



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

José Eduardo Villarroel Zúñiga

**Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela  
tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano**

Rio de Janeiro  
2011

José Eduardo Villarroel Zúñiga

**Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista,  
aço-concreto, submetida ao caminhar humano**

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



Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro

2011

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

Z95	<p>Zúñiga, Eduardo Villarroel. Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano / José Eduardo Villarroel Zúñiga. - 2011. 187f.</p> <p>Orientador: José Guilherme Santos da Silva. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.</p> <p>1. Engenharia Civil. 2. Estruturas mistas de aço e concreto – Dissertação. 3. Modelagem computacional - Dissertação. 4. Passarela para pedestre – Dissertação. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 624.016</p>
-----	---

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

---

Assinatura

---

Data

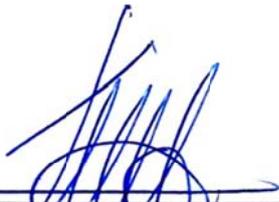
José Eduardo Villarroel Zúñiga

**Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista,  
aço-concreto, submetida ao caminhar humano**

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

Aprovado em: 19 de julho de 2011.

Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva (Orientador)  
Faculdade de Engenharia - UERJ



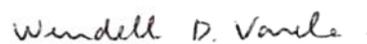
---

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



---

Prof. Dr. Evandro da Silveira Goulart  
Faculdade de Engenharia - UERJ



---

Prof. Dr. Wendell Diniz Varela  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Rio de Janeiro

2011

## DEDICATÓRIA

A Deus, por ter me amparado e conduzido durante estes anos, a minha família pelo apoio, paciência e compreensão.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor José Guilherme, orientador e amigo, pela compreensão, ensinamentos e constantes incentivos ao estudo e pesquisa, fundamentais para meu crescimento acadêmico.

Aos professores do PGECIV, por todo o conhecimento transmitido ao longo do curso de pós-graduação, no programa de mestrado.

À UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ por ter proporcionado a oportunidade.

Minha gratidão aos colegas de pós-graduação são tantos os que me auxiliaram na caminhada e na busca conjunta do conhecimento acadêmico, além do incentivo mútuo e amizade.

Ao professor José Guilherme e aos colegas que participaram da análise experimental sem os quais não teria sido possível.

Ao pessoal da Concremat, técnicos Márcio e Henrique fundamentais no ensaio experimental, aos engenheiros Gustavo e Rodrigo pela valiosa colaboração na análise dos resultados e a Graciela e David na pesquisa de informações e formatação do documento.

Ao Engenheiro Ricardo Takashi Tanaka, diretor da LYNX Tecnologia, pelo auxílio na execução do ensaio experimental e durante a análise dos resultados.

Aos colegas e amigos Antonio Ahi e Gisele pelo incentivo recebido.

A minha família, minha filha Flávia que sempre acreditou que o pai poderia fazer possível o sonho do mestrado.

Aos meus pais, que apesar da distância, sempre acompanharam com muito interesse e orgulho o desenvolvimento desta etapa.

A todos que de forma silenciosa de alguma maneira, contribuíram e participaram desta longa e renovadora jornada.

E, principalmente a Deus, por me propiciar saúde, serenidade e persistência.

A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita.

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

ZÚÑIGA, José Eduardo Villarroel. *Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano*. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

Este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal o desenvolvimento de investigação experimental dinâmica sobre estrutura real de uma passarela tubular mista aço-concreto. O sistema estrutural objeto deste trabalho corresponde a uma passarela composta por três vãos (32,5m, 17,5m e 20,0m, respectivamente) e dois balanços (7,50m e 5,0m, respectivamente), com comprimento total de 82,5m. A passarela com estrutura contínua de aço com as ligações soldadas se apoia em quatro pórticos também de aço. Estruturalmente está constituída por duas treliças planas que se interligam através de contraventamentos horizontais fixados na corda superior e inferior da treliça e lajes de concreto, formando um sistema misto com interação completa. A estrutura está submetida correntemente à travessia de pedestres e ciclistas. Testes experimentais foram realizados sobre o sistema estrutural e confrontados com resultados numéricos. Para a modelagem numérica do sistema são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS. Os resultados experimentais são analisados de acordo com a metodologia desenvolvida, sendo realizada análise modal experimental para a determinação das propriedades dinâmicas: frequências, modos e taxa de amortecimento, enquanto que os resultados da estrutura, em termos de aceleração de pico, são comparados com os valores limites propostos por diversos autores, normas e recomendações de projeto, para uma avaliação do desempenho da estrutura em relação a vibração quando solicitada pelo caminhar dos pedestres no que diz respeito a critério para conforto humano.

Palavras-chave: Análise dinâmica; Passarelas de pedestres; Estrutura tubular mista (aço-concreto); Análise modal experimental; Instrumentação dinâmica; Modelagem computacional.

## ABSTRACT

This research has as main objective the development of a dynamical experimental investigation of a real structure – a tubular composite steel-concrete footbridge. The structural system of this study corresponds to a footbridge composed by three spans (32,5m, 17,5m and 20,0m, respectively) and two overhangs (7,50m and 5,0m, respectively), spanning 82,5m. The investigated structural model is composed by a continuous tubular steel structure with welded connections supported by four double file steel columns. It is structurally composed of two plane trusses are intertwined by horizontal bracing set in upper and lower chord of the truss and slabs of concrete, forming effective composite with complete interaction. This structure is currently submitted to pedestrians and cyclists crossing. Experimental tests were carried out on the structural system and with the numerical results. For the numerical modeling, discretization techniques via finite element method were applied, based on the ANSYS program. The experimental results were analyzed according to the developed methodology, and a modal analysis was implemented to determine the dynamical properties: frequencies, mode shapes and modal damping ratio, while the structure results in terms of peak acceleration, was obtained and compared to the limit values proposed by several authors and design recommendations, for the structure performance by pedestrian walking regarding the acceptance criteria for human comfort.

Keywords: Dynamic analysis; Pedestrian footbridges; Composite (steel-concrete) tubular footbridge; Modal analysis; Computational modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Vista da Passarela do Milênio. Fonte: Wikipedia	24
Figura 1.2 -	Passarela Toda Park Bridge	25
Figura 1.3 -	Passarela de Pedestres da Estação Metrô Cidade Nova	26
Figura 1.4 -	Escala modificada de Reither-Meister de sensibilidade humana a vibração	31
Figura 1.5 -	Comparação da Força do passo no tempo de quatro pessoas diferentes - Ohlsson, S.V	36
Figura 2.1-	Caminhar Humano - Força vertical, lateral e longitudinal em N x s (Zivanovic et. al, 2005)	39
Figura 2.2 -	Caminhar Humano - Representação da força vertical, com dois picos e uma depressão em N x s (Harper et.al)	40
Figura 2.3 -	Caminhar Humano - Distribuição de forças em uma estrutura provocada por uma pessoa caminhando (a) ou correndo (b) (Zivanovic et al., 2005)	41
Figura 2.4 -	Ensaio fotogramétrico para descrição do caminhar humano	42
Figura 2.5 -	Medidas de distância e tempo de um ciclo de caminhar	43
Figura 2.6 -	Geometria simplificada de uma passada	44
Figura 2.7 -	Freqüência do passo para caminhar normal Matsumoto (1972)	44
Figura 2.8 -	Componentes da série de Fourier da função representativa da reação do piso	46
Figura 2.9 -	Coefficiente Dinâmico Médio obtido para caminhar por Rainer, Pernica e Allen	47
Figura 2.10 -	Caminhar Humano - Força de contato de um passo e reação do piso (apud Ohlsson 1982)	50
Figura 2.11 -	Comparação entre a função proposta por Varela para o caminhar e os resultados obtidos por Ohlsson	52
Figura 2.12 -	Função de carregamento para uma pessoa caminhando (CEB, 1991)	53
Figura 2.13 -	Função de carregamento, de caminhar lento até o correr (Zivanovic et al, 2005)	54
Figura 2.14 -	Correlação dos parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr dada por Wheeler (1982)	55
Figura 2.15 -	Função de carregamento para os movimentos de caminhar e correr (Wheeler, 1982)	56
Figura 3.1 -	Fator de resposta dinâmica em função do comprimento do vão e do coeficiente de amortecimento da passarela	61
Figura 3.2 -	Relação entre o fator de $k_{vert}$ e a primeira freqüência natural da passarela na direção vertical $f_{1,vert}$	64

Figura 3.3 -	Curva de tendência que relaciona o vão livre com a primeira freqüência para passarela de diferentes materiais	66
Figura 3.4 -	Gráfico de correlação entre a resposta da passarela a um pedestre caminhando para diferentes valores de decremento logarítmico $\delta$	67
Figura 3.5 -	Gráfico de correlação entre resposta em aceleração e a rigidez de passarela excitada por um pedestre caminhando	68
Figura 3.6 -	Curva básica para vibração na direção vertical – ISO 2631/2-2 (1989)	70
Figura 3.7 -	Curva básica para vibração na direção lateral – ISO 2631/2-2 (1989)	71
Figura 3.8 -	Aceleração de pico em % g x freqüência em Hz recomendada para conforto humano em vibrações devida a atividade humana, ISO 2631/2	77
Figura 3.9 -	Vibração transiente típica do teste do impacto sobre os calcanhares	81
Figura 3.10 -	Correlação entre o percentual de amortecimento crítico e o número de ciclos para $a_n = 0,8 \cdot a_0$	81
Figura 3.11 -	Diagrama de vibração limite em termos de aceleração de pico em função da correlação entre o percentual de amortecimento crítico e o número de ciclos para	82
Figura 3.12 -	Comparativo entre $a_n$ critérios normativos – força na direção vertical $m/s^2 \times Hz$	85
Figura 3.13 -	Comparativo entre os critérios normativos – força na direção transversal $m/s^2 \times Hz$	85
Figura 4.1 -	Passarela sobre a Avenida Oswaldo Aranha	87
Figura 4.2 -	Vista lateral da Passarela	88
Figura 4.3 -	Vista lateral da passarela e da rampa que da acesso à estação São Cristóvão	89
Figura 4.4 -	Encontro da passarela com a plataforma do Metrô	89
Figura 4.5 -	Vista parcial do interior da passarela com detalhes das treliças	90
Figura 4.6 -	Detalhe do nó na corda superior	90
Figura 4.7 -	Detalhe dos pórticos e a vista inferior do tabuleiro da passarela	91
Figura 4.8 -	Vista do encontro da viga inferior do tabuleiro da passarela	91
Figura 4.9 -	Passarela Oswaldo Aranha- Vista lateral e planta	93
Figura 4.10 -	Passarela Oswaldo Aranha - Cortes e Detalhes	94
Figura 5.1 -	Análise Teórica das Vibrações de um Sistema	97
Figura 5.2 -	Análise Experimental das Vibrações de um Sistema	98

Figura 5.3 -	Sinais de excitação: (a) aleatório; (b) aleatório impulsivo (c) “chirp”	101
Figura 5.4 -	Conceito da Transformada Discreta de Fourier - DFT (Nóbrega 2004)	103
Figura 5.5 -	Conversão de sinais contínuo do domínio do tempo para o da frequência (baseada em Ewins - 2000)	103
Figura 5.6 -	Conversão de sinais discretos do domínio do tempo para o da frequência (baseada em Ewins)	104
Figura 5.7 -	Método da Seleção de Picos “Peak – Picking” para determinação do Coeficiente de Amortecimento Modal	106
Figura 5.8 -	Gráfico da resposta subamortecida – deslocamento x tempo	106
Figura 6.1 -	1º Modo longitudinal – freq = 1,61Hz	111
Figura 6.2 -	2º Modo transversal – freq = 2,24 Hz	112
Figura 6.3 -	3º Modo transversal com flexão dos pórticos – freq = 2,47 Hz	112
Figura 6.4 -	4º Modo transversal com flexão dos pórticos – freq = 3,35 Hz	113
Figura 6.5 -	5º Modo transversal com tração do tabuleiro – freq = 4,46 Hz	113
Figura 6.6 -	6º Modo e 1º modo de flexão – freq = 5.68 Hz	114
Figura 6.7 -	7º Modo e 2º de flexão com torção – freq = 6,66Hz	114
Figura 6.8 -	Passarela Oswaldo Aranha - Localização dos Acelerômetros	115
Figura 6.9 -	Transdutor de Aceleração Capacitivo Uniaxial	116
Figura 6.10 -	Características geométricas do transdutor de aceleração 2210	116
Figura 6.11 e 6.12 -	Detalhamento do Sistema ADs 2000 da LYNX Ltda	117
Figura 6.13 e 6.14 -	Posicionamento dos sensores a ambos lados do tabuleiro da passarela e detalhe da instalação dos sensores	118
Figura 6.15 e 6.16 -	Detalhe dos posicionamento dos sensores na direção transversal e na vertical	118
Figura 6.17 e 6.18 -	Instalação do acelerômetro na direção longitudinal e detalhe na direção transversal	119
Figura 6.19 -	Excitação livre da passarela observa-se a massa de 57 Kg na posição anterior à queda.	120
Figura 6.20 -	Excitação livre da passarela observa-se a massa depois do impacto.	121
Figura 6.21 -	Detalhe da excitação dinâmica induzida, por uma pessoa com a passarela totalmente livre de outros pedestres	122
Figura 6.22 -	Detalhe excitação dinâmica induzida por duas pessoas	122
Figura 6.23 -	Detalhe excitação dinâmica induzida por três pessoas	123
Figura 6.24 -	Detalhe da excitação dinâmica induzida por uma pessoa correndo	123

Figura 6.25 -	Detalhe da excitação induzida por duas pessoas correndo com a passarela totalmente livre	124
Figura 7.1 -	Vibração livre - Resposta dinâmica da estrutura na direção vertical Acelerômetro AC 03 em $m/s^2$	125
Figura 7.2 -	Vibração livre - Resposta dinâmica da estrutura na direção transversal - Acelerômetro AC 04 em $m/s^2$	127
Figura 7.3 -	Vibração livre - Resposta dinâmica da estrutura na direção longitudinal - Acelerômetro AC 04 em $m/s^2$	127
Figura 7.4 -	Vibração livre - Espectro de frequência na direção vertical em $m/s^2 \times Hz$	129
Figura 7.5 -	Vibração livre - Espectro de frequência na direção transversal em $m/s^2 \times Hz$	130
Figura 7.6 -	Vibração livre - Espectro de frequência na direção longitudinal em $m/s^2 \times Hz$	131
Figura 7.7 -	Sinais temporais de aceleração de vibração livre na direção vertical após a filtragem na banda de 4 a 6 Hz	133
Figura 7.8 -	Sinais temporais de aceleração de vibração livre na direção transversal após a filtragem na banda de 2 a 3 Hz	133
Figura 7.9 -	Sinais temporais de aceleração de vibração livre na direção longitudinal após a filtragem na banda de 1 a 2 Hz	133
Figura 7.10 -	Gráficos de Aceleração x tempo com a indicação da escolha de regiões homogêneas	136
Figura 7.11 -	Gráficos de deslocamento x tempo, para a direção transversal.	137
Figura 7.12 -	Resposta em aceleração x tempo, para a direção vertical – AC 01 e AC 02	138
Figura 7.13 -	Resposta da passarela, em aceleração x tempo para a direção longitudinal quando solicitada pelo Caminhar Lento de 1 Pessoa - AC 06 e AC 06.	138
Figura 7.14-	Resposta da passarela, em aceleração x tempo para a direção transversal quando solicitada pelo Caminhar Lento de 1 Pessoa - AC 04 e AC 05.	139
Figura 7.15 -	Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção vertical quando solicitada pelo Caminhar Normal de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04.	140
Figura 7.16-	Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção longitudinal quando solicitada pelo Caminhar Normal de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04.	140
Figura 7.17 -	Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção transversal quando solicitada pelo Caminhar Normal de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04.	141
Figura 7.18 -	Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção vertical quando solicitada pelo Caminhar Rápido de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04	142

Figura 7.19 –	Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção transversal quando solicitada pelo Caminhar Rápido de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04	142
Figura 7.20 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para a carga dinâmica aplicada por 1 Pessoa Correndo – AC 02 e AC 03.	143
Figura 7.21 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para a carga dinâmica aplicada por 1 Pessoa Correndo – AC 02 e AC 03.	144
Figura 7.22 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção longitudinal para a carga dinâmica aplicada por 1 Pessoa Correndo – AC 02 e AC 03.	144
Figura 7.23 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção vertical para o Caminhar Lento de 2 Pessoas – AC 03 e AC 04	146
Figura 7.24 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Lento de 2 Pessoas – AC 03 e AC 04	146
Figura 7.25 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 2 pessoas – AC 03 e AC 04	147
Figura 7.26 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Normal de 2 pessoas – AC 03 e AC 04	147
Figura 7.27 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Normal de 2 pessoas – AC 03 e AC 04	148
Figura 7.28 –	Resposta em aceleração temporal para a direção Vertical para o Caminhar Rápido de 2 Pessoas.	149
Figura 7.29 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para a carga dinâmica aplicada por 2 Pessoas Correndo – AC 03 e AC 04.	150
Figura 7.30 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para a carga dinâmica aplicada por 2 Pessoas Correndo– AC 02 e AC 03.	150
Figura 7.31 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção vertical para o Caminhar Lento de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	152
Figura 7.32 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para o Caminhar Lento de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	152
Figura 7.33 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para o Caminhar Lento de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04	152
Figura 7.34 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção vertical para o Caminhar Normal de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	153
Figura 7.35 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para o Caminhar Normal de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	154

Figura 7.36 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção longitudinal para o Caminhar Normal de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	154
Figura 7.37 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Rápido de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	155
Figura 7.38 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Rápido de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	155
Figura 7.39 –	Resposta em aceleração x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Rápido de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.	156
Figura 7.40 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Lento de 1 Pessoa.	160
Figura 7.41 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.	160
Figura 7.42 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Rápido de 1 Pessoa.	160
Figura 7.43 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para 1 Pessoa Correndo.	161
Figura 7.44 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para o para o Caminhar Lento de 1 Pessoa.	161
Figura 7.45 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para o para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.	162
Figura 7.46 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para o para o Caminhar Rápido de 1 Pessoa.	162
Figura 7.47 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para 1 Pessoa Correndo.	162
Figura 7.48 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Lento de 1 Pessoa.	163
Figura 7.49 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.	163
Figura 7.50 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Longitudinal para 1 Pessoa Correndo.	163
Figura 7.51 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.	165
Figura 7.52 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 2 Pessoas.	165
Figura 7.53 –	Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 3 Pessoas.	165

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 -	Coeficiente Dinâmico	47
Tabela 1.2 -	Coeficientes para resolução da transformada de Fourier sugeridos pelo CEB (1991)	54
Tabela 1.3 -	Fator de Carga Dinâmica- DFL correlacionada com o tipo de atividade e a direção da componente de força - Zivanovic, Pavic & Reynolds	56
Tabela 2.1 -	Fator $K_{BS}$ em função da configuração da passarela	61
Tabela 2.2 -	Aceleração máxima aceitável, EM 1990	62
Tabela 2.3 -	Valores da taxa de amortecimento $\xi$ , para passarelas de pedestre CEB (1991)	68
Tabela 2.4 -	Acelerações limites de outras normas e admitidos pelo CEB (1991)	69
Tabela 2.5 -	Valores empíricos para a constante $C_F$ para diferentes tipos de vibração – DIN 4150- 2 (1999)	74
Tabela 2.6 -	Valores para avaliação da exposição humana à vibração em edificações habitacionais e espaços similares	75
Tabela 2.7 -	Freqüências da excitação, $f_p$ e coeficientes dinâmicos, $\alpha_i$ associados às atividades humanas, Murray et al.	77
Tabela 3.1 -	Propriedades das seções da passarela	95
Tabela 3.2 -	Propriedades dos materiais da passarela	96
Tabela 6.1 -	Valores mínimos e máximos para a resposta da estrutura em $m/s^2$	126
Tabela 6.2 -	Valores das freqüências naturais obtidas experimentalmente e obtidas por método numérico.	132
Tabela 6.3 –	Valores das taxas de amortecimento modal obtidos para a Passarela Oswaldo Aranha	134
Tabela 6.4 –	Características do Caminhar Humano ( Bachmann e Ammann, 1987)	136
Tabela 6.5 –	Valores da resposta em aceleração quando submetida ao Caminhar Lento de 01 pessoa.	139
Tabela 6.6 -	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ quando submetida ao Caminhar Normal de 01 pessoa.	141
Tabela 6.7 -	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ quando submetida ao Caminhar Rápido de 01 Pessoa.	143
Tabela 6.8 –	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ quando submetida à carga dinâmica de 01 Pessoa correndo.	145
Tabela 6.9 –	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ quando submetida à carga dinâmica do Caminhar Lento de 2 Pessoas.	146

Tabela 6.10 –	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ de passarela submetida ao Caminhar Normal de 2 Pessoas	148
Tabela 6.11 -	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ de passarela submetida ao Caminhar Rápido de 2 Pessoas	149
Tabela 6.12 –	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ de passarela submetida à carga dinâmica de 2 Pessoas correndo	150
Tabela 6.13 -	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ de passarela submetida ao Caminhar Lento de 3 Pessoas	153
Tabela 6.14 –	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ de passarela submetida ao Caminhar Normal de 3 Pessoas	154
Tabela 6.15 –	Valores da resposta em aceleração em $m/s^2$ de passarela submetida ao Caminhar Rápido de 3 Pessoas	156
Tabela 6.16 –	Valores da frequência do passo segundo Bachmann e Ammann e as obtidas de forma experimental	157
Tabela 6.17 –	Relação de Valores da frequência do passo segundo Bachmann, a vertical experimental e a transversal	158
Tabela 6.18 –	Valores de deslocamento na direção vertical da estrutura submetida à solicitação de 1 Pessoa para diferentes velocidades de passo.	159
Tabela 6.19 –	Valores de deslocamento na direção transversal da estrutura submetida à solicitação de 1 Pessoa para diferentes velocidades de passo.	161
Tabela 6.20 –	Valores em deslocamento na direção longitudinal da estrutura submetida à solicitação de 1 Pessoa para diferentes velocidades de passo	163
Tabela 6.21 –	Valores em deslocamento em (m) nas três direções para estrutura submetida à solicitação de 1 a 3 Pessoas Caminhando com Passo Normal	164
Tabela 6.22 –	Resumo dos limites de frequência e aceleração estabelecidos pelos Códigos e Normas revisadas	167
Tabela 6.23 –	Frequências naturais obtidas experimentalmente e por método numérico.	168
Tabela 6.24 –	Aceleração em $m/s^2$ na direção vertical para 2 Pessoas Correndo	168
Tabela 6.25 –	Aceleração em $m/s^2$ na direção transversal para 2 Pessoas Correndo	169
Tabela 6.26 -	Deslocamentos em (m) na direção vertical para 1 Pessoa Correndo	171

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$	freqüência natural própria da estrutura
$f_{crit}$	freqüência crítica
$\alpha_i$	coeficiente dinâmico para força harmônica
$f_p$	freqüência fundamental do passo ao caminhar
$t$	tempo
$\varnothing_i$	ângulo de fase para o harmônico.
$F(t)$	carga induzida por um único pedestre
$V$	velocidade
$\Lambda$	fluxo de pedestres sobre a extensão da passarela
$k_i$	fator de distribuição espacial da carga na passarela
$P_s$	probabilidade de sincronização em função da aceleração.
$P_o$	peso estático da pessoa
$T_p$	período do passo
$\varnothing_i$	ângulo de fase.
$\Delta_i$	coeficiente de Fourier para o harmônico $i$
$a_v$	aceleração vertical
$a_{lat}$	aceleração lateral
$g$	aceleração de gravidade
$K_{BS}$	fator de configuração que depende do número de vãos,
$\Psi$	fator de resposta dinâmica
$L$	vão
$M$	metro
$s$	segundo
$\rho_{ap}$	densidade aparente
$\xi$	taxa de amortecimento
$b$	largura da passarela
$t$	tempo do carregamento
$\delta$	decremento logarítmico

$C_f$	constante empírica para diferentes tipos de vibração
$G$	aceleração de gravidade
$\Omega$	peso do piso
$I_T$	momento de inércia
$\mu$	coeficiente de Poisson
$M$	matriz de massa
$K$	matriz de rigidez
$C$	matriz de amortecimento
$\omega$	freqüências naturais
$\Phi$	modos de vibração
$\xi$	fator de amortecimento modal
$h_{(t)}$	time history

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
PUC – Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	American Institute of Steel Construction
BS	British Standards
CEB	Comitê Euro-international du Beton
EUROCODE	European Committee For Standardization
ISO	International Organization for Standardization
DIN	German Institute for Standardization
NBC	National Building Code of Canada
OHBDC	Ontario Highway Bridge Design Code
CGP	Coordenadoria Geral de Projetos da Prefeitura RJ
DLF	Fator de Carga Dinâmica
MEF	Método dos Elementos Finitos
FRF	Funções de Resposta em Frequência
FRI	Funções de Resposta ao Impulso
DFT	Transformada Discreta de Fourier
AC	Acelerômetro
Hz	Hertz – Medida de frequência, corresponde ao número de eventos que ocorrem em um segundo
RMS	Valor quadrático médio
ANSYS	Programa computacional de simulação para Engenharia

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	22
1	<b>CARREGAMENTO DINÂMICO INDUZIDO POR PEDESTRES AO CAMINHAR</b> .....	38
1.1	<b>Introdução</b> .....	38
1.2	<b>Estudos realizados do carregamento induzido</b> .....	40
1.3	<b>Modelo do carregamento periódico</b> .....	45
1.3.1	<u>Para uma Pessoa</u> .....	45
1.3.2	<u>De Multidão ou para pequenos grupos de pessoas</u> .....	47
1.3.3	<u>Carregamento considerando o Impacto do Calcanhar</u> .....	49
1.3.4	<u>Modelo analítico recomendado pelo CEB</u> .....	52
1.3.5	<u>Modelo analítico de Wheeler</u> .....	56
1.3.6	<u>Fatores de Carga para Diversos Modelos de Força</u> .....	57
2	<b>NORMAS DE PROJETO</b> .....	60
2.1	<b>Introdução</b> .....	60
2.2	<b>British Standard 5400</b> .....	60
2.3	<b>European Committee for Standardization - EUROCODE</b> .....	63
2.4	<b>Comité Euro-International du Béton - CEB (1991)</b> .....	67
2.5	<b>International Organization for Standardization-ISO 10137</b> .....	70
2.6	<b>Norma DIN 4150 - 2</b> .....	74
2.7	<b>Guia prático - Floor Vibration due to Human Activity – AISC</b> .....	77
2.8	<b>Canadian Standards Association</b> .....	80
2.9	<b>Resumo dos critérios normativos</b> .....	85
3	<b>MODELO ESTRUTURAL DA PASSARELA EM ESTUDO</b> .....	88
3.1	<b>Descrição da estrutura</b> .....	89
3.2	<b>Detalhamento da geometria da estrutura</b> .....	93
3.3	<b>Propriedades das seções da passarela e dos materiais</b> .....	96
3.3.1	<u>Seções da Passarela</u> .....	96
3.3.2	<u>Propriedades dos Materiais</u> .....	97
4	<b>ANÁLISE MODAL</b> .....	98

4.1	<b>Introdução</b> .....	98
4.2	<b>Análise Teórica</b> .....	99
4.3	<b>Análise Experimental</b> .....	99
4.4	<b>Técnicas de análise modal experimental</b> .....	101
4.4.1	<u>Os vínculos da estrutura</u> .....	101
4.4.2	<u>Excitação da Estrutura</u> .....	102
4.4.3	<u>Aquisição dos Sinais</u> .....	102
4.4.4	<u>Processamento de Dados</u> .....	103
4.4.4.1	Transformada de Fourier .....	103
4.4.4.2	Processo de Cálculo da Média .....	105
4.4.4.3	Janelas de Aquisição .....	105
4.4.5	<u>Determinação dos Parâmetros Modais</u> .....	106
5	<b>ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL</b> .....	109
5.1	<b>Introdução</b> .....	109
5.2	<b>Detalhamento do programa de instrumentação</b> .....	110
5.2.1	<u>Definição do Objetivo e Abrangência</u> .....	110
5.2.2	<u>Conhecimento da estrutura, interferências e condições ambientais</u> .....	110
5.2.3	<u>Conhecimento do comportamento da estrutura “<i>in situ</i>”</u> .....	111
5.2.4	<u>Parâmetros a serem medidos</u> .....	111
5.2.5	<u>Posicionamento dos Sensores</u> .....	112
5.2.6	<u>Sistema de Aquisição de Dados</u> .....	118
5.3	<b>Descrição dos ensaios experimentais</b> .....	118
5.3.1	<u>Localização da Central de Aquisição</u> .....	118
5.3.2	<u>Detalhamento da Instalação dos Sensores</u> .....	118
5.3.3	<u>Detalhamento dos ensaios de Vibração Livre</u> .....	120
5.3.4	<u>Detalhamento dos ensaios de Vibração Induzida</u> .....	122
6	<b>PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	126

6.1	<b>Resultados dos ensaios de Vibração Livre</b> .....	126
6.1.1	<u>Resposta Dinâmica de Aceleração</u> .....	126
6.1.2	<u>Densidades Espectrais</u> .....	129
6.1.3	<u>Freqüências Naturais</u> .....	133
6.1.4	<u>Estimativa da Taxa de Amortecimento</u> .....	133
6.1.5	<u>Avaliação dos resultados da Análise Modal Experimental</u> .....	135
6.2	<b>Resultados dos Ensaios de Vibração Induzida</b> .....	136
6.2.1	<u>Resposta Dinâmica em Aceleração Temporal</u> .....	138
6.2.1.1	Carga Dinâmica Aplicada: 1 Pessoa .....	138
6.2.1.2	Carga Dinâmica Aplicada: 2 Pessoas.....	146
6.2.1.3	Carga Dinâmica Aplicada: 3 pessoas .....	152
6.2.1.4	Análise das respostas da estrutura em aceleração temporal .....	158
6.2.2	<u>Resposta Dinâmica em Deslocamento</u> .....	160
6.2.2.1	Influência do caminhar na resposta em deslocamento.....	160
6.2.2.2	nfluência da carga dinâmica na resposta em deslocamento .....	165
6.2.2.3	Análise da resposta da estrutura em deslocamento.....	166
6.2.3	<u>Avaliação dos Resultados de Vibração Induzida</u> .....	167
6.2.3.1	Avaliação da passarela segundo critérios de Códigos e Normas disponíveis.....	167
6.2.3.2	Avaliação das condições de conforto humano pelo AISC [64]. .....	170
6.2.3.3	Análise da Passarela em Relação à Sensibilidade Humana às Vibrações.....	171
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	173
7.1	<b>Generalidades</b> .....	173
7.2	<b>Conclusões</b> .....	174
7.3	<b>Sugestões</b> .....	176
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	178

## INTRODUÇÃO

### **Apresentação e Relevância**

Durante os últimos 100 anos, a população do mundo cresceu de 1,5 para 6 bilhões, e quase três bilhões de pessoas vivem em cidades ou em torno delas. Dezessete das 20 megacidades, cada uma com população de 10 milhões de habitantes ou mais, está situada em países em desenvolvimento [1]. Nestes lugares haverá necessidade de criar a infraestrutura urbana mínima que permita seu funcionamento. Uma das vertentes da infraestrutura urbana a ser desenvolvida está relacionada com a necessidade de deslocamento das pessoas até os núcleos industriais, centros financeiros ou administrativos que demanda soluções de transporte intermodal eficiente. Nas grandes cidades a implantação das soluções de transporte somente pode ser viabilizada pela construção de vias preferenciais, rodovias e ferrovias. Em todos os casos, o sistema viário projetado deverá levar em conta a execução de pontes e viadutos para resolver pontos de cruzamento e, em alguns casos, túneis. A implantação de vias expressas em espaços urbanos ou não, traz também a necessidade de reintegrar bairros através da construção de passarelas para favorecer e garantir a travessia de pedestres sobre essas vias.

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 conjunção destes fatores possibilitou o desenvolvimento da tendência de projetar estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis. Como consequência, estas estruturas ficaram mais sensíveis a solicitações dinâmicas provocadas entre outras por atividades humanas como dançar, caminhar ou pular que podem causar vibrações e que têm se manifestado de forma preferencial em estádios de futebol, salas de espetáculos, dependências adaptadas para atividades de ginásticas e passarelas de pedestres. No caso das passarelas, estas não ficaram à margem desta tendência já que em alguns momentos, buscando privilegiar a estética, e em outros para

atenderem limitações físicas e alguns casos orçamentários, resultaram estruturas leves com vãos arrojados e seção transversal reduzida.

O aumento da flexibilidade e leveza resultou em estruturas extremamente sensíveis a vibrações por estas apresentarem baixa frequência. A excitação dinâmica produzida pelo caminhar de pessoas ocorre essencialmente em baixas frequências com a componente na direção vertical entre 1,6 e 2,4 Hz podendo ser adotado valores médios de 2 Hz. Este fato predispõe as estruturas ao fenômeno da ressonância que poderá ocorrer devido à proximidade entre a frequência de excitação, o caminhar das pessoas, e as frequências naturais da estrutura. A observação de vibrações em passarelas não é recente já que o primeiro registro encontrado relata que em 1154 uma passarela de madeira colapsou por ação da carga de multidão de pessoas que desejavam saudar o Arcebispo William (B. Wolmuth, [2] apud [3]). Contudo, não existem registros das causas que provocaram o acidente. Segundo o mesmo autor, o caso mais antigo de problemas em passarelas devido à carga dinâmica induzida por pedestres, foi em 1831 numa ponte que desabou na cidade de Broughton – Inglaterra, causado pela marcha de 60 soldados [4] apud [3]. A partir desse fato, durante o século XX foram intensificados os estudos para interpretar o efeito das vibrações induzidas pelo caminhar de pessoas principalmente na direção vertical e em poucos casos na direção lateral.

A Passarela do Milênio, inaugurada em 2000, está localizada sobre Rio Tâmisa no Centro de Londres. Foi projetada para fazer a ligação entre a Catedral de Saint Paul e a nova galeria de Arte Tate Modern (Figura 1.1) Construída em estrutura mista, com sistema estrutural suspenso com comprimento de 332 m, está dividida em três vãos, o central de 144 m e dois extremos de 80 e 108 m. Logo na sua inauguração, entre 80.000 e 100.000 pessoas cruzaram a passarela, resultando em uma densidade de ocupação de 1,3 a 1,5 pessoas/m<sup>2</sup>. Este fato causou uma grande vibração. No primeiro dia a estrutura apresentou vibrações laterais da ordem de 0,8 Hz em um dos vãos extremos e no vão central de 0,5 Hz e 0,9 Hz para o primeiro e segundo modo. Os deslocamentos excessivos que alcançaram 70 mm fizeram recomendável o fechamento da passarela por segurança e pânico dos usuários. Isto levou a estudos do fenômeno nos quais se concluiu pela necessidade de se introduzir atenuadores dinâmicos de vibração para mitigar estes efeitos [5], [6], [7], [8].



Figura 1.1 - Vista da Passarela do Milênio Fonte: Wikipedia

Anteriormente e de maneira análoga, a Toda Park Bridge (Figura 1.2) tinha apresentado os mesmos problemas. De estrutura estaiada, com um vão principal de 134 m e outro de 45 m, suspensos por 11 cabos em cada um dos dois planos de estais, logo da sua inauguração em 1989 foram percebidas vibrações laterais motivadas pelo sincronismo das cargas provocadas pelo caminhar das pessoas, em multidão. Diversos artigos técnicos a esse respeito indicam que a viga central vibrou lateralmente com amplitude de 10 mm e uma frequência de 0,9 Hz. Embora a amplitude não pareça muito grande, alguns pedestres sentiram desconforto e insegurança [9], [10]. Observações registradas por meio de vídeos do movimento da cabeça das pessoas da multidão e pela resposta na direção horizontal, concluíram que 20% das pessoas da multidão sincronizaram perfeitamente os seus passos [11].



Figura 1.2 - Passarela Toda Park Bridge Fonte: Wikipedia

Assim como a passarela de Broughtton [3] apud em 1831 despertou o interesse para o estudo do comportamento da carga dinâmica na direção vertical, a passarela do Millennium fez intensificar os estudos para avaliar as vibrações laterais devido ao efeito do caminhar sincronizado das pessoas. A grande quantidade de trabalhos técnicos elaborados culminou com a realização da 1ª Conferência Internacional sobre o tema, a Footbridge 2002 realizada em Paris.

Como havíamos relatado os problemas de vibração em estruturas provocando desconforto são muito antigos.

Em 1998 o autor realizou medições dinâmicas para estudo do comportamento de passarela de estrutura de concreto, na qual os usuários, a maior parte funcionários da Mercedes Benz em São Bernardo do Campo - SP alertavam sobre a insegurança e o desconforto da estrutura.

Em dezembro de 2010 foi inaugurada a Passarela de Pedestre da Estação Cidade Nova do Metrô Rio (Figura. 1.3). Em trabalho apresentado no III Congresso de Pontes e Estruturas, a Noronha Engenharia [12], projetista do Conjunto Arquitetônico, mencionou que “foi elaborado modelo numérico de cálculo tridimensional reproduzido a partir do projeto arquitetônico original e constituído por elementos finitos de barras, cascas e sólidos para simular o comportamento estrutural da Estação e Passarela”.



Figura 1.3 - Passarela de Pedestres da Estação Metrô Cidade Nova.

Por iniciativa do Metrô, a empresa Concremat foi contratada para fazer a avaliação do comportamento da estrutura face às ações ambientais e às induzidas pelos pedestres, através do monitoramento da resposta dinâmica. Os trabalhos foram iniciados pela elaboração do modelo estrutural, em elementos finitos (MEF). Na análise modal realizada no modelo tridimensional da estrutura, foram encontrados valores de flexão vertical de 1,69 e 1,80 Hz, para a primeira e segunda frequência natural da estrutura, que estão dentro da faixa de excitação dinâmica produzida pelo caminhar de pessoas. Estes valores, bem como o comportamento dinâmico da estrutura foram confirmados através do processamento dos sinais de aceleração obtidos na análise modal experimental realizada.

Os diversos artigos técnicos revisados mostram que os problemas dinâmicos se manifestam em passarelas com diferentes sistemas estruturais e materiais e são consequências do desconhecimento deste fator na elaboração dos projetos. No meio técnico, as estruturas são projetadas para solicitações estáticas, observando-se somente os estados limites, não sendo levada em consideração a complexa interação: solicitação dinâmica-estrutura.

A revisão das normas brasileiras mostra que para o dimensionamento são estabelecidas as diretrizes para satisfazer as condições de serviço e de segurança com relação à sua ruptura, atendendo aos estados limites último (ELU) e de serviço (ELS) limites de utilização.

A NBR-6120/1980 [13] para Cálculo de estruturas de Edifícios utiliza o equivalente estático para avaliar a segurança de estruturas submetidas a carregamentos humanos.

A NBR 6118 [14] que fixa os requisitos básicos exigíveis para projetos de estruturas de concreto define que: "As ações dinâmicas podem provocar estados limites de serviço e estados limites últimos por vibração excessiva ou por fadiga dos materiais". Visando assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações na NBR 6118 é recomendado afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura  $f$  da frequência crítica  $f_{crit}$ , que depende da destinação da respectiva edificação.

$$f > 1,2 f_{crit}$$

Na falta de valores determinados experimentalmente, a norma recomenda adotar a frequência crítica  $f_{crit}$  de 1,6 a 4,5 Hz para passarelas de pedestres.

A NBR 8800/2008 [15] - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios - que fixa os requisitos básicos para projeto e execução de estruturas de aço de edifícios, já incorpora conceitos mais atuais em relação ao tema mencionando. O Anexo M que trata do projeto de estruturas de pisos com grandes vãos e amortecimento reduzido indica que podem resultar em vibrações que causem desconforto. No item M.2 recomenda que "o problema de vibração em pisos deve ser considerado no projeto de estrutura por meio de análise dinâmica, levando-se em conta, pelo menos: a) as características e a natureza das excitações dinâmicas, como por exemplo, as decorrentes do caminhar das pessoas e de atividades rítmicas; b) os critérios de aceitação para conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso; c) a frequência natural da estrutura do piso; d) a razão de amortecimento modal; e) os pesos efetivos do piso.

Em relação às ações, a NBR 7188/1984 [16], a sobrecarga em passarelas é estabelecida em classe única, onde a carga móvel é uniformemente distribuída de 5 kN/m<sup>2</sup>, não majorada. Ao considerar esta simplificação do carregamento móvel como uma carga uniformemente distribuída, a norma faz uma análise estática equivalente, isto é, despreza o comportamento dinâmico produzido pela movimentação das pessoas.

Como pode ser verificado, somente a NBR 8800/2008 [15] é a única norma brasileira que recomenda tratar o problema de vibração em pisos por meio de análise dinâmica que necessariamente deverá considerar as características da excitação e os parâmetros de rigidez, amortecimento e massa da estrutura.

Por outro lado, o comportamento dinâmico de passarelas vem sendo tratado com atenção em alguns códigos e regulamentações normativas internacionais, que apresentam diretrizes detalhadas com valores limites para frequências e picos de aceleração, que nem sempre são confirmados em medidas experimentais.

## **Motivação e Objetivos**

As passarelas são dimensionadas considerando, em geral, cargas estáticas que supostamente deveriam reproduzir além do peso próprio, solicitações dinâmicas induzidas pelo vento e pelo transitar de pessoas. Durante o caminhar, pedestres impõem forças dinâmicas nas estruturas que geram resultantes com componentes em três direções: vertical, lateral e longitudinal [3]. A força que gera o caminhar de uma única pessoa sobre a estrutura devido à aceleração e desaceleração da massa do seu corpo têm sido motivo de estudos durante muitos anos, em especial, a componente vertical por ser de magnitude maior. A frequência das ações associadas ao caminhar ou correr pode se aproximar da frequência associada a um dos modos de vibração da estrutura conduzindo ao aumento das amplitudes dos deslocamentos e acelerações o que provoca desconforto nos usuários.

O trabalho a seguir tem por objetivo estudar a resposta dinâmica experimental de uma passarela existente quando submetida às forças produzidas pelo transitar de uma ou mais pessoas caminhando e/ou correndo. De maneira preferencial, será analisada a componente vertical da força, sem desprezar a componente horizontal e longitudinal, efeitos que foram detectados nas observações realizadas na estrutura e confirmadas nas simulações do modelo numérico.

A determinação das características dinâmicas da estrutura será realizada através de análise modal experimental e terá como finalidade a determinação dos parâmetros modais: frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento, parâmetros frequentemente também estimados por métodos numéricos, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos.

A análise experimental para as diversas situações visará também determinar deslocamentos e principalmente acelerações, grandezas adotadas na análise dos níveis aceitáveis de vibração para avaliação do conforto humano.

Cabe ressaltar que na avaliação experimental da resposta dinâmica não será considerado o efeito dinâmico provocado pelo vento ou de outro tipo de excitação dinâmica que possam influenciar as medições de campo.

## **ESTADO DA ARTE**

Os problemas provocados pela vibração em estruturas tradicionalmente são agrupados em dois domínios distintos: os que podem afetar a integridade estrutural e os associados com o nível de conforto proporcionado aos usuários.

No primeiro caso o que está em questão é o Estado Limite Último de resistência e estabilidade das estruturas, inserindo-se nele a generalidade de ações exteriores adversas que podem induzir a danos estruturais e em casos extremos levar as estruturas ao colapso.

A segunda classe de problemas está relacionada com o estado Limite de Utilização das estruturas no concernente à satisfação de limites impostos para vibrações excessivas. Ao contrário da situação anterior, o que está em pauta não é a integridade estrutural, mas o funcionamento em serviço; incluindo-se neste grupo os problemas de vento e principalmente os relacionados com o fenômeno da ressonância por efeito de cargas móveis. Ressalta-se que em caso extremos ventos e cargas móveis podem derrubar estruturas.

Os casos mais frequentes de ocorrência de vibrações excessivas em estruturas, solicitadas por cargas móveis, estão na maioria dos casos associados a pontes rodoviárias ou ferroviárias sujeitas à ação das cargas dos veículos.

Neste particular é importante ressaltar também as estruturas sujeitas a atividades humanas que podem experimentar níveis de vibração elevados caso a frequência da ação ou algum de seus harmônicos coincida com uma das frequências naturais do sistema estrutural em análise.

No caso das passarelas, além das vibrações verticais provocadas pelo caminhar de pedestres, existe a possibilidade de ocorrer vibrações laterais

excessivas, como consequência do fenômeno de sincronismo entre o caminhar das pessoas.

A preocupação com os efeitos da carga dinâmica em estruturas gerada por atividade humana não é algo recente e os primeiros estudos remontam ao fim do século XIX [17].

Moreland e Tilden apud [17], já tinham a percepção de que a carga humana interage com a estrutura dinamicamente.

Pesquisas para interpretar e quantificar as forças induzidas por pessoas vem sendo realizadas por muitas décadas: Tilden; Galbraith e Barton, Nilsson, Matsumoto et al, Wyatt apud [18].

Utilizando uma plataforma Tilden apud [17], observou que o movimento de multidões podia ser aleatório ou sincronizado, e que conseguir sincronia perfeita entre os indivíduos era impossível.

A partir da década de 70, alguns autores, entre eles, [19],[20],[21],[22], passaram a descrever o carregamento gerado por algumas atividades humanas como a soma de uma parcela devido à carga estática (peso do indivíduo) e a carga dinâmica. A parcela de carga dinâmica está associada à atividade praticada pelo indivíduo ou de um grupo de pessoas e pode ser descrito matematicamente através de uma série de Fourier.

Baseado em resultados dos ensaios de estruturas instrumentadas Ohlsson apud [3], Allen, Rainer e Pernica [20], e posteriormente Bachmann e Ammann [23], entre outros, descrevem a função representativa do caminhar humano através de uma série de Fourier.

Em relatório elaborado em 1972, apresentado por Bachmann e Ammann no IABSE [23], está o relato de passarela de aço que experimentou forte vibração lateral durante a cerimônia de inauguração quando foi ocupada por 300 – 400 pessoas. A explicação esteve associada ao modo de vibração natural da passarela na direção lateral, próximo de 1 Hz. Bachmann [23] supõe que nesse caso pode ter acontecido a sincronização do passo com a vibração da passarela, amplificando a vibração consideravelmente. O problema foi resolvido com a instalação de atenuadores dinâmicos de vibração para absorver a vibração lateral. Na mesma publicação, relatam como ocorre a oscilação lateral do centro de gravidade das pessoas ao caminhar.

Murray [24], após o teste e a análise de vários sistemas de pisos com vigas de aço e lajes em concreto, sugeriu que sistemas com taxa de amortecimento crítico situado na faixa de 4% a 10% que estivessem situados acima da linha média da região “Distintamente perceptível” na escala modificada de Reither-Meister (Figura 1.4), iriam gerar desconforto aos ocupantes [23]. Da mesma forma sistemas na faixa “Fortemente perceptível” seriam inaceitáveis para ocupantes.

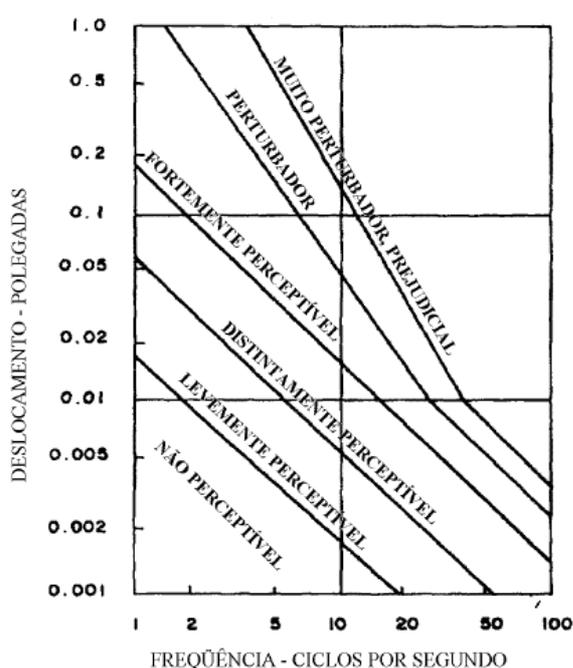


Figura 1.4 – Escala Modificada de Reither-Meister de sensibilidade humana às vibrações [25]

Em livro publicado por Bachmann & Ammann em 1987 [23], discorre-se sobre o carregamento humano distinguindo-se entre caminhar, correr, pular e dançar. No caminhar e correr os autores apontam que a carga dinâmica sobre o pavimento é dominada pela frequência da “passada”.

Segundo Bachmann [26], o caminhar rápido ou mais de uma pessoa caminhando conjuntamente é um carregamento dinâmico mais severo, mas somente para os dois primeiros harmônicos.

De forma similar, um grande grupo de pessoas andando em conjunto produz um carregamento dinâmico relevante (frequência do passo de aproximadamente 2 Hz), o que na prática é aliviado pelo efeito de amortecimento causado pelas próprias pessoas e pela falta de conexão com harmônicos mais altos.

Fujino et al., 1993 [27] apud [18], descreveu a vibração lateral imposta por pedestres em passarela metálica estaiada de dimensões similares à Millennium Bridge como consequência da ocupação de 2000 pessoas. A vibração lateral detectada foi de 0,9 Hz e amplitude de 11 mm.

Fujino et al., apud [18], detectou através de gravações de vídeo do movimento de multidão que 20% ou mais dos pedestres sobre a passarela caminhavam em sincronismo com a vibração lateral com frequência de aproximadamente 0.9 Hz.

Em estudo recente R. Sachse, A. Pavic & P. Reynolds [18], revisaram mais de 130 publicações referente ao problema da interação dinâmica estrutura-pessoas aplicável a projetos de engenharia. No trabalho é comentada a interação que ocorre em estruturas leves excitadas pelo caminhar, correr, pular e outras atividades similares realizadas por pessoas. Os autores comentam ainda que este fenômeno é extremamente complexo, interdisciplinar e muito pouco estudado. Para organizar o conhecimento existente, os autores abordam o tema sob dois pontos de vista: como a vibração da estrutura pode influenciar as forças induzidas pelos humanos e como os humanos influenciam nas propriedades dinâmicas das estruturas.

Eriksson [28], sugeriu que a carga humana fosse considerada como estacionária no espaço, devido à complexidade de se realizar a distribuição espacial das pessoas que produzem cargas dinâmicas na estrutura e devido à falta de estudos sobre o tema.

Zivanovic et al. [29], investigaram a natureza e a possível causa da diferença entre a resposta modal analítica e a medida de forma experimental e ainda de que maneira essa diferença pode ser levada em consideração na construção do modelo numérico computacional. A pesquisa foi realizada baseada na resposta da estrutura de três passarelas diferentes excitadas por uma e duas pessoas caminhando.

Blanco, [30], em trabalho apresentado na Conferencia da 9ª SAMTECH mostrou que a excitação dinâmica provocada quando da ocupação das passarelas por pessoas ocorre de duas diferentes maneiras: randômica e sincronizada. No primeiro caso a frequência de passo dos pedestres está distribuída de acordo com a curva de probabilidades e o espaço de tempo do ângulo de fase de 1º harmônico, é caracterizado pelo valor randômico. No caso de excitação sincronizada, o caminhar das pessoas é com passo uniforme, na mesma frequência e em fase. Isto resulta em um aumento da força induzida, que no caso do 1º harmônico é proporcional ao número de pessoas envolvidas. A maioria dos pesquisadores, que estudaram a

excitação sincronizada coincide que para um pequeno número de pessoas, não mais de 25, pode ser considerada a sincronização perfeita.

Nakamura, [11], reportou ensaios experimentais realizados em duas passarelas em Japão. A análise numérica para a excitação lateral foi realizada considerando a carga de pessoas distribuída e constante sobre a passarela.

Kasperski, apud [18] mencionou que apesar do grande número de publicações que tratam das forças induzidas por multidão, ainda precisam ser pesquisadas em particular a dependência da natureza e magnitude da força induzida.

Ebrahimipour e Sack, [31], publicaram que embora tenha sido comprovado que as cargas dinâmicas induzidas por grupos de pessoas são maiores que as induzidas individualmente, não existem linearidade entre o número de pessoas e as forças induzidas. Isso somente acontece se as pessoas são organizadas por movimento de outras pessoas ou por música.

Em geral, o comportamento sincronizado de pessoas sobre as estruturas pode ser premeditado ou não intencional. O caso de comportamento sincronizado premeditado mais conhecido é a ginástica aeróbica. Pode acontecer comportamento sincronizado em alguns casos por ação de vândalos.

Quast, e Kaspersky, apud [18], comentam que apesar de 200 anos de pesquisas sobre o comportamento dinâmico de pessoas sobre as estruturas, somente agora a sincronização não intencional está sendo considerada importante.

Dallard et al. [5], comenta que é possível afirmar que a vibração estrutural forte o suficiente perturba às pessoas em seus movimentos e, todavia, as estruturas podem ser inutilizadas ou consideradas inseguras devido ao pânico que provocam nos pedestres.

A sincronização espontânea de pedestres com a movimentação da estrutura representa um caso de interação humana-estrutura e este comportamento têm sido observado em diferentes épocas como foi reportado por Petersen [32], Bachmann [26], Fujino et al.[27], Dallard et al. [5], HIVOSS [33], Ji, T., et al. [21] e MURRAY [24], NAKAMURA [34].

Ainda em relação à interação do impacto humano sobre as estruturas, estudos mostram que além de excitar também podem alterar as propriedades modais da estrutura ocupada.

Em geral a influência de ocupantes sobre as propriedades modais de estruturas civis é representada modelando uma massa complementar à estrutura. Este modelo tem sido amplamente aceito por longo tempo Allen e Rainer, [19]; Ohlsson, [35]; Ebrahimpour et al., [31].

Investigações realizadas por Lenzen [36], and Rainer & Pernica [37] mostraram o significativo aumento do amortecimento devido á ocupação da estrutura por pessoas. Baseados em estes e outras investigações similares, tais como as realizadas por Ebrahimpour et al., [31], Pimentel [38] Pimentel & Waldron [39], Eyre & Cullington, Maheim & Honeck, Bishop et al., Quast apud [18] é amplamente aceito que a ocupação humana aumenta o amortecimento das estrutura ocupada. Além do mais, pesquisas recentes realizadas por Brownjohn [40] e Brownjohn & Middleton [41] mostram que a ocupação humana absorve significativamente mais energia que a sobrecarga que conformam o piso de concreto da estrutura.

Allen et al. [20], consideram a adição de massa na modelagem do amortecimento devido à ocupação humana das estruturas. Esta forma de modelar estruturas sob a ação humana têm sido considerada por Beyer et al., Luza e Hothan para passarelas de pedestres apud [18].

Em ensaios experimentais Lenzing, apud [18] mostrou que o modelo considerando massa não sempre indica as freqüências de estruturas ocupadas por humanos de forma apropriada. Contrariando as expectativas ensaios realizados em uma pequena plataforma de madeira mostraram que a freqüência fundamental não diminui de forma significativa se pessoas paradas com mais de duas vezes o peso da plataforma ocupam. Ao contrário, a freqüência natural da estrutura diminui levemente.

A resposta dinâmica medida no Twickenham Stadium de Londres por Ellis and Ji apud [21] indicou que a sobrecarga de pessoas em estruturas, atua como um sistema amortecedor massa-mola, de forma mais efetiva que adicionar massa.

As pesquisas realizadas mostram que em estruturas ocupadas por pessoas pode aumentar o amortecimento, há redução das freqüências fundamentais e também podem aparecer outros modos de vibração. Tais efeitos necessitam ser determinados de forma precisa para possibilitar a elaboração de projetos seguros e econômicos e livres de vibrações indesejáveis.

Teixeira, [42], aplicou, num modelo bidimensional de uma estrutura de passarela estaiada, a força produzida por um passo descrita por uma série de Fourier e, assim, simulou o caminhar de uma ou várias pessoas por meio de cargas pontuais se deslocando na estrutura com afastamentos, variáveis, entre elas.

Obata, Miyamori, et al [43], para tentar incluir as propriedades dinâmicas do corpo humano tais como massa e rigidez, apresentaram um modelo que acopla as equações dinâmicas do corpo humano, dividido em cabeça, partes superior e inferior do corpo, com as equações de movimento da estrutura. O modelo também considera o movimento vertical do corpo humano.

Figueiredo, [44], em sua dissertação de mestrado efetuou uma avaliação da resposta dinâmica de passarelas de pedestres no que se refere ao conforto humano. Em seu estudo desenvolveu diversos modelos de carregamento de forma a representar a travessia de pedestres sobre a estrutura, considerando inclusive um modelo mais realista de carregamento em que se incorpora o impacto transiente do calcanhar devido ao caminhar humano.

Varela, [45], descreve o caminhar humano consiste em uma composição de movimentos em várias direções, e considerar que esse caminhar produz apenas uma componente vertical de carga é tão somente uma simplificação totalmente válida para lajes de piso absolutamente rígidas em seu próprio plano, mas que não pode ser aplicada a passarelas totalmente flexíveis.

Varela, [45], propôs uma ferramenta computacional para a geração de carga humana do caminhar no tempo e no espaço e incluiu na formulação, o pico transiente que representa o impacto do calcanhar no piso. Essa ferramenta computacional permite considerar o carregamento produzido por pessoas se deslocando segundo trajetórias predeterminadas ou ainda geradas aleatoriamente.

Lima et al , [46], utilizando a técnica de inteligência computacional avaliou o conforto humano em passarelas mistas para pedestres, tendo como referência as recomendações da ISO 2631/2. Os resultados obtidos indicaram que, para as vibrações das passarelas atenderem aos níveis das normas de projeto, deve-se restringir a flexibilidade e a deformabilidade do sistema estrutural.

O caminhar humano, segundo Varela, [45], varia de pessoa para pessoa de acordo com a idade, tipo físico, cultura, personalidade, etc. Em geral, um jovem, por exemplo, apresenta balanço vertical mais proeminente, com impacto de calcanhar

mais intenso, possivelmente solicitando a estrutura mais severamente. O idoso por sua vez apresenta um caminhar suave e pendular.

Na figura 1.5 está apresentada a comparação da força de passo de quatro pessoas diferentes.

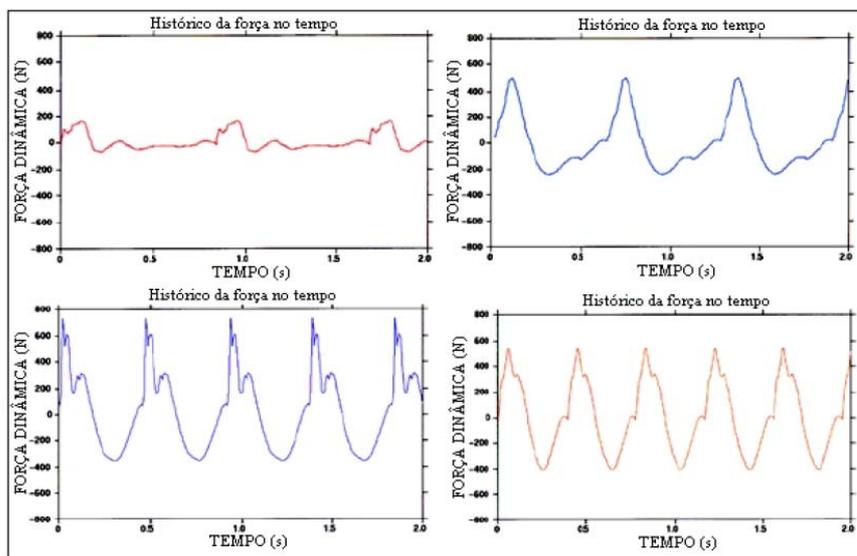


Figura 1.5 – Comparação da Força do passo no tempo de quatro pessoas diferentes – [47] apud [45].

Apesar das inúmeras investigações realizadas visando interpretar a interação do impacto humano sobre as estruturas flexíveis ainda não há um perfeito entendimento do fenômeno. Como consequência, não há um modelo matemático computacional apropriado, que depende não apenas das características das estruturas flexíveis, mas também da biomecânica humana individual do caminhar e do comportamento em multidão [18].

#### Escopo do trabalho

Com o intuito de atender aos objetivos e à metodologia descritos anteriormente, este trabalho está subdividido em nove capítulos, descritos a seguir.

Na parte inicial apresentou-se a motivação para o tema objeto deste trabalho, um breve resumo da importância das obras de arte especiais nas grandes cidades, em especial as passarelas. São comentados também os problemas decorrentes da não consideração do efeito dinâmico, mostrando o retrospecto com alguns insucessos clássicos.

No primeiro capítulo faz-se uma descrição do carregamento dinâmico induzido pelo caminhar humano e os efeitos sobre as estruturas, contendo breve resumo realizado por diversos autores e se discorre também sobre os modelos desenvolvidos para o caminhar de uma pessoa e para multidão.

Mostra-se no segundo capítulo uma explanação sucinta sobre critérios normativos internacionais para o cálculo que dizem relação à aceitação do nível de aceleração para passarelas em geral não se importando com o modelo, sistema estrutural ou materiais adotados, uma vez que todas as passarelas são analisadas pelos mesmos critérios.

O capítulo três descreve o modelo estrutural investigado constituído por uma passarela de pedestres. São apresentadas em detalhes o “*as built*” da estrutura uma vez que os projetos fornecidos não correspondiam à estrutura existente.

No quarto capítulo abordam-se os princípios básicos de análise modal criando desta maneira as condições de desenvolver a análise modal aplicada à estrutura da passarela investigada para a determinação das características dinâmicas que permitirão determinar as frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento modal.

O quinto capítulo aborda a análise experimental aplicada à estrutura investigada cujo modelo estrutural e as respectivas propriedades físicas e geométricas foram apresentadas no capítulo 3. A análise modal experimental desenvolvida possibilitará a construção do modelo representativo do comportamento dinâmico do sistema estrutural a fim de se determinar os parâmetros modais.

No capítulo seis são processados os sinais aqusitados para as diferentes situações de ensaios realizados na passarela estudada. Com os resultados obtidos nos ensaios de vibração livre são determinados os parâmetros modais, frequências, modos e taxas de amortecimento modal. Com os sinais de vibração induzida são obtidas as acelerações máximas que permitirão avaliar o conforto da estrutura.

No sétimo capítulo é realizada uma ampla análise de todo o processo de aprendizado com as principais conclusões em relação aos critérios normativos e documentação técnica disponível que foi consultada. São analisados se os objetivos foram atendidos e são feitas sugestões para a continuidade do desenvolvimento deste trabalho.

# 1 CARREGAMENTO DINÂMICO INDUZIDO POR PEDESTRES AO CAMINHAR

## 1.1 Introdução

As ações dinâmicas induzidas pelos seres humanos podem ser de natureza periódica ou transiente. As cargas dinâmicas periódicas, como o caminhar, são caracterizadas por excitações repetidas ao longo do tempo e as cargas dinâmicas transientes são causadas por um movimento único representado por um carregamento impulsivo sobre um determinado componente estrutural.

Durante o caminhar, os pedestres induzem forças dinâmicas que se deslocam sobre as estruturas. Estas forças geram componentes em três direções: vertical, transversal e longitudinal. Todas elas dependem de parâmetros associados à frequência e comprimento do passo e à velocidade da caminhada. Na direção vertical, a componente é produzida pelo impacto periódico das passadas e pelo movimento de oscilação vertical da pessoa ao caminhar. Na direção transversal, as forças são resultantes do movimento oscilatório em torno do centro de gravidade do corpo humano que ocorre entre as passadas Nakamura & Kawasaki, [9]. Já na direção longitudinal, as forças são geradas devido ao atrito entre os pés e o piso.

A frequência de excitação na direção transversal é igual a metade da frequência na direção vertical e longitudinal. A explicação é que a cada duas passadas do pedestre, são aplicadas duas forças de mesmo sentido na direção vertical e longitudinal enquanto que na direção transversal são aplicadas duas forças no sentido oposto (figura 2.1). Desta forma o período predominante da excitação na transversal é o dobro do período nas direções vertical e longitudinal.

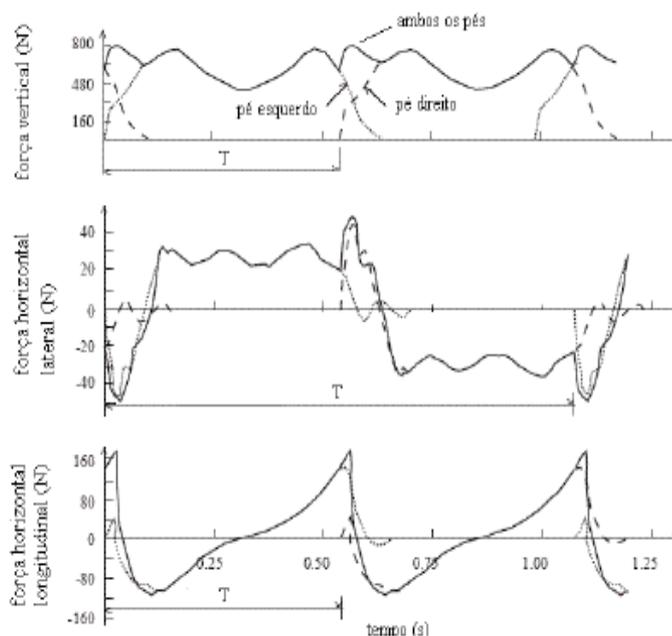


Figura 2.1 – Caminhar Humano - Força vertical, lateral e longitudinal em N x s 2005) [3]

Como mencionado anteriormente, as forças dinâmicas causadas por ações humanas são altamente complexas em natureza e interpretação. Existem muitos parâmetros envolvidos nas ações de caminhar e correr. Além disso, as forças variam no tempo e no espaço. Cada pessoa possui uma forma de andar própria e as pessoas têm diferentes pesos. O número de pessoas que passam por uma passarela, por exemplo, e o grau de sincronismo entre elas é de difícil generalização.

Este é um problema recorrente que têm sido estudado ao longo dos anos por diversos pesquisadores de varias partes do mundo visando quantificar as forças induzidas pelos pedestres de forma isolada ou pela ação em multidão. Na maioria dos casos, os estudos têm sido orientados a entender principalmente a componente vertical da força dinâmica em detrimento da transversal ou longitudinal. Assim foi até a inauguração da Millennium Bridge, que pelos problemas conhecidos, levaram a intensificar os estudos para avaliar as vibrações laterais devido ao efeito do caminhar sincronizado das pessoas.

No que se segue são apresentados estudos realizados para melhor entender e descrever física e matematicamente as ações humanas de caminhar e correr, de modo a compreender o modelo analítico que expressa essas ações corretamente e possam ser aplicadas nos projetos de passarelas.

## 1.2 Estudos realizados do carregamento induzido

Provavelmente o informe mais antigo que relata assuntos relativos a vibração em passarelas tenha sido realizado por Stevenson [3] em 1821. Somado a isso o mesmo autor fez diversos relatos de casos de vibração provocados pela marcha de soldados ao atravessar pontes, indicando nesse tempo, a necessidade de considerar nos projetos de pontes carregamentos dinâmicos induzidos pela ação de pessoas. Cabe mencionar que 10 anos após as observações realizadas por Stevenson, colapsou a ponte de Broughton causado pela marcha de soldados [3].

As primeiras medições das forças induzidas por pedestres foram realizadas por Harper et al. apud [3], com o intuito de investigar o atrito e o escorregamento sobre a superfície de pisos. As medições da força horizontal e vertical provocada pela passada foram realizadas usando uma plataforma instrumentada. A modelagem da força vertical com dois picos e uma depressão como aparece na figura 2.2 conseguiu ser reproduzida. Esta forma geral da força seria confirmada mais tarde por Galbraith e Barton, apud. [3], Ohlsson, [47] apud [45], Kerr [48] e [47] apud [45], e diversos outros pesquisadores.

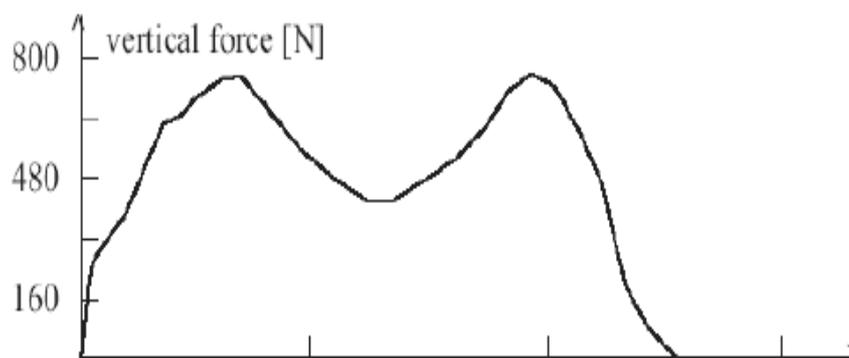


Figura 2.2 – Caminhar Humano - Representação da força vertical com dois picos e uma depressão – Harper et al [3]

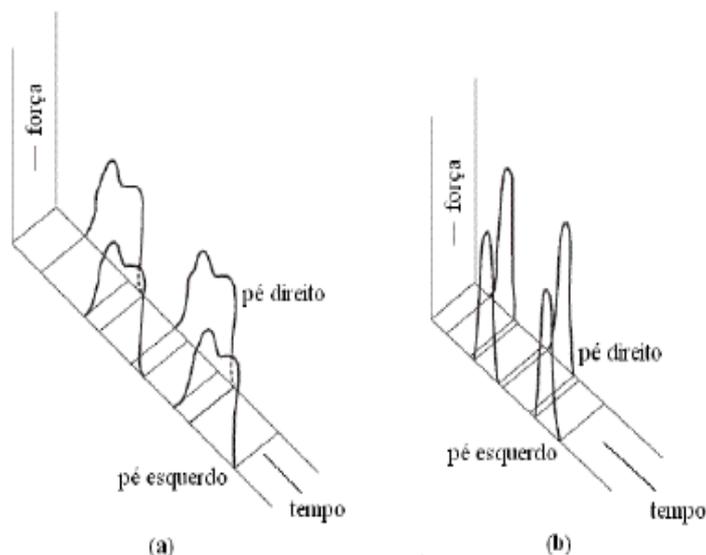


Figura 2.3 – Caminhar Humano - Distribuição de forças em uma estrutura provocada por uma pessoa caminhando (a) ou correndo (b) Zivanovic et al [3]

Em 2005 Zivanovic, S. [3], publicou uma sumarização dos trabalhos desenvolvidos por diversos pesquisadores. Uma das conclusões se refere à complexidade de modelar matematicamente o efeito dinâmico em função da diversidade de variáveis envolvidas (figura 2.3). Entre as variáveis podem ser mencionadas:

- diferentes tipos de forças induzidas por humanos sendo que algumas mudam não somente no tempo como também no espaço, ex. caminhar e correr;
- as forças dependem das características intrínsecas das pessoas: idade e biótipo;
- o conhecimento da força dinâmica induzida por uma pessoa, esta limitada a uma trilha ou caminho estreito e ainda assim, não é bem entendida, existindo dificuldades matemáticas para ser modelada;
- a influência do número de pessoas bem como o grau de sincronização ainda é difícil de ser interpretado;
- existem fortes indícios de que as forças são diferentes nos casos de movimentos perceptíveis e não tão perceptíveis em pontes de pedestres devido ao diferente comportamento das pessoas nessas duas situações.

Apesar de todas essas dificuldades, modelos de força existem e são utilizados em projetos.

Como mencionado na tese de Varela [45] a descrição do caminhar das pessoas passou a ser mais bem definida com a utilização de técnicas que conseguissem captar imagens sequenciais. Em 1883, foi registrada por Muybridge uma patente para captação de imagens de objetos em movimento. A fotogrametria, ciência de fazer medidas a partir de imagens, é ainda hoje uma ferramenta bastante utilizada para uma descrição precisa do caminhar em termos dos movimentos executados pelo corpo. A figura 2.4 mostra um ensaio para determinação de características geométricas do caminhar. Os pontos marcados no corpo da figura são as referências para o monitoramento da pessoa.



Figura 2.4 – Ensaio fotogramétrico para descrição do caminhar humano [45]

A figura 2.5 apresentada a seguir ilustra as medidas de tempo e distância de um ciclo completo de um passo durante o caminhar de uma pessoa. Para a construção da carga representativa do caminhar humano é utilizada metade do ciclo do passo completo.

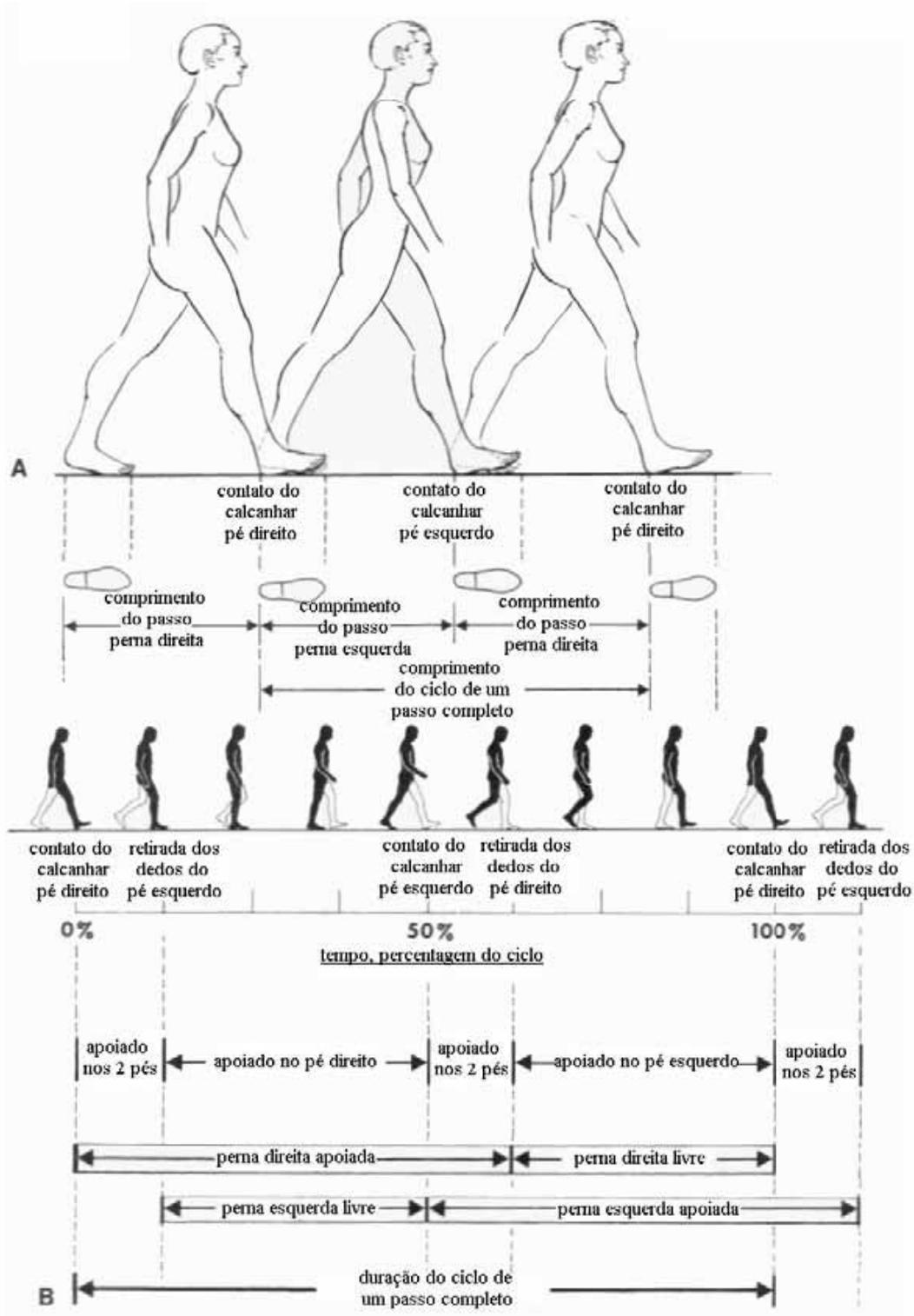


Figura 2.5 – Medidas de distância e tempo de um ciclo de caminhar [45]

A geometria do corpo humano andando é, em uma primeira aproximação, um movimento organizado de pernas que necessariamente causa a subida e a descida da massa do corpo em cada passada, conforme mostrado na Figura 2.6.

Este movimento de subida e descida é de aproximadamente 50 mm, de pico a pico, mas é sensível ao ângulo das pernas completamente esticadas, e deste modo à extensão no qual o pedestre está forçando o passo.

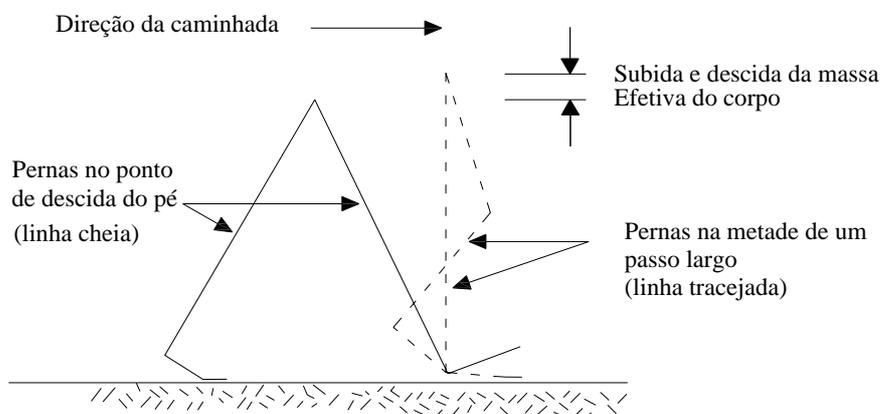


Figura 2.6 - Geometria Simplificada de uma Passada [49]

As acelerações verticais da massa do corpo são necessariamente associadas com as reações no piso, e elas são aproximadamente periódicas na frequência do passo.

A frequência do passo durante a caminhada pode variar entre 1,4 Hz e 2,4 Hz, figura 2.7, como foi confirmado por Matsumoto em pesquisa realizada com 505 pessoas. Com a amostra pesquisada encontrou a frequência média de 2,0 Hz com desvio padrão de 0,173 Hz.

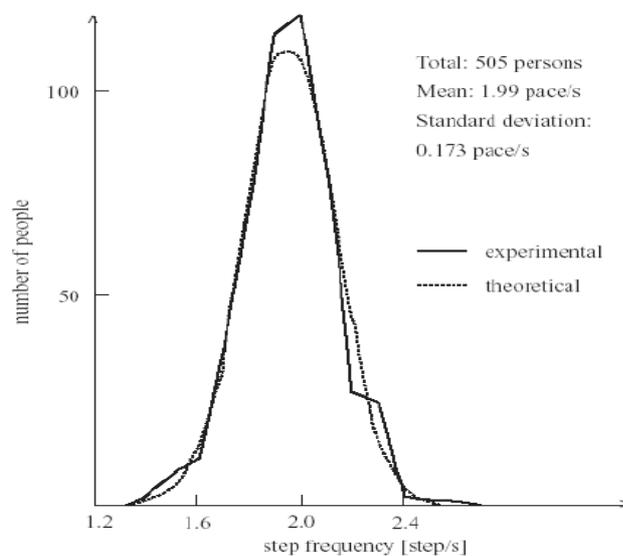


Figura 2.7 – Frequência do passo para caminhar normal segundo Matsumoto [3]

A figura 2.10 mostra que o passo é definido como o intervalo entre os contatos consecutivos dos dois pés no piso.

Considera-se que a força de reação do piso, que é a soma das forças aplicadas pelos dois pés no sistema estrutural no intervalo de um passo, é uma aproximação satisfatória da força de um passo. Isto porque, a distância entre os pés em um passo é muito pequena em relação ao tamanho de uma laje de piso ou de uma passarela, como é o nosso caso.

### 1.3 Modelo do Carregamento Periódico

Baseados em ensaios realizados em plataformas instrumentadas Ohlsson (1982), Allen, Rainer e Pernica (1985) e posteriormente Bachmann e Ammann (1987) apud [3] entre outros, descrevem a função representativa do caminhar humano através de uma série de Fourier.

Mesmo sabendo que a força da passada depende da freqüência do passo, o modelo de carga periódico considera que todos os pedestres ao caminhar produzem exatamente a mesma força e que essa força é periódica. No modelo é assumido também que a força produzida por um pedestre é constante no tempo, Zivanovic, S., Pavic, A., & Reynolds, P., [29], o que sabemos que não é verdadeiro, já que depende da freqüência do passo.

#### 1.3.1 Para uma Pessoa

Para uma pessoa a força repetitiva pode ser representada por uma combinação de forças senoidais cujas freqüências são múltiplos ou harmônicos da freqüência básica da força repetitiva do passo,  $f_p$ , das atividades humanas (figura 2.8). Esse carregamento é produzido pelos dois pés, como uma função da parcela estática associada com o peso do individuo e três ou quatro componentes harmônicos do carregamento. Esses harmônicos surgem devido à interação entre a carga crescente representada por um pé e pelo simultâneo descarregamento do outro pé.

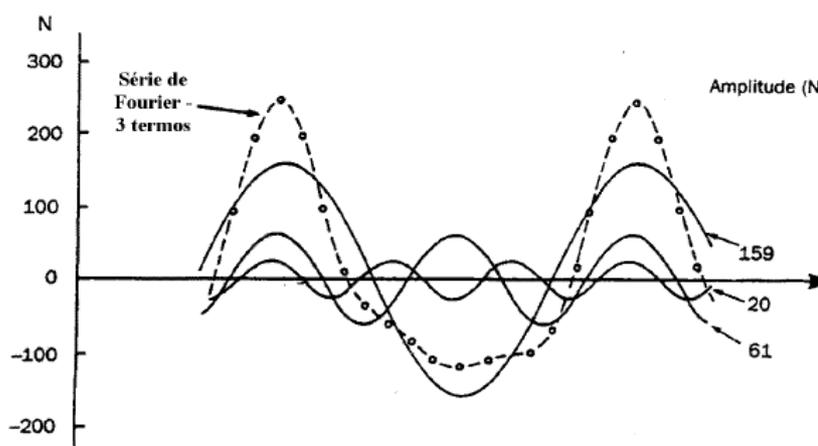


Figura 2.8 - Componentes da série de Fourier da Função representativa da reação do piso [50] apud [45]

A representação matemática aproximada da força dinâmica vertical induzida pelo caminhar humano esta dada pela série de Fourier

$$P(t) = P[1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi_i \cdot f_p \cdot t + \Phi_i)] \quad (2.1)$$

onde:

- P = peso considerado aqui de uma pessoa, a 700 N
- $\alpha_i$  = coeficiente dinâmico para força harmônica ( fator de carga dinâmica)
- i = múltiplo harmônico (1, 2, 3...)
- $f_p$  = freqüência fundamental do passo ao caminhar;
- t = tempo;
- $\Phi_i$  = ângulo de fase em relação ao 1º harmônico.

Os coeficientes dinâmicos associados aos quatro primeiros harmônicos da caminhada são respectivamente  $\alpha_1 = 0,5$ ;  $\alpha_2 = 0,2$ ;  $\alpha_3 = 0,1$  e  $\alpha_4 = 0,05$  [51]

A ressonância poderá ocorrer se qualquer freqüência associada com as forças senoidais se igualar com a freqüência natural de um determinado modo de vibração.

A segunda componente da série de Fourier varia de forma similar à componente básica. Os valores médios dos coeficientes dinâmicos foram obtidos a partir de ensaios experimentais variando a freqüência do caminhar na faixa de 1,0 a 3,0 Hz, realizados no Canadá por Pernica, Rainer e Allen [52].

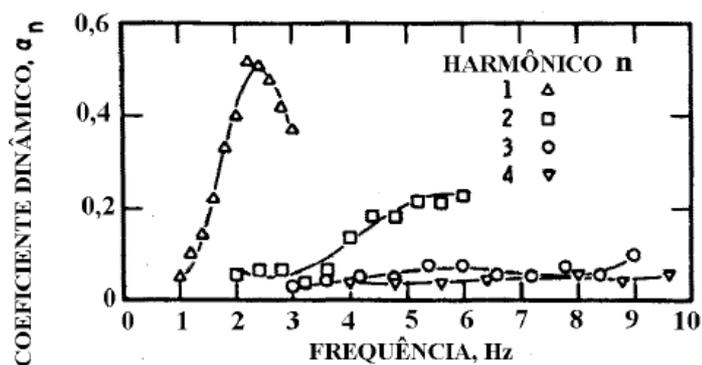


Figura 2.9 – Coeficientes dinâmicos médio obtidos para caminhar por Rainer, Pernica e Allen 1986 [52]

Na Tabela 1.1 a seguir, são encontrados valores para o coeficiente dinâmico determinado por diversos autores.

Tabela 1.1 – Coeficiente Dinâmico

Autor	Direção	Fator de Carga Dinâmica $\alpha_i$
Blanchard, 1977	Vertical	$\alpha_1 = 0,257$
Bachmann et al., 1987	Vertical	$\alpha_1 = 0,37$ $\alpha_2 = 0,10$ $\alpha_3 = 0,12$ $\alpha_4 = 0,04$ $\alpha_5 = 0,08$
Bachmann et al., 1987	Lateral	$\alpha_1 = 0,039$ $\alpha_2 = 0,010$ $\alpha_3 = 0,043$ $\alpha_4 = 0,012$ $\alpha_5 = 0,015$
Young, 2001	Vertical	$\alpha_1 = 0,37 (f - 0,92)$ $\alpha_2 = 0,054 + 0,0044 f$ $\alpha_3 = 0,026 + 0,0050 f$ $\alpha_4 = 0,010 + 0,0051 f$

Cabe ressaltar que os valores apresentados por Young, para os primeiros 4 harmônicos da força vertical, estão em função da frequência de passo  $f$ .

Para todos os casos as forças medidas de forma direta ou indireta foram sobre superfícies rígidas.

### 1.3.2 De Multidão ou para pequenos grupos de pessoas

Para tratar este assunto é necessário definir o conceito de multidão e de pequeno grupo de pessoas. A multidão está relacionada com uma elevada densidade de pedestres na passarela. A falta de espaço que se impõe impede que os pedestres desenvolvam sua taxa de passo normal e a velocidade do passo. O

termo pequenos grupos refere-se a algumas pessoas caminhando juntas. De acordo com Caetano et. al., [53], a carga de grupos depende do tamanho da passarela e da frequência de excitação, podendo ser considerada para pequenos grupos a quantidade de 2 a 6 pedestres. Blanco et. al.,[30], cita que pequenos grupos não excedendo 15 a 25 pessoas podem ser considerados para uma sincronização relativamente perfeita.

A primeira vista parece natural que o modelo de carga induzido por um pequeno grupo de pedestres pode ser obtido multiplicando a carga induzida por um único pedestre  $F_{(t)}$  por uma constante.

Pimentel [39] menciona a variabilidade que existe nos pedestres, no peso, na taxa de passo, as defasagens do passo entre os pedestres e até mesmo entre os que caminham com a mesma taxa de passo, a aglomeração que impede a circulação livre e também, a vibração da própria estrutura. O autor ainda ressalta que a possível correlação entre esses fatores para definição desta carga resulta é de um elevado grau de complexidade.

Procurando correlacionar a carga produzida por um pedestre com aquela gerada por um pequeno grupo ao caminhar numa passarela, Matsumoto (1978) apresentou uma expressão para majoração da carga. Consiste em um fator que multiplicado pela resposta de um pedestre (amplitude e vibração) fornece o efeito de grupo. Para isso o autor assumiu que as pessoas entram na passarela segundo a distribuição normal de Poisson e considerou que o ângulo de fase segue uma distribuição totalmente randômica. A partir destas considerações definiu o fator  $m$  para multiplicar a amplitude de vibração calculada para uma pessoa

$$m = \sqrt{\lambda T_0} \quad (2.2)$$

onde:

$\lambda$  = fluxo de pedestres sobre a extensão da passarela (pessoas/s);

$T_0$  = tempo necessários para cruzar a passarela de comprimento  $L$  com velocidade  $v$  ( s ).

Então o produto  $\lambda \cdot T_0$  corresponde ao número de pedestres sobre a passarela em um instante de tempo  $n$ .

Como  $\lambda \cdot T_0$  corresponde ao número de pedestres que se encontram em uma passarela num determinado período  $n$  a equação (2.2) pode ser apresentada como:

$$m = \sqrt{n} \quad (2.3)$$

De acordo com Bachmann [26], a equação (2.3) pode ser utilizada diretamente para passarelas com freqüência fundamental entre 1,8 Hz e 2,2 Hz. Como as taxa de passos inferiores a 1,8 Hz e superiores a 2,2 Hz são menos frequentes, para estes o valor do fator de correlação pode ser reduzido.

A equação (2.4) considera grupos caminhando com a mesma freqüência de passo e ângulos de fase aleatórios. Estas restrições limitam a utilização do fator, já que não atende aos cenários urbanos onde o grupo de pedestres e multidões em passarelas são possíveis e, conseqüentemente, a sincronização entre eles.

Grundmann et. al., (1993) apud [55], apresentou proposta que considera a probabilidade de sincronização da componente vertical da força de um fluxo de pedestres caminhando livremente, excitando a estrutura no primeiro harmônico sendo definido o fator  $m$  pela equação,

$$m = k_i \cdot n \cdot P_s \quad (2.4)$$

onde,

$k_i$  = fator relacionado com a distribuição espacial da carga ao longo da passarela;

$P_s$  = probabilidade de sincronização em função da aceleração.

Para  $P_s$  os autores sugerem um valor típico de 0,225 que corresponde a uma aceleração de  $0,7 \text{ m/s}^2$ , valor definido pela BS 5400 [54] como limite aceitável uma freqüência de 2,0 Hz.

Barker [2] propôs para grupos de mais de três pessoas o fator de majoração a seguir,

$$m = 1,188 \cdot \sqrt{n} \quad (2.5)$$

### 1.3.3 Carregamento considerando o Impacto do Calcanhar

Varela [45], em sua tese de doutorado, tendo como base a aproximação matemática da reação do piso mostrada na figura 2.10, propôs uma função força  $x$

tempo para representar a carga humana do caminhar, incorporando na formulação o pico transiente causado pelo impacto do calcanhar no piso. Para tanto e para reproduzir a série de Fourier, alguns parâmetros foram deduzidos da figura 2.8 e algumas hipóteses consideradas:

- como a distância entre os pés em um passo é muito pequena em relação à estrutura foi considerado que a força de reação do piso é a soma das forças aplicadas pelos dois pés;
- o modelo matemático proposto é a aproximação matemática da reação do piso da figura 2.8 que inclui em sua formulação o pico representativo do impacto do calcanhar no piso;
- peso da pessoa ( $P = 608 \text{ N}$ );
- número de harmônicos da força ( $nh = 3$ );
- coeficientes dinâmicos da série ( $\alpha_1 = 159/608 = 0,262$ ;  $\alpha_2 = 61/608 = 0,100$ ;  $\alpha_3 = 20/608 = 0,0333$ )
- período do passo ( $T_p = 0,6 \text{ s}$ );
- frequência ( $f_p = 1/0,6 = 1,67 \text{ Hz}$ );
- ângulo de fase ( $\theta_1 = 0$ ,  $\theta_2 = \pi/2$ ,  $\theta_3 = \pi$ ).

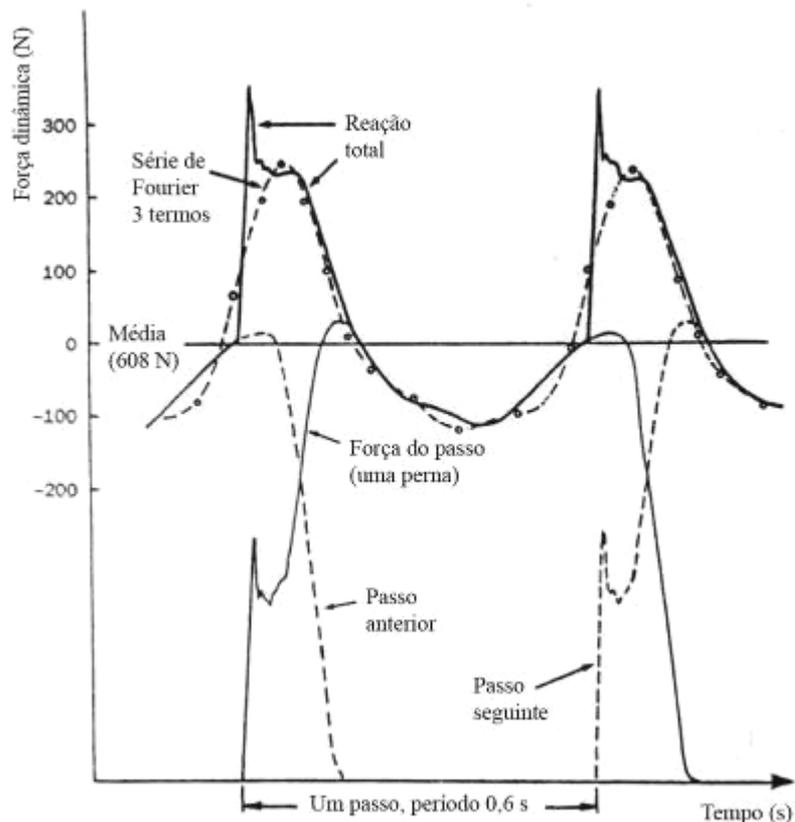


Figura 2.10 – Caminhar Humano - Força de contato de um passo e reação do piso [45]

A aproximação numérica realizada considerando o pico transiente representativo do calcanhar:

$$F(t) = P + \sum_{i=1}^{nh} P \cdot \alpha_i \cdot \text{sen}[2\pi \cdot i \cdot f_c(t + 0,1 \cdot T_p) - \phi_i] \quad (2.6)$$

$$\frac{f_{mi} F_m P}{0,04 T_p} t + P \quad \text{se } 0 \leq t < 0,04 T_p$$

$$f_{mi} F_m \frac{C_1(t - 0,04 T_p)}{0,02 T_p} + 1 \quad \text{se } 0,04 T_p \leq t < 0,06 T_p$$

$$P(t) = F_m \quad \text{se } 0,06 T_p \leq t < 0,15 T_p \quad (2.7)$$

$$P + \sum_{i=1}^{nh} P \alpha_i \text{sen}[2\pi i f_c(t + 0,1 T_p) + \phi_i] \quad \text{se } 0,15 T_p \leq t < 0,90 T_p$$

$$10 \left( P - C_2 \right) \frac{t}{T_p} + 1 + P \quad \text{se } 0,90 T_p \leq t < T_p$$

Onde:

-  $F_m$  é o valor máximo da série de Fourier, obtido da equação,

$$F_m = P \cdot 1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i \quad (2.8)$$

-  $f_{mi}$  é o fator de majoração do impacto do calcanhar, ou seja, é a relação entre o valor do pico transiente do calcanhar e o valor máximo da série de Fourier ( $F_m$ );

-  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes dados pelas equações,

$$C_1 = \frac{1}{f_{mi}} - 1 \quad (2.9)$$

$$C_2 = \begin{cases} P \cdot (1 - \alpha_2) & \text{se } nh = 3 \\ P \cdot (1 - \alpha_2 + \alpha_4) & \text{se } nh = 4 \end{cases} \quad (2.10)$$

Na Figura 2.11, o fator de majoração do impacto do calcanhar foi tomado igual a 1,12 valor que pode variar consideravelmente de uma pessoa para outra [45].

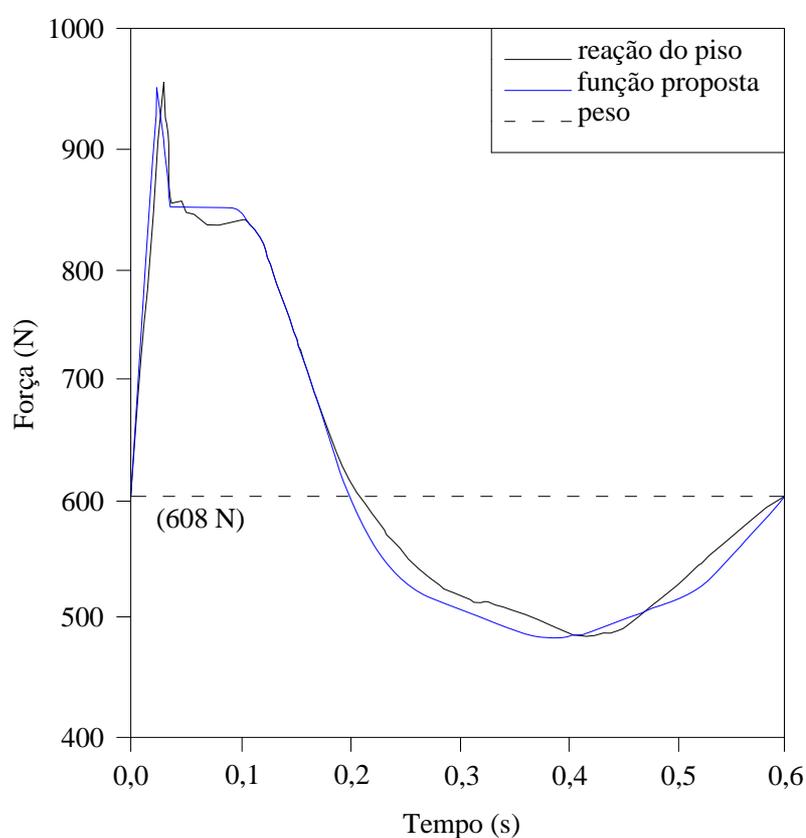


Figura 2.11 – Comparação entre a função proposta por Varela para o caminhar e os resultados obtidos por Olhsson [45]

#### 1.3.4 Modelo analítico recomendado pelo CEB.

O CEB, 1991 [56], propõe um modelo determinístico no domínio do tempo para representar os carregamentos provocados por ações humanas. O modelo

proposto pelo CEB para a função carregamento vertical do movimento de caminhar é uma função periódica e, sendo assim, pode ser expressa por meio de séries de Fourier:

$$F(t) = P_0 + \sum_{i=1}^j \Delta_i \cdot P_0 \cdot \text{sen}(2i \cdot \pi \cdot f \cdot t - \phi_i) =$$

$$P_0 + \Delta_1 \cdot P_0 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t) + \Delta_2 \cdot P_0 \cdot \text{sen}(4\pi \cdot f \cdot t - \phi_2) + \dots \quad (2.11)$$

onde

$F(t)$  = função de carregamento variando no tempo

$P_0$  = peso estático da pessoa (800N)

$\Delta_i$  = coeficiente de Fourier para o harmônico  $i$

$\Delta_i P_0$  = amplitude da Força do harmônico  $i$

$f$  = razão de passo Hz

$\phi_i$  = ângulo de fase do harmônico  $i$  com relação ao primeiro harmônico

$j$  = número total de harmônicos contribuintes

A figura 2.12 mostra a função de carregamento vertical que representa uma pessoa caminhando.

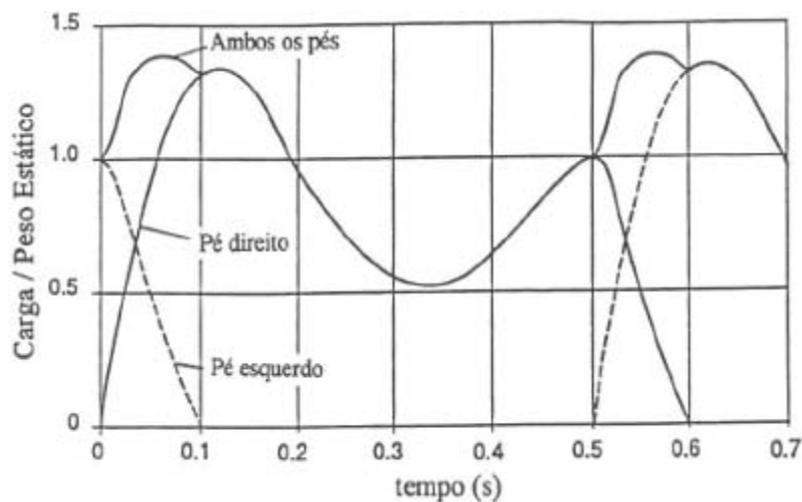


Figura 2.12 – Função de carregamento para uma pessoa caminhando  
CEB [56]

Caso a velocidade de avanço aumente até que o movimento passe do caminhar para correr, a função mudará progressivamente de forma conforme mostrado da figura 2.13.

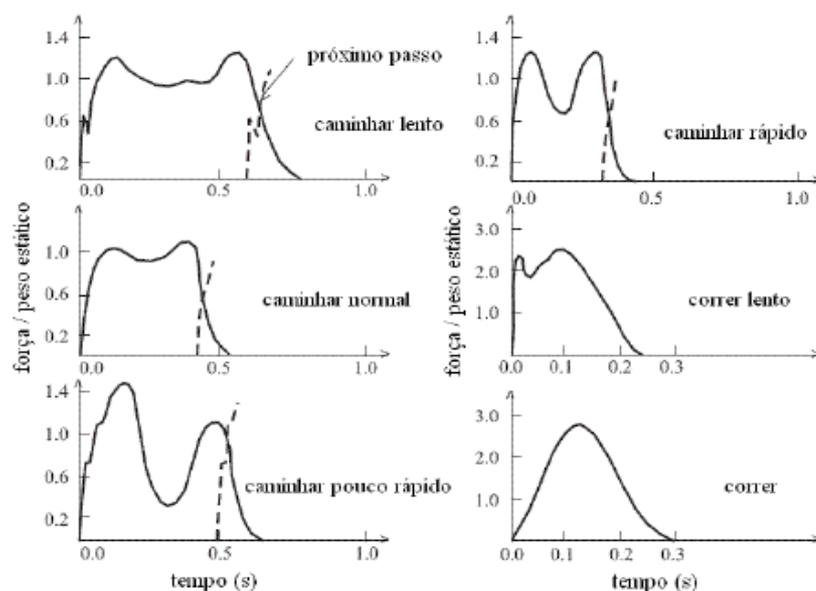


Figura 2.13 – Função de carregamento, de caminhar lento até o correr Zivanovic et al, [3]

O CEB apresenta sugestões de valores dos coeficientes apropriados para resolução da transformada de Fourier para a função de carregamento vertical (tabela 1.2). As funções de carregamento lateral e longitudinal, advindas da ação de caminhar, podem ser modeladas da mesma forma, escolhendo-se os coeficientes específicos.

Tabela 1.2 – Coeficientes para resolução da transformada de Fourier sugeridos pelo CEB [56]

Autor	$\Delta_i$	$\Phi_i$	f (Hz)	Atividade/direção da força
CEB (1991)	$\Delta_1 = 0,4$	-	2,0	Caminhar/vertical
	$\Delta_1 = 0,5$	-	2,4	
	$\Delta_2 = 0,1$	$\Phi_2 = \pi/2$	2,0	
	$\Delta_3 = 0,1$	$\Phi_2 = \pi/2$	2,0	
	$\Delta_1 = 0,1$	-	2,0	Caminhar/lateral
	$\Delta_2 = 0,2$	-	2,0	Caminhar/longitudinal

### 1.3.5 Modelo analítico de Wheeler

Wheeler, [57] apresentou valores médios para a correlação entre os parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr obtidos em testes experimentais. Na figura 2.14 são mostrados os gráficos de correlação.

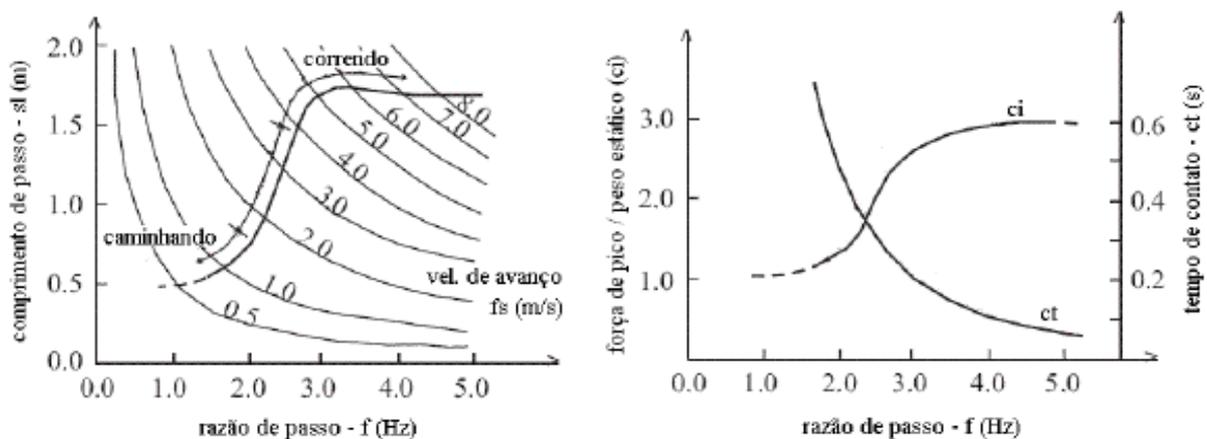


Figura 2.14 - Correlação dos parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr dada por Wheeler, [57]

O modelo determinístico no domínio do tempo de Wheeler [57] utilizou o conceito de função semi-senoidal, generalizando-o para os casos de caminhar e correr conforme a equação a seguir:

$$F(t) = F \cdot \text{sen} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot t}{ct} \right] \quad (2.12)$$

onde,

$F(t)$  = função de carregamento variando com o tempo

$F = P_0$  (peso estático da pessoa) x  $ci$  (coeficiente de impacto)

$ct$  = tempo de contato entre o pé e o piso

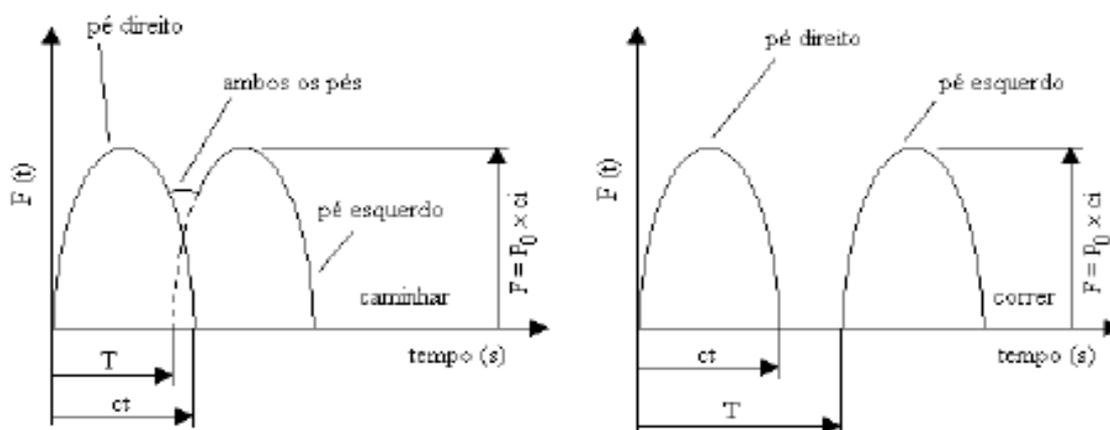


Figura 2.15 – Função de carregamento para os movimentos de caminhar e correr Wheeler [57].

### 1.3.6 Fatores de Carga para Diversos Modelos de Força

No trabalho de Zivanovic, Pavic & Reynolds [3], está apresentada uma visão em relação aos trabalhos desenvolvidos pelos principais pesquisadores que estudaram o comportamento de passarelas sob a solicitação induzida pelo caminhar humano. No trabalho Zivanovic, Pavic & Reynolds apresentaram tabela que relaciona o fator de carga dinâmica - DLF com o tipo de atividade e a direção da componente da força (tabela 1.3).

Tabela 1.3 – Fator de carga dinâmica - DLF correlacionada com o tipo de atividade e a direção da componente de força Zivanovic, Pavic & Reynolds [3]

Continua

Autor (s)	DFL's para consideração harmônica	Observações	Atividade e direção da componente de força
Blanchard et al.	$\alpha_1 = 0.257$	DFL reduzida para f de 4 a 5 Hz	Caminhar Vertical
Bachmann e Ammann	$\alpha_1 = 0,4 - 0,5$ $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,1$	Entre 2,0 e 2,4 Hz Aprox. até 2,0 Hz	Caminhar Vertical

Continua

Autor (s)	DFL's para consideração harmônica	Observações	Atividade e direção da componente de força
Schulze (após Bachmann e Ammann)	$\alpha_1 = 0,37, \alpha_2 = 0,10$ $\alpha_3 = 0,12, \alpha_4 = 0,04$ $\alpha_5 = 0,08$	Até 2,0 Hz	Caminhar Vertical
	$\alpha_1 = 0,039, \alpha_2 = 0,01$ $\alpha_3 = 0,243, \alpha_4 = 0,012$ $\alpha_5 = 0,015$	Até 2,0 Hz	Caminhar Lateral
	$\alpha_{1/2} = 0,037, \alpha_1 = 0,204$ $\alpha_{3/2} = 0,026, \alpha_2 = 0,083$ $\alpha_{5/2} = 0,024$	Até 2,0 Hz	Caminhar Longitudinal
Rainer et al.	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ e $\alpha_4$	DFLs são dependentes da frequência	Caminhar, correr e pular Vertical
Bachmann et al.	$\alpha_1 = 0,4/0,5$ $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,1$	2,0 – 2,4 Hz	Caminhar Vertical
	$\alpha_1 = \alpha_3 = 0,1$	2,0 Hz	Caminhar Lateral
	$\alpha_{1/2} = 0,1, \alpha_1 = 0,2,$ $\alpha_2 = 0,01$	2,0 Hz	Caminhar Longitudinal
	$\alpha_1 = 1,6$ $\alpha_2 = 0,7$ $\alpha_3 = 0,2$	2,0 a 3,0 Hz	Correr Vertical
Young	$\alpha_1 = 0,37 (f - 0,95) \leq 0,5$ $\alpha_2 = 0,054 + 0,0044 f$ $\alpha_3 = 0,026 + 0,0050 f$ $\alpha_4 = 0,010 + 0,0051 f$	Valor médio da DFL	Caminhar Vertical

			Conclusão
Autor (s)	DFL's para consideração harmônica	Observações	Atividade e direção da componente de força
Bachmann et al.	$\alpha_1 = 1,8/1,7$ , $\alpha_2 = 1,3/1,1$ $\alpha_3 = 0,7/ 0,5$	Pular normal 2,0 a 3,0 Hz	Pular Vertical
	$\alpha_1 = 1,9 / 1,8$ , $\alpha_2 = 1,6 / 1,3$ $\alpha_3 = 01,1 /0,8$	Pular alto 2,0 a 3,0 Hz	Pular Vertical
	$\alpha_1 = 1,7 / 0,38$ $\alpha_2 = 0,10 / 0,12$ $\alpha_3 = 0,04 / 0,02$	Até 1,6/2,4 Hz	Pular vigoroso Vertical
	$\alpha_1 = 0,5$	Até 0,6 Hz	Corpo Balançando lateral
Yao et AL.	$\alpha_1 = 0,7$ $\alpha_2 = 0,25$	Pular vigoroso sobre plataforma flexível com frequência natural de 2,0Hz	Pular vigoroso Vertical

No próximo capítulo serão abordados de maneira sucinta os critérios normativos internacionais para o cálculo de aceleração em passarelas.

## 2 **NORMAS DE PROJETO**

### 2.1 **Introdução**

Conforme exposto nos capítulos anteriores, durante os últimos anos têm se intensificado as pesquisas com relação aos efeitos causados por ações humanas em estruturas. As passarelas de pedestre têm recebido uma atenção especial dos pesquisadores. Os projetos de passarelas de pedestres têm sido cada vez mais ousados, com grandes vãos, estruturas leves, com pouca rigidez e amortecimento e baixo peso próprio. Esse conjunto de fatores as torna altamente susceptíveis a vibrações em baixas frequências.

A seguir são abordados os critérios normativos para o cálculo de aceleração em passarelas. Esses dizem relação à aceitação do nível de aceleração para as passarelas em geral, isto é, não importa o modelo, sistema estrutural ou materiais adotados, uma vez que todas as passarelas serão submetidas aos mesmos critérios de aceitação.

As normas apresentadas de forma sucinta correspondem BS 5400 (1978) [54], OHBDC (1991) [66], EUROCODES [58] [59] [60], ISO 10137 (2005)[61], CEB (1991) [56], Can3 – S16 (1989) [62], DIN 4150 - 2 (1999) [63], AISC [64].

### 2.2 **British Standard 5400 [54]**

A norma britânica BS 5400 é um dos primeiros códigos de práticas que trata especificamente de passarelas. Critérios para projetos de passarelas são encontrados no BD 29/04 e cargas no BD 37/01. Em relação a vibrações a BS 5400: Apêndice C define a maneira de avaliar a vibração vertical causada por um pedestre sobre a passarela com frequência natural não superior a 5 Hz. Com base na experiência da vibração lateral da Millennium Bridge, a versão da BS 5400, BD 37/01, incorporou recomendações para verificar o conforto também na direção lateral. Incorporou também a recomendação de realizar análise dinâmica de todas as passarelas com frequência natural lateral menor que 1,5 Hz. Embora não indique o procedimento que deverá ser seguido.

A BD 29/04 da BS 5400 estabelece os critérios e as considerações que o projetista deve observar em relação à susceptibilidade das passarelas frente as vibrações induzidas por pedestres. A norma faz menção especial às vibrações sincronizadas não intencionais que podem ser despertadas pela passagem de multidão, excitando a estrutura e provocando deslocamentos do tabuleiro. Ressalta que estruturas de passarelas com frequências de vibração natural menor que 5,0 Hz na direção vertical do tabuleiro e/ou menor que 1,5 Hz na direção transversal, são particularmente susceptíveis a grandes oscilações causadas pela passagem de grupos de pessoas em caminhar sincronização.

A frequência fundamental na direção vertical das passarelas não devera ser menor ou igual a 5 Hz. Caso a primeira frequência fundamental na direção vertical seja menor a 5 Hz, a aceleração vertical limite tolerável em qualquer região da passarela estará limitada por  $0,5 \cdot \sqrt{f_0}$  m/s<sup>2</sup>.

A aceleração vertical limite pode ser calculada com o método simplificado ou o método geral.

O método simplificado está especificado na BD 37/1 e é somente válido para estruturas de passarelas simplesmente apoiadas ou de dois ou três vãos apoiados ou contínuos, simétricos e de seção transversal constante, modeladas como vigas.

O valor da aceleração, na direção vertical, obtida por meio da equação a seguir é reduzido na faixa de frequência de 4 a 5 Hz, adotando-se respectivamente redução de 1 a 0,7, nessa faixa, com valores intermediários obtidos por interpolação linear.

$$a_v = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_0 \cdot y_{est} \cdot K_{BS} \cdot \Psi \quad m/s^2 \quad (3.1)$$

onde,

$f_0$  = frequência natural fundamental da passarela

$y_{est}$  = flecha estática no centro do vão (m)

$y_{est} = P \cdot L^3 / 48 \cdot E \cdot I_{vert}$  para  $P = 700N$

$K_{BS}$  = fator de configuração que depende do número de vãos, conforme tabela

2.1

$\Psi$  = fator da resposta dinâmica obtida por meio do gráfico da figura 3.1

Tabela 2.1 – Fator  $K_{BS}$  em função da Configuração da Passarela

Configuração da Passarela	Razão $L_1/L$	$K_{BS}$
Nº de vãos: 01L	-	1,0
Nº de vãos: 02L	-	0,7
Nº de vãos: 03 vãos $L_1 + L + L_1$	1,0	0,6
	0,8	0,8
	$\leq 0,6$	0,9

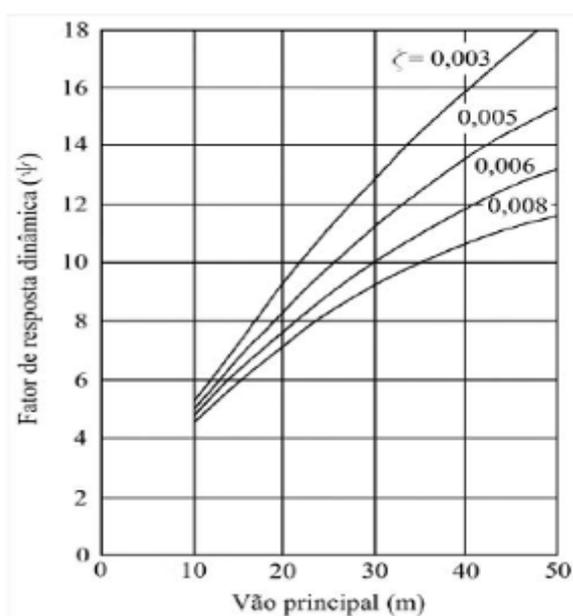


Figura 3.1 – Fator de resposta dinâmica em função do comprimento do vão e do coeficiente de amortecimento da passarela.

Para superestruturas de complexidade maior, o valor da aceleração vertical pode ser calculado assumindo que o carregamento dinâmico aplicado por um pedestre é representado por uma carga  $F_t$ , que se desloca com períodos de forma harmônica ao longo da passarela com velocidade constante  $v_t$  de acordo com a equação seguinte:

$$F = 180 \cdot \text{sen} \cdot (2\pi \cdot f_0 \cdot t) [N] \quad (3.2)$$

$$v_t = 0,9 f_0 [m/s]$$

onde

$f_0$  = frequência natural fundamental da passarela

$t$  = tempo do carregamento (s)

Como resumo da BS 5400 [54] tem-se:

- frequência natural vertical  $f_0 \geq 5$  Hz
- aceleração na direção vertical  $a_{vert} \leq 0,5 \cdot \sqrt{2Hz} \cong 0,707 \text{ m/s}^2$ ;
- não menciona um valor numérico para aceleração transversal;
- condiciona que a frequência natural na direção transversal  $\geq 1,5$  Hz para evitar risco de movimentos de vibração na direção lateral inaceitáveis;
- propõe modelo de carregamento somente na direção vertical.

### 2.3 European Committee For Standardization - Eurocode [58], [59][60]

A norma europeia Eurocode EN1990 [58]: Recomendações para projetos estruturais estabelece que o critério de conforto dos usuários deverá ser definido em termos de aceleração máxima aceitável em qualquer parte do tabuleiro. Também recomenda valores máximos de aceleração em outras partes como aparece tabela 2.2 a seguir:

Tabela 2.2 – Aceleração máxima aceitável, EN 1990 [59]

	Aceleração Máxima
Direção vertical	0,7 m/s <sup>2</sup>
Direção transversal, caminhar normal	0,2 m/s <sup>2</sup>
Direção transversal, caminhar rápido	0,4 m/s <sup>2</sup>

A norma Eurocode EN 1991[59] define modelos de cargas para projetos de pontes rodoviárias, passarelas e pontes ferroviárias. No Capítulo 5.7 trata de modelos dinâmicos de cargas humanas. Esta condição depende das características dinâmicas da estrutura, a frequência natural do tabuleiro se torna relevante e deverá

ser analisada com um modelo estrutural apropriado. Favorecem esta condição as forças exercidas por pedestres induzindo forças com a mesma frequência que uma das frequências naturais da passarela, podendo resultar em ressonância. Este fato necessita ser levado em consideração na verificação do estado limite de utilização em relação à vibração. Finalmente, o Eurocode 1 recomenda que deve ser implementado um adequado modelo dinâmico da carga gerada pelo caminhar de pessoas, bem como devem ser considerados os critérios de conforto. O Eurocode deixa a forma de modelar a carga dos pedestres por conta do projetista.

O Eurocode EN 1995 [60] – Design of Timber Structures, recomenda que sejam dispensadas as verificações de aceleração limite para passarelas que apresentam valores para as primeiras frequências naturais na direção vertical e lateral superior a 5Hz e 2,5Hz, respectivamente. Contém informações relevantes para projetos de passarelas de madeira. Recomenda necessário calcular a aceleração da ponte na direção vertical e lateral considerando a passagem de pequenos grupos e de fluxo contínuo de pessoas. O valor recomendado como aceitável é o mesmo que estava no EN1990, isto é, menor ou igual a  $0,7 \text{ m/s}^2$  para a direção vertical e menor ou igual a  $0,2 \text{ m/s}^2$  para a direção transversal.

O cálculo do valor da aceleração de passarelas estruturadas em madeira com a primeira frequência natural na direção vertical menor que 5 Hz, com um, dois, ou três vãos, será conforme a fórmula seguinte.

$$a_{vert} = a_{1,vert} \cdot k_{vert,f} \quad (m/s^2) \quad (3.3)$$

onde,

$k_{vert,f}$  = fator de grupo relacionado à frequência natural da passarela

O cálculo do valor da aceleração na direção vertical  $a_{1,vert}$  levar em conta que o fator de grupo  $k_{vert,f}$ , é expresso por meio da equação,

$$a_{1,vert} = 165 \cdot k_a \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n \cdot \zeta}}{M \cdot \zeta} \quad (m/s^2) \quad \text{onde,} \quad (3.4)$$

$$M = \rho_{ap} \cdot A_{sec,pas} \cdot L \quad \text{onde,} \quad (3.5)$$

$M$  = massa total da passarela (kg);

$\rho_{ap}$  = densidade aparente da madeira ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$A_{sec,pas}$  = área da seção transversal da passarela ( $\text{m}^2$ )

$L$  = vão da passarela (m)

$\zeta$  = taxa de amortecimento

$n = L/0,9$  número de passos para cruzar o vão da passarela

$k_a$  = fator de configuração, conforme tabela 3.1

O fator de grupo  $k_{vert,f}$  relacionado à frequência natural da passarela, mencionado anteriormente, pode ser obtido do gráfico da figura 3.2

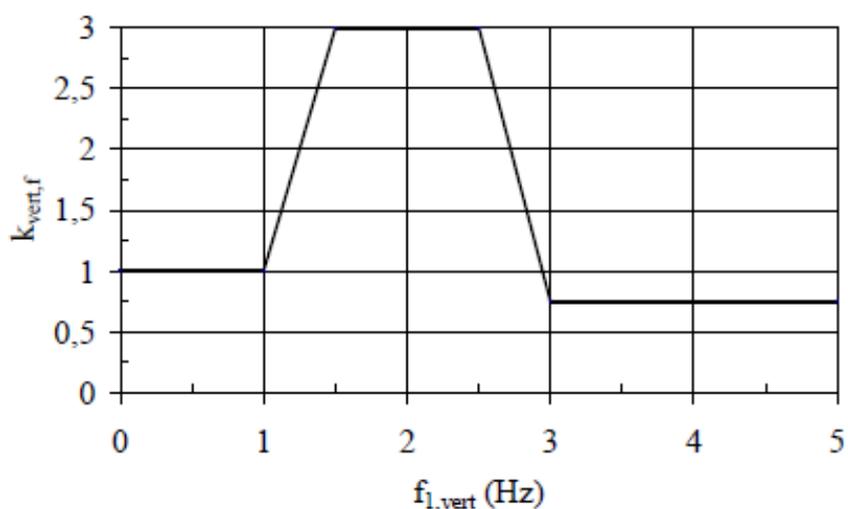


Figura 3.2 – Relação entre o fator de  $k_{vert,f}$  e a primeira frequência natural da passarela na direção vertical  $f_{1,vert}$

Este cálculo corresponde a uma excitação da passarela por um pequeno grupo de pedestres, que é uma situação normal para a maior parte das passarelas. Para as passarelas sujeitas a um fluxo maior de pedestres temos:

$$a_{vert,m\acute{a}x} = 0,027 \cdot L \cdot b \cdot a_{1,vert} \cdot k_{vert,f} \quad (\text{m}/\text{s}^2) \quad (3.6)$$

onde

$L$  = vão da passarela (m)

$B$  = largura da passarela (m)

O método apresentado simplificado é baseado na hipótese de que a frequência de passo do pedestre corresponde à primeira frequência vertical  $f_{1,vert}$  ou à metade desse valor.

Para configurações de passarelas diferentes às apresentadas na tabela 3.1, o valor da aceleração na direção vertical  $a_{vert}$  pode ser obtido através de análise dinâmica computacional utilizando como dado de entrada a força vertical exercida por um pedestre movimentando-se ao longo da passarela.

$$F(t) = 0,28 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_{1,vert} \cdot t) \quad (kN) \quad (3.7)$$

$$v_{vert} = 0,9 \cdot f_{1,vert} \quad (m/s^2) \quad (3.6)$$

onde,

$f_{1,vert}$  = primeira frequência natural da passarela na direção vertical Hz

$t$  = tempo do carregamento (s)

O Eurocode 5 chama a atenção que os cálculos e os resultados estarão sempre com uma carga de incerteza. Menciona também que se o critério de conforto não é satisfeito com uma margem significativa, deve ser previsto no projeto uma possível necessidade de instalar atenuadores dinâmicos de vibração na estrutura uma vez concluída.

Como resumo do Eurocode tem-se que:

1. Eurocode EN1990 [65]

- aceleração na direção vertical  $a_{vert} \leq 0,7 \text{ m/s}^2$ ;
- aceleração na direção transversal uso normal  $a_{lat} \leq 0,2 \text{ m/s}^2$ ;
- aceleração na direção transversal uso pesado  $a_{lat} \leq 0,4 \text{ m/s}^2$

2. Eurocode EN1995 [60]

- dispensa o cálculo da aceleração para passarelas com frequência natural vertical  $f_0 = \geq 5 \text{ Hz}$  e frequência natural transversal  $f_0 = \geq 2,5 \text{ Hz}$
- mantém os valores de aceleração de  $a_{vert} \leq 0,7 \text{ m/s}^2$  e  $a_{lat} \leq 0,2 \text{ m/s}^2$
- propõe modelos de carregamento na direção vertical e transversal para passarelas simplesmente apoiadas;

- leva em conta o efeito da ressonância por meio de um coeficiente de amplificação dinâmica que depende da frequência da passarela.

## 2.4 Comitê Euro-International du Béton - CEB (1991)[56]

Apesar de não ser uma norma, e sim uma recomendação, o CEB - Comitê Euro-International du Béton, têm dado grande foco ao dimensionamento de estruturas. Neste particular o Boletim nº 209 recomenda critérios de projetos para passarelas de pedestres. Descreve de forma geral os problemas que podem ocasionar as vibrações e apresenta os resultados de 67 passarelas de pedestres que foram instrumentadas de diferentes locais do mundo. Nas estruturas pesquisadas foi realizada a medição da frequência fundamental  $f_0$  e medidos os vãos  $L$  da passarela. Além desses parâmetros foi cadastrado o tipo estrutural e o comprimento do passo. No gráfico da figura 3.3 estão mostrados os resultados e a curva de tendência da frequência. Também a faixa que representa o intervalo de razão de passo de 95% dos pedestres.

A curva de tendência da frequência e representada pela equação:

$$f_0 = 33,6 \cdot L^{-0,73} \quad (3.7)$$

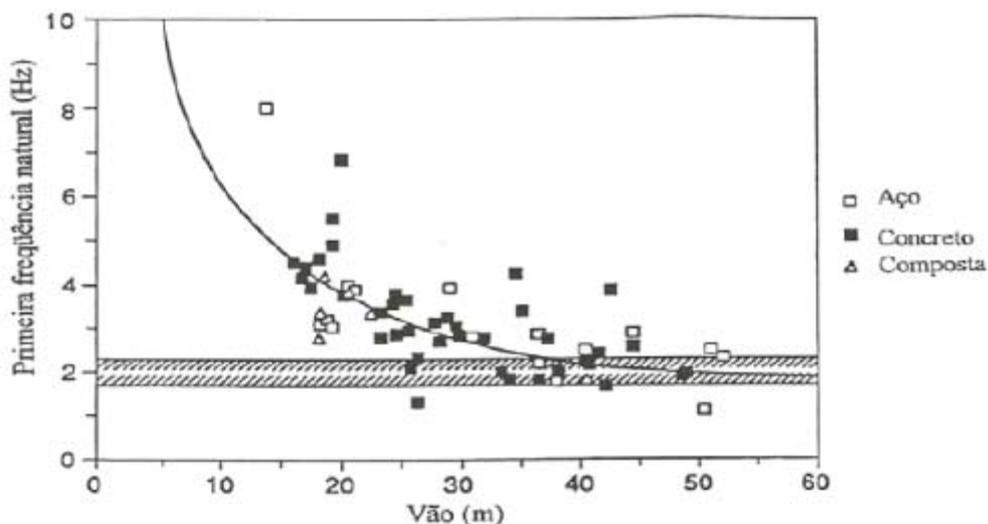


Figura 3.3 - Curva de tendência que relaciona o vão livre com a primeira frequência para passarela de diferentes materiais CEB [56]

A partir dos dados obtidos, o CEB propõe aproximações para o valor da frequência fundamental de passarelas:

$$\text{Passarela de concreto} \quad f_0 = 39 \cdot L^{-0,77} \quad (3.8)$$

$$\text{Passarela de aço} \quad f_0 = 35 \cdot L^{-0,73} \quad (3.9)$$

$$\text{Passarelas mistas} \quad f_0 = 42 \cdot L^{-0,84} \quad (3.10)$$

As recomendações do CEB mencionam também que os problemas são intensificados quando a frequência fundamental das estruturas se aproxima com o intervalo da frequência de excitação causada pelos pedestres. Da observação do gráfico da figura 3.3 isso ocorre para:

Passarelas de concreto: vãos maiores que 25 m

Passarelas de aço: vãos maiores que 35 m

Outra recomendação refere-se ao baixo amortecimento registrado neste tipo de estrutura. Segundo o CEB, durante a execução do projeto não é possível prever com precisão o amortecimento de uma passarela de pedestres recomendando o uso de dados de experiências anteriores.

O CEB apresenta resultado gráfico de pesquisa que mostra a resposta de 43 passarelas no Reino Unido, a um pedestre caminhando, para diferentes valores de decremento logarítmico  $\delta = 2 \cdot \pi \cdot \xi$ .

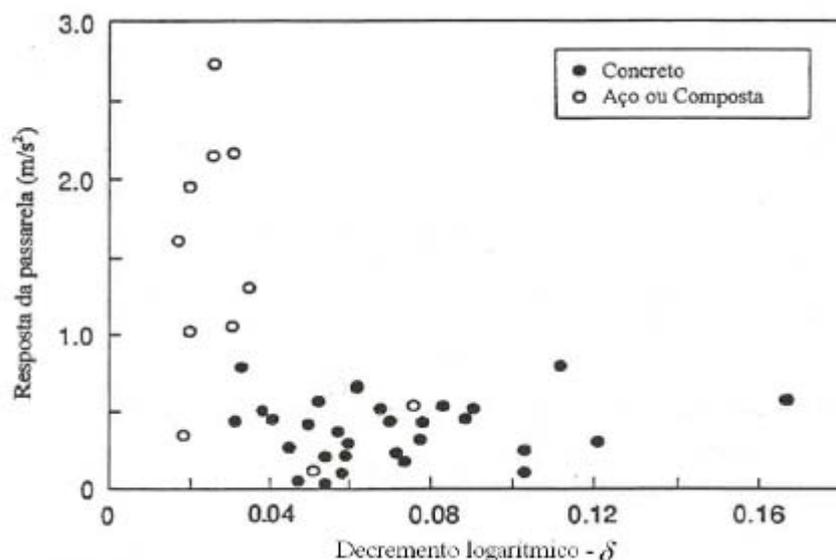


Figura 3.4 – Gráfico de correlação entre a resposta da passarela a um pedestre caminhando, para diferentes valores de decremento logarítmico  $\delta$  - CEB [56]

A seguir estão apresentados valores comuns da taxa de amortecimento  $\xi$ , para passarelas de pedestres medidos no nível de vibração causado por um pedestre caminhando na razão de passo igual à frequência fundamental.

Tabela 2.3 – Valores da taxa de amortecimento  $\xi$ , para passarelas de pedestres – CEB [56].

Tipo de Estrutura	Valor Mínimo $\xi$	Valor médio $\xi$	Valor Máximo $\xi$
Concreto Armado	0,008	0,013	0,020
Concreto	0,005	0,010	0,017
Material Compósito	0,003	0,006	-
Aço	0,002	0,004	-

Da tabela 2.3 pode ser concluído que passarelas com taxa de amortecimento menor que 0,006 (0,6%), ou seja decremento logarítmico menor de 0,04 são mais problemáticas. A tabela mostra também que as passarelas de aço são mais susceptíveis a problema de vibrações.

O Boletim nº 209 contém informações a respeito da rigidez das passarelas mostrando a variação da resposta com um pedestre caminhando com razão de passo igual à frequência fundamental. Adotando valores de aceleração máxima recomendados pelo BS 5400 [16] de  $0,7 (m/s^2)$  para um pedestre caminhando a 2 Hz, conclui que não ocorrerão problemas de vibração em estruturas com rigidez superior a 8 KN/mm.

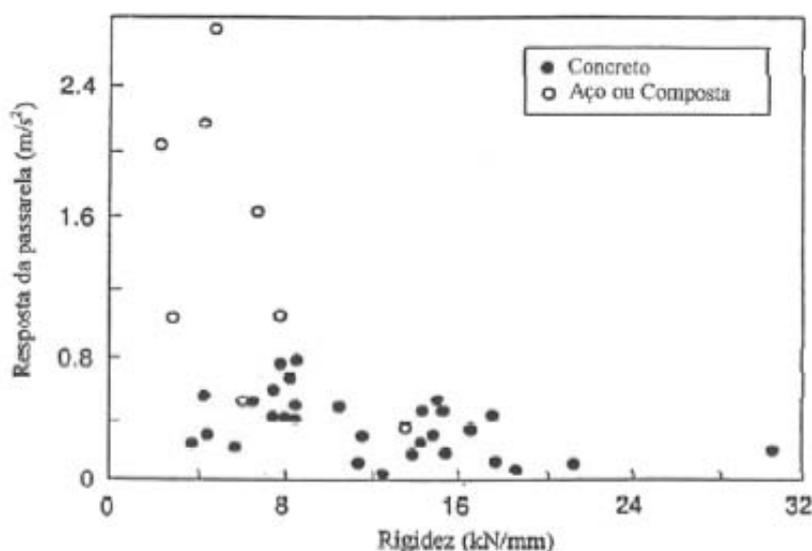


Figura 3.5 – Gráfico de correlação entre resposta em aceleração e a rigidez de passarela excitada por um pedestre caminhando CEB [56]

Com relação a limites toleráveis de serviço para passarelas o CEB faz referência às Normas BS 5400 [54], Ontário Bridge Code [66] e ISO/DIS 10137 [61]. Ao descrever os critérios o CEB [56] cita os valores máximos de aceleração para uma passarela com frequência fundamental  $f_0$  de 2 Hz, mostrados na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Acelerações limites de outras normas e tolerados pelo CEB [56]

Norma	Limite para $f_0 = 2$ Hz
BS 5400 [54]	$a_{\text{vert,lim}} = 0,5 \cdot f_0^{0,5} = 0,7 \text{ m/s}^2$ (7% g)
Ontario Bridge Code [66]	$a_{\text{vert,lim}} = 0,25 \cdot f_0^{0,18} = 0,43 \text{ m/s}^2$ (4.3% g) =
ISO/DIS 10137[61]	$a_{\text{RMS,vert,lim}} = 0,42 \text{ m/s}^2 = a_{\text{vert,lim}} = 0,59 \text{ m/s}^2$ (para $f_0 = 4 - 8$ Hz: $a_{\text{vert,lim}} = 0,42 \text{ m/s}^2$ )

O CEB [56] adota o valor de  $a_{\text{vert,lim}} = 0,5 \text{ m/s}^2$  (5% g) como limite apropriado.

Como resumo do CEB tem-se que:

- aceleração máxima  $a_{\text{vert}} \leq 0,7 \text{ m/s}^2$  para um pedestre caminhando a 2 Hz.
- aceleração máxima limite  $a_{\text{vert,lim}} = 0,5 \text{ m/s}^2$  (5% g)

## 2.5 International Organization for Standardization-ISO 10137 [61].

A norma ISO 10137 [61] foi desenvolvida com o objetivo de apresentar os princípios para prever vibrações na fase de projeto e avaliar a aceitabilidade de vibrações em estruturas.

A ISO 10137 [61] define os três parâmetros chaves que devem ser considerados ao lidar com as vibrações de estruturas no estado limite de serviço: A origem das forças vibratórias, o caminho que deve percorrer e o receptor de vibração. Os pedestres são a fonte de vibração que produzem forças ou ações dinâmicas na estrutura. O caminho de transmissão entre a fonte e o receptor das vibrações que são os pedestres cruzando a passarela está constituído pela própria estrutura. De acordo com a ISO 10137 [61], a análise da resposta requer um modelo de cálculo

que incorpore as características da fonte e o caminho de transmissão, que uma vez resolvido, forneça a resposta da vibração no receptor.

A norma auxiliará ao projetista a definir o critério de estado limite de serviço que deverá ser adotado no projeto das passarelas, em função do nível de vibração esperado que não provoque desconforto nos potenciais usuários.

No Anexo C da norma são dados alguns exemplos de critérios de vibração para passarelas. É sugerido dimensionar as estruturas utilizando as curvas básicas para vibração na direção vertical e lateral apresentadas nas figuras 3.6 e 3.7. Para passarelas está recomendado multiplicar esta curva base por um fator 60, excetuando os casos donde uma ou mais pessoas permaneçam fixas sobre a estrutura. Neste caso o fator 30 poderá ser aplicado. Segundo Zivanovic [29] isto se deve ao fato que pessoas estáticas são mais sensíveis a vibração que as pessoas caminhando.

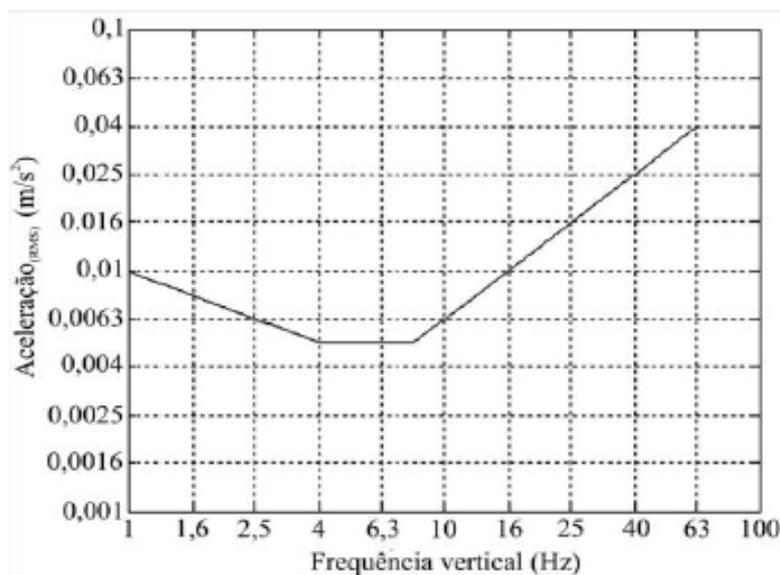


Figura 3.6 – Curva básica para vibração na direção vertical - ISO 2631/2 – 2 [67].

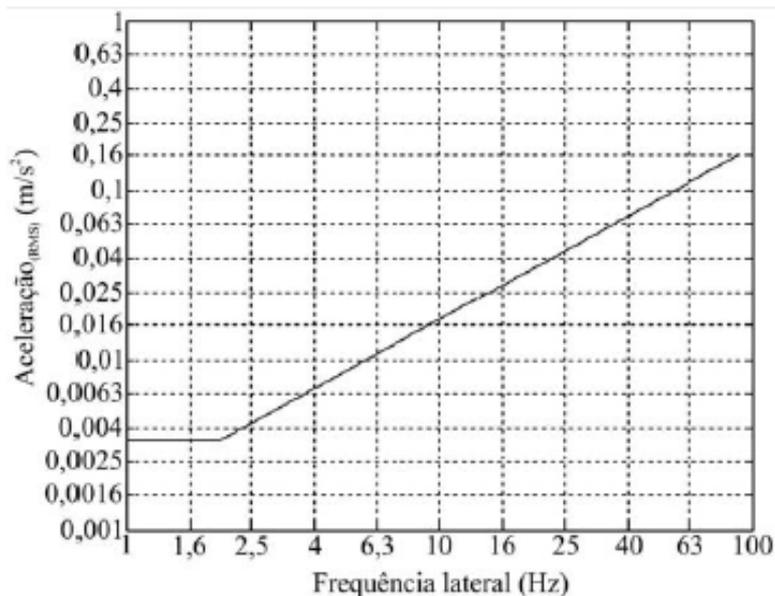


Figura 3.7 – Curva básica para vibração na direção lateral - ISO 2631/2 – 2 [67].

A ISO 2631/2 – 2 [67] considera os efeitos de carregamento periódico ou de vibrações transientes, numa faixa de frequência entre 1 Hz e 80 Hz. Distingue três níveis de desconforto humano: limite de conforto reduzido (distúrbio tolerável), limite do decréscimo de eficiência por fadiga (fadiga humana devido à vibração com conseqüente redução de eficiência: três vezes o nível de desconforto) e limite de exposição (máxima vibração tolerável com relação à saúde e segurança: 6 vezes o primeiro nível).

Os limites são dados por diagramas de aceleração efetiva em função da frequência, que dependem da direção de incidência sobre o corpo humano, com referência de um sistema de coordenadas. Esse critério se fórmula em termos do valor quadrático médio da aceleração *RMS* (*root – mean – square*), definida da seguinte forma:

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2 \cdot (t) dt} \quad (3.11)$$

onde,

a (t) = é aceleração em cada instante de tempo

T = tempo total da medição

As curvas de aceitabilidade propostas pela ISO 2631/1 – 2 [67] mencionadas anteriormente não estão baseadas em pesquisas pertinentes a vibrações que ocorrem em passarelas uma vez que estão dadas em *RMS*, Zivanovic et al. [3].

Segundo Pimentel (1997)[38], o fato de haver uma relação entre a aceleração de pico ( $a_{\text{máx}}$ ) e a aceleração *RMS* ( $a_{\text{RMS}}$ ), dada pelo fator  $a_{\text{RMS}} = \frac{a_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$ , permite incluir a curva da norma ISO 10137 [61] em comparações realizadas com outras normas.

De acordo com a ISO 10137 [61], as ações dinâmicas de uma ou mais pessoas podem ser apresentadas como força no tempo, pois variam no tempo e no espaço ao longo da estrutura. A situação do projeto deve ser selecionada dependendo do tráfego a ser admitido na passarela durante a vida útil.

Segundo a ISO 10137 [61], a força dinâmica  $F_{(t)}$  produzida por um pedestre caminhando ao longo de uma passarela pode ser expressa no domínio do tempo como uma série de Fourier,

$$F_{\text{vert}}(t) = P \left[ 1 + \sum_{i=1}^N \alpha_{i,\text{vert}} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot t - \varphi_{i,\text{vert}}) \right] (N) \quad (3.12)$$

$$F_{\text{lat}}(t) = P \left[ 1 + \sum_{i=1}^N \alpha_{i,\text{lat}} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot t - \varphi_{i,\text{lat}}) \right] (N) \quad (3.13)$$

onde,

$P$  = peso do pedestre igual a 700 N

$\alpha_i$  = coeficiente de Fourier do  $i$ th harmônico relacionado às direções vertical e lateral

$f_p$  = frequência de passo Hz

$\varphi_i$  = ângulo de fase para  $i$ th harmônico relacionado às direções vertical e lateral

$i$  = número do  $i$ th harmônico

$N$  = número total de harmônicos

$t$  = tempo de duração do carregamento (s)

Como resumo da ISO 10137 [61] tem-se:

- os valores de aceleração em *RMS* para efeito de comparação com os demais critérios normativos foram convertidos para a grandeza de pico de aceleração multiplicando-os pelos fatores  $\sqrt{2}$  e 60.

- aceleração máxima  $a_{\text{vert}} \cong 0,6 \text{ m/s}^2$ .

## 2.6 Norma DIN 4150 - 2 [63].

A norma descreve a maneira de avaliar os efeitos provocados nas pessoas, por vibração periódica e não periódica com frequência entre 1 Hz e 80 Hz. A norma estabelece os requisitos que devem ser considerados para evitar o desconforto em residências e construções similares. A norma não abrange a vibração por ondas de som originadas por aeronaves.

Normalmente os humanos em edifícios ou em moradias estão sempre expostos a vibrações pequenas, quase imperceptíveis tanto quanto possível. Entretanto estas vibrações não são fáceis de serem eliminadas totalmente com a utilização de tecnologias simples.

Para entender qual é o efeito da vibração que provoca o desconforto às pessoas, a DIN 4150 [63] no item 4, prescreve que é necessário conhecer a natureza da vibração, as características individuais de cada pessoa bem como outros fatores físicos. Os efeitos negativos somente podem ser eliminados quando a vibração é completamente imperceptível.

Entre os parâmetros que devem ser conhecidos para caracterizar a vibração estão: severidade da vibração, frequência, duração da exposição e o efeito surpresa.

Entre os fatores humanos a norma menciona: estado de saúde física e psicológica, grau de adaptação, relação das pessoas com a fonte de vibração, expectativa de qualidade de vida em função da vizinhança entre outras. Ao analisar os fatores humanos deve ser levado em consideração ainda os efeitos secundários como vibração de lustres, quadros, vidros ou paredes, que podem provocar desconforto.

A norma, no item 6, define a forma de avaliar os problemas decorrentes da vibração através de um fator de intensidade de percepção  $KB$ . Os dois fatores utilizados são: avaliação de vibração severa máxima  $KB_{F_{\max}}$  e avaliação de vibração severa  $KB_{F_{Tr}}$  que devem ser calculados separadamente para cada direção (x, y, z).

O fator  $KB_{F_{\max}}$  para baixas frequências, como é o caso de edificações, poderá ser determinado a partir da equação,

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v_{\max}}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}} \quad \text{e,} \quad (3.14)$$

$$KB_{F_{\max}} = KB \cdot C_F \quad (3.15)$$

onde

$f$  = frequência Hz

$f_0 = 5,6$  Hz (frequência limite)

$v_{\max}$  = velocidade máxima em mm/s

$C_f$  = constante empírica para diferentes tipos de vibração (tabela 2.5)

Os valores de frequência  $f$  e velocidade  $v_{\max}$  podem ser obtidos através de medições instrumentadas.

Tabela 2.5 - Valores empíricos para a constante  $C_f$  para diferentes tipos de Vibração – DIN 4150 - 2 [63]

Tipo	Descrição da Vibração <sup>(1)</sup>	$C_F$ <sup>(2)</sup>
1	Senoidal com pequenas distorções ( geradas por serrarias a grande distância do equipamento de medição ou onde pode existir ressonância)	0,9
2	Senoidal com grandes distorções ( maior que 20%) ( geradas por serrarias próximas, ou donde existem outras harmônicas)	0,8
3	Randômica e periódica com pulsações: a) com ressonância ( geradas por moinhos pesados, batestacas ( com medições sobre piso de habitações ) b) sem ressonância (medidas sobre pisos de habitações sem porão)	0,8 0,7
4	Eventos isolados de curta duração: a) com ressonância b) sem ressonância	0,8 0,6

(1) O valor  $C_f$  será selecionado em função da característica básica do sinal coletado. Os exemplos servem como orientação;

(2) O  $C_f$  são valores médios empíricos com desvios esperados de  $\pm 15\%$  esperados.

A avaliação da exposição humana à vibração será realizada comparando o valor de  $KB_{F_{\max}}$  com os valores limites de  $A_u$  e  $A_0$  especificados da DIN 4150 – 2 [63], apresentados na tabela 2.6.

O valor  $KB_{F_{Tr}}$  está dado pela equação,

$$KB_{FT_r} = KB_{FT_m} \sqrt{\frac{T_e}{T_r}} \quad (3.16)$$

onde

$T_r$  = avaliação do período (diurno: 16 h, noturno: 8h)

$T_e$  = exposição no período fora do período restante

$$KB_{FT_m} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N KB_{FT_i}^2} \quad (3.17)$$

onde

N = número de ciclos

Tabela 2.6 - Valores em aceleração ( $m/s^2$ ) para avaliação da exposição humana à vibração em edificações habitacionais e espaços similares - DIN 4150 – 2 [63]

Tipo	Localização da Edificação	Diurno			Noturno		
		$A_u$	$A_0$	$A_R$	$A_u$	$A_0$	$A_R$
1	Área industrial com edificações residenciais somente para pessoal ligado à indústria.	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Área predominantemente Comercial	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Áreas sem predominância comercial nem residencial	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Áreas predominantemente comerciais	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Área especialmente protegidas (hospitais ou resorts)	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

$A_u$  = limite inferior

$A_0$  = limite superior

$A_R$  = limite de comparação com  $KB_{FT_r}$

## 2.7 Guia Prático - Floor Vibration Due to Human Activity – AISC [64]

O Guia de projeto “Floor Vibrations Due to Human Activity” foi desenvolvido pelo AISC - American Institute of Steel Construction e faz parte de uma série de guias intitulados “Steel Design Guide Séries 11”. O objetivo desse guia de projeto é fornecer princípios básicos e ferramentas de análises simples para avaliação de pisos reticulados em aço e passarelas quanto a vibrações devido a atividades humanas.

O critério de Aceitação para o Conforto Humano pode ser empregado na avaliação da resposta dinâmica de sistemas estruturais associados a escritórios, shoppings, passarelas e ocupações similares, considerando as seguintes hipóteses propostas por Murray et al.

- 1- Os valores para a aceleração limite são os considerados pela norma International Standard Organization, ISO 2631/2 [67]. A ISO Standard sugere limites em, rms (*root mean square*) das acelerações, como um múltiplo da linha base da curva apresentada na figura 3.8. Os múltiplos para o critério empregado neste trabalho, são representados em termos das acelerações de pico, iguais a 10 para escritórios, 30 para shoppings e passarelas internas, e 100 para passarelas externas. Para fins de projeto, esses limites podem ser considerados em uma faixa que varia entre 0,8 e 1,5 vezes os valores recomendados por norma, dependendo da duração da vibração e da freqüência dos eventos referentes à vibração.
- 2- Considera-se como solicitação dinâmica uma componente harmônica dependente do tempo que coincide com a freqüência fundamental do piso, como mostra a equação a seguir:

$$F(t) = P \cdot \alpha_i \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_p \cdot t) \quad (3.18)$$

onde,

- P = peso de uma pessoa (700 N);
- $\alpha_i$  = coeficiente dinâmico para força harmônica;
- i = múltiplo harmônico da freqüência do passo (1, 2, 3...);
- $f_p$  = freqüência do passo da atividade;
- t = tempo

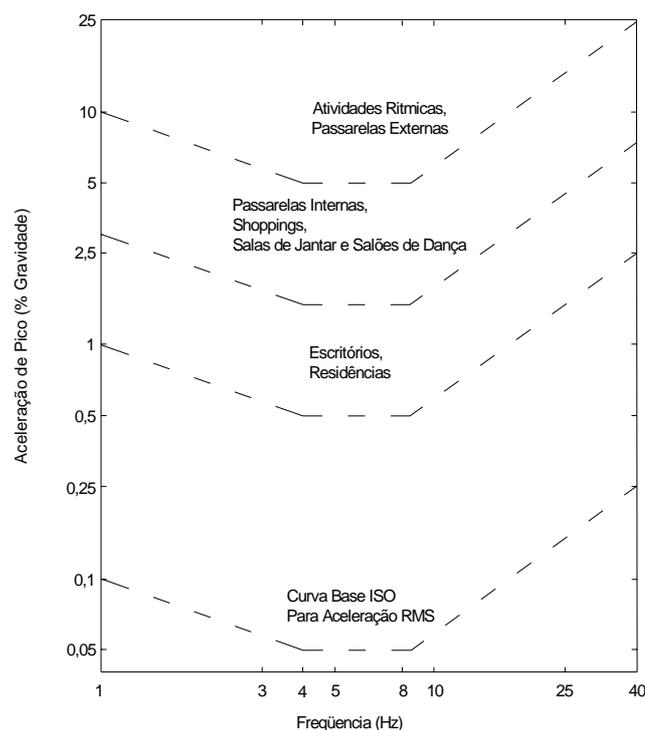


Figura 3.8 - Aceleração de pico em % g x Frequência em Hz, recomendada para conforto humano em vibrações devidas a atividades humanas, ISO 2631/2 [67]

Deve-se ressaltar que apenas uma componente harmônica é empregada no caso associado à atividade humana de caminhar, já que a participação dos demais harmônicos é pequena em comparação com aquele associado à condição de ressonância. Na sequência, valores correntes da frequência de excitação,  $f_p$ , e do coeficiente dinâmico,  $\alpha_i$ , são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Frequências da excitação,  $f_p$ , e coeficientes dinâmicos,  $\alpha_i$ , associados às atividades humanas, Murray et al.[34]

Harmônico $i$	Caminhar		Ginástica		Dança	
	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$
1	1,6 - 2,2	0,5	2 - 2,75	1,5	1,5 - 3,0	0,5
2	3,2 - 4,4	0,2	4 - 5,5	0,6	-	-
3	4,8 - 6,6	0,1	6 - 8,25	0,1	-	-
4	6,4 - 8,8	0,05	-	-	-	-
$\alpha_i$ = pico da força senoidal / peso do ser humano						

De acordo com as hipóteses anteriores, a aceleração do sistema estrutural, associada à condição de ressonância, é dada por:

$$\frac{a}{g} = \frac{R \cdot \alpha_i \cdot P}{\beta \cdot W} \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot f_p \cdot t) \quad (3.19)$$

onde,

- $a/g$  = razão entre a aceleração do piso e a aceleração da gravidade;
- $g$  = aceleração da gravidade;
- $R$  = fator de redução;
- $\beta$  = coeficiente de amortecimento modal;
- $W$  = peso efetivo do piso.

O fator de redução  $R$ , leva em conta o fato de que o movimento ressonante permanente não é alcançado através da caminhada e que a pessoa que está caminhando e a pessoa perturbada não estão simultaneamente no local de máxima amplitude modal. É recomendado que seja tomado igual a 0,7 para passarelas e 0,5 para estruturas de piso que possuam configurações modais associadas a duas direções, Murray et al [34].

A aceleração de pico devida ao caminhar de pessoas é estimada com base na equação apresentada, considerando o menor harmônico  $i$  para o qual a frequência da excitação,  $f = i \cdot f_p$ , coincide com a frequência fundamental do piso. A aceleração de pico é então comparadas com os valores limites propostos pela norma ISO 2631/2 [67], como apresentado na figura 3.8.

A expressão (3.18) pode, ainda, ser simplificada considerando-se que o coeficiente dinâmico para a componente força harmônica  $i$ ,  $\alpha_i$ , seja expresso em função da frequência da excitação,  $f$ , de acordo com a equação:

$$\alpha_i = 0,83 \exp(-0,35f) \quad (3.20)$$

Substituindo-se o coeficiente dinâmico,  $\alpha_i$  calculado, na equação (3.18) teremos,

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \cdot \exp(-0,35f_n)}{\beta \cdot W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (3.21)$$

onde,

- $a_p/g$  = aceleração de pico estimada em unidades de g;
- $a_0/g$  = aceleração limite proposta por norma, ISO 2631/2 [67]
- $f_p$  = frequência natural do piso;
- $P_0$  = força constante:  $P_0 = 0,29$  kN - pisos e  $P_0 = 0,41$  kN - passarelas.

O numerador  $P_0 \cdot \exp(-0,35f_n)$ , mostrado na Equação, representa uma força harmônica efetiva devida ao caminhar, resultando na resposta dinâmica da estrutura, em termos da aceleração de pico, associada à condição de ressonância referente à frequência natural da estrutura.

## 2.8 Canadian Standards Association [68]

A Norma Canadense CAN 3 – 16.1 2001 [68], Limites States Design of Steel Structures, no Apêndice C – Guide for Floor Vibrations, define os requisitos gerais que devem ser atendidos por estruturas de pisos. Comenta que as estruturas são cada vez mais leves, com grandes vãos e com amortecimento reduzido, condições que podem gerar distúrbios nos usuários. Recomenda que o comportamento dinâmico do piso seja avaliado pelo projetista da estrutura considerando os aspectos a seguir,

- características e natureza da força de excitação: o caminhar e atividades rítmicas.
- critério de aceitação para o conforto humano que depende da destinação da área do piso;
- determinação da frequência do sistema estrutural do piso incluindo os efeitos de continuidade;

- taxa de amortecimento modal;
- peso efetivo do piso.

O Guia recomenda ainda verificar as recomendações contidas no NBC - National Building Code of Canadá.

O item 4.1.10.6 do NBC se refere ao efeito de ressonância e as forças de excitação estabelecendo:

- 1 - Em estruturas destinadas a receber atividades rítmicas, tais como, dançar, espetáculos musicais, aulas de ginástica aeróbica e espetáculos musicais, a frequência fundamental de vibração não deverá ser menor que 6,0 Hz. Caso contrário, o comportamento da estrutura e os efeitos da ressonância devem ser verificados através de análises dinâmico.
- 2 - Em pisos destinados a assembléias e outras estruturas que suportam assentos fixos usadas para acomodar grande número de pessoas ao mesmo tempo, como por exemplo, arquibancadas, estádios e balcões de teatro devem ser projetados para resistir uma força horizontal igual a não menos que 0.3 kN para cada metro de comprimento dos assentos alocados paralelos a cada linha de assentos; e não menos que 0,15 kN para cada metro de comprimento de assentos alocados em ângulos reto a cada linha de assentos, assumindo que tais forças atuarão independentemente uma da outra.

A norma Canadense Can3 [68] - Limites States Design of Steel Structures, anexo G, recomenda realizar ensaios experimentais para avaliar o desempenho de pisos. O ponto de medição deve estar próximo do meio do vão e a pessoa que participará da avaliação, deve estar posicionada próxima a este ponto. O equipamento de medição deve estar apto a filtrar frequências superiores a 1,5 vezes a frequência fundamental da estrutura. Os ensaios deverão ser realizados por uma pessoa de peso médio, calçando sapatos de solado macio. A pessoa deve ficar apoiada na ponta dos pés e se deixar cair sobre os calcanhares num local próximo ao ponto instrumentado. Este teste é denominado de teste de impacto dos calcanhares – “Heel drop test”.

A frequência fundamental da estrutura, a taxa de amortecimento e a aceleração de pico são obtidas a partir destas medições.

Na figura 3.9 está o sinal do ensaio de impacto dos calcanhares onde pode ser visto o pico inicial da aceleração  $a_0$  e a vibração transiente típica.

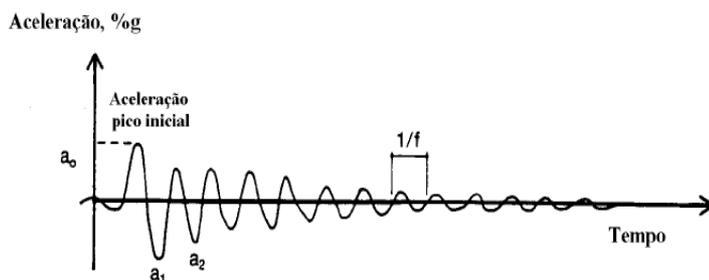


Figura 3.9 - Vibração transiente típica do teste do impacto sobre os calcanhares [68]

Na figura 3.10 representa a relação entre o percentual de amortecimento crítico e o número de ciclos para  $a_n = 0,8 \cdot a_0$ .

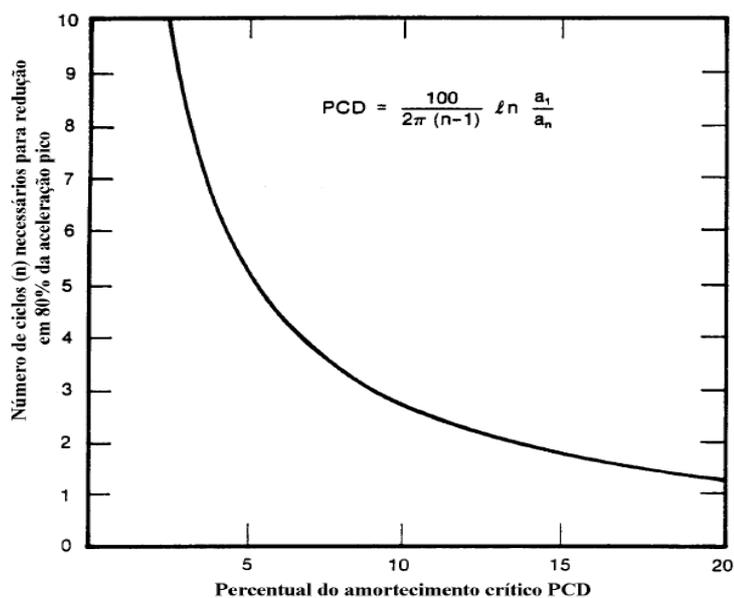


Figura 3.10 - Correlação entre o percentual de amortecimento crítico e o número de ciclos para  $a_n = 0,8 \cdot a_0$  [68]

A análise é realizada, através da comparação, da vibração com os limites estabelecidos na figura 3.11 determinando-se se as vibrações são aceitáveis quanto ao conforto humano. Alternativamente podem ser medidas vibrações da estrutura induzidas por diferentes pessoas caminhando sobre o piso. Neste caso, compara-se o pico médio de aceleração com o critério de vibrações contínuas.

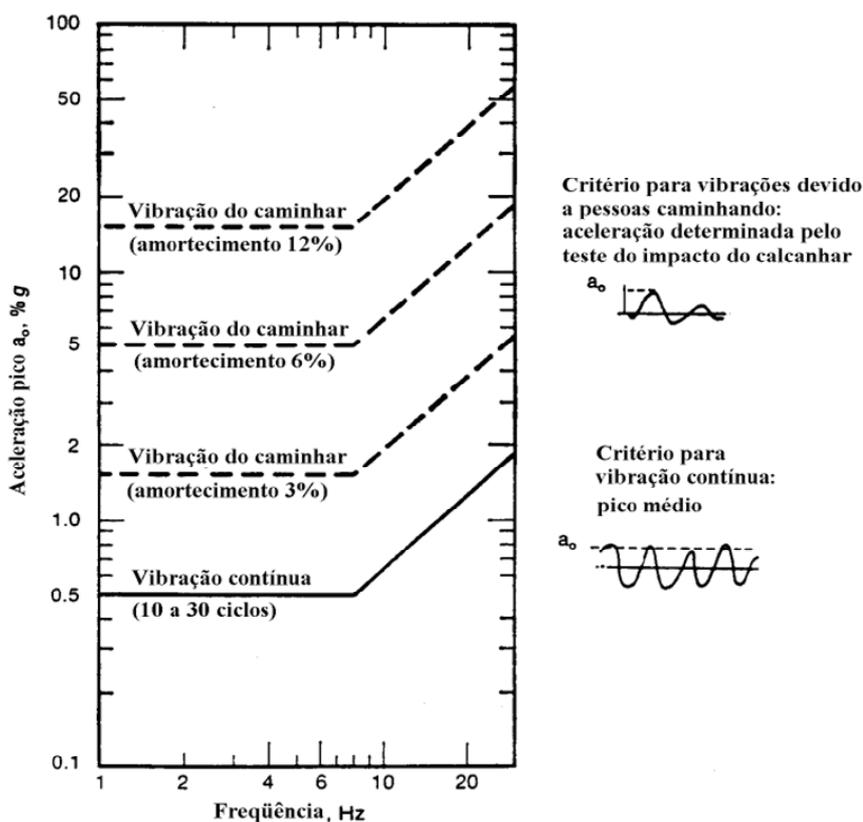


Figura 3.11 - Diagrama de vibração limite em termos de aceleração de pico em função da correlação entre relação entre o percentual de amortecimento crítico e o número de ciclos para  $a_n = 0,8 \cdot a_0$ .

Caso não seja possível realizar o ensaio experimental, pode ser feita uma estimativa da aceleração de pico  $a_0$ , em percentual do g, devido ao impacto dos calcanhares no piso. Deverá ser considerada a força do impacto, a frequência fundamental e a massa da estrutura. A estimativa deve ser feita para estruturas de piso com frequência fundamental menor que 10 Hz e vãos menores que 7,0 m - Allen e Rainer [19].

$$a_0 = 0,9 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{impulso}}{\text{massa equivalente}} \frac{100}{g} = \frac{60 \cdot f}{\varpi \cdot B \cdot L} \quad (3.22)$$

onde

$f$  = frequência fundamental calculada de estrutura em Hz dada pelas equações (3.21) e (3.22);

$\text{impulso} = 70 \text{ N}\cdot\text{s}$

$g$  = aceleração de gravidade

$\varpi$  = peso do piso kPa

$L$  = comprimento do vão em (m)

$B$  = largura da viga (m)

$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} \quad (3.23)$$

$$f_1 = 156 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_T}{w \cdot L^4}} \quad (3.24)$$

onde

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal do aço (200.000 MPa)

$I_T$  = momento de inércia ( $\text{mm}^4$ ) da seção equivalente

$L$  = comprimento (mm)

$w$  = peso permanente da seção T em N x mm do vão

$f_2$  = freqüência calculada da mesma forma da equação (2), mas para as vigas principais.

A OHBDC – Ontario Highway Bridge Design Code [66] recomenda que a aceleração limite na direção vertical  $a_{\text{lim,vert}}$  seja verificada caso a primeira freqüência natural na direção vertical  $f_{1,\text{vert}}$  seja menor que 4,0 Hz. Esta Norma adota um valor mais conservador para a aceleração limite na direção vertical  $a_{\text{lim,vert}}$  calculada pela equação,

$$a_{\text{lim,vert}} = 0,25 \cdot f_{1,\text{vert}}^{0,78} \quad \text{m/s}^2 \quad (3.25)$$

onde

$f_{1,\text{vert}}$  : primeira freqüência natural da passarela na direção vertical (Hz)

A norma canadense OHBDC [66] recomenda calcular o valor da aceleração na direção vertical  $a_{\text{vert}}$  por meio do método simplificado da norma British Standards BS 5400 – Parte 2 [54] segundo a equação

$$a_{\text{vert}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{1,\text{vert}}^2 \cdot y_{\text{est}} \cdot K_{BS} \cdot \Psi \quad \text{m/s}^2 \quad (3.26)$$

Para estruturas diferentes daquelas mostradas na tabela 3.4 o valor da aceleração na direção vertical poderá ser calculado pela equação da norma British Standards BS 5400 [54],

$$F = 180 \cdot \text{sen} \cdot (2\pi \cdot f_0 \cdot t) \quad (N) \quad (3.27)$$

$$v_{\text{vert}} = 0,9 \cdot f_{1,\text{vert}} \quad (m/s) \quad (3.28)$$

onde

$f_{1,\text{vert}}$  = primeira freqüência natural da passarela na direção vertical (Hz)

t = tempo de duração do carregamento (s)

## 2.9 Resumo dos Critérios Normativos

Os critérios normativos analisados para o cálculo de passarelas dizem relação à aceitação do nível de aceleração. Não fazem distinção ao modelo, sistema estrutural ou materiais adotados, uma vez que todas as passarelas serão submetidas aos mesmos critérios de aceitação.

Das normas apresentadas de forma sucinta podem ser tiradas as conclusões a seguir:

- a BS 5400 [54] especifica valores limites para a freqüência e aceleração vertical estabelecendo condições para a aceitação da freqüência transversal;
- o EUROCODE [58][59][60] fixa valores para a aceleração máxima na direção vertical e transversal e estabelece valores de freqüência a partir dos quais o cálculo da aceleração é dispensado. Leva em conta o efeito de ressonância.
- o CEB [56] fixa valores de aceleração máxima vertical. Não estabelece limites para a freqüência nem para aceleração transversal.
- ISO 10137 [61] fixa a aceleração vertical máxima.
- A Norma DIN [63] analisada não faz menção a passarelas já que trata de edificações residenciais.

Nas figuras da teses de doutorado de Segundinho 2010 [68], estão apresentados os diversos critérios normativos para freqüências de vibração na direção vertical e transversal correlacionados com acelerações limites.

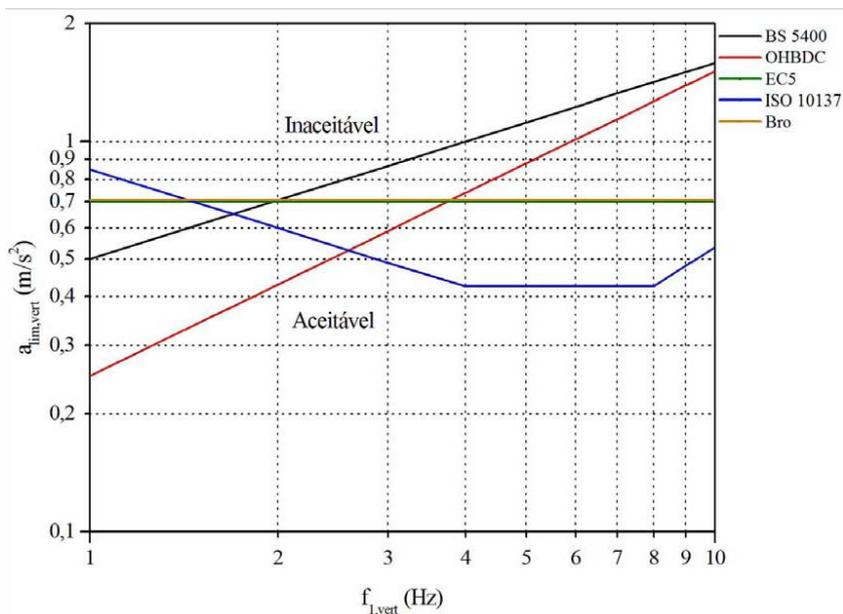


Figura 3.12 - Comparativo entre os diversos critérios normativos – Força na direção vertical  $m/s^2 \times Hz$  [68]

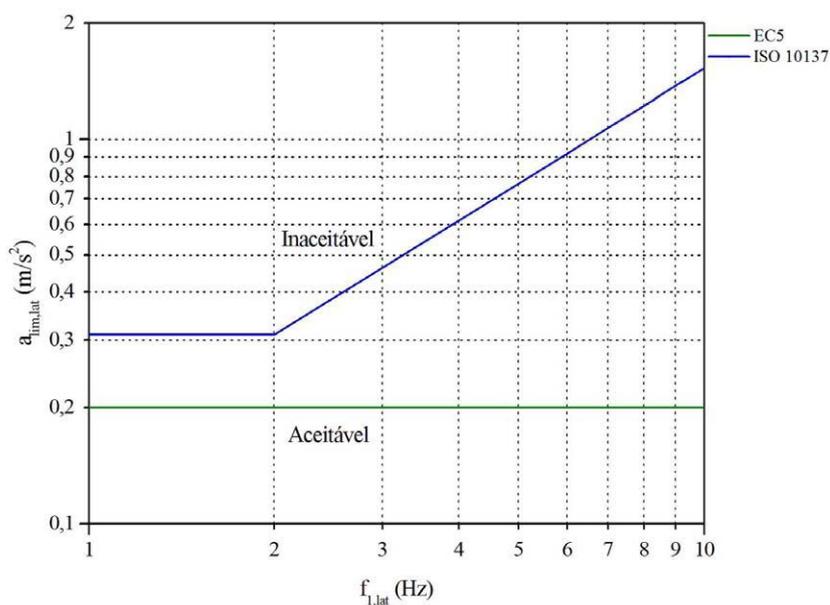


Figura 3.13 - Comparativo entre os diversos critérios normativos – Força na direção transversal  $m/s^2 \times Hz$  [68]

Em relação às normas brasileiras, que não foram incluídas na análise deste capítulo, podemos mencionar:

A NBR 6118 [14] define que: "As ações dinâmicas podem provocar estados limites de serviço e estados limites últimos por vibração excessiva ou por fadiga dos

materiais”. Recomenda afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura ( $f$ ) da frequência crítica  $f > 1,2 f_{crit}$ .

Ainda recomenda que na falta de valores determinados experimentalmente, pode ser adotado frequência crítica  $f_{crit}$  de 1,6 a 4,5 Hz para passarelas de pedestres.

A NBR 8800/2007 [15], sugere estudar o problema através de análise dinâmica, levando-se em conta as características das excitações e os critérios de aceitação para conforto humano entre outros.

A NBR 7188/1984 [16], estabelece a sobrecarga em passarelas em única classe, onde a carga móvel é uniformemente distribuída de 5 kN/m<sup>2</sup>, não majorada. Ao considerar esta simplificação do carregamento móvel como uma carga uniformemente distribuída, a norma faz uma análise estática equivalente, isto é, despreza o comportamento dinâmico produzido pela movimentação das pessoas.

### 3 MODELO ESTRUTURAL DA PASSARELA EM ESTUDO

Apresentam-se neste capítulo as principais características estruturais da passarela de pedestres Osvaldo Aranha, construída em estrutura mista aço/concreto, cujos projetos para este estudo foram consultados no arquivo da CGP - Coordenadoria Geral de Projetos da Prefeitura da Cidade de Rio de Janeiro. O projeto da estrutura da passarela, segundo consta nos desenhos, foi desenvolvido internamente pela equipe da CGP em 1990. Para o dimensionamento foram utilizadas as normas das ABNT vigentes na época.

A passarela foi escolhida em função do modelo estrutural, pelas características da solicitação imposta diariamente, comportamento dinâmico observado em visitas prévias e ainda pela proximidade com o Campus da UERJ.

Ressalta-se que durante a pesquisa do projeto, não foram localizados estudos dinâmicos.

Finalmente é conveniente mencionar que logo nas primeiras visitas foram identificadas discrepâncias entre o projeto e a estrutura executada o que nos levou a realizar o “as built” de modo a obter dados confiáveis para a construção do modelo espacial.



Figura 4.1 – Passarela sobre a Avenida Osvaldo Aranha -Fonte: Site Google

### 3.1 Descrição da Estrutura

A passarela objeto de análise está localizada na Cidade de Rio de Janeiro, sobre um trecho da Avenida Oswaldo Aranha no bairro de Maracanã. Está destinada à interligação para pedestres entre o terminal multimodal de São Cristovão e o Rio Maracanã. Pela localização a estrutura possui um fluxo de solicitação intenso no início da manhã e ao final da tarde e, apenas normal durante o restante do período.

A estrutura da passarela é composta por 3 vãos de comprimentos diferentes: 32,50 m, 17,50 m e 20,00 m e 2 balanços de 5,00m e 7,50 m. A disposição dos apoios que levaram a projetar vãos diferenciados foi consequência da largura das vias da Avenida Oswaldo Aranha e a disposição do canteiro central que formava o sistema viário existente na época em que foi construída a estrutura.



Figura 4.2 - Vista lateral da passarela

Os acessos à passarela também são diferentes. No lado de São Cristóvão a passarela recebe através do vão em balanço, os usuários que vem do Metrô e das composições da SuperVia. No lado Maracanã o acesso é através de estrutura independente constituída por lances em rampas projetada e construída conjuntamente com a passarela.

A superestrutura da passarela projetada em estrutura tubular de aço com todas as ligações soldadas é contínua, com 82,50 m, apoiada em quatro pórticos. Estruturalmente está constituída por duas treliças planas que se interligam através de contraventamentos horizontais fixados na corda superior e inferior da treliça, em cada um dos nós que se formam no encontro com as diagonais. Os contraventamentos inferiores (transversinas), reforçados com um perfil cantoneira invertido soldado, conferem apoio às placas premoldadas de concreto armado que conformam a laje do tabuleiro. Na região dos apoios a treliça têm um ganho de rigidez com a incorporação de montantes a partir dos nós. Complementam o sistema estrutural os montantes na extremidade dos balanços.

A mesoestrutura da passarela está composta por quatro pórticos formados por colunas tubulares ligadas a meia altura pela viga travessa, perfil quadrado de 254 x 254 mm. Os dispositivos de apoio, que estão fixados à viga travessa por solda recebem a superestrutura que se apoia pela corda inferior das treliças. Para garantir o funcionamento do apoio, a interface entre a corda da treliça e o berço de apoio está constituída por placa de neoprene, que não consta no projeto.



Figura 4.3 - Vista lateral da passarela e da rampa que dá acesso à Estação São Cristóvão



Figura 4.4 – Encontro da passarela com a plataforma do Metrô.



Figura 4.5 - Vista parcial do interior da passarela com detalhes das treliças.



Figura 4.6 – Detalhe do nó na corda superior

As colunas, de altura efetiva variável em função da topografia local, estão engastadas ao bloco de fundação através de chapas de base de 35 mm de espessura e parafusos, chumbados no concreto, com porca e contra porca.

A fundação profunda está composta, segundo indica o projeto, por estacas executadas por duplo trilho TR-37 soldados. Não foram localizados registros da cravação das estacas, mas em função da geologia local, o comprimento estimado está em torno de 12 m. O bloco de coroamento das estacas é de concreto armado de 0,65 x 0,65 e 1,20 m de altura com armadura de fretagem com estribos em forma de hélice. Entre os blocos de cada pórtico foi executada uma viga de equilíbrio de 0,40 x 0,70 m.



Figura 4.7– Detalhe dos pórticos e a vista inferior do tabuleiro da passarela.



Figura 4.8 – Vista do encontro da viga travessa com a coluna.

O piso da passarela são as próprias placas de concreto premoldado que vencem o vão entre os contraventamentos (transversinas) inferiores. O rejuntamento entre as placas foi executado com argamassa, que pelas suas características, permite a percolação de água eventualmente acumulada.

Complementa a passarela a cobertura executada por laminados de policarbonato estruturados em formato de arco para facilitar o escoamento de águas de chuva, o corrimão e guarda-corpo compostos por barras de seção tubular em aço.

A proteção da estrutura metálica, segundo consta no projeto, foi especificada em duas demãos de “primer” e tinta de acabamento também aplicada em duas demãos na cor branca a base de borracha clorada. Não foi especificada a espessura final da camada seca.

Finalmente, cabe ressaltar que a proteção da estrutura se encontra em processo acelerado de deterioração, sendo necessário um novo tratamento superficial para prolongar a vida útil da estrutura.

### 3.2 Detalhamento da Geometria da Estrutura

Como foi mencionado no início deste capítulo, foi necessário fazer o “as built” da estrutura tendo em vista as discrepâncias observadas em relação ao projeto e à necessidade de estar de posse de informações reais que se requer para a construção do modelo espacial.

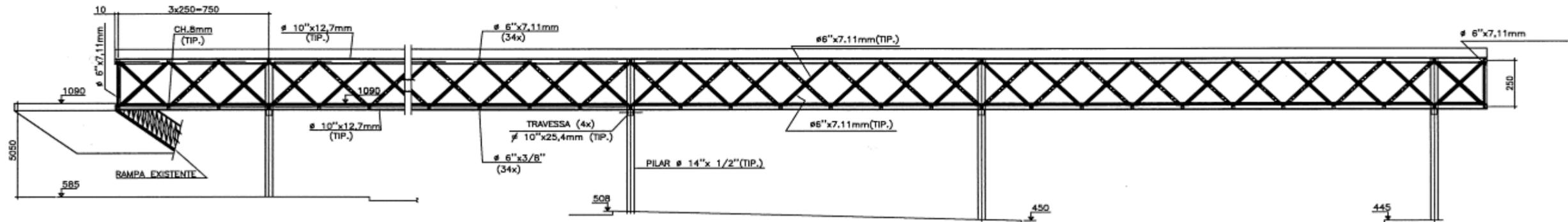
Com esse objetivo foi levantada a geometria da estrutura e reposicionados os elementos do acordo com as informações de campo. A maior alteração da parte visível da estrutura esteve relacionada com a mudança de posição dos pórticos de apoio extremos que com o deslocamento aumentaram o vão dos balanços em 2,50 m. A verificação das dimensões da passarela e dos perfis tubulares que compõem a estrutura foram medidos tendo sido verificado:

- as peças estruturais bem como o comprimento total da passarela estão de acordo com o projeto;
- os diâmetros de todos os elementos estiveram de acordo com o projeto;
- a espessura da parede verificada com técnicas de ultra-som, em alguns casos foi inferior à especificada;
- o tabuleiro da passarela foi executado por placas pré-moldadas de concreto que com o rejuntamento de argamassa conformam o piso.

Nas páginas a seguir estão apresentados desenhos com o detalhamento da estrutura que serviu para a elaboração do modelo espacial que orientou a análise experimental.

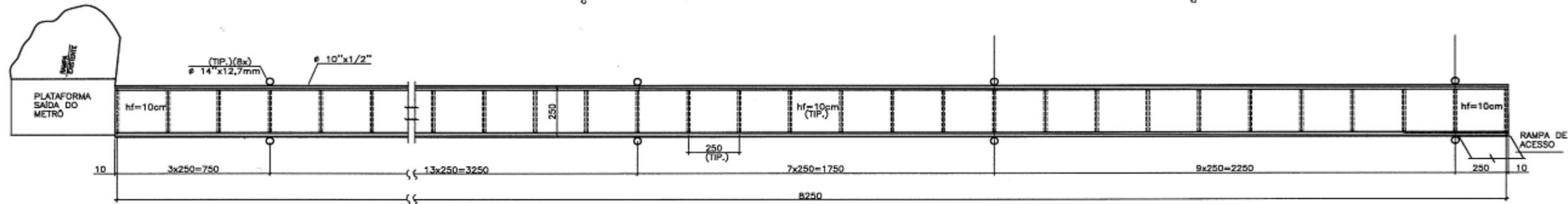
**PASSARELA OSWALDO ARANHA**  
**VISTA LATERAL**

ESC.:1/300



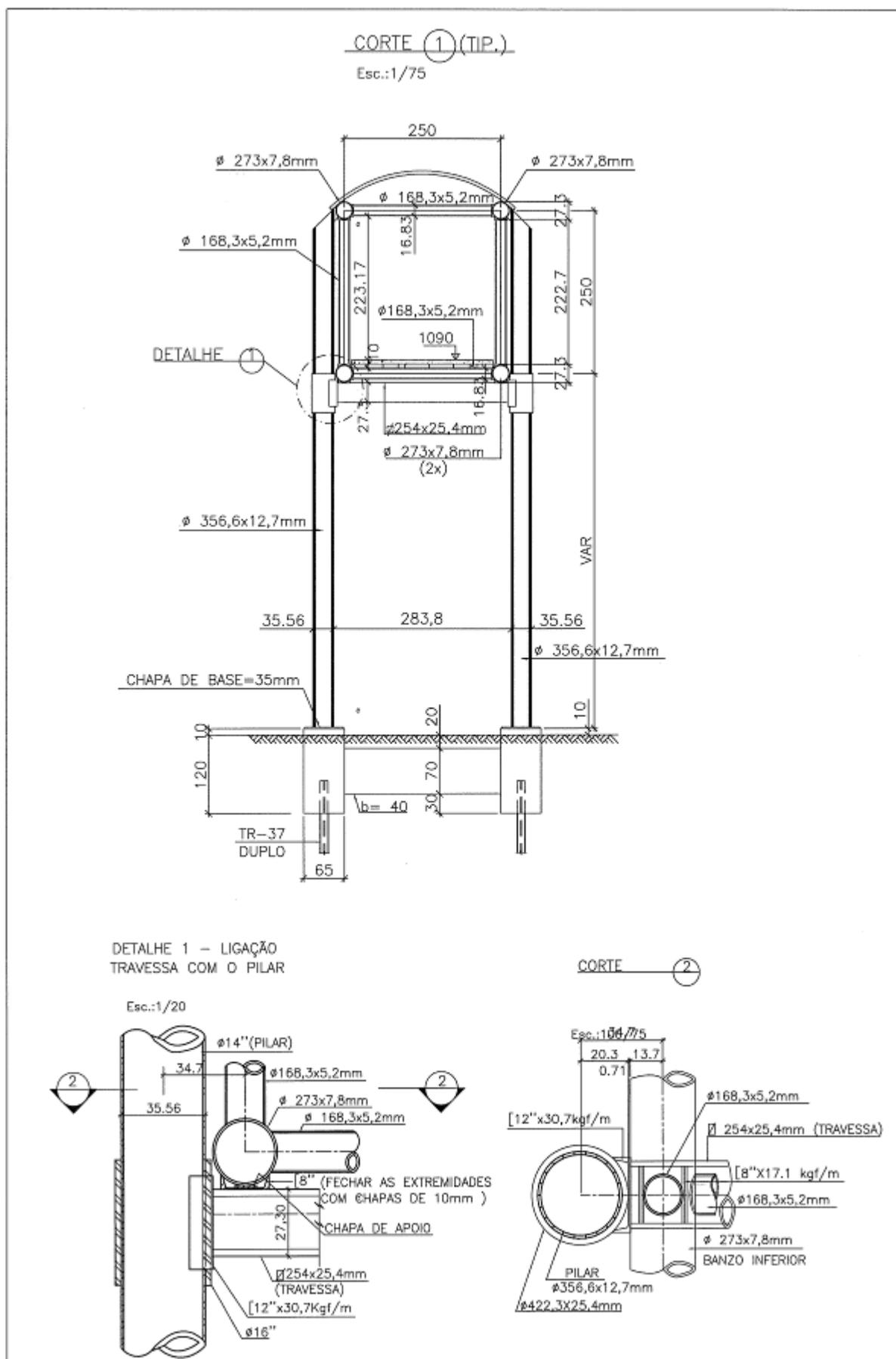
**PLANTA**

ESC.:1/300



PC-5000-41633

Figura 4.9 – Passarela Oswaldo Aranha – Vista Lateral e Planta



### 3.3 Propriedades das Seções da Passarela e dos Materiais

A seguir está apresentada tabela com as propriedades dos elementos que conformam os diversos elementos da passarela. Convém ressaltar que as dimensões exatas apresentadas correspondem aos perfis tubulares tabelados, que foram os mais próximos às medições de campo. Os comprimentos especificados para os elementos são de centro a centro dos nós exceto, na viga travessa que está especificada entre as tangentes internas das colunas descontada a espessura do reforço.

#### 3.3.1 Seções da Passarela

Tabela 3.1 - Propriedades das Seções da Passarela

Seção	Peça Estrutural	Descrição
	Colunas	Altura variável dos pórticos até o nível do piso. P1= 4,62 m; P2 = 5,38 m P3 = 6,02 m; P4 = 5,92 m Espessura de parede t = 12,7 mm
	Corda Superior	A corda superior modulada a cada 2,50 m com diâmetro D = 273 mm e espessura de parede t = 6,3 mm
	Corda Inferior	A corda inferior modulada a cada 2,50 m com diâmetro D = 273 mm e espessura de parede t = 7,8 mm
	Contraventamentos horizontais	O contraventamento superior e inferior (transversina) com: - comprimento L = 2,50 m - diâmetros D = 168,3 mm; - espessura de parede t = 5,2 mm
	Diagonais	As diagonais formando um "X" com: - comprimento L = 3,50 m - diâmetros D = 168,3 mm; - espessura de parede t = 5,2 mm
	Vigas Travessas	Viga travessa, - comprimento L = 2,70 m - seção = 254 x 254 mm - espessura de parede t = 25,4 mm.
	Apoio da Passarela	Apoios da passarela no pórtico: - perfil cantoneira de 8" x 17,1 kgf/m com comprimento L = 254 mm, soldado nas travessas

### 3.3.2 Propriedades dos Materiais

Tabela 3.2 - Propriedades dos Materiais da Passarela

Material	Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> )	Densidade ( $\rho$ ) (N/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )
Aço ASTM A-501	$2,074 \times 10^{11}$	$7,86 \times 10^4$	0,3
Concreto armado	$2,90 \times 10^{10}$	$2,50 \times 10^4$	0,2

No próximo capítulo abordam-se os princípios básicos de análise modal criando desta maneira as condições de desenvolver a análise modal aplicada à estrutura da passarela investigada cujo modelo estrutural foi apresentado neste capítulo.

## 4 ANÁLISE MODAL

### 4.1 Introdução

A determinação das características dinâmicas das estruturas pode ser realizada através de análise modal, processo constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo, a fim de determinar os seus parâmetros modais: frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento modal.

Tais parâmetros são frequentemente determinados por métodos numéricos, por exemplo, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos. Em outras situações, o modelo analítico sequer existe; assim os parâmetros modais podem ser determinados experimentalmente. Ou mesmo que ele exista, a abordagem experimental pode servir para a verificação e validação dos resultados do modelo analítico.

De forma mais geral, pode-se analisar as vibrações de um sistema estrutural segundo dois caminhos distintos: a via teórica e a via experimental. Cada uma destas alternativas pode ser considerada de três fases com indicam MAIA *et al*, 1997 [69] apud EWIN 2000 [70]. As três fases estão detalhadas nas figuras 5.1 e 5.2.

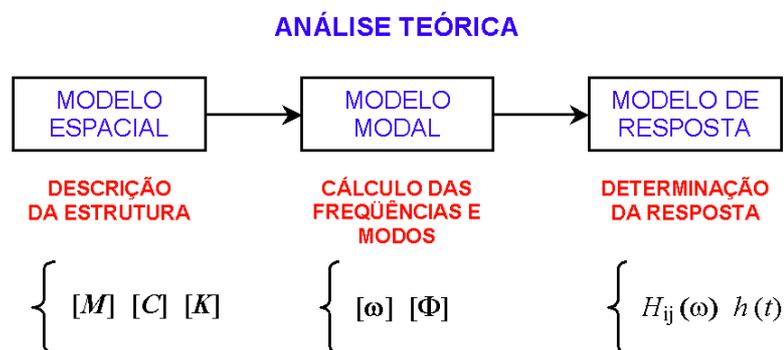


Figura 5.1 – Análise Teórica das Vibrações de um Sistema [71]

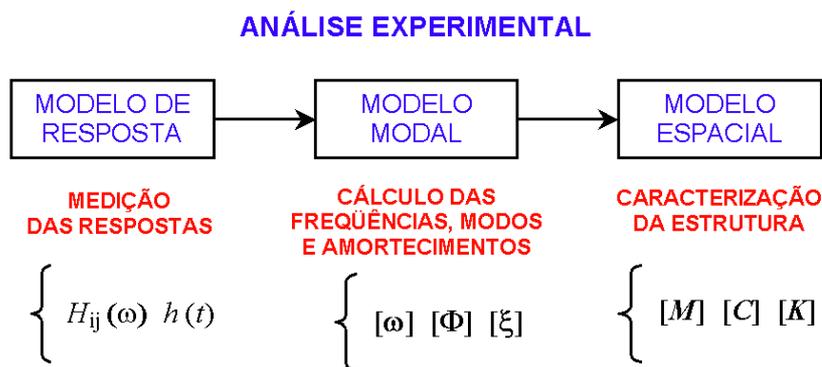


Figura 5.2 – Análise experimental das vibrações de um sistema [71]

## 4.2 Análise Teórica

A análise teórica inicia-se com a caracterização das propriedades físicas e geométricas da estrutura, em termos de suas matrizes de massa ( $M$ ), rigidez ( $K$ ) e amortecimento ( $C$ ), as quais definem o Modelo Espacial.

A partir do Modelo Espacial se faz uma análise modal teórica determinando o Modelo Modal: conjunto das frequências naturais ( $\omega$ ), seus correspondentes modos de vibração ( $\Phi$ ) e os fatores de amortecimento modal ( $\xi$ ), que juntos constituem os parâmetros modais do sistema estrutural.

A última fase da Análise Modal Teórica é a obtenção do Modelo Resposta que contém o conjunto de Funções de Resposta em Frequência (FRF) ou em Funções de Resposta ao Impulso (FRI's) e das respostas da estrutura ao longo do tempo ( $h(t)$ ) "time history".

## 4.3 Análise Experimental

MacConnell & Varoto [72], definem ensaios de vibração como a arte e a ciência de medir e compreender a resposta de uma estrutura quando exposta a um ambiente dinâmico específico.

Corresponde ao processo inverso na execução dos três modelos (interdependentes) referidos anteriormente; têm seu início com a medição da resposta da estrutura na forma de FRF's, FRI's e variações  $h(t)$ . As frequências

naturais ( $\omega$ ), modos de vibração ( $\Phi$ ) e os fatores de amortecimento ( $\xi$ ) serão obtidos através do processamento de dados utilizando-se analisadores espectrais. No limite, é possível deduzir as propriedades espaciais ( $M, C, K$ ) da estrutura através de técnicas apropriadas.

Deve ser observado que no Modelo de Resposta normalmente ocorre uma redução significativa dos graus de liberdade do sistema, em fase das dificuldades experimentais, e também limitados pelos pontos de medida definidos para o ensaio experimental. Posteriormente, executa-se uma “expansão” do modelo de resposta a fim de se obter o modelo espacial.

Segundo Silva C. W. [79], a instrumentação dinâmica no meio acadêmico está destinada fundamentalmente a aprendizado, treinamento e pesquisa. No campo prático a medição de vibrações têm as seguintes aplicações:

- projeto e desenvolvimento de produtos;
- elaboração, verificação, calibração, ajustes e correção de modelos para testes de soluções;
- avaliação de desempenho pelo monitoramento dinâmico;
- diagnóstico do comportamento ao longo do tempo.

Segundo Nóbrega [71], a Análise Modal Experimental para o estudo de qualquer sistema estrutural se fundamenta nas hipóteses a seguir:

- a estrutura é linear. A resposta da estrutura a qualquer combinação de forças, simultaneamente aplicadas, é a soma das respostas individuais de cada uma das forças, atuando sozinha;
- a estrutura é invariante no tempo. Os parâmetros modais são constantes no tempo;
- a estrutura obedece ao teorema da reciprocidade de Maxwell [73]. O teorema estabelece uma relação direta dos deslocamentos generalizados com as forças generalizadas que os provocam atuantes em pontos distintos da estrutura, independentemente de sua ordem de aplicação;
- a estrutura é observável. Os dados de entrada e saída contém informações suficientes para gerar um modelo de comportamento adequado para a estrutura.

#### 4.4 Técnicas de Análise Modal Experimental

Segundo Varoto [74] para a realização da análise modal experimental deverão ser levados em consideração vários aspectos importantes para a determinação precisa da resposta do sistema. Pode-se citar:

- Os vínculos da estrutura;
- A excitação da estrutura;
- A transdução dos sinais de excitação e resposta;
- O processamento de dados;
- A identificação dos parâmetros

##### 4.4.1 Os vínculos da estrutura

Independente das condições de contorno definidas no projeto, antes de iniciar a análise modal deverá ser verificado através de inspeção detalhada os vínculos da estrutura. Podem ter mudado por desvios executivos decorrentes da interpretação errada do projeto ou ausência de dispositivos de apoios adequados. Estas condições poderão contribuir para a degradação das respostas.

Uma das condições de contorno possíveis pode ser a “livre”, isto é, em condições elásticas suficientemente suaves para possibilitar esta aproximação. Esta alternativa pode ser muito útil se o interesse residir na determinação da massa e das propriedades de inércia da estrutura.

O vínculo de engaste, embora seja muito simples na modelagem analítica, sua aplicação nos ensaios experimentais é extremamente difícil de ser reproduzido.

Em ensaios experimentais de estruturas, normalmente estas condições são de difícil controle optando-se por não tentar instrumentar para entender o comportamento. Os efeitos medidos estarão influenciados pelas condições de contorno e o ajuste definitivo deverá acontecer no modelo espacial. Nesse instante poderão ser interpretados o comportamento e o entendimento dos vínculos da estrutura.

#### 4.4.2 Excitação da Estrutura

Para experiências em laboratório, existem diversos equipamentos e os mais comuns são os excitadores eletromagnéticos e os martelos de impacto.

Na excitação de estruturas civis em experiências de campo os mais comuns são os excitadores rotativos de massa excêntrica, marretas de impacto instrumentadas, excitadores eletrodinâmicos ou através da imposição de um deslocamento inicial, e seu relaxamento brusco, para que a estrutura vibre livremente (excitação tipo fusível).

Os sinais de excitação mais usados são o senoidal, o aleatório e o transiente, mais outros podem ser citados como o “chirp”, o pseudo aleatório e o aleatório impulsivo (“burst random”).

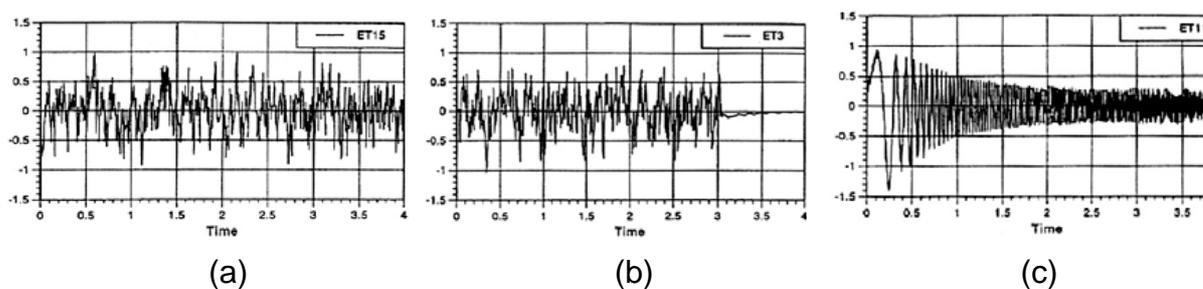


Figura 5.3 – Sinais de Excitação: (a) aleatório; (b) aleatório impulsivo (c) “chirp” (RICHARDSON *apud* NÓBREGA, [71])

Além dos equipamentos e dispositivos mencionados é muito comum utilizar em experiências de campo solicitações dinâmicas provocadas por massa de peso conhecido que impacta a estrutura de altura predefinida. Eventualmente pode ser realizada a excitação por pessoa pulando de altura conhecida. Com este tipo de excitação aleatória impulsiva, não é possível identificar não linearidades no comportamento da estrutura.

#### 4.4.3 Aquisição dos Sinais

A resposta deve ser medida com os sensores em pontos estrategicamente localizados em pontos de ventres dos modos fundamentais e a partir das medidas

de entrada e saída será possível determinar as características dinâmicas em termos de FRFs no domínio da frequência, ou FRI's no domínio do tempo.

Geralmente a aquisição pode ser realizada com o uso de transdutores piezoelétricos, mas também podem ser usados piezoresistivos, capacitivos, servo-acelerômetros, sistemas óticos a laser, e até extensômetros elétricos ou transdutores de deslocamentos tipo LVDT.

Um dos maiores problemas quando se ensaia uma estrutura civil são as suas baixas frequências, geralmente inviabilizando o uso de acelerômetros piezoelétricos, os mais comuns.

No estudo objeto deste trabalho o tipo de sensor e o posicionamento estarão orientados de forma empírica de modo a conseguir caracterizar os primeiros modos de vibração e os deslocamentos principais, o que será tratado em detalhes no capítulo seguinte.

#### 4.4.4 Processamento de Dados

O processamento dos dados é feito com analisadores espectrais capazes de fornecer as características de reposta da estrutura no domínio do tempo e da frequência. Para isto, utilizam as técnicas da transformada de Fourier. As Funções Respostas em Frequência – FRF's obtidas nas diversas aquisições de dados são submetidas ao processo de “averaging”, que permite reduzir o nível de ruído presente nos dados. A função coerência deve ser calculada para cada aquisição e seu valor deve ser o mais próximo possível de 1 o que, entre outras coisas, garante a linearidade entre a excitação e a resposta.

##### 4.4.4.1 Transformada de Fourier

O conceito da série e da integral de Fourier afirma que qualquer função contínua, ou que possui um número finito de descontinuidades, pode ser decomposto em um somatório de termos em seno e cosseno, com amplitudes, fases e períodos específicos. Se a Transformada Discreta de Fourier - DFT calcula estes termos para cada frequência discreta, pode-se considerar que o sinal, originalmente

no domínio do tempo, sofre uma transformação para o domínio da freqüência. A figura 5.4 ilustra o desenvolvimento de um sinal no domínio do tempo e sua descrição no domínio da freqüência, apresentadas os quatro termos senoidais.

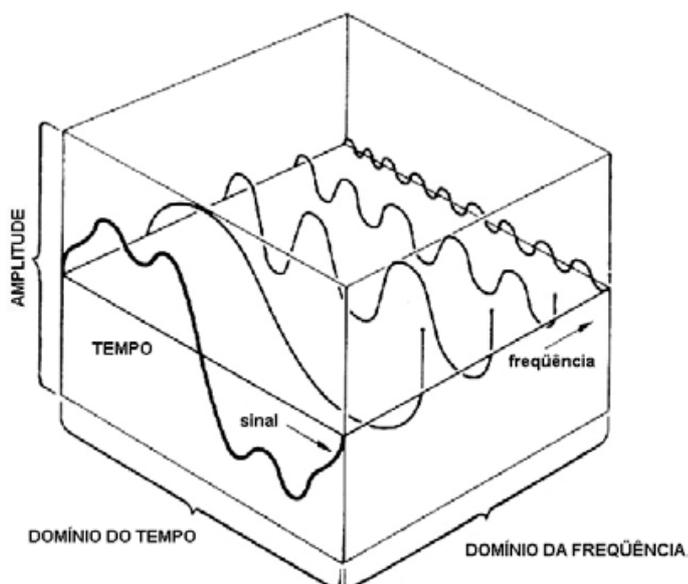


Figura 5.4 - Conceito da Transformada Discreta de Fourier - DFT Nóbrega 2004 [71]

Estes algoritmos são, simplesmente, uma maneira eficiente de calcular a Transformada Discreta de Fourier - DFT do sinal – a base matemática de qualquer sistema de aquisição de dados. A figura 5.5 ilustra os sinais contínuos no tempo e seus correspondentes espectros.

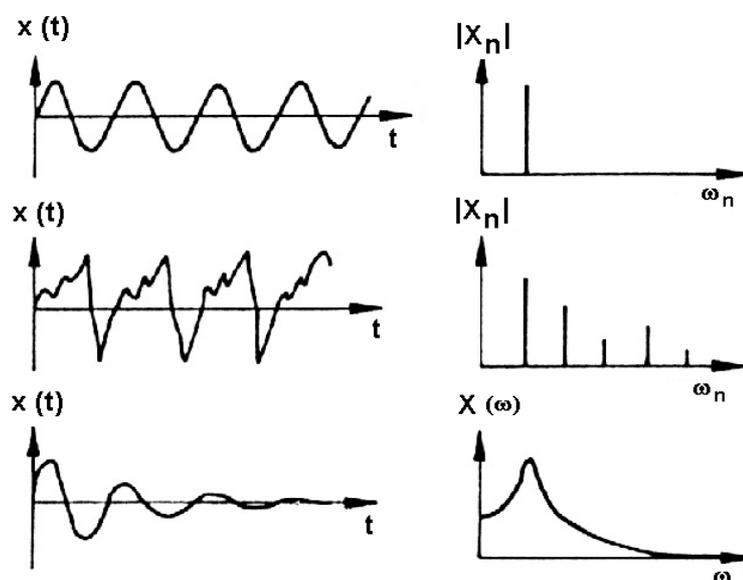


Figura 5.5 – Conversão de sinais contínuos do domínio do tempo para o da freqüência (baseada em Ewins [70])

Estes mesmos sinais, agora considerados discretos no tempo, são expostos juntos com os seus espectros de frequência na figura 5.6:

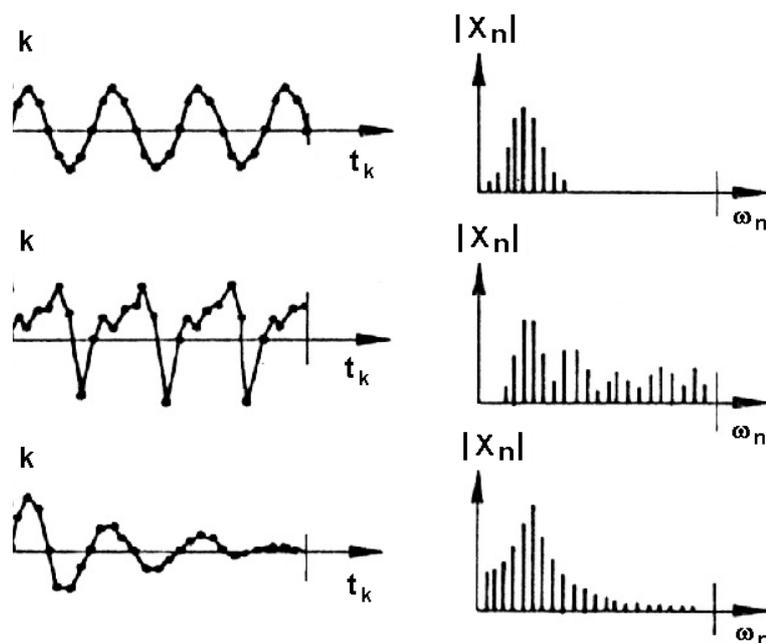


Figura 5.6 – Conversão de sinais discretos do domínio do tempo para o da frequência (baseada em Ewins) [70]

#### 4.4.4.2 Processo de Cálculo da Média

Quando se analisa a vibração devida a excitações aleatórias, é necessário calcular e usar certos parâmetros estatísticos dos sinais gravados, como a densidade espectral e a função de auto-correlação, utilizadas para caracterizá-los. Também é imprescindível realizar um processo de cálculo da média, que envolve várias aquisições do mesmo sinal, ou várias amostragens do sinal, para que se garanta uma confiabilidade mínima.

#### 4.4.4.3 Janelas de Aquisição

A janela de dados é uma função de ponderação em relação a qual os dados de aquisição do sinal serão multiplicados antes dos cálculos da FFT. O objetivo do uso da janela é minimizar os efeitos da descontinuidade do sinal que ocorrem quando apenas um intervalo deste sinal é capturado (“leakage”).

#### 4.4.5 Determinação dos Parâmetros Modais.

A determinação dos parâmetros modais pode ser realizada tanto no domínio do tempo quanto da frequência. Os parâmetros modais são geralmente obtidos através do ajuste de curvas aos dados medidos, comumente baseados no método dos mínimos quadrados. A identificação modal pode ser:

- modo-a-modo, onde cada modo é identificado separadamente, ou
- multi-modos, onde vários modos são identificados simultaneamente em uma faixa de frequência.

Os métodos de identificação no domínio da frequência usam como dados de entrada a FRF do sistema.

A identificação multi-modos no domínio da frequência pode ser realizada usando-se duas formas equivalentes da FRF do sistema: a forma polinomial e a forma em frações parciais.

Na forma polinomial procura-se ajustar os dados experimentais a uma função de transferência dada pelo quociente de dois polinômios. A forma polinomial não fornece os parâmetros modais diretamente, mas eles são calculados a partir dos coeficientes da função de transferência identificados.

Para a extração do modo de vibração, considera-se apenas a imaginária ou real dos números da FRF, podendo ser de aceleração ou de deslocamento.

Assim, escolhendo uma determinada frequência de excitação, verifica-se para cada ponto onde foi fixado um sensor (uma RFR distinta), o valor que corresponderá à coordenada do modo de vibração neste ponto.

Para a determinação experimental do amortecimento modal, poderão ser utilizados o Método da Seleção de Picos “Peak – Picking” – PP e Método de “Decremento Logarítmico” os quais são adotados por sua facilidade de aplicação.

O método de Seleção de Picos “Peak – Picking”, que consiste em após a identificação das frequências naturais na FRF, são determinados os pontos ( $\omega_a$ ) e ( $\omega_b$ ), localizados a ambos os lados dos picos ressonantes ( $\omega_r$ ) com ordenadas  $\alpha_{máx} / \sqrt{2}$ , como se demonstra na figura 5.7.

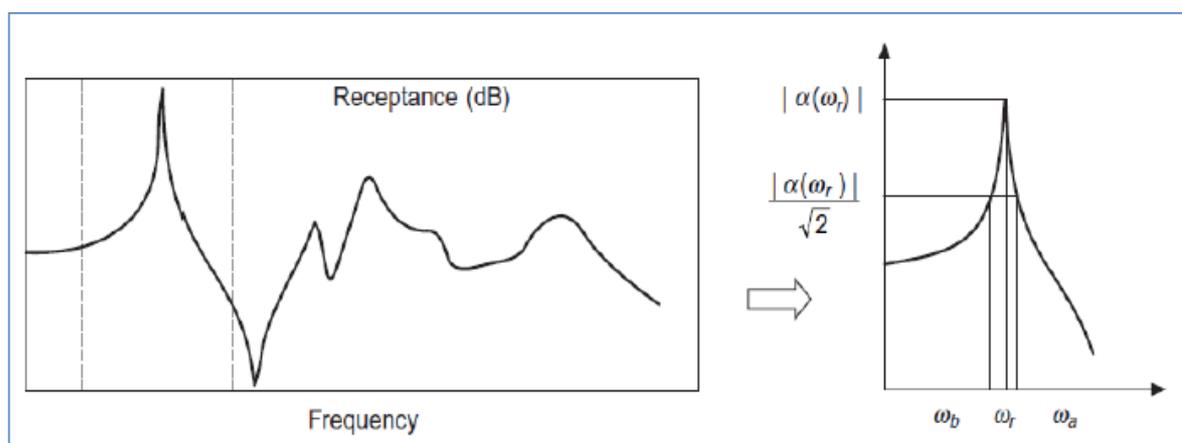


Figura 5.7 – Método da Seleção de Picos “Peak – Picking” para determinação do Coeficiente de Amortecimento Modal [65]

Assim o Coeficiente de amortecimento modal pode ser obtido a partir de:

$$\xi = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_r} \quad (5.1)$$

O “Método de Decremento Logarítmico” utiliza a curva experimental de deslocamento ou aceleração sendo escolhidos dois picos consecutivos de deslocamento  $v_n$  e  $v_{n+1}$  como mostra a figura a seguir:

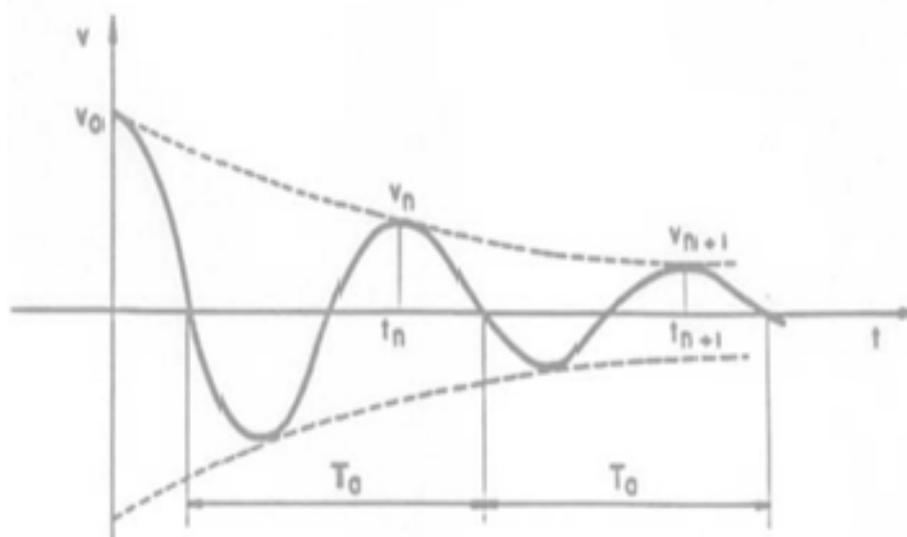


Figura 5.8 – Gráfico da resposta sub-amortecida - deslocamento x tempo [75]

Utilizando-se para a determinação do amortecimento  $\xi$  a expressão,

$$l_n \frac{v_n}{v_{n+1}} = 2\pi \cdot \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (5.2)$$

No próximo capítulo é abordada a análise experimental aplicada à estrutura investigada cujo modelo estrutural e as respectivas propriedades físicas e geométricas foram apresentadas no capítulo 4. A análise modal experimental que será desenvolvida possibilitará a construção do modelo representativo do comportamento dinâmico do sistema estrutural a fim de se determinar os parâmetros modais.

## 5 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

### 5.1 Introdução

Como foi mencionado anteriormente, a determinação das características dinâmicas de um sistema estrutural pode ser obtido através de análise modal, processo constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo representativo do comportamento dinâmico da estrutura.

Para a estrutura em questão foi definido que o foco do estudo deveria ser a determinação do comportamento dinâmico do sistema estrutural através da análise modal experimental. Desta maneira, o modelo numérico-computacional tridimensional construído utilizando-se o ANSYS 2005 [76] serviu para orientar a análise das vibrações da passarela realizado por via experimental seguindo-se as três fases já definidas no capítulo anterior. Modelo Resposta – Modelo Modal – Modelo Espacial.

A finalidade deste capítulo do estudo é apresentar as etapas que foram desenvolvidas para possibilitar a medição da resposta da estrutura na forma de Funções Resposta em Freqüência – FRF ou em Funções de Resposta ao Impulso FRI - e variações  $h(t)$ .

Como já foi mencionado no capítulo anterior, os ensaios de vibração se definem como a arte e a ciência de medir e compreender a resposta de uma estrutura quando exposta a um ambiente dinâmico específico. Para atender essa premissa com sucesso foi necessário desenvolver o programa de instrumentação a ser executado que se iniciou com a definição do objetivo do que se pretendia e que terminou com a definição de como os parâmetros a serem medidos serão analisados. Desta forma a análise experimental realizada esteve pautada no programa de instrumentação que constou das etapas a seguir:

- a) Definição do objetivo e abrangência;
- b) Conhecimento da estrutura, interferências e condições ambientais;
- c) Conhecimento do comportamento da estrutura “*in situ*”;
- d) Parâmetros a serem medidos;
- e) Posicionamento dos sensores;
- f) Sistema de Aquisição de Dados.

## 5.2 Detalhamento do Programa de Instrumentação

### 5.2.1 Definição do Objetivo e Abrangência.

O programa de instrumentação a seguir teve como objetivo determinar das características dinâmicas do sistema estrutural em análise através da aquisição das respostas da passarela, em frequência, quando submetida às ações dinâmicas impostas pelo impacto de uma massa conhecida e pelo caminhar de uma ou mais pessoas.

Os ensaios experimentais foram realizados no maior vão da passarela em estudo, situado sobre a pista no sentido bairro da Av. Osvaldo Aranha, e que no modelo numérico desenvolvido apresentou amplitudes de vibração e deslocamento mais relevantes como aparece na figura do modelo numérico.

Os ensaios estiveram destinados a determinar os modos de vibração na direção vertical, transversal e longitudinal e a resposta às forças aplicadas pelo caminhar em diferentes situações.

### 5.2.2 Conhecimento da estrutura, interferências e condições ambientais.

No capítulo 4, foi apresentado detalhadamente do sistema estrutural real da passarela, resultado do levantamento realizado em campo. Na ocasião foram verificadas as condições de contorno, com atenção especial à extremidade dos balanços e os apoios da estrutura nos pórticos. Os apoios se mostraram diferentes do projeto, já que durante a execução foram incorporadas placas de neoprene, que funcionam como aparelhos de apoio, o que facilita a rotação da estrutura na direção longitudinal (h).

Em relação a interferências externas que poderiam influenciar o comportamento da estrutura, foi verificado que o deslocamento da massa de ar provocado pelos veículos que trafegam de forma intensa na avenida não exercia influência significativa no comportamento da estrutura. Isto pode ser devido a que a massa de ar, no encontro com a estrutura treliçada não gera vórtices que poderiam vir a excitá-la transversalmente.

Em relação às condições ambientais não houve preocupação em relação a algum efeito térmico já que a passarela recebe insolação igualmente. Em relação à velocidade do vento, foram pesquisados os dados históricos da região nos registros da Geo-Rio, tendo sido encontrados ventos menores que 1 m/s com picos até 3 m/s. Esta condição descartou a possibilidade da formação de vórtices, que poderiam interferir nos resultados durante os ensaios.

### 5.2.3 Conhecimento do comportamento da estrutura “in situ”

As diversas observações realizadas permitiram perceber a sensibilidade da passarela a excitações dos pedestres. A estrutura se movimenta de forma perceptível segundo o tipo de solicitação: na direção longitudinal quando solicitada por poucos pedestres; na direção lateral pela multidão caminhado apressada e na vertical perceptível no meio do maior vão.

As observações realizadas permitiram inferir que a instrumentação deveria ser no maior vão da estrutura e a aquisição dos sinais nas três direções: vertical (y), transversal (x) e longitudinal (z). Foi possível perceber que para a aquisição de sinais de maneira controlada a estrutura deverá estar isenta de solicitações randômicas de pedestres não participantes da experiência.

### 5.2.4 Parâmetros a serem medidos

A instrumentação instalada teve por finalidade medir a resposta da estrutura causada pelo impacto de massa conhecida de altura controlada e pela força de excitação gerada pela atividade humana de caminhar de até três pessoas. Como durante o caminhar ou correr, pedestres impõem forças dinâmicas nas estruturas que geram resultantes com componentes: vertical (y), transversal (x) e longitudinal (z), os sensores para a aquisição dos sinais de freqüências e modos, nos diversos pontos instrumentados, estiveram orientados nessas direções.

A aquisição da resposta dinâmica da estrutura foi realizada com o uso de transdutores de aceleração capacitivos que são apropriados às baixas freqüências das estruturas civis.

No estudo objeto deste trabalho o posicionamento dos sensores foi orientado pelo modelo espacial desenvolvido com base no emprego da ferramenta computacional ANSYS 2005 [76] construído o que permitiu caracterizar o comportamento da estrutura e determinar os primeiros modos de vibração e os deslocamentos.

Para garantir a resposta da estrutura, as bases onde seriam acoplados os transdutores nas diversas posições, foram fixadas na estrutura de aço da passarela. Este posicionamento teve como vantagem eliminar vibrações secundárias que poderiam acontecer caso estivessem fixados na laje.

### 5.2.5 Posicionamento dos Sensores

Os acelerômetros foram instalados de forma a adquirir os sinais representativos dos modos fundamentais de vibração, em especial os 7 primeiros modos: longitudinal, transversal ( 2º, 3º, 4º), transversal com torção ( 5º modo) e flexão e flexão com torção ( 6º e 7º modo) como pode ser verificado nas figuras a seguir.

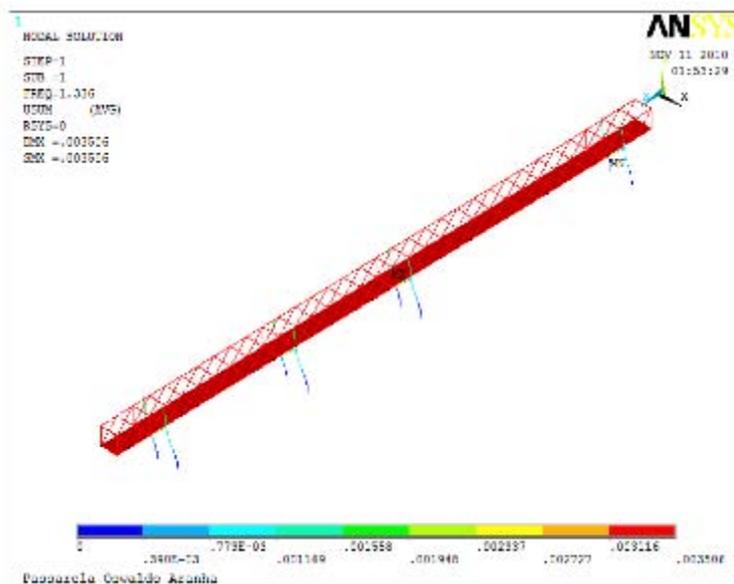


Figura 6.1 – 1º Modo Longitudinal - freq = 1,61 Hz

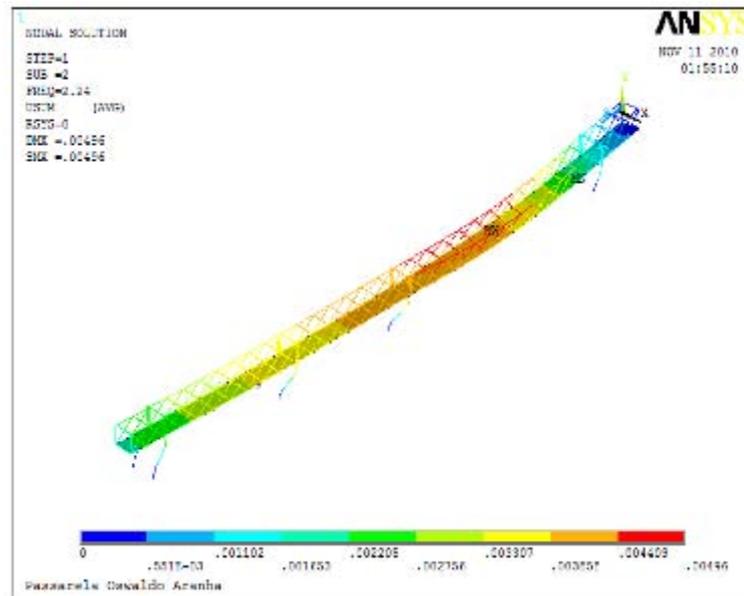


Figura 6.2 – 2º Modo transversal - freq = 2,24 Hz

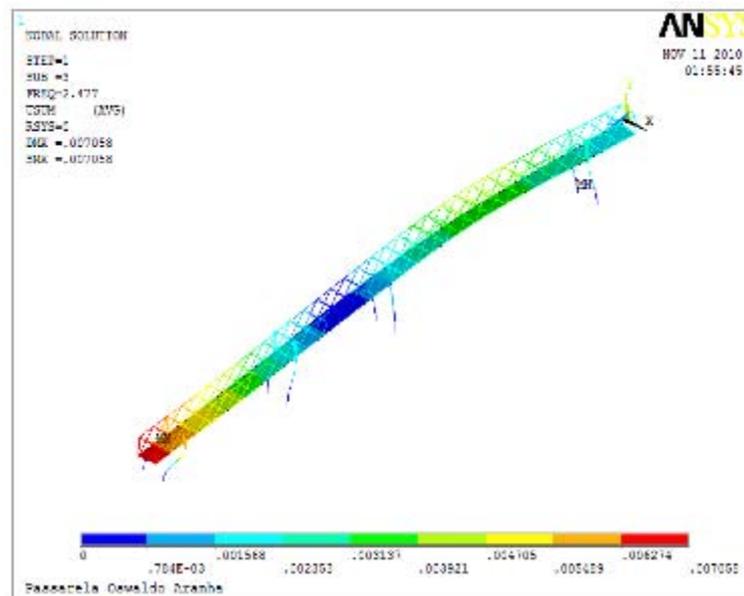


Figura 6.3 – 3º Modo transversal - freq = 2,47 Hz

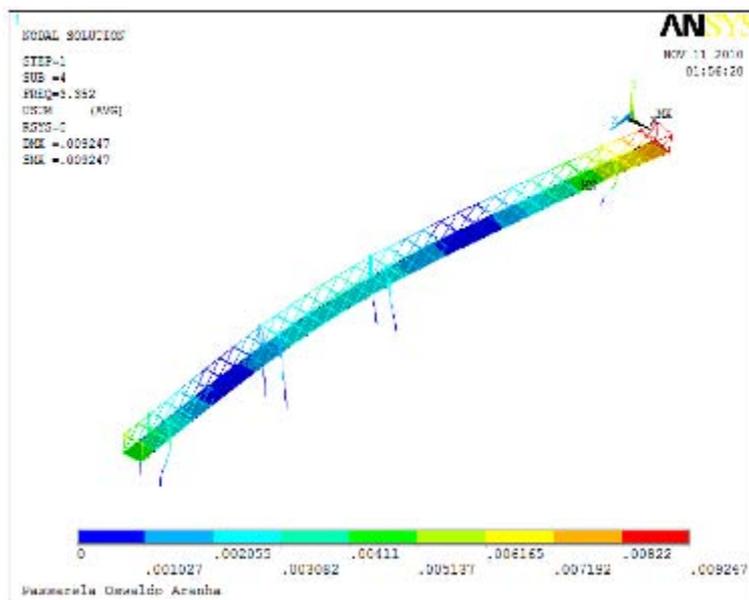


Figura 6.4 – 4º Modo transversal e da ponta do balanço - freq = 3,35 Hz

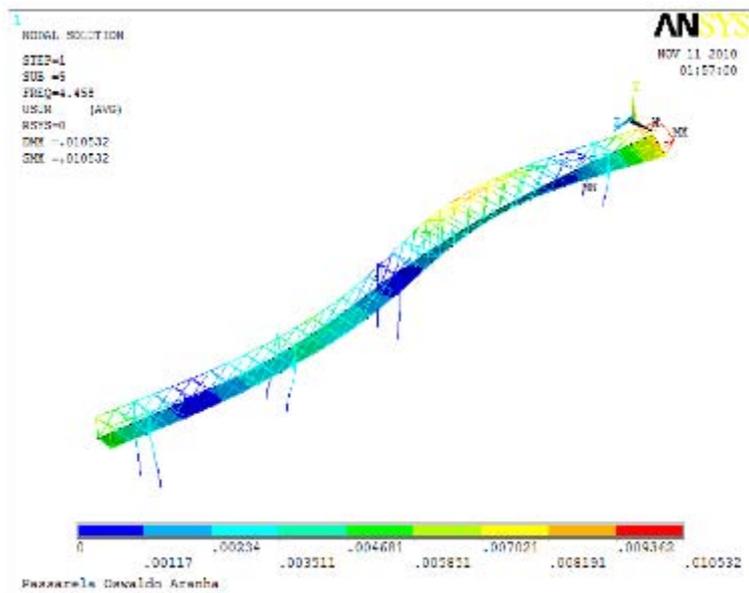


Figura 6.5 – 5º Modo transversal com torção do tabuleiro - freq = 4,46 Hz

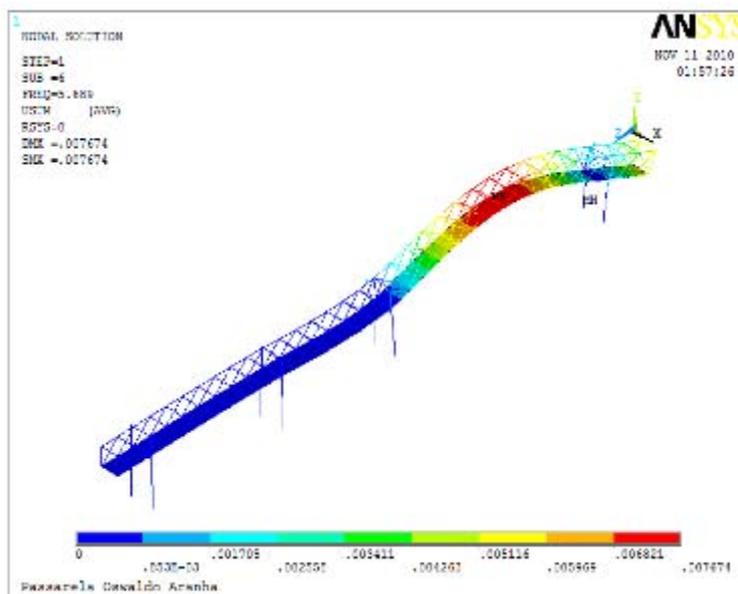


Figura 6.6 – 6º Modo 1º Modo flexão - freq = 5,68 Hz

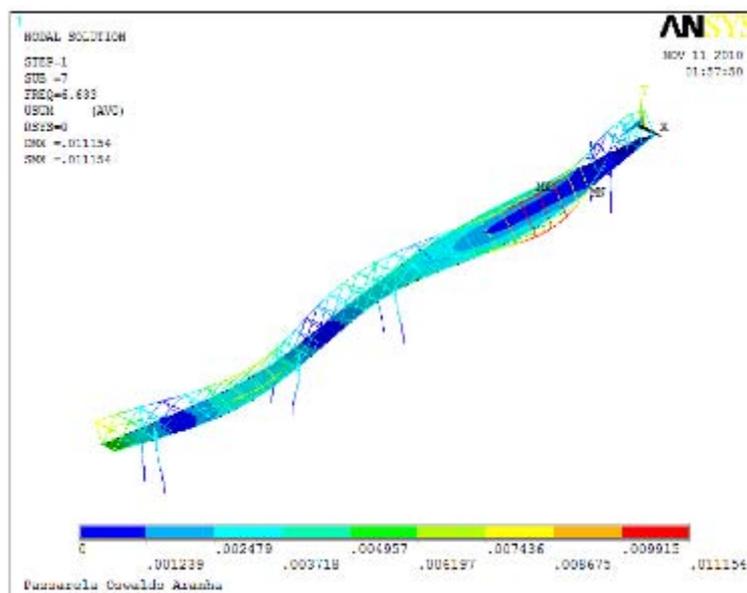


Figura 6.7 – 7º Modo 2º flexão com torção - freq =6,66 Hz

Os acelerômetros foram posicionados no meio do vão e nos terços do vão de maneira a garantir a coleta da resposta dinâmica da estrutura para os modos de flexão e torção na direção vertical, transversal e longitudinal – Figura 6.8.

Cabe ressaltar que no planejamento da instrumentação estava prevista a instalação de sensores na extremidade do balanço o que não foi possível tendo em

vista as dificuldades observadas em relação à interferência de pedestres nessa região.

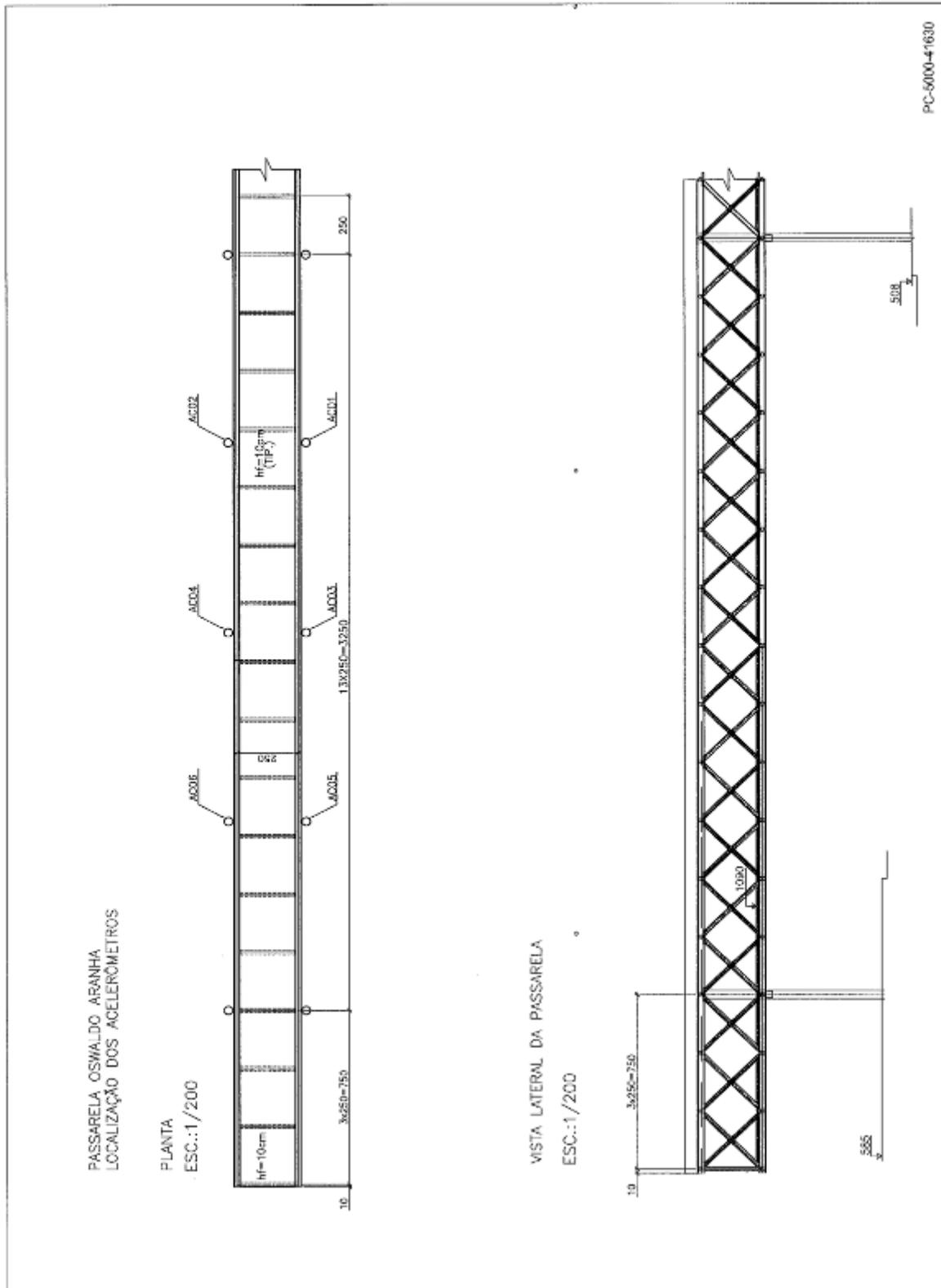


Figura 6.8 - Passarela Oswaldo Aranha - Localização dos Acelerômetros

Os acelerômetros utilizados estão descritos a seguir:

Transdutor de Aceleração Capacitivo Uniaxial

Marca: Silicon Designs, Inc

Modelo: 2010-010

Frequência de Resposta (Nominal 3 dB) 0 - 1000 Hz

Sensibilidade: 12,5 kHz/g

Input Range:  $\pm 10$  g

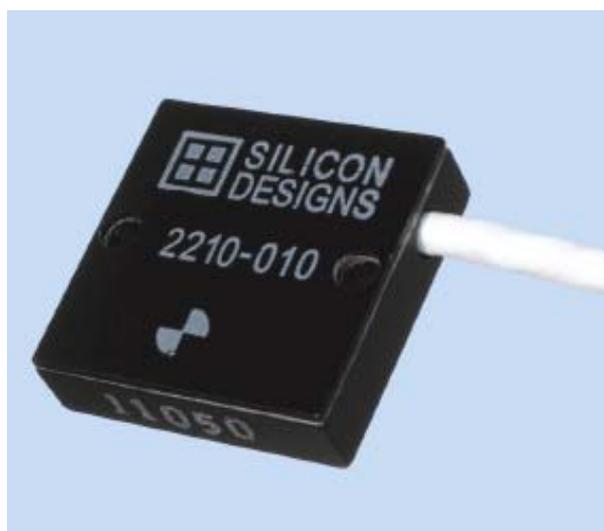


Figura 6.9 – Transdutor de Aceleração Capacitivo Uniaxial

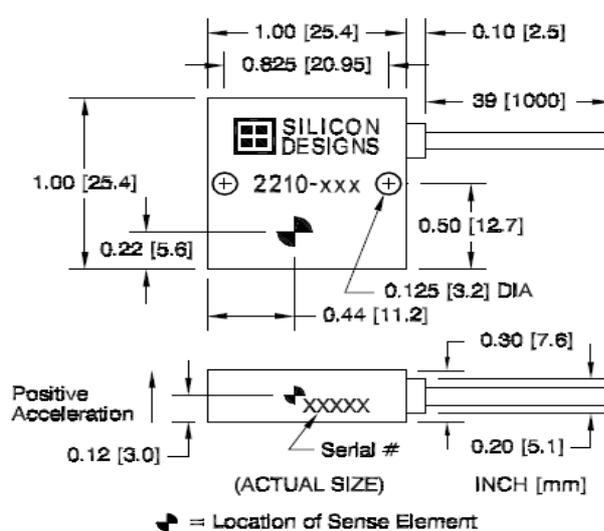


Figura 6.10 – Características Geométricas do Transdutor de Aceleração 2210

### 5.2.6 Sistema de Aquisição de Dados

As respostas dos eventos foram medidas e gravadas no sistema ADS 2000, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA. Este sistema de aquisição de dados é baseado em condicionadores de sinais, que transformam o sinal da variação elétrica em valor de engenharia (deformação específica, aceleração, força, etc.), controlados por um computador.

## 5.3 **Descrição dos ensaios experimentais**

### 5.3.1 Localização da Central de Aquisição

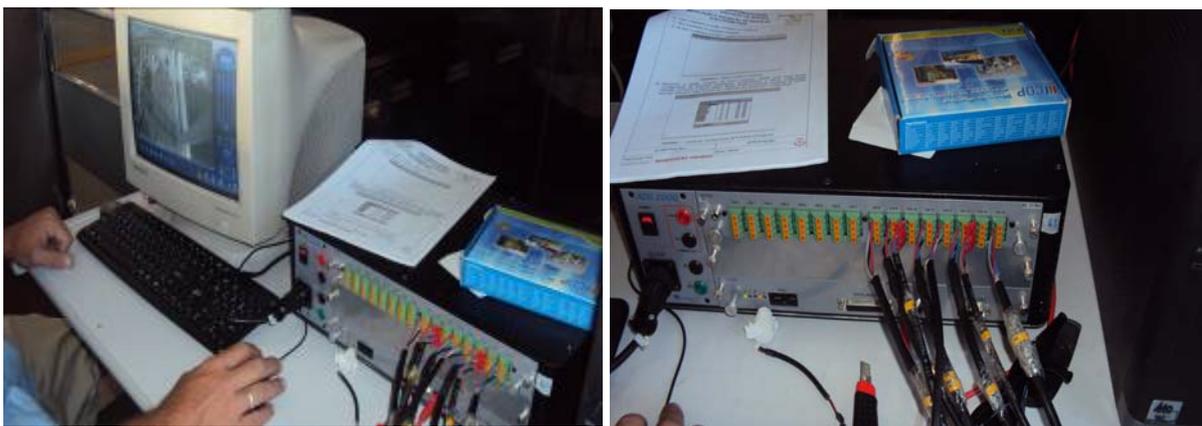


Figura 6.11 e 6.12 – Detalhamento do Sistema ADS 2000, da LYNX Ltda.

Considerando-se o vão instrumentado, a central de aquisição de dados esteve localizada nas dependências do Metrô, junto à cabine da segurança operacional na Plataforma da estação São Cristóvão.

### 5.3.2 Detalhamento da Instalação dos Sensores

Tendo em vista que para realização do ensaio estavam disponíveis somente 6 acelerômetros e com a impossibilidade de instalar na ponta do balanço devido à interferência local, foram determinados os pontos de medição mais convenientes:

1/3, 1/2 e 2/3 do vão em análise. A necessidade de adquirir sinais que permitissem registros na vertical (y), transversal (x) e longitudinal (z) obrigou a repetir os ensaios para conseguir os modos previstos. Desta forma as experiências de vibração livre e de vibração induzida pela passagem controlada de pessoas foram repetidas com os acelerômetros posicionados como segue:

1ª Experiência: os 6 acelerômetros na direção vertical (y)

2ª Experiência: os 6 acelerômetros na direção transversal (x)

3ª Experiência: os 6 acelerômetros na direção longitudinal (z)

Os acelerômetros do tipo capacitivos, blindados, de dimensões 25x25x8 mm foram fixados em cápsulas de PVC com a finalidade de garantir proteção adicional e ainda facilitar a mudança do sentido de medição. Isto foi possível através da união aparafusada com a base de aço inox, fixada à estrutura.



Figura 6.13 e 6.14 – Posicionamento dos sensores a ambos os lados do tabuleiro da passarela e detalhe da instalação dos sensores.



Figuras 6.15 e 6.16 – Detalhes da instalação na direção transversal e vertical.



Figuras 6.17 e 6.18 – Instalação do acelerômetro na direção longitudinal e detalhe na direção transversal.

### 5.3.3 Detalhamento dos ensaios de Vibração Livre

Esta etapa da análise experimental teve por finalidade adquirir sinais para determinar os parâmetros modais da estrutura: frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento modal da estrutura. Para ter sucesso na experiência foi aplicada uma excitação aleatória impulsiva provocada pela queda de peso de massa conhecido, que impactou na laje, no meio do vão instrumentado da estrutura.

A experiência foi realizada utilizando-se um saco com 57 kg de areia, pendurado por uma corda no contraventamento superior da treliça o que garantiu a altura de queda de 1,80 m.

Cada experiência ocorreu somente quando a passarela esteve livre de pedestres o que garantiu que o sinal adquirido fosse “limpo”, livre de influências externas não controladas. Para conseguir esta condição, houve um estrito controle de pedestres não participantes da experiência acessando a passarela durante cada evento. Como não poderia ser impedido o trânsito de pedestres de forma continuada, houve necessidade depois de cada medição, liberar a passagem da passarela, enquanto se preparava o equipamento de aquisição para o evento seguinte.

A energia aplicada na passarela foi suficiente para mobilizar a estrutura o que foi verificado na qualidade dos sinais adquiridos em todos os acelerômetros o que dispensou a repetição o ensaio.

Durante os ensaios foi verificado que o deslocamento da massa de ar provocado pelos veículos que trafegam de forma intensa na avenida não estava afetando de forma significativa os sinais dos acelerômetros, principalmente nos posicionados para adquirir na direção transversal.



Figura 6.19 – Excitação livre da passarela observa-se a massa de 57 Kg na posição anterior à queda.



Figura 6.20 – Excitação livre da passarela observa-se a massa depois do impacto.

#### 5.3.4 Detalhamento dos ensaios de Vibração Induzida.

Considerando-se que o objetivo deste trabalho é estudar a resposta dinâmica da passarela quando submetida às forças produzidas pelo transitar de uma ou mais pessoas caminhando e correndo a fase seguinte dos ensaios experimentais realizados foi reproduzir este efeito.

A carga dinâmica foi produzida por até três pessoas, de peso médio, percorrendo a passarela em ciclos de ida e volta a passo lento, regular e rápido.

- 01 pessoa caminhando no eixo da passarela: passo lento;
- 01 pessoa caminhando no eixo da passarela: passo normal;
- 01 pessoa caminhando no eixo da passarela: passo rápido.



Figura 6.21 – Detalhe da excitação dinâmica induzida por uma pessoa com a passarela total livre de outros pedestres. Note-se que a caminhada foi no eixo da seção transversal

02 pessoas caminhando simétricas em relação ao eixo da seção transversal da passarela: passo lento;

02 pessoas caminhando simétricas em relação ao eixo da seção transversal da passarela: passo normal;

02 pessoas caminhando simétricas em relação ao eixo da seção transversal da passarela: passo rápido.

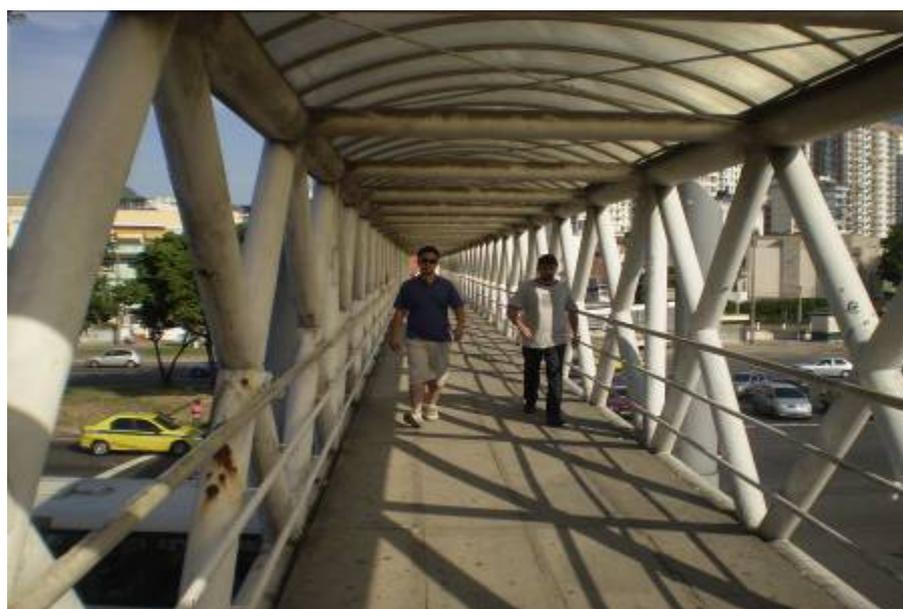


Figura 6.22 – Detalhe da excitação dinâmica induzida por duas pessoas caminhando nas linhas predefinidas.

- 03 pessoas caminhando na passarela: passo lento;
- 03 pessoas caminhando na passarela: passo normal;
- 03 pessoas caminhando na passarela: passo rápido.



Figura 6.23 – Detalhe da excitação dinâmica induzida por três pessoas.

- 01 pessoa correndo no eixo da seção transversal da passarela.



Figura 6.24 – Detalhe da excitação dinâmica induzida por uma pessoa correndo.

02 pessoas correndo de forma simétrica em relação ao eixo da seção transversal da passarela.

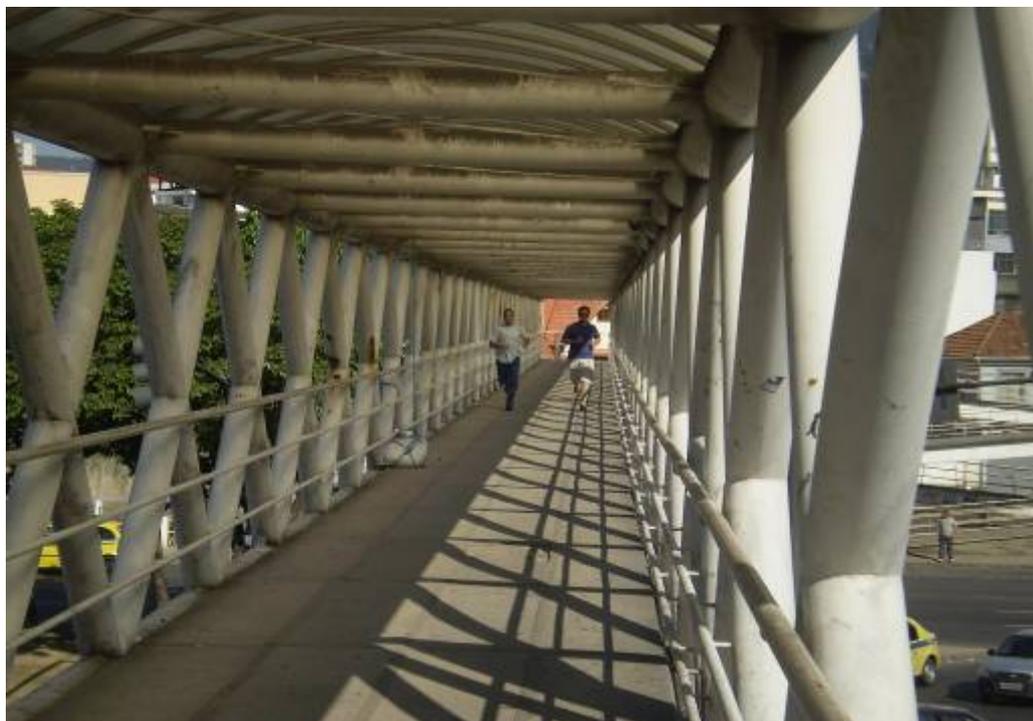


Figura 6.25 – Detalhe da excitação dinâmica induzida por duas pessoas correndo com a passarela totalmente livre de outros pedestres.

Da mesma forma que para a vibração livre cada evento foi realizado quando a passarela esteve somente com os pedestres participantes da experiência desta maneira esteve garantido o sinal adquirido “limpo” e livre de influências externas e não controladas.

As diversas situações de ensaio tiveram por objetivo simular as condições de utilização da passarela com carga dinâmica controlada de modo a obter respostas em frequência e amplitudes de aceleração, que poderão ser correlacionadas com o modelo numérico desenvolvido.

## 6 PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os sinais adquiridos para as diferentes situações de ensaios realizados na passarela estudada foram submetidos a uma filtragem e organização preliminar.

A seguir foi realizada a análise modal dos resultados obtidos nos ensaios de vibração livre permitindo determinar os parâmetros modais, frequências, modos e taxas de amortecimento modal.

Os sinais de vibração induzida permitiram determinar deslocamentos e as acelerações máximas para avaliar o conforto da estrutura à luz das normas e regulamentos internacionais.

### 6.1 Resultados dos ensaios de Vibração Livre

As características dinâmicas de vibração – frequências naturais e modos de vibração, além da taxa de amortecimentos modal da passarela– foram determinadas através do processamento de sinais de aceleração obtidos nos ensaios de vibração livre.

#### 6.1.1 Resposta Dinâmica de Aceleração

São apresentadas as respostas dinâmicas típicas, em termos de acelerações vertical, transversal e longitudinal registrados em cada um dos pontos indicados para a estrutura excitada por impacto no meio do vão escolhido para o ensaio. Como era de esperar as maiores amplitudes de aceleração aparecem na direção vertical por coincidir com a aplicação da força. Também na vertical as maiores amplitudes de aceleração vertical foram obtidas nos acelerômetros AC 03 e 04 localizados no meio do vão muito próximos ao local dos impactos. Para a direção transversal e longitudinal as maiores amplitudes também aparecem nos acelerômetros AC 03 e 04 com valores percentuais de 32% e 17% em relação à direção vertical.

Na tabela 6.1 estão apresentados os valores máximos das respostas em aceleração x tempo da estrutura em  $m/s^2$  na direção vertical, transversal e longitudinal.

Tabela 6.1 - Valores mínimos e máximos para a resposta da estrutura em  $m/s^2$ 

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Vibração Livre	Transversal	3,79	5,09	4,25	3,26	2,23	2,01
	Vertical	3,34	4,09	8,06	12,94	4,04	5,53
	Longitudinal	0,63	1,58	2,11	2,47	0,64	0,97

Como pode ser observado, a estrutura apresentou os maiores picos de aceleração de  $8,06 m/s^2$  e  $12,94 m/s^2$  nos acelerômetros AC 03 e AC 04, localizados no meio do vão e orientados na direção vertical, junto ao local de aplicação do impacto.

Para a direção transversal a resposta da estrutura em aceleração apresentou os maiores picos nos acelerômetros AC 03 e AC 04 com valores de  $4,25 m/s^2$  e  $3,26 m/s^2$ .

A aceleração de pico no sentido longitudinal de  $2,47$  e  $2,11 m/s^2$  foi registrada nos acelerômetros centrais, AC 03 e AC 04 e amortecida de forma mais acentuada para extremidade como pode ser verificado nos AC 05 e AC 06.

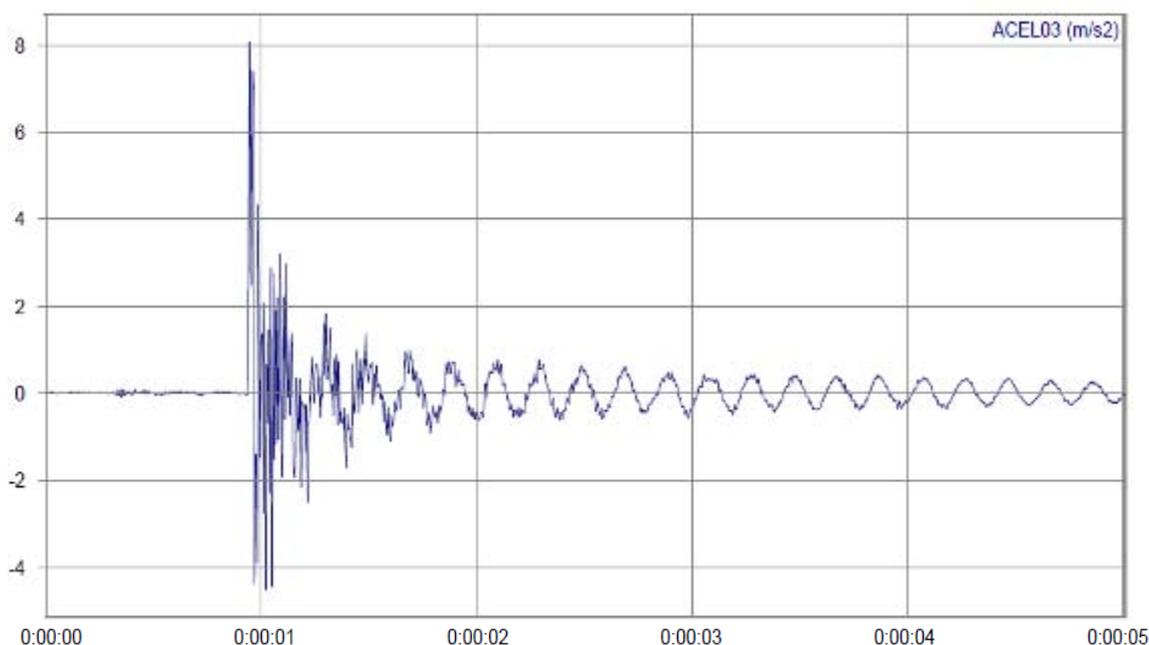


Figura 7.1 -- Vibração Livre, resposta dinâmica da estrutura na direção vertical em  $m/s^2$  - Acelerômetro AC 03 (\*)

(\*) As respostas dinâmicas temporais e espectros de frequência são apresentados no padrão do software AqDAnalysis v. 7.0 [55]. Em função disso para obter a grandeza física correta dos valores apresentados nas ordenadas temos que: para os valores seguidos de “m” multiplicar por  $10^{-3}$ ; para os valores seguidos de “ $\mu$ ” multiplicar por  $10^{-6}$  e para os valores que não são acompanhados de “m” ou “ $\mu$ ” a grandeza física lida é a real.

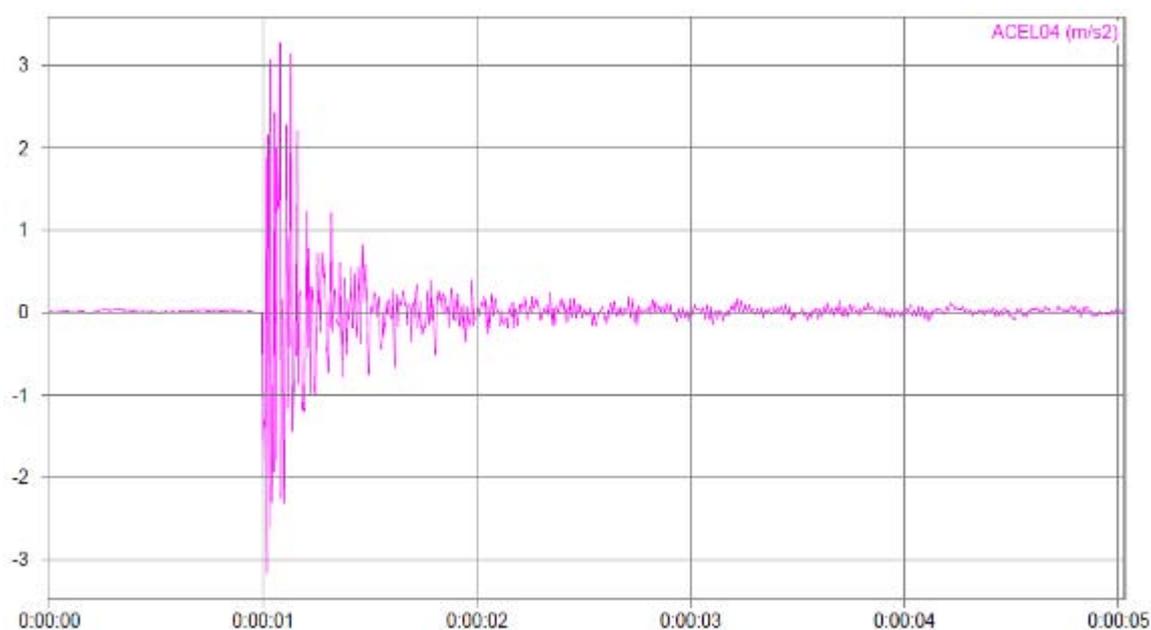


Figura 7.2 -- Vibração Livre, resposta dinâmica da estrutura na direção transversal em  $m/s^2$  - Acelerômetro AC 04,

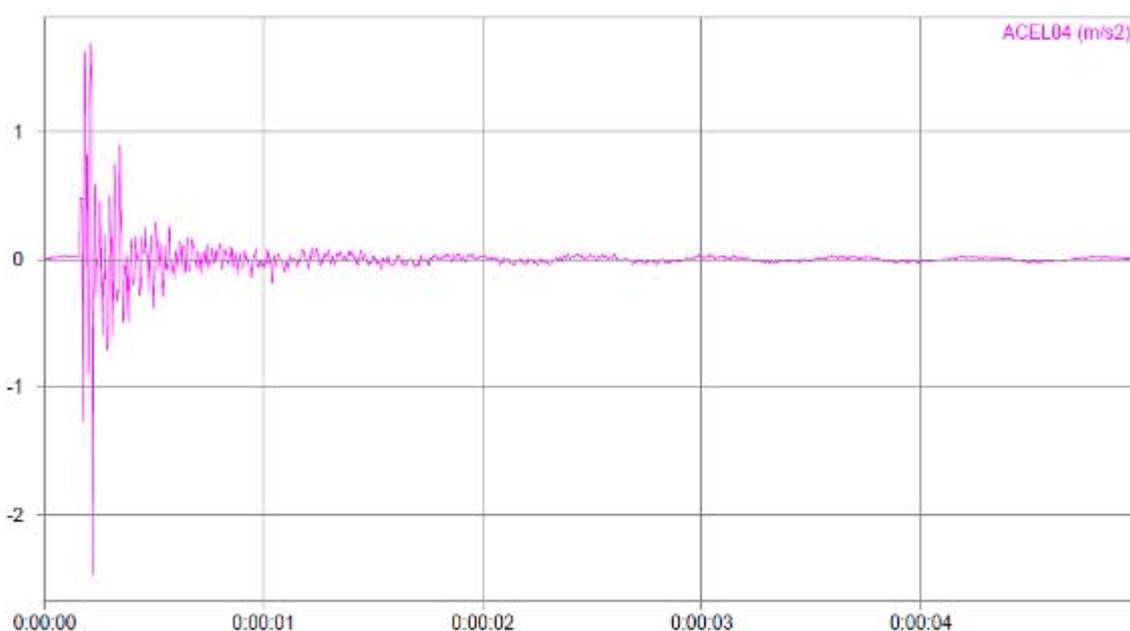


Figura 7.3 -- Vibração Livre, resposta dinâmica da estrutura na direção longitudinal em  $m/s^2$  - Acelerômetro AC 04,

### 6.1.2 Densidades Espectrais

A determinação das características dinâmicas da estrutura, frequências naturais e modos de vibração, foram realizados através da aplicação da densidade espectral de potência com a aplicação do auto-espectro aos sinais das acelerações da estrutura produzidos durante os ensaios nas três direções.

O auto-espectro foi obtido para o valor quadrático médio RMS das acelerações obtidas com janela de Hanning o que garantiu que o sinal a ser submetido à FFT - “Fast Fourier Transform” foi com períodos inteiros. O número de pontos por amostra foi de até 2100, resultante do sinal captado da aplicação de somente um impacto no ensaio.

É importante ressaltar que os gráficos apresentados seguem o padrão do software de análise AqDAnalysis. Desta forma quando os valores das ordenadas estão acompanhados pela unidade “m” devem ser multiplicados por  $10^{-3}$  para obter o valor real.

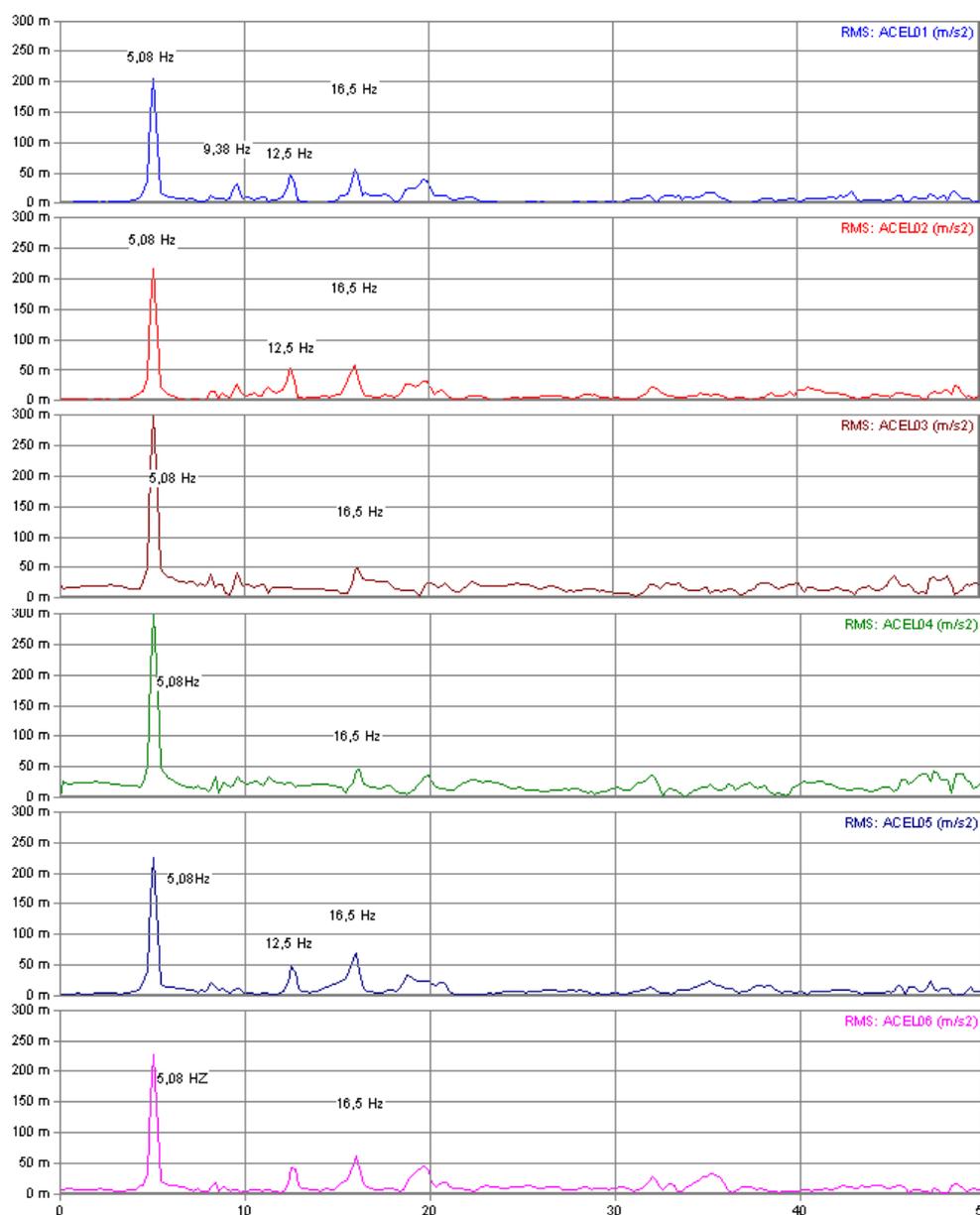


Figura 7.4 – Vibração Livre - Espectro de freqüências na direção vertical em  $m/s^2 \times Hz$

O espectro de freqüência na direção vertical permitiu identificar primeira freqüência à flexão de 5,08 Hz. Nos espectros aparecem outras freqüências: 9,38 Hz, 12,5 Hz e 16,5 Hz. Ressalta-se que a segunda freqüência a flexão 9,38 Hz foi identificada em três acelerômetros AC 01, AC 02 e AC 03, não aparecendo picos nos demais acelerômetros nesta direção. Isto é indicativo de alguma torção de estrutura, pois se observarmos os espectros para a direção transversal, estes se manifestam. A mesma observação pode ser realizada a 3ª freqüência a flexão (12,5

Hz), cujos picos estão nos AC 01, AC 02, AC 05 e AC 06. Se observarmos a direção transversal a frequência aparece também nos AC 03 e AC 04.

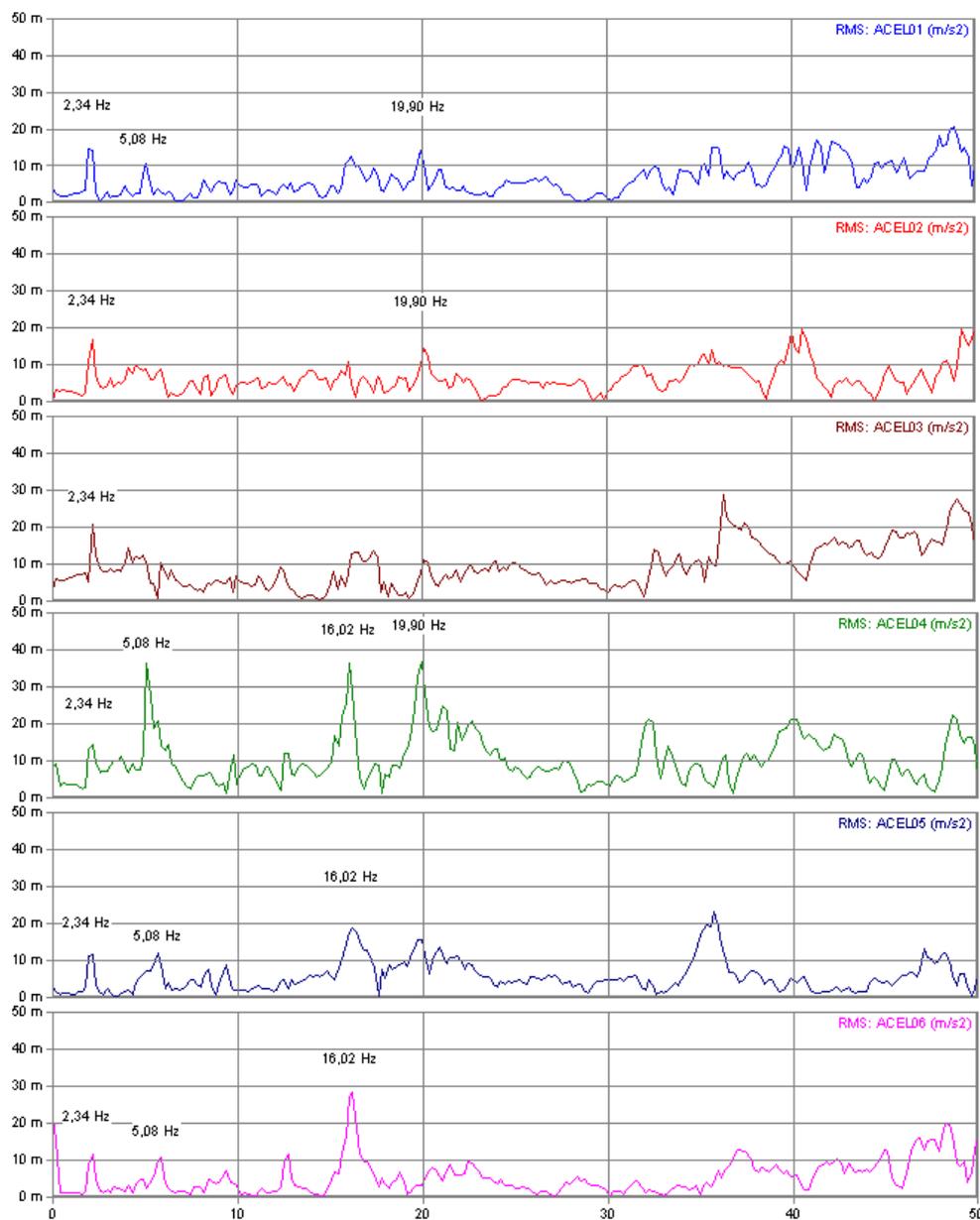


Figura 7.5 – Vibração Livre - Espectro de frequências na direção transversal em  $m/s^2 \times Hz$

Ressalta-se nos espectros frequência 2,34 Hz que representa a 1ª frequência a torção pura. A próxima frequência identificada de 5,08 Hz é o reflexo do 1ª modo a flexão já comentada. Ainda aparecem outras frequências secundárias que são combinadas com os modos a flexão, indicando flexão com torção.

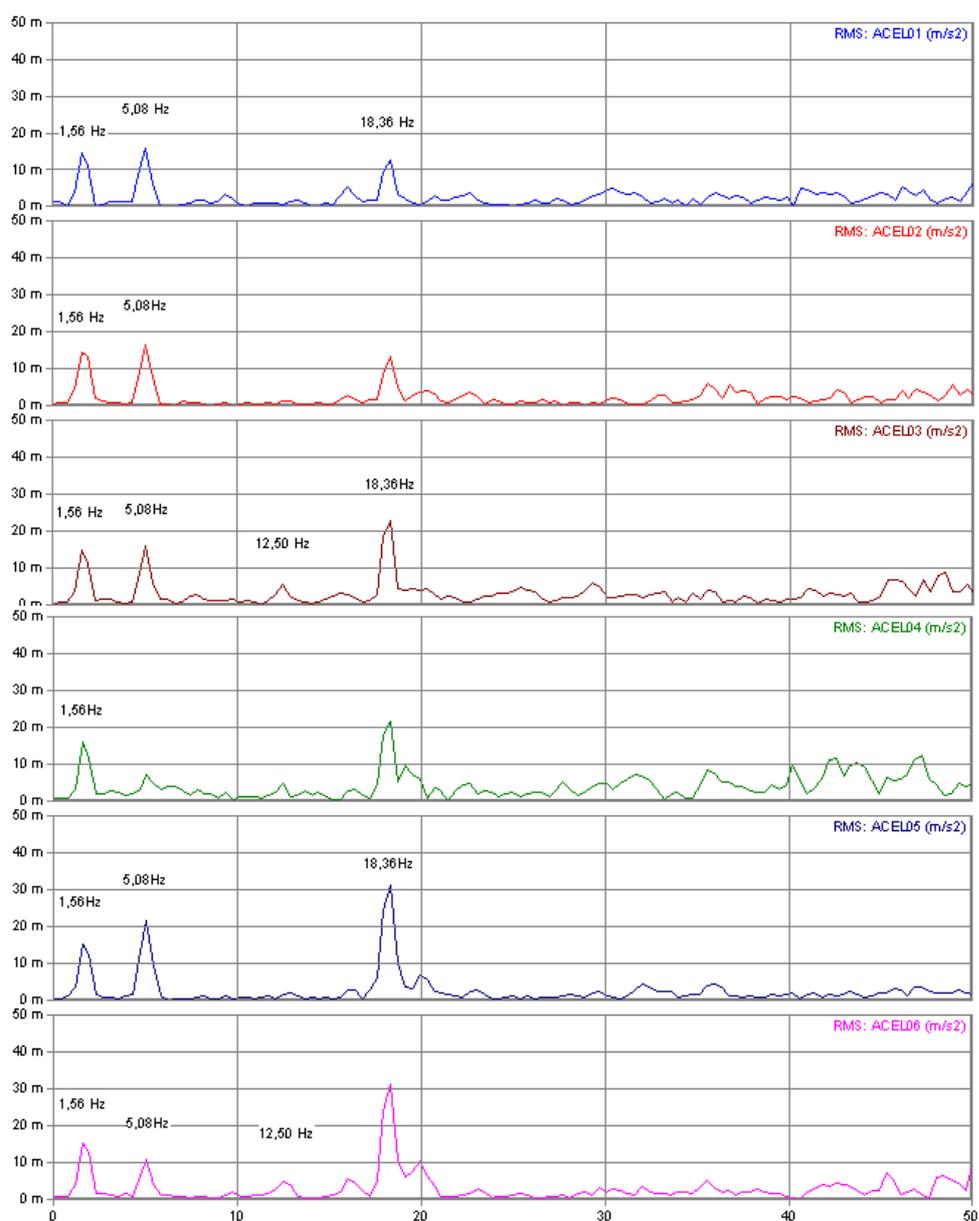


Figura 7.6 – Vibração Livre - Espectro de frequências na direção longitudinal em  $m/s^2 \times Hz$

O espectro de frequências na direção longitudinal mostrou o 1º modo de vibração da estrutura longitudinal (1,56 Hz). Manifesta-se um novo modo de vibração longitudinal de 18,36 Hz.

### 6.1.3 Freqüências Naturais

Da observação dos espectros obtidos com resposta da estrutura à solicitação aplicada foi possível identificar as freqüências naturais de vibração obtidas experimentalmente.

Tabela 6.2 – Valores das freqüências naturais obtidas experimentalmente e obtidas por método numérico.

Freqüências Naturais da Passarela (Hz)						
MODELO \ MODOS	$f_{01}$	$f_{02}$	$f_{03}$	$f_{04}$	$f_{05}$	$f_{06}$
Numérico	1,61	2,24	2,47	3,35	4,46	5,68
Experimental	1,56	-	2,34	-	-	5,08
Erro (%)	3,2	-	5,5	-	-	11,8

Como pode ser verificado apesar da complexidade da estrutura as freqüências do modelo numérico com as obtidas experimentalmente apresentam boa correlação. Destaca-se que o tipo de modo de vibração obtidos no modelo foi confirmado com os obtidos na análise experimental.

Lembra-se também que o modelo apresentou modos intermediários de 2,24, 3,35 e 4,46 Hz, que experimentalmente não foram identificados nos espectros de freqüência obtidos com os sinais obtidos por vibração livre da estrutura.

### 6.1.4 Estimativa da Taxa de Amortecimento

A estimativa do amortecimento modal  $\xi$  foi realizada através do método de decremento logarítmico com os sinais temporais experimentais de aceleração. Para a determinação do coeficiente de amortecimento foi realizada a “filtragem dos sinais de aceleração de vibração livre com filtros passa-banda no tempo (passa baixa e passa alta), de maneira que o sinal resultante fosse correspondente à aceleração da estrutura apenas na freqüência do modo desejado” - Varela [45].

Desta maneira os sinais na direção transversal foram filtrados na banda entre 2 e 3 Hz, na direção vertical entre 4 a 6 Hz e na direção longitudinal entre 1 e 2 Hz. Os sinais resultantes são semelhantes para todos os sensores de aceleração para cada direção.

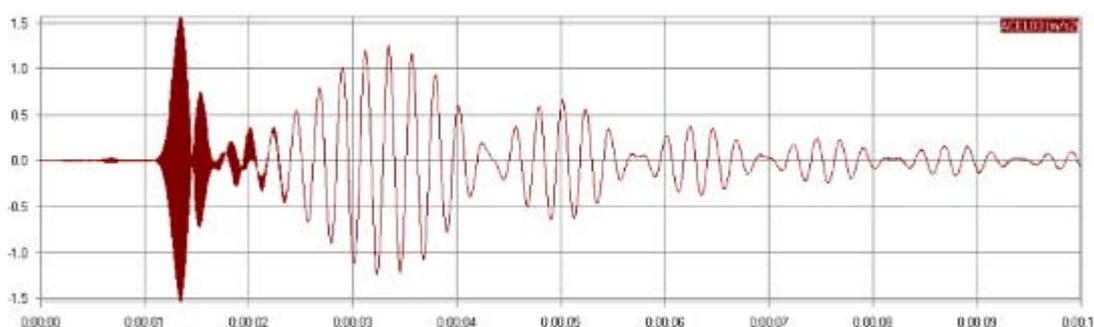


Figura 7.7 – Sinais temporais de aceleração de vibração livre na direção vertical após a filtragem na banda de 4 a 6 Hz

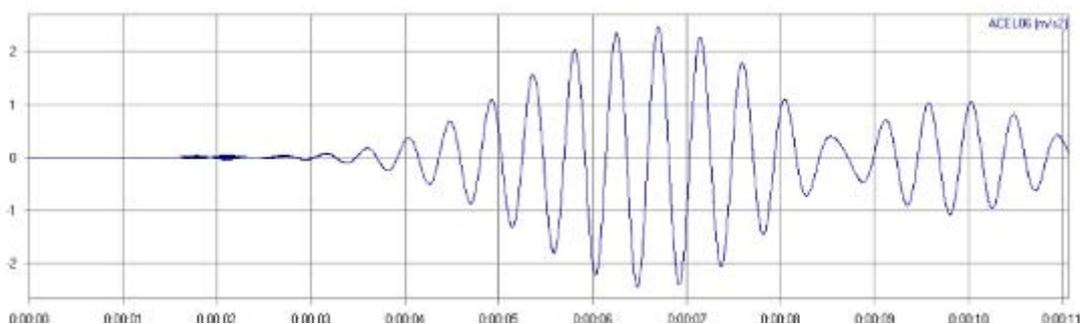


Figura 7.8 – Sinais temporais de aceleração de vibração livre na direção transversal após a filtragem na banda de 2 a 3 Hz

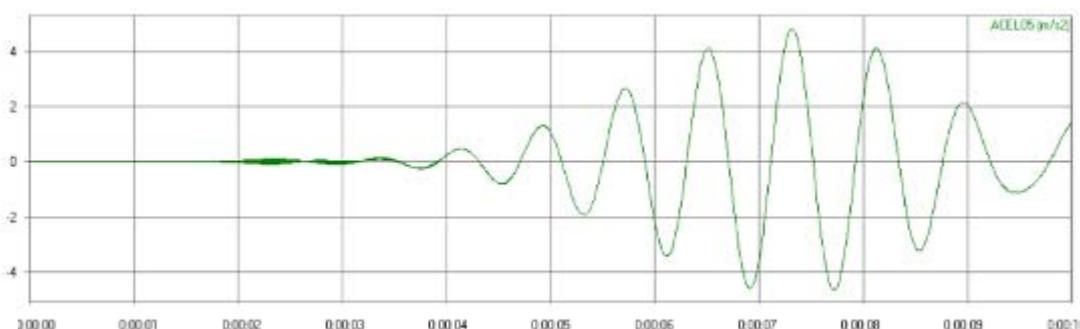


Figura 7.9 – Sinais temporais de aceleração de vibração livre na direção longitudinal após a filtragem na banda de 1 a 2 Hz

Com a aplicação do método de decremento logarítmico foi realizada a estimativa de amortecimento modal cujos resultados se encontram na tabela 6.3.

Cabe ressaltar que os valores obtidos são ligeiramente superiores aos recomendados pelo CEB [56] para passarelas de pedestres (tabela 3.4).

Tabela 6.3 – Valores das taxas de amortecimento modal obtidos para a Passarela Oswaldo Aranha

Direção	Banda de Filtragem	$\xi$	$\xi$ %
Longitudinal	1º Modo entre 1 e 2 Hz	0,021	2,1
Transversal	2º Modo entre 2 a 3 Hz	0,009	0,9
Vertical	3º Modo entre 4 a 6 Hz	0,007	0,7

#### 6.1.5 Avaliação dos resultados da Análise Modal Experimental

O objetivo da análise modal experimental realizada foi determinar das propriedades dinâmicas da passarela por meio das Funções Respostas em Freqüência - FRF que são obtidas a partir dos dados respostas quando aplicada uma excitação definida.

No caso em análise, a partir da aquisição das FRF durante os ensaios realizados, a etapa seguinte foi a obtenção dos parâmetros modais: freqüências naturais, modos de vibrar e taxas de amortecimentos modais que definem tipicamente as características dinâmicas das estruturas.

A obtenção dos parâmetros modais foi realizada utilizando-se processos computacionais o que permitiu analisar os dados com relativa facilidade e confiabilidade nos resultados.

No processamento dos dados o primeiro passo foi analisar os dados coletados e sua transformação em aceleração em  $m/s^2$  para posteriormente através da análise espectral de freqüência obter os modos de vibração e as freqüências naturais da estrutura.

Os valores encontrados para as freqüências e modos obtidos experimentalmente apresentam boa correlação com os valores do modelo numérico.

Com a aplicação do método de decremento logaritmo foi possível fazer a estimativa das taxas de amortecimento, a partir da filtragem dos sinais de aceleração de vibração livre com filtros passa-banda no tempo. Os valores encontrados apresentaram coerência muito próximas dos valores recomendados pelo CEB para estruturas de aço.

## 6.2 Resultados dos Ensaios de Vibração Induzida

Os ensaios experimentais de vibração realizados na passarela submetida ao caminhar humano tiveram a finalidade de avaliar a resposta da estrutura em aceleração e deslocamento para os diversos tipos de carregamentos: 1, 2 ou 3 pessoas caminhando e 1 e 2 pessoas correndo. Em todos os casos o carregamento foi aplicado de forma centrada em relação à seção da estrutura, com pessoas de pesos semelhantes para os casos de duas ou três para manter a simetria da força aplicada.

Os transdutores de aceleração estiveram localizados no meio do vão e nos terços do maior vão da passarela, da mesma forma que para os ensaios de vibração livre. Cabe ressaltar, que para conseguir resultados satisfatórios na experiência a condição inicial era a passarela livre de carregamentos não controlados isto é, livre de pessoas que não estivessem participando da experiência. Pelos resultados obtidos, os cuidados tomados tiveram sucesso, já que somente duas ocasiões houve necessidade de repetir a experiência por invasão de pessoas quando já havia sido iniciada a coleta dos sinais.

Como previsto a aplicação de cada carregamento: caminhar lento, normal e rápido, e correr foram realizados no percurso de 163,0 m que correspondeu à ida e a volta da passarela. Posteriormente na análise dos resultados numéricos e nos gráficos, ficou demonstrado que não seria necessário já que os sinais “na ida e na volta” apresentaram em quase todos os casos, simetria em relação à resposta da estrutura.

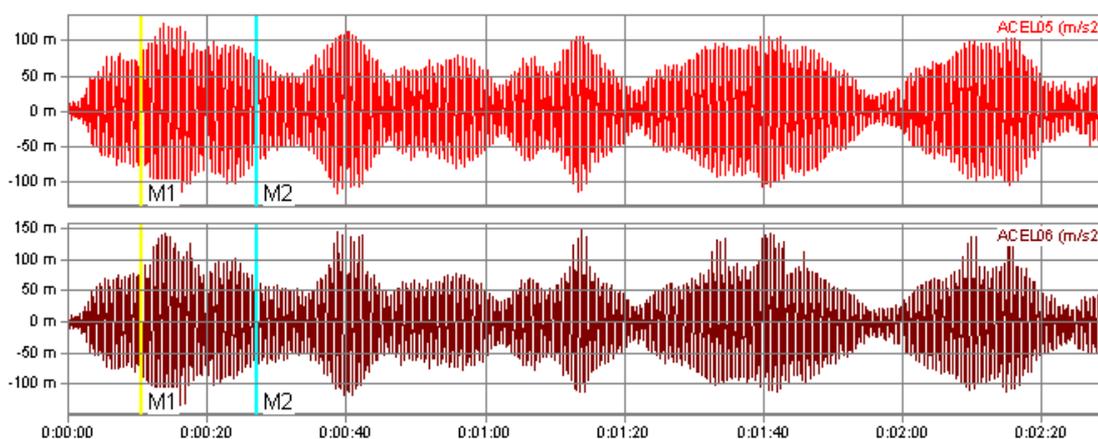
A interpretação dos resultados obtidos nas experiências com pessoas caminhando foi realizado utilizando-se o tempo gasto no percurso em s, e parâmetros que caracterizam o Caminhar Humano, pesquisado por Bachmann e Ammann [23] (tabela 6.4), para de esta maneira inferir a frequência de excitação para cada caso.

Tabela 6.4 – Características do Caminhar Humano Bachmann e Ammann, [23]

Atividade	Velocidade (m/s)	Distância do Passo (m)	Frequência do Passo Hz
Caminhar Lento	1,1	0,6	1,7
Caminhar Normal	1,5	0,75	2
Caminhar Rápido	2,2	1	2,3

Para o caso da solicitação por pessoas correndo foi utilizado o modelo analítico de Wheeler [57] que faz a correlação da velocidade de avanço com o comprimento do passo e a frequência (Figura 2.14).

Nas páginas a seguir são apresentados os resultados da resposta da estrutura em aceleração e deslocamento no formato das figuras 7.10 e 7.11 a seguir.

Figura 7.10 – Gráfico de aceleração x tempo em  $m/s^2$  (\*).

(\*) As respostas dinâmicas temporais e espectros de frequência são apresentados no padrão do software AqDAnalysis v. 7.0 [55]. Para obter a grandeza física correta dos valores as ordenadas deveremos entender: para os valores seguidos de “m” multiplicar por  $10^{-3}$ ; para os valores seguidos de “ $\mu$ ” multiplicar por  $10^{-6}$  e para os valores que não são acompanhados de “m” ou “ $\mu$ ” a grandeza física lida é a real.

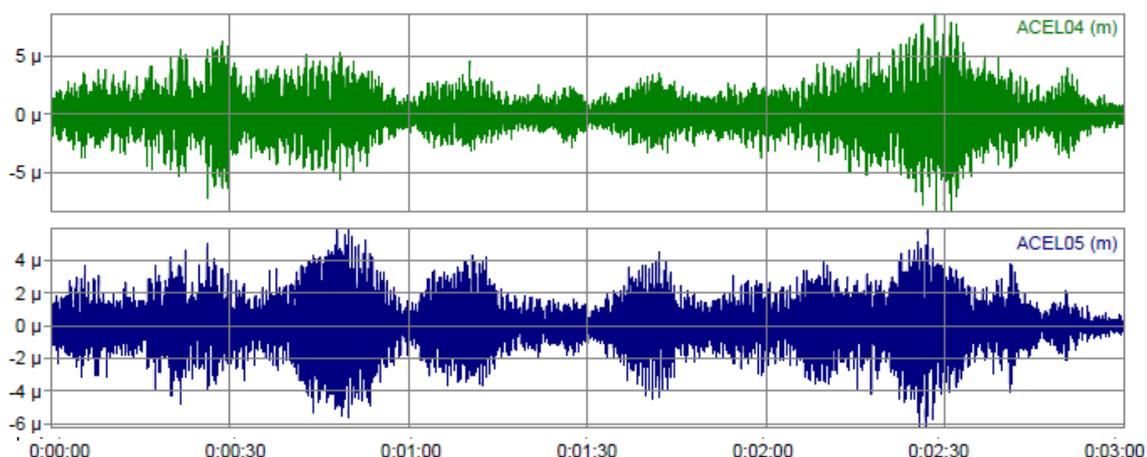


Figura 7.11 – Gráficos de deslocamento x tempo, para a direção transversal.

### 6.2.1 Resposta Dinâmica em Aceleração Temporal

Das experiências realizadas, são apresentadas a seguir as respostas da estrutura para a aceleração vertical, transversal e longitudinal em cada um dos pontos instrumentados.

De uma forma geral pode ser observado que para as diversas solicitações, os picos de aceleração aparecem na maioria dos casos na direção vertical por coincidir com a direção da aplicação da excitação.

Para a carga dinâmica aplicada por pessoas caminhando os maiores valores foram na direção vertical para o “Caminhar Lento” de 1, 2, ou 3 Pessoas. Para a direção transversal os valores de aceleração foram todos inferiores a  $0,2 \text{ m/s}^2$  exceto para a excitação “Caminhar Rápido - 3 Pessoas” quando um dos acelerômetros indicou  $0,23 \text{ m/s}^2$ .

A solicitação imposta por 1 ou 2 Pessoas Correndo, provocou acelerações acentuadas em todas as direções destacando-se a vertical.

#### 6.2.1.1 Carga Dinâmica Aplicada: 1 Pessoa

A carga dinâmica esteve composta por uma pessoa com peso médio de 85 kg que fez o percurso caminhando ida e volta a diferentes velocidades de passo. Para

cada percurso foi obtido o tempo no registro dos sinais obtendo-se desta forma o tempo médio.

### A - Caminhar Lento

São apresentados a seguir gráficos de aceleração da resposta dinâmica da passarela. Para a obtenção da frequência o tempo foi considerado desde o primeiro pico do gráfico até quando é observado o amortecimento e uma nova excitação provocada pela liberação da passarela. Das medições realizadas foi possível determinar o tempo de percurso ajustado total é de 160 segundos.

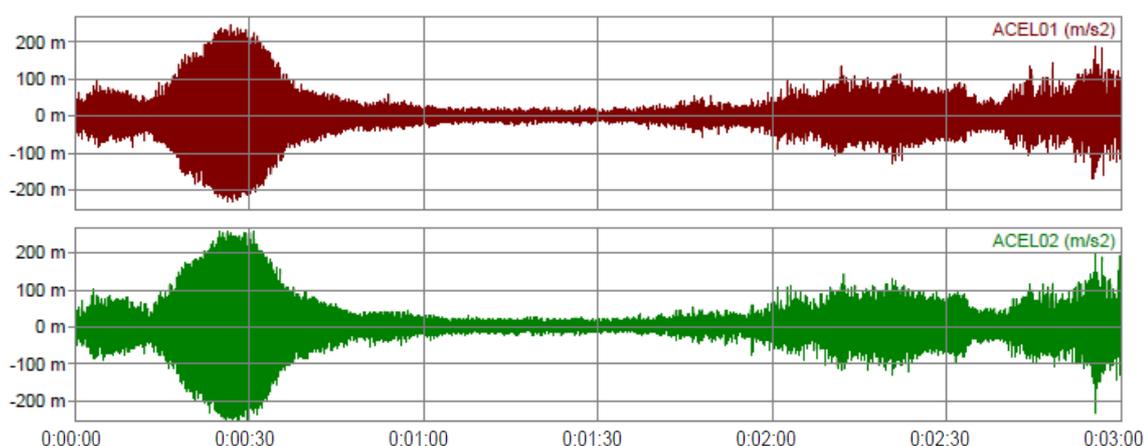


Figura 7.12 – Resposta da passarela em aceleração x tempo, para a direção vertical - quando solicitada pelo Caminhar Lento de 1 Pessoa AC 01 e AC 02.

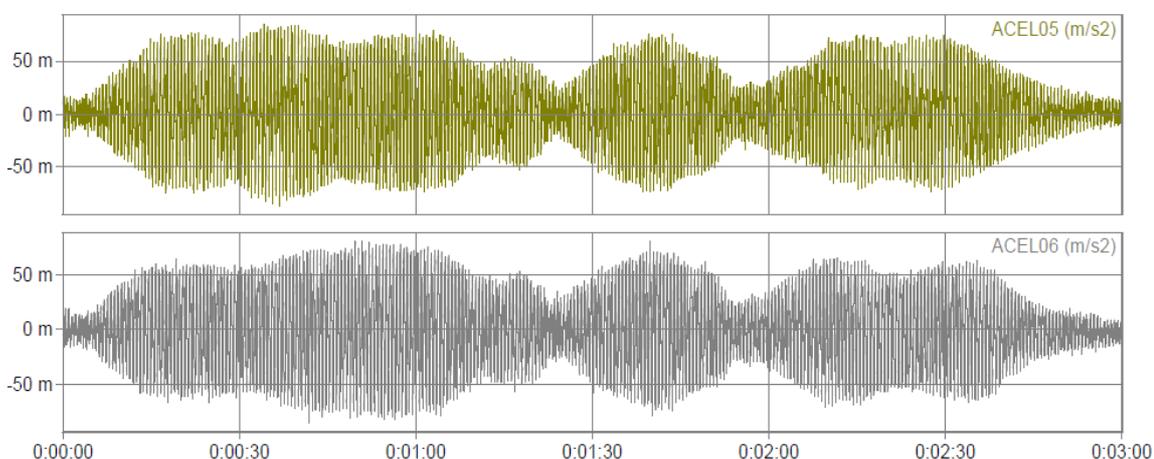


Figura 7.13 – Resposta da passarela, em aceleração x tempo para a direção longitudinal quando solicitada pelo Caminhar Lento de 1 Pessoa - AC 06 e AC 06.

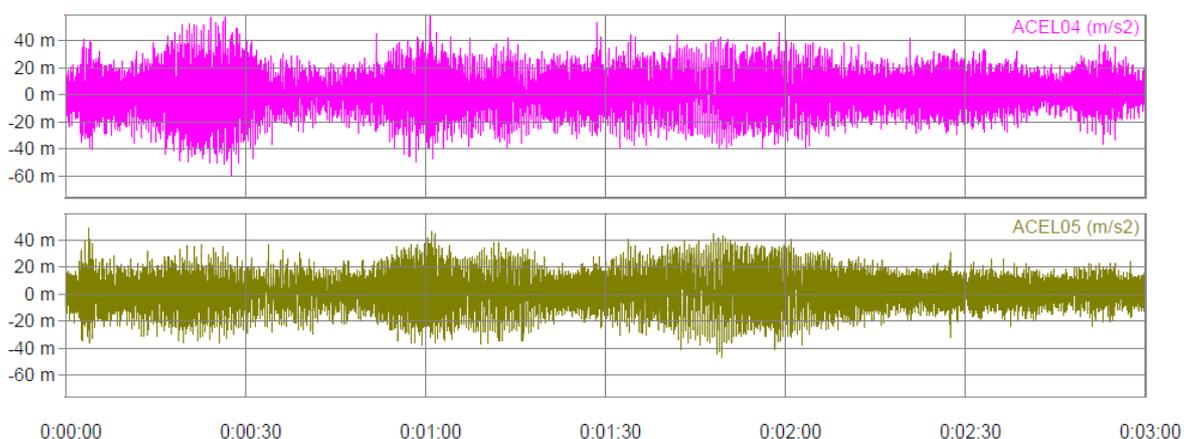


Figura 7.14 – Resposta da passarela, em aceleração x tempo para a direção transversal quando solicitada pelo Caminhar Lento de 1 Pessoa - AC 04 e AC 05.

A distância do passo para a carga dinâmica aplicada de uma pessoa caminhando lento especificada na Tabela 6.4 e o tempo de percurso permitiu determinar a frequência do passo experimental.

- distância de passo = 0,60 m (Bachmann e Ammann)
- tempo de percurso = 160 s
- comprimento do percurso = 163,0 m
- número de passos = 271 passos
- frequência do passo (experimental) = 1,69 Hz

Os valores máximos da resposta da estrutura em aceleração, nas três direções, se encontram na tabela a seguir.

Tabela 6.5 - Valores da resposta da estrutura em aceleração em  $m/s^2$  quando submetida ao Caminhar Lento de 1 Pessoa.

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Lento 01 Pessoa	Transversal	0,07	0,08	0,04	0,06	0,05	0,05
	Vertical	0,24	0,27	0,37	0,39	0,26	0,32
	Longitudinal	0,08	0,13	0,09	0,09	0,09	0,09

Os valores maiores para a resposta temporal em aceleração estão na direção vertical no meio do vão analisado. Ressaltam-se também a aceleração na direção longitudinal, que superam a direção transversal.

## B - Caminhar Normal

Os gráficos a seguir reproduzem a resposta dinâmica em aceleração da passarela quando excitada pelo caminhar normal de uma pessoa percorrendo o percurso de 163 m. Das medições realizadas foi possível determinar o tempo de percurso médio em 110 segundos.

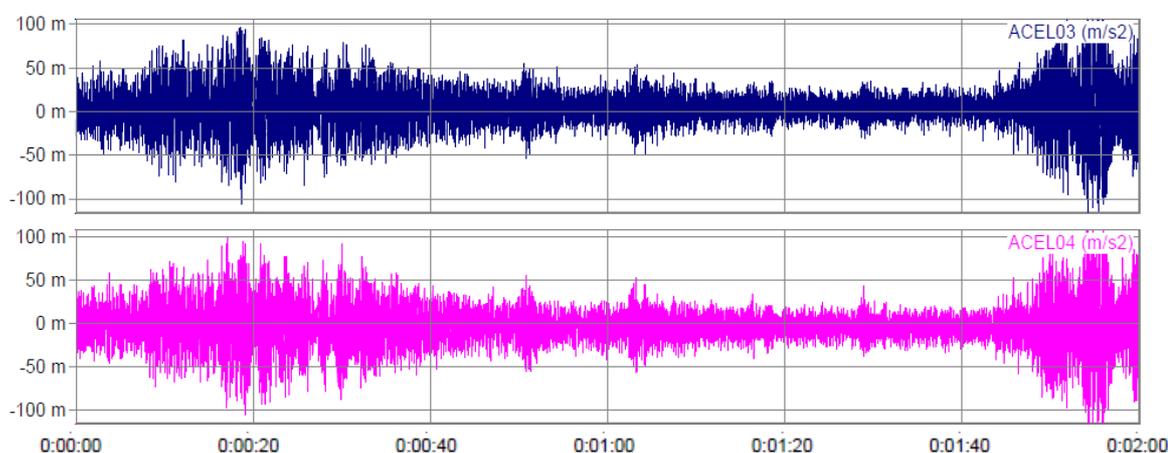


Figura 7.15 – Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção vertical quando solicitada pelo Caminhar Normal de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04.

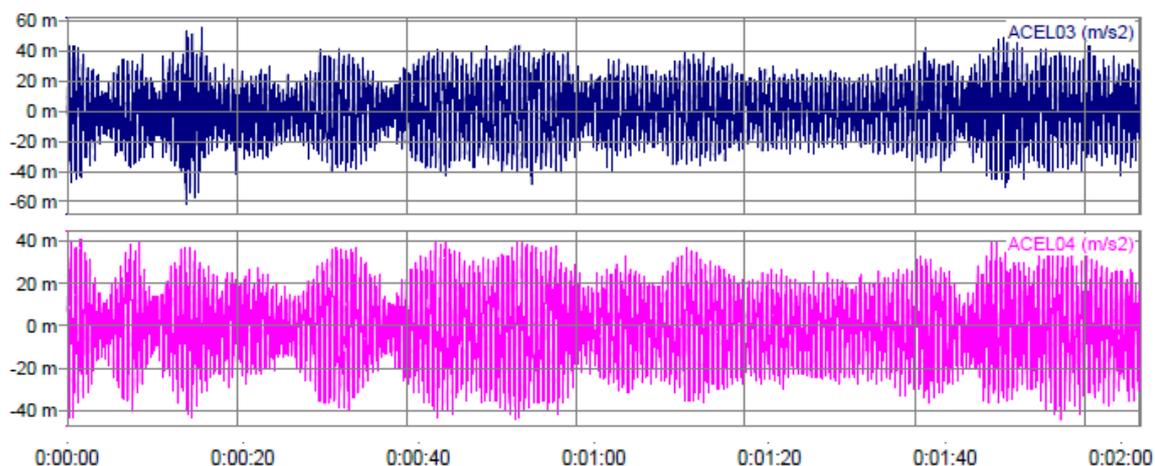


Figura 7.16 – Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção longitudinal quando solicitada pelo Caminhar Normal de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04.

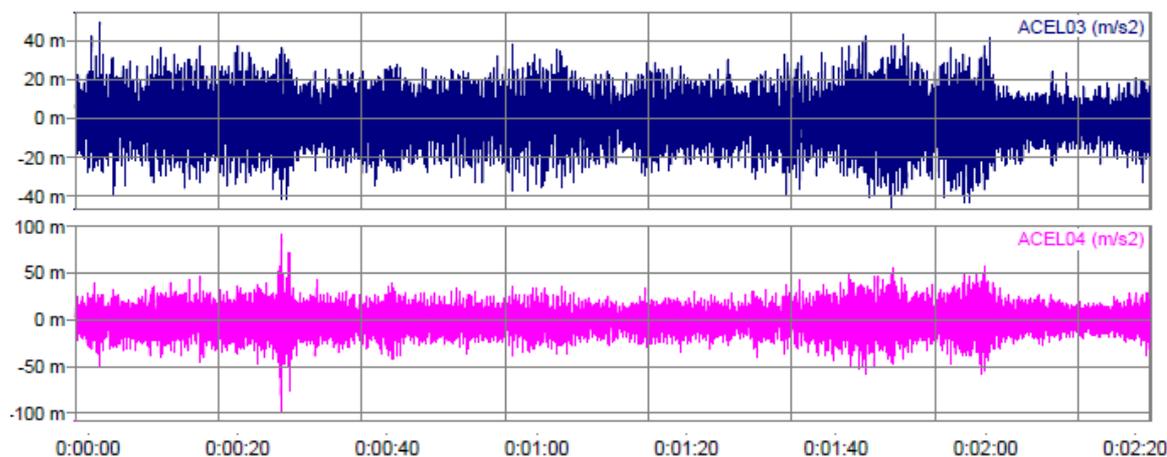


Figura 7.17 – Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção transversal quando solicitada pelo Caminhar Normal de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04.

Com o tempo de percurso experimental ajustado e a distância do passo normal da tabela 6.5 teremos:

- distância de passo = 0,75 m (Bachmann e Ammann)
- tempo de percurso = 110 s
- comprimento do percurso = 163,0 m
- número de passos = 217 passos
- frequência do passo (experimental) = 1,97 Hz

Os valores máximos da resposta temporal em aceleração da estrutura, nas três direções, se encontram na tabela 6.6 a seguir.

Tabela 6.6 - Valores da resposta da estrutura em aceleração em  $m/s^2$  quando submetida ao Caminhar Normal de 1 Pessoa.

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Normal 1 Pessoa	Transversal	0,07	0,12	0,04	0,10	0,06	0,05
	Vertical	0,11	0,11	0,11	0,11	(*)	0,10
	Longitudinal	0,04	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04

A análise dos resultados mostra que a excitação de uma pessoa caminhando com passo normal, provoca acelerações menores quando comparadas com o caminhar lento. Neste caso a frequência experimental de excitação de 1,97 está afastada das frequências naturais da estrutura.

## C - Caminhar Rápido

São apresentados a seguir gráficos de aceleração da resposta quando aplicada a excitação de uma pessoa caminhando rápido. Com as medições realizadas foi possível determinar o tempo de percurso médio em 80 segundos.

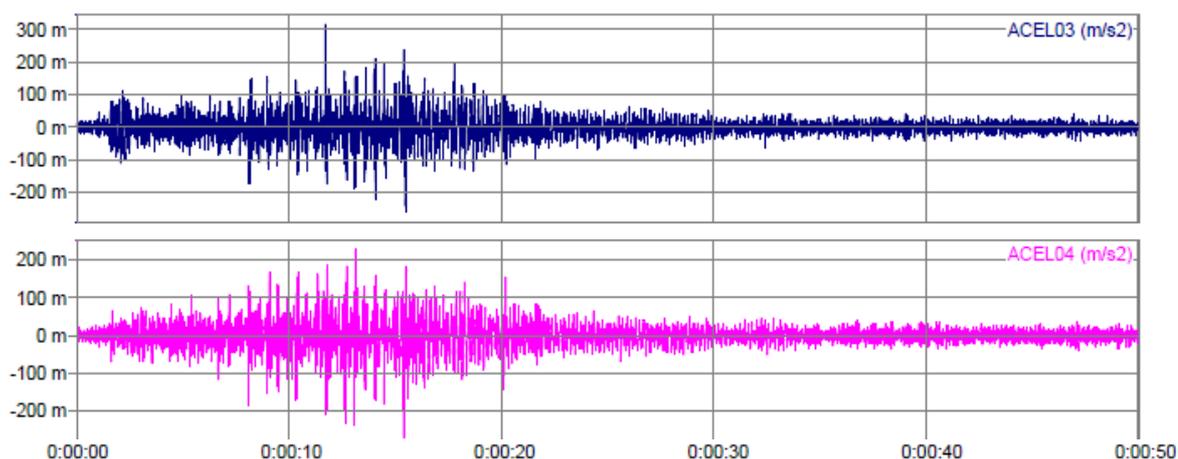


Figura 7.18 – Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção vertical quando solicitada pelo Caminhar Rápido de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04

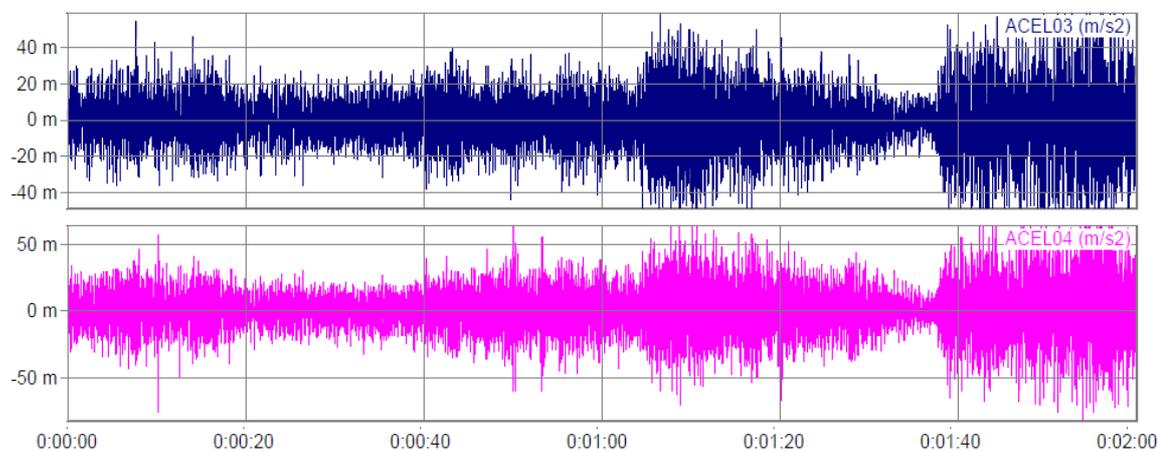


Figura 7.19 – Resposta da passarela, em aceleração x tempo, para a direção transversal quando solicitada pelo Caminhar Rápido de 1 Pessoa – AC 03 e AC 04

Desta forma para a frequência do passo rápido experimental teremos:

- distância de passo = 1,0 m (Bachmann e Ammann)
- tempo de percurso = 80 s
- comprimento do percurso = 163,0 m
- número de passos = 163 passos
- frequência do passo (experimental) = 2,03 Hz

Os valores máximos da resposta da estrutura em aceleração, nas três direções, se encontram na tabela 6.7 a seguir.

Tabela 6.7 - Valores da resposta da estrutura em aceleração em  $m/s^2$  quando submetida ao Caminhar Rápido de 1 Pessoa.

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Rápido 1 Pessoa	Transversal	0,08	0,14	0,07	0,07	0,08	0,04
	Vertical	0,08	0,28	0,32	0,27	0,27	0,22
	Longitudinal	0,08	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03

#### D - Carga Dinâmica Aplicada: Uma Pessoa Correndo

São apresentados a seguir gráficos de aceleração da resposta quando aplicada a excitação de uma pessoa correndo. Com as medições realizadas foi possível determinar o tempo de percurso médio em 50 segundos.

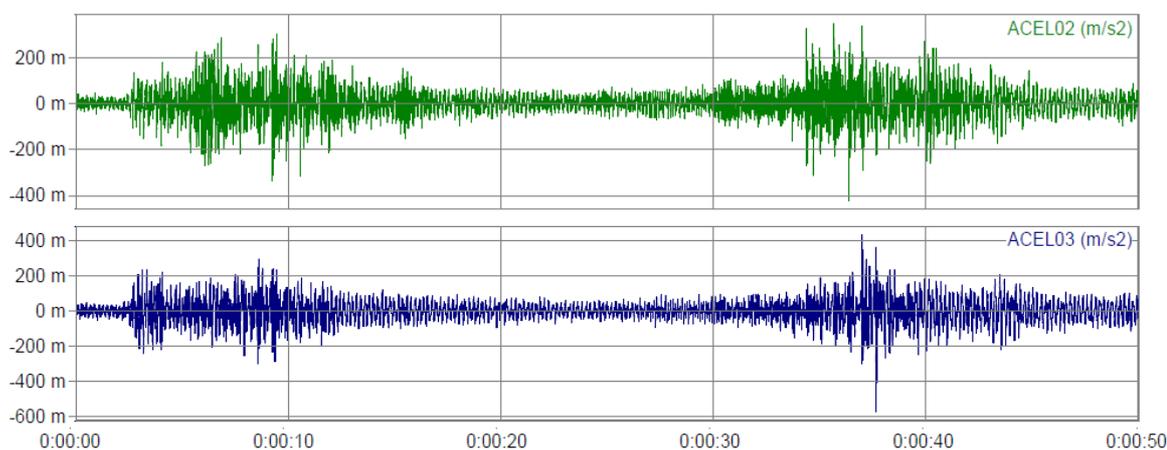


Figura 7.20 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para a carga dinâmica aplicada por 1 Pessoa Correndo – AC 02 e AC 03.

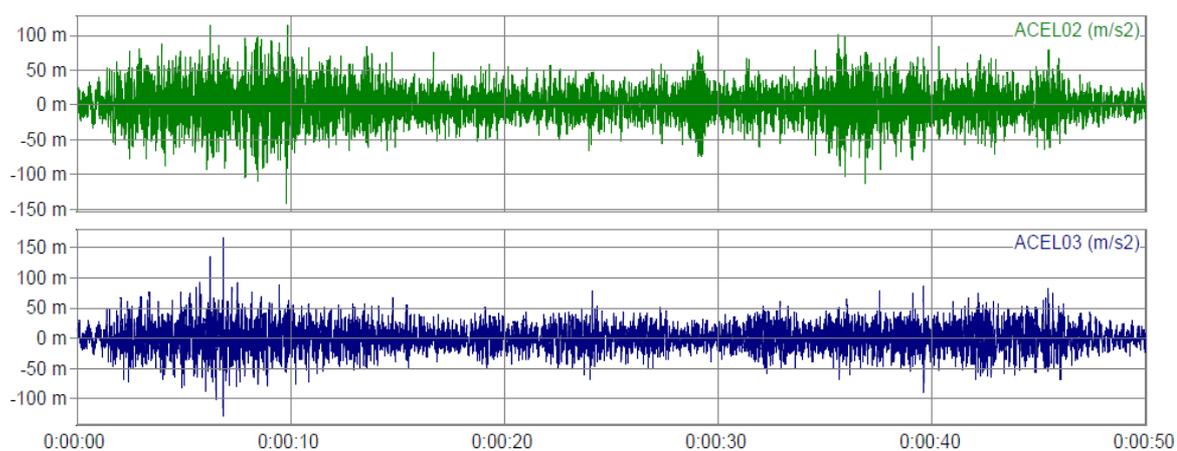


Figura 7.21 – Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para a carga dinâmica aplicada por 1 Pessoa Correndo – AC 02 e AC 03.

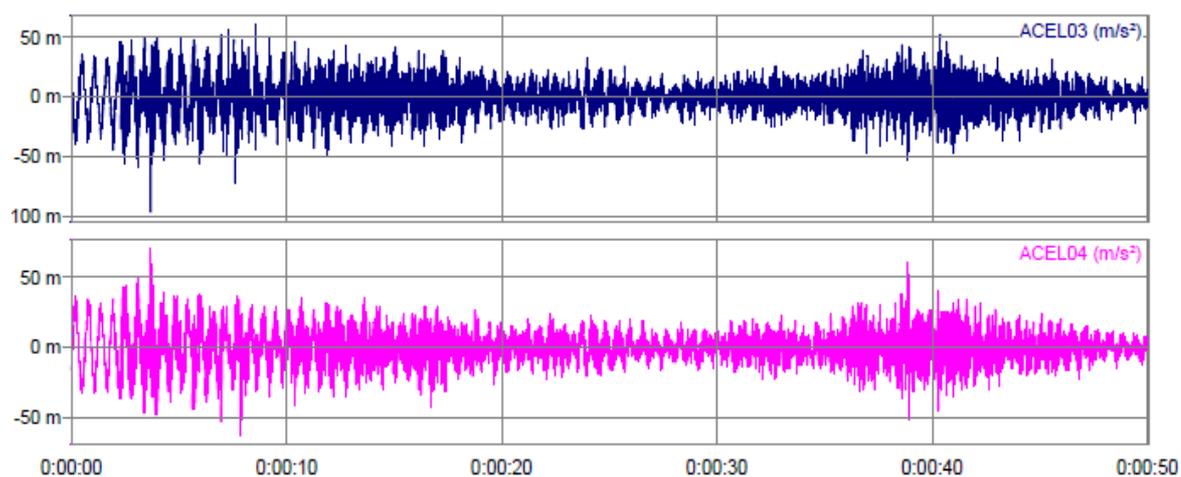


Figura 7.22 – Resposta em aceleração x tempo para a direção longitudinal para a carga dinâmica aplicada por 1 Pessoa Correndo – AC 02 e AC 03.

Para a frequência do passo correndo experimental teremos:

- tempo de percurso = 50 s
- comprimento do percurso = 163,0 m
- velocidade de avanço = 3,26 m/s
- distância de passo = 1,30 m ( Wheeler) [57]
- número de passos = 125
- frequência do passo (experimental) = 2,5 Hz

Tabela 6.8 – Valores da resposta da estrutura em aceleração em  $m/s^2$  quando submetida à carga dinâmica de 1 Pessoa Correndo.

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Correndo 1 Pessoa	Transversal	0,10	0,14	0,17	0,21	0,16	0,14
	Vertical	0,25	0,27	0,38	0,39	0,26	0,32
	Longitudinal	0,09	0,10	0,09	0,08	0,08	0,09

A análise da resposta da estrutura para a solicitação de 1 pessoa indicou que:

- os maiores valores foram para a aceleração vertical para uma pessoa correndo;
- as maiores acelerações transversais apresentaram valores próximos de  $0,2 m/s^2$  para uma pessoa correndo;
- o comportamento da estrutura foi semelhante quando solicitada por uma pessoa caminhando lento;
- as menores acelerações foram para a carga dinâmica de uma pessoa caminhando normal.

#### 6.2.1.2 Carga Dinâmica Aplicada: 2 Pessoas

A carga dinâmica aplicada esteve composta por duas pessoas de peso médio de 85 kg que fizeram o percurso caminhando a diferentes velocidades de passo, no possível sincronizado. Os tempos médios do percurso, foi obtido dos sinais respostas da estrutura, foram semelhantes ao de 1 pessoa.

#### A - Caminhar Lento

Os gráficos as seguir mostram a resposta dinâmica em aceleração na direção vertical da passarela quando excitada pelo caminhar lento de duas pessoas percorrendo o percurso de 163 m. O tempo médio foi de 160 segundos.

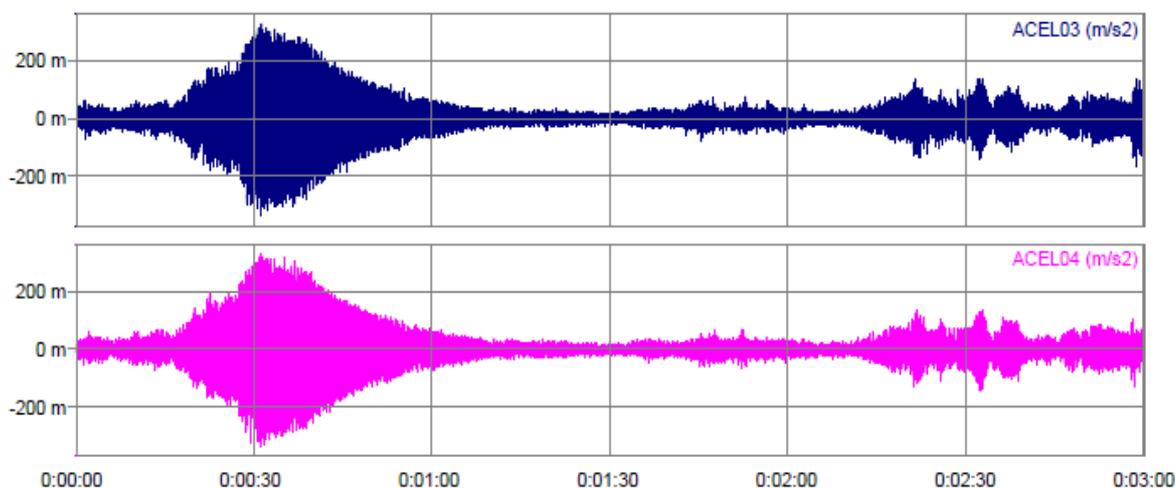


Figura 7.23 – Resposta em aceleração x tempo para a direção vertical para o Caminhar Lento de 2 Pessoas – AC 03 e AC 04

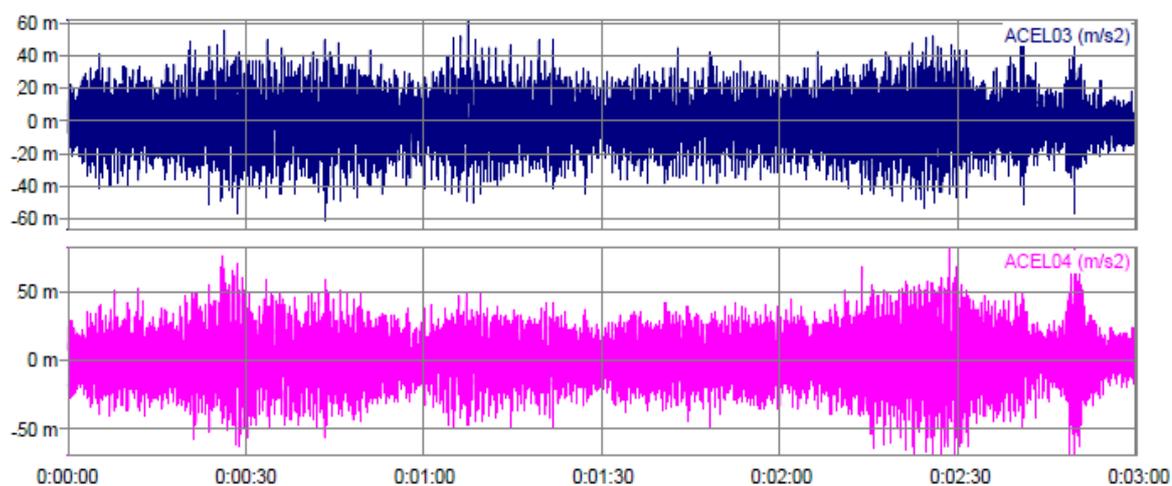


Figura 7.24 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Lento de 2 Pessoas – AC 03 e AC 04

Tabela 6.9 – Valores da resposta em aceleração em  $m/s^2$  de passarela submetida ao Caminhar Lento de 2 Pessoas

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Lento 2 Pessoas	Transversal	0,08	0,08	0,06	0,08	0,06	0,06
	Vertical	0,22	0,25	0,34	0,34	0,23	0,24
	Longitudinal	0,12	0,14	0,11	0,14	0,12	0,12

A resposta em aceleração da estrutura para o caminhar lento de duas pessoas na direção vertical é 10% menor que a resposta quando excitada por uma pessoa caminhando. Na direção transversal e longitudinal os valores são 12% e 24% superiores.

## B - Caminhar Normal

Os gráficos as seguir mostram a resposta dinâmica em aceleração na direção vertical da passarela quando excitada pelo caminhar normal de duas pessoas percorrendo o percurso de 163 m. O tempo médio foi de 110 segundos.

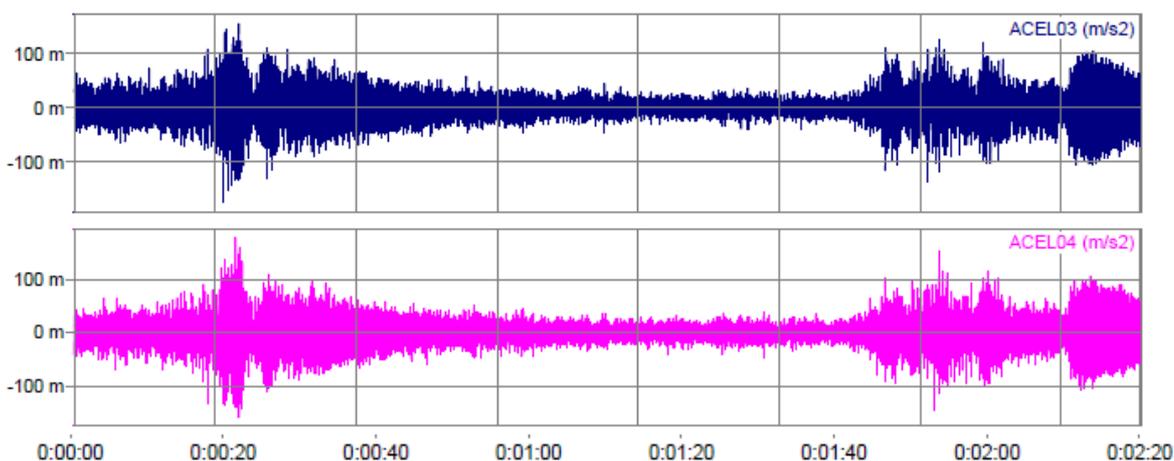


Figura 7.25 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 2 pessoas – AC 03 e AC 04

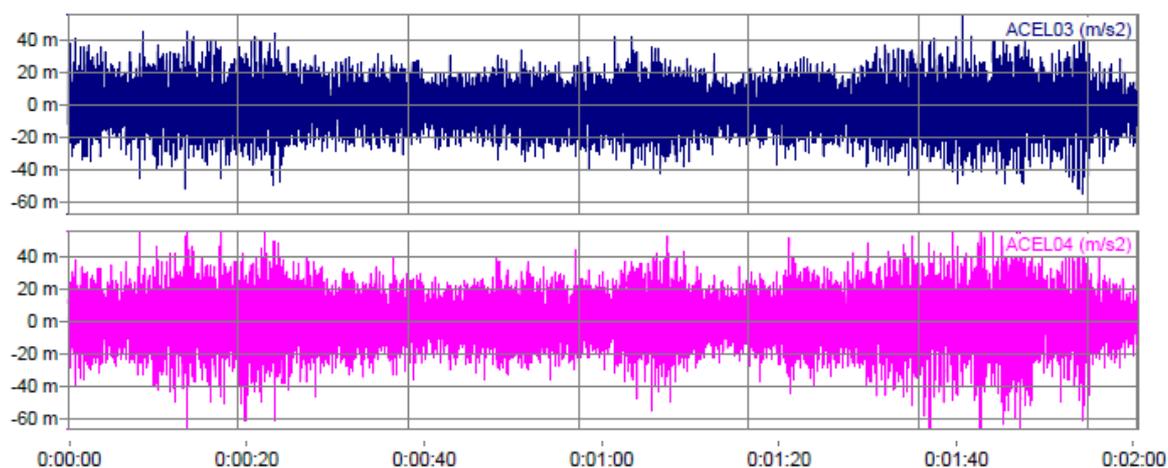


Figura 7.26 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Normal de 2 pessoas – AC 03 e AC 04

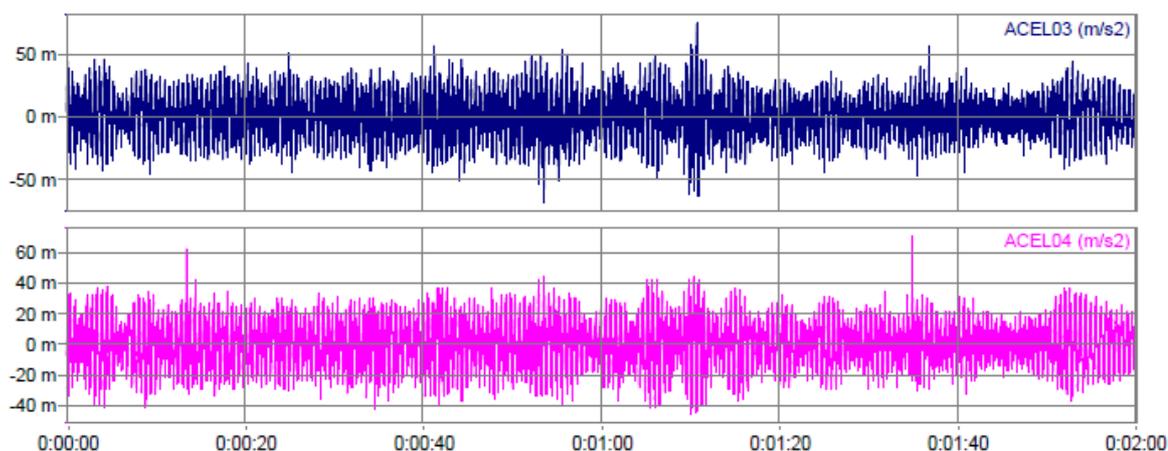


Figura 7.27 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Normal de 2 pessoas – AC 03 e AC 04

Tabela 6.10 – Valores da resposta em aceleração em  $m/s^2$  de passarela submetida ao Caminhar Normal de 2 Pessoas

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Normal 2 Pessoas	Transversal	0,06	0,09	0,05	0,08	0,05	0,06
	Vertical	0,12	0,12	0,18	0,18	0,11	0,13
	Longitudinal	0,04	0,09	0,06	0,06	0,04	0,04

A resposta em aceleração da estrutura para o caminhar normal de duas pessoas é na direção vertical é 28% maior que quando excitada por uma pessoa caminhando normal. Na direção transversal e longitudinal os valores são 13% e 3,7% menores.

### C - Caminhar Rápido

A resposta dinâmica em aceleração na direção vertical da passarela quando excitada pelo caminhar rápido de duas pessoas percorrendo o percurso de 163 m. O tempo médio foi de 80 segundos.

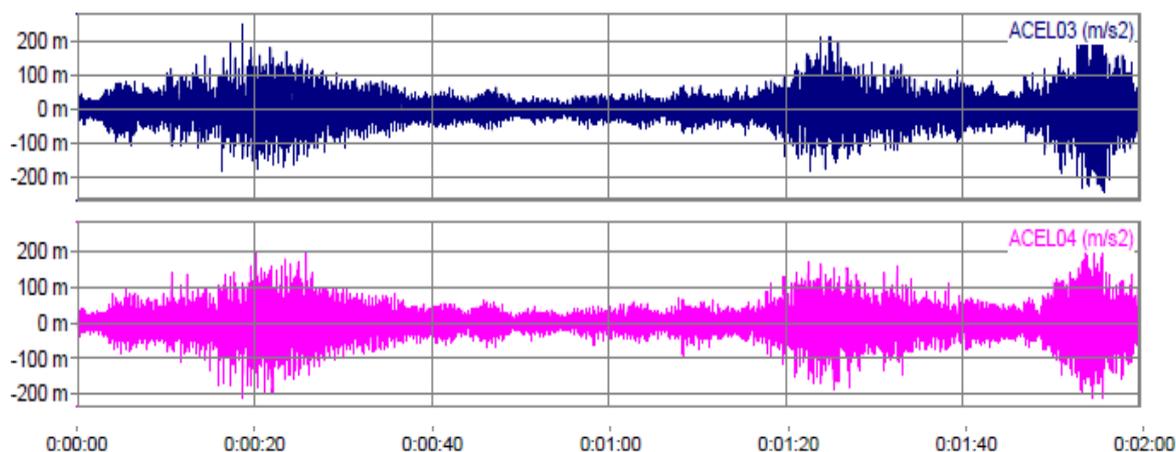


Figura 7.28 – Resposta em aceleração temporal para a direção Vertical para o Caminhar Rápido de 2 Pessoas.

Tabela 6.11 - Valores da resposta em aceleração em  $m/s^2$  de passarela submetida ao Caminhar Rápido de 2 Pessoas

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Rápido 2 Pessoas	Transversal	0,09	0,20	0,09	0,15	0,11	0,12
	Vertical	0,27	0,31	0,25	0,21	0,20	0,20
	Longitudinal	0,04	0,20	0,18	0,11	0,06	0,08

A resposta em aceleração da estrutura para o caminhar rápido das pessoas na direção vertical é 18% menor que quando excitada por uma pessoa caminhando rápido. Na direção transversal e longitudinal os valores são 56% e 167% superiores.

#### D - Carga Dinâmica Aplicada: Duas Pessoas Correndo

Os gráficos as seguir mostram a resposta dinâmica em aceleração na direção vertical da passarela quando excitada pelo carregamento dinâmico de duas pessoas Correndo o percurso de 163 m.

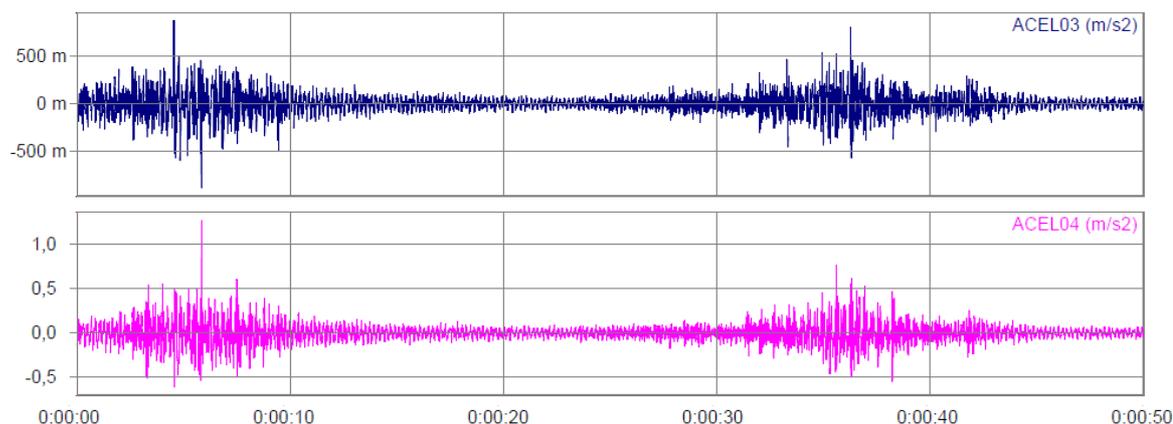


Figura 7.29 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para a carga dinâmica aplicada por 2 Pessoas Correndo – AC 03 e AC 04.

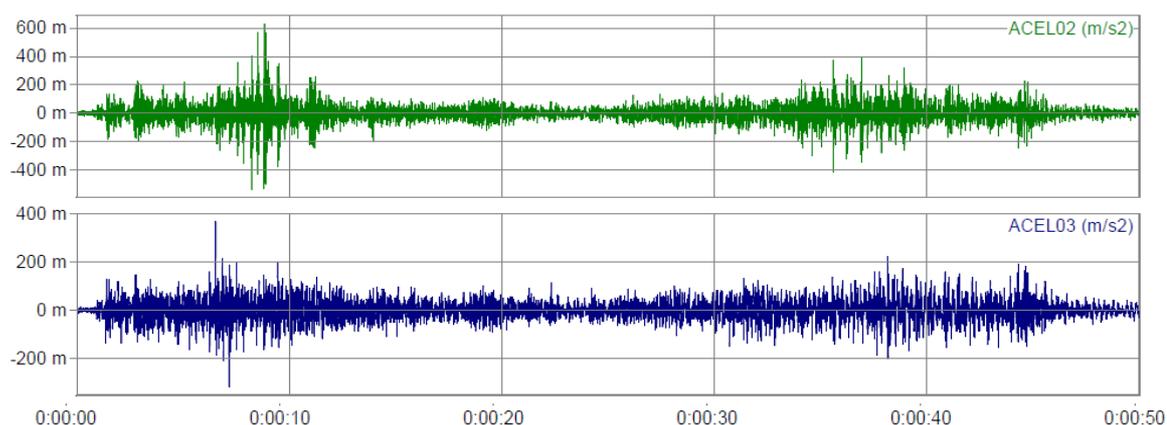


Figura 7.30 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para a carga dinâmica aplicada por 2 Pessoas Correndo– AC 02 e AC 03.

Tabela 6.12 – Valores da resposta em aceleração em  $m/s^2$  da passarela submetida à carga dinâmica de 2 Pessoas Correndo.

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Correndo 2 Pessoas	Transversal	1,22	0,53	0,32	0,32	0,34	0,22
	Vertical	1,00	2,21	0,88	1,27	0,80	0,90
	Longitudinal	0,14	0,44	0,39	0,21	0,10	0,25

A resposta em aceleração temporal da estrutura quando solicitada por duas pessoas correndo apresentou incremento em todas as direções quando comparada

com a excitação por uma pessoa correndo. Na direção vertical o incremento foi de 325%. Na direção transversal e longitudinal o incremento foi de 337% e 260% respectivamente.

Da análise da resposta em aceleração temporal da estrutura para o carregamento dinâmico de duas pessoas pode-se concluir:

- as maiores acelerações foram para a solicitação por duas pessoas correndo, alcançando valores, na direção vertical, de 0,87 e 1,27  $m/s^2$  nos acelerômetros AC 03 e AC 04. Na direção transversal o AC 01 registrou aceleração de 0,93  $m/s^2$  e o AC 02 de 1,22  $m/s^2$ ;
- para o caminhar lento os valores foram semelhantes aos obtidos para a solicitação de uma pessoa e superiores às respostas para o caminhar normal e rápido;
- os valores de aceleração para duas pessoas correndo superaram aos valores estabelecidos pelas normas.

#### 6.2.1.3 Carga Dinâmica Aplicada: 3 pessoas

A resposta dinâmica em aceleração da estrutura foi o resultado da solicitação da passarela pelo caminhar de 3 pessoas com passo, no possível sincronizado. A distribuição das cargas foi equilibrada com duas pessoas de pesos semelhantes nas extremidades e o terceiro no centro com peso ligeiramente superior. O percurso caminhando a diferentes velocidades de passo apresentou os resultados a seguir.

##### **A - Caminhar Lento**

O tempo médio para três pessoas com caminhar lento foi determinado em 160 s como pode ser verificado nas figuras a seguir.

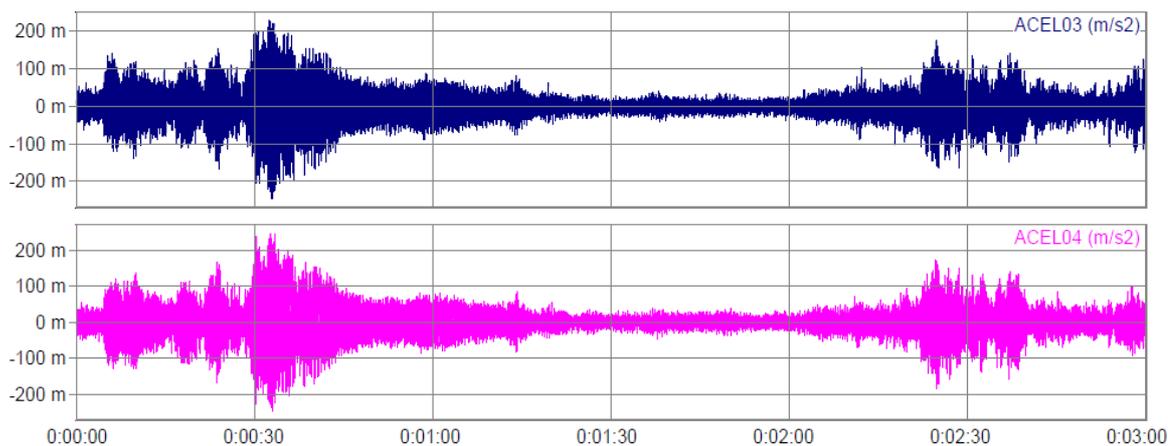


Figura 7.31 – Resposta em aceleração x tempo para a direção vertical para o Caminhar Lento de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

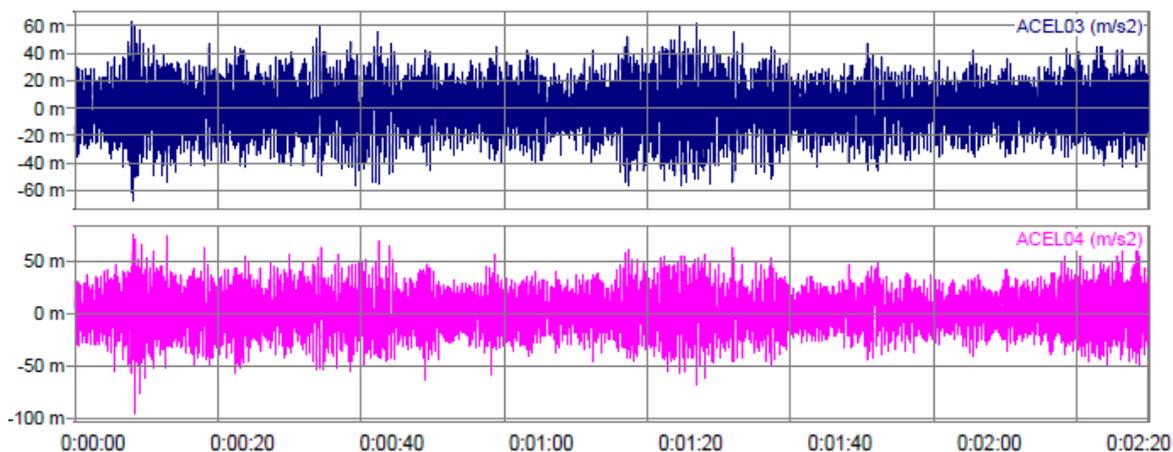


Figura 7.32 – Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para o Caminhar Lento de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

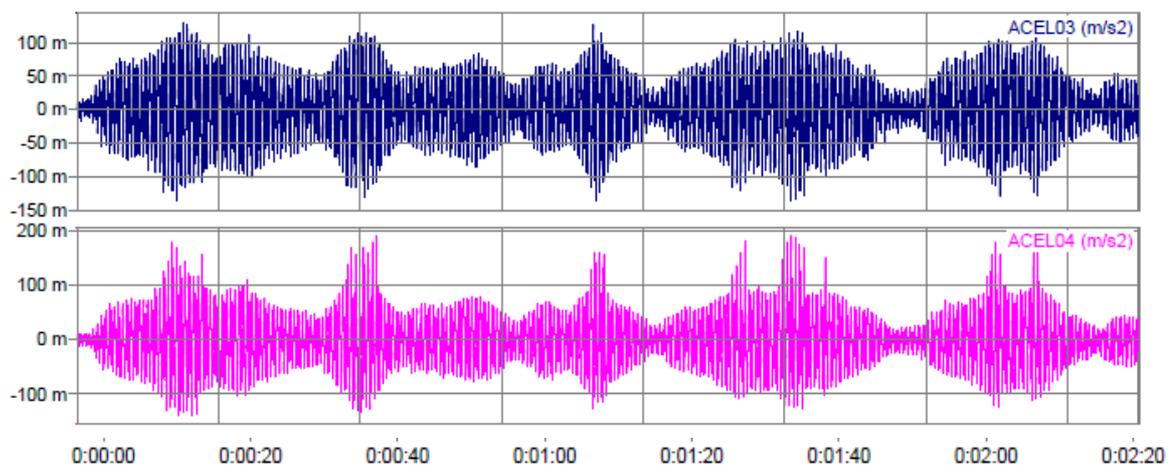


Figura 7.33 – Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para o Caminhar Lento de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04

Tabela 6.13 - Valores da resposta em aceleração em  $m/s^2$  de passarela submetida ao Caminhar Lento de 3 Pessoas

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Lento 3 Pessoas	Transversal	0,11	0,19	0,07	0,10	0,62	0,06
	Vertical	0,17	0,20	0,25	0,25	0,19	0,17
	Longitudinal	0,15	0,18	0,14	0,18	0,12	0,14

A resposta em aceleração da estrutura para o caminhar lento de três pessoas na direção vertical é 66% menor que a resposta quando excitada por uma pessoa caminhando. Na direção transversal e longitudinal os valores são 69% e 56% superiores

## B - Caminhar Normal

A frequência de passo para 3 pessoas caminhando normal repetiu o comportamento observado nos casos anteriores já que o tempo gasto no percurso foi o mesmo 110 segundos.

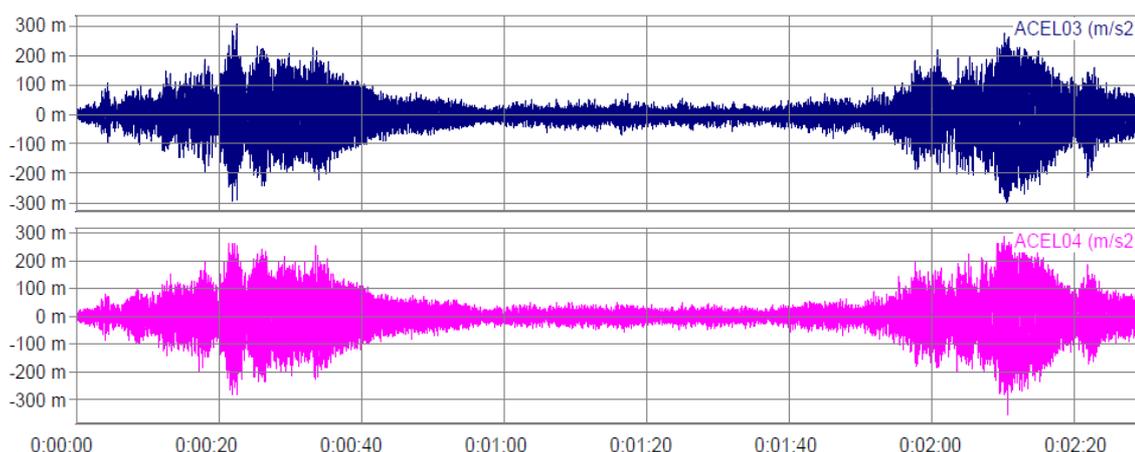


Figura 7.34 – Resposta em aceleração x tempo para a direção vertical para o Caminhar Normal de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

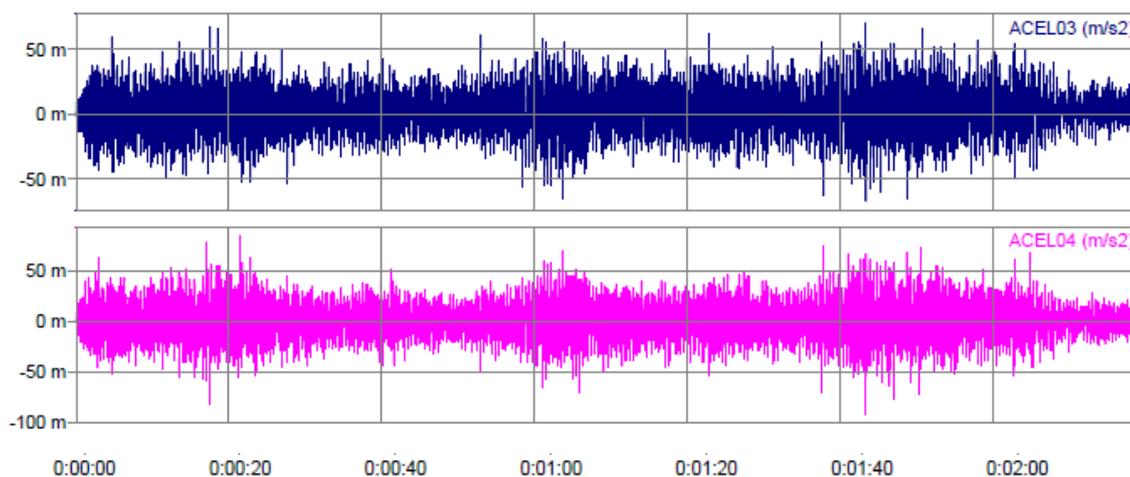


Figura 7.35 – Resposta em aceleração x tempo para a direção transversal para o Caminhar Normal de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

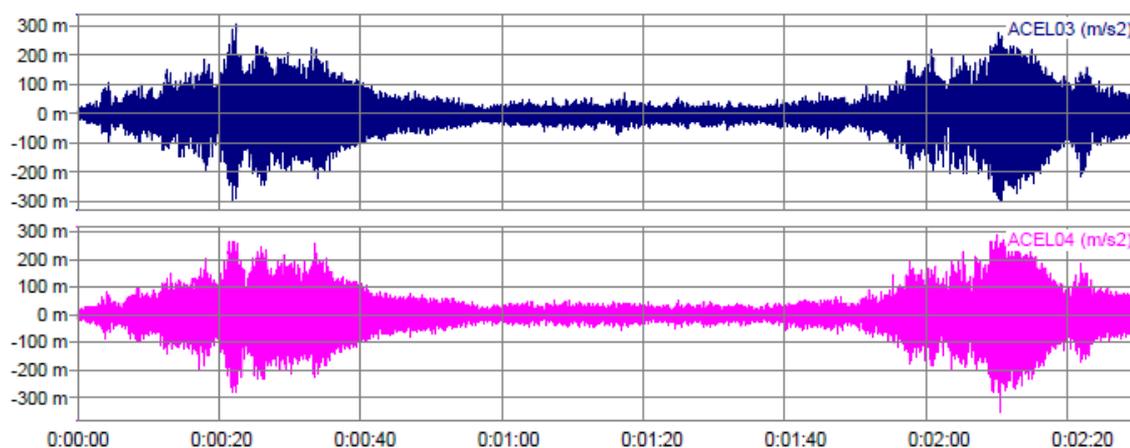


Figura 7.36 – Resposta em aceleração x tempo para a direção longitudinal para o Caminhar Normal de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

Tabela 6.14 – Valores da resposta em aceleração em  $m/s^2$  de passarela submetida ao Caminhar Normal de 3 Pessoas.

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Normal 3 Pessoas	Transversal	0,07	0,11	0,07	0,08	0,07	0,07
	Vertical	0,24	0,20	0,31	0,28	0,20	0,18
	Longitudinal	0,06	0,07	0,08	0,07	0,08	0,08

A resposta em aceleração da estrutura para o caminhar normal de três pessoas na direção vertical é 115% maior que quando excitada por uma pessoa caminhando normal. Na direção transversal e longitudinal os valores são 7,5% e 48% maiores.

### C - Caminhar Rápido

A resposta em aceleração para o caminhar rápido de 3 pessoas mostrou que apesar da interferência o tempo médio foi semelhante que nos casos anteriores. As figuras 7.37 a 7.39 mostra o comportamento da passarela no sentido vertical, transversal e longitudinal.

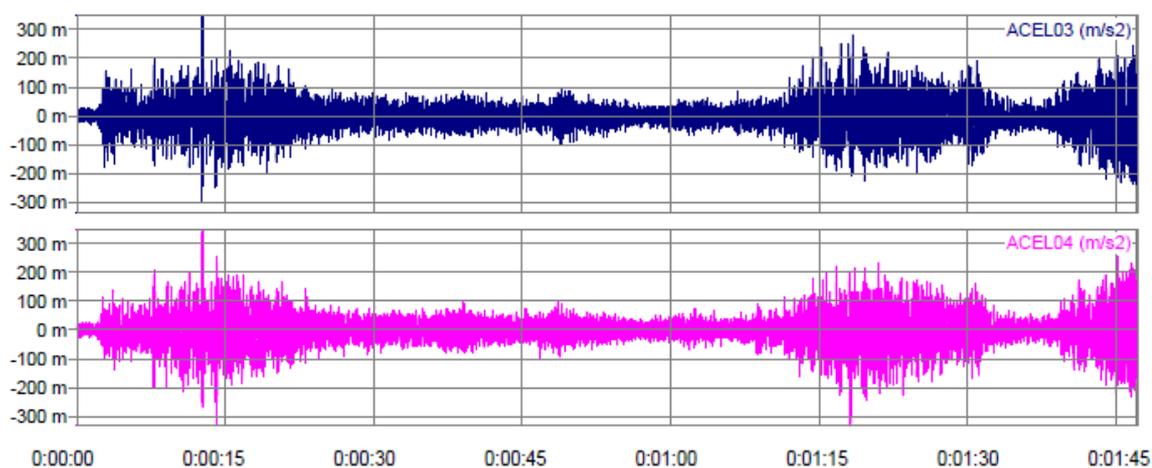


Figura 7.37 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Rápido de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

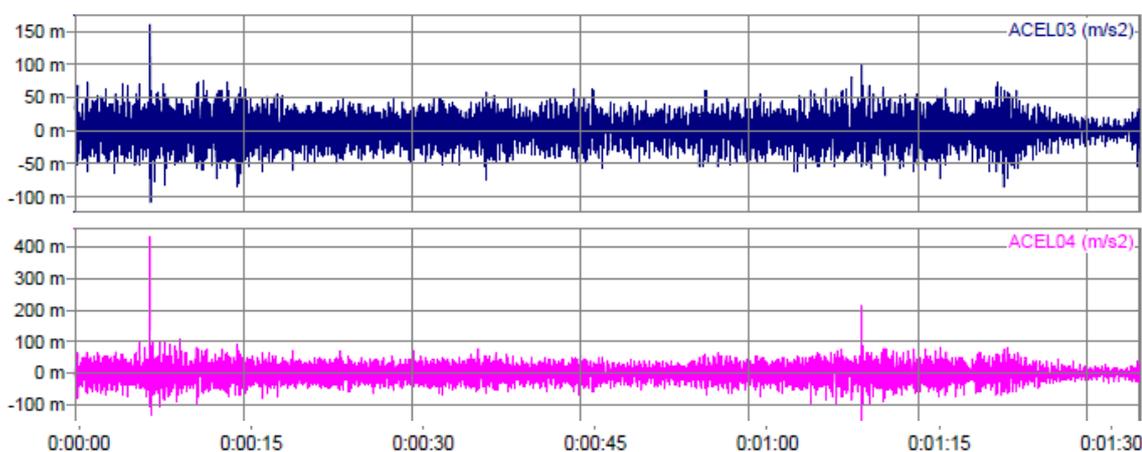


Figura 7.38 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Rápido de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

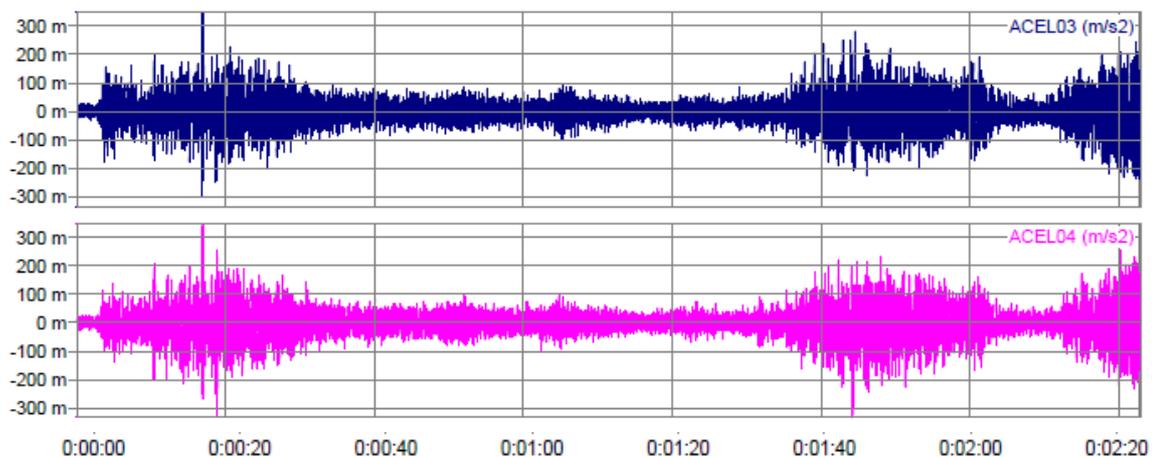


Figura 7.39 – Resposta em aceleração x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Rápido de 3 Pessoas – AC 03 e AC 04.

Tabela 6.15 – Valores da resposta em aceleração em  $m/s^2$  de passarela submetida ao Caminhar Rápido de 3 Pessoas

Tipo de Solicitação	Direção	Aceleração ( $m/s^2$ )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Caminhar Rápido 03 Pessoas	Transversal	0,12	0,23	0,16	0,13	0,12	0,10
	Vertical	0,32	0,33	0,19	0,19	0,33	0,28
	Longitudinal	0,06	0,13	0,06	0,08	0,06	0,10

A resposta em aceleração da estrutura para o caminhar rápido de três pessoas na direção vertical é 9% maior que quando excitada por uma pessoa caminhando rápido. Na direção transversal e longitudinal os valores são 82% e 102% superiores.

Nos resultados obtidos em aceleração temporal da estrutura para a solicitação imposta por 3 pessoas houve uma mudança de comportamento como segue:

- a resposta em aceleração apresentou valores 21% maiores para os AC 03 e 04 no “caminhar normal” quando comparados com o “lento”;
- em relação ao “caminhar rápido” a solicitação foi 46% maior para os mesmos acelerômetros;

- no caminhar rápido os valores registrados nos acelerômetros AC 03 e AC 04, normalmente maiores, para a condição imposta foram 46,3% menores que a média dos resultados dos acelerômetros AC 01, AC 02, AC 03 e AC 04.

#### 6.2.1.4 Análise das respostas da estrutura em aceleração temporal

Segundo Bachmann [77], a frequência do passo do Caminhar Humano, que aplica a força para excitar a estrutura, se encontra entre 1,7 Hz e 2,3 Hz, valores que foram confirmados nas experiências realizadas, como aparece na tabela 6.16. Na mesma tabela encontra-se a frequência da aplicação da carga para pessoas correndo, que foi obtida a partir do tempo de percurso e a distância de passo definida por Wheeler [57].

Tabela 6.16 – Valores da frequência do passo segundo Bachmann e Ammann [77] e as obtidas de forma experimental

Atividade	Frequência do Passo Hz	Frequência do Passo Experimental Hz	Variação %
Caminhar Lento	1,7	1,69	0,6
Caminhar Normal	2,0	1,97	1,5
Caminhar Rápido	2,3	2,03	11,7
Correr	2,0 - 3,0	2,50	-

Como já foi comentado no item 1.3.1 o modelo de representação de uma caminhada é composto por duas parcelas: uma referente à carga estática correspondente ao peso do indivíduo e outra referente à combinação de harmônicos associados à excitação, obtidos através da equação 2.1.

Desta maneira e considerando as frequências experimentais, verifica-se que as forças de excitação coincidem em alguns casos com a frequência natural do sistema estrutural ou seus harmônicos, o que amplifica as amplitudes de vibração.

Como pode ser observado para o caminhar lento a frequência de passo experimental foi 1,69 Hz, isto é, na faixa da primeira frequência natural da passarela e ainda, o terceiro harmônico coincide com a terceira frequência de vibração à flexão, 5,08 Hz. Em função deste fato as amplitudes de aceleração com o caminhar

lento são superiores as do caminhar normal e rápido com freqüências de passo de 1,97 Hz e 2,03 Hz.

A observação dos resultados mostra que o caminhar lento de 1 pessoa provoca acelerações maiores que quando a estrutura é excitada por duas ou três pessoas, também com passo lento. Este fato pode estar associado ao efeito de amortecimento causado pela massa das próprias pessoas e pela falta de conexão com harmônicos mais altos que segundo Bachmann [26] aparece para grupos de pessoas andando juntas.

Para a passarela solicitada pelo correr de 1 ou 2 pessoas, foram observadas as maiores acelerações. Essa resposta está associada à freqüência obtida experimentalmente de 2,5 Hz para essa solicitação, com o segundo harmônico muito próximo da primeira freqüência vertical de vibração à flexão, 5,08 Hz.

Antes de analisar a resposta em aceleração transversal lembrar que a freqüência da força horizontal corresponde à metade da freqüência vertical [78] apud [26] então teremos:

Tabela 6.17 – Valores da freqüência do passo segundo Bachmann e Ammann,[77] e os valores experimentais obtidos para as direções vertical e transversal

Atividade	Freqüência do Passo Hz	Freqüência do Passo Experimental Hz	Freqüência do Passo Transversal Hz
Caminhar Lento	1,7	1,69	0,8
Caminhar Normal	2,0	1,97	0,98
Caminhar Rápido	2,3	2,03	1,02
Correr	2,0 - 3,0	2,50	1,25

Assim sendo, podemos interpretar que a resposta da passarela apresenta valores maiores para o caminhar rápido de 2 ou 3 pessoas já que os segundos harmônicos da freqüência do passo se aproximam da primeira freqüência natural transversal de 2,34 Hz. Da mesma forma para a solicitação de 1 ou 2 pessoas correndo os segundos harmônicos são próximos de 5.08 Hz provocando as maiores acelerações verticais.

Ressalta-se finalmente que a solicitação da passarela por 2 ou 3 pessoas caminhando lento ou correndo despertam acelerações da componente longitudinal por corresponder à freqüência e aos harmônicos da freqüência natural da passarela.

## 6.2.2 Resposta Dinâmica em Deslocamento

Das experiências realizadas, são apresentadas nas tabelas a seguir as respostas da estrutura para o deslocamento vertical, transversal e longitudinal em cada um dos pontos instrumentados.

As experiências permitem estudar a influência da velocidade do caminhar e da carga aplicada na resposta da estrutura em deslocamento.

São apresentados na tabela 6.18 os valores máximos, nas três direções para uma pessoa caminhando com velocidade de passo lento, normal, rápido e correndo.

Para avaliação da influência do carregamento na tabela 6.19 são apresentados os resultados obtidos para o caminhar normal de duas e três pessoas, os quais podem ser comparados com o de uma pessoa.

Os gráficos mostram os principais resultados aquisitados para todas as solicitações aplicadas.

### 6.2.2.1 Influência do caminhar na resposta em deslocamento

Na tabela 6.18 está reproduzida a resposta da estrutura em deslocamento para o caminhar de uma pessoa a diferentes velocidades de passo.

Nos resultados obtidos na direção vertical pode ser verificado que os deslocamentos aumentam de  $10^{-6}$  m no caminhar lento de 1 pessoa para  $10^{-3}$  m quando a estrutura é solicitada por 1 pessoa correndo.

Tabela 6.18 – Deslocamento em (m) na direção vertical da estrutura submetida à solicitação de 1 Pessoa para diferentes velocidades de passo.

Direção	Tipo de Solicitação	Deslocamento (m)					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Vertical	Lento	3,87E-6	4,27E-6	6,29E-6	6,36E-6	4,37E-6	4,40E-6
	Normal	1,33E-5	1,40E-5	1,80E-5	1,85E-5	–	1,85E-5
	Rápido	2,50E-5	2,41E-5	2,62E-5	2,61E-5	2,21E-5	2,75E-5
	Correndo	4,27E-3	6,02E-3	5,61E-3	5,56E-3	4,72E-3	4,78E-3

Nos gráficos pode ser verificado que os deslocamentos mais acentuados ocorrem quando a solicitação dinâmica está sendo aplicada no vão instrumentado.

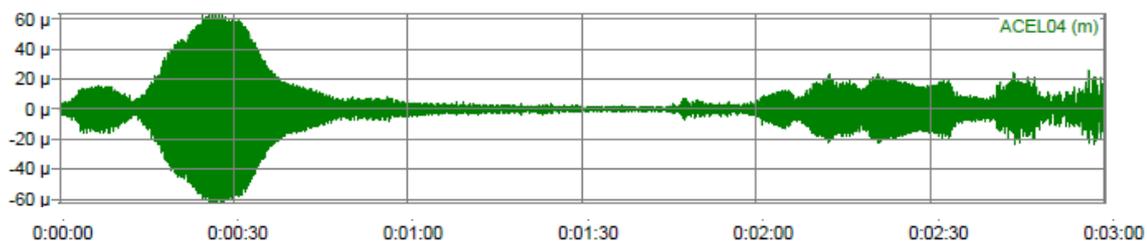


Figura 7.40 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Lento de 1 Pessoa.

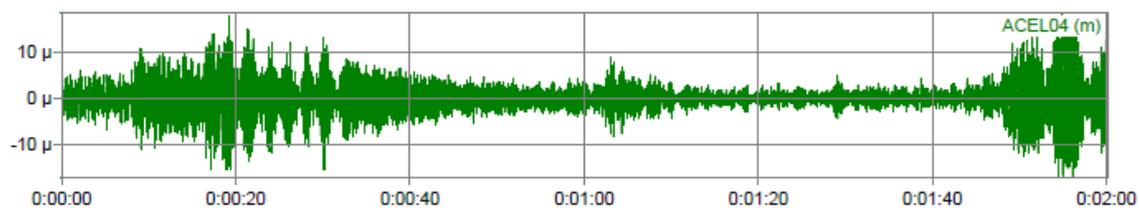


Figura 7.41 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.

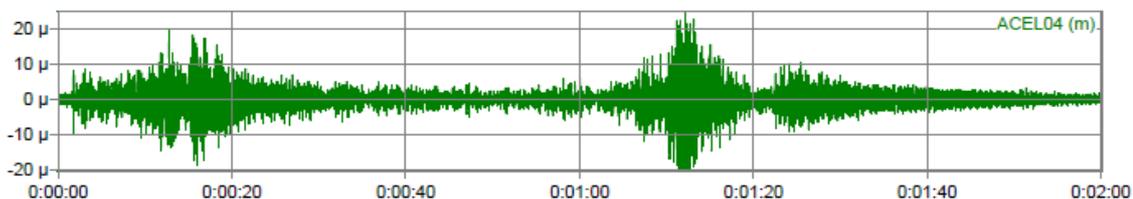


Figura 7.42 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Rápido de 1 Pessoa.

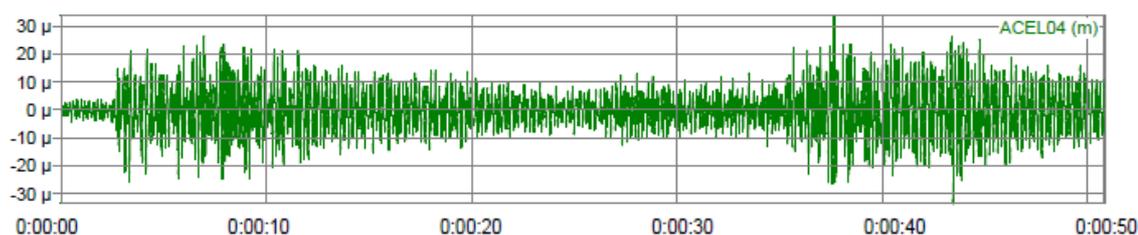


Figura 7.43 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para 1 Pessoa Correndo.

Nos resultados da tabela 6.19 pode ser verificado que as diferenças dos deslocamentos da estrutura na direção transversal, quando comparados para as diferentes velocidades de passo são imperceptíveis. Os valores estão em torno do valor característico de  $10^{-6}$  m.

Tabela 6.19 – Deslocamento em (m) na direção transversal da estrutura submetida à solicitação de 1 Pessoa para diferentes velocidades de passo.

Direção	Tipo de Solicitação	Deslocamento (m)					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Transversal	Lento		4,41E-6	3,97E-6	7,86E-6	3,89E-6	3,81E-6
	Normal	5,11E-6	5,33E-6	5,45E-6	6,33E-6	4,53E-6	4,31E-6
	Rápido	4,09E-6	4,43E-6	3,75E-6	3,70E-6	3,53E-6	3,95E-6
	Correndo	7,35E-6	8,11E-6	9,51E-6	1,24E-5	8,14E-6	7,60E-6

Nas figuras a seguir pode ser verificado que os deslocamentos na direção transversal não são influenciados de forma acentuada pela solicitação dinâmica aplicada.

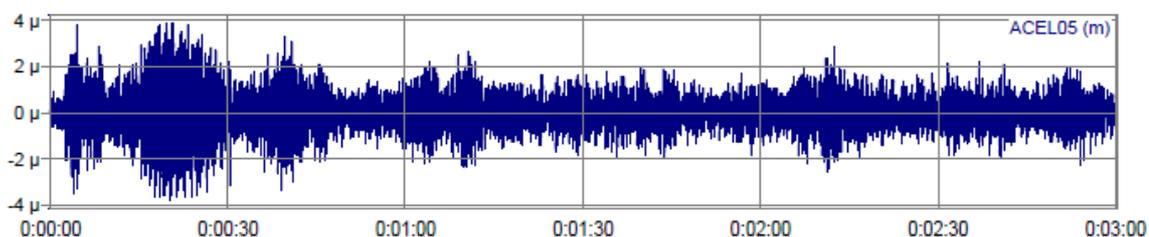


Figura 7.44 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para o para o Caminhar Lento de 1 Pessoa.

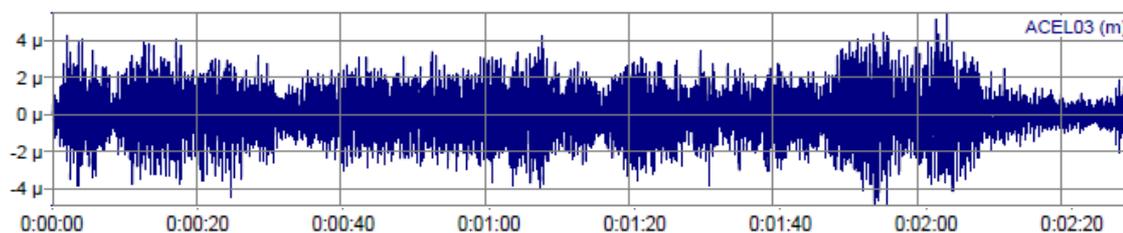


Figura 7.45 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.

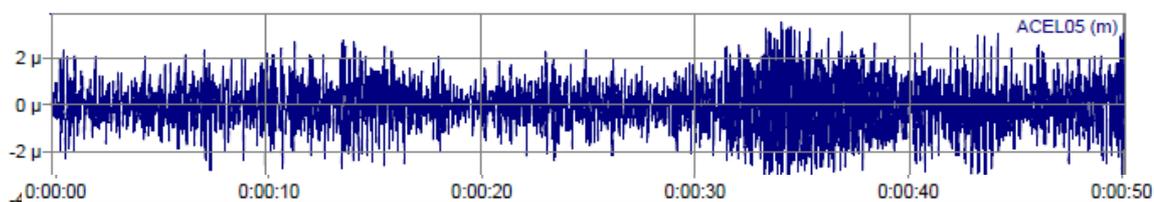


Figura 7.46 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para o Caminhar Rápido de 1 Pessoa.

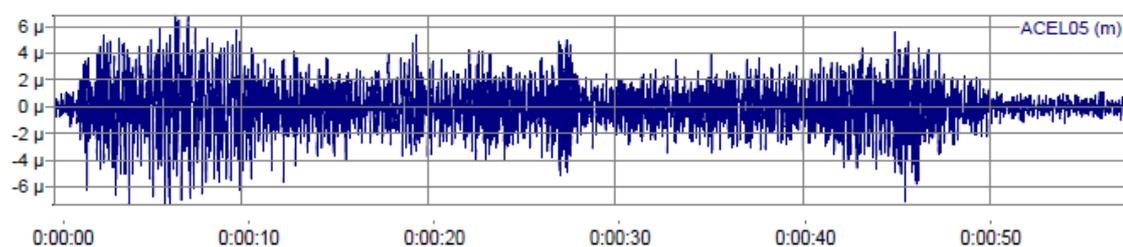


Figura 7.47 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Transversal para 1 Pessoa Correndo.

Para a direção longitudinal, os resultados também estão em torno de  $10^{-6}$  m exceto para a solicitação do caminhar rápido em que os valores alcançam  $10^{-3}$  m.

Tabela 6.20 – Deslocamento em (m) na direção longitudinal da estrutura submetida à solicitação de 1 Pessoa para diferentes velocidades de passo.

Direção	Tipo de Solicitação	Deslocamento (m)					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Longitudinal	Lento	2,36E-6	2,72E-6	2,66E-6	–	3,26E-6	2,08E-6
	Normal	1,18E-6	1,19E-6	1,67E-6	2,31E-6	1,59E-6	1,83E-6
	Rápido	5,40E-3	5,48E-3	4,36E-3	2,50E-3	1,45E-3	0,89E-3
	Correndo	2,18E-6	2,15E-6	2,14E-5	2,27E-6	3,49E-6	3,31E-6

As figuras a seguir correspondem aos gráficos que representam os sinais da resposta da passarela, adquiridos para o caminhar lento, normal, rápido e correndo de uma pessoa.

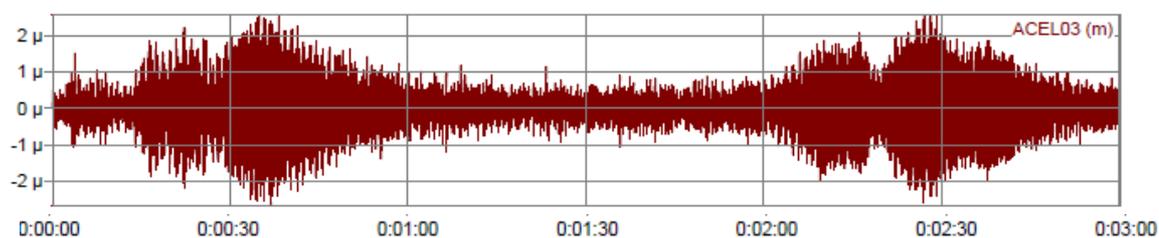


Figura 7.48 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Lento de 1 Pessoa.

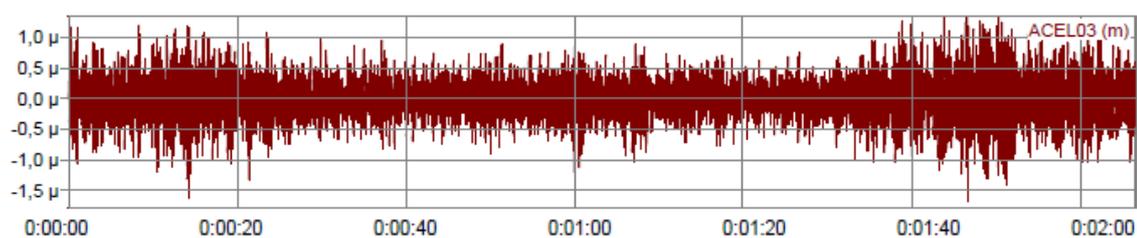


Figura 7.49 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Longitudinal para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.

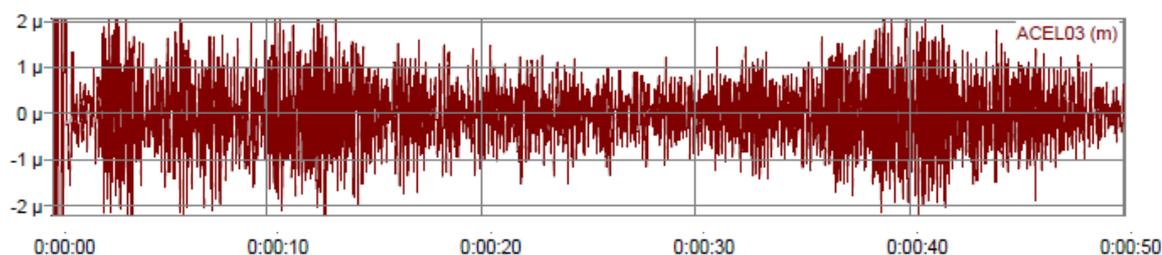


Figura 7.50 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Longitudinal para 1 Pessoa Correndo.

### 6.2.2.2 Influência da carga dinâmica na resposta em deslocamento

Os resultados obtidos nas experiências realizadas com a variação da carga dinâmica de uma a três pessoas caminhando com passo normal não mostraram alteração acentuada da resposta.

Para a direção transversal e longitudinal os valores estiveram em todos os casos em torno de  $10^{-6}$  m.

Para a direção vertical, que coincide com a da aplicação da carga, os valores registrados indicaram deslocamentos um pouco superior, em torno de  $10^{-5}$  m.

Tabela 6.21 – Valores em deslocamento em (m) nas três direções para estrutura submetida à solicitação de 1 a 3 Pessoas Caminhando com Passo Normal

Direção	Tipo de Solicitação	Deslocamento (m)					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
Vertical	01 Pessoa	1,33E-05	1,40E-05	1,80E-05	1,85E-05	-	1,58E-05
	02 Pessoas	1,41E-05	1,70E-05	2,31E-05	2,51E-05	1,76E-05	1,82E-05
	03 Pessoas	3,33E-05	3,50E-05	5,10E-05	4,93E-05	3,82E-05	3,54E-05
Transversal	01 Pessoa	5,11E-06	5,33E-06	5,45E-06	6,33E-06	5,36E-06	4,89E-06
	02 Pessoas	6,79E-06	7,58E-06	6,73E-06	6,98E-06	6,98E-06	6,19E-06
	03 Pessoas	7,80E-06	7,96E-06	6,74E-06	6,93E-06	7,43E-06	7,71E-06
Longitudinal	01 Pessoa	1,18E-06	1,19E-06	1,67E-06	2,31E-06	1,59E-06	1,83E-06
	02 Pessoas	-	1,59E-06	1,82E-06	1,52E-06	1,87E-06	1,80E-06
	03 Pessoas	2,10E-06	2,06E-06	2,62E-06	2,34E-06	-	-

São apresentados a seguir os gráficos dos resultados obtidos nas experiências realizadas com a variação da carga dinâmica de uma a três pessoas caminhando com passo normal na direção vertical.

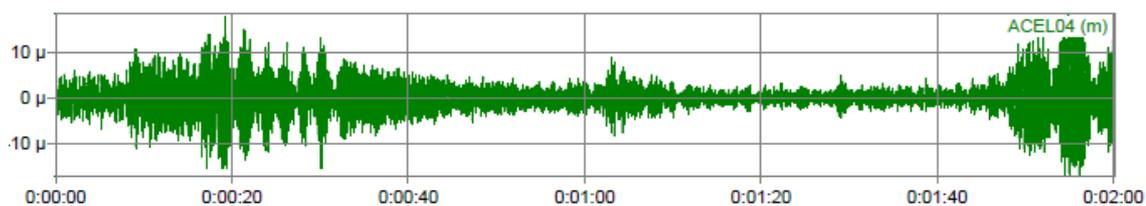


Figura 7.51 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 1 Pessoa.

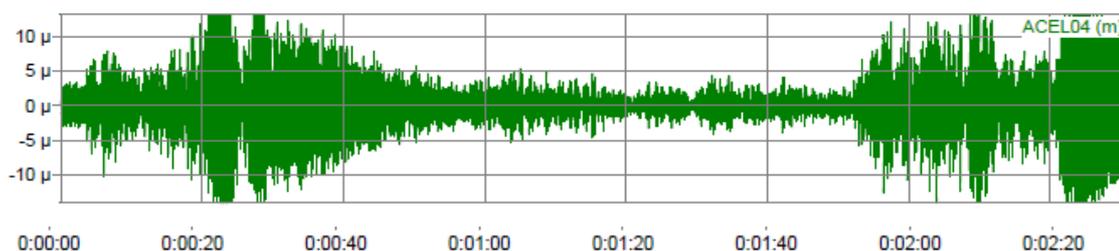


Figura 7.52 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 2 Pessoas.

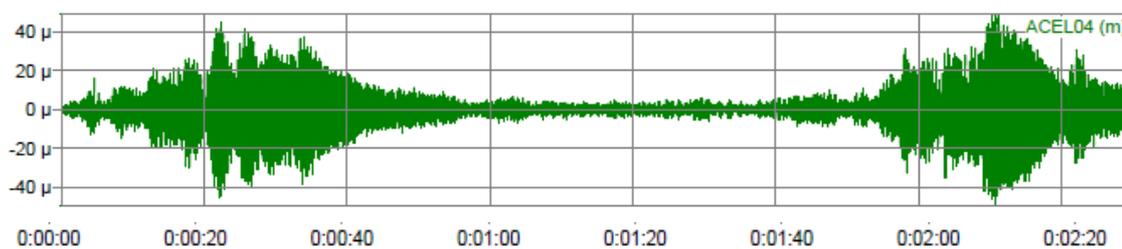


Figura 7.53 – Resposta em deslocamento x tempo para a direção Vertical para o Caminhar Normal de 3 Pessoas.

### 6.2.2.3 Análise da resposta da estrutura em deslocamento.

As experiências realizadas, cujos resultados estão apresentados com o deslocamento da estrutura da direção vertical, transversal e longitudinal permitiram estudar a influência da velocidade do caminhar e da carga aplicada na resposta da estrutura em deslocamento.

A avaliação da influencia no deslocamento da passarela quando houve variação da velocidade de passo de uma pessoa mostrou que para a direção vertical

estes variaram no intervalo de  $10^{-6}$  m para  $10^{-5}$  m entre o caminhar lento e o caminhar rápido e  $10^{-3}$  m quando a pessoa estava correndo.

Na direção longitudinal houve uma variação da mesma forma, isto é, de  $10^{-6}$  m para  $10^{-3}$  m do caminhar lento para o rápido. Não foi observado variação dos deslocamentos quando a solicitação foi o de uma pessoa correndo.

Na direção transversal, os valores se mantiveram no intervalo de  $10^{-6}$  m.

Para a solicitação com 1, 2 ou 3 pessoas caminhando a resposta da passarela em deslocamento não mostrou variação sensível. Na direção vertical os valores estiveram em torno de  $10^{-6}$  m. Os resultados indicam que a variação da massa de 1, 2 ou 3 pessoas é pouco significativa em relação à massa e à rigidez da estrutura não provocando deslocamentos.

### 6.2.3 Avaliação dos Resultados de Vibração Induzida.

Durante a caminhada em uma estrutura os pedestres introduzem forças dinâmicas que variam com o tempo. As forças têm componentes na direção vertical, transversal e longitudinal que provocam respostas em deslocamento e aceleração que dependem, por um lado, de parâmetros que caracterizam o caminhar tais como, a frequência de passo, velocidade de caminhada e comprimento de passo e por outro dos parâmetros modais da estrutura.

As análises dos resultados obtidos nos ensaios experimentais permitem avaliar a adequação da passarela a sua finalidade, através da comparação destes com os limites fixados pelos principais códigos e normas e ainda fazer a análise da estrutura para o Conforto Humano devido a vibrações excessivas.

#### 6.2.3.1 Avaliação da passarela segundo critérios de Códigos e Normas disponíveis.

Para análise da adequação da passarela é apresentado a seguir um resumo dos limites recomendados pelos Códigos e Normas que foram analisados ao longo do desenvolvimento do trabalho apresentado.

Tabela 6.22 – Resumo dos limites de frequência e aceleração estabelecidos pelos Códigos e Normas consultadas

	Frequência natural	Frequência natural	Aceleração	Aceleração
	$f_{0,vertical}$	$f_{0,transversal}$	$a_{vertical}$	$a_{transversal}$
BS – 5400 [54]	$\geq 5,0$ Hz	-	$\leq 0,707$ m/s <sup>2</sup>	-
EUROCODE EN 1990 [58][59][60]	$\geq 5,0$ Hz	$\geq 2,5$ Hz	$\leq 0,7$ m/s <sup>2</sup>	$\leq 0,2$ m/s <sup>2</sup> $\leq 0,4$ m/s <sup>2</sup> (*)
CEB [56]	$f_0 = 35xL^{-0,73}$	-	$\leq 0,5$ m/s <sup>2</sup> $\leq 0,7$ m/s <sup>2</sup> (**)	-
OHBDC [66]	-	-	$\leq 0,25x f^{0,78}$ m/s <sup>2</sup>	-
ISO/DIS 10137 [61]	-	-	$\leq 0,59$ m/s <sup>2</sup> $\leq 0,42$ m/s <sup>2</sup> (***)	-
NBR 6118 [14]	$f_0 > 1.2 f_{critica}$ (****)	-	-	-

(\*) Para caminhar rápido

(\*\*) Para caminhar normal a 2,0 Hz

(\*\*\*) Para  $f_0 = 4$  a 8 Hz

(\*\*\*\*) Para  $f_{critica} = 1,6$  a 4,5 Hz

Com os valores apresentados na tabela 6.23 é possível afirmar que a passarela atende aos critérios normativos em relação à frequência natural limite na direção vertical  $\geq 5,0$  Hz, já que o valor obtido na direção vertical foi de  $f_{0,vert} = 5,08$  Hz.

Para a direção transversal a passarela não atende já que a primeira frequência registrada  $f_{0,transv} = 2,34$  Hz é inferior ao limite de 2,5 Hz estabelecido pelo Eurocode 1990 [58][59][60]. As demais normas consultadas não mencionam valores.

É importante ressaltar que a análise espectral da estrutura foi realizada com os sinais nas três direções e a primeira frequência da estrutura, 1,56 Hz, foi registrada direção longitudinal, para a qual não foram encontradas referências em relação a limites máximos nos em nenhum dos Códigos e Normas consultados.

Tabela 6.23 – Freqüências naturais obtidas experimentalmente e por método numérico.

Freqüências Naturais da Passarela (Hz)						
MODELO \ MODOS	f <sub>01</sub>	f <sub>02</sub>	f <sub>03</sub>	f <sub>04</sub>	f <sub>05</sub>	f <sub>06</sub>
Numérico	1,61	2,24	2,47	3,35	4,46	5,68
Experimental	1,56	-	2,34	-	-	5,08
Erro (%)	3,2	-	5,5	-	-	11,8

Para a resposta da estrutura em aceleração, várias condições de solicitação podem ser comparadas com os valores estabelecidos pelos Códigos e Normas. Na tabela 6.24 são apresentados os valores obtidos para a reposta da passarela em aceleração quando solicitada por 2 pessoas correndo.

Tabela 6.24 - Aceleração em (m/s<sup>2</sup>) na direção vertical para 2 Pessoas Correndo

2 Pessoas Correndo	Direção Vertical	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
		1,00	2,21	0,88	1,27	0,80	0,90

Na direção vertical todos os valores são superiores ao limite de 0,7 m/s<sup>2</sup> recomendados pela BS 5400 [15] e o Eurocode [58][59][60].

Também são superiores aos do CEB [56] e da Norma ISO [61], que adotam limites mais conservadores de 0,5 m/s<sup>2</sup> e 0,59 m/s<sup>2</sup>.

Para o OHBDC [38] o limite está dado pela expressão  $a_{\text{vert}} \leq 0,25x f^{0,78} \text{ m/s}^2$ , que é função da primeira freqüência vertical, valor também é superado pela resposta em aceleração da passarela.

Para a direção transversal a situação também não é melhor, já que os valores de aceleração obtidos na direção transversal para 2 Pessoas Correndo apresentados na tabela 6.25, também superam largamente os limites recomendados de 0,2 m/s<sup>2</sup> recomendados pelos Eurocodes [58][59][60], e inclusive em alguns casos considerando o limite de 0,4 m/s<sup>2</sup> estabelecido para uso pesado.

Tabela 6.25 - Aceleração em (m/s<sup>2</sup>) na direção transversal para 2 Pessoas Correndo

2 Pessoas Correndo	Direção Transversal	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
		1,22	0,63	0,39	0,32	0,34	0,25

Convém ressaltar que para as demais solicitações impostas, caminhar de 1 a 3 pessoas ou de uma pessoa correndo, todos os valores de aceleração na direção vertical e transversal atendem aos limites prescritos pelos Códigos e Normas consultados como segue:

- As maiores acelerações de pico na direção vertical correspondem a 0,39 m/s<sup>2</sup> para 1 pessoa caminhando lento e também 0,39 m/s<sup>2</sup> para 1 pessoa correndo.

- Para a direção transversal os valores de aceleração de pico foram inferiores a 0,2 m/s<sup>2</sup> exceto para a excitação “Caminhar Rápido - 3 Pessoas” quando um dos acelerômetros indicou 0,23 m/s<sup>2</sup>.

- Na direção longitudinal as maiores acelerações foram para o “Caminhar Lento” de 1, 2, ou 3 Pessoas.

#### 6.2.3.2 Avaliação das condições de conforto humano pelo AISC [64].

O Steel Design Guide do American Institute of Steel Construction – AISC – “Floor Vibrations Due to Human Activity”, que define princípios básicos para avaliação de passarelas quanto a vibrações devido a atividades humanas, utiliza os valores a aceleração limite considerados pela ISO 2631-2/1989 [61] em rms das acelerações como um múltiplo da linha base da curva apresenta na figura 3.8.

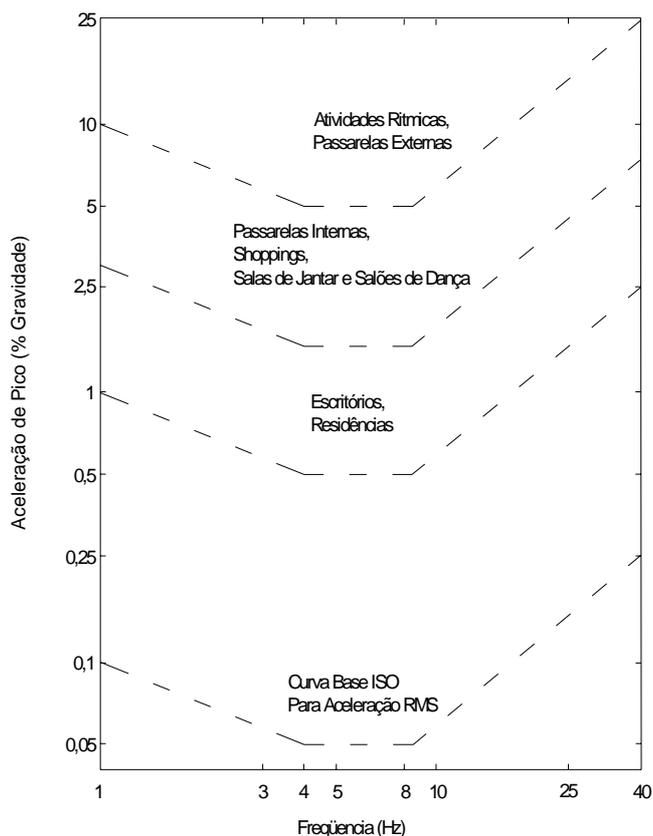


Figura 3.8 - Aceleração de pico recomendada para conforto humano em vibrações devidas a atividades humanas [67]

Considerando esse critério para a passarela em análise, situada ao ar livre, com frequência fundamental na direção vertical de 5,08 Hz tem-se como aceleração limite:

$$5 \% \text{ da aceleração de gravidade } a_{\text{vert}} = 0,49 \text{ m/s}^2.$$

Limite superado pelos valores de aceleração da Tabela 6.23 para 2 Pessoas Correndo, indicando que a passarela não atende para o Conforto Humano.

### 6.2.3.3 Análise da Passarela em Relação à Sensibilidade Humana às Vibrações

A avaliação das condições de conforto foi realizada utilizando-se a Escala Modificada Reither-Meister [25] que leva em consideração a frequência e os deslocamentos. Os máximos deslocamentos na direção vertical observados nas experiências ocorreram quando a passarela foi solicitada por uma pessoa correndo. Os valores estiveram entre 4,27 a 6,02 mm como aparece na Tabela 6.26.

Tabela 6.26 - Deslocamento em (m) na direção Vertical para 1 Pessoa Correndo

1 Pessoa Correndo	Direção Vertical	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )					
		AC 01	AC 02	AC 03	AC 04	AC 05	AC 06
		4,27E-3	6,02E-3	5,61E-3	5,56E-3	4,72E-3	4,87E-3

Se levarmos em consideração a 1ª freqüência na direção vertical de 5,06 Hz e os deslocamentos obtidos para a solicitação por uma pessoa correndo, temos que a passarela situa-se na faixa de “fortemente perceptível e perturbador”. Isso mostra que não apresenta condições de conforto em relação à Sensibilidade Humana às vibrações, neste caso, para pedestres.

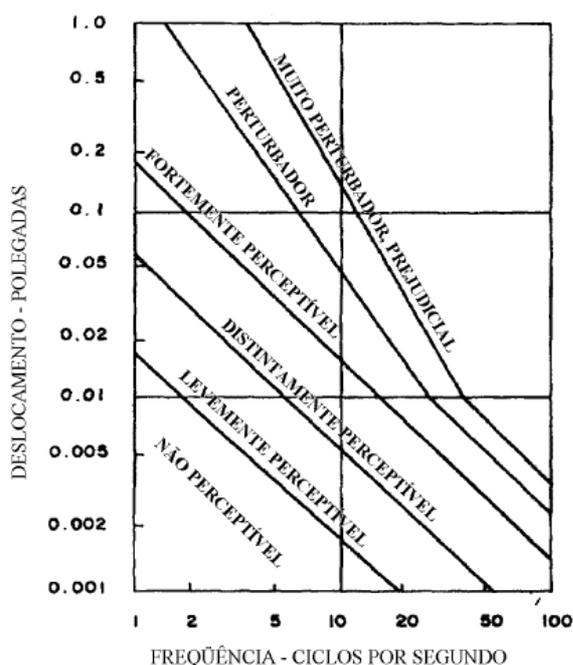


Figura 1.4 – Escala de Reither - Meister de sensibilidade humana às vibrações modificada [25]

Embora não existam parâmetros que permitam avaliar deslocamentos longitudinais ressalta-se que a passarela apresentou deslocamentos nessa direção de até 5,4 mm quando foi solicitada por uma pessoa caminhando rápido (Tabela 6.20).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 Generalidades

Esta dissertação teve como objetivo analisar o comportamento dinâmico de passarelas de pedestres, através de estudos teóricos e experimentais a fim de dar mais um passo para compreender a resposta da estrutura quando solicitada pela complexa força aplicada pelo caminhar humano.

Os estudos iniciaram pelo conhecimento da estrutura o que permitiu a elaboração de modelo da passarela pelo método dos elementos finitos. Esta providencia permitiu conhecer com antecedência o comportamento esperado para a estrutura, passo fundamental para a análise experimental tendo em vista a limitação de sensores que estavam disponíveis. De forma paralela foi realizada uma ampla revisão bibliográfica que ajudou a entender a complexidade do caminhar humanos e a interação com a estrutura que foi fundamental para o entendimento anterior da passarela estudada e no planejamento da etapa experimental.

A etapa experimental, foco principal desta dissertação, foi planejada visando o sucesso na primeira vez tendo em vista que a coleta de dados imprecisos, dificilmente poderia ser corrigida em novas experiências, em função da infraestrutura envolvida. Consciente disso tanto os equipamentos que seriam utilizados como a metodologia que deveria ser empregada foi amplamente analisada. Não podemos deixar de mencionar também a preocupação com as condições locais nas quais não seria possível ter um controle completo. Podemos considerar que foi um sucesso haja vista a linearidade dos resultados obtidos, tendo sido identificado apenas um resultado anômalo do universo de valores coletados. Pode-se dizer avaliar também a confiabilidades dos dados obtidos pela aderência entre as frequências experimentais e as do modelo de elementos finitos que esteve disponível.

O trabalho desenvolvido, fundamentalmente experimental, teve uma etapa inicial ligada á construção do modelo numérico para o que seria fundamental a coleta de informações em relação à geometria da estrutura, características dos materiais e identificação das condições de contorno. Esta etapa mostrou ser relevante tendo em vista os desvios identificados da estrutura existente em relação

ao projeto. Somente com dados reais poderia ser construído um modelo representativo do comportamento dinâmico da Passarela que estava sendo analisada.

Cabe lembrar que nesta etapa inicial foi possível também conhecer as peculiaridades do comportamento da passarela as quais seriam confirmadas tanto no modelo como posteriormente nos resultados dos ensaios.

O desenvolvimento da etapa de análise experimental foco central desta dissertação foi dividida em duas fases distintas que por condições operacionais, como já foi explicado foi realizado concomitantemente: Excitação da estrutura em vibração livre, para coleta de dados para a análise modal e vibração induzida, sob várias condições de carregamento, para avaliação do Conforto Humano.

A etapa final do trabalho, processamento e análise dos valores obtidos permitiram obter os parâmetros modais e dados de aceleração e deslocamentos que permitiram realizar a análise da estrutura em relação à critérios internacionais para avaliação do conforto.

## 7.2 Conclusões

Na seqüência do texto, são apresentadas conclusões parciais obtidas com os estudos realizados nessa dissertação. De modo a consolidá-las, essas conclusões são apresentadas em forma de tópicos, em que cada item representa um aspecto ou parâmetro utilizado para análise do comportamento dinâmico da estrutura.

### a) A importância da Revisão Bibliográfica realizada.

Esta etapa que representou a primeira parte do trabalho foi fundamental para conhecer o assunto e conseguir definir com absoluta segurança qual iria ser o caminho que deveria se percorrido para atender o objetivo fixado. A numerosa quantidade de publicações revisadas de livros a teses passando por publicações técnicas permitiram adquirir a cultura e o conhecimento necessário para compreender o que estava sendo realizado e desta forma entender e interpretar os resultados;

b) Critérios de Normas de Projeto.

A revisão dos critérios de Normas de Projeto contribuiu para um esclarecimento abrangente dos limites recomendados para a resposta das passarelas submetidas ao caminhar o correr de pessoas sobre as mesmas. Foi verificado que a maioria das normas refere-se a estruturas simplesmente apoiadas e os limites fixados são para a componente na direção vertical e que são poucas as que contemplam critérios para a direção transversal apesar do grande número de citações em trabalhos técnicos. Para a direção longitudinal, como é o caso do comportamento da passarela estudada, não foi encontrado nenhuma referencia a limites que permitisse fazer uma análise dos valores aquisitados. Foi observado também que há discordância entre as diversas diretrizes acerca do cálculo e limites para acelerações em passarelas;

c) A importância do conhecimento da estrutura.

O conhecimento da estrutura passou por vários períodos de observação da passarela a diversas horas do dia de observação da passarela, que visaram conhecer com anterioridade à análise do modelo a resposta da estrutura as diversas solicitações impostas pelos usuários que diariamente transitam. Esta etapa mostrou a necessidade da aquisição de sinais também na direção longitudinal e transversal, já que inicialmente estava previsto somente na direção vertical. Permitiu compreender a primeira frequência, na direção longitudinal, do modelo numérico. O conhecimento da estrutura da passarela com a coleta de informações em relação à geometria da estrutura, características dos materiais e identificação das condições de contorno foi fundamental para a construção do modelo numérico e principalmente para o projeto da instrumentação;

d) Análise Experimental.

A análise experimental corroborou ser bastante efetiva para a caracterização do comportamento dinâmico de estruturas através da obtenção de parâmetros modais e as respostas em deslocamento e aceleração.

A determinação das frequências naturais e modos de vibração foram realizados utilizando-se processos computacionais através da análise espectral de

potência dos sinais de aceleração da estrutura produzidos durante os ensaios nas três direções permitindo determinar as características dinâmicas da estrutura.

O método de decremento logarítmico se mostrou efetivo para a estimativa do amortecimento modal  $\xi$  a partir dos sinais de aceleração filtrados na frequência do modo de vibração escolhido como recomendado por Varela [45].

As respostas da passarela em deslocamento e aceleração para os carregamentos de pessoas caminhando ou correndo permitiu avaliar a adequação da estrutura para o conforto humano. Foi identificado o fenômeno de ressonância para um ou mais modos de vibração que é a causa da maioria dos problemas de vibrações excessivas.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais da passarela corroboraram as observações preliminares realizadas em relação à resposta da estrutura e os modos de vibrar que permitiram planejar a instrumentação. Isto mostra a importância do conhecimento da estrutura e do comportamento *"in situ"*.

Os resultados dos ensaios mostraram o efeito de amortecimento provocado na aceleração quando mais de uma pessoa excita a passarela na frequência ressonante. Este efeito acontece quando a frequência de excitação está afastada da ressonante.

### 7.3 Sugestões

A seguir relacionam-se algumas sugestões para a continuidade e desenvolvimento de trabalhos futuros sobre os temas aqui tratados e outros correlatos:

- a) Continuar os estudos experimentais da passarela analisada desta vez para monitorar a ponta do balanço, e as tensões para solicitações extremas;
- b) Aproveitar os resultados experimentais para continuar o refinamento e validação do modelo numérico com as respostas dinâmicas em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações;

- c) Desenvolver as funções matemáticas para interpretar as respostas experimentais da passarela;
- d) Após a validação do modelo, desenvolver estudos da interação solo-estrutura e estudar soluções dinâmicas incorporando à estrutura, atenuadores dinâmicos sincronizados (ADS);
- e) Investigar o comportamento dinâmico da passarela quando submetida a multidões, situação que acontece com diariamente durante a utilização normal;
- f) Desenvolver dissertações experimentais aproveitando a experiência obtida com este trabalho;
- g) Desenvolver pesquisa em relação ao comportamento das passarelas da Cidade do Rio de Janeiro em relação ao Conforto Humano.

## REFERÊNCIAS

1. MEHTA. P.K. and MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais – 3ª Ed., Ibracon – SP, 2008
2. BARKER C. Footbridge Pedestrian Vibration Limits Part 3: Background to Response Calculation, Footbridge 2005 – Second International Conference, 2005.
3. ŽIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. - Vibration Serviceability of Footbridges Under Human-Induced Excitation: a Literature Review. Journal of Sound and Vibration, Vol. 279, N° 1- 2 2005 b.
4. BAYRAKTAR A., ALTUNISIK A. C., SEVIM B., TÜRKER T. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge. J Nondestructive Eval 2010 29: 14 – 24.
5. DALLARD P., FITZPATRICK., FLINT A., BOURVA LE S., LOW A. SMITH R.M.R. AND WILLFORD M. The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer – Volume 79/N° 22 – 2001.
6. DALLARD P., FITZPATRICK., FLINT A., BOURVA LE S., LOW A. SMITH R.M.R. AND WILLFORD M. London Millennium Bridge: Pedestrian-Induced Lateral Vibration Journal of Bridge Engineering. Novembro/Dezembro 2001
7. NEWLAND D.E. Pedestrian Excitation of Bridges – Recent Results. Tenth International Congress on Sound and Vibration – Stockholm ,2003.
8. NEWLAND D. E. Vibration of de London Millennium Footbridge: Part 1- Cause and Cure. In: International Journal of Accoustics ans Vibrations, 8-14 p. 9-14, 2003.
9. NAKAMURA S., KAWASAKI T., KATSUURA H., YOKOYAMA K. Experimental studies on lateral forces induced by pedestrians. Journal of Constructional Steel Research 64, 2008.

10. NAKAMURA, S., Model for Lateral Excitation of Footbridges by Synchronous Walking. ASCE - Journal of Structural Engineering, 2004.
11. NAKAMURA, S., Lateral Vibration on a Pedestrian Cable-Stayed Bridge. IABSE. Journal of Structural Engineering International, vol 12 nº 4, 2002.
12. GOLEBIOSWSKI, B. O Projeto e a Construção da Estação e da Passarela Cidade Nova do Metrô de Rio de Janeiro – III Congresso de Pontes e Estruturas, ABPE, Rio de Janeiro Abril, 2010.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 6120/1980 Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações. Rio de Janeiro, 1980.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 6118 Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2007.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 8800/2007 Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. Rio de Janeiro, 2007.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 7188/1984 Carga Móvel em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres. Rio de Janeiro, 1984.
17. FAISCA, R.G. Caracterização de cargas Geradas por Atividades Humanas. 2003, 309p, Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
18. SACHSE, R., PAVIC. A. and REYNOLDS P. Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A literature Review. Dept. of Civil and Structural Engineering University of Sheffield UK.
19. ALLEN, D. E., RAINER, J. H., PERNICA, "Vibration Criteria for Long-Span Floors", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 3, Nº 2, pp. 165 – 171, June, 1976.
20. ALLEN, D. E., RAINER, J. H., PERNICA, G. Vibration Criteria for Assembly Occupancies. In: Canadian Journal of Civil Engineering, v. 12, nº. 3, p. 617-623, 1985.

21. JI, T., ELLIS, B.R., Floor Vibration Induced by danced – Type Loads: Theory and Verification. *The Structural Engineer*, v. 72, nº 3/1 Fevereiro 1994.
22. TUAN, C.Y. and SAUL, W.E. Loads Due to Spectators Moviments, ASCE, *Journal of Structural Engineering*, vol 111 nº 2, 1985.
23. BACHMANN, H., AMMANN, W. Vibrations in Structures induced by Man and Machines. *Structural Engineering Document N° 3e*, International Association for Bridges and Structural Engineering, IABSE, Zurich, Switzerland, 1987.
24. MURRAY, T.M., ALLEN, D.E., Design Criterion for Vibrations Due to Walking, *Engineering Journal/ American Institute of Steel Construction*, Fourth Quarter, 1993.
25. REITHER, H.E, MEISTER, F.J. The Effect of Vibration on People. Traduzido da *Forsch Geb. Ing, Wes: 2(11) 381- 6* pela U.S. Air Material Command, Tradução F-TS-616-RE, Wright Field, Ohio, AMC, 1946.
26. BACHMANN, H., Lively Footbridges a Real Challenge. *Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behavior of Footbridges*, Paris, France, November 20-22, 2002, pages 18-30.
27. FUJINO, Y., PACHEO, B.M., NAKAMURA, S.I. AND WARNITCHAI, P. 1993 Synchronization of Human Walking Observed During Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge. *Engineering and Structural Dynamics* 22 (9): 741-58
28. ERIKSSON, P.E. Dynamic Service Actions for Floor Systems. In: *Proceedings of Structures Congress XIV – Building an International Community of Structural Engineering*, ASCE, v. 1, p. 413-419, Chicago, USA, April, 1996.
29. ŽIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. – Dynamic Analysis of Lively Footbridges under Everyday Pedestrian Traffic. *EURODYN 2005. The Six European Conferences of Structural Dynamics*, Paris, France, Setembro 2005a.

30. BLANCO M.C., BOUILLARD PH., BODARWÉ E., NEY L. Structural Dynamic Design of a Footbridge under Pedestrian Loading. 9<sup>o</sup> SAMTECH Users Conference 2005.
31. EBRAHIMPOUR, A., SACK, R. L. Modeling Dynamic Occupant Loads. In: Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 117, n<sup>o</sup>. 11, p. 1476-1495, 1989.
32. PEDERSEN L., FRIER C. Sensitivity of Footbridge Vibrations to Stochastic Walking Parameters. Journal of Sound and Vibration 329 (2010) 2683-2701
33. HIVOSS (Human induced Vibrations of Steel Structures): Vibrações em Pontes Pedonais - Recomendações Técnicas RFS2-CT-2007-00033 Research Fund of Coal & Steel. Setembro 2008.
34. MURRAY, T.M., ALLEN, D. E., UNGAR, E. E. Floor Vibrations Due to Human Activity. Steel Design Guides Series N<sup>o</sup> 11, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2003.
35. OHLSSON, S.V., Springiness and Human Induced Floor Vibrations. A Design Guide, D12: 1988, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden 1988
36. LENZEN, K.M. Vibrations of Steel Joist-Concrete Slabs Floors. Engineering Journal of American Institute of Steel Construction, Vol. 3, n<sup>o</sup> 3, pg. 133-136, 1966
37. RAINER J.H., PERNICA G. ALLEN D.E. Dynamic Behaviour of Gymnasium Floor. National Research Council Canada, 1986.
38. PIMENTEL R.H. VIBRATION, Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-Induced Loads, PhD Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK, 1997
39. R.L. PIMENTEL, A. PAVIC, and P. WALDRON. Evaluation of Design Requirements for Footbridges excited by vertical forces from walking. Can. J. Civ.Eng. Vol. 28, 2001.

40. BROWNJOHN J.M.W. AND PAVIC A. Experimental Methods for Estimating Modal Mass in Footbridges Using Human-induced Dynamic Excitation. *Engineering Structures* 29(2007) 2833-2843.
41. BROWNJOHN J.M.W. and MIDDLETON C. Efficient Dynamic Performance Assessment of a Footbridge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering* 158 (2005) 185-192.
42. TEIXEIRA, A.J., *Passarelas Estaiadas de Materiais Novos e Convencionais sob Ação de Cargas Dinâmicas Humanas*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
43. OBATA T. AND MIYAMORI Y. Identifications of a Human Walking Force Model Based on Dynamic Monitoring Data from Pedestrian Bridges. *Computers and Structures* 84, 2006.
44. FIGUEIREDO, F.P. *Estudo do Comportamento Dinâmico de Passarelas Devido ao Caminhar de Pedestres*. Rio de Janeiro, 2005. 122p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
45. VARELA, W. D., *Modelo Teórico-Experimental para Análise de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando Sobre Lajes de Edifícios*. 2004, 309 p., Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
46. LIMA, N.L.A., Silva, J.G.S da., Soeiro, F.J.C.P., Neto L.B. e Lima, L.R.O. de. *Avaliação do Conforto Humano de Passarelas Mistas com o uso de Algoritmos Genéticos*. *Engevista*, v, 10, n.1, p. 59-70, 2008
47. KERR, S.C. *Human Induced Loading on Staircases* , Thesis PhD 1993. University College London, London, England.
48. KERR, S.C., BISHOP, N. W. M. – *Engineering Structures* 23 p. 37 – 45 2001
49. WYATT, T.A., *Design Guide on the Vibration of Floors*, SCI Publication 076, The Steel Construction Institute and Construction Industry Research and Information Association, London, 1989.

50. OHLSSON, S. V. Floor Vibrations and Human Discomfort. PhD Thesis - Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1982.
51. MURRAY, T.M., ALLEN, D.E., Design to Prevent Vibrations. Engineering Journal/ American Institute of Steel Construction, 2003.
52. RAINER J.H., PERNICA G., ALLEN D.E. Dynamic Loading and Response of Footbridges. National Research Council Canada, 1988.
53. CAETANO E., CUNHA A. Modelação Numérica e Validação Experimental do Comportamento Dinâmico de uma Ponte Pedonal. – 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica- 2004.
54. BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 5400: Steel, Concrete and Composite Bridges Specifications for Loads Part 2. Appendix C., London, England, 1978
55. AQDANALYSIS 7, Programa de Análise de Sinais, Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda, Manual do Usuário, 2005
56. CEB, 1991 – Bulletin D 'Information nº209. Vibrations Problems in Structures. Practical Guidelines. Committee Euro-International du Beton, August 1991.
57. WHEELER, J.E., Prediction and Control of Pedestrian Induced Vibration in Footbridges. ASCE, Journal of the Structural Division. v.108, nºST9, 1982
58. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EUROCODE EN 1990 – Basis of structural Design
59. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EUROCODE EN 1991 – Actions on Structures
60. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EUROCODE EN 1995 – Designs of Timber Structures

61. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO/DIS 10137 Bases for Design of Structures - Serviceability of Buildings against Vibrations. International Standard Organization, Geneva, Switzerland, (2005)
62. CANADIAN STANDARD CAN3-S16, 1-M89: Steel Structures for Buildings - Limit States Design. Appendix G: Guide for Floor Vibrations. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1989.
63. DIN 4150 – 2:1999-06 – Human Expository to Vibration in Buildings
64. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – AISC - STEEL DESIGN GUIDE 11 - Floor Vibrations Due to Human Activity
65. 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 de Mestrado, EESC-USP, São Carlos – SP, 2010
66. OHBDC, ONTARIO HIGHWAY BRIDGE Design Code (1991) and Commentary, Ministry of Transportation and Communication, Highway Engineering Division, Toronto, 1983.
67. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 2631/2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuo's and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). Switzerland, 1989.
68. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, S16-01 Limit States Design of Steel Structures, CSA Standard, December, 2001.
69. MAIA, N.M.N., SILVA, J.M.M., Theoretical and Experimental Modal Analysis. NY, John Wiley, 2007
70. EWINS, D.J. Modal Testing: Theory, practice and application. 2. ed. RSP, 2000.

71. NOBREGA, P.G.B. Análise Dinâmica de Estruturas de Concreto: Estudo Experimental e Numérico das Condições das Condições de Contorno de Estruturas Pré-moldadas. Tese de Doutorado, EESC-USP, São Carlos – SP, 2004
72. McCONNELL, K.G., Varoto P.S. Vibration Testing: Theory and Practice. NY, John Wiley 2008
73. A GHALI, A.M.NEVILLE. Structural Analysis: a Unified and matrix approach, New York: E8FN SPON, 1972
74. VAROTO, P. S., Análise Modal no Domínio da Frequência: Um Método de Identificação de Multi-modos. 1999 193 p, Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Carlos – SP.
75. ROEHL, J. L. P., Dinâmica das Estruturas – Vol. 1 Análise no Tempo. Departamento de Engenharia Civil PUC-Rio
76. ANSYS, Swanson Analysis Systems. Inc. P.O. Box 65. Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2005.
77. BACHMANN, H., AMMANN, W. Vibrations Problems in Structures: Practical Guidelines – Boston Berlin, 1995
78. HAUKSSON, F. Dynamic Behavior of Footbridges Subjected to Pedestrian-Induced Vibrations. 2005 Master's Dissertation – Lund University - Sweden
79. DE SILVA, C.W. Vibration: fundamentals and practices. U.S.A. 1999
80. SEGUNDINHO, P.G.A.de, Estudos das Vibrações Induzidas por Pedestres em Passarelas de Madeira. Tese de Doutorado, EESC-USP, São Carlos – SP, 2010
81. ŽIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P - Probability - Based Prediction of Multi-mode Vibration Response to Walking Excitation. Engineering Structures 29 (2007) 942- 954

82. ŽIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. - Modal Testing and FE Model Tuning of a Lively Footbridge Structure. Department of Civil and Structural Engineering University of Sheffield. *Engineering Structures* 28 (2006) 857-868
83. BRUNO L., VENUTI F. CROWD. Structure Interaction in Footbridges: Modeling, Application to a Real Case-study and Sensitivity Analyses. *J Nondestructive Eval* (2010) 29: 14–24.
84. EBRAHIMPOUR, A., SACK, R. L. Modeling Dynamic Occupant Loads. In: *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 117, nº. 11, p. 1476-1495, 1989.
85. GOMES, D.H.M., Controle da Resposta Dinâmica de uma Passarela de Pedestres de Brasília com Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados – Universidade de Brasília – 2006
86. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 2631/1: Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, Switzerland, 1974.
87. J.M.W. BROWNJOHN, A.A DUMANOGLU, C. A. TAYLOR. Dynamic Investigation of a Suspension Footbridge. *Engineering Structures*, 1999, Volume 16, Number 6.
88. LENZING, H. Durch Menschen Induzierte Schwingungen. Thesis Universität Hannover, Hannover, Germany.
89. LIMA, N.J.A. Efeito da Modelagem do Carregamento, do Impacto do Calcanhar Humano e do Amortecimento Estrutural na Resposta Dinâmica de Passarelas Mistas 2007 161p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
90. MACDONALD, J.H.G. Lateral Excitation of Bridges by Balancing Pedestrians. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering* 161.

91. MACKENZIE D., BARKER C., MCFADDEN N. AND ALLISON B. Footbridge Pedestrian Vibration Limits Part 2: Human Sensitivity. Footbridge 2005 – Second International Conference.
92. MENARD, K.P. Dynamic Mechanical Analysis. Library of Congress Card. USA 1999
93. PICCARDO G., TUBINO F. Simplified Procedures for Vibration Serviceability Analysis of Footbridges Subjected to Realistic Walking Loads. Computers and Structures 87, 2009.
94. SEILER C., OCCHIUZZI A., SPIZZUOCO M, SERINO G. Dynamical Stress Analysis Due to Moving Loads on footbridges.
95. STUDNICKOVÁ M. The Effect of Pedestrian Traffic on the Dynamic Behavior of Footbridges. Acta Polytechnica Vol. 44 N° 2/2004.