maior que o dobro da máxima frequência que se espera estudar. Em outras palavras, para análises de vibrações em sistemas de piso misto, considerando o limite de frequência fornecido pela ISO 2631-2 (2003) e pelas principais normas mundiais que é de 1 Hz a 80 Hz, é necessário um acelerômetro com uma frequência de aquisição igual ou superior a 160 Hz.

2.5.3 *Ensaio de impacto*

Os ensaios de impacto consistem basicamente em provocar uma excitação da estrutura por meio de algum impacto que cessa logo após o impulso inicial. Este tipo de ensaio é bem simples e é utilizado para identificar a zona crítica do sistema de piso (local onde se obtém as maiores amplitudes de deslocamentos dinâmicos) e as características modais da estrutura (modo de frequência, frequência natural e amortecimento).

A excitação da estrutura pode ser realizada por meio do salto de uma pessoa, impacto dos calcanhares (heel-drop test), da queda livre de algum objeto de massa e altura conhecidas ou de um martelo instrumentado.

A - Impacto dos calcanhares (heel-drop test)

Este tipo de ensaio tem grande aceitação entre os pesquisadores pela sua simplicidade. O fato de o impacto não ser constante entre ensaios não altera sua aplicabilidade, uma vez que a variabilidade ocorre somente entre as amplitudes de

aceleração de cada ensaio. Esta variação não interfere na obtenção das características modais da estrutura.



Figura 2-21 - Aspecto geral de um ensaio de impacto dos calcanhares sobre um sistema de piso.

B - Martelo de excitação instrumentado

Este tipo de ensaio é considerado como uma técnica de medição mais precisa, quando comparada com o heel-drop test. A fim de obter dados mais precisos, muitas vezes é necessário repetir o ensaio um número de vezes em um ponto particular no sistema de piso, de modo que é realizada a leitura da magnitude do impacto.

De acordo com Hicks et al. (2000), a desvantagem de usar esse tipo de teste está associada a ambientes sujeitos a muito ruído (situação comum na maioria dos edifícios submetidos a atividades físicas), em que podem se desenvolver erros de leitura da magnitude do impacto.



Figura 2-22 – Exemplo de martelo de excitação instrumentado.

2.5.4 Ensaio de vibração forçada

Os ensaios de vibração forçada são geralmente utilizados para medir as características dinâmicas em áreas críticas identificadas pelos ensaios de impacto, podendo assim medir valores máximos das amplitudes de deslocamentos ou aceleração destes pontos para comparar seus resultados com os valores recomendados por normas. Nestes casos, a vibração induzida é produzida por uma fonte externa com controle apurado de frequência e amplitude.

Dentre os procedimentos utilizados nos ensaios de vibração forçada em sistemas de piso, destaca-se o caso de vibrações induzidas por shakers (motor excêntrico) e pelo caminhar de pessoas de maneira controlada (walking tests).

A - Vibrações induzidas por um vibrador (shaker)

Para este tipo de vibração forçada, o gerador de vibração impõe um carregamento contínuo em um intervalo pré-definido de frequências, enquanto as respostas do pavimento são medidas através de um acelerômetro. De um modo semelhante aos ensaios de impacto (com um martelo instrumentado de excitação instrumentado), o conteúdo da frequência pode ser obtido por uma análise dos dados usando a transformada rápida de Fourier (FFT) para produzir um gráfico de resposta versus frequência (HICKS, LAWSON e KING, 2000).

Devido à forma como a função de transferência é definida pelos valores de frequência, de rigidez e de amortecimento do sistema de piso, é possível determinar as propriedades de rigidez e de amortecimento para cada modo de vibração.

B - Testes de caminhada (walking tests)

Este tipo de ensaio de vibração forçada é utilizado em grande escala em estudos dinâmicos para avaliação do conforto humano em sistemas de piso para edifícios residenciais, comerciais, shoppings e passarelas.

Os acelerômetros são posicionados nos locais de maiores amplitudes de deslocamento do sistema de piso, para assim medir os valores máximos de acelerações

induzidas pelo caminhar de uma, duas ou várias pessoas. Os resultados podem ser comparados com os valores recomendados pelos critérios de conforto.

A frequência do caminhar humano para este tipo de ensaio está na faixa de 1,7 a 2,3 Hz, como pode ser observado nos valores mostrados na Tabela 2-10.

Tabela 2-10 - Características do caminhar humano (BACHMANN ET AL., 1995).

Atividade	Velocidade (m/s)	Distância do Passo (m)	Frequência do Passo (Hz)
Caminhada lenta	1,1	0,6	1,7
Caminhada normal	1,5	0,8	2,0
Caminhada rápida	2,2	1,0	2,3

2.6 Avaliação experimental do amortecimento modal

O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica (LAZAN, 1968). É o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada (SILVA, 2007). O amortecimento é o mecanismo que delimita a amplitude de vibração de um elemento em ressonância e o tempo de permanência da vibração após o encerramento da fonte excitadora.

De acordo com Cossolino e Pereira (2010), o amortecimento pode ser classificado em três formas principais:

- interno;
- estrutural;
- fluídico.

A caracterização do sistema é importante para entender como a energia mecânica é dissipada e sua dependência com a velocidade e com a amplitude de vibração. Um modelo de amortecimento deve ser escolhido para representar essa dissipação de energia mecânica e permitir o cálculo de parâmetros comparativos de amortecimento.

O resultado da dissipação de energia mecânica causada por fricção devido ao movimento relativo entre os diversos componentes de uma estrutura e por impacto ou

contato intermitente nas vinculações do sistema estrutural pode ser definido como amortecimento estrutural.

Até os dias de hoje, não existe um conhecimento claro dos fenômenos físicos reais e os mecanismos que causam amortecimento. Portanto, na situação atual, não é possível calcular matematicamente ou descrever as contribuições individuais provenientes dos vários mecanismos de dissipação de energia num edifício. A consequência disso é que a modelagem de amortecimento não é tão exata como a modelagem da massa ou rigidez (PAVIC e REYNOLDS, 2002-a).

Segundo Clough e Penzien (1993), a avaliação do amortecimento estrutural é uma tarefa complexa que não pode ser determinada através da geometria da estrutura, das dimensões dos elementos estruturais e do amortecimento dos materiais. Deste modo, a forma mais fácil de estimar o amortecimento de uma estrutura é através de ensaios de impacto.

De acordo com Varela (2004), nos ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drops test) quando os impactos são aplicados na região central do sistema de piso, após o excitador executar o impacto com os calcanhares, o corpo do excitador funciona com um sistema massa-mola-amortecedor, aumentando falsamente o amortecimento modal da estrutura. Assim, para realização de ensaios de heel-drops, é aconselhado que o excitador não esteja no local de maior amplitude de deslocamento, para não influenciar no amortecimento.

A determinação do amortecimento estrutural pode ser feita por diversos métodos, que seguem, basicamente, dois caminhos: mediante a duração da resposta do sistema a uma excitação transitória (exemplo: método do decremento logarítmico) e em função da resposta do sistema em função da frequência (exemplo: método da largura de banda). Pode-se citar alguns dos métodos que vem sendo utilizados nos últimos anos: Método da Seleção de Picos - “Peak – Picking” (método da largura de banda), método do decremento logarítmico, método do pico na ressonância, método do círculo de Nyquist, SSI, ERA, ITD, etc.

Nos últimos anos, o método do decremento logarítmico tem sido amplamente utilizado para estimar o amortecimento no processamento das respostas do ensaios dinâmicos em sistemas de piso considerando o conforto humano, como pode ser visto nos

trabalhos de Nobrega (2004), Varela (2004), Moutinho (2007), Mendes e Oliveira (2008), Santos (2009), Junges (2010), Peralta et al. (2010), Zúniga (2011), Baldoni Junior e Pinheiro (2012) e etc. Apesar disso, atualmente, no âmbito da análise experimental de vibrações, o método do decaimento logarítmico já é considerado um método com limitações, quando comparado com métodos mais modernos. Sua utilização para avaliação de vibrações em sistemas de piso pode ser justificada devido à sua facilidade de aplicação e ao fato da taxa de amortecimento não ser utilizada de forma direta para a avaliação do conforto humano, mas sim para correlacionar os níveis da amplitude da aceleração com o amortecimento e como parâmetro para a simulação numérica. Deste modo, entende-se que é admissível continuar estimando a taxa de amortecimento com auxílio do método do decaimento logarítmico, no lugar de métodos mais complexos.

2.6.1 Método do decaimento logarítmico

O decaimento logarítmico é baseado na medida da taxa de decréscimo da amplitude das oscilações livres (ensaio de impacto), uma vez que, a energia é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio sistema. Sendo que quanto maior o amortecimento, maior será a taxa de decréscimo. Este método já se demonstrou ser um meio conveniente para se determinar a variável quantitativa de amortecimento de um sistema estrutural, utilizando a curva experimental de deslocamento (ou aceleração) versus tempo, com a seleção de picos consecutivos X_i e X_{i+j} como mostrado na Figura 2-23:

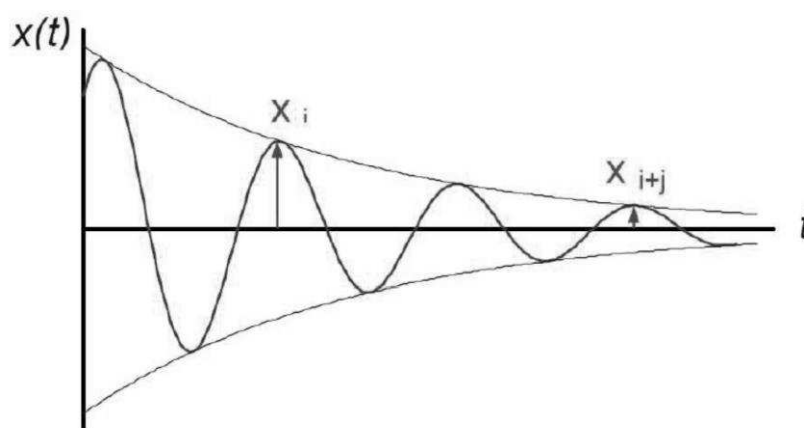


Figura 2-23 - Gráfico de resposta sub-amortecida - deslocamento (ou aceleração) x tempo ([http://pt.scribd.com/doc/58757911/DECREMENTO LOGARITMICO DA AMPLITUDE](http://pt.scribd.com/doc/58757911/DECREMENTO_LOGARITMICO_DA_AMPLITUDE), acesso em 13/06/13).

O decremento logarítmico (δ) pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\delta = \frac{1}{j} \ln \left(\frac{x_i}{x_{i+j}} \right) \quad (2-13)$$

ou

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2-14)$$

Em termos de amortecimento (ξ) têm-se:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi/\delta)^2}} \quad (2-15)$$

Observa-se em vários estudos experimentais, que o fator de amortecimento não é constante para os vários modos de vibração de uma mesma estrutura, sendo um valor específico para cada modo, como pode ser visto na Figura 2-24.

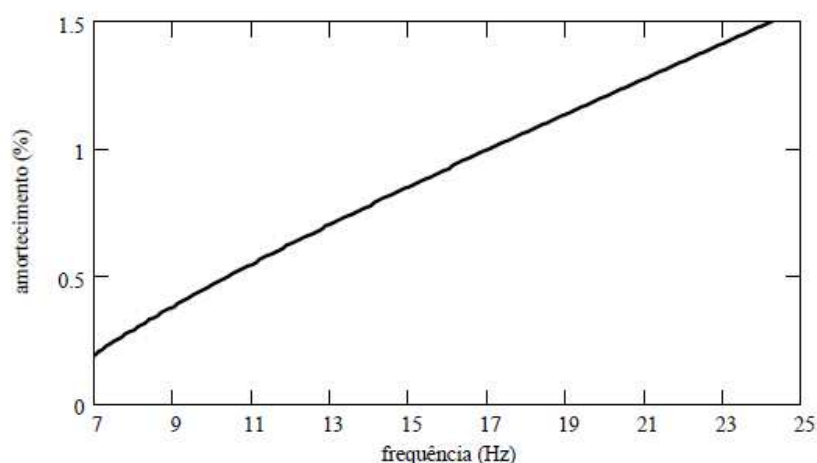


Figura 2-24 – Amortecimento modal de uma estrutura real em função da frequência (VARELA, 2004).

Observando a Figura 2-24, juntamente com fato que o ensaio de impacto excita ao mesmo tempo vários modos de vibração do sistema de piso analisado e não somente um modo de vibração, pode-se concluir que para aplicação do método do decremento logarítmico pode ser necessário, em determinados casos, a utilização de filtros do tipo passa-banda nos sinais de resposta do acelerômetro, selecionando assim somente as acelerações para uma determinada faixa de frequência. Os filtros passa-banda podem ser utilizados para retirar os ruídos mensurados durante os ensaios ou para estudar a taxa de amortecimento para uma determinada frequência.

3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Considerações preliminares

Neste capítulo se apresenta a metodologia utilizada para a realização dos ensaios dinâmicos de impacto e de vibração forçada, abrangendo a definição dos sistemas de piso, os equipamentos de medição e o processamento dos resultados.

Para realização dos ensaios dinâmicos foram selecionados sistemas de piso misto em aço e concreto em cinco edificações localizadas no Campus de Viçosa da Universidade Federal de Viçosa e na cidade de Viçosa, descritas a seguir:

- Pavilhão de Aulas II – PVB;
- Rampa de acesso do edifício de quadras poliesportivas;
- Laticínio FUNARBE;
- Edifício das Licenciaturas;
- Edifício comercial localizado na cidade de Viçosa.

Para cada edificação selecionada foram avaliadas as características geométricas, as propriedades mecânicas dos materiais e a utilização pretendida para os sistemas de piso, com o objetivo de identificar regiões críticas onde as atividades humanas pudessem induzir níveis perceptíveis de vibrações nos mesmos.

3.2 Equipamentos de medição

Para realização deste trabalho foram utilizados acelerômetros MEMS (micro-electro-mechanical systems) do tipo GP2Lx USB da marca SENSR (Figura 3-1). O GP2Lx USB é um sistema de aquisição de dados tri-axial, específico para

monitoramento dinâmico de estruturas. Ele possui uma amplitude de resposta de frequência de 0 a 200 Hz, tendo uma amostragem de 400 Hz, e seu acelerômetro de alta sensibilidade pode ser programado em 4 (quatro) faixas de 1,5 a 6,0 g.



Figura 3-1 - Sistema de aquisição de sinais dinâmicos portátil GP2Lx USB da marca SENSUR.

A grande vantagem da utilização do sistema de aquisição de dados da SENSUR é que se encontram acoplados em um único equipamento (de dimensões reduzidas) os sensores, condicionador/amplificador de sinal e central de aquisição de dados, que se conecta a uma porta USB de um computador (Figura 3-1), facilitando deste modo a portabilidade do equipamento. Assim em um único equipamento pode ser feita a leitura tri-axial da aceleração no domínio do tempo, a temperatura e ainda leituras de nível no eixo x e y.

Junto ao sistema de aquisição de dados foi acoplada uma base magnética fornecida pela SENSUR, que permite fixar com grande facilidade o acelerômetro no sistema de piso misto, tanto na viga metálica, quanto na forma de aço incorporada da laje (Figura 3-2).



Figura 3-2 – Exemplo de fixação do acelerômetro GP2Lx USB em estrutura metálica através da base magnética.

3.3 Procedimentos de ensaios

Neste tópico são descritos os procedimentos necessários para a realização dos ensaios dinâmicos nas estruturas estudadas, tanto para o ensaio de impacto, quanto para o ensaio de vibração forçada.

Devido a questões econômicas, durante os ensaios realizados foram utilizados dois acelerômetros GP2L fornecidos pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – UFV. Deste modo as características dinâmicas estudadas foram as frequências naturais, amortecimento e pico de aceleração. O modo de vibração não foi estimado devido à dificuldade do seu estudo com o baixo número de acelerômetros. Esta limitação, entretanto, não influencia no objetivo geral buscado neste trabalho, que é o estudo de vibrações forçadas em sistemas de piso pelo caminhar humano e avaliação de desempenho considerando o conforto humano, não interferindo nos resultados do mesmo.

Antes da realização de qualquer ensaio experimental foi realizado um roteiro com a programação do ensaio para cada estrutura estudada. Para a elaboração deste roteiro, levou-se em consideração o sistema estrutural, com intuito de buscar no sistema de piso misto, as regiões mais susceptíveis às vibrações induzidas pelo caminhar humano, estas regiões foram chamadas de regiões críticas.

Devido ao número de acelerômetros disponíveis não foi possível estudar todo o sistema de piso para uma única excitação em um local específico. Assim sendo, a pesquisa foi realizada através do ensaio dinâmico de “bacias” individualizadas (conjuntos delimitados por quatro pilares e suas respectivas vigas principais, vigas secundárias e lajes).

Em cada região crítica foram definidos os pontos de fixação dos acelerômetros, de forma a buscar valores representativos de respostas para os ensaios de impacto e o valor máximo da amplitude de aceleração para o ensaio de vibração induzida. No Capítulo 4 é mostrado de forma individualizada e detalhada a definição das regiões ensaiadas e também do posicionamento dos acelerômetros nestas regiões. A realização dos ensaios foi baseada na ISO 2631-1 (1997) e na ISO 2631-2 (2003), que definem métodos para a medição e avaliação de vibrações periódicas, aleatórias e intermitentes.

A aquisição dos dados dos ensaios foi realizada com o registro do sinal sem qualquer tipo de filtro, a partir do qual, posteriormente, os valores de análise desejados podem ser determinados sem nenhuma perda dos dados originais, de acordo com a recomendação da ISO 2631-2 (2003).

3.3.1 Ensaio de impacto

Com objetivo de obter as características dinâmicas de frequência fundamental e amortecimento experimental, o ensaio de impacto foi realizado através do heel-drop test (Figura 3-3), que consiste no impacto dos calcanhares. Para padronização, todos os ensaios foram realizados pelo voluntário 1, com estatura de 1,78 m e peso aproximado de 83,00 kgf.

O procedimento do ensaio de impacto foi repetido cinco vezes para cada ponto estudado, e entre os impactos, esperou-se tempo suficiente para que a vibração decorrente do choque anterior cessasse.



Figura 3-3 – Exemplo de heel-drop test.

Com o objetivo de estudar a relação entre a posição do impacto com o valor estimado do amortecimento, como pode ser visto nos estudos de Varela (2004), os ensaios de impacto com o heel-drop test foram realizados em duas etapas. Durante a primeira etapa o impacto do dos calcanhares foi efetuado na zona central de cada sistema de piso estudado e na segunda etapa, ele foi realizado próximo a sua zona de apoio. Deste modo é possível estudar a influência do posicionamento do impacto para determinação da taxa de amortecimento e a influência do sistema massa-mola-amortecedor do corpo humano em cada zona.

Nos ambientes em que o ensaio de heel-drop test não foi capaz de causar uma excitação de valor representativo, o ensaio de impacto foi executado com a queda livre de um saco de areia. O saco de areia foi içado com ajuda de uma corda e uma roldana que foi fixada na mesa inferior de uma viga do piso superior (Figura 3-4). Como não foi estabelecida nenhuma relação entre a altura de queda e o impacto produzido pelo saco de areia para diferentes sistemas de piso, para cada região crítica foi definida uma altura e um peso padrão para realização dos ensaios. De forma análoga ao ensaio dos calcanhares, para cada ponto foram realizados 3 impactos.



Figura 3-4 – Modelo esquemático de um ensaio de impacto com o saco de areia em um sistema de piso misto de aço e concreto.

3.3.2 Ensaio de vibração forçada

A partir dos resultados de frequência fundamental obtidos nos ensaios de impacto, pôde-se determinar a frequência crítica do caminhar humano para cada estrutura estudada. A frequência crítica do caminhar humano é aquela que possui um harmônico de valor igual ou semelhante a frequência fundamental do sistema de piso estudado, sendo que esta frequência deve estar dentro do intervalo proposto por Bachmann et al. (1995) de 1,7 a 2,3 Hz. Isto posto, têm-se o princípio da ressonância da estrutura induzida pelo caminhar humano, obtendo-se assim a maior amplitude de aceleração possível para o caminhar proposto. Para exemplificar, supondo que um sistema de piso misto de aço e concreto possui uma frequência fundamental de 5,16 Hz, esta estrutura teria um caminhar crítico

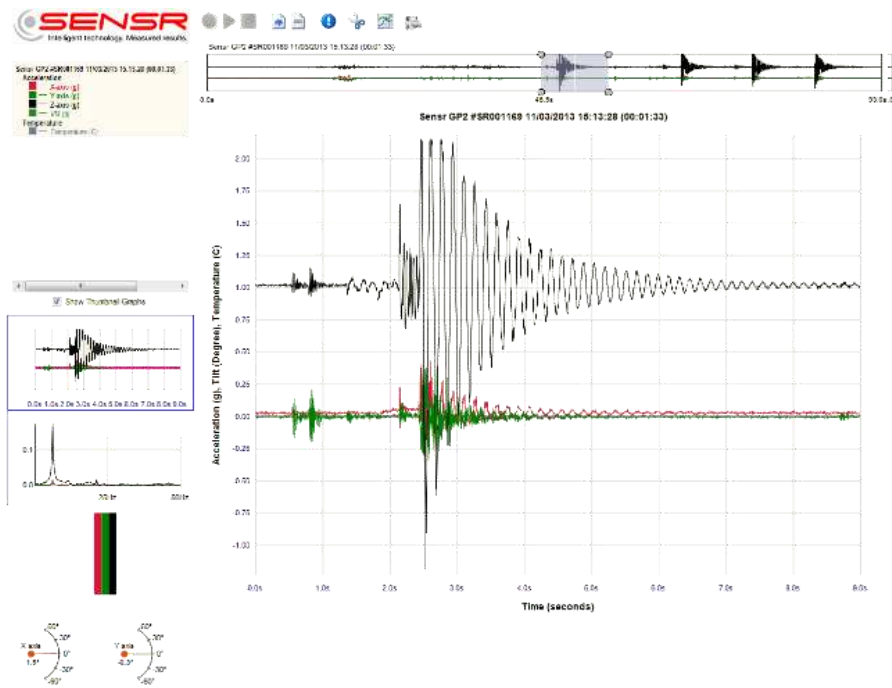
de 1,72 Hz, onde o terceiro harmônico deste caminhar coincide com a frequência fundamental do sistema de piso.

O voluntário que realizou os ensaios de vibração forçada foi o mesmo que realizou os ensaios de impacto. Para o ensaio de vibração forçada, foi utilizado um calçado de solado macio baixo. O ensaio foi realizado por no mínimo 3 ciclos de caminhar na estrutura, sendo que cada ciclo era composto pelo caminhar em toda estrutura, incluindo o ponto onde os acelerômetros se encontravam fixados. Durante os ensaios a frequência do caminhar foi mantida com o auxílio de um metrônomo digital.

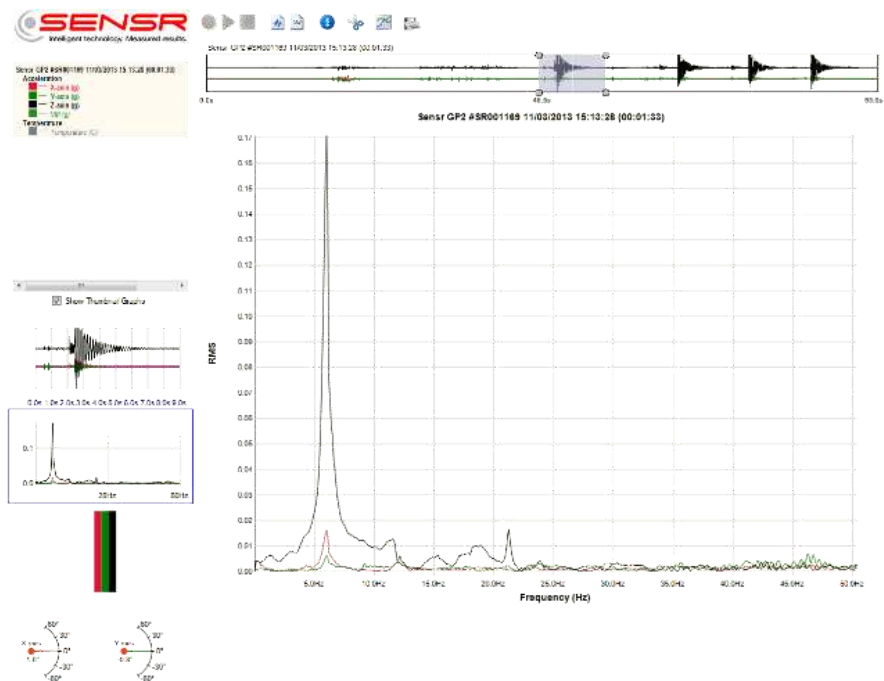
3.4 Procedimentos para processamento de resultados

Os dados foram tratados com auxílio de três programas computacionais: o SensView fornecido pela SENSR juntamente com o sistema de aquisição de dados GP2Lx USB, o MatLab da MathWorks e o Excel da Microsoft.

O software SensView é o programa da SENSR utilizado para realização das leituras dos dados captados pelo acelerômetro GP2Lx. As leituras podem ser realizadas de forma instantânea, à medida em que o ensaio é realizado, ou os sinais podem ser gravados, para análises posteriores. O programa codifica, filtra e analisa os sinais mensurados transformando-os em aceleração versus tempo para três direções de coordenadas ou através da transformada rápida de Fourier em espectro de frequência natural, além de captar os dados da temperatura ambiente e ângulo de inclinação do acelerômetro. Na Figura 3-5 é apresentado um exemplo de ensaio de impacto com a interface gráfica do software SensView, tanto para o domínio do tempo, quanto para o domínio da frequência.



(a)



(b)

Figura 3-5 - Exemplos de leitura no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b), com auxílio do programa computacional SensView.

O programa SensView permite a exportação dos dados de leitura no formato “.csv” (comma-separated values) para a análise em outros programas e sobreposição de até quatro ensaios para efeitos de comparação.

O MatLab é um programa interativo, amplamente conhecido na área de engenharia, voltado para o cálculo numérico em geral, que permite integrar a análise numérica, o cálculo de matrizes, o processamento de sinais e a construção de gráficos em um mesmo ambiente. Este programa permite a resolução de problemas através de programação dentro de sua interface, com auxílio de expressões algébricas convencionais, o que facilita o processo de programação.

Inicialmente foi realizado um processamento básico, em campo, durante a realização dos ensaios dinâmicos. Este processamento foi efetuado com o auxílio do SensView, sem a utilização de qualquer tipo de filtro, tendo o objetivo de determinar a frequência fundamental do sistema de piso, através do ensaio de impacto, para assim, calcular a frequência do caminhar crítico e realizar o ensaio de vibração forçada, verificando a influência do caminhar humano na estrutura.

Posteriormente os dados foram exportados do SensView e analisados no MatLab e no Excel, para a aplicação de filtros de sinais recomendados pelas normas ISO 2631-1 (1997) e ISO 2631-2 (2003) e o controle estatístico, respectivamente.

Após o processamento dos sinais obtidos através dos ensaios de impacto e vibração forçada, os resultados foram comparados com os valores limites propostos pelos principais critérios internacionais de conforto humano às vibrações em estruturas.

3.4.1 Filtro passa-banda

Nos ensaios de impacto em estruturas complexas, nem sempre as respostas da aceleração no domínio do tempo são limpas, pois além das acelerações induzidas pela excitação, tem-se ruídos que são induzidos por outros esforços externos, como vento, tráfego de veículos nas vias circunvizinhas à edificação e outros. Tal condição pode ser observada no exemplo da Figura 3-6.

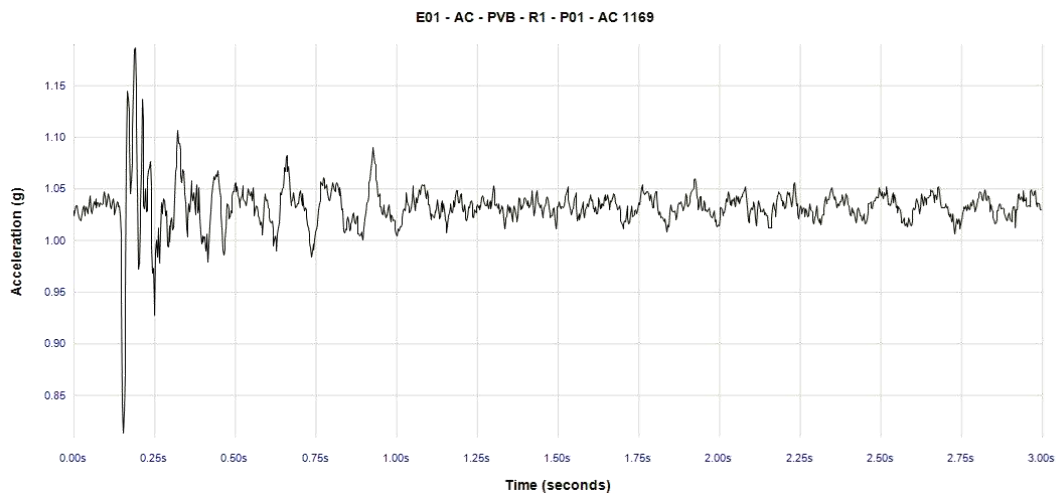


Figura 3-6 - Exemplo de heel-drop test com influência de ruídos externos.

Em geral estes esforços externos provocam vibrações em frequências bem superiores quando comparadas à frequência fundamental do sistema de piso. Além disso, estas acelerações dificultam a seleção dos picos de aceleração para aplicação do método do decremento logarítmico, para estimar o valor do amortecimento experimental. Observando a Figura 3-6, pode-se verificar que existe uma onda senoidal principal de maior amplitude que se refere ao impacto dos calcanhares e, internamente a esta onda, existe uma outra onda de frequência muito superior e amplitude muito inferior, que se refere aos ruídos provocados por excitações externas ao ensaio. Desta maneira existe uma dificuldade de identificação dos pontos de amplitudes máximas, atrapalhando a aplicação do método do decremento logarítmico. Outro fator a observar é que, de acordo com Varela (2004), o amortecimento modal da estrutura não é contínuo, alterando-se de acordo com a frequência analisada. Assim sendo, é de grande importância conseguir eliminar as acelerações induzidas pelos esforços externos.

Nos estudos de vibrações é comum a utilização de 3 tipos de filtros de sinais: os de passa-baixa, passa-alta e o de passa-banda. Estes filtros possuem a função de armazenar somente os sinais até uma determinada frequência pré-estabelecida, armazenar somente os sinais de uma frequência em diante e de armazenarem os dados em uma faixa de frequência, respectivamente.

De acordo com Moutinho (1998) apud Margarido (2013) conforme os regulamentos, excluindo os casos em que as vibrações apresentam caráter harmônico (ressonante), a análise do sinal deve ser realizada com a utilização de filtros de faixas de

frequências normalizadas de um terço de oitava. As faixas de terço de oitava (Tabela 3-1) são internacionalmente conhecidas e são definidas pelos limites superiores (f_1), inferiores (f_2) e frequências centrais (f_0), que são definidas pelas equações (3-1), (3-2) e (3-3). A ISO 2631-1 (1997) também faz a mesma recomendação da utilização de filtros passa-banda com banda de terço de oitava.

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (3-1)$$

$$f_1 = 2^{-1/6} f_0 \quad (3-2)$$

$$f_2 = 2^{1/6} f_0 \quad (3-3)$$

Tabela 3-1 – Caracterização das bandas de terço de oitava internacionalmente normalizadas (MOUTINHO, 1998) apud (MARGARIDO, 2013).

Banda nº	Frequência central (Hz)	1/3 de oitava (Hz)		Banda nº	Frequência central (Hz)	1/3 de oitava (Hz)	
		de	a			de	a
1	1,25	1,12	1,41	11	12,5	11,2	14,1
2	1,6	1,41	1,78	12	16,0	14,1	17,8
3	2,0	1,78	2,24	13	20,0	17,8	22,4
4	2,5	2,24	2,82	14	25,0	22,4	28,2
5	3,15	2,82	3,55	15	31,5	28,2	35,5
6	4,0	3,55	4,47	16	40,0	35,5	44,7
7	5,0	4,47	5,62	17	50,0	44,7	56,2
8	6,3	5,62	7,08	18	62,0	56,2	70,8
9	8	7,08	8,91	19	80,0	70,8	89,1
10	10	8,91	11,2	20	100,0	89,1	112,0

Foi implementado no MatLab um filtro passa-banda com características Butterworth de quinta ordem, onde foram definidos limites de frequência inferior e superior em relação à frequência fundamental da estrutura analisada. Este tipo de filtro tem o objetivo de realizar as leituras de aceleração somente para uma faixa definida de frequência, eliminando assim os ruídos externos e facilitando a implementação de métodos baseados na aceleração ou no decréscimo da aceleração para a determinação do amortecimento. Os limites foram empregados considerando uma banda de terço de oitava. Na Figura 3-7 pode-se observar a diferença do sinal antes e depois da utilização do filtro, tanto para o domínio do tempo, como para o domínio da frequência.

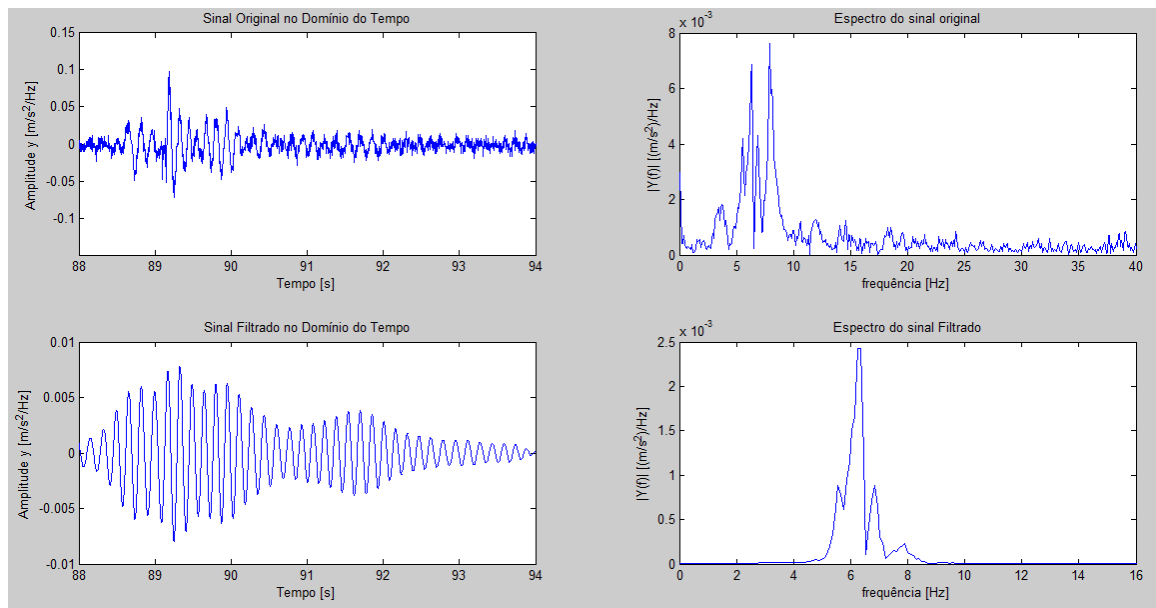


Figura 3-7 – Exemplo comparativo entre o sinal original e o sinal filtrado para o domínio do tempo e domínio da frequência para um ensaio de heel-drop test.

Observando a Figura 3-7, nota-se a vantagem da utilização do filtro passa-banda para análise do amortecimento modal, para a melhor aplicação do método do decremento logarítmico. Pode-se verificar no sinal filtrado a exclusão de todos os sinais referentes a frequências fora do intervalo determinado.

Além das recomendações já descritas, a ISO 2631-1 (1997) apresenta o método de valores de frequências ponderadas, onde os valores de ponderação da frequência estão relacionados à classe de sensibilidade da vibração, que neste caso pode ser: saúde, conforto (percepção) e enjoo à vibração. Para o caso de sistemas de piso, a análise de vibrações foi realizada de acordo com os critérios de conforto e percepção, tendo assim um valor de ponderação de frequência igual a 1 (um) para vibrações localizadas no eixo vertical de coordenadas. Desta maneira o efeito da ponderação da frequência para o critério de conforto e percepção não irá influenciar nos valores dos sinais analisados.

Para os ensaios de vibração forçada, onde o caminhar humano foi capaz de induzir a ação de ressonância, tendo desta maneira um caráter harmônico, a análise dos sinais foi realizada de acordo com a recomendação da ISO 2631-1 (1997), utilizando-se um filtro passa-banda de 0,4 Hz a 100 Hz. Após a passagem do sinal de resposta por este filtro, o valor do r.m.s. foi calculado pela expressão (2-11), proposta no HIVOSS (2008).

3.4.2 Controle estatístico

Após o tratamento de todos os dados adquiridos através dos ensaios de impacto e de vibração forçada com auxílio do Excel e do MatLab, as características modais foram obtidas por meio de um controle estatístico dos resultados analisados. A frequência fundamental da estrutura foi calculada através da média dos valores mensurados pelos 5 (cinco) ensaios de impacto realizados para cada região estudada. Para determinação do amortecimento, também foi realizado o cálculo da média entre todos os valores obtidos através do método do decremento logarítmico, além disso, foi realizado o cálculo do coeficiente de variação destes resultados.

Os valores dos coeficientes de variação determinados para cada região foram comparados com as faixas de precisão propostas por Gomes (2009) (Tabela 3-2) para avaliar a confiabilidade dos resultados e a aplicabilidade do método do decremento logarítmico.

Tabela 3-2 – Classificação geral do índice de precisão de experimentos com base no coeficiente de variação (GOMES, 2009).

C.V.	Avaliação do C.V.	Precisão
< 10 %	Baixo	Alta
10 a 20 %	Médio	Média
20 a 30 %	Alto	Baixa
> 30 %	Muito Alto	Muito baixa

Na Tabela 3-2 apresenta-se uma classificação geral do índice de precisão de experimentos com base no coeficiente de variação proposta por Gomes (2009), para diversos tipos de experimentos. Admite-se que essa classificação também pode ser utilizada para avaliar a precisão dos resultados calculados para a taxa de amortecimento nos ensaios dinâmicos em sistemas de piso misto. Varela (2004), Brito et al. (2010), Silva et al. (2012), etc., classificaram os resultados obtidos para a taxa de amortecimento com base no coeficiente de variação, tendo interpretado os valores entre 10 e 20% como resultados de boa precisão.

3.5 Classificação do teste de caminhada quanto à excitação da estrutura

O nível de excitação provocado por um teste de caminhada em um sistema de piso depende de vários aspectos, principalmente da frequência fundamental do sistema e da frequência do caminhar humano. Quanto menor a frequência fundamental do sistema de piso, mais fácil será excitar a estrutura com o caminhar humano, aumentando-se a amplitude das vibrações.

Para que o caminhar humano possa causar um maior nível de excitação em uma estrutura é necessário que a sua frequência ou um dos harmônicos desta frequência seja igual ou similar a uma das frequências naturais mais baixas da estrutura, provocando o fenômeno de quase ressonância ou ressonância, que produz um acúmulo da energia de excitação na estrutura e o aumento da amplitude das vibrações.

Diante disso, propõe-se neste trabalho uma classificação do ensaio de vibração forçada quanto ao nível de excitação provocado pelo caminhar humano e a percepção da ocorrência do fenômeno de quase ressonância ou ressonância. Desta maneira são estabelecidos quatro níveis de excitação:

- imperceptível;
- perceptível;
- clara;
- evidente.

Na Figura 3-8 são apresentados alguns exemplos de resultados de ensaios de vibração forçada por caminhar humano, no domínio do tempo, nos quais pode-se observar a faixa da razão entre a amplitude da aceleração crítica em relação à amplitude de aceleração do ruído, para os níveis de excitação propostos anteriormente.

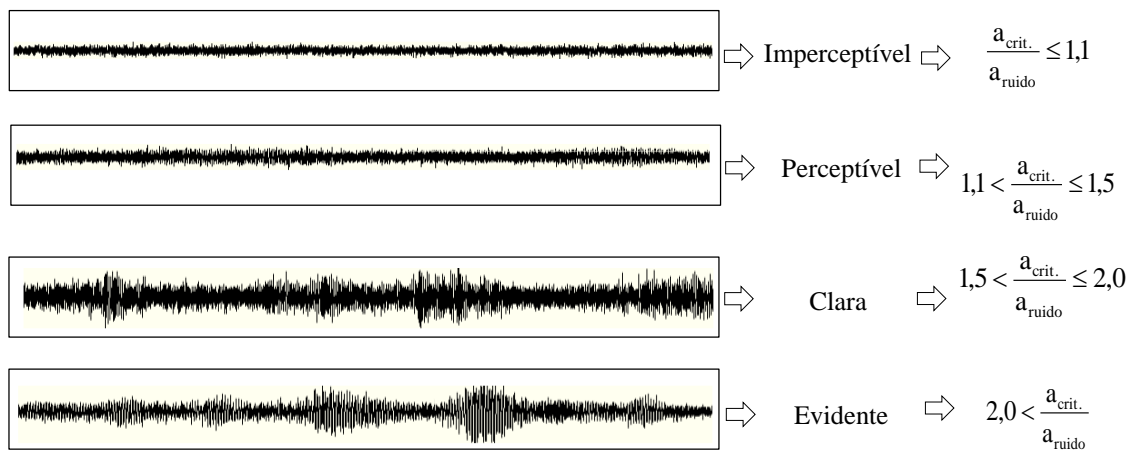


Figura 3-8- Resultados de ensaios de vibração forçada por caminhar humano e correspondentes níveis de excitação produzidos, segundo classificação proposta.

Com o uso da classificação proposta torna-se mais fácil interpretar os resultados obtidos através na análise experimental de vibrações em sistemas de piso, podendo-se transmitir com clareza ao leitor a magnitude da influência das vibrações induzidas pelo caminhar humano na estrutura.

4

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES EM SISTEMAS DE PISO MISTO

4.1 Considerações preliminares

No capítulo anterior foram definidos os materiais e os métodos empregados para a realização da análise de vibração nos sistemas de piso misto aço e concreto estudados. Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios dinâmicos realizados nas cinco edificações definidas anteriormente, para a elaboração deste trabalho.

Para cada edificação é apresentada detalhadamente a análise experimental de seus sistemas de piso, com a definição das regiões estudadas e descrição de suas características geométricas e de materiais. Para cada região foram realizados ensaios de impacto e vibrações forçadas.

Neste capítulo também são mostradas as particularidades dos ensaios para cada região, como posicionamento dos acelerômetros, estratégia de ensaio e número de ensaios. No final são apresentados para cada estrutura os resultados obtidos com a análise experimental de vibrações em seus sistemas de piso, bem como a comparação destes resultados com critérios internacionais considerando o conforto humano.

4.2 Estrutura I – Pavilhão de Aulas II - PVB

Localizado no Campus de Viçosa da Universidade Federal de Viçosa - UFV, o Edifício do Pavilhão de Aulas II – PVB (Figura 4-1) conta com três pavimentos e uma área total de 6995,28 m². O edifício é constituído por pilares de aço, sistemas de piso misto de aço e concreto com vigas mistas e lajes com forma de aço incorporada e fechamento com alvenaria de blocos celulares.



Figura 4-1 – Aspecto geral do Edifício do PVB da UFV.

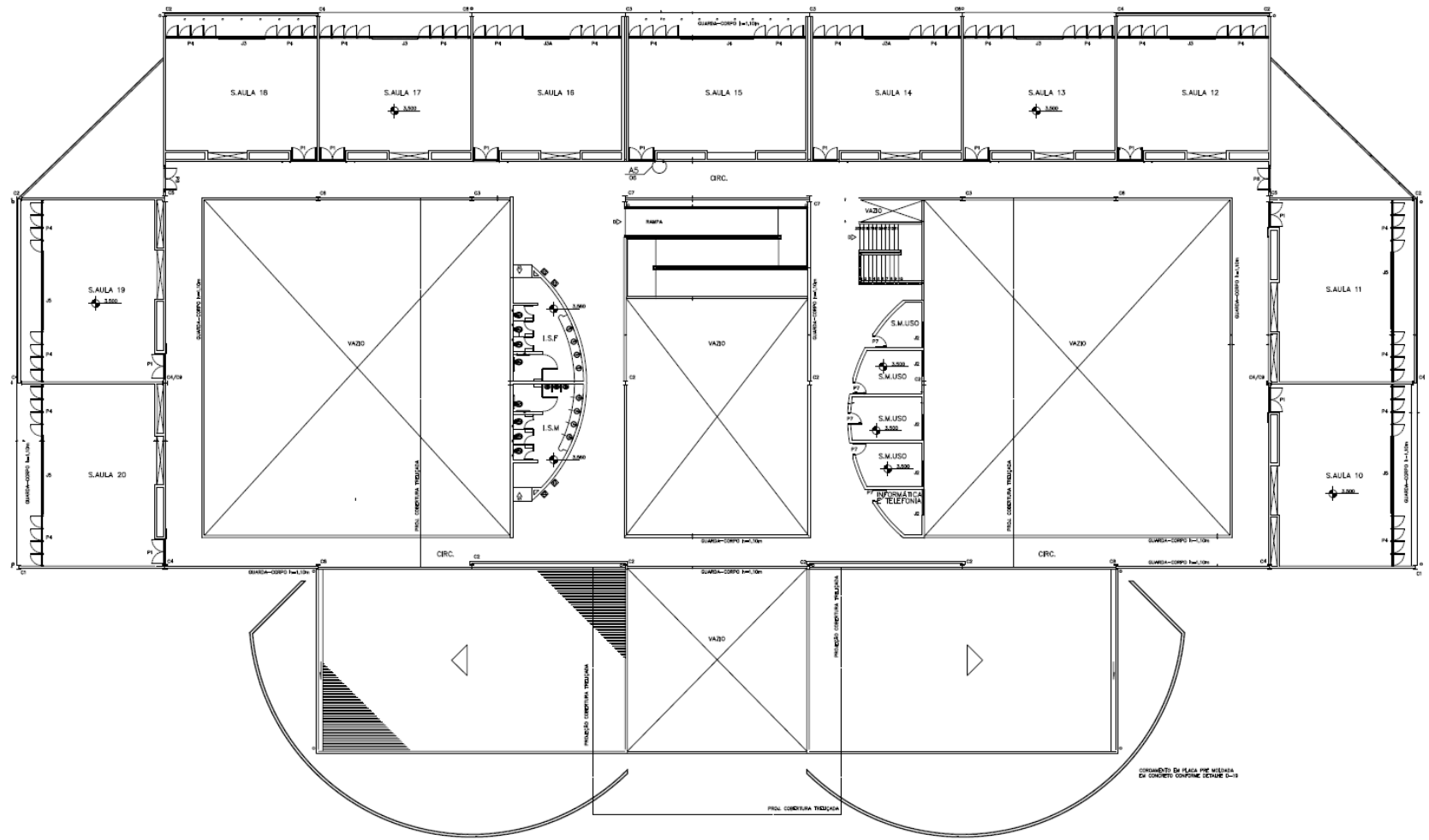


Figura 4-2 - Planta Baixa do 2º Pavimento – PVB.

Como pode ser visto na Figura 4-2 o edifício é formado basicamente por salas de aula e salas de apoio, visando atender à demanda da universidade de salas para os diversos cursos ministrados.

4.2.1 Sistemas de pisos estudados

Para realização da análise experimental de vibrações foram identificadas as regiões dos sistemas de piso mais susceptíveis aos efeitos das vibrações induzidas pelo caminhar humano, observado assim a rigidez e o amortecimento da estrutura, que estão diretamente ligados às seguintes características: comprimento do vão livre do sistema de piso, inércia dos elementos estruturais e a presença de paredes sob e sobre o pavimento estudado.

A partir dos documentos de projeto de estrutura metálica pode-se observar que o sistema estrutural do segundo e do terceiro pavimento são semelhantes, sendo necessário avaliar somente um destes pavimentos para compreender o comportamento de toda a edificação. Para facilitar a realização dos ensaios dinâmicos foi escolhido o sistema de piso do segundo pavimento, onde foram identificadas quatro regiões mais susceptíveis aos efeitos de vibrações induzidas pelo caminhar humano, indicadas na Figura 4-3:

- R1 - rampa de acessibilidade entre os pavimentos;
- R2 - sala de aula com vão livre de 12 metros nas duas direções;
- R3 - região das salas de uso múltiplo;
- R4 - corredor de acesso às salas de aula em balanço.

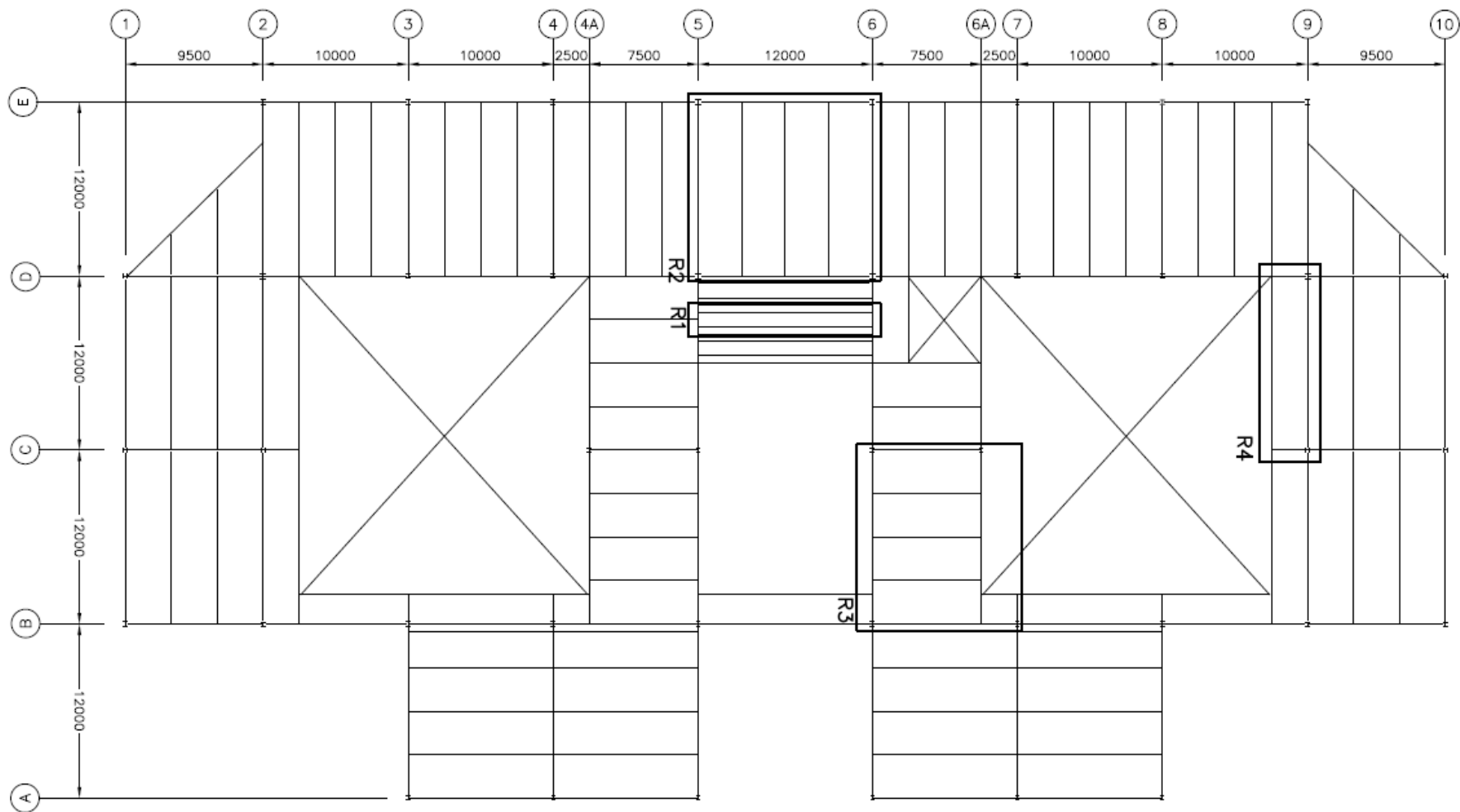


Figura 4-3 – Plano das vigas do segundo pavimento com a demarcação das regiões críticas selecionadas.

4.2.1.1 Região 1 – Rampa de acessibilidade entre os pavimentos

4.2.1.1.1 Descrição da estrutura

A rampa é composta por pilares de aço de perfis soldados tipo I e um sistema de piso misto de aço e concreto. As vigas mistas são formadas por perfis soldados tipo I, que se apoiam sobre patamares intermediários ou nos pisos adjacentes por meio de ligações parafusadas. Os patamares se conectam aos pisos adjacentes superiores e inferiores por meio de pilares ou tirantes por intermédio de ligação soldada. As lajes mistas de aço e concreto são compostas por forma de aço incorporada com altura de 75 mm, altura total de 150 mm e largura de 2000 mm. Nas Figuras 4-4 e 4-5, apresentam-se respectivamente o plano das vigas dos níveis + 0 ao + 2800 e a Elevação do eixo D, com intuito de caracterizar a estrutura da rampa.

A rampa é constituída por um vão de 12000 mm incluindo os patamares. As vigas principais são formadas por perfis soldados tipo PS 450x150x6,3x4,75, em aço ASTM A 36 multi grade ($f_y = 300$ MPa), sendo dispostas a uma distância de 1000 mm entre si. As vigas de bordo se apoiam nas vigas transversais dos patamares que são formadas por perfis soldados tipo PS 450x150x6,3x4,75, em aço ASTM A 36 multi grade. Os pilares e os tirantes se apoiam nos andares adjacentes, com comprimento máximo de 550 mm, compostos por perfis tipo PS 250x150x6,3x4,75, em aço ASTM A 36 multi grade. As vigas dos pisos adjacentes, onde as vigas principais se apoiam, são formadas por perfis PS 700x250x9,5x8, em aço ASTM A 36 multi grade.

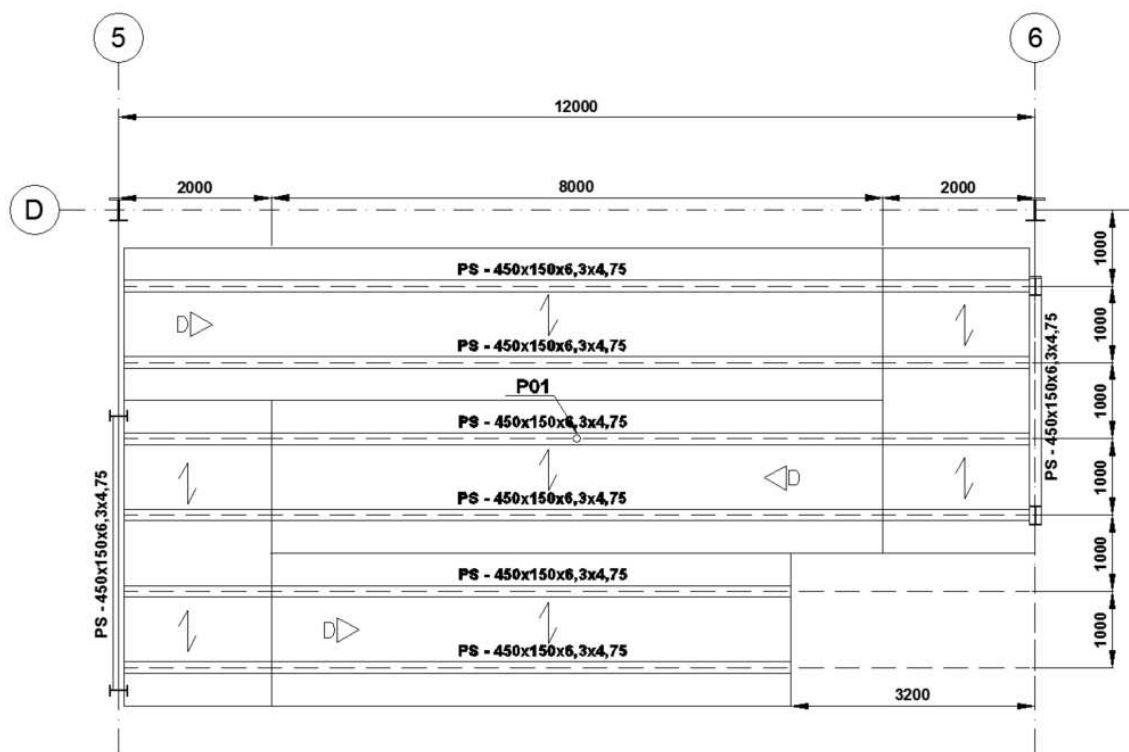


Figura 4-4 – Plano das vigas dos níveis + 0 ao + 2800, com o posicionamento do acelerômetro.

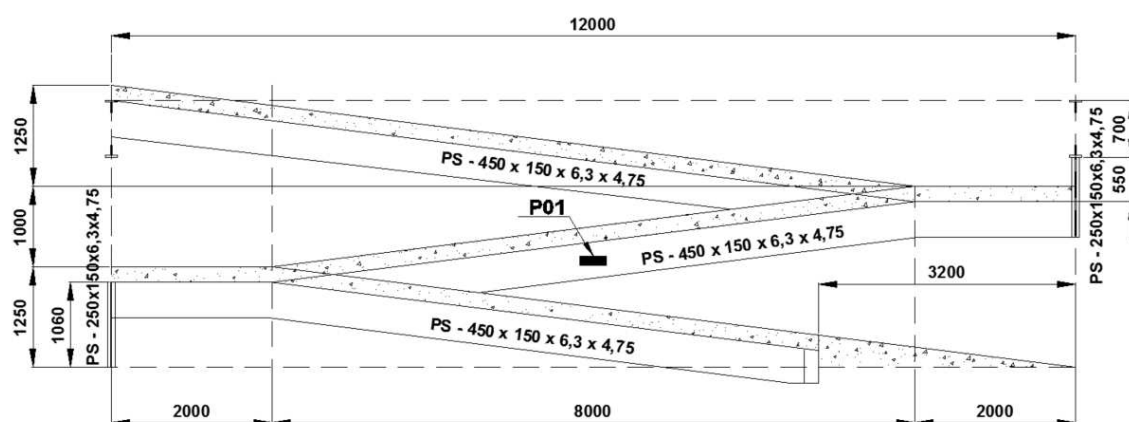


Figura 4-5 - Elevação eixo D, com o posicionamento do acelerômetro.

4.2.1.1.2 Ensaios dinâmicos

Nas Figuras 4-4 e 4-5 pode-se notar que o trecho inferior da rampa possui menor vão livre quando comparado com os trechos superiores. Isto resulta em uma maior rigidez e, conseqüentemente, numa maior frequência fundamental em relação aos outros dois trechos. Em função disso, o trecho inferior da rampa não foi avaliado durante os ensaios dinâmicos.

Outro fato relevante é que os dois trechos superiores são idênticos, porém espelhados. Desta forma, optou-se por avaliar somente os resultados de um dos intervalos. Por conveniência, escolheu-se o trecho intermediário. Observando-se a estrutura (Figura 4-5), pode-se notar que o trecho intermediário é formado por duas vigas biapoiadas paralelas e uma laje sobre as mesmas.

Por se tratar de um elemento biapoiado, o acelerômetro foi posicionado no centro do vão de uma das duas vigas longitudinais, como pode ser visto nas Figuras 4-4 e 4-5, de modo a medir as amplitudes máximas da aceleração para a frequência fundamental da estrutura. Pode ser observado na Figura 4-6 que o acelerômetro foi instalado na alma da viga e que seu eixo y foi adotado como o eixo principal, medindo as vibrações verticais da estrutura. Tal artifício foi utilizado com o objetivo de simplificar os vários graus de liberdade da estrutura em somente um, estudando assim somente o efeito das vibrações verticais da estrutura. Como visto anteriormente, grande parte dos esforços produzidos pelo caminhar humano pode ser decomposto em uma ação vertical, induzindo principalmente acelerações nesta direção, quando comparado com os esforços horizontais.



Figura 4-6 – Posicionamento do acelerômetro no ponto P01 (AC 1169) na alma da viga longitudinal da rampa de acesso.

Como descrito no Capítulo 3, a análise experimental foi dividida em três etapas, sendo que nas duas primeiras foram realizados ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test) e na subseqüente executado o ensaio de vibração forçada pelo caminhar de uma única pessoa (walking test). A frequência do caminhar humano para o ensaio de vibração forçada foi calculada a partir da frequência fundamental da estrutura, com objetivo que o harmônico do caminhar excitasse os primeiros módulos de frequência da estrutura.

4.2.1.1.3 Resultados e discussão

Através do ensaio de impacto foi identificada a frequência fundamental da estrutura. Pode-se observar na Figura 4-7, respectivamente a resposta no domínio do tempo e o espectro de resposta no domínio da frequência para um impacto do heel-drop test realizado no centro do vão estudado.

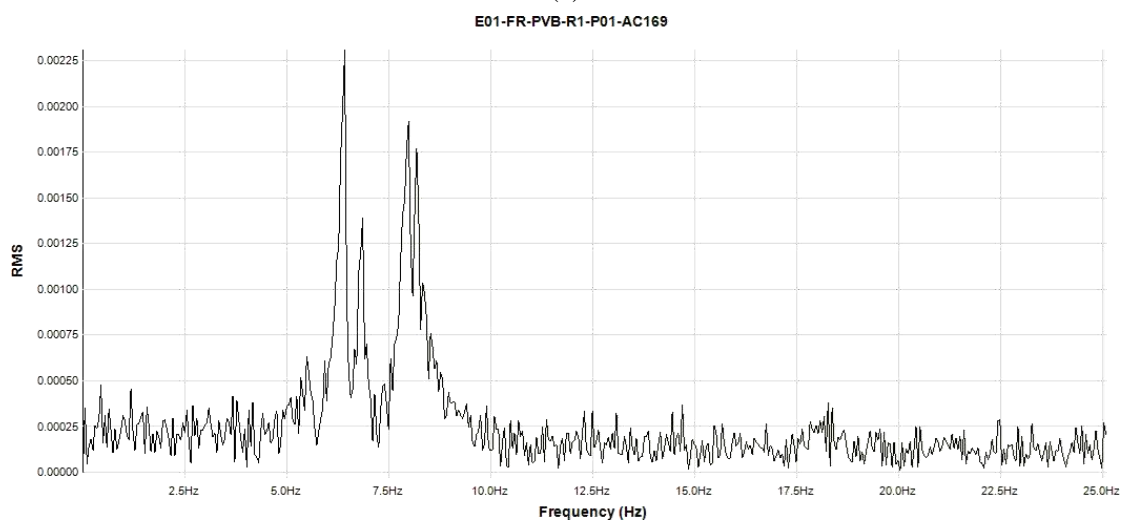
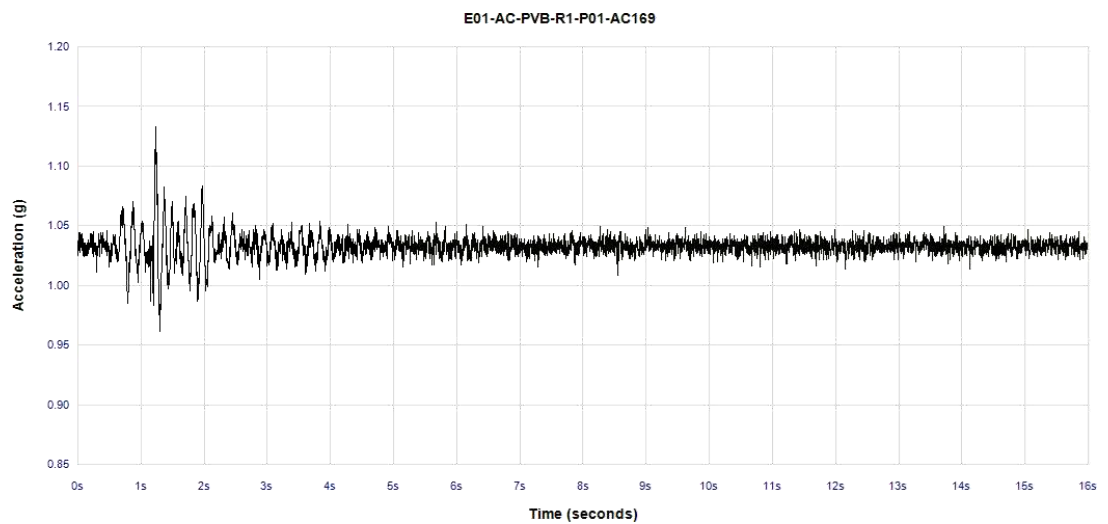


Figura 4-7 –Resposta no domínio do tempo (a) e domínio da frequência (b) para o terceiro impacto dos calcanhares no centro do vão da região 1 do PVB.

Por meio dos testes de impacto foi possível identificar as seguintes frequências naturais da rampa: 6,35 Hz, 6,83 Hz e 11,72 Hz.

Com o valor da frequência fundamental de 6,35 Hz pode-se calcular as frequências do filtro passa-banda, para assim estimar o valor do amortecimento, tanto para os impactos realizados no centro do vão, quanto para os impactos realizados na zona de apoio do vão. Na Tabela 4-1 são apresentados os valores das frequências para o filtro passa-banda.

Tabela 4-1 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	6,35 Hz	5,66 Hz	7,13 Hz

Na Figura 4-8 é apresentada a comparação entre a curva aceleração x tempo do sinal original e do sinal filtrado, para um impacto de heel-drop test na extremidade do vão da viga da região 1.

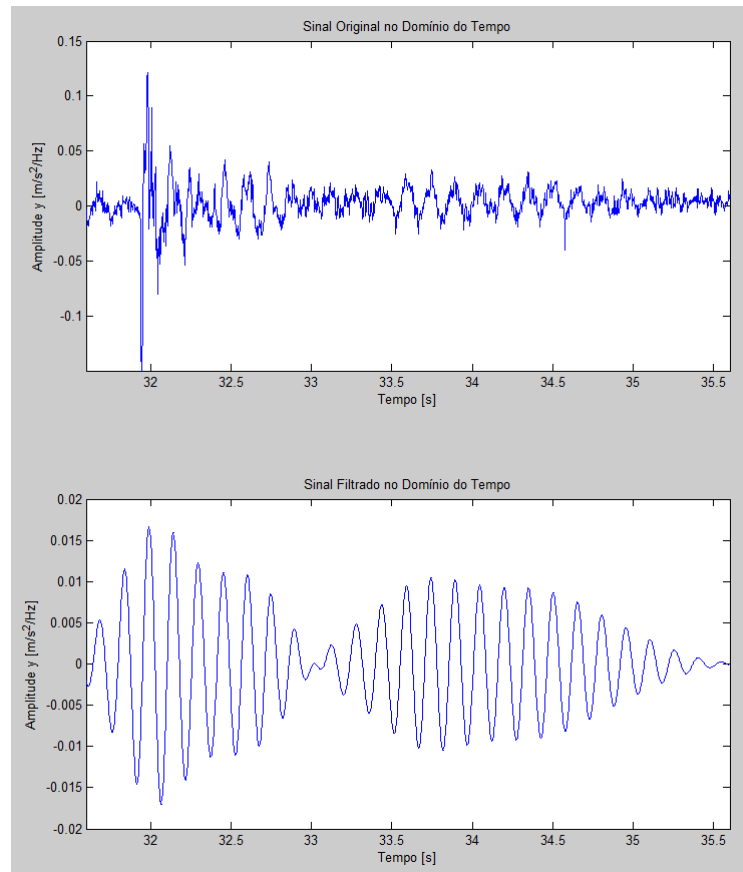


Figura 4-8 – Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto dos calcanhares na extremidade da região 1 do PVB.

Com os sinais dos ensaios de impacto filtrados foi possível estimar o valor do amortecimento para cada impacto com auxílio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-2 apresenta-se um resumo destes resultados.

Tabela 4-2 – Valores de amortecimento para a região 1 do PVB (AC 1169).

Local	Valores
Amortecimento com impacto dos calcanhares no centro do vão	Média: 3,23 %
	Amostragem: 14 picos
	Desvio padrão: 0,46 %
	Coef. de Variação: 14,4 %
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona de apoio do vão	Média: 2,81 %
	Amostragem: 20 picos
	Desvio padrão: 0,50 %
	Coef. de Variação: 17,8 %

O valor do amortecimento para o impacto dos calcanhares no centro do vão é maior quando comparado com o impacto na extremidade do vão. Isto ocorre devido ao amortecimento provocado pelo próprio corpo humano, visto que após o momento do impacto dos calcanhares, o corpo do voluntário funciona como um sistema massa-mola-amortecedor, aumentando o valor do amortecimento da estrutura. Deste modo, quando o ensaio de impacto é realizado com o voluntário posicionado no centro do vão, o valor do amortecimento calculado é maior do que o real da estrutura, conforme também observado nos ensaios de Varela (2004).

Os valores de amortecimento calculados (Tabela 4-2) se situam na faixa prevista para este parâmetro, que é de 2% a 5%. Para os impactos realizados na zona de apoio da viga estudada o amortecimento foi inferior a 3%, valor que condiz com o esperado para passarelas com grandes vãos e pisos “desnudos”. Com relação aos estimadores estatísticos pode-se dizer que os resultados apresentaram uma boa confiabilidade, com um coeficiente de variação máximo de 17,8% para os impactos na zona de apoio do vão, com uma amostragem de 14 picos, e 14,4% para os impactos no centro do vão, onde a amostragem foi de 20 picos.

A frequência fundamental de 6,35 Hz obtida por meio dos ensaios de impacto se situa no intervalo de 5 a 8 Hz, que de acordo com os estudos experimentais de Hanes (1970), é o intervalo que as pessoas reagem de forma especialmente adversa às vibrações. Quando se compara este valor de frequência fundamental com as curvas de aceitação de conforto humano às vibrações dos principais critérios internacionais (Figuras 2-15 e 2-18), pode-se observar que esta frequência está localizada na região crítica destas curvas. Desta forma fica evidente a importância do ensaio de vibração forçada pelo

caminhar humano para a avaliação da amplitude da aceleração nas condições reais de uso da estrutura para efeitos de análise do conforto humano às vibrações.

Na Figura 4-9 é mostrada a curva no domínio do tempo do teste de caminhada (walking test) para uma frequência de 2,12 Hz. Analisando este caso, pode-se fazer a sua classificação quanto à excitação da estrutura como evidente, já que a relação $a_{crit.}/a_{ruído}$ é de 6,69. O valor máximo de pico da aceleração para este ensaio foi de 5,09% g, que corresponde a uma aceleração em r.m.s. de 3,60% g.

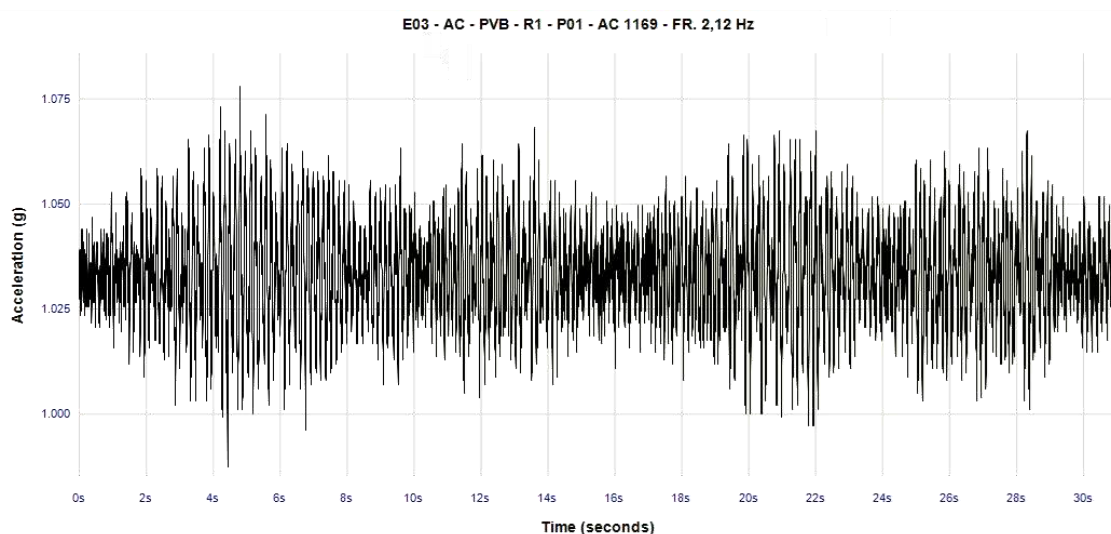


Figura 4-9 – Curva aceleração versus tempo na região 1 do PVB, para uma frequência de caminhar de 2,12 Hz.

Na Figura 4-10 a aceleração em r.m.s. obtida através dos ensaios experimentais para o walking test de uma pessoa é comparada com os valores limites das principais recomendações internacionais para passarelas internas considerando o conforto humano à vibração.

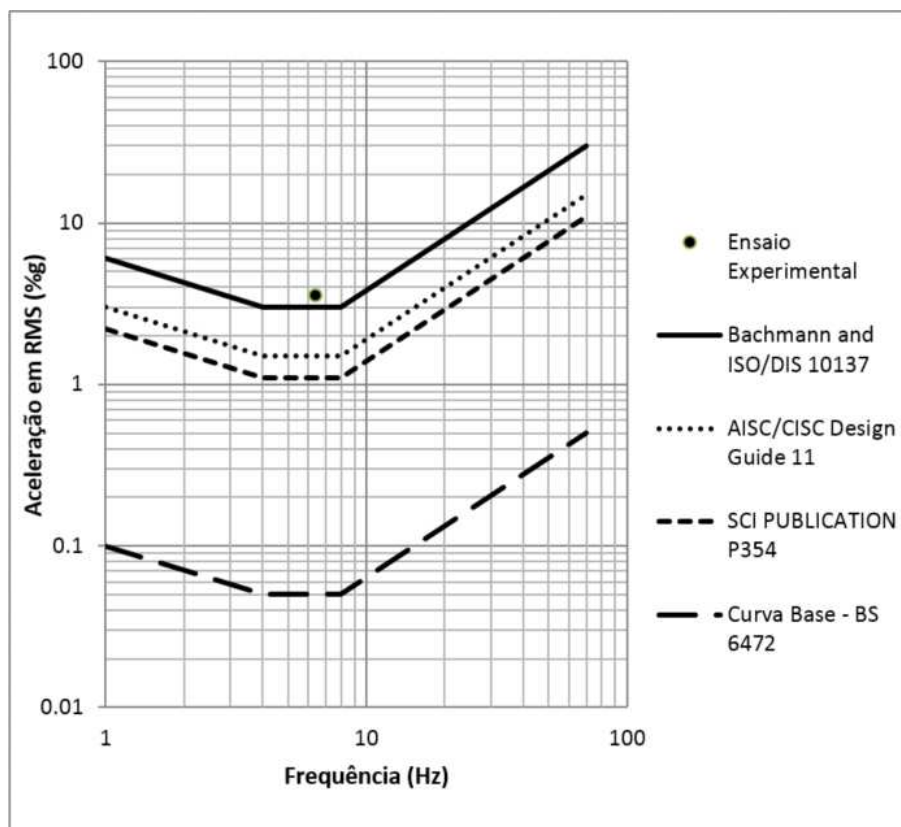


Figura 4-10 - Gráfico de comparação do valor da aceleração do ensaio experimental e os critérios de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para rampas internas.

Pode-se observar que o caminhar de frequência de 2,12 Hz de uma pessoa causou uma aceleração em r.m.s. de 3,60% g, valor este maior do que os limites recomendados pelas curvas da SCI PUBLICATION P354, do AISC/CISC Design Guide 11 e de Bachmann et al. (1995) e ISO 10137 para passarelas internas em edifícios com acesso ao público. Para passarelas internas, a SCI PUBLICATION P 354 recomenda a multiplicação dos valores característicos da curva base – BS 6472 por um fator de 22 vezes; a publicação da AISC/CISC recomenda um fator de multiplicação de 30 vezes e Bachmann et al. (1995) e a ISO 10137 um valor de 60 vezes. Quando se compara com as recomendações de Bachmann et al. (1995), o valor da aceleração em r.m.s. da análise experimental está próximo ao limite recomendado, com uma defasagem de somente 0,60% g.

Em função desses resultados, pode-se afirmar que as vibrações da estrutura na região 1 são perceptíveis aos seus usuários, podendo gerar desconforto. Tal desconforto é amenizado pelo fato da rampa ser estreita, do usuário não permanecer em um único local durante um longo período de tempo e da rampa normalmente ser utilizada por mais de um usuário simultaneamente, posicionados em trechos diferentes e com caminhantes

de frequências diferentes e defasados entre si. Deste modo, a amplitude de aceleração da estrutura normalmente é menor do que os valores verificados no ensaio.

4.2.1.2 Região 2 – Sala de aula com vão livre de 12 metros nas duas direções

4.2.1.2.1 Descrição da estrutura

A região 2 é composta por pilares de aço de perfis soldados tipo I e um sistema de misto de aço e concreto. As vigas secundárias são mistas formadas por perfis soldados tipo I com comprimento de 12000 mm, que se apoiam nas vigas principais por meio de ligações parafusadas. As vigas principais, também formadas por perfis tipo I com comprimento de 12000 mm, são ligadas aos pilares metálicos por ligações parafusadas. As lajes mistas de aço e concreto são compostas por forma de aço incorporada com altura de 75 mm, altura total de 150 mm. A interação laje de concreto e viga de aço é garantida através de conectores do tipo pino com cabeça.

As vigas secundárias são do tipo PS 600x47,50, sendo dispostas a uma distância de 3000 mm uma da outra. As vigas principais são formadas por perfis PS 600x103,45, PS 600x92,40, sendo o primeiro uma viga de borda e o segundo uma viga com continuidade para um corredor de acesso. Na Figura 4-11 é apresentado o plano das vigas da região 2 com suas dimensões e posicionamento dos acelerômetros.

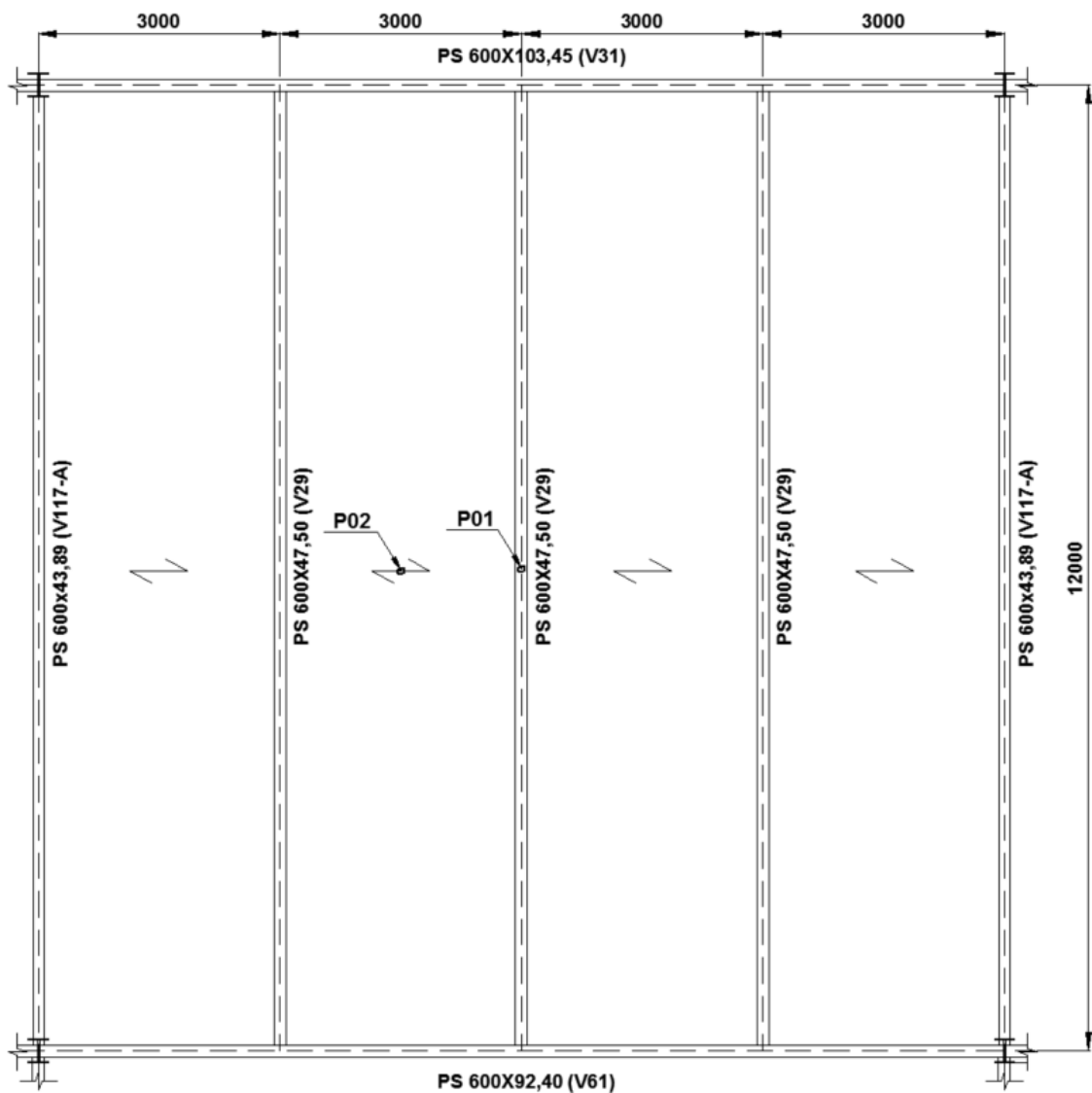


Figura 4-11 – Plano das vigas da região 2 com posicionamento dos acelerômetros.

A região 2 é utilizada como sala de aula, tendo paredes somente em seu contorno e baixa densidade de mobília. Estas características, somadas ao vão livre de 12000 mm nas duas direções, fazem com que esta região seja mais susceptível às vibrações forçadas pelo caminhar humano, quando comparada com as demais salas de aula da edificação. Por este motivo a região 2 foi escolhida para a análise dinâmica.

4.2.1.2.2 Ensaios dinâmicos

Os acelerômetros foram posicionados nos pontos P01 e P02 (Figura 4-11), que representam o ponto central da baia e o ponto central de um segmento da laje com forma de aço incorporada, respectivamente. Tais pontos foram definidos observando-se as condições de contorno do elemento estudado e os possíveis modos fundamentais de

vibração da estrutura, de forma que os acelerômetros foram fixados nas posições de maior amplitude de deslocamento e de aceleração. Na Figura 4-12 pode-se observar três possíveis configurações de deslocamentos para o modo fundamental, onde as duas primeiras passam pelo ponto P01 e a terceira no ponto P02.

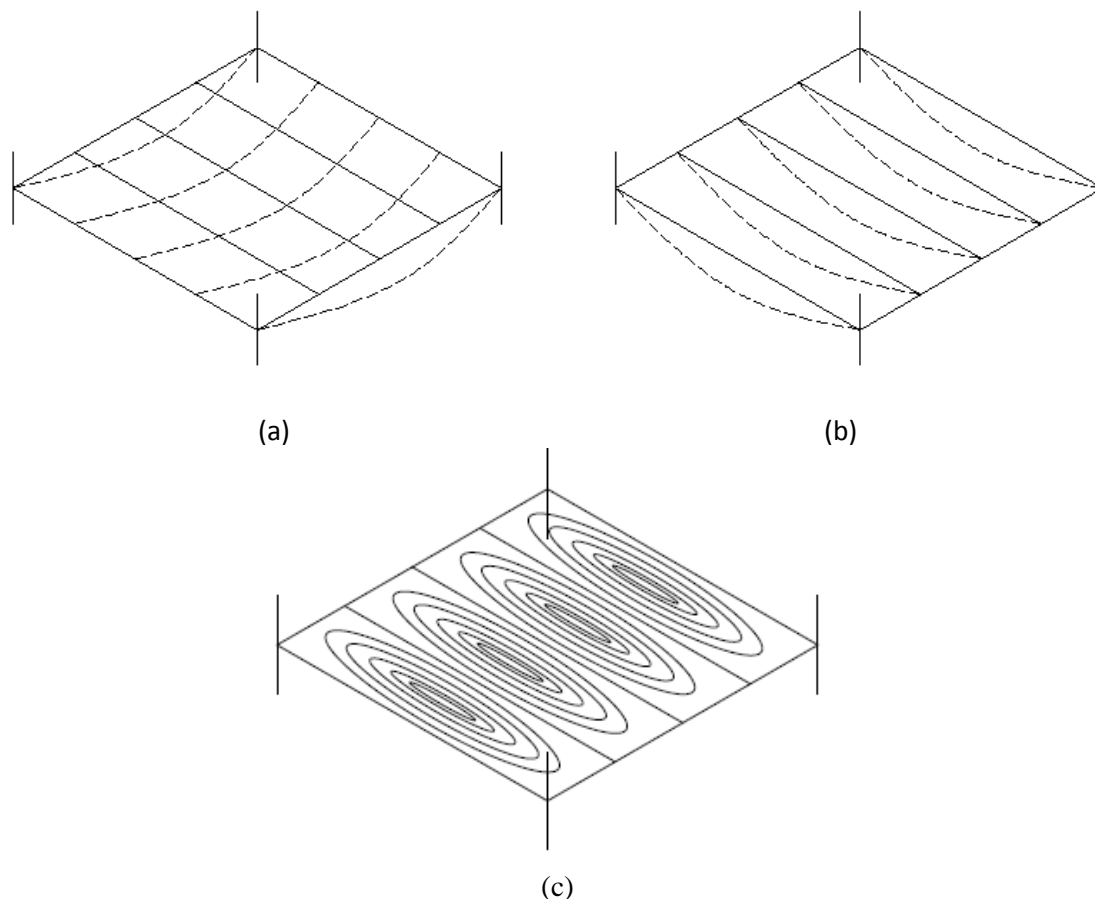


Figura 4-12 - Possíveis modos de vibração para a região 2 do PVB.

As duas primeiras configurações de deslocamentos para o modo de vibração correspondente à frequência fundamental da estrutura consideram a deformação de toda a baía como um único elemento. Já a terceira configuração considera que a rigidez das vigas secundárias é muito maior que a rigidez das lajes de concreto com forma de aço incorporada, o que provoca os maiores deslocamentos na laje de concreto e deslocamentos quase nulos nas vigas secundárias. Ainda pode existir uma quarta configuração do modo de vibração fundamental, que seria uma interação entre as duas primeiras configurações anteriores, onde o ponto de amplitude máxima de aceleração também seria no meio do vão da viga secundária central.

Os acelerômetros foram posicionados na mesa inferior da viga de aço e na forma de aço da laje, com auxílio da chave magnética da SENSR. No ponto P01 foi instalado o acelerômetro AC 1190 e no ponto P02 o AC 1169 (Figura 4-13).

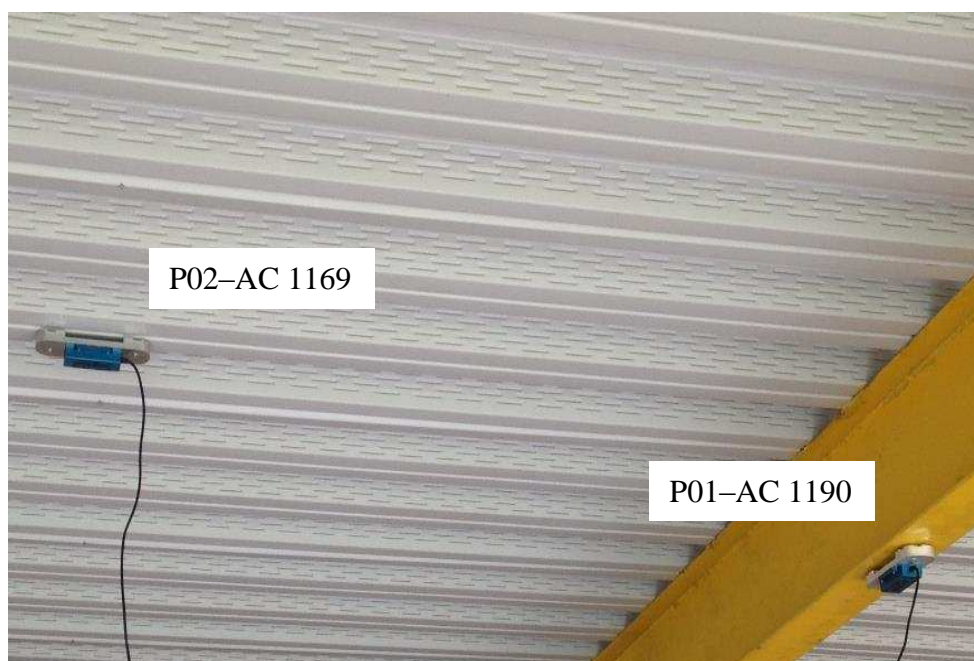


Figura 4-13 - Posicionamento dos acelerômetros da Região 2 do PVB.

A análise experimental foi dividida em 2 etapas, sendo a primeira correspondente aos ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test) e a segunda aos ensaios de vibração forçada pelo caminhar de uma única pessoa (walking test). A frequência do caminhar humano para os ensaios de vibração forçada foi calculada a partir da frequência fundamental da estrutura, com objetivo que o harmônico do caminhar excite os primeiros modos de frequência da estrutura.

4.2.1.2.3 Resultados e discussão

Com auxílio dos ensaios de impacto dos calcanhares foi identificada a frequência fundamental da estrutura. Na Figura 4-14 são apresentados os espectros de resposta no domínio da frequência, obtidos com auxílio dos acelerômetros localizados nos pontos P01 e P02, para um impacto dos calcanhares na zona central do sistema de piso.

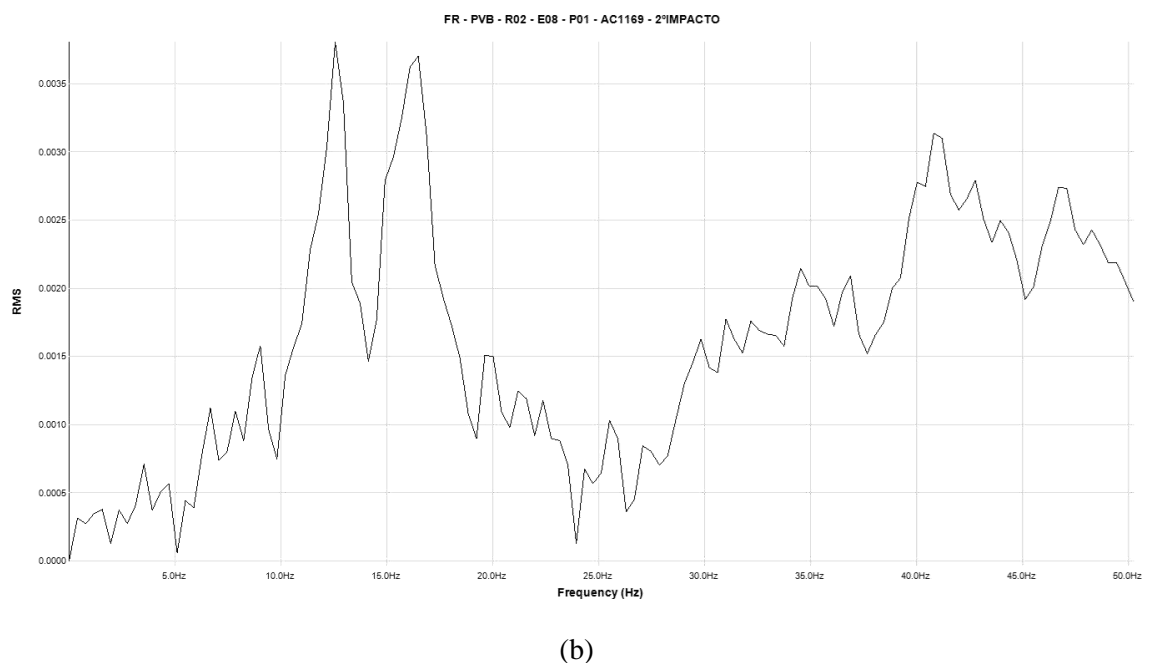
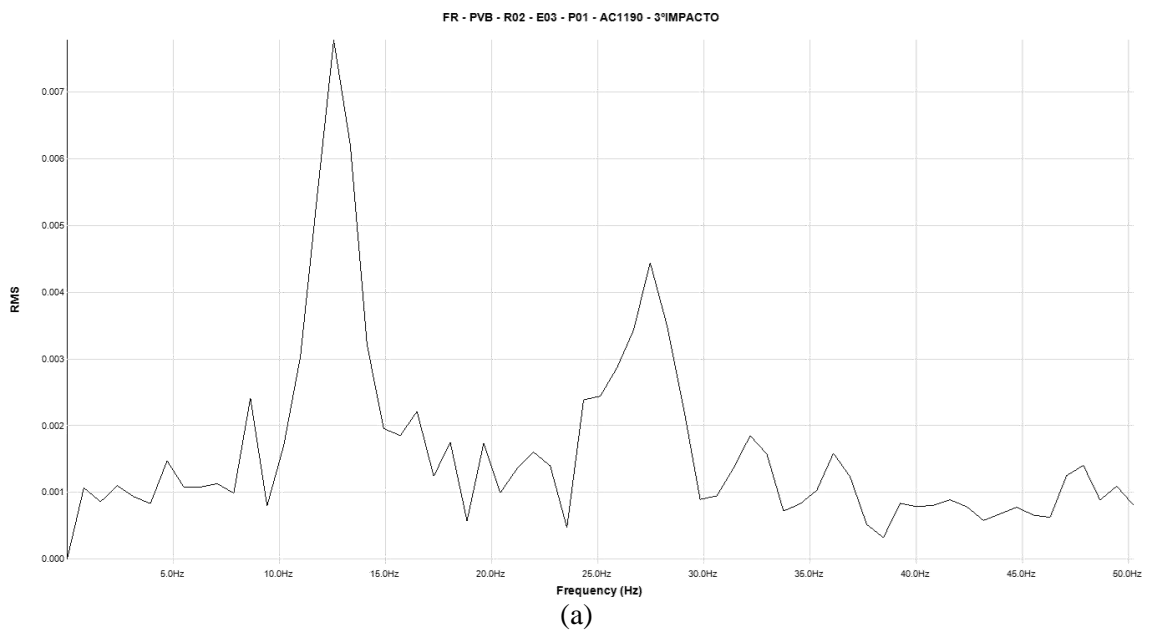


Figura 4-14 – Espectro de resposta no domínio da frequência para os acelerômetros P01 – AC 1190 (a) e P02 - AC 1169 (b) para um heel-drop test na zona central da região 2.

Por meio dos testes de impacto foi possível identificar as seguintes frequências naturais: 12,89 Hz, 16,41 Hz e 27,34 Hz. Observando os resultados de impacto para cada acelerômetro, pode-se concluir que a frequência fundamental da estrutura de 12,89 Hz possui amplitude máxima de aceleração no ponto P01, mostrando que a configuração de deslocamentos do modo de vibração fundamental possui características semelhantes às duas primeiras configurações propostas para a definição do posicionamento dos acelerômetros. Existem evidências que permitem afirmar que a frequência natural de

16,41 Hz corresponde ao terceiro modo de vibração indicado na Figura 4-12, já que as amplitudes de deslocamentos do ponto P02 são muito maiores do que aquelas observadas no ponto P01.

Com o valor da frequência fundamental de 12,89 Hz pode-se calcular os valores das frequências do filtro passa-banda, para assim estimar o valor do amortecimento, tanto para os impactos realizados na zona central do sistema de piso, quanto para os impactos realizados próximos à zona de apoio. Na Tabela 4-3 são apresentados os valores das frequências para o filtro passa-banda.

Tabela 4-3 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	12,89 Hz	11,48 Hz	14,47 Hz
P02	12,89 Hz	11,48 Hz	14,47 Hz

Com intuito de demonstrar a importância do filtro passa-banda, na Figura 4-15 é realizada a comparação entre o sinal de aceleração no domínio do tempo original e filtrado para um impacto de heel-drop test realizado no centro do sistema de piso estudado, tais dados foram medidos pelo acelerômetro posicionado no ponto P01.

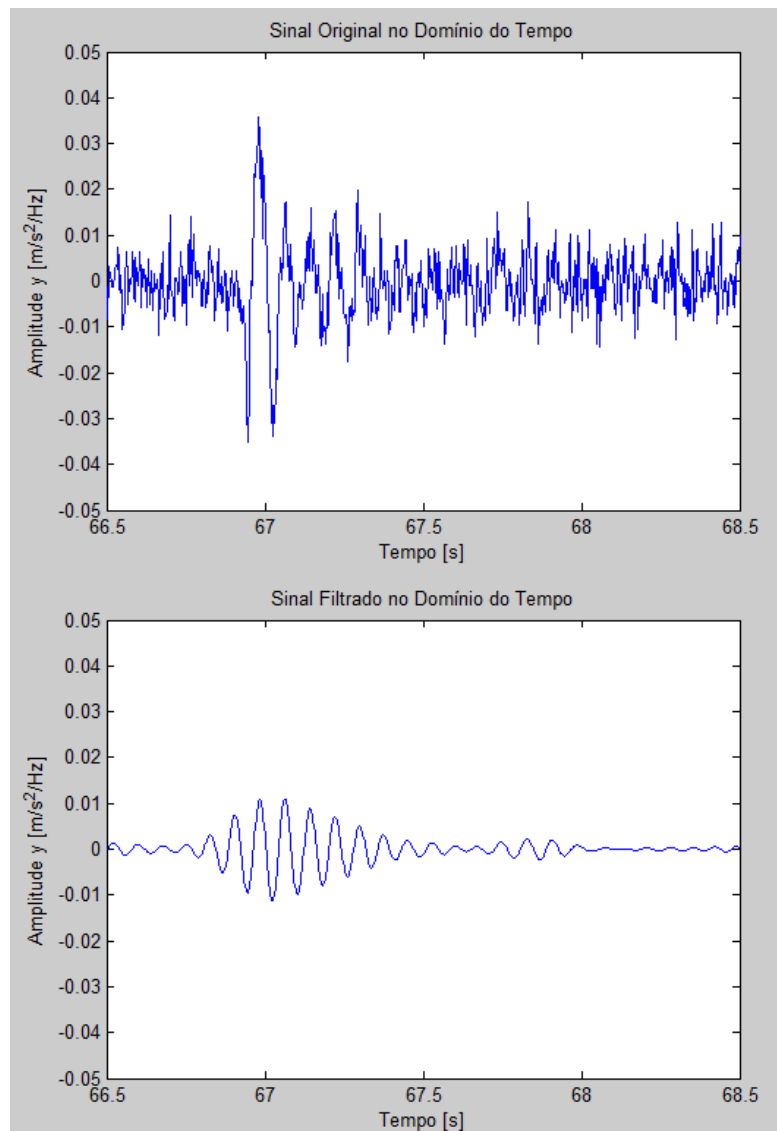


Figura 4-15 – Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto dos calcanhares no centro da região 2 do PVB.

Com os resultados dos sinais dos ensaios de impacto filtrados foi possível determinar os picos de acelerações e estimar o valor do amortecimento para cada impacto por meio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-4 apresenta-se um resumo destes resultados. Os valores de amortecimento determinados a partir da excitação da zona central da baía foram calculados com base nas respostas obtidas nos pontos P01 e P02. Para a excitação provocada próximo à zona de apoio da estrutura, o amortecimento foi calculado somente a partir das respostas do ponto P02, já que as amplitudes do ponto P01 não permitiram a determinação deste parâmetro.

Tabela 4-4 – Valores de amortecimento para a região 2 do PVB (AC 1169 e AC 1190).

Local	Valores
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona central do sistema de piso	Média: 4,275 %
	Amostragem: 43 picos
	Desvio padrão: 0,76 %
	Coef.de Variação: 17,88 %
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona do apoio do sistema de piso	Média: 4,09 %
	Amostragem: 24 picos
	Desvio padrão: 0,68 %
	Coef. de Variação: 16,71 %

De forma similar ao que foi observado anteriormente para a região 1, os valores de amortecimento calculados com impactos na zona central da região 2 foram cerca de 4,52% maiores do que os calculados com impactos produzidos na zona de apoio.

Conforme mostrado na Tabela 4-4, os valores médios de amortecimento experimental calculados se situam na faixa usual para sistemas de piso misto de aço e concreto que é de 2% a 5%, sendo que um valor próximo de 4,0% pode ser justificado considerando-se a alvenaria disposta sobre o sistema de piso e a mobília presente no local.

O método do decremento logarítmico mostrou-se novamente adequado para estimar o amortecimento, tendo apresentado um coeficiente de variação inferior a 18,0%.

Na Figura 4-16 é mostrada a curva no domínio do tempo do teste de caminhada para uma frequência de 2,14 Hz.

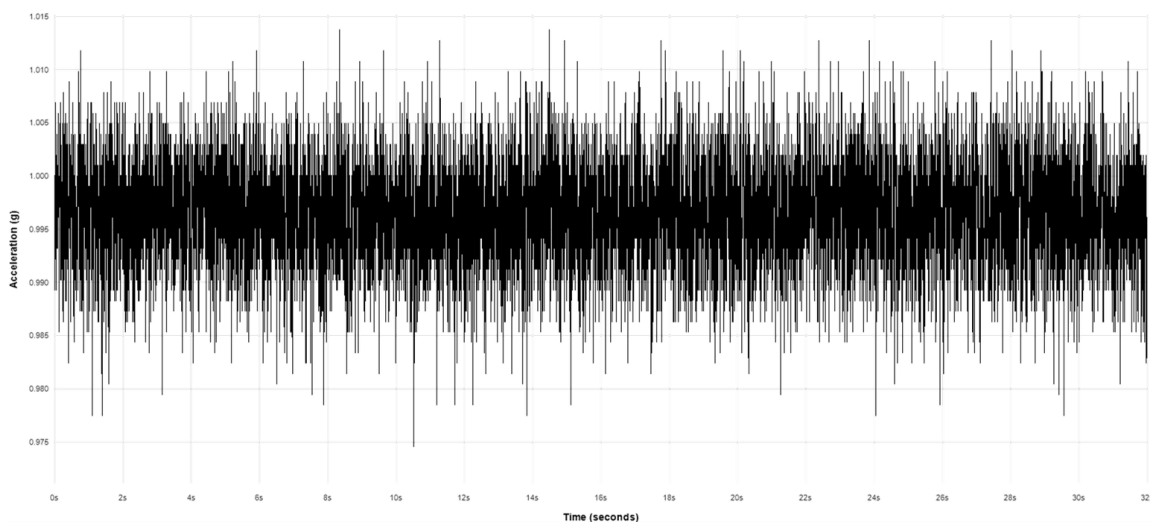


Figura 4-16 – Curva aceleração versus tempo da região 2 do PVB, para uma frequência do caminhar de 2,14 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P01.

Analisando a Figura 4-16 e considerando-se que a relação $a_{crit.}/a_{ruído}$ foi de 1,01, pode-se classificar a excitação da estrutura como imperceptível. Isto pode ser confirmado por meio da Figura 4-17, onde são comparadas a curva de aceleração para o ensaio de vibração forçada com a curva de aceleração dos ruídos, obtidas pelo sistema de aquisição de dados.

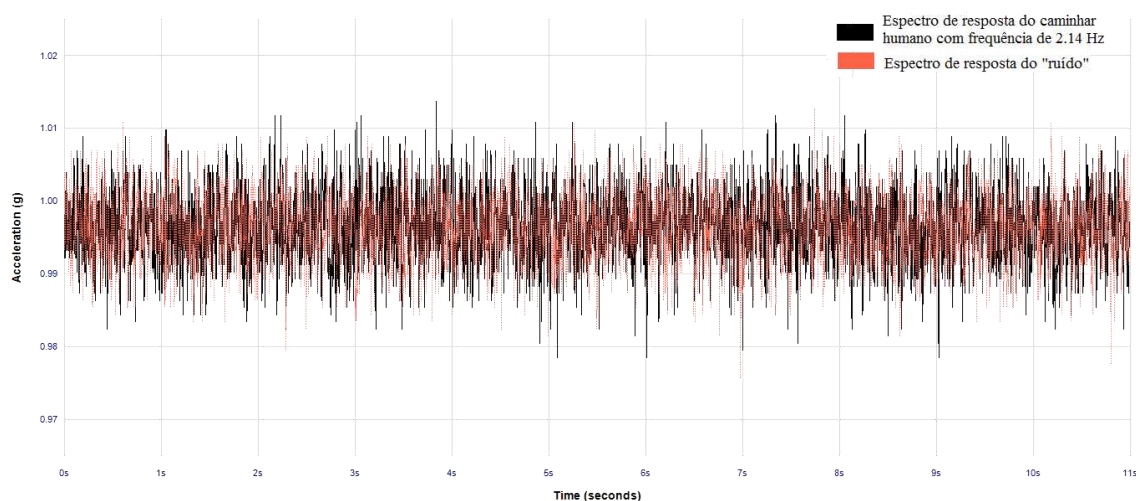


Figura 4-17 – Comparação entre a curva aceleração versus tempo para uma frequência de caminhar de 2,14 Hz e de ruído para a região 2 do PVB.

Devido ao alto valor da frequência fundamental da estrutura, o caminhar humano não consegue excitar o sistema de piso a ponto de provocar o princípio de ressonância com o acúmulo de energia de excitação e o aumento das amplitudes de aceleração. Isso fica evidente na Figura 4-17, no qual os valores máximos da amplitude de aceleração para

o teste de caminhada com frequência de 2,14 Hz são semelhantes aos valores máximos da amplitude de aceleração do ruído. Neste caso, somente o sexto harmônico do caminhar humano coincide com a frequência fundamental do sistema de piso. Diante disto é desnecessária a comparação das respostas do ensaio induzido pelo caminhar humano com as recomendações internacionais considerando o conforto humano.

4.2.1.3 Região 3 – Salas de uso múltiplo (salas de apoio)

4.2.1.3.1 Descrição da estrutura

A região 3 é composta por pilares de aço de perfis soldados tipo I e um sistema de piso misto de aço e concreto. As vigas secundárias são mistas formadas por perfis soldados tipo I com comprimento de 7500 mm, que se apoiam nas vigas principais por meio de ligações parafusadas. As vigas principais, também formadas por perfis tipo I com comprimento de 12000 mm, são ligadas aos pilares metálicos por ligações parafusadas. As lajes mistas de aço e concreto são compostas por forma de aço incorporada com altura de 75 mm, altura total de 150 mm. A interação laje de concreto e viga de aço é garantida através de conectores do tipo pino com cabeça.

As vigas secundárias possuem perfis PS 300x25,25 e PS 600x66,17, sendo dispostas a uma distância de 3000 mm uma da outra. As vigas principais são formadas por perfis PS 700x98,1 e PS 700x92,40. Na Figura 4-18 é apresentado o plano das vigas da região 3 com suas dimensões e posicionamento dos acelerômetros.

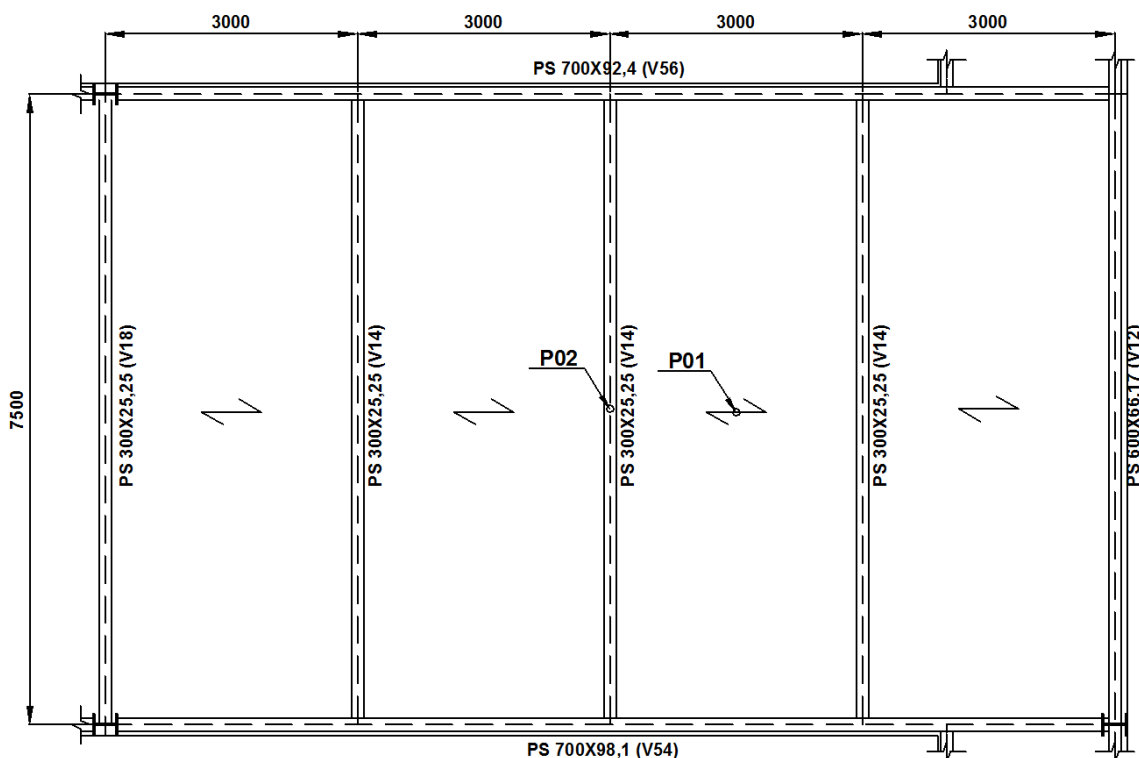


Figura 4-18 – Plano das vigas da região 3 com posicionamento dos acelerômetros.

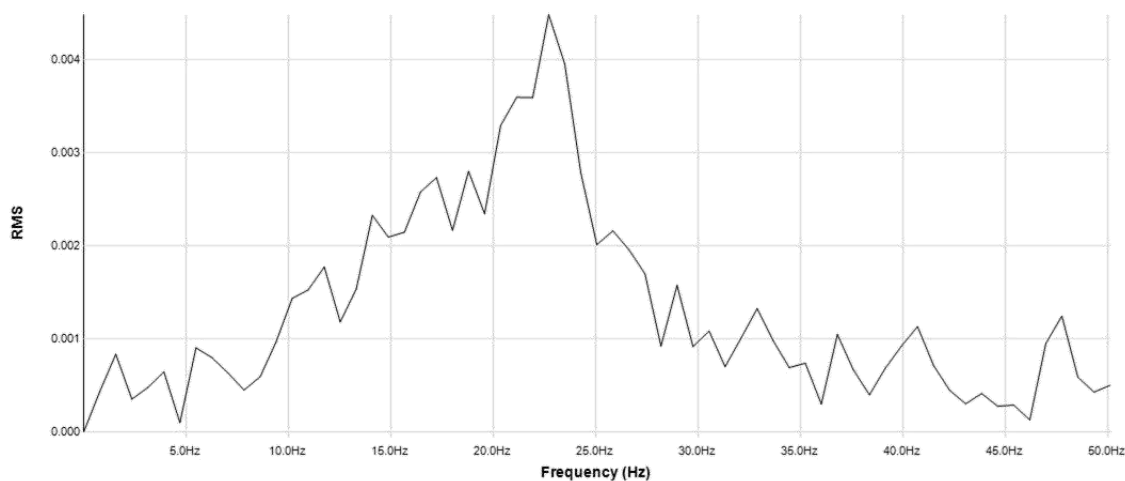
A região 3 é dividida em 5 salas de apoio e um corredor de acesso para o pavilhão de aulas, como pode ser visto nas Figura 4-2 e 4-3. Devido às suas características atípicas em relação ao restante da edificação e o local possuir uma baixa densidade de mobília, a região 3 foi incluída nos estudos dinâmicos da edificação.

4.2.1.3.2 *Ensaio dinâmicos*

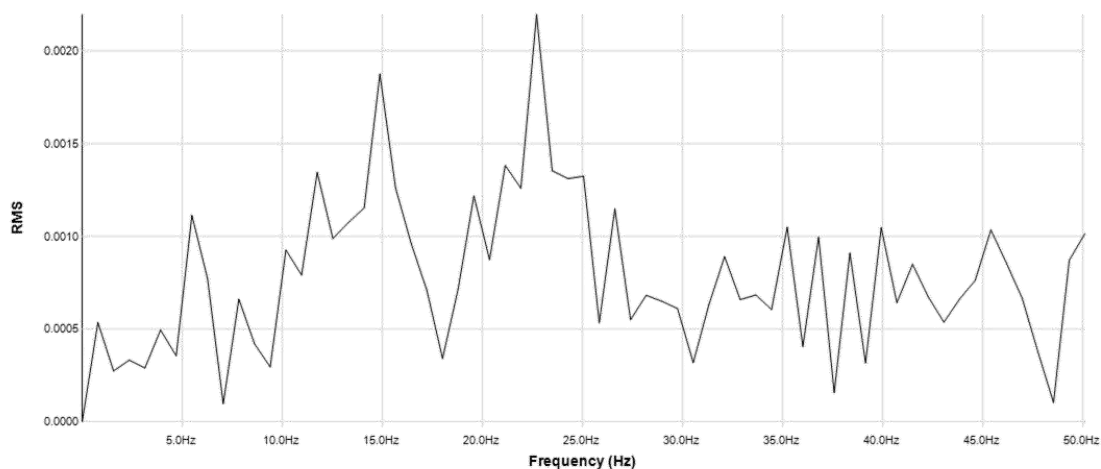
De forma semelhante ao que foi feito na região 2, os acelerômetros foram posicionados no ponto central da baía – P01 (acelerômetro AC 1190) e no centro do vão livre da laje com forma de aço incorporada adjacente à viga secundária central – P02 (acelerômetro AC 1169), conforme mostrado na Figura 4-18. Para a região 3 foram realizados ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test) e ensaios de vibração forçada pelo caminhar de uma única pessoa (walking test), de forma semelhante àqueles realizados na região 2.

4.2.1.3.3 Resultados e discussão

Com auxílio dos ensaios de impacto foi identificada a frequência fundamental da estrutura. Na Figura 4-19 são apresentados os espectros de resposta no domínio da frequência, obtidos com auxílio dos acelerômetros localizados nos pontos P01 e P02, para um impacto do heel-drop test realizado na zona central do sistema de piso.



(a)



(b)

Figura 4-19 – Espectro de resposta no domínio da frequência para os acelerômetros P01 – AC 1190 (a) e P02 - AC 1169 (b) para um heel-drop test na zona central da estrutura.

Por meio dos testes de impacto foram identificadas duas possíveis frequências naturais do sistema de piso: 14,94 Hz e 22,66 Hz, como pode ser visto na Figura 4-19. Nessa figura pode-se perceber que os espectros de respostas no domínio da frequência para os pontos P01 e P02 possuem baixa discretização, o que pode ser atribuído ao curto intervalo do tempo de resposta selecionado no domínio do tempo para determinação das

frequências naturais do sistema, por meio do cálculo da FFT. Esta baixa resolução na frequencial pode ser notada em função dos diversos falsos picos ao longo da curva de frequência (Figura 4-19). Apesar da limitação observada, não foi possível analisar as frequências naturais obtidas por meio dos ensaios de impacto com um intervalo de tempo mais longo, devido à baixa energia de excitação aplicada pelos calcanhares e o alto nível de ruídos provocados por excitações externas. Em função disso, para um baixo intervalo de tempo, as amplitudes de aceleração induzidas pelo impacto dos calcanhares se igualavam com as amplitudes dos ruídos, dificultando a interpretação do espectro de resposta no domínio da frequência para um intervalo de tempo maior.

Observando-se os resultados de impacto para cada acelerômetro, pode-se dizer que o modo de vibração correspondente à frequência fundamental da estrutura (14,94 Hz) apresenta uma amplitude máxima de deslocamentos no ponto P02. Esse modo de vibração possui características semelhantes à terceira configuração de deslocamentos (c) indicada na Figura 4-12, onde a rigidez das lajes é inferior à rigidez das vigas longitudinais e os deslocamentos máximos acontecem na zona central da laje, sendo que as vigas apresentam deslocamentos quase nulos. Para o modo de vibração correspondente à frequência natural de 22,66 Hz, a amplitude máxima de deslocamentos ocorre na zona central do sistema de piso. Esse modo de vibração possui características semelhantes à primeira ou segunda configurações de deslocamentos (a ou b) da Figura 4-12.

O valor da frequência fundamental (14,94 Hz) determinada para o sistema de piso é elevado quando comparado com os outros sistemas de piso ensaiados na mesma edificação. Devido às características dessa região da estrutura, era possível prever que a sua frequência natural seria mais alta do que a de outras regiões.

Com o valor da frequência fundamental de 14,94 Hz pode-se calcular os valores das frequências do filtro passa-banda, para assim estimar o valor do amortecimento para impactos realizados na zona central do sistema de piso. Na Tabela 4-5 são apresentados os valores das frequências para o filtro passa-banda.

Tabela 4-5 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	22,66 Hz	20,19 Hz	25,43 Hz
P02	14,94 Hz	13,31 Hz	16,77 Hz

Com os resultados dos sinais dos ensaios de impacto filtrados foi possível determinar os picos de acelerações e estimar o valor do amortecimento para cada impacto com auxílio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-6 apresenta-se um resumo destes resultados. Os valores de amortecimento determinados a partir da excitação da zona central da baia foram calculados com base nas respostas obtidas nos pontos P01 e P02. Para a excitação provocada próximo à zona de apoio da estrutura, o amortecimento não foi calculado para ambos pontos, uma vez que as amplitudes do ponto P01 e P02 não permitiram a determinação deste parâmetro devido à elevada rigidez do sistema de piso e baixa excitação provocada pelo impacto dos calcanhares nesta zona.

Tabela 4-6 – Valores de amortecimento para a região 3 do PVB (AC 1169 e AC 1190).

Local	Valores
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona central do sistema de piso	Média: 5,83 %
	Amostragem: 25 picos
	Desvio padrão: 0,79 %
	Coef. de Variação: 13,58 %

Conforme mostrado na Tabela 4-6, o valor médio de amortecimento experimental (5,83%) calculado para a região 3 ficou um pouco acima da faixa esperada para sistemas de piso misto de aço e concreto que é de 2% a 5%. Este valor pode ser justificado devido ao fato da região 3 possuir algumas divisórias de alvenaria que são travadas no pavimento superior, o que produz um aumento da rigidez e do amortecimento do sistema.

O método do decremento logarítmico mostrou-se novamente adequado para estimar o amortecimento, tendo apresentado um coeficiente de variação inferior a 14,0% para uma amostragem de 25 picos de aceleração.

A partir da frequência fundamental, pode-se calcular um caminhar crítico de frequência de 2,13 Hz, onde seu 7º harmônico coincide com a frequência fundamental da região 3. De forma análoga à região 2, o alto valor da frequência fundamental da estrutura, quando comparado com a faixa de frequência do caminhar humano de 1,7 a 2,3 Hz, faz com que os esforços induzidos pelo caminhar sejam desprezíveis, não conseguindo excitar a estrutura a ponto de ocorrer o princípio de ressonância e acúmulo de energia de excitação com o aumento das amplitudes de aceleração do sistema de piso.

Na Figura 4-20 é apresentada a resposta no domínio do tempo para o acelerômetro posicionado no ponto P02, para o caminhar de uma pessoa com a frequência de 2,13 Hz.

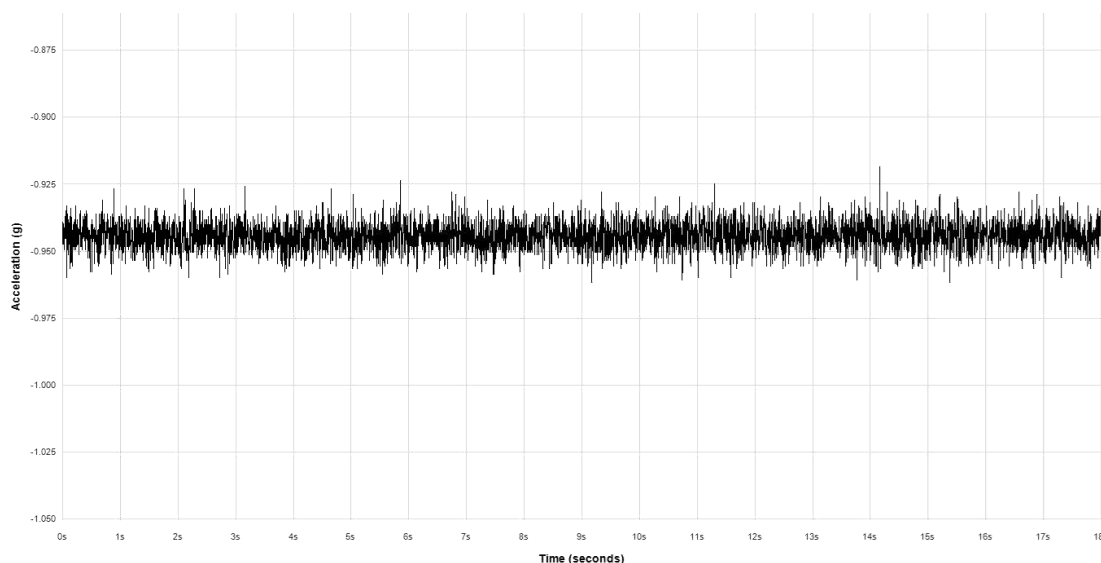


Figura 4-20 - Curva aceleração versus tempo na região 3 do PVB, para uma frequência de caminhar de 2,13 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P02.

Analisando a Figura 4-20 e considerando-se que a relação de $a_{\text{crit.}}/a_{\text{ruído}}$ é menor do que 1,1, pode-se classificar o sistema de piso quanto à excitação da estrutura como imperceptível. Assim sendo, é desnecessário comparar as respostas do ensaio induzido pelo caminhar humano com as recomendações internacionais considerando o conforto humano.

4.2.1.4 Região 4 - Corredor de acesso às salas de aula em balanço

4.2.1.4.1 Descrição da estrutura

A região 4 é composta por pilares de aço de perfis soldados tipo I e um sistema de piso misto de aço e concreto (Figura 4-21). As vigas secundárias possuem comprimento de 1200 mm, sendo a interna constituída por uma viga mista formada por perfil soldado tipo I e a externa por uma treliça mista, que se apoiam nas vigas principais por meio de ligações parafusadas. As vigas principais em balanço, também formadas por perfis tipo I com comprimento de 2500 mm, são ligadas aos pilares de aço por ligações soldadas, de forma a garantir o engastamento. As lajes mistas de aço e concreto são compostas por

forma de aço incorporada com altura de 75 mm, altura total de 150 mm. A interação laje de concreto e viga de aço é garantida através de conectores do tipo pino com cabeça.

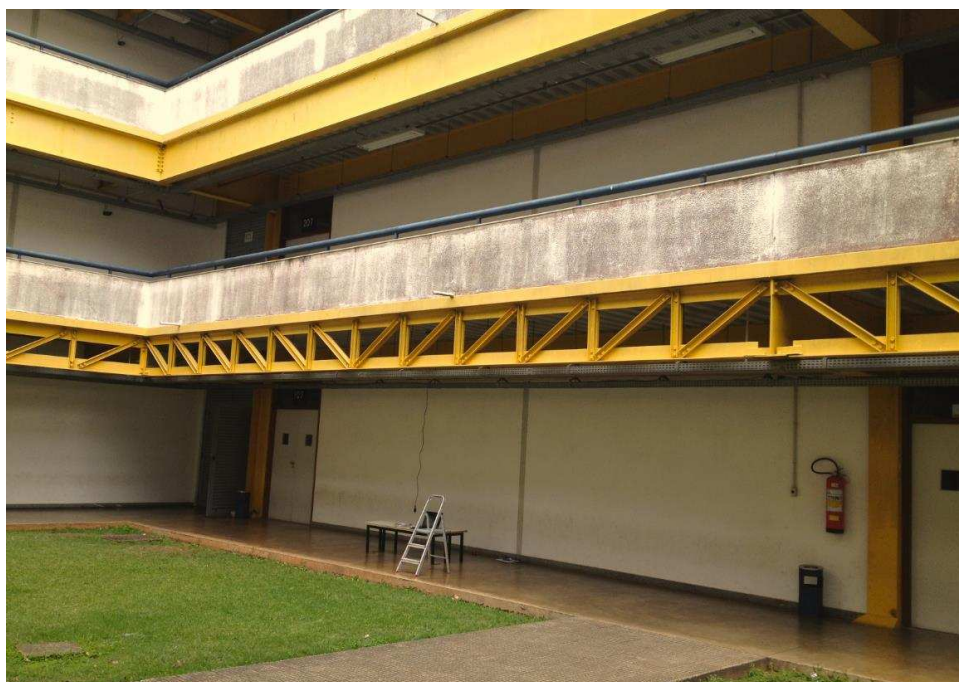


Figura 4-21 – Vista geral da região 4 do PVB.

A viga secundária interna é formada por um perfil PS 700x47,5 e a externa por uma treliça mista de altura constante formada por perfis soldados tipo Tê, sendo dispostas a uma distância de 2500 mm uma da outra. As vigas principais em balanço são formadas por perfis PS 700x74,86. Na Figura 4-22 é apresentado o plano das vigas da região 4 com suas dimensões e posicionamento do acelerômetro.

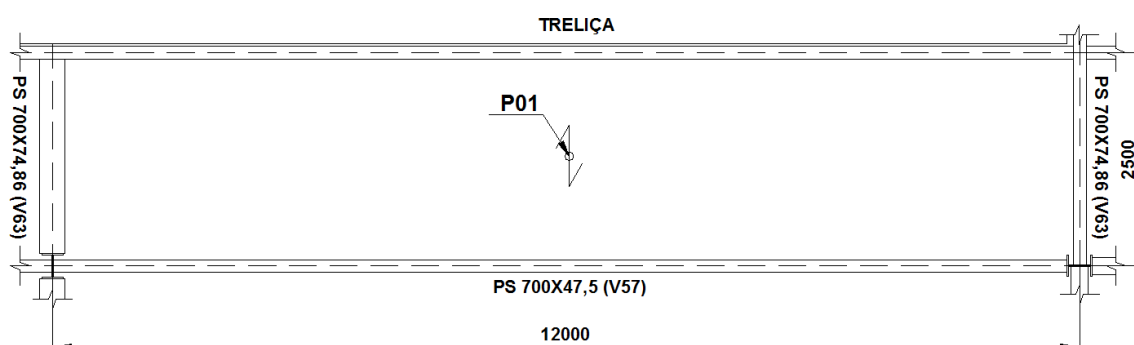


Figura 4-22 – Plano das vigas da região 4 com o posicionamento do acelerômetro.

Esta região é utilizada como acesso às salas de aula e é delimitada externamente por paredes com altura de 1100 mm que servem de guarda corpo. Diante destas

circunstâncias e ao fato do elemento estar em balanço, tal estrutura foi incluída na análise experimental da edificação.

4.2.1.4.2 Ensaio dinâmico

Inicialmente foi realizado um estudo das propriedades geométricas, de materiais e condições de contorno do sistema de piso para definição da zona de maior amplitude de aceleração para o modo de vibração correspondente à frequência fundamental. Devido à elevada rigidez das vigas principais e secundárias foi verificado que o modo de vibração fundamental ocorreria na laje com forma de aço incorporada, como se mostra na Figura 4-23. Em função disso, o acelerômetro foi posicionado no ponto P01 (Figura 4-21), que representa o ponto central da laje.

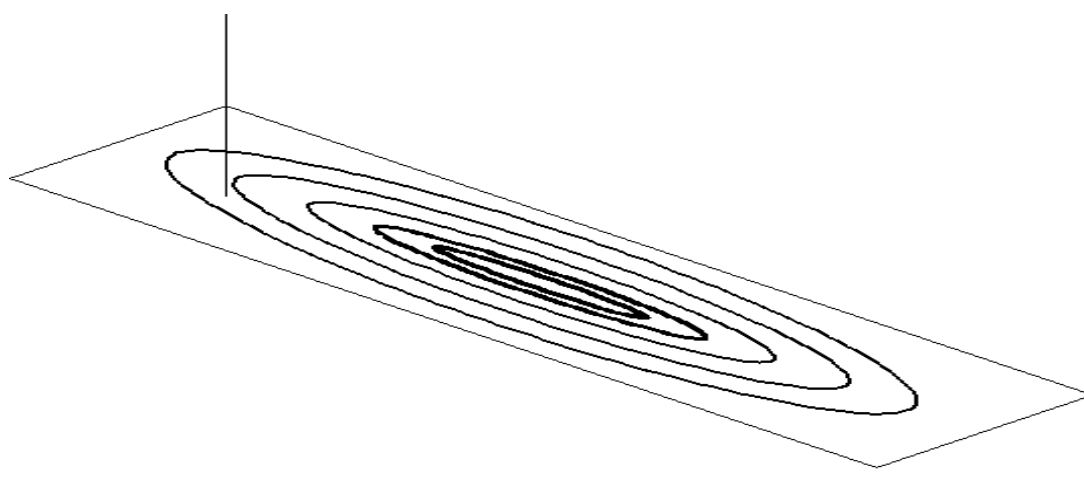


Figura 4-23 – Modo de vibração correspondente à frequência fundamental para a região 4 do PVB.

Os procedimentos para realização da análise experimental para a região 4 foram idênticos àqueles descritos para as regiões 2 e 3, sendo a primeira etapa primeira correspondente aos ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test) e a segunda aos ensaios de vibração forçada pelo caminhar de uma única pessoa (walking test).

4.2.1.4.3 Resultados e discussão

De forma análoga às outras regiões, por meio dos ensaios de impacto dos calcanhares foi identificada a frequência fundamental da estrutura. Na Figura 4-24 é apresentado o espectro de resposta no domínio da frequência obtido com auxílio do

acelerômetro localizado no ponto P01, para um impacto dos calcanhares na zona central do sistema de piso, onde pode-se observar a frequência fundamental de 11,72 Hz.

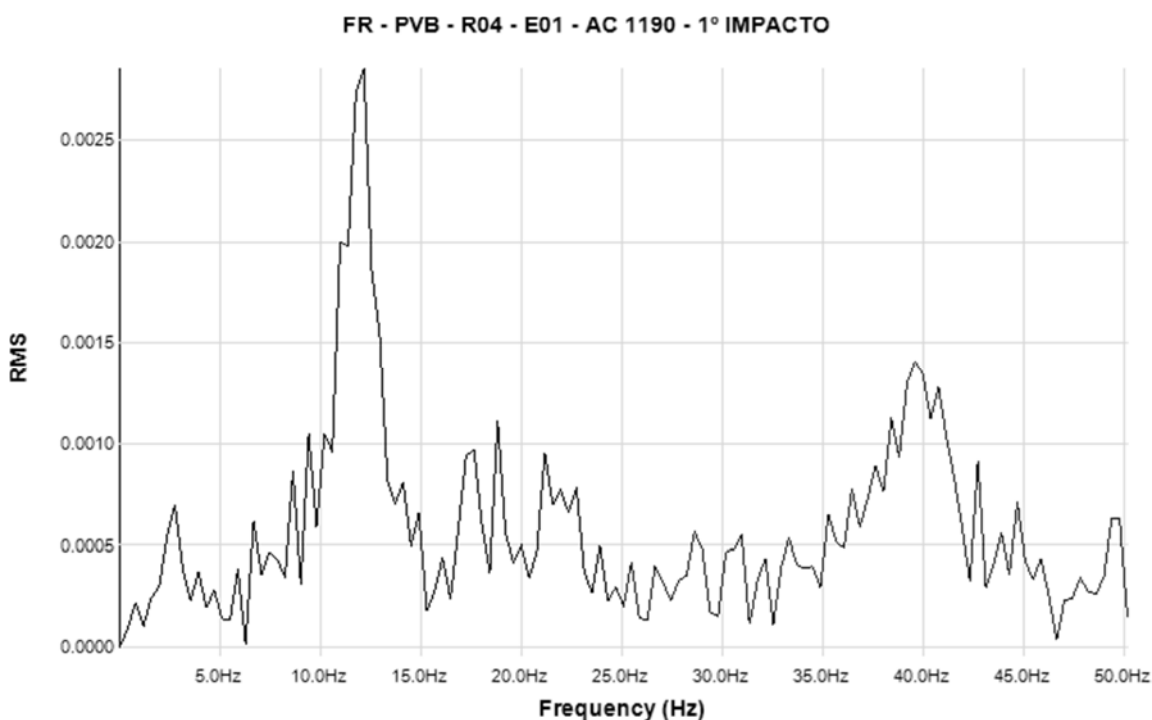


Figura 4-24 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1190 para um *heel-drop test* na zona central da região 4.

Com o valor da frequência fundamental de 11,72 Hz, pode-se calcular os valores das frequências do filtro passa-banda, para assim estimar o valor do amortecimento, tanto para os impactos realizados na zona central do sistema de piso, quanto para os impactos realizados próximos à zona de apoio. Na Tabela 4-7 são apresentados os valores das frequências para o filtro passa-banda.

Tabela 4-7 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	11,72 Hz	10,44 Hz	13,15 Hz

Com os resultados dos sinais dos ensaios de impacto filtrados foi possível determinar o valor do amortecimento para cada impacto por meio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-8 apresenta-se um resumo destes resultados.

Tabela 4-8 – Valores de amortecimento para a região 4 do PVB (AC 1190).

Local	Valores
Amortecimento com impacto dos calcanhares no centro do vão	Média: 3,81 %
	Amostragem: 29 picos
	Desvio padrão: 0,31 %
	Coef. de Variação: 8,21 %
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona de apoio do vão	Média: 3,23 %
	Amostragem: 16 picos
	Desvio padrão: 0,46 %
	Coef. de Variação: 14,4 %

De forma similar ao que foi observado anteriormente para as regiões 1 e 2, os valores de amortecimento calculados com impactos na zona central da região 4 foram cerca de 17,96% maiores do que os calculados com impactos produzidos na zona de apoio.

Conforme indicado na Tabela 4-8, os valores do amortecimento experimental calculados se situam na faixa usual para sistemas de piso misto de aço e concreto que é de 2% a 5%, sendo que o valor de 3,23% condiz com as características do local.

O método do decremento logarítmico mostrou-se novamente adequado para estimar o amortecimento, tendo apresentado um coeficiente de variação inferior a 15,0%.

A partir da frequência fundamental, pode-se calcular um caminhar crítico de frequência de 2,34 Hz, onde seu 5º harmônico coincide com a frequência fundamental da região 4. De forma análoga às regiões 2 e 3, o teste de caminhada não foi capaz de excitar a estrutura a ponto de ocorrer o princípio de ressonância e acúmulo de energia de excitação com o aumento das amplitudes de aceleração do sistema de piso.

Com os resultados obtidos por meio da análise experimental de vibrações nas quatro regiões selecionadas no Pavilhão de Aulas II - PVB, pode-se concluir que os sistemas de piso do segundo e terceiro pavimentos da edificação apresentam valores de frequência fundamental relativamente altos. Deste modo, dificilmente as vibrações induzidas pelo caminhar humano são capazes de gerar algum desconforto aos usuários da edificação. No entanto, esta afirmação não é válida para o sistema de piso da rampa de acesso (região 1), onde os valores de aceleração obtidos nos ensaios experimentais são maiores que os limites recomendados pelos critérios internacionais considerando o

conforto humano às vibrações, podendo assim gerar desconforto aos usuários. Tal fato mostra a importância da análise de vibrações nos sistemas de piso misto em aço e concreto, principalmente naqueles sistemas considerados leves, com grandes vãos livres e baixa rigidez.

4.3 Estrutura II – Rampa de acesso do edifício das quadras poliesportivas

4.3.1 Descrição da estrutura

O presente estudo refere-se a uma rampa de acesso de um edifício para fins esportivos, localizado no Campus de Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV), conforme apresentado nas Figuras 4-25 e 4-26. A rampa é composta por quatro lances inclinados e quatro patamares.



Figura 4-25 – Aspecto geral da maquete do edifício para fins esportivos, no qual se localiza a rampa de acesso.



Figura 4-26 - Vista geral da rampa de acesso.

A rampa é composta por colunas tubulares de aço e um sistema de piso misto de aço e concreto. As vigas de bordo são vigas mistas formadas por perfis laminados tipo I, que se apoiam sobre vigas em balanço por meio de ligações parafusadas. As vigas em balanço, também formadas por perfis laminados tipo I, são ligadas às colunas tubulares por meio de ligação soldada e seu engastamento é garantido com a utilização de mísulas. As lajes maciças de concreto, com largura de 2103 mm e 125 mm de espessura, foram moldadas in-loco, com base inferior plana. A interação entre a laje e as vigas é garantida através de conectores tipo pino com cabeça. Nas Figuras 4-27 e 4-28 se apresentam o plano das vigas e a vista frontal da rampa com as dimensões da estrutura e os posicionamentos dos acelerômetros.

A rampa é constituída por quatro vãos contínuos, com dois vãos principais de 10400 mm e patamares. As vigas de bordo são formadas por perfis laminados tipo W 410x60, em aço ASTM A-572 grau 50, e foram dispostas a uma distância de 1950 mm entre si. As vigas em balanço são formadas por perfis laminados tipo W 530x72 e W 520x82, em aço ASTM A-572 grau 50. As colunas são contínuas, com comprimento máximo de 12000 mm, compostas por perfis tubulares TB 255,6x9,0 em aço ASTM A-572 grau 50.

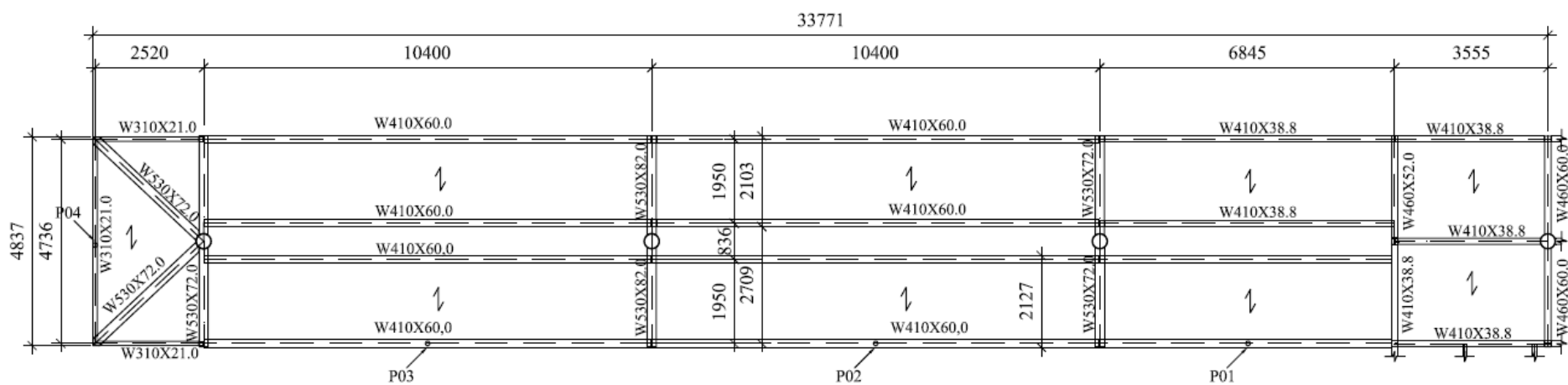


Figura 4-27 – Plano das vigas do nível +2800 até +6400 para a rampa de acesso com o posicionamento dos acelerômetros.

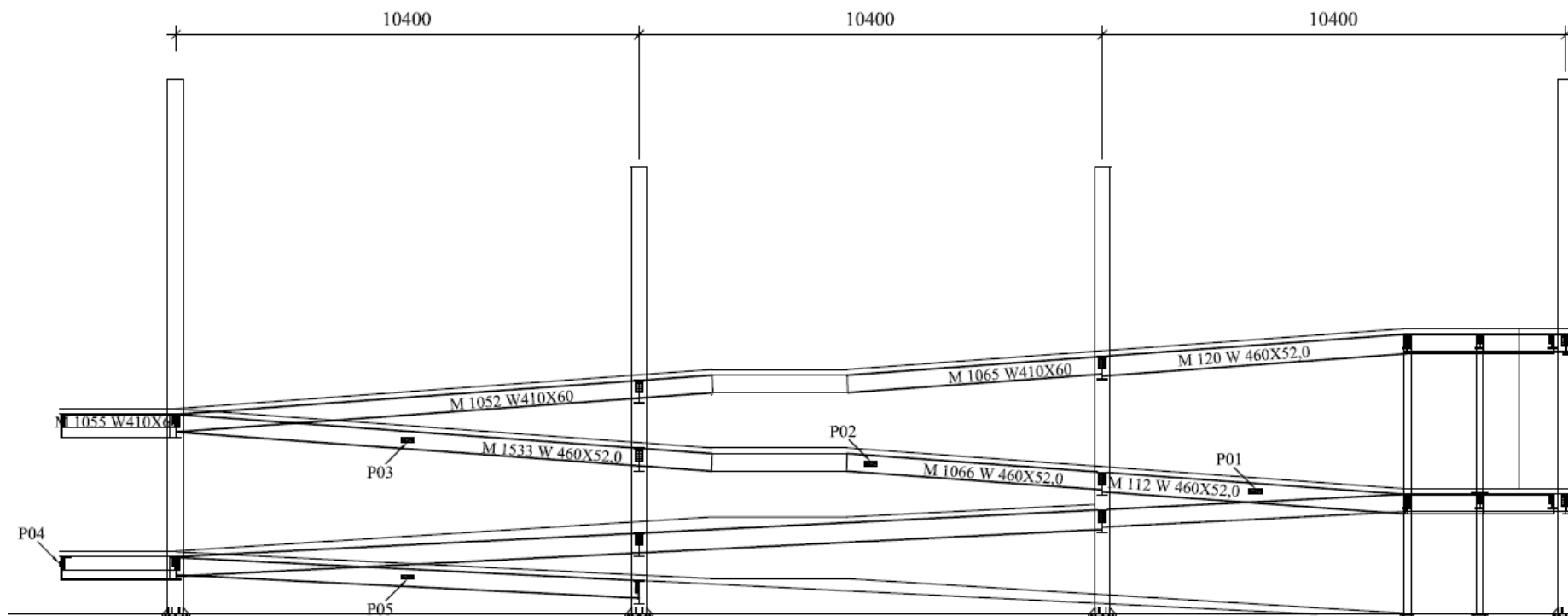


Figura 4-28 – Vista Frontal da rampa de acesso.

4.3.2 Ensaios dinâmicos

Inicialmente foram definidos os pontos de maior amplitude para os principais modos de vibração e, em seguida, os acelerômetros foram instalados nestas posições. Os acelerômetros foram fixados nas vigas de bordo externas da rampa, com intuito de se obter as amplitudes máximas da aceleração o modo de vibração correspondente à frequência fundamental da estrutura. Por se tratar de elementos biapoiados, os acelerômetros foram posicionados no centro dos vãos destas vigas. De forma análoga ao que foi feito para a região 1 do Pavilhão de Aulas II - PVB, o eixo y do acelerômetro foi adotado como o eixo principal para medir as vibrações verticais da estrutura. No total foram definidos 5 pontos de monitoramento para a realização dos ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test) e vibração forçada pelo caminhar humano, como pode ser visto nas Figuras 4-27 e 4-28.

Durante os ensaios, um dos acelerômetros permaneceu sempre no mesmo ponto (P02), como referência, enquanto que o outro sensor foi movido sucessivamente para as demais posições de monitoramento.



Figura 4-29 – Posicionamento dos acelerômetros nos pontos P02 e P03 da rampa de acesso.

A análise experimental foi dividida em 3 etapas, sendo a primeira correspondente aos ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test) para obtenção das características modais da estrutura, a segunda aos ensaios de vibração forçada pelo teste de caminhada (walking test) e a terceira aos ensaios de multidão. Esta última etapa foi considerada devido às características de serviço da estrutura, já que a rampa é utilizada como acesso principal às quadras poliesportivas cobertas do Departamento de Educação Física da UFV. Desde modo, em dias de eventos esportivos com grande público podem ocorrer situações em que o ensaio de caminhar humano com uma única pessoa não representa de forma realista as vibrações induzidas pelas atividades humanas.

A. Ensaios de impacto e ensaios de vibração forçada

Os ensaios de impacto e de vibração forçada foram realizados de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3, sendo que para os ensaios de vibração forçada realizou-se também o caminhar simultâneo de duas e três pessoas, buscando-se simular de forma mais realista as possíveis situações de serviço da estrutura. Na Tabela 4-9 apresentam-se as características dos ensaios de vibração forçada realizados.

Tabela 4-9 – Características dos ensaios de vibração forçada.

Ponto	Acelerômetro	Característica	Frequência de excitação
P01	AC 1169	Uma pessoa	1,66 Hz
		Uma pessoa	2,22 HZ
P02	AC 1190	Uma pessoa	1,66 Hz
		Uma pessoa	1,76 Hz
		Uma pessoa	2,22 Hz
		Duas pessoas	1,66 Hz
		Duas pessoas	2,22 Hz
P03	AC 1169	Três pessoas	2,22 Hz
		Uma pessoa	1,76 Hz
		Uma pessoa	2,34 Hz
		Duas pessoas	1,66 Hz
		Duas pessoas	2,22 Hz
		Três pessoas	1,66 Hz
		Três pessoas	2,22 Hz

B. Ensaios de multidão

Devido à rampa se encontrar instalada em um local de livre acesso ao público e proporcionar uma visão privilegiada às quadras poliesportivas da edificação, acredita-se que a aglomeração de pessoas é algo provável de acontecer. Em função disso, decidiu-se alterar o procedimento dos ensaios de vibração forçada, aumentando-se o número de pessoas para indução das vibrações. Na Tabela 4-10 apresentam-se as características dos ensaios de multidão realizados.

Tabela 4-10 – Características dos ensaios de multidão.

Ponto	Característica	Organização do Voluntários
P02	Teste de Utilização	Caminhar: frequência aleatória
	Teste de Utilização	Caminhar aglomerado - frequência aleatória
	Teste de Utilização	Caminhar: 3 duplas a 1,69 Hz
	Teste de Utilização	Caminhar: 3 duplas a 2,26 Hz
	Simulação de Torcida	Voluntários enfileirados na zona do ponto P02 - pulos aleatórios
	Simulação de Torcida	Voluntários enfileirados na zona do ponto P02 - 1 pulo simultâneo
	Simulação de Torcida	Voluntários enfileirados na zona do ponto P02 - "Ola"

No total, 13 voluntários participaram dos ensaios de multidão, que foram monitorados com auxílio de um acelerômetro posicionado no ponto P02. Este ponto foi o único analisado, devido ao fato que esta etapa ocorreu posteriormente ao processamento dos resultados dos ensaios de caminhar de uma única pessoa (walking test), onde foi constatado que o ponto P02 é a zona crítica da rampa de acesso, com maiores amplitudes de aceleração / deslocamentos do sistema de piso.

No primeiro ensaio de multidão solicitou-se que os voluntários percorressem a rampa de forma aleatória, sem controle da frequência do caminhar (Figura 4-30), realizando-se duas subidas e duas descidas, assim como nos ensaios de caminhar realizados pelo voluntário 1. O segundo ensaio de multidão foi uma variação do primeiro, realizando-se um caminhar aglomerado como mostrado na Figura 4-31. Em seguida o terceiro e o quarto ensaios de multidão foram realizados com o caminhar de três duplas a uma frequência controlada de 1,69 Hz e de 2,26 Hz respectivamente.



Figura 4-30- Primeiro ensaio de multidão com caminhar aleatório.



Figura 4-31 – Segundo ensaio de multidão com caminhar aglomerado.

Após a realização dos quatro primeiros ensaios de multidão, foram efetuados mais três ensaios para simular o comportamento de uma torcida, uma vez que a rampa poderá ser utilizada como arquibancada, devido à visão que oferece. Foram realizadas as simulações de comemoração (Figura 4-32), com pulos aleatórios dos voluntários, de “grito de guerra” (Figura 4-33), com pulos simultâneos de todos voluntários e, por último, de grito de “Ola” (Figura 4-34), com pulos subsequentes.



Figura 4-32 – Quinto ensaio de multidão com pulos aleatórios de voluntários na zona do Ponto P02.



Figura 4-33 – Sexto ensaio de multidão com pulo simultâneo de voluntários na zona do Ponto P02.



Figura 4-34 – Sétimo ensaio de multidão com pulos subsequentes de voluntários na zona do Ponto P02.

4.3.3 Resultados e discussão

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de vibração realizados na rampa de acesso. Os resultados foram divididos em frequências naturais, amortecimento, teste de caminhada e ensaios de multidão.

A. Frequências naturais

Com auxílio dos ensaios de impacto dos calcanhares foram identificadas as frequências naturais da estrutura. Da Figura 4-35 à Figura 4-39 são apresentados os espectros de resposta no domínio da frequência, obtidos com auxílio dos acelerômetros localizados nos pontos P01 a P05, para um impacto do heel-drop test realizado em cada zona de monitoramento.

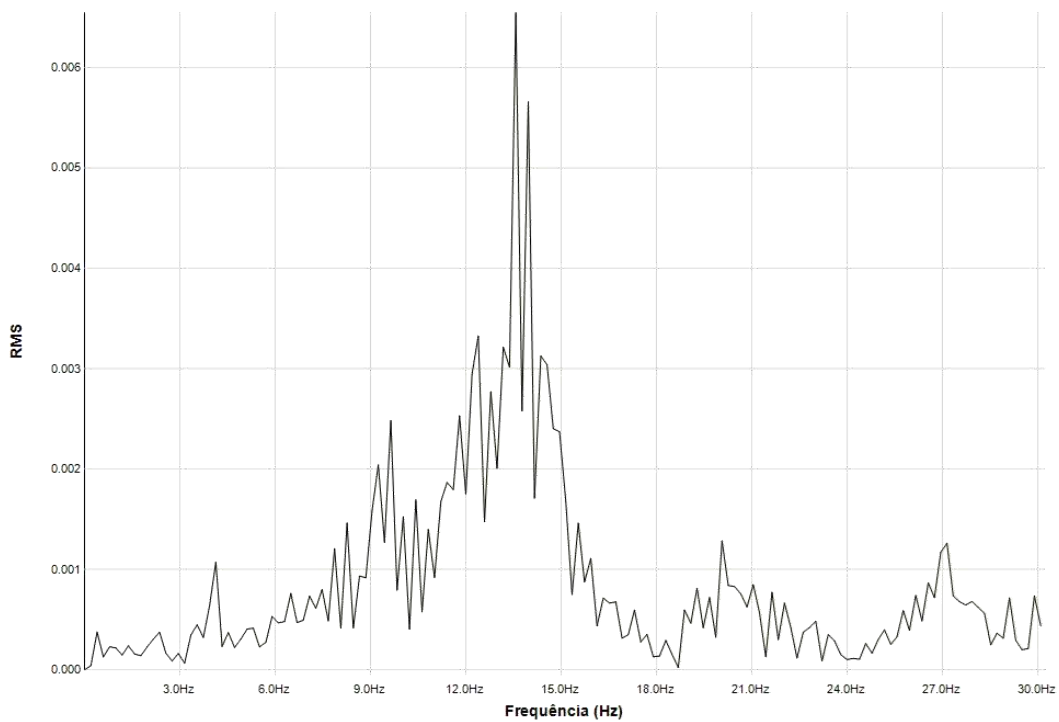


Figura 4-35- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P01 da rampa de acesso.

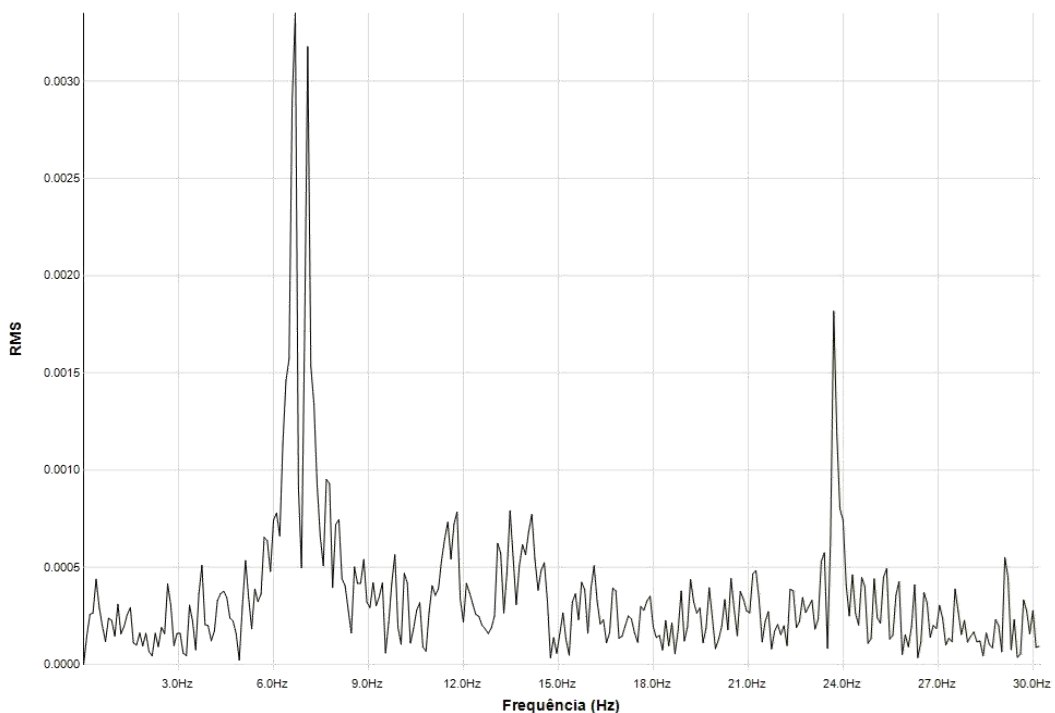


Figura 4-36- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P02 da rampa de acesso.

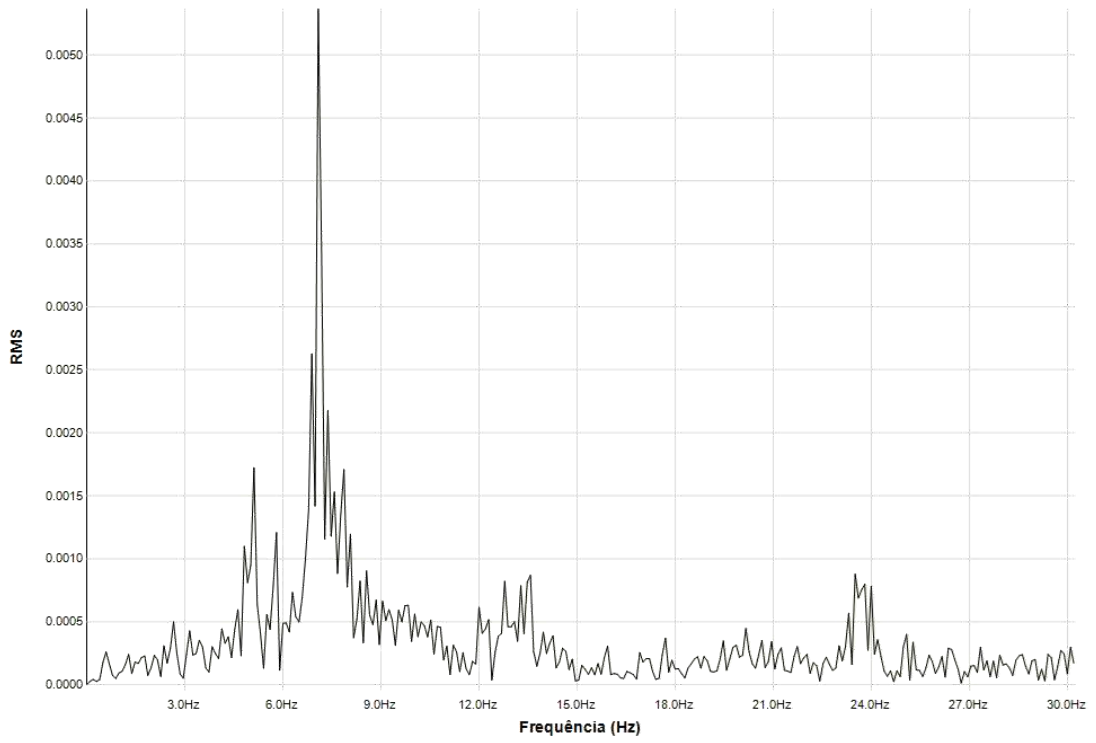


Figura 4-37- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P03 da rampa de acesso.

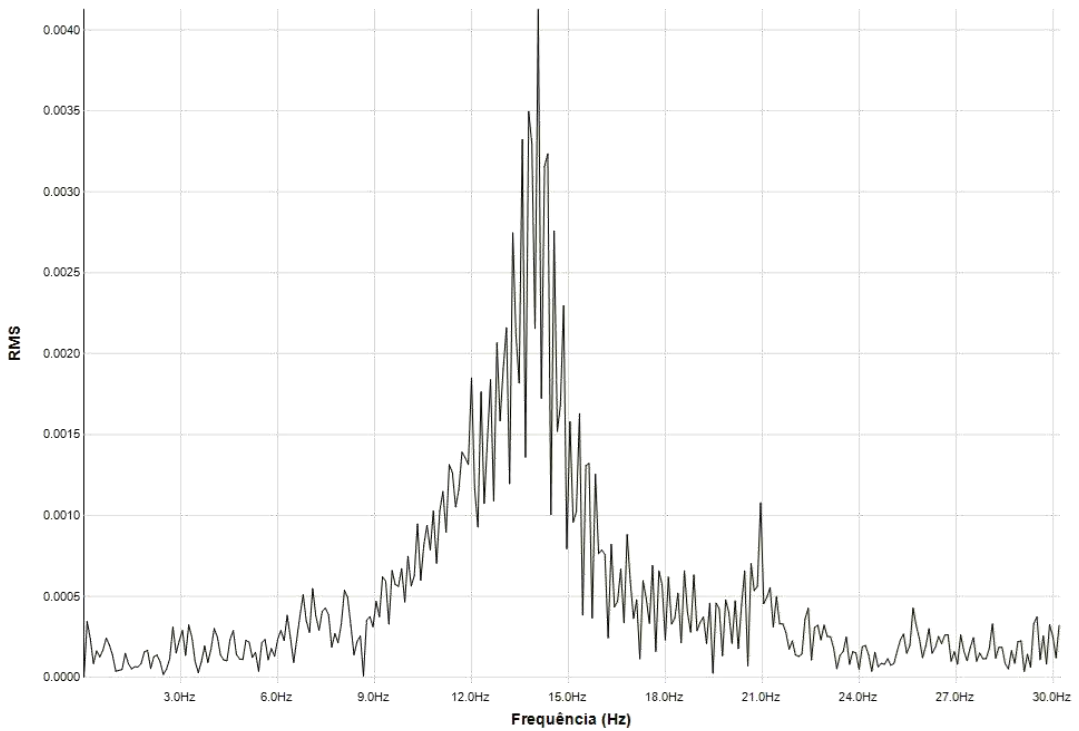


Figura 4-38- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P04 da rampa de acesso.

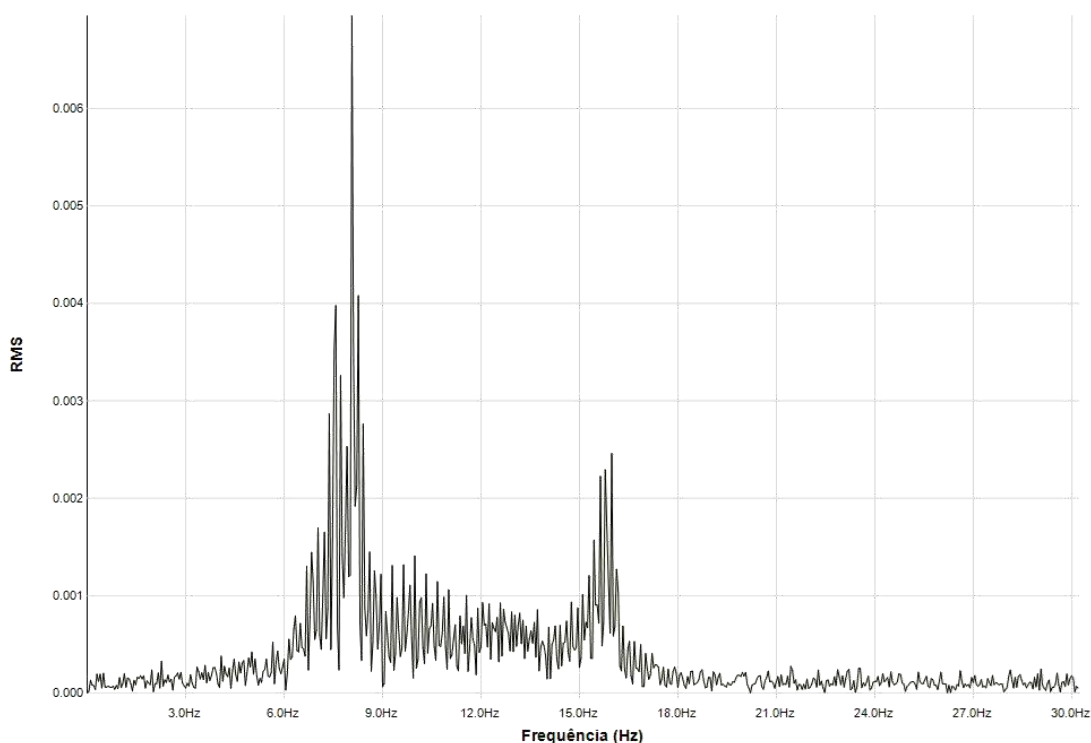


Figura 4-39- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro no ponto P05 da rampa de acesso.

Por meio dos ensaios de impacto foi possível identificar algumas frequências naturais da estrutura, onde as mais baixas são: 6,64 Hz; 7,03 Hz; 8,01 Hz; 13,83 Hz e 14,06 Hz.

Com base nas respostas dos ensaios de impacto no domínio da frequência (Figuras 4-35 a 4-39) pode-se observar a presença de várias frequências naturais com valores muito próximos uns dos outros. Este fato pode ser explicado devido à complexibilidade da estrutura, que possui vários modos de vibração distintos como: longitudinais, transversais, torsionais, entre outros. A excitação em um determinado local tende a excitar mais um modo de vibração do que outro. Isto pode ser visto comparando-se os resultados das Figuras 4-35 a 4-36, onde o impacto no ponto P01 excita mais a frequência natural de 13,83 Hz e no ponto P02 a frequência natural de 6,64 Hz.

B. Taxas de amortecimento

Com base nas frequências naturais identificadas para cada ponto de monitoramento, foram calculados os valores das frequências dos filtros passa-banda cujas características são apresentadas na Tabela 4-11.

Tabela 4-11 – Parâmetros para os filtros passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	13,83	12,32	15,52
P02	6,64	5,92	7,45
P03	7,03	6,26	7,89
P04	14,06	12,53	15,78
P05	8,01	7,14	8,99

Com os resultados dos sinais dos ensaios de impacto filtrados foi possível determinar os picos de acelerações e estimar o valor do amortecimento para cada impacto por meio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-4 apresenta-se um resumo destes resultados.

Tabela 4-12- Valores de amortecimento para a rampa de acesso (AC 1169 e AC 1190).

Ponto	Local do impacto no vão	f_n (Hz)	Amortecimento (%)	Nº de picos	Coef. Variação (%)
P01	Centro	13,83	4,59	5	10,8
	Apoio	13,67	6,43	5	12,7
P02	Centro	6,64	3,51	10	7,8
	Apoio	6,64	4,23	10	22,1
P03	Centro	7,03	2,28	25	24,1
	Apoio	7,04	3,54	8	8,7
P04	Centro	8,56	4,32	25	13,4
P05	Centro	8,57	2,96	25	21,9

O amortecimento não é uma característica global para toda estrutura, variando em função das propriedades geométricas e mecânicas dos materiais da região estudada. O valor do amortecimento determinado por meio do método do decremento logarítmico pode ser impreciso quando a magnitude da excitação causada à estrutura for muito baixa, não sendo suficiente para excitá-la por completo.

Como no caso da Estrutura I, era esperado que os valores de amortecimento com o impacto dos calcanhares realizado na zona do apoio fossem menores quando comparados com os valores obtidos com impactos realizados no centro, mas isso não ocorreu. Isto pode ter acontecido devido à grande rigidez da zona do apoio, que possui mísulas na zona de engastamento das vigas transversais. Assim, com o impacto dos calcanhares, não foi possível excitar toda a estrutura para a obtenção de respostas

representativas para o cálculo do amortecimento pelo método do decremento logarítmico. Apesar disso, pode-se observar que os valores do amortecimento para o impacto na zona central estão inseridos na faixa usual esperada para esse parâmetro, que é de 2% a 5%.

A partir dos resultados da Tabela 4-12 pode-se observar também que nos pontos P03 e P05, que representam os trechos de maiores vãos livres (10400 mm), o valor amortecimento calculado para o impacto no centro do vão foi inferior a 3%, que são valores esperados para passarelas com grandes vãos e pisos “desnudos”. O ponto P02 também está localizado em um trecho com vão livre de 10400 mm, para o qual o valor do amortecimento foi de 3,51%, o que pode ser justificado pela existência de um enchimento de concreto para a formação de um patamar que não tinha sido previsto inicialmente (Figura 4-40), o que afetou a rigidez do trecho e a sua taxa de amortecimento.



Figura 4-40 - Patamar executado com enchimento de concreto na zona do ponto P02 da rampa de acesso.

Diante das observações anteriores, pode-se admitir que o valor global de amortecimento experimental para toda a estrutura é de 2,92%, que representa o valor médio entre os pontos P02, P03 e P05.

Tomando-se por base os coeficientes de variação apresentados na Tabela 4-12, pode-se afirmar que os valores de amortecimento apresentaram uma precisão média,

mostrando novamente uma adequação do método do decremento logarítmico do para estimar o amortecimento.

C. Testes de caminhada (walking test)

Os testes de caminhada variaram tanto com relação ao número de voluntários andando sobre o trecho da rampa, quanto às frequências de excitação. Os resultados foram classificados, observando a amplitude da aceleração em função do tempo e a relação $a_{crit.}/a_{ruído}$, caracterizando a excitação observada de acordo com as categorias propostas no item 3.5.

Na Tabela 4-13 é apresentado o resumo dos resultados para os testes de caminhada para uma, duas e três pessoas para os pontos P01, P02 e P03. Os pontos P04 e P05 não foram considerados nos ensaios de vibração forçada, por estarem em zonas de menor amplitude de deslocamentos quando comparados com os demais pontos.

Tabela 4-13- Resultados dos testes de caminhada para uma, duas e três pessoas na rampa de acesso.

Ponto	Acelerômetro	Caraterística	Freq. de Excitação	$a_{crit.}/a_{ruído}$	Classificação	Aceleração em r.m.s. (%g)
P01	AC 1169	Uma Pessoa	1,66 Hz	1,12	Perceptível	2,04
		Uma Pessoa	2,22 Hz	1,04	Imperceptível	1,90
P02	AC1190	Uma Pessoa	1,66 Hz	1,16	Perceptível	2,12
		Uma Pessoa	1,79 Hz	1,08	Imperceptível	1,98
		Uma Pessoa	2,22 Hz	1,34	Perceptível	2,45
		Duas Pessoas	1,66 Hz	1,61	Clara	2,93
		Duas Pessoas	2,22 Hz	2,40	Evidente	4,37
		Três Pessoas	2,22 Hz	2,78	Evidente	5,07
P03	AC1169	Uma Pessoa	1,76 Hz	1,23	Perceptível	2,25
		Uma Pessoa	2,34 Hz	1,54	Clara	2,82
		Duas Pessoas	1,66 Hz	2,04	Evidente	3,73
		Duas Pessoas	2,22 Hz	1,61	Clara	2,93
		Três Pessoas	1,66 Hz	1,01	Imperceptível	1,83
		Três Pessoas	2,22 Hz	2,42	Evidente	4,42

Como pode ser visto na Tabela 4-13, no ponto P01 as frequências do caminhar humano de 1,66 Hz e 2,22 Hz excitaram a estrutura de modo a causar amplitudes de acelerações inferiores quando comparadas às amplitudes encontradas nos outros pontos monitorados. Este fenômeno já era esperado, a partir da análise dos resultados do

heel-drop test. Isto se deve ao fato deste ponto estar localizado em um trecho de maior rigidez, devido ao menor vão livre a ser vencido e à ligação de forma contínua com o patamar adjacente, como pode ser observado na Figura 4-41.

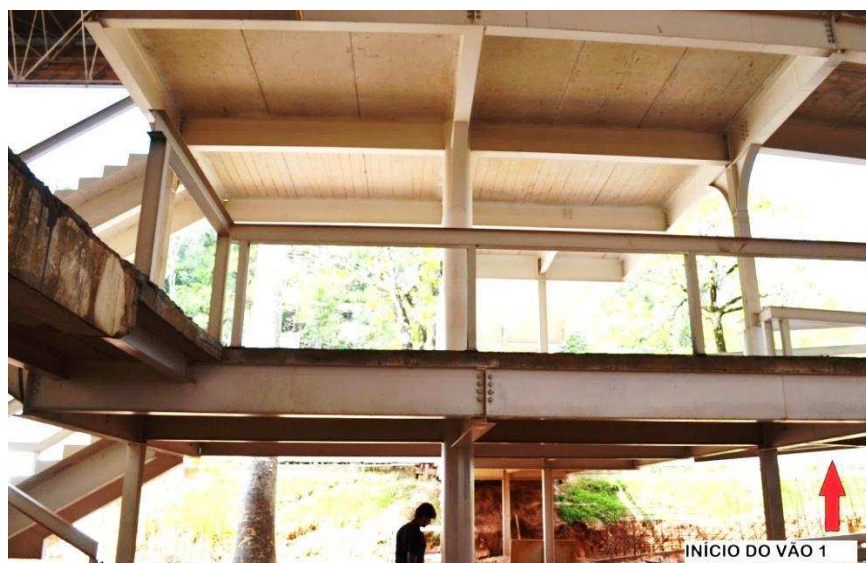


Figura 4-41- Patamar adjacente ao primeiro vão da rampa de acesso.

Os pontos P02 e P03 se encontram em trechos da rampa que possuem características semelhantes como o vão a ser vencido, os perfis de aço e as condições de vinculação. Dessa forma, em virtude da complexidade geométrica da estrutura, vinculações e a presença de mísulas, não foi possível definir um único trecho crítico.

Quando foram planejados os ensaios de vibração forçada, buscou-se caminhar em frequências cujos harmônicos pudessem excitar a frequência fundamental da estrutura. Dessa forma, uma mesma frequência de caminhar proporcionou uma maior excitação num determinado trecho do que em outro. Os 3º e 4º harmônicos das frequências de caminhar de 2,22 Hz e 1,66 Hz respectivamente excitaram a frequência fundamental de 6,64 Hz no ponto P02, identificada durante os ensaios de impacto dos calcanhares. De forma semelhante, os 3º e 4º harmônicos das frequências de caminhar de 2,34 Hz e 1,76 Hz respectivamente excitaram a frequência fundamental de 7,03 Hz no ponto P03. A ocorrência desses harmônicos pode ser notada nos espectros de respostas no domínio da frequência dos ensaios de vibração forçada, assim como pode ser visto no teste de caminhada de duas pessoas (Figura 4-42), com frequência de caminhar de 2,22 Hz.

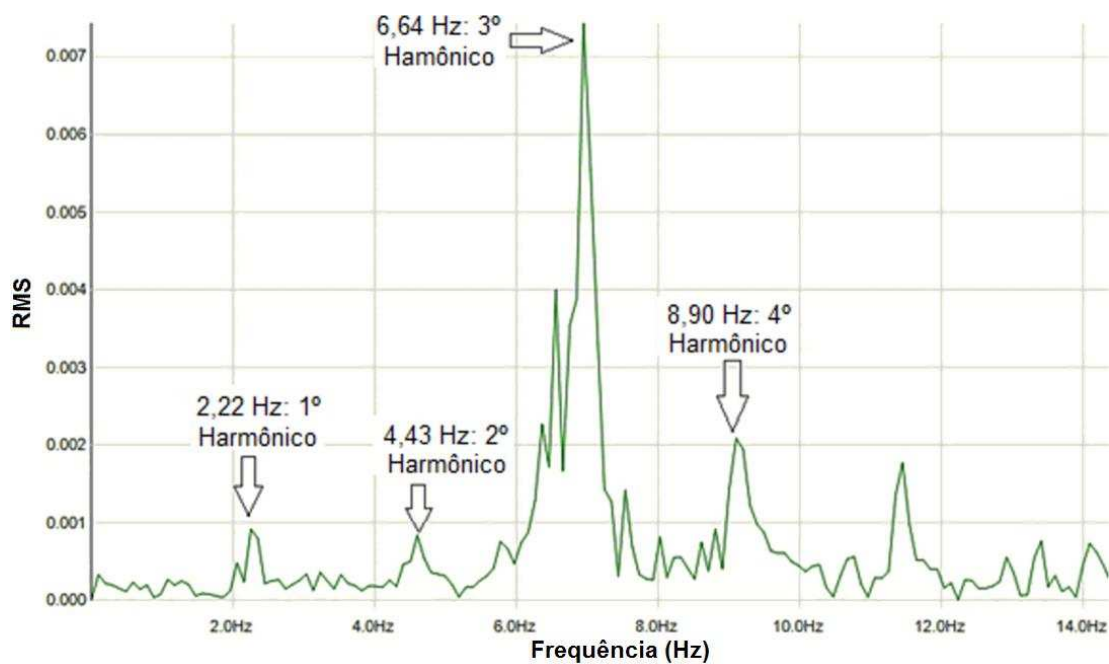


Figura 4-42 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 – AC 1190 para um teste de caminhada de duas pessoas com frequência de caminhar de 2,22 Hz na rampa de acesso.

Os valores de aceleração em r.m.s. são apresentados na Tabela 4-14 e são comparados com alguns critérios internacionais que estabelecem limites de aceitação considerando o conforto humano às vibrações, conforme apresentado na Figura 4-43.

Tabela 4-14 – Valores de aceleração em r.m.s. para diferentes números de pessoas nos testes de caminhada (walking test).

Número de Pessoas	Aceleração em r.m.s. (%g)
Uma Pessoa	2,82
Duas Pessoas	4,37
Três Pessoas	5,07

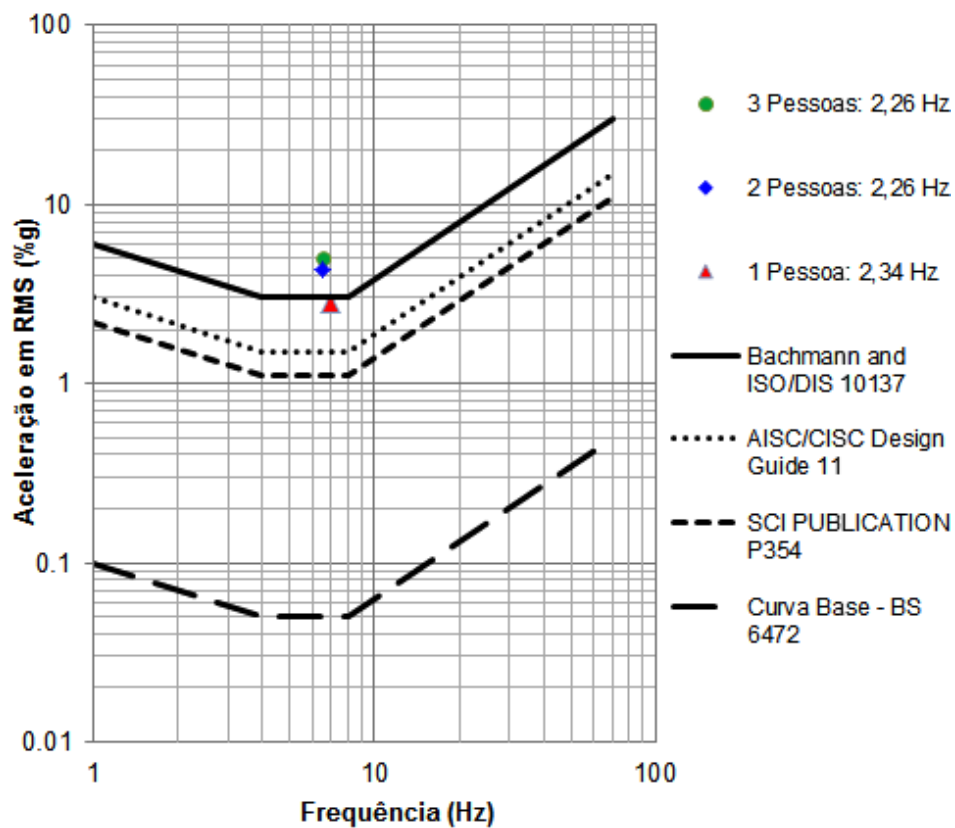


Figura 4-43- Gráfico comparativo dos valores críticos de acelerações dos ensaios experimentais e critérios de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para rampas internas.

Pode-se observar que o caminhar de frequência de 2,34 Hz de uma pessoa causou uma aceleração em r.m.s. de 2,82% g, valor este maior do que os limites recomendados tanto para as curvas da SCI PUBLICATION P354, como para o AISC/CISC Design Guide 11 para passarelas internas em edifícios com acesso ao público. A aceleração para o caminhar de frequência de 2,34 Hz de uma pessoa foi inferior ao limite recomendando por Bachmann et al. (1995) e pela ISO 10137. Porém, quando se compara as acelerações em r.m.s. para o caminhar de frequência de 2,26 Hz de duas ou três pessoas (4,37% g e 5,07% g, respectivamente) com os mesmos limites, em todos os casos as amplitudes de aceleração induzidas pelo caminhar humano foram superiores aos limites estabelecidos pelos critérios internacionais considerando o conforto humano.

Em função dos resultados dos testes de caminhada, pode-se afirmar que as vibrações da rampa de acesso são perceptíveis aos seus usuários, podendo gerar desconforto. Também pode-se observar que à medida que se aumentou o número de voluntários durante os testes de caminhada, aumentaram as amplitudes das acelerações induzidas no sistema de piso. Diante disso, nota-se que a realização de ensaios de

multidão é de grande importância para representar de forma realista as vibrações induzidas pelas atividades humanas nas situações de serviço da estrutura.

D. Ensaio de Multidão

Na Tabela 4-15 é apresentado um resumo dos resultados para os ensaios de multidão monitorados pelo o acelerômetro posicionado no ponto P02.

Tabela 4-15- Resultados dos ensaios de multidão.

Ponto	Característica	Organização do Voluntários	Aceleração em r.m.s. (%g)
P02	Teste de Utilização	Caminhar: frequência aleatória	3,71
	Teste de Utilização	Caminhar aglomerado - frequência aleatória	4,27
	Teste de Utilização	Caminhar: 3 duplas a 1,69 Hz	3,78
	Teste de Utilização	Caminhar: 3 duplas a 2,26 Hz	5,37
	Simulação de Torcida	Voluntários enfileirados na zona do ponto P02 - pulos aleatórios	31,09
	Simulação de Torcida	Voluntários enfileirados na zona do ponto P02 – 1 pulo simultâneo	22,51
	Simulação de Torcida	Voluntários enfileirados na zona do ponto P02 - "Ola"	28,83

Ao se observar os resultados para o primeiro ensaio de multidão (Figura 4-44), pode-se constatar que apesar de os voluntários caminharem em frequências diferentes e representarem um sistema de elevada massa modal, houve acúmulo de energia durante a realização dos ensaios e as acelerações em r.m.s de 3,71% g detectadas pelo acelerômetro posicionado no ponto P02 (Tabela 4-15) são maiores que os limites estabelecidos pelos critérios internacionais para passarelas internas considerando o conforto humano (Figura 4-46).

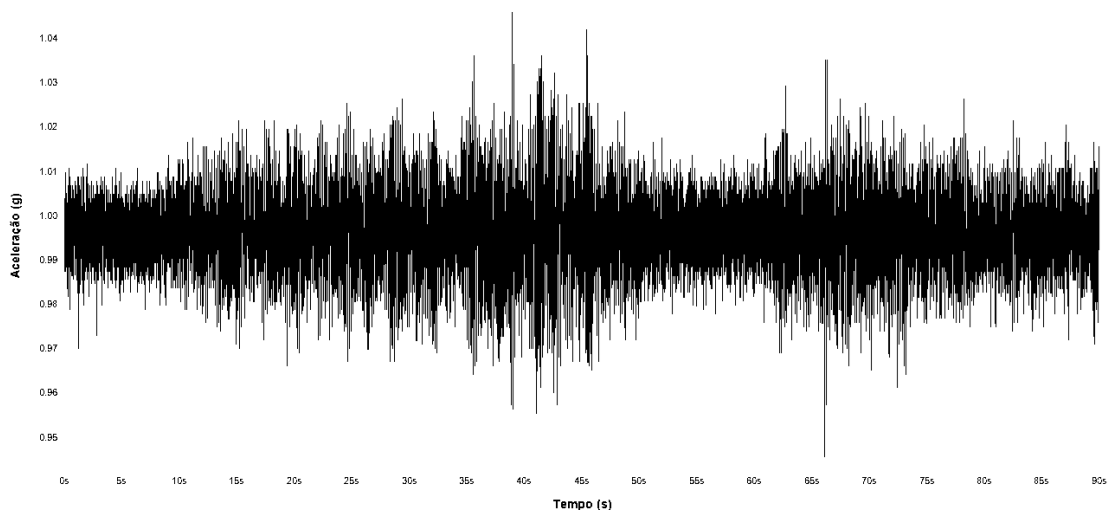


Figura 4-44 – Curva aceleração versus tempo da rampa de acesso, para o primeiro ensaio de multidão com caminhar aleatório, obtida a partir de leituras no ponto P02.

Comparando-se os resultados entre o primeiro ensaio de multidão (caminhar com frequência aleatória) e o segundo ensaio de multidão (caminhar aglomerado com frequência aleatória), pode-se observar um aumento de 15,09% das acelerações detectadas pelo acelerômetro posicionado no ponto P02. Acredita-se que isso ocorreu devido à redução da liberdade do caminhar, que obrigou os voluntários a andarem com passos mais curtos e sincronizados, caminhando em frequências parecidas. Na Figura 4-45 apresenta-se um aspecto geral da caminhada no primeiro e segundo ensaios de multidão respectivamente.



Figura 4-45- Aspecto geral das caminhadas com frequências aleatórias no primeiro e segundo ensaios de multidão respectivamente.

No terceiro ensaio de multidão, com 6 pessoas caminhando em duplas numa frequência de 2,22 Hz, alcançou-se o valor de aceleração em r.m.s. de 5,37% g (Tabela 4-15), o que representa um acréscimo de 5,59% em relação ao ensaio com três pessoas andando na mesma frequência de caminhar (Tabela 4-13). Ao se comparar os resultados de duas e três pessoas andando a 2,22 Hz (Tabela 4-13) nota-se que houve um aumento de 13,08% no valor da aceleração em r.m.s. Dessa forma, pode-se concluir que o número de pessoas no ensaio não influenciou de forma linear na resposta do sistema de piso.

Todas as simulações de torcida (quarto, quinto e sexto ensaios de multidão) resultaram em grandes acelerações, obtendo-se valores até 10 vezes maiores que nos testes de caminhada. Observando a Tabela 4-15 pode-se notar que as maiores amplitudes de aceleração em r.m.s. (31,09% g) foram obtidas para o quarto ensaio de multidão, com pulos aleatórios. Na Figura 4-46 é apresentado o gráfico de comparação dos valores das

acelerações em r.m.s. dos ensaios de multidão e os valores limites dos critérios internacionais de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para rampas internas.

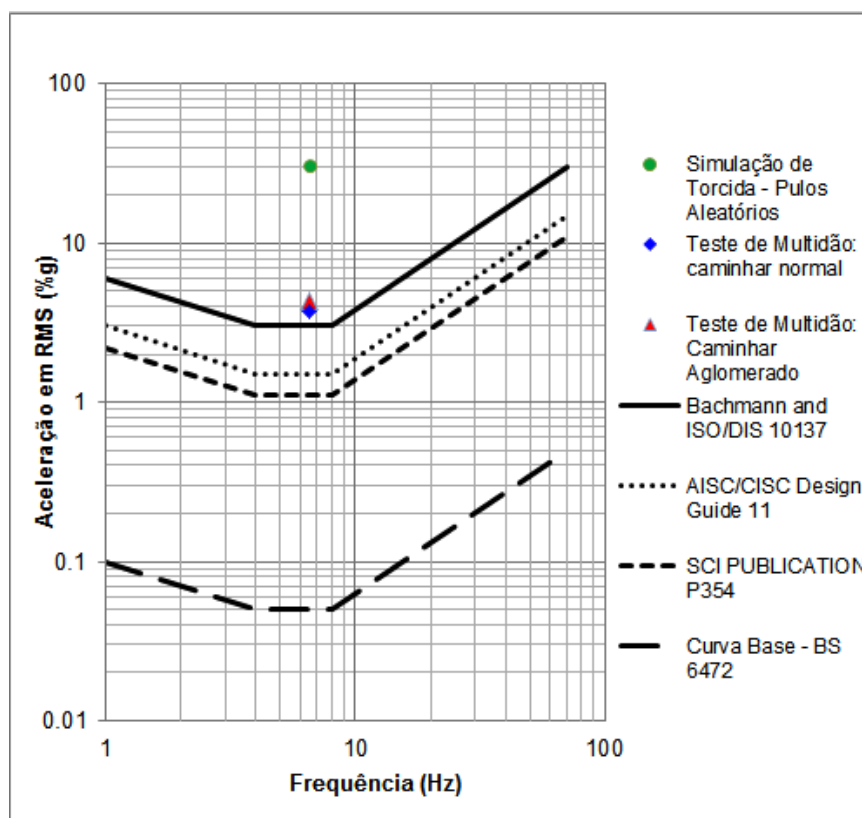


Figura 4-46 - Gráfico de comparação dos valores das acelerações em r.m.s. dos ensaios de multidão e os valores limites dos critérios internacionais de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para rampas internas.

Durante a realização dos ensaios de multidão, as vibrações foram percebidas com clareza pelas pessoas que faziam as medições no nível inferior da rampa. No entanto, a maioria dos voluntários relatou não sentir qualquer desconforto, já que os mesmos estavam participando efetivamente do movimento. Segundo os participantes, somente durante a “Ola” pode-se sentir a vibração, visto que neste movimento alguns voluntários permanecem parados enquanto outros pulavam. Desta maneira confirma-se que a sensibilidade humana às vibrações depende de indivíduo para indivíduo e também do fato de estar ou não estar exercendo a ação excitadora.

Diante dos fatos relatados pode-se concluir que em um determinado tipo de evento, onde exista a aglomeração de pessoas, existe a possibilidade de alguns usuários sentirem algum tipo de desconforto devido às vibrações induzidas pelas as atividades

humanas no sistema de piso, principalmente aqueles que não estiverem realizando a ação excitadora.

4.4 Estrutura III – Laticínios FUNARBE

4.4.1 Descrição da estrutura

O novo edifício do Laticínios FUNARBE se trata de uma edificação em estrutura em aço, com vigas mistas com lajes de concreto com forma de aço incorporada, fechamentos laterais em painéis termo-isolantes e cobertura metálica, tendo um consumo total de 162 t de aço (neste valor não estão incluídas as terças, contraventamentos, telhas e forma de aço incorporada para as lajes). Sua finalidade é abrigar a linha de produção dos diversos produtos da marca Viçosa, administração e também um Laticínios-Escola, que será voltado aos cursos de Engenharia de Alimentos e Laticínios da UFV. Sua construção foi iniciada no ano de 2013 e sua conclusão está prevista para o segundo semestre de 2015.



Figura 4-47- Aspecto geral do Novo Laticínios FUNARBE.

A edificação possui uma área total de 4759,52 m² e é subdividida em dois edifícios, que distam 12 m um do outro. O primeiro edifício é formado por dois

pavimentos, no qual se encontra toda a área administrativa e área de apoio aos funcionários. Já no segundo edifício se encontra toda a linha de produção do laticínios, formado por três pavimentos, onde no primeiro (subterrâneo) estão localizados o almoxarifado e o banco de gelo, no segundo a linha de fabricação e no terceiro o Laticínios-Escola.

Somente o último pavimento do segundo edifício é objeto de estudo neste trabalho. Isto ocorre porque todos os outros pavimentos possuem uma sobrecarga de piso alta devido à sua finalidade, resultando assim em uma estrutura relativamente rígida e com alta frequência fundamental, onde, dificilmente, o caminhar humano irá induzir vibrações a ponto de serem perceptíveis aos usuários. Devido à concepção arquitetônica do terceiro pavimento, existe um trecho de passarela para que estudantes possam observar as diversas fases de fabricação da linha de produção situada no pavimento inferior (como pode ser observado nas Figuras 4-48, 4-49 e 4-50). A rigidez desta passarela é mais baixa do que a dos outros pisos devido às características dos seus elementos estruturais e ao seu vão livre, tornando-se uma região de interesse para a análise experimental de vibrações devido ao caminhar humano.

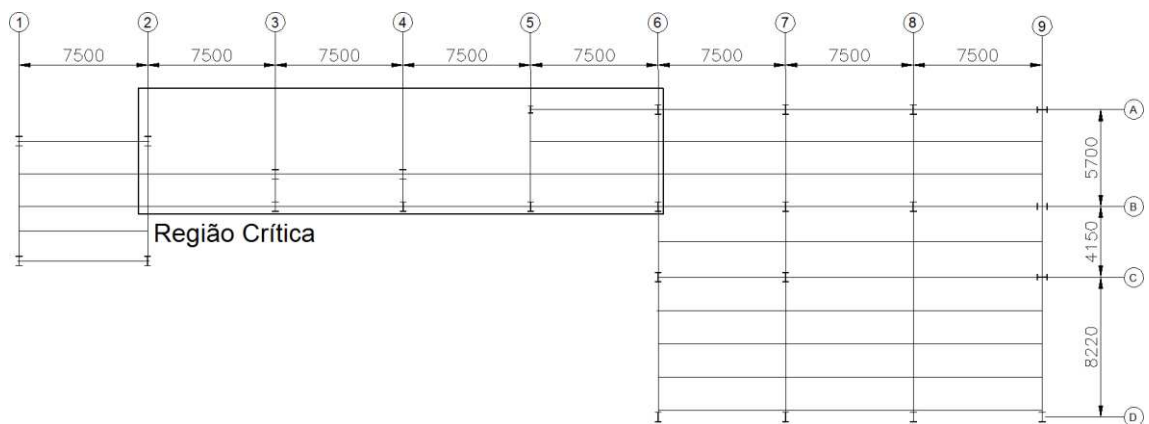


Figura 4-48- Plano das vigas do terceiro pavimento (EL. + 6200) do Laticínios FUNARBE.



Figura 4-49- vista lateral esquerda da passarela.



Figura 4-50- Vista lateral direita da passarela.

A passarela é composta por pilares de aço de perfis laminados tipo I e um sistema de piso misto de aço e concreto. As vigas principais são mistas e formadas por perfis laminados tipo I, que se apoiam nos pilares por meio de ligações parafusadas. Da mesma forma, as vigas secundárias, também são formadas por perfis laminados tipo I e se apoiam nas vigas principais por meio de ligações parafusadas. As lajes mistas de aço e concreto são compostas por forma de aço incorporada com altura de 75 mm, altura total de 150 mm

e largura de 2100 mm. Na Figura 4-51 apresenta-se o plano das vigas da região crítica com o posicionamento dos acelerômetros.

A passarela é constituída por quatro trechos com vãos livres de 7500 mm, sendo os três primeiros com a largura de 1900 entre os eixos das vigas de bordo e o quarto com 5700 mm de largura entre os eixos das vigas de bordo. As vigas de bordo e transversais dos três primeiros trechos do piso da passarela são formadas por perfis laminados tipo W 250x17,9, enquanto que as vigas principais e secundárias do quarto trecho são formadas por perfis laminados tipo W 310x21. Todos os pilares de aço são compostos por perfis laminados tipo W 200x26,6. Toda a estrutura é constituída em aço ASTM A-572 grau 50.

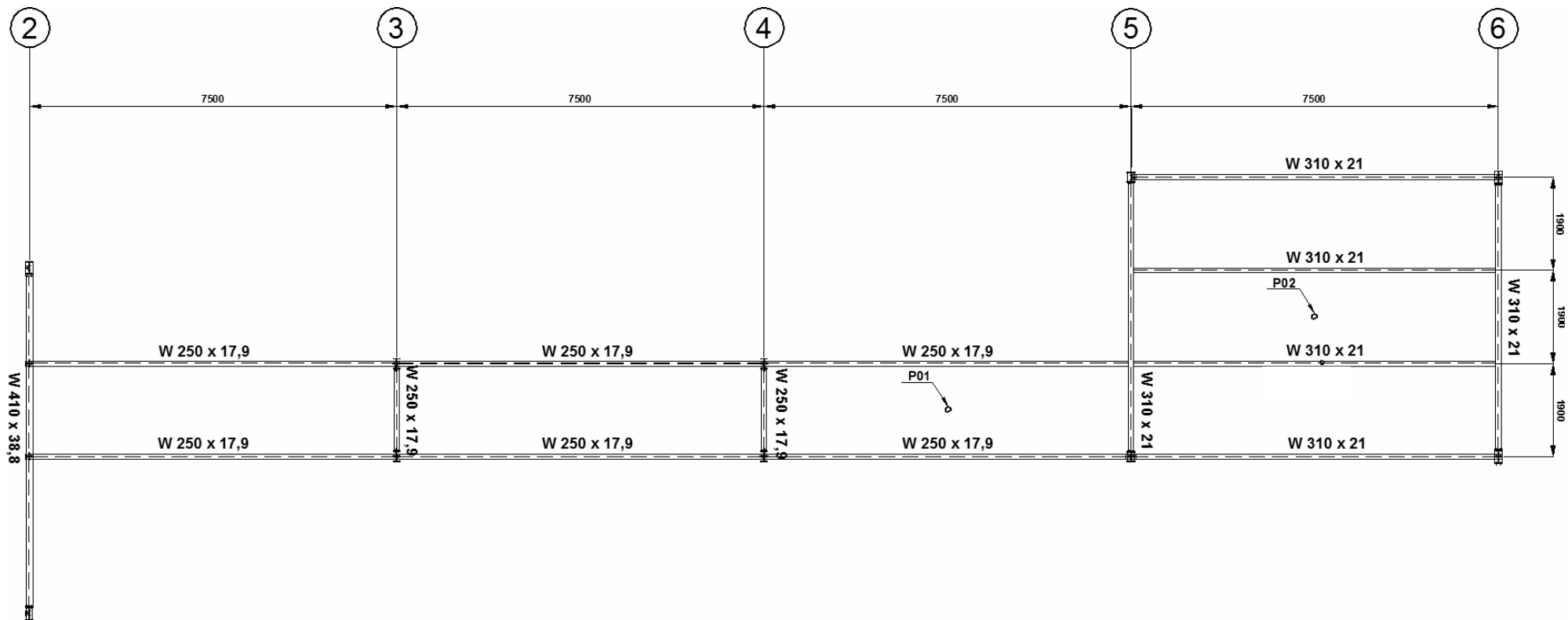


Figura 4-51- Plano das vigas da região crítica com o posicionamento dos acelerômetros.

Um aspecto importante a se observar é que no momento da realização da análise experimental de vibrações o sistema de piso estava todo “desnudo”, sem a instalação de nenhuma divisória de painel termo-isolante, conforme mostrado na Figura 4-52.



Figura 4-52- Aspecto geral da passarela no momento dos ensaios dinâmicos.

4.4.2 Ensaio dinâmico

A primeira região analisada foi o trecho onde a passarela possui largura constante de 2100 mm. Pode-se observar que os 3 trechos formadores desta região são idênticos em relação às suas dimensões e elementos estruturais. Também pode-se notar que em todos trechos existe a continuidade da laje no sentido longitudinal (Figura 4-48), sendo praticamente idênticos. No entanto, o terceiro trecho possui um apoio elástico (zona de encontro do terceiro trecho com o quarto trecho), enquanto nos outros trechos as vigas são apoiadas diretamente nos pilares. Desta maneira, o terceiro trecho se torna menos rígido quando comparado com os outros dois. Diante disto, o primeiro ponto selecionado foi o centro da laje deste trecho, onde foi instalado o acelerômetro AC 1190, conforme mostrado na Figura 4-53.



Figura 4-53- Apoio elástico do terceiro trecho da passarela e posicionamento do acelerômetro AC 1190 no ponto P01.

Posteriormente, foi analisado o 4º trecho da passarela, que é formado por uma baía de 7500 mm de comprimento e 5700 mm de largura, dividida em 3 segmentos de 1900 mm cada. Para este trecho, o centro da baía coincide com o centro de um dos segmentos de laje. Como a amplitude máxima de aceleração para a frequência fundamental passa em algum destes dois centros (como visto anteriormente no item 4.2.2.2), pode-se então definir o posicionamento do segundo ponto. O posicionamento dos dois pontos é mostrado na Figura 4-51.

A análise experimental foi dividida em 2 etapas, sendo a primeira correspondente aos ensaios de impacto dos calcanhares (heel-drop test) e a segunda aos ensaios de vibração forçada pelo caminhar de uma única pessoa (walking test). A frequência do caminhar humano para o ensaio de vibração forçada foi calculada a partir da frequência fundamental da estrutura, com objetivo que o harmônico do caminhar excite os primeiros modos de frequência da estrutura.

4.4.3 Resultados e discussão

Com auxílio dos ensaios de impacto dos calcanhares foi identificada a frequência fundamental da estrutura. Nas Figuras 4-54 e 4-55 são apresentados os espectros de resposta no domínio da frequência, obtidos com auxílio dos acelerômetros localizados nos pontos P01 e P02, respectivamente, para um impacto dos calcanhares na zona central do sistema de piso.

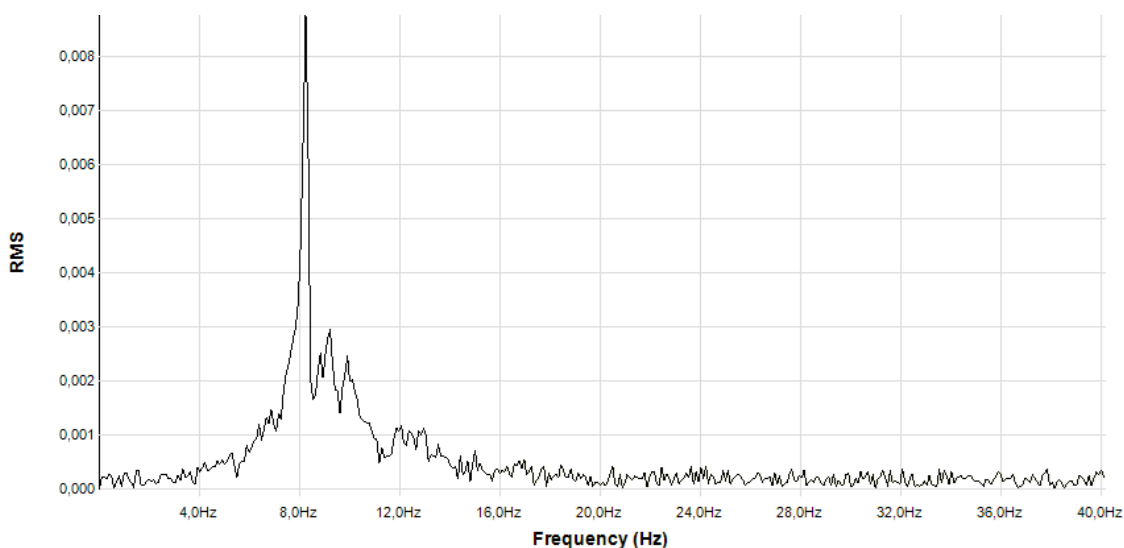


Figura 4-54- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 – AC 1190 para um heel-drop test na zona central do ponto P01.

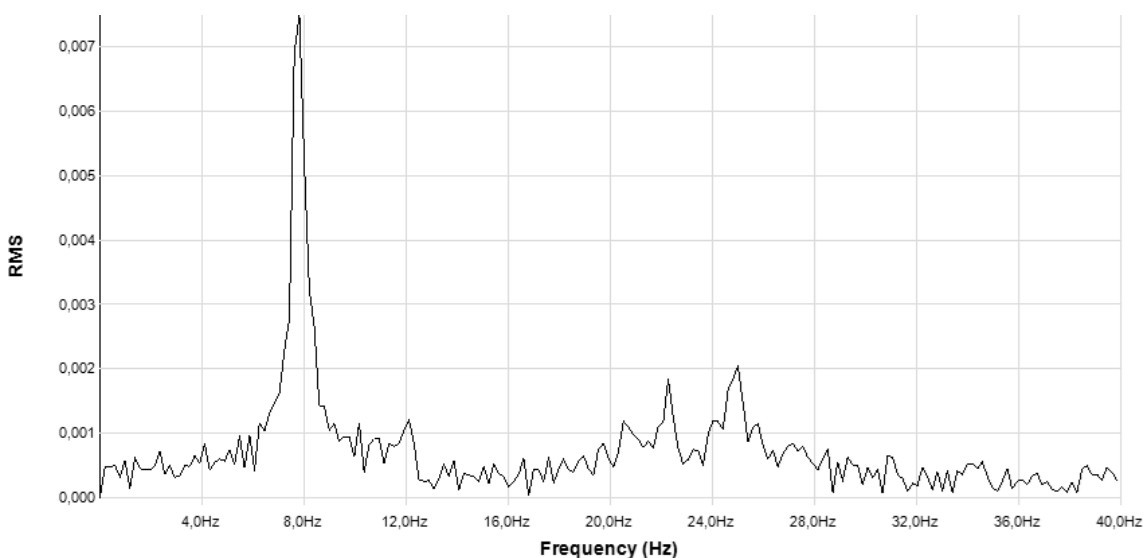


Figura 4-55- Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 – AC 1169 para um heel-drop test na zona central do ponto P02.

Por meio dos testes de impacto foram identificadas as seguintes frequências naturais do sistema de piso: 7,81 Hz, 8,20 Hz, 9,96 Hz e 11,91 Hz, como pode ser visto nas Figura 4-54 e 4-55. Com base nos resultados apresentados nessas figuras, pode-se observar a presença de algumas frequências naturais com valores muito próximos uns dos outros, o que se deve à similaridade entre os trechos da estrutura.

Observa-se que os valores encontrados para a frequência fundamental de cada ponto estão entre ou muito próximos ao intervalo de 5 Hz a 8 Hz, que de acordo com os estudos experimentais de Hanes (1970), é a faixa de frequências para qual as pessoas reagem de forma especialmente adversa às vibrações. Isto reforça a importância de realizar testes de caminhada e comparar as amplitudes de aceleração em r.m.s induzidas pelo caminhar com os critérios internacionais de avaliação de desempenho considerando o conforto humano às vibrações.

Com o valor da frequência fundamental para cada ponto de 7,81 Hz e 8,20 Hz pode-se calcular as frequências do filtro passa-banda, para assim estimar o valor do amortecimento, tanto para os impactos realizados no centro do vão, quanto para os impactos realizados na zona de apoio do vão. Na Tabela 4-16 são apresentados os valores das frequências para o filtro passa-banda.

Tabela 4-16 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	8,203	7,31	9,21
P02	7,813	6,96	8,77

Com os resultados dos sinais dos ensaios de impacto filtrados foi possível determinar os picos de aceleração e estimar o valor do amortecimento para cada impacto por meio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-17 apresenta-se um resumo destes resultados. Os valores de amortecimento determinados a partir da excitação da zona central da baía foram calculados com base nas respostas obtidas nos pontos P01 e P02. Para a excitação provocada próximo à zona de apoio da estrutura, o amortecimento foi calculado somente a partir das respostas do ponto P02, já que as amplitudes do ponto P01 não permitiram a determinação deste parâmetro.

Tabela 4-17- Valores de amortecimento para a região crítica do Laticínios FUNARBE (AC 1169 e AC 1190).

Ponto	Local do impacto no Vão	f_n (Hz)	Amortecimento (%)	Nº de picos	Coef. Variação (%)
P01	Centro	8,20	1,82	-	11,43
	Apoio	8,20	-	27	-
P02	Centro	7,81	2,05	48	9,36
	Apoio	7,81	1,76	15	14,15

Na Figura 4-56 é apresentada a comparação entre a curva aceleração x tempo do sinal original e do sinal filtrado, para um impacto de heel-drop test na zona central do ponto P02.

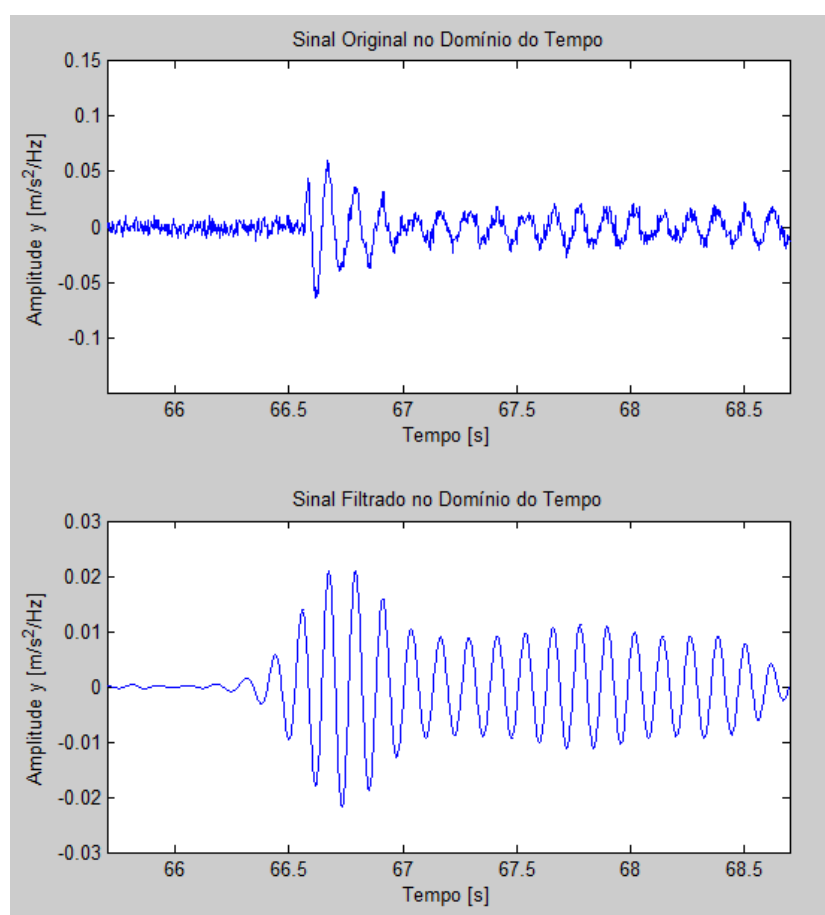


Figura 4-56- Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto dos calcanhares na zona central do ponto P02.

De forma similar ao que foi observado anteriormente para a Estrutura I, os valores de amortecimento calculados com impactos na zona central do ponto P02 foram cerca de 16,48% maiores do que os calculados com impactos produzidos na zona de apoio.

Conforme mostrado na Tabela 4-17, o valor médio de amortecimento de 1,76% para o ponto P02 é considerado baixo quando comparado com a faixa usual para sistemas de piso misto de aço e concreto que é de 2% a 5%. Isto se deve ao fato de que no momento da realização dos ensaios a passarela se encontrava totalmente “desnuda”, sem nenhum tipo de contra-piso, divisória ou elemento que pudesse aumentar o amortecimento da mesma. O mesmo ocorreu para o ponto P01, com valores médios de amortecimento de 1,82% para os impactos realizados próximo ao acelerômetro.

O método do decremento logarítmico mostrou-se novamente adequado para estimar o amortecimento, tendo apresentado um coeficiente de variação inferior a 15,0%.

Com base nos resultados dos ensaios, pode-se admitir que o valor global de amortecimento experimental para toda a estrutura é de 1,90%, que representa o valor médio entre os pontos P01 e P02.

A partir da frequência fundamental, pode-se calcular um caminhar crítico de frequência de 2,05 Hz para o ponto P01 e de 1,95 Hz para o ponto P02. Em ambos os casos, o 4º harmônico da frequência do caminhar coincide com a frequência fundamental da estrutura (Tabela 4-17).

Na Tabela 4-18 é apresentado o resumo dos resultados para os testes de caminhada de uma pessoa para os pontos P01 e P02.

Tabela 4-18- Resultados dos testes de caminhada na passarela do Laticínios FUNARBE.

Ponto	Acelerômetro	Caraterística	Freq. de Excitação	$a_{crit.} / a_{ruído}$	Classificação	Aceleração em r.m.s. (%g)
P01	AC 1190	Uma Pessoa	2,05 Hz	20,57	Evidente	3,58
P02	AC 1190	Uma Pessoa	1,95 Hz	12,41	Evidente	2,09

Com base nos resultados dos ensaios de impacto dos calcanhares (Tabela 4-17), esperava-se que no ponto P02 fossem obtidos os maiores valores de amplitude de aceleração em r.m.s., já que sua frequência fundamental foi de 7,81 Hz e seu amortecimento de 1,76 %, enquanto que para o ponto P01 a frequência fundamental foi de 8,20 Hz e amortecimento de 1,82%. Porém, pode-se observar na Tabela 4-18 que ocorreu o contrário do esperado, uma vez que para o ponto P01 foram observados valores

de aceleração em r.m.s. cerca de 71,29% maiores do que para o ponto P02. Isto pode ser explicado porque o ponto P01 está localizado em uma espécie de corredor, com 22,5 m de comprimento, enquanto que o ponto P02 está inserido em baia de 7,5 m por 5,7 m, sendo bem mais fácil um voluntário caminhar com uma frequência contínua na zona do ponto P01 do que na zona do ponto P02.

Na Figura 4-57 é apresentada a resposta no domínio do tempo para o acelerômetro posicionado no ponto P01 para o caminhar de uma pessoa com frequência de 2,05Hz. Com base na Figura 4-20 e considerando-se que a relação de $a_{\text{crit.}}/a_{\text{ruído}}$ é maior do que 2,0, pode-se classificar o sistema de piso quanto à excitação da estrutura como evidente.

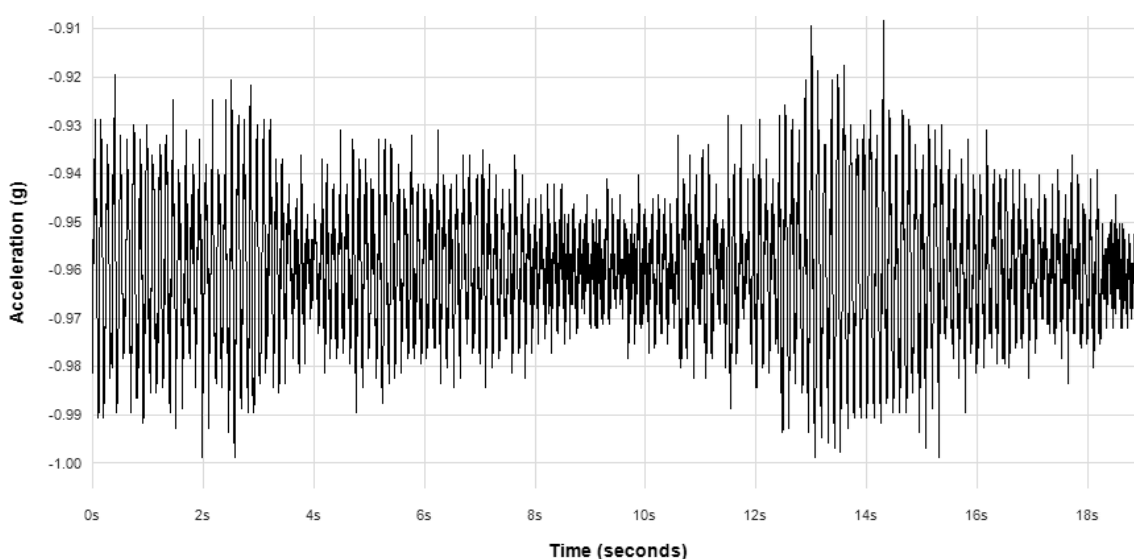


Figura 4-57- Curva aceleração versus tempo no Laticínios FUNARBE, para uma frequência de caminhar de 2,05 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P01.

O 4º harmônico da frequência do caminhar de 2,05 Hz excitou a frequência fundamental de 8,20 Hz no ponto P01, identificada durante os ensaios de impacto dos calcanhares (Figura 4-58).

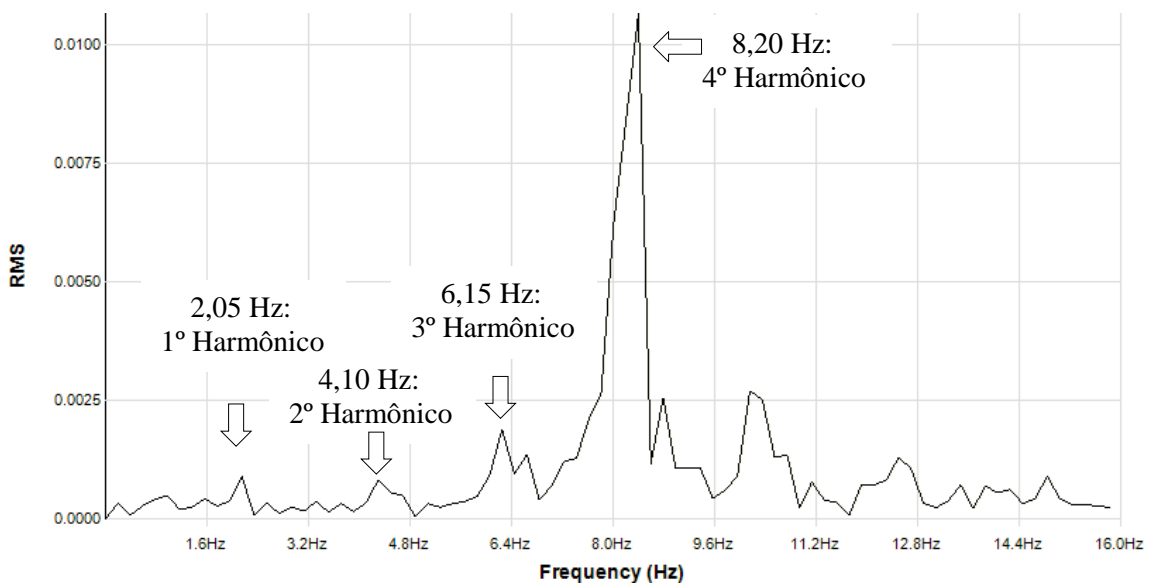


Figura 4-58 - Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1190 para um teste de caminhada com frequência de caminhar de 2,05 Hz, no Laticínios FUNARBE.

Com base nos resultados da Figura 4-58, observa-se que o caminhar numa frequência de 2,05 Hz excitou a frequência fundamental da zona do ponto P01. De forma análoga, este ensaio foi realizado na zona do ponto P02 para uma frequência de caminhar de 1,95 Hz, que excitou a frequência fundamental desta zona, como pode ser visto na Figura 4-59.

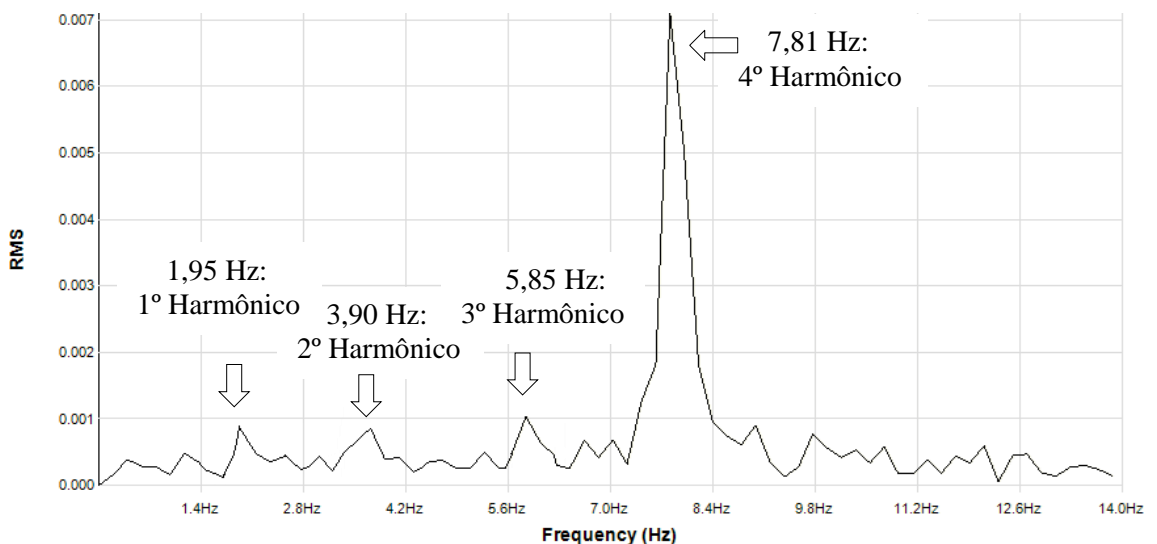


Figura 4-59 - Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 - AC 1190 para um teste de caminhada com frequência de caminhar de 1,95 Hz, no Laticínios FUNARBE.

Os valores de aceleração em r.m.s. apresentados na Tabela 4-18 são comparados com alguns critérios internacionais que estabelecem limites de aceitação considerando o conforto humano às vibrações, conforme apresentado no Figura 4-60. Devido à finalidade deste sistema de piso foram considerados valores limites propostos para rampas ou passarelas internas. De acordo com as recomendações da SCI PUBLICATION P 354 utiliza-se um fator multiplicador de 22 vezes em relação aos valores característicos da curva base (BS 6472), de 30 vezes de acordo com AISC/CISC Design Guide 11 e de 60 vezes de acordo com Bachmann et al. (1995) e ISSO 10137.

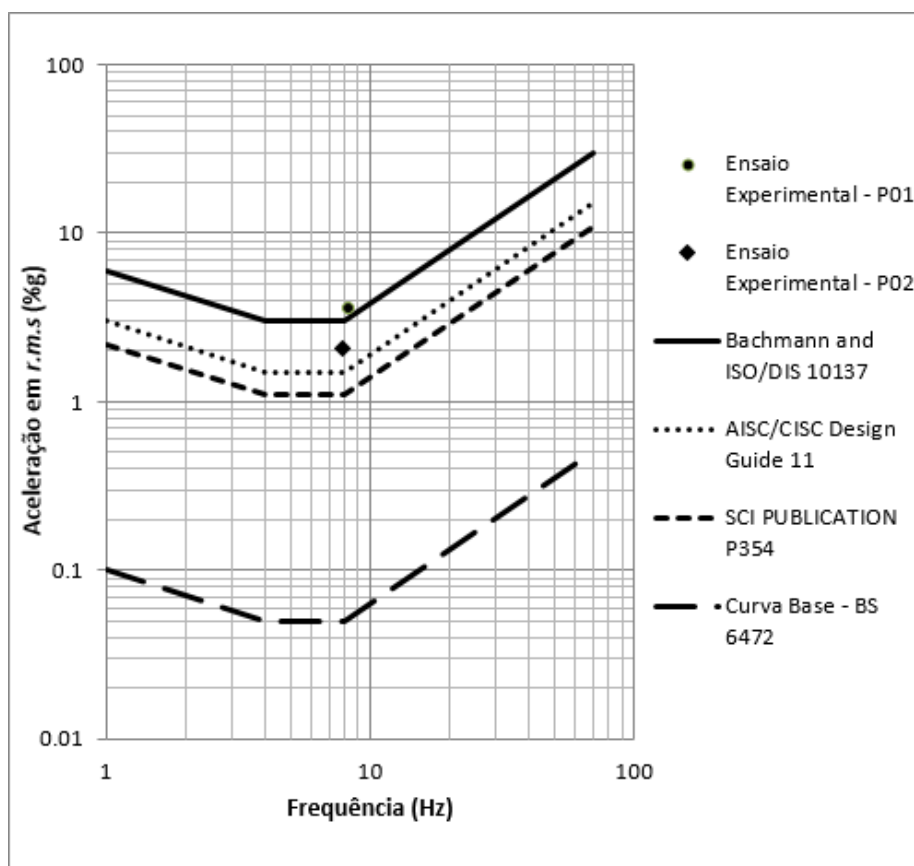


Figura 4-60- Gráfico de comparação dos valores de aceleração dos ensaios experimentais e os critérios de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações para passarelas internas.

Ao analisar a Figura 4-60 pode-se notar que em ambos os pontos analisados os limites propostos pela SCI PUBLICATION P 354 e pelo AISC/CISC Design Guide 11 foram ultrapassados. Os limites propostos por Bachmann et al. (1995) e pela ISO 10137 somente foram ultrapassados somente para o ponto P01.

Em função dos resultados mostrados na Figura 4-60 e de algumas opiniões de usuários coletadas no local da passarela, pode-se confirmar que as vibrações induzidas pelo caminhar no sistema de piso são perceptíveis e os deslocamentos gerados podem efetivamente causar desconforto aos usuários. Vale salientar que os ensaios foram realizados no momento que o sistema de piso estava “desnudo”, sem a presença das divisórias de termo-isolantes que são mostradas nas Figuras 4-49 e 4-50. Diante deste fato é aconselhável que após a conclusão da obra, seja refeita a análise experimental de vibrações do sistema de piso para sua classificação final quanto ao conforto humano.

4.5 Estrutura IV – Edifício das Licenciaturas

4.5.1 Descrição da estrutura

O edifício das Licenciaturas está localizado no Campus de Viçosa da Universidade Federal de Viçosa - UFV e conta com cinco pavimentos, com uma área de 680,00 m² por pavimento. O edifício é construído por pilares metálicos, sistemas de piso misto aço e concreto com vigas mistas e lajes com forma de aço incorporada e fechamento com alvenaria de tijolos furados. A sua construção foi iniciada no ano de 2012 e foi concluída no final de 2014. O edifício é formado basicamente por salas de aula, laboratórios de informática, salas de instrumentação física, sala de instrumentação matemática, auditório e gabinetes de professores.



Figura 4-61- Aspecto geral do Edifício das Licenciaturas da UFV.

Para realização da análise experimental de vibrações foram avaliadas as regiões dos sistemas de piso mais susceptíveis aos efeitos das vibrações induzidas pelo caminhar humano, buscando-se identificar as regiões de menor rigidez e menor amortecimento da estrutura. Nesta análise procurou-se levar em conta o posicionamento das paredes, tanto as localizadas no pavimento investigado, quanto aquelas localizadas no pavimento inferior, já que todas as paredes da edificação foram encunhadas no piso superior com auxílio de espuma de poliuretano expandido, o que altera a rigidez e o amortecimento do pavimento que está sendo investigado.

Diante da análise de toda edificação, chegou-se à conclusão que as salas de aula do segundo pavimento (Figura 4-62) constituem a região mais susceptível às vibrações forçadas pelo caminhar humano, por ser o local com menor rigidez e amortecimento da estrutura.

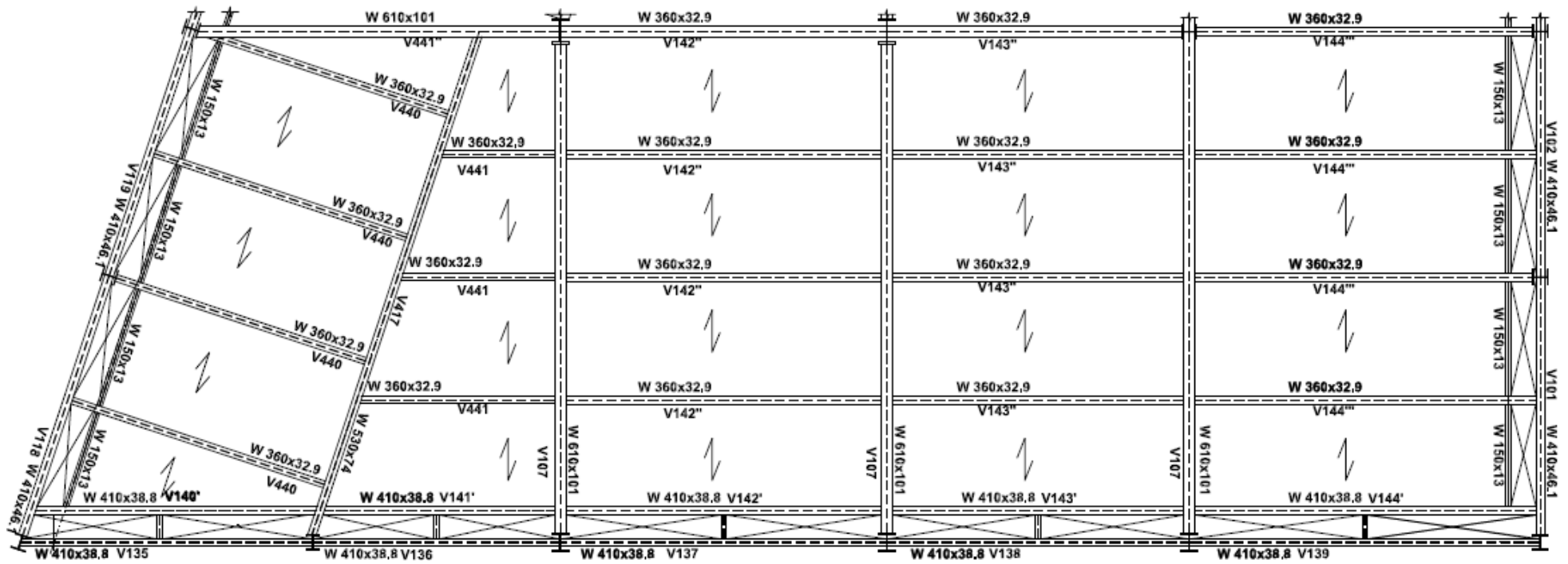


Figura 4-62 – Plano das vigas do segundo pavimento (EL. +5850) do Edifício das Licenciaturas.

Com o objetivo de reduzir o número de ensaios foi instrumentada somente a primeira baía, delimitada longitudinalmente pelos eixos A0 e C e transversalmente pelos Eixos 1 e 2, que representa a região de menor rigidez do sistema de piso misto de aço e concreto (Figura 4-63). Esta baía é composta por pilares de aço de perfis laminados tipo I e um sistema de piso misto de aço e concreto. As vigas que compõem a baía são vigas mistas, formadas por perfis laminados tipo I, que se apoiam nos pilares por meio de ligações parafusadas. As lajes mistas de aço e concreto são compostas por forma de aço incorporada com altura de 75 mm, altura total de 150 mm. Na Figura 4-63 é apresentado o plano das vigas da região crítica com o posicionamento dos acelerômetros.

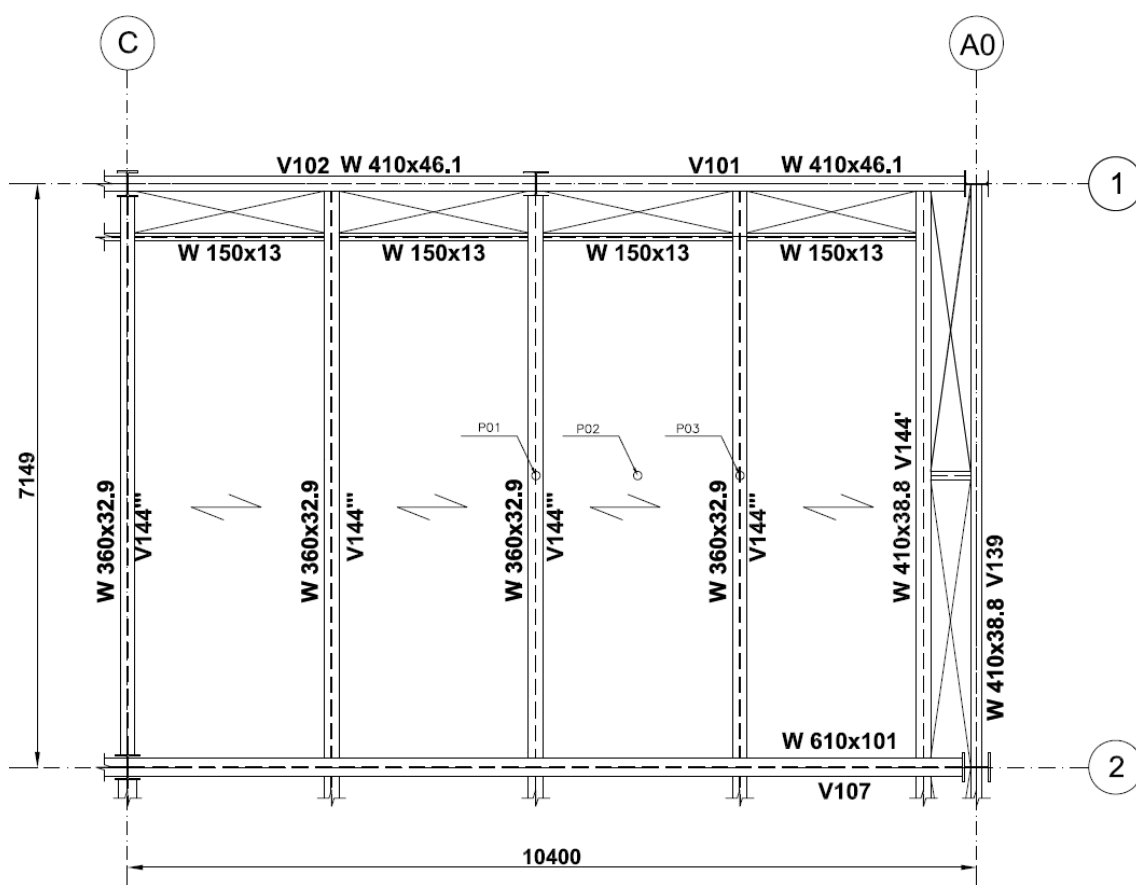


Figura 4-63 – Plano das vigas da região crítica e posicionamento dos acelerômetros.

A baía tem formato retangular, com vão de 10400 mm na direção das vigas principais e de 7150 mm na direção das vigas secundárias. As vigas principais são formadas por perfis laminados tipo W410x46,1 e W610x101 e as vigas secundárias são formadas por perfis laminados tipo W 360x32,9 e W410x38,8. Toda a estrutura é constituída em aço ASTM A-572 grau 50.

4.5.2 Ensaio dinâmico

Inicialmente foi realizado um estudo de posicionamento dos acelerômetros com intuito de identificar as primeiras frequências naturais do sistema de piso estudado. Para isso foram escolhidas as três posições demarcadas na Figura 4-63, nos pontos P01, P02 e P03.

O ponto P01 está localizado na zona de maiores deslocamentos para o primeiro modo de vibração, onde todo sistema de piso possui uma única oscilação, análogo ao primeiro modo de vibração de um elemento biapoado. O ponto P02 foi escolhido considerando-se a possibilidade de a rigidez das vigas secundárias ser muito maior que a rigidez das lajes de concreto com forma de aço incorporada, o que provoca os maiores deslocamentos na laje de concreto e deslocamentos quase nulos nas vigas secundárias. O ponto P03 foi escolhido considerando-se a possibilidade de ocorrência de um modo de vibração onde a viga central do sistema de piso teria deslocamentos quase nulos e os maiores deslocamentos se produziram na zona do ponto P03.

O acelerômetro AC 1169 foi posicionado no ponto P01, onde permaneceu durante toda a análise experimental, sendo que em uma primeira etapa o acelerômetro AC 1190 foi posicionado no ponto P02 e foram realizados os ensaios de impacto dos calcanhares e os testes de caminhada. Posteriormente o acelerômetro AC 1190 foi retirado do ponto P02 e fixado no ponto P03 e todo o processo foi repetido.



Figura 4-64 – Posicionamento dos acelerômetros nos pontos P01 - AC 1169 (a) e P02 - AC 1190 (b).

Diferentemente da análise experimental descrita para as outras estruturas (I, II e III), para este caso os testes de impacto foram realizados com auxílio da queda livre de um saco de areia, que foi içado com ajuda de uma corda e uma roldana foi fixada na mesa inferior de uma viga do piso superior. Este procedimento foi realizado devido aos estudos preliminares mostrarem que os ensaios de heel-drops test realizados próximos aos apoios e no centro da estrutura não foram capazes de causar uma excitação de valor representativo. Em todas as etapas dos testes de impacto, a excitação com o saco areia foi introduzida na zona central do sistema de piso (ponto P01 da Figura 4-63). Após a realização dos ensaios de impacto foram realizados os ensaios de vibração forçada de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3.

4.5.3 Resultados e discussão

Com auxílio dos ensaios de impacto foi identificada a frequência fundamental da estrutura. Nas Figuras 4-65 a 4-67 são apresentados os espectros de resposta no domínio da frequência, obtidos com auxílio dos acelerômetros localizados nos pontos P01, P02 e P03, para um impacto do saco de areia na zona central do sistema de piso.

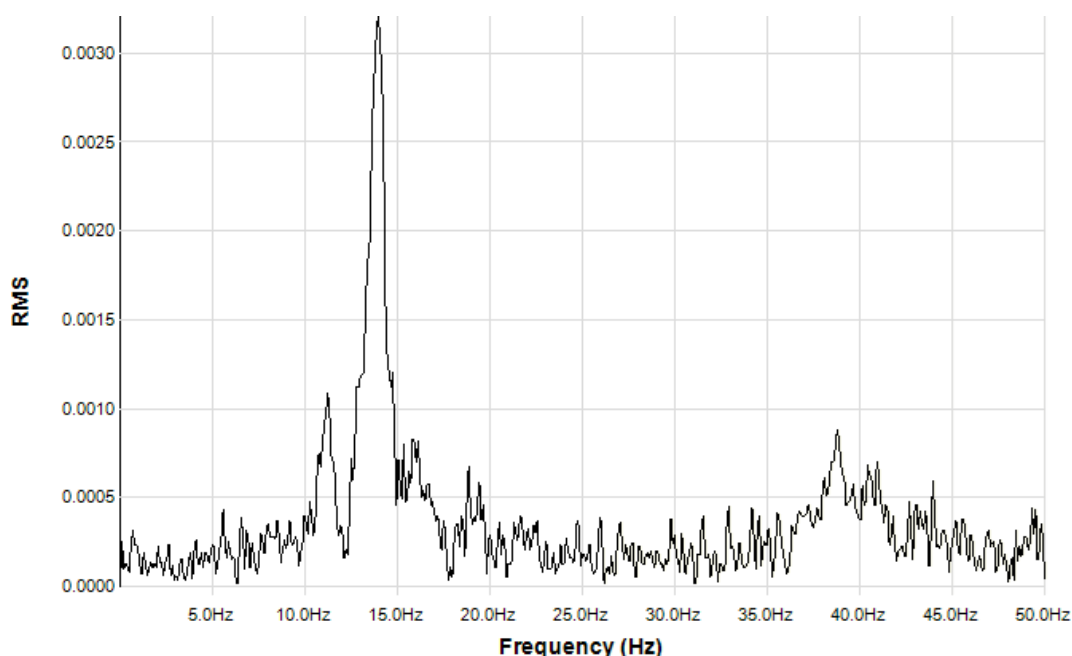


Figura 4-65 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1169, para um impacto do saco de areia na zona central da estrutura.

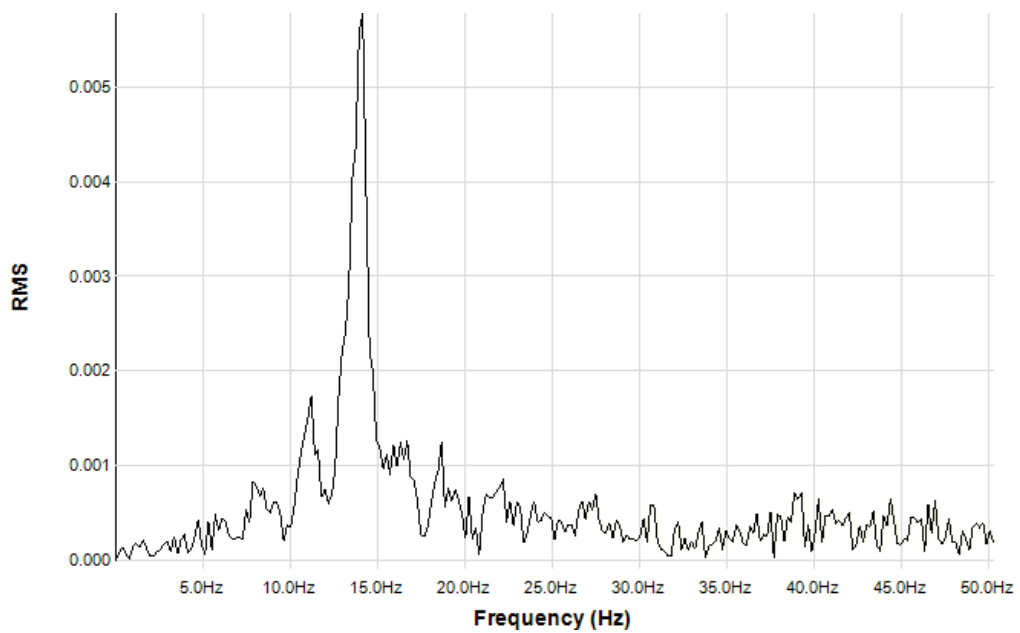


Figura 4-66 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 - AC 1190, para um impacto do saco de areia na zona central da estrutura.

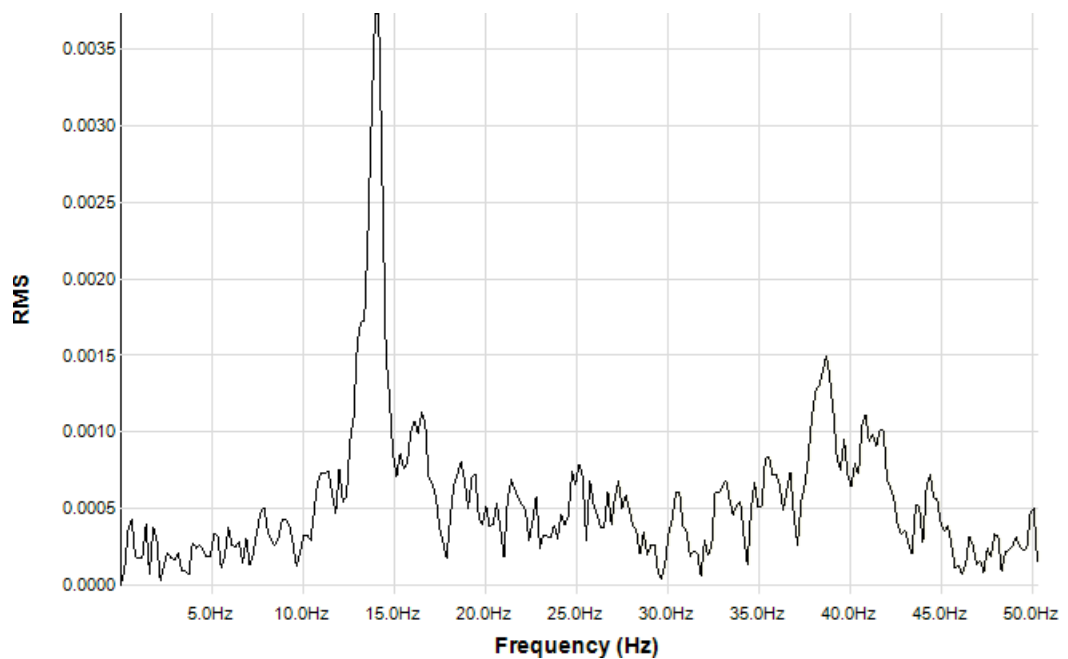


Figura 4-67 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P03 - AC 1190, para um impacto do saco de areia na zona central da estrutura.

Por meio dos testes de impacto foram identificadas as seguintes frequências naturais do sistema de piso: 11,20 Hz, 14,06 Hz, 16,41 Hz e 18,36 Hz. Observando-se os

resultados dos testes de impacto para cada acelerômetro, pode-se concluir que em todas as etapas dos ensaios, o modo de vibração mais excitado foi o referente à frequência natural de 14,06 Hz. Já que em todos os ensaios o impacto foi realizado no mesmo local (zona do ponto P01) os deslocamentos desta zona foram sempre maiores do que os dos outros locais, mesmo não sendo o modo de vibração referente à frequência fundamental do sistema de piso. Devido à dificuldade em fixar a roldana em outras posições não foi possível realizar os ensaios de impacto em outras zonas da estrutura, impossibilitando identificar o ponto onde os deslocamentos eram máximos para o modo de vibração correspondente à frequência fundamental.

Com o valor da frequência fundamental de 11,20 Hz pode-se calcular os valores das frequências do filtro passa-banda, para assim estimar o valor do amortecimento para impactos realizados na zona central do sistema de piso. Na Tabela 4-19 são apresentados os valores das frequências para o filtro passa-banda.

Tabela 4-19 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	11,20 Hz	9,98 Hz	12,57 Hz
P02	11,20 Hz	9,98 Hz	12,57 Hz
P03	11,20 Hz	9,98 Hz	12,57 Hz

Na Figura 4-68 é apresentada a comparação entre a curva aceleração x tempo do sinal original e do sinal filtrado para um impacto do saco de areia na zona do ponto P01. Durante a realização dos ensaios de impacto, notou-se que quando o saco de areia tocava o chão o seu movimento não cessava instantaneamente, repicando uma vez sobre o sistema de piso e provocando um segundo impacto. Analisando a resposta no domínio do tempo para cada impacto, fica evidente a ocorrência deste fenômeno (Figura 4-68).

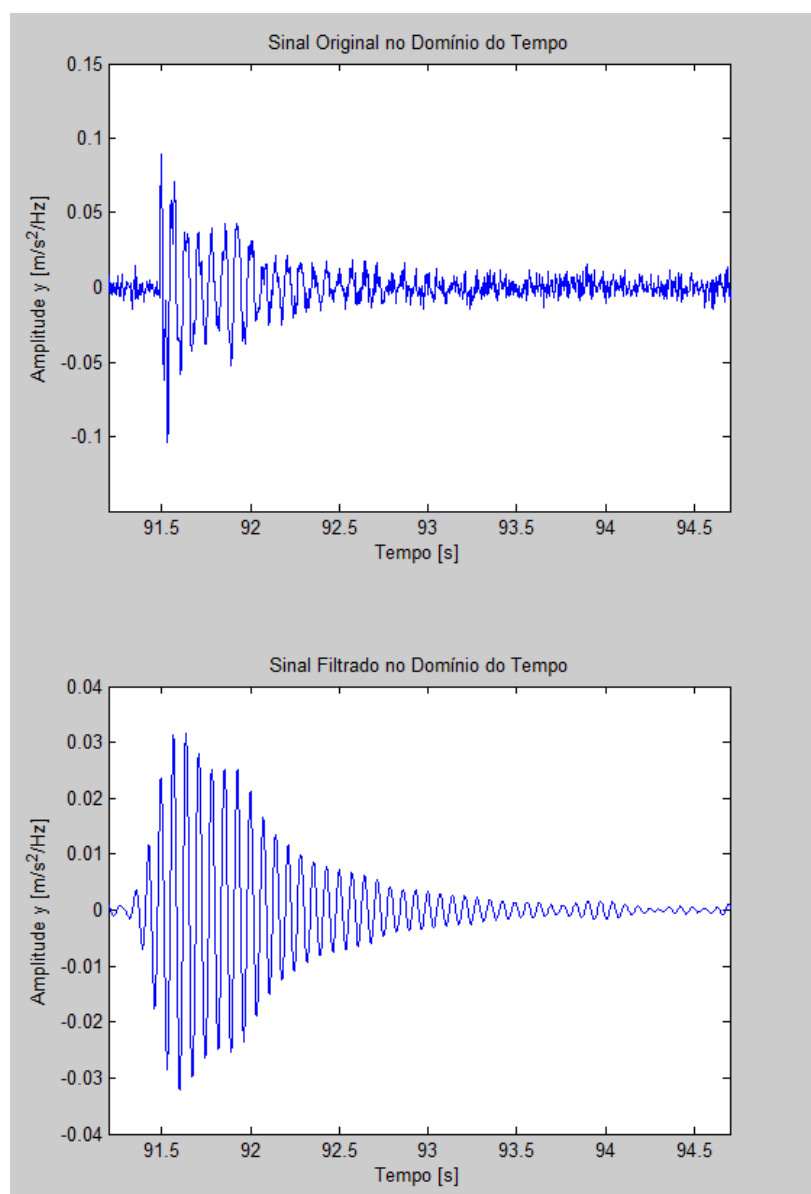


Figura 4-68 – Sinal original e sinal filtrado no domínio do tempo para um impacto do saco de areia na zona central da região crítica do Edifício das Licenciaturas.

Observando-se o sinal filtrado no domínio do tempo na Figura 4-68, observa-se que devido ao repique do saco de areia ocorre um aumento nas amplitudes da aceleração, causando uma perturbação no sinal. Em função disso, para aplicar o método do decremento logarítmico optou-se por utilizar somente os picos de aceleração após o segundo impacto do saco de areia. Com base nisso foi possível determinar os picos de aceleração e estimar o valor do amortecimento para cada impacto por meio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-20 apresenta-se um resumo destes resultados.

Tabela 4-20 – Valores de amortecimento para a região crítica do Edifício das Licenciaturas (AC 1169 e AC 1190).

Local	Valores
Amortecimento com impacto do saco de areia na zona central do sistema de piso	Média: 2,35 %
	Amostragem: 59 picos
	Desvio padrão: 0,46 %
	Coef. de Variação: 23,04 %

Conforme mostrado na Tabela 4-20, o valor médio de amortecimento experimental (2,35%) calculado para a região crítica ficou dentro da faixa esperada para sistemas de piso misto de aço e concreto que é de 2% a 5%. No entanto, para sistemas de piso semelhantes ao estudado, o valor do amortecimento esperado é de aproximadamente 3,0 %. Uma taxa de amortecimento mais baixa como a obtida pode ser explicada pelo fato do sistema de piso estar praticamente concluído no momento dos ensaios, mas ainda sem nenhum tipo de mobília.

Outro aspecto que deve ser salientado é que para o cálculo do valor médio do amortecimento nos ensaios de impacto realizados na zona central do sistema de piso foram consideradas 59 amostras, sendo obtido um coeficiente de variação de 23,04%. Este valor indica uma precisão de resultados entre média e baixa, o que pode ter sido afetado pelas incertezas geradas pelo repique do saco de areia.

Com os resultados dos ensaios de impacto do saco de areia, pode-se supor que o caminhar humano de uma pessoa não iria causar nenhuma interferência perceptível no sistema de piso estudado. Admitindo-se uma frequência do caminhar humano de acordo com Bachmann et al. (1995) na faixa de 1,7 Hz a 2,3 Hz, pode-se observar que somente o 5º harmônico do caminhar iria excitar a frequência fundamental do sistema de piso, com 11,20 Hz. Porém a energia que é aplicada ao sistema pelo 5º harmônico do caminhar humano é baixa, sendo que o amortecimento estrutural seria capaz de absorvê-la completamente, sem que houvesse um aumento significativo da amplitude de aceleração induzida pelo caminhar humano.

Apesar das evidências anteriores, optou-se por realizar um teste de caminhada na região crítica do sistema de piso. Com base nos resultados obtidos para um caminhar com frequência de 2,24 Hz (Figura 4-69), pode-se concluir que para o sistema de piso estudado o caminhar humano não mesmo é capaz de gerar amplitudes de aceleração

significativas. Na Figura 4-69 é apresentado o comparativo entre a resposta no domínio do tempo do teste de caminhada para uma frequência de 2,24 Hz e a curva de aceleração dos ruídos, obtidas pelo sistema de aquisição de dados.

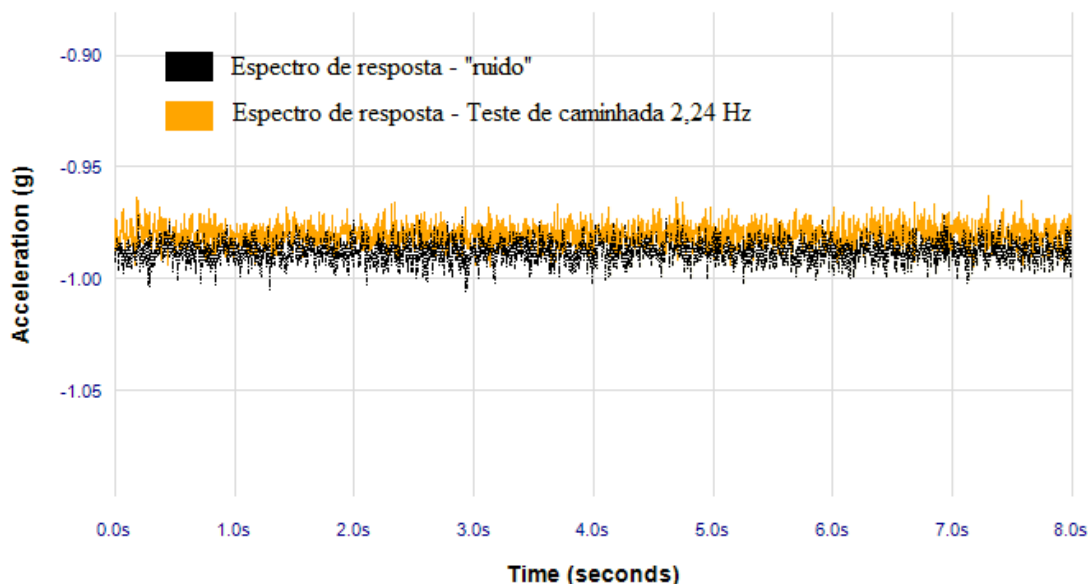


Figura 4-69 – Comparação entre a curva aceleração versus tempo para uma frequência de caminhar de 2,24 Hz e de ruído para a região crítica do sistema de piso do Edifício das Licenciaturas.

Analisando a Figura 4-69 e considerando-se que a relação $a_{crit.} / a_{ruído}$ foi inferior a 1,1, pode-se classificar a excitação da estrutura como imperceptível para os testes de caminhada. Diante dos resultados obtidos nos testes de caminhada, é desnecessário comparar suas respostas com os valores limites dos critérios internacionais de aceitação quanto ao conforto humano às vibrações.

A partir dos resultados dos ensaios de impacto e de vibrações forçadas no sistema de piso estudado existem evidências de que a edificação não apresentará problemas de vibrações induzidas pelo caminhar humano.

4.6 Estrutura V – Edifício comercial

Além das edificações para fins institucionais localizadas no Campus de Viçosa da Universidade Federal de Viçosa, também foi realizada a análise experimental de vibrações em um edifício comercial, localizado na cidade de Viçosa.

4.6.1 Descrição da estrutura

O edifício comercial considerado para este estudo é composto por três pavimentos, sendo um subsolo, que é utilizado como garagem, o primeiro pavimento, onde existe um galpão com cobertura em treliça de aço e onde se encontra instalado um supermercado, e um mezanino, onde se localiza a área administrativa do supermercado e um restaurante.

A estrutura do edifício é composta por pilares de aço de perfis soldados tipo I, sistema de piso misto de aço e concreto e uma cobertura em treliças de aço de altura constante. As vigas do sistema de piso são mistas e formadas por perfis soldados tipo I, que se apoiam nos pilares por meio de ligações soldadas. Da mesma forma, as vigas secundárias, também são formadas por perfis soldados tipo I, se apoiam nas vigas principais por meio de ligações soldadas. As lajes mistas de aço e concreto são compostas por forma de aço incorporada com altura de 75 mm, altura total de 150 mm e largura de 2100 mm.

Para realização da análise experimental de vibrações foram avaliadas as regiões dos sistemas de piso da edificação mais susceptíveis aos efeitos das vibrações induzidas pelo caminhar humano, buscando-se identificar as regiões de menor rigidez e menor amortecimento da estrutura. Analisando as propriedades geométricas da estrutura e mecânicas dos materiais pode-se concluir que o sistema de piso do primeiro pavimento dificilmente sofrerá problemas de vibrações induzidas pelo caminhar humano, uma vez que apresenta elevada rigidez e um elevado amortecimento devido às prateleiras carregadas de mercadorias no supermercado. Já o mezanino possui um sistema de piso menos rígido e, de acordo com relatos de usuários da edificação, pode-se perceber as vibrações quando outras pessoas caminham na mesma. Diante dessas evidências, chegou-se à conclusão o mezanino é a região mais susceptível às vibrações induzidas pelo caminhar humano.

O sistema de piso do mezanino é constituído por várias baias modulares com as seguintes características: formato regular, vão de 6400 mm na direção das vigas principais e de 7500 mm na direção das vigas secundárias, além de um balanço de 1500 mm no sentido das vigas principais. As vigas principais são formadas por perfis tipo VS 350x35,0 e as vigas secundárias são formadas por perfis tipo VS 300x25, sendo que no trecho do

balanço são utilizados perfis tipo VS 200x19,0. Os pilares de aço são constituídos por perfis tipo CS 200x41,0. Na Figura 4-70 é apresentado o plano das vigas da região crítica com o posicionamento dos acelerômetros.

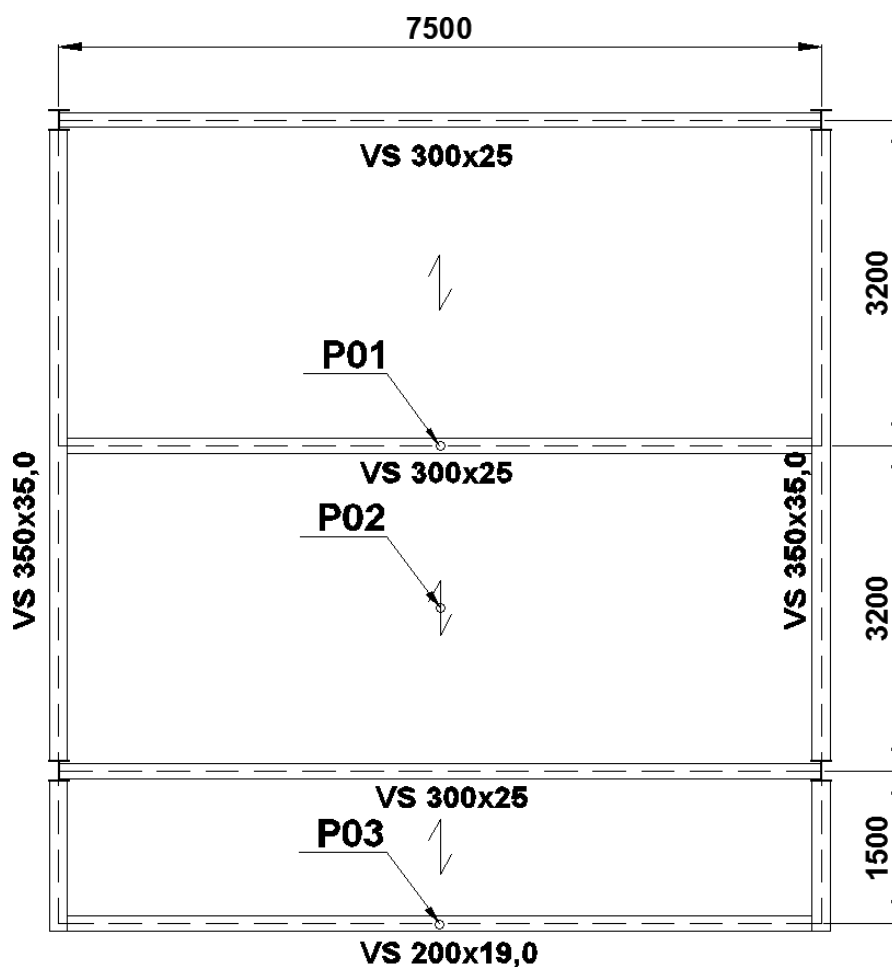


Figura 4-70 – Plano das vigas da região crítica e posicionamento dos acelerômetros.

Devido à dificuldade de acesso ao sistema de piso foi escolhida uma das baias que permitia fácil acesso para realização dos ensaios dinâmicos. Para escolha desta baia foi observada a disposição dos móveis e das divisórias no sistema de piso do restaurante. A baia escolhida faz parte do salão do restaurante, enquanto que o trecho em balanço corresponde a um corredor de acesso aos sanitários. Na zona correspondente ao salão do restaurante existe um balcão de alvenaria sobre todo o comprimento da primeira viga secundária, sob qual está localizado o ponto P01 (Figura 4-70).

4.6.2 Ensaios dinâmicos

Inicialmente foi realizado um estudo de posicionamento dos acelerômetros com intuito de identificar as primeiras frequências naturais do sistema de piso estudado. Para isso foram escolhidas as três posições demarcadas na Figura 4-63, nos pontos P01, P02 e P03.

O ponto P01 está localizado na zona de maiores deslocamentos para o primeiro modo de vibração, onde todo sistema de piso possui uma única oscilação, análogo ao primeiro modo de vibração de um elemento biapoado. O ponto P02 foi escolhido considerando-se a possibilidade de a rigidez das vigas secundárias ser muito maior que a rigidez das lajes de concreto com forma de aço incorporada, o que provoca os maiores deslocamentos na laje de concreto e deslocamentos quase nulos nas vigas secundárias. O ponto P03 está localizado na extremidade do balanço, com o intuito de avaliar as amplitudes de aceleração no mesmo.

O acelerômetro AC 1190 foi posicionado no ponto P01, onde permaneceu durante toda análise experimental, sendo que em uma primeira etapa o acelerômetro AC 1169 foi posicionado no ponto P02 e foram realizados os ensaios de impacto dos calcanhares e os testes de caminhada. Posteriormente o acelerômetro AC 1169 foi retirado do ponto P02 e fixado no ponto P03 e todo o processo foi repetido.



Figura 4-71 – Posicionamento dos acelerômetros nos pontos P01 - AC 1190 e P02 - AC 1169.

4.6.3 Resultados e discussão

Com auxílio dos ensaios de impacto foi identificada a frequência fundamental da estrutura. Nas Figura 4-194-72 a 4-74 são apresentados os espectros de resposta no domínio da frequência, obtidos com auxílio dos acelerômetros localizados nos pontos P01, P02 e P03, para um impacto dos calcanhares na zona central do sistema de piso do mezanino.

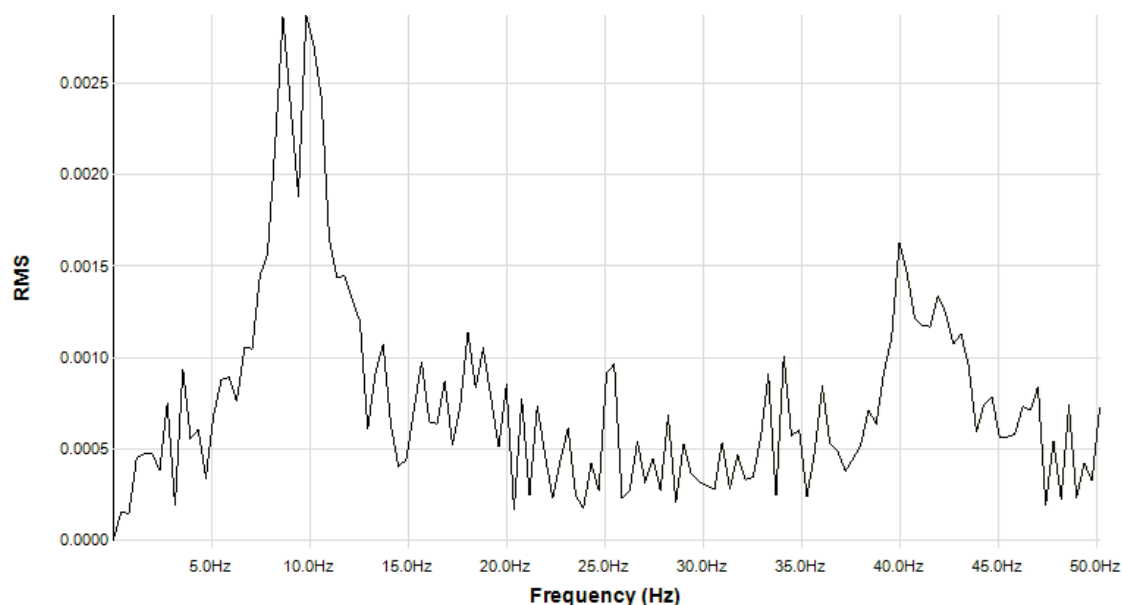


Figura 4-72 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P01 - AC 1190 para um heel-drop test na zona central do ponto P01.

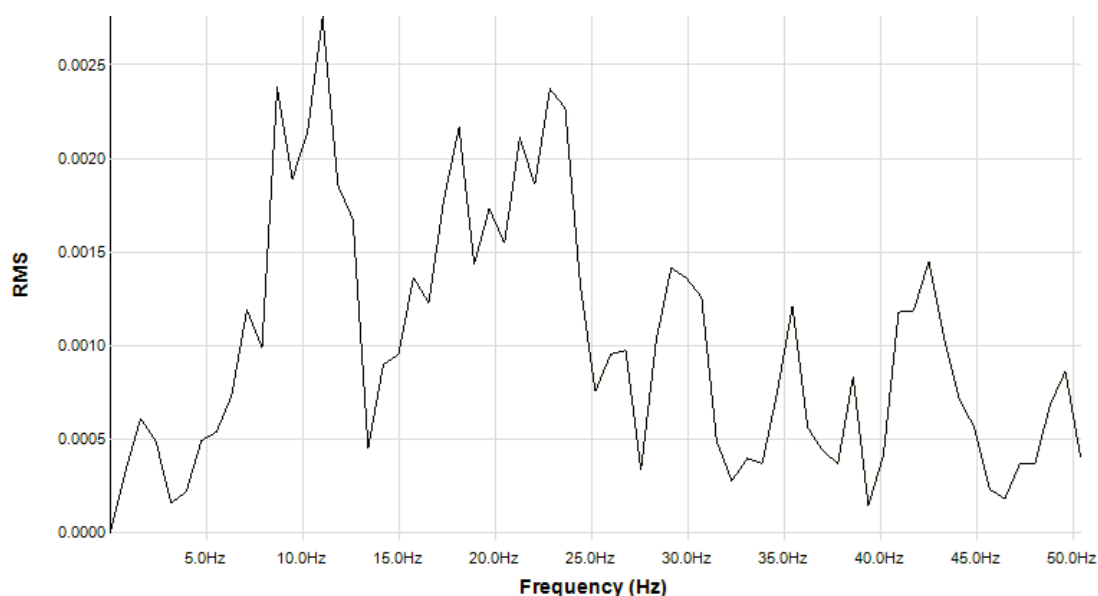


Figura 4-73 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P02 - AC 1169 para um heel-drop test na zona central do ponto P02.

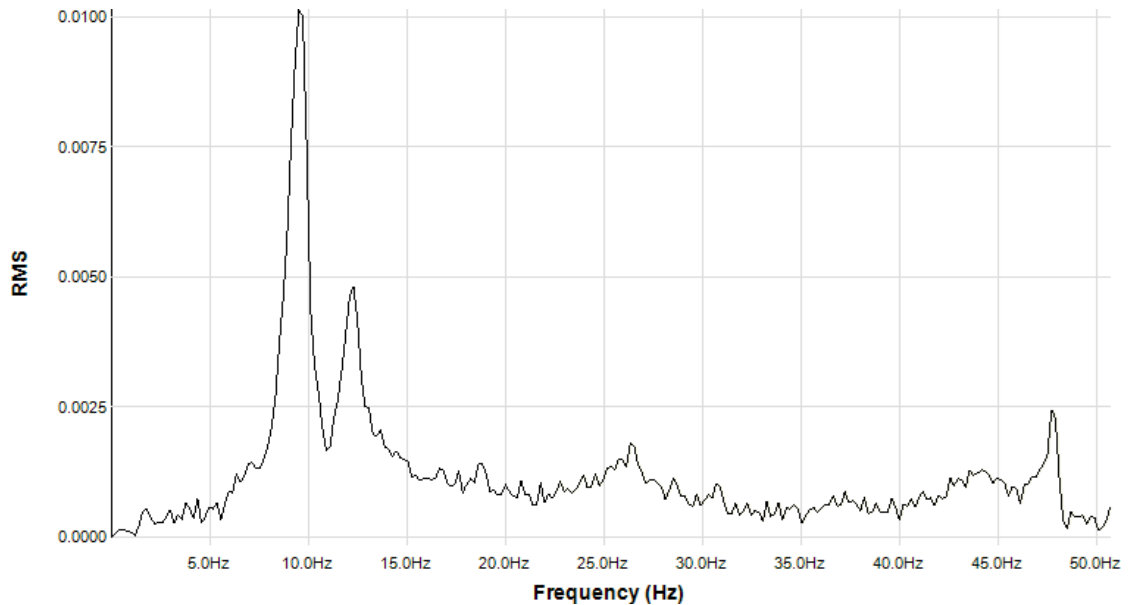


Figura 4-74 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P03 - AC 1169 para um heel-drop test na zona central do ponto P03.

Por meio dos testes de impacto foram identificadas as seguintes frequências naturais do sistema de piso: 8,20 Hz, 9,37 Hz, 12,44 Hz e 18,36 Hz, como pode ser visto nas Figuras 4-72 a 4-74. Observando os resultados dos ensaios de impacto para cada acelerômetro, pode-se concluir que somente no ponto P01 o modo de vibração mais excitado pelo impacto dos calcanhares foi o referente à frequência fundamental da estrutura, que é 8,20 Hz. Já para o ponto P02 o modo de vibração mais excitado foi o referente à frequência natural de 12,44 Hz, enquanto que para o ponto P03, aquele que corresponde à frequência natural de 9,37 Hz.

Com o valor da frequência fundamental de 8,20 Hz pode-se calcular as frequências do filtro passa-banda, para assim estimar o valor do amortecimento. Na Tabela 4-21 são apresentados os valores das frequências para o filtro passa-banda.

Tabela 4-21 – Parâmetros para o filtro passa-banda (Hz).

Ponto	f_0	f_1	f_2
P01	8,20 Hz	7,30 Hz	9,20 Hz
P02	8,20 Hz	7,30 Hz	9,20 Hz
P03	9,37 Hz	8,35 Hz	10,52 Hz

Depois de filtrados os sinais dos ensaios de impacto dos calcanhares foi possível determinar os picos de aceleração e estimar o valor do amortecimento para cada impacto por meio do método do decremento logarítmico e realizar o controle estatístico dos valores calculados. Na Tabela 4-22 apresenta-se um resumo destes resultados.

Tabela 4-22 – Valores de amortecimento para a região crítica do mezanino (AC 1169 e AC 1190).

Local	Valores
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona central do sistema de piso - Ponto P02	Média: 6,18 %
	Amostragem: 18 picos
	Desvio padrão: 1,61 %
	Coef. de Variação: 25,96 %
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona do apoio do sistema de piso - Ponto P02	Média: 5,82 %
	Amostragem: 23 picos
	Desvio padrão: 2,05 %
	Coef. de Variação: 35,16 %
Amortecimento com impacto dos calcanhares na zona central do balanço - Ponto P03	Média: 3,04 %
	Amostragem: 34 picos
	Desvio padrão: 0,55 %
	Coef. de Variação: 18,26 %

De forma similar ao que foi observado anteriormente para as Estrutura I e III, os valores de amortecimento calculados com impactos na zona central do ponto P02 foram cerca de 6,19% maiores do que os calculados com impactos produzidos na zona de apoio.

Conforme mostrado na Tabela 4-22, o valor médio de amortecimento experimental de 5,82% para o ponto P02 é considerado alto quando comparado com a faixa usual de sistemas de piso misto de aço e concreto que é de 2% a 5%. Isto pode ser justificado devido à existência de um balcão de alvenaria ao longo de todo o eixo da viga secundária, próximo à zona central do ponto P02. Este balcão limita, de certa forma, os movimentos vibratórios, aumentando assim os valores dos amortecimentos calculados. Já para a zona central do ponto P03, o valor médio do amortecimento experimental calculado por meio do método do decremento logarítmico de 3,04 % está dentro dos valores esperados para sistemas de piso misto de aço e concreto.

Outro aspecto que vale ser salientado é que para o cálculo do valor médio do amortecimento para os ensaios de impacto realizados na zona central do ponto P02 foram considerados 18 amostras, sendo obtido um coeficiente de variação de 25,96% e para os

impactos efetuados perto da zona do apoio do mesmo ponto, foram considerados 23 amostras, obtendo-se um coeficiente de variação de 35,16%. Estes valores de coeficiente de variação decorrem de uma certa dificuldade na obtenção de resultados representativos para a aplicação do método do decremento logarítmico, o que levou a uma baixa precisão dos resultados calculados. Isso pode ser justificado pela presença de alguns trabalhadores do restaurante nas baias adjacentes no momento dos ensaios de impacto dos calcanhares, o que pode ter gerado interferências nos sinais obtidos pelos acelerômetros. Já para o cálculo do valor médio do amortecimento para os ensaios de impacto realizados na zona central do ponto P03 foram considerados 34 amostras, sendo obtido um coeficiente de variação de 18,26%, o que representa uma precisão média.

Admitindo-se uma frequência do caminhar humano de acordo com Bachmann et al. (1995) na faixa de 1,7 Hz a 2,3 Hz pode-se observar que somente o 5º harmônico de um caminhar de 1,64 Hz e o 4º harmônico de um caminhar de 2,05 Hz podem excitar a frequência fundamental do sistema de piso, com 8,20 Hz. De forma semelhante, somente o 4º harmônico de um caminhar de 2,34 Hz pode excitar a frequência natural de 9,37 Hz, que se refere ao modo de vibração com maiores deslocamentos na zona do balanço.

Nas Figuras 4-75, 4-76 e 4-77 são apresentadas as curvas de aceleração versus tempo nos pontos P01, P02 e P03, com seus respectivos caminhares críticos.

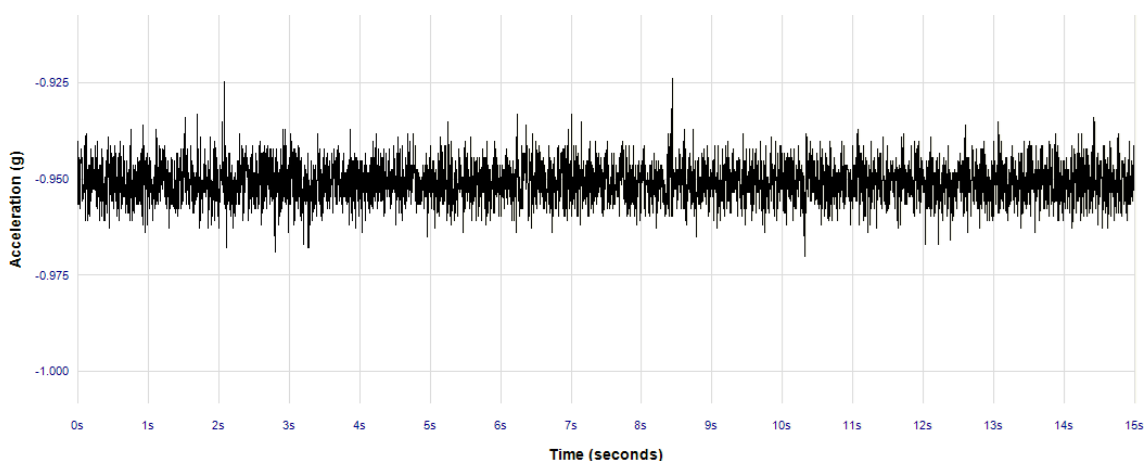


Figura 4-75 – Curva aceleração versus tempo na zona correspondente ao salão do restaurante, para uma frequência de caminhar de 1,64 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P01.

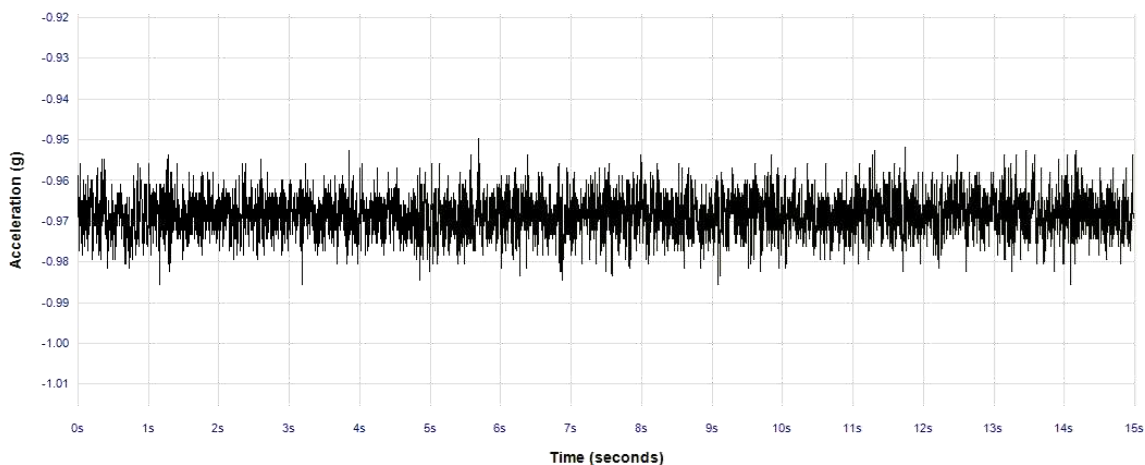


Figura 4-76 – Curva aceleração versus tempo na zona correspondente ao salão do restaurante, para uma frequência de caminhar de 1,64 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P02.

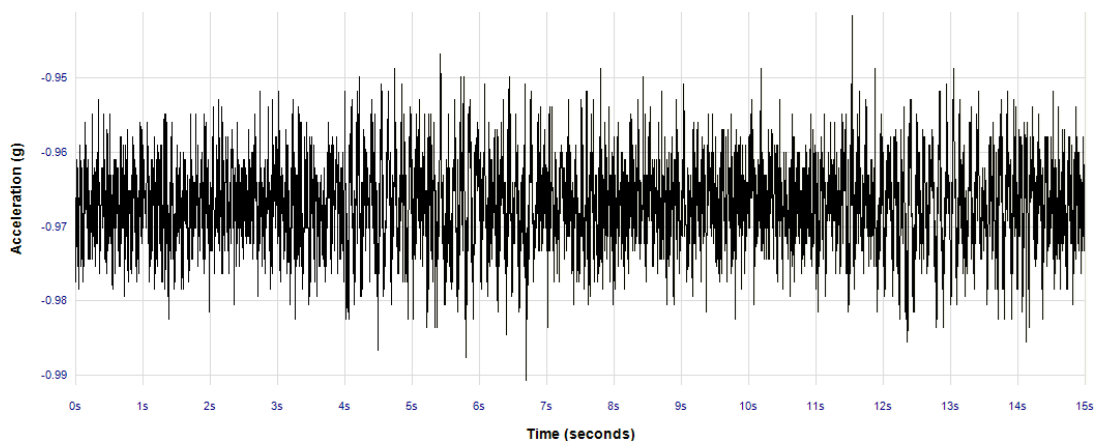


Figura 4-77 – Curva aceleração versus tempo na zona do balanço, para uma frequência de caminhar de 2,34 Hz, obtida a partir de leituras no ponto P03.

Analisando as Figura 4-20 que se referem a um teste de caminhada de 1,64 Hz e considerando-se que a relação de $a_{crit.}/a_{ruído}$ é menor do que 1,1, pode-se classificar o sistema de piso quanto à excitação da estrutura como imperceptível. Um comportamento semelhante foi verificado para um teste de caminhada de 2,05 Hz.

Diante destes resultados, pode-se afirmar que as frequências de caminhada de 1,64 Hz e 2,05 Hz não foram capazes de excitar os pontos P01 e P02, devido à taxa de amortecimento relativamente alta encontrada nestes pontos, onde a energia inserida pelo caminhar humano no sistema de piso é menor que a energia dissipada.

Analisando a curva de aceleração versus tempo na zona do balanço (P03) para uma frequência de caminhar de 2,34 Hz (Figura 4-77), pode-se observar que o caminhar humano foi capaz de excitar o ponto P03, provocando um aumento das amplitudes da aceleração. Considerando-se que a relação de $a_{crit.}/a_{ruído}$ é menor do que 1,61, pode-se classificar o sistema de piso quanto à excitação da estrutura como clara. Isto pode ser confirmado no espectro de resposta no domínio de frequência apresentado na Figura 4-78.

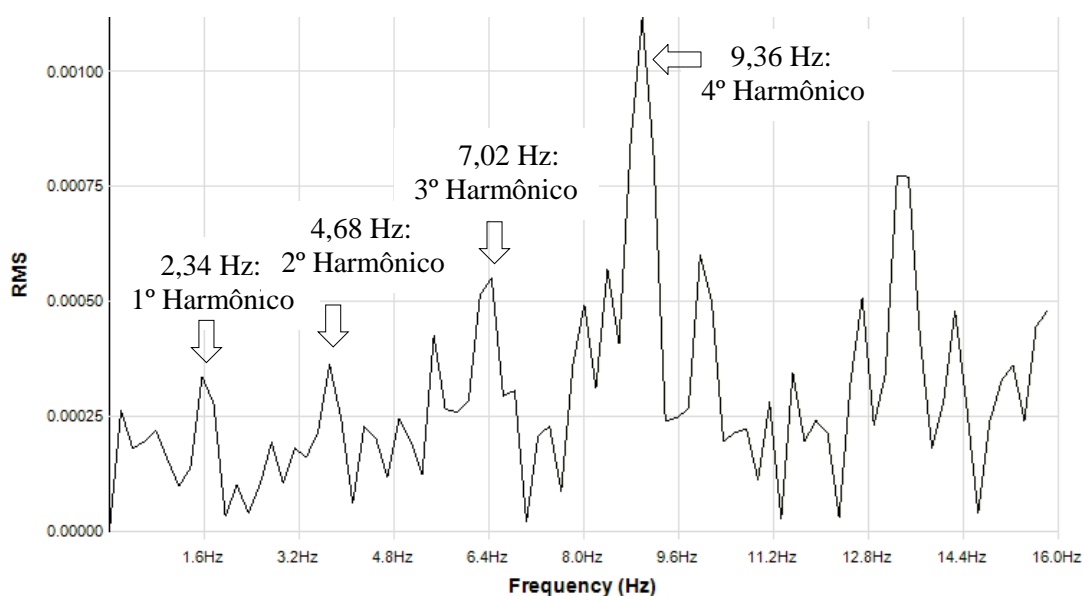


Figura 4-78 – Espectro de resposta no domínio da frequência para o acelerômetro P03 – AC 1169 para um teste de caminhada com frequência de 2,34 Hz na zona do balanço.

Para um teste de caminhada com frequência de 2,34 Hz na zona do balanço (P03) foi obtido um valor crítico da aceleração em r.m.s. de 1,38% g. Na Figura 4-79 a aceleração em r.m.s. obtida através dos ensaios experimentais para o walking test de uma pessoa é comparada com os valores limites das principais recomendações internacionais considerando o conforto humano às vibrações.

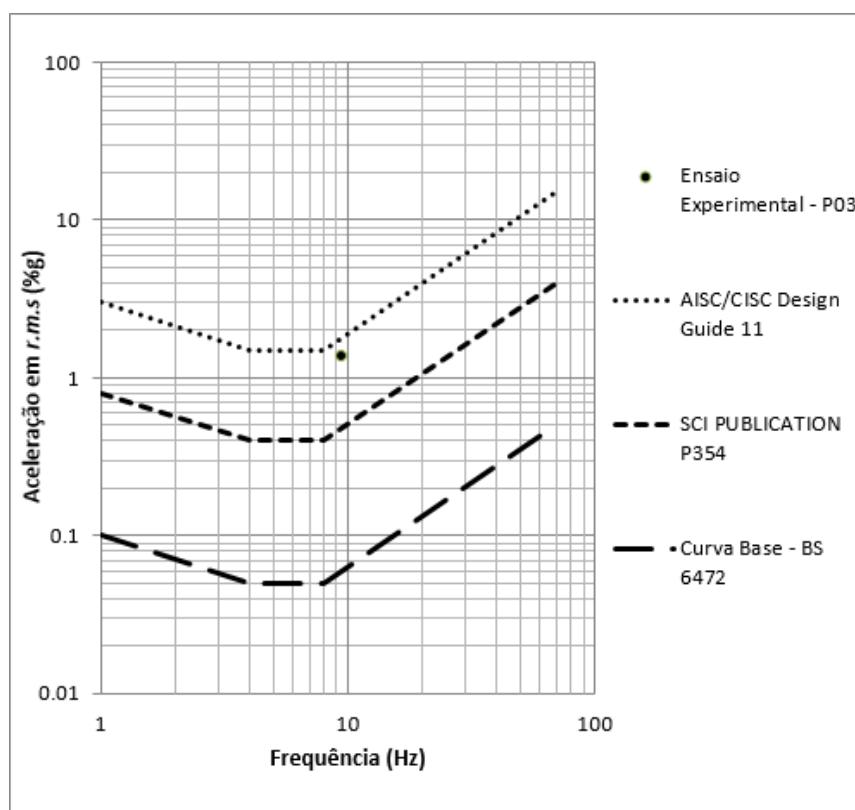


Figura 4-79 – Gráfico comparativo do valor crítico da aceleração em r.m.s. encontrada no ensaio experimental com os valores limites recomendados por critérios internacionais.

O AISC/CISC Design Guide 11 recomenda a multiplicação dos valores característicos da curva base – BS 6472 por um fator de 30 vezes para locais como salas de jantar e de dança. Já a SCI PUBLICATION P 354 não faz nenhum tipo de recomendação específica para estes tipos de ambientes e por isto decidiu-se considerar um fator de multiplicação de 8 vezes, que corresponde a escritórios de uso geral.

Observando-se a Figura 4-79, pode-se concluir que as acelerações induzidas pelo caminhar humano com frequência de 2,34 Hz estão abaixo dos limites estabelecidos pelo AISC/CISC Design Guide 11, que possui uma classificação específica para restaurantes. Já quando se compara valor crítico da aceleração em r.m.s. com as recomendações da SCI PUBLICATION P 354, pode-se observar que este valor supera os limites recomendados por esta publicação. No entanto, deve-se observar que esta publicação não se refere especificamente a restaurantes, assim como pode-se levar em conta que a amplitude de aceleração de 1,38% g foi determinada somente para o corredor de acesso aos sanitários, onde os usuários não permanecem durante longos períodos de tempo. Assim, apesar de classificar as vibrações induzidas pelo caminhar humano no sistema de piso como claras, dificilmente elas gerariam desconforto aos usuários.

5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

O presente trabalho de pesquisa foi planejado com o objetivo geral de realizar a análise experimental de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto pertencentes a edifícios de múltiplos andares e avaliar o desempenho dos mesmos considerando critérios de conforto humano.

Inicialmente foi estabelecida uma metodologia para realização da análise experimental de vibrações induzidas por atividades humanas, com auxílio do sistema de aquisição de dados GP2LxUSB da SENSR e dos programas computacionais SensView, MatLab e Excel, de acordo com recomendações de normas e guias de projeto nacionais e internacionais. Para realização dos ensaios experimentais foram avaliados diversos aspectos como o posicionamento dos acelerômetros, o posicionamento e tipo de impacto utilizados, o processamento da resposta com a utilização de filtros passa-banda, a determinação do amortecimento experimental e as características dos testes de caminhada, como sua frequência, número de ciclos e trajetória.

Em seguida foi selecionado um conjunto de sistemas de piso misto pertencentes a edifícios de múltiplos andares, situados na cidade de Viçosa, e definidas as estratégias para realização dos ensaios de impacto e de vibração forçada dos sistemas de piso selecionados. Com o processamento da resposta dos ensaios realizados foram determinadas as frequências naturais, o amortecimento experimental e acelerações induzidas pelo caminhar humano.

Os resultados obtidos por meio da análise experimental de vibrações foram avaliados em função das recomendações de normas e guias de projeto internacionais de vibrações considerando o conforto humano.

Com base nos resultados obtidos pode-se afirmar que os ensaios dinâmicos se mostraram eficazes pelo seu caráter não-destrutivo e permitiram a obtenção das frequências naturais e taxa de amortecimento das estruturas analisadas, como também a avaliação das vibrações induzidas pelo caminhar considerando os critérios de conforto humano.

Através deste trabalho fica evidente a importância da avaliação das acelerações, através dos ensaios de vibrações forçadas pelo caminhar humano, permitindo assim uma visão mais clara sobre o comportamento dinâmico dos sistemas de piso e a avaliação do conforto humano. Os valores das frequências fundamentais determinadas por meio dos ensaios de impacto foram ligeiramente superiores aos valores mínimos prescritos por critérios normativos, bem como em determinados casos foram obtidas acelerações superiores aos limites recomendados por critérios de conforto humano internacionais.

De modo geral, a determinação do amortecimento experimental pelo método do decremento logarítmico se mostrou satisfatória, levando à obtenção de valores de amortecimento dentro da faixa indicada na literatura técnica. O tratamento estatístico indicou que existe uma boa confiabilidade entre os resultados. A obtenção do amortecimento, às vezes pode se tornar imprecisa devido à magnitude da excitação causada à estrutura, já que se esta excitação for muito baixa pode não ser suficiente para produzir vibrações em toda a estrutura, dificultando a obtenção de valores representativos para a aplicação do método do decremento logarítmico.

Nos três casos estudados de rampas e/ou passarelas, as amplitudes de aceleração determinadas por meio dos testes de caminhada ultrapassaram ou se aproximaram muito dos limites recomendados pelos critérios internacionais de conforto humano. Em função disso, nota-se a importância de avaliar com mais rigor as vibrações sobre este tipo de estrutura, uma vez que as mesmas normalmente apresentam grandes vãos, baixa rigidez e baixa taxa de amortecimento.

Os sistemas de piso pertencentes aos edifícios institucionais do Campus de Viçosa da Universidade Federal de Viçosa apresentaram respostas satisfatórias quanto ao nível de vibrações induzido pelo caminhar humano. Entende-se que o bom comportamento frente às vibrações decorre de algumas características específicas identificadas nesses sistemas como os vãos livres entre 5,0 e 12,0 m, um número razoável de divisórias sobre o piso e uma maior taxa de consumo de aço devido à sobrecarga de utilização relativamente alta ($q = 3,0 \text{ kN/m}^2$). Essas características produzem sistemas de piso com frequência fundamental relativamente alta, quando comparada com a faixa da frequência do caminhar humano, e com valores de amortecimento intermediários. Nesses casos, dificilmente o caminhar humano irá produzir vibrações acima dos valores recomendados pelos critérios internacionais de conforto humano.

Com relação ao edifício comercial de um pavimento com mezanino estudado neste trabalho, pode-se afirmar que os níveis de vibrações induzidas nesta estrutura são perceptíveis, mas dificilmente gerariam desconforto aos usuários.

Em função dos estudos realizados, pode-se afirmar que, de um modo geral, o controle das vibrações em sistemas de piso misto que apresentam maiores vãos livres, menor rigidez estrutural e baixo amortecimento, é um fator de grande importância na atualidade. Estes tipos de estruturas tendem a apresentar uma elevada amplitude de aceleração induzida pelo caminhar humano, o que pode gerar um desconforto aos seus usuários.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento deste trabalho permitiu visualizar os seguintes temas como propostas para trabalhos futuros:

- realizar novas análises experimentais de vibração com um maior número de acelerômetros e mapeamento de todo o sistema de piso, com o objetivo de determinar os modos de vibração da estrutura;
- desenvolver novos ensaios experimentais de vibração forçada com auxílio de excitadores dinâmicos (shakers), com o objetivo de aplicar uma energia de

excitação no sistema de piso de forma controlada, tanto com relação à frequência, quanto à energia de excitação, possibilitando obter resultados mais precisos;

- determinar os valores das amplitudes de aceleração através do VDV (valores de dose de vibração) e o cálculo rigoroso das acelerações em r.m.s.;
- investigar o comportamento dinâmico da passarela do novo Laticínios da FUNARBE após a sua conclusão e comparar os novos resultados com os obtidos no presente trabalho. No momento dos ensaios dinâmicos realizados neste trabalho, as divisórias em painéis termo-isolantes ainda não tinham sido instaladas, o que fará com que várias características do sistema de piso sejam alteradas após a conclusão da obra, como massa, amortecimento e rigidez.

Referências Bibliográficas

ALLEN, D. E. **Building Vibration from human activities**. Concrete international: design an construction 12(6), pp 66-73. 1990-a.

ALLEN, D. E. **Floor vibration from aerobics**. Canadian journal of civil engineering, vol 17, No5. 1990-b.

ALMEIDA, R. R. **Análise de vibração em sistemas estruturais para pisos mistos com joists submetidos a atividades humanas rítmicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro. 2008.

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. 1986.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto De Estruturas De Concreto**. Rio de Janeiro. 2014.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. **Vibrations in Structures. Induced by Man and Machines**. International Association for Bridge and Structural Engineering – IABSE, Zürich. 1987.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. J.; DEISCHL, F.; EISENMANN, J.; FLOEGL, I.; HIRSCH, G. H.; KLEIN, G. H.; LANDE, G. J.; MAHREHOLTZ, O.; NATKE, H. G.; NUSSBAUMER, H.; PRETLOVE, A.; RAINER, J. H.; SAEMANN, E.; TEINBISSER, H. **Vibration problems in structures. Practical guidelines**. Birkhauser. 1995.

BALDONI JUNIOR, G. F.; PINHEIRO, M. A. S. **AVALIAÇÃO DA PERDA RELATIVA DE RIGIDEZ EM VIGAS DE CONCRETO**. XXXV Jornadas Su Americanas de engenharia Estrutural, Rio de Janeiro. 2012.

BATTISTA, R. C.; VARELA, W. D. **Medidas corretivas para vibrações de painéis contínuos de lajes de edifícios (2002)**. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, TRB0282, Brasília. 2007-a.

BATTISTA, R.; VARELA, W.; DOS SANTOS, E.; CORREA, W. **Avaliação e Solução dos Problemas de Vibrações na Estrutura Mista de um Pavimento do Salvador Shopping**. Relatório Técnico CL-225A/07, Controllato Ltda., Rio de Janeiro. 2007-b.

BATTISTA, R.; VARELA, W.; DOS SANTOS, E.; CORREA, W. **Execução das soluções para redução das vibrações na estrutura mista do piso L3 do Salvador Shopping**. Relatório Técnico CL-309A/08, Controllato Ltda., Rio de Janeiro. 2008.

BATTISTA, R.; VARELA, W.; CORREA, W.; CORTÁZIO, L. **Atenuação de vibrações induzidas na estrutura do edifício pelos bumper-cars do Game Station**. Relatório Técnico CL-505A/10, Controllato Ltda., Rio de Janeiro. 2010-a.

BATTISTA, R. C.; PFEIL, M. S. **Control of wind oscillations of Rio-Niterói Bridge**. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Structures and Buildings, v. 163, p. 87-96, Rio de Janeiro. 2010-b.

BATTISTA, R.; VARELA, W.; DOS SANTOS, E.; CORREA, W. **Controle de vibrações induzidas na estrutura mista de um centro comercial**. XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, Rio de Janeiro. 2012.

BERCZYNSKI, S. **Experimental Verification of Natural Vibration Models of Steel-concrete Composite Beams**. *Journal of Vibration Control*. 2010.

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

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

BRITO, J. L. V.; DOZ, G.N.; ÁVILA, S. M.; PIMENTEL, R. L.; BRASILIANO, A.; ROITMAN, N.; MAGLUTA, C.; BARBOSA, F. S.; NOGUEIRA, A. F. M. **Avaliação do comportamento dinâmico de passarela composta localizada em Brasília**. XXXIV Jornadas Sudamerinas de Ingeniería Estructural, San Juan. 2010.

CAMPOSINHOS, R. S.; NEVES, A. S. **Lajes Aligeradas com Vigotas Pré-Tensionadas**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto. 2005.

CASAS, J. R.; APARICIO, A.; RODELLAR, A.; BARBAT, A.. **Structural dynamic response: an useful non-destructive tool in assessing integrity of existing structures**. International Conference on Computational Engineering Science (ICCES-88), Orlando. 1988.

CEB. **RC Elements Under Cyclic Loading - State of Art Report. Bulletin d'Information 230**. Comité Euro-International du Béton, London. 1996.

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

COSSOLINO, L. C. A.; PEREIRA, A. H. **Informativo Técnico-Científico IT C04 – Amortecimento: classificação e métodos de determinação**. ATPC Engenharia Física, São Carlos. 2010.

COSTA, Y. C. V. **Análise paramétrica de vibrações em laje nervurada devido às ações humanas**. Dissertação (mestrado em engenharia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

DEBONA, G. L. **Modelagem do comportamento dinâmico de passarelas tubulares em aço e mistas (aço-concreto)**. UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

DIÓGENES, H. J. F. **Análise tipológica de elementos e sistemas construtivos pré-moldados de concreto do ponto de vista de sensibilidade a vibrações em serviço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010.

DOEBLING, S. W.; FARRAR, C.; PRIME, M.; SHEVITZ, D. **Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review**. Los Alamos, National Laboratory - University of California, California. 1996.

EN 1990: 2002 - CEN (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION): 1992. **Eurocode 0 - Basis of structural Design**. 2002.

FARRAR, C.; DUFFEY, A.; CORNWELL, P.; DOEBLING, S. **Excitation Methods for Bridge Structures. Proceedings of International Modal Analysis Conference**. Kissimmee, FL. 1999.

FIGUEIREDO, F. P. **Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

GALAMBOS, T. V. **Recent Research and Design Developments in Steel and Composite Steel-Concrete Structures in USA**. P. 289-303. Journal of Constructional Steel Research. 2000.

GARAYGORDÓBIL, J. C. A. **Dynamic Assessment of Structural Building Components**. Ph.D. Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2003.

GOMES, P. F. **Curso de Estatística Experimental**. 15. Ed. Fealq, Piracicaba. 2009.

HANES, R. M. **Human sensitivity to whole-body vibration in urban transportation systems: a literature review**. Transportation Programs Report, APL/JHU TPR 004. Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, Maryland. 1970.

HICKS, S. J.; LAWSON, R. M.; KING, C. M. **Design Guide for Vibrations of Long Span Composite Floors. Document RT852 - Version 01**. Ascot: The Steel Construction Institute. 2000.

HIVOSS - HUMAN INDUCED VIBRATIONS OF STEEL STRUCTURES. **Vibrações em Pavimentos: Recomendações Técnicas de Projeto**. RFS2-CT-2007-00033. 2008.

HOLMLUND, P.; LUNSTRÖM, R. **Mechanical impedance of the human body in the horizontal direction**. Journal of Sound and Vibration. 1998.

HOMEM, S. M. **Control of Human Induced Floor Vibrations**. Massachusetts Institute of Technology. 2007.

[http://pt.scribd.com/doc/58757911/DECREMENTO LOGARITMICO DA AMPLITUDE](http://pt.scribd.com/doc/58757911/DECREMENTO_LOGARITMICO_DA_AMPLITUDE), acesso em 13/06/13.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 2631-1 - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: Human exposure to continuous and shock- induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz)**. 1985.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 2631-1 - Evaluation of human exposure to whole-body vibration: General requirements**. 1997.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 2631-2 - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Human exposure to continuous and shock- induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz)**. 1989.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 2631-2 - Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz)**. 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 5349 - Mechanical Vibration: Guidelines of the Measurement and Assessment of Human Exposure to Hand Transmitted Vibration**. 1986.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 10137 - Bases for design of structures – Serviceability of buildings against vibration**. 2007.

JOHANSSON, P. **Vibration of Hollow Core Concrete Elements Induced by Walking**, (Master's Dissertation). Department of Construction Sciences, Lund University. Lund. 2009.

JUNGES, P. **Análise de vibrações de uma laje mista de concreto e perfis PRFV induzidas por atividades humanas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010.

LAZAN, B. J. **Damping of Materials and Members in Structural Mechanics**. Oxford, USA: Pergamon Press. 1968.

LIMA, M. D. H. **Controle de Vibrações Induzidas em uma Laje de Academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília. 2007.

MARGARIDO, G. R. **Metodologias para a avaliação dos níveis de vibração em estruturas do ponto de vista do conforto humano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Estruturas). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2013.

MENDES, P.; OLIVEIRA, S. **Análise dinâmica de estruturas - utilização integrada de modelos de identificação modal e modelos de elementos finitos**. Lisboa. 2008.

- MIDDLETON, C. J.; BROWNJOHN, J. M. W. **Response of frequency floors: A literature review**. Departamento de Engenharia Civil e Estrutural, Universidade de Sheffield, Reino Unido. 2008.
- MOUTINHO, C. M. R. **Controlo Passivo e Activo de Vibrações em Pontes de Peões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 1998.
- MOUTINHO, C. M. R. **Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Porto, Porto. 2007.
- MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E. **Floor vibrations due to human activity**. Steel design guide series nº 11, American Institute of Steel Construction, AISC. Chicago. 2003.
- NÓBREGA, P. G. B. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, São Carlos. 2004.
- PAVIC, A.; REYNOLDS, P. **Vibration Serviceability of Long-Span Concrete Building Floors. Part 1: Review of Background Information.**, 34, n. 3, The Shock and Vibration Digest. 2002-a.
- PAVIC, A.; REYNOLDS, P. **Vibration Serviceability of Long-Span Concrete Building Floors. Part 2: Review of Mathematical Modelling Approaches**. The Shock and Vibration Digest. 2002-b.
- PEETERS, B. **System Identification and Damage in Civil Engineering**. Faculteit Toegepaste Wetenschappen. 2000.
- PEETERS, B.; DE ROECK, G. **Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering**. Inverse Problems in Engineering, 8[1], 47-74. 2000.
- PERALTA, M. H.; ERCOLI, N. L.; PICO, L. O.; MALFA, S. L.; CORREA, L. **COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PUENTES DE HORMIGÓN CON**. XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, San Juan. 2010.
- SALAWU, O. S.; WILLIAMS, C. **Bridge Assessment Using Forced-Vibration Testing**. Journal of Structural Engineering, 121[2], 161–173. 1995.
- SANTOS, N. F. **Estudo e controlo de vibrações em lajes de edifícios**. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2009.
- SCI PUBLICATION 076. **Design Guide on the Vibration of Floors**. 1989.
- SCI PUBLICATION P354. **Design of Floors for Vibration: A New Approach**. 2009.
- SILVA, V. C.; MAGLUTA, C.; VIERO, P. F.; GONÇAVES, B. P. **Análise do comportamento dinâmico de placas submetidas a esforços axiais**. 2012.

SILVA, C. W. **Vibration Damping, control, and design.** Vancouver, Canada: Taylor & Francis Group. 2007.

THE STATIONERY OFFICE. **Health Technical Memorandum 08-01: Acoustics.** 2008.

TREDGOLD, T. **Elementary Principles of Carpentry.** 2^a ED, Publisher unknown. 1828.

VARELA, W. D. **Modelo Teórico-Experimental para análise de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios.** Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2004.

ZÚÑIGA, J. E. V. **Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro. 2011.