

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia

Lucas de Souza Suzano Moreira

Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) submetidas a carregamentos induzidos por pedestres

> Rio de Janeiro 2023

Lucas de Souza Suzano Moreira

Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) submetidas a carregamentos induzidos por pedestres

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

Orientador: Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc.

Rio de Janeiro 2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M838 Moreira, Lucas de Souza Suzano. Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) submetidas a carregamentos induzidos por pedestres / Lucas de Souza Suzano Moreira. – 2023. 186 f.
Orientadora: José Guilherme Santos da Silva. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
1. Engenharia civil - Teses. 2. Construção mista - Teses. 3. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 4. Conforto humano - Teses. 5. Vibração - Medição - Teses. 1. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade do Estado do Rio de Incensional do Rio de Incensional do Rio de Janeiro, Teses. 1. Silva, José Guilherme Santos da. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
III. Título.

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

Assinatura

Data

Lucas de Souza Suzano Moreira

Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) submetidas a carregamentos induzidos por pedestres

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 Banca Examinadora:

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

Prof. Rodrigo Bird Burgos Faculdade de Engenharia - UERJ

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

Paulo Anderson Santana Rocha Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

> Rio de Janeiro 2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que se interessem pelo tema, desejando que possam encontrar um norte em todas as palavras escritas nestas páginas.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado condições de chegar até o final dessa carreira.

Aos meus familiares pelo suporte durante todo esse árduo processo, principalmente minha amada esposa, cujo apoio foi fundamental para alcançar esse objetivo.

Ao meu orientador Prof. José Guilherme, pelo conhecimento dispensado para realização desse trabalho.

Aos professores pelo conhecimento ofertado para que esse resultado pudesse ser alcançado.

À UERJ, instituição de ensino de extrema relevância no país, responsável por me permitir atingir o objetivo de obter a titulação de mestre em Engenharia Civil.

À CAPES pelo suporte financeiro que fundamental para que eu me mantivesse em condições de realizar o trabalho.

Agradecimentos a todos.

RESUMO

MOREIRA, Lucas de Souza Suzano. *Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) submetidas a carregamentos induzidos por pedestres*. 2023. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Considerando-se os recentes avancos tecnológicos e científicos, os projetos de passarelas têm sido concebidos cada vez mais leves e esbeltos, provocando uma redução dos valores das freguências naturais dessas estruturas, ocasionando aumento dos riscos de ressonância com referência aos carregamentos induzidos pelos pedestres. Assim sendo, o objetivo deste trabalho de pesquisa é o de investigar o comportamento estrutural dinâmico de passarelas mistas (aço-concreto), quando submetidas às ações dinâmicas produzidas por pedestres, tendo em mente as metodologias de análise existentes na literatura técnica. Ao longo do texto apresentados os modelos matemáticos tradicionais utilizados para a são caracterização da ação humana, os métodos expeditos para análise dinâmica de passarelas, além dos critérios de conforto humano estabelecidos pelas normas de projeto vigentes. Além disso, neste trabalho de pesquisa a resposta estrutural dinâmica das passarelas, também é investigada com base no emprego de modelos biodinâmicos, representativos dos pedestres, de maneira a levar em consideração as propriedades dinâmicas dos indivíduos e o efeito da interação dinâmica pedestreestrutura. As metodologias de análise são aplicadas sobre três projetos estruturais de passarelas mistas (aço-concreto) com vãos de 27,2m, 32m e 36m, respectivamente, todas situadas na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. A modelagem numérica das estruturas foi desenvolvida com base no emprego do programa de elementos finitos ANSYS. Com base nos resultados alcançados, foi observado que as normas e recomendações de projeto ainda não refletem os avanços das pesquisas acerca do tema e apresentam critérios de conforto humano conservadores. De outra forma, metodologias de análise mais recentes, tais como os guias de projeto SÉTRA e HIVOSS, tem se mostrado mais próximas do comportamento real das passarelas. Por outro lado, cabe ressaltar que os modelos matemáticos tradicionais de carregamento dinâmico, e mesmo os guias de projeto SÉTRA e HIVOSS produzem respostas dinâmicas (acelerações de pico) superiores quando comparadas àquelas determinadas a partir do emprego de modelos biodinâmicos para simular as ações dinâmicas induzidas pelos pedestres. Desta maneira, fica claro que a utilização dos modelos biodinâmicos é relevante para a avaliação final do conforto humano de passarelas de pedestres, de maneira mais realista, e que ainda existe uma demanda significativa no que concerne ao desenvolvimento de pesquisas sobre este tema.

Palavras-chave: Passarelas de pedestres; Análise estrutural dinâmica; Avaliação do conforto humano; Modelos biodinâmicos; Modelagem em elementos finitos.

ABSTRACT

MOREIRA, Lucas de Souza Suzano. *Vibration analysis and human comfort assessment of composite footbridge (steel-concrete) subjected to pedestrian-induced loading*. 2023. 186 f. Dissertation (Master's in Civil Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Considering recent technological and scientific advances, footbridge projects have been designed increasingly lighter and slender, causing a reduction in the values of the natural frequencies of these structures, causing an increase in the risk of resonance with reference to loads induced by pedestrians. Therefore, the objective of this research work is to investigate the dynamic structural behavior of composite footbridge (steel-concrete), when subjected to dynamic actions produced by pedestrians, keeping in mind the analysis methodologies existing in the technical literature. Throughout the text, traditional mathematical models used to characterize human action, expedient methods for dynamic analysis of footbridge are presented, in addition to the human comfort criteria established by current design standards. Furthermore, in this research work the dynamic structural response of footbridge is also investigated based on the use of biodynamic models, representative of pedestrians, in order to take into account the dynamic properties of individuals and the effect of the dynamic pedestrian-structure interaction. The analysis methodologies are applied to three structural projects of mixed footbridge (steel-concrete) with lenght of 27.2m, 32m and 36m, respectively, all located in the city of Rio de Janeiro/RJ, Brazil. The numerical modeling of the structures was developed based on the use of the ANSYS finite element program. Based on the results achieved, it was observed that the design standards and recommendations do not yet reflect advances in research on the topic and present conservative human comfort criteria. Otherwise, more recent analysis methodologies, such as the SÉTRA and HIVOSS design guides, have proven to be closer to the real behavior of footbridge. On the other hand, it is worth highlighting that traditional mathematical models of dynamic loading, and even the SÉTRA and HIVOSS design guides, produce superior dynamic responses (peak accelerations) when compared to those determined from the use of biodynamic models to simulate the induced dynamic actions. by pedestrians. In this way, it is clear that the use of biodynamic models is relevant for the final assessment of human comfort on pedestrian footbridge, in a more realistic way, and that there is still a significant demand regarding the development of research on this topic.

Keywords: Pedestrian footbridge; Dynamic structural analysis; Assessment of human comfort; Biodynamic models; Finite element modeling.

LISTA DE FIGURAS

|

Figura 1 - Millennium Bridge (Inglaterra)	23
Figura 2 - Passarela da Praça da Bandeira/RJ	27
Figura 3 - Passarela no bairro Maracanã/RJ	27
Figura 4 - "Passarela do INTO" no bairro Caju/RJ	29
Figura 5 - Passarela da Faculdade de Engenharia (UERJ)	32
Figura 6 - Passarela E.P.I.A/Brasília	34
Figura 7 - Passarela sobre o rio Moraca em Podgorica, Montenegro	35
Figura 8 - Ponte de Broughton/UK	42
Figura 9 - Millenium Bridge, Londres, Inglaterra	53
Figura 10 - Aceleração de pico em diferentes frequências da estrutura	56
Figura 11 - Fator redutor da reposta dinâmica (ψ) no 1º harmônico	60
Figura 12 - Fator redutor da reposta dinâmica (ψ) no 2º harmônico	60
Figura 13 - Ciclo do passo e carga F(t) aplicada nos pontos	63
Figura 14 - Força dinâmica tempo e frequência: ME-I (f _p =2,40 Hz) AISC [5]	65
Figura 15 - Força dinâmica tempo e frequência: ME-II (fp =2 Hz) AISC [5]	65
Figura 16 - Força dinâmica tempo e frequência: ME-III (fp =2,15 Hz) AISC [5]	66
Figura 17 - Espectro de resposta: ME-I (fp =2,40 Hz) Bachmann [1]	67
Figura 18 - Espectro de resposta: ME-II (fp =2 Hz) Bachmann [1]	67
Figura 19 - Espectro de resposta: ME-III (fp =2,15 Hz) Bachmann [1]	67
Figura 20 - Espectro de resposta: ME-I (fp =2,40 Hz) Kerr [6]	69
Figura 21 - Espectro de resposta: ME-II (fp =2 Hz) Kerr [6]	69
Figura 22 - Espectro de resposta: ME-III (fp =2,15 Hz) Kerr [6]	69
Figura 23 - Sistema massa-mola-amortecedor na estrutura (Debona [3])	70
Figura 24 - Vista frontal da passarela [11]	72
Figura 25 - Vista superior da passarela [11]	72
Figura 26 - Vista inferior da passarela [11]	72
Figura 27 - Corte transversal da passarela [11]	72
Figura 28 - Vista frontal da passarela [11]	73
Figura 29 - Vista superior da passarela [11]	74
Figura 30 - Vista inferior da passarela [11]	74
Figura 31 - Corte transversal da passarela [11]	74

Figura 32 - Planta baixa da passarela [11]	75
Figura 33 - Corte longitudinal da passarela [11]	75
Figura 34 - Corte transversal da passarela [11]	76
Figura 35 - Elemento BEAM44	77
Figura 36 - Elemento SHELL63	78
Figura 37 - Representação do uso dos elementos BEAM44 e SHELL63	78
Figura 38 - Vista isométrica do ME-I	79
Figura 39 - Vista superior do ME-I	79
Figura 40 - Vista frontal do ME-I	79
Figura 41 - Vista inferior do ME-I	80
Figura 42 - Vista isométrica do ME-II	80
Figura 43 - Vista superior do ME-II	80
Figura 44 - Vista frontal do ME-II	80
Figura 45 - Vista inferior do ME-II	81
Figura 46 - Vista isométrica do ME-III	81
Figura 47 - Vista superior do ME-III	81
Figura 48 - Vista frontal do ME-III	81
Figura 49 - Vista inferior do ME-III	82
Figura 50 - Elemento COMBIN40 (ANSYS [7])	82
Figura 51 - 1º modo de vibração: ME-I (f₀1 = 4,83 Hz: flexão vertical)	84
Figura 52 - 2º modo de vibração: ME-I (f ₀₂ = 6,13 Hz: torção horizontal)	85
Figura 53 - 3º modo de vibração: ME-I (f ₀₃ = 8,33 Hz: torção horizontal)	86
Figura 54 - 4º modo de vibração: ME-I (f ₀₄ = 12,29 Hz: flexão vertical)	87
Figura 55 - 1º modo de vibração: ME-II (f₀1 = 4,04 Hz: torção vertical)	89
Figura 56 - 2º modo de vibração: ME-II (f₀₂ = 5,52 Hz: flexão horizontal)	90
Figura 57 - 3º modo de vibração: ME-II (f ₀₃ = 7,50 Hz: torção)	91
Figura 58 - 4º modo de vibração: ME-II (f₀₄ = 10,95 Hz: flexão vertical)	92
Figura 59 - 1º modo de vibração: ME-III (f₀1 = 4,29 Hz: flexão vertical)	94
Figura 60 - 2º modo de vibração: ME-III (f ₀₂ = 5,32 Hz: rotação horizontal)	95
Figura 61 - 3º modo de vibração: ME-III (f ₀₃ = 10,23 Hz: rotação horizontal)	96
Figura 62 - 4º modo de vibração: ME-III (f ₀₄ = 14,03 Hz: flexão vertical)	97
Figura 63 - Variação da frequência fundamental: ME-I	98
Figura 64 - Variação da frequência fundamental: ME-II	98
Figura 65 - Variação da frequência fundamental: ME-III	99

Figura 66 - Trajetórias retilíneas analisadas para ME-I, ME-II e ME-III	103
Figura 67 - Trajetórias aleatórias analisadas para ME-I	104
Figura 68 - Trajetórias aleatórias analisadas para ME-II	104
Figura 69 - Trajetórias aleatórias analisadas para ME-III	105
Figura 70 - Seção investigada: ME-I	106
Figura 71 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo) AISC [5]	106
Figura 72 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência) AISC [5]	106
Figura 73 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo) Bachmann [1]	107
Figura 74 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência) Bachmann [1]	107
Figura 75 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo) Kerr [6]	107
Figura 76 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência) Kerr [6]	107
Figura 77 - Seção investigada em ME-II	109
Figura 78 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) AISC [5]	109
Figura 79 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência) AISC [5]	109
Figura 80 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) Bachmann [1]	110
Figura 81 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência) Bachmann [1]	110
Figura 82 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) Kerr [6]	110
Figura 83 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência) Kerr [6]	110
Figura 84 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) AISC [5]	110
Figura 85 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência) AISC [5]	111
Figura 86 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) Bachmann [1]	111
Figura 87 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência) Bachmann [1]	111
Figura 88 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) Kerr [6]	111
Figura 89 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência) Kerr [6]	112
Figura 90 - Seção investigada em ME-III	113
Figura 91 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo) AISC [5]	114
Figura 92 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) AISC [5]	114
Figura 93 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo) Bachmann [1]	114
Figura 94 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) Bachmann [1]	114
Figura 95 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo) Kerr [6]	115
Figura 96 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) Kerr [6]	115
Figura 97 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo) AISC [5]	115
Figura 98 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) AISC [5]	115
Figura 99 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo) Bachmann [1]	116

Figura 100 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) Bachmann [1]116 Figura 101 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo) Kerr [6]116 Figura 102 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) Kerr [6]116 Figura 103 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo)......121 Figura 104 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência)......121 Figura 105 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo)......121 Figura 107 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo)......123 Figura 109 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo)......123 Figura 111 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo)......124 Figura 112 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência)......124 Figura 113 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo)......125 Figura 115 - ME-I: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo......126 Figura 116 - ME-I: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência.......127 Figura 117 - ME-I: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo......127 Figura 118 - ME-I: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência......127 Figura 119 - ME-II: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo......127 Figura 120 - ME-II: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência......128 Figura 121 - ME-II: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo......128 Figura 122 - ME-II: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência......128 Figura 123 - ME-III: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo......129 Figura 124 - ME-III: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência......129 Figura 125 - ME-III: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo......129 Figura 126 - ME-III: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência.....130 Figura 127 - Força dura x Biodinâmico: ME-I (Kerr [6])......132 Figura 128 - Força dura x Biodinâmico: ME-II (Kerr [6])......132 Figura 129 - Força dura x Biodinâmico: ME-III (Kerr [6])......133 Figura 130 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-I: tempo) AISC [5]......148 Figura 132 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-I: tempo) Bachmann [1] 148 Figura 133 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-I: frequência) Bachmann [1].149 Figura 135 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-I: frequência) Kerr [6]......149 Figura 136 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: tempo) AISC [5]......150 Figura 138 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: tempo) Bachmann [1] 150 Figura 139 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: frequência) Bachmann [1].151 Figura 140 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: tempo) Kerr [6]151 Figura 141 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: frequência) Kerr [6]......151 Figura 142 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: tempo) AISC [5]152 Figura 143 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: frequência) AISC [5]152 Figura 144 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: tempo) Bachmann [1] 152 Figura 145 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: frequência) Bachmann [1].152 Figura 146 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: tempo) Kerr [6]......153 Figura 147 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: frequência) Kerr [6]153 Figura 148 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: tempo) AISC [5]......153 Figura 149 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: frequência) AISC [5]......154 Figura 150 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: tempo) Bachmann [1]......154 Figura 151 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: frequência) Bachmann [1].154 Figura 153 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: frequência) Kerr [6]155 Figura 154 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: tempo) AISC [5]156 Figura 156 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: tempo) Bachmann [1] 156 Figura 157 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: frequência) Bachmann [1]. 156 Figura 158 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: tempo) Kerr [6]......157 Figura 159 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: frequência) Kerr [6]......157 Figura 160 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: tempo) AISC [5]157 Figura 161 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: frequência) AISC [5]157 Figura 162 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: tempo) Bachmann [1] 158 Figura 163 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: frequência) Bachmann [1]. 158 Figura 164 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: tempo) Kerr [6]......158 Figura 165 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: frequência) Kerr [6]......159 Figura 166 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-II: tempo) AISC [5]......159

Figura 167 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-II: frequência) AISC [5]160 Figura 168 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-II: tempo) Bachmann [1] 160 Figura 169 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-II: frequência) Bachmann [1] 160 Figura 170 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-II: tempo) Kerr [6]160 Figura 171 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-II: frequência) Kerr [6]......161 Figura 172 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: tempo) AISC [5]......161 Figura 173 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: frequência) AISC [5]161 Figura 174 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: tempo) Bachmann [1]161 Figura 175 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: frequência) Bachmann [1] 162 Figura 176 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: tempo) Kerr [6]162 Figura 177 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: frequência) Kerr [6]......162 Figura 178 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: tempo) AISC [5]......162 Figura 179 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: frequência) AISC [5]......163 Figura 180 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: tempo) Bachmann [1]......163 Figura 181 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: frequência) Bachmann [1] 163 Figura 182 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: tempo) Kerr [6]164 Figura 183 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: frequência) Kerr [6]164 Figura 184 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: tempo) AISC [5]164 Figura 185 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: frequência) AISC [5]164 Figura 186 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: tempo) Bachmann [1] 165 Figura 187 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: frequência) Bachmann [1]. 165 Figura 188 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: tempo) Kerr [6]......165 Figura 189 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: frequência) Kerr [6]......165 Figura 190 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: tempo) AISC [5]166 Figura 191 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: frequência) AISC [5]166 Figura 192 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: tempo) Bachmann [1] 166 Figura 193 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: frequência) Bachmann [1]. 166 Figura 194 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: tempo) Kerr [6]......167 Figura 195 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: frequência) Kerr [6]......167 Figura 196 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-IIII: tempo) AISC [5]......168 Figura 197 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-III: frequência) AISC [5] 168 Figura 198 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-III: tempo) Bachmann [1] 168 Figura 199 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-III: frequência) Bachmann [1]168 Figura 200 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-III: tempo) Kerr [6]169

Figura 201 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-III: frequência) Kerr [6]......169 Figura 202 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: tempo) AISC [5]......169 Figura 203 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: frequência) AISC [5] 169 Figura 204 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: tempo) Bachmann [1] 170 Figura 205 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: frequência) Bachmann [1]170 Figura 206 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: tempo) Kerr [6]170 Figura 207 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: frequência) Kerr [6]......170 Figura 208 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: tempo) AISC [5]......171 Figura 209 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: frequência) AISC [5]......171 Figura 210 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: tempo) Bachmann [1].....171 Figura 211 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: frequência) Bachmann [1]171 Figura 212 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: tempo) Kerr [6]172 Figura 213 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: frequência) Kerr [6]172 Figura 214 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: tempo) AISC [5]172 Figura 215 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: frequência) AISC [5] 172 Figura 216 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: tempo) Bachmann [1] 173 Figura 217 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: frequência) Bachmann [1]173 Figura 218 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: tempo) Kerr [6]......173 Figura 219 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: frequência) Kerr [6]......173 Figura 220 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: tempo) AISC [5]174 Figura 221 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: frequência) AISC [5] 174 Figura 222 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: tempo) Bachmann [1] 174 Figura 223 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: frequência) Bachmann [1]174 Figura 224 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: tempo) Kerr [6]......175 Figura 225 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: frequência) Kerr [6]......175 Figura 228 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-I: tempo)......176 Figura 230 - Trajetória aleatória com 1 pedestre no centro do vão (ME-I: tempo)..177 Figura 231 - Trajetória aleatória com 1 pedestre no centro do vão (ME-I: frequência) Figura 232 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-I: tempo)......178 Figura 233 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-I: frequência) 178

Figura 234 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-I: tempo)	.178
Figura 235 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-I: frequência)	.179
Figura 236 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-I: tempo)	.179
Figura 237 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-I: frequência)	.179
Figura 238 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-II: tempo)	.180
Figura 239 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-II: frequência)	.180
Figura 240 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-II: tempo)	.180
Figura 241 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-II: frequência)	.181
Figura 242 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-II: tempo)	.181
Figura 243 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-II: frequência)	.181
Figura 244 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-II: tempo)	.182
Figura 245 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-II: frequência)	.182
Figura 246 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-II: tempo)	.182
Figura 247 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-II: frequência)	.183
Figura 248 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-III: tempo)	.183
Figura 249 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-III: frequência)	.183
Figura 250 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-III: tempo)	.184
Figura 251 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-III: frequência)	.184
Figura 252 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-III: tempo)	.184
Figura 253 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-III: frequência).	.185
Figura 254 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-III: tempo)	.185
Figura 255 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-III: frequência)	.185
Figura 256 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-III: tempo)	.186
Figura 257 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-III: frequência)	.186

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de cálculo: Método AISC [5]	55
Tabela 2 - Parâmetros do caminhar humano: Método AISC [5]	56
Tabela 3 - Faixas de aceleração para conforto humano: vibrações verticais	57
Tabela 4 - Faixas de aceleração para conforto humano: vibrações verticais	59
Tabela 5 - Faixas de aceleração para conforto humano: vibrações horizontais	59
Tabela 6 - Risco de ressonância em cada faixa de aceleração	59
Tabela 7 - Casos de carregamentos: verificação da resposta dinâmica	59
Tabela 8 - Cálculo da força dinâmica: classes II e III	60
Tabela 9 - Cálculo da força dinâmica: classe I	60
Tabela 10 - Classe de tráfego: Método HIVOSS	61
Tabela 11 - Classe e nível de conforto de acordo com a aceleração	61
Tabela 12 - Amortecimento recomendado pela metodologia HIVOSS [10]	62
Tabela 13 - Harmônicos: modelo AISC [5]	64
Tabela 14 - Característica do caminhar humano	65
Tabela 15 - Harmônicos: modelo Bachmann [1]	67
Tabela 16 - Harmônicos: modelo Kerr [6]	68
Tabela 17 - Dimensões estrutura mista aço-concreto	71
Tabela 18 - Parâmetros da estrutura metálica	71
Tabela 19 - Parâmetros da estrutura de concreto	71
Tabela 20 - Dimensões estrutura mista aço-concreto	73
Tabela 21 - Parâmetros da estrutura metálica	73
Tabela 22 - Parâmetros da estrutura de concreto	73
Tabela 23 - Dimensões estrutura mista aço-concreto	75
Tabela 24 - Parâmetros da estrutura metálica	75
Tabela 25 - Parâmetros da estrutura de concreto	75
Tabela 26 - Características do ME-I	79
Tabela 27 - Características do ME-II	80
Tabela 28 - Características do ME-III	81
Tabela 29 - Frequências naturais e modos de vibração: ME-I	88
Tabela 30 - Modos de vibração e Frequências naturais do ME-II	92
Tabela 31 - Modos de vibração e Frequências naturais do ME-III	93

Tabela 32 - Variação da massa modal (kg) com o acréscimo de pedestres9	9
Tabela 33 - Variação da rigidez modal (N/m) com o acréscimo de pedestres10	0
Tabela 34 - Variação do amortecimento modal (Ns/m) com o acréscimo de pedestre	s
	0
Tabela 35 - Recomendações dos guias nacionais e internacionais de projeto10	0
Tabela 36 - Variação das frequências: força dura x biodinâmico10	0
Tabela 37 - Características do caminhar humano102	2
Tabela 38 - Características do caminhar humano das passarelas investigadas 10	3
Tabela 41 - Análise quantitativa dos resultados: força dura104	8
Tabela 40 - Análise quantitativa dos resultados: força dura11	3
Tabela 41 - Análise quantitativa dos resultados: força dura11	7
Tabela 42 - Deslocamento (mm): força dura11	8
Tabela 43 - Aceleração (m/s²): força dura11	8
Tabela 44 - Aceleração (m/s²) Kerr: força dura e biodinâmico11	9
Tabela 45 - Características do modelo biodinâmico: ME-I	0
Tabela 46 - Características do modelo biodinâmico: ME-II	0
Tabela 47 - Características do modelo biodinâmico: ME-III	0
Tabela 48 - Aceleração (m/s²) em ME-I: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 1%) 13	0
Tabela 49 - Aceleração (m/s²) em ME-II: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 1%)13	0
Tabela 50 - Aceleração (m/s²) em ME-III: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 1%)	
	0
Tabela 51 - Aceleração (m/s²) em ME-I: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 0,6%)	
	1
Tabela 52 - Aceleracão (m/s²) em ME-II: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 0,6%)	
	1
Tabela 53 - Aceleração (m/s ²) em ME-III [.] SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico ($\xi = 0.6\%$)	-
13	1
Tabela 54 - Análise quantitativa dos resultados MF-I [·] SÉTRA [9] e HIVOSS [10] 15	9
Tabela 55 - Análise quantitativa dos resultados ME-II: SÉTRA [9] e HIVOSS [10] 16	7
Tabela 56 - Valores de ME-III para SÉTRA [9] e HIVOSS [10] com base na	
referência de Mendes [11]	7
Tabela 57 - Análise quantitativa resultados ME-III: SÉTRA [9] e HIVOSS [10]17	5

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
CS	Coluna soldada
CVS	Coluna viga soldada
EUA	Estados Unidos da América
FAD	Fator de amplificação dinâmica
HIVOSS	Human Induced Vibration of Steel Structures
ISO	International Organization for Standardization
ME	Modelo Estrutural
NBR	Norma Brasileira
S1GL	Sistema com um grau de liberdade
SÉTRA	Service d'Etudes Techniques dês Routes et Autoroutes
SNGL	Sistema com "N" graus de liberdade
ТА	Trajetória Aleatória
TR	Trajetória Retilínea
VS	Viga soldada

LISTA DE SÍMBOLOS

l

a _p	-	Aceleração de pico da estrutura (m/s²)
a _p /g	-	Taxa de aceleração de pico
αί	-	Coeficiente dinâmico
α	-	Ângulo de fase
β	-	Parâmetro de frequência
[C]	-	Matriz de amortecimento
Cp	-	Amortecimento do pedestre (N.s/m)
Ci	-	Amortecimento modal
$\Delta \tau$	-	Variação de tempo incremental
ξ	-	Taxa de amortecimento estrutural
ξi	-	Taxa de amortecimento modal
f 01	-	Frequência fundamental da estrutura (Hz)
fp	-	Frequência de passo do pedestre (Hz)
g	-	Aceleração da gravidade (m/s²)
фі	-	Ângulo de fase i harmônico (rad);
i	-	Número do harmônico
[K]	-	Matriz de rigidez
kp	-	Rigidez do pedestre (N/m)
kg	-	Kilograma (Unidade de massa do sistema internacional de
		medidas)
Lp	-	Comprimento de passo do pedestre (m)
[M]	-	Matriz de massa
m _p	-	Massa do pedestre (kg)
n	-	Número total de harmônicos considerados
Ν	-	Newton (Unidade de peso do sistema internacional de medidas)
Р	-	Peso de um indivíduo (N)
Ψ	-	Fator redutor da resposta dinâmica
S	-	Segundos (unidade de tempo do sistema internacional de medidas)
σγ	-	Tensão limite de escoamento do aço

- t Tempo (s)
- u Deslocamento vertical máximo (m)
- ve Deslocamento vertical estático (m)
- v_p Velocidade de passo do pedestre (m/s)
- ω Frequência angular da estrutura (rad/s)
- ω_i Frequência angular relacionada ao modo i (rad/s)
- ω_0 Primeira frequência angular da estrutura (rad/s)
- W Peso efetivo da estrutura

SUMÁRIO

l

INTF	RODUÇÃO	22
Motiv	vação	24
Obje	etivos	24
Esco	opo do trabalho	25
1.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.	NORMAS E GUIAS DE PROJETOS PARA ANÁLISE	54
2.1.	Introdução	54
2.2.	Norma brasileira NBR 6118/2014	54
2.3.	Guia de projeto do AISC/2003	54
2.4.	Norma ISO 2631-2	56
2.5.	Guia de projeto SÉTRA	58
2.6.	Guia de projeto HIVOSS	61
3.	MODELOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO	63
3.1.	Introdução	63
3.2.	Modelo de AISC	64
3.3.	Modelo de Bachmann e Ammann	66
3.4.	Modelo de Kerr	68
3.5.	Modelos Biodinâmicos (interação dinâmica pedestre-estrutura)	69
4.	MODELOS ESTRUTURAIS DAS PASSARELAS	71
4.1.	Introdução	71
4.2.	Modelo Estrutural I (ME-I)	71
4.3.	Modelo Estrutural II (ME-II)	73
4.4.	Modelo Estrutural III (ME-III)	74
5.	MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS	77
5.1.	Introdução	77
5.2.	Elementos finitos utilizados de acordo com o programa ANSYS	77
5.3.	Modelos em elementos finitos das passarelas investigadas	78
5.4.	Modelagem da interação pedestre-estrutura no programa ANSYS	82
6.	ANÁLISE MODAL	83
6.1.	Introdução	83
6.2.	Passarelas sem a consideração dos modelos biodinâmicos	83

6.3.	Efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura97
6.4.	Relação das características da passarela com o número de pedestres99
7.	ANÁLISES DE VIBRAÇÃO FORÇADA102
7.1.	Introdução102
7.2.	Tipos de caminhada102
7.3.	Situações de carregamento analisadas103
7.4.	Modelos matemáticos de força dura [AISC, Bachmann e Kerr]: resultados . 105
7.5.	Comparação entre os resultados: modelo de força dura e sistema
	biodinâmico119
7.6.	Comparação de resultados: sistemas biodinâmicos x guias SETRA e
	HIVOSS
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS134
8.1.	Introdução134
8.2.	Conclusões134
8.3.	Sugestões para trabalhos futuros138
REF	ERÊNCIAS139
ANE	XO A – DESLOCAMENTO E ACELERAÇÃO DE ME-I, ME-II E ME-III: 2 E 3
PED	ESTRES EM TRAJETÓRIAS RETILÍNEAS E ALEATÓRIAS148

INTRODUÇÃO

Os constantes avanços tecnológicos na área da construção civil têm transformado as estruturas em obras de arte cada vez mais esbeltas e arrojadas. Tal concepção se torna visível quando se trata de passarelas de pedestres, estruturas com grande comprimento, e largura reduzida, criadas para permitir ao ser humano sobrepor áreas em que o tráfego é dificultado ou impossibilitado, sem que seja necessário se arriscar atravessando rodovias movimentadas, principalmente em grandes cidades.

Entende-se a passarela como uma estrutura de massa e rigidez reduzidas, pouco amortecimento e alta flexibilidade, submetida a carregamentos dinâmicos, induzidos por pedestres, que geram vibrações, assim, é de extrema importância a investigação da interação pedestre-estrutura devido a ser esta uma estrutura que precisa vencer grandes vãos, garantindo conforto durante o caminhar de poucos ou muitos pedestres. Vibrações excessivas, além do desconforto humano, podem causar problemas estruturais como fissuras no revestimento e fadiga estrutural, conforme citado por Bachmann [1]. A NBR 6118 [2] define o estado limite de vibrações excessivas como "vibrações que atingem limites estabelecidos para a utilização normal da construção". Busca-se evitar esse nível de vibrações para permitir que a estrutura cumpra sua função de forma a preservar sua vida útil e garantir sua utilização de forma segura pelos pedestres.

Debona [3], ao se referenciar em Brownjohn [4], cita que na análise das passarelas de pedestres, as características do caminhar humano influenciam na resposta dinâmica. Ao se investigar as passarelas utilizadas neste trabalho, torna-se importante considerar as características do pedestre como frequência, velocidade e comprimento do passo para as análises baseadas nos métodos de AISC [5], Bachmann [1] e Kerr [6]. O programa computacional ANSYS [7], fruto dos avanços tecnológicos citados anteriormente, permite a modelagem numérica dos modelos estruturais das passarelas a serem investigadas, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos. Com a utilização dessa ferramenta é possível observar graficamente a estrutura da passarela e suas reações ao ser submetida aos esforços dinâmicos causados pelos pedestres. Inicialmente empregam-se os modelos matemáticos tradicionais denominados de "força dura" (*only force*), porém é possível simular a interação pedestre-estrutura com ainda mais realidade com a utilização do

modelo com biodinâmicos em um sistema massa-mola-amortecedor, conforme citado por Aguiar [8].

Ressalta-se também a importância do uso de fontes renomadas neste tipo de análise. Os guias europeus de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10] são de extrema importância pois simulam o efeito de várias pessoas caminhando sobre a passarela ao mesmo tempo. Dessa forma, é possível submeter a estrutura a grandes esforços a fim de testar sua resistência em diferentes situações de utilização real, principalmente quando se trata de passarelas em grandes cidades com centenas ou até milhares de pessoas fazendo uso.

Um exemplo bastante conhecido de passarela de pedestre, largamente utilizado em trabalhos sobre este tema, é o da Passarela do Milênio (Millennium Bridge, Londres, Inglaterra), que pode ser vista na Figura 1. A passarela do tipo Pênsil em aço, que cruza o rio Tâmisa, em Londres, apresentou oscilações laterais expressivas devido ao movimento das pessoas, com amplitude máxima atingindo 75 mm e frequências de 0,8 a 1 Hz, tendo sido fechada para o público apenas três dias após a inauguração, conforme citado por Mendes [11] em referência ao trabalho de Dallard et al. [12].



Figura 1 - Millennium Bridge (Inglaterra)

A passarela Pedro e Inês na cidade de Coimbra, Portugal, é outro caso de passarela analisada amplamente em trabalhos sobre o tema. Segundo Caetano et al. [13], a estrutura vem sendo analisada para se caracterizar seu comportamento

dinâmico, visando implementar medidas corretivas que garantam segurança à estrutura e conforto a uma passarela que sofre vibrações verticais e laterais.

Existem ainda vários outros casos de passarelas de pedestres que sofreram com vibrações excessivas. Ressalta-se a importância da análise estrutural para que esses problemas sejam sanados e o conforto na utilização seja garantido aos usuários.

Motivação

Nas últimas décadas, os projetos dos sistemas estruturais de passarelas de pedestres têm se tornado cada vez mais arrojados e esbeltos. De acordo com este contexto, se faz necessário o aprimoramento e desenvolvimento de pesquisas acerca da análise dinâmica de passarelas de pedestres, tendo em mente o atendimento das normas de projeto [Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS)], as questões relevantes acerca do menor custo de projeto, além de atender o conforto humano dos usuários (ELS). O cenário é desafiador e representa a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, pois os casos de problemas de vibrações excessivas em estruturas, nomeadamente em passarelas de pedestres, tem sido cada vez mais frequentes.

Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo principal a investigação do comportamento dinâmico e os níveis de conforto humano de passarelas de pedestres, quando submetidas a carregamentos dinâmicos induzidos pelos pedestres. Ao longo do estudo são considerados os projetos estruturais de três passarelas mistas (aço-concreto) situadas na cidade do Rio de Janeiro/RJ, com vãos de 32m, 36m e 27,2m, respectivamente. Ao longo do trabalho, a resposta dinâmica das passarelas (deslocamentos e acelerações) será analisada com base no emprego de modelos matemáticos tradicionais denominados comumente de "força dura" ("only force"); em seguida, mediante a utilização de sistemas biodinâmicos para simular o efeito do caminhar dos pedestres (efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura), além do uso dos guias internacionais de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10]. Finalmente, objetiva-se verificar o atendimento aos estados limites de serviço (ELS) das

passarelas de pedestres investigadas, através da análise dos valores das acelerações de pico e avaliação do conforto humano.

Escopo do trabalho

O trabalho de pesquisas se dividirá em 8 capítulos, além de uma breve introdução, um anexo e as principais referências bibliográficas.

No primeiro capítulo faz-se uma revisão das bibliografias analisadas e tidas como basilares para a confecção deste estudo.

No segundo capítulo há a apresentação de normas nacionais e internacionais usadas como referências teóricas para as análises feitas no trabalho.

No terceiro capítulo são apresentados os modelos de carregamento dinâmico para as passarelas, baseados em AISC, Bachmann, Kerr e o modelo com utilização de biodinâmicos.

No quarto capítulo são apresentados os modelos das estruturas das passarelas.

No quinto capítulo são apresentados os modelos numéricos computacionais das estruturas em elementos finitos com utilização do programa ANSYS.

No sexto capítulo é apresentada a análise modal das estruturas, com e sem os modelos biodinâmicos do caminhar humano.

No sétimo capítulo é apresentada a análise de vibração forçada para o modelo de força dura e biodinâmicos para três tipos de caminhada: lenta, normal e rápida, sendo a "normal" o foco deste trabalho. Também é apresentada a avaliação das acelerações de pico baseada nos guias de projetos anteriormente referenciados.

No oitavo capítulo têm-se as considerações finais após toda a explanação.

Após as referências bibliográficas, encontra-se o anexo com memórias de cálculo baseadas nos guias SÉTRA e HIVOSS.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de contribuir com a avaliação da resposta dinâmica das passarelas de pedestres, principalmente em relação ao conforto humano, Figueiredo [14] considerou em sua análise um modelo realista de carregamento desenvolvido para incorporar o caminhar humano como um impacto transiente, utilizando o movimento das pernas que causa subida e descida da massa efetiva do corpo no passo; também considerou que a posição do carregamento dinâmico se alterava de acordo com a posição do pedestre, originando uma variação no espaço e no tempo.

Ao todo quatro modelos foram analisados, e os dois modelos que consideraram a carga dinâmica se alterando com a posição ofereceram respostas dinâmicas superiores aos outros. Considerou-se ainda em um dos modelos o *fmi* (fator de impacto do calcanhar). Constatou-se também que tanto o amortecimento da estrutura quanto o aumento de sua inércia, reduzem a resposta dinâmica estrutural (Fator de Amplificação Dinâmica), o aumento da massa diminui a frequência fundamental, a frequência dominante e a de excitação variam com as características de massa e rigidez, sendo assim, cada passarela analisada pode apresentar valores diferentes de acordo com suas características de projeto. Por fim, inferiu-se que quanto maior o vão, menor a rigidez e menores as frequências naturais.

Em seu trabalho, Santos [15] estudou a influência da modelagem do carregamento dinâmico dos pedestres com o impacto causado pelo calcanhar ao caminhar na passarela e o amortecimento estrutural sobre a resposta dinâmica da estrutura, também utilizando um modelo que considera o impacto transiente ao longo do trajeto que o pedestre faz pela passarela.

Ao se obter valores de acelerações verticais e *rms* (*root mean square*), o autor comparou limites propostos por normas de projeto para identificar a importância desses fatores no projeto de tais estruturas e alertar para as distorções que devem ser evitadas pelos projetistas devido à negligência dos efeitos dinâmicos na análise.

Nos resultados percebe-se que, mesmo para diferentes perfis usados na estrutura, o deslocamento no meio do vão aumenta com o aumento do vão e com o aumento da quantidade de pedestres. Enquanto isso a frequência fundamental das passarelas diminui. Quanto menor o coeficiente de amortecimento estrutural, maior a resposta dinâmica da estrutura. Com o aumento do vão há diminuição da rigidez e

das frequências naturais. No caso das acelerações de pico, estas não são necessariamente afetadas.

Debona [3] também propôs a análise da estrutura de passarelas de pedestres com um carregamento que considera a subida e a descida da massa efetiva do corpo em cada passo, além de alterar a posição da carga dinâmica de acordo com a posição do pedestre sobre a estrutura em função do tempo. As passarelas analisadas estão localizadas sobre as avenidas Osvaldo Aranha e Maracanã na cidade do Rio de Janeiro. O autor correlacionou os resultados experimentais com os obtidos via método dos elementos finitos e com isso chegou a uma análise dinâmica completa do conforto humano em passarelas e os limites de utilização destas, associados à quantidade de vibração produzida.



Figura 2 - Passarela da Praça da Bandeira/RJ



Figura 3 - Passarela no bairro Maracanã/RJ

Ao se testar com variação da quantidade de pessoas caminhando, percebeuse que quanto maior a intensidade do carregamento (2 e 3 pessoas), maiores os valores de aceleração de pico. O tipo de modelo de carregamento adotado e as componentes harmônicas são importantes para a simulação numérica da caminhada no que diz respeito a acelerações de pico.

Zúñiga [16] em seu estudo confrontou testes experimentais com resultados de modelagem numérica discretizados via métodos de elementos finitos com o programa ANSYS [7] para analisar também a passarela de pedestres localizadas sobre a avenida Osvaldo Aranha na cidade do Rio de Janeiro, citada anteriormente. A partir de sua metodologia, realizou-se análise modal para determinação das propriedades dinâmicas da estrutura, como frequências, modos de vibração e taxa de amortecimento. Os resultados de aceleração de pico são comparados com os valores limites de diversos autores renomados, normas e recomendações.

Primeiro se verifica quanto ao ELU para resistência e estabilidade da estrutura com ações externas adversas. Depois quanto ao ELS para a satisfação de limites de vibrações excessivas, visando o funcionamento em serviço e conforto humano ao transitar pela passarela; nesse caso verifica-se vento e ressonância por cargas móveis. No caso das passarelas, além das vibrações verticais provocadas pelo caminhar, há a possibilidade de vibrações laterais excessivas, provocadas pela sincronia entre o caminhar das pessoas.

Durante o caminhar, os pedestres induzem forças dinâmicas verticais, transversais e longitudinais, dependendo de frequência, comprimento do passo e velocidade de caminhada. Vertical: impacto periódico dos passos e oscilação vertical, também dos passos; transversal: movimento oscilatório em torno do centro de gravidade (C.G.) do corpo; longitudinal: atrito entre pés e piso. A frequência de excitação transversal é metade da vertical e da longitudinal.

Souza [17] escreve em seu trabalho que o caminhar humano e as respectivas forças dinâmicas geradas por eles apresentam comportamento aleatório, por isso propõe uma abordagem probabilística para avaliar o estado limite de utilização das passarelas, no que diz respeito a vibrações excessivas que causam desconforto aos pedestres. Para isso analisou a passarela mista aço-concreto localizada no Instituto de Traumatologia e Ortopedia (INTO), no bairro Caju/RJ.



Figura 4 - "Passarela do INTO" no bairro Caju/RJ

A partir desse critério de probabilidade, é possível determinar se os valores de aceleração de pico ultrapassam os critérios de conforto para o usuário e as recomendações de projeto. Com isso, chegou-se ao entendimento de que valores de aceleração calculados exclusivamente sob métodos determinísticos podem ser superestimados em alguns projetos.

Os coeficientes dinâmicos do passo são variáveis dependentes da frequência do passo e podem ser determinadas por formulações matemáticas que não apresentam todas o mesmo intervalo de resultados. Em algumas formulações há uma tendência de crescimento desses coeficientes com o aumento da frequência do passo; em outras formulações há tendência de decrescimento.

Ao longo do estudo percebeu-se que alguns pedestres poderiam gerar carregamentos dinâmicos ressonantes com a passarela, mas nem todos. Os métodos determinísticos também não consideram a variação da frequência (além dos 2 Hz) do passo durante a caminhada, sendo assim, o método analítico probabilístico do trabalho considerou a variabilidade na análise. A aceleração de pico diminui conforme se aumenta a variação da frequência do passo do pedestre.

O efeito dinâmico de fluxo de pedestres é diferente do somatório dos efeitos dinâmicos de cada pedestre caminhando porque no fluxo há diferença no início de cada caminhada, assim, apenas alguns pedestres encontram-se em fase entre si. Nesse caso, parte dos pedestres atua como um sistema massa mola absorvendo parte da energia gerada pelo fluxo de pedestres.

O uso de modelos computacionais é de grande ajuda para as análises necessárias nas estruturas. Mendes [11] desenvolveu um desses modelos com técnicas de refinamento de simulações do método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS [7]. Os valores de aceleração de pico e rms encontrados indicaram que as passarelas analisadas, a serem construídas no Estado do Rio de Janeiro, apresentaram problemas relacionados ao conforto humano, principal foco de cuidado quando se projetam passarelas de pedestres. Para atenuar as vibrações excessivas e garantir que o caminhar das pessoas fosse de maneira a não causar desconforto e nem atingir picos de ressonância na estrutura, buscou-se o emprego de sistemas atenuadores dinâmicos sintonizados (ADS), visando reduzir as vibrações que o caminhar das pessoas causa.

As respostas de todos os modelos estruturais analisados pelo autor em termos de acelerações de pico, indicaram acelerações máximas, em situação de ressonância, para o segundo harmônico de carga, acima de valores limites de acelerações propostos para o conforto humano. Com a análise do *rms*, os valores alcançados foram bem inferiores. Frisou-se que as normas não apresentam consenso em recomendar valores para conforto humano. Como no estudo anterior, o resultado das acelerações de pico mostrou que um maior vão não significa necessariamente uma maior aceleração.

Inicialmente houve pouca resposta da estrutura sob ação dos ADS em relação à redução das vibrações, mas à medida que a resposta da estrutura evoluía, as reduções das respostas estruturais aumentavam pelo acréscimo de força de inércia transferida pela massa adicional, também por meio da rigidez e amortecimento dos ADS. Ao se aproximar o final da caminhada do pedestre, a resposta da estrutura diminuía. Tudo isso se deve ao fato das massas do ADS atuarem na reação inercial, favorecendo uma menor amplitude da resposta estrutural da passarela.

Considerando-se a exigência de estruturas cada vez mais leves, mais esbeltas e suportando cargas maiores, há a necessidade de realizar análises cada vez mais minuciosas no que diz respeito à estabilidade e vibrações excessivas, em se tratando de passarelas de pedestres. Peña [18] investigou modelos estruturais utilizando elementos finitos, a fim de determinar as frequências naturais e as respostas dinâmicas em relação a vibrações forçadas, por meio da obtenção de deslocamentos máximos e acelerações de pico. As passarelas analisadas se localizam no bairro de Paciência, na cidade do Rio de Janeiro e o outro modelo foi elaborado por alunos do curso de Engenharia Civil da USP, em São Paulo.

A partir de estudos, entende-se que de acordo com o conceito de rigidez da estrutura, quanto mais rígido um elemento, menores serão seus deslocamentos. Entende-se também que os seres humanos são menos sensitivos às vibrações transientes do que às constantes. Percebeu-se que quanto maior o vão, maior a probabilidade do Fator de Amplificação Dinâmico ser maior. Também que pedestres caminhando em trajetória irregular ocasionam minoração dos deslocamentos e acelerações na estrutura em comparação com uma trajetória retilínea. O estudo também encontrou uma relação entre as frequências dos passos e as frequências naturais da passarela: quanto mais próximas as primeiras frequências naturais da passarela.

Duarte [19] objetivou em seu trabalho o desenvolvimento de uma metodologia para análise do comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres, utilizando modelagem numérica, análise estrutural, consideração do efeito pedestreestrutura e avaliação do conforto humano. Para isso, lançou mão de modelos biodinâmicos, que simulam a variação tempo-espaço do caminhar humano a cada passo dado, conforme citado anteriormente neste trabalho. A passarela analisada se localiza sobre a Av. Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro, com um vão central de 68,6m de comprimento.

Percebeu-se que o valor da frequência fundamental da passarela mista estava abaixo do recomendado por guias internacionais de projeto (f₀₁ = 1,94Hz), causando alto nível de desconforto dos pedestres porque o valor é bastante próximo da frequência de passo para uma caminhada normal. O autor utilizou os modelos biodinâmicos acoplados ao modelo de elementos finitos e isso influenciou nos resultados, principalmente na variação da frequência fundamental da estrutura. Isso ocorreu devido ao incremento do valor da massa modal do modelo, reduzindo a frequência fundamental da passarela. Em um exemplo disso, o valor da frequência fundamental da passarela foi reduzido de 1,94 Hz para 1,73 Hz, muito próximo da frequência do passo em caminhada lenta que é 1,70 Hz. Dentre tudo que envolve a análise de passarelas, a monitoração experimental é uma importante ferramenta para obtenção de resultados. Debona [3] utilizou essa ferramenta junto com a modelagem numérica para obter as informações que permitissem avaliar a resposta da estrutura

submetida a esforços de pedestres caminhando, localizada na Faculdade de Engenharia (FEN) da UERJ, na cidade do Rio de Janeiro.



Figura 5 - Passarela da Faculdade de Engenharia (UERJ)

O monitoramento se deu com o emprego de acelerômetros instalados sobre a estrutura e técnicas SIMO (uma entrada, múltiplas saídas) e SISO (uma entrada, uma saída). SIMO: força de excitação aplicada sobre um ponto da estrutura (entrada) e a resposta dinâmica (saída) obtida simultaneamente em vários pontos, porém não é possível controlar a excitação na entrada. A SISO: força aplicada e resposta dinâmica são obtidas simultaneamente sobre cada ponto da estrutura; mede-se a entrada e a saída e é possível obter-se a resposta em frequência de cada ponto do modelo.

Após os testes experimentais, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos para incorporar o efeito da interação dinâmica entre pedestre e estrutura e utilização dos modelos biodinâmicos representativos dos pedestres. A resposta estrutural dinâmica obtida foi comparada com critérios de normas e recomendações de projeto.

Silva [20], também objetivando avaliar o efeito da interação pedestre-estrutura sobre a resposta dinâmica da passarela, realizou uma série de testes experimentais de vibração forçada, além da utilização de um modelo computacional. Foi analisada a influência das frequências de passos distintas, massa, amortecimento e trajetórias diferentes dos pedestres ao caminharem. A estrutura analisada está localizada na Av. Osvaldo Aranha, na cidade do Rio de Janeiro.

Esse trabalho destaca a ineficácia do modelo "força dura" na realização da análise e reforça a eficácia da utilização do modelo biodinâmico, que reproduz a dinâmica vertical da caminhada, adiciona ao modelo de força um modelo que possui massa, rigidez e amortecimento, considerando, assim, as contribuições dinâmicas dos pedestres sobre a estrutura. As acelerações de pico sofrem variações de acordo com o modelo de carregamento dinâmico aplicado. Quanto maior a sincronização do caminhar com os harmônicos de excitação, maiores as acelerações de pico.

Segundo o autor: "a natureza do modelo de carregamento dinâmico adotado, bem como as suas componentes harmônicas, são de suma importância para uma simulação numérica mais precisa da caminhada humana sobre passarelas, notadamente com relação aos valores das acelerações de pico."

Teixeira [21] frisa em seu trabalho que com o advento de materiais mais modernos para a construção das estruturas também traz mais vulnerabilidades a ações dinâmicas. Como é sabido, o caminhar humano produz vibrações que, dependendo da intensidade, podem causar desde desconforto a colapso na estrutura por causa da ressonância. Algumas considerações foram feitas após toda a análise.

Em testes computacionais realizados com uma pessoa se deslocando na passarela conclui-se que apenas o primeiro harmônico era relevante para obter a resposta dinâmica da estrutura, o comprimento do passo influencia na resposta devido à relação distância-tempo percorrido pelo passo, a frequência do passo se relaciona com a frequência fundamental da estrutura e influencia a resposta dinâmica.

Considerando-se os testes com muitas pessoas se deslocando conclui-se que a consideração de várias pessoas se deslocando em frequências aleatórias deve fornecer uma resposta dinâmica menor, considerando a tendência de que se modifique a frequência do passo para sincronizar com as demais pessoas próximas a elas durante a caminhada sobre a passarela. Após análise dos resultados, chegou-se a algumas soluções para redução dos níveis de vibração na passarela: reduzir o coeficiente de impacto e aumentar o amortecimento da estrutura através do material empregado no piso e reduzir a rigidez da estrutura.

Santos [15] alerta em seu trabalho que as normas e regulamentos oficiais ainda não refletem as técnicas mais atuais de projeto para estruturas de passarelas de pedestres, com isso, é importante dar atenção a metodologias mais recentes que mostrem resultados mais próximos do comportamento real dessas estruturas. Ao final chegou ao resultado de que a passarela pode ser considerada confortável ou não, dependendo da norma considerada. A passarela analisada está localizada sobre a estrada Parque de Indústria e Abastecimento E.P.I.A., em Brasília.

O autor realizou o estudo do comportamento dinâmico das passarelas submetidas a ações dinâmicas produzidas pelos pedestres. Utilizou para isso a caracterização da ação humana sobre a estrutura, métodos para análise dinâmica e critérios de conforto humano de normas vigentes.



Figura 6 - Passarela E.P.I.A/Brasília

Ruiz [22] verifica em seus estudos que existe uma limitação nas normas de suporem um carregamento perfeitamente periódico. Quando há uma marcha perfeitamente periódica das pessoas em cima da passarela, a resposta em termos de espectro de aceleração é subestimada em casos de não-ressonância, sendo que não são capturados os picos de frequências naturais ou não são captados ou não apresentam amplitudes altas o suficiente para comparação.

Também se verificou que a melhor forma de alcançar boa precisão da medição das vibrações da estrutura é a aleatoriedade dos passos. A consideração da massa dos pedestres em relação à massa modal da estrutura não pode ser desprezada, principalmente em passarelas mais leves.

Segundo Gonzaga [23] para esse tipo de passarela espera-se um alto grau de interação pessoa-estrutura. A literatura mostra que, como esperado, as propriedades dinâmicas da passarela ocupada são diferentes da passarela vazia. As passarelas analisadas estão localizadas no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba e sobre o rio Moraca em Podgorica, capital de Montenegro.


Figura 7 - Passarela sobre o rio Moraca em Podgorica, Montenegro

Uma das maneiras utilizadas para representar os efeitos da interação dos pedestres com a passarela é a utilização de modelos biodinâmicos, conforme visto anteriormente em outros trabalhos citados nesta dissertação. Esses modelos são compostos por massa, rigidez e amortecimento modais equivalentes ao corpo humano. O modelo biodinâmico se contrapõe ao modelo de carga móvel, comumente utilizado, mas que não é apropriado para estruturas leves.

Devido à dificuldade de se considerar os efeitos da interação pessoa-estrutura, o autor propôs um estudo paramétrico sobre o assunto. Como resultado foi encontrado que tanto massa modal quanto frequência do modelo biodinâmico são parâmetros que exercem a maior influência nas amplitudes de resposta da estrutura.

Com o aumento da massa modal, diminuem-se as amplitudes de resposta. Quando a frequência do modelo biodinâmico é próxima da frequência natural da estrutura e da excitação, o movimento que induz às oscilações na estrutura é ampliado.

A consideração da estrutura ocupada por pedestres em relação à desocupada, a frequência da ocupada é menor que a desocupada, pois quando se considera um grande número de pessoas caminhando, a tendência é de redução da frequência devido às restrições do movimento. O estudo utilizou para consideração do carregamento da estrutura ocupada, um modelo analítico de apenas um pedestre, porém estendido. Para os casos em que se torna inviável o aumento da rigidez e da massa da estrutura como forma de evitar frequências em ressonância com a frequência gerada pelo caminhar das pessoas, é possível utilizar amortecedores como forma de diminuir essas frequências, como mostra o trabalho de Gomes [24].

Em seus testes, em uma passarela de pedestres localizada na cidade de Brasília, o autor verificou que várias situações analisadas apresentavam valores que ultrapassavam os limites de serviço de normas, devido ao excesso de vibração gerado na estrutura. Optou-se então pela utilização dos Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos (AMSM), além de barras de travamento na estrutura. O estudo foi sobre um vão inclinado de uma passarela. As frequências naturais foram de 1,9997 Hz na horizontal e 2,9905 Hz na vertical, para a análise de vibrações livres com as primeiras 6 frequências naturais dentro do intervalo crítico da literatura da época (5 Hz). Para vibrações forçadas, foram feitas simulações com números variados de pedestres caminhando ou correndo. As frequências observadas foram de 1,8 Hz para caminhada e 2,5 Hz para corrida, esta última ultrapassando limites de serviço consultados em trabalhos anteriores. Ainda para a simulação com pedestre correndo, verificou-se que apenas uma pessoa seria suficiente para causar aceleração com valor superior aos limites de serviço.

A conclusão foi que a estrutura analisada poderia apresentar vibrações excessivas em situações normais de uso, com poucos ou muitos pedestres transitando de forma lenta ou rápida. Com isso, utilizou-se o sistema de controle com amortecedores e barras de travamento, que se mostrou eficiente no combate à ressonância da estrutura quando os pedestres se deslocavam na frequência do primeiro modo de vibração, que era o mais desfavorável

Segundo trabalho recente publicado por Pereira [25], as normas brasileiras podem ser consideradas conservadoras ao estabelecerem parâmetros gerais, com valores que resultam em estruturas mais robustas e antieconômicas. Ao analisar dois tipos de passarelas, uma localizada na BR 153 em Goiânia e outra sobre o rio Piracicaba, na cidade de Piracicaba, respectivamente treliçada e pênsil, a autora mostra que o sistema pênsil resulta em frequências naturais mais baixas, o que pode facilmente se aproximar aos valores de frequências causados por poucos pedestres transitando pela estrutura e gerar acelerações mais intensas, tornando a estrutura mais vulnerável. Na direção vertical, os valores de acelerações podem chegar a ser quatro vezes maiores que no sistema treliçado. Isso indica que em termos de análise dinâmica, a estrutura treliçada se comporta de maneira mais satisfatória.

Peña [18] ao analisar as vibrações laterais das passarelas faz ressaltar a necessidade de um modelo que seja correspondente à interação pedestre-estrutura, representando a dinâmica do corpo humano ao caminhar. No trabalho a autora propõe um sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL) por meio de experimentos e simulações numéricas, tanto para analisar a influência do caminhar de uma pessoa quanto de uma multidão sobre a passarela Aberfeldy, na Escócia.

A partir do uso de medições experimentais e relacionando aceleração do centro de massa dos indivíduos com os parâmetros biodinâmicos de massa, rigidez e amortecimento foi possível representar a ação na direção lateral da passarela de uma pessoa caminhando e investigar os efeitos da vibração causada. A autora também analisou o que chamou de Fator Dinâmico de Carga (FDC), como sendo a força do pedestre dividida pelo seu peso. Ao longo da análise, foi observado que a rigidez aumenta com o aumento proporcional da massa corporal. Também se encontrou correlação entre amortecimento da estrutura e o FDC, porém não houve essa correlação entre o FDC e a massa corporal. Os estudos também mostraram que a interação humano-humano muda o padrão de caminhada natural da pessoa, como visto em referências anteriores, e que estas se adequam, forçadamente, ao ritmo de caminhada das demais sobre a passarela.

Ao final do estudo inferiu-se que as amplitudes de acelerações encontradas com modelo biodinâmico foram melhores que com apenas um modelo de carga móvel representando uma pessoa se deslocando, provando, mais uma vez, que esse modelo é o ideal para a análise dos efeitos do caminhar de pedestres em uma estrutura como uma passarela.

Batista [26] ressalta que em muitos casos é difícil evitar que as frequências mais baixas das passarelas se encontrem no intervalo de valores próximos a 5 Hz, como é proposto, porque isso exigiria aumento de rigidez e de massa da estrutura, tendo como alternativa a utilização de amortecedores. O autor realizou simulações no domínio do tempo e com variados números de pedestres correndo de forma sincronizada e demonstrou vibrações em excesso e ultrapassou os limites de serviço indicados em literatura, havendo a necessidade de se projetar sistema de controle por amortecedor.

Durante a análise, observou-se que apenas a primeira frequência natural da estrutura esteve próxima à faixa de frequência de vibrações induzidas pelo homem (modo horizontal lateral) com 5,16 Hz. Para o estudo realizado com menos de 20

pedestres correndo, a estrutura não apresentou valores que ultrapassaram os limites de serviço de norma, para 20 ou mais pedestres correndo houve acelerações no sentido horizontal que ultrapassaram os limites de serviço apresentados por Blanco *et al* (2005), referência usada pelo autor. O segundo e o terceiro modo de vibração resultaram em harmônicos com maior amplitude.

Toso [27] buscou obter parâmetros para o modelo biodinâmico que representa a ação do pedestre caminhando sobre a passarela, representada por uma plataforma de forças com boa rigidez e sensibilidade e depois comparou com a análise de uma passarela real localizada sobre a estrada Parque de Indústria e Abastecimento E.P.I.A., em Brasília. Em seu estudo explica sobre um aumento natural do amortecimento na interação pedestre-passarela devido à capacidade do corpo humano em absorver energia vibratória. Além dos parâmetros de massa modal, amortecimento e rigidez, o autor realizou medições experimentais com uso de rede neural para reduzir a incerteza nas expressões que utilizam esses parâmetros.

O uso de rede neural se deve ao fato de representar maior precisão na captação de dados de força e posicionamento sobre a plataforma. Os dados de amplitude de forças e acelerações foram usados para avaliação dos modelos biodinâmicos compostos por massa modal, amortecimento e rigidez. O autor observou correlações entre massa e rigidez, massa e amortecimento, taxa de passos e massa modal.

O trabalho ainda ressalta que considerar os pedestres caminhando sobre a passarela apenas como modelos de força subestima os resultados frente aos obtidos utilizando o modelo biodinâmico, bem mais representativo da posição e velocidade de cada pedestre no tempo e espaço.

Silva [20] propôs uma forma de minimizar a amplitude das vibrações em passarelas com a utilização de dispositivos de controle, nesse caso um amortecedor de massa sintonizado (AMS).

Após uma série de otimizações propostas, o dispositivo foi capaz de reduzir a resposta dinâmica da estrutura, minimizando os efeitos da vibração sobre a estrutura e sobre os pedestres que trafegam sobre ela. Em termos percentuais obteve-se redução maior que 80% para o deslocamento e maior que 90% para velocidade e aceleração nos nós centrais das passarelas analisadas.

Ferreira [28], ao apresentar seu estudo sobre passarelas pênsil protendidas, analisou o comportamento estrutural dessa estrutura relativo à análise dinâmica. O autor também comenta e descreve a reação dos pedestres sob efeito de vibrações na estrutura, explicitando que há um efeito psicológico e físico que faz com que cada pessoa sinta os graus de vibração de forma diferente e algumas nem sentem; a reação também depende do fato da pessoa estar parada ou andando, sozinha ou acompanhada; depende também da frequência da vibração e do tempo que os pedestres ficam expostos a ela. A força que o pedestre transmite para a estrutura depende da velocidade de caminhada deste sobre a passarela e também depende da quantidade desses pedestres sobre a passarela ao mesmo tempo.

O autor descreve sua análise teórica e computacional sobre passarelas de madeira, utilizando a formulação de Euler-Bernoulli para cálculo da primeira frequência natural nas direções transversais vertical e horizontal e também faz a avaliação da rigidez à flexão na direção transversal horizontal.

Os resultados observados para a avaliação dinâmica relativo ao conforto humano ao caminhar sobre as passarelas de madeira foram de que as primeiras frequências naturais tenderam a ser menores que 5 Hz para direção transversal vertical e 2,5 Hz para horizontal; os limites para a aceleração previstos em norma foram ultrapassados, sendo estes 0,7 m/s² e 0,2 m/s² para vertical e horizontal respectivamente. A passarela não foi capaz de atender aos critérios de conforto humano.

Foi possível inferir que a formulação de Euler-Bernoulli, para este caso, se mostra muito conservadora quando comparada a valores numéricos para a mesma análise devido à consideração da inércia apenas nas vigas principais e desprezo pela rigidez à flexão do tabuleiro e o efeito da ligação das tábuas (no caso de estrutura de madeira) nas vigas principais.

Segundinho [29] ainda ressalta a importância da consideração dos harmônicos de caminhada e corrida nas direções vertical e horizontal, ambas transversais, com verificação de acelerações máximas para primeiro e segundo harmônicos de caminhada e primeiro de corrida na direção transversal vertical.

Stolovas [30] em seu artigo sobre aplicação da Análise de Fourier para o projeto e a avaliação funciona de passarelas de pedestres expõe que as estratégias tradicionais de projeto visavam garantir o desempenho da estrutura impedindo a ressonância, porém a ressonância não constitui sempre um problema para a estabilidade da estrutura, mas sim uma amplificação das respostas dinâmicas desta. Por meio de um método analítico geometricamente idêntico, mas com algumas mudanças, o autor caracteriza a ação dos pedestres sobre a estrutura e analisa seus fluxos críticos ao caminharem.

Foi observado durante os testes que pedestres em grupo diminuem a frequência de marcha e encurtam o passo, sendo assim frequência e velocidade são parâmetros de análise que precisam considerar a densidade de pessoas sobre a passarela para serem calculados. Também foi apontada a diferença do caminhar de diferentes grupos, mostrando que alguns grupos podem caminhar em velocidades maiores que outros de acordo com suas necessidades. De forma geral, a tendência das pessoas caminhando é sincronizar seus movimentos e a força aplicada fica em fase com a velocidade da estrutura, ampliando a oscilação, efeito conhecido como "Lock-in". Caso a quantidade de pedestres seja grande e o amortecimento da estrutura seja baixo, a vibração poderá se tornar instável, causando problemas à estrutura.

Santos e Brito [31] reforçam um modelo numérico com parâmetros atualizados que é importante para representar o comportamento real da estrutura e correlacionar com o modelo experimental de forma mais próxima da realidade do funcionamento estrutural.

Foi feita uma análise de sensibilidade com o objetivo de identificar a influência da variação dos parâmetros sobre as propriedades da passarela. Verificou-se que o módulo de elasticidade dos elementos metálicos foi um dos parâmetros que mais alterou as variáveis.

Caetano e Cunha [32] evidenciam a importância da abordagem experimental e a utilização de modelos numéricos no estudo do comportamento dinâmico de estruturas submetidas a vibrações. A passarela analisada possui 3,8 m de largura e 0,15 m de espessura, 58 m de comprimento total e forma curva. De acordo com os autores, a melhor discretização foi com elementos finitos de treliça e de viga.

Segundo as Recomendações Técnicas de Projeto [33] sobre vibrações em pontes pedonais, o crescente número de problemas de vibração nestas estruturas mostra que o projeto não deve contemplar apenas as cargas estáticas, mas também as dinâmicas, considerando o nível de vibração produzida pelos pedestres ao caminharem por ela.

A divisão feita pela Recomendação Técnica engloba 7 passos:

- Avaliação das frequências naturais
- Verificação da série crítica de frequências naturais
- Caracterização das situações de projeto
- Caracterização do amortecimento estrutural
- Determinação da aceleração máxima
- Verificação de critérios para "lock-in" lateral
- Tendência de as pessoas sincronizarem seus movimentos e a força aplicada ficar em fase com a velocidade da estrutura, ampliando a oscilação.
- Verificação do nível de conforto

Realizaram-se ensaios de vibração forçada, ambiental e livre para identificação e medição de amortecimentos na estrutura. Para controlar as vibrações excessivas, faz-se uso de algumas técnicas, como:

- Modificação da massa, aumentando a quantidade de concreto utilizada na estrutura.
- Modificação da frequência, que é feita ainda na fase de projeto, porque seria quase impossível de fazer com a estrutura pronta.
- Modificação do amortecimento estrutural

Com estruturas cada vez mais esbeltas e leves, há maior chance de adotar soluções estruturais com baixa rigidez e frequências naturais próximas à das atividades humanas. Passarelas vêm sofrendo com problemas vibratórios desde 1831, com a ponte inglesa de Broughton. Em seu trabalho, Queiroz, Lima e Santos [15] apresentam as recomendações de SÉTRA [9] e HIVOSS [10] para projeto de passarelas, fazendo também a análise de um caso existente de estrutura construída de acordo com as normas vigentes à época, mas que apresentou problemas de vibração excessiva de acordo com as recomendações de SÉTRA [9] e HIVOSS [10].



Figura 8 - Ponte de Broughton/UK

Essas duas recomendações vieram para preencher lacunas presentes em diversas normas, inclusive europeias, que recomendavam apenas um valor de carregamento a ser suportado pela estrutura (5 kN/m²), e uma frequência natural mínima de 4 Hz, porém não recomendavam nenhum critério relativo ao comportamento dinâmica das passarelas.

Após as análises realizadas, os autores chegaram à solução de controlar as vibrações foi o uso de pórticos e contraventamentos. Outro ponto notado foi o que de que mesmo atendendo à solicitação da norma de calcular a estrutura com uma carga de 5 kN/m², a passarela apresentou problemas dinâmicos com o excesso de vibrações, mostrando que a utilização de parâmetros sem a análise dinâmica se mostra ineficaz para projetar essas estruturas.

Santos [34] ressalta que as normas e regulamentos oficiais ainda não refletem os avanços sobre a análise dinâmica de passarelas e critérios de conforto humano. Por isso cita os guias europeus SÉTRA [9] e HIVOSS [10] com mais arrojadas e com resultados mais próximos do comportamento real das estruturas, em relação às normas que são consideradas mais conservadoras, pois em seu trabalho demonstra que a estrutura analisada não atendia aos critérios de conforto humano, entretanto não apresentava vibrações excessivas que causassem perturbação ao pedestre. É importante que os resultados alcançados por SÉTRA [9] e HIVOSS [10] sejam incorporados aos normativos atuais, principalmente para ajudar no entendimento da interação pedestre-estrutura.

Martins, Pinto e Porto [35] analisam uma passarela sob o aspecto de vibração e conforto humano, utilizando uma estrutura sem a consideração do corrimão, que

poderia elevar a rigidez e contribuir para melhora no comportamento dinâmico. O estudo mostra que estruturas metálicas têm maior sensibilidade aos diversos tipos de carregamentos dinâmicos, com frequência natural menor quando comparadas com as de concreto armado. É possível que haja ocorrência de ressonância com atividades comuns de pedestres como caminhar, vento, tráfego de carros etc.

Os autores explicam que tanto a NBR 6118 [2] quanto a NBR 8800 [36] tratam de forma apenas superficial a questão do conforto humano, sendo assim, utilizaram mais normas internacionais que abrangem mais critérios.

A estrutura analisada é mista de aço-concreto com 26,50 m de comprimento e 1,20 m de largura. De acordo com os seis primeiros modos de vibração, o intervalo de frequências foi de 8,25 até 22,23 Hz. Foi considerado um amortecimento da estrutura de 3%. Também foi considerada uma pessoa de 800 N cruzando a passarela de um lado ao outro. Os valores de aceleração foram de 0,803 até 0,903 m/s².

Os resultados foram comparados com normas e recomendações internacionais: BACHMANN (1987), ISO/DIS (2007), AISC/CISC (2003), SCI Publication P354 (2009) e BS 6472 (1992). As acelerações foram bem acima dos limites especificados para caminhar de pedestres. O corrimão poderia interferir nesse resultado porque aumenta a rigidez da estrutura, porém não foi considerada, como dito anteriormente.

Oliveira, Bastos e Weibull [38] em seu trabalho analisam uma passarela de concreto com fibra de vidro reforçada por polímeros com 29 m de vão livre, modelada via método dos elementos finitos. Os autores analisam as frequências naturais e modos de vibração da estrutura, assim como o Estado Limite de Vibrações Excessivas.

Baseado pelo guia SÉTRA (2006) [9] as passarelas são divididas em classes de I a IV, e em 3 categorias, segundo o nível de conforto máximo. A frequência natural da estrutura da passarela deve ser determinada para as direções vertical, horizontal transversal e horizontal longitudinal, com a massa das pessoas (70 kg/m² para SÉTRA [9]) que caminham sendo considerada para o cálculo da frequência natural.

Após as análises estática e modal, os autores concluíram que a verificação dos Estados-limites de serviço é condicionante para o dimensionamento da estrutura, além da solução em concreto com armadura não metálica, tema central do estudo na parte de corrosão (tópico não abordado nesta dissertação de mestrado). Também foi possível concluir que a exigência normativa para análise dinâmica da frequência natural em torno de 2,6 Hz (usada pelos autores) varia de norma para norma, não havendo consenso.

Ribeiro, Gaspar e Cardoso [39] citam a crescente demanda por avaliações estruturais que representem variadas situações de uso para avaliar seu comportamento dinâmico, não apenas a abordagem unicamente estática, observando apenas os limites recomendados por normas e que não representam a realidade. Com isso o estudo foi feito sobre a intenção de avaliar o comportamento de uma passarela com pedestres caminhando e saltando, com análise das frequências e modos de vibração do sistema e sua resposta dinâmica de aceleração.

A análise com utilização de programa de computador identificou frequências e modos de vibração da passarela da ordem 1,99 Hz a 14,24 Hz, indicando que a estrutura é sujeita a alto risco de ressonância com a atividade humana, principalmente em seus quatro primeiros modos de vibração. Os estudos realizados com ressonância ocorrendo no primeiro modo de vibração (com 1,99 Hz de frequência) e aceleração máxima de 2,603 m/s² e 3,509 m/s² se sobrepuseram ao limite de conforto humano dos guias de projeto do AISC (2016) [5] e SÉTRA (2006) [9].

Faria e Poggiali [40] propuseram uma revisão da literatura referente às ações dinâmicas em estruturas no Brasil com o objetivo de frisar a importância do estudo das ações dinâmicas, seus efeitos nas estruturas e a falta de conhecimento de norma que rege projetos nessa área. Como resultado entendeu-se que o Brasil carece de estudos a respeito das ações dinâmicas, principalmente em relação a fenômenos sísmicos em regiões mais próximas da região intraplaca. Os autores destacam a importância da análise de ações dinâmicas na estrutura para saber as formas possíveis de ajustes e correções em estruturas que sofrem com os efeitos desse tipo de fenômeno. É importante salientar que essas medidas corretivas servem também para estruturas que, mesmo sem sismos, sofrem com vibrações causadas por outras situações, como movimentação de veículos, e que causam desconforto humano e até colapso.

Uma grande quantidade de pesquisas, experimentos, artigos e guias de projeto tem sido publicada ao longo das últimas 3 décadas a respeito de estruturas de passarelas. Para responder ao questionamento de como formular a força lateral gerada por pedestres e como conceituar mecanismos de excitação e sincronização, Fujino e Siringoringo [41] propuseram e validaram numérica e experimentalmente vários modelos, além disso fizeram uma revisão crítica conceitual sobre o estudo de vibração lateral induzida por pedestres em passarelas.

Os autores comentam sobre o conceito de critério de estabilidade, ou ponto crítico, que é o ponto em que a caminhada aleatória se torna caminhada sincronizada; esse conceito é associado ao número crítico de pedestres ou à amplitude crítica de resposta da estrutura. Em relação a contramedidas ao amortecimento, podem ser por dispositivos externos ou sistema de controle de vibração, seja como for, utiliza-se o critério de estabilidade para medir o amortecimento mínimo da estrutura.

Maraveas, Fasoulakis e Tsavdaridis [42], ao fazerem uma revisão sobre estudos sobre características dinâmicas importantes para passarelas, abordam os parâmetros que afetam a resposta dinâmica de passarelas excitadas por pedestres, principalmente a excitação lateral síncrona. Também descrevem métodos para controle de vibração com aplicação de amortecedores de massa sincronizados.

Os autores destacam a necessidade de métodos probabilísticos. O projeto de passarelas deve contemplar a instalação de amortecedores para restringir efeitos dinâmicos, podendo ser considerado realizar testes de vibração na passarela para aferir a segurança de seu uso.

Brownjohn, Pavic e Omenzetter [43] em seu artigo examinam forças contínuas de caminhada e o efeito das suas imperfeições através de simulações de tempo de resposta estrutural para mostrar a diferença entre essa imperfeição da caminhada e a simulação feita de forma perfeita. Essa abordagem pode ser usada tanto para pedestres individuais quanto para multidões.

Nhleko, Zingoni e Moyo [44] revisaram o que havia sobre os efeitos do comportamento vibratório das estruturas com humanos saltando sobre elas, com base no modelo previsto no código BS 6399-96. Esse modelo mostrou-se incapaz de prever de forma correta tanto impulso quanto harmônico para as frequências de salto.

Ao longo da verificação experimental, os autores concluíram que a aceleração de uma estrutura com frequência fundamental de 7,1 Hz foi dominada pelo segundo harmônico de frequência de salto (sem considerar as ressonantes), quando um pedestre saltou a 1 Hz. Isso também foi encontrado pela simulação feita.

O estudo foi feito com a incorporação de fatores de forma de impulso que descrevem impulsos de carga resultantes do salto de um ser humano sobre a estrutura da passarela. Esse método foi baseado no tratamento do sistema como sendo

pseudo-variável. Após a verificação com a literatura, provou-se que o modelo é capaz de representar fielmente o que vinha sendo proposto por outros autores.

He e Xie [45] investigaram o efeito de pessoas paradas e andando nas características dinâmicas verticais de uma ponte mista aço-concreto, usando programa de computador, com frequência natural vertical da passarela foi de 2,83 Hz, taxa de amortecimento de 0,42% e primeira massa modal de 1,750 Kg. Foram realizados testes estacionários e de caminhada sincronizada com frequências que variaram de 1,6 a 2,4 Hz e diferentes grupos, incluindo caminhadas com trajeto aleatório. Para o teste estacionário, o resultado mostrou uma diminuição na frequência natural e aumento na relação do amortecimento da estrutura ocupada em relação à vazia, à medida que o número de pessoas aumentava, considerando joelhos retos e dobrados. Para um número crítico de pedestres, o amortecimento estrutural tende a se estabilizar. Para o teste com caminhada, os resultados foram semelhantes. As propriedades da estrutura como peso, frequência de carga e tamanho do grupo de pessoas contribuem para as respostas estruturais, com a frequência tendo papel mais decisivo.

Seiler et al. [46] propuseram um modelo numérico de carregamento para pessoas correndo sobre uma passarela e o validaram através de testes experimentais de uma passarela de aço estaiada construída na Alemanha. O modelo criado foi derivado de observações visuais e leis físicas, como conservação de energia. Chegou-se à conclusão de que a força máxima depende apenas da relação do passo do pedestre em seu movimento sobre a passarela e não da frequência de caminhada/corrida. Atualmente muitas das descrições de carga nesse tipo de experimento e modelagem ainda não simulam o processo real do movimento do contato do pé com a estrutura. No caso de corrida, o intervalo de contato é muito pequeno e a passarela tem menor possiblidade de adaptação da dinâmica da estrutura.

Os testes foram realizados para um sistema de um grau de liberdade (S1GL) com modelo simplificado e foram encontrados bons resultados, porém em relação a pessoas correndo sobre a passarela, ainda é necessário mais aprofundamento pois o teste pode superestimar a resposta dinâmica máxima.

Piccardo e Tubino [47] modelaram probabilisticamente, considerando várias fontes de aleatoriedade: chegada dos pedestres, velocidade dos passos, amplitude da força e peso dos pedestres. A modelagem consistiu em uma representação probabilística dos pedestres: as chegadas eram modeladas como variáveis aleatórias de Poisson e as frequências dos passos, velocidade dos passos e amplitude de força e peso modeladas como distribuição normal. O objetivo era estudar a resposta dinâmica resultante e para isso foi usado apenas o primeiro harmônico.

Nakamura *et al* [48] observaram em sua pesquisa que passarelas suportadas por cabos apresentaram vibração lateral em suas vigas com frequência de cerca de 1 Hz quando um grande número de pessoas trafegava. Esse efeito foi causado pela força dinâmica lateral produzida pelo movimento ziguezague dos pedestres. Durante a vibração da passarela, alguns pedestres sincronizaram com a vibração da viga, o que aumentou ainda mais a resposta dinâmica de vibração da viga.

Através do experimento feito em cima de uma placa, os pedestres caminharam enquanto havia vibração da placa e as frequências e amplitudes foram medidas. Quanto mais se induzia a vibração da placa, mais a amplitude das forças dinâmicas produzidas pelos pedestres aumentava. A sincronização da vibração da viga com a movimentação dos pedestres afeta a resposta da viga. Ao se diminuir a frequência de 1 Hz para 0,87 Hz, 20% dos pedestres sincronizaram seus movimentos com a placa de testes. Os autores alertam que o experimento foi feito apenas com 5 pedestres, logo seria necessário realizá-lo com um número maior.

Ma *et al* [49] citam a importância do critério de conforto de vibração como influente na avaliação do resultado da resposta dinâmica da estrutura, e que há uma falta de estudos necessários sobre o assunto, por isso realizaram um estudo para entender a percepção dos pedestres sobre vibrações induzidas na passarela. Para isso as pessoas caminharam sobre uma mesa vibratória de 4m x 4m com imposição de excitações senoidais com amplitudes e frequências diferentes e com isso foi criada uma escala de cinco níveis dependente da aceleração e da frequência.

Os resultados mostraram que uma amplitude de aceleração crescente piorava a percepção das vibrações quando a frequência destas permanecia constante; uma frequência de vibração crescente melhorava a percepção de vibrações quando a amplitude da aceleração permanecia constante. As pessoas também se mostraram mais sensíveis a vibrações laterais do que verticais.

Zivanovic, Pavic e Reynolds [50]**Erro! Fonte de referência não encontrada.** m seu estudo mostram que a carga dinâmica induzida na direção vertical por um único pedestre andando sobre uma passarela é, geralmente, modelada com um único harmônico ressonante. Isso é comprovado por um teste feito com uma pessoa caminhando sobre uma esteira e funciona para estruturas que não vibram perceptivelmente. Porém o uso de um único harmônico pode acabar superestimando a proposta da passarela, devido à incapacidade dos pedestres de caminharem de forma constante ao perceberem fortes vibrações na estrutura.

Sendo assim, propuseram identificar os níveis de vibração que perturbam a caminhada normal. O amortecimento durante os períodos analisados foi até dez vezes maior que com a passarela vazia. Percebeu-se que o pedestre perde a constância na caminhada, modificando assim a frequência dos passos, quando percebe certo nível de vibração e isso afeta as respostas dinâmicas, porém é algo esperado, considerando-se que as pessoas naturalmente não conseguem caminhar todas da mesma forma, velocidade e direção.

Zivanovic, Pavic e Reynolds [51] fizeram, em outro estudo, um levantamento da literatura a respeito do tema e identificaram que o ser humano é a fonte mais importante de vibração nas passarelas, no entanto a modelagem da força dinâmica induzida pela multidão ainda não está claramente definida. Os maiores fatores de influência da vibração nas passarelas são massa, amortecimento e rigidez, tendo o amortecimento como parâmetro mais incerto. Apesar de muitas escalas existirem na literatura para medição da percepção humana de vibrações, poucas são aplicáveis a passarelas porque não há um receptor parado, mas sim se movendo sobre a estrutura.

Os autores entendem que a maneira mais confiável de determinar o amortecimento estrutural é realizar o teste na estrutura após construída. Sobre a avaliação das vibrações entendem que os fatores mais importantes são a natureza dos passos, tempo de exposição a vibrações e o pedestre estar em movimento e não parado sobre a estrutura.

Dallard *et al* [12] descreve o caso da passarela London Millennium, em Londres – Inglaterra, inaugurada em 10 de junho de 2000. Na abertura houve movimentos laterais inesperados enquanto os pedestres atravessavam. Essa força lateral exercida pelas pessoas pode ocorrer em qualquer ponte/passarela parecida com frequência lateral abaixo de 1,3 Hz com um certo número de pedestres. O artigo descreve o desenvolvimento de um retrofit para controlar as vibrações, envolvendo o uso de amortecedores de fluidos viscosos e de massa, ambos para alcançar amortecimento superior a 20% do crítico.

Jiménez-Alonso *et al* [52] desenvolveram um modelo biodinâmico de interação multidão-estrutura para estimar a troca de energia entre pedestres e passarela. O foco

do modelo é nas vibrações na direção vertical. Dois submodelos são propostos: um de interação pedestre-estrutura e um de multidão. O primeiro usa uma projeção modal com dois graus de liberdade, simulando o comportamento de cada pedestre sobre os modos de vibração da estrutura, estimando as acelerações de uma passarela real. O segundo submodelo é simulado pela análise do comportamento de muitas pessoas.

Fazendo a interação entre os dois submodelos na direção vertical, há um limite de parada para os pedestres pararem quando um certo limite de aceleração for alcançado. Importante ressaltar que os parâmetros da interação pedestre-estrutura são assumidos constantes, ou seja, não variam com a frequência de passos dos pedestres, e os efeitos dinâmicos associados à variação da velocidade das pessoas ao longo do tempo foi desprezado. O modelo é capaz de analisar as alterações nas propriedades dinâmicas da estrutura induzidas pelos fluxos dos pedestres, melhorando assim a eficiência dos dispositivos de amortecimento usados.

Caetano *et al* [13] analisaram a passarela Pedro e Inês em Portugal, uma estrutura longa e esbelta, com tendência a vibrações vertical e lateral induzidas pela ação dos pedestres. A análise permitiu identificar parâmetros modais e observar o efeito "lock-in" lateral quando da travessia por grande quantidade de pedestres.

O modelo usado com elementos finitos e o efeito "lock-in" foram usados nos projetos dos amortecedores instalados na passarela. Foram escolhidos amortecedores verticais e laterais. Os amortecedores laterais se mostraram menos eficientes devido ao atrito nas hastes deslizantes da passarela e um comportamento diferente do próprio amortecedor devido à diferença da unidade das massas no equipamento. O amortecedor aumentou o amortecimento de 0,58% para 4%, quando era esperado 7% e também foi mostrado que o amortecedor só é ativado de forma intermitente com um nível mínimo de oscilação de 0,02 m/s², e isso está bem abaixo do limite de conforto para vibrações laterais. Ao ser utilizada uma fórmula baseada na Millennium Bridge de Londres, percebeu-se que seriam necessárias 560 pessoas para produzir o efeito "lock-in", correspondendo a 1 pessoa por m². Na inauguração da passarela essa quantidade de pessoas não foi atingida, logo a estrutura se comportou de forma segura.

Segundo Studnicková [53] se qualquer uma das frequências na vertical fica na faixa de 1 a 3 Hz a resposta dinâmica da estrutura se torna significativa porque essa resposta depende bastante das frequências vertical, horizontal e na torção. Por isso é necessário o cálculo das vibrações utilizando os estados limites últimos. Em relação às frequências horizontais, ou em torção, a mesma situação acontece quando as frequências estão entre 0,5 e 1,5 Hz. Essas faixas de frequência são normalmente encontradas em passarelas com vãos maiores ou estaiadas e suspensas. Passarelas com baixo amortecimento (0,03) e frequências naturais verticais dentro dos limites 1,6 a 2,4 Hz ou 3,3 a 4,5 Hz (primeiro e segundo harmônicos) geralmente reagem ao tráfego de pedestres com uma resposta significante.

Segundo Caprani *et al* [54], antes a maior parte dos testes para determinar a força vertical induzida por caminhada foi feita sobre superfícies rígidas ou não flexíveis, como esteiras, no entanto a superfície deve estar vibrando e o ser humano pode adaptar sua caminhada para chegar a uma situação mais confortável e isso pode causar discrepância entre os níveis de vibração previstos pela teoria e na prática.

O trabalho proposto pelos autores tem como objetivo resolver essa discrepância e quantificar de forma correta a magnitude da interação humanoestrutura por meio de programas experimentais, para isso foram usadas tanto superfícies rígidas como flexíveis (vibratórias) e pessoas caminhando em diferentes faixas de frequência.

O processo é feito com a comparação entre uma resposta de vibração nocional da pisada do pedestre transmitida à superfície rígida e a resposta real causada pela pisada transmitida à superfície flexível. Como citado em outros trabalhos, descobriuse que com o aumento da frequência, aumenta-se a taxa de amortecimento, com este último tornando-se 2 a 3 vezes maior durante a ressonância.

Brunet Jr. *et al* [55] realizaram análises dinâmicas em uma passarela com modelos determinísticos e probabilísticos, com formulações que simulam um modelo de caminhada, um de força e um biodinâmico. Os testes foram realizados com a quantidade de 1 a 6 pedestres trafegando pela passarela. É citado no trabalho que não se encontram, especificamente, os parâmetros de caminhada aleatória, tipo usado pelos autores, sendo assim, foi preciso analisar e definir tais valores. Os testes mostraram que a maioria das amplitudes máximas de aceleração atinge o limite de conforto inaceitável, utilizando o modelo de força; o nível de conforto é melhorado quando se utiliza o modelo biodinâmico.

Yahia *et al* [56] analisou uma passarela da Jordan University of Science and Technology, na Jordânia, devido ao fato de vários pedestres sentirem desconforto ao trafegar. Foram conduzidas investigações experimentais para caminhada, corrida e corrida com várias pessoas na sequência de um, dois, cinco, oito e nove. Como se sabe, os pedestres exercem forças dinâmicas verticais e laterais. Após comparação dos testes com referências importantes, conclui-se que para caminhada diária normal, as acelerações verticais são consideradas aceitáveis, tanto para um quanto para vários pedestres. Alguns códigos especificam excitações que excedem limites de conforto, mas são extremas e não ocorrem normalmente.

Acelerações máximas (vertical e lateral) excederam limites de critérios, mas para padrões mais recentes, como HIVOSS [10] e SÉTRA [9], foram consideradas aceitáveis. Algumas excitações de corrida e caminhada síncrona, consideradas extremas e de pouca ocorrência, são consideradas inaceitáveis. Entende-se que os códigos de projeto mais recentes se preocupam mais que os antigos em estudar os critérios de conforto.

He *et al* [57] ressaltam que o teste experimental é a maneira mais confiável de obter parâmetros dinâmicos do corpo humano. Na dificuldade, principalmente de custo, de se implementar o teste de agitação sobre placa ou mesa com agitador mecânico, o trabalho apresentou um procedimento baseado em transmissibilidade simples para testar propriedades dinâmicas do corpo humano. A agitação é gerada por um agitador humano em movimento rítmico em estrutura flexível, como uma passarela.

Ao encontrarem a força de excitação humana, os autores puderam correlacionar com o movimento do corpo humano via medição de passos e rastreamento de movimentação. A resposta da frequência da estrutura é estabelecida usando força de pisada e aceleração. A transmissão do impacto do pedestre para a estrutura é obtida pela medição no ponto de apoio em relação à posição do corpo sobre a passarela.

O artigo de Han *et* al [58] estuda a sincronização de pessoas que atravessam as passarelas com a frequência horizontal fundamental. Supôs-se que a frequência de caminhar dos pedestres segue uma distribuição de Gauss e que as pessoas ajustam inconscientemente a fase do seu ciclo de caminhada. Foi proposta uma Equação dinâmica não linear variando no tempo. Esse modelo foi usado para análise da Millennium Bridge, em Londres, para produzir sua excessiva vibração lateral. Vários parâmetros são investigados, como frequência de caminhada, sensibilidade das pessoas ao movimento da passarela, frequência da passarela, amortecimento e diferentes condições de carga. Durante os testes os pedestres foram modelados como forças laterais de pisada na passarela, que não são afetadas pelos movimentos da ponte. O modelo de entrada dos pedestres pelas extremidades se mostra mais realista do que caminhar em sentido único. O comprimento do passo e o nível inicial de sincronia entre os pedestres mostrou ter pouco efeito na resposta dinâmica. A homogeneidade das frequências normais da caminhada das pessoas tem um impacto notável nas características de resposta da ponte e no limite crítico de instabilidade. Adicionar mais amortecedores e aumentar a frequência da passarela diminui a vibração e ajuda a controlar a estabilidade dinâmica da estrutura.

Rodríguez-Suesca *et al* [59] apresentam os resultados de sua avaliação de características dinâmicas e desempenho vibratório de oito passarelas deterioradas na Colômbia que apresentam vibração excessiva sob cargas de serviço. Algumas considerações foram feitas. Foi percebida relação entre a deterioração da estrutura e valores de amortecimento para baixas vibrações, com indicação de redução da rigidez da estrutura. Testes de vibração induzida por pedestres mostraram que o efeito do calcanhar em cada passo tem influência significativa na resposta estrutura dinâmica.

Górski *et al* [60] estudaram o efeito da excitação dinâmica em passarelas sob atividades induzidas por humanos, pequenas motocicletas e trens que passavam sob a estrutura. Com os testes feitos por humanos, foi possível identificar modos de torção da estrutura associados às frequências naturais e razões de amortecimento de 4 a 21 Hz e 0,52 a 2,77%, respectivamente. A frequência fundamental f1 = 4,35 Hz ficou dentro da faixa estabelecida pelo EUROCODE e pelo SÉTRA [9]. Atividades normais de pedestres foram induzidas e testadas em pontos no meio do vão. Nesse ponto foi constatado que existe a possibilidade de ressonância com efeitos nocivos das vibrações relacionadas ao segundo harmônico de frequência obtido pelos passos, porém os valores de aceleração de pico se mantiveram dentro do limite crítico para o nível mínimo de conforto de acordo com SÉTRA [9]. Para atividades sincronizadas com mais de um pedestre, foram obtidos resultados de vibrações que excedem o conforto mínimo, entretanto, por ser uma estrutura estaiada, o alto nível de amortecimento de vibrações (em torno de 2,77%) causa rápida dissipação nesses efeitos, diminuindo o tempo em que os pedestres ficam expostos ao fenômeno.

Cuevas *et al* [62] escrevem sobre as vibrações laterais devido ao caminhar de pedestres, citando o efeito "lock-in" que ocorre quando o número de pedestres na passarela atinge o número crítico. Em seu artigo, propõem uma abordagem para

avaliar as vibrações laterais das passarelas esbeltas durante o uso, considerando incertezas na frequência natural e no amortecimento modal e sugerindo que os fatores externos causadores de vibrações são mais significativos quando a quantidade de pedestres ultrapassa o valor crítico. Durante o efeito de "lock-in", o nível de incerteza na magnitude das respostas aumenta consideravelmente.



Figura 9 - Millenium Bridge, Londres, Inglaterra

Este capítulo teve como objetivo apresentar as principais referências bibliográficas estudadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa, visando a análise dinâmica de passarelas de pedestres e avaliação do conforto humano ao caminhar sobre a estrutura.

2. NORMAS E GUIAS DE PROJETOS PARA ANÁLISE

2.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se nortear todo o trabalho em relação ao conhecimento basilar a respeito do tema, cercando-se de normas e guias renomados a respeito do assunto ora tratado, desde normas nacionais a guias internacionais de projeto amplamente utilizados para análises referentes a este tema.

2.2. Norma brasileira NBR 6118/2014

A norma NBR 6118 [2] "estabelece procedimentos e requisitos básicos para o projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, excluindo as de concreto leve, pesado ou outros especiais". O item "23 Ações dinâmicas e fadiga" define que as "ações dinâmicas podem provocar estados-limites de serviço e estados-limites últimos por vibração excessiva ou por fadiga dos materiais" e que "a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais".

A fim de "assegurar um comportamento satisfatório da estrutura sujeita a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit})", dependente do tipo de uso da estrutura, na proporção de f > 1,2 f_{crit}. Para ação de pessoas sobre estruturas, a norma delimita as frequências críticas de acordo com o uso da estrutura. Para passarelas de pedestres a frequência crítica (f_{crit}) é de 4,5 Hz.

2.3. Guia de projeto do AISC/2003

O guia do American Institute of Steel Construction (AISC [5]) é usado como base para avaliação da resposta dinâmica de uma passarela submetida à ação humana. O cálculo da aceleração da estrutura sob caminhar humano se dá com o limite relacionado com a frequência fundamental dessa estrutura e sua destinação de uso. O modelo do AISC considera quatro harmônicos na composição da ação dinâmica, mostrados na Tabela 1. O guia recomenda que sejam comparados os valores de aceleração de pico com a gravidade, sendo a_p/g. Baseando-se em outros trabalhos sobre o tema, recomenda-se a análise desses valores com os valores limites da curva base da ISO 2631/2 [63].

A ação dinâmica é composta pelo harmônico coincidente com a frequência natural da estrutura, caso em que ocorre a ressonância, considerando que os demais fatores não contribuem significativamente na resposta dinâmica.

$$F(t)=P.\alpha_{i}.\cos(2\pi .i.f_{p}.t)$$
(1)

Em que:

F(t) - força representativa da ação dinâmica humana ao longo do tempo (N);

P - peso do indivíduo (N);

αi - coeficiente de Fourier associado ao i-ésimo harmônico da ação dinâmica;

i - múltiplo harmônico da frequência de passo;

f_p - frequência do passo da ação dinâmica humana (Hz);

t - tempo (s).

A Tabela 1 correlaciona os harmônicos, os coeficientes dinâmicos e os ângulos de fase do modelo proposto por AISC [5]. A Tabela 2, por sua vez, correlaciona as frequências de excitação, os harmônicos e os coeficientes dinâmicos para o caminhar humano.

Hormônico	Coeficiente	Ângulo de
паппопісо	dinâmico (α _i)	fase (φi)
1	0,50	0
2	0,20	π/2
3	0,10	π
4	0,05	3π/2

Tabela 1 - Parâmetros de cálculo: Método AISC [5]

Frequência de excitação do passo (fp) e					
coefic	coeficientes dinâmicos (αi)				
Harmônico	Harmônico Caminhada				
I	fp (Hz)	αi			
1	1,6 a 2,2	0,5			
2	3,2 a 4,4	0,2			
3	4,8 a 6,6	0,1			
4	6,4 a 8,8	0,05			

Tabela 2 - Parâmetros do caminhar humano: Método AISC [5]

2.4. Norma ISO 2631-2

Esta norma *International Standard* Organization (ISO) 2631-2 [63] recomenda valores de acelerações limites em função da frequência fundamental da estrutura analisada. A respeito da comparação das acelerações de pico do guia AISC [5] com a gravidade, a Figura 10 mostra a recomendação da ISO 2631-2 sobre os valores dessas acelerações.



Figura 10 - Aceleração de pico em diferentes frequências da estrutura

A ação dinâmica será composta pelo componente harmônico coincidente a frequência natural da estrutura para que ocorra a ressonância, conforme equação (2).

$$F(t) = P.\alpha_{i}.cos(2.\pi.i.f_{p}.t)$$
(2)

F(t): força representativa da ação dinâmica humana ao longo do tempo (N);

P: peso do indivíduo (N);

α: coeficiente de Fourier associado ao i-ésimo harmônico da ação dinâmica;

i: múltiplo harmônico da frequência de passo;

f_p: frequência do passo da ação dinâmica humana (Hz);

t: tempo (s).

Tabela 3 - Faixas de aceleração para conforto humano: vibrações verticais

Harmônico	Caminhada		
	fp (Hz)	αi	
1	1,6 a 2,2	0,5	
2	3,2 a 4,4	0,2	
3	4,8 a 6,6	1	
4	6,4 a 8,8	0,05	

A tabela 3 apresenta as frequências de excitação e os coeficientes dinâmicos associados à atividade de caminhada. Tomando os valores de $f_p e \alpha$ como base, procede-se ao cálculo da resposta dinâmica para a aceleração do sistema, utilizando a tabela (3).

$$\frac{a}{g} = \frac{R.\alpha_{i}.P}{\beta W} \cos(2\pi.i. f_{p}.t)$$
(3)

Onde:

ap/g: razão entre as acelerações do piso e da gravidade;

g: aceleração da gravidade;

R: fator de redução;

W: peso efetivo do piso;

β: coeficiente de amortecimento modal;

a: coeficiente dinâmico da componente harmônica da força;

i: múltiplo harmônico da frequência do passo;

f p: frequência do passo da ação dinâmica humana; t: tempo.

2.5. Guia de projeto SÉTRA

Esse guia considera, para a análise da resposta dinâmica, os efeitos dinâmicos do fluxo de pedestres caminhando de forma aleatória sobre a estrutura. Essa análise passa a considerar não somente um pedestre, mas um fluxo de pedestres, ou seja, uma quantidade de pessoas caminhando aleatoriamente sobre a passarela. Visando diferenciar o fluxo de grupo de pedestres, entende-se por grupo um conjunto de pessoas caminhando de forma sincronizada, estando eles em fase entre si, já no fluxo, apenas parte dessas pessoas estão em fase entre si.

O guia propõe ainda a classificação das passarelas em quatro classes distintas:

- Classe IV: raramente utilizadas, construídas em áreas pouco habitadas ou para assegurar a continuidade da caminhada de pedestres sobre rodovias. Assim, não precisam ser avaliadas dinamicamente.
- Classe III: empregadas para uso padrão e ocasionalmente são submetidas ao carregamento associado ao fluxo de pedestres, que neste caso é de 0,5 pedestre/m².
- Classe II: urbanas construídas para ligar áreas populosas submetidas a tráfego pesado e ocasionalmente toda sua área é submetida ao carregamento de pedestres, que neste caso é de 0,8 pedestre/m².
- Classe I: urbanas construídas em áreas com alta concentração de pedestres (estações de trem, estádios de futebol, etc.), submetidas frequentemente a tráfego pesado, que neste caso é de 1,0 pedestre/m².

O guia propõe patamares de aceleração de pico para avaliação do conforto humano para vibrações verticais, de acordo com a Tabela 4, e para vibrações horizontais, de acordo com a Tabela 5. Em ambas as relações o conforto pode chegar ao nível inaceitável, impossibilitando o caminhar normal do pedestre sobre a estrutura.

Faixa de aceleração (m/s ²)	0,0 - 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 2,5	> 2,5
Faixa 1	Máximo			
Faixa 2		Médio		
Faixa 3			Mínimo	
Faixa 4				Inaceitável

Tabela 4 - Faixas de aceleração para conforto humano: vibrações verticais

Tabela 5 - Faixas de aceleração para conforto humano: vibrações horizontais

Faixa de aceleração (m/s²)	0,0 - 0,15	0,15 - 0,30	0,30 - 0,80	> 0,80
Faixa 1	Máximo			
Faixa 2		Médio		
Faixa 3			Mínimo	
Faixa 4				Inaceitável

A Tabela 6 mostra as faixas de frequências naturais com maior probabilidade de ocorrência do fenômeno da ressonância, quando a frequência natural da estrutura é igual ou próxima da frequência da excitação. O guia ainda separa a análise em três casos, dependendo da classe da passarela e a faixa de frequências, de acordo com a Tabela 7. Para o cálculo da Força Dinâmica, o guia recomenda fórmulas que variam com a direção do carregamento para as Classes de I a III, segundo as Tabelas 8 e 9.

Tabela 6 - Risco de ressonância em cada faixa de aceleração

Aceleração (m/s²)	0,0-1,0	1,0-1,7	1,7-2,1	2,1-2,6	2,6-5,0	>5,0
Faixa 1			Máximo			
Faixa 2		Médio		Médio		
Faixa 3					Mínimo	
Faixa 4	Negligenciável					Negligenciável

Tabela 7 - Casos de carregamentos: verificação da resposta dinâmica

Casos de carregamentos para verificação das acelerações máximas				
Fluxo de	Classe da	Faix	as de frequência	(Hz)
pedestres	passarela	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
Esparso	III	Casa 1	Não	Não
Denso	II	Casul	Caso 1	
Intenso	I	Caso 2	Caso 2	Caso 3

Direção	Carregamento por m ²	
Vertical (v)	d*(280N)*cos(2πf _v t)*10,8*(ξ/n) ^{1/2*} ψ	
Longitudinal (I)	d*(140N)*cos(2πf _v t)*10,8*(ξ/n) ^{1/2*} ψ	
Transversal (t)	d*(35N)*cos(2πf _v t)*10,8*(ξ/n) ^{1/2*} ψ	

Tabela 8 - Cálculo da força dinâmica: classes II e III.

Tabela 9 - Cálculo da força dinâmica: classe I.

Direção	Carregamento por m ²	
Vertical (v)	1*(280N)*cos(2πf _v t)*1,85*(ξ/n) ^{1/2*} ψ	
Longitudinal (I)	1*(140N)*cos(2πf _v t)*1,85*(ξ/n) ^{1/2*} ψ	
Transversal (t)	1*(35N)*cos(2πf _v t)*1,85*(ξ/n) ^{1/2*} ψ	

Quando a passarela se encontra fora da faixa de ressonância do caminhar, o guia recomenda o uso de um fator de redução da resposta dinâmica (ψ). A Figura 11 e a Figura 12 representam os fatores de redução da resposta dinâmica de passarelas de pedestres para o 1º e o 2º harmônico.



Figura 11 - Fator redutor da resposta dinâmica (ψ) no 1º harmônico



Figura 12 - Fator redutor da resposta dinâmica (ψ) no 2º harmônico

2.6. Guia de projeto HIVOSS

Human Induced Vibration Of Steel Structures (HIVOSS [10]) apresenta uma metodologia com algumas diferenças para o SÉTRA [9], porém com resultados muito próximos. O processo se inicia com o cálculo das frequências naturais da estrutura, depois a verificação do intervalo de frequências críticas para vibrações verticais e longitudinais (1,25 Hz \leq f \leq 2,3 Hz), também para as transversais (0,50 Hz \leq f \leq 1,2 Hz). Entretanto, para evitar que as estruturas com frequências naturais entre 2,5 Hz e 4,6 Hz sejam excitadas pelo 2º harmônico da carga, o guia sugere que o intervalo crítico seja expandido para um intervalo entre 1,25 Hz \leq f \leq 4,6 Hz. O próximo passo define os casos de carga em função da classe de tráfego esperado e do nível do conforto, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 -	Classe	de tráfego	: Método	HIVOSS
-------------	--------	------------	----------	--------

Tráfego	Densidade d	Descrição	Características
TC 1	15 pessoas d = 15P/B*L	Tráfego muito fraco	B = largura; L = comprimento
TC 2	d = 0,2 P/m ²	Tráfego fraco	Confortável e caminhar livre
TC 3	d = 0,5 P/m²	Tráfego denso	Caminhar ainda não restringido
TC 4	d = 1,0 P/m ²	Tráfego muito denso	Liberdade de movimento é restringida
TC 5	d = 1,5 P/m²	Tráfego excepcionalmente denso	Caminhar desagradável

Além disso, o guia também especifica as classes de conforto, definidas de acordo com a aceleração máxima da estrutura, conforme Tabela 11. Após a definição dos parâmetros de amortecimento conforme Tabela 12, procede-se o cálculo das acelerações máximas utilizando a Equação (3).

Tabela 11 - Classe e nível de conforto de acordo com a aceleração

Classe de	Nível de	Aceleração limite -	Aceleração limite -
conforto	conforto	vertical	horizontal
CL 1	Máximo	< 0,50 m/s²	< 0,10 m/s²
CL 2	Médio	0,50 a 1,00 m/s²	0,10 a 0,30 m/s²
CL 3	Mínimo	1,00 a 2,5 m/s²	0,30 a 0,80 m/s²
CL 4	Inaceitável	> 2,50 m/s²	> 0,80 m/s²

Tipo de construção	ξmínimo	ξ médio
Concreto armado	0,8%	1,3%
Concreto protendido	0,5%	1,0%
Estrutura mista	0,3%	0,6%
Estrutura metálica	0,2%	0,4%
Estrutura de madeira	1,0%	1,5%
Stress-Ribbon	0,7%	1,0%

Tabela 12 - Amortecimento recomendado pela metodologia HIVOSS [10]

$$P(t)=P.\cos(2\pi f_{p}.t)n\psi \quad [N/m^{2}]$$
(3)

Em que:

P: componente da força de um pedestre isolado, que varia conforme a direção do modo de vibração em estudo;

f_p: frequência de passo, assumida igual à frequência própria da estrutura para o modo de vibração em estudo;

n': número de pedestres equivalente, definido com base na densidade do fluxo;

 ψ : coeficiente de redução que considera a probabilidade da frequência de passo se aproximar da frequência própria da estrutura;

t: tempo.

3. MODELOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO

3.1. Introdução

A análise do caminhar humano tem como objetivo avaliar o efeito do carregamento dinâmico aplicado sobre a estrutura da passarela. Neste capítulo serão apresentados os modelos utilizados para as análises feitas neste trabalho, sendo eles: AISC, Bachmann, Kerr, além da utilização de modelos biodinâmicos representativos do caminhar humano e, ainda, haverá uma comparação com as proposições feitas pelos guias SÉTRA [9] e HIVOSS [10]. Conforme a Figura 13 mostra, divide-se a carga F(t) em cargas nodais que representam cada passo em um ciclo de passo, assim é possível modelar a trajetória em que o pedestre caminha, saber seu comprimento de passo (L_p), frequência (f_p) e velocidade (v_p).



Figura 13 - Ciclo do passo e carga F(t) aplicada nos pontos

3.2. Modelo de AISC

Na modelagem do caminhar humano são consideradas a frequência e a distância do passo, ambas variando com a velocidade que a pessoa desenvolve durante o tempo. Esse movimento de caminhada pode ser dividido em lento, normal e rápido, visto na Tabela 14. Para essa análise considera-se que a força vertical exercida por cada pé tem magnitude igual e periodicidade. O passo do caminhar se dá em um certo tempo em um certo espaço, ambos dependentes da frequência (f_p) desse passo, seu comprimento (L_p) e sua velocidade (v_p). Tais parâmetros diferenciam-se em tipos de caminhada e de corrida, conforme a Tabela 14.

$$F(t)=Q+\sum_{i=1}^{N}\alpha_{i}Qsen(2\pi i f_{p}t-\phi_{i})$$
(4)

Em que:

- F(t) Função de carregamento dinâmico (N);
- Q Peso do pedestre (N);
- N Número total de harmônicos contribuintes;
- i Número de ordem do harmônico;
- αi Fator dinâmico para a força harmônica;
- f_{step} Frequência do passo (Hz);
- t Tempo do carregamento (s);
- φi Ângulo de fase i harmônico (rad).

Harmônico	Coeficiente	Ângulo de
(i)	dinâmico (α _i)	fase (fi)
1	0,50	0
2	0,20	π/2
3	0,10	π
4	0,05	π/2

Tabela 13 - Harmônicos: modelo AISC [5]

Movimento	f _p (Hz)	v _p (m/s)	L _p (m)
Caminhada lenta	1,70	1,10	0,60
Caminhada normal	2,00	1,50	0,75
Caminhada rápida	2,30	2,20	1,00
Corrida lenta	2,50	3,30	1,30
Corrida rápida	3,20	5,50	1,75

Tabela 14 - Característica do caminhar humano

Da Figura 14 à Figura 16 são representados os gráficos no domínio do tempo e da frequência do modelo AISC para ME-I, ME-II e ME-III, considerando a frequência de passo dos pedestres em cada um os três modelos estruturais. Percebem-se os picos nos gráficos Força (N) x Frequência (Hz) resultantes das frequências de passo.



Figura 14 - Força dinâmica tempo e frequência: ME-I (fp =2,40 Hz) AISC [5]



Figura 15 - Força dinâmica tempo e frequência: ME-II (fp =2 Hz) AISC [5]



Figura 16 - Força dinâmica tempo e frequência: ME-III (fp =2,15 Hz) AISC [5]

3.3. Modelo de Bachmann e Ammann

Segundo Bachmann e Ammann [1] o caminhar humano produz um carregamento dinâmico que pode ser descrito pela Série de Fourier expressa na Equação (5). Essa Equação leva em consideração o peso do pedestre, a frequência do passo, o tempo despendido para o carregamento e o número de harmônicos que contribuem para a composição da análise do movimento. Ao incluírem na Equação a frequência do passo, os autores estavam levando em consideração o tipo de movimento realizado, seja caminhada ou corrida. Os resultados da força dinâmica para as caminhadas lenta, normal e rápida, baseados nas características da Tabela 14, são apresentados da Figura 17 à Figura 19, que representam os gráficos no domínio do tempo e da frequência do modelo Bachmann para ME-I, ME-II e ME-III.

$$F(t) = P\left[1 + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cos(2\pi i f_p t + \phi_i)\right]$$
(5)

Em que:

- F(t) Função de carregamento dinâmico (N);
- P Peso do pedestre (N);
- n Número total de harmônicos contribuintes;
- i Número de ordem do harmônico;
- αi Fator dinâmico para a força harmônica;
- fp Frequência do passo (Hz);
- t Tempo do carregamento (s);
- ϕ_i Ângulo de fase i harmônico (rad).

Harmônico	Coeficiente	Ângulo de
(i)	dinâmico (αi)	fase (fi)
1	0,37	0
2	0,10	π/2
3	0,12	π/2
4	0,04	π/2
5	0,08	π/2

Tabela 15 - Harmônicos: modelo Bachmann [1]











Figura 19 - Espectro de resposta: ME-III (fp =2,15 Hz) Bachmann [1]

3.4. Modelo de Kerr

O autor realizou trabalhos que analisaram as ações dinâmicas do caminhar humano baseando-se em ensaios experimentais em escadas metálicas com o uso de acelerômetros, obtendo a resposta dinâmica da estrutura com as pessoas caminhando individualmente ou em grupo. Assim como para os modelos AISC [5] e Bachmann [1], a força exercida pelo pedestre na estrutura depende da velocidade e da frequência do passo.

A Equação (6), assim como para os outros modelos, relaciona o peso do pedestre com a frequência do passo e com os harmônicos contribuintes. Da Figura 20 à Figura 22 há a representação dos gráficos no domínio do tempo e da frequência do modelo Kerr para ME-I, ME-II e ME-III.

$$F(t) = G \sum_{i=1}^{II} \alpha_i \cos(2\pi i f_p t - \phi_i)$$
(6)

Em que:

F(t) - Função de carregamento dinâmico (N);

G - Peso do pedestre (N);

- n Número total de harmônicos contribuintes;
- i Número de ordem do harmônico;
- αi Fator dinâmico para a força harmônica;
- fp Frequência do passo (Hz);
- t Tempo do carregamento (s);
- φi Ângulo de fase i harmônico (rad).

Tabela	16 -	Harmônicos:	modelo	Kerr	[6]
Tabola	10	nannoniooo.	modolo	1.011	[~]

α ₁ (f _p) = -0,27	f ³ p + 1,32
α2 = 0,07	f ² p - 1,76
α3 = 0,06	f _p + 0,76







Figura 21 - Espectro de resposta: ME-II (fp =2 Hz) Kerr [6]



Figura 22 - Espectro de resposta: ME-III (fp =2,15 Hz) Kerr [6]

3.5. Modelos Biodinâmicos (interação dinâmica pedestre-estrutura)

Objetivando simular de maneira mais realista o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura, neste trabalho de pesquisa são utilizados modelos biodinâmicos simplificados representativos de pessoas caminhando, nos quais somente a dinâmica vertical do caminhar é considerada. A representação destes modelos biodinâmicos surgiu da necessidade de complementar o modelo de força largamente utilizado

(modelos de força dura ou "only force models"), com base em um modelo dotado de massa, rigidez e amortecimento, de maneira a considerar as contribuições dinâmicas dos pedestres sobre a estrutura investigada.

Deste modo, neste trabalho de pesquisa os pedestres são modelados numericamente como um sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), em conjunto com uma força que se move com velocidade v(t) e exerce uma força $F_p(t)$ sobre a estrutura (Figura 23). A força $F_p(t)$ foi definida com base no modelo matemático proposto por Kerr [6], considerando-se que este foi o modelo que mais se aproximou dos resultados experimentais desenvolvidos anteriormente por Aguiar [8]. Os parâmetros dos modelos biodinâmicos foram considerados conforme descritos por Silva e Pimentel [64] e Silva et al. [65], que propuseram três equações empíricas para o caminhar humano baseados em testes com 20 indivíduos (11 homens e 9 mulheres) sobre uma superfície rígida. As três equações empíricas para massa (m_p), amortecimento (c_p) e rigidez (k_p) do pedestre são descritas pela Equação (6), que relaciona massa dos indivíduos e massa da estrutura com a frequência de passo f_p.

$$\begin{cases} m(f_p, M) = -231,34+3,69M+154,06f_p -1,97Mf_p+0,005M^2 -15,25f_p^2 \\ c(M, m) = -1115,69+92,56M-108,94m+2,91Mm-1,33M^2 -1,30m^2 \\ k(M, f_p) = 75601,45-1295,32M-33786,95f_p+506,44Mf_p+3,59M^2 +539,39f_p^2 \end{cases}$$
(6)

Em que:

fp - frequência de passo

M - massa da estrutura

m - massa do indivíduo



Figura 23 - Sistema massa-mola-amortecedor na estrutura (Debona [3])
4. MODELOS ESTRUTURAIS DAS PASSARELAS

4.1. Introdução

Os três modelos estudados neste trabalho se referem a passarelas reais localizadas na cidade do Rio de Janeiro. Neste capítulo serão apresentados os modelos estruturais de cada uma delas, que serviram para as análises descritas neste trabalho.

4.2. Modelo Estrutural I (ME-I)

Estrutura mista aço-concreto composta por perfis metálicos laminados ASTM A572 e laje de concreto. Passarela possui duas treliças metálicas interligadas banzos superiores e inferiores, que formam contraventamentos horizontais e piso em laje de concreto. Os parâmetros da estrutura estão dispostos da Tabela 17 a Tabela 19 e as vistas da Figura 24 à Figura 27.

Tabela 17 - Dimensões estrutura mista aço-concreto

Treliças metálicas – comprimento	32 m
Treliças metálicas - altura	2,50 m
Laje de concreto - espessura	0,10 m
Laje de concreto - largura	2,00 m

Tabela 18 - Parâmetros da estrutura metálica

Escoamento do aço (f _y)	345 MPa
Módulo de elasticidade (E)	205 GPa
Massa específica (ρ _a)	7850 kg/m³
Coeficiente de Poisson (va)	0,3

Tabela 19 - Parâmetros da estrutura de concreto

Resistência à compressão (fck)	30 MPa
Módulo de elasticidade (Ecs)	26 GPa
Massa específica (ρ _c)	2500 kg/m³
Coeficiente de Poisson (v _c)	0,2



Figura 24 - Vista frontal da passarela [11]







Figura 26 - Vista inferior da passarela [11]



Figura 27 - Corte transversal da passarela [11]

4.3. Modelo Estrutural II (ME-II)

Estrutura mista aço-concreto composta por perfis metálicos formados a frio USIC SAC 300 e laje de concreto armado. Passarela possui ligações soldadas, duas treliças metálicas interligadas banzos superiores e inferiores, que formam contraventamentos horizontais e piso em laje de concreto. Os parâmetros da estrutura estão dispostos da Tabela 20 a Tabela 22 e as vistas da Figura 28 à Figura 31.

Tabela 20 - Dimensões estrutura mista aço-concreto

Treliças metálicas – comprimento	36 m
Treliças metálicas - altura	2,55 m
Laje de concreto - espessura	0,10 m
Laje de concreto - largura	2,00 m

Tabela 21 - Parâmetros da estrutura metálica

Escoamento do aço (f _y)	300 MPa
Módulo de elasticidade (E)	205 GPa
Massa específica (ρ _a)	7850 kg/m³
Coeficiente de Poisson (va)	0,3

Tabela 22 - Parâmetros da estrutura de concreto

Resistência à compressão (f _{ck})	20 MPa
Módulo de elasticidade (E _{cs})	21 GPa
Massa específica (ρ _c)	2500 kg/m³
Coeficiente de Poisson (v _c)	0,2



Figura 28 - Vista frontal da passarela [11]



Figura 29 - Vista superior da passarela [11]



Figura 30 - Vista inferior da passarela [11]



Figura 31 - Corte transversal da passarela [11]

4.4. Modelo Estrutural III (ME-III)

Estrutura mista aço-concreto composta por perfis metálicos formados a frio USIC SAC 300 e laje de concreto armado. Passarela possui ligações soldadas, duas treliças metálicas interligadas banzos superiores e inferiores, que formam contraventamentos horizontais e piso em laje de concreto. Os parâmetros da estrutura estão dispostos da Tabela 23 a Tabela 25 e as vistas da Figura 32 à Figura 34.

Treliças metálicas – comprimento	27,2 m
Treliças metálicas - altura	1,40 m
Laje de concreto - espessura	0,10 m
Laje de concreto - largura	2,00 m

Tabela 23 - Dimensões estrutura mista aço-concreto

Tabela 24 - Parâmetros da estrutura metálica

Escoamento do aço (f _y)	300 MPa
Módulo de elasticidade (E)	205 GPa
Massa específica (ρ _a)	7850 kg/m³
Coeficiente de Poisson (va)	0,3

Tabela 25 - Parâmetros da estrutura de concreto

Resistência à compressão (fck)	20 MPa
Módulo de elasticidade (Ecs)	21 GPa
Massa específica (ρ _c)	2500 kg/m ³
Coeficiente de Poisson (v _c)	0,2



Figura 32 - Planta baixa da passarela [11]



Figura 33 - Corte longitudinal da passarela [11]



Figura 34 - Corte transversal da passarela [11]

5. MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

5.1. Introdução

Objetivando-se modelar o caminhar humano sobre a passarela foi utilizado o programa ANSYS [7]. Assim, este capítulo apresenta o processo dessa modelagem e sua discretização em elementos finitos que permitem modelar e analisar os efeitos do caminhar humano sobre a estrutura. Tratando-se de uma análise de conforto humano baseado no caminhar sobre uma estrutura, faz-se necessário entender em quais partes da passarela o pé humano fará contato, exercendo sobre essa região a carga representativa do pedestre. Para isso identifica-se cada nó em que a pessoa pisará, a distância entre os nós e a distância entre os passos.

Em relação a essa modelagem, foi considerado que concreto e aço trabalham no regime linear-elástico, com suas seções permanecendo planas no estado deformado. Também se considerou a hipótese de Bernoulli, que diz que as seções transversais dos elementos finitos permanecem planas ante um carregamento aplicado. Não houve restrições aos graus de liberdade da rotação porque a estrutura foi considerada como apoiada.

5.2. Elementos finitos utilizados de acordo com o programa ANSYS

Objetivando a modelagem da estrutura metálica da passarela, foi usado o comando BEAM44 (Figura 35), que considera os efeitos de flexão e torção, apresentando seis graus de liberdade por nó nas direções x, y e z, em translação e rotação.



Figura 35 - Elemento BEAM44

Objetivando a modelagem da estrutura de concreto do piso da passarela, foi usado o elemento SHELL63 (Figura 36), que também apresenta seis graus de liberdade por nó nas direções x, y e z, em translação e rotação, além de permitir utilizar materiais com propriedades ortotrópicas.



SHELL63: estrutura de concreto do piso

Figura 37 - Representação do uso dos elementos BEAM44 e SHELL63

5.3. Modelos em elementos finitos das passarelas investigadas

Utilizando a combinação desses elementos, foi possível montar no programa ANSYS [7] o modelo em elementos finitos das três estruturas analisadas. Neste item serão demonstrados os três modelos analisados (ME-I, ME-II e ME-III), seus graus de liberdade, número de nós e elementos. Para cada modelo haverá, além de uma tabela com as características citadas anteriormente, vistas variadas para melhor compreensão do modelo em elementos finitos.

Graus de liberdade	14556
Nós	2448
Elementos	2836
BEAM44	1812
SHELL63	1024

Tabela 26 - Características do ME-I



Figura 38 - Vista isométrica do ME-I



Figura 39 - Vista superior do ME-I



Figura 40 - Vista frontal do ME-I



Figura 41 - Vista inferior do ME-I

Tabela 27 -	Características	do ME-II
-------------	-----------------	----------

Graus de liberdade	18588
Nós	3100
Elementos	3506
BEAM44	2534
SHELL63	1152







Figura 43 - Vista superior do ME-II



Figura 44 - Vista frontal do ME-II



Figura 45 - Vista inferior do ME-II

Tabela 28 - Características do ME-III

Graus de liberdade	17682
Nós	2985
Elementos	3374
BEAM44	2014
SHELL63	1360



Figura 46 - Vista isométrica do ME-III



Figura 47 - Vista superior do ME-III



Figura 48 - Vista frontal do ME-III



Figura 49 - Vista inferior do ME-III

5.4. Modelagem da interação pedestre-estrutura no programa ANSYS

Buscando a interação pedestre-estrutura com modelos biodinâmicos, foi usado no programa ANSYS [7] o elemento COMBIN40, conforme ilustrado na Figura 50, que representa o elemento massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL). Um nó é criado coincidindo com o nó existente na estrutura onde o pedestre pisa e o elemento faz o acoplamento desses dois nós. Esse elemento é definido por dois nós, um coeficiente de mola e um coeficiente de amortecimento, podendo ser usado para tração, compressão e torção em torno de seu eixo. Possui seis graus de liberdade em cada nó, três para translação e três para rotação. Esse elemento substitui a utilização do COMBIN14 que necessitava ser somado ao elemento MASS21 para adicionar massa ao sistema.



Figura 50 - Elemento COMBIN40 (ANSYS [7])

6. ANÁLISE MODAL

6.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é demonstrar as frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) de cada estrutura, utilizando a análise modal no programa ANSYS [7], com os modelos estruturais em elementos finitos apresentados no capítulo anterior. Para isso analisa-se o comportamento da estrutura sob vibração livre, ou seja, a passarela é retirada de seu equilíbrio estático e permanece vibrando livremente sem qualquer interferência dinâmica externa.

É importante que a frequência fundamental da estrutura não se aproxime, ou mesmo se iguale, à frequência de passo do pedestre (ou um de seus valores múltiplos), que para este trabalho é de 2,15 Hz para o ME-I, 2,00 Hz para o ME-II e 2,40 Hz para o ME-III, a fim de se evitar o fenômeno da ressonância, em que há amplificação da resposta dinâmica, gerando vibrações excessivas.

6.2. Passarelas sem a consideração dos modelos biodinâmicos

Neste item, considerando a modelagem vista no item 5, serão apresentadas as passarelas dos modelos ME-I, ME-II e ME-III, com seus modos de vibração, frequências naturais, período, massa, rigidez e amortecimento modal. Serão apresentadas frequências para os quatro primeiros modos de vibração devido ao fato de as normais nacionais recomendarem a análise até 10 Hz.

No primeiro modo de vibração, percebe-se que a frequência se aproxima do 2º harmônico da frequência de passo para a caminhada rápida sobre a passarela, podendo ocasionar o fenômeno da ressonância e, com isso, gerar vibrações excessivas na estrutura. Cada um dos seis modos de vibração da estrutura é apresentado da Figura 51 à Figura 54.



Figura 51 - 1º modo de vibração: ME-I (f_{01} = 4,83 Hz: flexão vertical)



Figura 52 - 2º modo de vibração: ME-I (f₀₂ = 6,13 Hz: torção horizontal)



Figura 53 - 3º modo de vibração: ME-I (f₀₃ = 8,33 Hz: torção horizontal)



Figura 54 - 4º modo de vibração: ME-I (f₀₄ = 12,29 Hz: flexão vertical)

Considerando-se que o máximo valor de frequência de passo que um humano consegue alcançar é em torno de 10 Hz, com os três primeiros modos do ME-I seria possível analisar corretamente a vibração estrutural.

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Período	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
f 01	4,83	0,21	11066,94	10207674,34	6684,62
f 02	6,13	0,16	5450,32	8096833,35	4309,91
f 03	8,33	0,12	9889,48	27116260,78	11939,94
f ₀₄	12,29	0,08	2117,59	12623164,88	4816,94

Tabela 29 - Frequências naturais e modos de vibração: ME-I

Assim como acontece com o ME-I, no primeiro modo de vibração, percebe-se que a frequência se aproxima do 2º harmônico da frequência de passo para a caminhada normal sobre a passarela, podendo ocasionar o fenômeno da ressonância e, com isso, gerar vibrações excessivas na estrutura. Cada um dos quatro modos de vibração da estrutura é apresentado da Figura 55 à Figura 58.









d) Vista superior

Figura 55 - 1° modo de vibração: ME-II (f_{01} = 4,04 Hz: torção vertical)







Figura 56 - 2º modo de vibração: ME-II (fo2 = 5,52 Hz: flexão horizontal)



b) Vista lateral



Figura 57 - 3º modo de vibração: ME-II (f₀₃ = 7,50 Hz: torção)





Figura 58 - 4º modo de vibração: ME-II (f₀₄ = 10,95 Hz: flexão vertical)

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Período	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
f 01	4,04	0,25	11594,61	7477000,85	5936,55
f 02	5,52	0,18	6044,60	7277265,56	4215,37
f 03	7,50	0,13	3848,17	8543074,61	3980,13
f 04	10,95	0,09	9773,39	46218340,57	18239,05

Tabela 30 - Modos de vibração e Frequências naturais do ME-II

Considerando-se que o máximo valor de frequência de passo que um humano consegue alcançar é em torno de 10 Hz, com os quatro primeiros modos do ME-II seria possível analisar corretamente a vibração estrutural. Na caracterização de cada modo de vibração, tem-se que para os modos 1 e 4 há flexão na vertical. Para o modo 2 há flexão na horizontal. Para o modo 3 há torção, rotacionando a estrutura no eixo Z.

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Período	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
f 01	4,29	0,23	10231,21	7447034,66	5520,06
f 02	5,32	0,19	3681,53	4107848,62	2459,84
foз	10,23	0,10	9253,85	38258623,02	15444,91
f 04	14,03	0,07	9573,56	74418506,41	27529,87

Tabela 31 - Modos de vibração e Frequências naturais do ME-III

Assim como acontece nos modelos ME-I e ME-II, no primeiro modo de vibração, percebe-se que a frequência se aproxima do 2º harmônico da frequência de passo para a caminhada normal ou para a caminhada rápida sobre a passarela, podendo ocasionar o fenômeno da ressonância e, com isso, gerar vibrações excessivas na estrutura. Cada um dos quatro modos de vibração da estrutura é apresentado da Figura 59 à Figura 62.







Figura 59 - 1° modo de vibração: ME-III (f_{01} = 4,29 Hz: flexão vertical)





d) Vista superior

Figura 60 - 2º modo de vibração: ME-III (fo2 = 5,32 Hz: rotação horizontal)





Figura 61 - 3º modo de vibração: ME-III (f₀₃ = 10,23 Hz: rotação horizontal)







Figura 62 - 4º modo de vibração: ME-III (f₀₄ = 14,03 Hz: flexão vertical)

6.3. Efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura

Considerando cada pedestre trafegando pela passarela, o aumento da parcela da massa no sistema massa-mola-amortecedor reduz, com o incremento do número de pessoas, as frequências obtidas pela análise modal da estrutura. Com o objetivo de analisar a influência dos biodinâmicos representativos das pessoas sobre a passarela, estes foram dispostos ao longo da estrutura de forma simétrica e foi realizada a análise modal da passarela.

Foram realizados testes com os pedestres caminhando em uma, duas e três fileiras, sempre alocadas o mais próximo possível do centro da passarela, buscando haver simetria e posicionar os pedestres no vão central devido a ser essa região a mais suscetível a deformações sob o carregamento dinâmico exercido sobre a estrutura. Com o aumento da massa modal da estrutura, as molas atuam intensificando o deslocamento estrutural e desfavorecendo o sistema, assim a frequência se reduz. Nos gráficos da Figura 63 à Figura 65, têm-se a relação das

frequências de ME-I, ME-II e ME-III, respectivamente, com a razão entre as massas dos indivíduos que caminham pela passarela (Mi) e a massa da própria passarela (Mp).



Figura 63 - Variação da frequência fundamental: ME-I



Figura 64 - Variação da frequência fundamental: ME-II



Figura 65 - Variação da frequência fundamental: ME-III

6.4. Relação das características da passarela com o número de pedestres

A Tabela 32 apresenta a variação da massa modal dos três modelos estruturais analisados (ME-I, ME-II e ME-III) com o acréscimo de pedestres caminhando sobre a estrutura, a Tabela 33 apresenta a variação da rigidez modal para o mesmo acréscimo de pedestres e, por fim, a Tabela 34 apresenta o amortecimento modal para o mesmo acréscimo de pedestres.

Nº pedestres	ME-I	ME-II	ME-III
0	11066	11594	10231
5	54,000	205,639	162,012
10	259,069	416,355	344,826
16	401,300	692,028	529,529
21	534,847	914,400	697,172
32	773,555	1380,458	953,447
64	1168,740	2475,374	1436,142

Tabela 32 - Variação da massa modal (kg) com o acréscimo de pedestres

Nº pedestres	ME-I	ME-II	ME-III
5	23385,49	69427,26	59543,67
10	110445,94	137982,76	123968,82
16	169383,45	224031,67	186985,97
21	223714,96	291291,97	242736,91
32	318653,30	426427,66	324880,01
64	470588,36	719254,06	472703,70

Tabela 33 - Variação da rigidez modal (N/m) com o acréscimo de pedestres

Tabela 34 - Variação do amortecimento modal (Ns/m) com o acréscimo de pedestres

Nº pedestres	ME-I	ME-II	ME-III
5	22,47	76,13	62,31
10	106,98	152,88	131,29
16	164,90	251,55	199,98
21	218,79	330,10	261,63
32	314,08	491,93	354,39
64	469,29	860,22	525,78

Tabela 35 - Recomendações dos guias nacionais e internacionais de projeto

Método	f ₀₁ (Hz)	
AISC e NBR 6118/2014	> 2,40 ou < 1,66	
SÉTRA	> 2,10 ou <1,70	
HIVOSS	> 2,3 ou <1,25	

Tabela 36 - Variação das frequências: força dura x biodinâmico

Modelo	Força dura	Biodinâmico	Diferença (%)
ME-I	4,80 Hz	3,20 Hz	34
ME-II	4,00 Hz	2,70 Hz	32
ME-III	4,30 Hz	2,90 Hz	36

As frequências naturais da estrutura obtidas para ME-I, $f_{01} = 4,83$ Hz, ME-II, $f_{01} = 4,04$ Hz e ME-III, $f_{01} = 4,30$ Hz, encontram-se dentro das recomendações dos guias nacionais e internacionais de projeto, segundo a Tabela 35. A Tabela 36 mostra a frequência natural das estruturas analisadas com modelos de força dura e com biodinâmicos. Nota-se a redução no valor das frequências porque o uso dos biodinâmicos implica em a estrutura estar sob o efeito do amortecimento e ter

aumentada a quantidade de massa sobre ela. A variação percentual entre as frequências ficou em média 34% menor para as encontradas usando-se os modelos com biodinâmicos.

7. ANÁLISES DE VIBRAÇÃO FORÇADA

7.1. Introdução

A análise de vibração forçada simula o efeito do caminhar humano sobre a passarela e pode ser feita de duas formas: modelo de força dura e modelo com biodinâmicos da interação pedestre-estrutura. Esta análise é feita considerando as frequências de passo do pedestre, podendo ser lenta, normal ou rápida.

Nos modelos de força dura, a frequência do passo humano é igualada à frequência natural da estrutura, causando o fenômeno da ressonância, com coeficiente de amortecimento estrutural ξ =0,01 (1%). No uso dos biodinâmicos incluem-se na análise o amortecimento, a rigidez e a massa do pedestre aplicados sobre a estrutura na hora da caminhada.

A análise será comparada com os modelos propostos por SÉTRA [9] e HIVOSS [10] sobre o caminhar humano de multidões em passarelas de pedestres para se chegar ao valor da aceleração de pico (a_p) e o resultado em relação ao conforto humano no caminhar sobre a estrutura.

7.2. Tipos de caminhada

Variam-se as características de velocidade, frequência e comprimento do passo para se chegar o mais perto possível do caminhar humano real. Assim, chegase aos tipos de caminhada lenta, normal e rápida, conforme Tabela 37. As análises de vibração forçada, seja por "força dura", seja utilizando biodinâmicos, passam pelo entendimento do tipo de caminhada que o pedestre utiliza ao trafegar pela passarela.

Pedestres	fp (Hz)	V _p (m/s)	L _p (m)
Caminhada lenta	1,70	1,10	0,60
Caminhar normal	2,00	1,50	0,75
Caminhar rápido	2,30	2,20	1,00
Corrida lenta	2,50	3,30	1,30
Corrida rápida	> 3,20	> 5,50	1,75

Tabela 37 - Características do caminhar humano

Modelo	fp (Hz)	V _p (m/s)	L _p (m)	Caminhar
ME-I	2,40	2,40	1,00	Rápido
ME-II	2,00	1,50	0,75	Normal
ME-III	2,15	2,15	1,00	Normal/rápido

Tabela 38 - Características do caminhar humano das passarelas investigadas

7.3. Situações de carregamento analisadas

Foram analisadas situações com pedestres caminhando em trajetória retilínea e aleatória, ambas com um, dois e três pedestres espaçados de acordo com o comprimento do passo referente à cada modelo estrutural. Para as duas trajetórias, quando analisados o caminhar de dois ou três pedestres, estes caminhavam em paralelo pela estrutura. Na figura 66 tem-se a representação das trajetórias retilíneas T-01, T-02 e T-03. As trajetórias aleatórias são representadas de T-04 até T-15.

Na forma aleatória foram feitas duas trajetórias com um único pedestre, uma passando pelo centro do vão e outra fora desse centro, com o intuito de se analisar o comportamento da passarela mesmo que a pessoa não caminhe pela área de maior resposta dinâmica sob ação de cargas dinâmicas. Além disso também foram feitas uma trajetória com dois pedestres e outra com três, conforme Figura 67, Figura 68 e Figura 69 para ME-I, ME-II e ME-III, respectivamente.



Figura 66 - Trajetórias retilíneas analisadas para ME-I, ME-II e ME-III



Figura 68 - Trajetórias aleatórias analisadas para ME-II



Figura 69 - Trajetórias aleatórias analisadas para ME-III

7.4. Modelos matemáticos de força dura [AISC, Bachmann e Kerr]: resultados

A Figura 70 apresenta, para o Modelo Estrutural I (ME-I), o sentido do caminhar do pedestre na passarela, suas dimensões e a seção investigada. Com o uso do programa ANSYS [7] é possível analisar deslocamento e aceleração no nó que está localizado no centro da estrutura. O pedestre caminha a uma frequência de passo f_p=2,4 Hz (Bachmann [1]), considerada caminhada rápida para efeito de cálculo dentro da análise. Cabe ressaltar, como citado anteriormente, que a seção central é a que mais sofre os efeitos da aplicação de cargas tanto no que se refere ao deslocamento quanto à aceleração, assim é importante analisar a resposta dinâmica da estrutura no nó localizado nessa seção.

Da Figura 71 à Figura 76 são apresentados os resultados gráficos para deslocamento e aceleração de ME-I, para 1 pedestre em trajetória retilínea (TR) e em trajetória aleatória (TA), no domínio do tempo e da frequência. Cabe ressaltar que, apesar da trajetória aleatória ter sido feita em alguns nós diferentes, os valores

máximos de deslocamento e aceleração mostraram-se praticamente idênticos, tanto no domínio do tempo, quanto da frequência, assim, apresentam-se os resultados para a trajetória retilínea, que também representam a aleatória. Para 2 e 3 pedestres em ambas as trajetórias, os resultados estão apresentados no ANEXO A.



Figura 70 - Seção investigada: ME-I



Figura 71 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo) AISC [5]



Figura 72 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência) AISC [5]


Figura 73 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo) Bachmann [1]



Figura 74 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência) Bachmann [1]









Percebe-se, pela análise dos gráficos no domínio do tempo e da frequência da Figura 71 à Figura 76 e da Tabela 39, uma diminuição de AISC para Bachmann de 40% no deslocamento e de 50% na aceleração. De Bachmann para Kerr a porcentagem diminui para 16% no deslocamento e 31% na aceleração. Apesar de pequenas variações, as três análises se mantiveram com valores praticamente idênticos de frequência natural, segundo harmônico (fo1), que indica o fenômeno da ressonância na estrutura, e para o segundo modo de vibração (fo2). Em relação aos valores limites de aceleração e RMS, o modelo estrutural I apresentou resultados satisfatórios, no entanto, a aceleração utilizando AISC, 0,52 m/s², ultrapassou o limite de 0,50 m/s² estabelecido por AISC [5] e por Murray et al [67], em razão de o segundo coeficiente dinâmico (α 2) ser maior que o coeficiente de Bachmann e Kerr.

Da análise da Figura 72 à Figura 76 observa-se que o maior pico de resposta da estrutura acontece na frequência natural 4,83Hz, que diz respeito ao modo de flexão vertical e corresponde ao segundo harmônico da frequência de passo (2,40 Hz) para caminhada rápida.

Modelos	Aceleração (m/s²)	RMS (m/s²)			
AISC	0,52	0,18			
Bachmann	0,26	0,10			
Kerr	0,18	0,07			
Aceleração limite	a _{lim} = 0,50 m/s² (AISC [5]) (Murray [67])				
RMS limite	RMS _{lim} = 0,29 m/s	² (ISO 10137 [68])			

Tabela 39 - Análise quantitativa dos resultados: força dura

A Figura 77 apresenta, para o Modelo Estrutural II (ME-II), o sentido do caminhar do pedestre na passarela, suas dimensões e a seção investigada. Com o uso do programa ANSYS [7] é possível analisar deslocamento e aceleração no nó que está localizado no centro da estrutura. O pedestre caminha a uma frequência de passo f_p=2 Hz, considerada caminhada normal para efeito de cálculo dentro da análise (Bachmann [1]). Cabe ressaltar, como citado anteriormente, que a seção central é a que mais sofre os efeitos da aplicação de cargas tanto no que se refere ao deslocamento quanto à aceleração, assim é importante analisar a resposta dinâmica da estrutura no nó localizado nessa seção. Das Figuras 78 a 83 são apresentados os resultados gráficos para o deslocamento e aceleração, nos domínios do tempo e da

frequência, de ME-II com o pedestre caminhando em trajetória retilínea e da Figura 84 à Figura 89 para trajetória aleatória. Novamente, para 2 e 3 pedestres em ambas as trajetórias, os resultados estão apresentados no ANEXO A.



Figura 77 - Seção investigada em ME-II



Figura 78 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) AISC [5]







































Figura 88 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo) Kerr [6]



Figura 89 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência) Kerr [6]

De acordo com a análise dos gráficos no domínio do tempo e da frequência da Figura 78 à Figura 83 (trajetória retilínea) e da Tabela 40 nota-se uma diminuição de AISC para Bachmann de 43% no deslocamento e de 53% na aceleração. De Bachmann para Kerr o deslocamento aumenta para 10% e há redução de 31% na aceleração. Da Figura 84 à Figura 89 (trajetória aleatória) notam-se valores parecidos de AISC para Bachmann em deslocamento e aceleração e de Bachmann para Kerr 18% no deslocamento e 30% na aceleração.

As análises se mantiveram com valores praticamente idênticos de frequência natural (f_{01}), segundo harmônico, que indica do fenômeno da ressonância na estrutura, e para o segundo modo de vibração (f_{02}). Em relação aos valores limites de deslocamento, aceleração e RMS, o modelo estrutural II apresentou resultados satisfatórios, ficando acima apenas em relação à aceleração utilizando AISC, 0,51 m/s², que ultrapassou o limite de 0,50 m/s² estabelecido por AISC [5] e por Murray et al. [67], em razão de o segundo coeficiente dinâmico (α_2) ser maior que o coeficiente de Bachmann e Kerr.

Realizando a análise da Figura 79, da Figura 81, da Figura 83, da Figura 85, da Figura 87 e da Figura 89, percebe-se que o maior pico de resposta da estrutura acontece na frequência natural 4 Hz, que diz respeito ao modo de flexão vertical e corresponde ao segundo harmônico da frequência de passo (2 Hz) para caminhada normal.

Modelos	Aceleração (m/s²)	RMS (m/s²)		
Retilínea - AISC	0,51	0,21		
Retilínea - Bachmann	0,24	0,10		
Retilínea - Kerr	0,16	0,07		
Aleatória - AISC	0,48	0,20		
Aleatória - Bachmann	0,23	0,10		
Aleatória - Kerr	0,16	0,07		
Aceleração limite	a _{lim} = 0,50 m/s² (AISC [5]) (Murray [67			
RMS limite	RMS _{lim} = 0,29 m/s ² (ISO 10137 [68])			

Tabela 40 - Análise quantitativa dos resultados: força dura

A Figura 90 apresenta, para o Modelo Estrutural III (ME-III), o sentido do caminhar do pedestre na passarela, suas dimensões e a seção investigada. Com o uso do programa ANSYS [7] é possível analisar a aceleração no nó que está localizado no centro da estrutura. O pedestre caminha a uma frequência de passo f_p=2,15 Hz, considerada caminhada entre normal e rápida (Bachmann [1]) para efeito de cálculo dentro da análise. Cabe ressaltar, como citado anteriormente, que a seção central é a que mais sofre os efeitos da aplicação de cargas tanto no que se refere ao deslocamento quanto à aceleração, assim é importante analisar a resposta dinâmica da estrutura no nó localizado nessa seção. Da Figura 91 à Figura 96 são apresentados os resultados gráficos para o deslocamento e aceleração, nos domínios do tempo e da frequência, de ME-III com o pedestre caminhando em trajetória retilínea e da Figura 97 à Figura 102 para trajetória aleatória. Novamente, para 2 e 3 pedestres, em ambas as trajetórias, os resultados estão apresentados no ANEXO A.



Figura 90 - Seção investigada em ME-III















Figura 94 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) Bachmann [1]



Figura 95 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo) Kerr [6]



Figura 96 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) Kerr [6]







Figura 98 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) AISC [5]















Figura 102 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência) Kerr [6]

De acordo com a análise dos gráficos no domínio do tempo e da frequência da Figura 91 à Figura 96 (trajetória retilínea) e da Tabela 41, nota-se uma diminuição de AISC para Bachmann de 44% no deslocamento e de 49% na aceleração. De Bachmann para Kerr o deslocamento reduz 20% e há redução de 27% na aceleração. Da Figura 97 à Figura 102 (trajetória aleatória) o deslocamento se reduz em 40% e a aceleração em 48% e de Bachmann para Kerr 20% no deslocamento e 28% na aceleração. As análises se mantiveram com valores praticamente idênticos de frequência natural, segundo harmônico (f₀₁), que indica do fenômeno da ressonância na estrutura, e para o segundo modo de vibração (f₀₂). Em relação aos valores limites de aceleração e RMS, o modelo estrutural III apresentou resultados satisfatórios, ficando acima apenas em relação à aceleração utilizando AISC, 0,56 m/s², que ultrapassou o limite de 0,50 m/s² estabelecido por AISC [5] e por Murray et al. [67], em razão de o segundo coeficiente dinâmico (α_2) ser maior que o coeficiente de Bachmann e Kerr.

Da análise da Figura 92, da Figura 94, da Figura 96, da Figura 98, da Figura 100 e da Figura 102, observa-se que o maior pico de resposta da estrutura acontece na frequência natural 4,30Hz, que diz respeito ao modo de flexão vertical e corresponde ao segundo harmônico da frequência de passo (2,15 Hz) para caminhada normal / rápida.

Modelos	Aceleração (m/s²)	RMS (m/s²)		
Retilínea – AISC	0,56	0,18		
Retilínea - Bachmann	0,29	0,09		
Retilínea - Kerr	0,21	0,06		
Aleatória - AISC	0,53	0,17		
Aleatória - Bachmann	0,28	0,08		
Aleatória - Kerr	0,20	0,06		
Aceleração limite	alim = 0,50 m/s² (AISC [5]) (Murray [6			
RMS limite	RMS _{lim} = 0,29 m/s ² (ISO 10137 [68])			

Tabela 41 - Análise quantitativa dos resultados: força dura

Percebe-se da análise dos três modelos estruturais que a alteração na trajetória de retilínea para aleatória não ocasiona grande variação nos valores de deslocamento e aceleração, fato este que também pode ser observado para um número maior de pedestres conforme os resultados no ANEXO A. Ao caminhar pela passarela, o

pedestre exerce a mesma influência na estrutura independentemente da trajetória, além disso, a diferença da massa da passarela em relação à massa da pessoa é muito grande para que apenas uma consiga alterar drasticamente a resposta dinâmica em termos de deslocamento e aceleração.

		ME-			ME-II ME-II				-111			
Carregamento	AISC	Bach mann	Kerr	Dif. (%)	AISC	Bach mann	Kerr	Dif. (%)	AISC	Bach mann	Kerr	Dif. (%)
Retilínea 1 pedestre	0,64	0,37	0,30	53	0,64	0,36	0,40	38	0,90	0,52	0,40	54
Retilínea 2 pedestres	1,20	0,73	0,58	52	1,30	0,72	0,78	40	1,80	1,00	0,80	56
Retilínea 3 pedestres	2,00	1,00	0,87	57	1,90	1,20	1,10	37	2,70	1,50	1,21	55
Aleatória no vão	0,65	0,38	0,30	53	0,87	0,48	0,39	55	0,89	0,52	0,42	53
Aleatória fora do vão	0,63	0,36	0,30	52	0,86	0,47	0,38	56	0,89	0,52	0,41	54
Aleatória 2 pedestres	1,20	0,73	0,58	55	1,70	0,96	0,76	55	1,80	1,11	0,83	54
Aleatória 3 pedestres	1,90	1,10	0,90	53	1,90	1,10	1,30	26	2,70	1,60	1,30	52

Tabela 42 - Deslocamento (mm): força dura

		ME-				ME-	II			ME-I	-111		
Carregamento	AISC	Bach mann	Kerr	Dif. (%)	AISC	Bach mann	Kerr	Dif. (%)	AISC	Bach mann	Kerr	Dif. (%)	
Retilínea 1 pedestre	0,52	0,24	0,18	64	0,51	0,24	0,16	69	0,56	0,29	0,19	63	
Retilínea 2 pedestres	1,00	0,50	0,35	64	1,00	0,51	0,32	68	1,14	0,57	0,39	63	
Retilínea 3 pedestres	1,53	0,78	0,54	65	1,48	0,78	0,48	67	1,71	0,81	0,57	67	
Aleatória no vão	0,52	0,26	0,18	65	0,48	0,23	0,16	65	0,53	0,28	0,20	60	
Aleatória fora do vão	0,50	0,25	0,17	64	0,48	0,23	0,16	65	0,54	0,28	0,21	61	
Aleatória 2 pedestres	1,00	0,49	0,35	66	0,99	0,45	0,33	67	1,17	0,59	0,41	63	
Aleatória 3 pedestres	1,56	0,74	0,54	65	1,55	0,79	0,54	68	1,75	0,85	0,62	65	

Finalmente destaca-se que as Tabelas 42 e 43 apresentam um resumo de todos os resultados referentes à análise estrutura dinâmica das passarelas

investigadas, com base no uso dos modelos de "força dura" AISC [5], Bachmann [1] e Kerr [6]. Essas tabelas apresentam os deslocamentos e acelerações máximos obtidas em todas as análises, considerando-se os casos de carregamento dinâmico para um, dois e três pedestres, trajetórias retilíneas e aleatórias. São destacados também os valores de aceleração máximo que ultrapassam o limite de conforto humano (0,50 m/s²), segundo AISC [5] e Murray [67].

7.5. Comparação entre os resultados: modelo de força dura e sistema biodinâmico

Com o objetivo de aprofundar o entendimento da resposta dinâmica das três passarelas, procederam-se os cálculos utilizando a interação pedestre-estrutura por meio do emprego dos biodinâmicos representativos de pessoas trafegando sobre a estrutura. Dessa forma foi possível entender a interação do sistema massa-mola-amortecedor de cada pessoa sobre a passarela enquanto caminha e como a passarela responde a esse estímulo. Observando-se novamente o modelo proposto por Kerr [6], devido à proximidade dos resultados quando em comparação com testes experimentais, conforme Aguiar [8], adicionou-se a este o sistema biodinâmico da interação pedestre-estrutura. Na Tabela 44 são apresentados os resultados obtidos nessa análise biodinâmica em comparação com os resultados de força dura baseados em Kerr [6], além de uma coluna a variação percentual entre os valores, (Dif.).

Modelo es	trutural	utural ME-I		ME-II				ME-III		
Trajetória	Método	Força dura	Bio dinâmico	Dif. (%)	Força dura	Bio dinâmico	Dif. (%)	Força dura	Bio dinâmico	Dif. (%)
Retilínea 1 pedestres	m/s²	0,18	0,17	6	0,16	0,14	13	0,21	0,19	10
Retilínea 2 pedestres	m/s²	0,36	0,31	14	0,32	0,24	25	0,41	0,38	7
Retilínea 3 pedestres	m/s²	0,54	0,44	19	0,49	0,31	37	0,57	0,55	4
Aleatória no vão	m/s²	0,18	0,17	6	0,17	0,14	18	0,21	0,20	5
Aleatória fora do vão	m/s²	0,18	0,16	11	0,17	0,14	18	0,21	0,20	5
Aleatória 2 pedestres	m/s²	0,35	0,31	11	0,33	0,24	27	0,43	0,40	7
Aleatória 3 pedestres	m/s²	0,54	0,43	20	0,50	0,35	30	0,62	0,54	13

Tabela 44 - Aceleração (m/s²) Kerr: força dura e biodinâmico

As Figuras 103 e 104 representam a comparação entre os métodos de força dura e biodinâmico para o ME-I, tanto no domínio do tempo quanto da frequência para a trajetória retilínea e as Figuras 105 e 106, para a trajetória aleatória. Conforme citado no item anterior, trajetórias retilíneas e aleatórias com o mesmo número de pedestres dificilmente apresentarão valores discrepantes, tal fato pode ser comprovado novamente neste item.

Para os gráficos da Figura 103 à Figura 114, no sentido de facilitar a leitura e o entendimento dos leitores da dissertação, destaca-se que, para cada modelo estrutural investigado, foram utilizadas características diferentes de acordo com as frequência de passo das pessoas sobre cada passarela e as características dos modelos biodinâmicos estão apresentadas da Tabela 45 a Tabela 47.

Tabela 45 - Características do modelo biodinâmico: ME-I

Frequência	Movimento (Silva et. al. [66])					
do passo (Hz): ME-I	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)			
2,40 Hz	27,27	549,45	11858,98			

Tabela 46 - Características do modelo biodinâmico: ME-II

Frequência do passo (Hz): ME-II	Movimento (Silva et. al. [66])					
	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)			
2 Hz	42,28	792,73	14560,12			

Tabela 47 - Características do modelo biodinâmico: ME-III

Frequência	Movimento (Silva et. al. [66])					
do passo (Hz): ME-III	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)			
2,15 Hz	35,90	689,32	13411,96			







Figura 104 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência)



Figura 105 - Deslocamento e aceleração (ME-I: tempo)



Figura 106 - Deslocamento e aceleração (ME-I: frequência)

Percebe-se pela análise dos gráficos das Figuras 103 e 105, que o uso dos biodinâmicos, como esperado, reduz o valor dos deslocamentos e das acelerações, ficando esses valores abaixo dos máximos valores de deslocamento de 0,30 mm para 0,28 mm e da aceleração de 0,18 m/s² para 0,17 m/s², tanto para a trajetória retilínea quanto para a aleatória, ambas com 1 pedestre. Isso ocorre devido à incidência do amortecimento sobre a estrutura, vindo do sistema massa-mola-amortecedor. Com referência aos modelos de força dura, a carga é aplicada sobre os nós da estrutura sem nenhum tipo de amortecimento.

Da análise da Figura 104 e da Figura 106, percebe-se o maior pico para a frequência fundamental (1ª frequência natural f₀₁=4,83 Hz), valor coincidente com o segundo harmônico da frequência de passo para caminhada rápida (2,40 Hz) do pedestre na estrutura.

As Figuras 107 e 108 representam a comparação entre os métodos de força dura e biodinâmico para o ME-II, tanto no domínio do tempo quanto da frequência para a trajetória retilínea e da Figura 109 e Figura 110 para a trajetória aleatória.







Figura 107 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo)

Figura 108 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência)



Figura 109 - Deslocamento e aceleração (ME-II: tempo)



Figura 110 - Deslocamento e aceleração (ME-II: frequência)

Percebe-se pela análise dos gráficos da Figura 107 e da Figura 109, que o uso dos biodinâmicos, como esperado, reduz o valor dos deslocamentos e das acelerações, ficando esses valores abaixo dos máximos valores de deslocamento de 0,40 mm para 0,35 mm e da aceleração de 0,16 m/s² para 0,14 m/s², para a trajetória retilínea e deslocamento de 0,39 mm para 0,35 mm e da aceleração de 0,17 m/s² para 0,14 m/s² para a trajetória aleatória. Isso ocorre devido à incidência do amortecimento sobre a estrutura, vindo do sistema massa-mola-amortecedor. Com referência aos modelos de força dura, a carga é aplicada sobre os nós da estrutura sem nenhum tipo de amortecimento.

Da análise da Figura 108 e da Figura 110, percebe-se o maior pico para a frequência fundamental (1ª frequência natural f₀₁=4 Hz), valor coincidente com o segundo harmônico da frequência de passo para caminhada rápida (2 Hz) do pedestre na estrutura.

As Figuras 111 e 112 representam a comparação entre os métodos de força dura e biodinâmico para o ME-III, tanto no domínio do tempo quanto da frequência para a trajetória retilínea e as Figuras 113 e 114, para a trajetória aleatória.



Figura 111 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo)



Figura 112 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência)



Figura 113 - Deslocamento e aceleração (ME-III: tempo)



Figura 114 - Deslocamento e aceleração (ME-III: frequência)

Percebe-se pela análise dos gráficos da Figura 107 e da Figura 109, que o uso dos biodinâmicos, como esperado, reduz o valor dos deslocamentos e das acelerações, ficando esses valores abaixo dos máximos valores de deslocamento de 0,41 mm para 0,40 mm e da aceleração de 0,21 m/s² para 0,19 m/s², para a trajetória retilínea e deslocamento de 0,42 mm para 0,40 mm e da aceleração de 0,21 m/s² para 0,20 m/s² para a trajetória aleatória. Isso ocorre devido à incidência do amortecimento sobre a estrutura, vindo do sistema massa-mola-amortecedor. Com referência aos modelos de força dura, a carga é aplicada sobre os nós da estrutura sem nenhum tipo de amortecimento.

Da análise da Figura 112 e da Figura 114, percebe-se o maior pico para a frequência fundamental (1^a frequência natural f_{01} =4,30 Hz), valor coincidente com o segundo harmônico da frequência de passo para caminhada rápida (2,15 Hz) do pedestre na estrutura.

7.6. Comparação de resultados: sistemas biodinâmicos x guias SETRA e HIVOSS

Ressaltando-se a importância de referências qualificadas na análise estrutural para a obtenção de embasamento teórico e prático, buscou-se realizar uma comparação dos resultados por meio do emprego dos modelos com biodinâmicos representativos de pessoas com os renomados guias de projeto propostos por SÉTRA e HIVOSS. A Classe I de SÉTRA pode ser aproximada da TC 4 de HIVOSS, visto que ambas consideram 1 pedestre por m² da estrutura analisada. De forma semelhante a Classe III pode ser aproximada da TC 3, ambas considerando 0,5 pedestres por m² de estrutura analisada.

Os guias SÉTRA [9] e HIVOSS [10] recomendam que os cálculos de aceleração sejam feitos com coeficiente de amortecimento $\xi = 0,6\%$, porém neste trabalho foram realizados testes também para o coeficiente de amortecimento de $\xi = 1\%$, o mesmo usado nas análises biodinâmicas. Os resultados podem ser vistos da Figura 115 à Figura 126. Os tempos totais de travessia de cada modelo estrutural são: ME-I = 13s, ME-II = 24s e ME-III = 16s.









Figura 116 - ME-I: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência





Figura 118 - ME-I: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência



Figura 119 - ME-II: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo



Figura 120 - ME-II: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência



Figura 121 - ME-II: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo



Figura 122 - ME-II: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência







Figura 124 - ME-III: SÉTRA Classe I (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência



Figura 125 - ME-III: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio do tempo



Figura 126 - ME-III: SÉTRA Classe III (ξ = 1% e 0,6%): domínio da frequência

Da Tabela 48 a Tabela 53 apresentam a comparação entre o sistema biodinâmico e os guias europeus de projeto SÉTRA e HIVOSS para amortecimento 1% e 0,6%, além de uma coluna com a diferença percentual entre os resultados, que permite fácil visualização para cada classe dos guias.

Aceleração (m/s²)	ME-I							
	SÉTRA/ HIVOSS	Bio dinâmico	Dif. (%)	Conforto SÉTRA	Conforto HIVOSS			
Classe I / TC 4	2,50	2,20	12	Mínimo	CL 2			
Classe III / TC 3	0,60	0,58	3	Médio	CL 2			

Tabela 48 - Aceleração (m/s²) em ME-I: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 1%)

Tabela 49 - Aceleração (m/s²) em ME-II: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 1%)

Aceleração (m/s²)	ME-II							
	SÉTRA/ HIVOSS	Bio dinâmico	Dif. (%)	Conforto SÉTRA	Conforto HIVOSS			
Classe I / TC 4	3,80	2,50	34	Mínimo	CL 3			
Classe III / TC 3	1,30	0,85	34	Médio	CL 2			

Tabela 50 - Aceleração (m/s²) em ME-III: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 1%)

Aceleração (m/s²)	ME-III				
	SÉTRA/ HIVOSS	Bio dinâmico	Dif. (%)	Conforto SÉTRA	Conforto HIVOSS
Classe I / TC 4	4,00	3,20	20	Inaceitável	CL 4
Classe III / TC 3	1,40	1,05	25	Mínimo	CL 3

Tabela 51 - Aceleração (m/s²) em ME-I: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 0,6%)

Aceleração (m/s²)	ME-I				
	SÉTRA/ HIVOSS	Bio dinâmico	Dif. (%)	Conforto SÉTRA	Conforto HIVOSS
Classe I / TC 4	2,50	2,21	11,6	Mínimo	CL 3
Classe III / TC 3	0,60	0,59	2	Médio	CL 2

Tabela 52 - Aceleração (m/s²) em ME-II: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 0,6%)

Aceleração (m/s²)	ME-II				
	SÉTRA/ HIVOSS	Bio dinâmico	Dif. (%)	Conforto SÉTRA	Conforto HIVOSS
Classe I / TC 4	3,80	2,50	34	Mínimo	CL 3
Classe III / TC 3	1,30	0,85	34	Médio	CL 2

Tabela 53 - Aceleração (m/s²) em ME-III: SÉTRA/HIVOSS e Biodinâmico (ξ = 0,6%)

Aceleração (m/s²)	ME-III				
	SÉTRA/ HIVOSS	Bio dinâmico	Dif. (%)	Conforto SÉTRA	Conforto HIVOSS
Classe I / TC 4	4,00	3,40	15	Inaceitável	CL 3
Classe III / TC 3	1,40	1,39	>1	Mínimo	CL 3

Procedendo-se a análise da Tabela 48 a Tabela 53, nota-se que as três estruturas apresentaram, ao menos, o nível mínimo de conforto para o usuário. Para a verificação os guias de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10] recomendam a utilização do amortecimento ξ = 0,6%, porém, para efeito de complementação das análises, foi calculado também par ao amortecimento ξ = 1%, usado nas análises com o método dos biodinâmicos.

Em ambas as análises, apenas o modelo ME-III (passarela com 27,2 m) não alcançou conforto para o pedestre, estando no nível inaceitável (aceleração > 2,50 m/s²), os demais casos se enquadraram, ao menos, no nível mínimo de conforto para que as pessoas caminhem pela passarela. A Tabela 4 e a Tabela 10, retiradas dos guias SÉTRA [9] e HIVOSS [10], demonstram as faixas de aceleração em que se enquadram os valores encontrados da Tabela 48 a Tabela 53, para denominação do tipo de conforto humano da estrutura.

Da Figura 127 à Figura 129 são representadas as acelerações obtidas relacionadas a vários números de pedestres testados nos modelos ME-I, ME-II e ME-III, respectivamente, comparando os resultados para força dura e com uso dos biodinâmicos e demonstrando a redução dos valores de aceleração com o uso dos biodinâmicos na análise.







Figura 128 - Força dura x Biodinâmico: ME-II (Kerr [6])



Figura 129 - Força dura x Biodinâmico: ME-III (Kerr [6])

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Introdução

O desenvolvimento deste trabalho de pesquisa objetivou investigar o comportamento dinâmico e os níveis de conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto), quando submetidas a carregamentos dinâmicos induzidos pelos pedestres. Para tal, ao longo do estudo foram considerados os projetos estruturais de três passarelas mistas (aço-concreto) situadas na cidade do Rio de Janeiro/RJ, com vãos de 32m, 36m e 27,2m, respectivamente. As estruturas foram modeladas numericamente com base no uso do programa ANSYS [7], considerando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF). Ao longo da pesquisa, a resposta dinâmica das passarelas foi analisada com base no emprego de modelos matemáticos tradicionais denominados comumente de "força dura" ("*only force*"); em seguida, mediante a utilização de sistemas biodinâmicos para simular os pedestres (efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura), além do uso dos guias internacionais de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10].

8.2. Conclusões

Neste item da dissertação serão apresentadas as conclusões referentes aos principais resultados alcançados ao longo do desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

a) Análise modal

Os valores das frequências naturais (autovalores) determinadas para os modelos estruturais das passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) analisadas neste estudo (ME-I / ME-II / ME-III) foram os seguintes: $f_{01} = 4,80$ Hz (ME-I); $f_{01} = 4$ Hz (ME-II); $f_{01} = 4,30$ Hz (ME-III). Cabe destacar que estes valores associados à primeira frequência natural (frequência fundamental) das passarelas se encontram ou mesmo coincidem com a frequência de excitação dos pedestres, referente ao segundo harmônico da carga dinâmica. Tal fato é indicativo de que vibrações excessivas e desconforto humano podem ocorrer quando as passarelas sejam

submetidas ao caminhar dos pedestres. Ressalta-se, ainda, que o modo de vibração fundamental (primeiro modo de vibração: autovetor) dos três modelos estruturais investigados ao longo das análises apresentam preponderância dos efeitos de flexão. Com referência ao efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura sobre os resultados das análises de vibração livre (autovalores), o qual foi representado pela modelagem dos sistemas biodinâmicos sobre as passarelas, foi verificado que ocorre uma diminuição da ordem de 30% sobre o valor da frequência fundamental dos três modelos investigados, na medida em que a massa dos pedestres aumenta em relação à massa total das passarelas. De outra forma, os efeitos de flexão continuam preponderantes e não ocorreram modificações significativas nas formas modais (modos de vibração).

b) Análises de vibração forçada: deslocamentos e acelerações

Neste item da dissertação foram consideradas as análises de vibração forçada, tendo em mente as características do caminhar humano, além de possíveis variações das trajetórias retilíneas e aleatórias desenvolvidas por parte dos pedestres sobre as passarelas. Assim sendo, foram realizadas análises estruturais dinâmicas de vibração forçada, no domínio do tempo e no domínio da frequência, com base na utilização dos modelos matemáticos tradicionais de força dura (*"only force"*), a partir do emprego de modelos biodinâmicos com um grau de liberdade (S1GL: sistema massa-mola-amortecedor); e, finalmente, foi feita uma comparação com guias internacionais de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10].

Inicialmente, considerando-se uma análise dos resultados em termos qualitativos, com referência as análises no domínio da frequência, verifica-se com clareza a ressonância existente entre as frequências naturais dos modelos estruturais investigados (ME-I / ME-II / ME-III), com as frequências de excitação induzidas pelo caminhar dos pedestres, com especial relevância para os picos de transferência de energia máximos produzidos pelo segundo harmônico da excitação (caminhar dos pedestres) em ressonância com a frequência fundamental de cada passarela investigada neste trabalho de pesquisa.

Sob o ponto de vista das análises de natureza quantitativa, os valores mais elevados determinados para a resposta dinâmica das passarelas investigadas (ME-I / ME-II / ME-III: deslocamentos e acelerações) foram calculados mediante emprego

dos modelos de força dura ("only force"), ressaltando que estes valores são conservadores; e, em determinadas situações, inclusive, estão fora da realidade prática de projeto. Objetivando exemplificar este cenário, de maneira geral, as acelerações máximas (acelerações de pico) calculadas ao longo da pesquisa foram determinadas, inicialmente, via emprego do modelo matemático proposto pelo AISC [5] e situam-se na faixa de 0,51 m/s² a 1,75 m/s² $[a_p = 0,51 \text{ m/s}^2 \text{ a } 1,75 \text{ m/s}^2]$. Por outro lado, quando o modelo matemático de Bachmann [1] foi considerado nas análises dinâmicas (vibração forçada), os valores determinados para as acelerações de pico situam-se na faixa de 0,24 m/s² a 0,85 m/s² [$a_p = 0,24$ m/s² a 0,85 m/s²]. Finalmente, quando o modelo de força dura proposto por Kerr [6] foi utilizado na investigação (análises de vibração forçada), os valores calculados para as acelerações de pico situam-se na faixa de 0,16 m/s² a 0,62 m/s² $[a_p = 0,16 \text{ m/s}^2 \text{ a } 0,62 \text{ m/s}^2]$. Estes valores calculados para as acelerações máximas ou de pico [ap (m/s²)] determinados sobre os três modelos estruturais de passarelas mistas (aço-concreto) em estudo (ME-I / ME-II / ME-III) violam os critérios de conforto humano (alim = 0,50 m/s² [5] e [67]), em diversas situações de projeto nas quais foram consideradas trajetórias retilíneas e aleatórias para até três pedestres.

De outra maneira, quando os sistemas biodinâmicos com um grau de liberdade (S1GL: sistema massa-mola-amortecedor) foram considerados nas análises de vibração forçada, objetivando simular numericamente o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura, o quadro geral se mostrou completamente distinto, com atenuações significativas da resposta dinâmica das passarelas em estudo (ME-I / ME-II / ME-III). De maneira geral, os valores das acelerações máximas (acelerações de pico) calculados ao longo deste trabalho de pesquisa diminuíram sensivelmente e situam-se na faixa de 0,28 m/s² a 0,54 m/s² [a_p = 0,28 m/s² a 0,54 m/s²]. Neste novo cenário, com base no emprego dos sistemas biodinâmicos, os valores calculados para as acelerações máximas ou de pico [a_p (m/s²)] determinados sobre os três modelos estruturais de passarelas mistas (aço-concreto) analisadas neste trabalho de pesquisa (ME-I / ME-II) meterações de pico) analisadas neste trabalho de pesquisa (ME-I / ME-II) atenderiam aos critérios de conforto humano (a_{lim} = 0,50 m/s² [5] e [67]), na maioria das situações de projeto estudadas, tendo em mente trajetórias retilíneas e aleatórias para um até três pedestres.

c) Análises de vibração forçada: sistemas biodinâmicos versus guias de projeto

Diante da discrepância de resultados (deslocamentos e acelerações de pico) oriunda do emprego dos modelos matemáticos tradicionais de força dura ("*only force*") em comparação com aqueles determinados via utilização dos sistemas biodinâmicos, foram realizadas comparações entre a resposta dinâmica (acelerações de pico) calculada via emprego dos guias internacionais de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10] em comparação com as acelerações máximas determinadas via emprego dos sistemas de biodinâmicos para um número de pedestres prescrito pelos referidos guias de projeto, o qual é definido mediante classes de carregamento.

Assim sendo, em relação aos guias internacionais de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10], os valores das acelerações de pico calculadas a partir do emprego dos sistemas biodinâmicos nas análises de vibração forçada, novamente, se mostraram inferiores e menos conservadores do que aqueles calculados via uso dos guias de projeto, tendo em mente o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura que é incorporado à modelagem dos sistemas biodinâmicos. Neste cenário, as diferenças máximas entre os valores das acelerações de pico variam na faixa de 3% até 25%, considerando-se as classes de carregamento comuns aos guias de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10]; e, também, para os níveis de amortecimento estrutural investigados neste estudo ($\xi = 0,6\%$ e $\xi = 1\%$). Todavia, deve-se destacar que tal fato não refletiu de maneira significativa sobre a avaliação final do conforto humano das passarelas mistas (aço-concreto) investigadas.

d) Avaliação do conforto humano da passarela mista (aço-concreto)

Considerando-se as trajetórias retilíneas e aleatórias de um até três pedestres investigadas neste estudo, pode-se concluir que todas as passarelas atendem aos limites de conforto humano, na maioria das situações analisadas neste trabalho de pesquisa, tendo em mente a utilização do modelo matemático proposto por Kerr [6] em conjunto com a utilização dos sistemas biodinâmicos (alim = 0,50 m/s² [5] e [67]).

Por outro lado, considerando-se as classes de carregamento e os limites estabelecidos pelos guias de projeto SÉTRA [9] e HIVOSS [10], e as acelerações calculadas via uso do modelo matemático proposto por Kerr [6] em conjunto com a utilização dos modelos biodinâmicos, o cenário mais próximo da realidade de projeto

estrutural das passarelas mistas (aço-concreto) investigadas nesta dissertação seria o seguinte: ME-I [L = 32m. ξ = 0,6%. Classe III (SÉTRA [9]) / TC 3 (HIVOSS [10]). 32 pedestres]: a_p = 0,59 m/s² (conforto médio). ME-II [L = 36m. ξ = 0,6%. Classe III (SÉTRA [9]) / TC 3 (HIVOSS [10])]. 36 pedestres: a_p = 1,10 m/s² (conforto mínimo). ME-III [L = 27,2m. ξ = 0,6%. Classe III (SÉTRA [9]) / TC 3 (HIVOSS [10])]. 27 pedestres: a_p = 1,39 m/s² (conforto mínimo).

8.3. Sugestões para trabalhos futuros

Com base no desenvolvimento desta investigação, tendo em mente a relevância do tema da pesquisa, além das limitações dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do estudo, em seguida são enumeradas sugestões para trabalhos futuros, visando dar continuidade à pesquisa.

a) Considerar na metodologia de análise desenvolvida o efeito da variação da frequência do passo de um dado pedestre ao longo do tempo (efeito da intravariabilidade) sobre a estrutura, além da variação da frequência do passo entre pedestres (efeito da intervariabilidade), objetivando o desenvolvimento de modelos probabilísticos, de modo a tornar mais realistas os modelos de carregamentos dinâmicos induzidos pelos pedestres.

b) Desenvolvimento de testes experimentais sobre o projeto de passarelas de pedestres, considerando-se a ação dinâmica dos pedestres sobre a estrutura, de maneira a calibrar os resultados produzidos pelos modelos numéricos, inicialmente, com a utilização de um número reduzido de pedestres, de maneira a caracterizar o comportamento dinâmico da estrutura.

c) Realizar testes experimentais com base em um número elevado de pedestres (cargas de multidão), de maneira a comparar os resultados experimentais obtidos com aqueles determinados via uso dos guias de projeto SÉTRA e HIVOSS; e, também, através de simulações via emprego dos modelos numéricos em elementos finitos, com base na utilização dos sistemas biodinâmicos em conjunto com modelos probabilísticos.

REFERÊNCIAS

- [1] BACHMANN, H. & AMMANN, W. Vibrations is structures induced by man and machines, IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering, ISBN 3-85748-052-X, 1987
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014
- [3] DEBONA, Gilvan Lunz.; Monitoração experimental e modelagem numérica sobre a resposta estrutural dinâmica de passarela de pedestres. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 349p
- [4] BROWNJOHN, J. M. W. Energy dissipation in one-way slabs with human participation. Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference, Vol. 1, Nanyang Technological University, Singapore, p. 13–15, 1999
- [5] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC Fourteenth Edition
 Steel Construction Manual. United States of America, 2010
- [6] KERR, S. C. Human induced loading on staircases. 1988. 259 f. Tese (PhD em Engenharia). Universidade de Londres, Inglaterra.
- [7] ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research, 2012.
- [8] AGUIAR, J. V.; Investigação experimental e numérica sobre o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura e análise de conforto humano de pisos de edifícios submetidos ao caminhar humano. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 304p

- [9] SÉTRA Footbridge Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridge Under Pedestrian Loading, Technical guide. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, 2006.
- [10] HIVOSS Human Induced Vibration of Steel Structures, Design of Footbridges Guideline. Research Fund for Coal and Steel, 2008.
- [11] MENDES, P. J.; Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 212p.
- [12] DALLARD, P.; FITZPATRICK, A. J.; FLINT, A.; LE BOURVA, S.; LOW, A.; SMITH, R.M.R.; WILLFORD, M. The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer, v. 79, p. 17-33, 2001.
- [13] CAETANO, E.; CUNHA, A.; MAGALHÃES, F.; MOUTINHO, C. Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 1: Assessment of dynamic behaviour; Implementation of tuned mass dampers. ELSEVIER – Engineering Structures, v. 32, p. 1082-1091, 2009.
- [14] FIGUEIREDO, F.P. Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005
- [15] SANTOS, S. H. de C.; LIMA, S. S.; QUEIROZ, M. M.; Análise dinâmica de uma passarela. VII Congresso Brasileiro de Pontos e Estruturas, Rio de Janeiro, RJ, maio/2014
- [16] ZÚÑIGA, J. E. V.; Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 187p, 2011

- [17] SOUZA, J. M. S.; Análise da Resposta Dinâmica de Passarelas de Pedestres Considerando-se uma Modelagem Probabilística do Caminhar Humano. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 174p, 2012
- [18] PEÑA, A. N. Avaliação de vibrações em passarelas de pedestres na direção lateral considerando modelos biodinâmicos de pessoas caminhando. Tese de Doutorado. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília Universidade de Brasília, UNB, Brasília, DF, Brasil, 2018
- [19] DUARTE, I. F. B.; Resposta estrutural dinâmica e análise do conforto humano em passarelas de pedestres. Dissertação de Mestrado. Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 180p, 2016
- [20] SILVA, I. A. R. Análise experimental e modelagem numérica para avaliação do efeito da interação pedestre-estrutura sobre o comportamento dinâmico de passarelas. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 208p, 2020
- [21] TEIXEIRA, A. M. A. J.; Passarelas estaiadas de materiais novos e convencionais sob ação de cargas dinâmicas humanas. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2000
- [22] RUIZ, D. V.; Verificação experimental de modelo de caminhada bípede para a simulação de cargas verticais induzidas por humanos. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2021
- [23] GONZAGA, I. B. N.; Interação entre estrutura de passarela e multidão via uso de modelos biodinâmicos. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2021

- [25] PEREIRA, S. P.; Desempenho dinâmico de sistemas estruturais de passarelas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília Universidade de Brasília, UNB, Brasília, DF, Brasil, 2017
- [26] BATISTA, M. D.; Análise dinâmica e controle de vibrações em passarela da octogonal - Brasília. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília Universidade de Brasília, UNB, Brasília, DF, Brasil, 2018
- [27] TOSO, M. A.; Instrumentação e modelos biodinâmicos para simulação de carregamentos em estruturas submetidas a esforços da caminhada humana. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, 2016
- [28] FERREIRA, L. M.; Passarela pênsil protendida formada por elementos prémoldados de concreto. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, Brasil, 2001
- [29] SEGUNDINHO, P. G. A. Estudo das vibrações induzidas por pedestres em passarelas de madeira. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, Brasil, 2010
- [30] STOLOVAS, S. Aplicação da Análise de Fourier para o projeto e a avaliação funcional de Passarelas de Pedestres. V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2012.
- [31] BRITO, J. L. V.; SANTOS, I. C.; Atualização do modelo numérico de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília Universidade de Brasília, UNB, Brasília, DF, Brasil, 2009
- [32] CAETANO, E.; CUNHA, A. Modelação Numérica e Validação Experimental do Comportamento Dinâmico de Uma Ponte Pedonal. 6° Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, p. 601-610, 2004.
- [33] RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS DE PROJECTO. Vibrações em Pontes Pedonais. Research Fund for Coal and Steel. 2008.
- [34] SANTOS, C. M.; Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Passarela Submetida a Carregamentos Induzidos por Pedestres. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2011., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 123p
- [35] PORTO, T. B.; PINTO, J. F. A.; MARTINS, L. C. M.; Análise numérica de vibrações em uma passarela mista de aço e concreto. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 2, p.131-144, julho – dezembro/2017
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projetos de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237p.
- [37] SANTOS, H. C.; MEDEIROS, C. A.; Avaliação do Comportamento Dinâmico para uma Ponte Metálica Destinada a um Sistema de Adutoras
- [38] OLIVEIRA, L. O. de S. B.; BASTOS, C. C. D. d'O.; WEIBULL, J. K.; Análise Modal e Dimensionamento de uma Passarela de Concreto com GFRP. XII Congresso Brasileiro De Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, RJ, junho/2021
- [39] CARDOSO, D. C. T.; GASPAR, C. M. R.; RIBEIRO, M. C. da P.; Avaliação do Comportamento Dinâmico de Passarelas Submetidas a Atividades Humanas. XII Congresso Brasileiro De Pontes e Estruturas, junho/2021
- [40] POGGIALI, F. S. J.; FARIA, I. B. S.; Vibrações em estruturas no Brasil: uma revisão bibliográfica da literatura. Revista de Engenharia Civil, n. 60, p. 54-60, 2022

- [41] SIRINGORINGO, D.; FUJINO, Y. A Conceptual Review of Pedestrian-Induced Lateral Vibration and Crowd Synchronization Problem on Footbridges. Journal of Bridge Engineering, v. 21, 2015.
- [42] MARAVEAS, C.; FASOULAKIS, Z.C.; TSAVDARIDIS, K.D. A Review of Human Induced Vibrations on Footbridges. American Journal of Engineering and Applied Sciences, p. 422-433, 2015.
- [43] OMENZETTER, P.; PAVIC, A.; BROWNJOHN, J. M. W.; A spectral density approach for modelling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking. Canadian Journal of Civil Engineering, NSC Research Press, p. 65-77. 2004
- [44] MOYO, P.; ZINGONI, A.; NHLEKO, S.; A Variable mass model for describing load impulses due to periodic jumping. Engineering Structures (2008)
- [45] HE, W.; XIE, W. Characterization of stationary and walking people on vertical dynamic properties of a lively lightweight bridge. Wiley Online Library. p. 1-24, 2017.
- [46] SEILER, C.; OCCHIUZZI, A.; SPIZZUOCO, M.; SERINO, G. Dynamical Stress Analysis due to Moving Loads on Footbridges.
- [47] PICCARDO, G.; TUBINO, F. Equivalent spectral model and maximum dynamic response for the serviceability analysis of footbridges. ELSEVIER, Engineering Structures, v. 40. p. 445-456, 2011.
- [48] NAKAMURA, S.; KAWASAKI, T.; KATSUURA, H.; YOKOYAMA, K. Experimental studies on lateral forces induced by pedestrians. ELSEVIER, Journal of Constructional Steel Research, v. 64, p. 247-252, 2007.
- [49] MA, R.; KE, L.; WANG, D.; CHEN, A.; PAN, Z. Experimental Study on Pedestrians' Perception of Human-Induced Vibrations of Footbridges. International Journal of Structural Stability and Dynamics, v. 18, 2018.

- [50] ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Human-structure dynamic interaction in footbridges. Bridge Engineering, v. 158 Issue BE4, p. 165-177, 2005.
- [51] ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Statistical characterisation of parameters defining human walking as observed on an indoor passerelle. EVACES'07 - Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, p. 219-225, 2007.
- [52] JIMÉNEZ-ALONSO, J.F.; SÁEZ, A.; CAETANO, E.; MAGALHÃES, F. Vertical Crowd–Structure Interaction Model to Analyze the Change of the Modal Properties of a Footbridge. Journal of Bridge Engineering. 2016.
- [53] STUDNICKOVÁ, M. The Effect of Pedestrian Traffic on the Dynamic Behavior of Footbridges. Acta Polytechnica, v. 44, p. 47-51, 2004.
- [54] CAPRANI, C.; QU, J.; ZIVANOVIC, S.; EVANS, N.; AHMADI, E.; Quantification of human-structure interaction. MATEC Web of Conferences, 2015
- [55] BRUNET. O.; REZENDE. F.; CARVALHO, E. M. L.; Probabilistic vibration performance assessment of a long-span steel footbridge. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2001
- [56] YAHIA, M. A.; RAJAI, Z. A.; AMEEN, A. L.; ONUR, A.; Vibration serviceability investigation of a curved footbridge. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2022
- [57] HE, W.; HE, K.; CUI, H.; WANG, G.; Using a rhythmic human shaker to identify modal properties of a stationary human body on a footbridge. Journal os Sound and Vibration, 2022
- [58] HAN, H.; ZHOU, D.; LI, T.; ZHANG, J.; Modelling of lateral forces generated by pedestrians walking across footbridges. Applied Mathematical Modelling, 2021
- [59] RODRÍGUEZ-SUESCA, A. R.; GUTIÉRREZ-JUNCO. O. J.; HERNÁNDEZ-MONTES, E.; Vibration performance assessment of deteriorating footbridges:

A study of Tunja's public footbridges. Science Direct, Engineering Structures, 2022

- [60] GÓRSKI, P.; TATARA, M.; STANKIEWICZ, B.; Vibration serviceability of all-GFRP cable-stayed footbridge under various service excitations. Science Direct, Measurement, 2021
- [61] SANTOS, H. C.; MEDEIROS, C. A.; Avaliação do Comportamento Dinâmico para uma Ponte Metálica Destinada a um Sistema de Adutoras e de Uso Conjunto como Passarela de Pedestres. X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, maio/2018
- [62] CUEVAS, R. G.; JIMENÉZ-ALONSO, F. J.; MARTÍNEZ, F.; DÍAZ, I. M.; Uncertainty-based approaches for the lateral vibration serviceability assessment of slender footbridges. ELSEVIER, Structures, v. 33, 2021.
- [63] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631/2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuos and shock-induced vibrationin buildings (1 to 80 Hz), Switzerland, 1989
- [64] SILVA, F. T.; PIMENTEL, R. L. Biodynamic walking model for vibration serviceability of footbridges in vertical direction. In: Proceeding of the 8th International Conference on Structural Dynamics (Eurodyn'11). 2011. P. 1090-1096
- [65] SILVA, J.G.S. da; VELLASCO, P.C.G da S.; ANDRADE, S.A.L. de; LIMA, L.R.O. de; FIGUEIREDO, F.P. Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads. *Computers & Structures*, v. 85, p. 1693-1703, 2007
- [66] DA SILVA, F. T.; BRITO, H. M. B. F.; PIMENTEL, R. L. Modelling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges, Can. J. Civil Eng., v40, p. 1196–1204, 2013.

- [67] MURRAY, T. M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 1997
- [68] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO10137: Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, Second Edition, International Standart Association, Geneve, Switzerland, 2007
- [69] SILVA, J.G.S. da; "Dinâmica das Estruturas 1" (Notas de Aula), 2022
- [70] SILVA, J.G.S. da; "Modelagem Numérica do Comportamento Dinâmico de Estruturas" (Notas de Aula), 2022
- [71] AGUIAR, J. V.; Tutorial modelagem do caminhar humano: sem e com utilização de modelos biodinâmicos. Volume I: Descrição do método e exemplo prático. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 42p.

ANEXO A – DESLOCAMENTO E ACELERAÇÃO DE ME-I, ME-II E ME-III: 2 E 3 PEDESTRES EM TRAJETÓRIAS RETILÍNEAS (TR) E ALEATÓRIAS (TA)

Para trajetória aleatória com 1 pedestre passando no centro do vão, será utilizada a representação TA-C e para 1 pedestre passando fora do centro do vão da passarela, será utilizada a representação TA-F.















Figura 133 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-I: frequência) Bachmann [1]



Figura 134 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-I: tempo) Kerr [6]



Figura 135 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-I: frequência) Kerr [6]



Figura 136 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: tempo) AISC [5]



Figura 137 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: frequência) AISC [5]



Figura 138 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: tempo) Bachmann [1]



Figura 139 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: frequência) Bachmann [1]



Figura 140 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: tempo) Kerr [6]



Figura 141 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-I: frequência) Kerr [6]



Figura 142 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: tempo) AISC [5]



Figura 143 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: frequência) AISC [5]







Figura 145 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: frequência) Bachmann [1]



Figura 146 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: tempo) Kerr [6]



Figura 147 - Deslocamento e aceleração: TA-C (ME-I: frequência) Kerr [6]



Figura 148 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: tempo) AISC [5]



Figura 149 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: frequência) AISC [5]



Figura 150 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: tempo) Bachmann [1]







Figura 152 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: tempo) Kerr [6]



Figura 153 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-I: frequência) Kerr [6]



Figura 154 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: tempo) AISC [5]



Figura 155 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: frequência) AISC [5]







Figura 157 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: frequência) Bachmann [1]







Figura 159 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-I: frequência) Kerr [6]











Figura 162 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: tempo) Bachmann [1]



Figura 163 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: frequência) Bachmann [1]



Figura 164 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: tempo) Kerr [6]



Figura 165 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-I: frequência) Kerr [6]

Método	Nível de tráfego	Aceleração (m/s²)	Nível de conforto	N° de pedestres
SÉTRA	Classe I	2,5	Inaceitável	64
	Classe II	0,91	Médio	51,2
	Classe III	0,59	Médio	32
	Classe IV	Cálculo dispensado		
HIVOSS	TC1	Cálculo dispensado pelo limite de frequência	Máximo	15
	TC2	Cálculo dispensado pelo limite de frequência	Máximo	12,8
	TC3	Cálculo dispensado pelo limite de frequência	Máximo	32
	TC4	0,59	Médio	64
	TC5	1,19	Mínimo	96

Tabela 54 - Análise quantitativa dos resultados ME-I: SÉTRA [9] e HIVOSS [10]

A Tabela 54 apresenta os valores de ME-III para SÉTRA [9] e HIVOSS [10], com base na referência de Mendes [11].



Figura 166 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-II: tempo) AISC [5]































Figura 174 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: tempo) Bachmann [1]



Figura 175 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: frequência) Bachmann [1]



Figura 176 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-II: tempo) Kerr [6]











Figura 179 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: frequência) AISC [5]



Figura 180 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: tempo) Bachmann [1]



Figura 181 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: frequência) Bachmann [1]



Figura 182 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: tempo) Kerr [6]



Figura 183 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-II: frequência) Kerr [6]







Figura 185 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: frequência) AISC [5]



Figura 186 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: tempo) Bachmann [1]



Figura 187 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: frequência) Bachmann [1]







Figura 189 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-II: frequência) Kerr [6]







Figura 191 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: frequência) AISC [5]







Figura 193 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: frequência) Bachmann [1]



Figura 194 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: tempo) Kerr [6]



Figura 195 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-II: frequência) Kerr [6]

Método	Nível de tráfego	Aceleração (m/s²)	Nível de conforto	N° de pedestres
SÉTRA	Classe I	3,81		
	Classe II	1,59	Mínimo	57,6
	Classe III	1,33	Mínimo	36
	Classe IV	Cálculo dispensado		
HIVOSS	TC1			
	TC2	1,08	Mínimo	14,4
	TC3	1,71	Mínimo	36
	TC4	1,94	Mínimo	72
	TC5	1,75	Mínimo	108

Tabela 55 - Análise quantitativa dos resultados M	ME-II: SÉTRA [9] e HIVOSS [10]
---	--------------------------------

A Tabela 56 apresenta os valores de ME-III para SÉTRA [9] e HIVOSS [10], com base na referência de Mendes [11].







Figura 197 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-III: frequência) AISC [5]







Figura 199 - Deslocamento e aceleração: TR 2 (ME-III: frequência) Bachmann [1]















Figura 203 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: frequência) AISC [5]



Figura 204 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: tempo) Bachmann [1]



Figura 205 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: frequência) Bachmann [1]







Figura 207 - Deslocamento e aceleração: TR 3 (ME-III: frequência) Kerr [6]















Figura 211 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: frequência) Bachmann [1]







Figura 213 - Deslocamento e aceleração: TA-F (ME-III: frequência) Kerr [6]







Figura 215 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: frequência) AISC [5]



Figura 216 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: tempo) Bachmann [1]



Figura 217 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: frequência) Bachmann [1]







Figura 219 - Deslocamento e aceleração: TA 2 (ME-III: frequência) Kerr [6]



Figura 220 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: tempo) AISC [5]



Figura 221 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: frequência) AISC [5]







Figura 223 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: frequência) Bachmann [1]



Figura 224 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: tempo) Kerr [6]



Figura 225 - Deslocamento e aceleração: TA 3 (ME-III: frequência) Kerr [6]

Método	Nível de tráfego	Aceleração (m/s²)	Nível de conforto	N° de pedestres
SÉTRA	Classe I	4,04	Inaceitável	54,4
	Classe II	1,68	Mínimo	43,5
	Classe III	1,40	Mínimo	27,2
	Classe IV	Cálculo dispensado		
HIVOSS	TC1	1,34	Mínimo	15
	TC2	1,10	Mínimo	10,9
	TC3	1,82	Mínimo	27,2
	TC4	2,02	Mínimo	54,4
	TC5	1,83	Mínimo	81,6

Tabela 57 - Análise quantitativa resultados ME-III: SÉTRA [9] e HIVOSS [10]

A Tabela 57 apresenta os valores de ME-III para SÉTRA [9] e HIVOSS [10], com base na referência de Mendes [11].



As Figura 226 à Figura 237 representam ME-I, comparando deslocamento e aceleração no tempo e na frequência entre força dura e biodinâmico.

Figura 226 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-I: tempo)



Figura 227 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-I: frequência)



Figura 228 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-I: tempo)



Figura 229 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-I: frequência)



Figura 230 - Trajetória aleatória com 1 pedestre no centro do vão (ME-I: tempo)



Figura 231 - Trajetória aleatória com 1 pedestre no centro do vão (ME-I: frequência)



Figura 232 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-I: tempo)



Figura 233 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-I: frequência)



Figura 234 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-I: tempo)


Figura 235 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-I: frequência)



Figura 236 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-I: tempo)



Figura 237 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-I: frequência)

As Figura 238 à Figura 247 representam ME-II, comparando deslocamento e aceleração no tempo e na frequência entre força dura e biodinâmico.



Figura 238 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-II: tempo)



Figura 239 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-II: frequência)



Figura 240 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-II: tempo)



Figura 241 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-II: frequência)



Figura 242 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-II: tempo)



Figura 243 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-II: frequência)







Figura 245 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-II: frequência)



Figura 246 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-II: tempo)



Figura 247 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-II: frequência)

As Figura 248 à Figura 257 representam ME-III, comparando deslocamento e aceleração no tempo e na frequência entre força dura e biodinâmico.



Figura 248 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-III: tempo)



Figura 249 - Trajetória retilínea com 2 pedestres (ME-III: frequência)



Figura 250 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-III: tempo)



Figura 251 - Trajetória retilínea com 3 pedestres (ME-III: frequência)



Figura 252 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-III: tempo)



Figura 253 - Trajetória aleatória com 1 pedestre fora do vão (ME-III: frequência)



Figura 254 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-III: tempo)



Figura 255 - Trajetória aleatória com 2 pedestres (ME-III: frequência)



Figura 256 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-III: tempo)



Figura 257 - Trajetória aleatória com 3 pedestres (ME-III: frequência)