



Maria Clara da P. Ribeiro

**Avaliação do comportamento dinâmico de passarelas
submetidas a atividades humanas**

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Orientador: Cássio Marques Rodrigues Gaspar
Co-orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso

Rio de Janeiro
Julho de 2020



Agradecimentos

A Deus por toda oportunidade e discernimento dados durante o decorrer deste ciclo.

A minha família por todo o apoio, especialmente aos meus pais José e Odissea, por não medirem esforços e empenho para concretização desse sonho sendo incansáveis no incentivo, amor e companheirismo.

Aos meus amigos os quais fizeram desse processo uma caminhada mais leve e com agradáveis surpresas. Sobretudo, aqueles que não pouparam palavras de incentivo e ânimo que impulsionaram esse momento e vivenciaram comigo cada conquista. Levooos com carinho e para a vida.

Ao meu orientador Cássio Gaspar que em muito me ajudou e contribuiu demasiadamente para o acréscimo de conhecimento e a exploração de temáticas novas e desafiadoras. Todo o apoio e auxílio prestados são evidentes nesse trabalho que está além da composição de algo feito apenas por duas mãos.

Ao meu co-orientador Daniel Carlos Taissum Cardoso, o qual me confiou e creditou a responsabilidade para o desempenho de mais esta etapa. Seu incentivo e apoio, de fato, fizeram diferença para mais essa realização.

A Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro por, sempre de portas abertas, propiciar a realização de sonhos e ser base para inúmeras conquistas transpondo quaisquer barreiras e extrapolando os limites do conhecimento. Fazendo de nós cidadãos e profissionais melhores.

Maria Clara Ribeiro



"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo"

(Albert Einstein)



Resumo

O avanço das diferentes áreas do conhecimento, sobretudo no que diz respeito ao segmento da Engenharia Civil, é de imediata constatação, com projetos desafiadores e inovadores os quais demandam soluções que contemplem a arquitetura almejada, estabilidade e segurança. Como evidenciado, o progresso na ciência e tecnologia dos materiais propicia a construção de estruturas que se apresentam mais leves, esbeltas e com maiores vãos, sendo assim mais flexíveis, conseqüentemente sujeitas a efeitos mais perceptíveis da ação dinâmica. As ações dinâmicas representam assim variável relevante do processo de análise de estruturas. Estas proveem de diferentes fontes, sendo do interesse desse estudo aquelas relacionadas às atividades humanas de saltar e caminhar. Tais carregamentos dinâmicos induzidos serão analisados e implementados ao modelo numérico representativo de uma estrutura pedonal localizada no Terminal Centro Olímpico – RJ. Os limites normativos e resultados obtidos são apresentados mediante as análises e discussões para diferentes estudos de casos propostos e avaliados quanto a conforto para os usuários e identificação de situações de vibrações excessivas e indução de ressonância.

Palavras-chave: análise dinâmica, passarelas, carregamentos dinâmicos.



Abstract

The advancement of different areas of knowledge, especially with regard to the Civil Engineering segment, is immediately apparent with challenging and innovative projects that demand solutions that contemplate the desired architecture, stability and security. As evidenced, progress in the science and technology of materials allows the construction of structures that are lighter, slender and with larger spans, thus being more flexible, consequently subject to more noticeable effects of dynamic action. Dynamic actions therefore represent a relevant variable in the structure analysis process. These come from different sources, being of interest in this study those related to human activities of jumping and walking. Such induced dynamic loads will be analyzed and implemented using the numerical model representative of a pedestrian structure located in the Centro Olímpico Terminal – RJ. The normative limits and results obtained are presented through the analyzes and discussions for different case studies proposed and evaluated regarding comfort for users and identification of situations of excessive vibrations and resonance induction.

Keywords: dynamic analysis, walkways, dynamic loads



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Motivação.....	3
1.3	Objetivos	4
1.4	Metodologia	5
1.5	Organização do trabalho.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Vibrações induzidas por atividades humanas em passarelas	7
2.2	Limites Normativos.....	18
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	28
3.1	Dinâmica das Estruturas.....	28
3.2	Modelos do carregamento humano	30
4	MODELAGEM COMPUTACIONAL	37
4.1	Modelo Estrutural.....	37
4.2	Modelo Numérico	43
4.3	Modelagem do Amortecimento Estrutural.....	47
5	ESTUDOS DE CASOS.....	51
5.1	Análise Modal	52
5.2	Análise Transiente.....	58
6	CONCLUSÕES.....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Desabamento da passarela na Carolina do Norte/EUA [Fonte: BBC News]	7
Figura 2 – The Millennium Footbridge [Fonte: https://londonist.com/london/features/millennium-bridge-trivia]	8
Figura 3 – Toda Park Bridge, Toda City/Japão (Nakamura & Fujino, 2002)	9
Figura 4 – Carregamentos decorrentes do caminhar e correr (Galbraith e Barton, 1970 apud Segundinho, 2017)	10
Figura 5 – Forças na direção transversal vertical para diferentes frequências de passos (Wheeler, 1980,1982, apud Segundinho 2017)	11
Figura 6 – Distribuição normal para frequência de passos (Matsumoto et al, 1972,1978, apud Segundinho 2017)	11
Figura 7 – Esquema da passarela de madeira com duas vigas (Segundinho, 2010)	13
Figura 8 – Esquema da passarela de madeira com quatro vigas (Segundinho, 2010)	13
Figura 9 – Passarela da Universidade do Porto (Caetano e Cunha, 2004)	14
Figura 10 – Modelo numérico da passarela (Barros, 2009)	15
Figura 11 – Passarela Osvaldo Aranha (Zúñiga, 2011)	17
Figura 12 – Limites para acelerações verticais (EUR23318, 2008)	23
Figura 13 – Método da Superposição Modal (Avelino, 2008)	30
Figura 14 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Planta de situação [Fonte: Google Earth]	37
Figura 15 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Trechos 1 - 4 [Fonte: Google Earth]	38
Figura 16 – Estrutura provisória ao lado da passarela do Terminal Centro Olímpico [Fonte: Google Maps, 2017]	38
Figura 17 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Vista superior Trecho 2 (dimensões em cm)	39
Figura 18 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Vista superior Trecho 3 (dimensões em cm)	40
Figura 19 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Trecho 2 (Dias e Souza, 2017)	40



Figura 20 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Vista dos elementos componentes da superestrutura (Dias e Souza, 2017).....	41
Figura 21 – Seção transversal típica da passarela.....	42
Figura 22 – Detalhe de ligação dos pilares.....	43
Figura 23 – SAP2000: Apoios dos Pilares.....	45
Figura 24 – SAP2000: Modelagem da Estrutura – (a) vermelho: elementos de área e (b) azul: elementos de barra.....	46
Figura 25 – Razão de amortecimento.....	49
Figura 26 – Metodologia para análise dinâmica [Adaptado: SETRA (2006)].....	51
Figura 27 – Modelo SAP2000: Modo 1 e Modo 2.....	52
Figura 28 – Modelo SAP2000: Modo 3 e Modo 4.....	53
Figura 29 – Modelo SAP2000: Modo 5 e Modo 6.....	53
Figura 30 – Modelo SAP2000: Modo 7 e Modo 8.....	54
Figura 31 – Modelo SAP2000: Modo 9 e Modo 10.....	54
Figura 32 – Modelo SAP2000: Modo 11 e Modo 12.....	55
Figura 33 – Modelo SAP2000: Modo 13 e Modo 14.....	55
Figura 34 – Modelo SAP2000: Modo 15 e Modo 16.....	56
Figura 35 – Modelo SAP2000: Modo 17 e Modo 18.....	56
Figura 36 – Modelo SAP2000: Modo 19 e Modo 20.....	57
Figura 37 – SAP2000: Modelo da Estrutura.....	59
Figura 38 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 1 e 3.....	60
Figura 39 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 2 e 4.....	60
Figura 40 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 5, 7, 9 e 11.....	61
Figura 41 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 6, 8, 10 e 12.....	61
Figura 42 – Modelos de carregamentos para saltos: AISC (2016) e ISO10137 (2007).....	63
Figura 43 – Casos 1 e 3: FFT: Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz).....	64
Figura 44 – Casos 1 e 3: FFT: Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz).....	64
Figura 45 – Caso 1 (AISC): Acelerações (m/s ²).....	65
Figura 46 – Caso 3 (ISO 10137): Acelerações (m/s ²).....	65
Figura 47 – Casos 2 e 4: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz).....	67
Figura 48 – Casos 2 e 4: FFT – Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz).....	67



Figura 49 – Caso 2 (AISC): Acelerações (m/s ²)	68
Figura 50 – Caso 4 (ISO 10137): Acelerações (m/s ²).....	69
Figura 51 – Casos 5 e 7: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz).....	70
Figura 52 – Casos 5 e 7: FFT – Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz)	70
Figura 53 – Caso 5 (AISC): Acelerações (m/s ²)	71
Figura 54 – Caso 7 (ISO 10137): Acelerações (m/s ²).....	71
Figura 55 – Casos 6 e 8: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz).....	73
Figura 56 – Casos 6 e 8: FFT – Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz)	73
Figura 57 – Caso 6 (AISC): Acelerações (m/s ²)	74
Figura 58 – Caso 8 (ISO 10137): Acelerações (m/s ²).....	74
Figura 59 – Casos 9 e 11: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz).....	75
Figura 60 – Casos 9 e 11: FFT – Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz)	76
Figura 61 – Caso 9 (AISC): Acelerações (m/s ²)	76
Figura 62 – Caso 11 (ISO 10137): Acelerações (m/s ²).....	77
Figura 63 – Casos 10 e 12: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz).....	78
Figura 64 – Casos 10 e 12: FFT – Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz)	79
Figura 65 – Caso 10 (AISC): Acelerações (m/s ²)	79
Figura 66 – Caso 12 (ISO 10137): Acelerações (m/s ²).....	80
Figura 67 – Caminhada: Configuração [Adaptado de Figueiredo (2005)]	82
Figura 68 – Caminhada: Modelos da função	83
Figura 69 – Caminhada: Caso 1, Caso 2, Caso 3 e Caso 4 – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz)	84
Figura 70 – Caminhada: Caso 1 e Caso 2 – Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz)	84
Figura 71 – Caminhada: Caso 3 e Caso 4 – Aceleração (m/s ²) x Frequência (Hz)	84
Figura 72 – Caso 1 (AISC): Acelerações (m/s ²)	85
Figura 73 – Caso 2 (SETRA): Acelerações (m/s ²)	85
Figura 74 – Caso 3 (AISC): Acelerações (m/s ²)	86
Figura 75 – Caso 4 (SETRA): Acelerações (m/s ²)	86



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Limites para deslocamentos [Adaptado de (NBR6118,2014)]	19
Tabela 2 – Frequência crítica para vibrações verticais de estruturas sob ação humana (NBR6118,2014).....	19
Tabela 3 – Limites de vibração para passarelas [Adaptado de AISC (2016)]	21
Tabela 4 – Limites de vibração para edificações [Adaptado de AISC (2016)]	21
Tabela 5 – Limites de para acelerações verticais [m/s ²] [EUR 23318 (2008)].....	23
Tabela 6 – Critérios associados a atividades rítmicas [Adaptado de SCI (2009)].....	24
Tabela 7 – Intervalos de conforto para acelerações (m/s ²) [Adaptado de SETRA (2006)].....	25
Tabela 8 – Intervalos de frequência para vibrações verticais (Hz) [Adaptado de SETRA (2006)].....	26
Tabela 9 – Intervalos VDV para critério de conforto humano [Adaptado de Gaspar (2018)].....	27
Tabela 10 – Parâmetros para série de Fourier - individual [Adaptado: AISC (2016)]	31
Tabela 11 – Parâmetros para série de Fourier - grupos [Adaptado: AISC (2016)]	32
Tabela 12 – Faixas de frequência para caminhada e coeficientes de Fourier [AISC (2016)].....	32
Tabela 13 – Parâmetros para série de Fourier – 1 pessoa (SCI, 2009)	33
Tabela 14 – Faixas de domínio para caminhada (SCI, 2009)	33
Tabela 15 – Parâmetros para carregamento devido a saltos de uma pessoa [Adaptado de ISO10137:2007].....	34
Tabela 16 – Parâmetros para carregamento devido ao caminhar de uma pessoa [Adaptado de ISO10137:2007]	35
Tabela 17 –Valores para relação de amortecimento	48
Tabela 18 – Resumo dos Estudos de Casos	62
Tabela 19 – Caso 1	66
Tabela 20 – Caso 3	66
Tabela 21 – Caso 2.....	69
Tabela 22 – Caso 4.....	69



Tabela 23 – Caso 5.....	72
Tabela 24 – Caso 7.....	72
Tabela 25 – Caso 6.....	74
Tabela 26 – Caso 8.....	75
Tabela 27 – Caso 9.....	77
Tabela 28 – Caso 11.....	77
Tabela 29 – Caso 10.....	80
Tabela 30 – Caso 12.....	80
Tabela 31 – Resumo dos Estudos de Casos: Caminhada.....	81
Tabela 32 – Caminhada: Parâmetros adotados	82
Tabela 33 – Caminhada: Caso 1	87
Tabela 34 – Caminhada: Caso 2	87
Tabela 35 – Caminhada: Caso 3	87
Tabela 36 – Caminhada: Caso 4	87



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISC American Institute of Steel Construction

E.L.S Estado Limite de Serviço

E.L.U Estado Limite Último

ESPA Equivalent sinusoidal peak acceleration

ISO International Organization for Standardization

NBR Norma Brasileira

SCI The Steel Construction Institute

SETRA Service d'études techniques des routes et autoroutes



LISTA DE SÍMBOLOS

- a_m Aceleração média dos picos
- a_n Coeficiente da série infinita de Fourier (cosseno)
- a_p aceleração de pico
- a_{rms} aceleração r.m.s
- a_w aceleração ponderada
- $a_{w,rms}$ aceleração r.m.s (root mean square) ponderada
- $C(N)$ valores de coordenação (ponderação) entre os indivíduos
- cm centímetro
- f frequência
- f_p frequência do passo ou da atividade
- $F(t)$ força da atividade humana ao longo do tempo (força dura)
- $F(t)/G$ força normalizada em relação ao peso de uma pessoa
- g aceleração da gravidade
- G peso
- Hz Hertz
- i número imaginário (domínio da frequência)
- i múltiplo harmônico da frequência do passo
- m metro
- mm milímetros
- $m/s^{1,75}$ metro por segundo elevado a 1,75
- m/s^2 metro por segundo ao quadrado
- n número de elementos ou termos
- N newton
- p número de pessoas



r.m.s valor quadrático médio (root mean square)

r_i coeficiente de Fourier normalizado associado ao i -ésimo harmônico

s segundo

t tempo

T Período da atividade rítmica

T_c Período de contato

VDV valor de dose de vibração (vibration dose value)

w_p carga efetiva por unidade de área das pessoas distribuídas sobre o piso

ξ fator ou taxa de amortecimento

φ_i ângulo de fase associado ao i -ésimo harmônico

ω frequência angular da força externa



1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O avanço de diversas áreas do conhecimento é perceptível e, sobretudo nos períodos mais recentes da história, este avanço permeia e compõe os cenários de diferentes lugares. Quando explorada essa temática acerca do que ocorre no segmento da Engenharia Civil, a constatação dos progressos é imediata. Os projetos estruturais acompanham a largos passos o avanço quanto a concepção, forma e método.

As pontes Red Python e a Hovenring, na Holanda, exemplificam os avanços de formas e concepção recorrentes nas novas estruturas. De igual modo, a Gateshead Millennium, no Reino Unido, a Skywalk, nos Estados Unidos, e a Henderson Waves, em Singapura, exprimem a possibilidade da implementação de soluções inovadoras. Projetos desafiadores, arquiteturas que inovam em propostas e demandam por estudos detalhados a fim de que se complemente em uma solução a forma desejada e a estabilidade e segurança do projeto.

Criando subsídios a essas soluções, o estudo da resistência dos materiais tem propiciado a construção de estruturas cada vez mais esbeltas – somado a isso, estruturas mais leves e que, geralmente, apresentam grandes vãos – por conseguinte são mais flexíveis e, deste modo, estão sujeitas a efeitos mais perceptíveis da ação dinâmica. Sendo assim, as análises outrora feitas exclusivamente sob a perspectiva estática, passam a não corresponder a um conhecimento mais preciso e completo acerca da resposta da estrutura as ações sob as quais está submetida.

As ações dinâmicas passam a representar uma variável relevante ao processo de análise das estruturas – sendo classificadas em: harmônicas, periódicas arbitrárias,



impulsivas e aperiódicas arbitrarias. As forças harmônicas relacionam-se, por exemplo, ao funcionamento de máquinas rotativas desbalanceadas. Enquanto as periódicas podem ser caracterizadas por indução humana através do caminhar ou da prática de atividades de ginástica, aeróbica ou dança, assim como situações com uso de motores alternados e máquinas que causam trepidações. As forças impulsivas, as quais exprimem grande intensidade em curto período de tempo, relacionam-se a situações de explosões, falhas abruptas de elementos estruturais, entre outras. As forças aperiódicas arbitrarias podem ser expressas por situações como terremotos, movimento das ondas do mar, tráfego de veículos rodoviários, entre outros (SORIANO, 2014). Sendo assim, a relevância atrela-se à avaliação da resposta da estrutura frente a estas solicitações quando a combinação destas com as condições naturais da estrutura possibilitam a ocorrência de problemas como vibrações excessivas, principalmente devido ao fenômeno de ressonância – as quais podem configurar situações, por exemplo, de desconforto dos usuários ou deslocamentos demasiados.

Quanto às ações periódicas, dentro do contexto teste trabalho, destacam-se aquelas relacionadas às ações humanas – tais como andar, correr e saltar. E, por interesse ao objeto de estudo, o recorte desta temática corresponde a estes carregamentos induzidos por atividades humanas em estruturas de passarelas.

As passarelas são recorrentemente solicitadas por ações de âmbito estático e dinâmico. Além disso, durante o transcorrer dos anos a forma como estas são utilizadas sofre variações – rotina de uso, frequências de uso da estrutura, comportamento do usuário, entre outras. Pensando-se nestas variações, na segurança e conforto dos usuários, o entendimento mais amplo da estrutura torna-se, de fato, relevante, ou seja, uma análise estática acompanhada de uma avaliação dinâmica complementa-se no entendimento



amplo da estrutura – corroborando a uma solução de projeto que seja conciliatória aos diferentes fatores.

1.2 Motivação

As crescentes demandas por avaliações de estruturas que representem as diferentes situações da realidade nas quais tais construções estão submetidas tornam-se um fator atrativo para o desenvolvimento da temática – uma vez que a perspectiva exclusivamente estática não contempla a amplitude de casos que condizem com as condições de interação entre estrutura, meio e uso. Tais demandas somam-se às sucessivas apresentações de casos nos quais se constata problemas decorrentes de vibrações excessivas de estruturas – de modo a corroborar para a necessidade de avaliações dinâmicas. O caso ocorrido na Millennium Bridge, em Londres, no qual a interdição da estrutura ocorreu após o evento de inauguração devido a ocorrência de vibrações excessivas perceptíveis durante o momento da travessia, repercute visto que a inovação proposta da estrutura como símbolo dos avanços tecnológicos/construtivos conflitou com os problemas dinâmicos não avaliados (DALLARD et al., 2001). Caso semelhante ocorreu na Toda Park, no Japão, a qual após grande concentração de pessoas durante a travessia de expectadores de um evento esportivo apresentou deslocamentos de seus elementos estruturais, os quais levaram os pedestres a busca de apoio para continuidade do percurso (NAKAMURA; FUJINO, 2002).

Além disso, o interesse por tornar o assunto mais próximo à prática de projeto de modo que considerações e ponderações a respeito do comportamento dinâmico sejam avaliadas durante a concepção de projetos de modo a atenuar, ou por dizer, evitar problemas futuros que podem implicar em quesitos de conforto humano ou segurança.



Por fim, destaca-se o intuito de propor a abordagem do tema, ainda que paulatinamente, no grau de graduação, uma vez que a discussão do assunto ainda é restrita a níveis de pós-graduação e especializações.

1.3 Objetivos

A partir de uma abordagem sobre os conceitos os quais envolvem as avaliações dinâmicas de estruturas, considerando a apresentação de limites e critérios de conforto humano com base em normas e guias de projeto, tem-se por objetivo a apresentação da temática e a implementação do estudo do comportamento dinâmico de estruturas por meio da elaboração de estudo de caso referentes à estrutura da passarela mista (aço-concreto) situada no Terminal Olímpico da cidade do Rio de Janeiro. Ressalta-se que os projetos atuais, no geral em nível nacional, oferecem soluções exclusivamente de âmbito estático. Por outro lado, por meio da realização de uma análise dinâmica – tal complementação será exposta no estudo de caso apresentado.

Nesta, o fim é estabelecer a resposta dinâmica da estrutura e sua relação quanto ao conforto por parte dos usuários – isto é, baseado nos diferentes carregamentos adotados e implementados ao modelo considerando situações reais em que o sistema estrutural possa estar submetido a atividades humanas em passarelas, como o caminhar e saltos rítmicos.

Além disso, parte da proposta deste trabalho é evidenciar a relevância da análise dinâmica durante a concepção de um projeto – para soluções que, além da segurança, sejam abrangentes a questões de conforto.



1.4 Metodologia

Inicialmente, mediante exposição dos casos apontados em literatura que abordam problemas de vibrações excessivas em estruturas pedonais e a tratativa presente em normas e guias de projeto – nacionais e internacionais – para estas, evidencia-se a relevância e recorrência crescentes de estudos que promovem a discussão sobre a temática. Por conseguinte, a fundamentação teórica da dinâmica de estruturas, as modelagens matemáticas pertinentes aos carregamentos de interesse são elencadas para a posterior implementação de tais conhecimentos no estudo de caso proposto.

O estudo da passarela – localizada no Terminal Olímpico do Rio de Janeiro – é iniciado por meio do uso do modelo feito por Dias e Souza (2017). Tendo em vista que a modelagem realizada corresponde a uma representação do projeto executado, são apresentados os parâmetros adotados, as condições de contorno e materiais utilizados.

Prosseguindo, a partir da abordagem teórica a respeito da modelagem do carregamento a ser estudado, este é definido e implementado ao modelo numérico da passarela para que as respostas dinâmicas em termos de acelerações sejam obtidas. Além disso, a partir desta implementação do carregamento é realizada a comparação entre as frequências da estrutura e as frequências induzidas pelo carregamento para a avaliação da ocorrência de vibrações excessivas ou possíveis situações de ressonância.

A partir da obtenção dos resultados, a comparação destes é feita em relação aos valores apresentados em guias de projetos e normas para estabelecer se a estrutura apresenta comportamento compreendido entre os limites admissíveis estabelecidos nesses documentos.



1.5 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, a fim de apresentar o sequencial de ideias e estruturação utilizados para a abordagem da temática proposta. Sendo este capítulo inicial, destinado a considerações iniciais, apresentação da temática, motivação e metodologia adotada para a realização deste.

No segundo capítulo, a partir da revisão bibliográfica, são apresentadas as problemáticas relacionadas em literatura devido a ações dinâmicas, e, de igual modo, os limites normativos de conforto estabelecidos para condições de vibrações induzidas por atividades humanas.

No terceiro capítulo, a abordagem teórica adotada é apresentada acerca da temática de dinâmica das estruturas. Além disso, a modelagem matemática dos carregamentos a serem estudados propostas a partir de diferentes autores.

No quarto capítulo, o modelo estrutural escolhido para o estudo de caso é exposto, do mesmo modo o modelo numérico. Além disso, a modelagem do amortecimento natural e as configurações de posicionamento do carregamento para análise são apresentadas.

No quinto capítulo, é apresentada a análise do modelo computacional – realizada por meio do software SAP2000 v.20.0 – sendo esta dividida em: estática, modal e transiente. Quanto a análise transiente, ressalta-se a abordagem das atividades de saltos rítmicos e caminhada.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho desde a abordagem teórica até os resultados obtidos por meio da análise do modelo computacional.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vibrações induzidas por atividades humanas em passarelas

A maior suscetibilidade de estruturas a vibrações relaciona-se, entre outros fatores, aos desdobramentos decorridos da evolução da ciência dos materiais, os quais contribuem para a modificação/criação de materiais empregados na construção. Como referido, tais avanços têm por consequências novas métricas, formas e concepções de projetos que, no geral, apresentam uma estrutura mais leve, flexível e esbelta.

Casos referidos na literatura corroboram a relevância do estudo e avaliação de comportamentos dinâmicos das estruturas, visto que, além da questão de conforto, a segurança dos usuários durante a utilização das mesmas está relacionada a tais comportamentos.

O desabamento de uma passarela ocorrido em maio de 2000, na Carolina do Norte/EUA, durante a saída de um evento esportivo resultando em mais de 100 pessoas feridas exemplifica a relevância e suscita a discussão da relação entre a avaliação dinâmica – considerando as consequências de vibrações excessivas – e a segurança, bem como integridade, da estrutura e dos usuários (BBC News, 2000) – Figura 1.



Figura 1 – Desabamento da passarela na Carolina do Norte/EUA [Fonte: BBC News]



A “The Millennium Bridge” – Figura 2 – tornou-se um caso de repercussão, quando um dia após sua inauguração, necessitou de interdição para investigações do ocorrido durante o momento de travessia dos pedestres no evento de inauguração. No dia referido, ocorreram vibrações laterais excessivas na ponte, as quais percebidas por alguns usuários geraram a dificuldade de caminhar e, em outros, a necessidade de apoio nos elementos da ponte (DALLARD et al., 2001). Entre as conclusões dos autores destaca-se a ocorrência do fenômeno devido a frequência lateral da estrutura apresentar valores de, aproximadamente, 1,3 Hz. A situação redobrou atenções aos estudos referentes ao assunto de vibrações excessivas em pontes pedonais, que implicam em situações de ressonâncias nos diferentes modos de vibração (ŽIVANOVIĆ et al., 2005).



Figura 2 – The Millennium Footbridge [Fonte: <https://londonist.com/london/features/millennium-bridge-trivia>]

Outro incidente, relacionado ao comportamento dinâmico, ocorreu na “Toda Park Bridge” uma ponte pedonal estaiada inaugurada em 1989 no Japão, relaciona-se ao carregamento decorrente da ação dos usuários e vibrações da estrutura – Figura 3. Durante um evento esportivo, no momento de travessia de pedestres, na qual a



correspondente ocupação era de 1,0 a 1,5 pessoas/m², vibrações foram percebidas e, apesar de não terem grandes amplitudes, foram suficientes para gerar a sensação de desconforto e levar algumas pessoas a buscar apoio no corrimão da estrutura para realizar a continuidade da travessia. As vibrações laterais na viga central alcançaram amplitudes de 10 mm e frequência de 0,9 Hz, sendo equivalente a frequência natural do primeiro modo na direção transversal horizontal (NAKAMURA; FUJINO, 2002).



Figura 3 – Toda Park Bridge, Toda City/Japão (Nakamura & Fujino, 2002)

As vibrações ocorrem a partir da interação entre ações/perturbações, variantes ao longo do tempo, e as propriedades de inércia do meio afetado. Tais ações podem ser descritas por forças ou funções de deslocamentos impostas sobre um meio. Além disso, o entendimento desta problemática envolve a análise de três pontos fundamentais: (a) fonte de vibração; (b) caminho de transmissão; (c) receptor (ISO 10137, 2007).

Galbraith e Barton (1970), por meio de uma série de experimentos de laboratórios, estudaram o carregamento induzido pelas atividades do correr e do caminhar humano.

Tal estudo tinha como finalidade a obtenção de dados para o entendimento da relação carregamento-vibrações sob a estrutura. A variabilidade do estudo levou em conta a relação de peso dos usuários, frequência de caminhada/corrída, superfície de contato e a condição de usarem, ou não, calçados. Constataram a ocorrência de um pico para a força de corrida na direção vertical e dois picos para a consideração de caminhada tratando-se da direção vertical – Figura 4. Além disso, apontaram a frequência do passo e o peso do indivíduo como fatores preponderantes para a ampliação dos picos, em detrimento da interferência que o tipo de calçado ou superfície de caminhada possuem Galbraith e Barton ,1970).

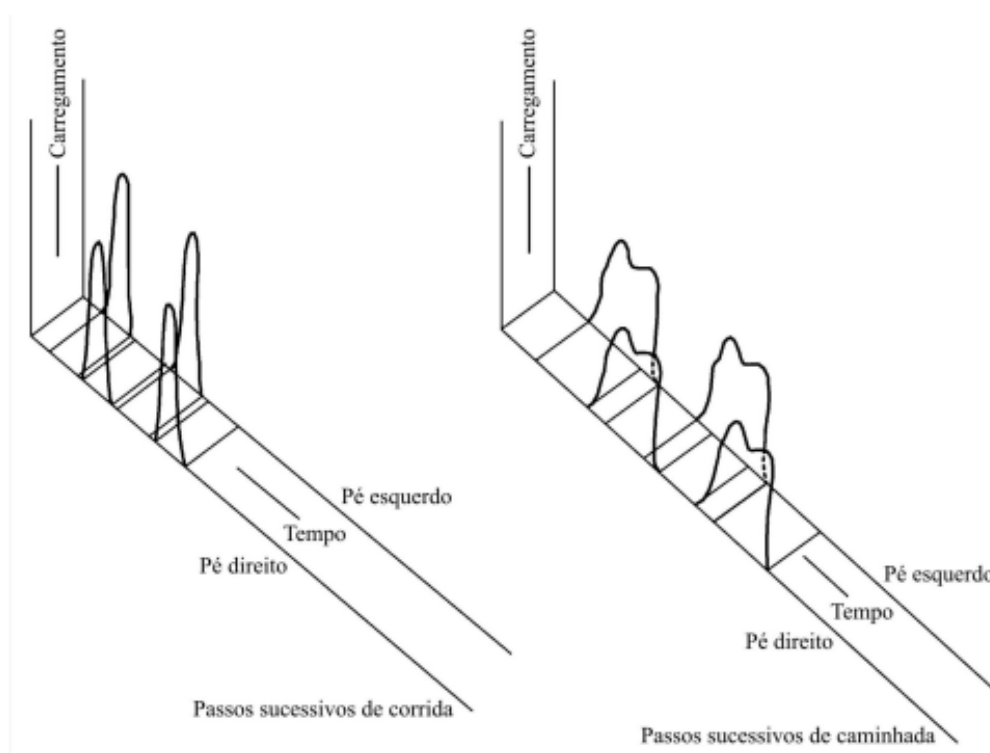


Figura 4 – Carregamentos decorrentes do caminhar e correr (Galbraith e Barton, 1970 apud Segundinho, 2017)

Os resultados apresentados por Wheeler (1980,1982) demonstram a influência da velocidade do passo nas diferentes formas da força na direção transversal vertical para caminhada (Wheeler 1980,1982, apud Segundinho, 2017) – Figura 5.

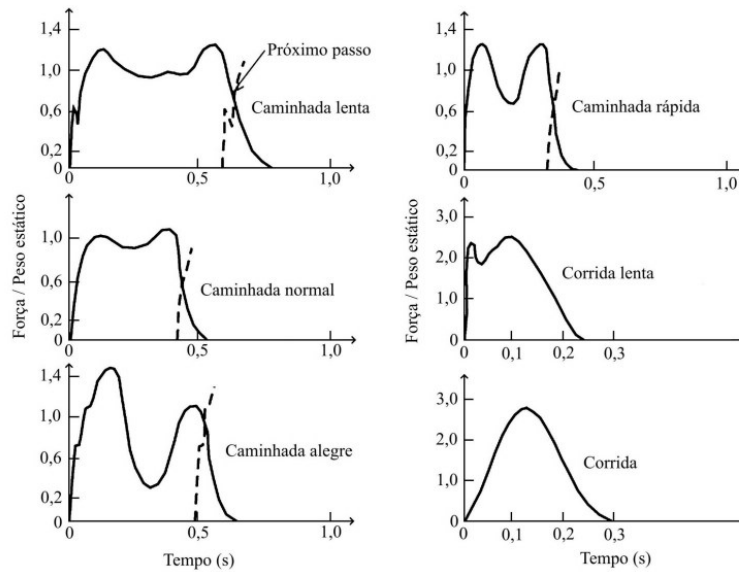


Figura 5 – Forças na direção transversal vertical para diferentes frequências de passos (Wheeler, 1980,1982, apud Segundinho 2017]

Matsumoto et al. (1972,1978), a partir de um experimento com 505 pessoas, demonstraram que as faixas de frequência podem ser representadas por uma distribuição normal com média de 2,0 Hz e desvio padrão de 0,173 Hz – Figura 6. (Matsumoto et al. 1972,1978, apud Segundinho, 2017).

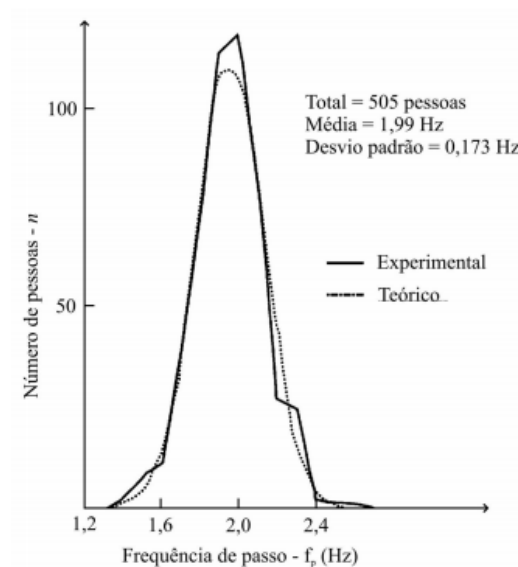


Figura 6 – Distribuição normal para frequência de passos (Matsumoto et al, 1972,1978, apud Segundinho

2017)



Quanto às faixas de frequências, para a direção vertical, as quais compreendem as ações de caminhar, correr, pular (*jumping*) e saltar (*skipping*), têm-se os seguintes valores segundo Bachmann, Pretlove e Rainer (1995): 1,6 a 2,4 Hz para caminhada; 2,0 a 3,5 Hz para corrida; 1,5 a 3,4 Hz para pular/saltar; e 0,4 a 0,7 Hz para a consideração do movimento de balanço, na direção transversal horizontal, estando o corpo no mesmo lugar (BACHMANN et al, 1995) (SEGUNDINHO et al., 2017).

A consideração em projeto das forças dinâmicas requer que estas sejam modeladas analiticamente – a modelagem pode ser no domínio do tempo ou da frequência. Contudo, esta tarefa apresenta certo grau de complexidade tendo em vista: (a) a existência de diferentes forças induzidas pelo homem que podem além de serem variáveis no tempo, variam no espaço; (b) as forças relacionam-se a uma diversidade de parâmetros; (c) a força dinâmica induzida por uma pessoa não é um processo simples e compreendido plenamente sendo de difícil modelagem; (d) quando as ações referem-se a grupos de pessoas, o número de participantes, assim como o grau de sincronização entre eles são variáveis de difícil correlação; (e) há indícios de que as forças são diferentes quando o movimento é percebido e quando este não é perceptível, visto que o comportamento dos usuários em ambas as situações difere (ŽIVANOVIĆ et al., 2005).

A abordagem de vibrações induzidas por atividades humanas em diferentes estruturas, como supracitado, tornou-se tema recorrente do interesse de diferentes autores e de destaque para trabalhos e pesquisas que primam pela ampliação e o aprofundamento dos conhecimentos a respeito do assunto.

Segundinho (2010) apresentou o estudo referente a passarelas com vigas de madeira simplesmente apoiadas, as quais foram dimensionadas estaticamente. As estruturas possuíam duas e quatro vigas de madeira, respectivamente, possuindo vãos variáveis

entre 5,0 m e 35,0 m, largura variando de 1,5 a 2,0 m e com classe de resistência da madeira C40 e C60 – Figura 7 e Figura 8.

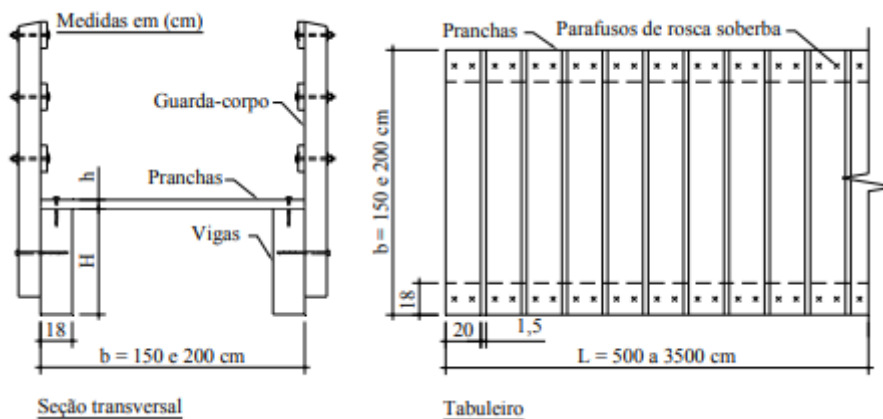


Figura 7 – Esquema da passarela de madeira com duas vigas (Segundinho, 2010)

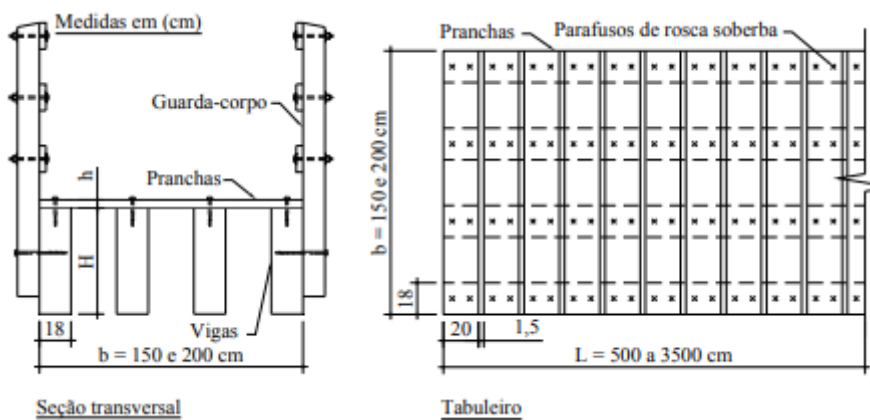


Figura 8 – Esquema da passarela de madeira com quatro vigas (Segundinho, 2010)

Levando-se em consideração o fato de que se realizou o dimensionamento apenas sob perspectiva estática dos elementos, segundo as verificações realizadas no modelo numérico para ações dinâmicas induzidas por ação humana, as acelerações limites de 0,7 m/s² na direção vertical e de 0,2 m/s² na direção transversal horizontal estabelecidas foram ultrapassadas. Sendo assim, os limites normativos para conforto humano estabelecidos em normas não foram atendidos para a maioria dos casos analisados (SEGUNDINHO,



2010). Tal fato corrobora o argumento de que uma avaliação dinâmica se faz necessária quando se entende que uma análise apenas estática não é contemplativa dos diferentes tipos de comportamentos e respostas da estrutura para as diferentes naturezas de carregamentos.

Caetano e Cunha (2005) estudou os efeitos provenientes de carregamentos induzidos por atividade humana, sobretudo aqueles com pretensão de causa de ressonância decorrente de movimentos sincronizados – considerando a ação sincronizada de grupos de pessoas em atos de vandalismo. O objeto de estudo corresponde a uma passarela localizada no Campus da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a qual possui dois trechos de 28m e 30m, sendo sua seção transversal composta por uma laje retangular a qual incorpora quatro cabos pré-tensionados embutidos em concreto armado e possui dimensões de 3,80x0,15 m, sendo elevada a 2,0 m por quatro pilares localizados no ponto intermediário – Figura 9.



Figura 9 – Passarela da Universidade do Porto (Caetano e Cunha, 2004)

A investigação deu-se na análise de três cenários:

- i) Ação estática de grande multidão;
- ii) Ação dinâmica da multidão ao longo da estrutura (caminhada);
- iii) Vibrações excessivas intencionalmente induzidas por grupos de pedestres – “vandal” loads.



Quantos aos resultados para o segundo cenário, houve a constatação de que, para uma densidade de aproximadamente 1,0 pessoa/m² com sincronização de passos, a aceleração vertical máxima não excedeu 2,0 m/s² e o limite registrado para a aceleração lateral máxima foi de 0,5 m/s² - tais valores são classificados como estando no “limite da perturbação” a “perturbação forte”. Para o terceiro cenário, para a ação de 18 pessoas saltando com pretensão de excitação da estrutura, ocorreu a indução de uma aceleração máxima de 6,6 m/s², um deslocamento correspondente de 3,4 cm e a taxa de amortecimento identificada era de 4,8%. Os resultados evidenciaram a facilidade de excitação da passarela e a possibilidade de danos decorrentes do efeito de ressonância por ação intencional de um grupo de pedestres (CAETANO; CUNHA, 2004).

Barros (2009) apresenta o estudo referente a uma passarela de pedestres – localizada município de Esteio – RS situada sobre a rodovia BR-116. A estrutura contabiliza um total de 80,08 m, sendo dividida em três vãos e dois trechos em balanços – Figura 10.

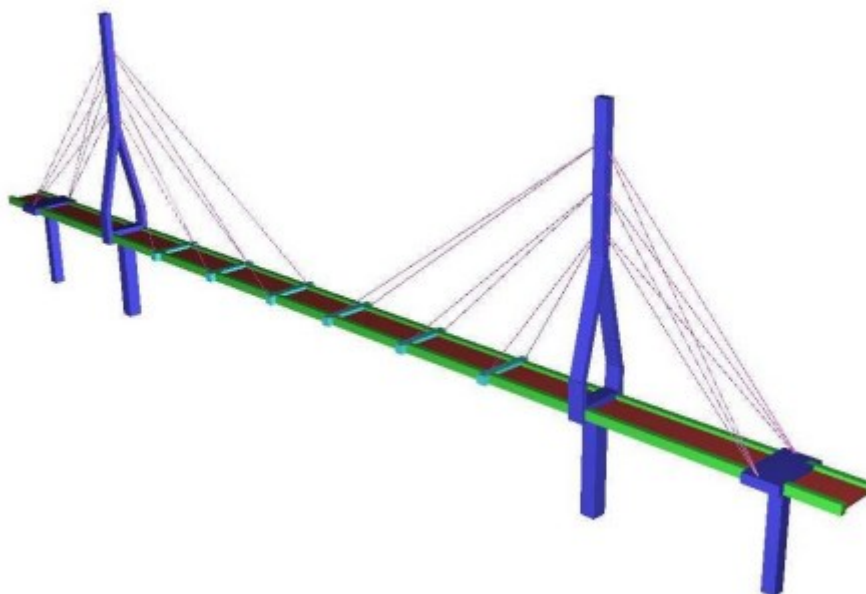


Figura 10 – Modelo numérico da passarela (Barros, 2009)

Ao desenvolver seu estudo, adotou como atividades de análise as condições de saltos, caminhada e corrida lenta – sendo estes implementados para a região do vão central no



qual se encontravam as maiores amplitudes. Quanto à quantidade de usuários e à sincronia de movimento, o autor adotou seis combinações:

- i) Caminhar: um pedestre caminhando no vão central;
- ii) Caminhar: três pedestres caminhando no vão central defasados de 1,0s;
- iii) Correr: um pedestre correndo no vão central;
- iv) Correr: três pedestres correndo no vão central defasados de 0,8s;
- v) Correr: três pedestres saltando simultaneamente no meio do vão central

A partir dos resultados obtidos, as conclusões acerca dos danos acarretados pela atividade de saltar são sobressalentes e relacionam-se ao impacto – como a de maior fator de impacto; a aplicação do carregamento incidente no ponto mais crítico do vão e a escolha de uma frequência de salto próxima a natural da estrutura. Como conclusão ao estudo identificou ainda que a ação de três usuários saltando – como uma simulação de ato de vandalismo – segundo o pressuposto de limites normativos, a estrutura não atenderia ao padrão de conforto, visto que até a ação de um usuário seria capaz de provocar acelerações na estrutura além do permitido. Além disso, ressalta a amplificação do deslocamento durante o salto o qual, quando comparado ao pedestre parado, apresenta-se muito superior – salientando que para números maiores de usuários, os valores de deslocamento podem atingir valores não previstos em projeto (BARROS, 2009).

Zúñiga (2011) propôs a análise da passarela tubular mista, aço-concreto, Osvaldo Aranha, situada na cidade do Rio de Janeiro/RJ. A estrutura é composta por três vãos de 32,50 m, 17,50 m e 20,00 m e dois balanços de 5,00 m e 7,50 m. A superestrutura consiste na disposição de elementos tubulares de aço, sendo constituída por duas treliças contraventadas horizontalmente na região inferior e superior da seção e um tabuleiro de

concreto armado. A mesoestrutura apresenta quatro pórticos formados por colunas tubulares e vigas travessas – Figura 11.



Figura 11 – Passarela Osvaldo Aranha (Zúñiga, 2011)

A estrutura foi submetida a análise experimental e a análise do modelo numérico para diferentes configurações de carregamento. A avaliação dinâmica teve por resultados uma frequência natural na direção vertical de 5,08 Hz, atendendo aos critérios normativos, visto que este valor deve ser superior a 5,0 Hz. Quanto à frequência transversal, a estrutura não atende ao limite de 2,5 Hz determinado pelo Eurocódigo 1995-2 (1997), apresentando um valor de 2,34 Hz. As acelerações apresentaram valores superiores aos normativos estabelecidos na direção vertical quando verificados valores referentes a situação de duas pessoas correndo – para as situações de uma caminhada para 1 a 3 pessoas ou uma pessoa correndo os valores de aceleração foram satisfeitos. Além disso, ressalta-se a ocorrência do efeito de ressonância para alguns modos de vibração da estrutura, indicando assim a possibilidade de ocorrência de vibrações excessivas e, como exposto, devido à identificação de acelerações acima dos valores estabelecidos, situações de desconforto para os usuários (ZÚÑIGA, 2011).

Entende-se, portanto, que uma avaliação dinâmica torna-se relevante para a compreensão do comportamento da estrutura quando submetida a diferentes



configurações de carregamento – sobretudo, para carregamentos resultantes da ação dos usuários e aqueles correspondentes a atos com fins de danificação da estrutura – tendo por fim a previsão de situações que acarretam desconforto ao pedestre, comprometimento de elementos estruturais, interrupção do tráfego e dificuldades da travessia – além do atendimento de limites de conforto que asseguram o usufruto pleno da estrutura.

2.2 Limites Normativos

As normas e guias propõem diretrizes a respeito da abordagem de situações de análises dinâmicas e vibrações em estruturas. Por interesse no objeto de estudo, prima-se pelas recomendações e limites estabelecidos apresentados em questões pertinentes a abordagem da temática para aplicabilidade em situações de avaliações de passarelas.

A NBR 6118 (2014) “Projeto de Estruturas de Concreto Armado” apresenta fatores que se relacionam às vibrações e ao dimensionamento para o Estado Limite Último (ELU) e para o Estado Limite de Serviço (ELS) de estruturas. Destaca-se a seção 13.3 da referida norma que classifica deslocamentos limites como valores práticos para verificações do estado de deformações excessivas da estrutura. Para tal, divide em quatro grupos básicos, a respeito dos deslocamentos e, por interesse do trabalho, destaca-se o grupo de “aceitabilidade sensorial” para o qual: “o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. A limitação da flecha para prevenir essas vibrações, em situações especiais de utilização, deve ser realizada como estabelecido na Seção 23” (NBR 6118:2014). O limite de deslocamento proposto é assim apresentado na Tabela 1.



Tabela 1 – Limites para deslocamentos [Adaptado de (NBR6118,2014)]

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$

Além disso, a norma, na seção 23 intitulada “Ações dinâmicas e fadiga”, descreve que “As ações dinâmicas podem provocar estados-limites de serviço e estados-limites últimos por vibração excessiva ou por fadiga dos materiais”. Quando ao estado-limite de vibrações excessivas, a recomendação, para garantia do comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, é de que a frequência da própria estrutura (f) seja o máximo possível afastada da frequência crítica (f_{crit}), sendo a seguinte relação satisfeita:

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

Os valores recomendados para f_{crit} , quando estes não podem ser experimentalmente determinados, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Frequência crítica para vibrações verticais de estruturas sob ação humana (NBR6118,2014)

Caso	f_{crit} Hz
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

A NBR8800 (2008) “Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios” destina o “Anexo L” às tratativas de vibrações em pisos. Entre as recomendações, encontra-se a



de que a frequência natural da estrutura do piso, em nenhum caso, deve ser inferior a 3 Hz. A indicação do problema de vibração, segundo a norma, prevê a abordagem, durante projeto, de que por meio na análise dinâmica sejam considerados: (a) as características e a natureza das excitações dinâmicas; (b) os critérios de aceitação de conforto humano em função do uso e da ocupação de áreas do piso; (c) a frequência natural da estrutura do piso; (d) a razão do amortecimento modal; (e) os pesos efetivos do piso.

Quanto às frequências sugeridas para pisos onde há, regularmente, pessoas caminhando – tais como residências e escritórios – a menor frequência natural não deve ser inferior a 4 Hz. Além disso, atrela esta condição de limitação de frequência ao fato de que a satisfação do critério depende do deslocamento vertical total do piso – este devido as ações permanentes, sendo desconsideradas parcelas dependentes do tempo, e ações variáveis – calculado mediante uso de combinações de serviço não ultrapassar 20 mm. Em locais de atividades rítmicas, como academias de ginásticas, salões de dança, ginásios e estádios de esportes a menor frequência natural não dever ser inferior a 6 Hz. E em casos onde as ações apresentem alto grau de repetição, o limite inferior indicado corresponde a 8 Hz. Além disso, a satisfação do critério depende do deslocamento vertical total do piso – este devido às ações permanentes, sendo desconsideradas parcelas dependentes do tempo, e ações variáveis – calculado mediante uso de combinações de serviço não ultrapassar 9 mm e 5 mm. Como visto, a norma não sugere diretamente limites aplicáveis a passarelas.

A NBR7188 (2013) – “Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestres” recomenda para ações em passarelas, segundo a seção 6, a aplicação de uma carga móvel de 5 kN/m² uniformemente distribuída, sendo inserida na limitação entre os guarda-corpos na correspondente posição mais desfavorável sem que haja consideração do



coeficiente de impacto vertical. Ainda nesta seção, segundo o item 6.3, há o seguinte destaque para o caso de passarelas especiais: “Tratando-se de passarelas esbeltas, leves, sensíveis a vento e a ação dinâmica dos pedestres, principalmente em estruturas de aço, mistas, pênseis ou estaiadas, é necessária a comprovação de sua estabilidade global e verificação dos diversos elementos estruturais através de modelos dinâmicos e verificação à fadiga”.

O guia de projeto “Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity” elaborado pelo American Institute of Steel Construction (AISC) apresenta critérios e análises recomendadas para ponte pedonal em ambiente interno e externo, conforme Tabelas 3 e 4. Salienta-se que o critério para avaliação de pisos pode ser, de igual modo, utilizado para determinar a aceitabilidade da vibração vertical em passarelas. Ressalta-se que os valores de aceleração de pico são obtidos, segundo o guia, a partir do valor máximo de 1s RMS, ou seja “*root mean square*”, multiplicado pela raiz quadrada de 2, sendo então denominado de ESPA (“*equivalent sinusoidal peak acceleration*”).

Tabela 3 – Limites de vibração para passarelas [Adaptado de AISC (2016)]

Ambiente	Método	Aceleração limite (m/s ²)*
Interno	Aceleração de pico	0,15
Externo	Aceleração de pico	0,5
*Valores considerados para pedestres em pé. Valores menores são recomendados para o caso de pedestres sentados.		

Tabela 4 – Limites de vibração para edificações [Adaptado de AISC (2016)]

Ocupação	Método	Aceleração limite (m/s ²)
Atividades rítmicas	Aceleração de pico	0,4 - 0,7

O guia acrescenta ponderações a respeito da frequência natural de vibração lateral, a qual não deve ser inferior a 1,3 Hz, isto se deve ao fato de que uma vez considerada como



frequência máxima do passo o valor de 2,2 Hz, implicando em uma força lateral máxima de frequência 1,1 Hz, uma possível sincronia da caminhada com o balanço lateral não ocorrerá caso a frequência natural excede o valor de 1,1 Hz.

Além disso, no que tange a considerações de projeto, o guia adverte sobre a influência da concepção deste quanto ao posicionamento do tabuleiro, visto que caso este esteja localizado entre as vigas a estrutura estará sujeita a vibrações de baixas frequências e de elevadas amplitudes quando comparada ao posicionamento deste acima dos elementos de suporte cujo conjunto apresentaria uma inércia maior.

Considerando ainda situações de carregamentos que pressupõem ação deliberada de excitação da estrutura – denominados de “vandal loads” – e a fim de evitar a suscetibilidade de pisos a vibrações decorrentes destes atos, a frequência natural recomendada pelo guia não deve ser inferior a 3,0 Hz.

O guia “Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for steel footbridges”, elaborado por Butz et al. (2008), apresenta limites de aceleração vertical indicados conforme a Tabela 5.

Além disso, apresenta a relação entre as acelerações, em conformidade com diferentes normas internacionais, e as respectivas faixas de frequências – Figura 12. Nesta, expressam-se as diferentes admissões apresentadas por fontes distintas que, para mesmas faixas de frequência, apresentam variações de limites de aceleração.



Tabela 5 – Limites de para acelerações verticais [m/s²] [EUR 23318 (2008)]

Fonte	Limite	Descrição
AISC (2016)	0,5	-
Eurocode 1 (ENV 1991-3)	$\text{Min} \begin{cases} 0,50\sqrt{f_n} \\ 0,70 \end{cases}$	para $f = 1$ a 3 Hz
		para $f = 3$ a 5 Hz: verificar dependendo do caso
		para $f = 5$ Hz: não é necessário verificar
DIN Fachbericht 102	$0,50\sqrt{f_1}$	para $f_i < 5$ Hz, $f_i =$ frequência natural da ponte
SBA	0,39	1 - 3 Hz
BS 5400-2/C	$0,50\sqrt{f_1}$	para $f_i < 5$ Hz, $f_i =$ frequência natural da ponte
Ontario Bridge Code ONT83	$0,25 \times f_1^{0,78}$	$f_i =$ frequência natural da ponte
Eurocode 5 (ENV 1995-2)	0,7	
Japanese footbridge design code (1979)	1	

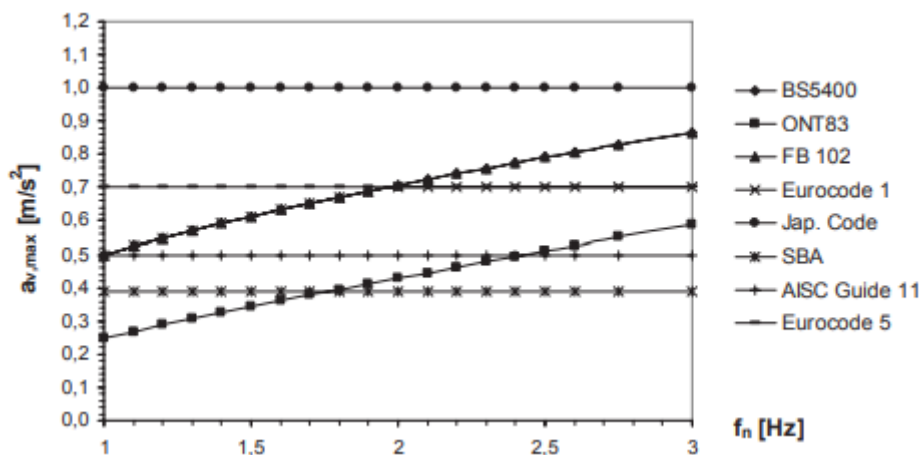


Figura 12 – Limites para acelerações verticais (EUR23318, 2008)

O guia de projeto “Design of Floors for Vibration: A New Approach” proposto pelo Steel Construction Institute (SCI), aponta que a vibração é considerada um problema relacionado, sobretudo ao conforto, embora possa causar danos como rachaduras e afetar aparelhos sensíveis a vibração. Outra questão corresponde à natureza subjetiva da percepção e conforto, uma vez que tais condições são variáveis entre as pessoas, não



sendo possível o estabelecimento de valores fixos. Deste modo, torna-se conveniente que se estabeleçam faixas que possam atender a baixas probabilidades da ocorrência de problemas relacionados a vibração. Sendo assim, o guia apresenta os critérios associados a atividades humanas rítmicas conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Critérios associados a atividades rítmicas [Adaptado de SCI (2009)]

Reação das Pessoas	Aceleração_{rms} m/s²
Limite razoável para pessoas passivas	< 0,35
Perturbador	0,35 - 1,27
Inaceitável	1,27 - 2,47
Provável situação de pânico	> 2,47

O guia técnico de projeto “Footbridges” elaborado pelo Service d'études techniques des routes et autoroutes – (SETRA, 2006) aponta que os problemas relacionados a pontes pedonais referem-se ao problema de ressonância, ou seja, quando a frequência natural da estrutura é concordante à frequência de excitação provocada pela ação dos usuários, ocasionando um desconforto sentido pelo pedestre que interfere no progresso de sua ação. Ressalta, de igual modo, que visto a variabilidade constituinte das diferentes formas com as quais uma pessoa pode executar o caminhar, mediante os diferentes fatores que interferem em tal movimento, o problema deve ser abordado tendo-se em perspectiva a gama de valores possíveis para frequências correspondentes a tal, ou seja, a tratativa de projetos para esta questão deve compreender a análise de parâmetros relacionados à condição de ressonância – como os modos de vibração natural e fator de amortecimento crítico da passarela – e faixas de frequências naturais da estrutura associadas a estes modos, as quais podem coincidir com as frequências estabelecidas para o caminhar humano.



Considerando ainda a subjetividade dos conceitos de conforto e percepção, o guia pondera quatro questões: (a) a percepção é variante entre usuários e considerando que esta varia para pessoas realizando a ação no mesmo percurso; (b) os limites estabelecidos para um indivíduo podem ser: o nível de vibração percebido; o grau de perturbação ou desconforto decorrente da vibração podendo ser tolerável durante um curto período de tempo, perturbador ou inaceitável; a relação de consequências da vibrações podendo abranger perda de equilíbrio ou problemas de saúde; (c) a posição da pessoa – podendo estar sentada, em pé, parada ou em movimento – implicando diretamente no nível de percepção e reação as vibrações; (d) o nível de vibração da estrutura e a vibração realmente sentida pelo pedestre são distintas. Sendo assim, torna-se relevante a limitação da aceleração de pico da estrutura, denominada aceleração crítica, de modo a não se exceder tal valor e assegurar o conforto do usuário. Esta verificação, mediante a combinação de casos de cargas para a determinação da aceleração é considerada um Estado Limite de Serviço. Deste modo, são propostos quatro intervalos de acelerações verticais divididos em quatro níveis de conforto: (a) máximo; (b) médio; (c) mínimo; (d) desconfortável/inaceitável – Tabela 7.

Tabela 7 – Intervalos de conforto para acelerações (m/s^2) [Adaptado de SETRA (2006)]

Intervalos de aceleração	0–0,5	0,5–1	1–2,5	>2,5
1	Máximo			
2		Médio		
3			Mínimo	
4				Inaceitável

Além dos intervalos de acelerações para critérios de conforto, o guia estabelece intervalos de frequência os quais são atribuídos riscos de ocorrência do fenômeno de ressonância para vibrações no sentido vertical e longitudinal, sendo estes divididos em: (a) máximo risco de ressonância; (b) médio risco de ressonância; (c) baixo risco de



ressonância para situações de carregamento padrão; (d) risco insignificante de ressonância – Tabela 8.

Tabela 8 – Intervalos de frequência para vibrações verticais (Hz) [Adaptado de SETRA (2006)]

Intervalos de frequência	0–1	1–1,7	1,7–2,1	2,1–2,6	2,6–5	>5
1			Máximo			
2		Médio		Médio		
3					Baixo	
4	Insignificante					Insignificante

Geralmente, além das considerações usuais de avaliações de acelerações em termos de acelerações de pico, ou pico a pico, as correspondentes ao que seria a aplicação da formulação RMS é utilizada como forma de avaliação da resposta de aceleração da estrutura sendo expressa pela Equação (1).

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt} \tag{1}$$

Onde: a(t) representa a aceleração ao longo do tempo e T o tempo de avaliação observado.

Outra forma de mensurar a exposição humana a vibrações é apresentada pela “Vibration Dose Value”, ou VDV, utilizada em situações de vibrações não estacionárias ou aquelas nas quais as características variam no tempo – Equação (2). É interessante observar que, neste caso, a unidade referente ao VDV é obtida em m/s^{1,75}.

$$a_{VDV} = \left(\int_0^T [a(t)]^4 dt \right)^{1/4} \tag{2}$$

O método “running r.m.s”, apresentado para a verificação de vibrações na estrutura, é exposto pela ISO 2631 (1997) e soma-se as demais formas de mensurar as respostas de acelerações – Equação (3).



$$a_w(t_0) = \left(\frac{1}{r} \int_{t_0-1}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right)^{1/2}$$

Onde: $a_w(t_0)$ representa a aceleração no instante de tempo observado; t_0 corresponde ao instante observado; e r relaciona-se ao intervalo de integração.

Ressalta-se que para a formulação supracitada, tem-se aplicabilidade usual da obtenção de resposta em um intervalo correspondente a 1 s, ou seja, r sendo igual a 1, sendo esse valor conhecido por 1s RMS.

Segundo Živanović e Pavic (2007) para avaliações de passarelas, as quais vibram em predominantemente um único modo, os valores correspondentes as acelerações de pico, 1s RMS e VDV apresentam correlações lineares as quais possibilitam a utilização de tais medidas de forma a avaliar a resposta humana as vibrações na estrutura. Segundo o exposto na Tabela 6, os valores de acelerações RMS são apresentados para a sugestão presente no guia SCI (2009), enquanto os valores VDV são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Intervalos VDV para critério de conforto humano [Adaptado de Gaspar (2018)]

Ellis e Litter (2004)	Setareh (2012)	Reação das pessoas
VDV (m/s^{1,75})	VDV (m/s^{1,75})	
< 0,66	< 0,50	Limite razoável para pessoas passivas
0,66 - 2,38	0,50 - 3,50	Perturbador
2,38 - 4,64	3,50 - 6,90	Inaceitável
> 4,64	> 6,90	Provável situação de pânico



3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Dinâmica das Estruturas

Os sistemas com n graus de liberdade apresentam uma equação de equilíbrio dinâmico resultante das relações existentes entre as matrizes de massa, amortecimento e rigidez e a associação aos valores de aceleração, velocidade e deslocamento. Deste modo, a Equação (4) exprime o equilíbrio para o sistema (CLOUGH E PENZIEN, 2003).

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (4)$$

Onde, $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ e $u(t)$ representam os vetores aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente, com dimensão n . Enquanto que M , C e K representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, com dimensões $n \times n$. O vetor $F(t)$ com dimensão n representa o carregamento atuante na estrutura.

Segundo Clough e Penzien (2003), para um sistema em vibração livre e não amortecido, tem-se a Equação (5), a qual resulta da retirada das parcelas referentes ao amortecimento e a carga atuante na estrutura:

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0 \quad (5)$$

A resolução da equação diferencial linear resultando provém do uso da Equação (6):

$$u(t) = u_0 \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (6)$$

Onde, u_0 – corresponde ao vetor de amplitudes associado à forma modal (deslocamentos nodais) do sistema; ω – é a frequência angular do movimento em rad/s; θ – representa o ângulo de fase em rad.

Mediante a substituição da Equação (6) na Equação (5), considerando a arbitrariedade do termo seno, tem-se a Equação (7):

$$[K - \omega^2 M]\hat{u} = 0 \quad (7)$$



Na Equação (4), os valores de ω^2 representam os autovalores, indicando o quadrado das frequências de vibrações livres, enquanto os deslocamentos associam-se aos valores de \hat{u} os quais denotam a forma de vibração do sistema – sendo os autovetores ou modos de vibração. A resolução das equações é expressa pela Regra de Cramer – Equação (8):

$$\hat{u} = \frac{0}{[K - \omega^2 M]} \quad (8)$$

Deste modo, uma solução não trivial é possível quando a Equação (9) é satisfeita.

$$[K - \omega^2 M] = 0 \quad (9)$$

A Equação (7) é denominada como equação de frequência do sistema. Expandindo-se o determinante, tem-se a equação algébrica para o n -ésimo grau da frequência ω^2 para o sistema com n graus de liberdade. As raízes da equação ($\omega^2_1, \omega^2_2, \omega^2_3, \dots, \omega^2_n$) são representativas das frequências naturais associadas aos modos de vibração do sistema – \hat{u} .

O método adotado para a avaliação da resposta dinâmica da estrutura estudada – apresentada no Capítulo 4 – corresponde ao da Superposição Modal. A abordagem proposta por este representa uma combinação linear dos modos naturais de vibração da estrutura para a obtenção de uma configuração deformada em um dado instante sob condição de carregamento constante (AVELINO, 2008) – Figura 13.

Na aplicação deste método, cada modo de vibração relaciona-se a um “fator de participação” correspondente a este na resposta dinâmica. A determinação deste fator prossegue mediante a resolução de um sistema massa, mola amortecedor e força com um grau de liberdade. Sendo assim, a sequência de procedimentos do método é expressa por: (i) determinação dos modos e frequências naturais; (ii) cálculo da massa, rigidez, amortecimento e força generalizada para cada modo de vibrar; (iii) resolução do sistema



generalizado massa, mola, amortecedor e força para cada modo de vibrar determinando os fatores de participação; (iv) implementação da superposição modal (AVELINO, 2008).

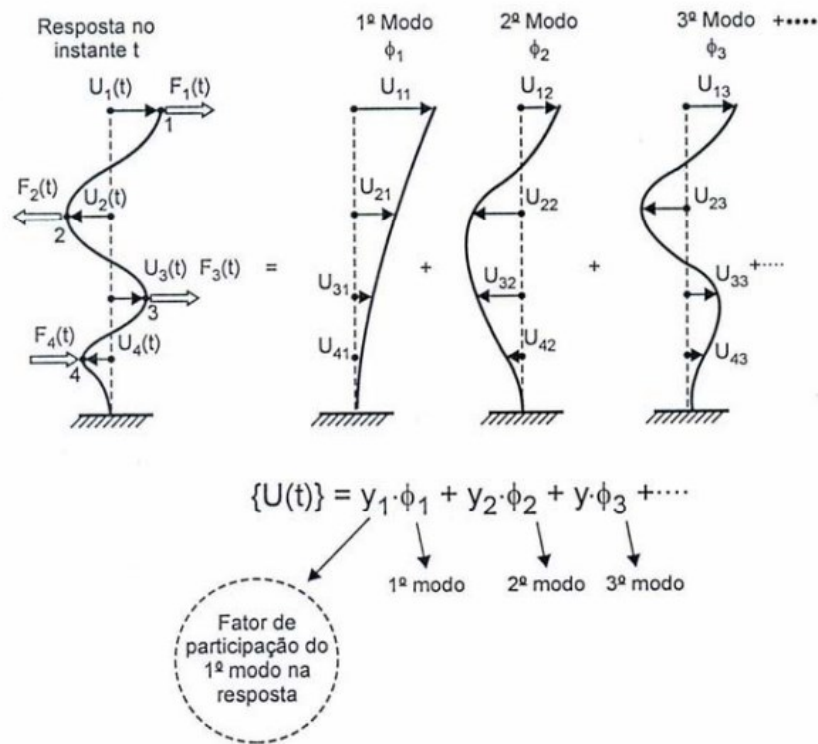


Figura 13 – Método da Superposição Modal (Avelino, 2008)

3.2 Modelos do carregamento humano

As modelagens adotadas para o estudo da temática estudada seguem os modelos determinísticos de carregamento humano dinâmico matemático (saltos rítmicos e caminhada) propostos nas referências normativas e guias de projeto apresentados a seguir.

3.2.1 American Institute of Steel Construction – AISC

O guia de projeto “Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity” apresentado pelo American Institute of Steel Construction propõe a Equação (10) – através de uma série de Fourier – como uma representação que denota a atividade



humana, seja associada aos saltos ou à caminhada, imposta sobre um piso para uma pessoa (AISC, 2016):

$$F(t) = Q + \sum_{i=1}^N \alpha_i Q \text{sen}(2\pi i f_{\text{step}} t - \phi_i) \quad (10)$$

onde $F(t)$: função dinâmica do carregamento (N); Q : peso de uma pessoa (N); α_i : coeficiente dinâmico corresponde ao i -ésimo harmônico; i : harmônico da frequência correspondente; f_{step} : frequência do passo (Hz); t : tempo (s); ϕ_i : ângulo de fase para o i -ésimo harmônico (rad); N : número de termos da série de Fourier.

O guia propõe a Equação (11) como uma representação que denota a atividade humana rítmica imposta sobre um piso para um grupo:

$$P(t) = w_p + \sum_{i=1}^N w_p \alpha_i \text{sen}(2\pi i f_{\text{step}} t - \phi_i) \quad (11)$$

onde, w_p : representa a estimativa do peso corporal por unidade de área e o espaçamento previsto para os participantes da atividade rítmica (N/m²).

Quanto ao interesse em atividades referentes a caminhada e a saltos, o guia propõe parâmetros para a série de Fourier para uma pessoa ou grupos, diferentes atividades e mediante a abordagem de diferentes autores – Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 – Parâmetros para série de Fourier - individual [Adaptado: AISC (2016)]

Atividade	Autores	Q (N)	f_{step} (Hz)	Coefficiente dinâmico α_i	Ângulo de fase ϕ_i (rad)
Caminhar	Rainer et al. (1988) Allen e Murray (1993)	698	1,6 - 2,2	0,5; 0,2; 0,1; 0,05	-
	Willford et al. (2007) Smith et al. (2007) Davis e Murray (2010)	747	1,6 - 2,2	0,4; 0,07; 0,06; 0,05	0; $-\pi/2$; π ; $\pi/2$



Tabela 11 – Parâmetros para série de Fourier - grupos [Adaptado: AISC (2016)]

Atividade	Autores	w_p (psf)	f_{step} (Hz)	Coefficiente dinâmico α_i	Ângulo de fase ϕ_i (rad)
Saltos	Smith et al. (2007)	3,9*	1,5 - 2,8	1,8; 1,3; 0,7; 0,2	$\pi/6$; $-\pi/6$; $-\pi/2$; $-5\pi/6$
* Devido à falta de coordenação de quando grupos, os fatores de redução ($\alpha_1 = 1,61p^{-0,082}$, $\alpha_2 = 0,94p^{-0,24}$, $\alpha_3 = 0,44p^{-0,31}$) em decorrência do número de participantes da atividade ($2 \leq p \leq 64$) podem ser aplicados a w_p .					

Além disso, para a atividade de caminhada o guia apresenta a recomendação quanto às faixas de frequência, levando-se em consideração os critérios de conforto previamente estabelecidos – Tabela 12.

Tabela 12 – Faixas de frequência para caminhada e coeficientes de Fourier [AISC (2016)]

Harmônico (i)	Caminhada	
	if_{step} (Hz)	α_i
1	1,6 - 2,2	0.5
2	3,2 - 4,4	0.2
3	4,8 - 6,6	0.1
4	6,4 - 8,8	0.05

3.2.2 Steel Construction Institute – SCI

O guia de projeto “Design of Floors for Vibration: A New Approach” apresentado pelo Steel Construction Institute propõe as Equações (12-15) como uma representação que denota a atividade humana rítmica – tais como saltos para uma pessoa – imposta sobre um piso (SCI, 2009):

$$F(t) = Q \left[1,0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \text{sen}(2\pi i f_p t + \phi_i) \right] \quad (12)$$

$$\alpha_1 = 1,61p^{-0,082} \quad (13)$$

$$\alpha_2 = 0,94p^{-0,24} \quad (14)$$

$$\alpha_3 = 0,44p^{-0,31} \quad (15)$$



onde $F(t)$: função dinâmica do carregamento (N); Q : peso de uma pessoa (N); α_i : coeficiente dinâmico corresponde ao i -ésimo harmônico; i : harmônico da frequência correspondente; f_p : frequência do carregamento (Hz); t : tempo (s); ϕ_i : ângulo de fase para o i -ésimo harmônico (rad); N : número de termos da série de Fourier; p : número de participantes da atividade rítmica ($2 \leq p \leq 64$), quando considerada atividades em grupo.

Para situações com uma pessoa, a recomendação para saltos normais “*Normal Jumping*” apresentada pelo guia pode ser observada na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros para série de Fourier – 1 pessoa (SCI, 2009)

Saltos normais	Coeficiente	$h = 1$	$h = 2$	$h = 3$	$h = 4$	$h = 5$	$h = 6$
	α_h	1,80	1,286	0,667	0,164	0,099	0,133
	ϕ_h	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

Além disso, para a atividade de caminhada o guia apresenta a recomendação quanto às faixas de frequência referentes a cada harmônico – Tabela 14.

Tabela 14 – Faixas de domínio para caminhada (SCI, 2009)

Harmônico (i)	Intervalo de frequência f_p (Hz)	Coeficiente α_i	Ângulo de fase ϕ_i
1	1,8 - 2,2	0,436 ($if_p - 0,95$)	0
2	3,6 - 4,4	0,006 ($if_p + 12,3$)	$-\pi/2$
3	5,4 - 6,6	0,007 ($if_p + 5,2$)	π
4	7,2 - 8,8	0,007 ($if_p + 2,0$)	$\pi/2$

3.2.3 Standard ISO 10137

A norma ISO 10137 propõe as Equações (16-19) como uma representação que denota a atividade humana – tais como saltos coordenados ou caminhada – imposta sobre um piso (ISO 10137, 2007):



$$F(t) = Q \left[1,0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \text{sen}(2\pi i f_p t + \phi_i) \right] \quad (16)$$

$$\alpha_1 = 2,1 - 0,15(f) \quad (17)$$

$$\alpha_2 = 1,9 - 0,17(2f) \quad (18)$$

$$\alpha_3 = 1,25 - 0,11(3f) \quad (19)$$

onde $F(t)$: função dinâmica do carregamento (N); Q : participação estática de uma pessoa (N); α_i : coeficiente dinâmico corresponde ao i -ésimo harmônico; i : harmônico da frequência correspondente; f_p : frequência do carregamento (Hz); t : tempo (s); ϕ_i : ângulo de fase para o i -ésimo harmônico (rad); N : número de termos da série de Fourier.

A ISO10137:2007 apresenta, de modo mais específico, a consideração do carregamento proveniente da ação humana assim como seus respectivos parâmetros associados – Tabela 15 e Tabela 16. Para tais considerações, ressalta que a força decorrente das ações de caminhar ou correr, por exemplo, depende de características tais quais como o corpo da pessoa, o modo de caminhar ou correr e, em menor grau, o tipo de calçado e a construção do piso – referidos no “Anexo A”.

Tabela 15 – Parâmetros para carregamento devido a saltos de uma pessoa [Adaptado de ISO10137:2007]

Atividade	Intervalo de frequência nf (Hz)	Coeficientes		
		α_1	α_2	α_3
Saltos ^a	1,5 - 3,5	2,1 - 0,15 (f)	1,9 - 0,17 ($2f$)	1,25 - 0,11 ($3f$)
(a)	Uma primeira aproximação para os coeficientes α_1, α_2 e α_3 , podem ser os valores 1,7, 1,0 e 0,4 respectivamente.			



Tabela 16 – Parâmetros para carregamento devido ao caminhar de uma pessoa [Adaptado de ISO10137:2007]

Atividade	Harmônico n	Intervalo de frequência nf Hz	Coefficiente na direção vertical $\alpha_{n,v}$	Coefficiente na direção horizontal $\alpha_{n,h}$
Caminhar	1	1,2 - 2,4	0,37 ($f - 1,0$)	0,1
	2	2,4 - 4,8	0,1	
	3	3,6 - 7,2	0,06	
	4 ^a	4,8 - 9,6	0,06	
	5 ^a	6,0 - 12,0	0,06	
(a)	Esses harmônicos mais altos raramente são significativos para as considerações de percepções humanas, mas podem ser importantes para casos com maior sensibilidade de percepção por ocupantes de edificações sensíveis a vibrações.			

3.2.4 Technical Guide: Footbridges – Service d’Études Techniques des Routes et Autoroutes

O guia técnico “Footbridges – Assessment of vibration behaviour of footbridges under pedestrian loading” – elaborado pelo Service d’études techniques des routes et autoroutes – Sétra (2006) propõe a Equação (20) como uma representação que denota a atividade humana de caminhar:

$$F(t) = G_0 + G_1 \text{sen}(2\pi f_m t) + \sum_{i=2}^n G_i \text{sen}(2\pi i f_m t - \phi_i) \quad (20)$$

onde $F(t)$: função dinâmica do carregamento (N); G_0 : participação estática de uma pessoa – componente vertical (N); G_1 : amplitude do primeiro harmônico; G_i : amplitude do i -ésimo harmônico; f_m : frequência da caminhada (Hz); t : tempo (s); ϕ_i : ângulo de fase para o i -ésimo harmônico em relação ao primeiro (rad); n : número de termos da série de Fourier.



Diferentemente dos guias SCI (2009) e ISO 10137 (2007), onde as amplitudes dos harmônicos variam em função da frequência do passo, o SETRA (2006) apresenta valores fixos de amplitude – assim como o guia do AISC (2016) – correspondentes a $G_1 = 0,4 G_0$ e $G_2 = G_3 \approx 0,1 G_0$; e ângulos de fase iguais a $\phi_2 = \phi_3 \approx \pi/2$.

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

4.1 Modelo Estrutural

A passarela do Terminal Centro Olímpico - RJ, construída em 2015, como parte da obra de integração entre o complexo Olímpico – situado no bairro do Recreio dos Bandeirantes – e o BRT Terminal Centro Olímpico, é o estudo de caso apresentado e analisado para a implementação dos conceitos teóricos elucidados sobre o estudo da dinâmica de estruturas – Figura 14.



Figura 14 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Planta de situação [Fonte: Google Earth]

A passarela apresenta uma estrutura considerada mista, ou seja, aço-concreto, com aproximadamente 210 m, sendo dividida em 4 trechos, os quais são contados no sentido do início da travessia a partir da proximidade do complexo Olímpico em direção ao terminal de BRT – Figura 15.

A motivação para o estudo desta passarela deu-se ao fato que, após sua inauguração, diferentemente do previsto, a quantidade de usuários da estrutura apresentou-se de modo reduzido relativo ao esperado. Sendo posteriormente investigado o motivo do uso reduzido, os pedestres relataram o desconforto durante o momento da travessia uma vez que a estrutura apresenta vibrações que geram sensação de insegurança. Outro fator

mencionado foi a vibração da passarela a qual se torna perceptível em condições adversas – tais como ventos e chuvas fortes. (Dias e Souza, 2017).

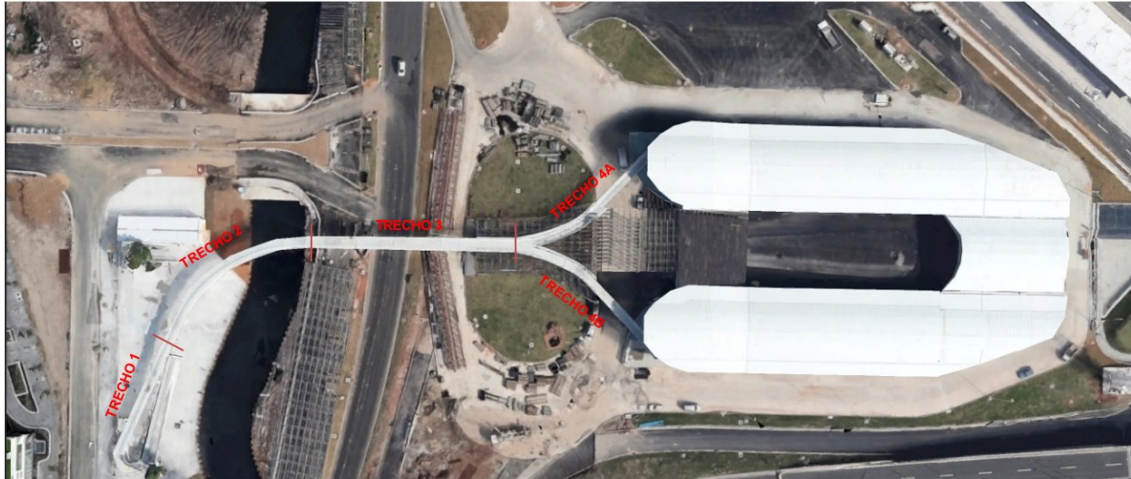


Figura 15 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Trechos 1 - 4 [Fonte: Google Earth]

Em 2017, durante a sétima edição do festival do Rock in Rio, uma estrutura provisória para travessia dos expectadores foi construída paralelamente a passarela, a qual ficou, deste modo, sendo utilizada durante o evento em detrimento do uso da alternativa de travessia original – tal fato relaciona-se ao desconforto sentido durante o uso da estrutura – Figura 16.



Figura 16 – Estrutura provisória ao lado da passarela do Terminal Centro Olímpico [Fonte: Google Maps, 2017]



O Trecho 1 da estrutura apresenta divisão de eixos espaçados 1,40 m para segmentos retilíneos e espaçamento de 1,50 m a região curva. Os Trechos 2 e 3 apresentam igual espaçamento de 1,40 m entre eixos. O Trecho 4 apresenta as variações de espaçamento sendo estes compreendidos na faixa de 1,32 m a 1,50 m – Figura 17 a Figura 20.

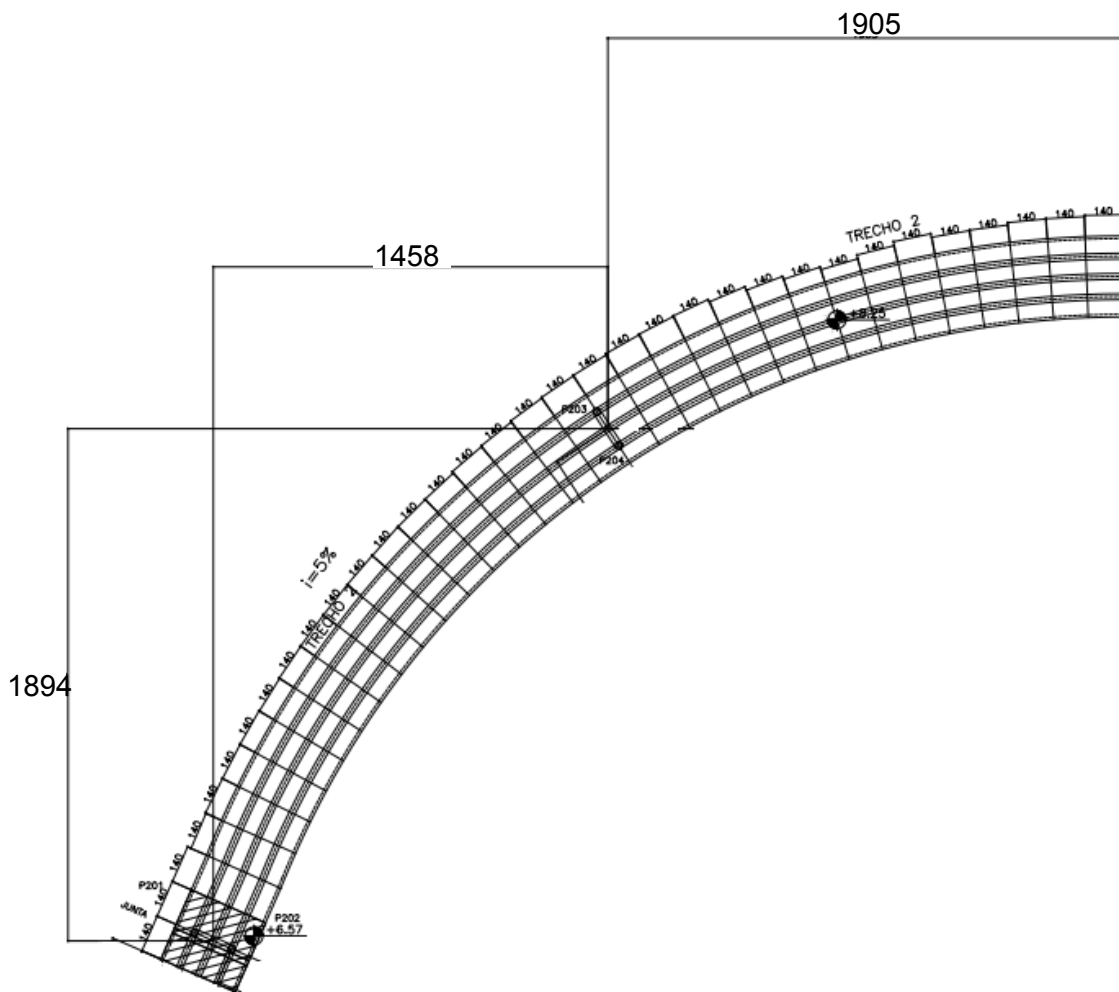


Figura 17 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Vista superior Trecho 2 (dimensões em cm)

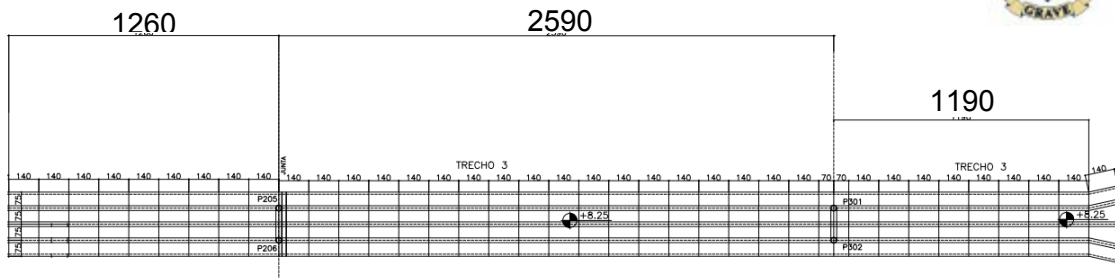


Figura 18 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Vista superior Trecho 3 (dimensões em cm)



Figura 19 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Trecho 2 (Dias e Souza, 2017)



Figura 20 – Passarela Terminal Centro Olímpico: Vista dos elementos componentes da superestrutura (Dias e Souza, 2017)

A superestrutura da passarela apresenta em sua seção transversal dois guarda-corpos compostos por tubos de diferentes diâmetros. O tabuleiro da estrutura é de concreto, e no seu decorrer há dois perfis tubulares retangulares, sendo sobreposto a uma chapa metálica. A esta chapa, ligam-se cantoneiras duplas, com comprimentos iguais aos intervalos de eixos, e montantes de chapas metálicas que ocorrem pontualmente a cada eixo. Ao todo, três conjuntos de cantoneiras duplas são dispostas, espaçadas entre si de 0,75 m e interligadas por chapas metálicas. A seção apresenta, ainda, três longarinas metálicas tubulares circulares longitudinais interligadas por chapas metálicas. Além disso, em cada eixo, há enrijecedores laterais ligados as longarinas e cantoneiras extremas da seção – Figura 21.

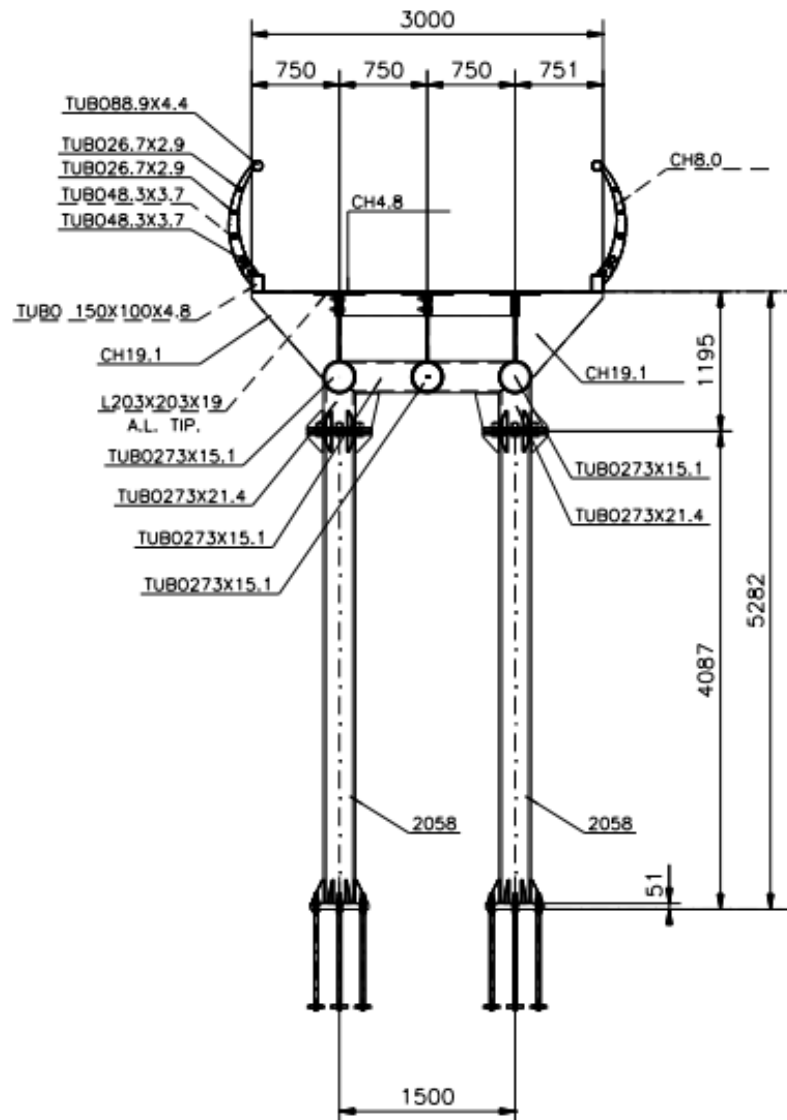


Figura 21 – Seção transversal típica da passarela

A mesoestrutura da passarela é composta por pilares metálicos tubulares circulares interligados por transversinas tubulares circulares – os quais ocorrem em pares para os Trechos 2 e 3, contudo nos Trechos 1 e 4 há disposições diferentes. O detalhe das ligações desses elementos é apresentado conforme Figura 22.

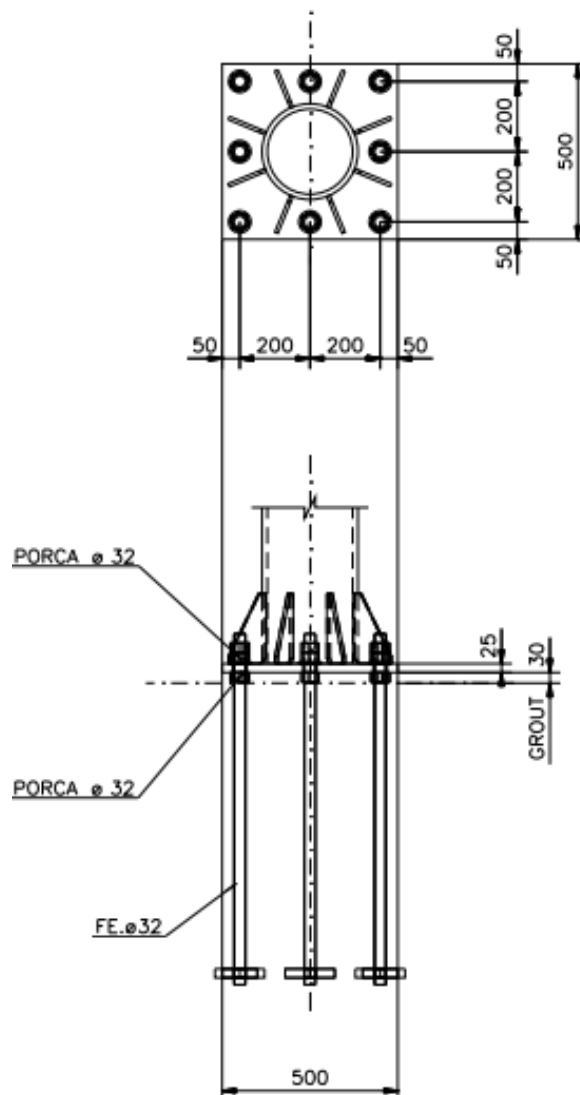


Figura 22 – Detalhe de ligação dos pilares

4.2 Modelo Numérico

Mediante o exposto, a respeito do modelo estrutural proposto para estudo, elaborou-se o modelo numérico equivalente, sendo para fins de análises empregado o software SAP2000 v. 20.0. O modelo utilizado para estudo provém do trabalho anteriormente desenvolvido por Dias e Souza (2017). Ressalta-se que em conformidade com o estudo da situação somente os Trechos 2 e 3 foram modelados, uma vez que estes apresentam as



maiores vibrações (Dias e Souza, 2017). Salienta-se também que não serão contempladas, neste estudo, alterações da estrutura construída *in loco* posteriores a esta data.

Os procedimentos de modelagem adotados para o desenvolvimento do modelo podem ser divididos em:

- (i) Disposição dos eixos da estrutura;
- (ii) Estabelecimento das condições de contorno;
- (iii) Modelagem dos elementos da seção transversal;
- (iv) Considerações de carregamentos.

Tendo em vista a modelagem apenas dos Trechos 2 e 3, as condições de contorno adotadas correspondem a: (i) para pilares considerou-se o engastamento da base; (ii) para assegurar a condição de continuidade da estrutura, nos trechos de ligação com os demais que não são modelados, tem-se a adoção de apoios do segundo gênero – restringindo deslocamentos na direção X e Y, sendo liberadas as rotações – os quais asseguram o pressuposto de continuidade – Figura 23.

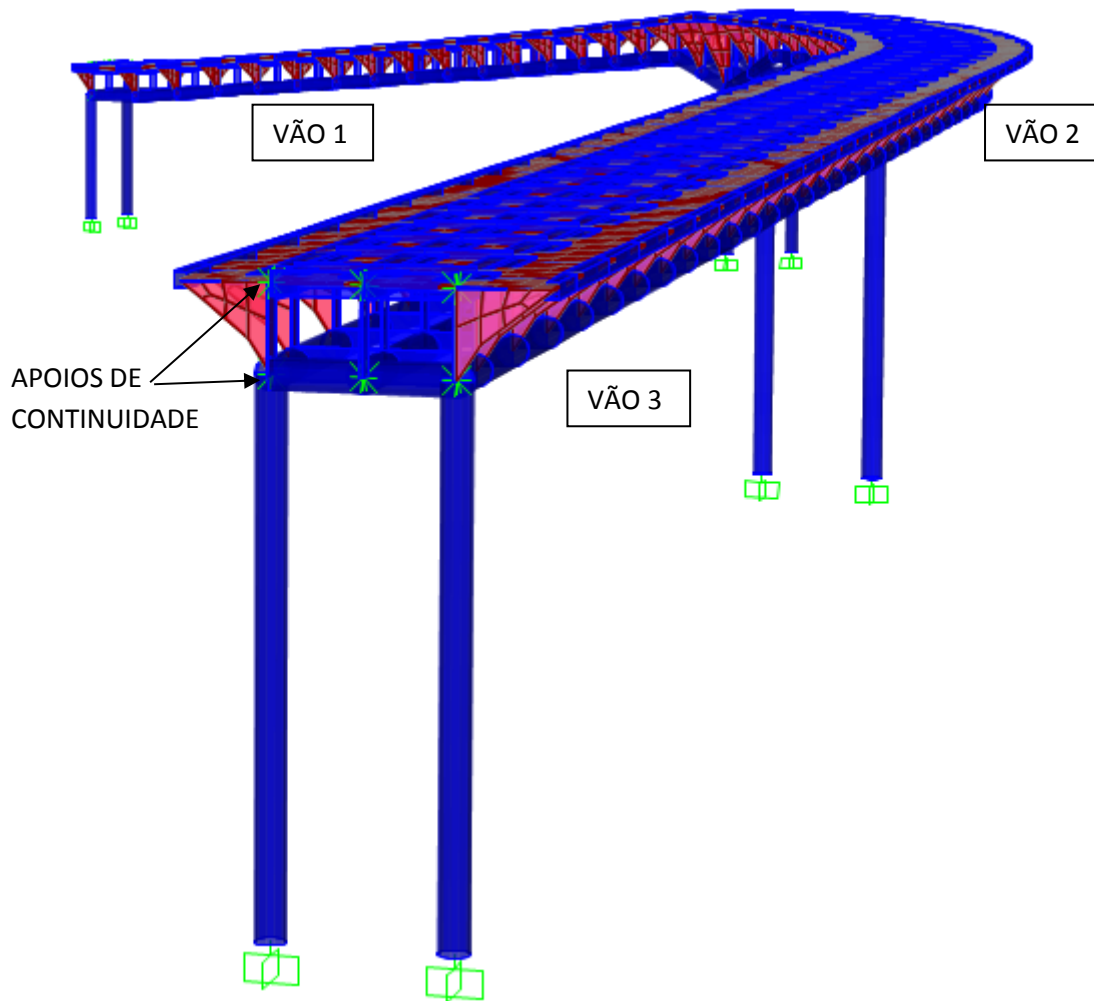


Figura 23 – SAP2000: Apoios dos Pilares

Para a modelagem dos elementos da seção transversal, duas propriedades disponíveis no software foram utilizadas da seguinte maneira: (i) para o tabuleiro e os enrijecedores laterais adotaram-se elementos de área; (ii) para as longarinas, cantoneiras, montantes e pilares adotaram-se elementos de barra – Figura 24. Como ressaltado por Dias e Souza (2017), a orientação de eixos locais dos elementos torna-se de suma importância para as análises futuras e validade do modelo. Deste modo, assegurou-se que todos os elementos estivessem dispostos de modo a serem solicitados no sentido do eixo de maior inércia.

Mediante o uso dos projetos da estrutura, primou-se pela adequação das seções que correspondesse a estrutura real.

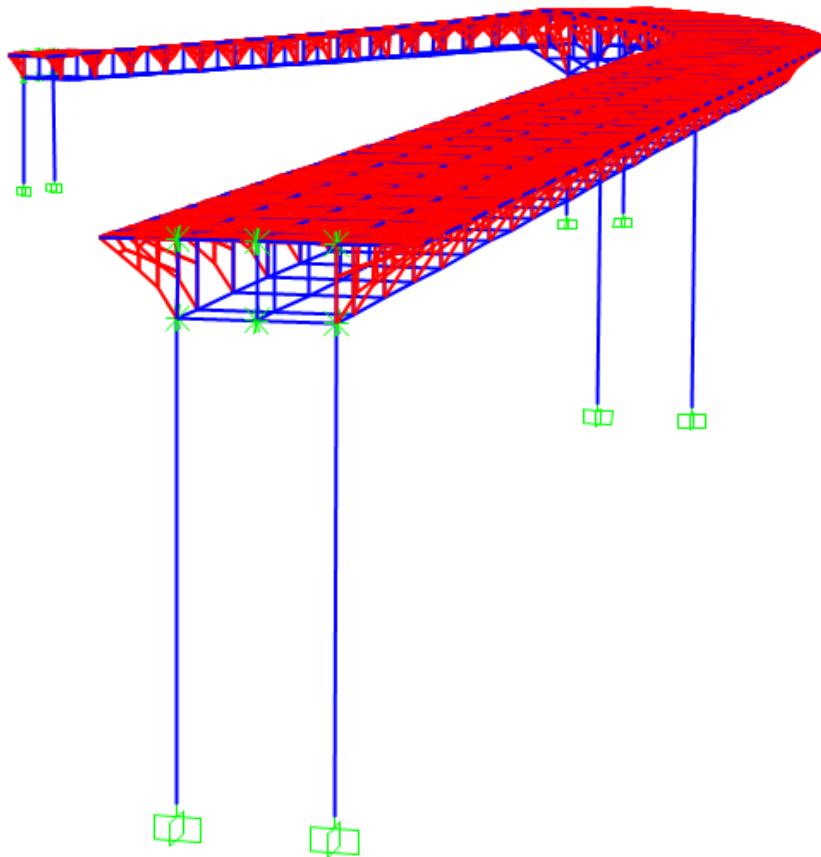


Figura 24 – SAP2000: Modelagem da Estrutura – (a) vermelho: elementos de área e (b) azul: elementos de barra

O material adotado para os elementos corresponde ao aço AR350 com propriedades: tensão de escoamento (f_y): 370 MPa; módulo de elasticidade (E): 200 GPa; massa específica (γ): 7850 kg/m³. O tabuleiro da seção corresponde a uma seção composta de aço-concreto, sendo adotada na modelagem uma seção única de aço determinada por meio do cálculo de seção equivalente – tal consideração é adotada a partir das hipóteses de que os materiais trabalham de modo conjunto (Dias e Souza, 2017).



4.3 Modelagem do Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural implica no decaimento da oscilação uma vez cessada as ações externas sobre a estrutura e na limitação das amplitudes em condição de ressonância. A construção da matriz de amortecimento, C , é realizada mediante a abordagem de Lord Rayleigh (Soriano, 2014), através da contribuição das matrizes de massa, M , e rigidez, K considerando, respectivamente, seus coeficientes de proporcionalidade α e β . Essa combinação linear é expressa pela Equação (20).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (20)$$

As constantes α e β são representadas pelas Equações (21 – 22) uma vez especificadas as razões de amortecimento ξ_i e ξ_j correspondentes ao i -ésimo e j -ésimo modo de vibração.

$$\alpha = 2 \frac{\omega_i^2 \omega_j \xi_j - \omega_i \omega_j^2 \xi_i}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (21)$$

$$\beta = 2 \frac{\omega_i \xi_i - \omega_j \xi_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (22)$$

O amortecimento do k -ésimo modo de vibração pode então ser expresso segundo a Equação (23).

$$\xi_k = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_k} + \beta \omega_k \right) \quad (23)$$

Tomando-se a razão de amortecimento ξ para os modos de referência φ_i e φ_j as Equações (21 - 22) são então substituídas pelas Equações (24 - 25).



$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (24)$$

$$\beta = 2\xi \frac{1}{\omega_i + \omega_j} \quad (25)$$

A razão de amortecimento do k-ésimo modo é expressa então pela Equação (26).

$$\xi_k = \frac{\xi(\omega_i \omega_j + \omega_k^2)}{\omega_k(\omega_i + \omega_j)} \quad (26)$$

Os valores de amortecimento são mencionados pelos guias e normas de projeto quanto à sugestão apresentada por cada um. Para tais, há recomendação conforme exposto na Tabela 17.

Tabela 17 –Valores para relação de amortecimento

Guia/Norma	Local	Aplicação	Relação de Amortecimento (ξ)
AISC (2016)	Passarela	-	1,0%
SCI (2009)	Piso	Locais com estrutura soldada ou escadas	0,5%
	Piso	Locais com pouco ou nenhum mobiliário	1,1%
	Piso	Locais equipados e mobiliados	3,0%
	Piso	Locais com divisórias de ambientes (elementos não estruturais)	4,5%
ISO10137 (2007)	Passarela	Locais com estrutura de aço e revestimento asfáltico	0,5%
	Passarela	Locais com estrutura mista (aço/concreto)	0,6%
	Passarela	Locais com estrutura de concreto protendido ou concreto armado	0,8%
SÉTRA (2006)	Passarela	Locais com estrutura de concreto armado	1,3%
	Passarela	Locais com estrutura concreto protendido	1,0%
	Passarela	Locais com estrutural mista (aço/concreto)	0,6%
	Passarela	Locais com estrutura de aço	0,4%
	Passarela	Locais com estrutura de madeira	1,0%



Nota-se que, dos guias consultados, apenas o SCI (2009) não apresenta uma citação direta quanto a valor da relação de amortecimento recomendado para estruturas pedonais.

Em posse dos valores modais da estrutura, determinou-se, a partir da resposta correspondente a cada modo e assumindo-se 0,6% como o valor de amortecimento inicial em conformidade com a recomendação presentes nos guias, a razão de amortecimento modal para cada modo da estrutura de acordo com a Equação (26) – ressalta-se que a apresentação da análise modal será um tópico discutido no capítulo seguinte. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 25.

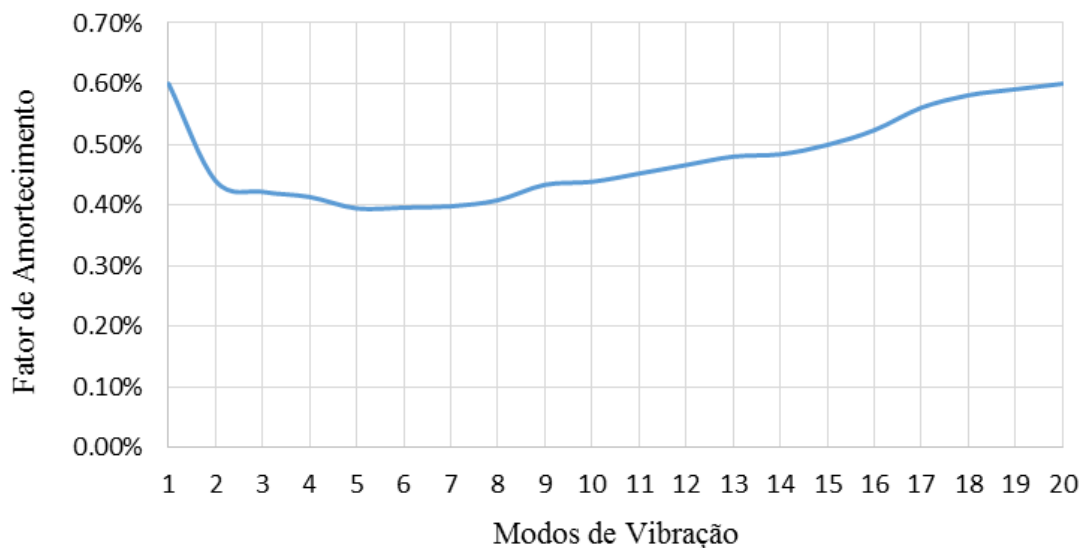


Figura 25 – Razão de amortecimento

Conforme a Figura 25, os modos naturais de vibração admitidos como os modos de referência são o Modo 1 e Modo 20 – nota-se isto a partir da observação de que para estes modos o fator de amortecimento corresponde ao valor inicial estabelecido de 0,6%. Além disso, ressalta-se que a escolha dos dois modos de referência deve ser feita de modo a determinar uma matriz de amortecimento global com esparsidade igual à matriz de



rigidez. Para tal, esta escolha deve preconizar a adoção do primeiro modo, a partir da compreensão de que os primeiros modos naturais são os mais participativos na resposta dinâmica, e o modo de frequência mais alta que possui participação na resposta (Soriano, 2014).



5 ESTUDOS DE CASOS

Este capítulo destina-se às apresentações e discussões dos resultados obtidos para as análises realizadas no modelo apresentado no Capítulo 4. As análises apresentadas correspondem a: (i) análise modal; (ii) análise transiente – sendo esta a implementação dos modelos matemáticos determinísticos os quais representam a atividade de saltar e caminhar humano.

Segundo o SÉTRA (2006), a análise dinâmica de passarelas pode seguir uma metodologia composta pelas etapas descritas na Figura 26

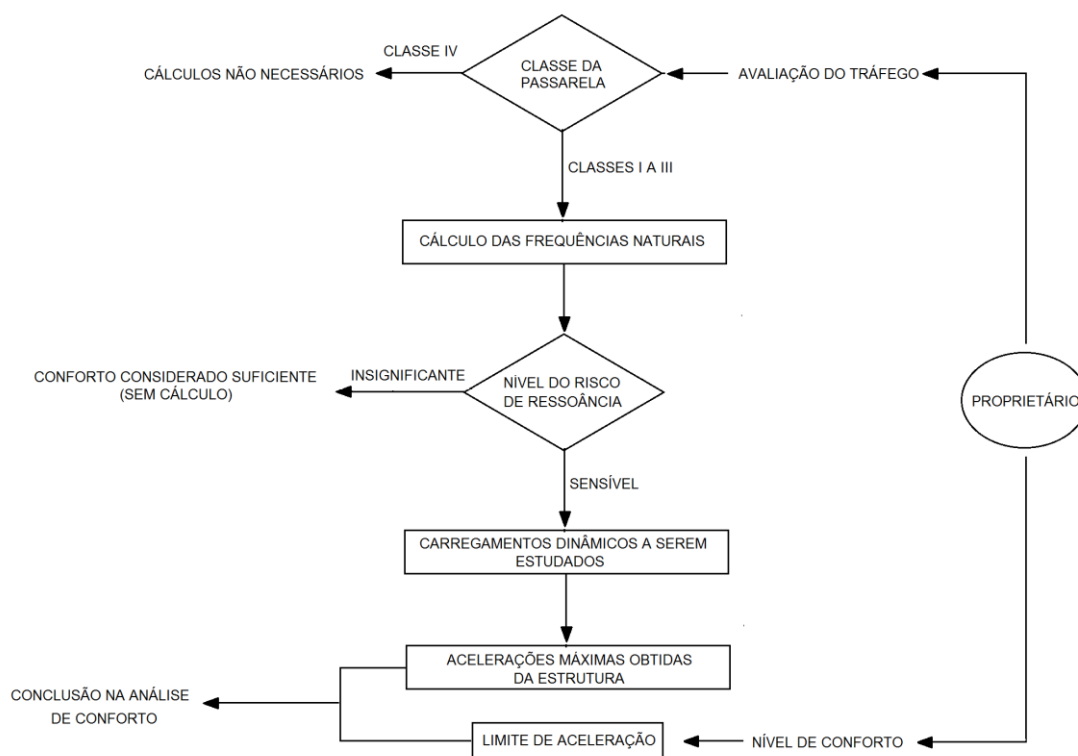


Figura 26 – Metodologia para análise dinâmica [Adaptado: SETRA (2006)]

Segundo as classes apresentadas pelo SETRA (2006) a passarela estudada pode ser classificada como de Classe III, ou seja, estrutura de uso padrão que ocasionalmente pode ser atravessada por grandes grupos de pessoas, mas não sendo carregadas em toda a sua

área de rolamento. Sendo assim, são necessárias as etapas posteriores de avaliação dinâmicas expostas a seguir.

5.1 Análise Modal

Em conformidade com a abordagem teórica apresentada no Capítulo 3, a implementação de análise para a determinação dos modos de vibração natural da estrutura foi executada no software SAP2000 v.20. Ressalta-se que o método selecionado para a análise corresponde ao de “superposição modal”.

Em decorrência do interesse na determinação de modos de vibração com maiores frequências, com os quais ainda pode haver respostas as excitações decorrentes das ações humanas posteriormente analisadas, estipulou-se a determinação dos 20 primeiros modos naturais de vibração da estrutura – Figura 27 a Figura 36.

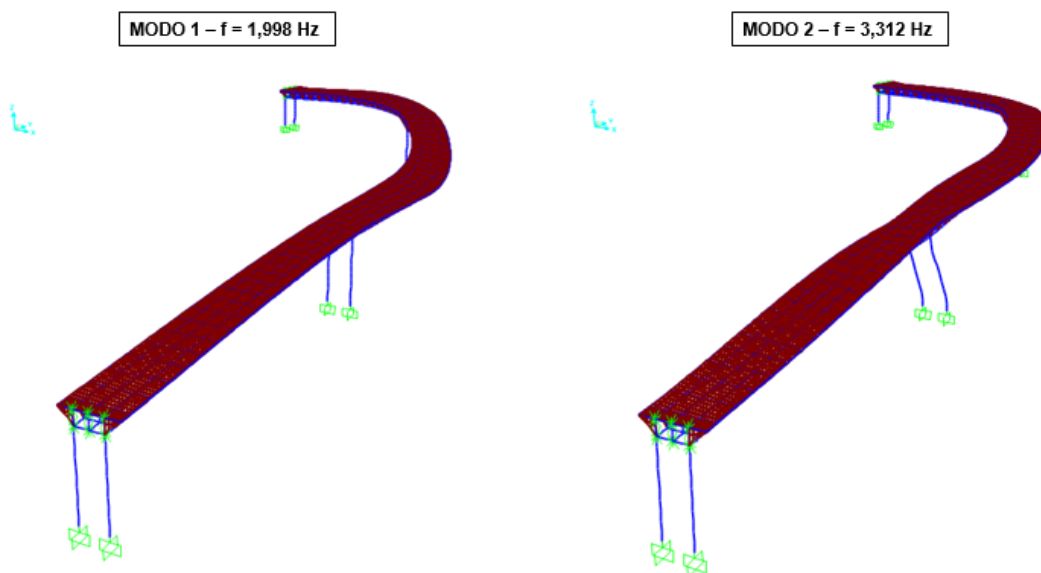


Figura 27 – Modelo SAP2000: Modo 1 e Modo 2

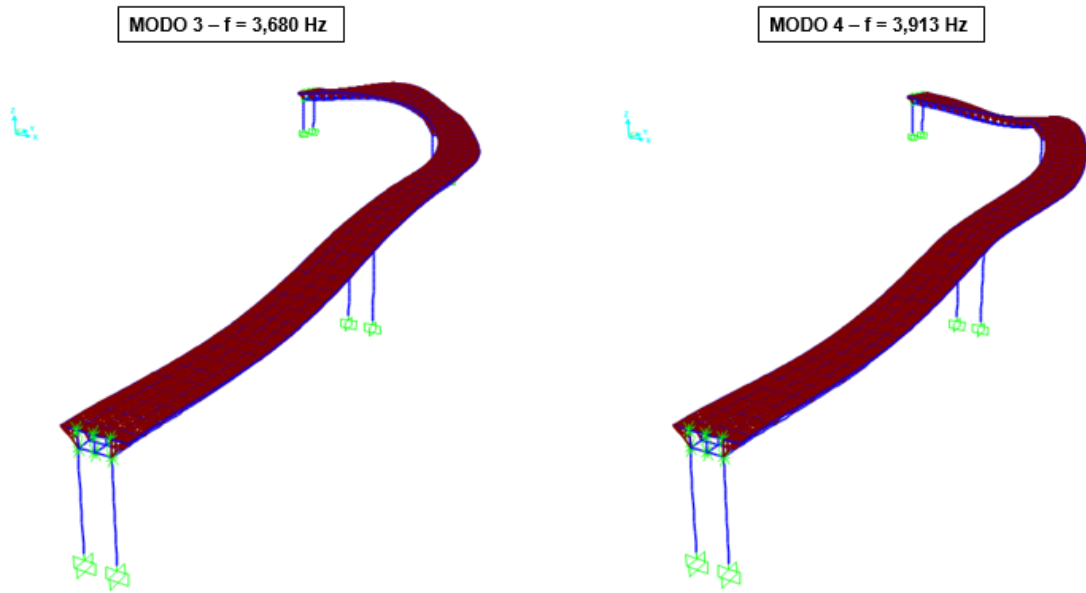


Figura 28 – Modelo SAP2000: Modo 3 e Modo 4

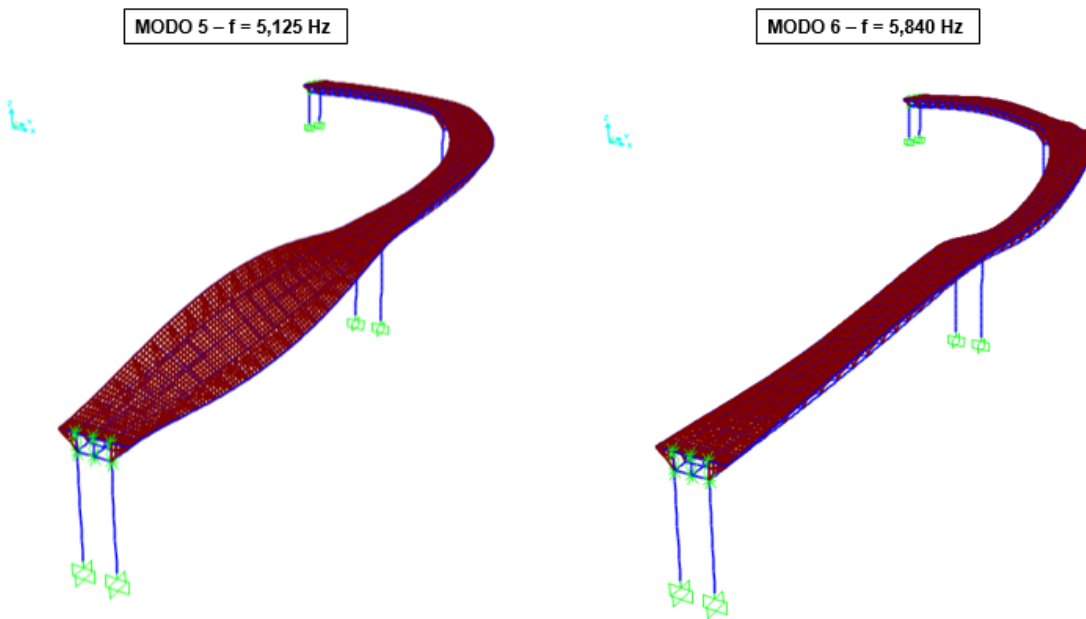
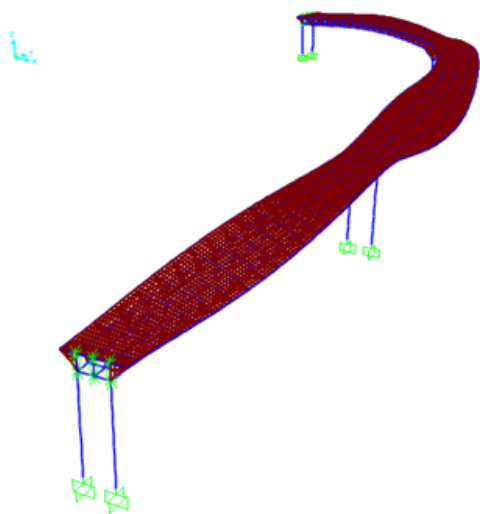


Figura 29 – Modelo SAP2000: Modo 5 e Modo 6



MODO 7 - $f = 6,112$ Hz



MODO 8 - $f = 6,952$ Hz

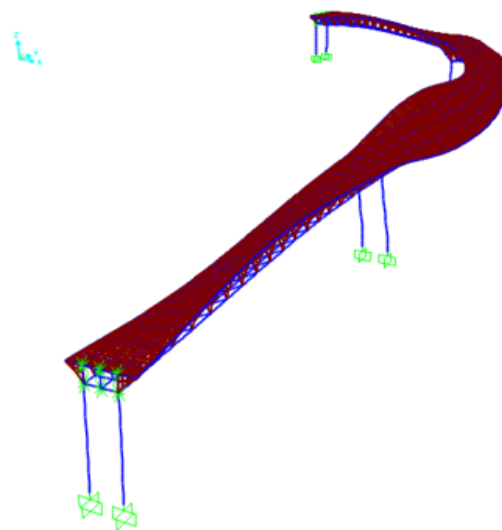
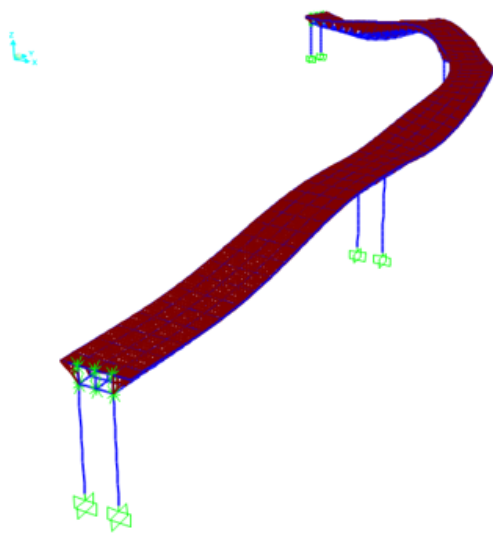


Figura 30 – Modelo SAP2000: Modo 7 e Modo 8

MODO 9 - $f = 8,304$ Hz



MODO 10 - $f = 8,531$ Hz

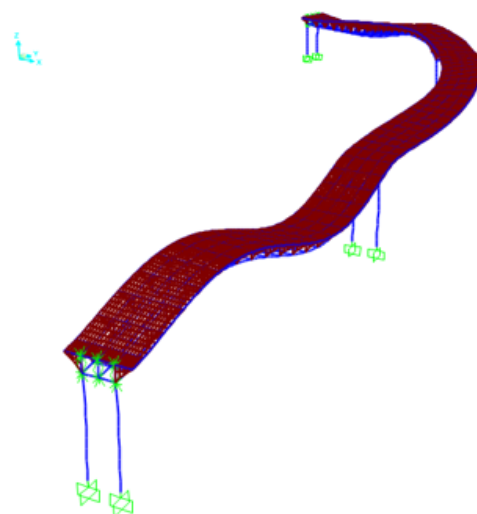
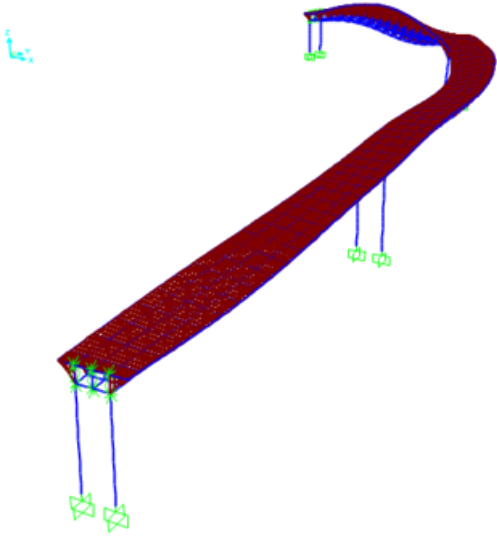


Figura 31 – Modelo SAP2000: Modo 9 e Modo 10



MODO 11 - $f = 9,110$ Hz



MODO 12 - $f = 9,670$ Hz

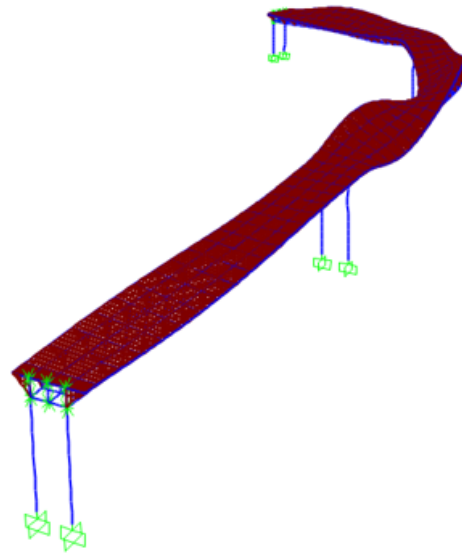
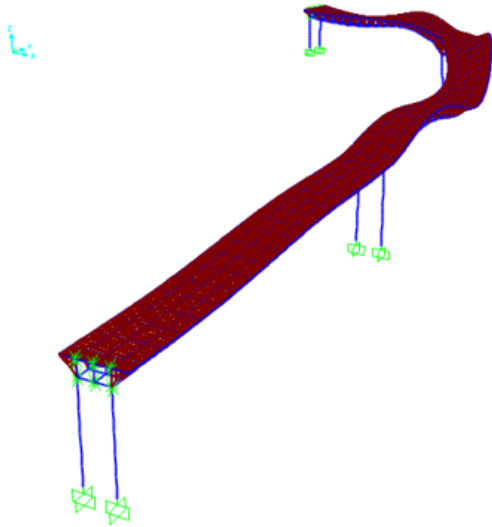


Figura 32 – Modelo SAP2000: Modo 11 e Modo 12

MODO 13 - $f = 10,200$ Hz



MODO 14 - $f = 10,340$ Hz

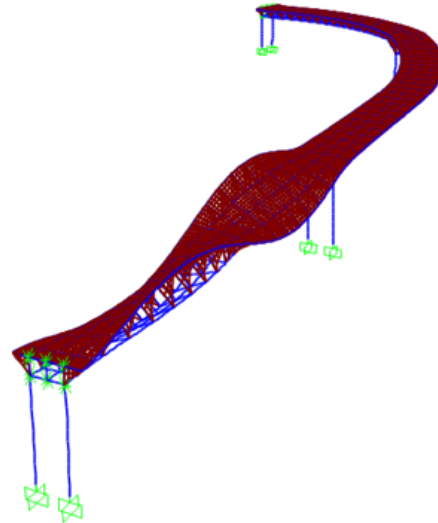
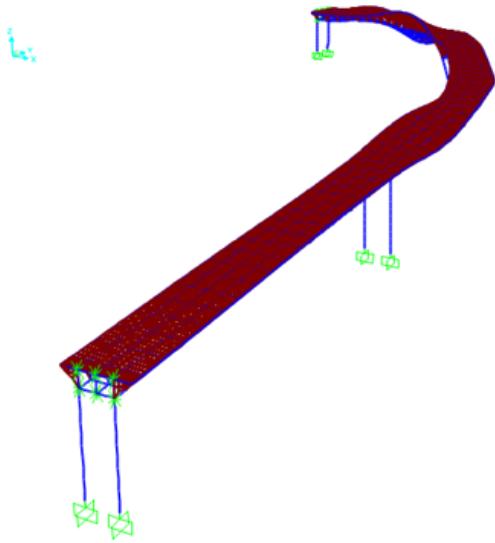


Figura 33 – Modelo SAP2000: Modo 13 e Modo 14



MODO 15 - $f = 10,902$ Hz



MODO 16 - $f = 11,746$ Hz

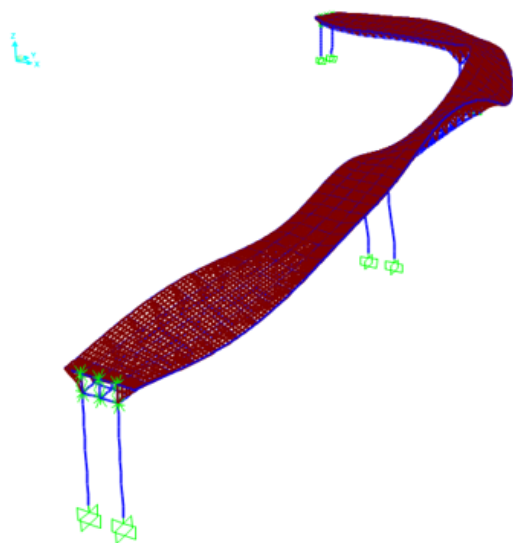
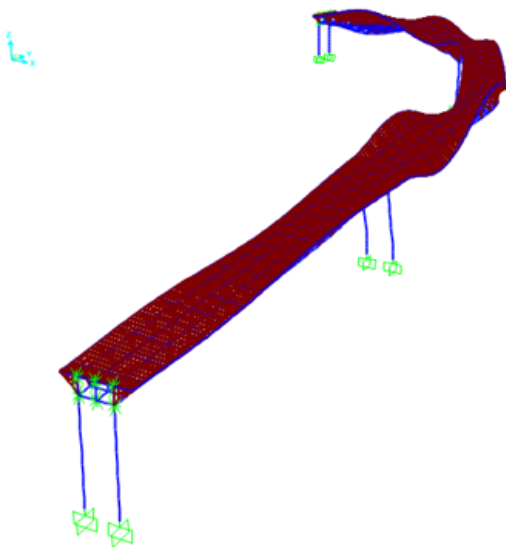


Figura 34 – Modelo SAP2000: Modo 15 e Modo 16

MODO 17 - $f = 12,978$ Hz



MODO 18 - $f = 13,640$ Hz

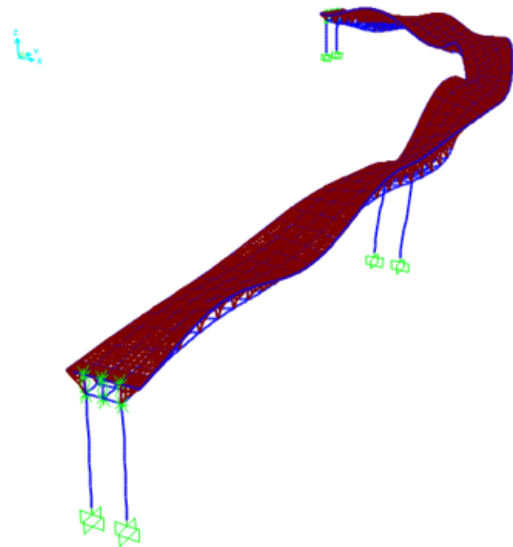


Figura 35 – Modelo SAP2000: Modo 17 e Modo 18

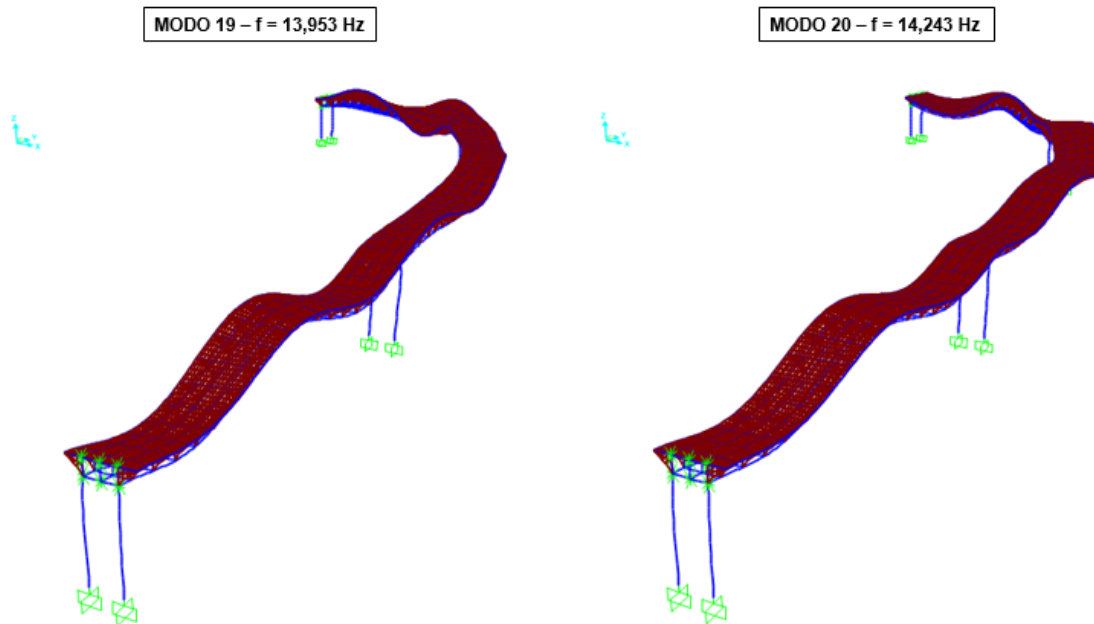


Figura 36 – Modelo SAP2000: Modo 19 e Modo 20

Deste modo, como supracitado, a etapa preliminar correspondente à análise modal evidencia resultados os quais expõem a sensibilidade da estrutura a situações de ressonância. Isto porque:

- (i) De acordo com os resultados dos Modos 1 a 5 as frequências encontram-se abaixo do limite estabelecido pela NBR 6118 (2014), a qual para situações de passarelas a frequência crítica corresponde a 4,5 Hz, sendo recomendado valor de, pelo menos, 20% superior a este, ou seja, uma frequência da estrutura de 5,4 Hz.
- (ii) Segundo o guia AISC (2016) o limite inferior mínimo para pisos não deve ser inferior a 3,0 Hz. Ou seja, o Modo 1 ($f=1,998$ Hz) está abaixo desse limite, implicando assim em uma situação de risco ocorrência de ressonância – sobretudo para situações de excitação deliberada como “vandal loads”.



- (iii) Quanto às faixas apresentadas pelo SETRA (2006) o Modo 1 apresenta resultados na faixa de risco máximo de ressonância – 1,7 Hz a 2,1 Hz.

Segundo a metodologia apresentada na Figura 26 a estrutura apresenta sensibilidade quanto ao risco da ocorrência de ressonância, deste modo faz-se necessária a análise dos diferentes casos de carregamentos dinâmicos induzidos por atividade humana aos quais a estrutura está submetida.

A seguir, mediante a avaliação da resposta observada na análise modal, tem-se a implementação dos estudos de casos, referentes aos carregamentos induzidos por atividades humanas como saltos e caminhada, para posicionamentos pertinentes e considerando faixas de frequências coincidentes aos modos de vibração da estrutura estudando-se a ocorrência de ressonância e identificando-se as respostas de acelerações para avaliação do conforto humano.

5.2 Análise Transiente

As análises a serem apresentadas, como anteriormente citado, correspondem à implementação dos modelos matemáticos determinísticos representativos das atividades de saltar e caminhar no modelo da passarela do Terminal Centro Olímpico. Adotou-se para estas análises, no caso de saltos, as equações apresentadas no Capítulo 3 representativas dos guias AISC (2016) e ISO 10137 (2007). Enquanto isso, para as atividades de caminhada, os modelos referem-se aos apresentados pelo AISC (2016) e SÉTRA (2006).

Para fins de análises e determinação da nomenclatura de casos a serem estudados, a estrutura foi dividida em três vãos – os quais são ordenados no sentido crescente original ao apresentado em projeto – Figura 37.

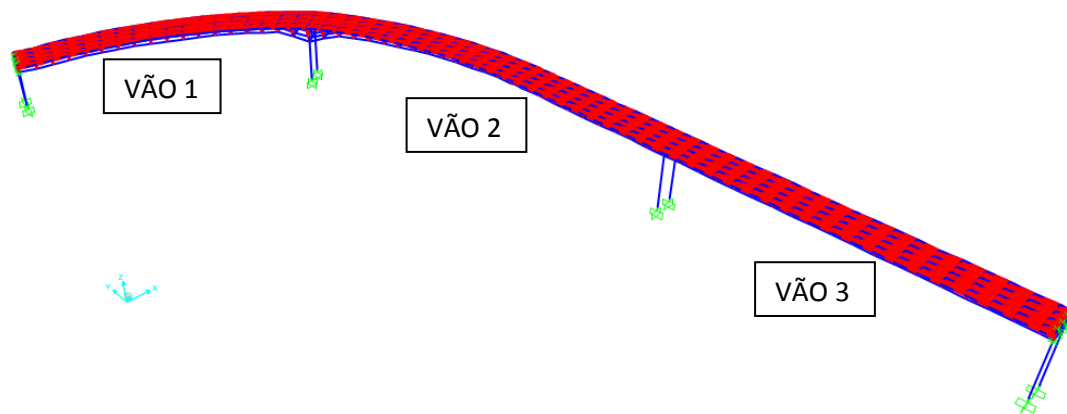


Figura 37 – SAP2000: Modelo da Estrutura

As análises a serem apresentadas resultam da implementação dos carregamentos nos vãos 2 e 3. Ressalta-se que, para os casos de saltos, consideraram-se os cenários de: uma pessoa saltando e um grupo de 16 pessoas saltando. Quanto à caminhada, esta será implementada de modo a considerar a travessia de, aproximadamente, 10,0 m no trecho modelado pela região lateral do tabuleiro – Vão 2 – e região central do tabuleiro – Vão 3.

As Figura 38 a Figura 41 representam os posicionamentos selecionados para a implementação dos carregamentos, sendo estes definidos a partir da análise modal realizada e mediante a intenção de estabelecer configurações de ressonância da estrutura uma vez que as cargas serão aplicadas nos antinós, ou seja, nos pontos de maiores amplitudes de deslocamento nodal, ou em suas proximidades quando considerados os casos de grupos.

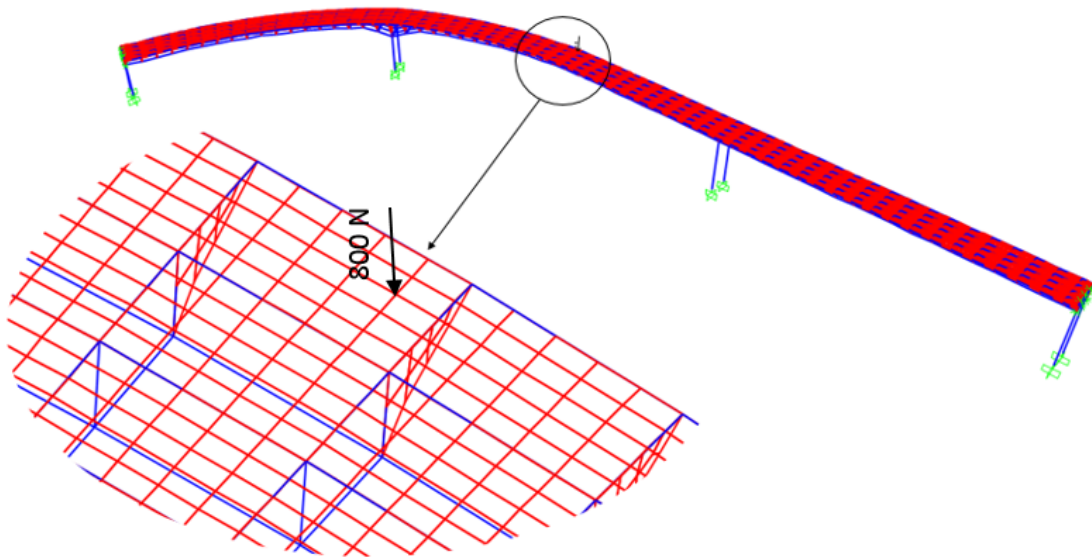


Figura 38 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 1 e 3

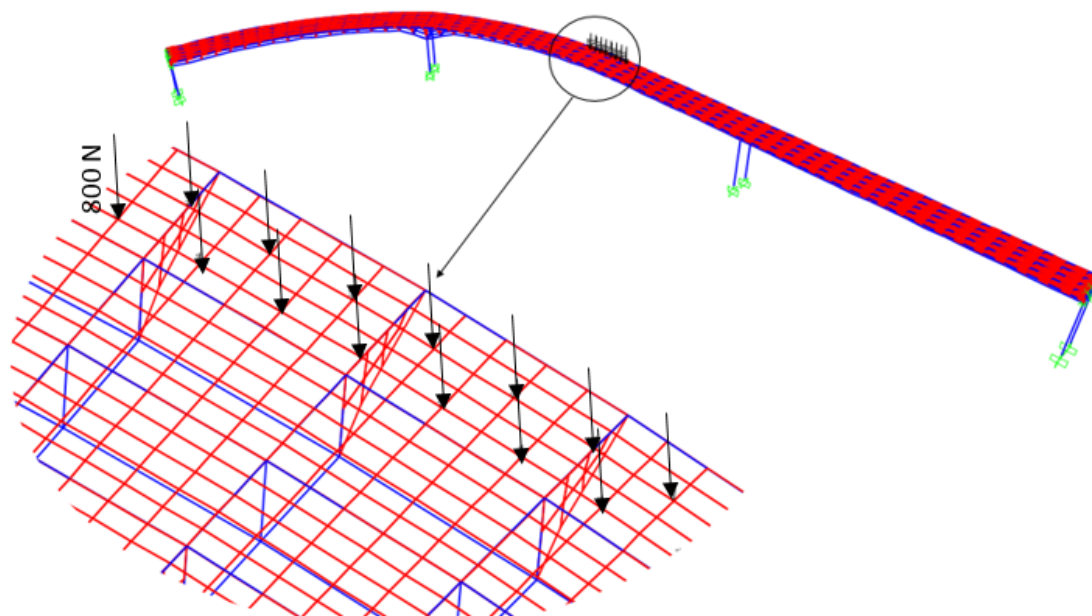


Figura 39 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 2 e 4

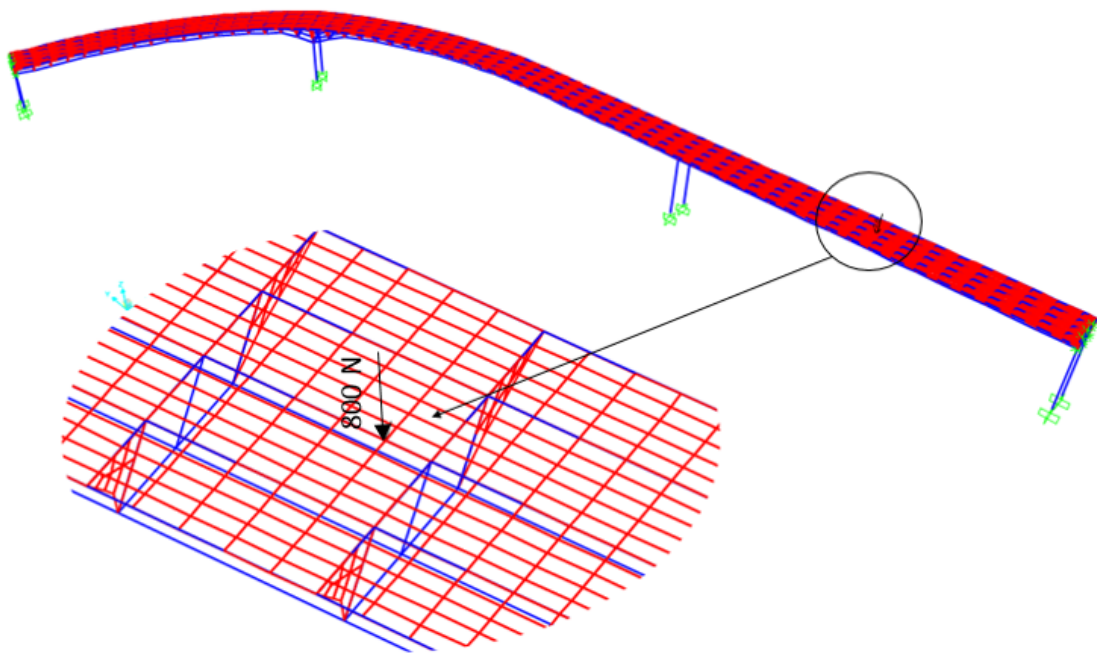


Figura 40 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 5, 7, 9 e 11

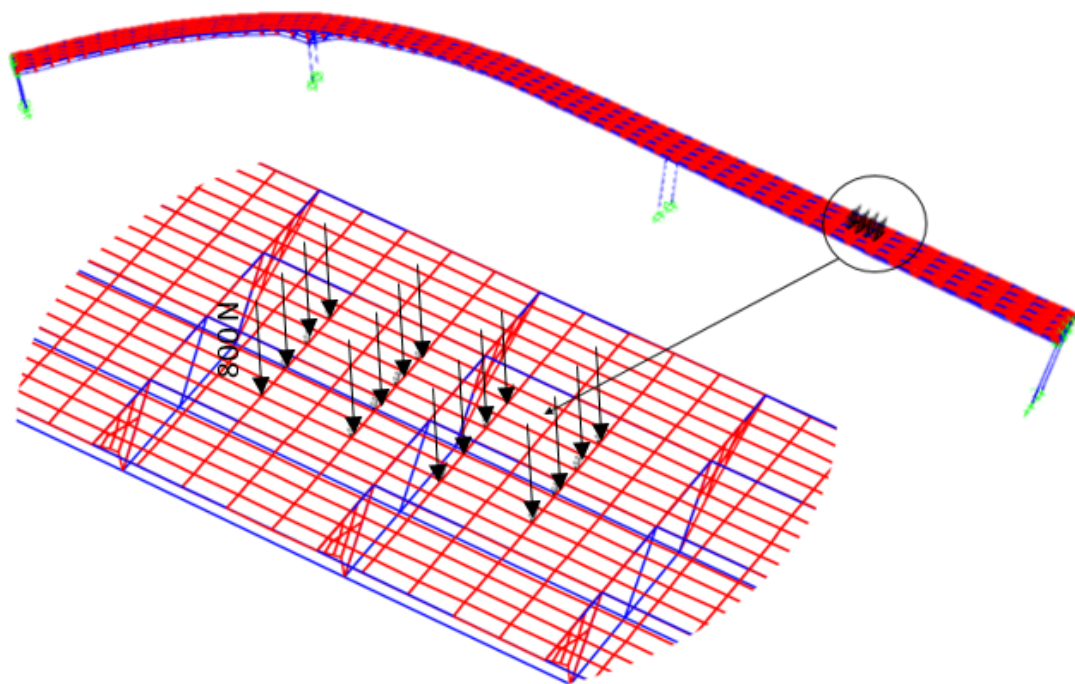


Figura 41 – SAP2000: Posicionamento – Casos: 6, 8, 10 e 12



5.2.1 Saltos rítmicos

Os casos implementados são divididos em: (i) número de participantes da atividade; (ii) modelagem de carregamento adotada; (iii) frequência da atividade; (iv) posicionamento no carregamento na estrutura. Ao total, são apresentados 12 estudos de casos – Tabela 18.

Tabela 18 – Resumo dos Estudos de Casos

Estudo de Caso	Número de pessoas	Guia/Norma	Frequência de excitação (Hz)	Vão	Local	Posição
1	1	AISC (2016)	2,00	2	Meio do vão	Canto do tabuleiro
2	16	AISC (2016)	2,00	2	Meio do vão	Canto do tabuleiro
3	1	ISO 10137 (2007)	2,00	2	Meio do vão	Canto do tabuleiro
4	16	ISO 10137 (2007)	2,00	2	Meio do vão	Canto do tabuleiro
5	1	AISC (2016)	1,84	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
6	16	AISC (2016)	1,84	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
7	1	ISO 10137 (2007)	1,84	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
8	16	ISO 10137 (2007)	1,84	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
9	1	AISC (2016)	1,95	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
10	16	AISC (2016)	1,95	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
11	1	ISO 10137 (2007)	1,95	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
12	16	ISO 10137 (2007)	1,95	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro

Como supracitado, os modelos de carregamentos matemáticos adotados para a análise dos estudos casos de saltos rítmicos seguem o proposto pelo AISC (2016) e ISO (2007) – Figura 42.

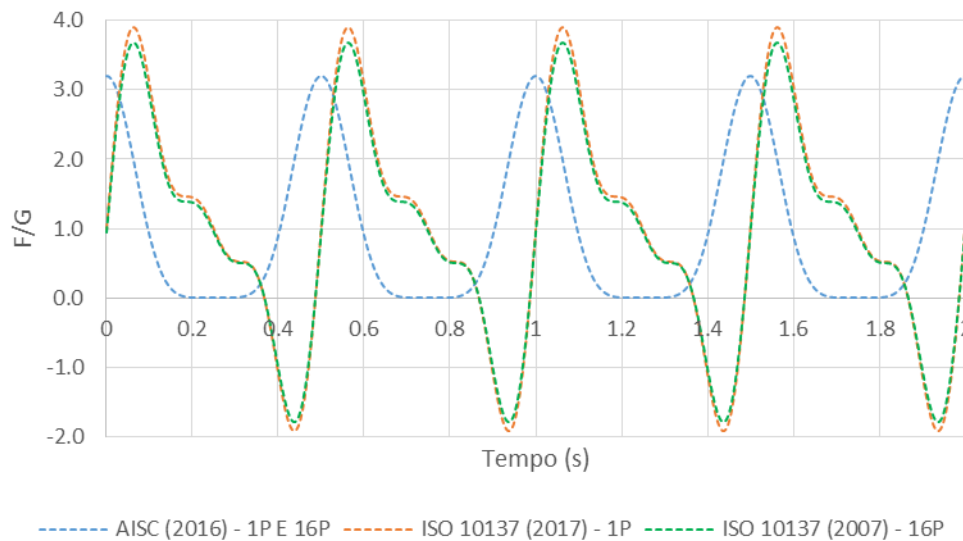


Figura 42 – Modelos de carregamentos para saltos: AISC (2016) e ISO10137 (2007)

As análises feitas para o Vão 2, correspondentes aos casos 1 e 3, têm por fim a excitação do Modo 1 através do 1º harmônico. Deste modo, estas foram aplicadas na região lateral do tabuleiro para a amplificação do movimento torcional característico deste (ver Figura 27).

Os carregamentos aplicados e as acelerações ponderadas foram processados no software MATLAB R2020a mediante o uso do código desenvolvido por Abbasi (2009) para a obtenção dos sinais provenientes da Transformada Rápida de Fourier (FFT) a qual apresenta, no domínio da frequência, a contribuição individual de cada harmônico – Figura 43 e Figura 44.

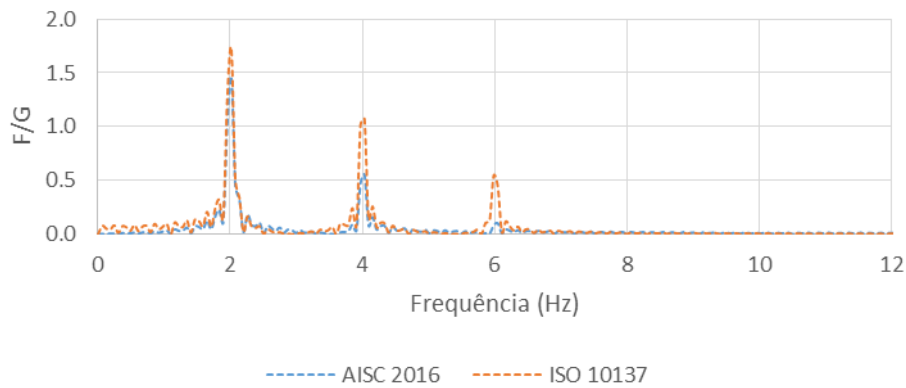


Figura 43 – Casos 1 e 3: FFT: Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz)

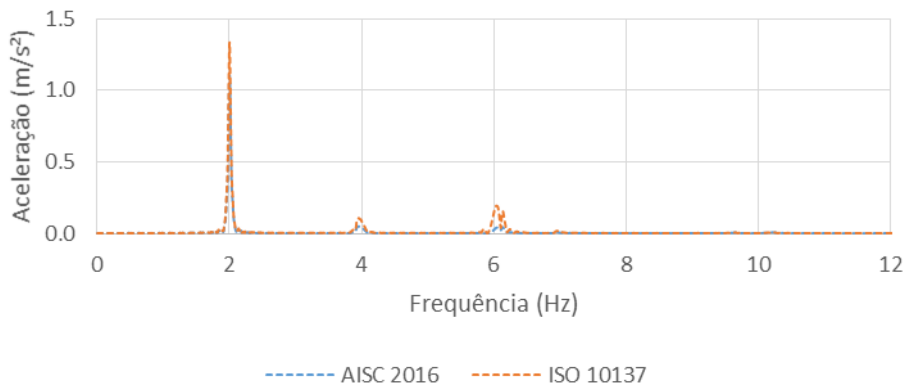


Figura 44 – Casos 1 e 3: FFT: Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)

Como observado, o 1º harmônico apresenta a maior contribuição energética ao sistema sendo evidenciado, quanto à resposta em termos de aceleração, que este apresentou a maior participação do modo excitado (Modo 1), com valor de amplitude de, aproximadamente, 1,5 m/s².

A Figura 45 e a Figura 46 apresenta as acelerações: (i) acelerações originais; (ii) acelerações ponderadas – a_w ; (iii) 1s RMS no domínio do tempo.

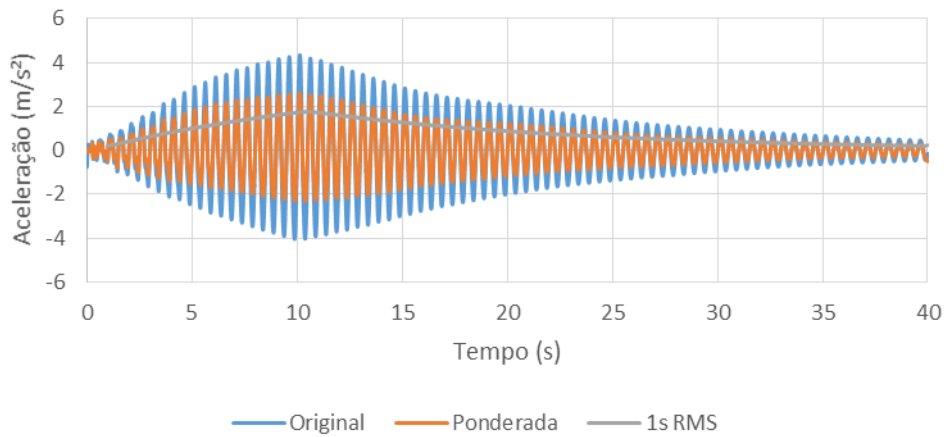


Figura 45 – Caso 1 (AISC): Acelerações (m/s²)

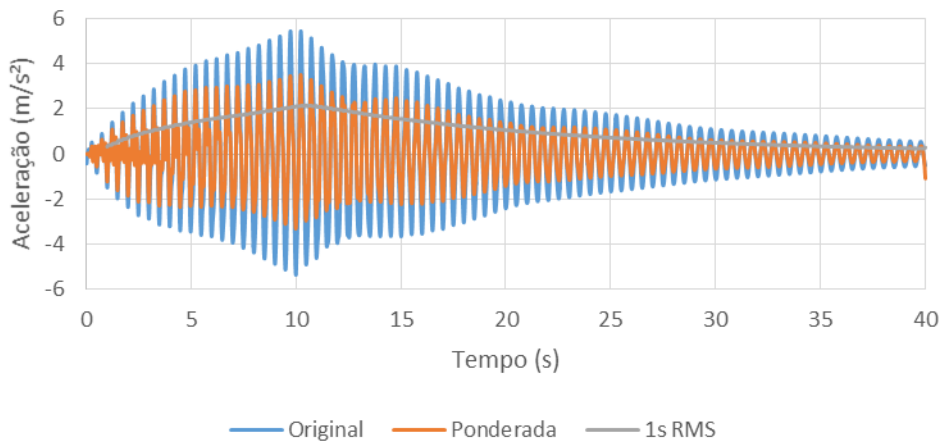


Figura 46 – Caso 3 (ISO 10137): Acelerações (m/s²)

As acelerações originais correspondem aos valores obtidos diretamente do programa. Enquanto as acelerações ponderadas (a_w) representam os valores “filtrados” mediante o processamento de dados no software MATLAB, por meio do código desenvolvido por Irvine (2012) os quais levam em consideração a direção da resposta e a faixa de percepção humana compreendida entre 4 Hz e 8Hz. Como explicitado no Capítulo 2, as acelerações 1s RMS são apresentadas a partir das respostas ponderadas.



Além disso, os valores notáveis para cada caso, considerando os resultados obtidos para um ponto de aplicação direta para ação de 1 pessoa, são apresentados conforme Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 19 – Caso 1

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	4,342
a _w (m/s ²), pico	2,603
original (m/s ²), RMS	1,556
a _w (m/s ²), RMS	0,918
MTVV (m/s ²)	1,722
VDV (m/s ^{1.75})	3,092
ESPA (m/s ²)	2,435

Tabela 20 – Caso 3

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	5,449
a _w (m/s ²), pico	3,509
original (m/s ²), RMS	1,902
a _w (m/s ²), RMS	1,150
MTVV (m/s ²)	2,131
VDV (m/s ^{1.75})	3,885
ESPA (m/s ²)	3,014

Considerando-se os valores originais de pico, a interpretação ocorre a partir de uma perspectiva conversadora. Enquanto as considerações de pico para a_{w,rms} podem subestimar os valores obtidos. Usualmente, os valores de MTVV, VDV e ESPA são apresentados como alternativas à avaliação da resposta dinâmica.

Os valores originais de pico, assim como ESPA, apresentam-se superiores ao valor limite de 0,5 m/s² proposto pelo AISC (2016), além de estarem compreendidos na faixa de conforto inaceitável, ou seja, superior a 2,5 m/s² proposto pelo SETRA (2006).

Para os limites apresentados no SCI (2009) estes são classificados como desencadeadores de uma “inaceitável”, estando entre 1,27 – 2,47 m/s², se a aceleração



RMS original for considerada. Por outro lado, para a aceleração RMS filtrada os valores passam a estar compreendidos no intervalo de “perturbador”.

Os valores de VDV limites definidos pelos autores Ellis e Litter (2004) classificam ambos os casos como “inaceitáveis”. Para o estabelecido por Setareh (2012), os valores obtidos para os Casos 1 e 3, encontram-se nos intervalos considerados “perturbador” e “inaceitável” respectivamente.

Os carregamentos aplicados e as acelerações ponderadas correspondentes a cada harmônico para os casos 2 e 4 – nos quais a número de participantes é de 16 pessoas e a densidade de 0,25 pessoas/m² – são apresentados nas Figura 47 e Figura 48.

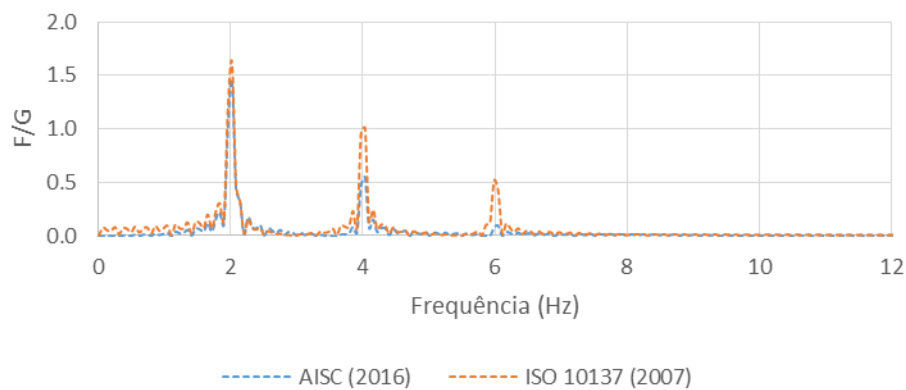


Figura 47 – Casos 2 e 4: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz)

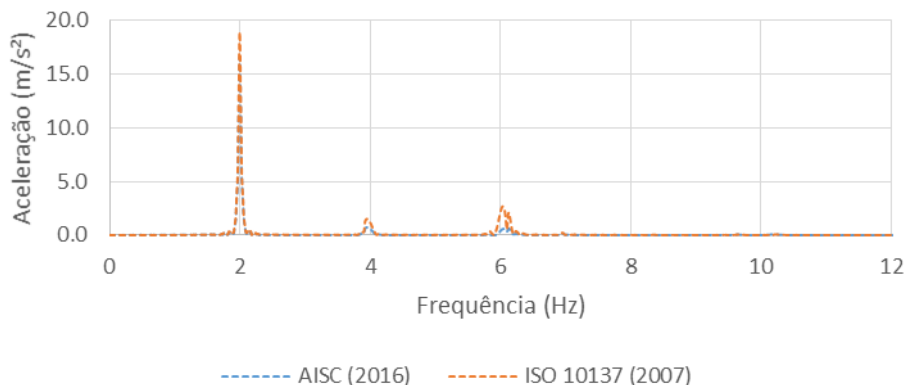


Figura 48 – Casos 2 e 4: FFT – Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)



A formulação apresentada para o Caso 2 – conforme exposto no Capítulo 3 – não apresenta diferença quanto a consideração para o efeito de grupo, em contrapartida a ISO 10137 (2007), Caso 4, apresenta um fator de coordenação considerado para a implementação de um carregamento em grupo correspondendo, segundo as condições adotadas, de 0,94.

O pico observado na frequência de 2 Hz corresponde a um pico típico de condição de ressonância uma vez que a frequência de excitação se equipara a frequência de natural de vibração da estrutura. Ou seja, tal condição apresenta-se como uma situação de desconforto ao usuário, além de representar uma possibilidade de danos a estrutura devido a deslocamentos excessivos não previstos.

Neste contexto do “vandal loads” – ações com intenção deliberada de excitação da estrutura – as respostas de aceleração obtidas são apresentadas na Figura 49 e Figura 50.

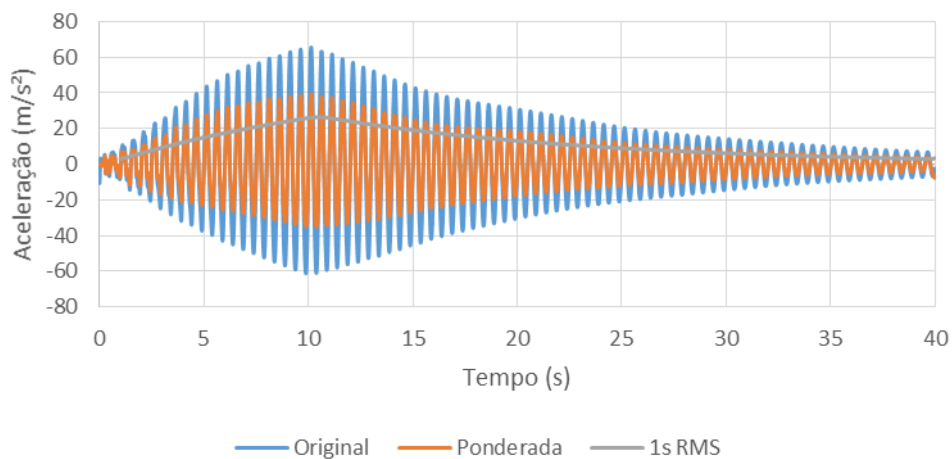


Figura 49 – Caso 2 (AISC): Acelerações (m/s^2)

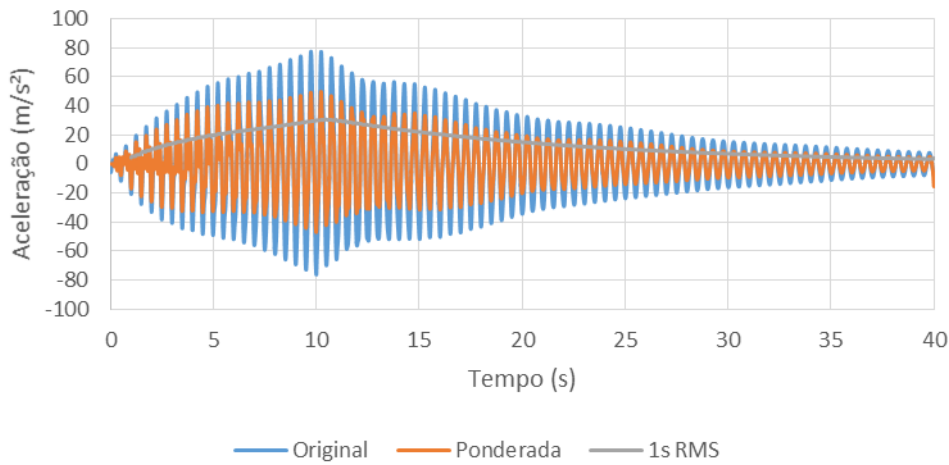


Figura 50 – Caso 4 (ISO 10137): Acelerações (m/s²)

De igual modo, os valores notáveis para cada caso, considerando os resultados obtidos no mesmo ponto dos Casos 1 e 3, são apresentados conforme Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 21 – Caso 2

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	65,668
a _w (m/s ²), pico	39,373
original (m/s ²), RMS	23,521
a _w (m/s ²), RMS	13,870
MTVV (m/s ²)	26,020
VDV (m/s ^{1.75})	46,740
ESPA (m/s ²)	36,798

Tabela 22 – Caso 4

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	77,376
a _w (m/s ²), pico	49,802
original (m/s ²), RMS	27,016
a _w (m/s ²), RMS	16,330
MTVV (m/s ²)	30,270
VDV (m/s ^{1.75})	55,150
ESPA (m/s ²)	42,808

A partir do observado, a resposta do modelo apresenta valores acima dos limites estabelecidos. Tal fato implica que as condições de conforto não são satisfeitas e



evidenciam a ocorrência de ressonância, implicando em elevados deslocamentos – e, a partir da perspectiva do usuário, sensação de “insegurança”.

As análises realizadas para o trecho do Vão 3 considerando-se os Casos 5, 7, 6 e 8 têm por fim a excitação do 3º Modo ($f=3,68$ Hz) de vibração da estrutura por meio do 2º harmônico ($f = 2 \times 1,84$ Hz) (ver Figura 28).

Tratando-se inicialmente dos Casos 5 e 7 os carregamentos aplicados e as acelerações ponderadas correspondentes a cada harmônico por meio da FFT são apresentados nas Figura 51 e Figura 52.

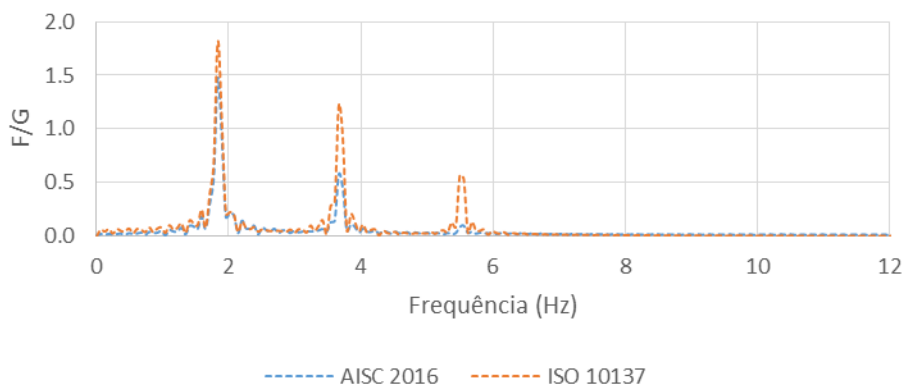


Figura 51 – Casos 5 e 7: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz)

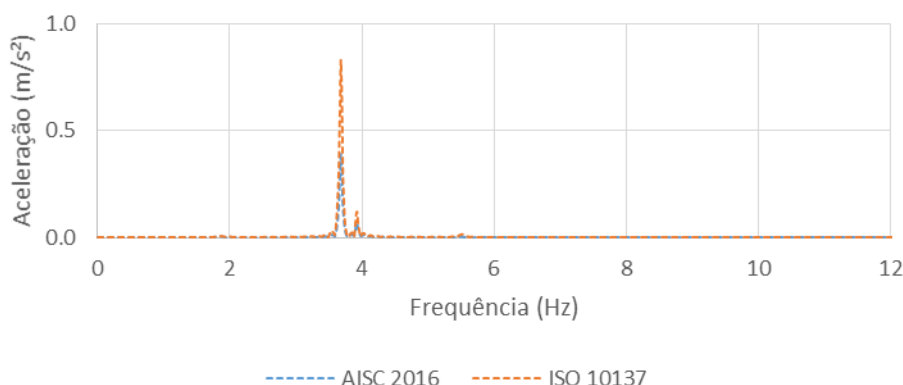


Figura 52 – Casos 5 e 7: FFT – Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)

A resposta observada para as duas figuras evidencia que a maior participação para a interação entre humano-estrutura relaciona-se ao 2º harmônico – como intencionado inicialmente – sendo excitado o correspondente ao 3º Modo.



A Figura 53 e a Figura 54 apresentam as acelerações referentes ao ponto analisado para os casos.

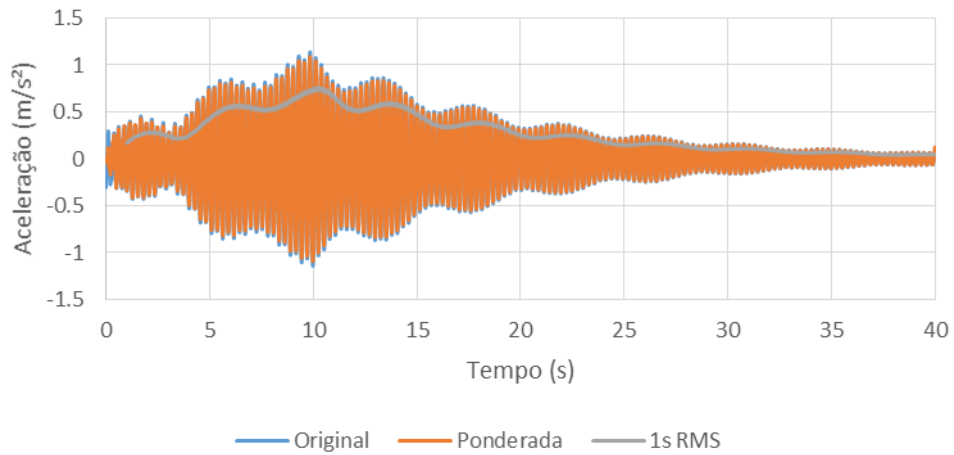


Figura 53 – Caso 5 (AISC): Acelerações (m/s²)

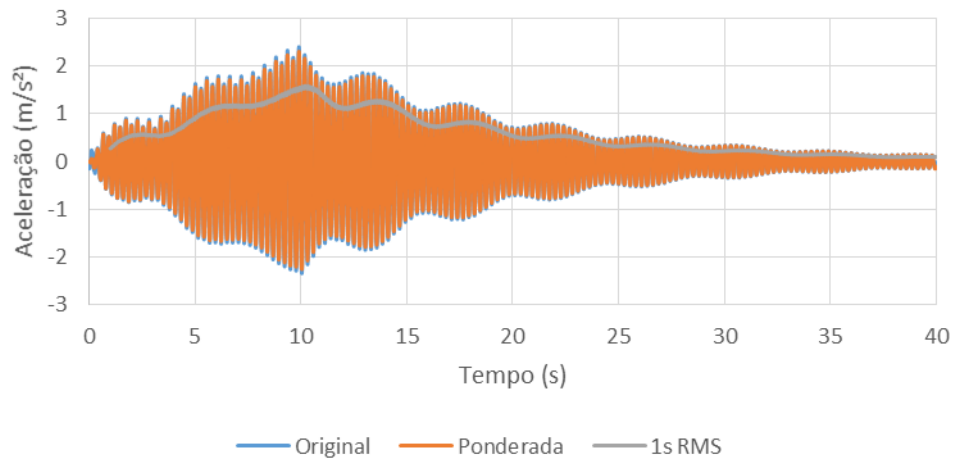


Figura 54 – Caso 7 (ISO 10137): Acelerações (m/s²)

Os valores notáveis para cada caso, considerando os resultados obtidos no mesmo ponto dos Casos 5 e 7, são apresentados conforme Tabela 23 e Tabela 24.



Tabela 23 – Caso 5

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	1,142
a _w (m/s ²), pico	1,087
original (m/s ²), RMS	0,357
a _w (m/s ²), RMS	0,344
MTVV (m/s ²)	0,735
VDV (m/s ^{1.75})	1,197
ESPA (m/s ²)	1,039

Tabela 24 – Caso 7

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	2,397
a _w (m/s ²), pico	2,300
original (m/s ²), RMS	0,761
a _w (m/s ²), RMS	0,732
MTVV (m/s ²)	1,509
VDV (m/s ^{1.75})	2,545
ESPA (m/s ²)	2,134

Assim como observado para o Vão 2, os valores originais de pico, assim como ESPA, apresentam-se superiores ao valor limite proposto pelo AISC (2016). Para os limites de conforto do SETRA (2006) o Caso 5 apresenta-se compreendido na faixa de “mínimo conforto”. O Caso 7 apresenta-se na região de “inaceitável”.

De igual modo, para valores de RMS ponderados, quanto ao limite apresentado no SCI (2009), o Caso 5 é classificado como “limite razoável para pessoas passivas” estando abaixo de 0,35 m/s², enquanto o Caso 7 é classificado como “perturbador”, estando compreendidos entre 0,35 - 1,27 m/s².

Os valores de VDV limites definidos pelos autores Ellis e Litter (2004) classifica o Caso 5 como “perturbador”, enquanto o Caso 7 é classificado como “inaceitável”. Para o estabelecido por Setareh (2012), os valores obtidos para o Caso 5 e Caso 7, encontram-se nos intervalos considerados “perturbador”.



Os carregamentos aplicados e as acelerações ponderadas correspondentes a cada harmônico para os casos 6 e 8 são apresentados nas Figura 55 e Figura 56.

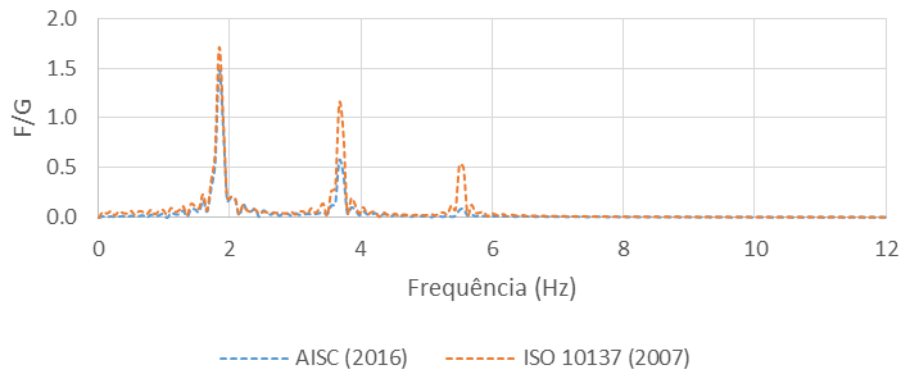


Figura 55 – Casos 6 e 8: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz)

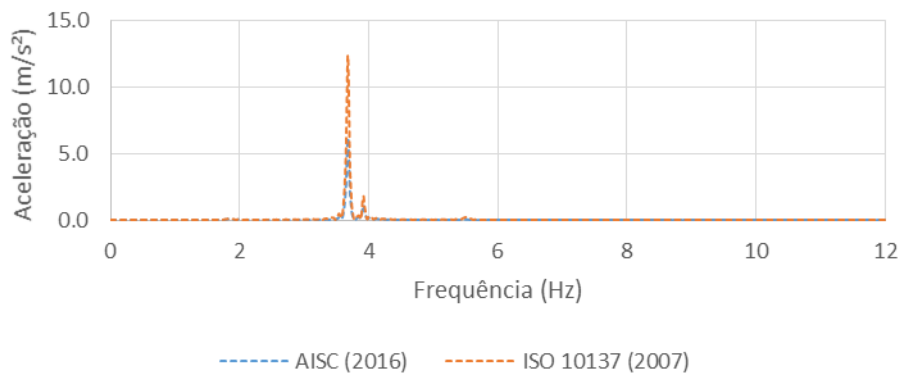


Figura 56 – Casos 6 e 8: FFT – Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)

O pico observado na frequência de 4 Hz corresponde a um comportamento típico de interação de frequências, ou seja, a frequência induzida no 2º harmônico apresenta maior resposta na estrutura – como supracitado. As respostas de aceleração obtidas são apresentadas na Figura 57 e Figura 58.

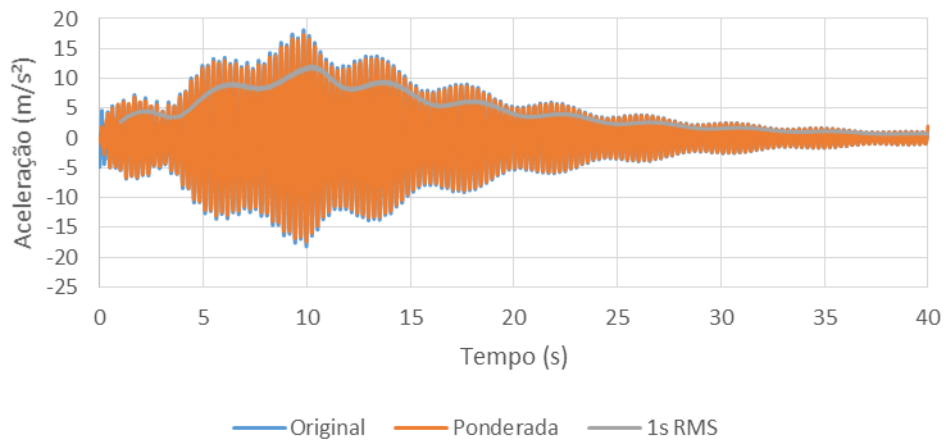


Figura 57 – Caso 6 (AISC): Acelerações (m/s^2)

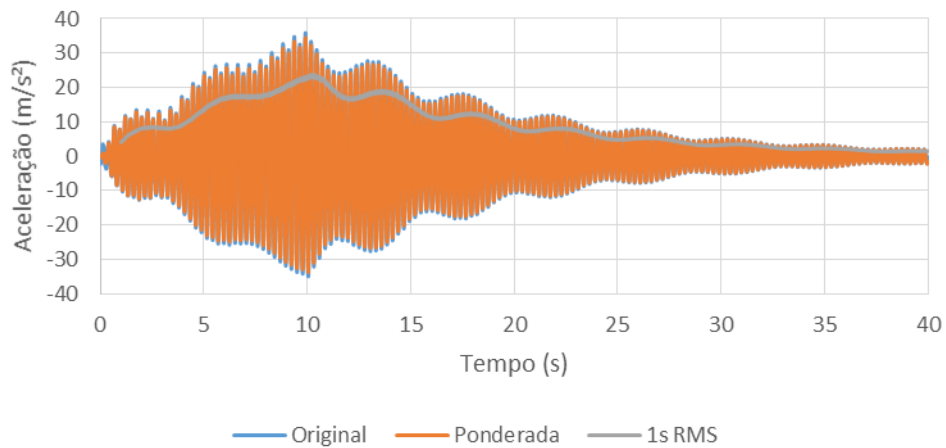


Figura 58 – Caso 8 (ISO 10137): Acelerações (m/s^2)

Os valores notáveis para cada caso, considerando os resultados obtidos para o mesmo ponto dos Casos 5 e 7, são apresentados conforme Tabela 25 e Tabela 26.

Tabela 25 – Caso 6

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s^2)	18,191
a_w (m/s^2), pico	17,306
original (m/s^2), RMS	5,690
a_w (m/s^2), RMS	5,475
MTVV (m/s^2)	11,700
VDV ($m/s^{1.75}$)	19,070
ESPA (m/s^2)	16,546



Tabela 26 – Caso 8

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	35,895
a _w (m/s ²), pico	34,447
original (m/s ²), RMS	11,398
a _w (m/s ²), RMS	10,970
MTVV (m/s ²)	22,600
VDV (m/s ^{1.75})	38,110
ESPA (m/s ²)	31,961

A partir do observado, a resposta do modelo apresenta valores acima dos limites estabelecidos. Tal fato, implica que as condições de conforto não são satisfeitas. Contudo, quando comparados aos valores obtidos para os Casos de 2 e 4, as respostas para este trecho apresentam valores inferiores e uma situação menos crítica.

Prosseguindo as análises realizadas para o trecho do Vão 3, considerou-se o estudo dos Casos 9, 10, 11 e 12 os quais têm por fim a excitação do 4º Modo de vibração (f=3,913 Hz) da estrutura por meio do 2º harmônico (f = 2x1,95 Hz) (ver Figura 28).

Tratando-se inicialmente dos Casos 9 e 11 os carregamentos aplicados e as acelerações ponderadas correspondentes a cada harmônico por meio da FFT são apresentados nas Figura 59 e Figura 60.

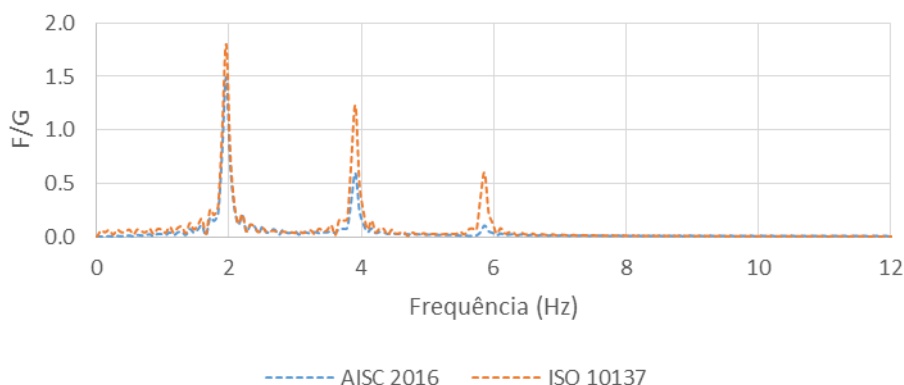


Figura 59 – Casos 9 e 11: FFT – Força normalizada (F/G) x Freqüência (Hz)

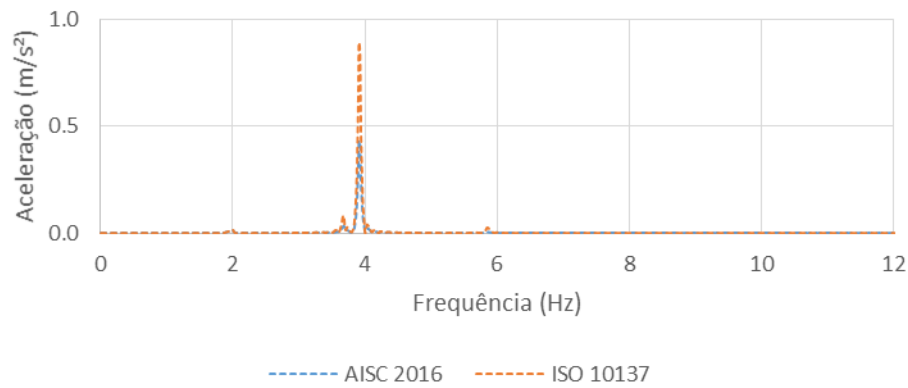


Figura 60 – Casos 9 e 11: FFT – Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)

A resposta observada para as duas figuras evidencia que a maior participação para a interação entre humano-estrutura relaciona-se ao 2º harmônico – como intencionado inicialmente – sendo excitado o correspondente ao 4º Modo.

A Figura 61 e a Figura 62 apresenta as acelerações referentes ao ponto analisado para os casos.

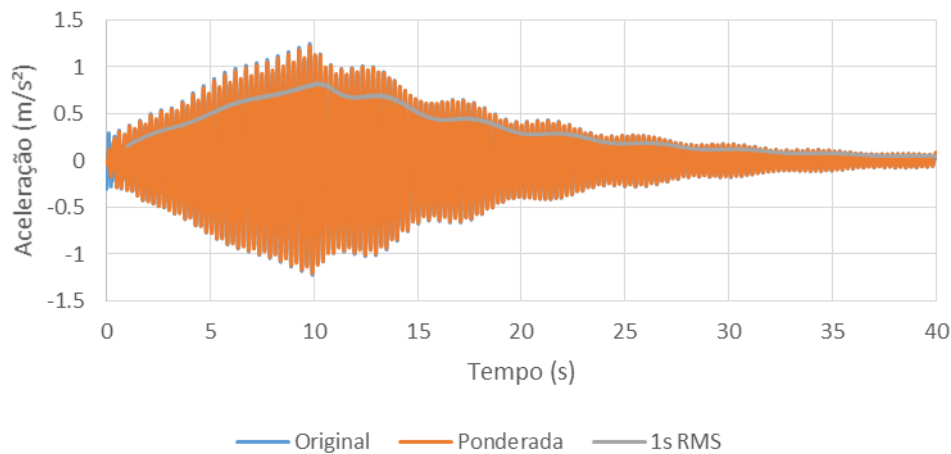


Figura 61 – Caso 9 (AISC): Acelerações (m/s²)

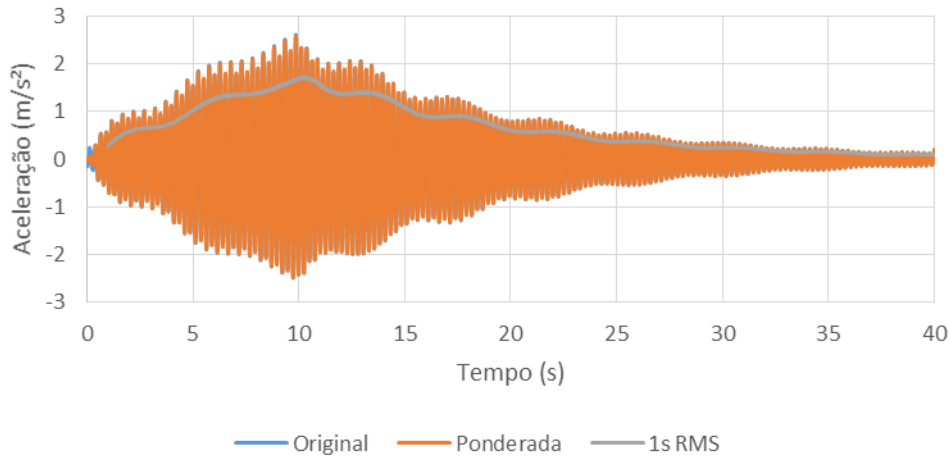


Figura 62 – Caso 11 (ISO 10137): Acelerações (m/s²)

Os valores notáveis para cada caso, considerando os resultados obtidos para o mesmo ponto dos Casos 9 e 11, são apresentados conforme Tabela 27 e Tabela 28.

Tabela 27 – Caso 9

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	1,250
a _w (m/s ²), pico	1,223
original (m/s ²), RMS	0,405
a _w (m/s ²), RMS	0,404
MTVV (m/s ²)	0,821
VDV (m/s ^{1.75})	1,402
ESPA (m/s ²)	1,160

Tabela 28 – Caso 11

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	2,611
a _w (m/s ²), pico	2,580
original (m/s ²), RMS	0,826
a _w (m/s ²), RMS	0,826
MTVV (m/s ²)	1,665
VDV (m/s ^{1.75})	2,872
ESPA (m/s ²)	2,355



Mediantes os resultados, os valores originais de pico, assim como ESPA, apresentam-se superiores ao valor limite proposto pelo AISC (2016). Para os limites de conforto do SETRA (2006) o Caso 9 apresenta-se compreendido na faixa de “mínimo conforto”. O Caso 11 apresenta-se na região de “inaceitável”.

Para valores de RMS ponderados, quanto ao limite apresentado no SCI (2009), ambos os Casos são classificados como na faixa de critério de “perturbador”, estando compreendidos entre 0,35 - 1,27 m/s².

Os valores de VDV limites definidos pelos autores Ellis e Litter (2004) classifica o Caso 9 como “perturbador”, enquanto o Caso 11 é classificado como “inaceitável”. Para o estabelecido por Setareh (2012), os valores obtidos para ambos, encontram-se no intervalo considerado “perturbador”.

Os carregamentos aplicados e as acelerações ponderadas correspondentes a cada harmônico para os casos 10 e 12 são apresentados nas Figura 63 e Figura 64.

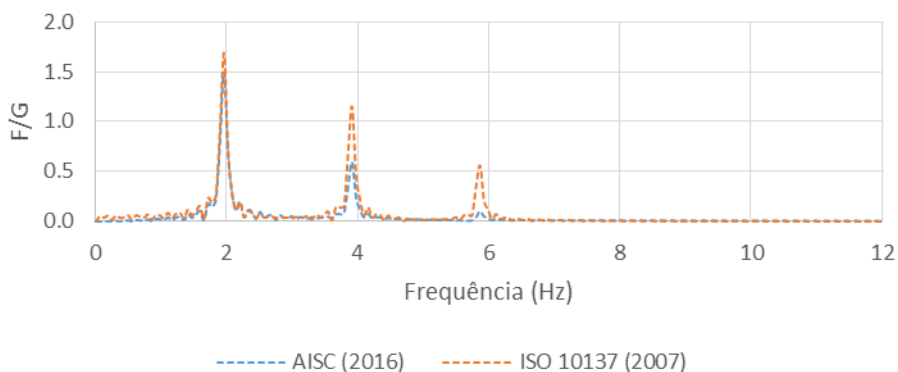


Figura 63 – Casos 10 e 12: FFT – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz)

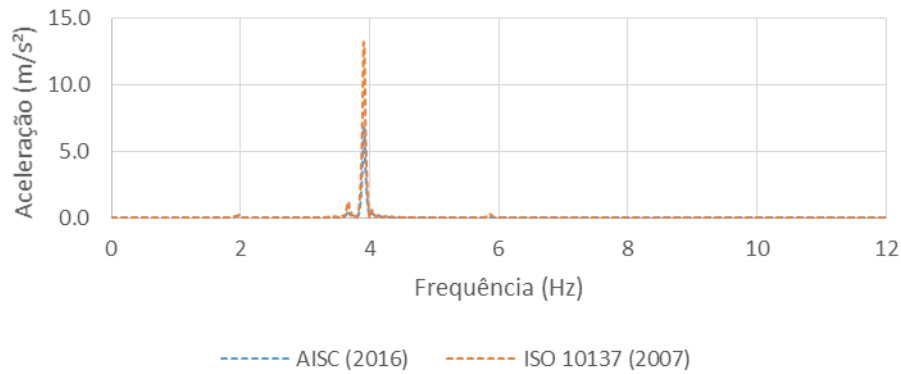


Figura 64 – Casos 10 e 12: FFT – Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)

O pico observado na frequência de 4 Hz corresponde a um comportamento típico de interação de frequências, ou seja, a frequência induzida no 2º harmônico apresenta maior resposta na estrutura – como supracitado. As respostas de aceleração obtidas são apresentadas na Figura 65 e Figura 66.

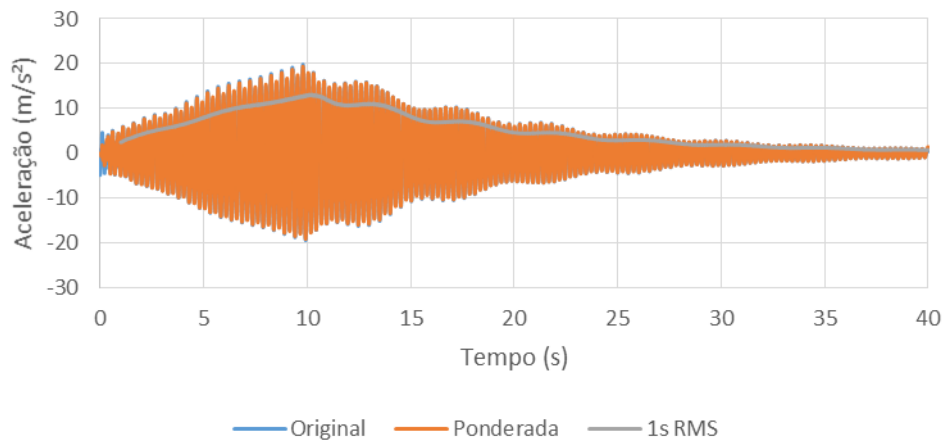


Figura 65 – Caso 10 (AISC): Acelerações (m/s²)

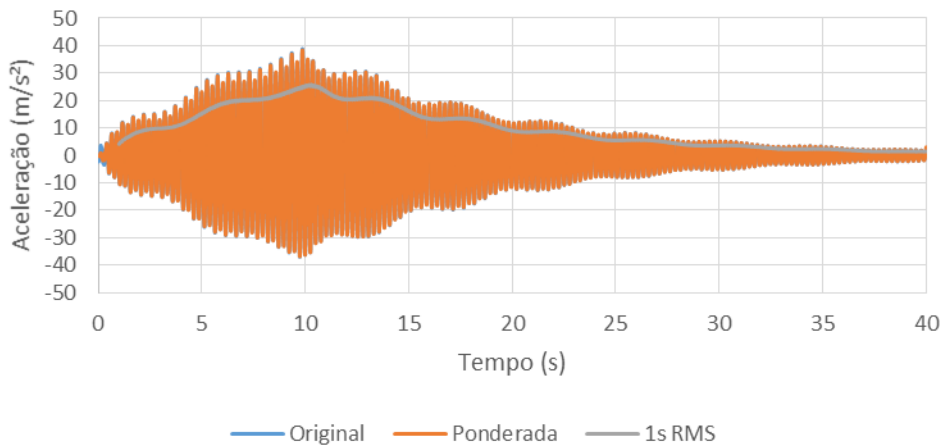


Figura 66 – Caso 12 (ISO 10137): Acelerações (m/s²)

Os valores notáveis para cada caso, considerando os resultados obtidos para o mesmo ponto dos Casos 10 e 12, são apresentados conforme Tabela 29 e Tabela 30.

Tabela 29 – Caso 10

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	19,811
a _w (m/s ²), pico	19,387
original (m/s ²), RMS	6,423
a _w (m/s ²), RMS	6,420
MTVV (m/s ²)	13,030
VDV (m/s ^{1.75})	22,260
ESPA (m/s ²)	18,427

Tabela 30 – Caso 12

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	38,845
a _w (m/s ²), pico	38,366
original (m/s ²), RMS	12,325
a _w (m/s ²), RMS	12,330
MTVV (m/s ²)	24,840
VDV (m/s ^{1.75})	42,860
ESPA (m/s ²)	35,129

A partir do observado, a resposta do modelo apresenta valores acima dos limites estabelecidos. Tal fato, implica que as condições de conforto não são satisfeitas. Quando comparados aos Casos 6 e 8, os valores apresentam ainda respostas maiores, indicando



que para maiores frequências – mais próximas a 2 Hz – a estrutura apresenta um quadro tendencioso ao efeito de ressonância.

Nota-se, portanto, que os casos de saltos analisados – tanto em situações de 1 pessoa como as configurações de ação para 16 pessoas – os limites normativos são ultrapassados conferindo à estrutura condições de desconforto a graus inaceitáveis e perturbadores. Sobretudo considerando-se ações deliberadas de dano a estrutura, percebe-se a sensibilidade, ou por dizer facilidade, desta em ser excitada levando-se a quadros de ressonância os quais podem implicar em deslocamentos demasiados e não previstos. Deste modo, evidencia-se a relevância da análise de tais condições as quais não são contempladas por uma abordagem de solução exclusivamente estática.

5.2.2 Caminhar

Os casos implementados para a atividade de caminha são divididos em: (i) trecho de travessia; (ii) região do tabuleiro; (iii) modelo adotado. Sendo apresentados 4 estudos de casos – Tabela 31.

Tabela 31 – Resumo dos Estudos de Casos: Caminhada

Estudo de Caso	Guia/Norma	Frequência de excitação (Hz)	Vão	Local	Posição
1	AISC (2016)	2	2	Meio do vão	Canto do tabuleiro
2	SETRA (2006)	2	2	Meio do vão	Canto do tabuleiro
3	AISC (2016)	2	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro
4	SETRA (2006)	2	3	Meio do vão	Centro do tabuleiro

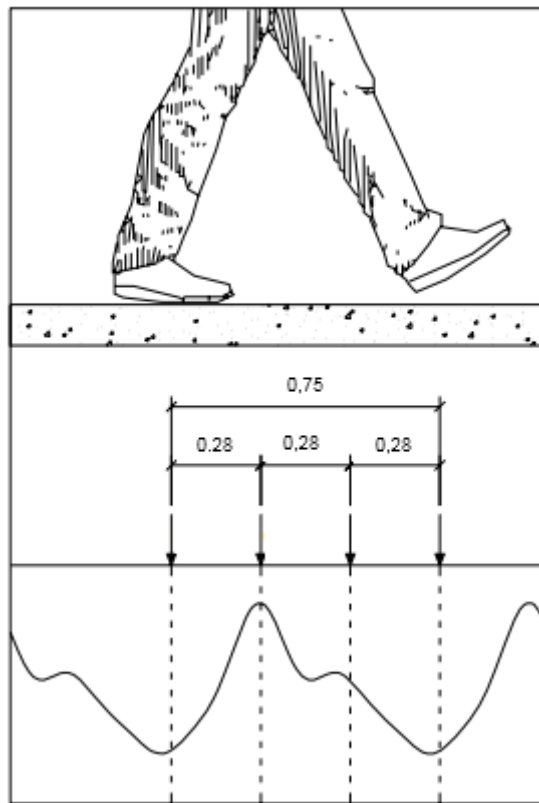


Figura 67 – Caminhada: Configuração [Adaptado de Figueiredo (2005)]

Ressalta-se que a implementação se deu de modo que a trajetória passasse pelos pontos anteriormente analisados nos casos de saltos e a travessia correspondesse a 10,0 m de comprimento. A configuração adotada para a caminhada pode ser vista conforme Figura 67. Além disso, a Tabela 32 apresenta as considerações admitidas para a implementação.

Tabela 32 – Caminhada: Parâmetros adotados

Atividade	Distância do passo (m)	Frequência do passo (Hz)	Velocidade (m/s)	Tempo de contato (s)
Caminhada normal (BACHMANN e AMMANN, 1987)	0,75	2	1,5	0,1867



Como supracitado, os modelos matemáticos de carregamentos adotados para a modelagem da caminhada correspondem aos apresentados pelo AISC (2016) e SETRA (2006) – Figura 68.

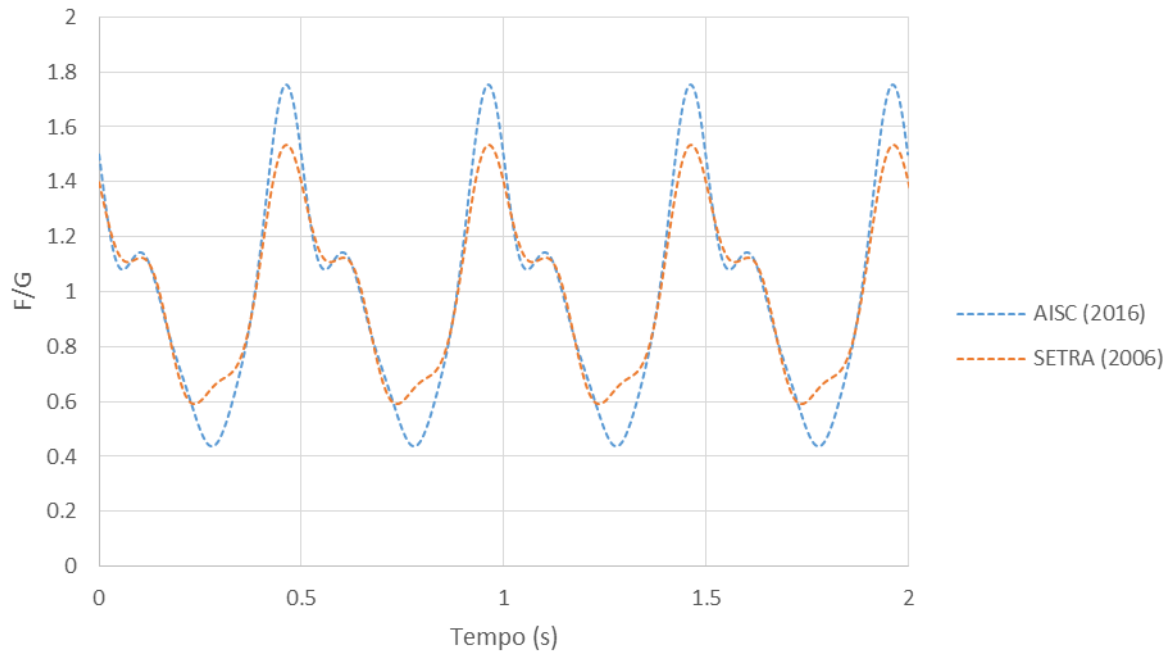


Figura 68 – Caminhada: Modelos da função

De acordo com a necessidade de simular o caminhar mediante a implementação de cargas pontuais ao longo do modelo com tempo de contato definido, utilizou-se para a geração de tabelas correspondentes a cada carga o programa “Gerador de Função de Carregamento Dinâmico” – GFCD desenvolvido por Figueiredo (2005).

A partir dos valores para as respectivas funções, através do MATLAB extraíram-se as respostas correspondentes a cada harmônico utilizando-se da FFT – Figura 69 a Figura 71.

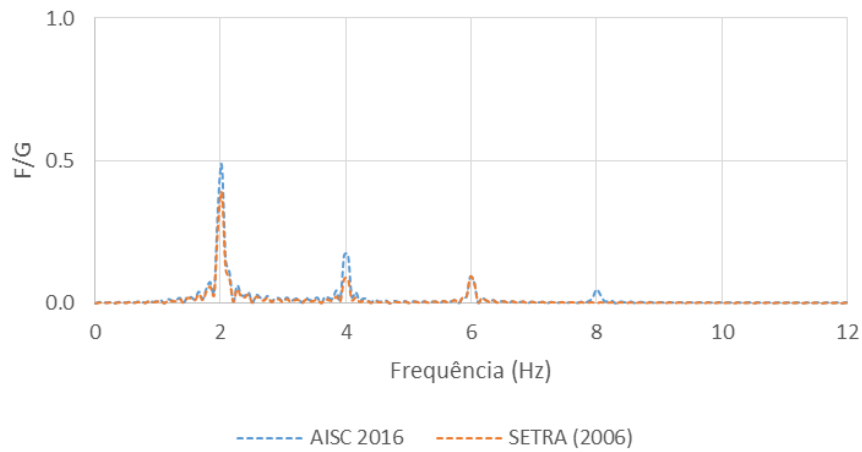


Figura 69 – Caminhada: Caso 1, Caso 2, Caso 3 e Caso 4 – Força normalizada (F/G) x Frequência (Hz)

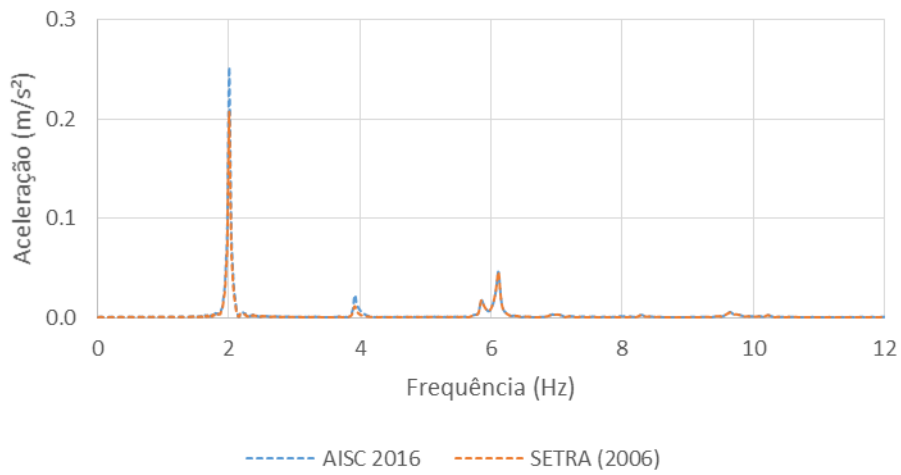


Figura 70 – Caminhada: Caso 1 e Caso 2 – Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)

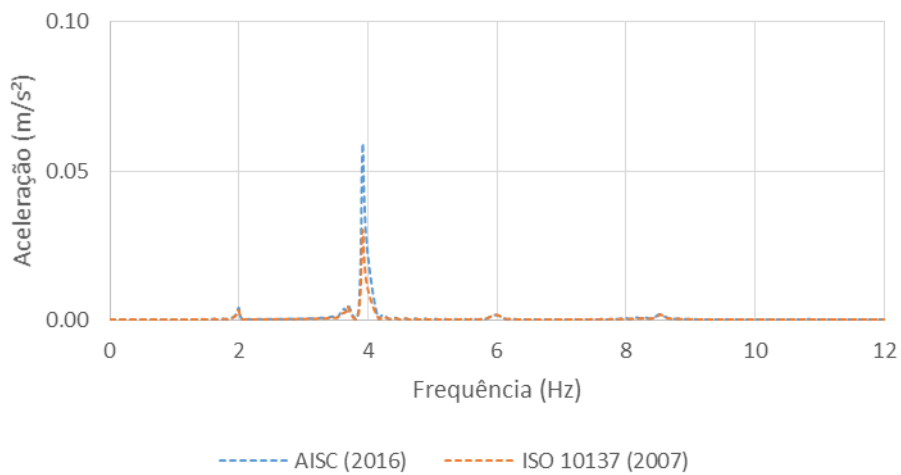


Figura 71 – Caminhada: Caso 3 e Caso 4 – Aceleração (m/s²) x Frequência (Hz)



Nota-se que, para os Casos 1 e 2, a resposta obtida apresenta-se mais representativa, com maior participação do 1º harmônico. Para os Casos 3 e 4, os valores obtidos mostram-se menos expressivos, sendo percebida a resposta representativa para o 2º harmônico.

A partir da implementação, as repostas de aceleração para o ponto de interesse em cada vão – ou seja, o mesmo analisado nos casos de saltos – são apresentadas a seguir conforme Figura 72 a Figura 75.

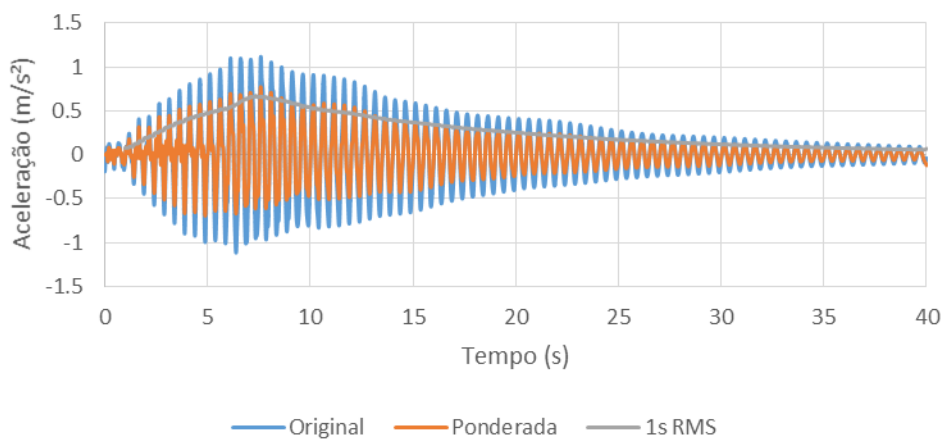


Figura 72 – Caso 1 (AISC): Acelerações (m/s²)

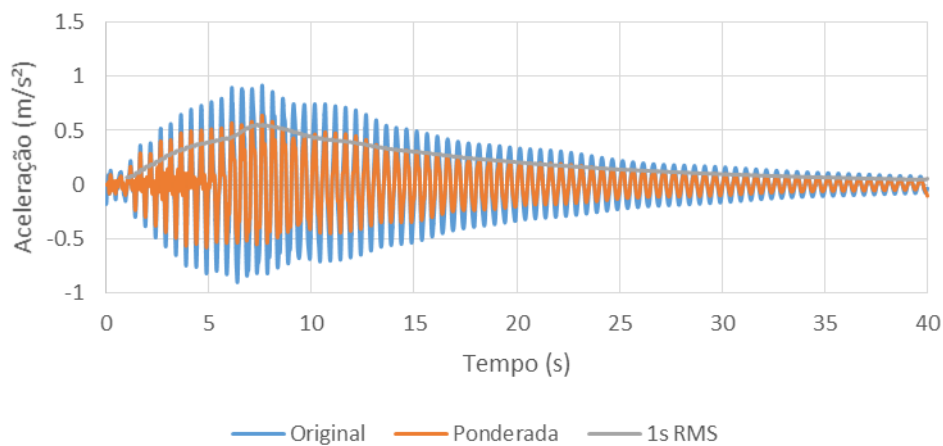


Figura 73 – Caso 2 (SETRA): Acelerações (m/s²)

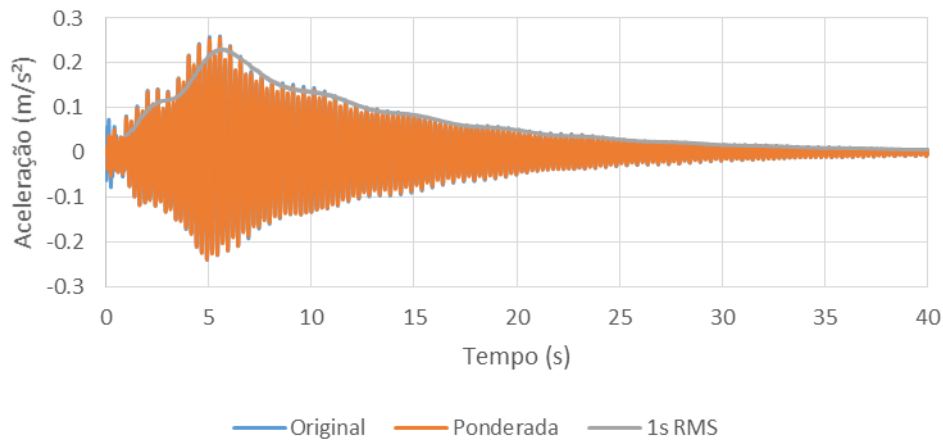


Figura 74 – Caso 3 (AISC): Acelerações (m/s²)

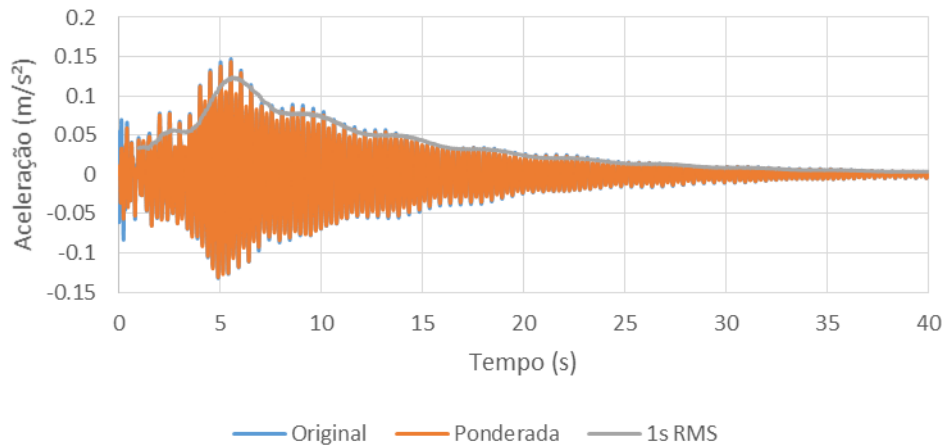


Figura 75 – Caso 4 (SETRA): Acelerações (m/s²)

Segundo o apresentado, os valores de acelerações (pico a pico) para o Vão 2 apresentam-se na faixa de $-1,0 - 1,0 \text{ m/s}^2$ - considerando-se valores originais. Enquanto para o Vão 3 a excitação devido a caminhada apresenta valores de, aproximadamente, $-0,25 - 0,25 \text{ m/s}^2$. Esta primeira observação evidencia a sensibilidade maior do Vão 2 para a ação implementada.

Do mesmo modo que para os saltos, determinaram-se os valores notáveis referentes a cada caso para posterior comparação com os valores limite – Tabela 33 a Tabela 36.



Tabela 33 – Caminhada: Caso 1

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	1,117
a _w (m/s ²), pico	0,772
original (m/s ²), RMS	0,371
a _w (m/s ²), RMS	0,224
MTVV (m/s ²)	0,456
VDV (m/s ^{1.75})	0,794
ESPA (m/s ²)	0,645

Tabela 34 – Caminhada: Caso 2

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	0,917
a _w (m/s ²), pico	0,640
original (m/s ²), RMS	0,305
a _w (m/s ²), RMS	0,186
MTVV (m/s ²)	0,381
VDV (m/s ^{1.75})	0,659
ESPA (m/s ²)	0,539

Tabela 35 – Caminhada: Caso 3

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	0,260
a _w (m/s ²), pico	0,256
original (m/s ²), RMS	0,064
a _w (m/s ²), RMS	0,064
MTVV (m/s ²)	0,162
VDV (m/s ^{1.75})	0,243
ESPA (m/s ²)	0,228

Tabela 36 – Caminhada: Caso 4

Valores Notáveis	
Original, pico (m/s ²)	0,147
a _w (m/s ²), pico	0,143
original (m/s ²), RMS	0,033
a _w (m/s ²), RMS	0,033
MTVV (m/s ²)	0,086
VDV (m/s ^{1.75})	0,127
ESPA (m/s ²)	0,122



Os valores originais de pico, assim como ESPA, obtidos para os Casos 1, 2 apresentam-se acima do valor limite proposto pelo AISC (2016), enquanto os valores dos Casos 3 e 4 apresentam-se inferiores a esse limite. Ressalta-se que, quanto às acelerações ponderadas de pico para os Casos 1 e 2, estas são inferiores aos valores de originais de pico visto que, mediante o uso do “filtro” para ponderação, ocorre a atenuação das respostas devido ao afastamento das frequências do intervalo de maior percepção humana (4 a 8 Hz). Para os limites de conforto do SETRA (2006) os Casos 1, 2 estão compreendidos no intervalo de “médio conforto”, enquanto os Casos 3 e 4 apresentam-se na faixa de “máximo conforto” quando considerados valores de aceleração originais. Para valores ponderados são compreendidos no intervalo de “médio conforto” os Casos 1 e 2 e de “máximo conforto” os Casos 3 e 4.

Para valores de RMS ponderados, quanto ao limite apresentado no SCI (2009), todos os Casos são classificados como na faixa de critério de “limite razoável para pessoas passivas”, estando compreendidos entre abaixo de $0,35 \text{ m/s}^2$.

Os valores de VDV limites definidos pelos autores Ellis e Litter (2004) e os definidos por Setareh (2012) classifica os Casos 1 e 2 como “perturbador”, enquanto os Casos 3 e 4 são classificados como “limite razoável para pessoas passivas”.

Sendo assim, evidencia-se que diferentemente das situações de salto – atividades de maior impacto e energia – os casos de caminhadas apresentam-se do seguinte modo: (i) Casos 1 e 2 ultrapassando o limite para acelerações de pico estabelecidos pelo AISC (2016), estando segundo o SETRA (2006) compreendidos no intervalo de “médio conforto”, sendo para os valores de aceleração RMS incluídos na faixa de “limite razoável para pessoas passivas” e para valores VDV classificados no intervalo de “perturbador”; (ii) os Casos 3 e 4 apresentaram limites dentro das condições estabelecidas pelo AISC



(2016), estando na faixa de “máximo conforto” segundo o estipulado pelo SETRA (2006), assim como para valores de aceleração RMS e VDV foram classificados como dentro do “limite razoável para pessoas passivas”. Além disso, ressalta-se que nos casos os quais tais limites foram ultrapassados, considerações como o efeito de interação (para amortecimento) do sistema humano-estrutura e valor real de amortecimento estrutural do modelo analisado podem gerar resultados os quais, nas situações analisadas, não haja extrapolação dos limites normativos.



6 CONCLUSÕES

Em conformidade com todo o exposto dos demais capítulos do trabalho as seguintes ponderações são apresentadas:

- (i) Os resultados obtidos não contemplam as modificações recentes executadas na estrutura – ou seja, referem-se à condição inicial de projeto da estrutura executada. Contudo, o estudo apresenta-se relevante ao passo que o entendimento das condições iniciais propicia a análise desta quanto ao proposto e mediante a identificação de situações/casos suscetíveis a problemas dinâmicos, como vibrações excessivas, as intervenções podem ser direcionadas e realizadas de modo eficaz a atenuação/resolução dos problemas.
- (ii) A abordagem adotada para a composição do trabalho não contempla a real situação da relação do sistema humano-estrutura, que leva em conta as propriedades dinâmicas do corpo humano (massa, amortecimento e rigidez), o qual mediante a interação entre as partes tende a atenuar os efeitos decorrentes de carregamentos dinâmicos induzidos por atividades humanas. Ou seja, casos críticos podem então ser reavaliados para que a estrutura não seja “condenada” a partir de resultados sob perspectiva simplificada/conservadora do carregamento humano atuante apenas como uma pura força aplicada.
- (iii) As diferentes modelagens de atividades humanas para carregamentos dinâmicos induzidos evidenciam que quanto à energia, e ao grau de impacto relacionado a estas, a estrutura apresenta respostas significativas e relevantes



ao comportamento sob ação dinâmica podendo, deste modo, avaliar casos extremos e situações de desconforto e risco aos usuários. Como discutido, os estudos de casos referentes aos saltos, atividade de alto grau impacto e energia, apresentaram respostas dinâmicas insatisfatórias as quais extrapolaram os limites normativos estabelecidos. Contudo, quantos aos casos de caminhada analisados para os mesmos pontos considerando o efeito de uma pessoa, no que diz respeito aos Casos 1 e 2 quando considerados valores de acelerações originais estes apresentaram-se acima dos limites estabelecidos pelo AISC (2016) enquanto os Casos 3 e 4 estavam abaixo do limite. Quanto as considerações de acelerações RMS a faixa resposta a excitação variou entre “médio conforto”, para os Casos 1 e 2, e “máximo conforto” para os Casos 3 e 4. Enquanto para valores VDV os Casos 1 e 2 são classificados em “perturbador” e os Casos 3 e 4 como “limite razoável para pessoas passivas”.

- (iv) A avaliação dinâmica apresentada mostrou-se relevante ao estudo do comportamento da estrutura analisada visto que a concepção de um projeto apenas sob perspectiva estática não contempla situações reais de uso da estrutura as quais devem assegurar segurança e conforto dos usuários. Deste modo, a partir de um estudo dinâmico e estático do projeto a solução proposta apresenta-se mais assertiva ao passo que antecipa problemas de ordem estática/dinâmica e minimiza a ocorrência de intervenções futuras, as quais, no geral, são onerosas e de execução com maior grau de complexibilidade.
- (v) O conceito de “segurança” primado pelas orientações normativas refere-se a análise de situações que estejam em conformidade com o estabelecido para o



Estado Limite Último e o Estado Limite de Serviço das estruturas. Em contrapartida, o conceito de “conforto” tem por natureza limites subjetivos os quais abordados em normas referem-se a questão de uso por parte dos indivíduos em interação com a estrutura. Contudo, observa-se que uma vez exposto a situações de desconforto, como casos de vibrações excessivas, o usuário remete a resposta sensitiva a uma condição de insegurança para com a estrutura. Deste modo, o grau de conforto implica na “sensação de segurança” percebido no exercício de atividades desenvolvidas na estrutura. Desta forma, os resultados apresentados nesse trabalho corroboram o fato presenciado de que a passarela analisada, durante um evento de grande movimentação de pedestres, ficou inadequada, não sendo utilizada, visto que a sensação de desconforto resultou em uma insegurança dos usuários os quais tomaram por rota alternativa o uso de uma passarela provisória. Pensando-se na subutilização, os recursos investidos na estrutura são incompatíveis ao retorno esperado quanto a rotina de uso. Sendo assim, o critério de conforto influi no critério de segurança sob a perspectiva do usuário sendo possível a correlação entre estes e necessária a avaliação de ambos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, NASSER. Attempt to explain scaling factors in Matlab help on FFT, 2009. Disponível em:

https://www.12000.org/my_notes/on_scaling_factor_for_fft_in_matlab/.

ALCÂNTARA SEGUNDINHO, P. G. DE. Estudo das vibrações induzidas por pedestres em passarelas de madeira. p. 321, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga Móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e mistas de aço e concreto de edificações, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

AVELINO, A. F. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica. Ed. Érica, 2008.

BACHMANN, H. et al. Vibration problems in structures: practical guidelines. Basel (Switzerland): Birkhäuser, 1995.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. J. Vibrations in Structures Induced by Man and Machines. Zürich (Switzerland): IABSE—AIPC—IVBH, 1987.

BBC NEWS. Scores hurt as US bridge collapses. Disponível em: <<http://www.bbc.com.br>>. Acesso em: 24 jun. 2020.

CAETANO, E.; CUNHA, A. Experimental and numerical assessment of the dynamic behaviour of a stress-ribbon footbridge. **Structural Concrete**, v. 5, n. 1, p. 29–38, 2004.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of structures. 3rd. ed. Berkeley: Computers & Structures. 2003.

DALLARD, P. et al. The London Millennium Footbridge. **Structural Engineer**, v. 79, n. 22, p. 17–33, 2001.

DIAS, A. D. P. et al. Terminal Olímpico do Rio de Janeiro Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Agradecimentos. 2017.



ELLIS, B.R.; LITTLER, J. D. Response of cantilever grandstands to crowd loads. Part I: Serviceability evaluation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, v. 157, n. 4, p. 235–241, 2004.

European Committee for Standardization CEN: ENV 1995-2, Eurocode 5 - Design of timber structures – bridges, 1997.

ETHIOPIAN STANDARDS AGENCY. ET ISO 10137 - Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. v. 10137, p. 50, 2012.

FIGUEIREDO, F. P.; Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - UERJ/Engenharia Civil: Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

GASPAR, C. M. R.; Avaliação do efeito da interação humana sobre pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - UERJ/Engenharia Civil: Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

GOOGLE MAPS. Disponível em: [https://www.google.com/maps/@-22.9716172,-43.4006708,3a,75y,90t/data=!3m8!1e2!3m6!1sAF1QipOsiFP3OvkL99mfKd6o3SiyZFM2g9yr8aj8_3wE!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Flh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipOsiFP3OvkL99mfKd6o3SiyZFM2g9yr8aj8_3wE!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Flh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipOsiFP3OvkL99mfKd6o3SiyZFM2g9yr8aj8_3wE%3Dw203-h114-k-no!7i3264!8i1836](https://www.google.com/maps/@-22.9716172,-43.4006708,3a,75y,90t/data=!3m8!1e2!3m6!1sAF1QipOsiFP3OvkL99mfKd6o3SiyZFM2g9yr8aj8_3wE!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Flh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipOsiFP3OvkL99mfKd6o3SiyZFM2g9yr8aj8_3wE%3Dw203-h114-k-no!7i3264!8i1836)

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. Switzerland, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Switzerland, 2007.

IRVINE, TOM. ISO 2631 Matlab Scripts, 2012. Disponível em: <http://vibrationdata.wordpress.com/2012/10/21/iso-2631-matlab-scripts>.

L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. Footbridges – Assessment of vibration behaviour of footbridges under pedestrian loading. Service d'études techniques des routes et autoroutes (SÉTRA), 2006.

MURRAY, T. M. et al. Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity: AISC DG11 Second Edition. Chicago, USA, 2016.

NAKAMURA, S. I.; FUJINO, Y. Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge. **Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)**, v. 12, n. 4, p. 295–300, 2002.



PIERO, T.; MESTRANDO, D. B. Análise dinâmica em passarela sujeita à movimentação humana. 2010.

SEGUNDINHO, P. G. DE A.; DIAS, A. A.; CARREIRA, M. R. Carregamentos dinâmicos induzidos pelos movimentos de pedestres em estruturas. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 38, n. 2, p. 3, 2018.

SETAREH, M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, v. 165, n. 5, p. 219–231, 2012.

SORIANO, H. L. **Introdução à Dinâmica das Estruturas**. [s.l: s.n.].

SMITH, A.L.; HICKS, S.J.; DEVINE, P. J. *Design of Floors for Vibration : A New Approach (Revised Edition)*. The Steel Construction Institute (SCI) Publication P354, Ascot, 2009.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. **Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review**. [s.l: s.n.]. v. 279

ZÚÑIGA, J. E. V. Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UERJ/Engenharia Civil: Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.