

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

OTAVIO BRUNET JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PASSARELAS FLEXÍVEIS SOB AÇÃO DO
CAMINHAR DE PEDESTRES UTILIZANDO MODELOS PROBABILÍSTICOS**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Niterói
2022

OTAVIO BRUNET JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PASSARELAS FLEXÍVEIS SOB AÇÃO DO
CAMINHAR DE PEDESTRES UTILIZANDO MODELOS PROBABILÍSTICOS**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal Fluminense, como requisito
parcial para conclusão do curso.

Orientadora:
Prof.^a Eliane Maria Lopes Carvalho

Niterói
2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

B895a Brunet junior, Otávio
Avaliação de Desempenho de Passarelas Flexíveis Sob
Ação do Caminhar de Pedestres Utilizando Modelos
Probabilísticos / Otávio Brunet junior ; Eliane Maria Lopes
Carvalho, orientadora. Niterói, 2022.
117 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Civil)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia,
Niterói, 2022.

1. Dinâmica de Estruturas. 2. Modelos de Carregamento. 3.
Performance Estrutural. 4. Análise Probabilística. 5.
Produção intelectual. I. Carvalho, Eliane Maria Lopes,
orientadora. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. III. Título.

CDD -

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PASSARELAS FLEXÍVEIS SOB AÇÃO DO
CAMINHAR DE PEDESTRES UTILIZANDO MODELOS PROBABILÍSTICOS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Bacharelado em
Engenharia Civil, como requisito parcial
para conclusão do curso.

Aprovada em _____ de _____ de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eliane Maria Lopes Carvalho – UFF (orientadora)

Prof. Wendell Diniz Varela – UFRJ

Prof. Janine Domingos Vieira- UFF

Prof. André Maués Brabo Pereira – UFF

Niterói
2022

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Otavio Brunet (*in memoriam*),
que nunca tirou o olho de seu filho,
sempre amando e mostrando o caminho.

À minha mãe Dayana Alice,
a inspiração, o alicerce,
a alegria, o amor,
meu tudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço de forma incondicional aos meus pais, Dayana Alice e Otavio Brunet, por todo amor, carinho, suporte, e força que me deram ao longo de todos esses anos. Tudo que faço é por vocês e sem a nossa união, nada disso seria possível. Amo muito vocês.

Agradeço aos meus avós, Thomaz de Aquino e Alice Lima, por toda dedicação e amor que fazem parte do que nossa família é hoje. Vocês são a base. E essa minha conquista é fruto de uma história linda, forte e gigante que vocês construíram. Beijos fraternos. Saudades costelinha.

Ao meu Tio Denis e a minha Tia Cristina, por serem meu segundo pai e minha segunda mãe. Sempre comigo nos momentos difíceis, me dando o carinho e o amor que eventualmente me faltasse. Obrigado por toda luz.

Aos meus Tios George e Thomaz e a minha Tia Marisa, que apesar das distâncias, sempre se preocuparam comigo, mandaram energias e torceram para o meu sucesso. Obrigado por tudo.

Ao meu primo/irmão Matheus Kaliffi, por toda parceria e por nunca me deixar sozinho. Crescemos juntos e estamos mais fortes juntos. Obrigado por sempre me tirar da inércia, me mostrar um novo caminho, me dar esperança e alegria.

À minha família da UFF, minha segunda casa, por me tornarem uma pessoa melhor, me ensinarem a ver e a entender o mundo, por sempre cuidarem de mim e por me aceitarem do jeito que eu sou. São muitos nomes. Talvez uma página de nomes. Mas deixo um agradecimento especial à essas pessoas maravilhosas por serem o começo e o infinito: Amanda Petrunaro, Caroline Paixão, Felipe Andrade, Kênia Herran, Larissa Mota, Lucas França e Marianna Valle. Ninguém se forma sozinho.

A todos os meus amigos da vida, em especial às turmas do Martins, Pitacos e Luxos, por sempre me motivarem, quererem o meu bem e por nunca desistirem de mim. Vocês são meu porto-seguro e nossas amizades independem de qualquer coisa. Beijos do teivs.

Aos amigos feitos na *Baker Hughes* e na *Subsea 7* que foram do trabalho para a vida. Muitos momentos lindos que vivemos, e que ainda vamos viver juntos. Vocês me mostraram o que é engenharia de verdade.

Agradeço imensamente à minha orientadora Eliane Carvalho, pela oportunidade de trabalhar ao lado dela, pela enorme paciência, por todo o conhecimento compartilhado e por sempre, sempre, sempre acreditar no meu potencial. Aos meus coorientadores Wendell Varela e André Pereira por toda parceria e companheirismo, pelos ensinamentos e por sempre me desafiarem ao longo dessa jornada. E claro, ao Filipe Rezende, que foi meu mentor desde o início, contribuindo com o meu desenvolvimento e ainda sendo o meu parceiro de escrita nos artigos que fizemos. Sem ele, este projeto não teria a qualidade que tem hoje.

Por fim, agradeço à UFF por ter me fornecido as ferramentas necessárias para eu exercer a profissão que eu amo e ao CNPq, por ter financiado o início da pesquisa deste projeto em 2017. Ter a oportunidade de desenvolver uma engenharia brasileira é um privilégio, o qual vou valorizar para sempre. Tudo isso foi graças a um ensino público, gratuito e de qualidade.

RESUMO

No presente trabalho, são realizadas análises dinâmicas em uma passarela considerando modelos determinísticos e probabilísticos com duas formulações distintas para simulação de carregamento humano, um modelo de força (MF) e dois modelo biodinâmicos (MBs) desenvolvidos por TOSO (2016) (MT) e COSTA (2019) (MC). As análises probabilísticas baseiam-se no método de passeio aleatório (PA), para representar realisticamente o movimento de pedestres através das variabilidades inter- e intrasujeito. Para o desenvolvimento da metodologia foram criadas análises paramétricas de sensibilidade, a fim de compreender a aplicação do método para análises dinâmicas. Para a calibração dos modelos, utilizou-se correlações teórico-experimentais com base em testes de vibrações livres sob ação do caminhar uma e seis pessoas atravessando uma passarela de aço. Por fim, foram feitas análises de performance considerando uma vasta gama de cenários, seguindo normas e abordagens estatísticas utilizando PA. O estudo tem como objetivo proporcionar uma melhor compreensão sobre estruturas em cenários de manutenção, utilizando os modelos de carregamento probabilístico com PA para MF, MT e MC (PAMF, PAMT e PAMC). Os resultados mostram que a maioria das amplitudes máximas de aceleração atingem o limite de conforto inaceitável utilizando o PAMF, e o nível de conforto é melhorado nas simulações utilizando o PAMT ou PAMC. Os resultados obtidos nas simulações propostas apontam que, o uso de PA simula com sucesso as pequenas variações presentes no ciclo de caminhada.

Palavras-chave: *carregamento humano, caminhar, modelo probabilístico, passeio aleatório*

ABSTRACT

In the present work, dynamic analyses are performed on a footbridge considering deterministic and probabilistic models with two distinct formulations for simulation of human loading, one force model (FM) and biodynamic models (MBs) developed by TOSO (2016) (MT) and COSTA (2019) (MC). Probabilistic analyses are based on the random walk (PA) method to realistically represent pedestrian movement with inter- and intrasubject variability approaches. For the development of the methodology, parametric sensitivity analyses were created in order to understand the application of the method in different scenarios. In order to calibrate the model, theoretical-experimental correlations were used based on tests of one and six people crossing a steel footbridge conducted by REZENDE et al. (2020). Finally, performance assessments were performed considering a wide range of scenarios, following international standards and statistical approaches using the RW. The study aims to provide a better understanding of structures in maintenance scenarios using probabilistic loading models with PA for MF, MT, and MC (PAMF, PAMT and PAMC). The results show that most maximum acceleration amplitudes reach the unacceptable comfort limit using the PAMF, and the comfort level is improved in simulations using PAMT or PAMC. The results obtained in the proposed simulations indicate that the use of PA successfully simulates the small variations present in the walking cycle.

Keywords: *Human loading simulation, walking, probabilistic model, random walk method*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1: Solferino Bridge na França. Fonte: br.pinterest.com. Acesso em 01/12/2020....	23
Figura 1-2: Millenium Bridge em Londres. Fonte: br.pinterest.com. Acesso em 01/12/2020	23
Figura 2-1: Sistema massa mola amortecedor para um grau de liberdade (Fonte: Autor)....	28
Figura 2-2: Ilustração do Método da Superposição Modal para um Viga engastada (Fonte: Notas de Aula, Mazzilli).....	29
Figura 2-3. Gráfico de $Pk(n)$ para $k = 100, 200, 300$ (Fonte: Autor)	34
Figura 2-4: Ciclo de Marcha. Fonte: https://www.pessemador.com.br . Acesso em 11/12/2021.	35
Figura 2-5: Exemplo de resposta de um MF com uma abordagem determinística (Fonte: Autor)	37
Figura 2-6: Histograma gerado através da distribuição uniforme dos ângulos de fase (Fonte: Autor)	38
Figura 2-7: Modelos Biodinâmicos com um Grau de Liberdade. (Fonte: Autor).....	39
Figura 2-8: Percentis 50, 75 e 95 de acelerações máximas em função da frequência natural fn da estrutura (Fonte: PEDERSEN & FRIER (2010) – Adaptado).....	44
Figura 2-9: Modelo polinomial obtido através da superposição com dados experimentais de impactos do passo (Fonte: SAHNACI & KASPERSKI (2011) – Adaptado).....	47
Figura 2-10: Fator ψ em casos de caminhar para direção vertical (Fonte: SÉTRA (2006) – Adaptado)	50
Figura 2-11: Ábaco para análise de aceleração máxima de vibração vertical para edificações (Fonte: ISO (2007) – Adaptado).....	52
Figura 3-1: Detalhe da laje pré-moldada apoiada nas transversinas (Fonte: REZENDE, 2017)	54

Figura 3-2: Passarela instrumentada (Fonte: BRUNET <i>et al.</i> , 2021).....	55
Figura 3-3: Croqui especificando os perfis de cada elemento de barra (Fonte: BRUNET <i>et al.</i> 2021).....	55
Figura 3-4: Espectro de direção vertical obtido pelos testes de vibração livre (Fonte: Autor)	57
Figura 3-5: Resposta para um pedestre andando em ressonância considerando o domínio do tempo (Fonte: Autor).....	58
Figura 3-6: Resposta para um pedestre andando em ressonância considerando o domínio da frequência (Fonte: Autor).....	58
Figura 3-7: Resposta para seis pedestres andando em ressonância considerando o domínio do tempo (Fonte: Autor).....	59
Figura 3-8: Resposta para seis pedestres andando em ressonância considerando o domínio da frequência (Fonte: Autor).....	59
Figura 3-9: Fluxograma referente à lógica de programação do PA utilizado	65
Figura 3-10: Exemplos de PA considerando valores de f_p para diferentes μS (Fonte: BRUNET <i>et al.</i> (2022) – Adaptado).....	66
Figura 3-11: Transições do PA de frequências do passo Sf_p para os exemplos da Figura 3-10 (Fonte: BRUNET <i>et al.</i> (2022) – Adaptado)	67
Figura 3-12: Exemplo de valores de f_p para um PA no âmbito do tempo representando os ciclos de cada passo dado por um pedestre	67
Figura 4-1: Acelerações máxima médias para diferentes CVS e μS considerando um pedestre como MF. (Fonte: BRUNET <i>et al.</i> (2022) – Adaptado)	72
Figura 4-2: Comparação entre modelos de carregamento representando 1 pedestre considerando $amax, \mu$ normalizados para diferentes μS (Fonte: Autor)	75

Figura 4-3: Comparação entre modelos de carregamento representando 5 pedestres considerando $amax, \mu$ normalizados para diferentes μS (Fonte: Autor)	76
Figura 4-4: Comparação entre modelos de carregamento representando 30 pedestres considerando $amax, \mu$ normalizados para diferentes μS (Fonte: Autor)	76
Figura 4-5: Comparação entre modelos de carregamento representando 156 pedestres considerando $amax, \mu$ normalizados para diferentes μS (Fonte: Autor)	77
Figura 4-6: Comparação entre $amax, \mu$ normalizadas obtidas por diferentes μS para quatro densidades de carregamento representadas pelo Modelo de Força (Fonte: Autor).....	78
Figura 4-7: Comparação entre $amax, \mu$ normalizadas obtidas por diferentes μS para quatro densidades de carregamento representadas por TOSO (2016) (Fonte: Autor).....	79
Figura 4-8: Comparação entre $amax, \mu$ normalizadas obtidas por diferentes μS para quatro densidades de carregamento representadas por COSTA (2019) (Fonte: Autor).....	79
Figura 4-9: Análise de sensibilidade para um CVS de 50% com destaque no valor de μS escolhido para simular um pedestre caminhando em ressonância conforme REZENDE <i>et al.</i> (2020) (Fonte: Autor)	81
Figura 4-10: Respostas determinística para um pedestre caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor).....	83
Figura 4-11: Respostas probabilística utilizando PA para um pedestre caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor)	83
Figura 4-12: Frequências obtidas a cada passo do PA gerado durante as simulações para um pedestre caminhando em ressonância (Fonte: Autor).....	84
Figura 4-13: Esquemático em vista superior do arranjo de pedestres modelado (Fonte: Autor)	85
Figura 4-14: Respostas determinística para seis pedestres caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor).....	86

Figura 4-15: Respostas probabilística utilizando PA para seis pedestres caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor)	86
Figura 4-16: Frequências obtidas a cada passo do PA gerado durante as simulações para cada um dos pares de pedestres modelados (Fonte: Autor).....	88
Figura 4-17: Taxas de amortecimento ξn medidas em cargas de serviço com a variação da frequência natural f_n (Fonte: HEINEMEYER <i>et al.</i> (2009) – Adaptado).....	91
Figura 4-18: Análises de performance considerando critérios de conforto do guia SÉTRA (2006) para o Modelo de Força (Fonte: Autor)	93
Figura 4-19: Análises de performance considerando critérios de conforto do guia SÉTRA (2006) para TOSO (2016) (Fonte: Autor)	94
Figura 4-20: Análises de performance considerando critérios de conforto do guia SÉTRA (2006) para COSTA (2019) (Fonte: Autor).....	95
Figura 4-21: Matriz de gráficos para d e f_n , a qual apresenta uma comparação entre os Casos 1 e 2 de variabilidade, considerando o número de cenários com níveis de desconforto desprezíveis segundo SÉTRA (2006) (Fonte: Autor)	98
Figura 4-22: Matriz de gráficos para d e f_n , a qual apresenta uma comparação entre os Casos 1 e 2 de variabilidade, considerando o número de cenários com $RMS_{amax}, 95 \leq RMS_{amax}$ conforme ISO (2007) (Fonte: Autor)	100
Figura A-0-1: Exemplo de função densidade para variáveis aleatórias entre 1 e 3. (Fonte: WALPOLE <i>et al.</i> (2011) - Adaptado)	114
A Figura A-0-2 apresenta o gráfico gerado pela função que define a distribuição normal. O pico da curva representa o valor médio escolhido para análise, enquanto a abertura da curva é gerada com base no desvio-padrão.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Valores de $Pk(n)$ para k passos variando de 0 (sem movimento) para 5	33
Tabela 2-2: Parâmetros da distribuição normal dos coeficientes obtidos por KERR (1998).	38
Tabela 2-3 Exemplos de valores médios e desvio-padrão para frequências de passo obtidos por diferentes pesquisadores (PEDERSEN & FRIER, 2010 - Adaptado)	45
Tabela 2-4: Faixas de conforto com base nas amplitudes de aceleração segundo guia SÉTRA (2006)	49
Tabela 2-5: Faixas para risco de ressonância para 1º modo de vibração vertical segundo o guia SÉTRA	49
Tabela 2-6: Densidade de pedestres segundo o guia SÉTRA	50
Tabela 3-1: Compilado de parâmetros utilizados para a variabilidade inter-sujeito	62
Tabela 4-1: Parâmetros físicos de entrada para o modelo equivalente de viga para a passarela estudada por REZENDE <i>et al.</i> (2020)	69
Tabela 4-2: Especificações técnicas do equipamento utilizado para as simulações.....	69
Tabela 4-3: Resultados da análise de convergência considerando RMS_{amax}, μ	70
Tabela 4-4: Condições de contorno para ao Modelo de Força utilizado nas análises de sensibilidade para CVS	72
Tabela 4-5: Condições de contorno para os Modelos de Força, de TOSO (2016) e de COSTA (2019) utilizados nas análises de sensibilidade para μS	74
Tabela 4-6: Condições de contorno para modelagem de um pedestre caminhando em ressonância.....	82
Tabela 4-7: Acelerações máximas para um pedestre considerando MF e MT com e sem PA	82
Tabela 4-8: Parâmetros de entrada para a modelagem das simulações para seis pessoas caminhando em ressonância	85

Tabela 4-9: Acelerações máximas para seis pedestres considerando MF e MT com e sem PA	87
Tabela 4-10: Distribuições de probabilidade e valores escolhidos para a modelagem da variabilidade nos parâmetros que definem o caminhar humano para as análises de ELS.....	90
Tabela 4-11: Diferenças percentual [%] entre os valores de <i>amax</i> , 95 dos Casos 1 e 2 para MF	93
Tabela 4-12: Diferenças percentual [%] entre os valores de <i>amax</i> , 95 dos Casos 1 e 2 para MT	94
Tabela 4-13: Diferenças percentual [%] entre os valores de <i>amax</i> , 95 dos Casos 1 e 2 para MC	95
Tabela 4-14: Resultados de <i>amax</i> , 95 obtidos para cenários considerando $d = 0,2$ pedestre/m ² , $fn = 2$ Hz e $\xi n = \{0,25, 0,50, 1,50\}$ % com destaque aos níveis de conforto segundo o guia SÉTRA (2006).....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CV_S	Coeficiente de Variância da Transição
$N_{p,pos}$	Número de pedestres por posição
N_p	Número de pedestres total
N_{pos}	Número de pessoas em uma posição
S_i	Transição do i-ésimo passo
X_i	Valor na i-ésima etapa de um PA
α_i	i-ésima amostra gerada a partir da distribuição uniforme
$a_{max,95}$	Aceleração máxima em percentil 95
$a_{max,\mu}$	Aceleração máxima média
c_p	Coeficiente modal da pessoa
f_{p_0}	Frequência do passo inicial
f_{p_i}	Frequência do i-ésimo passo
$f_{p_i}^n$	número n de pontos de integração que sejam iguais a f_{p_i}
f_a	frequência natural amortecida
f_n	Frequência natural da estrutura
f_p	Frequência do passo
k_p	Rigidez modal da pessoa
m_p	Massa modal da pessoa
$y_j(t)$	Deslocamentos do modo j ao longo do tempo
α_j	Fator de amplificação dinâmica do j-ésimo harmônico
μ_S	Transição média
ξ_n	Taxa de amortecimento da estrutura
ξ_p	Taxa de amortecimento da pessoa
σ_S	Desvio-Padrão da Transição
$\phi_j(x)$	formas modais
Δt	Intervalo de tempo

CV	Coeficiente de Variância
d	Densidade de Pedestres
DN	Distribuição Normal
DP	Desvio Padrão
DU	Distribuição Uniforme
E	Módulo de elasticidade do material
f	Frequência Natural do Carregamento
$F(t)$	Força dinâmica, variável no domínio do tempo
FAD	Fator de Amplificação Dinâmica
I	Momento de Inércia da seção transversal
ISO	<i>International Standards Organization</i>
L	Comprimento Físico do sistema analisado
M	Massa da pessoa
MB	Modelo Biodinâmico
MC	Modelo de COSTA (2019)
MF	Modelo de Força
MMC	Método de Monte Carlo
m^o	Massa por unidade de comprimento da estrutura
MT	Modelo de TOSO (2016)
PA	Passeio Aleatório
PAMC	Modelo de COSTA (2019) utilizando Passeio Aleatório
PAMF	Modelo de Força utilizando Passeio Aleatório
PAMT	Modelo de TOSO (2016) utilizando Passeio Aleatório
RMS	<i>Root Mean Square</i>
VE	Valor Eficaz
$RMSa_{max,95}$	Aceleração RMS máxima em percentil 95
$RMSa_{max,\mu}$	Aceleração RMS máxima e média
ψ	Fator de risco de ressonância

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação	22
1.1.1	Objetivo geral	25
1.1.2	Objetivo específico	25
1.2	Escopo do trabalho	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1	Equação de Equilíbrio da Dinâmica	27
2.2	Método da Superposição Modal	28
2.3	Método de Passeio Aleatório (<i>Random Walk</i>).....	30
2.4	Modelos para Simulação de Carregamento	35
2.4.1	Simulações com Modelos de Força	36
2.4.2	Simulação com Modelo Biodinâmico	39
2.5	Métodos Probabilísticos para Simulação de Carregamento	42
2.6	Guias para Análise do Estado Limite de Serviço de Passarelas	48
2.6.1	Guia SÉTRA.....	48
2.6.2	Norma ISO 10137.....	51
3	METODOLOGIA.....	53
3.1	Estrutura Analisada.....	54
3.2	Campanha de ensaios experimentais	56
3.3	Implementação de Variabilidade nos Modelos de Carregamentos Humano.....	60
3.3.1	Modelagem de Variabilidade Inter-sujeito	61

3.3.2	Modelagem de Variabilidade Intrasujeito	63
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	68
4.1	Análises de Convergência das Simulações.....	70
4.2	Análises de Sensibilidade para Modelos de Carregamento Humano Utilizando o Método de Passeio Aleatório.....	71
4.2.1	Coeficiente de Variância das Transições Médias μS	71
4.2.2	Transições Médias μS para casos de ressonância.....	73
4.3	Calibração dos Modelos Probabilísticos de Carregamento Humano Utilizando o Método de Passeio Aleatório.....	80
4.3.1	Uma pessoa caminhando em ressonância com a estrutura.....	81
4.3.2	Seis pessoas caminhando em ressonância com a estrutura	84
4.4	Avaliações de Desempenho de Passarelas Utilizando Modelos Probabilísticos de Carregamento.....	88
4.4.1	Condições de contorno para os modelos de carregamento.....	89
4.4.2	Aspectos de modelagem para as avaliações	90
4.4.3	Análise compreensiva dos resultados de desempenho	91
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	102
5.1	Conclusões.....	102
5.2	Sugestões de continuidade do trabalho.....	105
6	REFERÊNCIAS	106
	ANEXO A – FERRAMENTAS PARA ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	112
A.1.	MÉTODO DE MONTE CARLO	112

A.2. DISTRIBUIÇÕES CONTÍNUAS	112
A.2.1 Distribuição uniforme.....	114
A.2.2. Distribuição normal	115
ANEXO b – vALORES DE <i>amax</i>, 95 PARA AS ANÁLISES DE PERFOMANCE SEGUNDO o guia sétra (2006).....	116
ANEXO c – vALORES DE <i>RMSamax</i>, 95 PARA AS ANÁLISES DE PERFOMANCE SEGUNDO A iso 10137.....	117

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho é resultado de um desenvolvimento de pesquisa, o qual teve início no ano de 2017, a partir de uma bolsa de iniciação científica provida pela Universidade Federal Fluminense (UFF) via o órgão CNPq. A premissa inicial do projeto foi estudar maneiras de representar o caminhar humano de forma teórica, porém de uma maneira otimizada e condizente com a realidade.

Ao longo deste trabalho, serão descritos os fundamentos para análises dinâmicas de estruturas, os quais são importantes para a delimitação de diferentes maneiras de se representar um carregamento humano. Dois tipos de modelos utilizados para esses fins serão detalhados, sendo eles: modelos de força e biodinâmico.

Para estes tipos de modelos, o método de Passeio Aleatório (PA) é utilizado de forma inovadora no âmbito de simulação de carregamentos humanos, visto que existem poucas referências na literatura que o utilizam. Dessa forma, cenários práticos de utilização da nova metodologia foram criados, a fim de detalhar ao máximo de que maneiras essa nova abordagem pode contribuir em análises dinâmicas para estruturas submetidas a tais tipos de carregamento.

Para isso, foram elaboradas análises paramétricas considerando a variação de parâmetros relevantes, os quais devem ser considerados para a criação da carga cíclica gerada pelo caminhar humano. Serão explicitadas correlações de modelos de carregamento determinísticos e probabilísticos, com dados de campanhas experimentais apresentadas por REZENDE *et al.* (2020). Estas análises são de suma importância, pois se tem a necessidade de demonstrar que método de PA é algo factível de ser considerado em dimensionamentos estruturais.

Por fim, um estudo considerando diferentes características de passarelas e diferentes níveis de variabilidade para carregamentos será apresentado, a partir de análises de performance, considerando o Estado Limite de Serviço (ELS) de cada estrutura. Para tal, foram considerados diferentes densidades de pedestres, três tipos de modelos de carregamento distintos e diferentes valores para frequência natural do primeiro modo de vibração e para taxa de amortecimento. No total, 162 cenários serão apresentados e analisados com base nas

diretrizes preconizadas pelo guia SÉTRA (2006) e a norma ISO 10137 (ISO, 2007). Adicionalmente, uma comparação entre as considerações dos documentos será apresentada.

1.1 Motivação

Passarelas são estruturas que possuem bastante importância no âmbito da criação de um fluxo de indivíduos em ambientes urbanos. Devido à necessidade de vencer obstáculos, como rios e estradas, por exemplo, tem-se a necessidade de criar métodos alternativos de movimentação que sejam eficazes no que diz respeito à custo, execução e manutenção de projeto. Passarelas em estrutura metálica acabam por ser a opção mais utilizada para esses casos.

Em contrapartida, tais tipos de estruturas acabam tendo a tendência de serem leves e pouco rígidas em relação a concepções convencionais em concreto armado, por exemplo. Isso tem como consequência casos de respostas dinâmicas acentuadas mais recorrentes, as quais devem ser observados com maior cuidado, já que tal característica inflige diretamente no bem-estar do usuário.

Na literatura, existem diversos casos de problemas de vibração registrados em passarela. ŽIVANOVIĆ (2005) afirma que um dos mais antigos registros destes problemas ocorreu em 1831 numa passarela em Broughton na Inglaterra, devido à marcha de militares. COSTA (2013) destaca ainda outros casos mais recentes, que geraram maior atenção técnica ao problema, entre eles a Solferino Bridge, na França em 1999, e a Millenium Bridge, na Inglaterra, em 2000, mostradas na Figura 1-1 e na Figura 1-2, respectivamente. Outros problemas de vibrações excessivas são relatados por DALLARD *et al.* (2001) e NAKAMURA & FUJINO (2002).



Figura 1-1: Solferino Bridge na França. Fonte: br.pinterest.com. Acesso em 01/12/2020



Figura 1-2: Millenium Bridge em Londres. Fonte: br.pinterest.com. Acesso em 01/12/2020

Segundo VIEIRA (2009), a forma de caminhar pode ser vista como uma atividade cíclica, periódica e que é composta por dois passos, na qual em cada ciclo são mantidas a média e a variância. Como cada indivíduo tem uma forma de caminhar única, ou seja, distinta entre indivíduos, pode-se considerar que as variáveis, que definem um modelo numérico, são aleatórias.

O caminhar do ser humano depende de diversos fatores que podem influenciar na resposta dinâmica de uma estrutura, podendo ser: o peso, o comprimento do passo, centro de gravidade, modo de pisar, tipo de calçado, velocidade, postura, fatores psicológicos etc. Por isso, com a realização desta pesquisa, buscou-se obter uma maneira simples e eficaz de simular todas essas nuances que estão presentes no caminhar de cada indivíduo.

As principais metodologias de simulação do caminhar apresentadas na literatura consistem no uso do modelo de força (MF) e modelo biodinâmico (MB) conforme descrito por PIMENTEL (1997), KERR (1998), SÉTRA (2006), TOSO *et al.* (2015) e VARELA *et al.* (2020), entre outros. Para o MF, os efeitos de pedestres são considerados por uma força móvel aplicada ao longo de uma estrutura rígida. Para o MB, o pedestre é considerado juntamente com a interação pessoa-estrutura (IPE), modelando o pedestre como um grau adicional de liberdade ao sistema estrutural, sendo representado por um modelo massa-mola-amortecedor. Tanto MF, quanto MB são geralmente usados em uma abordagem determinística, porém, nestes casos são gerados resultados não-representativos, pois as incertezas do caminhar não são consideradas.

Por outro lado, métodos probabilísticos são adequados para representar a incerteza no ciclo do caminhar, que é caracterizada como uma relação inter- e intrasujeito. De acordo com ZIVANOCIC *et al.* (2007), a variabilidade inter-sujeito é a diferença que existe entre os padrões de caminhada entre as pessoas. A variabilidade intrasujeito é o padrão natural irregular de uma pessoa durante a caminhada, resultante da incapacidade de manter o ritmo de passada constante ao longo do tempo.

Os estudos realizados por ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007) e KERR (1998) possuem, como exemplo, a aplicação de amostragens para cargas de multidão de pedestres. Nesses casos, cada indivíduo possuiria parâmetros de caminhada únicos que, ao longo do percurso sobre a estrutura, não sofreriam variabilidade. No entanto, este trabalho utilizou a premissa discutida pelos autores buscando variar ao longo do tempo as características, que definem o ciclo do caminhar como a frequência e comprimento do passo, ângulos de fase entre os harmônicos da força, coeficientes de amplificação dinâmica etc.

Ao passo que fatores cognitivos não possuem linearidade, abre-se margem a busca de maior entendimento em como simular tal realidade utilizando métodos numéricos práticos. Desta forma, o desenvolvimento desta pesquisa teve como objetivo estudar metodologias de variabilidade, contribuindo com o desenvolvimento de uma nova metodologia para representar as incertezas do caminhar humano.

1.1.1 Objetivo geral

O presente projeto tem como objetivo fornecer uma metodologia para projetos de passarelas, que simule o ciclo do caminhar de pedestres utilizando o método de PA, utilizando modelos de carregamento de força e biodinâmicos. Todas as análises foram realizadas buscando atender às condições de conforto humano, com base em guias de projeto internacionais e normas técnicas, comprovando a confiabilidade do método através de correlações com respostas dinâmicas experimentais.

1.1.2 Objetivo específico

A fim de atender o objetivo geral citado, foram traçados objetivos cruciais para validação do estudo deste projeto. Entre eles, tem-se:

- Estudar o caminhar humano buscando entender suas principais características biológicas, psicológicas e seus modelos de simulação;
- Entender como métodos estatísticos são utilizados para representar as incertezas no ciclo do caminhar humano;
- Compreender o comportamento de Modelos de Força e Biodinâmico ao considerarem o método de PA em seus cálculos;
- Validar o método de PA para modelagem de variabilidade intrasujeito considerando ciclo do caminhar de pedestres;
- Aplicar o método de PA em cenários de avaliação de conforto considerando ELS e compreender a sua influência em diferentes cenários

1.2 Escopo do trabalho

O conteúdo deste trabalho está organizado em cinco capítulos, apresentando o desenvolvimento da pesquisa em questão:

O Capítulo 1 é a presente introdução.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e revisão bibliográfica utilizadas neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia de pesquisa deste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As seções subsequentes referem-se ao embasamento teórico deste trabalho, apresentando deduções das Equações Gerais da Dinâmica, Método da Superposição Modal e dissertando acerca de Modelos Determinísticos e Probabilísticos para Simulação de Carregamento Humano, o Método de Passeio Aleatório, Critérios de Conforto e Análises de Estado Limite de Serviço considerando diretrizes internacionais para dimensionamento de passarelas.

2.1 Equação de Equilíbrio da Dinâmica

Segundo INMAN (2008), os fundamentos básicos e primordiais para a definição de aspectos da física e da dinâmica de uma partícula são seus vetores de deslocamento, velocidade e aceleração. Adicionalmente, as leis da física demonstram que o movimento de uma massa com velocidade variável é determinado pela força líquida atuante. Tal fato remete a comportamentos dinâmicos de vibração, os quais estão presentes na natureza das coisas e tem-se como consequência um relevante interesse em realizar estudos e análises referentes ao assunto.

Um dos objetivos das análises de vibração é permitir ter previsão da resposta ou movimento de um sistema, portanto, faz-se necessário calcular as soluções de equações que o governam. Dentre os sistemas estudados na literatura, o tipo massa-mola-amortecedor é o utilizado para representar modelos de carregamento humano, devido a isso, este foi utilizado ao longo de toda a pesquisa deste trabalho.

A Figura 2-1 apresenta um sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade, massa m , rigidez de mola k e coeficiente de amortecimento viscoso c , submetido a uma carga de excitação $f(t)$, simulando um modo de vibração de uma estrutura.

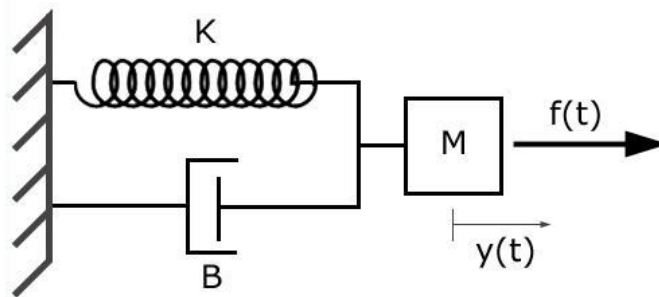


Figura 2-1: Sistema massa mola amortecedor para um grau de liberdade (Fonte: Autor)

Os sistemas de engenharia, no entanto, podem ser contínuos e serem convertidos em sistemas discretos com n graus de liberdade. A análise de um sistema com muitos graus de liberdade requer a solução de um conjunto de equações diferenciais ordinárias. A equação geral do movimento para o sistema pode ser deduzida da forma:

$$M\ddot{\vec{u}} + C\dot{\vec{u}} + K\vec{u} = F \quad (2-1)$$

Onde:

M = Matriz de massa;

K = Matriz de rigidez;

C = Matriz de amortecimento estrutural;

F = Vetor de forças externas;

\vec{u} = Vetor de deslocamento;

$\dot{\vec{u}}$ = Vetor de velocidade;

$\ddot{\vec{u}}$ = Vetor de aceleração.

2.2 Método da Superposição Modal

Para um sistema contínuo, existe um número infinito de modos naturais de vibração e frequências associadas. Para cada caso, entretanto, pode-se tomar apenas alguns desses

modos, os quais melhor possam representar a resposta da estrutura sob ação de um determinado carregamento dinâmico.

A resposta global é então buscada na forma resultante de uma superposição de um certo número j de modos de vibração. A Figura 2-2 ilustra este método da superposição modal para uma viga engastada e livre.

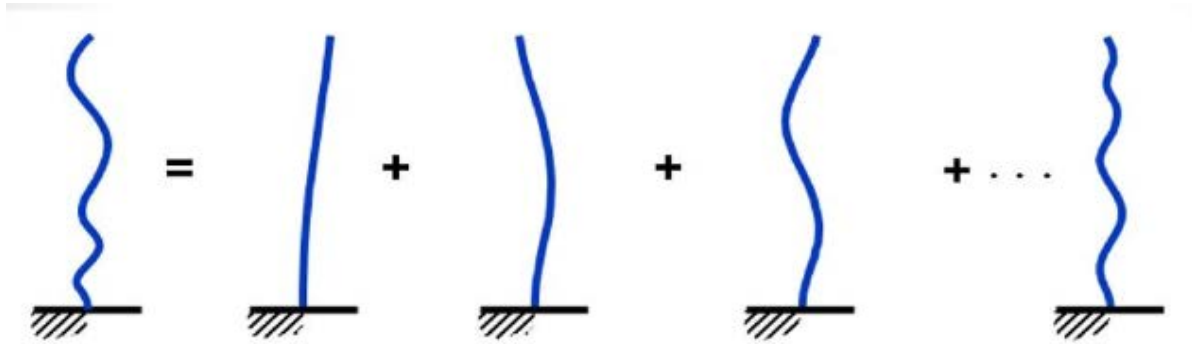


Figura 2-2: Ilustração do Método da Superposição Modal para um Viga engastada (Fonte: Notas de Aula, Mazzilli)

Para o caso contínuo unidimensional, pode-se escrever a resposta na forma de separação de variáveis conforme a equação (2-2).

$$Y(x, t) = \sum_{j=1}^{j \neq \infty} \phi_j(x) y_j(t) \quad (2-2)$$

Onde:

$\phi_j(x)$ São as formas modais, autovetores determinados no problema de vibração livre;

$y_j(t)$ Deslocamentos do modo j ao longo do tempo.

Considerando um modo j e outro n , distintos em torno da configuração deformada, num problema sem amortecimento, a substituição da equação (2-2) para estes dois modos na equação geral de equilíbrio da dinâmica fornece um problema de autovalor, cujos modos de vibração atendem à condição de ortogonalidade, enunciada na equação (2-3).

$$\int_0^L \phi_j(x) \phi_n(x) dx = 0 \quad (2-3)$$

Uma vez verificada esta condição de ortogonalidade, as equações desacoplam-se, podendo os modos serem tratados separadamente. O amortecimento é tomado como proporcional à massa e à rigidez, e com isso verifica-se a mesma condição de ortogonalidade nesta propriedade estrutural. Nestas condições, as expressões para a massa modal m_e , força modal F_e e a rigidez modal k_e adquirem a forma:

$$\begin{aligned} m_e &= \int_0^L m^o \phi^2(x) dx \\ F_e &= \int_0^L F(t) \phi(x) dx \\ k_e &= \int_0^L EI \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx \end{aligned} \quad (2-4)$$

Onde:

m^o é a massa por unidade de comprimento da estrutura;

$F(t)$ é a força dinâmica, variável no domínio do tempo;

L é o comprimento físico do sistema analisado;

E é o módulo de elasticidade do material;

I é o momento de Inércia da seção transversal

2.3 Método de Passeio Aleatório (*Random Walk*)

Segundo LANGTENGEN (1997), o Passeio Aleatório (PA) consiste em um método de modelagem baseado em cadeias de Markov sequenciadas por eventos independentes. O caminho de um PA é caracterizado por transições estocásticas e é comumente conhecido como “caminhar bêbado” (PEARSON, 1905), visto que não se possui previsibilidade como o modelo irá se comportar.

Ironicamente, apesar da proposta inicial do método, não é comum encontrar qualquer referência que utiliza algoritmos de PA simulando o ciclo do caminhar humano. Por outro lado, o PA é extensivamente usado para modelar o movimento estocástico de inúmeras

partículas em um determinado domínio. O desenvolvimento da literatura baseado no método de PA tem aplicações em muitas áreas de estudo relacionadas a processos aleatórios, ruídos aleatórios e equações estocásticas, como na descrição do movimento e do fluxo de animais e microrganismos (CODLING *et al.*, 2008), problemas de propagação de ondas (BUDAEV *et al.*, 2002), movimentos de partículas de ar (KRUIS *et al.*, 2012) entre outros. O movimento aleatório estocástico fornecido pelo PA é um comportamento microscópico simples que possibilita resultados médios similares de modelos de alta precisão, porém com uma abordagem muito mais simples e eficiente do que uma simulação microscópica direta ou molecular.

Em um domínio unidimensional, ao modelar uma partícula que se move em uma linha a partir da origem com N passos de mesmo tamanho (PEARSON, 1905), o movimento aleatório pode ser representado como uma variável binária S_i com um passo i que pode variar tanto para esquerda quanto para a direita, com uma probabilidade p de -1 e uma $q = 1 - p$ de S_i igual a 1 . Neste caso, o valor esperado e a variância para S_k pode ser expressa pelas equações (2-5) e (2-6) a seguir:

$$E[S_i] = p \cdot (-1) + q \cdot (1) = 1 - 2p \quad (2-5)$$

$$Var[S_i] = E[S_i^2] - E[S_i]^2 = 1 - (1 - 2p)^2 = 4p(1 - p) \quad (2-6)$$

Outro parâmetro importante no método de PA é a posição de partículas após um número k de passos. Considerando que o PA unidimensional possui passos de mesma grandeza de forma constante, a posição X_k relativa à posição-origem 0 da partícula no passo k pode ser determinado a partir da equação:

$$X_k = \sum_{i=1}^k S_i \quad (2-7)$$

Com X_k possuindo os valores e variância esperados, tem-se:

$$E[X_k] = \sum_{i=1}^k E[S_i] = i \cdot E[S_i] = i(1 - 2p) \quad (2-8)$$

$$Var[X_k] = \sum_{i=1}^k Var[S_i] = i4p(1-p) \quad (2-9)$$

Para diversos casos práticos, a probabilidade de uma partícula se deslocar para um sentido ou outro é sempre a mesma, em outras palavras, $p = q = 0,5$. Com isso, tem-se:

$$se \rightarrow p = q = 0,5 \begin{cases} E[X_k] = 0 \\ Var[X_k] = k \end{cases} \quad (2-10)$$

Portanto, o valor esperado da posição de partículas é $E[X_k] = 0$. Esta conclusão é simples, uma vez que se pode supor que uma partícula com chances iguais de ir para frente ou para trás é esperada, em média, ter o término de seu movimento na mesma posição de origem.

De forma similar, em casos em que $p = q = 0,5$, a variância da posição da partícula é proporcional ao número de passos $Var[X_k] = k$, oriundo da equação (2-9). Com isso, a variância $Var[X_k]$ da posição é aumentada com base no número de passos k , indicando que a partícula possui uma maior margem de possíveis posições devido ao aumento do número de passos.

Sendo $f_k(n)$ a função-densidade de probabilidade para um PA de k passos de mesma grandeza, começando a partir da origem 0 em um ponto n para casos em que $p = q = 0,5$. Se $k = 0$, nenhum passo será dado, portanto, a partícula possui uma probabilidade de 100% em finalizar o movimento na mesma localização de origem.

Se $k = 1$, um passo foi dado e a partícula possui uma probabilidade em 50% de finalizar seu movimento tanto para direita quanto para a esquerda, em relação a sua posição original, e as chances de se manter na origem são nulas. Seguindo esta lógica, a distribuição de probabilidade pode assumir os valores discretos $P_k(n)$ apresentados na Tabela 2-1, ao considerar uma série de valores onde $k = 0 \dots 5$.

Tabela 2-1: Valores de $P_k(n)$ para k passos variando de 0 (sem movimento) para 5

k passos	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
0						1					
1					1/2	0	1/2				
2				1/4	0	2/4	0	1/4			
3			1/8	0	3/8	0	3/8	0	1/8		
4		1/16	0	4/16	0	6/16	0	4/16	0	1/16	
5	1/32	0	5/32	0	10/32	0	10/32	0	5/32	0	1/32

Tabela 2-1 tem algumas propriedades interessantes e pode ser estendida para maior número de etapas. Na verdade, o padrão observado nas probabilidades de uma partícula para terminar em uma posição n é muito semelhante ao de um triângulo de Pascal com zeros intervinientes e multiplicado por um fator adicional de $1/2$. Os coeficientes da Tabela 2-1 podem ser obtidos pela seguinte fórmula:

$$P_k(n) = \frac{1}{2^k} \binom{k}{\frac{n+k}{2}} \quad (2-11)$$

Usando a Fórmula de Stirling, pode-se aproximar a equação (2-11) para a seguinte expressão:

$$P_k(n) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{2\pi k}} e^{-\frac{n^2}{2k}} \leftarrow \text{se } (k-n) \text{ for par} \\ 0 \leftarrow \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2-12)$$

A Figura 2-3 apresenta a equação (2-12) de forma gráfica. Pode-se notar que, um número maior de passos está relacionado ao aumento do número de possíveis posições nas quais a partícula pode se encontrar, o que significa uma maior variância $Var[X_k]$. Além disso, conforme mostrado na equação (2-11), o valor mais provável de se ocorrer é a própria origem do passeio, representado pelos picos das curvas, porém o aumento do número de passos reduz consideravelmente as chances da partícula terminar seu movimento na origem, começando

com 100% de chance para um $k = 0$ (veja Tabela 2-1) e chegando à margem de 8% de chance para $N = 100$ e menos que 5% para um $N = 300$.

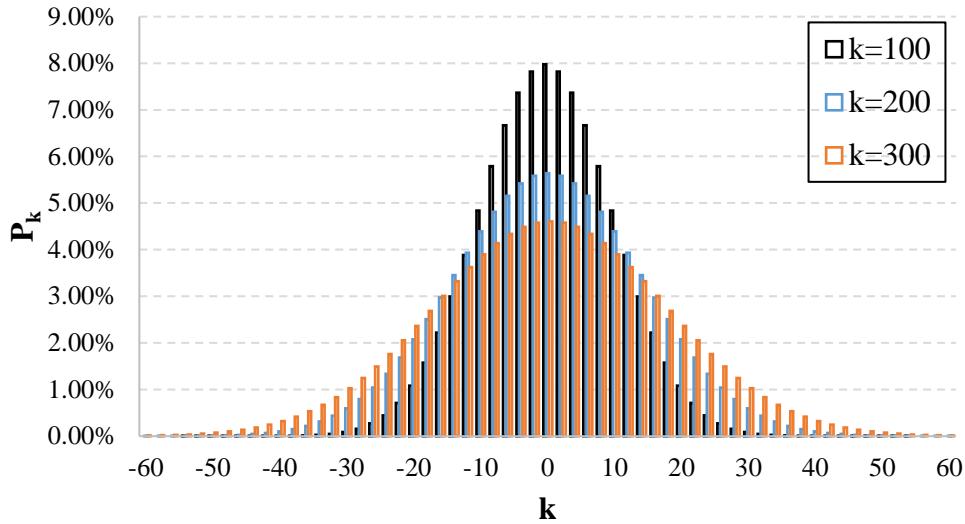


Figura 2-3. Gráfico de $P_k(n)$ para $k = 100, 200, 300$ (Fonte: Autor)

Com isso, a definição do valor esperado demonstra ter nenhuma influência no movimento do PA com $p = q = 0.5$, visto que tal característica sempre indica a origem como sendo o valor mais provável de ser obtido. Entretanto, a análise mais importante a ser feita se diz respeito ao quão distante espera-se que a partícula termine seu movimento, independente da direção. Tal conceito pode ser interpretado através de seu Valor Eficaz (VE), do inglês *Root Mean Square* (RMS), que é definido pela equação (2-13). Portanto, é possível concluir que a distância d esperada em relação a origem em um PA de k passos é \sqrt{k} .

$$d_{origem}^{VE} = \sqrt{k} \quad (2-13)$$

O tipo de PA descrito até agora demonstra uma variação numérica de forma discreta, ou seja, os passos obtidos para o passeio são representados por valores numéricos. Estes tipos de passeios não se correlacionam com eventos realísticos, por isso, tal abordagem pode ser utilizada considerando passos com valores aleatórios contínuos, os quais são regidos por uma distribuição normal. Este tipo de método é conhecido como Passeio Aleatório Gaussiano

(JANSSEN & van LEEUWAARDEN, 2007). Para este caso, o tamanho de um passo aleatório é dado por uma distribuição cumulativa normal $S_i \leftarrow DN(\mu_S, \sigma_S)$, onde $0 \leq S_i \leq 1$, μ_S é a média gaussiana e σ_S é seu desvio-padrão.

Se μ_S é diferente de zero, o PA irá variar sobre uma tendência linear e sendo X_0 o valor inicial do passeio, a posição esperada depois de k passos será $X_0 + k\mu_S$. Para o caso especial onde μ_S é igual a zero, depois de k passos, a distância de translação da distribuição de probabilidade é dada por $DN(0, k\sigma_S^2)$. Para as etapas distribuídas de acordo com qualquer distribuição, com zero de média e uma variância finita (não necessariamente apenas uma distribuição normal), o VE da distância da tradução depois de k passos é:

$$d_{origem}^{VE} = \sigma_S \sqrt{k} \quad (2-14)$$

2.4 Modelos para Simulação de Carregamento

Segundo PIMENTEL (1997), as atividades humanas de caminhar, correr, saltar e balançar lateralmente, em contato com a superfície, são os movimentos de interesse como fontes de excitação dinâmica nas passarelas. O caminhar e o correr humano obedecem a determinado ciclo devido ao próprio passo natural da pessoa. COSTA (2013) destaca os trabalhos de INMAN *et al.* (1981), que descreveram o movimento translacional do corpo ao caminhar, ilustrado na Figura 2-4.

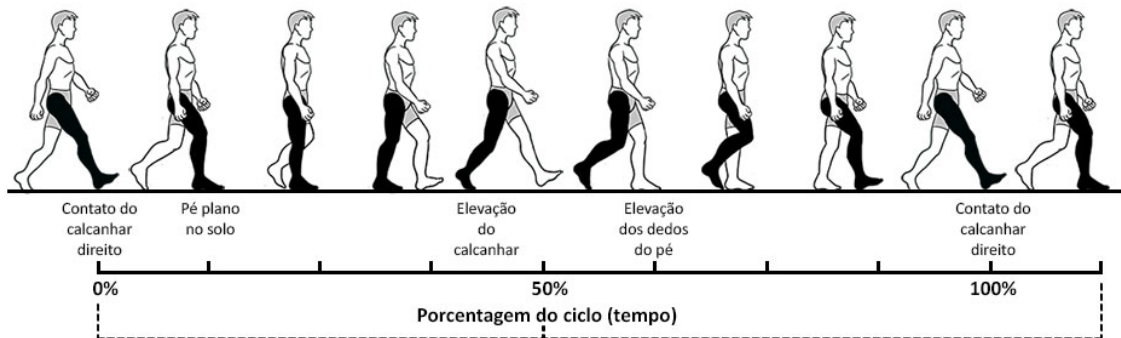


Figura 2-4: Ciclo de Marcha. Fonte: <https://www.pessemador.com.br>. Acesso em 11/12/2021.

Andar é a atividade mais comum considerada em projetos, uma vez que está relacionada ao uso normal de uma passarela. A relação entre a frequência do caminhar de pedestres e as

frequências naturais de uma estrutura é um parâmetro de dimensionamento fundamental, para determinar níveis de amplificação dinâmica (WILLFORD *et al.* 2007).

Com base em anos de pesquisas e análises, a ressonância de estruturas foi diferenciada para casos de baixas e elevadas frequências naturais. De modo geral, passarelas são estruturas criadas com o foco em receber cargas cíclicas de pedestres, que possuem uma margem de frequência de 1,6 a 2,4 Hz (SÉTRA, 2006). Como consequência, passarelas com baixas frequências são estruturas que devem passar por análises mais criteriosas, visto que possuem uma maior probabilidade de gerar ressonâncias com o caminhar. Tendo isso em vista, as próximas seções irão descrever os modelos de carregamento mais utilizados em simulações de carregamento humano: os modelos de força e biodinâmicos.

2.4.1 Simulações com Modelos de Força

Simulações que utilizam representações analíticas da força gerada por pedestres são umas das mais importantes. Segundo ŽIVANOVIĆ *et al.* (2005), o modelo mais comum de simulação do carregamento humano consiste no chamado modelo de força (MF), o qual consiste em uma força variável na posição e no tempo. Tal tipo de carga possui intensidade periódica, dada por uma Série de Fourier no domínio do tempo, mostrada na equação (2-15). A Figura 2-5 apresenta um exemplo de uma força cíclica gerada de forma determinística simulando o caminhar humano.

$$F(t) = G + \sum_{j=1}^n G\alpha_j \text{sen}(2j\pi f_p t - \phi_j) \quad (2-15)$$

Onde:

G é o peso de uma pessoa;

f_p é a frequência do passo;

α_j é o coeficiente do j -ésimo harmônico;

ϕ_j é a diferença de fase entre o j -ésimo e o primeiro harmônico;

t é o instante de tempo.

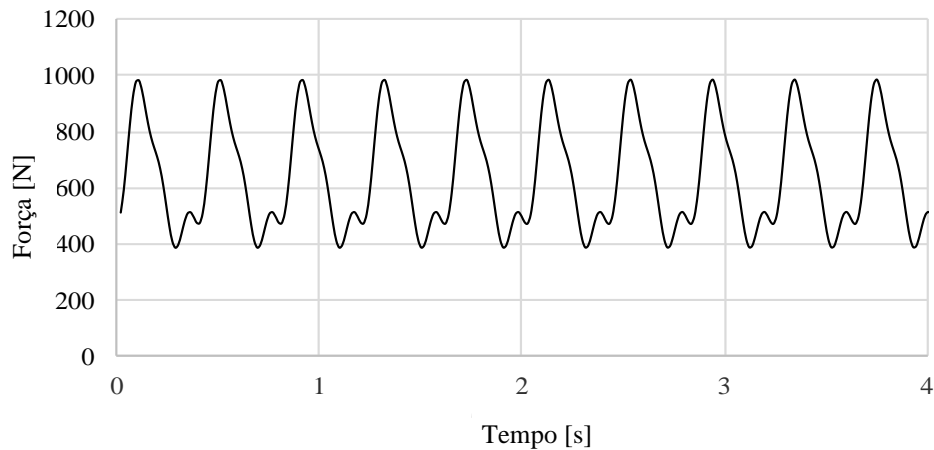


Figura 2-5: Exemplo de resposta de um MF com uma abordagem determinística (Fonte: Autor)

O parâmetro α_j , também conhecido como Fator de Amplificação Dinâmica (FAD), é bastante estudado e possui diversas publicações dedicadas à compreensão de sua influência do sobre a excitação de estruturas. BLANCHARD *et al.* (1977) publicaram um dos primeiros estudos a respeito do tema. A pesquisa propôs um modelo que descreve um único carregamento de pedestres como uma força senoidal, assumida como em ressonância em relação ao primeiro modo de vibração vertical da estrutura. BACHMANN & AMMANN (1987) relataram valores dos cinco primeiros harmônicos para a carga vertical, e diversos harmônicos e sub-harmônicos da força. RAINER *et al.* (1988) realizou um estudo projetado para fornecer medição e análise de força contínua devido a caminhada, corrida e salto de uma única pessoa. Foi confirmado que os FADs dependem fortemente da frequência do ciclo analisado.

Uma das pesquisas mais relevantes para as forças do caminhar foi realizada por KERR (1998). O autor coletou aproximadamente 1000 sinais de carga gerados por diversos passos de caminhada. Estes dados foram gerados a partir 40 indivíduos, enquanto caminhavam sobre uma placa de força. O trabalho criou atualmente um dos bancos de dados mais abrangentes sobre o carregamento de pedestres disponível na literatura. Como consequência, os resultados obtidos são comumente utilizados como base para desenvolvimentos de pesquisas sobre carregamentos humanos. Para o trabalho em questão não foi diferente, visto que o

desenvolvimento dos modelos aqui apresentados utilizou os dados de FAD obtidos por KERR (1998) conforme a Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Parâmetros da distribuição normal dos coeficientes obtidos por KERR (1998)

Harmônico	Coefficientes dos harmônicos α_j	Desvio Padrão [σ]
1°	$-0,2649f_p^3 + 1,3206f_p^2 - 1,7597f_p + 0,7613$	0,16
2°	0,07	0,03
3°	0,05	0,02

Considerando os ângulos de fase, sabe-se que este também deve ser obtido experimentalmente. Devido a isso, diversas pesquisas também atribuem diferentes valores dependendo da forma que as campanhas experimentais são abordadas. Para este trabalho, utilizou-se como base os dados obtidos por ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007). Os autores conduziram um estudo de modelos de força baseados na Série Fourier, considerando harmônicos e sub-harmônicos para cargas aleatórias de multidões.

Analisando os espectros gerados no âmbito da frequência, foi possível observar que os harmônicos entre a faixa de 0,25 a 5,25Hz tinham os ângulos de fase uniformemente distribuídos em uma faixa $[-\pi, +\pi]$. A Figura 2-6 mostra um exemplo de histograma obtido na criação da amostragem dos valores de ângulo de fase.

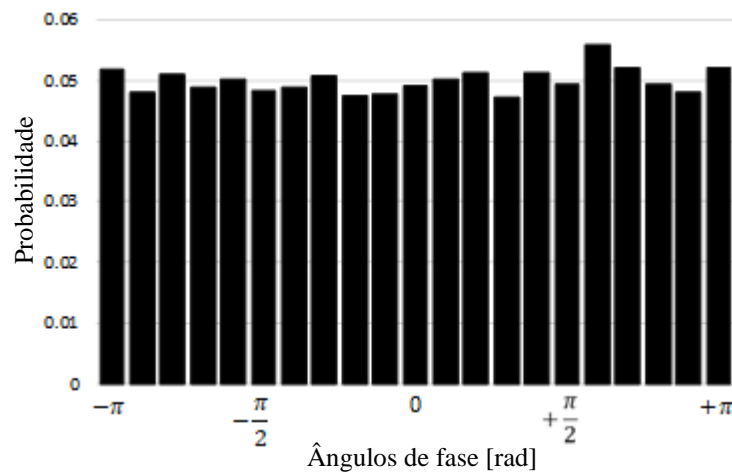


Figura 2-6: Histograma gerado através da distribuição uniforme dos ângulos de fase (Fonte: Autor)

2.4.2 Simulação com Modelo Biodinâmico

Outra abordagem para a simulação do carregamento humano em estruturas é por meio de modelos biodinâmicos (MB), nos quais as pessoas são representadas por sistemas massa-mola-amortecedor. Desta forma, pretende-se não só considerar as forças estáticas e dinâmicas provocadas pela pessoa, como também sua massa, seu amortecimento e sua rigidez, acoplados ao da estrutura.

COSTA (2013) afirma que em estruturas muito leves (como passarelas), onde a massa das pessoas não é desprezível frente à massa da estrutura, pode haver interação dinâmica entre as partes do sistema, cujas propriedades dinâmicas diferem da estrutura original. A interação pessoa-estrutura (IPE) ocorre estando o corpo humano parado (sentado ou em pé) ou em movimento (caminhando, correndo, pulando). Figura 2-7 ilustra um exemplo de modelos biodinâmicos com 1 grau de liberdade.

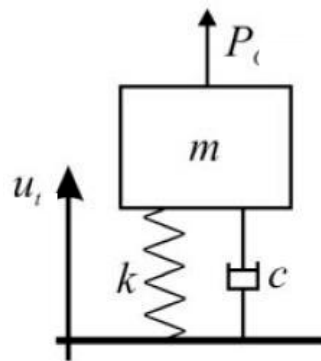


Figura 2-7: Modelos Biodinâmicos com um Grau de Liberdade. (Fonte: Autor)

SHAHABPOOR *et al.* (2016) definem a IPE como o efeito dinâmico, contínuo e mútuo o qual a pessoa impõe sobre a estrutura e, conseqüentemente, a estrutura impõe à pessoa. Segundo JONES *et al.* (2011), a IPE resulta em um novo sistema mecânico acoplado a partir da combinação entre as propriedades dinâmicas da estrutura e do corpo humano. Apesar de já conhecido o fenômeno da IPE, comprovado muitas vezes através de campanhas experimentais, ainda se tem pouco conhecimento de como ocorrem as alterações das propriedades dinâmicas da estrutura ocupada em relação à estrutura desocupada (GONZAGA, 2021).

Para este trabalho, dois MBs foram utilizados para as elaborações de simulações considerando a IPE. Um dos modelos foi proposto por TOSO (2016) que obteve parâmetros biodinâmicos seguindo a metodologia publicada por TOSO *et al.* (2015) com a ajuda de trinta e cinco pedestres. Cada indivíduo caminhou dez vezes sobre uma plataforma instrumentada que, através de tratamentos nos sinais de carga, obtiveram-se parâmetros biodinâmicos médios. Por meio de regressões, gerou-se as equações (2-16), (2-17) e (2-18) as quais definem a massa modal, amortecimento e rigidez modal de uma pessoa, respectivamente.

$$m(f_p, M) = -231,34 + 3,69M + 154,06f_p - 1,97Mf_p + 0,005M^2 - 15,25f_p^2 \quad (2-16)$$

$$c(M, m) = -1115,69 + 92,56M - 108,94m + 2,91Mm - 1,33M^2 - 1,30m^2 \quad (2-17)$$

$$k(M, f_p) = 75601,45 - 1295,32M - 33786,75f_p + 506,44Mf_p + 3,59M^2 + 539,39f_p^2 \quad (2-18)$$

Onde:

M é a massa da pessoa;

m é a massa modal da pessoa;

c é o coeficiente de amortecimento da pessoa;

k é o coeficiente de rigidez da pessoa;

f_p é a frequência do passo da pessoa.

O outro MB utilizado neste trabalho foi o proposto por COSTA (2019) e VARELA *et al.* (2020). Este é um modelo recente e desenvolvido por meio de uma campanha experimental conduzida com 53 pessoas, que caminharam sobre uma plataforma rígida. Os dados obtidos consistiam nas forças verticais geradas pelo caminhar sobre a plataforma e a aceleração oriunda do pulso de cada pessoa. O tratamento dos dados contribuíram para a definição das propriedades dinâmicas de pedestres conforme as equações (2-19), (2-20) e (2-21).

$$m_p(f_p, M) = 12,94 + 0,874M - 9,142f_p \quad (2-19)$$

$$k_p(m) = 360,3m - 1282,5 \quad (2-20)$$

$$\xi_p(f_a) = -20,818f_a + 87,513 \quad (2-21)$$

$$f_p^a = \sqrt{\frac{k_p}{m_p} (1 - \xi_p^2)} \quad (2-22)$$

Onde:

M é a massa da pessoa;

m_p é a massa modal da pessoa;

k_p é o coeficiente de rigidez da pessoa;

ξ_p é a taxa de amortecimento da pessoa;

f_p é a frequência do passo da pessoa;

f_a é a frequência natural amortecida

A frequência natural amortecida f_a e a taxa de amortecimento ξ_p da pessoa devem ser determinados iterativamente, visto que um parâmetro depende do outro. Além das definições de expressão para os parâmetros do pedestre (m , ξ_p e k), este modelo também fornece expressões para o comprimento de passo l_p , apresentado pela Equação (2-23), e os FADs para o primeiro e segundo harmônicos da força (α_1 e α_2), apresentados pelas Equações (2-24) e (2-25), respectivamente. Vale ressaltar que, as expressões destacam a dependência da altura H dos pedestres, tópico observado por KERR (1998) porém negligenciado por várias formulações de MBs.

$$l_p = -0,3853 + 0,553H + 0,107f_p \quad (2-23)$$

$$\alpha_1 = -1,20526 + 0,37794H + 0,4357f_p \quad (2-24)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0,065f_p & \leftarrow \text{se } f_p < 2 \text{ Hz} \\ 0,1958f_p - 0,3266 & \leftarrow \text{se } f_p \geq 2 \text{ Hz} \end{cases} \quad (2-25)$$

Onde:

H é a altura da pessoa

l_p é o comprimento do passo da pessoa;

α_1 é o FAD para o 1º harmônico da força;

α_2 é o FAD para o 2º harmônico da força.

2.5 Métodos Probabilísticos para Simulação de Carregamento

Sabe-se que o comportamento humano não possui características meramente analíticas e simples de serem quantificadas. De modo geral, é possível ter uma noção abrangente de como o indivíduo pode influenciar um sistema através de uma gama de dados empíricos. Considerando tais incertezas, a utilização de metodologias estatísticas acaba sendo a solução mais viável para representar processos que possuem características variáveis, como o próprio ciclo do caminhar humano. A estruturação de uma abordagem probabilística é mais bem utilizada quando se tem correlações com a realidade, pois se torna possível realizar comparações e análises em prol do refinamento de um modelo numérico desejado.

SAMPAIO *et al.* (2008) decorrem a respeito da definição do procedimento de pesquisas científicas experimental-teórica, as quais procuram definir parâmetros comportamentais do ser humano. Segundo os autores, o objetivo principal de um experimento é estabelecer relações de causa entre eventos, ou seja, variáveis. Tais aspectos abrangem como exemplo o tipo de sexo de uma pessoa, que pode ser definido por masculino e feminino (duas variáveis). A partir desse princípio, avalia-se maneiras de delinear um evento podendo ser entre grupos (inter-sujeito) ou por uma única pessoa (intrasujeito).

Para avaliações inter-sujeitos, os efeitos de uma condição experimental são avaliados pela comparação entre diferentes grupos de indivíduos submetidos a diversas condições. Já para casos intrasujeito, a abordagem experimental é baseada no estudo do comportamento humano, que é bem específico ao indivíduo, tendo uma interação única com seu entorno.

Tais conceitos de variabilidade são objetos de estudo bastante relevantes quando busca-se compreender, de forma teórica, o comportamento de uma estrutura sob a atuação de um

carregamento humano. A IPE torna-se um desafio maior de engenharia pelo fato de os indivíduos terem características inter- e intrasujeito bastante diversificadas.

Embora análises de variabilidade e de incerteza sejam bem desenvolvidas no âmbito da dinâmica de estruturas, como em cargas de vento, ondas e terremotos, nota-se que abordagens probabilísticas possuem um histórico bem recente de estudos sobre a interação dinâmica entre carregamento e estrutura (RACIC *et al.*, 2009). A principal razão para isso é a complexidade da carga induzida pelo ser humano, acompanhado pela necessidade de tecnologia de ponta que forneça registros realistas ao longo de um período e ainda considerando uma ampla gama de casos de carregamento. Felizmente, este cenário vem mudando ao longo dos últimos anos, visto que diversas pesquisas foram e vem sendo realizadas através de campanhas de ensaios experimentais robustas, que fornecem dados pertinentes e que permitem a elaboração de cenários probabilísticos correlatos com a realidade.

Levando em consideração características inter-sujeitos, muitos estudos fornecem uma visão geral das funções de densidade de probabilidade (valor médio e desvio padrão) dos parâmetros de projeto relacionados ao carregamento de pedestres, como frequência de passo, velocidade de caminhada, comprimento de passo e amplitude de força.

MATSUMOTO *et al.* (1972) foram os primeiros a relatar estatísticas confiáveis de frequências de passos com base em uma amostra de 505 pessoas andando com velocidades arbitrárias. Os dados coletados mostram uma distribuição normal com uma taxa média de f_p em 1,99 Hz e desvio padrão de 0,173 Hz. ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007) mensuraram 1976 pedestres caminhando sobre a passarela Podgorica, em Montenegro, adquirindo funções de probabilidade para o ritmo do caminhar identificando um valor médio de 1,87 Hz e desvio-padrão de 0,186 Hz. Nota-se que estes valores se diferem daqueles obtidos por MATSUMOTO *et al.* (1972), porém estão bem próximos aos dados fornecidos por outros pesquisadores: 1,90 Hz mensurado por KERR & BISHOP (2001); 1,82 Hz mensurado por KASPERSKI & SAHNACI (2007); 1,80 Hz mensurado por PACHI & JI (2005).

PEDERSEN & FRIER (2010) avaliaram o efeito da modelagem probabilística dos parâmetros que descrevem cargas de caminhada: frequência de passo (f_p), comprimento do passo (l_p), Fatores de Amplificação Dinâmica (FAD) e peso (P) de pedestres. Uma revisão da literatura revelou uma variedade de distribuições de probabilidade através das quais os

parâmetros de caminhada podem ser modelados, e estes foram usados para explorar a sensibilidade em percentis de 50, 75 e 95 da aceleração de média. A Figura 2-8 mostra que a frequência do caminhar possui influência considerável na amplificação dinâmica de estruturas com frequências naturais na margem de 1,6 a 2,4 Hz, visto que remetem à possibilidade de ressonância com o carregamento humano.

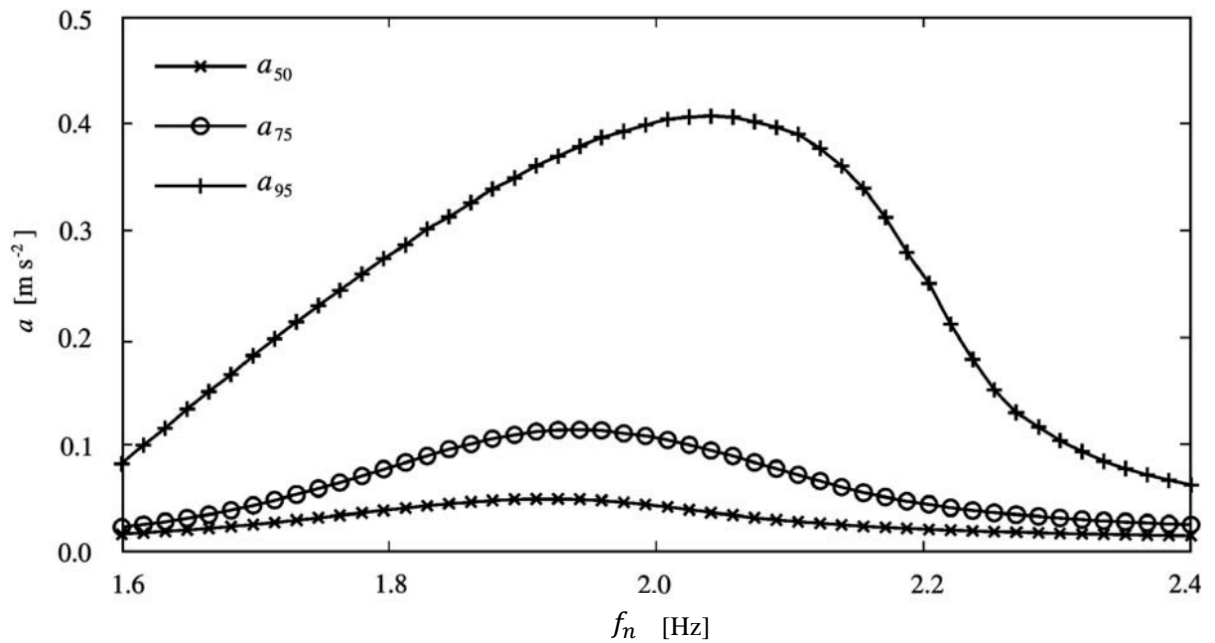


Figura 2-8: Percentis 50, 75 e 95 de acelerações máximas em função da frequência natural f_n da estrutura (Fonte: PEDERSEN & FRIER (2010) – Adaptado)

Entretanto os FADs, o peso de pedestres e o comprimento do passo têm uma influência desprezível em relação à resposta dinâmica. A Tabela 2-3 apresenta os valores médios μ_{f_p} para frequências de passo e seus respectivos desvios-padrão σ_{f_p} obtidos por diversos pesquisadores e que foram utilizados nas análises de sensibilidade.

Tabela 2-3 Exemplos de valores médios e desvio-padrão para frequências de passo obtidos por diferentes pesquisadores (PEDERSEN & FRIER, 2010 - Adaptado)

Referência	μ_{f_p} (Hz)	σ_{f_p} (Hz)	Amostras
MATSUMOTO <i>et al.</i> (1972)	1,99	0,173	505
SCHULTZE (1980)	2,00	0,13	.*
KRAMER <i>et al.</i> (1979)	2,20	0,3	.*
ŽIVANOVIĆ <i>et al.</i> (2007)	1,87	0,186	1976
KERR (1998)	1,90	.*	40
KASPERSKI & SAHNACI (2007)	1,82	0,12	250

*Os autores não identificaram o referido dado

Outras formas de se obter a resposta dinâmica de estruturas sobre ação de cargas probabilísticas se faz por meio de análises espectrais, em outras palavras, no âmbito da frequência. Como a carga gerada pelo caminhar possui comportamento cíclico, a força aplicada por um grupo de pedestres pode ser avaliada de uma forma modal.

PICCARDO & TURBINO (2012) introduziram um modelo espectral equivalente para a análise da resposta dinâmica de passarelas, utilizando uma representação probabilística dos pedestres. Os autores forneceram expressões simples para a avaliação das respostas dinâmicas máximas para uso em análises de vibração, de forma similar aos procedimentos clássicos adotados para dimensionamento de torres eólica.

KRENK (2012) analisou o efeito da variação de frequências do caminhar representando a carga de pedestres através de uma densidade espectral. Esta foi definida em termos de uma frequência de pico e um parâmetro, o qual descreve a frequência relativa de um grupo de pedestres. Com isso, o autor introduziu expressões simplificadas para o desvio padrão da resposta dinâmica para sistemas de grau único de liberdade a excitações ressonantes e não-ressonantes.

NIMMEN *et al.* (2020) realizaram estudos para desenvolvimento, verificação e validações desses modelos probabilísticos que consideram diversos harmônicos na força aplicada por um carregamento humano, contribuindo com uma vasta revisão bibliográfica sobre o assunto.

De forma geral, os modelos de carregamento propostos e analisados pelos autores supracitados aplicam conceitos de variabilidade inter-sujeito, remetendo a uma modelagem que influencia somente os parâmetros de entrada que definem o ciclo do caminhar, os quais não possuem variação até o fim de uma simulação. Contudo, sabe-se que pedestres são incapazes de manter um ciclo de caminhar perfeito ao longo de uma trajetória já que fatores físicos, biomecânicos e até psicológicos podem influenciar diretamente o processo. Ao contrário da variabilidade inter-sujeito, a variabilidade intrasujeito tem sido muitas vezes negligenciada, pois seu impacto nos níveis de amplificação dinâmica foi tradicionalmente considerado insignificante (GARCÍA-DIÉGUEZ *et al.*, 2021).

Vale ressaltar que já existiam estudos no âmbito da biomecânica relevantes que buscavam definir, de forma analítica, a variação do passo dos indivíduos tendo como base dados obtidos em campanhas de ensaios experimentais. YAMASAKI *et al.* (1991) foram um dos primeiros a relatar como a variabilidade de um passo se comporta dependendo da velocidade do caminhar. Os pesquisadores concluíram que a variação no passo é mínima para velocidades arbitrárias de caminhada sobre esteiras. O mesmo resultado foi confirmado anos depois por SEKIYA *et al.* (1997), que estudaram a caminhada feita sobre uma laje.

Com o tempo, a variabilidade intrasujeito foi sendo implementada no âmbito da dinâmica estrutural. BROWNJOHN *et al.* (2004) mediram a força de caminhada contínua gerada em uma esteira por três voluntários caminhando em uma velocidade arbitrária. Os resultados apontaram que o coeficiente de variação da frequência do passo é de cerca de 3%. SAHNACI & KASPERSKI (2011) buscaram recriar o sinal de força do caminhar através de uma abordagem polinomial usando dados experimentais, mostrando resultados que indicam o pé direito como o mais suscetível a aplicar força de maior magnitude sobre uma estrutura. A Figura 2-9 apresenta o sinal teórico obtido a partir da base de dados de sinais de força aferidos.

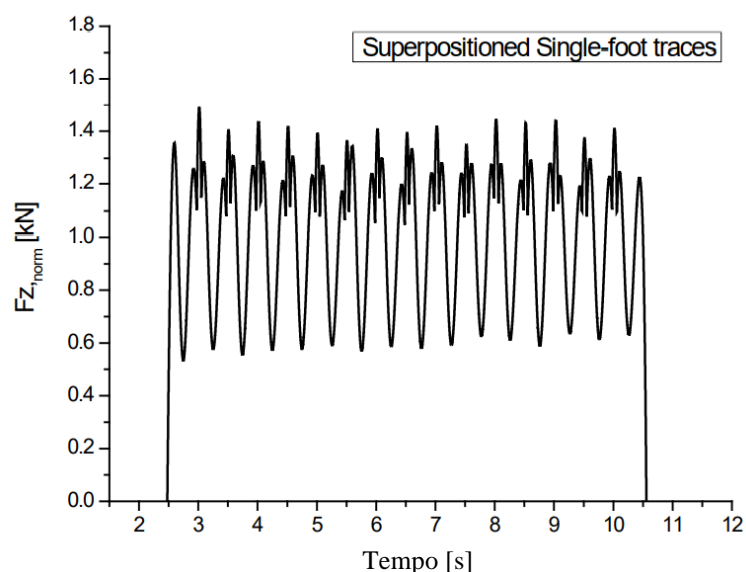


Figura 2-9: Modelo polinomial obtido através da superposição com dados experimentais de impactos do passo (Fonte: SAHNACI & KASPERSKI (2011) – Adaptado)

KAPERSKI (2017) realizou um estudo sobre como um indivíduo ajusta os seus parâmetros de caminhada, com base na velocidade do caminhar da pessoa imediatamente a frente. De forma parecida, BOCIAN *et al.* (2018) também tratou a variabilidade intrasujeito, com foco na sincronização de multidões e no comportamento do grupo de pedestres afetados por fatores sociais e psicológicos. NIMMEN *et al.* (2017) apresenta um estudo paramétrico a respeito das influências da IPE para sistemas não-acoplados e acoplados, levando em consideração diferentes cenários de carregamento com variabilidades inter- e/ou intrasujeito. MUHAMMAD & REYNOLDS (2020) desenvolveram um modelo de carregamento considerando ambas as variabilidades inter- e intrasujeito, com base em um banco de dados da magnitude de forças aplicadas por pedestres, replicando suas características temporais e espectrais. REZENDE *et al.* (2021) demonstrou o impacto da variabilidade inter e intrasujeito na eficiência de atenuadores através de simulações envolvendo densidades de pedestres de até 0,5 pedestre/m².

Levando em consideração os estudos citados, infere-se que a modelagem probabilística de carregamentos humanos vem em uma crescente evolução no embasamento teórico-experimental. Além disso, nota-se que o ciclo do caminhar pode ser reproduzido de diferentes maneiras, o que pode exigir menor ou maior esforço computacional, dependendo das

circunstâncias. Isto deve ser sempre analisado criteriosamente, atentando-se ao nível de precisão desejado para os resultados e aos recursos disponíveis para a execução das análises.

Adicionalmente, não é difícil perceber a aleatoriedade no processo de caminhada humana. Como consequência, a representação determinística deste processo requer suposições conservadoras ou até altos fatores segurança. Por esta razão, a abordagem probabilística torna-se uma ferramenta relevante na aplicação da variabilidade no ciclo do caminhar, gerando a possibilidade de respostas correlatas à realidade.

2.6 Guias para Análise do Estado Limite de Serviço de Passarelas

Segundo ŽIVANOVIĆ *et al.* (2005), para verificar o Estado Limite de Serviço (ELS) de uma passarela, basicamente são necessários os seguintes itens: um modelo de carregamento que represente a força induzida pelo homem, as propriedades dinâmicas da passarela e a definição do nível de tolerância da percepção das amplificações dinâmicas.

Para auxiliar na estruturação de uma análise de serviço, guias e normas foram criadas com base em estudos robustos presentes na literatura e estão em constante evolução, buscando fornecer meios de avaliação mais simples e precisos. A grande maioria dos procedimentos disponíveis abordam as respostas dinâmicas no âmbito do tempo ou no âmbito da frequência, contribuindo na determinação do pico da aceleração padrão ou através de uma média quadrática (*RMS*).

Para este trabalho, dois documentos foram utilizados para nortear as Análises de Estado de Serviço discutidas na Seção 4.4, sendo eles: o guia SÉTRA (2006) e a norma ISO 10137 (ISO, 2007). A seguir, estes serão apresentados considerando as informações que foram fundamentais para o desenvolvimento das análises de resultados.

2.6.1 Guia SÉTRA

As recomendações do guia SÉTRA (2006) para avaliações do ELS de passarelas é feito com base no conforto dos pedestres. Segundo o guia, os níveis de conforto para acelerações verticais, que são escopo deste projeto, podem ser definidos como máximo, mediano e mínimo em função da amplitude de aceleração sofrida pela estrutura, conforme a Tabela 2-4.

Tabela 2-4: Faixas de conforto com base nas amplitudes de aceleração segundo guia SÉTRA (2006)

Nível de Conforto	Amplitude de Aceleração [m/s ²]
Máximo	0 - 0,5
Mediano	0,5 - 1,0
Mínimo	1,0 - 2,5

O guia também estabelece níveis de risco de ressonância em função de faixas de frequências naturais. As estruturas cujas frequências estejam próximas das frequências típicas do caminhar humano (entre 1,7 e 2,1 Hz) estão no nível de risco máximo, como mostra a Tabela 2-5.

Tabela 2-5: Faixas para risco de ressonância para 1º modo de vibração vertical segundo o guia SÉTRA

Frequência (Hz)	0	1	1,7	2,1	2,6	5
Máximo						
Médio						
Mínimo						
Desprezível						

O guia SÉTRA (2006) divide as passarelas de pedestres em quatro classes:

- Classe I: Passarela urbana que liga áreas com intenso fluxo de pedestres, próximas de estações de modais de transporte, ou que são frequentemente usadas por multidões densas;
- Classe II: Passarela urbana que interliga áreas populosas, sujeitos ao tráfego intenso, e que podem ocasionalmente serem carregadas por toda sua pista de rolamento;
- Classe III: Passarela de uso padrão, que podem ocasionalmente serem atravessadas por um grande grupo de pessoas, mas que nunca serão carregadas ao longo de toda sua pista de rolamento;
- Classe IV: Passarela de uso escasso, construídas para interligar áreas pouco populosas.

A densidade de pedestres (d) é função da classe da passarela e do risco de a passarela apresentar ressonância. As densidades de pedestres a serem usadas são definidas conforme a Tabela 2-6.

Tabela 2-6: Densidade de pedestres segundo o guia SÉTRA

Classe	Multidão [pedestres/m ²]
III	0 - 0,5
II	0,5 - 1,0
I	1,0 - 2,5

A força gerada pelo primeiro harmônico para uma carga de multidão na direção vertical é dada pela equação (2-26). A Figura 2-10 apresenta um gráfico que fornece o fator para risco de ressonância ψ em casos que a estrutura possui frequência natural próxima a do caminhar. Caso a estrutura, possua um valor de frequência entre 1,7 e 2,1, as chances de a estrutura entrar em ressonância são bem altas, obtendo-se um fator máximo de 1,0.

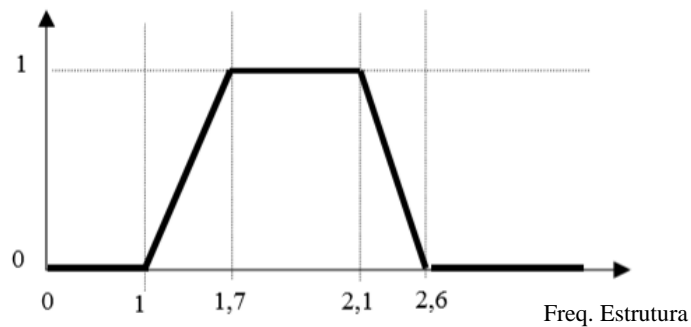


Figura 2-10: Fator ψ em casos de caminhar para direção vertical (Fonte: SÉTRA (2006) – Adaptado)

$$Fv(t) = d(280 N) \cos(2\pi f_v t) 10,8 \left(\sqrt{\frac{\xi}{n}} \right) \psi \quad (2-26)$$

Onde,

d é a densidade de pedestres (pedestres/m²);

f é a frequência natural do carregamento;

ψ é o fator de risco de ressonância,

ξ é a taxa de amortecimento da estrutura;

n é o número de pedestres, calculado por

$$n = dA = dLw \quad (2-27)$$

Onde,

A é a área da pista de rolamento da passarela;

L é o vão da passarela;

w é a largura da passarela.

2.6.2 Norma ISO 10137

A norma ISO 10137 apresenta em seu conteúdo recomendações para avaliações do ELS de estruturas sobre ação de cargas dinâmicas considerando edificações e passarelas que façam a ligação entre duas regiões internas ou externas (ISO, 2007). No que diz respeito às passarelas, escopo deste trabalho, a norma recomenda a avaliação de serviço para os seguintes casos de carregamento:

- Uma pessoa caminhando sobre a passarela, com outra parada no meio do vão-livre;
- Um grupo de 8 a 15 pessoas, considerando um fluxo médio de pedestre presente no dia a dia de usabilidade da estrutura;
- Fluxos intensos de pedestres bem acima de 15 pessoas;
- Casos festivos, se aplicável.

As análises de serviço preconizadas pela ISO 10137 consideram a média quadrática (RMS) da aceleração gerada pela estrutura no âmbito do tempo. O método e os fatores necessários para determinar a aceleração-RMS são discutidas na norma ISO 2631 (ISO, 2007).

A ISO 10137 recomenda uma metodologia para se obter um valor de aceleração máxima, o qual não pode ser excedido durante as análises de vibração. O método consiste na utilização do ábaco apresentado na Figura 2-11 que, a partir da frequência natural f_n da estrutura, obtém-se a aceleração-RMS máxima na direção vertical multiplicando, por um fator de 60, o valor do eixo Y correspondente a f_n .

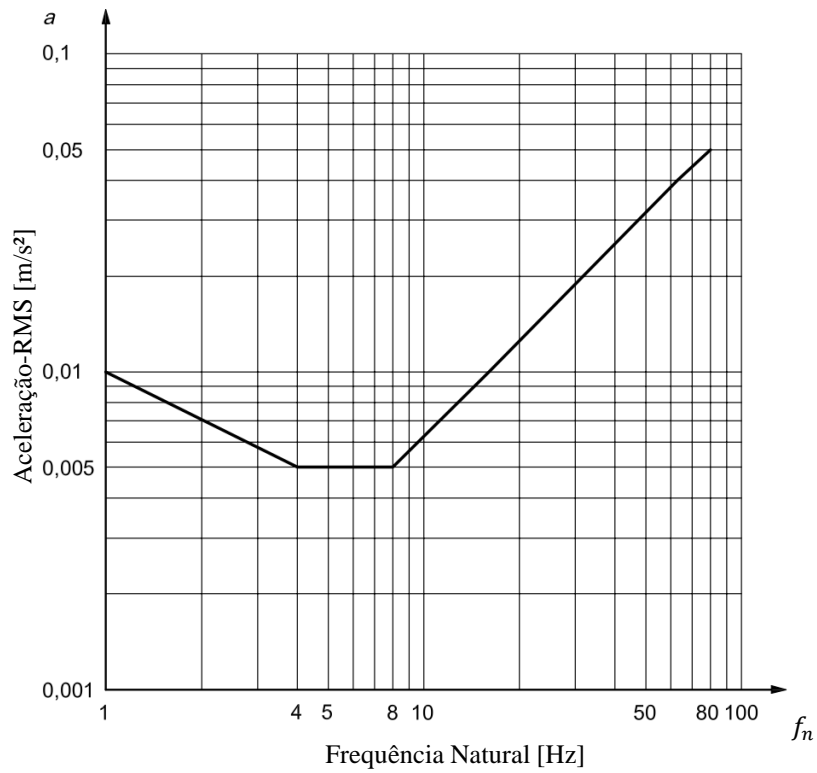


Figura 2-11: Ábaco para análise de aceleração máxima de vibração vertical para edificações
(Fonte: ISO (2007) – Adaptado)

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho, aborda a criação e a análise de simulações de pedestres, tomou como base pesquisas e estudos que foram feitos por REZENDE *et. al* (2017) e REZENDE *et. al* (2020) e BRUNET *et al.* (2022). Campanhas de ensaios experimentais foram realizadas em uma passarela situada no Rio de Janeiro e, através do tratamento dos dados obtidos, foi possível calibrar um modelo numérico da estrutura. Com isso, as simulações subsequentes teriam uma base de validação, a qual forneceria confiabilidade nos modelos de carregamento a serem gerados.

REZENDE *et al.* (2017) realizou uma comparação entre os modelos de carregamento em Série de Fourier e Biodinâmico através da criação de um algoritmo, que utiliza uma abordagem determinística. Isto quer dizer que a metodologia utiliza parâmetros que não variam entre os pedestres e nem ao longo do tempo. Neste trabalho, as simulações consideram abordagens estocásticas que utilizam os trabalhos de KERR (1998) e ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007) como referência e uma nova forma de simulação da variabilidade intrasujeito utilizando o método de PA (Seção 2.3) é introduzida. Para tal, análises paramétricas foram realizadas considerando diferentes situações de carregamento e ambos MF e MB discutidos na Seção 2.4. Os dados experimentais obtidos por REZENDE *et al.* (2020) foram utilizados para realizar a calibração do modelo numérico com a nova metodologia. Por fim, uma análise de performance considerando diferentes características estruturais foi realizada para demonstrar, de forma prática, a utilização dos métodos de variabilidade, em especial a influência do método de PA nos resultados.

A eficiência de métodos estatísticos é notável pelo fato de ser possível gerar uma quantidade massiva de dados, que podem ser controlados e extremamente úteis para simular o comportamento de um pedestre, mesmo este tendo um alto nível de variação nos parâmetros que o definem. Portanto, nas seções subsequentes serão apresentadas as características da estrutura utilizada para a pesquisa, as campanhas de ensaios experimentais realizadas e a metodologia de implementação de variabilidade nos modelos de carregamento utilizados.

3.1 Estrutura Analisada

Neste trabalho, os resultados obtidos com o modelo numérico foram comparados com os sinais experimentais de uma estrutura real: uma passarela de pedestres de grande vão localizada no Rio de Janeiro. Além disso, o modelo plano utilizado neste projeto teve suas propriedades dinâmicas (frequências naturais, massa modais e autovetores) extraídas de um modelo tridimensional em elementos finitos da estrutura real, que foi calibrado anteriormente com os resultados experimentais obtidos por REZENDE *et al.* (2020).

A passarela analisada possui dois vãos, um de 68,5m e outro de 17,7m, dos quais somente o mais longo foi instrumentado e modelado por ser o mais flexível e o mais problemático, em termos de vibração. A passarela possui seus elementos de vigas, pilares e contraventamentos em perfis metálicos. A laje é pré-moldada de concreto armado, composta de placa superior e enrijecedores apoiada sobre as transversinas, como mostra a Figura 3-1. O teto da passarela é de telha de amianto. A Figura 3-2 apresenta uma foto geral da passarela.



Figura 3-1: Detalhe da laje pré-moldada apoiada nas transversinas (Fonte: REZENDE, 2017)



Figura 3-2: Passarela instrumentada (Fonte: BRUNET *et al.*, 2021)

A estrutura do vão de 68,5m tem sua geometria e perfis de seção transversal espelhados em relação ao meio do vão. A Figura 3-3 apresenta um croqui de metade do vão ensaiado (vão mais longo), especificando os perfis das seções transversais de cada elemento.

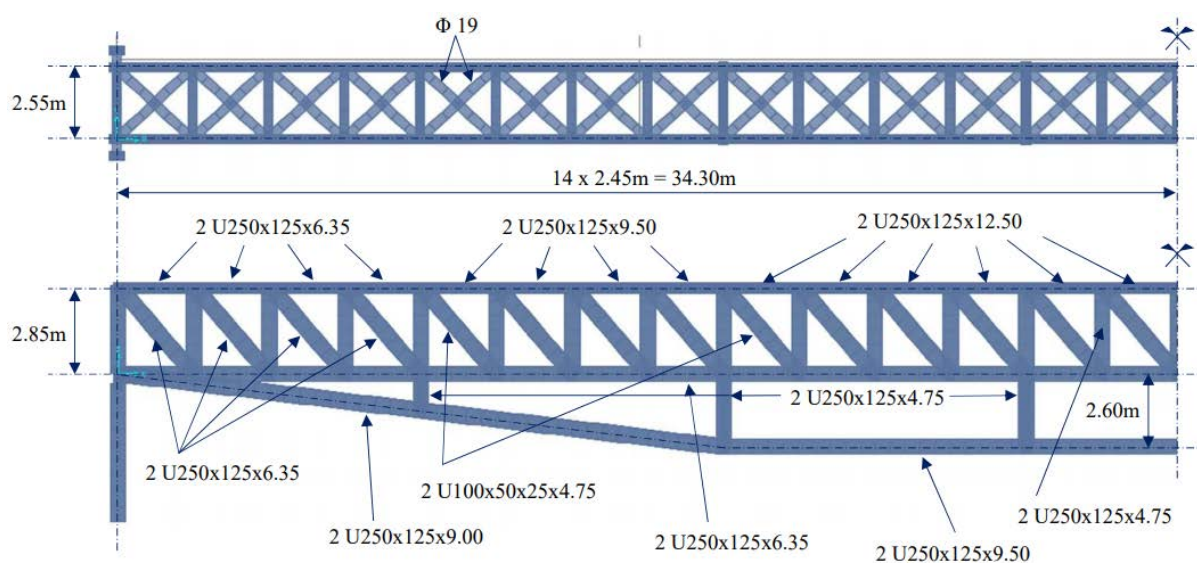


Figura 3-3: Croqui especificando os perfis de cada elemento de barra (Fonte: BRUNET *et al.* 2021)

3.2 Campanha de ensaios experimentais

REZENDE *et al.* (2020) realizaram testes de vibração livre e forçada sobre a passarela. Toda a campanha experimental foi registrada por um sistema de aquisição de dados (modelo ADS2000; Lync Ltd, Brasil) conectado a dois acelerômetros, que foram fixados no meio e a um quarto do vão. Os testes de vibração livre foram realizados com a aplicação de impactos impulsivos com o calcanhar na laje da passarela.

Uma Transformada Rápida de Fourier (TRF) foi aplicada no sinal de aceleração obtido e este processo resultou nas frequências naturais para o primeiro e segundo modos de vibração vertical, de acordo com a Figura 3-4. As correspondentes taxas de amortecimento apresentadas na Figura 3-4 foram obtidas após a aplicação de uma técnica de decremento logarítmico sobre sinais filtrados. Os resultados estão de acordo com os valores típicos da taxa de amortecimento para passarela de aço (BACHMANN & AMMANN, 1987 e HEINEMEYER *et al.*, 2009).

O espectro obtido a partir dos testes de vibração livre é apresentado na Figura 3-4. A frequência natural para o primeiro modo de vibração é de 1,85 Hz, visto que o maior pico de energia no sinal ocorreu nesta faixa. Este valor se encontra dentro do intervalo de frequências típicas do ciclo de caminhar humano, sendo este entre 1,6 Hz e 2,4 Hz de acordo com SÉTRA (2006).

Portanto, dada a proximidade da frequência natural do primeiro modo de vibração às frequências típicas de caminhada de pedestres, a passarela analisada é muito suscetível a problemas de vibração. Isso foi confirmado durante a campanha experimental observando o desconforto dos pedestres ao atravessar a passarela devido às vibrações excessivas (REZENDE *et al.* 2020).

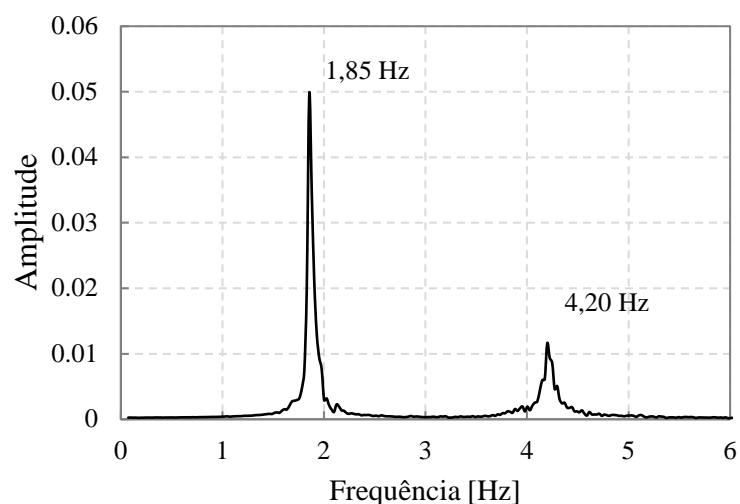


Figura 3-4: Espectro de direção vertical obtido pelos testes de vibração livre (Fonte: Autor)

Testes de vibração forçada com um e seis pedestres caminhando a 1,85 Hz, com a ajuda de um metrônomo, também foram realizados a fim de excitar o primeiro modo de vibração vertical da estrutura. A Figura 3-5 e a Figura 3-7 apresentam os sinais experimentais obtidos a partir de um acelerômetro posicionado no meio do vão, e a Figura 3-6 e a Figura 3-8 apresentam os espectros para cada um deles, respectivamente. É importante ressaltar que, devido à dificuldade em sincronizar os passos de várias pessoas caminhando juntas, a excitação da estrutura não ocorre de forma homogênea. O pico em 1,85 Hz representa a alta energia dessa frequência e sua predominância na resposta dinâmica.

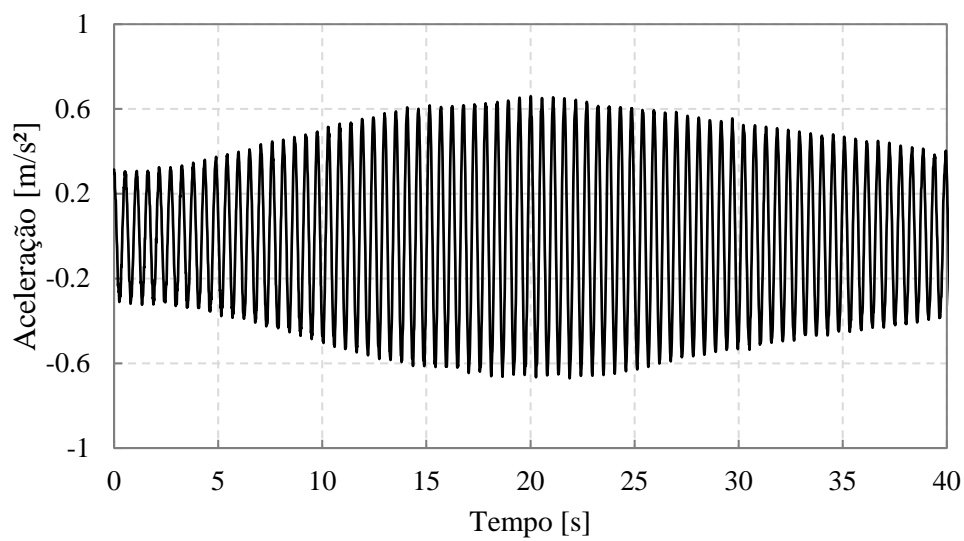


Figura 3-5: Resposta para um pedestre andando em ressonância considerando o domínio do tempo (Fonte: Autor)

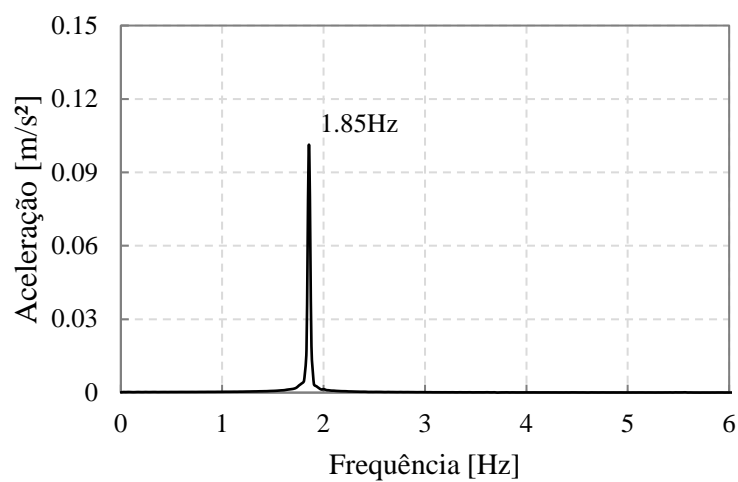


Figura 3-6: Resposta para um pedestre andando em ressonância considerando o domínio da frequência (Fonte: Autor)

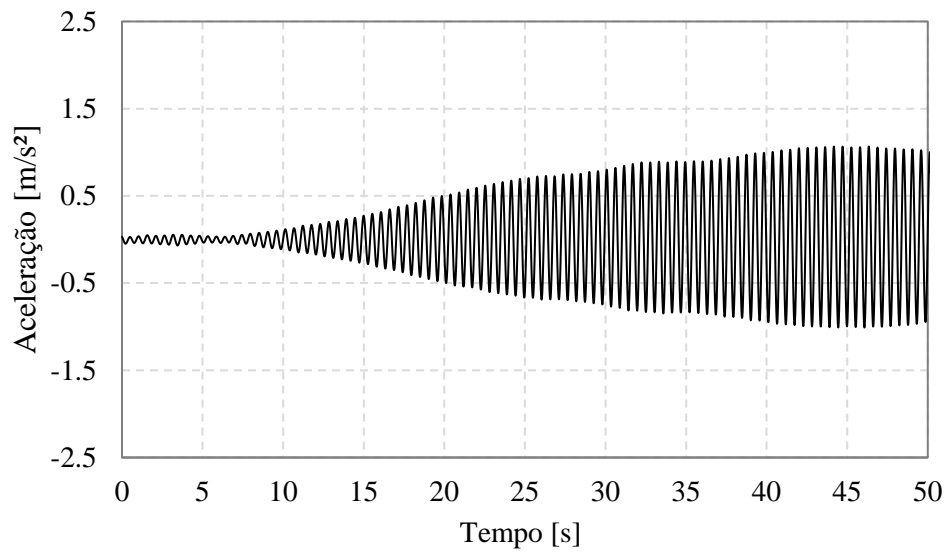


Figura 3-7: Resposta para seis pedestres andando em ressonância considerando o domínio do tempo (Fonte: Autor)

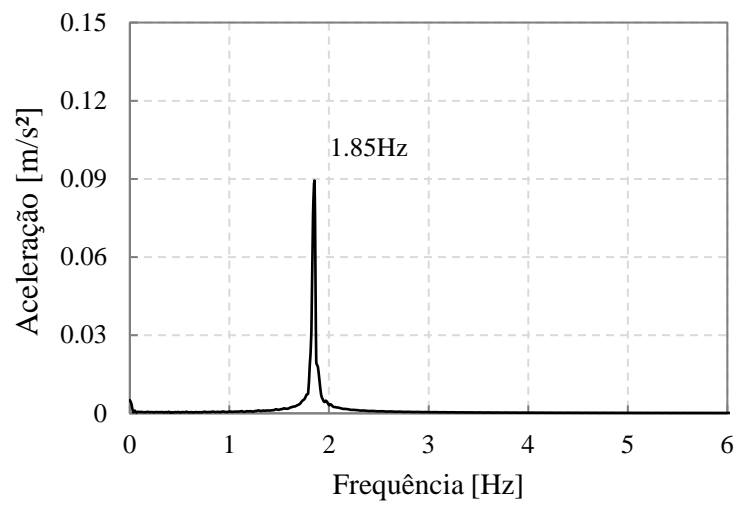


Figura 3-8: Resposta para seis pedestres andando em ressonância considerando o domínio da frequência (Fonte: Autor)

3.3 Implementação de Variabilidade nos Modelos de Carregamentos Humano

Conforme discutido na Seção 2.4, MFs e MBs são ótimas ferramentas para realizar simulações das cargas aplicadas pelo caminhar de pedestres. Ambos os modelos são definidos por meio de parâmetros de caminhada conforme as equações (2-15), (2-16), (2-17) e (2-18), as quais são comumente utilizadas em abordagem determinísticas. Nestes casos, parâmetros de caminhada como f_p , l_p e α_j se mantêm constantes ao longo de toda a simulação.

Um ciclo de caminhar determinístico é considerado uma simplificação da realidade, visto que este processo possui características randômicas e específicas a cada indivíduo. Como consequência, uma representação determinística requer a aplicação de suposições conservadoras ou fatores de segurança elevados. Essa é a razão pela qual a abordagem probabilística torna-se uma ferramenta relevante na aplicação da variabilidade ao ciclo do caminhar.

Conforme descrito na Seção 2.5, modelos probabilísticos podem assumir uma variabilidade nos parâmetros de caminhada de acordo com as distribuições adequadas de densidade de probabilidade. Tal variabilidade é dividida em relações inter-sujeito e intrasujeito: aquele é denotado como a diferença de parâmetros de caminhada entre dois ou mais pedestres, definidos por condições subjetivas como altura, peso, postura ou mesmo humor; este denotado por pequenas variações nos parâmetros de caminhada durante um curto período, dada pela incapacidade de um pedestre manter o padrão de caminhada ao longo do tempo.

Levando em consideração estes conceitos, a seção a seguir irá apresentar como ambos os tipos de variabilidades foram implementados nos modelos de carregamento probabilísticos deste trabalho. Serão descritas as densidades de probabilidade apresentadas por ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007) e KERR (1998), as quais foram utilizadas para definir as relações inter-sujeitos dos pedestres. Além disso, será apresentado uma descrição de como o método de PA foi utilizado para simular a variação do caminhar ao longo do tempo, bem como a lógica do algoritmo implementado.

3.3.1 Modelagem de Variabilidade Inter-sujeito

Em ambos os modelos de caminhada humana apresentados (MF e MB), tem-se a força gerada pelo ciclo do caminhar dada pela Equação (2-15) e esta contribui diretamente para a amplificação dinâmica da estrutura. Sabe-se que o ciclo do caminhar pode ser mais rápido, mais lento e mais ou menos irregular devido à variabilidade de cada parâmetro entre os pedestres. Neste trabalho, a variabilidade entre pessoas é dada pela frequência do passo, comprimento do passo, distribuições de probabilidade para ângulos de fase obtidas por ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007) e as distribuições de fatores de amplificação dinâmica obtidas por KERR (1998).

A frequência de passos f_p é o parâmetro mais influente nas simulações de sistemas dinâmicos, pois este está diretamente relacionado com o fenômeno de ressonância entre carregamento e estrutura (Seção 2.4.1). O comprimento de passo l_p é utilizado a fim de obter a posição do pedestre sobre a passarela, o que também influencia as amplitudes de vibração, porém em menores proporções. ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007) obteve uma distribuição normal (DN) para esses parâmetros, com um coeficiente de variação (CV) igual a 10% (Seção 2.5). Os valores médios das distribuições (μ_{f_p} , μ_{l_p}) são selecionados com base nas condições de contorno das análises a serem detalhadas na Seção 4. Em resumo, tem-se a seguinte relação entre os parâmetros apresentados: $f_p \rightarrow \text{DN}(\mu_{f_p}, CV = 10\%)$ e $l_p \rightarrow \text{DN}(\mu_{l_p}, CV = 10\%)$.

ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007) observou que os harmônicos da força que se encontram na faixa de 0,25 a 5,25 Hz possuem os ângulos de fase (ϕ_j) definidos com base em uma distribuição uniforme (DU) sobre uma faixa de $[-\pi, +\pi]$. Conforme a Equação (2-15), a força gerada possui três harmônicos, ou seja, três valores de ϕ_j . O ângulo de fase do primeiro harmônico (ϕ_1) tem valor nulo, pois o parâmetro é a referência aos harmônicos subsequentes. O ângulo de fase do segundo harmônico (ϕ_2) é selecionado aleatoriamente com base em uma distribuição uniforme de intervalo $[-\pi, +\pi]$ obtida por ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007). O ângulo da terceira fase (ϕ_3) foi considerado igual a ϕ_2 . Em resumo, tem-se a seguinte relação entre os ângulos de fase, $\phi_1 = 0$, $\phi_2 \rightarrow UN(-\pi, \pi)$ e $\phi_3 = \phi_2$.

As equações, valores e distribuições dos FADs foram obtidos por meio de campanhas experimentais e métodos numéricos apresentados no trabalho desenvolvido por KERR (1998).

Na referida pesquisa, o autor sugere uma distribuição normal para modelagem dos FAD e, semelhante aos ângulos de fase, três harmônicos (α_1 , α_2 e α_3) são necessários para serem substituídos na Equação (2-15). O valor médio para o primeiro harmônico (μ_{α_1}) é calculado em função da frequência do passo f_p e pode ser obtido através da Equação (3-1). A distribuição normal obtida com base em dados experimentais em um intervalo de confiança em 95% possui um CV igual a 16%, ou seja, $\alpha_1 \rightarrow DN(\mu_{\alpha_1}, CV = 16\%)$.

$$\mu_{\alpha_1} = -0.2649f_p^3 + 1.3206f_p^2 - 1.7597f_p + 0.7613 \quad (3-1)$$

Os valores médios para o segundo e o terceiro harmônicos da força são constantes e iguais a 0,07 e 0,05, respectivamente. Ambos são assumidos com um CV de 40%, com base nos dados apresentados por KERR (1998). A Tabela 3-1 resume todas as variáveis inter-sujeito descritas nesta seção.

Tabela 3-1: Compilado de parâmetros utilizados para a variabilidade inter-sujeito

Parâmetro	Descrição	Distribuição de Probabilidade / Valor
f_p	Frequência do Passo	$DN(\mu_{f_p}, CV = 10\%)$
l_p	Comprimento do Passo	$DN(\mu_{l_p}, CV = 10\%)$
\emptyset_1	Ângulo de Fase para 1º Harmônico	Assumido igual a 0
\emptyset_2	Ângulo de Fase para 2º Harmônico	$DU(-\pi, \pi)$
\emptyset_3	Ângulo de Fase para 3º Harmônico	Assumido igual a \emptyset_2
α_1	FAD para 1º Harmônico	$DN(\mu_{\alpha_1}, CV = 16\%)$
α_2	FAD para 2º Harmônico	$DN(0.07, CV = 40\%)$
α_3	FAD para 3º Harmônico	$DN(0.05, CV = 40\%)$

Vale ressaltar que, para as análises propostas neste trabalho, a variabilidade inter-sujeito e as distribuições descritas na Tabela 3-1 afetam apenas os valores iniciais dos parâmetros da força dinâmica. Em outras palavras, cada parâmetro dinâmico inicial dos pedestres será obtido a partir das distribuições probabilísticas correspondentes, resultando em diferentes padrões de caminhada. No entanto, após a seleção dos valores iniciais, o comportamento destes é regido pela variabilidade intrasujeito, a qual é o escopo da próxima seção.

3.3.2 Modelagem de Variabilidade Intrasujeito

Neste trabalho, a variabilidade dos parâmetros intrasujeito é modelada com base em um algoritmo de PA. De acordo com ALM (2002), um PA é uma sequência estocástica dentro de uma “cadeia de Markov”, que contém variáveis aleatórias independentes e distribuídas de forma idêntica, onde a probabilidade de cada evento ocorrer depende apenas da etapa anterior da cadeia (propriedade de Markov). Sabe-se que um PA é definido em um domínio discreto N-dimensional e, em cada etapa de um passeio, o sistema tem a probabilidade de ser modificado em uma direção do domínio. Tais mudanças de estado do sistema são chamadas de transições (S_i). Com isso, o mecanismo aleatório do movimento espacial é determinado pelas probabilidades de transição dadas a cada etapa X_i (BOGACHEV, 2006). Mais detalhes teóricos sobre a metodologia podem ser vistos na Seção 2.3 deste trabalho.

Considerando as simulações de carregamento humano, o método de PA é aplicado diretamente sobre a frequência do passo f_p , visto que o parâmetro contribui para a definição da carga móvel e na existência ou não de ressonância no sistema. A partir de estudos paramétricos sobre os parâmetros de caminhada, PEDERSEN & FRIER (2010) mostraram que a aplicação de variabilidade intrasujeito no comprimento do passo l_p não possui influência relevante na amplificação dinâmica. As outras variáveis presentes nas Equações (2-15) a (2-18) são modificadas indiretamente devido às suas dependências em relação a f_p .

É de suma importância definir o tipo de distribuição de probabilidades que poderia representar o comportamento das transições S_i , da frequência do passo f_p e o comprimento do passo l_p para uma única pessoa. Em situações típicas de fluxo de pedestres, supõe-se que os indivíduos têm as mesmas probabilidades de aumentar ou diminuir a velocidade de caminhada. Além disso, um aumento ou diminuição drástica no ritmo do passo pode ter uma probabilidade de ocorrência menor do que uma variação sutil. Portanto, uma distribuição adequada para governar o comportamento de transição desses parâmetros é a gaussiana.

Ao modelar as variações dos parâmetros de caminhada, condições de contorno iniciais devem ser definidas para dar início à lógica de programação. Primeiramente, deve-se definir um valor X_0 para o parâmetro a ser variado. A escolha deste valor pode ser arbitrária ou pode ser definida aleatoriamente com base em distribuições probabilísticas, seguindo indicações

presentes na literatura (vide Seção 2.5). Gera-se amostras (a_i) uniformemente distribuídas em uma faixa de $[0, 1]$ e faz-se uma varredura por todos estes valores. A cada ciclo de varredura feito por um *for loop*, análises condicionais são realizadas: se a_i possuir um percentil menor que 0,5, X_{i+1} é obtido ao reduzir X_i por um valor S_i ; em contrapartida, se a_i possuir um percentil maior ou igual a 0,5, o valor X_{i+1} é obtido ao aumentar o valor X_i por uma parcela S_i . Com isso, a lógica da rotina considera que existe 100% de chance de uma transição ocorrer, tendo 50% de chance para o valor ser incrementado ou decrementado. Caso aplicável, pode-se considerar probabilidades intermediárias na modelagem, onde existe uma probabilidade P_S de a transição não sofrer variação em passo i no PA.

É importante ressaltar que a parcela de acréscimo ou decréscimo é randomicamente gerada a partir de uma distribuição gaussiana, a qual é definida por um valor médio μ_S , escolhido arbitrariamente ou por uma função probabilística, e um CV. A formulação presente na Equação (3-4) apresenta a lógica descrita e evidencia como um PA é modelado com base em transições S_i aleatórias, enquanto a Figura 3-9 mostra a lógica de programação descrita através de um fluxograma.

$$a_k \leftarrow DU(0, 1) \quad (3-2)$$

$$S_i \leftarrow DN(\mu_S, CV) \quad (3-3)$$

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i + S_i \leftarrow \text{se } a_i < 0,5 \\ X_i - S_i \leftarrow \text{se } a_i \geq 0,5 \end{cases} \quad (3-4)$$

Onde:

a_i é a i -ésima amostra gerada a partir da distribuição uniforme;

S_i é o valor da i -ésima transição de um PA;

X_i é o valor na i -ésima etapa de um PA.

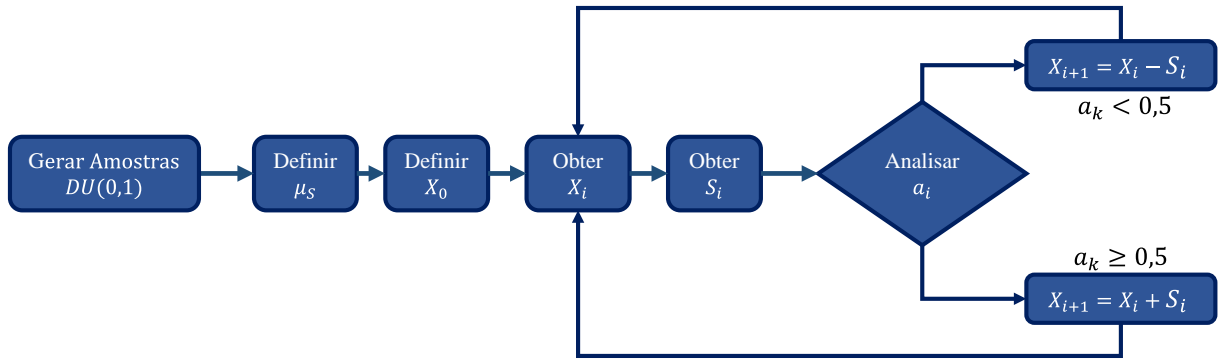


Figura 3-9: Fluxograma referente à lógica de programação do PA utilizado

No que diz respeito aos modelos de carregamento humano, a frequência do passo f_p de pedestres foi o parâmetro no qual foi aplicado o método de PA. Primeiro deve-se definir o número de passos k a serem gerados, a frequência do passo inicial f_{p_0} , o valor da transição média μ_s e seu coeficiente de variância CV_s . Seguindo a lógica apresentada pela Figura 3-9, uma amostragem de frequências por passo é obtida. Após isso, é necessário aplicar as amostras de tal forma que a força do caminhar seja gerada. Sabe-se que o período de um passo é o inverso de sua frequência, portanto, a depender da discretização da integração numérica do sistema, um vetor com valores de f_p deve ser criado no âmbito do tempo.

De forma ilustrativa, considere dois passos seguidos com $f_{p_0} = 1,85$ Hz e $f_{p_1} = 1,90$ Hz. O período do primeiro passo f_{p_0} é dado por 0,541s e de f_{p_1} é dado por 0,526s, portanto, todo este processo levaria 1,08 segundos para finalizar. Considerando um intervalo de tempo $\Delta t = 0,01$ s para integração numérica do sistema, tem-se a necessidade de criar um vetor com 54 ($\approx 0,541/0,01$) valores de 1,85 Hz e 53 ($\approx 0,526/0,01$) valores de 1,90 Hz. Ao final, um vetor com 109 valores de f_p considerando dois ciclos de passo seria criado. De modo geral, a Equação (3-5) mostra como se calcular o número de pontos de integração para um ciclo de passo i .

$$f_{p_i}^n = \frac{\left(\frac{1}{f_{p_i}}\right)}{\Delta t} \quad (3-5)$$

Onde:

Δt é o intervalo de tempo da integração numérica do sistema;

f_{p_i} é a frequência do i -ésimo ciclo de passo;

$f_{p_i}^n$ é o número n de pontos de integração que sejam iguais a f_{p_i} .

A Figura 3-10 apresenta exemplos de PAs obtidos para $f_{p_0} = 1,85$ Hz, valores de $\mu_S = \{0.5, 1.0, 2.0\} \times 10^{-3}$ Hz e $CV_S = 50\%$, mostrando os diferentes valores de f_p obtidos para cada passo. Nota-se que, conforme o μ_S é aumentado, as variações no PA se tornam maiores, pois o valor da transição S_i tem uma maior tendência de afastar o passeio do valor inicial f_{p_0} . A Figura 3-11 mostra um gráfico com os valores de S_i obtidos para cada caso de μ_S , a fim de deixar mais claro o aumento da variação do passeio a depender da escolha de μ_S .

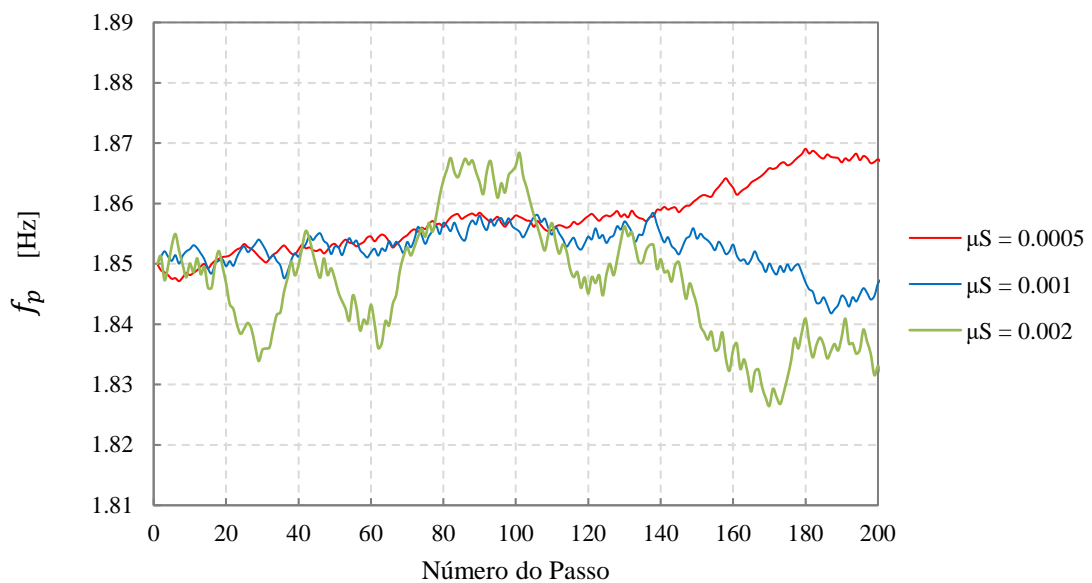


Figura 3-10: Exemplos de PA considerando valores de f_p para diferentes μ_S (Fonte: BRUNET et al. (2022) – Adaptado)

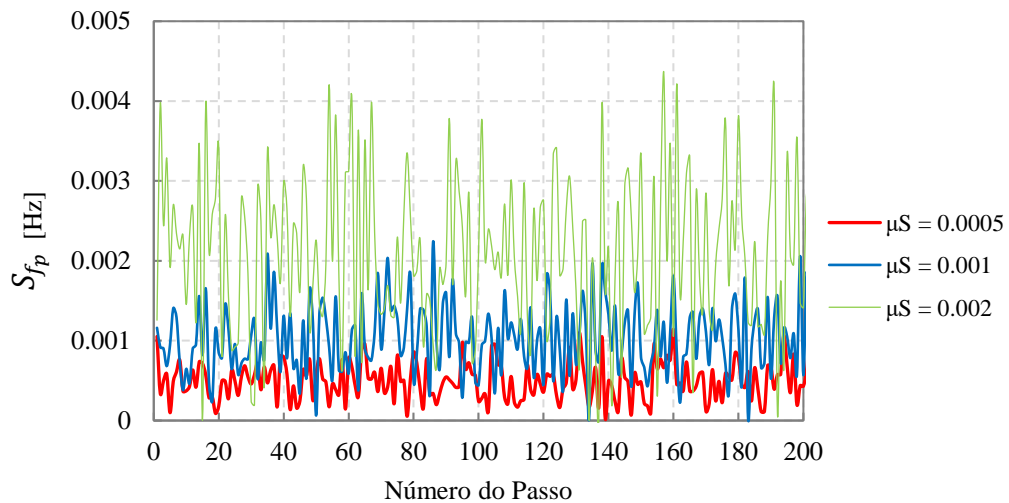


Figura 3-11: Transições do PA de frequências do passo S_{f_p} para os exemplos da Figura 3-10 (Fonte: BRUNET et al. (2022) – Adaptado)

Adicionalmente, a Figura 3-12 mostra um exemplo de PA obtido no âmbito do tempo, considerando a lógica de programação descrita anteriormente. Vale ressaltar que as regiões da curva do gráfico que estão horizontais representam o período em que o ciclo do passo está ocorrendo, em outras palavras, o pé do pedestre está no ar e está completando o seu ciclo de passo até encostar no solo novamente.

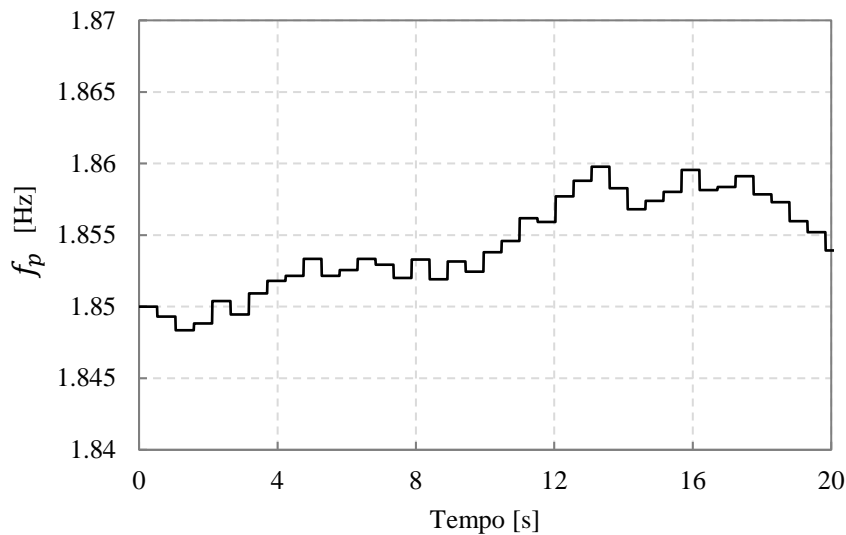


Figura 3-12: Exemplo de valores de f_p para um PA no âmbito do tempo representando os ciclos de cada passo dado por um pedestre

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Conforme apontado na Seção 1.1, existem poucas referências que fornecem informações sobre quais dados utilizar ao modelar variações intrasujeito através do método de PA. Por essa razão, análises de sensibilidade foram necessárias para a obtenção de um melhor entendimento sobre como a metodologia pode influenciar a resposta dinâmica de estruturas. Os parâmetros de um PA que devem ser considerados são a transição média μ_s e o CV correspondente.

Tais parâmetros foram utilizados diretamente na aplicação de variabilidade intrasujeito na frequência do passo f_p , já que esta é a grandeza mais influente em relação a ressonância de um sistema pedestre-estrutura (PEDERSEN & FRIER, 2010). Com isso, estudos paramétricos foram realizados a fim de compreender de que maneira cada parâmetro do PA atua sobre a amplificação dinâmica. Tais considerações auxiliaram na definição de quais seriam os dados de entrada adequados para um PA, pois certos valores podem remeter a simulações irreais do caminhar. Além disso, buscou-se compreender se a aplicação de variabilidade intrasujeito sobre o comprimento do passo l_p seria considerável nas respostas finais das simulações.

A fim de verificar a consistência dos modelos probabilísticos de caminhada, simulações com variabilidades intrasujeito e determinísticas, utilizando condições de contorno iguais, são comparadas com os dados experimentais. Para isso, os sinais obtidos pelos ensaios de vibração forçada para um pedestre e seis pedestres andando a 1,85 Hz foram utilizados (Figura 3-5 e Figura 3-7). Por fim, uma análise paramétrica de performance é feita considerando diversos cenários de carregamento, características dinâmicas estruturais e modelos de carregamento.

REZENDE *et al.* (2020) geraram um modelo tridimensional (3D) de elementos finitos da passarela descrita na Seção 3.1 e que teve suas propriedades físicas refinadas com o auxílio de resultados de testes experimentais. Como de costume para este tipo de estrutura, observou-se que o comportamento do modelo se assemelhava a uma viga bi apoiada, permitindo considerá-la como um modelo plano. A Tabela 4-1 apresenta os parâmetros físicos de entrada utilizados para a modelagem da viga equivalente.

Tabela 4-1: Parâmetros físicos de entrada para o modelo equivalente de viga para a passarela estudada por REZENDE *et al.* (2020)

Parâmetro	Descrição	Valor
f_n	Freq. Natural 1º Modo Vertical	1,85 Hz
ξ_e	Taxa de Amortecimento	0,23%
m_e	Massa Modal	$3,95 \times 10^4$ kg
L	Comprimento do Vão-Livre	68,6 m

Esta simplificação do modelo numérico permitiu uma avaliação otimizada das respostas dinâmicas através de uma rotina em *Python*, a qual utiliza o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para solucionar as equações diferenciais do sistema (Seção 2.1). Todos os carregamentos foram aplicados considerando uma carga móvel caminhando em linha reta ao longo de todo o vão da passarela. O método de superposição modal foi utilizado como premissa (Seção 2.2), considerando os autovalores e autovetores obtidos a partir do modelo 3D.

Devido à grande quantidade de simulações, foi necessário a utilização de um algoritmo de multiprocessamento. A abordagem possibilitou a redução do tempo de simulações consideravelmente, abrindo um leque maior de análises. Para informação, a Tabela 4-2 apresenta as especificações técnicas gerais do equipamento utilizado para as simulações.

Tabela 4-2: Especificações técnicas do equipamento utilizado para as simulações

Item	Especificação
Sistema Operacional	Windows 10 Pro 64 Bits
Processador	AMD Ryzen 5 2600 Six-Core 3,4GHz
Memória RAM	16 GB

Todas as simulações realizadas neste trabalho tiveram como objetivo principal fornecer um melhor entendimento da influência do método de PA sobre análises dinâmicas de passarelas de modo geral. De diferentes formas, as simulações buscaram considerar variabilidades inter- e intrasujeito, cenários de carregamento de acordo com o guia SÉTRA (2006) e os três modelos de carregamento descritos na Seção 2.4: Modelo de Força (MF) e os Modelos Biodinâmicos de TOSO (2016) (MT) e COSTA (2019) (MC).

A seguir serão descritas de forma detalhada: os critérios de convergência de todas as simulações; análises paramétricas de sensibilidade em relação ao método de PA; a calibração dos modelos de carregamento através de uma correlação teórico-experimental com o trabalho de REZENDE *et al.* (2020); por fim, análises de ELS utilizando os modelos probabilísticos considerando os critérios de conforto preconizados pelo guia SÉTRA (2006) e pela norma ISO 10137 (ISO, 2007).

4.1 Análises de Convergência das Simulações

Devido à variabilidade inerente à excitação dinâmica gerada por pedestres, análises estatísticas acabam sendo as mais apropriadas para avaliar o comportamento de uma estrutura a ser analisada. No que diz respeito às análises de sensibilidade descritas na Seção 4.2, cada caso de carregamento considerou a média quadrática $RMSa_{max,\mu}$ das acelerações máximas e médias dentro uma amostragem de 100 iterações. Optou-se por essa quantidade, pois as análises de convergência realizadas consideraram um nível de incertezas elevado, onde introduziu-se 1 pedestre/m² sobre a passarela descrita na Seção 3.1, aplicando variabilidades tanto inter- quanto intrasujeito através do MF (Seção 2.4.1).

Sendo assim, a Tabela 4-3 apresenta os resultados obtidos na análise de convergência, mostrando valores de $RMSa_{max,\mu}$ resultantes de 100, 200, 300, 400 e 500 iterações. O critério de parada utilizado foi de $\pm 5\%$ de diferença percentual (Δ). Com isso, nota-se que 100 iterações foi o suficiente para obter acelerações aceitáveis para as análises.

Tabela 4-3: Resultados da análise de convergência considerando $RMSa_{max,\mu}$

Iterações	$RMSa_{max,\mu}$ (m/s ²)	Δ (%)
100	1,104	-
200	1,062	3,79
300	1,040	2,10
400	1,036	0,40
500	1,049	1,27

Por fim, as análises de serviço que serão descritas na Seção 4.4, utilizaram um critério de convergência considerando 5% de tolerância para percentis de 95 das iterações (NIMMEN *et al.*, 2017). Em outras palavras, o número de amostras $RMSa_{max,\mu}$ oriundas das simulações

foi sendo incrementada até o percentil 95 da quantidade “atual” possuir $\pm 5\%$ de diferença em relação a quantidade anterior.

4.2 Análises de Sensibilidade para Modelos de Carregamento Humano Utilizando o Método de Passeio Aleatório

Conforme discutido na Seção 2.3, existem poucas referências na literatura que abordam a utilização do método de passeio aleatório (PA) no âmbito da simulação de carregamentos humanos. Devido a isso, foi necessário realizar análises de sensibilidade paramétricas que buscaram compreender como uma transição média μ_S e seu coeficiente de variância CV_S podem influenciar na geração da carga móvel e na amplificação dinâmica de uma estrutura. A Seção 3.3.2 apresenta uma discussão detalhada de como o método de PA é utilizado na aplicação de variabilidade intrasujeito sobre um dado parâmetro.

De modo geral, o método foi aplicado diretamente sobre a frequência do passo f_p e influenciou indiretamente todos os parâmetros dinâmicos que dependem deste. Cada grupo de análises paramétricas apresenta as descrições específicas das condições de contorno para os modelos de carregamento utilizados. A estrutura instrumentada e modelada por REZENDE *et al.* (2020) foi utilizada como base para as simulações. A seguir serão apresentadas as análises paramétricas que lideram com: diferentes valores de CV_S ; diferentes valores de μ_S sendo aplicados aos três modelos de carregamento estudados e com a influência do método de PA.

4.2.1 Coeficiente de Variância das Transições Médias μ_S

As simulações descritas nesta seção buscam compreender de que maneira valores de CV_S poderiam influenciar na amplificação dinâmica. Para isso, foi criado um estudo paramétrico fixando valores de CV_S em 10%, 30%, 50% e 70% e, para cada caso, utilizar diferentes valores de μ_S a fim de obter acelerações instantâneas máximas e médias ($a_{max,\mu}$).

As análises utilizaram o MF representando somente um pedestre caminhando sobre a passarela com uma frequência de passo inicial f_{p_0} de 1,85 Hz, um valor do comprimento de passo inicial l_{p_0} de 0,71m e um peso de 700 N. O parâmetro f_p foi sendo variado ao longo da trajetória devido à aplicação do método de PA, enquanto l_p foi mantido fixo. A Tabela 4-4 apresenta em resumo as condições de contorno para o modelo de carregamento utilizado.

Tabela 4-4: Condições de contorno para ao Modelo de Força utilizado nas análises de sensibilidade para CV_S

Parâmetro	Descrição	Valor
N_{ped}	Número de pedestres	1 pedestre
f_{p_0}	Frequência do passo inicial	1,85 Hz
l_{p_0}	Comprimento do passo inicial	0,71 m
P	Peso	700 N
CV_S	Variância das Transições	{10, 30, 50, 70} %

A Figura 4-1 apresenta os valores de $a_{max,\mu}$ obtidos no meio do vão da passarela. Os dados mostram que a aplicação de um valor mais elevado de μ_S gera valores de $a_{max,\mu}$ menores. Isso é um indicativo de uma maior probabilidade de f_p se afastar da frequência natural f_n da passarela, resultando em uma menor amplificação dinâmica.

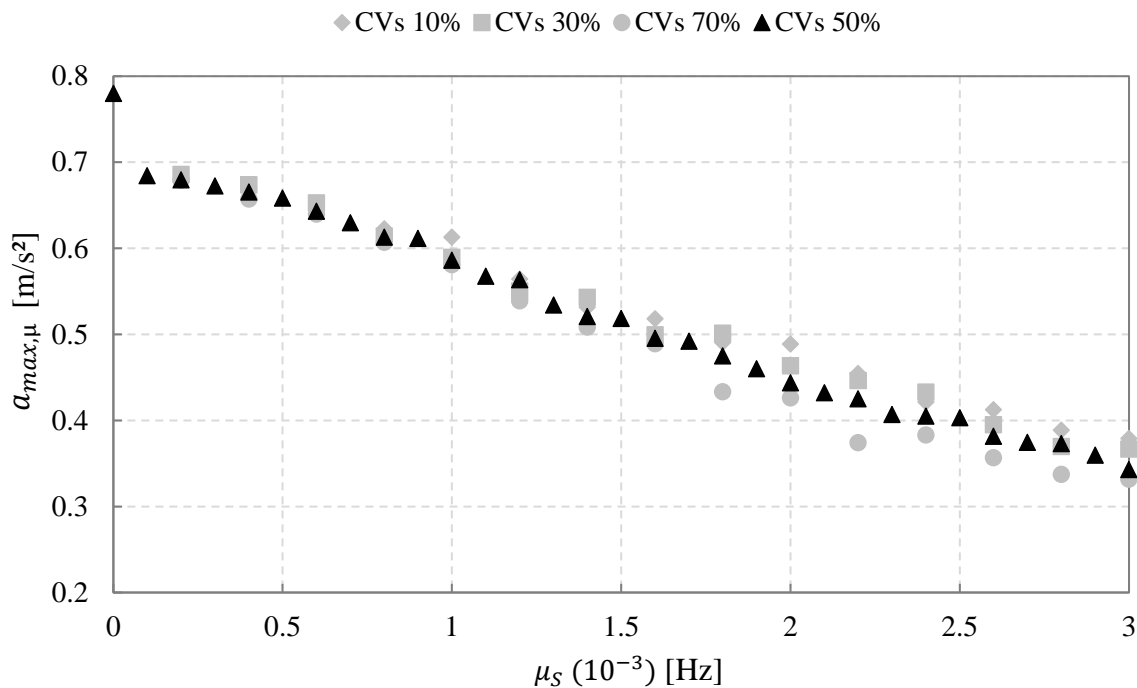


Figura 4-1: Acelerações máxima médias para diferentes CV_S e μ_S considerando um pedestre como MF. (Fonte: BRUNET *et al.* (2022) – Adaptado)

A análise paramétrica mostra que a escolha do valor CV_S pode sim influenciar a resposta dinâmica. Nota-se que a utilização de um CV_S mais alto pode corresponder a maiores flutuações nos valores de $a_{max,\mu}$, especialmente quando μ_S aumenta. Porém, as diferenças nas acelerações máximas, ao variar os coeficientes, não possuem relevância considerável na

amplificação dinâmica. Levando em consideração os resultados apresentados na Figura 4-1, pode-se inferir que um valor de CV_S igual a 50% acaba fornecendo dados de $a_{max,\mu}$ de forma mais equilibrada em relação aos demais casos. Por este motivo, todas as simulações subsequentes utilizaram 50% de variância para μ_S .

4.2.2 Transições Médias μ_S para casos de ressonância

As transições médias μ_S são parâmetros chaves para realizar a modelagem de variabilidade intrasujeito de f_p . Devido a isso, necessitou-se buscar uma compreensão mais abrangente sobre como diferentes valores de μ_S influenciam a resposta dinâmica de uma estrutura. Para isso, as simulações a serem descritas consideram os modelos de carregamento de Força, de TOSO (2016) e COSTA (2019). Como a variabilidade intrasujeito via PA foi aplicada sob MF e ambos os MBs, optou-se por nomeá-los da seguinte forma respectivamente: PAMF, PAMT e PAMC. Adicionalmente, diferentes densidades de carregamento foram utilizadas para ampliar a gama de variabilidade nas simulações e realizar comparações sobre a IPE de cada modelo.

As condições de contorno para os três modelos de carregamento consideraram f_{p_0} igual a 1,85Hz para todos os pedestres modelados. Esta condição teve como objetivo impor ressonância sobre o sistema passarela-pedestres através da ressonância, para que fosse possível visualizar de forma mais clara como o aumento de μ_S influencia a amplificação dinâmica.

No que diz respeito às simplificações das simulações, todos os pedestres foram considerados tendo: 700 N de peso; a altura de 1,73 m (NCD-RisC, 2016) para MC; o comprimento do passo inicial $l_{p_0} = 0,71$ m, que se manteve constante ao longo de toda a travessia; 1 m de distância uns dos outros; a ausência de interferências físicas e psicológicas entre grupos.

As densidades de pedestres utilizadas $d_{ped} = \{0,00633, 0,0316, 0,2, 1,0\}$ pedestre/m² considerando a passarela estudada por REZENDE *et al.* (2020), a qual possui vão-livre de 68,6m e largura de laje igual a 2,3m (vide Seção 3.1). A fim de otimizar as modelagens, as simulações consideraram um arranjo de N_{pos} posições distando 1 metro uma das outras, com um número $N_{p,pos}$ de pedestres por posição. Com isso, os arranjos de

pedestres para cada caso de carregamento foram considerados da seguinte forma: $N_{pos} = \{1, 5, 10, 39\}$ posições e $N_{p,pos} = \{1, 1, 3, 4\}$ pedestres/posição. Portanto, obteve-se um número total de pedestres $N_p = \{1, 5, 30, 156\}$ para cada caso de carregamento. A Tabela 4-5 apresenta em resumo as condições de contorno e os casos analisados nas análises paramétricas desta seção.

Tabela 4-5: Condições de contorno para os Modelos de Força, de TOSO (2016) e de COSTA (2019) utilizados nas análises de sensibilidade para μ_S

Parâmetro	Descrição	Valor
N_p	Número total de pedestres	$\{1, 5, 30, 156\}$ pedestres
f_{p_0}	Frequência do passo inicial	1,85 Hz
l_{p_0}	Comprimento do passo inicial	0,71 m
P	Peso do pedestre	700 N
H	Altura do pedestre	1,73 m
CV_S	Variância das Transições	50%

Os gráficos apresentados da Figura 4-2 a Figura 4-5 mostram os resultados das análises paramétricas com os valores de $a_{max,\mu}$ normalizados obtidos para casos de densidades $d_{ped} = \{0,00633, 0,0316, 0,2, 1,0\}$ pedestres/m² e valores de $\mu_S = \{0,5, 1, 2, 3, \dots, 12\} \times 10^{-3}$ Hz. Vale ressaltar que todos os pedestres modelados também possuíam o mesmo valor de μ_S . Ao analisar os resultados, notam-se comportamentos similares referente à amplificação dinâmica da estrutura à medida que o valor de μ_S é variado. Para melhor entendimento, as principais considerações sobre os resultados estão listadas a seguir:

- Observa-se que quanto maior μ_S for, menor será a aceleração máxima obtida, já que as transições gaussianas geradas serão elevadas, tendo como consequência, uma maior probabilidade de f_p se afastar de $f_{p_0} = 1,85$ Hz durante o PA. Em outras palavras, isso mostra que um modelo de pedestre atrelado a uma maior μ_S estará representando um ciclo do caminhar com menos chances de se manter estável em relação a f_{p_0} .
- Em contrapartida, menores valores de μ_S podem representar um pedestre que está buscando manter um ciclo de caminhar estável, ou seja, com variações (transições) mais sutis.

- Nota-se também que todas as curvas possuem um comportamento assintótico e quanto maior a densidade de pedestres aplicada, mais acentuada é a queda assintótica. Quanto maior for a carga ressonante com a estrutura, mais sensível será a escolha do valor de μ_S , principalmente na faixa de $[0.5, 2] \times 10^{-3}$ Hz para casos de $d_{ped} \geq 1$ pedestre/m².
- As curvas assintóticas demonstram uma estagnação na amplificação dinâmica até certas faixas de μ_S , a depender da densidade. Isto ocorre, pois caso as transições a cada passo sejam muito elevadas, pode-se resultar mais uma vez no afastamento de f_{p_0} . Este fato garante que a ressonância entre estrutura e carregamento não irá acontecer.
- Levando em consideração a eficiência da modelagem numérica, não é uma boa abordagem utilizar μ_S elevados para as análises dinâmicas, visto que estes não fizeram diferença na amplificação da estrutura.
- Por fim, considerando aspectos físicos do caminhar, pode-se inferir que as transições no passo também podem chegar a ordens de grandeza que não representam a forma natural de executar um passo após o outro.

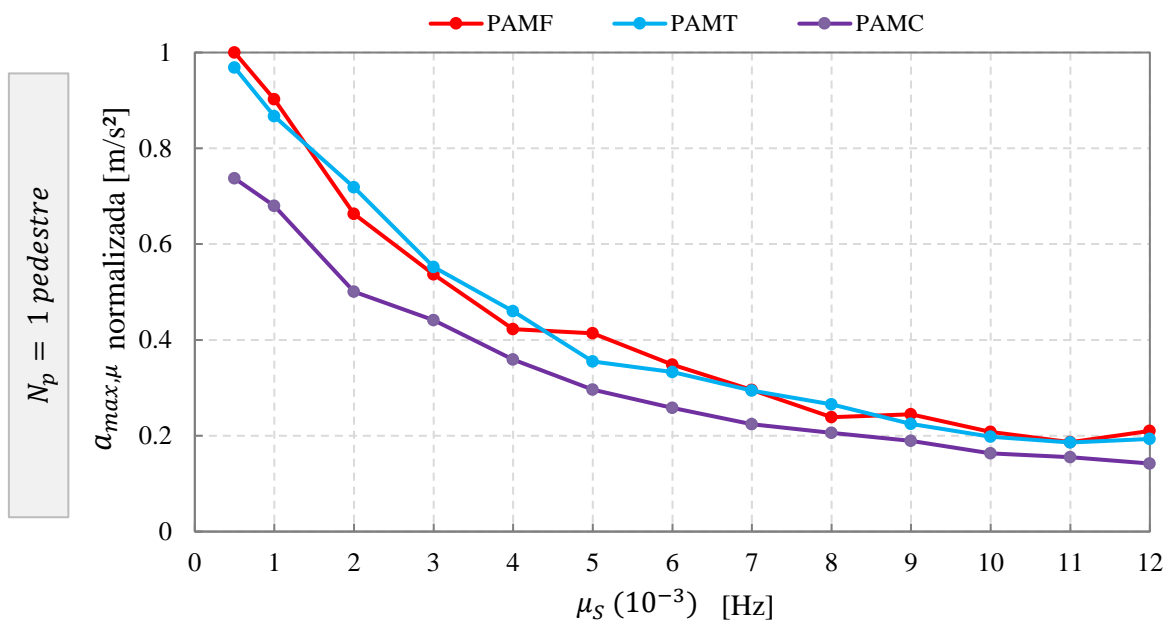


Figura 4-2: Comparação entre modelos de carregamento representando 1 pedestre considerando $a_{max,\mu}$ normalizados para diferentes μ_S (Fonte: Autor)

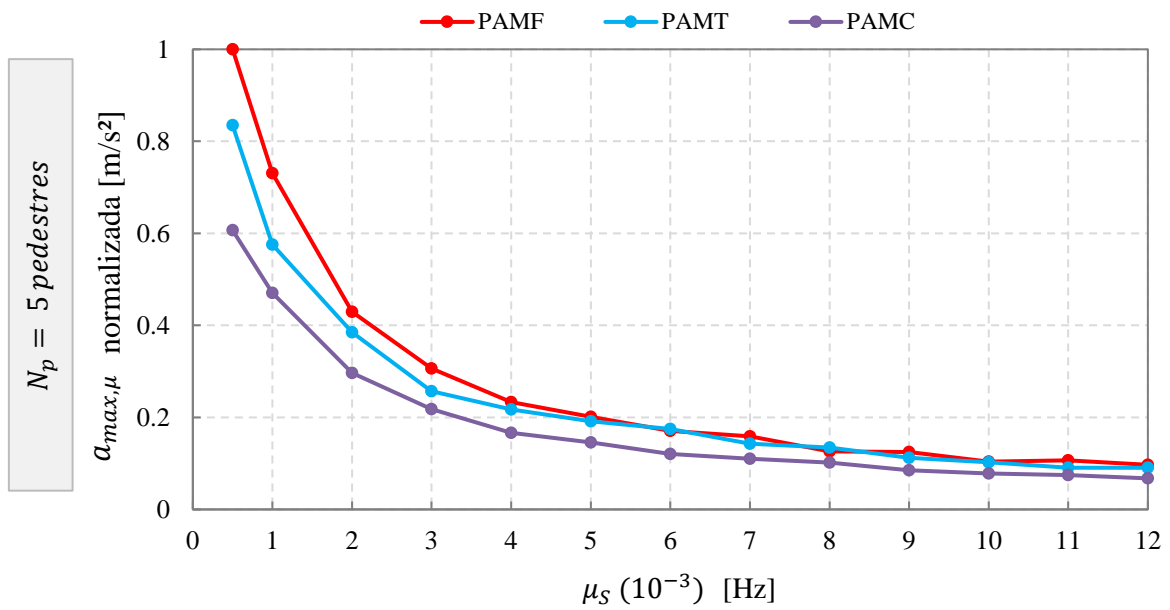


Figura 4-3: Comparação entre modelos de carregamento representando 5 pedestres considerando $a_{max,\mu}$ normalizados para diferentes μ_S (Fonte: Autor)

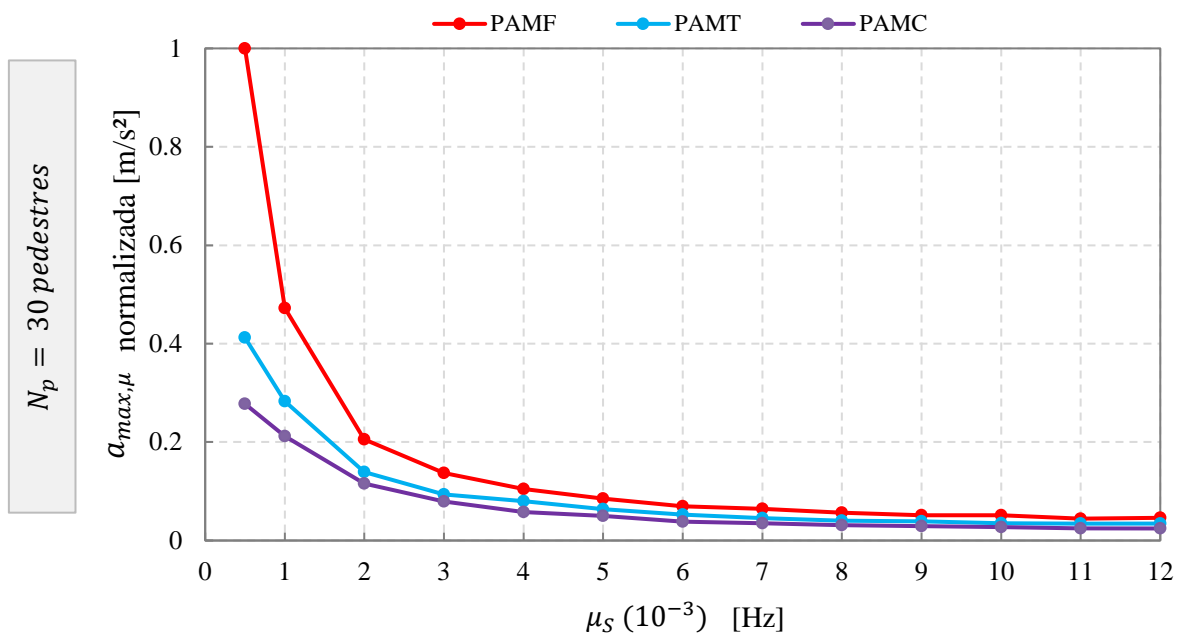


Figura 4-4: Comparação entre modelos de carregamento representando 30 pedestres considerando $a_{max,\mu}$ normalizados para diferentes μ_S (Fonte: Autor)

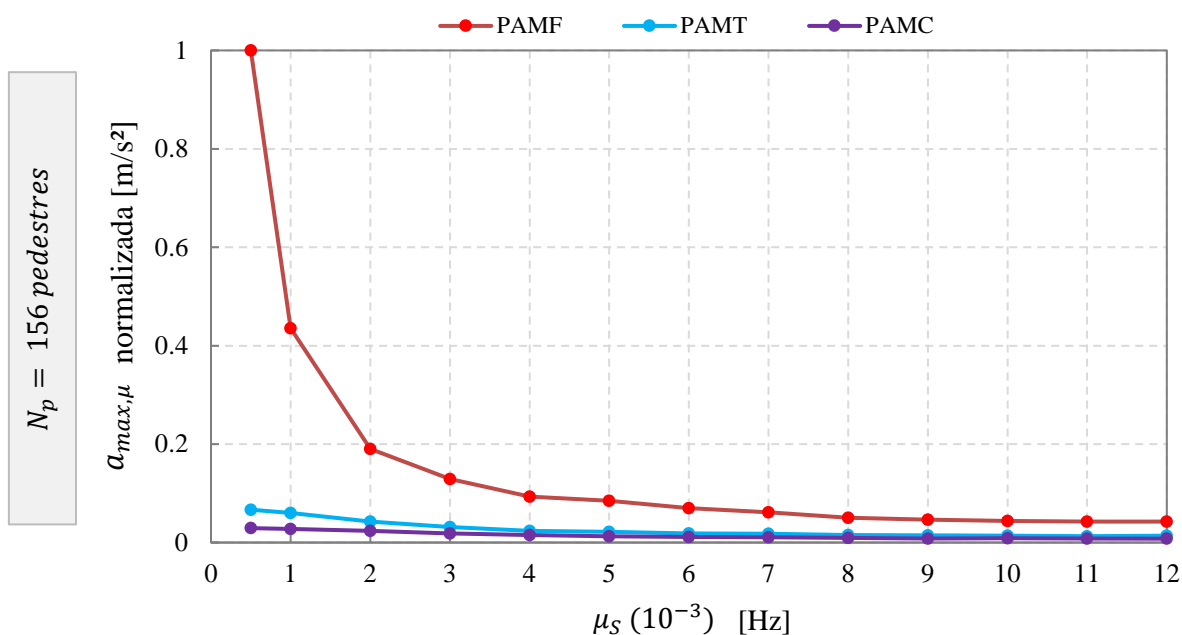


Figura 4-5: Comparação entre modelos de carregamento representando 156 pedestres considerando $a_{max,\mu}$ normalizados para diferentes μ_S (Fonte: Autor)

Outro ponto importante a ser analisado é a influência do PA sobre diferentes modelos de carregamento com e sem a consideração da IPE. A partir da Figura 4-2, nota-se que o PAMF possui um comportamento bem parecido com PAMT, visto que o amortecimento da estrutura para 1 pedestre não é relevante para MBs.

Conforme a densidade dos pedestre é aumentada (vide Figura 4-3, Figura 4-4, e Figura 4-5), a amplificação gerada pelo PAMF se torna gradativamente maior em relação àquelas geradas por ambos os MBs (PAMT e PAMC). Isso mais uma vez confirma que modelos de carregamento que consideram IPE geram acelerações máximas com menores ordens de grandeza, muito devido ao acoplamento do sistema.

A Figura 4-6, Figura 4-7 e Figura 4-8 apresentam, de forma mais clara, a comparação entre as amplitudes de aceleração normalizadas a depender da densidade de pedestres, considerando os modelos PAMF, PAMT e PAMC respectivamente. A Figura 4-6 demonstra uma amplificação proporcional ao número de pedestres sobre a passarela considerando o PAMF. Os resultados para PAMT e PAMC (vide Figura 4-7 e Figura 4-8, respectivamente) apresentam as mesmas características somente para os casos de 1, 5 e 30 pedestres caminhando sobre a passarela. Porém, ao considerar 156 pedestres, o amortecimento gerado

pelo número de pedestres elevou-se tanto, que as amplitudes reduziram cerca de 27% para PAMT e 53% para PAMC em relação ao caso de 30 pedestres.

Vale ressaltar que, os resultados obtidos através de PAMC também se comportaram de forma coerente com os estudos de COSTA (2019), visto que este modelo considera um amortecimento mais elevado em relação ao de TOSO (2016). Valores na faixa de 0.0005 a 0.001 Hz para μ_S demonstram uma diferença considerável na amplificação para ambos os MBs, porém o aumento destes diminuiu a diferença entre $a_{max,\mu}$ chegando aos níveis de estagnação da curva assintótica.

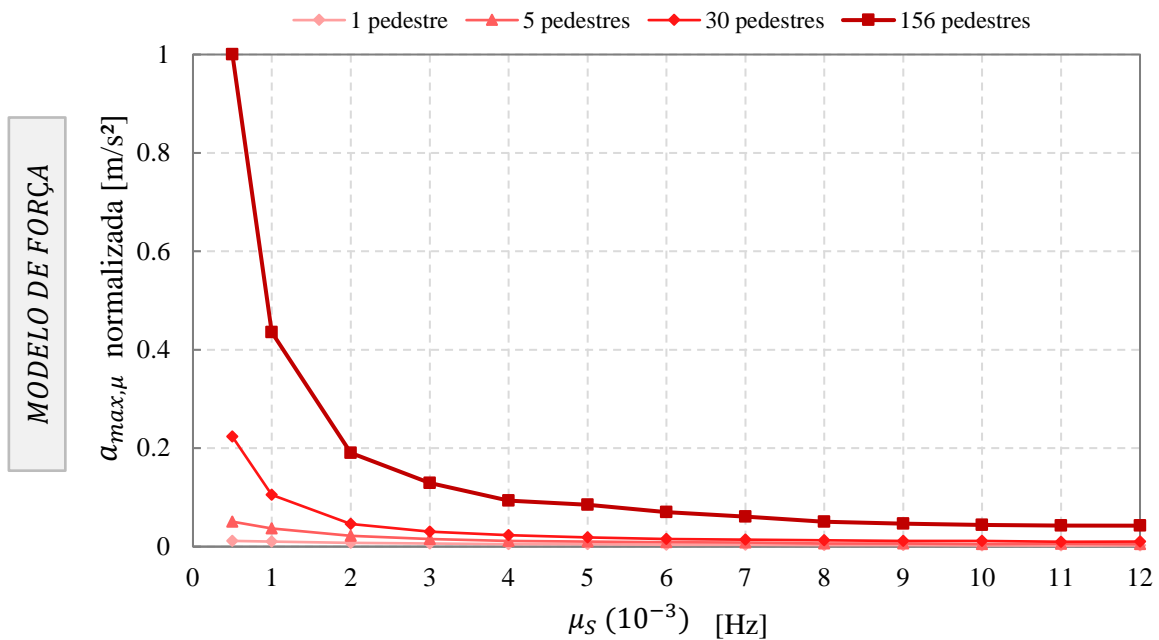


Figura 4-6: Comparação entre $a_{max,\mu}$ normalizadas obtidas por diferentes μ_S para quatro densidades de carregamento representadas pelo Modelo de Força (Fonte: Autor)

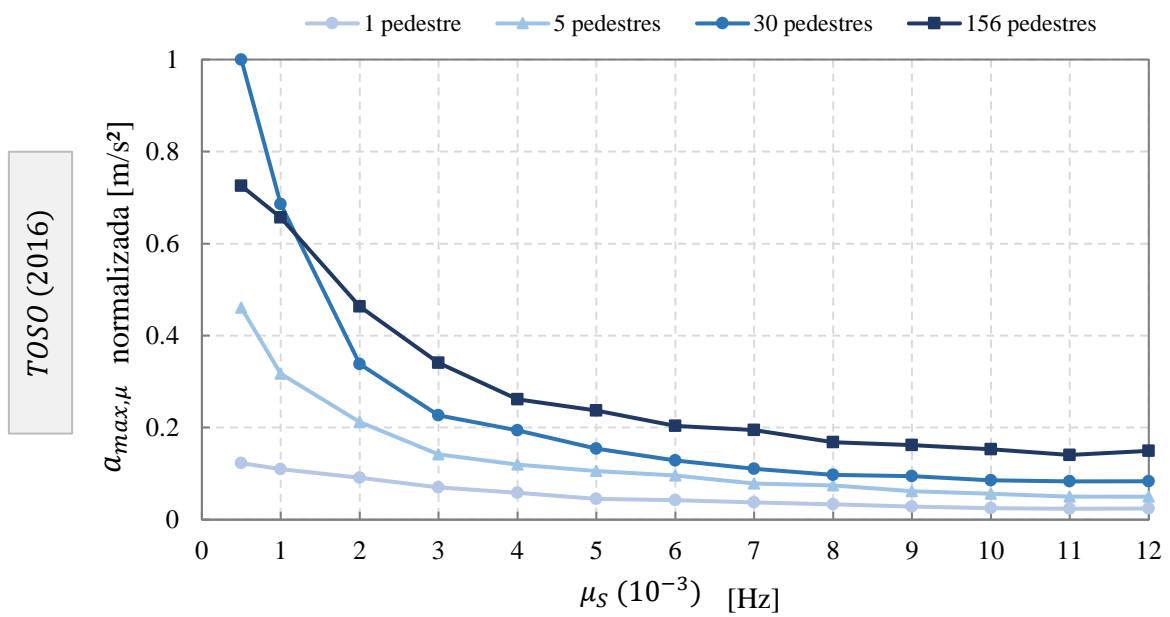


Figura 4-7: Comparação entre $a_{max,\mu}$ normalizadas obtidas por diferentes μ_s para quatro densidades de carregamento representadas por TOSO (2016) (Fonte: Autor)

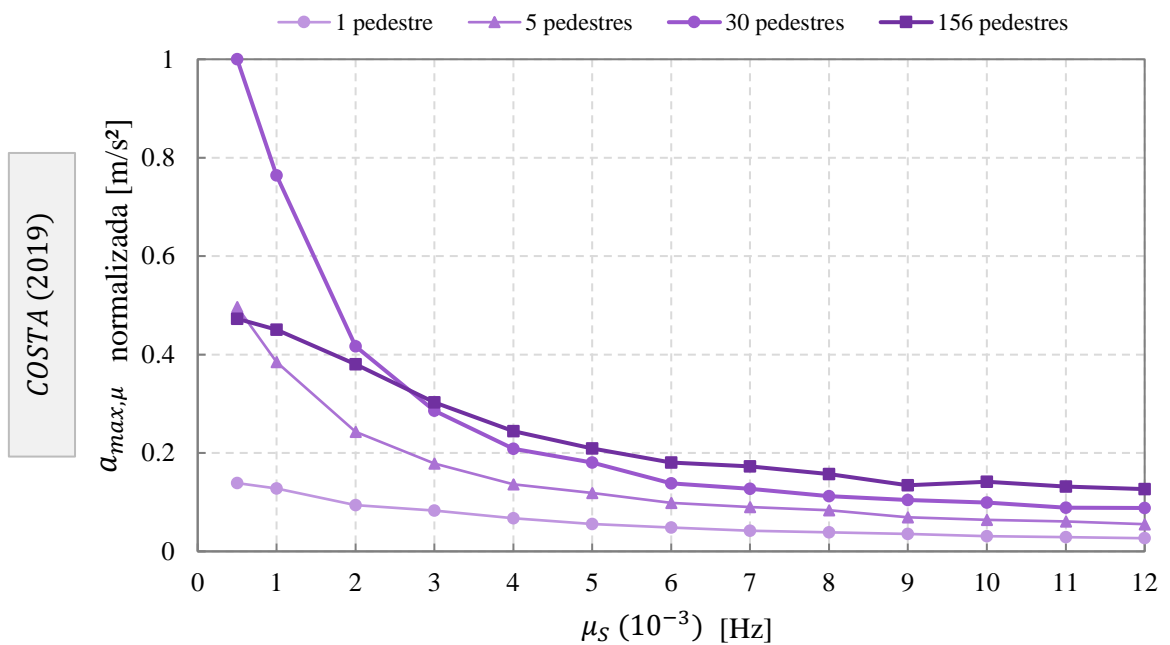


Figura 4-8: Comparação entre $a_{max,\mu}$ normalizadas obtidas por diferentes μ_s para quatro densidades de carregamento representadas por COSTA (2019) (Fonte: Autor)

4.3 Calibração dos Modelos Probabilísticos de Carregamento Humano Utilizando o Método de Passeio Aleatório

A partir da Seção 4.2, foi possível ter um entendimento de forma compreensiva de como o método de PA pode ser utilizado para análises dinâmicas de passarelas. As análises paramétricas tiveram a abrangência de diversos cenários considerando modelos de carregamento humano com e sem IPE, lidando com diferentes densidades de pedestres. Teoricamente, o método de PA consegue ter influência de forma sistemática na resposta dinâmica de uma estrutura.

Com o intuito de consolidar tal aprendizado, esta seção irá apresentar um estudo de calibração dos modelos probabilísticos considerando PA, o qual foi feito a partir de uma correlação teórico-experimental com base em REZENDE *et al.* (2020). Teve-se como objetivo mostrar que a utilização do método de PA pode representar cenários de carregamento de uma maneira condizente com a realidade.

Neste estudo, a calibração dos modelos considerou as transições médias μ_S como parâmetro principal a ser analisado. O valor escolhido para a modelagem foi determinado assumindo aquele que fornece uma aceleração máxima teórica mais próxima da experimental. Portanto, esta abordagem é válida para uma avaliação prática da metodologia de modelagem e pode ser utilizada como referência, mas não deve ser tomada como geral ou ser aplicada diretamente em outros tipos de estruturas e situações.

A Figura 4-9 apresenta o estudo de sensibilidade para $CV_S = 50\%$, e nela observa-se que, para valores $\mu_S = 0,5 \times 10^{-3}$ Hz e $CV_S = 50\%$, a aceleração máxima média obtida é $a_{max,\mu} = 0,659$ m/s². Tal valor é bastante próximo à amplitude máxima de 0,660 m/s² referente ao sinal experimental obtido por REZENDE *et al.* (2020), vide Figura 3-5. O sinal experimental foi gerado por meio de vibrações induzidas com o auxílio de um metrônomo, o que fez com que o pedestre ficasse em ressonância com a estrutura. A comparação mostra que, para uma modelagem intrasujeito, a escolha da transição média e do coeficiente de variância oriundos da Figura 4-1 está em conformidade com o cenário de um pedestre caminhando sobre a passarela. Estes valores tornaram-se referência para outras análises utilizando PA. Com isso, μ_S pode ser ligeiramente modificado em torno do valor referência de $0,5 \times 10^{-3}$ nas

simulações, dependendo do número de pedestres, suas condições e da presença ou ausência de um metrônomo.

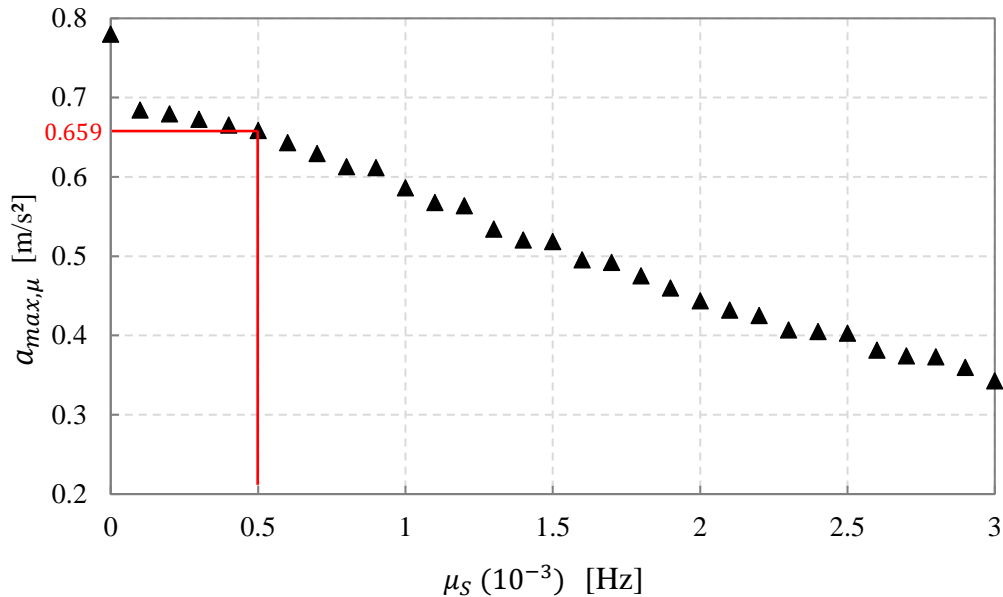


Figura 4-9: Análise de sensibilidade para um CV_S de 50% com destaque no valor de μ_s escolhido para simular um pedestre caminhando em ressonância conforme REZENDE *et al.* (2020) (Fonte: Autor)

Nas seções a seguir, cenários de vibração forçada são apresentados considerando um e seis pedestres caminhando sobre a passarela. Correlações teórico-experimentais são apresentadas detalhando a metodologia de modelagem, bem como as condições de contorno dos modelos de carregamento utilizados (MF e MT). A fim demonstrar a eficácia do uso da metodologia de PA, simulações com abordagens determinísticas e probabilísticas são discutidas e comparadas tomando como base os sinais experimentais obtidos por REZENDE *et al.* (2020).

4.3.1 Uma pessoa caminhando em ressonância com a estrutura

Durante os ensaios de vibração forçada, a pessoa estava caminhando com o auxílio de um metrônomo a fim de manter a frequência do caminhar estável. Conseqüentemente, a frequência inicial de caminhada f_{p_0} é fixada em 1,85 Hz para a simulação, sendo assim, a variabilidade inter-sujeito não é considerada. Dessa forma, apenas a variabilidade intrasujeito foi aplicada na modelagem. O comprimento do passo inicial l_{p_0} , que se manteve constante ao longo de toda a simulação, foi de 0,71 m e o peso da pessoa de 700 N. Conforme discutido

anteriormente, a transição média escolhida foi de $\mu_S = 0,5 \times 10^{-3}$ e $CV_S = 50\%$. A Tabela 4-6 apresenta em resumo as condições de contorno para os modelos de carregamento utilizados. Nesta seção, a simulação determinística típica com a MF e MB é referida pelas próprias iniciais, e mais uma vez as simulações utilizando PA com os mesmos modelos são denotadas como modelo de força de passeio aleatório (PAMF) e modelo biodinâmico de TOSO (2016) com passeio aleatório (PAMT).

Tabela 4-6: Condições de contorno para modelagem de um pedestre caminhando em ressonância

Parâmetro	Descrição	Valor
f_{p_0}	Frequência do passo inicial	1,85 Hz
l_{p_0}	Comprimento do passo inicial	0,71 m
P	Peso	700 N
μ_S	Transição Média do Passo	$0,5 \times 10^{-3}$ Hz
CV_S	Variância das Transições	50%

As Figura 4-10 e Figura 4-11 apresentam as simulações determinísticas e com PA, respectivamente. Os resultados numéricos são comparados com os sinais experimentais de REZENDE *et al.* (2020). A Tabela 4-7 apresenta resultados de acelerações máximas no meio do vão da passarela a partir de metodologias determinísticas e de PA, que são comparadas com a aceleração experimental máxima de $0,660 \text{ m/s}^2$ de REZENDE *et al.* (2020).

Tabela 4-7: Acelerações máximas para um pedestre considerando MF e MT com e sem PA

Método	Aceleração Máxima [m/s^2]	Δ^* [%]
MF	0,780	18,2
MT	0,774	17,3
PAMF	0,685	3,79
PAMT	0,661	0,15

*Aceleração máxima experimental no meio do vão = $0,660 \text{ m/s}^2$

A partir dos resultados apresentados, observa-se que o PA aplicado a ambos os modelos resultou em uma redução dos valores de aceleração, ao compará-los com os resultados determinísticos. O PA também resultou em uma melhor aproximação ao comportamento real da estrutura, como pode ser observado ao longo de todo o sinal. As diferenças de sinal entre a MF e a MT são mínimas neste cenário de um pedestre, visto que a relação de massa entre a pessoa e a estrutura é pequena, e a influência da IPE é insignificante.

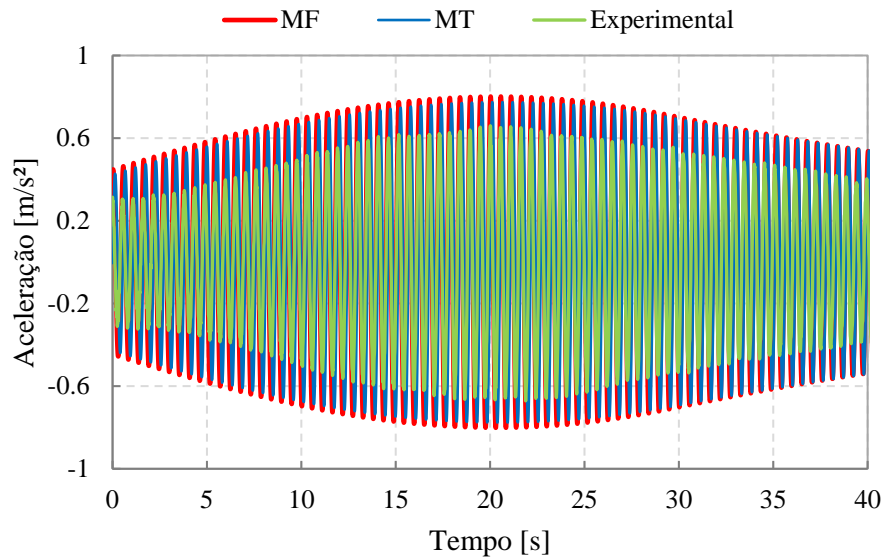


Figura 4-10: Respostas determinísticas para um pedestre caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor)

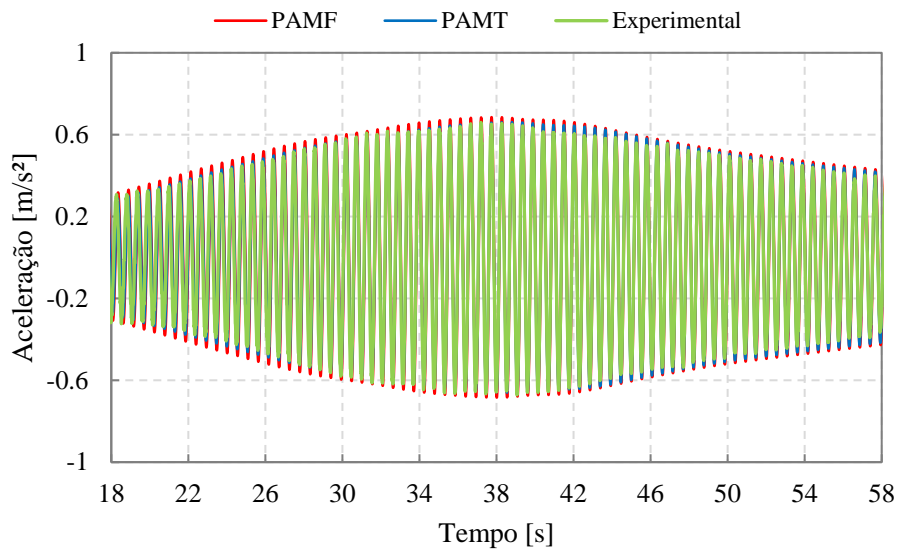


Figura 4-11: Respostas probabilísticas utilizando PA para um pedestre caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor)

Adicionalmente, a Figura 4-12 apresenta de forma gráfica o passeio aleatório de f_p obtido durante as simulações e é possível notar as transições sendo aplicadas sobre o parâmetro, bem como a sua variação a cada passo. A Figura 4-11 mostra que a amplitude

máxima do sinal ocorreu por volta dos 38 segundos de simulação e, a partir da Figura 4-12, nota-se que o pedestre estava por volta de seu 70º passo, o qual estava sendo executado com $f_p = 1,861$ Hz. Este valor possui 0,59% de Δ em relação à frequência de ressonância (1,85 Hz) e por esse motivo a redução da aplicação dinâmica seria realmente esperada de se ocorrer.

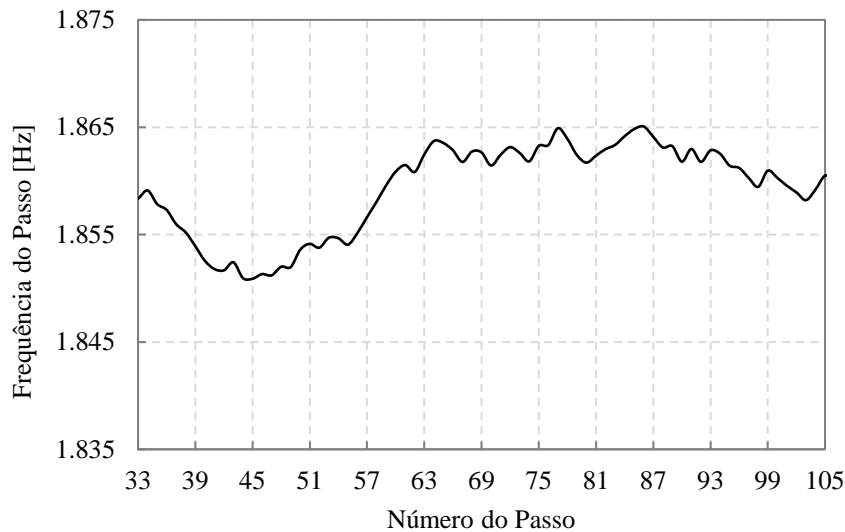


Figura 4-12: Frequências obtidas a cada passo do PA gerado durante as simulações para um pedestre caminhando em ressonância (Fonte: Autor)

4.3.2 Seis pessoas caminhando em ressonância com a estrutura

Após as análises com um pedestre caminhando sobre a passarela, outra simulação com seis pedestres também foi realizada. Mais uma vez, uma correlação teórico-experimental foi realizada, utilizando o sinal experimental apresentado pela Figura 3-7 como referência. Semelhante às simulações anteriores, nesta simulação os seis pedestres caminharam com o auxílio de um metrônomo a 1,85Hz, com isso, as simulações foram realizadas apenas com a variabilidade intrasujeito.

O grupo de seis pessoas é dividido em três pares (A, B e C), que estão a 1 m de distância um do outro. Como o modelo numérico da passarela é plano, cada par de pedestres é considerado como um pedestre equivalente com massa dupla e parâmetros modais. A Figura 4-18 apresenta o esquemático do arranjo de pedestres modelado para as análises.

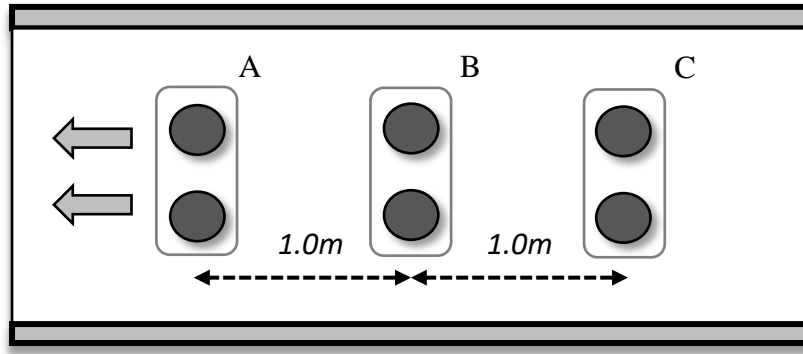


Figura 4-13: Esquemático em vista superior do arranjo de pedestres modelado (Fonte: Autor)

Para todos os pares, foi escolhida uma transição média μ_S de 0,001, o que corresponde a um valor maior do aquele utilizado nas análises para uma pessoa discutidas na seção anterior. Isso se justifica, pois espera-se que um grupo maior de pedestres tenha mais dificuldade em manter a constância no ciclo do passo, mesmo com o auxílio de um metrônomo.

A Tabela 4-8 apresenta, em resumo, os dados de entrada para a modelagem do arranjo de pedestres. A frequência do passo inicial f_{p_0} de cada par é influenciado pela limitação imposta pelo grupo à frente, conforme já estudado por KAPERSKI (2017). Por essa razão, um valor inicial de 1,85 Hz é atribuído para frequência de passo inicial f_{p_0} do Par A, 1,825 Hz para o Par B e 1,800 Hz para o Par C. Para cada par, foi considerando um peso de 1.400 N (700 N por pedestre) e o comprimento de passo inicial l_{p_0} igual 0,71 m, o qual se manteve constante ao longo de toda a travessia.

Tabela 4-8: Parâmetros de entrada para a modelagem das simulações para seis pessoas caminhando em ressonância

Parâmetro	Par A	Par B	Par C
f_{p_0}	1,850 Hz	1,825 Hz	1,800 Hz
l_{p_0}	0,710 m	0,710 m	0,710 m
P	1.400 N	1.400 N	1.400 N
μ_S	0,001	0,001	0,001
CV_S	50%	50%	50%

As Figuras Figura 4-14 e Figura 4-15 apresentam os resultados das simulações obtidas com os métodos determinísticos e de PA, em comparação com o sinal experimental para seis

peças que caminham em ressonância com a passarela. Em ambos os casos, é possível notar uma diferença significativa na amplificação dinâmica para MF e MT. Com seis pedestres, a IPE considerada em MBs, resulta em um amortecimento sob a estrutura, tendo como consequência uma maior redução na amplificação dinâmica, comparando com o MF.

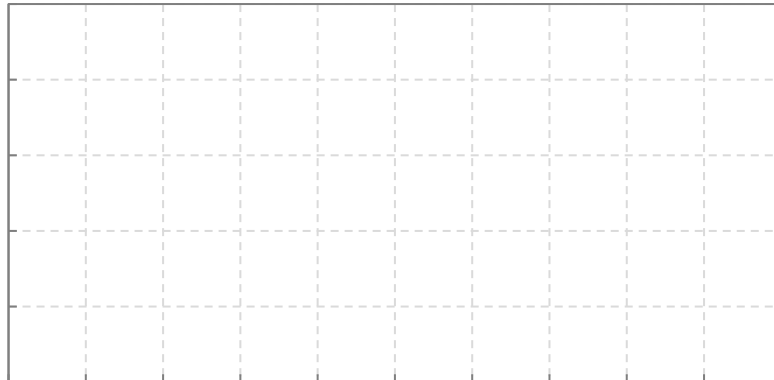


Figura 4-14: Respostas determinística para seis pedestres caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor)

Figura 4-15: Respostas probabilística utilizando PA para seis pedestres caminhando em ressonância com o 1º modo de vibração vertical da passarela (Fonte: Autor)

Ao comparar o MF com o PAMF, observa-se que os sinais determinísticos sofrem uma redução das amplitudes máximas devido à variabilidade dos parâmetros de caminhada após a

aplicação do PA. O sinal teórico e suas amplificações dinâmicas demonstram uma boa correlação quando comparados com os resultados experimentais. Como consequência, nota-se que os resultados mostraram ser qualitativamente bons, considerando o uso de PA para simulações do caminhar humano.

A Tabela 4-9 apresenta resultados de acelerações máximas no meio da passarela a partir de métodos determinísticos e de PA para a simulação de seis pedestres. A diferença percentual Δ entre a aceleração máxima obtida pelo MF e o sinal experimental é de 82,4%, e tal diferença diminui para 20,3% ao utilizar a PAMF. Para o MT determinístico, a diferença percentual é de 59,5%, enquanto PAMT reduz a diferença para 1,0%. O MT tende a ter resultados mais representativos em relação ao MF devido ao acoplamento entre os seis pedestres e a estrutura. Além disso, a introdução da variabilidade nos parâmetros de caminhada através do PA cumpriu seu objetivo em representar realisticamente os modelos numéricos de carregamento, especialmente quando utilizados em associação com ao MT.

Tabela 4-9: Acelerações máximas para seis pedestres considerando MF e MT com e sem PA

Método	Aceleração máxima [m/s²]	Δ^* [%]
MF	1,94	82,4
MT	1,70	59,5
PAMF	1,28	20,3
PAMT	1,06	1,00

**Aceleração máxima experimental no meio do vão = 1,07 m/s²*

Por fim, a Figura 4-16 apresenta o PA obtido para a frequência do caminhar dos três pares de pedestres modelados para as simulações. Os dados mostram que realmente nenhum dos pares mantiveram um ciclo de passo constante e de forma sutil foram desviando de sua frequência inicial. Isso explica o porquê de a amplificação dinâmica ter sofrido redução em relação aos resultados determinísticos, os quais possuem dados de f_p constantes ao longo de toda a trajetória sobre a estrutura.

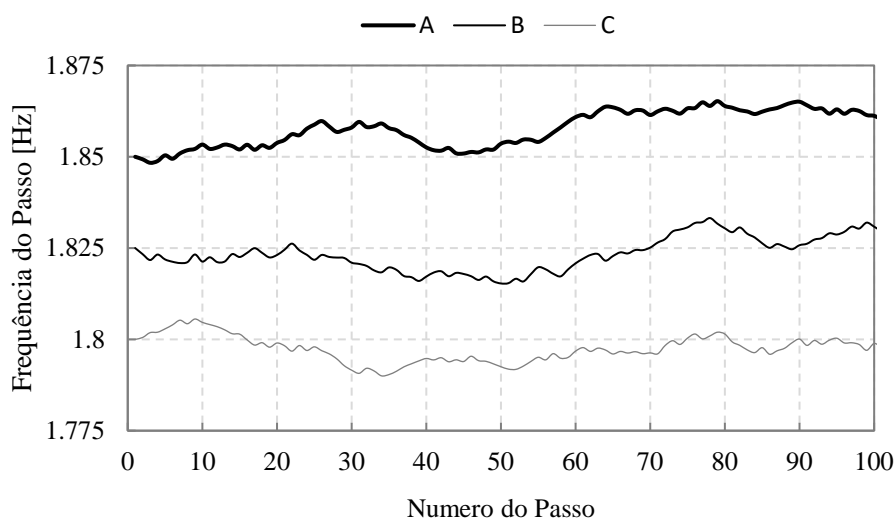


Figura 4-16: Frequências obtidas a cada passo do PA gerado durante as simulações para cada um dos pares de pedestres modelados (Fonte: Autor)

4.4 Avaliações de Desempenho de Passarelas Utilizando Modelos Probabilísticos de Carregamento

Nesta seção, os estudos tiveram como objetivo analisar de forma prática a utilização de modelos de carregamento probabilísticos para avaliação de desempenho de passarelas \

A partir das diretrizes fornecidas tanto pelo guia SÉTRA (2006) quanto pela norma ISO 10137 (ISO, 2007), avaliações foram feitas através de vasta gama de cenários, considerando faixas de valores para parâmetros físicos de passarelas e densidades de carregamento. A partir disso, buscou-se ter uma melhor compreensão de quais cenários são mais apropriados de se aplicar as variabilidades inter-sujeito, intrasujeito ou ambos os casos, a fim de se obter uma otimização em análises de modo geral. As modelagens de variabilidade intrasujeito consideraram o método de PA, a fim de registrar um uso prático da ferramenta e tirar conclusões sobre sua aplicabilidade em cenários de análises de ELS.

Em todos os casos, as acelerações máximas para um percentil de 95 das amostragens foram utilizadas como referência para avaliar o desempenho das estruturas. O critério de convergência utilizado para tais análises encontra-se descrito na Seção 4.1. A seguir, serão descritas a matriz de casos utilizada para as análises, as condições de contorno para os modelos de carregamento e uma análise compreensiva dos resultados obtidos.

4.4.1 Condições de contorno para os modelos de carregamento

As análises de serviço realizadas consideraram os três modelos de carregamento apresentados neste trabalho: MF (Seção 2.4.1), MT e MC (Seção 2.4.2). Para cada um dos modelos, dois casos de variabilidade foram considerados: o primeiro, chamado de “Caso 1”, considerou somente a inter-sujeito, enquanto o segundo, chamado de “Caso 2”, considerou a inter- e a intrasujeito juntas.

A variabilidade inter-sujeito, para cada pedestre modelado, foi preconizada por: ŽIVANOVIĆ *et al.* (2007), onde aplicou-se distribuições de probabilidade para os parâmetros de caminhada f_p , l_p e ϕ_j ; e por KERR (1998), que definiu FADs para sinais de força geradas pelo caminhar.

A variabilidade intrasujeito foi modelada com base o método de PA, com isso, a transição média μ_S para cada pedestre foi gerada aleatoriamente com base em uma distribuição uniforme $\mu_S \rightarrow DU(0,5 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3})$ e um coeficiente de variância CV_S de 50%. A escolha dessa faixa de valores foi feita com base nas análises de sensibilidade descritas na Seção 4.2, e na calibração dos modelos probabilísticos apresentada na Seção 4.3. O valor de $\mu_S = 0,5 \times 10^{-3}$ representou um pedestre que mantém um ciclo de caminhada bastante estável em relação a f_{p_0} , enquanto $\mu_S = 5 \times 10^{-3}$ representa um ciclo mais instável e que esteja sofrendo a influência de fatores externos de forma mais contundente. No que diz respeito à otimização de simulações, conforme visto na Seção 4.3, valores de μ_S maiores não são relevantes para a amplificação dinâmica.

No que diz respeito às simplificações de modelagem: todos os pedestres foram considerados ter 700 N de peso; a altura de todos os pedestres foi considerada 1,73 m (NCD-RisC, 2016) para MC; o comprimento do passo l_p manteve-se constante ao longo de toda a travessia; todos os pedestres foram modelados com 1 m de distância uns dos outros; e não foram consideradas interferências físicas e fatores psicológicos entre os pedestres. A Tabela 4-10 apresenta em resumos as condições de contorno para a modelagem dos pedestres utilizados nas análises de ELS.

Tabela 4-10: Distribuições de probabilidade e valores escolhidos para a modelagem da variabilidade nos parâmetros que definem o caminhar humano para as análises de ELS

Parâmetro	Descrição	Distribuição de Probabilidade / Valor
f_{p_0}	Frequência do Passo Inicial	$DN(1.87 \text{ Hz}, CV = 10\%)$
l_{p_0}	Comprimento do Passo Inicial	$DN(0.71 \text{ m}, CV = 10\%)$
ϕ_1	Ângulo de Fase para 1º Harmônico	Assumido igual a 0
ϕ_2	Ângulo de Fase para 2º Harmônico	$DU(-\pi, \pi)$
ϕ_3	Ângulo de Fase para 3º Harmônico	Assumido igual a ϕ_2
α_1	FAD para 1º Harmônico	$DN(\mu_{\alpha_1}, CV = 16\%)$
α_2	FAD para 2º Harmônico	$DN(0.07, CV = 40\%)$
α_3	FAD para 3º Harmônico	$DN(0.05, CV = 40\%)$
P	Peso do pedestre	700 N
H	Altura do pedestre	1,73 m
μ_S	Transição Média do Passo	$DU(0,5 \times 10^{-3} \text{ Hz}, 5 \times 10^{-3} \text{ Hz})$
CV_S	Variância da Transição	50 %

4.4.2 Aspectos de modelagem para as avaliações

A fim de compreender a aplicação dos modelos de carregamento com variabilidades inter- e intrasujeito, foi necessário ter uma visibilidade de respostas dinâmicas em diferentes cenários, os quais consideraram a variação da densidade de pedestres e dos parâmetros físicos de passarelas.

O guia SÉTRA (2006) classifica passarelas em classes a partir do nível de densidades de pedestres, conforme mostrado pela Tabela 2-6. Por isso, três densidades foram consideradas para os cenários, sendo elas: 0,2 pedestre/m² (Classe III), 0,5 pedestre/m² (Classe II) e 1,0 pedestre/m² (Classe I).

No que diz respeito aos parâmetros físicos de passarelas, a estrutura modelada por REZENDE *et al.* (2020) foi utilizada como base, porém a sua frequência natural do 1º modo de vibração f_n e a sua taxa de amortecimento ξ_n sofreram variações dentre os cenários. Foi feita a escolha de três valores para cada parâmetro: para frequência do primeiro do modo de

vibração da estrutura, foi considerado $f_n = \{2,00, 4,00, 6,00\}$ Hz, enquanto para o amortecimento foi considerado $\xi_n = \{0,25, 0,50, 1,50\}$ %.

Os valores de f_n correspondem a faixas comumente utilizadas para análises de vibração considerando os diferentes harmônicos da força gerada por um ciclo de caminhar comum. Os valores de ξ_n foram escolhidos com base na Figura 4-17, que apresenta uma base de dados que correlacionam valores reais de f_n e ξ_n para passarelas de diferentes tipos de materiais.

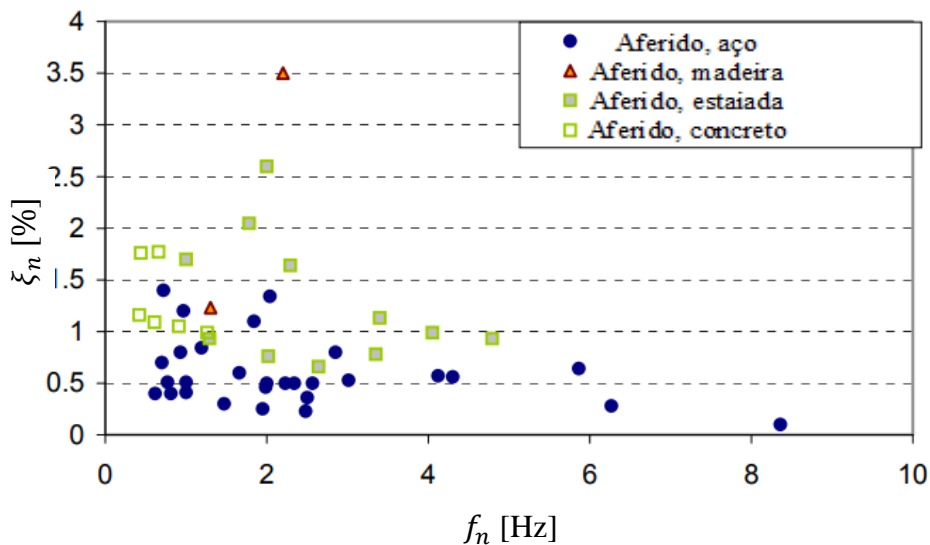


Figura 4-17: Taxas de amortecimento ξ_n medidas em cargas de serviço com a variação da frequência natural f_n (Fonte: HEINEMEYER *et al.* (2009) – Adaptado)

4.4.3 Análise abrangente dos resultados de desempenho

Com a definição das condições de contorno dos modelos de carregamento e dos cenários de simulação, o estudo das respostas dinâmicas pôde ser realizado. Considerando os três modelos de carregamento e as combinações entre d , f_n e ξ_n descritas na seção anterior, um total de 162 cenários foram criados e, para cada um deles, a aceleração máxima para um percentil de 95 das amostragens foi utilizada como referência para avaliar o desempenho das estruturas.

Conforme descrito na Seção 2.6, o guia SÉTRA (2006) considera os níveis de conforto a partir de acelerações máximas instantâneas ($a_{max,95}$), enquanto a ISO 10137 (ISO, 2007) considera acelerações máximas em RMS ($RMSa_{max,95}$). Com isso, cada cenário gerou estes dois dados de saída considerando o critério de convergência apresentado na Seção 4.1. A

seguir, os resultados são apresentados e interpretados considerando tanto o guia SÉTRA (2006) quanto a norma ISO 10137 (ISO, 2007).

4.4.3.1 Avaliações conforme o guia SÉTRA (2006)

Os critérios de conforto preconizados pelo guia SÉTRA (2006) foram utilizados conforme Tabela 2-4. Os resultados foram apresentados através de gráficos de barra, que representam os valores de $a_{max,95}$ obtidos para os 162 cenários. As Figuras Figura 4-18, Figura 4-19 e Figura 4-20 apresentam as análises de conforto para MF, MT e MC respectivamente.

Cada gráfico apresenta linhas tracejadas, que delimitam os níveis de desconforto preconizados pelo guia. A linha verde representa o limite para um cenário ser aprovado tendo desconforto desprezível ($a_{max,95} \leq 0,5 \text{ m/s}^2$); a linha amarela delimita desconforto mínimo ($0,5 \text{ m/s}^2 < a_{max,95} \leq 1,0 \text{ m/s}^2$); por fim, a linha vermelha representa o limiar entre um desconforto médio ($1 \text{ m/s}^2 < a_{max,95} \leq 2,5 \text{ m/s}^2$) e o máximo ($a_{max,95} > 2,5 \text{ m/s}^2$).

As Tabela 4-11, Tabela 4-12 e Tabela 4-13 apresentam as diferenças percentuais Δ entre $a_{max,95}$ obtidos para os Casos 1 e 2 considerando MF, MT e MC respectivamente. Valores positivos mostram que a variabilidade intrasujeito gerou uma redução na amplificação dinâmica em relação ao Caso 1, no qual somente a variabilidade inter-sujeito foi considerada.

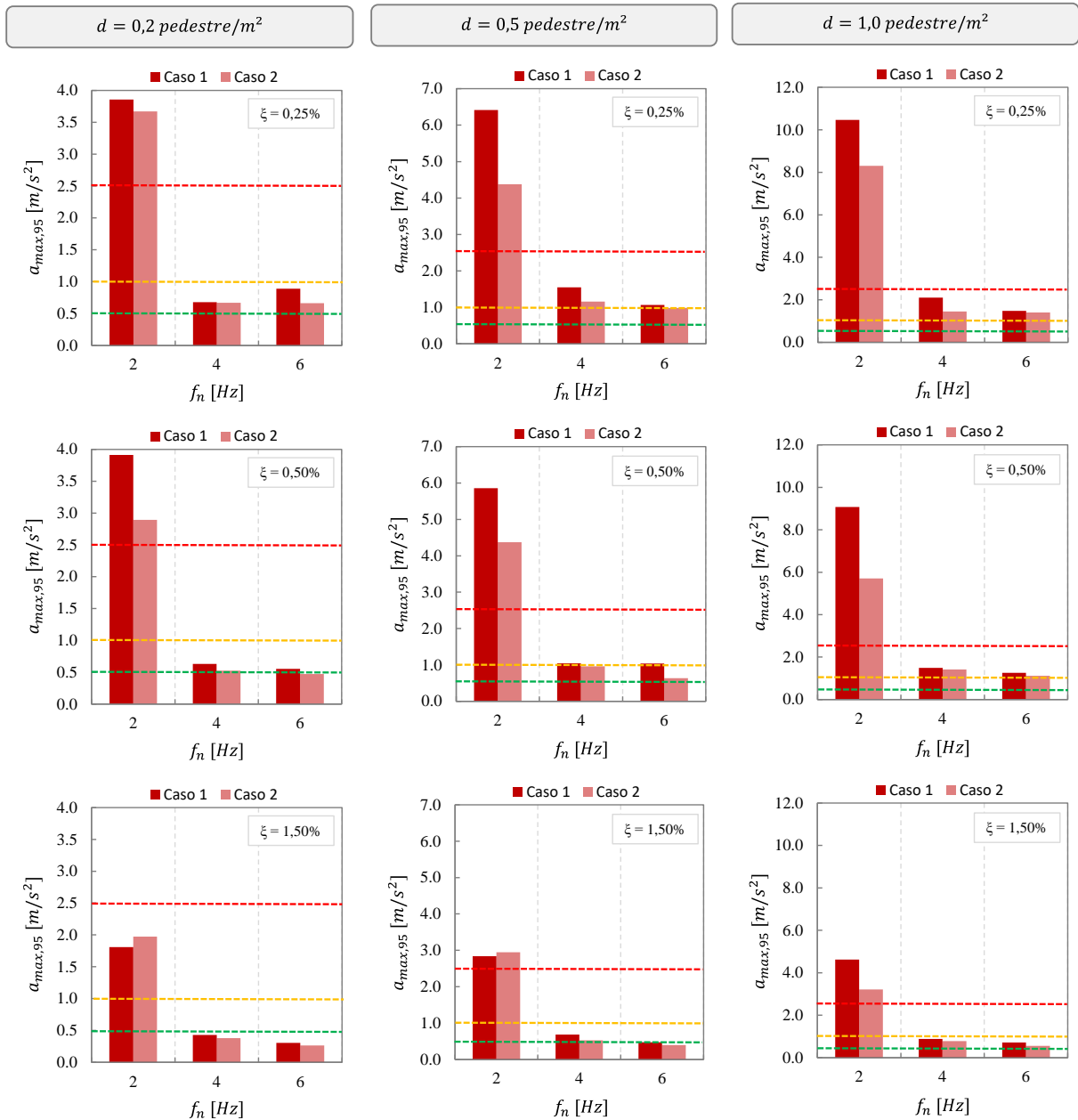


Figura 4-18: Análises de performance considerando critérios de conforto do guia SÉTRA (2006) para o Modelo de Força (Fonte: Autor)

Tabela 4-11: Diferenças percentual [%] entre os valores de $a_{max,95}$ dos Casos 1 e 2 para MF

$d = 0,2 \text{ pedestre/m}^2$				$d = 0,5 \text{ pedestre/m}^2$				$d = 1,0 \text{ pedestre/m}^2$			
$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %	$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %	$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %
2,00 Hz	5	35	-8	2,00 Hz	47	34	-4	2,00 Hz	26	59	44
4,00 Hz	1	20	13	4,00 Hz	34	9	31	4,00 Hz	45	5	12
6,00 Hz	34	17	15	6,00 Hz	8	63	19	6,00 Hz	5	13	30
Δ médio:	14	24	6	Δ médio:	29	35	15	Δ médio:	25	26	29

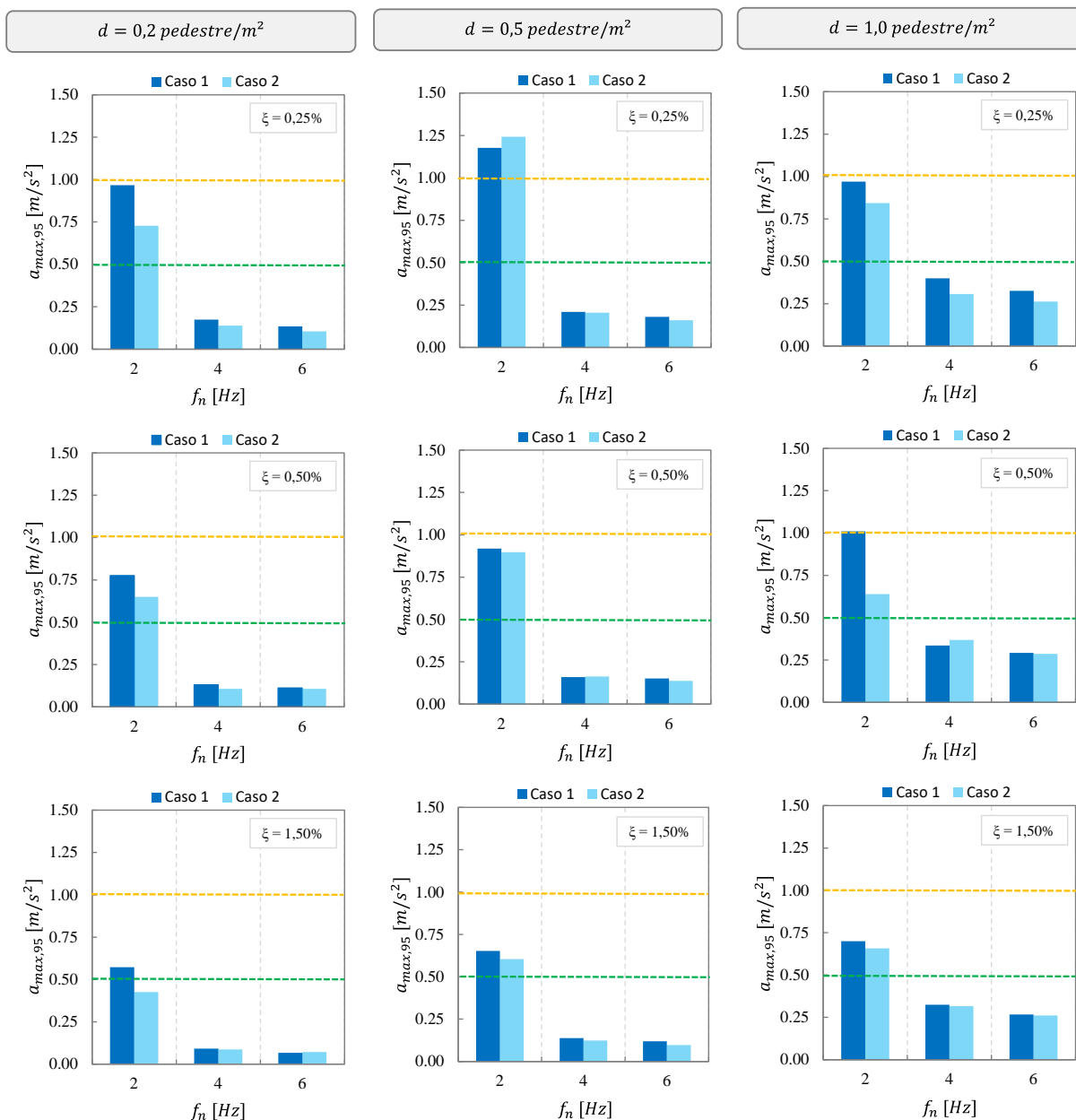


Figura 4-19: Análises de performance considerando critérios de conforto do guia SÉTRA (2006) para TOSO (2016) (Fonte: Autor)

Tabela 4-12: Diferenças percentual [%] entre os valores de $a_{max,95}$ dos Casos 1 e 2 para MT

$d = 0,2 \text{ pedestre/m}^2$				$d = 0,5 \text{ pedestre/m}^2$				$d = 1,0 \text{ pedestre/m}^2$			
$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %	$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %	$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %
2,00 Hz	33	19	34	2,00 Hz	-5	2	8	2,00 Hz	15	58	7
4,00 Hz	25	22	5	4,00 Hz	2	-2	12	4,00 Hz	30	-9	3
6,00 Hz	27	5	-7	6,00 Hz	12	10	24	6,00 Hz	24	2	2
Δ médio:	28	15	11	Δ médio:	3	3	15	Δ médio:	23	17	4

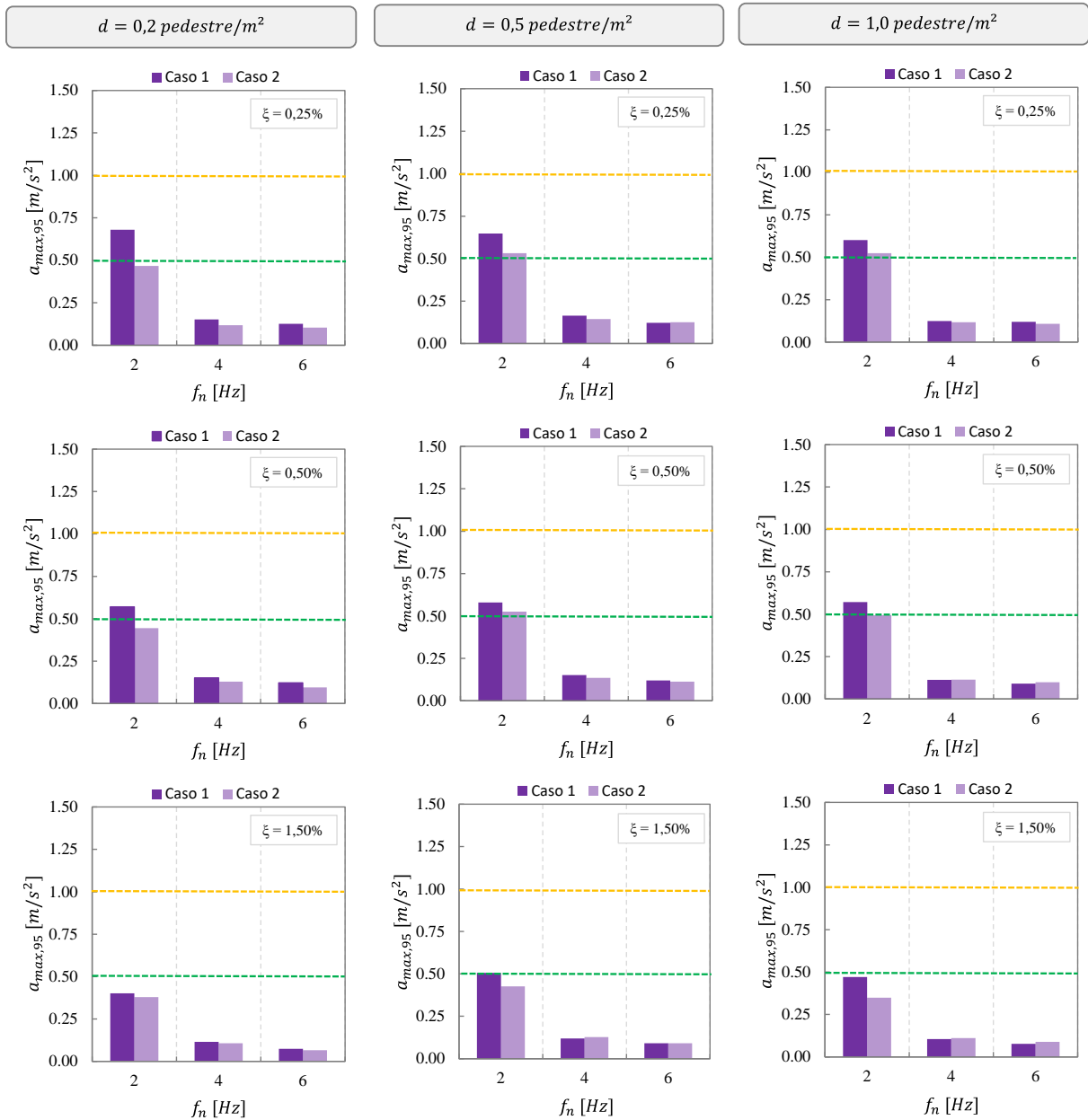


Figura 4-20: Análises de performance considerando critérios de conforto do guia SÉTRA (2006) para COSTA (2019) (Fonte: Autor)

Tabela 4-13: Diferenças percentual [%] entre os valores de $a_{max,95}$ dos Casos 1 e 2 para MC

$d = 0,2 \text{ pedestre/m}^2$				$d = 0,5 \text{ pedestre/m}^2$				$d = 1,0 \text{ pedestre/m}^2$			
$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %	$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %	$f_n \setminus \xi_n$	0,25 %	0,5 %	1,5 %
2,00 Hz	46	28	6	2,00 Hz	22	10	19	2,00 Hz	15	16	35
4,00 Hz	29	17	7	4,00 Hz	13	11	-7	4,00 Hz	6	-1	-5
6,00 Hz	21	29	12	6,00 Hz	-3	7	0	6,00 Hz	11	-8	-13
Δ médio:	32	25	8	Δ médio:	11	10	4	Δ médio:	11	2	5

Devido ao grande número de resultados obtidos por cada cenário, uma lista das principais conclusões é apresentada a seguir para melhor interpretação das análises:

- Em todos os cenários, aumento de ξ_n gerou redução nas amplificações dinâmicas de forma esperada devido ao acréscimo de amortecimento no sistema;
- Nota-se que o aumento de d possui influência diretamente proporcional sob amplificação dinâmica bem mais relevante para MF em relação a MT e MC, pelo fato de a IPE não ser considerada naquele tipo de modelo;
- As respostas obtidas para $f_n = 2,00$ Hz mostram os maiores valores de $a_{max,95}$ dentre os cenários, pois este valor se encontra bem próximo à faixa de frequência do caminhar humano. Portanto, a probabilidade de o sistema entrar em ressonância é aumentada para estes casos. Adicionalmente, os dados de $a_{max,95}$ para MF considerando $f_n = 2,00$ Hz apresentam ordens de grandeza fora da realidade. Isso mostra que simulações feitas com este tipo modelo têm a tendência de serem mais conservadoras e não representam bem o real comportamento da estrutura. Em contrapartida, MT e MC apresentaram amplificações reduzidas devido à consideração da IPE, resultando em $a_{max,95}$ mais aceitáveis. Vale mencionar o cenário para $d = 1,0$ pedestre/m², $\xi_n = 0,25\%$, $f_n = 2$ Hz e o Caso 1, no qual obteve-se $a_{max,95} = 10,5$ m/s² para MF, $a_{max,95} = 0,969$ m/s² para MT e $a_{max,95} = 0,601$ m/s² para MC;
- Os valores $a_{max,95}$ obtidos para estruturas com $f_n = \{4,00, 6,00\}$ Hz possuem menores ordens de grandeza, visto que estes valores estão afastados da faixa de frequência do primeiro harmônico da força do caminhar humano. Este fato se correlaciona com a Tabela 2-5, que mostra os níveis de conforto a serem obtidos dependendo de f_n . Grande parte de $a_{max,95}$ se encontraram na faixa de desconforto mínimo e aceitável, tendo somente resultados pontuais de médio desconforto para $d = \{0.5, 1.0\}$ pedestre/m². Isto ocorreu por conta do número elevado de pedestres;
- Nota-se que MC gera maiores níveis de amortecimento em relação a MT. Isto é evidente pela diferença entre os valores de $a_{max,95}$.
- Considerando comparações entre os Casos 1 e 2, 81 cenários foram analisados tendo em vista diferentes valores de d , f_n e ξ_n . No total, 85% dos cenários obtiveram

redução na amplificação dinâmica ao considerar a variabilidade intrasujeito. A média dos Δ para MF foi de 23%, para MT obteve-se 13% e para MC obteve-se 12%. Isso mostra que análises MF apresentaram uma maior tendência de ter a influência do PA na amplificação dinâmica.

- Nenhuma correlação entre a redução de $a_{max,95}$ devido ao método de PA e os valores de f_n e ξ_n foi encontrada, bem como para os valores de d considerando MF e MT.
- Para MC, o aumento do número de pedestres na passarela reduziu a influência do PA sobre as amplificações dinâmicas. Um média de Δ em 22% para $d = 0,2$ pedestre/m², 8% para $d = 0,5$ pedestre/m² e 7% para $d = 1,0$ pedestre/m².

Conforme constatado anteriormente, o método de PA possui influência na redução da amplificação dinâmica de estruturas. Devido a isso, buscou-se analisar o número de cenários que obtiveram um nível de conforto aceitável perante o guia SÉTRA (2006). Foram feitas comparações entre os Casos 1 e 2 de variabilidade, a fim de demonstrar a relevância do método de PA nas simulações.

O Anexo B deste trabalho apresenta todos os dados de $a_{max,95}$ obtidos nos 162 cenários, destacando os níveis de conforto a partir das indicações por cor preconizadas pelo guia SÉTRA (2006) (vide Tabela 2-5). A partir deste compilado de dados, uma matriz de gráficos considerando os valores d e f_n como referência foi elaborada. Cada gráfico está considerando os três modelos estudados (MF, MC e MT) e $\xi_n = \{0.25, 0.50, 1.50\}$ %, ou seja, 9 cenários ao todo. A Figura 4-21 apresenta a quantidade de cenários aprovados para os Caso 1 a partir da cor verde-escuro, já para o Caso 2, utilizou-se a cor verde-claro. As cores acinzentadas representam a parcela de cenários que não obtiveram nível de conforto aceitável.

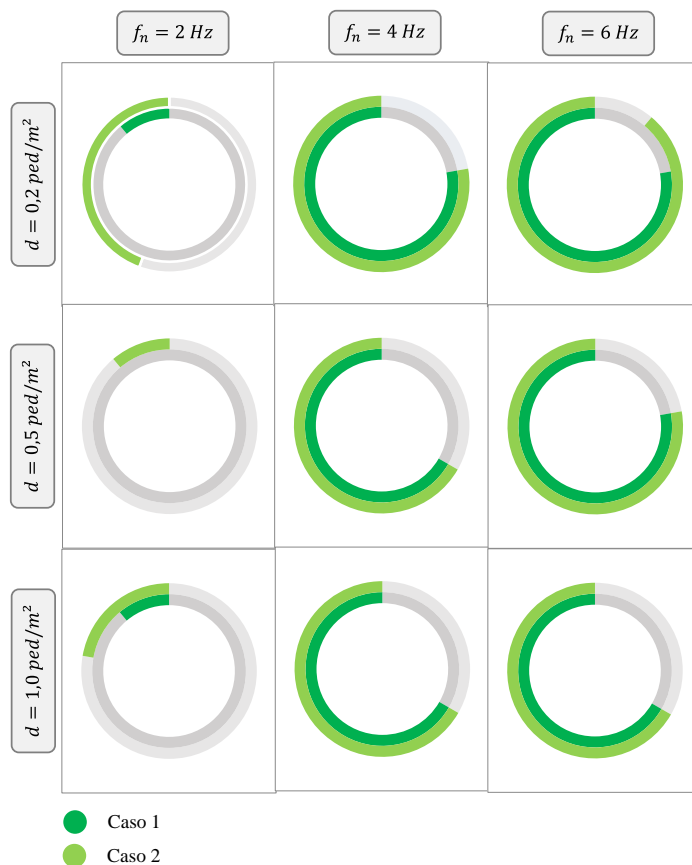


Figura 4-21: Matriz de gráficos para d e f_n , a qual apresenta uma comparação entre os Casos 1 e 2 de variabilidade, considerando o número de cenários com níveis de desconforto desprezíveis segundo SÉTRA (2006) (Fonte: Autor)

Dentre os gráficos, destaca-se aquele com a combinação $f_n = 2,00 \text{ Hz}$ e $d = 0,2 \text{ pedestre/m}^2$, onde nota-se que somente um cenário obteve aprovação utilizando somente a variabilidade inter-sujeito (Caso 1). Entretanto, um aumento considerável de cenários aprovados ocorre a partir implementação tanto da variabilidade inter-sujeito quanto da intrasujeito. A Tabela 4-14 apresenta em destaque os resultados obtidos para a combinação descrita. Nota-se que o aumento de casos aprovados ocorreu por conta a aplicação do método de PA em MC e MT, onde este teve todos os casos aprovados nos critérios de conforto, e aquele obteve melhora no cenário com $\xi_n = 1,50\%$.

Tabela 4-14: Resultados de $a_{max,95}$ obtidos para cenários considerando $d = 0,2$ pedestre/m², $f_n = 2$ Hz e $\xi_n = \{0,25, 0,50, 1,50\}$ % com destaque aos níveis de conforto segundo o guia SÉTRA (2006)

Tipo de Modelo	Frequência Natural f_n :	$a_{max,95}$ [m/s ²]		
		2,00 Hz		
	Taxa de Amortecimento ξ_n :	0,25 %	0,50 %	1,50 %
Densidade de Pedestres = 0,2 pedestre/m ²				
MF	Caso 1	3,86	3,91	1,81
MT	Caso 1	0,966	0,775	0,572
MC	Caso 1	0,680	0,571	0,401
PAMF	Caso 2	3,67	2,89	1,97
PAMT	Caso 2	0,728	0,650	0,426
PAMC	Caso 2	0,466	0,445	0,379

As combinações $f_n = 2$ Hz com $d = \{0,5, 1,0\}$ pedestre/m² também obtiveram melhora no número de casos aprovados, mas não em um nível relevante devido ao elevado número de pedestres e ao valor de f_n ser próximo da faixa de frequência do caminhar. É importante ressaltar que, para $f_n = \{4,00, 6,00\}$ Hz, a aplicação do método de PA não foi relevante em melhorar as condições de conforto, visto que o Caso 1 e Caso 2 obtiveram um número igual de cenários aprovados.

4.4.3.2 Avaliações conforme norma ISO 10137

Conforme descrito na Seção 2.6.2, a norma ISO 10137 define seu critério de conforto para análises de ELS com base em um valor de aceleração máxima em RMS, o qual é obtido a partir da frequência natural f_n da estrutura analisada. Dentre os 162 cenários já descritos, tem-se a consideração $f_n = \{2,00, 4,00, 6,00\}$ Hz, portanto, os valores máximos de aceleração para cada caso devem ser $RMSa_{max} = \{0,42, 0,30, 0,30\}$ m/s².

O Anexo C deste trabalho contempla todos os valores de $RMSa_{max,95}$ obtidos para os cenários, apresentando, através da cor verde, as acelerações que estão abaixo do limite de conforto preconizado pela ISO 10137 ($RMSa_{max,95} \leq RMSa_{max}$) e, em vermelho, aquelas que estão acima ($RMSa_{max,95} > RMSa_{max}$).

No que diz respeito às conclusões destes resultados, as mesmas considerações feitas para as análises considerando o guia SÉTRA (2006) podem ser assumidas. Porém,

considerações adicionais devem ser feitas a respeito do conservadorismo da norma e como a implementação do método de PA influenciou as amplificações dinâmicas e a aprovação dos cenários. Para isso, outra matriz de gráficos foi construída seguindo os mesmos moldes daquela apresentada pela Figura 4-21 na seção anterior.

A Figura 4-22 apresenta a quantidade de resultados aprovados para diferentes cenários, os quais possuem d e f_n como referência. Cada gráfico considera os três modelos estudados (MF, MC e MT) e $\xi_n = \{0,25, 0,50, 1,50\}$ %, ou seja, 9 cenários ao todo. Além disso, apresenta a quantidade de cenários aprovados para o Caso 1, a partir da cor verde-escuro, e para o Caso 2, a partir da cor verde-claro. As cores acinzentadas representam a parcela de cenários, que não obtiveram nível de conforto aceitável.

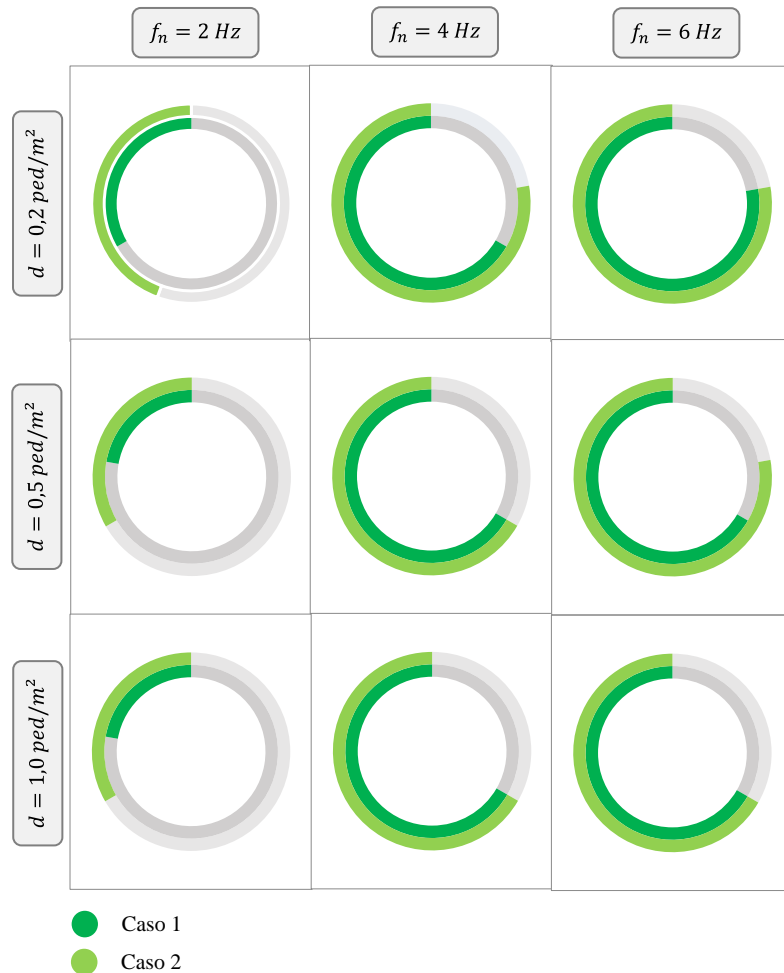


Figura 4-22: Matriz de gráficos para d e f_n , a qual apresenta uma comparação entre os Casos 1 e 2 de variabilidade, considerando o número de cenários com $RMSa_{max,95} \leq RMSa_{max}$ conforme ISO (2007) (Fonte: Autor)

Mais uma vez, nota-se que a variabilidade intrasujeito contribuiu para o aumento do número de cenários, porém, não de forma tão expressiva quanto às avaliações considerando o guia SÉTRA (2006). Somente para $f_n = 2,00$ Hz, todas as três densidades de pedestres obtiveram aumento de cenários aprovados, pelo fato de a variabilidade via PA ser mais influente em estruturas com f_n próxima a frequência do passo humano.

Vale ressaltar que, comparando com as avaliações pelo guia SÉTRA (2006), um maior número de cenários foi aprovado considerando a norma ISO 10137 (ISO, 2007). Para $f_n = \{4,00, 6,00\}$ Hz, o número de cenários aprovados foi maior devido a menor probabilidade de o carregamento humano entrar em ressonância com a estrutura. Como consequência, a variabilidade intrasujeito não foi tão influente nestes casos.

De modo geral, nota-se que a norma possui características menos conservadoras em relação ao guia SÉTRA (2006) considerando $f_n = 2,00$ Hz, por outro lado, ambas as normas obtiveram um número de cenários aprovados bem parecidos ao considerar estruturas com frequências naturais mais afastadas da frequência típica do caminhar humano.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou um panorama geral sobre estudos e desenvolvimento de modelos de carregamento probabilísticos para análises dinâmicas de passarelas, destacando suas características e seus benefícios para diferentes tipos de cenários. Foi compreendido que a utilização de métodos estatísticos é uma abordagem bastante eficaz para representar sistemas complexos como os de IPE. Isso tem como consequência, análises dinâmicas menos conservadoras em relação a métodos determinísticos, contribuindo para um processo de dimensionamento estrutural mais otimizado e assertivo.

Neste campo de estudo, dois tipos de variabilidade são primordiais para a modelagem de um carregamento probabilístico: a inter- e intrasujeito. O primeiro demonstra a variação de características entre indivíduos de um grupo, enquanto o segundo mostra a variação de características para um só indivíduo durante um período. Tais conceitos foram estudados e utilizados para as simulações presentes neste trabalho.

Com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento da modelagem de carregamentos humanos, o método de PA foi utilizado para representar a variabilidade intrasujeito. O método buscou simular as incertezas presentes no ciclo do caminhar, variando de forma sutil os valores de f_p a cada passo dado pelo pedestre. As variações foram feitas com base em parcelas randômicas chamadas de transições gaussianas S_i , as quais tem a chance de aumentar ou diminuir f_p ao longo da simulação.

Não existem muitas referências na literatura, que apresentam a utilização do método em modelagens de carregamento humano. Dessa forma, a metodologia foi apresentada detalhadamente através de explanações teóricas e de utilizações práticas da ferramenta, em análises paramétricas, correlações teórico-experimentais e análises no ELS considerando uma vasta matriz de casos.

A fim de compreender a influência do método de PA em respostas dinâmicas de passarelas, análises de sensibilidade sobre a metodologia foram realizadas. Os parâmetros que

definem um PA são a transição média μ_S e o coeficiente de variância CV_S da distribuição normal que fornece a transição gaussiana.

As simulações foram caracterizadas por cenários críticos, nos quais a ressonância entre o carregamento e a estrutura teria grandes chances de ocorrer, visto que foi considerado $f_{p_0} = f_n$ para os casos. Os resultados mostraram que maiores valores de μ_S possuem a tendência de gerar menores amplificações dinâmicas, visto que a variação de f_p é maior. Em outras palavras, isso mostra que um modelo de pedestre atrelado a uma maior μ_S representará um ciclo do caminhar com menos chances de se manter estável em relação a f_{p_0} . Todavia, menores valores de μ_S podem representar um pedestre que está buscando manter um ciclo de caminhar estável, ou seja, com variações (transições) mais sutis.

Considerando aspectos físicos do caminhar, as transições S_i de um passo também não devem possuir uma ordem de grandeza elevada, visto que a modelagem não estaria representando um ciclo natural do caminhar. Isso é demonstrado por todas as curvas geradas pelas análises de sensibilidade, as quais se comportaram de forma assintótica, ou seja, não possuíram influência na amplificação dinâmica da estrutura até certo valor de μ_S .

Os dados obtidos pelas campanhas de ensaios experimentais conduzidas por REZENDE *et al.* (2020) contribuíram para a calibração dos modelos probabilísticos, que utilizam o método de PA. Foram feitas correlações teórico-experimentais para dois cenários de carregamento considerando MF e MT: um pedestre e seis pedestres caminhando em ressonância com uma passarela.

Pelas comparações, constatou-se que MT obteve resultados muito mais representativos tanto para as simulações determinísticas, quanto para os cenários considerando o método de PA devido à consideração da IPE. Além disso, as excelentes correlações obtidas pelas simulações apontam que o PA é capaz de representar as incertezas presentes no ciclo do caminhar, as quais são causadas por diferentes aspectos físicos discutidos neste trabalho. Adicionalmente, os resultados destacam a importância de considerar a variabilidade intrasujeito em modelagens de carregamento humano.

A partir dessas informações, o autor recomenda uma faixa de $\mu_S = [0,5 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3}]$ Hz e um CV_S de 50% para a modelagem da variabilidade intrasujeito utilizado PA. O valor de $\mu_S = 0,5 \times 10^{-3}$ representa um pedestre que mantém um ciclo de caminhada

bastante estável em relação a f_{p_0} (auxílio de um metrônomo, por exemplo), enquanto $\mu_S = 5 \times 10^{-3}$ representa um ciclo mais instável e que esteja sofrendo a influência de fatores externos de forma mais contundente.

Com objetivo de estudar de forma mais abrangente as variabilidades inter- e intrasujeito em análises dinâmicas, 162 cenários de simulações foram criados considerando MF, MT e MC; diferentes densidades de pedestres e valores de f_n e ξ_n . Cada cenário foi avaliado por meio de análises no ELS, as quais consideraram os critérios de conforto tanto do guia SÉTRA (2006), quanto da norma ISO 10137 (ISO, 2007).

Os resultados mostraram que a influência da variabilidade intrasujeito é mais relevante em cenários onde f_n possui um valor próximo a faixa comum de f_p (1,6 Hz – 2,4 Hz). Além disso, 85% dos cenários sofreram redução na amplificação dinâmica ao considerar o método de PA nos cálculos; com destaque ao MF, o qual obteve uma média de 23% de redução. Vale ressaltar, que nenhuma correlação com ξ_n foi encontrada, no que diz respeito à utilização do método de PA.

Como era esperado, o acoplamento do sistema característico de MBs resultou em amplificações dinâmicas bem menores em relação a MF. O aumento da densidade de pedestres gera um aumento na diferença percentual Δ , uma vez que o amortecimento do sistema gerado pela IPE aumenta. Vale destacar que, para o cenário para $d = 1,0$ pedestre/m², $\xi_n = 0,25\%$, $f_n = 2$ Hz, o Δ entre as $a_{max,95}$ de MF e MC chegou a 95%. Além disso, constatou-se que, em todos os casos, as amplificações dinâmicas utilizando MC foram menores que aquelas obtidas por MT.

No que diz respeito à comparação das avaliações de performance preconizadas pelo guia SÉTRA (2006) e pela norma ISO 10137 (ISO, 2007), nota-se que a variabilidade intrasujeito contribuiu para o aumento do número de cenários aprovados nos critérios de conforto em ambos os casos. Porém, a melhoria na performance foi mais relevante a partir das considerações do guia SÉTRA (2006). Destaca-se a combinação $f_n = 2,00$ Hz e $d = 0,2$ pedestre/m², onde se constatou que somente um cenário obteve aprovação utilizando somente a variabilidade inter-sujeito (Caso 1). Em contrapartida, houve um aumento considerável de cenários aprovados a partir da implementação tanto da variabilidade inter-sujeito quanto da intrasujeito nas simulações.

5.2 Sugestões de continuidade do trabalho

Como proposta de continuidade deste trabalho, sugere-se:

- Confrontar dados de frequência a cada ciclo de passo obtidos experimentalmente por VARELA (2004) com a metodologia de PA através de simulações probabilísticas;
- Estudar sincronização entre da vibração passarelas flexíveis e o ciclo de caminhar de pedestres. Talvez modelo de um pedestre com PA possa ser refinado de tal forma que as transições S_i sejam geradas com base na frequência de oscilação da estrutura durante a travessia. Recomenda-se a leitura da Seção 5.2 de RACIC *et al.* (2009);
- Considerar a influência de grupo na variação de f_p , fazendo com que o modelo de pedestre tenha noção do distanciamento de outros indivíduos que estejam ao seu redor. Recomenda-se a leitura de KAPERSKI (2017);
- Aplicar o método de PA em simulações de fadiga, a fim de investigar se os resultados terão níveis de fadiga maiores do que aqueles obtidos em métodos convencionais, ou se o método forneceria resultados menos conservadores.

6 REFERÊNCIAS

- ALM, S. E. “*Simple random walk*”. Uppsala University, Sweden. (2002)
- ALVES, E. C. *Optimization of structures subjected to dynamic load: deterministic and probabilistic methods* - REM, Int. Eng. J. vol.69 no.3 Ouro Preto July/Sept. (2016)
- BACHMANN, H. et al. *Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines*, Institut für Baustatik und Konstruktion, Isted, Basel, Birkhäuser. (1995)
- BACHMANN, H., AMMANN, W. *Vibrations in structures induced by man and machines*. Structural Engineering Documents No. 3e. Int. Association of Bridge and Structural Engineering (IABSE). Zürich, Switzerland. (1987)
- BACKMANN, H., AMMANN, W. *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines*, International Association of Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland. (1987)
- BLANCHARD, J., DAVIES, B.L., SMITH, J.W. *Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges*, Proceedings of the DOE and DOT TRRL Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges, Crowthorne, UK. (1977)
- BOCIAN et al. *Time-dependent spectral analysis of interactions within groups of walking pedestrians and vertical structural motion using wavelets*. Mech. Syst. Signal Process. 105, 502–523. (2018)
- BOGACHEV, L. V. *Random walks in random environments*. In Encyclopedia of mathematical physics, 353–371. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. (2006)
- BROWNJOHN, J., PAVIC, A., OMENZETTER, P. *A spectral density approach for modelling continuous vertical forces due to walking*. Can. J. Civ. Eng., 31, 65–77. (2004)
- BRUNET, O. et al. *Probabilistic Vibration Performance Assessment of a Long-Span Steel Footbridge*. Journal of Performance of Constructed Facilities. v36. (2022)
- BUDAEV, B.V, BOGY, D.B. *Analysis of one-dimensional wave scattering by the random walk method*. Journal of the Acoustic Society of America., 111(6):2555-2560. (2002)

CODLING, E.A, PLANK, M.J. BENHAMOU, S. *Random walk models in biology*. Journal of the Royal Society. 5, 813-814. (2008)

COSTA, N. P. A. *Interação Dinâmica Pessoa-Estrutura de Passarelas em Material Compósito*. Manaus, Brasil. (2013)

COSTA. N. P. A. *Modelo biodinâmico do caminhar humano tendo em vista a interação dinâmica pessoa-estrutura*. Tese (Doutorado Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Brasil. (2019)

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

GARCÍA-DIÉGUEZ, M., RACIC, V., ZAPICO-VALLE, J. *Complete statistical approach to modelling variable pedestrian forces induced on rigid surfaces*. Mech. Syst. Signal Process. 159, 107800 (2021)

GONZAGA, I. B. N. *Interação entre estrutura de passarela e multidão via uso de modelos biodinâmicos*. Tese (Mestrado Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Brasil. (2021)

HEINEMEYER, C., et al. *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*. KRC Scientific and Technical Reports, 1st Edition, (2009)

INMAN V.T.; Todd F., RALSTON H.J., *Human Walking, Williams and Wilkins, Baltimore, USA*. (1981)

INMAN, D.J. *Engineering vibration*. 3rd. ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA. (2008)

ISO 10137. *International Organization for Standardization. Vibration and shock Mechanical driving point impedance of the human body*. (2007)

JANSSEN, A.J.E.M.; van LEEUWAARDEN, J.S.H. *Cumulants of the maximum of the Gaussian random walk*. Stochastic Processes and their Applications, Volume 117, Issue 12, 1928-1959. (2007)

JONES, C. A.; REYNOLDS, P.; PAVIC, A. *Vibration Serviceability of Stadia Structures Subject to Dynamic Crowd Loads: A Literature Review*. Journal of Sound and Vibration, 330, pp. 1531-1566. (2011)

KAPERSKI, M., SAHNACI, C. *Serviceability of pedestrian structures*. Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, (2007)

KASPERSKI, M. *Realistic Simulation of a Random Pedestrian Flow*. X International Conference on Structural Dynamic, EUROODYN. Procedia Engineering 199, 2814-2819. (2017)

KERR, S.C. *Human Induced Loading on Staircases*, Ph.D. thesis, University of London, London, England. (1998)

KRAMER, H., KEBE, H.W.H. *Man-induced structural vibrations*. Der Bauingenieur 54 195–199, em Alemão. (1979)

KRUIS, F.E, et al. *Computational fluid dynamics based stochastic aerosol modelling: Combination of cell-based weighted random walk method and a constant-number Monte-Carlo method for aerosol dynamics*. Chemical engineering science. 70, 109-120. (2012)

LANGTANGEN, H. P., Linge, S. *Finite Difference Computing with PDEs: a modern software approach*. Springer Open, 1st Edition. (2017)

MATSUMOTO, Y., SATO, S., NISHIOKA, T., SHIOJIRI, H. *A study on dynamic design of pedestrian over-bridges*. Trans. JSCE, vol. 4, pp. 50-51. (1972)

MUHAMMAD, Z.O., REYNOLDS, P. *Probabilistic multiple pedestrian walking force model including pedestrian inter- and intrasubject variabilities*. Adv. Civ. Eng.: 9093037. (2020)

NAKAMURA, S. I.; FUJINO, Y. *Transversal horizontal vibration on a pedestrian cable stayed bridge*. Structural Engineering International, v. 12, n. 4, p. 295-300. (2002)

NCD-RisC. *A century of trends in adult human height*. eLife. 5. PMID 27458798. (2016)

- NIMMEN, K. et al. *Pedestrian-induced vibrations of footbridges: An extended spectral approach*. J. Bridge Eng. 25 (8): 04020058. (2020)
- NIMMEN, K. et al. *The impact of vertical human-structure interaction on the response of footbridges to pedestrian excitation*. Journal of Sound and Vibration (2017)
- PACHI, A., JI, T. *Frequency and velocity of people walking*. Structural Engineer. (2005)
- PEARSON, K. *The Problem of the Random Walk*. Nature 72, 294 (1905)
- PEDERSEN, L., FRIER, C. *Sensitivity of footbridge vibrations to stochastic walking parameters*. Journal of Sound and Vibration 329 (2010) 2683–2701
- PEDROZA, L. S. Universidade de São Paulo - *Método de Monte Carlos utilizando cálculos de energia total ab initio*. (2006)
- PIMENTEL, R. L. *Vibrational performance of pedestrian bridges due to human-induced loads*. Ph.D. thesis. Sheffield (UK): University of Sheffield. (1997)
- RAINER, J.H., PERNICA, G., ALLEN, D.E. *Dynamic loading and response of footbridges*, Canadian Journal of Civil Engineering 15, 66–71. (1988)
- REZENDE et al. *Evaluation of TMD performance in footbridges using human walking probabilistic models*. Vibration 4 (2): 323–340 (2021)
- REZENDE et al. *Vibration performance assessment of a long-span steel footbridge*. Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build. 1–13. (2020)
- REZENDE, F.A.; VARELA, W.D; CARVALHO, E.M.L. *Análise Dinâmica Numérica e Experimental de Passarela de Grande Vão Sob Ação do Caminhar de Pedestres - XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*. (2017)
- SACHSE, R., PAVIC, A., REYNOLDS, P. *Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd–structure dynamic systems*, Journal of Sound and Vibration, v. 274, p.461-480. (2004)

SAHNACI, C., KASPERSKI, M. *Simulation of random pedestrian flow*. In Proc., 8th Int. Conf. on Structural Dynamics, EURODYN, 1040–1047. Porto, Portugal: European Association for Structural Dynamics. (2011)

SAMPAIO, A.A.S. *Uma Introdução aos Delineamentos Experimentais de Pessoal Único - Interação em Psicologia*, 12(1), p. 151-164. (2008)

SAP2000 14 [Software]. Computers and Structures, Berkley, CA.

SEKIYA, N., NAGASAKI, H., ITO, H., FURUNA, T. *Optimal walking in terms of variability in step length*. Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy 26, 266–272. (1997)

SÉTRA. *Service d'Études techniques des routes et auto routes. Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*. (2006)

SHARAHBPOOR, E; PAVIC, A; RACIC, V. *Interaction of Mass-Spring-Damper Model of Walking Humans*. Structures Vol. 5 pp. 233-246. (2016)

SOLÍS, F.M. et al. *Design of a lowcost measurement system based on accelerometers for gait analysis*. Acta Scientiarum, v. 36, n. 1, p. 111-121. (2014)

TOSO, M. A. et al. *Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian-structure interaction in walking situations*. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 72-73, p. 590-606. (2015)

TOSO, M.A. *Instrumentação e Modelos Biodinâmicos para Simulação de Carregamentos em Estruturas Submetidas a Esforços da Caminhada Humana*. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica). Porto Alegre, Maio de 2016.

VARELA, W.D. *Modelo Teórico Experimental para Análise de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edifícios*. Tese (Doutorado Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Brasil. (2004)

VARELA, W.D.; PFEIL, M.S.; COSTA, N.P.A. *Experimental investigation on human walking loading parameters and biodynamic model*. J. Vib. Eng. Technol., 8, 883–892. (2020)

VIEIRA, R.M.T – *Identificação de indivíduos pela dinâmica do caminhar* –Tese (Mestrado Engenharia Elétrica) UFES, Brasil. (2009)

WALPOLE, R. E. et al. *Probability & Statistics for Engineers & Scientists* – Prentice Hall Ninth Edition. (2011)

WILLFORD, M. et al. *Predicting footfall-induced vibration: part 1, Structures & Buildings* 160, 65–72. (2007)

YAMASAKI, M., SASAKI, T., TORII, M. *Sex difference in the pattern of lower limb movement during treadmill walking*. *European Journal of Applied Physiology* 62, 103. (1991)

ZHANG, Z.F., CHEN, S.H. *Random eigenvalue problems in structural dynamics*. *Proceeding of ICAM*. (1989)

ŽIVANOVIĆ, S., PAVIC, A., REYNOLDS, P. *Human-structure Dynamic Interaction in Footbridges*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Bridges Engineering* 158. (2005)

ŽIVANOVIĆ, S., PAVIC, A., REYNOLDS, P. *Probability-based prediction of multi-mode vibration response to walking excitation*. *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 6, pp. 942-954. (2007)

ŽIVANOVIĆ, S., PAVIC, A., REYNOLDS, P. *Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review*. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74. (2005)

ANEXO A – FERRAMENTAS PARA ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Neste anexo será apresentado as ferramentas utilizadas para realiza as análises probabilísticas dos modelos, mostrando informações teóricas sobre o Método de Monte Carlo e tipos de Distribuições Contínuas.

A.1. MÉTODO DE MONTE CARLO

O Método de Monte Carlo (MMC) consiste em qualquer método de classe estatística que se baseiam em amostragens aleatórias, tendo o intuito de obter-se resultados numéricos. Tais resultados geralmente buscam representar casos que possuem variabilidade e que são difíceis de adequar-se a um certo padrão.

Para chegar neste estado, faz-se necessário a repetição de sucessivas simulações para calcular probabilidades heurísticamente, ou seja, não racionalmente. O procedimento tem sido utilizado há bastante tempo como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas, em que não é viável obter uma solução analítica.

Segundo PEDROZA (2006), o MMC parte da ideia de aproximar a média de certo parâmetro por uma soma de apenas um conjunto característico de pontos do espaço de amostragem. Esses são escolhidos randomicamente a partir de uma dada distribuição de probabilidade, que neste trabalho foram utilizados levando em conta parâmetros os quais definem o caminhar do pedestre.

No âmbito de análises dinâmicas estruturais o método é bastante difundido existindo pesquisas na literatura que abordem otimização de estruturas (ALVES, 2016), previsões de vibração devido à carga de multidão (ŽIVANOVIĆ *et al.* 2007), comportamento de lajes de edifícios em relação ao caminhar de pedestres, variabilidade em autovalores de modelos numéricos estruturais (ZHANG & CHEN, 1989), entre outros.

A.2. DISTRIBUIÇÕES CONTÍNUAS

Uma variável aleatória contínua é aquela que pode assumir inúmeros valores num intervalo de números reais e é medida numa escala contínua. Por exemplo, uma variável aleatória contínua deve ser definida entre os números reais 0 e 1, ou números reais não negativos ou, para algumas distribuições, qualquer número real. A frequência do caminhar, os ângulos de

fase de uma série, a velocidade ou qualquer elemento medido numa escala pode ser considerado uma variável aleatória contínua.

Existem duas funções associadas a cada variável contínua X : a função densidade de probabilidade, simbolizada por $f(X)$, e a função acumulativa de probabilidade, ou função de distribuição de probabilidade representada por $F(X)$. A função $f(X)$ é aquela cuja integral de $X = a$ até $X = b (a \leq b)$ dá a probabilidade de que X assumira valores compreendidos no intervalo (a, b) , ou seja,

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(X) dx \quad (1-1)$$

A função acumulativa de probabilidade $F(b)$ é dada por:

$$F(b) = Prob(X \leq b) = \int_{-\infty}^b f(X) dX \quad (1-2)$$

Qualquer função definida no campo real só pode ser considerada como uma função densidade de probabilidade se forem satisfeitas condições:

$$f(X) \geq 0 \quad (1-3)$$

para todo X e

$$F(X) = \int_{-\infty}^{\infty} X dX - 1 \quad (1-4)$$

A probabilidade de que a variável X assumira valores no intervalo (a,b) é dada por

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(X) dX = F(b) - F(a) \quad (1-5)$$

e a probabilidade de que a variável contínua X assumira um valor em particular b , por exemplo, é:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(X) dX = F(b) - F(a) = 0 \quad (1-6)$$

Existem diversas distribuições teóricas contínuas presentes na literatura. Para este trabalho, foram utilizadas somente as distribuições uniforme e normal. Nas seções seguintes, serão decorridas as propriedades matemáticas de cada um dos métodos, demonstrando seus conceitos básicos que foram de suma importância para a implementação do modelo de carregamento apresentado.

A.2.1 Distribuição uniforme

Uma das distribuições contínuas mais simples de todas as estatísticas é a distribuição uniforme contínua. Esta distribuição é caracterizada por uma função de densidade, portanto, a probabilidade é uniforme em um intervalo fechado. Probabilidades são simples de calcular para uma distribuição uniforme devido à natureza menos complexa da função densidade. Porém, deve-se levar em conta que a aplicação deste método é baseada na premissa de que a probabilidade de falha em um intervalo fixo é sempre constante. A Figura A-0-1 apresenta um exemplo de distribuição uniforme para variáveis aleatórias em um intervalo [1,3].

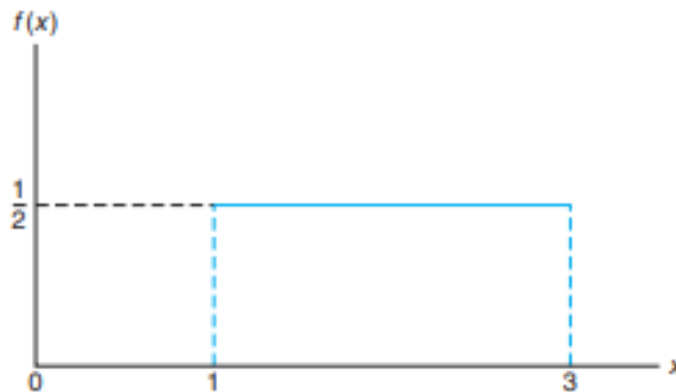


Figura A-0-1: Exemplo de função densidade para variáveis aleatórias entre 1 e 3. (Fonte: WALPOLE *et al.* (2011) - Adaptado)

A função densidade da distribuição uniforme para uma variável X para um intervalo $[A, B]$ é dada por:

$$f(x; A, B) = \begin{cases} \frac{1}{B - A}, & A \leq x \leq B, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1-7)$$

A.2.2. Distribuição normal

A distribuição normal, também conhecida como distribuição gaussiana, é de suma importância para a análise deste trabalho. Isso ocorre devido ao teorema central do limite, o qual garante que, mesmo quando a distribuição da população de eventos não segue uma distribuição normal, a distribuição da média dos dados converge para a distribuição normal conforme o tamanho da amostragem aumenta.

Como o caminhar do ser humano é um ciclo físico com uma grande complexidade, o teorema forneceu margem de trabalho, pois mesmo com a necessidade da geração de uma amostragem massiva, foi possível gerar a característica normal do problema.

No que se diz respeito à criação de uma amostragem, tem-se que uma variável aleatória X tem distribuição normal se sua função densidade de probabilidade for dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], x \in (-\infty, \infty) \quad (1-8)$$

Onde:

x é a variável aleatória;

μ é o valor médio do parâmetro analisado;

σ é o desvio padrão do parâmetro analisado.

A Figura A-0-2 apresenta o gráfico gerado pela função que define a distribuição normal. O pico da curva representa o valor médio escolhido para análise, enquanto a abertura da curva é gerada com base no desvio-padrão.

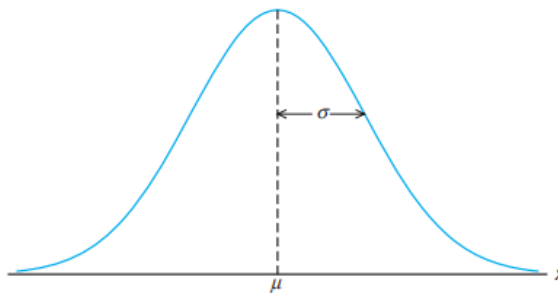


Figura A-0-2: Exemplo de uma média amostral. (Fonte: WALPOLE *et al.* (2011) - Adaptado)

ANEXO B – VALORES DE $a_{max,95}$ PARA AS ANÁLISES DE PERFORMANCE SEGUNDO O GUIA SÉTRA (2006)

Tipo de Modelo	Frequência Natural f_n :	$a_{max,95}$ [m/s ²]			$a_{max,95}$ [m/s ²]			$a_{max,95}$ [m/s ²]		
		2,00 Hz			4,00 Hz			6,00 Hz		
		Taxa de Amortecimento ξ_n :			Taxa de Amortecimento ξ_n :			Taxa de Amortecimento ξ_n :		
		0,25 %	0,50 %	1,50 %	0,25 %	0,50 %	1,50 %	0,25 %	0,50 %	1,50 %
Densidade de Pedestres = 0,2 pedestre/m ²										
MF	Caso 1	3,86	3,91	1,81	0,68	0,63	0,427	0,889	0,554	0,304
MT	Caso 1	0,966	0,775	0,572	0,174	0,131	0,091	0,134	0,112	0,067
MC	Caso 1	0,680	0,571	0,401	0,151	0,152	0,115	0,126	0,122	0,074
PAMF	Caso 2	3,67	2,89	1,97	0,67	0,52	0,380	0,662	0,472	0,264
PAMT	Caso 2	0,728	0,650	0,426	0,139	0,107	0,087	0,105	0,107	0,072
PAMC	Caso 2	0,466	0,445	0,379	0,118	0,130	0,107	0,104	0,095	0,066
Densidade de Pedestres = 0,5 pedestre/m ²										
MF	Caso 1	6,42	5,86	2,84	1,55	1,04	0,686	1,06	1,04	0,471
MT	Caso 1	1,18	0,919	0,652	0,210	0,160	0,138	0,181	0,151	0,119
MC	Caso 1	0,648	0,580	0,506	0,164	0,151	0,119	0,122	0,121	0,091
PAMF	Caso 2	4,38	4,37	2,95	1,16	0,960	0,525	0,987	0,637	0,396
PAMT	Caso 2	1,24	0,898	0,605	0,205	0,164	0,124	0,161	0,138	0,096
PAMC	Caso 2	0,532	0,526	0,426	0,145	0,136	0,127	0,125	0,113	0,091
Densidade de Pedestres = 1,0 pedestre/m ²										
MF	Caso 1	10,47	9,08	4,62	2,11	1,49	0,881	1,48	1,26	0,719
MT	Caso 1	0,969	1,01	0,700	0,399	0,336	0,325	0,326	0,292	0,267
MC	Caso 1	0,601	0,572	0,471	0,125	0,113	0,105	0,120	0,091	0,077
PAMF	Caso 2	8,30	5,71	3,22	1,45	1,42	0,783	1,41	1,12	0,554
PAMT	Caso 2	0,844	0,640	0,657	0,307	0,368	0,316	0,263	0,286	0,261
PAMC	Caso 2	0,523	0,494	0,349	0,117	0,114	0,111	0,108	0,099	0,089

ANEXO C – VALORES DE $RMSa_{max,95}$ PARA AS ANÁLISES DE PERFORMANCE SEGUNDO A ISO 10137

Tipo de Modelo	Taxa de Amortecimento ξ_n :	$RMSa_{max,95}$ [m/s ²]			$RMSa_{max,95}$ [m/s ²]			$RMSa_{max,95}$ [m/s ²]		
		2,00 Hz			4,00 Hz			6,00 Hz		
		0,25 %	0,50 %	1,50 %	0,25 %	0,50 %	1,50 %	0,25 %	0,50 %	1,50 %
Densidade de Pedestres = 0,2 pedestre/m ²										
MF	Caso 1	2,73	2,77	1,28	0,506	0,468	0,322	0,665	0,417	0,228
MT	Caso 1	0,689	0,555	0,409	0,128	0,096	0,067	0,099	0,083	0,050
MC	Caso 1	0,475	0,407	0,293	0,112	0,111	0,082	0,093	0,091	0,056
PAMF	Caso 2	2,59	2,04	1,38	0,501	0,387	0,281	0,497	0,351	0,196
PAMT	Caso 2	0,562	0,503	0,330	0,108	0,083	0,067	0,081	0,083	0,056
PAMC	Caso 2	0,361	0,344	0,293	0,091	0,100	0,083	0,080	0,073	0,051
Densidade de Pedestres = 0,5 pedestre/m ²										
MF	Caso 1	4,53	4,14	2,01	1,15	0,773	0,508	0,797	0,778	0,353
MT	Caso 1	0,845	0,655	0,471	0,162	0,118	0,104	0,137	0,110	0,0894
MC	Caso 1	0,469	0,418	0,369	0,121	0,116	0,091	0,0916	0,0888	0,0672
PAMF	Caso 2	3,11	3,08	2,07	0,871	0,717	0,371	0,730	0,476	0,297
PAMT	Caso 2	0,877	0,639	0,439	0,149	0,114	0,087	0,117	0,100	0,0678
PAMC	Caso 2	0,379	0,382	0,305	0,104	0,101	0,093	0,0885	0,0830	0,0663
Densidade de Pedestres = 1,0 pedestre/m ²										
MF	Caso 1	7,39	6,45	3,30	1,58	1,11	0,64	1,10	0,95	0,52
MT	Caso 1	0,690	0,723	0,514	0,301	0,251	0,234	0,241	0,218	0,179
MC	Caso 1	0,432	0,409	0,338	0,0904	0,0826	0,0727	0,0889	0,0661	0,0571
PAMF	Caso 2	5,89	4,04	2,27	1,07	1,01	0,57	1,03	0,84	0,41
PAMT	Caso 2	0,605	0,456	0,468	0,218	0,264	0,229	0,195	0,187	0,180
PAMC	Caso 2	0,389	0,351	0,252	0,0864	0,0830	0,0826	0,0804	0,0704	0,0660