



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Fábio Faria Feitosa

**Análise dinâmica de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto)
com aberturas na alma das vigas de aço**

Rio de Janeiro

2012

Fábio Faria Feitosa

**Análise dinâmica de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com
aberturas na alma das vigas de aço**



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

Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Coorientadores: Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Prof. Dr Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Rio de Janeiro

2012

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

F311 Feitosa, Fábio Faria.
Análise dinâmica de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com aberturas na alma das vigas de aço. / Fábio Faria Feitosa. - 2012
119f.

Orientador: José Guilherme Santos da Silva.
Coorientadores: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco;
Luciano Rodrigues Ornelas de Lima.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Aço - Estruturas - Dissertações. 3. Estruturas mistas de aço e concreto. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 624.016

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

Assinatura

Data

Fábio Faria Feitosa

Análise dinâmica de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com aberturas na alma das vigas de aço

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

Aprovado em: 27 de setembro de 2012.

Banca Examinadora:



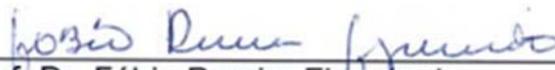
Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco (Coorientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (Coorientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Fábio Pereira Figueiredo
Pesquisador do Laboratório de Tecnologia em Computação Gráfica
TECGRAF/PUC-Rio



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

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a Deus, por permitir mais essa vitória, e as pessoas que estiveram ao meu lado pelos caminhos da vida, apoiando e acreditando em mim: Meus pais, minha esposa e minha filha.

AGRADECIMENTOS

Diretamente ou indiretamente, algumas pessoas se tornaram especiais nos últimos três anos da minha vida por participarem da conclusão deste trabalho. Algumas já de longas datas, e outras, recentemente. A importância em mencioná-las está ligada a forma especial que empregaram o seu expertise acadêmico e/ou pessoal nesta obra:

À minha esposa Leila Marcia pela cumplicidade e apoio moral e espiritual durante a minha vida e na elaboração desta dissertação. Sua paciência e propensão durante os meus momentos de desespero e nervosismo foi de suma importância para o alcance do êxito.

Ao meu orientador, professor e amigo José Guilherme Santos da Silva, pelos ensinamentos, paciência e dedicação de muito do seu tempo neste trabalho, embora tivesse envolvido na orientação de outros.

Aos meus coorientadores, Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco Luciano Rodrigues Ornelas de Lima e pela confiança, dedicação e amizade que não faltaram durante todo o meu período no curso de mestrado.

Ao engenheiro e coronel bombeiro-militar Luis Eduardo Coelho Sant'Anna pelo incentivo ao longo deste período, sempre me apoiando a seguir em frente.

Ao engenheiro Fabio Pereira Figueiredo pela ajuda na atualização do programa GFCD (Gerador de Função de Carregamento Dinâmico), de sua autoria, necessário para a geração dos carregamentos verticais aplicados no modelo para a realização desta pesquisa.

Aos professores e funcionários do PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, pelos conhecimentos compartilhados a cada dia durante o curso.

Aos amigos, e mestres recém-concludentes do PGECIV, Bruno Costa da Cruz, Bruno Dias Rimola, Sidiclei Gomes Gonçalves, Tassiana Duarte Rocha e Gilvan Lunz Debona, pelo apoio incondicional, principalmente, durante os estudos em grupo desenvolvidos antes das avaliações.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este caminho se tornasse mais fácil de ser percorrido.

“Para o sucesso, atitude é igualmente tão importante quanto capacidade”

Harry F. Banks

RESUMO

FEITOSA, Fábio Faria. *Análise dinâmica de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com aberturas na alma das vigas de aço*. 2012. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Limitações de altura têm sido impostas sobre edificações por regulamentos de zoneamento urbano e aspectos econômicos e estéticos. Além disso, para se proporcionar a passagem de tubulações de grande diâmetro sob vigas de aço, um pé-direito alto é normalmente requerido. Uma solução frequentemente utilizada em projeto diz respeito à abertura de furos na alma das vigas de aço para passagem das tubulações de serviço. Assim sendo, este trabalho de pesquisa objetiva a avaliação da resposta dinâmica de passarelas para pedestres, onde o projeto estrutural prevê a utilização de vigas celulares em aço. Objetiva-se verificar a influência das aberturas nas almas dessas vigas sobre a resposta dinâmica das passarelas. As ações dinâmicas representativas do caminhar dos pedestres são simuladas por meio de um modelo matemático que considera uma descrição espacial e temporal e, ainda, inclui o efeito do impacto do calcanhar humano. Os modelos estruturais investigados correspondem a passarelas mistas (aço-concreto) com 10m a 30m de extensão. São empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do programa Ansys. A resposta dinâmica das passarelas é obtida para duas situações distintas: vigas de alma cheia e vigas celulares. Uma avaliação crítica sobre a resposta dinâmica das passarelas possibilita verificar a influência dos furos nas almas das vigas metálicas, mediante a obtenção das acelerações de pico, focando aspectos associados ao conforto humano, considerando-se comparações com normas e recomendações de projeto.

Palavras-chave: Passarelas de pedestres; Dinâmica estrutural; Vigas celulares; Análise de conforto humano.

ABSTRACT

FEITOSA, Fábio Faria. *Dynamic analysis of mixed pedestrian walkways (steel-concrete) with holes in the steel beams web*. 2012. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Height limitations are frequent in multi-storey buildings due to zoning regulations, economic requirements and aesthetical considerations. Moreover, to provide for the passage of large diameter pipes in steel beams a high ceilings is usually required. The most adopted solution is the use of holes in the steel beams web in order to enable the passage of services. Therefore, the main objective of this research work is to evaluate the dynamic behaviour of footbridges, where structural design includes the use of cellular steel beams. The present study was carried out based on a load model developed to incorporate the dynamic effects induced by people walking. In this load model the transient effect due to the human heel impact was considered and the position of the dynamic load is changed according to individual position. The investigated structural model was based on a series of steel-concrete composite footbridges, with main spans varying from 10m to 30m. The proposed computational model, developed for the structural system dynamic analysis, adopted the usual mesh refinement techniques present in finite element method simulations, based on the Ansys program. The footbridges dynamic response was investigated considering two different design solutions: beams filled soul and cellular beams. The influence of the holes in the composite beams web over the footbridges dynamic response was investigated and the peak accelerations were obtained and compared with results supplied by design codes and recommendations aiming human comfort evaluations.

Keywords: Pedestrian footbridges; Structural dynamics; Cellular beams; Human comfort analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Vigas celulares com uma série de aberturas circulares na alma [1] ..	19
Figura 2	– Passarela biapoiada de 20 metros [2].....	20
Figura 3	– Passarela rolante sobre o Canal Bodogue [3].....	20
Figura 4	– Passarela rolante em Ivinghoe/Inglaterra [3].....	21
Figura 5	– Desabamento de uma passarela na Carolina do Norte/EUA [5]	22
Figura 6	– Efeito das vibrações [35] [36].....	28
Figura 7	– Aceleração de peico rcomendada para conforto humano em vibrações devidas a atividades humanas, ISO 2631/2 [38].....	31
Figura 8	– Curva base de vibrações para acelerações verticais	36
Figura 9	– Critérios normativos de aceleração limite para as passarelas ($a_{lim,vertical}$ em m/s^2).....	38
Figura 10	– Sistema idealizado com um grau de liberdade: (a) Componentes básicos; (b) Diagrama de corpo livre.....	44
Figura 11	– Geometria simplificada de uma passada [49]	47
Figura 12	– Força de contato de um passo e reação do piso [49]	48
Figura 13	– Amplitudes das componentes de Fourier para uma caminhada regular [13].....	49
Figura 14	– Comparação entre a função proposta para o caminhar e os resultados obtidos por Olhsson [13].....	52
Figura 15	– Força de excitação dinâmica descontínua	53
Figura 16	– Representação do passo do pedestre durante a caminhada [51]	55
Figura 17	– Função de carregamento dinâmico transversal vertical para uma pessoa caminhando (Debona [47])	60
Figura 18	– Seção transversal típica das passarelas com altura h	62
Figura 19	– Seção do perfil original metálico adotado nas passarelas	62
Figura 20	– Vigas alveolares.....	64
Figura 21	– Fabricação de vigas celulares: (a) Corte da alma; (b) Soldagem [1]..	65
Figura 22	– Vigas celulares [1].....	66
Figura 23	– Geometria flexível do diâmetro e do espaçamento para a fabricação de vigas celulares [4]	67

Figura 24	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 10m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	73
Figura 25	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 12,5m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	73
Figura 26	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 15m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	73
Figura 27	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 17,5m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	74
Figura 28	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 20m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	74
Figura 29	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 22,5m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	74
Figura 30	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 25m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	75
Figura 31	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 27,5m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	75
Figura 32	– Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 30m: (a) Detalhes do perfil de alma cheia; (b) Detalhes do perfil celular.....	75
Figura 33	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 508x49 (vão de 10m)	83
Figura 34	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 580x55 (vão de 12,5m)	83
Figura 35	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 725x69 (vão de 15m)	84

Figura 36	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 798x95 (vão de 17,5m)	84
Figura 37	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 870x133 (vão de 20m)	84
Figura 38	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1015x146 (vão de 22,5m)	85
Figura 39	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1160x164 (vão de 25m)	85
Figura 40	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1305x181 (vão de 27,5m)	85
Figura 41	– Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1450x191 (vão de 30m)	85
Figura 42	– 1º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil sólido VS900x191 ($f_{01} = 5,70\text{Hz}$)	87
Figura 43	– 2º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil sólido VS900x191 ($f_{02} = 11,34\text{Hz}$)	87
Figura 44	– 3º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil sólido VS900x191 ($f_{03} = 14,08\text{Hz}$)	88
Figura 45	– 1º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS1160x164 - 16 furos ($f_{01} = 6,40\text{Hz}$)	88
Figura 46	– 2º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS1160x164 - 16 furos ($f_{02} = 10,06\text{Hz}$)	89
Figura 47	– 3º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS1160x164 - 16 furos ($f_{03} = 14,39\text{Hz}$)	89
Figura 48	– 1º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS1160x164 - 31 furos ($f_{01} = 5,56\text{Hz}$)	90
Figura 49	– 2º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS1160x164 - 31 furos ($f_{02} = 8,66\text{Hz}$)	90
Figura 50	– 3º modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS1160x164 - 31 furos ($f_{03} = 12,04\text{Hz}$)	91
Figura 51	– Planta baixa representativa do caso de carregamento investigado ...	95
Figura 52	– Deslocamento translacional vertical. Seção B: perfil sólido	96
Figura 53	– Deslocamento translacional vertical. Seção B: perfil celular com 16 furos	96

Figura 54	– Deslocamento translacional vertical. Seção B: perfil celular com 31 furos	96
Figura 55	– Aceleração ao longo do tempo. Seção B: perfil sólido	97
Figura 56	– Aceleração ao longo do tempo. Seção B: perfil celular com 16 furos	97
Figura 57	– Aceleração ao longo do tempo. Seção B: perfil celular com 31 furos	97
Figura 58	– Variação das acelerações de pico em função do vão e do sistema estrutural	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [6].....	30
Tabela 2	– Frequências da excitação, f_p , e coeficientes dinâmicos, α_i , associados às atividades humanas [34].....	32
Tabela 3	– Valores recomendados para os parâmetros P_0 , β e limites para a_0/g [34].....	34
Tabela 4	– Acelerações limites para passarelas de pedestres [34] [38]	41
Tabela 5	– Características do caminhar humano	54
Tabela 6	– Coeficientes dinâmicos	57
Tabela 7	– Coeficientes dinâmicos [34]	57
Tabela 8	– Coeficientes dinâmicos]	58
Tabela 9	– Coeficientes dinâmicos [34]	59
Tabela 10	– Dimensões dos perfis originais metálicos do tipo “I”	63
Tabela 11	– Correlação entre o perfil do tipo “I” original e o perfil celular formado	71
Tabela 12	– Valores recomendados de taxas de amortecimento ξ [34].....	74
Tabela 13	– Relação entre os perfis analisados	75
Tabela 14	– Dados geométricos dos perfis celulares analisados com o número mínimo de furos (em mm)	79
Tabela 15	– Dados geométricos dos perfis celulares analisados com o número máximo de furos (em mm)	80
Tabela 16	– Esforço computacional médio	81
Tabela 17	– Frequencia natural das passarelas com perfis de alma cheia.....	84
Tabela 18	– Frequencia natural das passarelas com perfis celulares com a quantidade mínima de furos (f)	85
Tabela 19	– Frequencia natural das passarelas com perfis celulares com a quantidade máxima de furos (f).....	85
Tabela 20	– Deslocamentos máximos obtidos na seção central dos modelos	97
Tabela 21	– Parâmetros utilizados na análise de conforto humano das passarelas.....	98
Tabela 22	– Acelerações de pico das passarelas investigadas	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADS	Sistema de Aquisição de Dados
AISC	American Institute of Steel Construction
ANSYS	Swanson Analysis Systems
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CEB	Comitê Euro-International du Béton
GFCD	Gerador de Função de Carregamento Dinâmico
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
PVC	Policloreto de Vinila
RMS	Root Mean Square
SIA	Swiss National Standards

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{eff}	acelerações efetivas
a_p	aceleração de pico
a/g	razão entre a aceleração do piso e a aceleração da gravidade
a_0/g	pico de aceleração limite
a_p/g	pico de aceleração estimado
a_{lim}	aceleração limite
b_w	largura do montante interno
b_{we}	largura do montante externo
d_0	Diâmetro do furo
E_c	módulo de elasticidade do concreto
E_s	módulo de elasticidade do aço
f	frequência de excitação
f_{crit}	frequência crítica
f_{mi}	fator de majoração do impacto do calcanhar
f_n	frequência natural da estrutura
f_p	frequência do passo da atividade
F_m	valor máximo da série de Fourier
$F(t)$	vetor de forças nodais equivalente
F_v	carregamento vertical
g	aceleração da gravidade
G_n	módulo de cisalhamento do neoprene
h_n	espessura de uma lâmina de neoprene
l	múltiplo harmônico (1, 2, 3...)
K	matriz de rigidez do sistema
k_h	coeficiente de reação horizontal

kN	kilonewton
k_{s1}	módulo para uma placa horizontal de 0,3048 m (1ft) de lado e d a largura da coluna (m)
L	comprimento da passarela
M	matriz de massa do sistema
n	número de camadas do neoprene
η_h	parâmetro de rigidez para solos não coesivos
N	newton
p	pressão aplicada
ρ	passo
P	peso da pessoa
P_0	força constante igual a 0,29kN para pisos e 0,41kN para passarelas
R	fator de redução
t	tempo
T	período de tempo na qual a aceleração efetiva é medida
T_p	período do passo
TR	trilho
W	peso efetivo do piso
α	taxa de contribuição da matriz de massa
α_i	coeficiente dinâmico para força harmônica
β	coeficiente de amortecimento modal
β	taxa de contribuição da matriz de rigidez
ϕ_i	ângulo de fase para o harmônico i
ν	coeficiente de Poisson
ρ	densidade
Δ_i	coeficiente de Fourier para o harmônico
$\Delta_i P_0$	amplitude da força do harmônico

ξ_i	taxa de amortecimento do modo i
σ_c	tensão média atuante
ω_{0i}	frequência natural circular do modo i

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	19
1	RECOMENDAÇÕES DE PROJETO	28
1.1	Generalidades	28
1.2	Normas de projeto	29
1.2.1	<i>NBR 6118 – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado [6]</i>	29
1.2.2	<i>Guia Prático - Floor Vibration Due to Human Activity – AISC [34]</i>	300
1.2.3	<i>Normas SIA 160 [39], CEB [40] e AASHTO [41]</i>	34
1.2.4	<i>ISO 2631/2 - International Organization for Standardization [38]</i>	35
1.2.5	<i>Norma Eurocode 5 - [37]</i>	35
1.2.6	<i>Norma Eurocode 5 - Parte 2 [43]</i>	37
1.2.7	<i>Norma Britânica BS-5400 [19]</i>	38
1.2.8	<i>Norma Canadense OHBDC [40]</i>	39
1.2.9	<i>Norma Sueca Bro [45]</i>	39
1.3	Critério sobre o conforto humano em passarelas	40
1.4	Guia de projeto do AISC	41
1.5	Comparativo entre os principais critérios normativos	42
2	VIBRAÇÃO EM PISOS DEVIDO A ATIVIDADES HUMANAS	43
2.1	Introdução	43
2.2	Equação diferencial do movimento	43
2.3	Cargas dinâmicas induzidas por atividades humanas	45
2.3.1	<i>Caminhar</i>	47
2.3.2	<i>Correr</i>	52
2.3.2	<i>Pular</i>	53
2.4	Considerações sobre a caminhada humana	54
2.4.1	<i>Modelo proposto por Varela e Battista [24]</i>	58
3	DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO	61
3.1	Introdução	61
3.2	Modelo estrutural da passarela	61
3.3	Dimensionamento das estruturas	63
3.3.1	Cálculo das cargas permanentes e acidentais	63
3.3.2	Análise do parâmetro inicial do Estado Limite Último (ELU)	64

3.3.3	Verificação da resistência a flexão	64
3.3.4	Verificação da flambagem local da alma	65
3.3.5	Verificação da flambagem local da mesa	65
3.3.6	Verificação de resistência ao esforço cortante (cisalhamento)	65
3.3.7	Verificação das flechas na viga mista	65
3.4	Vigas alveolares	67
3.4.1	<i>Geometria das vigas alveolares</i>	67
3.4.2	<i>Vigas celulares</i>	68
3.5	Seleção dos modelos das vigas celulares	71
4	MODELO NUMÉRICO COMPUTACIONAL	72
4.1	Considerações iniciais	72
4.2	Modelagem do amortecimento	72
4.3	Modelos em elementos finitos	74
4.3.1	<i>Passarela com vão de 10m a 30m</i>	75
4.4	Parâmetros geométricos dos perfis celulares	79
4.5	Desempenho operacional	80
4.6	Considerações finais	81
5	ANÁLISE DE AUTOVALORES E AUTOVETORES	83
5.1	Introdução	83
5.2	Análise das frequências naturais (Autovalores)	83
5.3	Análise dos modos de vibração (Autovetores)	89
5.4	GFCD gerador de funções de carregamento dinâmico	94
5.5	Considerações finais	95
6	ANÁLISE DINÂMICA DAS PASSARELAS	96
6.1	Introdução	96
6.2	Análise dos deslocamentos estáticos	96
6.3	Análise das acelerações de pico (a_p)	96
6.4	Considerações finais	103
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
7.1	Introdução	104
7.2	Conclusões	104
7.3	Sugestões para trabalhos futuros	107

INTRODUÇÃO

Atualmente, são frequentes as limitações de “pé-direito” em edificações de vários pavimentos devido às leis de zoneamento e as exigências econômicas, além das considerações sobre a estética da estrutura. Normalmente, grandes espaços são necessários para permitir a passagem de tubos, dutos e bandejas de cabeamentos energizados sob as vigas de aço o que, conseqüentemente, pode prejudicar o aproveitamento do espaço entre o piso e o teto (pé-direito).

Inúmeras soluções podem ser utilizadas para superar esses problemas, tais como vigas misuladas e treliças. Contudo, a solução mais adotada nos países de primeiro mundo é a utilização de aberturas na alma das vigas de aço, identificadas como vigas alveolares, embora mais altas do que as vigas laminadas originais.

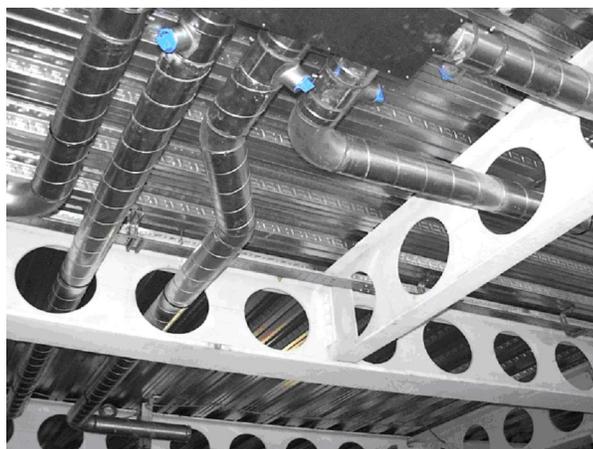


Figura 1 - Vigas celulares com uma série de aberturas circulares na alma [1].

Em alguns casos, os perfis das vigas de aço podem apresentar aberturas contínuas circulares, onde estas são denominadas vigas celulares. Outras formas de abertura na alma das vigas podem ser utilizadas, tal como a hexagonal, as quais são denominadas como vigas casteladas. Um exemplo de viga celular pode ser visto na Figura1.

Por outro lado, além da evolução tecnológica dos materiais, as metodologias construtivas e de cálculo empregadas nos últimos anos vem tornando as estruturas das passarelas cada vez mais leves e esbeltas. Logo, os perfis de vigas alveolares estão sendo utilizados também em pontes e passarelas internas e externas. A Figura

2 ilustra uma passarela de 20 metros biapoiada, estabelecida de forma provisória sobre um canal.



Figura 2 - Passarela biapoiada de 20 metros [2].

Segundo a WESTOK [3], atualmente na Europa, a maioria das pontes e passarelas rolantes sobre os canais das unidades de tratamento de água são projetadas com perfis celulares. Principalmente, nos vãos superiores a 15m. Além de reduzir a flexão contra o peso, as vigas celulares tem uma área reduzida de cargas de vento, o que resulta em menos força necessária para girar ou deslocar a passarela, quando do tipo rolante. As Figuras 3 e 4 ilustram alguns modelos.



Figura 3 - Passarela rolante sobre o Canal Bodogue [3].

Geralmente, as passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) são constituídas por longarinas e transversinas de aço e o piso é composto por lajes de concreto armado. Este tipo de sistema estrutural vem se tornando um marco arquitetônico relevante em grandes áreas urbanas. Devido a característica esbelta

das passarelas na atualidade, as estruturas apresentam baixos valores de frequência e amortecimento estrutural.



Figura 4 - Passarela rolante em Ivinghoe/Inglaterra [3].

Na construção de pontes e passarelas, os furos nas almas das vigas são aproveitados para propiciar o acesso ao serviço de inspeção e manutenção. A profundidade destas aberturas pode chegar a 60% da altura total da viga e a largura das aberturas pode chegar até três vezes a profundidade dos furos.

Para efeito deste estudo, além do perfil de alma cheia, o qual, atualmente, esta sendo comercialmente chamado na Europa de perfil sólido, a análise foi feita sobre duas vigas celulares fabricadas a partir de um perfil VS soldado de altura menor. O objetivo é comparar o comportamento dinâmico de cada passarela, de acordo com o vão, mediante a obtenção das acelerações de pico, focando o conforto humano, levando em condideração as normas e recomendações de projeto.

Nesta análise, foram consideradas passarelas de 10m a 30m de vão, onde duas longarinas da estrutura, associadas a vigas de aço celulares foram modeladas de acordo com o número mínimo e máximo de furos possíveis, no que diz respeito ao perfil gerado após o corte, e de acordo com as características geométricas do perfil de alma cheia inicial. No caso das vigas celulares, além da perda nas extremidades durante o processo de fabricação, ainda há uma perda adicional devido à diferença entre as duas linhas de corte. É importante ressaltar que estas vigas podem ser produzidas com inúmeras combinações entre a altura da seção transversal, diâmetro da abertura e distância entre os centros de aberturas.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, as modelagens dos perfis celulares foram baseadas na teoria de Harper [4], devido a sua combinação ser consagrada internacionalmente, além de ser bastante utilizada na prática corrente de projeto, pelo fato de oferecer resultados compensadores. Para os diâmetros mínimos e máximos foram adotados, respectivamente, 57% e 80% da altura do perfil. Diante disso, foram estabelecidos os parâmetros de identidade para as quantidades de furos de cada perfil soldado VS analisado.

O outro tópico pertinente a desenvoltura deste dissertação está associada a preocupação com o surgimento de inúmeros casos de comprometimento estrutural em passarelas, derivados da vibração excessiva ao longo dos anos em diversas partes do mundo, gerando problemas de desconforto humano e até o seu colapso, como ocorreu em uma Passarela na Carolina do Norte/EUA durante a saída de uma multidão em um evento esportivo deixando mais de 100 pessoas feridas (BBC NEWS [5]) A Figura 5 ilustra um instante logo após o desabamento da passarela.



Figura 5 - Desabamento de uma passarela na Carolina do Norte/EUA [5]

As pontes foram criadas para atender um determinado fluxo de carga mantendo a segurança. Assim como as passarelas foram criadas para atender o fluxo de pessoas que circulam sobre o tabuleiro de forma que as caminhadas devam ser seguras e confortáveis. Independente da velocidade, as caminhadas produzem forças dinâmicas que causam vibrações, e conseqüentemente, possíveis incômodos às pessoas que a utilizam. As vibrações excessivas podem comprometer a segurança da estrutura, já que impõe um aumento de tensões, ou comprometer o seu comportamento em serviço. A NBR-6118 [6] define estado limite de vibrações excessivas como estado limite estabelecido para a utilização normal da construção.

No final do século XIX, preocupações foram deslumbradas devido aos efeitos das cargas dinâmicas nas estruturas. O primeiro critério de rigidez conhecido surgiu a cerca de 170 anos atrás, onde Tredgold [7] relata em seus trabalhos que vigas com vãos grandes deveriam ser feitas com altura suficiente para evitar o inconveniente de serem capazes de se mover junto com a estrutura.

Um dos primeiros casos que se tem registrado de uma ponte que entrou em colapso devido a vibração induzida por pedestres foi de uma ponte de ferro fundido localizada em Broughton, na Inglaterra, em 1831. Na ocasião, 60 soldados marchavam na ponte quando ela entrou em ressonância e desabou [8] [9]. O movimento sincronizado dos soldados deu origem a forças resultantes de elevada intensidade. Diante disso, no século XX, Tilden [10] realizou vários estudos sobre atividades humanas em uma plataforma e constatou que os movimentos de multidões podiam ser sincronizados ou aleatórios, e que a sincronia perfeita entre os indivíduos era algo impossível de se atingir.

Na década de 60, percebeu-se que os problemas com vibrações induzidas pela caminhada humana nos pisos satisfaziam o critério tradicional de rigidez, mas, em 1966, Lenzen [11] estabeleceu que a rigidez não era o mais importante, e sim, o amortecimento e a massa. Esses dois fatores passaram a ser os mais importantes na prevenção contra vibrações de pisos causados por atividades humanas.

Na década de 70, baseado nos resultados dos ensaios de plataforma instrumentada, Ohlsson [12], Allen, Rainer e Pernica [13], Bachmann e Ammann [14], entre outros, desenvolveram uma função matemática representativa do carregamento gerado por atividades humanas através de uma série de Fourier, composta por duas parcelas: uma estática, correspondente ao peso da pessoa, e outra devida a carga dinâmica, relativa à finalidade.

Em 1974, McCormick [15] desenvolveu um estudo sobre critério de projeto e testes de dinâmica de piso de escritórios, com o objetivo de encontrar um critério mais conveniente para a aplicação em um projeto de duas torres novas, construídas em pórticos metálicos. Como conclusão, McCormick [15] definiu como aceitável a taxa de amortecimento superior a 3% para o sistema de pisos.

Em 1975, Murray [16], após testar e analisar vários sistemas de pisos com vigas de aço e lajes em concreto, sugere que sistemas com amortecimento crítico na faixa de 4% a 10% que estiverem situados acima da linha média da região “Claramente perceptível” na escala modificada de Reither-Meister, irão gerar queixas

dos ocupantes, e sistemas na faixa “Fortemente perceptível” serão inaceitáveis para ocupantes e proprietários.

Em 1976, Allen e Rainer [17], desenvolveram um critério de projeto simples, baseado na resposta do impacto do calcanhar, para levar o amortecimento e a massa em consideração. Este critério foi introduzido no apêndice do *Canadian Design Standard for Steel Structures* [18].

Em 1981, Murray [16], recomendou um critério de projeto baseado nos dados de ensaios de 91 pisos medidos. Mais recentemente, um critério para passarelas foi introduzido no *BSI British Standard, BS 5400* [19], e no *Ontario Highway Bridge Design Code, ONT83* [20], baseados na resposta da ressonância a uma força senoidal.

Em 1984, Ellingwood e Tallin [21], recomendaram um critério para projetos de pisos comerciais baseado na aceleração limite de 0,5%g e na excitação da caminhada. O critério é satisfeito se a máxima deflexão devido a uma carga concentrada de 2 kN em qualquer ponto do piso não exceder 0,5 mm correspondente à uma rigidez de 4 kN/mm.

Em 1996, Eriksson [22], também sugeriu que a carga humana fosse considerada como estacionária no espaço, devido à complexidade de se realizar a distribuição espacial das pessoas que produzem cargas dinâmicas na estrutura e devido à falta de estudos sobre o tema.

Em 2001, Miyamori, Obata, Hayashikawa et al [23], para tentar incluir as propriedades dinâmicas do corpo humano tais como massa e rigidez, apresentaram um modelo que acopla as equações dinâmicas do corpo humano, dividido em cabeça, partes superior e inferior do corpo, com as equações de movimento da estrutura. O modelo também considera o movimento vertical do corpo humano.

Em 2004, Varela [24], propôs um modelo matemático para representação do caminhar humano que inclui em sua formulação, o pico transiente representativo do impacto do calcanhar no piso.

Em 2005, Figueiredo [25] em sua dissertação de mestrado efetuou uma avaliação da resposta dinâmica de passarelas de pedestres no que se refere ao conforto humano. Em seu estudo desenvolveu diversos modelos de carregamento de forma a representar a travessia de pedestres sobre a estrutura, considerando inclusive um modelo mais realista de carregamento em que se incorpora o impacto transiente do calcanhar devido ao caminhar humano.

Em 2007, Lima [26] encontrou valores máximos de acelerações que violavam os critérios de conforto humano, quando comparados com os da recomendação de projeto.

Em 2008, Araújo Junior [27] em sua dissertação de mestrado realizou testes experimentais num protótipo de passarela com diferentes densidades de pedestres (0,3, 0,7 e 0,9 pedestres/m²). Durante a investigação, nenhum indício de sincronização foi verificado na caminhada com sua taxa de passo natural, onde os resultados encontrados mostraram que o procedimento adotado é válido e pode ser aplicado para outras densidades de interesse.

Quanto aos perfis alveolares, na literatura são encontradas diferentes versões sobre sua origem. Um dos primeiros registros sobre projeto e fabricação de vigas alveolares de doze metros são da Skoda, em Pilser, na República Tcheca. Outro registro consta no nome de Geoffrey Murray Boyd, que solicitou patente das vigas casteladas em 1937. Além desses, consta-se que as vigas casteladas foram desenvolvidas por Boyd em 1935, a partir da necessidade de vigas de maior altura para vencer grandes vãos para uma construção em Buenos Aires, na Argentina. A patente só foi concedida depois, em 1939, pelo British Patent Office. Devido à Segunda Guerra Mundial, Boyd não conseguiu levar em frente a comercialização da sua invenção. Assim, os direitos da patente foi cedido para a United Steel Companies Limited [28].

Entre o final da década de 30 até o início da década de 60, o emprego de vigas foi limitado devido a elevação do custo de produção na época. De qualquer forma, a partir da segunda metade da década de 50 começaram a ser desenvolvidos estudos a respeito do comportamento e dos métodos de dimensionamento de vigas alveolares.

Em 2007, Rodrigues [29] avaliou e descreveu o comportamento estrutural das vigas de aço com abertura de diferentes tamanhos e forma na alma, avaliando os diferentes mecanismos de ruínas e as causas que conduziram ao colapso.

Em 2010, Abreu [30] propôs um procedimento para a determinação do momento fletor resistente nominal de vigas de aço celulares, para o estado limite último de flambagem lateral com torção para os casos em que a viga possuam empenamento livre e torção impedida nas extremidades. Quanto aos dimensionamento geométricos, seus estudos foram baseados em Harper [4].

Em 2011, Silveira [31], baseada na formação de rótulas plásticas, efetuou um estudo que contribuiu para o estabelecimento de critérios de dimensionamento de vigas alveolares de acordo com as normas vigentes de projeto e cálculo de estruturas metálicas.

Em 2012, Oliveira [32] em sua dissertação defendeu procedimentos para a definição das características geométricas de vigas alveolares para sistemas de piso e cobertura, levando-se em conta o custo benefício

Motivação

A evolução da engenharia estrutural vem exigindo cada vez mais que os projetos sejam satisfatórios em atender simultaneamente as normas técnicas e o custo financeiro da execução. Visando o lado das passarelas, de acordo com as inovações, suas modelagens apresentam características cada vez mais esbeltas, o que acarreta em um possível desconforto humano. Para evitar este tipo de problema, pode-se avaliar os possíveis tipos de vibrações, as quais, são facilmente evitadas se estudados durante a fase do projeto.

Objetivos

Este trabalho busca fazer uma avaliação entre os resultados obtidos por modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos através do programa ANSYS [33]. Para cada vão de passarela, será feita uma comparação entre os modelos com perfis de alma sem furo (perfis sólidos) e perfis de alma com furo (perfil celular). Esta investigação, que terá como referência as prescrições do manual de projetos do AISC [34], visa obter uma maior confiabilidade nas análises por meios de elementos finitos e mostrar que os problemas gerados, com relação ao conforto humano, poderiam ser facilmente amenizados utilizando os perfis celulares, os quais possuem uma inércia maior.

Estrutura da dissertação

O presente capítulo apresentou-se a motivação para o desenvolvimento deste trabalho e uma breve descrição do conteúdo do mesmo.

No primeiro capítulo apresentam-se os critérios e recomendações de projeto propostos por algumas normas nacionais e estrangeiras.

No segundo capítulo inicia-se a discussão do problema de vibrações em pisos devido a atividades humanas como: caminhar, correr e pular, apresentado ainda um breve resumo da equação do movimento que rege o problema dinâmico.

No terceiro capítulo apresenta-se o modelo estrutural investigado no presente trabalho para a realização das análises dinâmicas, apresentando suas características físicas e geométricas. Este capítulo também apresenta a modelagem do amortecimento estrutural.

O quarto capítulo apresenta uma descrição dos modelos de elementos finitos utilizados na presente análise, bem como suas propriedades, características e dados gerais de elementos utilizados.

O quinto capítulo apresenta os resultados das análises de vibração livre, realizadas para determinar os autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração). Tais dados são utilizados para se prever a resposta dinâmica da estrutura quando submetida a carregamentos dinâmicos.

O sexto capítulo é dedicado às análises harmônicas do modelo dois desenvolvido para a realização deste estudo. Ao final das análises, os resultados obtidos são comparados com as recomendações encontradas na literatura técnica, no que diz respeito ao conforto humano e aos critérios de normas.

No sétimo capítulo apresentam-se as conclusões alcançadas com este estudo, contendo as considerações e sugestões para continuação do trabalho aqui desenvolvido.

1 RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

1.1 Generalidades

Antigamente se acreditava que os carregamentos dinâmicos poderiam ser representados como cargas puramente estáticas. Entretanto, com os estudos mais sofisticados, hoje já se sabe que esta premissa não representa o efeito das cargas dinâmicas nas estruturas civis de maneira correta, visto que a análise dos efeitos causados por uma carga dinâmica difere muito da análise dos efeitos causados por uma carga estática.

Cada tipo de excitação dinâmica é regido por características diferentes e próprias de frequências, amplitudes e formas de carregamento, levando os sistemas estruturais a diferentes tipos de perturbações. A Figura 6 mostra o efeito das vibrações sobre as estruturas, o homem e o meio ambiente.

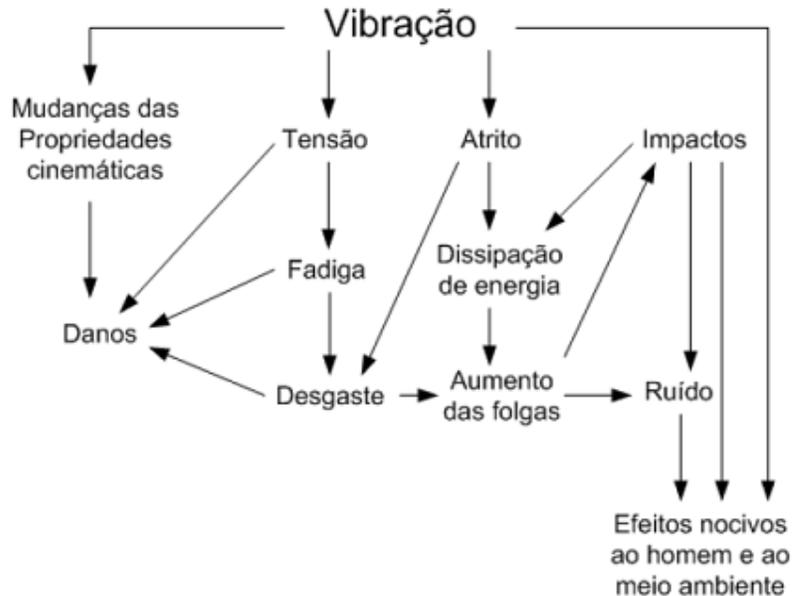


Figura 6 - Efeito das vibrações [35], [36].

No presente capítulo, serão apresentados inúmeros critérios e recomendações pertencentes a normas nacionais e internacionais de projeto. De modo geral, estas normas recomendam métodos simplificados para o cálculo das

frequências naturais das estruturas, e, bem como, para a obtenção dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico), devido ao caminhar dos pedestres.

No que tange aos trabalhos investigados, a norma europeia [37] e a recomendação de projeto americana [30] abordam o cálculo da frequência fundamental para estruturas mistas (aço-concreto), levando-se em conta uma formulação simplificada para vigas simplesmente apoiadas. Assim sendo, de acordo com os objetivos do trabalho, a frequência natural de passarelas mistas (aço-concreto) pode ser calculada por meio das Equações (1) e (2) [34].

$$f_n = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

Onde:

- E : módulo de elasticidade do aço (N/m^2);
- ρ : densidade do aço (kg/m^3);
- I : momento de inércia da seção transformada (m^4);
- A : área transversal da seção transformada (m^2).
- L : vão da passarela mista (aço-concreto)

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (2)$$

Onde:

- g : aceleração da gravidade (m/s^2);
- Δ : deslocamento no centro do vão, devido ao peso próprio da estrutura ($\Delta=5qL^4/384EI$).

1.2 Normas de projeto

1.2.1 NBR 6118 – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado [6]

Segundo a norma brasileira NBR 6118 [6], a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. A norma recomenda que, para estruturas sujeitas à vibração, deve-se afastar a frequência natural da estrutura (f_n) ao máximo possível da frequência crítica (f_{crit}), que depende do tipo de atividade que será exercida sobre a estrutura, conforme a Equação (3).

$$f_n > 1,2 \cdot f_{crit} \quad (3)$$

O comportamento das estruturas sujeitas a ações dinâmicas cíclicas que originam vibrações pode ser modificado por meio de alterações em alguns fatores tais como: ações dinâmicas, frequência natural (pela mudança da rigidez da

estrutura ou da massa em vibração) e aumento das características de amortecimento.

Em casos especiais, é usualmente necessário aumentar a massa ou o amortecimento da estrutura para absorver parte da energia envolvida, pois pode não ser suficiente afastar as duas frequências, própria e crítica. Nestes casos em que as recomendações anteriores não puderem ser atendidas, deve ser feita uma análise dinâmica mais acurada, conforme estabelecido em normas internacionais, enquanto não existir normas brasileiras que tratem do assunto.

Na falta de valores determinados experimentalmente, pode-se adotar os valores indicados na Tabela 1 para a frequência crítica, f_{crit} .

Tabela 1 - Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [6]

Estrutura	f_{crit} (Hz)	f_n (Hz)
Ginásio de esportes	8,0	9,6
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0	8,4
Escritórios	3,0 a 4,0	3,6 a 4,8
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4	4,1
Passarelas de pedestres ou ciclistas	1,6 a 4,5	1,9 a 5,4

1.2.2 Guia Prático - Floor Vibration Due to Human Activity - AISC [34]

Desenvolvido pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar [34], este guia faz parte de uma série de livros denominada Steel Design Guide Series, desenvolvida no American Institute of Steel Construction (AISC). Ele tem como objetivo básico fornecer os princípios básicos e ferramentas simples de análise para avaliar sistemas de pisos e passarelas submetidas a atividades humanas, quanto aos estados limites, e também dar orientação no desenvolvimento de medidas corretivas para pisos problemáticos, devido a atividades humanas.

Os critérios de aceitação para o conforto humano podem ser empregados na avaliação da resposta dinâmica de sistemas estruturais associados a escritórios, shoppings, passarelas e ocupações similares.

A análise dinâmica proposta por este guia é em função dos valores obtidos da aceleração de pico, relação a_p/g . Estes valores são comparados com os valores

limites definidos na curva base da ISO 2631/2 [38], fornecidos pela norma International Standard Organization, que representa o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis. A ISO Standard sugere limites em termos da raiz quadrada do erro quadrático médio, rms (root mean square) das acelerações, como um múltiplo da linha base da curva apresentada na Figura 7. Para fins de projeto, esses limites podem ser considerados em uma faixa que varia entre 0,8 e 1,5 vezes os valores recomendados por norma, dependendo da duração da vibração e da frequência dos eventos referentes à vibração.

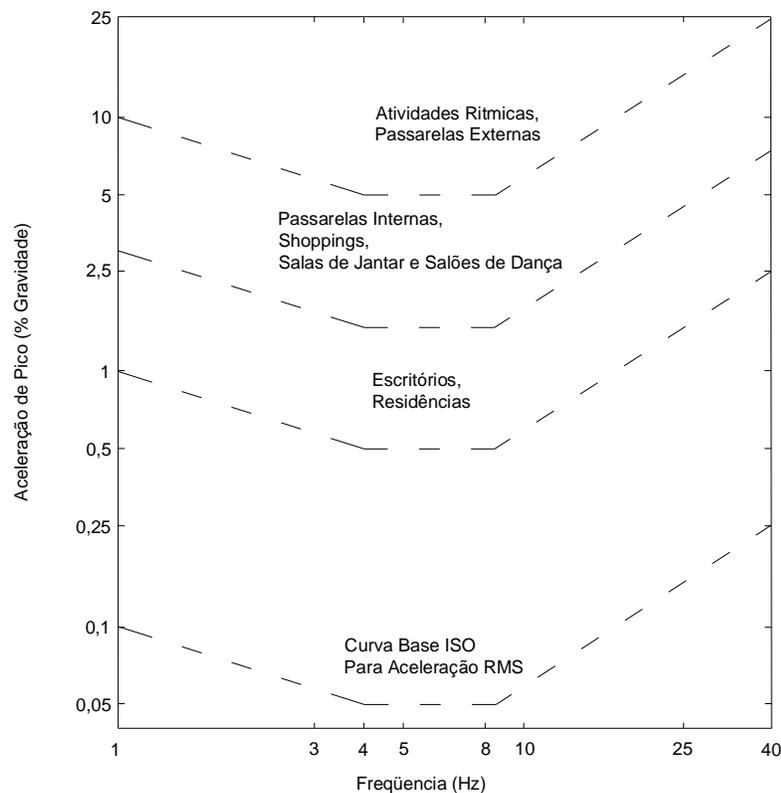


Figura 7 - Aceleração de pico recomendada para conforto humano em vibrações devidas a atividades humanas, ISO 2631/2 [38].

Considerando-se em uma sollicitação dinâmica, uma componente harmônica dependente do tempo que coincide com a frequência fundamental do piso, como mostra a Equação (4):

$$F(t) = P.\alpha_i.\cos(2.\pi.i.f_p.t) \quad (4)$$

Sendo:

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

P: peso do indivíduo (N);

i: múltiplo harmônico da frequência do passo;

α_i : coeficiente de Fourier associado ao i-ésimo harmônico da atividade;

f_p : frequência do passo da atividade (Hz);

t: tempo (s).

Em alguns casos, apenas uma componente harmônica é empregada no caso associado à atividade humana de caminhar, já que a participação dos demais harmônicos é pequena em comparação com aquele associado à condição de ressonância. Na sequência, valores correntes da frequência de excitação, f_p , e do coeficiente dinâmico, α_i , são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Frequências da excitação, f_p , e coeficientes dinâmicos, α_i , associados às atividades humanas [34]

Harmônico	Caminhada		Atividade aeróbica		Dança	
	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_i
1	1,6 a 2,2	0,5	2,0 a 2,75	1,5	1,5 a 3,0	0,5
2	3,2 a 4,4	0,2	4,0 a 5,5	0,6	-	-
3	4,8 a 6,6	0,1	6,0 a 8,25	0,1	-	-
4	6,4 a 8,8	0,05	-	-	-	-

* Coeficiente dinâmico = pico da força senoidal / peso da(s) pessoa(s).

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

$$\frac{a}{g} = \frac{R\alpha_i P}{\beta W} \cos(2\pi i f_p t) \quad (5)$$

Sendo:

a/g: razão entre a aceleração do piso e a aceleração da gravidade;

g: aceleração da gravidade;

R: fator de redução;

β : coeficiente de amortecimento modal;

W: peso efetivo do piso.

O fator de redução R, leva em conta o fato de que o movimento ressonante permanente não é alcançado através da caminhada e que a pessoa que está caminhando e a pessoa que está sentindo a vibração não estão simultaneamente no

local de máxima amplitude modal. É recomendado que seja tomado igual a 0,7 para passarelas e 0,5 para estruturas de piso que possuam configurações modais associadas a duas direções, segundo Murray [34].

A aceleração de pico devido ao caminhar de pessoas é estimada com base no emprego da Equação (5), considerando o menor harmônico i para o qual a frequência da excitação, $f = i.f_p$, coincide com a frequência fundamental do piso. A aceleração de pico é então comparada com os valores limites propostos por norma, ISO 2631/2 [38], como apresentado na Figura 9.

A Equação (5), pode, ainda, ser simplificada considerando-se que o coeficiente dinâmico para a componente força harmônica i , α_i , seja expresso em função da frequência da excitação, f , de acordo com a Equação (6):

$$\alpha_i = 0,83 \exp(-0,35 f) \quad (6)$$

Substituindo-se o coeficiente dinâmico, α_i , Equação. (6), na Equação (5):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0,35 f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (7)$$

Sendo:

a_p/g : aceleração de pico estimada em unidades de g ;

a_0/g : aceleração limite proposta por norma, ISO 2631/2 [38];

f_n : frequência natural do piso;

P_0 : força constante.

O numerador $P_0 \exp(-0,35f_n)$, mostrado na Equação (7), representa uma força harmônica efetiva devida ao caminhar, resultando na resposta dinâmica da estrutura, em termos da aceleração de pico, associada à condição de ressonância referente à frequência natural da estrutura.

A partir do critério de projeto para excitações provocadas por caminhadas, temos que estes possuem abrangências muito maiores do que os critérios comumente usados, sendo baseado na resposta dinâmica de um sistema de piso em aço para forças produzidas durante a caminhada.

O critério determina que o sistema de piso é satisfatório se o pico de aceleração, a_p , devido à excitação da caminhada, em função da aceleração da gravidade, g , determinada através da Equação (8), não exceda a aceleração limite, a_0/g , para a ocupação apropriada.

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

Sendo:

P_0 : força constante representativa da excitação;

f_n : frequência natural do piso;

β : coeficiente de amortecimento modal;

W : peso efetivo do piso.

Os valores recomendados para P_0 , β e a_0/g para várias ocupações, são dados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores recomendados para os parâmetros P_0 , β e limites para a_0/g [34]

Tipo de ocupação	Força constante P_0	Taxa de amortecimento β	Aceleração limite $a_0/g \times 100\%$
Escritórios, residências e igrejas	0,29 kN	0,02-0,05*	0,50%
Shoppings centers	0,29 kN	0,02	1,50%
Passarela - interna	0,41 kN	0,01	1,50%
Passarela - externa	0,41 kN	0,01	5,00%
* 0,02 para pisos com poucos componentes não estruturais como pode ocorrer em áreas de trabalho e igrejas.			
* 0,03 para pisos com poucos componentes estruturais e móveis, mas com somente pequenas divisórias desmontáveis, típicas de muitas áreas de escritórios modulares.			
* 0,05 para pisos com divisórias de altura total entre pisos.			

A Figura 9 pode também ser usada para avaliar o sistema de piso. Se a frequência natural do piso for maior do que um valor situado entre 9 e 10Hz, significa que amplificações significativas da resposta da estrutura devido ao caminhar podem não ocorrer, mas os níveis de vibrações podem ainda incomodar os seres humanos. Experiências indicam que o piso deve ter uma rigidez mínima de 1 kN/mm sob uma força concentrada.

1.2.3 Normas SIA 160 [39], CEB [40] e AASHTO [41]

As normas SIA 160 (Swiss National Standards [39]), CEB (Comite Euro-International Du Beton [40]) e AASHTO (American Association of State Highway and

Transportation Officials [41]) abordam o problema de vibrações verticais nas passarelas, por exclusão das faixas de variação de frequências críticas.

As normas SIA 160 [39] e CEB [40] reconhecem as faixas críticas de frequências da excitação produzida por um pedestre ao caminhar, e recomendam que seja evitado projetar passarelas com frequências naturais na direção transversal vertical entre 1,6 e 2,4 Hz e também entre 3,5 e 4,5 Hz. Estas limitações são baseadas no fato de que a frequência de caminhada de um pedestre está compreendida de 1,6 a 2,4 Hz e 3,2 a 4,8 Hz que são as faixas do primeiro e segundo harmônicos, respectivamente, segundo Pimentel [42].

A AASHTO [41] recomenda que seja evitado projetar passarelas com frequências naturais na direção transversal vertical inferiores a 3 Hz e 5 Hz, aplicando o segundo limite, caso sejam esperados problemas de vibração causados pelo segundo harmônico da excitação.

1.2.4 ISO 2631/2 - International Organization for Standardization [38]

A International Organization for Standardization (ISO 2631/2 [38]), aplica-se à vibração em direções ortogonais e abrange vibrações aleatórias, de choque, e harmônicas. A faixa de frequência coberta é de 1 a 80 Hz e o critério é expresso em relação às acelerações efetivas medidas, rms, dadas por:

$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (9)$$

Sendo:

T: o período de tempo na qual a aceleração efetiva é medida.

A ISO 2631/2 [38] sugere limites em termos da aceleração rms, como um múltiplo da linha base da curva apresentada na Figura 8.

1.2.5 Norma Eurocode 5 – [37]

A norma europeia Eurocode 5 [37] recomenda que seja verificada a aceleração sempre que a frequência fundamental da passarela seja inferior a 5 Hz, e que neste cenário a aceleração máxima não deverá ultrapassar o valor limite de $0,7\text{m/s}^2$ (7%g).

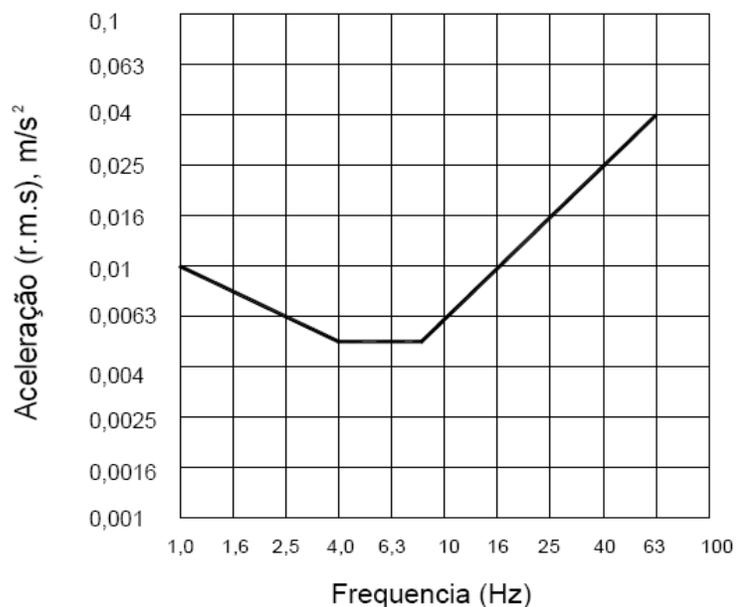


Figura 8 - Curva base de vibrações para acelerações verticais.

O cálculo da aceleração para um fluxo de pessoas é obtido utilizando-se a Equação (10):

$$a = a_{vert} K_{vert} \quad (10)$$

Onde:

a_{vert} : aceleração máxima sem levar em consideração o fator de grupo;

K_{vert} : fator de grupo relacionado à frequência fundamental da passarela.

O cálculo da aceleração a_{vert} , sem levar em conta o fator de grupo K_{vert} é realizado por meio das Equações (11) e (12):

$$a_{vert} = 165K_a \frac{1 - e^{-2m\zeta}}{M\zeta} \quad (11)$$

$$M = \rho A L \quad (12)$$

Onde:

M : massa total da passarela (kg);

ρ : densidade do aço (kg/m³);

A : área da seção transversal da passarela (m²);

L : vão da passarela (m);

ζ : coeficiente de amortecimento da estrutura (%);

n : número de passos para cruzar o vão da passarela ($n=L/0,9m$);

K_a : fator de configuração.

O cálculo da aceleração correspondente à excitação causada por um único pedestre cruzando a passarela é obtida pela Equação (13):

$$a = 0,027Lb a_{vert} K_{vert} \quad (13)$$

Onde:

L : vão da passarela (m);

b : largura da passarela (m).

1.2.6 Norma Eurocode 5 - Parte 2 [43]

A norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 [43] (utilizados para estruturas de madeira) recomenda que sejam dispensadas das verificações de acelerações as passarelas que apresentarem frequências naturais nas direções transversal vertical e transversal horizontal acima de 5,0 Hz e 2,5 Hz, respectivamente.

A norma [37] (para estruturas de aço) apresenta apenas diretrizes para projeto de passarelas simplesmente apoiadas de um único vão. A seguir tem-se o cálculo das acelerações nas direções transversal vertical e transversal horizontal, quando uma pessoa ou mais pessoas cruzam a passarela, cujas as frequências naturais da estrutura estejam abaixo dos limites estabelecidos. O cálculo da aceleração na direção transversal vertical a_{vert} para uma pessoa caminhando em uma passarela simplesmente apoiada é dada pelas Equações 14 a 16.

$$a_{vert} = \frac{200}{M\xi} \text{ para } f_n \leq 2,5Hz \quad (14)$$

$$a_{vert} = \frac{100}{M\xi} \text{ para } 2,5 \leq f_n \leq 5,0Hz \quad (15)$$

$$M = \rho AL \quad (16)$$

Onde:

M : massa total da passarela (kg);

ρ : densidade do material (kg/m³);

A : área da seção transformada da passarela (m²);

L : vão da passarela (m);

ξ : coeficiente de amortecimento (%).

A aceleração transversal vertical para várias pessoas caminhando sobre a passarela é dada pela Equação 17.

$$a_{vert,n} = 0,23 a_{vert} n_{ped} K_{vert} \quad (17)$$

Onde:

n_{ped} : número de pedestres;

K_{vert} : coeficiente relacionado à frequência natural da passarela (Eurocode 5 [43]).

O cálculo da aceleração na direção transversal horizontal a_{lat} para uma pessoa caminhando sobre a passarela é dado pela Equação 18.

$$a_{lat} = \frac{50}{M\xi} \text{ para } 0,5 \leq f_{lat} \leq 2,5Hz \quad (18)$$

A aceleração transversal horizontal para várias pessoas caminhando sobre a passarela é dada pela Equação 19.

$$a_{horiz} = 0,18 a_{lat} n_{ped} K_{lat} \quad (19)$$

Onde:

K_{lat} : coeficiente relacionado à frequência natural da passarela (Eurocode 5 [43]).

A norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 [43] mantém as acelerações limites nas direções transversal vertical $a_{lim,vert}$ menor ou igual a $0,7 \text{ m/s}^2$ (7% g) e transversal horizontal $a_{lim,horiz}$ menor ou igual a $0,2 \text{ m/s}^2$ (2% g).

1.2.7 Norma Britânica BS 5400 [19]

A norma britânica BS 5400 [19] recomenda que para as passarelas onde a frequência fundamental esteja abaixo de 5Hz à aceleração da estrutura seja limitada ao valor calculado pela Equação (20). Assim sendo, passarelas com valores de frequência acima de 5Hz atenderiam aos critérios de conforto humano [19]. Deve-se ressaltar que, no presente momento, esta norma foi substituída pelos Eurocódigos. Todavia, diante da relevância da mesma os autores optaram por mantê-la no presente trabalho.

$$a = 0,5\sqrt{f_n} \quad (20)$$

Onde:

f_n : frequência fundamental.

O cálculo da aceleração máxima é feito mediante o emprego da Equação (21), sendo que este valor está associado à faixa de frequências entre 4Hz e 5Hz, adotando-se, respectivamente, uma redução de 1,0 e 0,7, para estas frequências. Os valores intermediários são obtidos por interpolação linear.

$$a = 4\pi^2 f_n^2 y_{est} K_{BS} \psi \quad (21)$$

Onde:

- f_n : frequência fundamental vertical da passarela (Hz);
- y_{est} : deslocamento no centro do vão ($y_{est} = PL^3/48EI$) devido ao peso humano ($P=700$ N);
- K_{BS} : fato de configuração que depende do número de vãos da estrutura;
- ψ : fator de resposta dinâmica.

1.2.8 Norma Canadense OHBDC [44]

A norma canadense OHBDC - Ontario Highway Bridge Design Code [40] recomenda que a aceleração seja verificada caso a frequência fundamental da estrutura encontre-se abaixo de 4Hz. A aceleração recomendada pela presente norma [44] não deve ultrapassar o valor obtido por meio da Equação (22).

$$a = 0,25 f_n^{0,78} \quad (22)$$

Onde:

- f_n : frequência fundamental da passarela.

O cálculo da aceleração é realizado adotando-se o método simplificado da norma britânica BS 5400 [20], de acordo com a Equação (20).

1.2.9 Norma Sueca Bro [45]

A norma sueca Bro [45] é aplicada a projetos de pontes e passarelas na Suécia. Esta norma recomenda que passarelas devam ter a frequência fundamental superior a 3,5Hz, ou seja, o projetista deve proceder à verificação da aceleração para passarelas cujas frequências naturais sejam inferiores aos valores recomendados, devendo a aceleração limite ser inferior a $0,5\text{m/s}^2$. Os valores das acelerações de pico devem ser obtidos por meio de análise dinâmica. O método simplificado desta norma é aplicável somente às passarelas biapoiadas, sendo que

para estruturas mais complexas é recomendado à realização de análise dinâmica com auxílio computacional.

1.3 Critérios sobre o conforto humano em passarelas

Rainer et al [46] propõe um método analítico para o cálculo do valor da aceleração de pico de passarelas em função do caminhar do pedestre, de acordo com a Equação (23), ressaltando que este valor de aceleração não deve ultrapassar, em nenhuma hipótese, os limites estabelecidos em normas de projeto [39].

$$a = 4\pi^2 f_n^2 y_{est} \alpha \phi_i \quad (23)$$

Onde:

- f_n : frequência fundamental da passarela;
- y_{est} : deslocamento no centro do vão ($y_{est} = PL^3/48EI$) devido ao peso humano ($P=700$ N);
- α_i : coeficiente de Fourier;
- ϕ : fator de amplificação dinâmico.

Pimentel et al [42] propõe um fator de configuração, K_{pf} , associado ao número de vãos da estrutura, a ser inserido na formulação proposta por Rainer [46], conforme apresentado na Equação (24). Destaca-se que para passarelas simplesmente apoiadas $K_{pf} = 1$.

$$a = 4\pi^2 f_n^2 y_{est} \alpha_i \phi K_{pf} \quad (24)$$

Onde:

- f_n : frequência fundamental da passarela;
- y_{est} : deslocamento no centro do vão ($y_{est} = PL^3/48EI$) devido ao peso humano ($P=700$ N);
- α_i : coeficiente de Fourier;
- ϕ : fator de amplificação dinâmico;
- K_{pf} : fator de configuração que depende do número de vãos.

Grundmann [47] apresentou uma formulação para o cálculo da aceleração de pico, aplicável somente para modelos de passarelas simplesmente apoiadas, de acordo com as Eqs.(25) a (27).

$$a_{vert} = 0,6 \frac{F}{m} \frac{\pi}{\delta} (1 - e^{-n\delta}) \quad (25)$$

$$F = \alpha_i P \quad (26)$$

$$m = \frac{17}{35} M \quad (27)$$

Onde:

P : peso do pedestre, considerado igual a 700 N;

α_i : coeficiente de Fourier para o i th harmônico;

n : número de passos para cruzar o vão;

M : massa total da passarela (kg);

δ : amortecimento crítico em termos de decremento logarítmico
($\delta = 2\pi\zeta$).

1.4 Guia de projeto do AISC

O guia de projeto do AISC [34] recomenda que a aceleração de pico das passarelas de pedestres não ultrapassem os limites delineados na Tabela 4, de acordo com a sua localização.

Tabela 4: Acelerações limites para passarelas de pedestres [34] [38].

Descrição	Aceleração (m/s ²)
Passarela interna	0,15
Passarela externa	0,49

O cálculo da aceleração de pico para um pedestre cruzando uma passarela simplesmente apoiada é dado pela Equação (28).

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P \exp(-0,35 f_n)}{\beta W} \quad (28)$$

Onde:

P : 0,41 kN para passarelas de pedestres;

f_n : frequência fundamental da estrutura;

β : coeficiente de amortecimento igual a 0,1;

W : peso efetivo da passarela.

g : aceleração da gravidade;

1.5 Comparativo entre os principais critérios normativos

A Figura 9 demonstra, com clareza, os valores limites das acelerações de pico estabelecidos pelas principais normas de projeto investigadas neste trabalho de pesquisa, em função da frequência fundamental da estrutura.

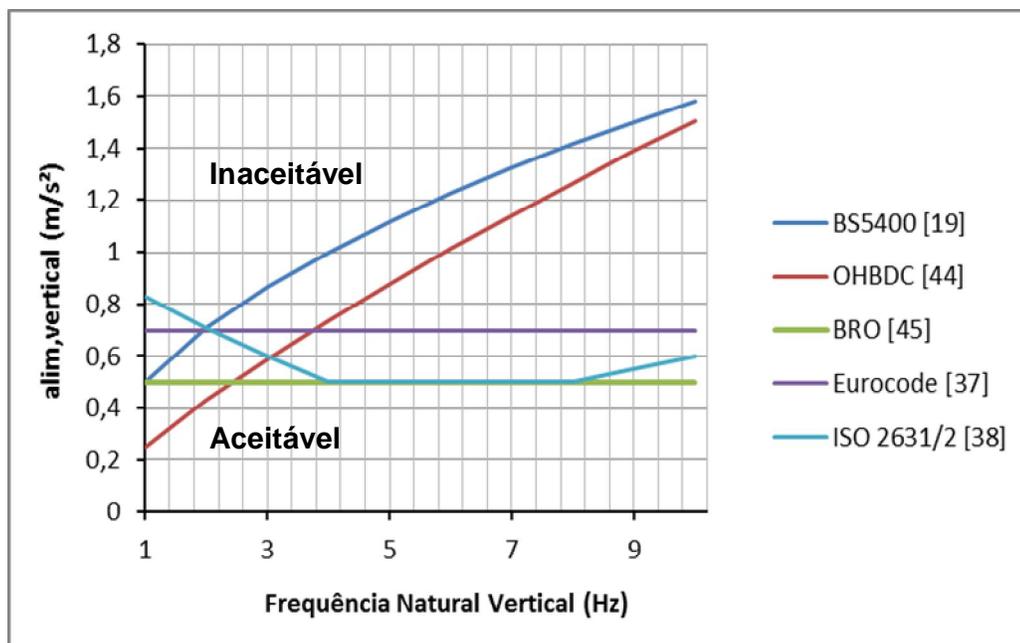


Figura 9 - Critérios normativos de aceleração limite para passarelas ($a_{lim, vertical}$ em m/s^2).

2 VIBRAÇÃO EM PISOS DEVIDO A ATIVIDADES HUMANAS

2.1 Introdução

Neste capítulo será discutido o problema de vibrações em pisos devido a atividades humanas como: caminhar, correr e pular. Será apresentado ainda um breve resumo da equação do movimento que rege o problema dinâmico.

2.2 Equação diferencial do movimento

A equação do movimento para qualquer sistema dinâmico tem como base a segunda lei de Newton. Essa relação pode ser expressa matematicamente com a seguinte equação diferencial:

$$f(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{dv}{dt} \right) \quad (29)$$

onde $f(t)$ é a resultante das forças aplicadas num corpo de massa m e é proporcional à taxa de variação no tempo da quantidade de movimento do corpo. Para a maioria dos problemas em dinâmica assume-se que a massa não varia com o tempo, e a Equação 29 pode ser reescrita:

$$f(t) = m \frac{d^2v}{dt^2} \equiv m\ddot{v}(t) \quad (30)$$

A conhecida Equação 30 que expressa que a força é igual ao produto da massa pela aceleração, pode agora ser escrita como:

$$f(t) - m\ddot{v}(t) = 0 \quad (31)$$

Neste caso o segundo termo $m\ddot{v}(t)$ é chamado de força de inércia desenvolvida pela massa m , proporcional à aceleração e no sentido contrário a ela.

Outras forças importantes na análise dinâmica são as forças elásticas, que dependem da rigidez e são proporcionais aos deslocamentos, e as forças de amortecimento, de caráter não conservativo, as quais promovem a dissipação da energia do sistema mecânico.

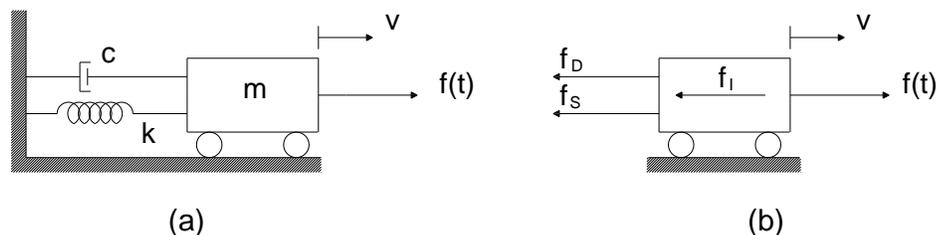


Figura 10 - Sistema idealizado com um grau de liberdade: (a) Componentes básicos; (b) Diagrama de corpo livre

A equação do movimento para o sistema da Figura 10(a) pode ser formulada diretamente pelo equilíbrio direto das forças atuantes na massa ou pelo princípio D'Alembert. Como mostrado na Figura 10(b), as forças atuantes são: a força aplicada $f(t)$ e três forças resultantes do movimento, inércia f_i , amortecimento f_D e a força elástica f_S . A equação do movimento então é meramente uma expressão do equilíbrio dessas forças, isto é:

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = f(t) \quad (32)$$

Onde:

- m : massa do corpo;
- c : amortecimento;
- k : rigidez do corpo;
- \ddot{v} : aceleração.
- \dot{v} : velocidade;
- v : deslocamento;
- $f(t)$: força externa aplicada.

A análise de vibração livre constitui uma etapa muito importante, pois é através dela que podemos conhecer as frequências fundamentais e os modos de vibração. Para um sistema não amortecido a Equação (32) torna-se:

$$m\ddot{v} + kv = 0 \quad (33)$$

A solução da Equação (33). é dada por:

$$v = \bar{v} \cos \omega_0 t \quad (34)$$

Onde:

- ω_0 : frequência natural de vibração;
- \bar{v} : amplitude no modo discreto de oscilação.

Substituindo-se a Equação 3 a Equação (34), chega-se ao problema de autovalor, logo:

$$|k - \omega_0^2 m| \bar{v} = 0 \quad (35)$$

Que para a solução não trivial ($\bar{v} \neq 0$) resulta na equação característica.

$$|k - \omega_0^2 m| = 0 \quad (36)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

As equações anteriores foram deduzidas para sistemas com um grau de liberdade, como o mostrado na Figura 10, para sistemas com vários graus de liberdade as Equações (35) e (36) são:

$$M\ddot{v}(t) + C\dot{v}(t) + Kv(t) = F(t) \quad (37)$$

Onde:

M : matriz de massa;

C : amortecimento;

K : rigidez dos modelo;

$\ddot{v}(t)$: vetor aceleração.

$\dot{v}(t)$: vetor velocidade;

$v(t)$: vetor deslocamento;

$F(t)$: vetor de forças nodais equivalentes.

$$|K - \omega_i^2 M| = 0 \quad (38)$$

onde ω_i^2 é a frequência natural do *enésimo* modo

2.3 Cargas dinâmicas induzidas por atividades humanas

Este tipo de ação dinâmica se faz presente basicamente em estruturas referentes a passarelas de pedestres, ginásios esportivos, pisos submetidos a atividades humanas, tais como: dança, aulas de ginástica aeróbica, shows de rock, concerto, etc.

Algumas considerações de caráter experimental devem ser levadas em conta na análise de estruturas submetidas a excitações dinâmicas induzidas pelo homem. Uma das dificuldades de se proceder à análise de pisos com carregamento de multidão diz respeito em como levar em conta a massa das pessoas, já que esta controla características importantes do sistema estrutural, tais como a frequência fundamental, e como consequência modifica a resposta dinâmica da estrutura quando esta é submetida a qualquer tipo de carregamento.

Um critério geralmente adotado é o de se considerar a multidão como uma massa adicionada à massa da estrutura, o que implica em um aumento de massa e redução da frequência fundamental. Entretanto, algumas considerações baseadas no fenômeno físico associado ao problema sugerem que as pessoas deveriam ser rigorosamente modeladas como sistemas adicionais massa-mola-amortecedor, Ellis & Ji [48].

Com base em diversos trabalhos técnicos publicados sobre o assunto em questão, pode-se verificar que no caso de pessoas pulando com os dois pés simultaneamente, ou durante atividades em que o contato destas com a estrutura seja relativamente curto, tem-se que a massa das pessoas não está vibrando junto com a massa do sistema estrutural e o envolvimento humano, nestes casos, ocorre apenas como carregamento e não associado à inclusão de massa adicional ao sistema. Tal conclusão foi obtida com base em ensaios experimentais, onde foi observado que as características dinâmicas do sistema em estudo (viga simplesmente apoiada com 3,0m de vão), tais como frequência e amortecimento, não foram sensivelmente modificadas pela presença das pessoas, Ellis & Ji [48].

Deve-se ressaltar também, que as ações dinâmicas induzidas pelos seres humanos podem ser de natureza periódica ou transiente. Basicamente, as cargas dinâmicas periódicas são caracterizadas por excitações repetidas ao longo do tempo, tais como o caminhar, correr, pular, etc. No que tange às cargas dinâmicas transientes, estas são causadas por um movimento único representado por um carregamento impulsivo sobre um determinado elemento estrutural, como no caso de plataformas de mergulho em piscinas.

Um outro fato importante associado a esse tipo de carregamento se refere ao contato da pessoa com o sistema estrutural. Este contato pode ser contínuo ou não, existindo, ainda, a influência da rugosidade da superfície, do tipo de calçado da pessoa, além do sexo, peso, etc. Finalmente, pode-se citar também, o número de

peças a realizar um determinado tipo de ação sobre o sistema estrutural, ou seja, o efeito de grupo. Percebe-se, claramente, que são inúmeros os fatores que contribuem para a vibração de pisos de edificações quando estes se encontram submetidos à ação humana, Ellis & Ji [48].

2.3.1 Caminhar

A caminhada é sem dúvida o tipo de excitação mais comum em sistemas de pisos. A geometria do corpo humano andando é, em uma primeira aproximação, um movimento organizado de pernas que necessariamente causa a subida e a descida da massa do corpo em cada passada, conforme mostrado na Figura 11. Este movimento de subida e descida é de aproximadamente 50 mm, de pico a pico, mas é sensível ao ângulo das pernas completamente esticadas, e deste modo à extensão no qual o pedestre está forçando o passo.

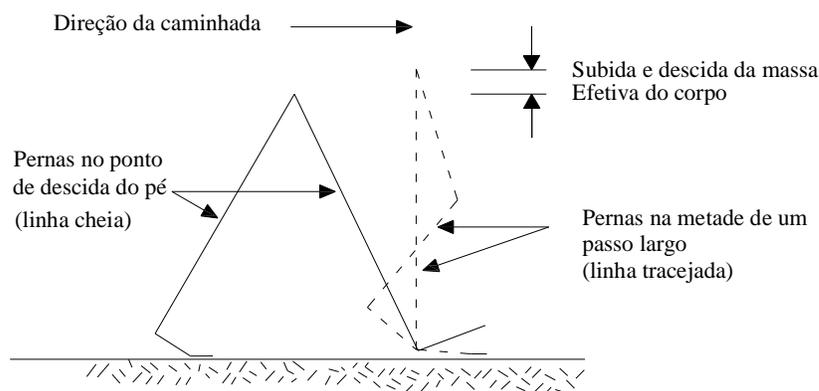


Figura 11 - Geometria simplificada de uma passada [49]

As acelerações verticais da massa do corpo são necessariamente associadas com as reações no piso, e elas são aproximadamente periódicas, na frequência do passo. A flutuação pode ser resolvida como uma série de componentes senoidais (série de Fourier) e o termo fundamental corresponde muito bem com a simplificação da Figura 12, resultando uma amplitude de força entre 100 N e 300 N.

A frequência do passo durante a caminhada pode variar entre 1,4 Hz e 2,5 Hz, e a amplitude da força tendendo a aumentar severamente com o aumento da frequência, Wyatt [49]. Entretanto, os passos de uma caminhada no interior de

edificações estão mais comumente perto do início da faixa, em torno de 1,6 Hz. A norma britânica, *BSI British Standard*, BS 5400 [19], sugere uma amplitude de força de 180 N para projetos de passarelas.

A Figura 12, mostra que o passo é definido como o intervalo entre os contatos consecutivos dos dois pés no piso. Considera-se que a força de reação do piso, que é a soma das forças aplicadas pelos dois pés no sistema estrutural no intervalo de um passo, é uma aproximação satisfatória da força de um passo. Isto porque, a distância entre os pés em um passo é muito pequena em relação ao tamanho de uma laje de piso que pode apresentar vibrações excessivas ao caminhar de pessoas.

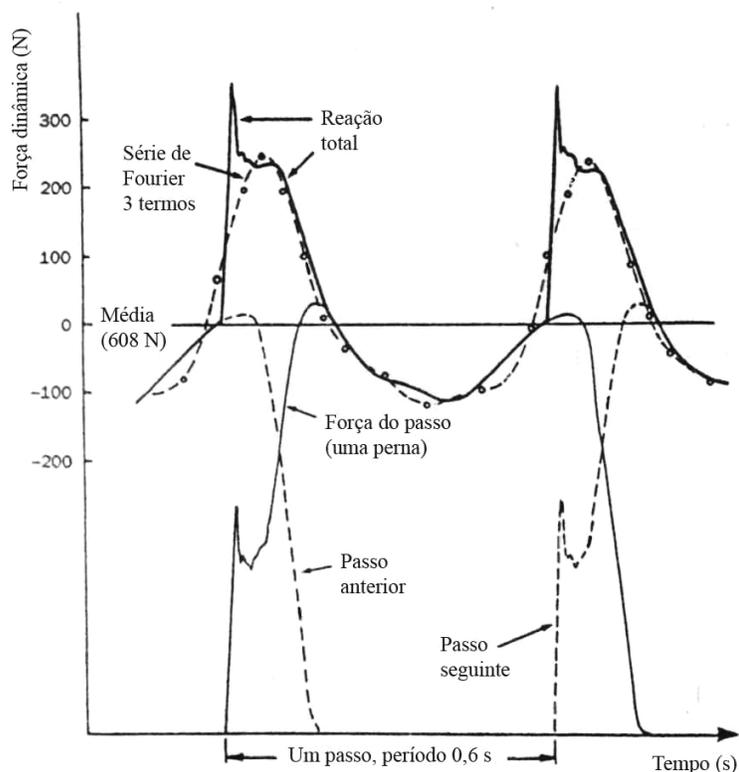


Figura 12 - Força de contato de um passo e reação do piso [49]

A caminhada é um carregamento um pouco mais complicado que os outros devido a variação da posição do carregamento em cada passo. Em alguns casos a força aplicada é senoidal ou próxima disso. No geral, uma força repetitiva pode ser representada por uma combinação de forças senoidais cujas frequências são múltiplos ou harmônicos da frequência básica da força repetitiva, por exemplo, a

frequência do passo das atividades humanas (f_p). Esse carregamento é produzido pelos dois pés, como uma função da parcela estática associada com o peso do indivíduo e três ou quatro componentes harmônicas do carregamento. Esses harmônicos surgem devido à interação entre a carga crescente representada por um pé e pelo simultâneo descarregamento do outro pé.

A força $F(t)$ na Equação (38) pode, portanto, ser representada no tempo pela série de Fourier.

$$F(t) = P \left[1 + \sum \alpha_i \cdot \cos(2\pi i \cdot f_p t + \phi_i) \right] \quad (39)$$

Onde:

P : peso de uma pessoa [30];

α_i : coeficiente dinâmico para força harmônica;

i : múltiplo harmônico (1, 2, 3...);

f_p : frequência do passo da atividade;

t : tempo;

ϕ_i : ângulo de fase para o harmônico.

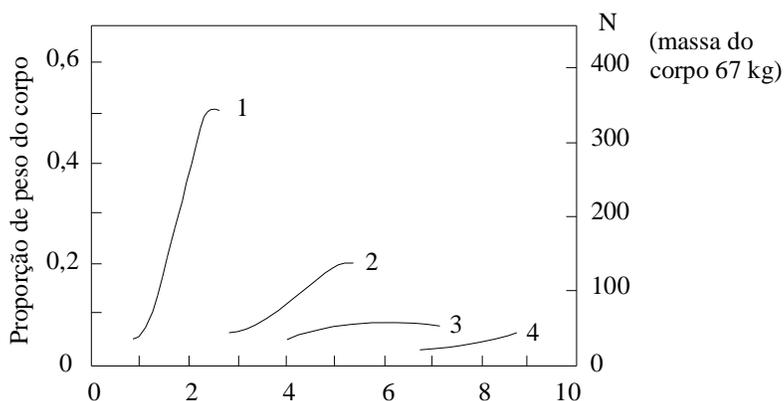


Figura 13 - Amplitudes das componentes de Fourier para uma caminhada regular [13].

Como regra geral, a magnitude do coeficiente dinâmico diminui com o aumento do harmônico, por exemplo, os coeficientes dinâmicos associados com os quatro primeiros harmônicos da caminhada são $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 0,2$, $\alpha_3 = 0,1$ e $\alpha_4 = 0,05$, respectivamente. Na teoria, se qualquer frequência associada com as forças

senoidais iguais com a frequência natural de um determinado modo de vibração, então a ressonância ocorrerá, causando graves amplificações na resposta dinâmica.

A magnitude da segunda componente de Fourier varia com os passos na caminhada de forma similar à componente básica. Entretanto, os efeitos das frequências mais altas, especialmente o impulso devido ao contato dos pés com o piso, variam consideravelmente de pessoa para pessoa. Os valores médios dos coeficientes de Fourier relatados por Rainer, Pernica e Allen [13] em um estudo canadense para carregamentos em passarelas de pedestres são mostrados na Figura 13. O impulso de contato é tipicamente em torno de 3 N.

Segundo Bachmann [50], andar pesadamente, ou mais de uma pessoa caminhar em conjunto, é um carregamento dinâmico mais severo, mas somente para os dois primeiros harmônicos. Geralmente tais casos são raros demais para representar um problema na prática. Similarmente um grande grupo de pessoas andando em uma área produz um carregamento dinâmico relevante quando andando em conjunto (frequência do passo de aproximadamente 2 Hz), mas a falta de conexão com harmônicos mais altos e o efeito do amortecimento causado pelas pessoas faz com que tais carregamentos não sejam um problema na prática.

Varela [24], em sua tese de doutorado, tendo como base a aproximação matemática da reação do piso mostrada na Figura 13 propõe um modelo matemático que inclui em sua formulação o pico transiente representativo do impacto do calcanhar no piso. Para tanto, alguns parâmetros foram deduzidos da Figura 14 e algumas hipóteses foram feitas.

A função proposta para o pico transiente representativo do calcanhar é dada pela Equação.

$$F(t) = \begin{cases} \left(\frac{f_{mi} F_m - P}{0,04 T_p} \right) t + P & \text{se } 0 \leq t < 0,04 T_p \\ f_{mi} F_m \left[\frac{C_1 (t - 0,04 T_p)}{0,02 T_p} + 1 \right] & \text{se } 0,04 T_p \leq t < 0,06 T_p \\ F_m & \text{se } 0,06 T_p \leq t < 0,15 T_p \\ P + \sum_{i=1}^{nh} P \alpha \operatorname{sen} [2 \pi i f_c (t + 0,1 T_p) + \phi_i] & \text{se } 0,15 T_p \leq t < 0,90 T_p \\ 10 (P - C_2) \left(\frac{t}{T_p} - 1 \right) + P & \text{se } 0,90 T_p \leq t < T_p \end{cases} \quad (40)$$

Onde:

F_m : valor máximo da série de Fourier, dado pela Equação (41);

f_{mi} : fator de majoração do impacto do calcanhar (1,12);

T_p : período do passo;

C_1 : coeficiente dado pela Equação (42);

C_2 : coeficiente dado pela Equação (43);

$$F_m = P \left(1 + \sum_{j=1}^{nh} \alpha_j \right) \quad (41)$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{f_{mi}} - 1 \right) \quad (42)$$

$$C_2 = \begin{cases} P(1 - \alpha_2); nh = 3 \\ P(1 - \alpha_2 + \alpha_4); nh = 4 \end{cases} \quad (43)$$

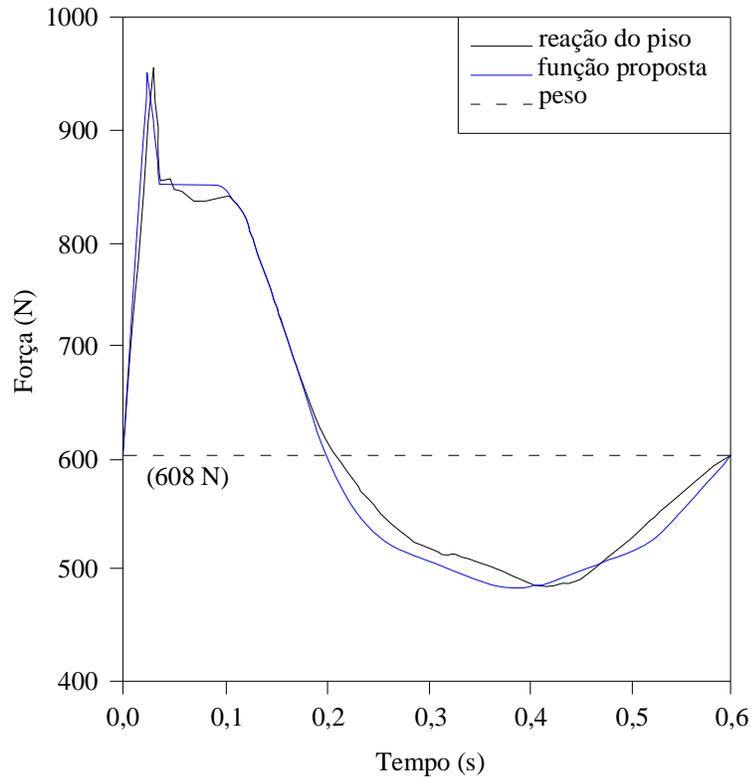


Figura 14 – Comparação entre a função proposta para o caminhar e os resultados obtidos por Olhsson [13].

Na Figura 14, o fator de majoração do impacto do calcanhar foi tomado igual a 1,12 [5], mas esse valor pode variar consideravelmente de uma pessoa para outra. Aliás, toda forma da função representativa do caminhar humano pode variar bastante entre pessoas. Os ângulos de fase utilizados na Equação devem ser $\Phi_1 = 0$, $\Phi_2 = \pi/2$, $\Phi_3 = \pi$ e $\Phi_4 = 3\pi/2$, isto porque as equações foram concebidas utilizando esses valores, caso seja utilizado valores diferentes dos apresentados, a Equação (40) a (43) apresenta singularidades e fica descaracterizada, de acordo com as recomendações de Varela [24].

2.3.2 Correr

De acordo com Bachmann e Ammann [14], a corrida pode ser definida como um movimento em que o contato da excitação dinâmica com a superfície da estrutura é descontínuo. Essa descontinuidade é representada pela metade da curva

senoidal durante o contato, e zero quando o contato é perdido, conforme a Figura 15.

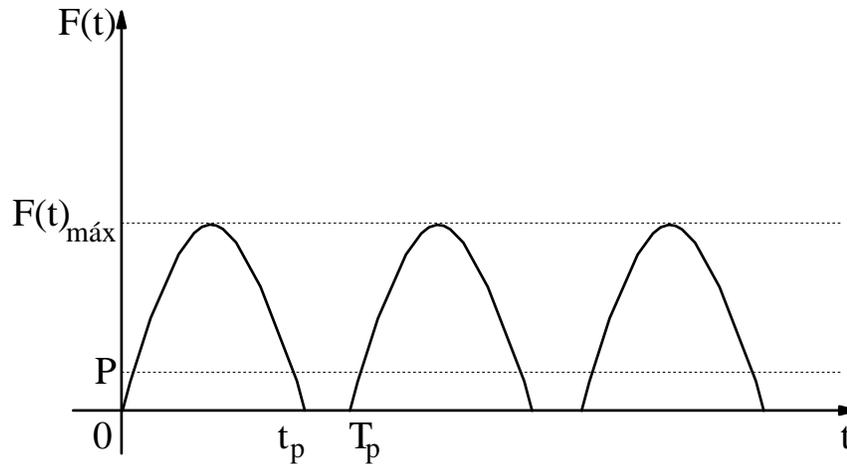


Figura 15 - Força de excitação dinâmica descontínua.

A Equação (44) representa esse carregamento:

$$F(t) = \begin{cases} k_p \cdot P \cdot \text{sen}(\pi f_p \cdot t); & \text{se } t < t_a \\ 0; & \text{se } t_a < t < T_p \end{cases} \quad (44)$$

Onde:

t_a : duração de aplicação da força quando uma pessoa corre;

T_p : período do passo;

K_p : definida pela relação $p(t)_{\text{máx}}/P$. Nessa expressão $p(t)_{\text{máx}}$ é a maior amplitude da função senoidal;

P : peso do indivíduo.

2.3.3 Pular

A metade da curva senoidal é também usada para modelar esse tipo de carregamento, Figura 15. Essa situação, associada com saltos individuais no sistema estrutural, considera que o efeito gerado por um grupo de pessoas leva a um crescimento linear do carregamento máximo dinâmico, dependendo somente do número de pessoas. O carregamento em função do tempo para atividades que

envolvam pulos pode ser simulado por uma sequência de forças impulsivas com certo intervalo de duração t_c (tempo de contato) seguido por intervalo t_p em que a força é zero, quando os pés deixam de estar em contato com o piso.

2.4 Considerações sobre a caminhada humana

Baseado nos modelos numéricos de carregamentos dinâmicos apresentados neste capítulo, observamos que, embora os critérios de conforto humano sejam conhecidos por muitos anos, só recentemente se tornou prática de projeto, aplicar tais critérios para a verificação de estruturas. A razão para isto é que o carregamento é complexo e a resposta complicada, envolvendo um grande número de modos de vibração. Os estudos acadêmicos e experimentais mostram, no entanto, que o problema pode ser simplificado até que se obtenham critérios práticos de projeto.

A maioria dos problemas de vibração envolvem forças que se repetem, causadas por máquinas ou por atividades humanas, como a dança, a aeróbica ou o caminhar. Apesar da caminhada se tornar um pouco mais complicada do que os outros carregamentos, na maioria dos casos, a força aplicada é senoidal ou quase isso.

Com referência ao modelo de carregamento dinâmico, o movimento de pernas do ser humano que causa a subida e descida da massa efetiva do corpo em cada passo foi considerado ao longo da análise e a posição da carga dinâmica foi alterada de acordo com a posição do pedestre sobre a estrutura. Deste modo, a função de tempo, correspondente à excitação dinâmica induzida pela caminhada, possui uma variação espacial e temporal, objetivando uma representação mais realista dos passos dados pelo ser humano em uma caminhada.

Tabela 5 - Características do caminhar humano

Atividade	Velocidade (m/s)	Distância do Passo (m)	Frequência do Passo (Hz)
Caminhada lenta	1,1	0,60	1,7
Caminhada normal	1,5	0,75	2,0
Caminhada rápida	2,2	1,00	2,3

Por outro lado, faz-se necessário um estudo mais abrangente acerca de outros parâmetros a serem efetivamente utilizados na modelagem numérica, tais

como: a distância e a velocidade do passo. Estes parâmetros estão associados com a frequência do passo humano e são ilustrados pela Tabela 5.

Assim sendo, de forma a demonstrar a modelagem numérica da ação de caminhar do pedestre sobre a estrutura, considera-se as passarelas investigadas, com vão de 10 à 30m e frequência fundamental que variam de 12,65Hz à 4,92Hz para os perfis sólidos e 12,86 a 5,20 para os perfis celulares (f_{01}). Desta maneira, utiliza-se uma frequência do passo (f_p) igual a 1,7 Hz, 2 Hz e 2,3 Hz, de acordo com a Tabela 5, de forma a induzir a estrutura o mais próximo possível do fenômeno físico da ressonância.

Nesta situação, a malha de elementos finitos precisa ser refinada suficientemente e o tempo de contato da aplicação da carga dinâmica com a estrutura depende da distância e da frequência do passo. Assim sendo, a distância do passo associada à frequência varia de acordo com a Tabela 5. Na sequência, a carga dinâmica associada ao caminhar do pedestre sobre a passarela, ao longo do tempo, é obtida mediante o emprego dos harmônicos, utilizados para gerar a função de carregamento.

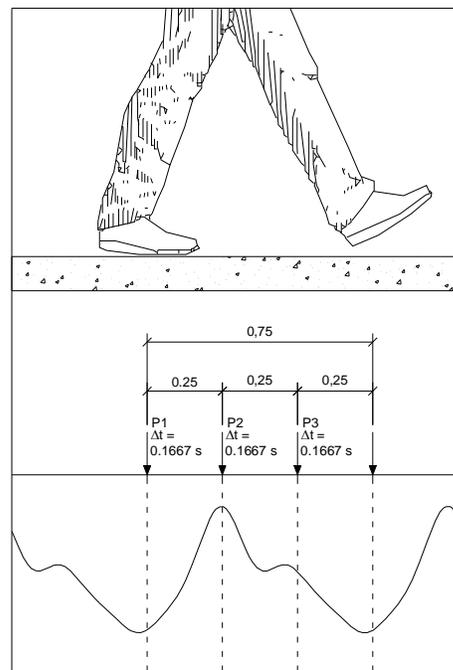


Figura 16 - Representação do passo do pedestre durante a caminhada [25]

Sabendo-se que em sua maioria o carregamento dinâmico do caminhar de pessoas é em ritmo normal, temos que o período do passo é igual a $1/f_p = \frac{1}{2} \text{ Hz} = 0,50 \text{ s}$, correspondente a uma distância de 0,75m. Portanto, adotando-se uma malha com elementos finitos com comprimento de 0,25m, por exemplo, para representar um passo do pedestre sobre a passarela seriam necessárias três cargas. Cada uma dessas cargas P1, P2 e P3 seriam aplicadas durante $0,50/3 = 0,1667 \text{ s}$, conforme ilustrado na Figura 18. Nota-se que para as caminhadas em ritmo lento e rápida, a teoria utilizada é a mesma que a mostrada anteriormente para a caminhada normal.

Destaca-se que a ação dinâmica não é aplicada simultaneamente. A carga P1 é aplicada durante 0,1667 s, e no final deste período de tempo, P1 passaria a assumir um valor nulo e, logo em seguida, a carga P2 seria aplicada por 0,1667 s. Este processo numérico ocorre sucessivamente, ao longo do tempo, e a força dinâmica associada ao caminhar do pedestre é aplicada, de forma correta, ao longo de toda a passarela.

Durante a caminhada em uma estrutura, os pedestres introduzem forças dinâmicas que variam no tempo e estas forças têm componentes (nas direções transversal vertical, transversal horizontal e longitudinal) dependentes de parâmetros, tais como: frequência de passo, velocidade de caminhada e comprimento de passo. Este estudo tem uma atenção especial à componente na direção transversal vertical, haja vista, que quase todos os problemas documentados a respeito das vibrações induzidas por pedestres foram associados a essa componente.

O A frequência típica de passo para caminhada normal, gira em torno de 2 passos por segundo, gerando uma força na direção transversal vertical com 2,0 Hz de frequência. A caminhada lenta está na faixa de 1,4 a 1,7 Hz e a caminhada rápida na faixa de 2,2 a 2,4Hz. Isto significa que a faixa total da frequência de força na direção transversal vertical é de 1,4 a 2,4Hz, com uma média de 2,0Hz.

Em relação a análise, e recapitulando os modelos, sabemos que na proposta de Bachmann [15] a ação dinâmica transversal vertical induzida pelo caminhar humano é representada pela Equação (39). São considerados cinco harmônicos na composição da ação dinâmica representativa da caminhada humana e os coeficientes dinâmicos associados a estes harmônicos estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes dinâmicos.

Harmônico i	Coeficiente Dinâmico (α_i)		Ângulo de Fase (ϕ_i)
	Transversal Vertical	Transversal Horizontal	
1	0,37	0,039	0
2	0,10	0,010	$\pi/2$
3	0,12	0,042	$\pi/2$
4	0,04	0,012	$\pi/2$
5	0,08	0,015	$\pi/2$

O modelo de função proposta pelo AISC [34] se baseia na mesma formulação do Bachmann [33], representando a caminhada humana em uma série de Fourier, conforme Equação (39). São considerados quatro harmônicos na composição da ação dinâmica representativa da caminhada humana e os coeficientes dinâmicos transversal vertical associados a estes harmônicos estão expressos na Tabela 7.

O CEB (Comité Euro-International du Béton) [40] propõe um modelo determinístico no domínio do tempo para representar os carregamentos provocados por ações humanas. O modelo proposto pelo CEB para a função de carregamento dinâmico vertical do movimento de caminhar é uma função periódica representada por uma série de Fourier, de acordo com a Equação (45). A formulação proposta pelo CEB [40] considera apenas três harmônicos na composição da ação dinâmica representativa do caminhar e os coeficientes dinâmicos associados a estes harmônicos estão expressos na Tabela 8.

Tabela 7 - Coeficientes dinâmicos [34].

Harmônico i	Coeficiente Dinâmico (α_i)	Ângulo de Fase (ϕ_i)
1	0,50	0
2	0,20	$\pi/2$
3	0,10	π
4	0,05	$3\pi/2$

$$F(t) = P_0 + \sum \Delta_i P_0 \text{sen}(2i \pi f_p t - \phi_i) = P_0 + \Delta_1 P_0 \text{sen}(2\pi f_p t) + \Delta_2 P_0 \text{sen}(4\pi f_p t - \phi_2) \quad (45)$$

Onde:

$F(t)$: função de carregamento variando no tempo;

P_0 : peso de uma pessoa (N);

Δ_i : coeficiente de Fourier para o harmônico;

$\Delta_i P_0$: amplitude da Força do harmônico;

f_p : frequência do passo humano;

ϕ_i : ângulo de fase para o harmônico i ;

t : tempo.

Tabela 8 - Coeficientes dinâmicos.

Harmônico i	Coeficiente Dinâmico (α_i)	Ângulo de Fase (ϕ_i)
1	0,40	0
2	0,10	$\pi/2$
3	0,10	$\pi/2$

Ressalta-se que, neste trabalho de pesquisa, que na função de carregamento dinâmico, $F(t)$, representativa do caminhar do pedestre sobre a passarela, foi implementado o modelo proposto por Varela e Battista [24] para se simular o carregamento transversal vertical.

2.4.1 Modelo proposto por Varela e Battista [24]

Este modelo matemático baseia-se em uma análise mais realista para representar a excitação dinâmica proveniente do pedestre, de forma a incorporar o impacto transiente do calcanhar humano devido ao caminhar. O modelo adotado neste estudo foi proposto a partir de uma aproximação matemática respaldada por estudos experimentais que permitiram registrar a reação total de um piso, gerada ao longo do tempo, durante uma caminhada sobre plataformas rígidas (Ohlsson [13] Varela [24]), conforme mostrado na Figura 14. Neste caso, a carga dinâmica associada ao caminhar humano, considerando-se a incorporação do efeito do impacto do calcanhar, é obtida a partir das Equações (40) a (43) (Varela [24]). Essas

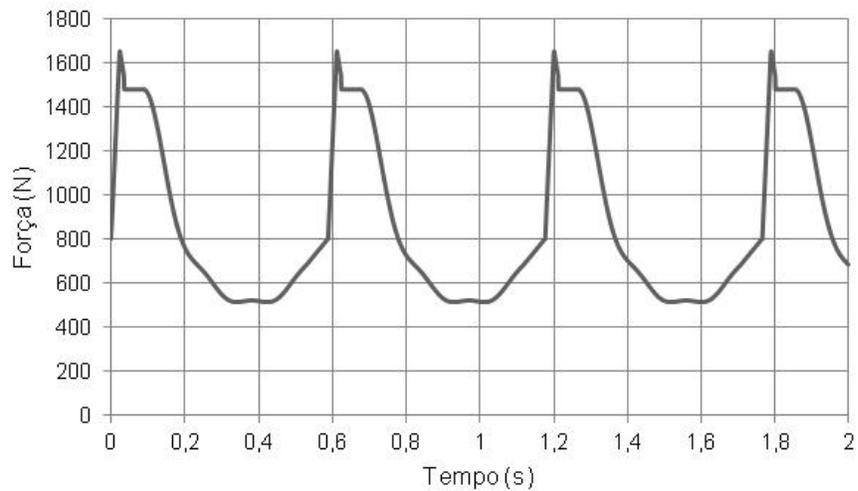
funções matemáticas, Equações (40) a (43), utilizada para representar a carga dinâmica produzida por uma pessoa caminhando sobre um piso, não é simulada simplesmente por uma série de Fourier, pois a equação também incorpora em sua formulação o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso.

Na presente investigação, durante a utilização das Equações (40) a (43), adotou-se o valor de 1,12 para o fator de amplificação do impacto do calcanhar humano ($f_{mi} = 1,12$) [20]. Todavia, faz-se necessário enfatizar que este valor varia de pessoa para pessoa, uma vez que, o referido coeficiente merece um estudo mais aprofundado. Neste modelo de carregamento, os coeficientes dinâmicos associados aos quatros primeiros harmônicos da caminhada são fornecidos pelo guia de projeto do AISC (Murray et al [34]), de acordo com a Tabela 9.

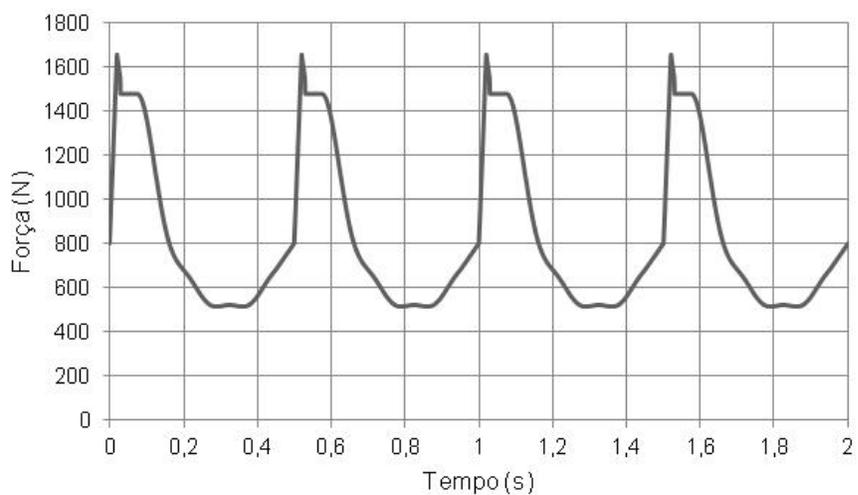
Tabela 9 - Coeficientes dinâmicos [34].

Harmônico i	Coeficiente Dinâmico(α_i)	Ângulo de Fase (ϕ_i)
1	0,50	0
2	0,20	$\pi/2$
3	0,10	π
4	0,05	$3\pi/2$

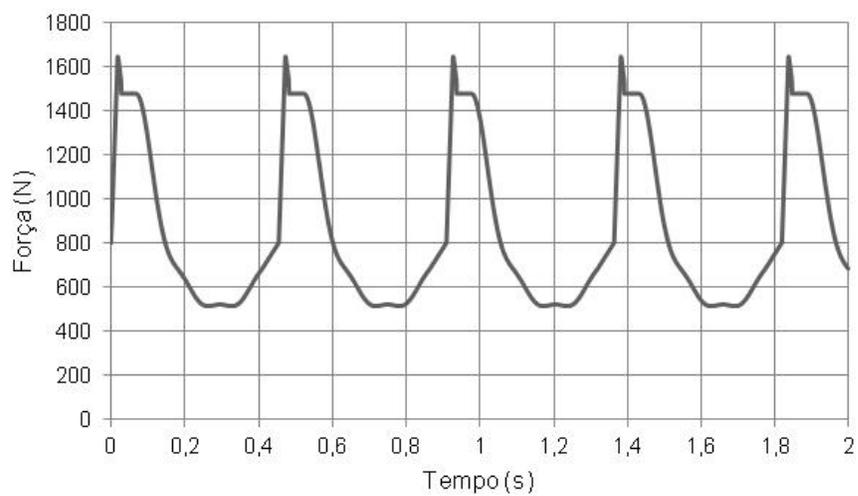
A Figura 17 apresenta uma função de carregamento dinâmico vertical, a qual representa um pedestre caminhando sobre a passarela (Debona [47]). O programa GFCD - Gerador de Funções de Carregamento Dinâmico (Figueiredo [25]) foi utilizado para gerar a função apresentada.



(a) Lento com $f_p = 1,70$ Hz.



(b) Normal com $f_p = 2,00$ Hz.



(c) Rápido com $f_p = 2,30$ Hz.

Figura 17 – Função de carregamento dinâmico transversal vertical para uma pessoa caminhando (Debona [47]).

3 DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

3.1 Introdução

O presente capítulo apresenta as informações relativas ao projeto estrutural da passarela investigada, cujo comportamento dinâmico foi analisado neste trabalho. Serão apresentados os dados referentes à geometria da estrutura, características geométricas dos perfis e características físicas dos materiais utilizados. As estruturas analisadas são passarelas mistas, constituídas por perfis em aço e lajes em concreto armado, suscetível a vibrações provenientes da caminhada humana.

Todas as passarelas, com perfis de alma cheia e perfis alveolares, foram devidamente dimensionadas de acordo com a norma brasileira NBR 8800 [52] e os critérios de dimensionamento dos furos nas almas se basearam na teoria de Harper [4]. Os dimensionamentos das passarelas não são apresentados, porém foram realizados utilizando a metodologia de cálculo avaliando os estados limites últimos de cada perfil de alma cheia e celular.

3.2 Modelo estrutural da passarela

Os modelos estruturais investigados correspondem a derivação de uma passarela biapoiada constituída por uma seção mista (aço-concreto) composta por vigas de aço do tipo “I” com dimensões que variam de 10m a 30m de comprimento. Encontra-se apoiada em colunas externas sem características de engastamento total ou elástico. O tabuleiro é formado por uma peça maciça de concreto armado com a largura de 2500mm e espessura de 100mm. As estruturas com perfis de alma cheia são as mesmas analisadas inicialmente por Figueiredo [25], sem as vigas de contraventamentos inferiores (transversinas), conforme pode ser observado na Figura 18.

Com referência às características físicas dos materiais utilizados, para o dimensionamento das estruturas foi considerado que:

- A massa específica do concreto (ρ_c) é igual a 2500 kg/m³;
- O peso específico do concreto (γ_c) é igual a 25 kN/m³;
- A resistência do concreto à compressão (f_{ck}) é igual a 30 MPa;

- O módulo de elasticidade do concreto (E_c) é igual 25×10^3 MPa;
- A tensão de escoamento do aço (f_y) é igual a 250 MPa;
- A tensão de ruptura à tração do aço (f_u) é igual a 400 MPa;
- O módulo de elasticidade do aço (E_s) é igual a $2,05 \times 10^5$ MPa;
- O módulo de distorção ou elasticidade transversal (G) é igual 78,85 GPa;
- O coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3.

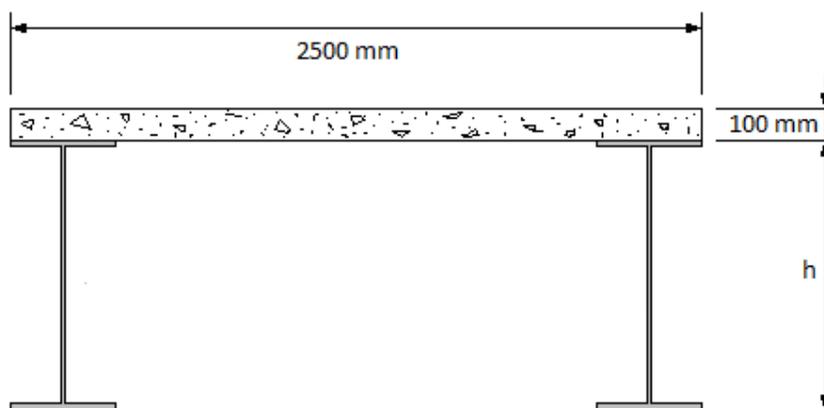


Figura 18 - Seção transversal típica das passarelas com a altura h .

Os perfis metálicos de sustentação escolhidos para a análise são do tipo soldáveis VS, cuja seção transversal e características geométricas são mostradas, respectivamente, na Figura 19 e na Tabela 10, conforme Figueiredo [25].

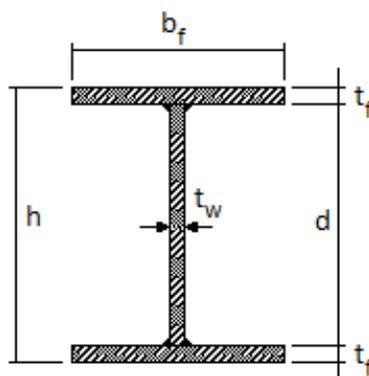


Figura 19 - Seção do perfil metálico de alma cheia adotado nas passarelas.

Tabela 10 - Dimensões dos perfis originais metálicos do tipo "I"

L (m)	Perfil	m (kg/m)	A (cm ²)	h (mm)	d (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	b _f (mm)
10,0	VS 400x58	57,8	73,6	400	375	6,3	12,5	200
12,5	VS 500x73	72,6	92,4	500	475	6,3	12,5	250
15,0	VS 550x100	99,9	127,3	550	512	6,3	19,0	250
17,5	VS 600x140	140,4	178,8	600	555	8,0	22,4	300
20,0	VS 700x154	153,7	195,8	700	655	8,0	22,4	320
22,5	VS 800x173	172,7	220	800	750	8,0	25,0	320
25,0	VS 900x191	190,8	243	900	850	8,0	25,0	350
27,5	VS 1000x201	200,7	255,6	1000	955	8,0	22,4	400
30,0	VS 1100x235	235,3	299,8	1100	1050	9,5	25,0	400

3.3 Dimensionamento das estruturas

De acordo com a NBR 8800 [52], após elencar as propriedades mecânicas e geométricas do concreto e do aço empregados, o dimensionamento das estruturas investigadas seguiu as seguintes etapas de cálculo:

3.3.1 Cálculo das cargas permanentes e acidentais

Para as cargas permanentes (g), considerou-se o somatório do peso próprio da laje, dado pela Equação (46), das duas vigas metálicas e do peso do revestimento. Para as cargas acidentais (q), considerou-se somente a carga gerada por pessoas.

$$g = \frac{L_0 e_j}{2} \gamma_c \quad (46)$$

Onde:

g : peso próprio da laje;

L_0 : largura da laje;

- e_j : espessura da laje;
 γ_c : peso específico do concreto.

3.3.2 Análise do parâmetro inicial do Estado Limite Último (ELU)

De acordo com a largura efetiva da laje, dimensionou-se o momento máximo admissível da viga através da Equação (47), considerando o esforço atuante no meio do vão das vigas provocado pelas cargas permanente e acidentais.

$$M_d = (g + q)L_j^2 / 8 \quad (47)$$

Onde:

- M_d : momento máximo total na (meio do vão);
 g : peso próprio da laje;
 q : peso próprio da laje;
 L_j : comprimento da laje;

3.3.3 Verificação de resistência à flexão

Para as passarelas de estruturas mistas (aço e concreto) deste trabalho, com perfis de alma cheia ou celulares biapoiadas, todos os dimensionamentos foram efetuados considerando as propriedades plásticas, uma vez que, os modelos analisados se encontram conforme as condições da Equação (48). Em seguida, o estado limite de resistência à flexão foi dimensionado conforme a Equação (49).

$$\frac{d}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \quad (48)$$

$$M_{pl} = W_x f_y \quad (49)$$

Onde:

- d : altura da alma do perfil;
 t_w : espessura da alma do perfil;

- E_s : módulo de elasticidade do aço;
 f_y : tensão de escoamento do aço;
 M_{pl} : momento plástico;
 W_x : módulo de resistência plástica (pelo eixo x).

3.3.4 Verificação da flambagem local da alma

Sendo o parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação (λ_p) uma razão entre a altura e a espessura da alma do perfil, conforme Equação (48) e que o parâmetro de esbeltez no início do escoamento (λ_r) é dado pela Equação (50), definiu-se a flambagem local da alma através da Equação (51).

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \quad (50)$$

$$M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \quad (51)$$

Onde:

- M_n : momento de flambagem local da alma;
 M_{pl} : momento plástico;
 M_r : momento limite para o escoamento;

3.3.5 Verificação da flambagem local da mesa

Em relação a mesa do perfil, de acordo com a norma [52], o parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação (λ_p) tem-se através da Equação (52). Definiu-se a flambagem local da mesa comprimida através do menor valor entre M_d dado pela Equação (47) e M_{pl} dado pela Equação (49).

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \quad (52)$$

3.3.6 Verificação de resistência ao esforço cortante (cisalhamento)

Utilizou-se a Equação (53) para o cálculo de esforço cortante máximo no apoio das vigas. Depois, calculou-se o esforço cortante plástico resistente através da Equação (54). Como os modelos analisados não possuem transversinas, a resistência ao cisalhamento foi dimensionada considerando as condições da Equação (55).

$$V_{ed} = F_d L_j \quad (53)$$

$$V_{pl,rd} = 1,04 A_w F_y \quad (54)$$

$$V_{rd} = \begin{cases} \frac{V_{pl}}{1,1} \rightarrow \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{\lambda_p V_{pl}}{1,1\lambda} \rightarrow \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ 1,24 \left(\frac{\lambda_p^2}{\lambda^2} \right) \rightarrow \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (55)$$

Onde:

- V_{ed} : esforço cortante máximo;
- F_d : somatório das cargas atuantes;
- L_j : comprimento da laje;
- A_w : área da alma do perfil;
- f_y : tensão de escoamento do aço;
- $V_{pl,rd}$: esforço cortante plástico resistente;
- V_{rd} : tensão resistente ao cortante;

3.3.7 Verificação das flechas na viga mista

O estado limite de deformação foi calculado fazendo uma comparação entre deformação máxima permitida ($L_j/300$) [52] e a deformação vertical existente, conforme Equação (56).

$$\delta_v = \frac{5qL_j^4}{384E_s I} \quad (56)$$

Onde:

- δ_v : deformação vertical existente;
- q : peso próprio da estrutura mista;
- L_j : comprimento da laje;
- E_s : módulo de elasticidade do aço;
- I : momento de inércia;

3.4 Vigas alveolares

As vigas alveolares surgiram na Europa por volta de 1930, devido à necessidade de atender as demandas de perfis com altura superior as dos perfis “I” laminados produzidos pela indústria da época.

A fabricação das vigas alveolares parte do perfil “I” com um corte longitudinal. Posteriormente as duas metades resultantes são defasadas e soldadas entre si pelos segmentos retos sobressalentes, formando com isso uma viga com altura superior a do perfil original. Como resultado do processo de corte, deslocamento e solda, a altura do perfil alveolar aumenta cerca de 50% em relação ao perfil original, dando origem a uma viga com maior inércia, mantendo-se o mesmo valor da área da seção e, portanto, o mesmo peso da estrutura.

3.4.1 Geometria das vigas alveolares

As vigas alveolares podem ser fabricadas de acordo com diversos tipos de geometrias , dentre as quais se destacam as vigas casteladas e as vigas celulares, conforme ilustrado na Figura 20.

As vigas casteladas são aquelas cujos alvéolos (furos) possuem formato hexagonal ou octogonal (quando existe a presença de chapa expansora). As vigas celulares possuem os alvéolos (furos) com formato circular. Esses três tipos podem ser observadas através da Figura 20.

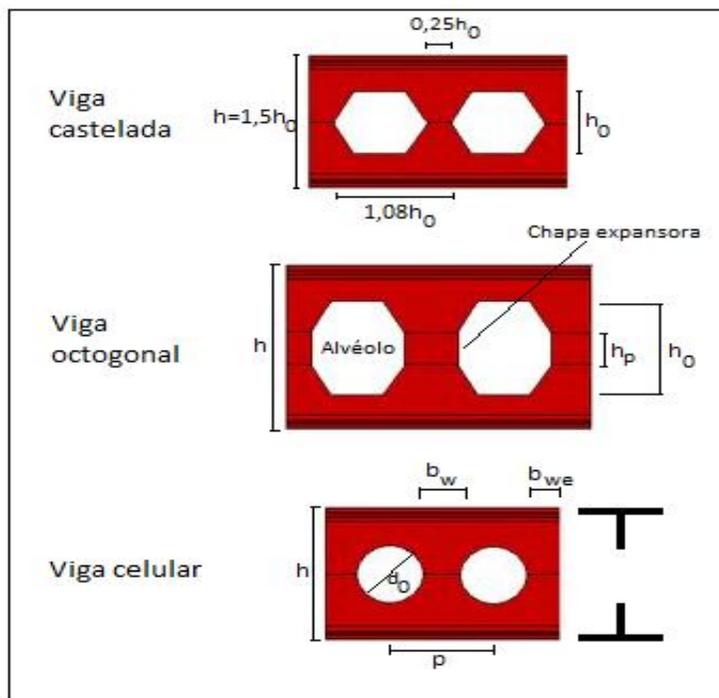


Figura 20 - Vigas alveolares.

3.4.2 Vigas celulares

Para efeito desta dissertação, dentre os principais perfis alveolares existentes, trabalhou-se com o perfil celular, onde são efetuados cortes longitudinais formando módulos contínuos de semicircunferência intercalados por um pequeno segmento reto, conforme ilustrado na Figura 21(a) [1]. Posteriormente, observa-se na Figura 21(b) [1] que as duas metades são separadas e sobrepostas de forma a serem soldadas as partes retas.

Além de aumentar a resistência à flexão, as vigas celulares têm a vantagem de possibilitar a passagem de dutos dentro das aberturas, evitando corte na alma ou aumento da altura da construção, conforme Figura 22.

Segundo Ward [53], as vigas celulares são utilizadas para vencer grandes vãos, principalmente quando atua um carregamento uniformemente distribuído, pois possuem capacidade resistente ao cisalhamento bastante reduzida sob cargas concentradas.



Figura 21 - Fabricação de vigas celulares: a) Corte da alma; b) Soldagem [1].

Um dos modos de falha das vigas celulares é a flambagem lateral com torção (FLT), que se trata de um estado limite último aplicável às vigas com perfil “I”, causado pelo momento fletor atuante em relação ao eixo de maior momento de inércia da seção transversal, e caracterizado por movimentos de translação lateral e torção.



Figura 22 - Vigas celulares [1].

Cabe salientar que a flambagem lateral com torção não foi considerada no dimensionamento das vigas de alma cheia e celulares deste trabalho, uma vez que, as estruturas propostas são de interação total (entre a laje e o perfil metálico). Neste caso, a mesa superior comprimida não tem como se deslocar para fora do plano. Logo, não ocorre FLT.

As modelagens dos perfis celulares foram baseadas na teoria de Harper [4]. A Figura 23 apresenta uma combinação consagrada internacionalmente e que tem sido bastante utilizada na prática corrente de projeto, pelo fato de oferecer resultados compensadores [4]. A altura do perfil celular corresponde a altura do perfil original multiplicada pela razão de expansão (varia de 1,3 a 1,4). Com base na altura do perfil celular (h) definem-se os parâmetros geométricos da viga, tais como o passo (p) que é a distância entre os centros dos furos, o diâmetro do alvéolo (d_0) e a largura do montante interno (b_w), que corresponde a distância entre os furos, conforme Figura 20. Para o cálculo dos diâmetros mínimos e máximos foram adotados, respectivamente, $0,57h$ e $0,80h$ (57% e 80% da altura do perfil). Enquanto que, para o dimensionamento das distâncias mínimas e máximas entre os furos, adotaram-se, respectivamente, $1,08d_0$ e $1,50d_0$, conforme a Figura 23. Diante disso, foram estabelecidos os parâmetros de identidade para as quantidades de furos de cada perfil soldado VS analisado.

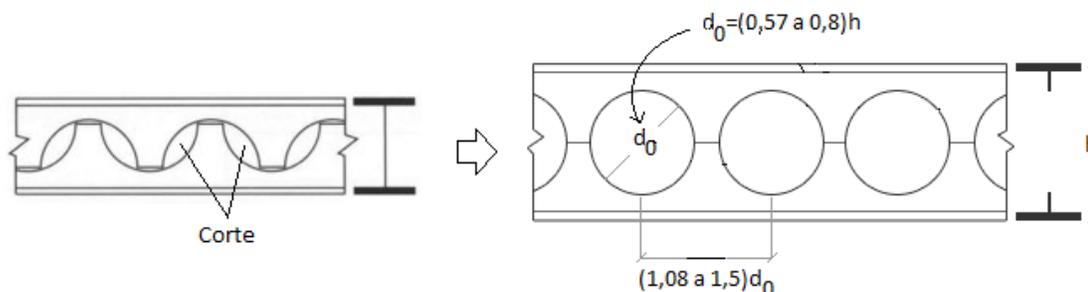


Figura 23 - Geometria flexível do diâmetro e do espaçamento para a fabricação de vigas celulares [4].

$$b_{w\min} \geq \begin{cases} d_0 / 12 \\ 50\text{mm} \end{cases} \quad (57)$$

$$b_{w\max} \leq \frac{d_0}{1,25} \quad (58)$$

$$b_{we\min} \geq p - \frac{d_0}{2} \quad (59)$$

Onde:

$b_{w\min}$: distância mínima entre os furos;

$b_{w\max}$: distância máxima entre os furos;

b_{wemin} : distância mínima entre o furo e a extremidade da alma da viga;

d_0 : diâmetro do furo;

p : distância entre os centros dos furos;

3.5 Seleção dos modelos das vigas celulares

Neste trabalho, após vários estudos analíticos, adotou-se o perfil celular formado com condições mecânicas e geométricas mínimas para resistir a todos os parâmetros do estado limite último. Iniciou-se avaliando os perfis de alma cheia de dimensão mínima a formar um perfil celular, de acordo com a teoria de Harper [4], respeitando o mínimo admissível para cada vão L . Diante dos resultados alcançados, a Tabela 11 mostra a correlação entre o perfil original de alma cheia do tipo “I” e o perfil celular formado.

Tabela 11 - Correlação entre o perfil do tipo “I” original e o perfil celular formado

L (m)	Perfil “I” original de alma cheia	Perfil “I” celular formado
10,0	VS 350x51	VS 508x49
12,5	VS 400x58	VS 580x55
15,0	VS 500x73	VS 725x69
17,5	VS 550x100	VS 798x95
20,0	VS 600x140	VS 870x133
22,5	VS 700x154	VS 1015x146
25,0	VS 800x173	VS 1160x164
27,5	VS 900x191	VS 1305x181
30,0	VS 1000x201	VS 1450x191

4 MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

4.1 Considerações iniciais

No capítulo anterior foram apresentadas todas as propriedades referentes as estruturas das passarelas em análise (alma cheia e celulares). Neste capítulo, essas propriedades são utilizadas para tornar possível o desenvolvimento de modelos numérico-computacionais, que representam o comportamento do sistema estrutural estudado.

4.2 Modelagem do amortecimento

Denomina-se amortecimento o processo pelo qual a energia do movimento vibratório é dissipada. Todavia, a avaliação do amortecimento estrutural é uma tarefa complexa que não pode ser determinada através da geometria da estrutura, das dimensões dos elementos estruturais e do amortecimento dos materiais, segundo Clough e Penzien [54].

Segundo Chopra [55], é impossível determinar a matriz de amortecimento de um sistema estrutural através das propriedades de amortecimento de cada elemento que compõe a estrutura da maneira como é determinada a matriz de rigidez, por exemplo. Isto ocorre porque ao contrário do módulo de elasticidade, que é utilizado na computação da rigidez, as propriedades de amortecimento dos materiais não são bem estabelecidas.

Ainda que estas propriedades fossem conhecidas, de acordo com Chopra [55], a matriz de amortecimento resultante não levaria em conta uma parte significativa da energia dissipada através do atrito nas ligações em estruturas metálicas, abertura e fechamento de micro fissuras no concreto, atrito entre a estrutura e outros elementos que estejam acoplados à mesma, tais como alvenaria, divisórias, equipamentos mecânicos, proteção contra incêndio, etc. Algumas destas fontes de dissipação de energia são extremamente difíceis de serem identificadas.

A avaliação física do amortecimento de uma estrutura só é considerada corretamente medida se seus valores são obtidos através de ensaios experimentais. Entretanto, a realização destes ensaios muitas das vezes demanda tempo e custo que na maioria dos casos é muito elevado. Por esta razão, o amortecimento é

geralmente obtido em termos de taxas de contribuição, ou taxas de amortecimento modal, Clough e Penzien [54].

Com este intuito, é habitual utilizar-se a matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera duas principais parcelas, uma relativa à taxa de contribuição da matriz de massa (α) e outra à taxa de contribuição da matriz de rigidez (β), conforme pode ser observado através da Equação (60). Define-se M a matriz de massa e K a matriz de rigidez do sistema, Craig Jr. [56], Clough e Penzien [54] e Chopra [55].

$$C = \alpha M + \beta K \quad (60)$$

A Equação (60) pode ser reescrita, em termos de taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_{0i}} + \frac{\beta\omega_{0i}}{2} \quad (61)$$

Onde:

ξ_i : taxa de amortecimento do i -ésimo modo;

ω_{0i} : frequência natural circular referente ao i -ésimo modo.

Isolando α e β da Equação (61), para duas frequências naturais mais importantes, obtêm-se as Equações (62) e (63).

$$\alpha = 2\xi_1\omega_{01} - \beta\omega_{01}\omega_{01} \quad (62)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2\omega_{02} - \xi_1\omega_{01})}{\omega_{02}\omega_{02} - \omega_{01}\omega_{01}} \quad (63)$$

A partir de duas frequências naturais mais importantes é possível descobrir os valores de α e β . Em geral, a frequência natural ω_{01} é tomada como a menor frequência natural, ou frequência fundamental da estrutura, e ω_{02} como a segunda frequência mais importante no carregamento.

Na literatura, encontram-se diversos valores e dados sobre o amortecimento estrutural. Muitas vezes, entretanto, estes valores aparecem com grande variabilidade, o que dificulta sua utilização em projetos estruturais nos quais se deseja atingir certo grau de sistematização. Além disso, face à grande variedade de formas de se considerar o amortecimento estrutural nos programas de análise numérica, as quais, caso sejam utilizadas de forma incorreta, fornecem resultados que não correspondem a uma situação real.

O AISC [34] apresenta valores recomendados de amortecimento viscoso para estruturas, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores recomendados de taxas de amortecimento ξ [34]

Tipo de construção	Amortecimento ξ
Escritórios, residências e igrejas	0,02 – 0,05
Shopping centers	0,02
Passarelas internas	0,01
Passarelas externas	0,01

Como as estruturas em estudo possuem poucos elementos que contribuam com o amortecimento, foi utilizado um coeficiente de amortecimento de 1,0% ($\xi = 1,0\%$ ou 0,01) em todos os modos.

4.3 Modelos em elementos finitos

No modelo numérico-computacional desenvolvido para a análise dinâmica das passarelas são empregadas técnicas usuais de refinamento, via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS [33].

No presente modelo, as vigas de aço são simuladas por elementos finitos de casca tridimensionais SHELL63, onde são considerados os efeitos de flexão e torção. A laje de concreto armado é simulada por meio de elementos finitos sólidos SOLID45. Considera-se que o aço e o concreto possuem interação completa e que ambos trabalham no regime linear-elástico.

Durante o refinamento, foram feitas as modelagens variando as malhas, o que acarretou em respostas distintas. Então, procurou-se trabalhar com malhas de 0,25m. Segundo o catálogo da ArcelorMittal [1], o crescimento nas vendas das vigas alveolares vem aumentando, onde prevalece um consumo maior sobre os perfis com o número máximo de furos admissíveis. Logo, O número de alvéolos (furos) de cada modelo celular avaliado neste capítulo corresponde ao máximo permitido, seguindo a teoria de Harper [4].

A Tabela 13 mostra uma correlação entre os perfis de alma cheia e celulares

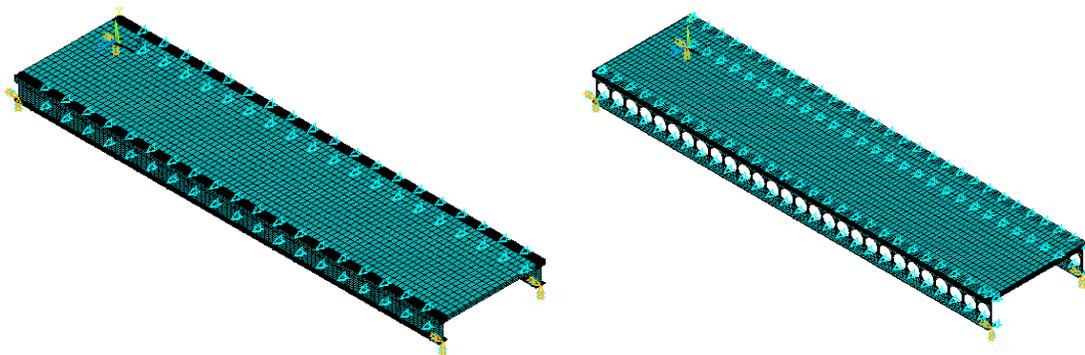
analisados.

Tabela 13 - Relação entre os perfis analisados

L (m)	Perfil de alma cheia	Perfil celular com a quantidade mínima e máxima de furos	
10,0	VS 400x58	VS 508x49	14 furos
			28 furos
12,5	VS 500x73	VS 580x55	14 furos
			28 furos
15,0	VS 550x100	VS 725x69	14 furos
			28 furos
17,5	VS 600x140	VS 798x95	15 furos
			31 furos
20,0	VS 700x154	VS 870x133	16 furos
			31 furos
22,5	VS 800x173	VS 1015x146	16 furos
			31 furos
25,0	VS 900x191	VS 1160x164	16 furos
			31 furos
27,5	VS 1000x201	VS 1305x181	16 furos
			31 furos
30,0	VS 1100x235	VS 1450x191	15 furos
			30 furos

4.3.1 Passarelas com vãos de 10m a 30m

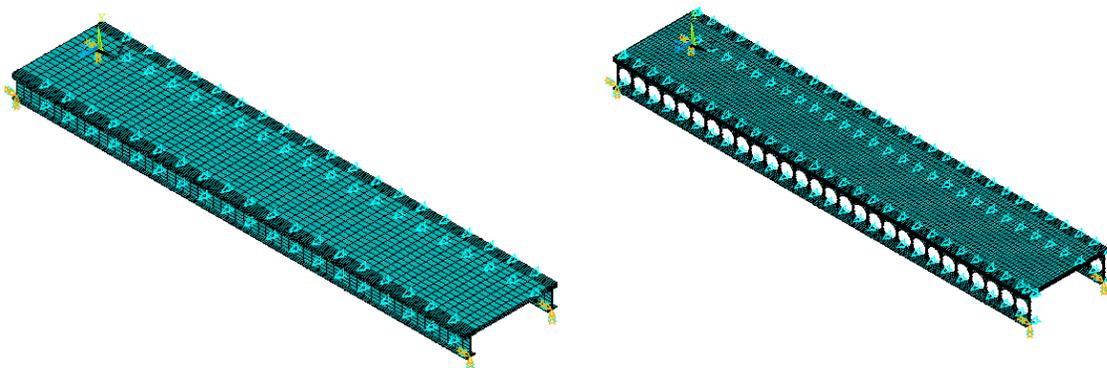
As Figuras 24 a 32 correspondem aos modelos analisados das passarelas mistas (aço-concreto) com vãos variando de 10 a 30 metros de comprimento, onde a comparação das vigas metálicas seguem a correlação entre as de almas cheias e celulares com o número máximo de furos (Tabela 13).



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

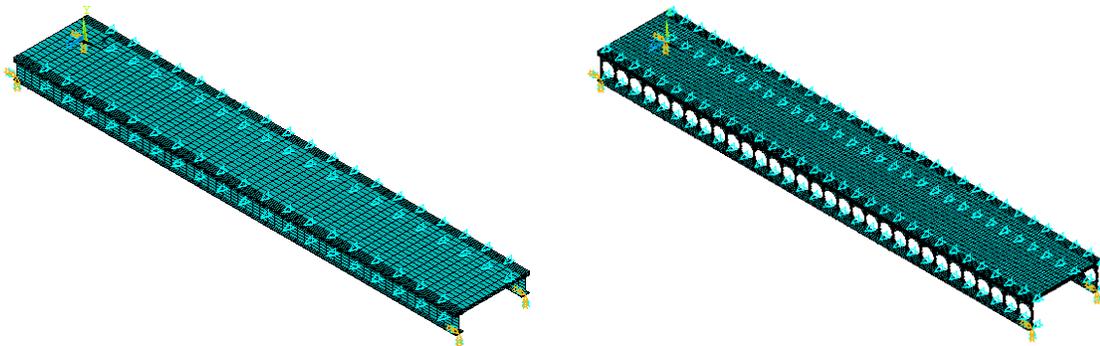
Figura 24 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 10m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

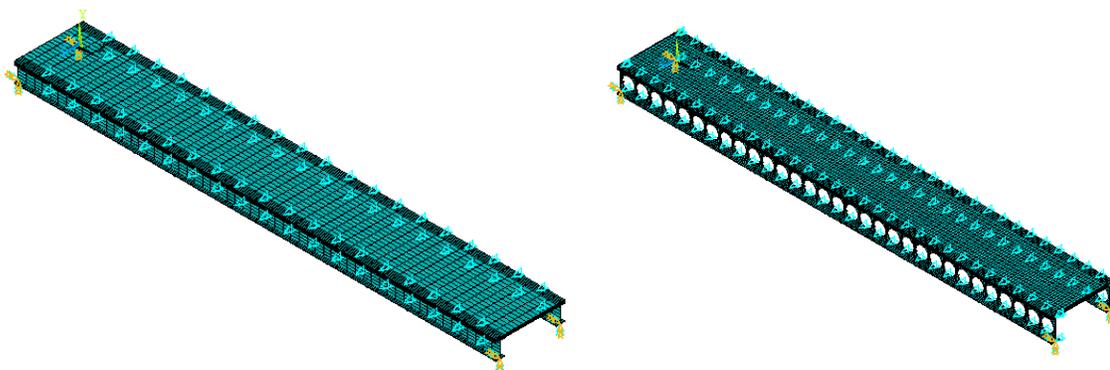
Figura 25 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 12,5m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

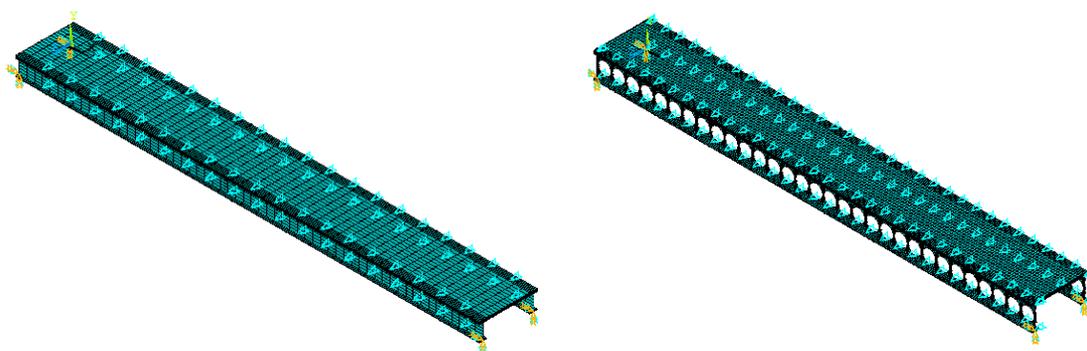
Figura 26 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 15m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

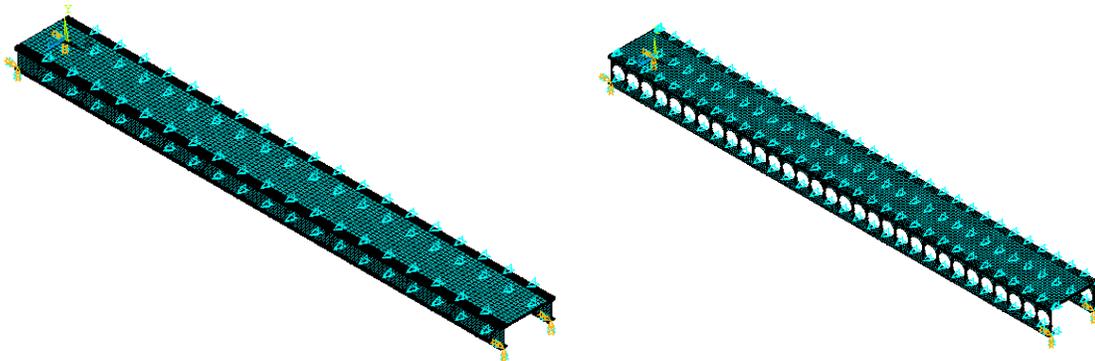
Figura 27 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 17,5m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

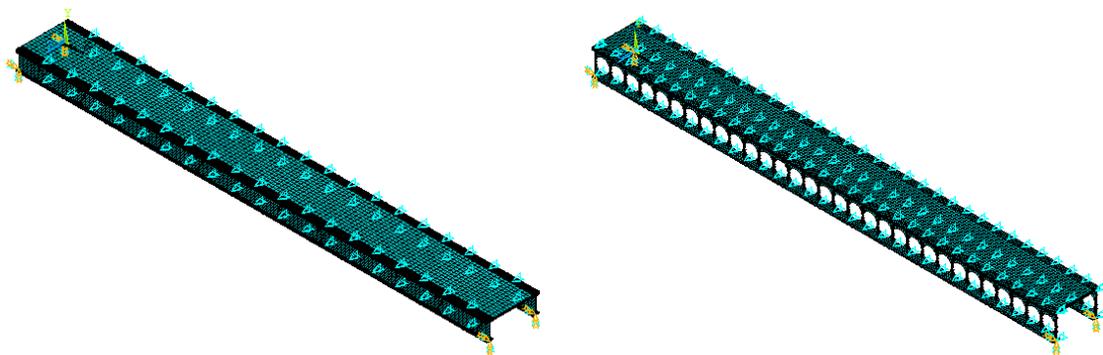
Figura 28 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 20m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

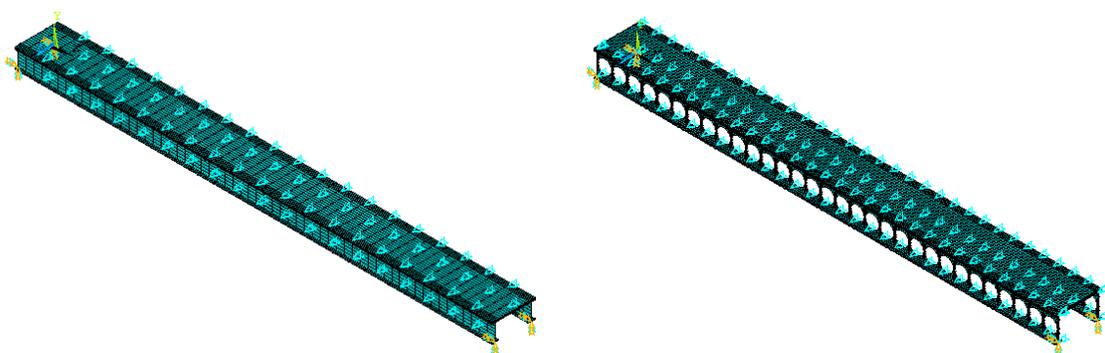
Figura 29 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 22,5m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

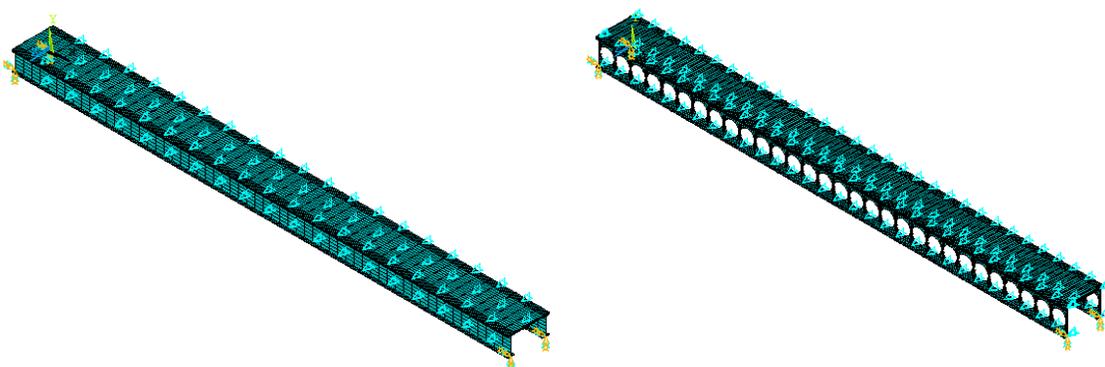
Figura 30 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 25m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

Figura 31 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 27,5m.



(a) Detalhes do perfil de alma cheia.

(b) Detalhes do perfil celular.

Figura 32 - Modelo em elementos finitos desenvolvidos para a representação da passarela com vão de 30m.

4.4 Parâmetros geométricos dos perfis celulares

As Tabelas 14 e 15 mostram, respectivamente, as medidas geométricas dos perfis celulares formados com o número mínimo e máximo de furos para as análises.

Tabela 14 - Dados geométricos dos perfis celulares analisados com o número mínimo de furos (em mm)

Perfil celular	Altura (h)	Passo (p)	Diâmetro (d_0)	Montante (b_w)
VS 508x49	507,50	609,00	406,00	203,00
VS 580x55	580,00	696,00	464,00	232,00
VS 725x69	725,00	870,00	580,00	290,00
VS 798x95	797,50	957,00	638,00	319,00
VS 870x133	870,00	1044,00	696,00	348,00
VS 1015x146	1015,00	1218,00	812,00	406,00
VS 1160x164	1160,00	1392,00	928,00	464,00
VS 1305x181	1305,00	1566,00	1044,00	522,00
VS 1450x191	1450,00	1740,00	1160,00	580,00

Quanto à localização do furo em relação ao perfil, trabalhou-se com o centroide localizado na metade da altura da alma (furo concêntrico). Com base na altura do perfil celular (h) definiu-se a medida do passo (p) que é a distância entre os centros dos furos, o diâmetro do alvéolo (d_0) e a largura do montante interno (b_w), que corresponde a distância entre os furos.

Nesta dissertação, para a modelagem dos perfis celulares, seguiu-se a recomendação de que a distância entre os centroides não ultrapasse três vezes o valor da distância entre os círculos, pois isso acarretaria na redução da rigidez da estrutura [4].

Na maioria das construções que envolve estruturas celulares, a profundidade das aberturas chega algumas vezes a 60% da altura da viga e a largura das aberturas pode chegar até cerca de duas ou três vezes a profundidade dos furos.

Para as principais indústrias metalúrgicas europeia, é importante enfatizar

comercialmente que a altura do perfil celular formado pode alcançar de 40% a 60% da altura do perfil de origem [3].

Tabela 15 - Dados geométricos dos perfis celulares analisados com o número máximo de furos (em mm)

Perfil celular	Altura (h)	Passo (p)	Diâmetro (d_o)	Montante (b_w)
VS 508x49	507,50	433,92	289,28	144,64
VS 580x55	580,00	495,90	330,60	165,30
VS 725x69	725,00	619,89	413,25	206,63
VS 798x95	797,50	681,87	454,58	227,29
VS 870x133	870,00	743,85	495,90	247,95
VS 1015x146	1015,00	867,84	578,55	289,28
VS 1160x164	1160,00	991,80	661,20	330,60
VS 1305x181	1305,00	1115,79	743,85	371,93
VS 1450x191	1450,00	1239,75	826,50	413,25

4.5 Desempenho computacional

Com o objetivo de relatar as experiências adquiridas acerca do desempenho computacional obtido durante o presente trabalho, são apresentados os tempos médios de processamento necessários para a obtenção dos resultados numéricos do modelo de cada passarela.

As análises computacionais foram realizadas em um computador com processador Intel® Core i7 e 16 Gb (gigabytes) de memória RAM. O programa computacional utilizado foi o ANSYS [33], rodando sobre sistema operacional Windows 7.

A Tabela 16 apresenta o tempo gasto nas análises de cada modelo de passarela, indicando o tipo de análise realizada e o respectivo tempo decorrido até a obtenção dos dados desejados.

Tabela 16 - Esforço computacional médio

Modelo computacional		Tempo de análise modal	Tempo de análise dinâmica
Modelo I - 10m	Sólido	16s	1h40min
	Celular com 14 furos	30s	2h32min
	Celular de 28 furos	32s	2h50min
Modelo II - 12,5m	Sólido	18s	2h05min
	Celular com 14 furos	35s	4h10min
	Celular de 28 furos	35s	4h18min
Modelo III - 15m	Sólido	18s	2h05min
	Celular com 15 furos	42s	6h20min
	Celular de 31 furos	45s	6h20min
Modelo IV - 17,5m	Sólido	26s	7h50min
	Celular com 16 furos	50s	9h00min
	Celular de 31 furos	50s	9h00min
Modelo V - 20m	Sólido	50s	8h00min
	Celular com 16 furos	1min32s	9h30min
	Celular de 31 furos	1min30s	8h40min
Modelo VI - 22,5m	Sólido	1min00s	12h40min
	Celular com 16 furos	1min00s	15h20min
	Celular de 31 furos	1min00s	15h00min
Modelo VII - 25m	Sólido	1min10s	12h50min
	Celular com 16 furos	1min20s	15h00min
	Celular de 31 furos	1min20s	15h30min
Modelo VIII - 27,5m	Sólido	50s	16h00min
	Celular com 15 furos	1min23s	25h00min
	Celular de 30 furos	1min30s	26h00min
Modelo IX - 30m	Sólido	1min00s	22h00min
	Celular com 15 furos	56s	30h00min
	Celular de 30 furos	1min00s	30h00min

4.6 Considerações finais

No presente capítulo foi apresentada uma descrição completa dos modelos numérico-computacionais desenvolvidos para este estudo, indicando as

características geométricas e físicas de tais modelos, de forma a mostrar com clareza a estratégia adotada no desenvolvimento de cada um.

No capítulo seguinte, serão efetuadas análises de vibração livre dos modelos numérico-computacionais apresentados no presente capítulo de forma a se obter o comportamento dinâmico dos modelos através da análise das frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores).

5 ANÁLISE DE AUTOVALORES E AUTOVETORES

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise da resposta dinâmica de diversos projetos de passarelas, em termos das acelerações verticais máximas, calculados via método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS [33]. Para quantificar os níveis de vibração, o processo utilizado considerou a maior amplitude da aceleração ou pico.

Neste capítulo são obtidos os autovalores (frequências naturais) e os autovetores (modos de vibração), referentes aos modelos estruturais investigados no presente trabalho.

5.2 Análise das frequências naturais (Autovalores)

Com base nas simulações numéricas realizadas ao longo do estudo, foram determinadas as frequências naturais das passarelas mistas (aço-concreto) com dimensões variando entre 10m e 30m. Tal análise foi feita para os modelos sólidos e celulares objetivando investigar, quantitativamente, qual a variação do valor da frequência fundamental das passarelas, no que diz respeito ao número de furos e, bem como, ao tamanho da abertura.

Conforme as descrições dos perfis indicados em cada modelo analisado no capítulo anterior, as Tabelas 17, 18 e 19, indicam respectivamente as frequências das passarelas de perfis sólidos, celulares com a quantidade mínima de furos e celulares com a quantidade máxima de furos. Considera-se esta análise de suma importância, pois a literatura disponível não tem registro de informações desta natureza, e que pode influir diretamente no estudo de conforto humano das estruturas investigadas.

Os resultados apresentados indicam diferenças numéricas que podem vir a ser importantes, no que diz respeito ao valor da frequência fundamental das passarelas, em todos os vãos investigados, quando são comparados os casos entre perfis sólidos e celulares (número mínimo e máximo de furos).

Através das Tabelas 17 a 19 pode-se visualizar os resultados das seis

primeiras frequências naturais obtidos através da análise computacional. As diferenças entre estes valores chegam até 20% (diferença máxima), comparando-se os perfis de alma cheia e celulares para cada vão.

Destaca-se ainda, que os resultados numéricos (ANSYS [33]), associados à frequência fundamental das passarelas estão de acordo com os valores calculados por meio do guia de projeto do AISC [34], demonstrando que os modelos numéricos estão bem calibrados e coerentes com a solução analítica.

Nas Tabelas 17 a 19, pode-se observar, claramente, que à medida que o vão dos modelos estruturais é aumentado, o valor da frequência fundamental das passarelas diminui, como era de se esperar. Tal fato demonstra a coerência dos modelos computacionais desenvolvidos no presente estudo. Por outro lado, os resultados apresentados nesta tabela indicam que a partir do aumento dos modelos, o erro percentual relativo aumenta consideravelmente. Evidentemente, considerando que a modelagem via métodos dos elementos finitos (MEF), foi feita de modo a se ter resultados bastantes refinados e que as expressões propostas pelo AISC [34] são, de fato, bastante simplificadas, certamente os resultados fornecidos pelos modelos numéricos são tomados nesta dissertação como sendo mais próximos do real.

Tabela 17 - Frequência natural das passarelas com perfis de alma cheia.

Vão (m)	Frequências Naturais f_{oi} (Hz) (ANSYS, 2009)						AISC [34]	Erro (%)
	f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}	f_{01}	
10,0	12,65	23,46	25,47	39,70	45,48	49,44	12,53	0,96%
12,5	10,84	20,38	23,04	39,00	44,13	44,37	10,77	0,65%
15,0	8,84	17,10	19,93	36,05	37,24	42,00	8,82	0,22%
17,5	7,51	14,90	18,02	32,96	35,11	42,51	7,51	0,00%
20,0	6,77	13,57	16,44	30,41	33,14	41,19	6,77	0,00%
22,5	6,18	12,52	15,19	28,21	31,17	37,68	6,18	0,00%
25,0	5,70	11,34	14,08	25,79	25,69	29,19	5,68	0,35%
27,5	5,25	10,67	13,16	24,34	24,39	24,45	5,25	0,00%
30,0	4,92	10,23	12,51	23,53	27,09	27,20	4,91	0,20%

Tabela 18 - Frequência natural das passarelas com perfis celulares com a quantidade mínima de furos (f).

Vão (m)	Frequências Naturais f_{oi} (Hz) (ANSYS, 2009)						AISC[34] f_{01}	Erro (%)
	f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}		
10,0	12,86	22,29	24,81	36,71	42,93	44,23	12,76	0,78%
12,5	11,65	19,84	23,11	35,48	38,94	38,96	11,60	0,43%
15,0	9,76	16,61	20,28	32,20	32,76	32,78	9,75	0,10%
17,5	8,55	13,33	18,41	28,02	29,50	32,59	8,48	0,82%
20,0	7,74	12,07	16,84	25,18	25,48	25,55	7,69	0,65%
22,5	7,03	10,98	15,46	20,99	21,06	22,61	7,00	0,42%
25,0	6,40	10,06	14,39	18,89	19,01	18,22	6,38	0,31%
27,5	6,12	9,53	13,47	13,57	13,76	14,85	6,11	0,16%
30,0	5,86	9,20	13,34	13,79	13,93	14,86	5,85	0,17%

Tabela 19 - Frequência natural das passarelas com perfis celulares com a quantidade máxima de furos (f).

Vão (m)	Frequências Naturais f_{oi} (Hz) (ANSYS, 2009)						AISC [34] f_{01}	Erro (%)
	f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}		
10,0	9,90	17,20	20,04	31,06	33,94	40,26	9,93	0,30%
12,5	9,31	15,57	18,91	29,63	30,84	38,27	9,35	0,43%
15,0	7,66	12,63	16,06	25,23	25,72	31,94	7,73	0,91%
17,5	7,94	13,04	17,14	26,16	27,98	32,72	7,99	0,63%
20,0	6,75	10,72	14,44	21,39	23,48	25,33	6,81	0,88%
22,5	6,13	9,73	13,27	19,44	21,03	21,07	6,19	0,97%
25,0	5,56	8,66	12,04	16,81	16,85	17,26	5,61	0,90%
27,5	5,42	8,45	11,90	13,54	13,60	15,02	5,47	0,92%
30,0	5,20	8,09	11,53	13,92	14,00	14,99	5,25	0,96%

Baseado na teoria de Harper [4], respeitando os diâmetros mínimos e máximos (d_0) dos alvéolos (furos) e o respectivos passos (p), foram analisadas as frequências resultantes de acordo com a variação do diâmetro.

Os resultados apresentaram coerência devido a diferença de massa e a comparação entre a quantidade de furos para cada perfil é mostrado através das curvas não-lineares, conforme Figuras 33 a 41.

Diante do exposto, observou-se uma diferença grande nas frequências conforme o aumento do diâmetro do furo.

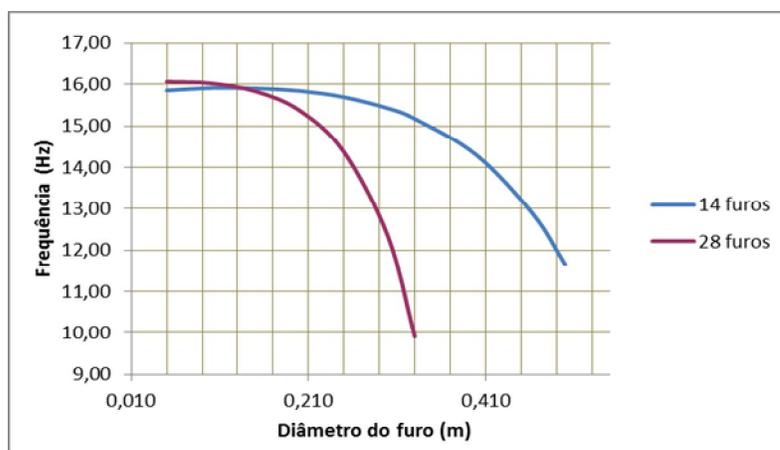


Figura 33: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 508x49. Vão de 10m.

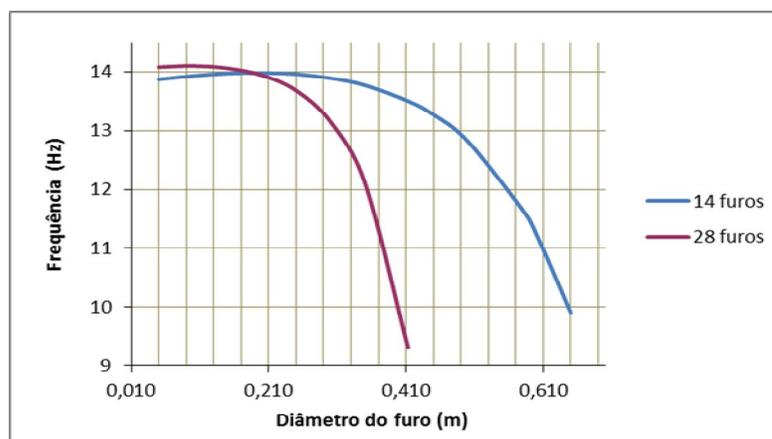


Figura 34: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 580x55. Vão de 12,5m.

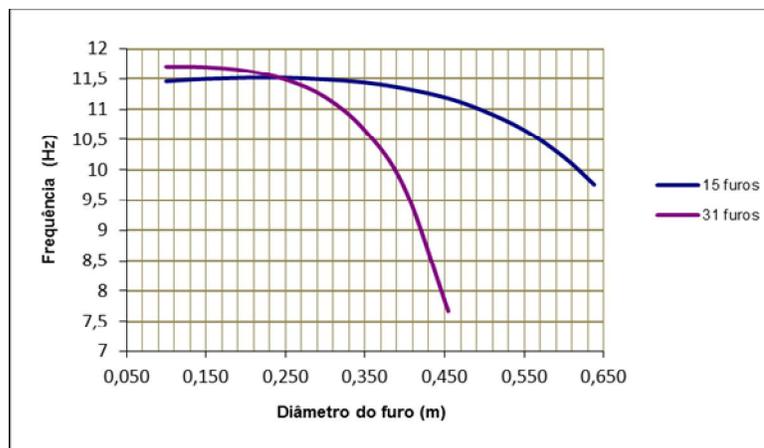


Figura 35: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 725x69. Vão de 15m.

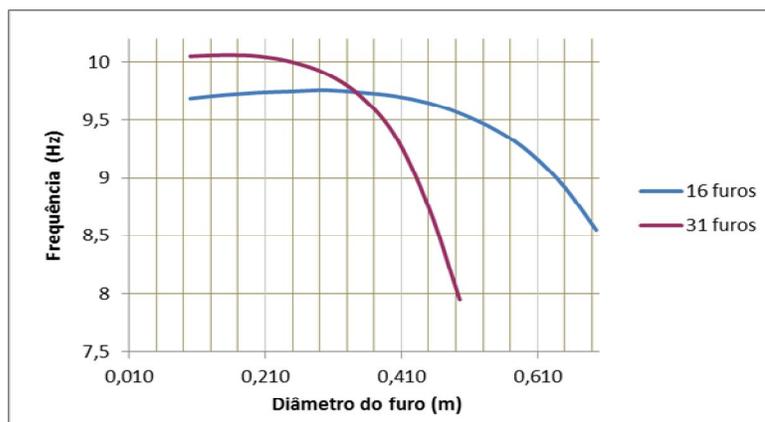


Figura 36: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 798x95. Vão de 17,5m.

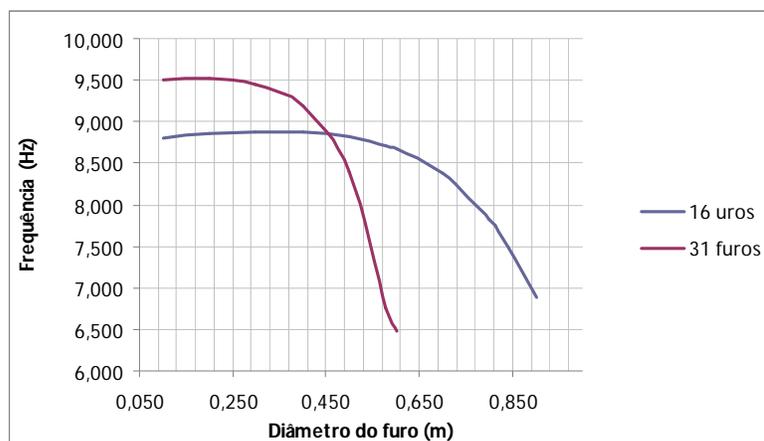


Figura 37: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 870x133. Vão de 20m.

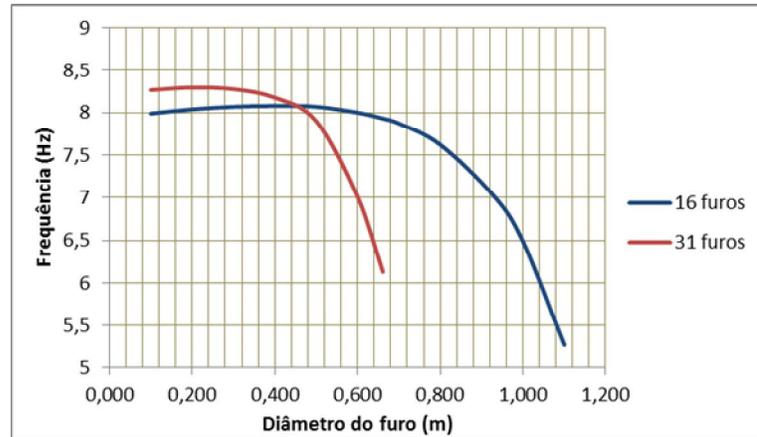


Figura 38: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1015x146. Vão de 22,5m.

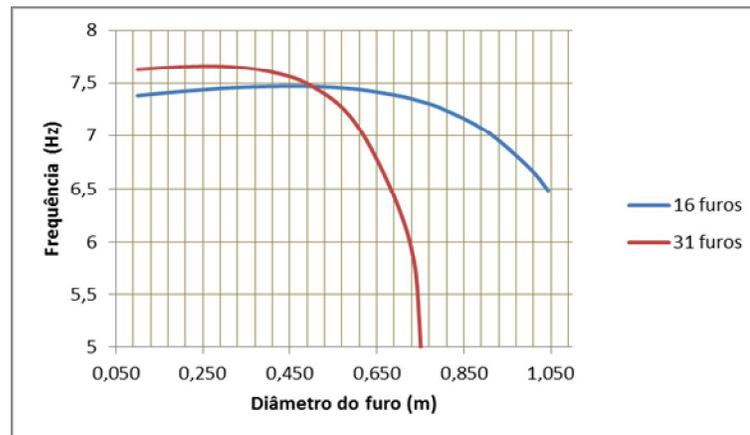


Figura 39: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1160x164. Vão de 25m.

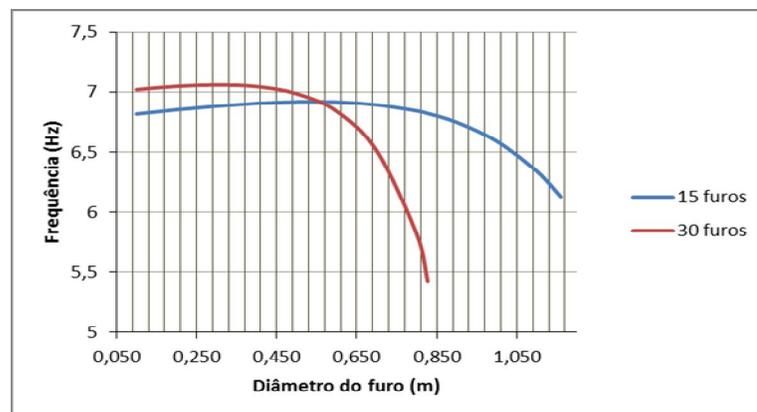


Figura 40: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1305x181. Vão de 27,5m.

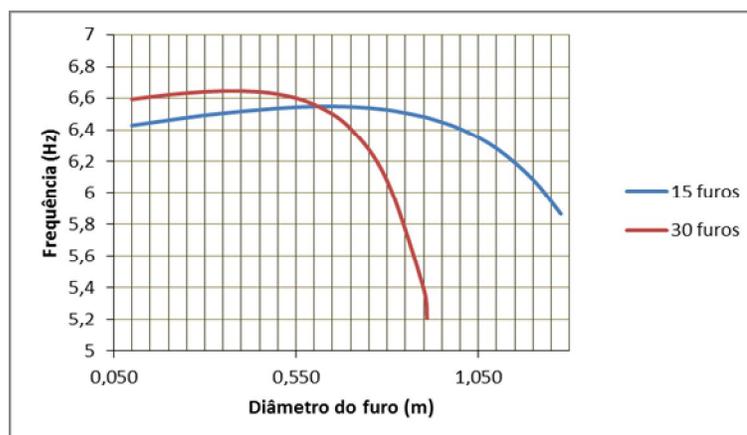


Figura 41: Variação da frequência (f_{01}) da passarela com perfil celular VS 1450x191. Vão de 30m.

5.3 Análise dos modos de vibração (Autovetores)

As Figuras 42 a 50 ilustram os modos de vibração correspondentes às três primeiras frequências naturais do modelo estrutural (sólido e celular) com vão de 25m. Observou-se que nos modelos estruturais investigados os efeitos de flexão foram predominantes no modo fundamental de vibração. No entanto, é importante salientar que os efeitos de torção estão presentes a partir do segundo modo de vibração da estrutura.

Quanto ao perfil de alma cheia VS 900x191, para o vão de 25m, a primeira frequência natural foi de 5,70 Hz (Figura 42) associado ao primeiro modo de flexão. A segunda frequência natural foi de 11,34 Hz (Figura 43), associado ao primeiro modo de torção. A terceira frequência natural foi de 14,08 Hz (Figura 44), associado ao segundo modo de flexão.

Na análise do perfil celular VS 1160x164 com 16 furos, para o vão de 25m, a primeira frequência natural foi de 6,40 Hz (Figura 45) associado ao primeiro modo de flexão. A segunda frequência natural foi de 10,06 Hz (Figura 46), associado ao primeiro modo de torção. A terceira frequência natural foi de 14,39 Hz (Figura 47), associado ao segundo modo de flexão. Na análise do perfil celular VS de 25m com 31 furos, a primeira frequência natural foi de 5,56 Hz (Figura 48) associado ao primeiro modo de flexão. A segunda frequência natural foi de 8,66 Hz (Figura 49),

associado ao primeiro modo de torção. A terceira frequência natural foi de 12,04 Hz (Figura 50), associado ao segundo modo de flexão.

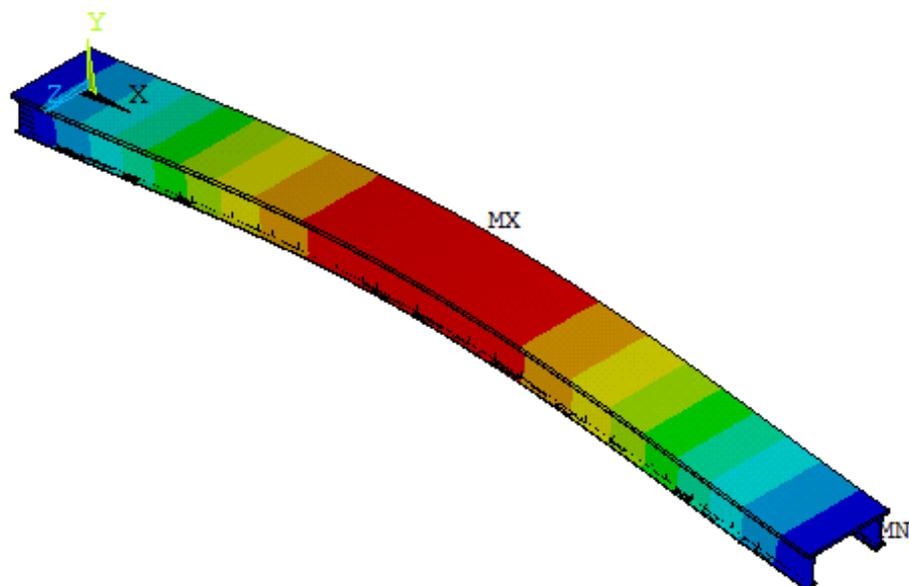


Figura 42: 1º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil de alma cheia VS 900x191 ($f_{01}= 5,70$ Hz)

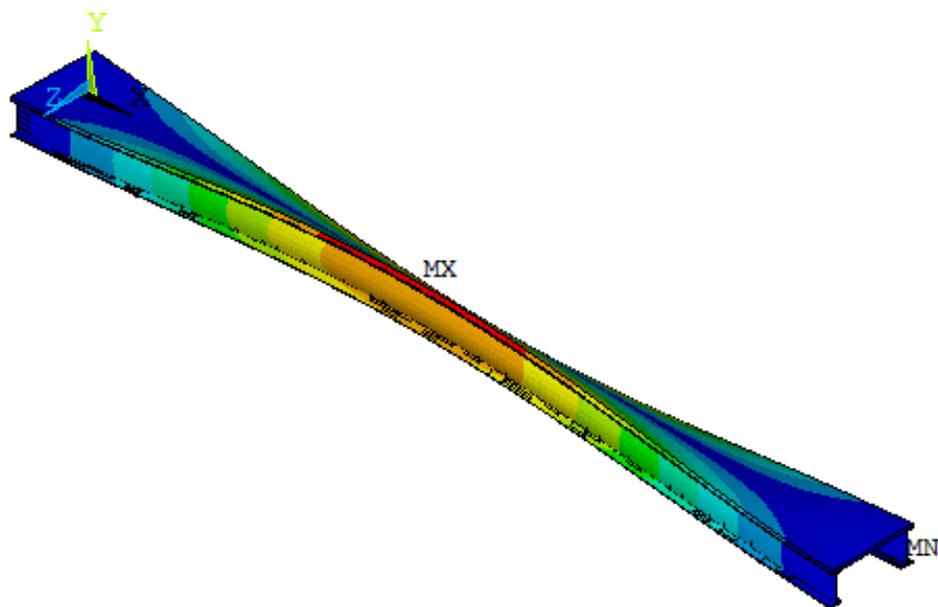


Figura 43: 2º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil de alma cheia VS 900x191 ($f_{02}= 11,34$ Hz)

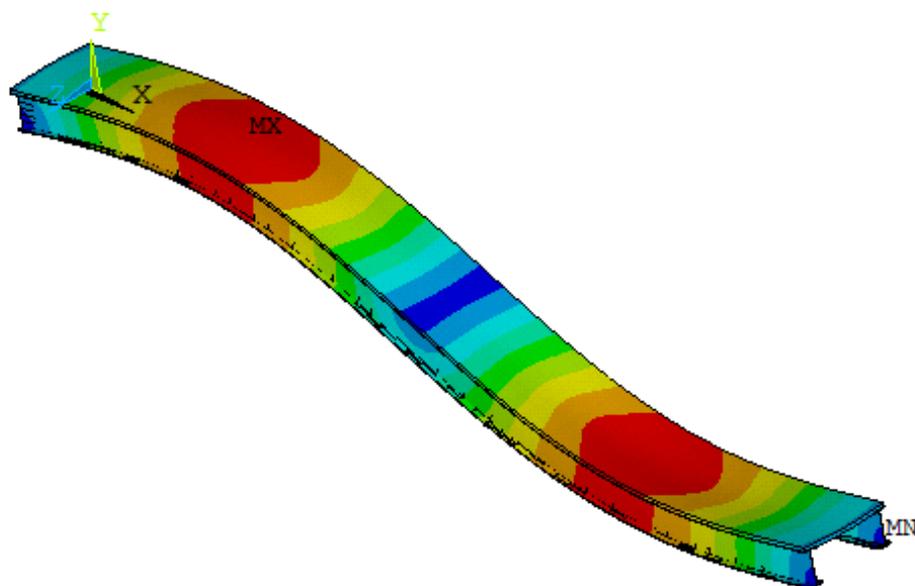


Figura 44: 3º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil de alma cheia VS 900x191 ($f_{03}= 14,08$ Hz)

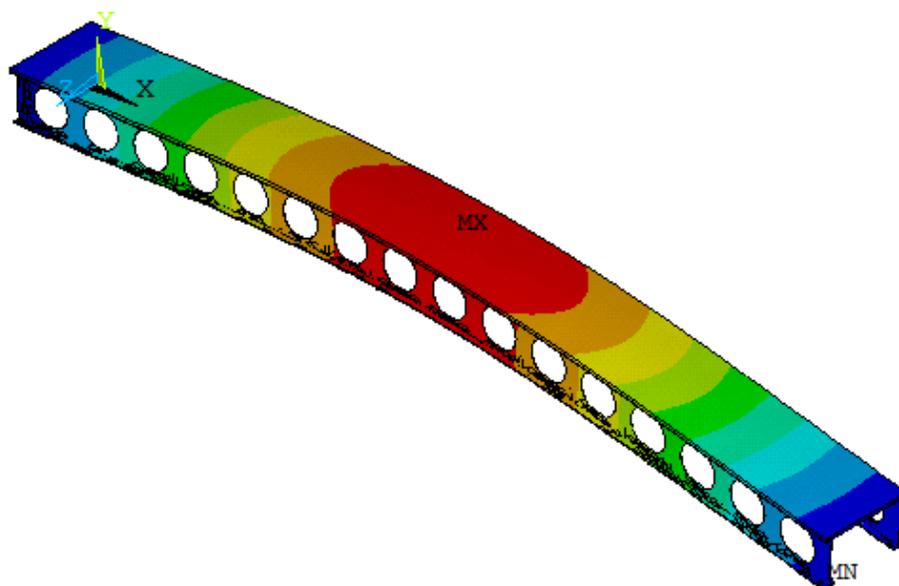


Figura 45: 1º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS 1160x164 - 16 furos ($f_{01}= 6,40$ Hz)

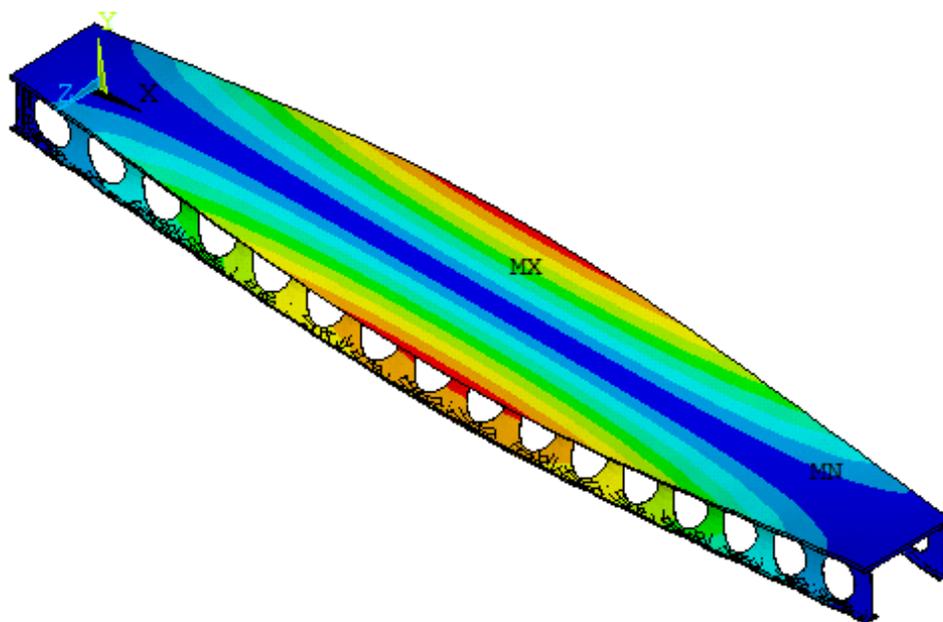


Figura 46: 2º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS
1160x164 - 16 furos ($f_{02}= 10,06$ Hz)

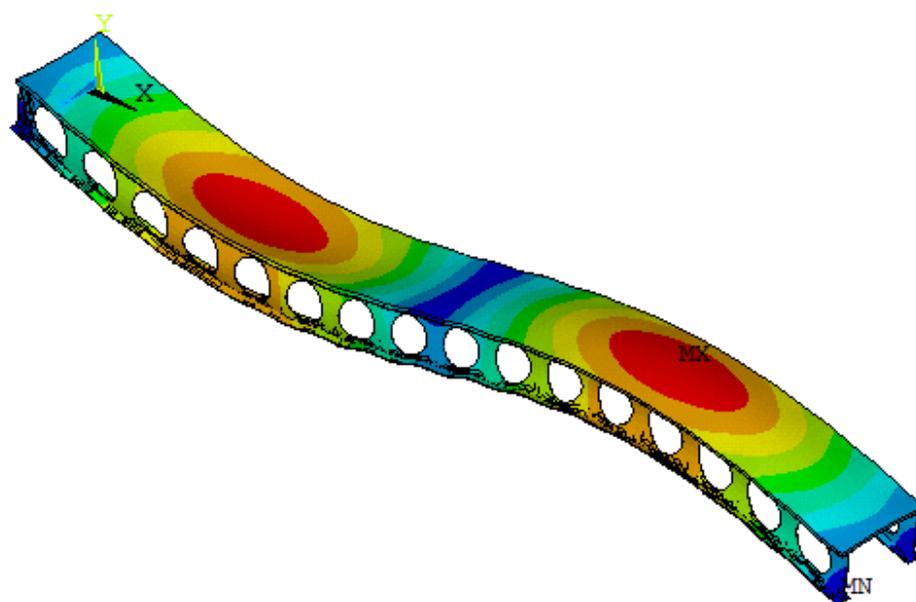


Figura 47: 3º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS
1160x164 - 16 furos ($f_{03}= 14,39$ Hz)

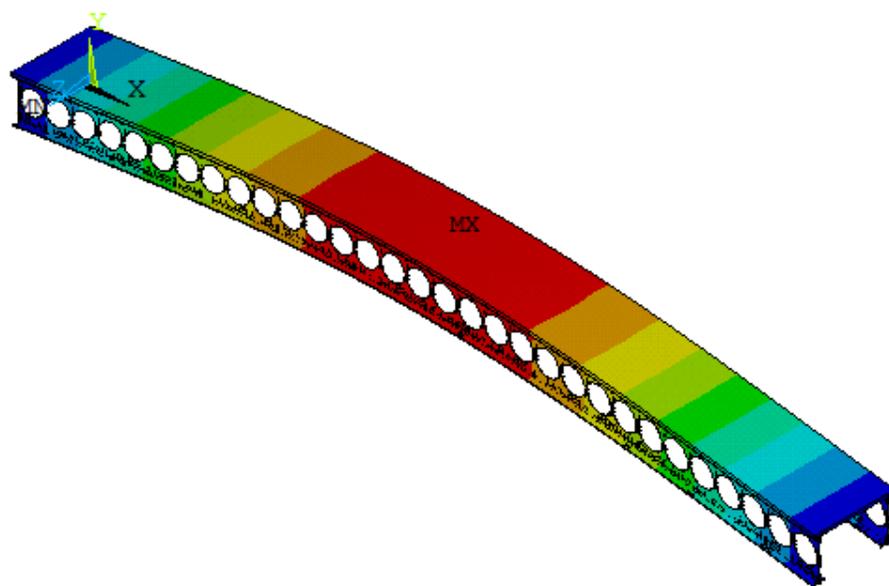


Figura 48: 1º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS
1160x164 - 31 furos ($f_{01}= 5,56$ Hz)

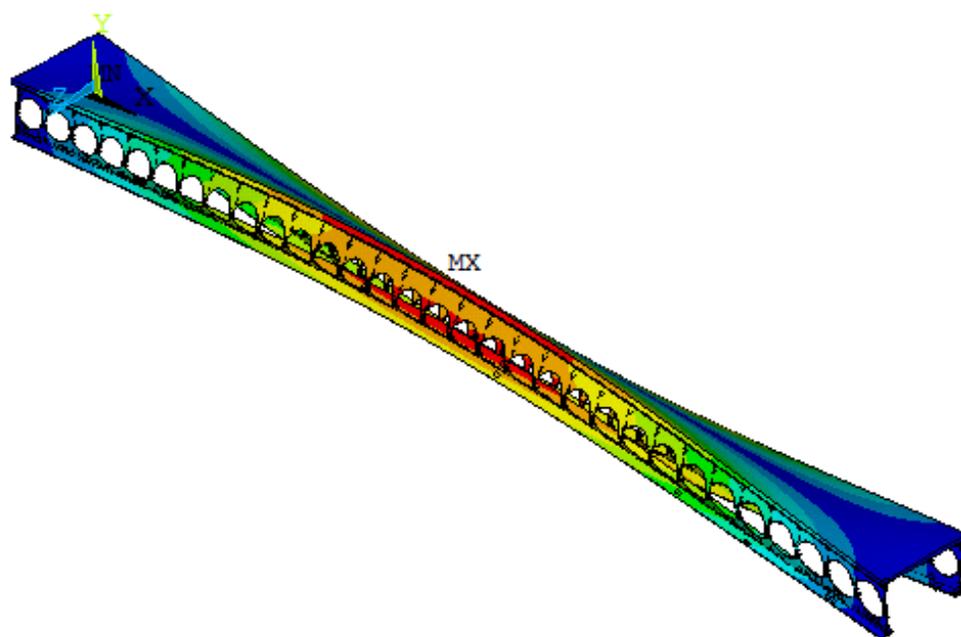


Figura 49: 2º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS
1160x164 - 31 furos ($f_{02}= 8,66$ Hz)

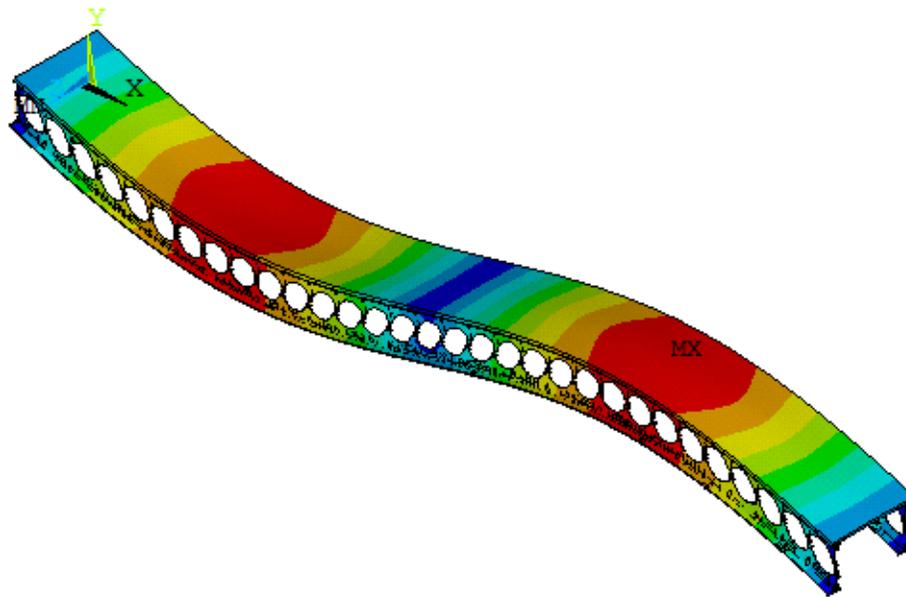


Figura 50: 3º Modo de vibração da passarela com 25m de vão com perfil celular VS 1160x164 - 31 furos ($f_{03}= 12,04$ Hz)

5.4 GFCD Gerador de Funções de Carregamento Dinâmico [25]

Durante a fase de análise dinâmica das passarelas, desenvolvida com base no programa ANSYS [33], seria necessário gerar tabelas contendo os valores da variação do carregamento ao longo do tempo, os quais seriam aplicados nos modelos de elementos finitos de forma a simular o caminhar de um pedestre durante a travessia da passarela.

Considerando todos os modelos que seriam analisados, o número de tabelas necessárias seria em torno de 4.000. Desta forma, criou-se um aplicativo desenvolvido por Figueiredo [25] a fim de automatizar o processo de geração dessas tabelas.

O aplicativo implementa as equações que modelam o caminhar humano, considerando o pico transiente devido ao calcanhar proposto por Varela [24], sem considerar o calcanhar com somente um harmônico ou sem considerar o calcanhar com mais de um harmônico.

5.5 Considerações Finais

No presente capítulo foram, apresentados os resultados das análises de vibração livre dos três modelos computacionais desenvolvidos referente aos perfis sólidos e celulares na faixa de 10m até 30m de vão. Estes resultados permitiram a avaliação da resposta dinâmica de cada modelo de forma a conhecer o seu comportamento geral quando da aplicação dos carregamentos dinâmicos.

6 ANÁLISE DINÂMICA DAS PASSARELAS

6.1 Introdução

Neste capítulo procede-se a análise dinâmica dos modelos estruturais investigados, com base na avaliação das acelerações de pico das passarelas com vãos na faixa de 15,0m até 30,0m. São considerados modelos estruturais sólidos e celulares. Os valores máximos das acelerações são comparados com os valores limites propostos por normas e recomendações de projeto [34], [37], [38]. Para tal, utiliza-se um modelo de carregamento no qual a posição do pedestre sobre a estrutura é alterada ao longo do tempo e a função gerada apresenta uma descrição temporal e espacial. Este modelo incorpora, também, o impacto transiente do calcanhar do pedestre, de acordo com as Equações (40) a (43), [24].

6.2 Análise dos deslocamentos estáticos

Inicialmente, realiza-se uma análise estática com o objetivo de se obter o deslocamento máximo ocorrido nas estruturas analisadas, devido à aplicação de uma carga concentrada de 800 N, referente ao peso de uma pessoa, aplicada no meio do vão. Na sequência do texto, a Tabela 25 apresenta os resultados obtidos.

6.3 Análise das acelerações de pico (a_p)

Pretende-se verificar a adequabilidade das passarelas quando submetidas ao caminhar humano, no que tange ao desconforto relacionado às vibrações. Os coeficientes de Fourier adotados nesta investigação foram $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 0,2$, $\alpha_3 = 0,1$ e $\alpha_4 = 0,05$ e os ângulos de fase utilizados foram $\phi_1 = 0$, $\phi_2 = \pi/2$, $\phi_3 = \pi$ e $\phi_4 = 3\pi/2$. Isto porque, as equações propostas por Varela [24] foram concebidas utilizando tais valores e caso sejam utilizados valores diferentes dos apresentados nas Equações (40) a (43), a função de carregamento apresenta singularidades e fica descaracterizada. O fator de amplificação do impacto do calcanhar foi considerado igual a 1,12 [24] e o valor máximo da faixa de pico do calcanhar igual a 0,6 [24].

Tabela 20 - Deslocamentos máximos obtidos na seção central dos modelos.

Vão (m)	Modelo Estrutural	Deslocamento Máximo (mm)
15m	Sólido	0,147
	Celular com 15 furos	0,089
	Celular de 31 furos	0,093
17,5m	Sólido	0,144
	Celular com 16 furos	0,084
	Celular de 31 furos	0,092
20m	Sólido	0,180
	Celular com 16 furos	0,105
	Celular de 31 furos	0,114
22,5m	Sólido	0,273
	Celular com 16 furos	0,160
	Celular de 31 furos	0,174
25m	Sólido	0,318
	Celular com 16 furos	0,187
	Celular de 31 furos	0,203
27,5m	Sólido	0,163
	Celular com 15 furos	0,099
	Celular de 30 furos	0,103
30m	Sólido	0,154
	Celular com 15 furos	0,095
	Celular de 30 furos	0,098

Basicamente, a resposta dinâmica das passarelas é avaliada na seção central de todos os modelos (seção central da laje de concreto). Deste modo, a Figura 50 ilustra o caso de carregamento dinâmico investigado neste trabalho, de forma genérica, correspondente à travessia de um pedestre cruzando o modelo com comprimento do vão igual a 25,0m.

Os parâmetros utilizados para representação da variação da posição do passo dos pedestres em cada passada, no que tange ao modelo de carregamento utilizado são mostrados na Tabela 26.

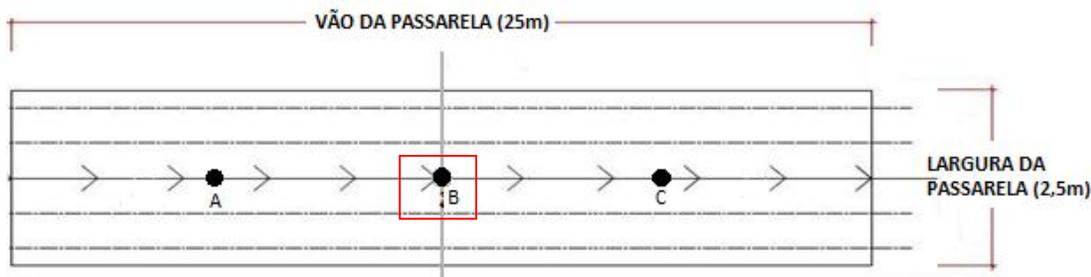


Figura 51: Planta baixa representativa do caso de carregamento dinâmico investigado.

Tabela 21 - Parâmetros utilizados na análise de conforto humano das passarelas.

Vão (m)	Perfil	Tipo do Caminhar	Frequência do Passo f_p (Hz)	Harmônico Ressonante	Frequência Fundamental f_{01} (Hz)
15,0	VS 550x100	Rápida	2,3	4	8,84
17,5	VS 600x140	Normal	2,0	4	7,51
20,0	VS 700x154	Rápida	2,3	3	6,77
22,5	VS 800x173	Normal	2,0	3	6,18
25,0	VS 900x191	Rápida	2,3	3	5,70
27,5	VS 1000x201	Rápida	2,3	2	5,25
30,0	VS 1100x235	Normal	2,0	2	4,92

Na sequência do estudo, as Figuras 52 a 57 ilustram a resposta dinâmica da passarela com vão de 25m, escolhida para representar, de forma genérica, o comportamento dinâmico geral dos modelos estruturais investigados nesta dissertação. Os gráficos de deslocamento apresentados nas Figuras 52 a 54, mostram que a resposta dinâmica no meio do vão da passarela aumenta gradativamente com tempo, ou seja, o segundo harmônico da caminhada com frequência do passo, f_p , igual a 2,30 Hz (caminhada rápida) provoca a resposta ressonante da estrutura. Verifica-se ainda, que a partir do momento em que o pedestre deixa a estrutura, no tempo igual a aproximadamente 11 s, o amortecimento passa a minimizar as amplitudes até que a estrutura entre em repouso. As Figuras 55 a 57 ilustram a variação das acelerações ao longo do tempo, no que diz respeito a passarela em estudo. Neste caso em particular, as acelerações de pico são iguais a $1,6 \text{ m/s}^2$ (Perfil de alma cheia), $1,45 \text{ m/s}^2$ (Perfil celular: 16 furos) e $1,57 \text{ m/s}^2$ (Perfil celular: 31 furos).

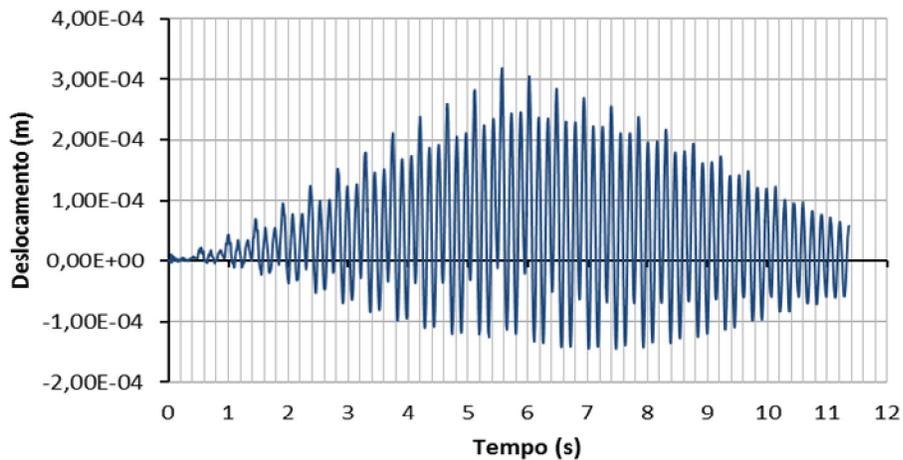


Figura 52: Deslocamento translacional vertical. Seção B. Perfil de alma cheia VS 900x191. Vão de 25m.

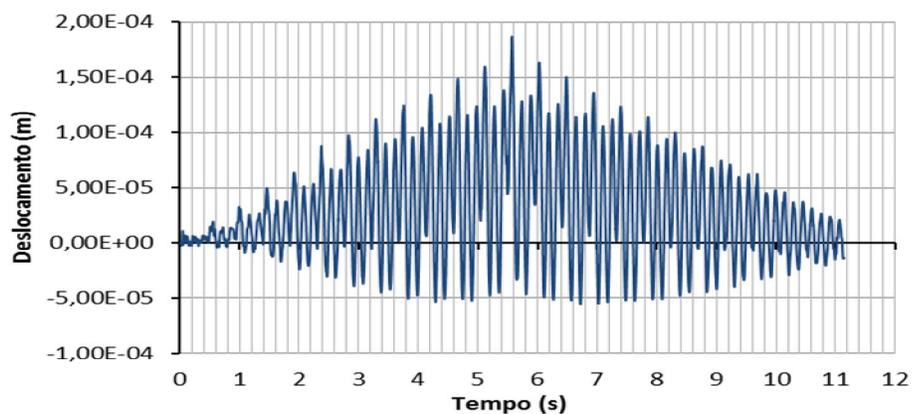


Figura 53: Deslocamento translacional vertical. Seção B. Perfil celular de 16 furos VS 1160x164. Vão de 25m.

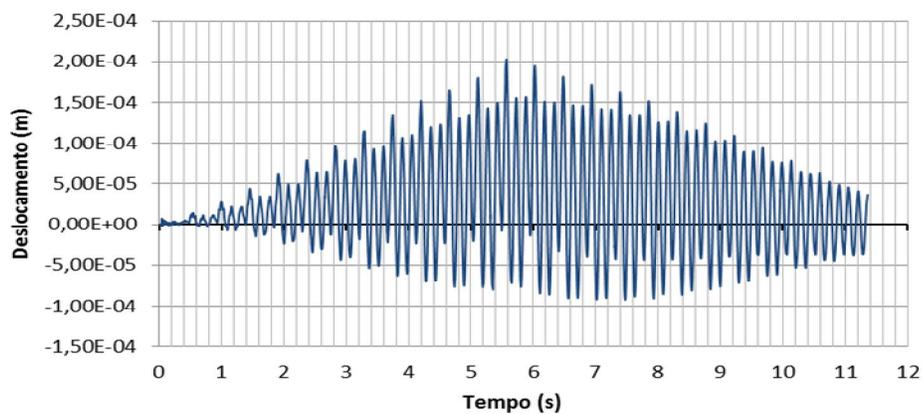


Figura 54: Deslocamento translacional vertical. Seção B. Perfil celular de 31 furos VS 1160x164. Vão de 25m.

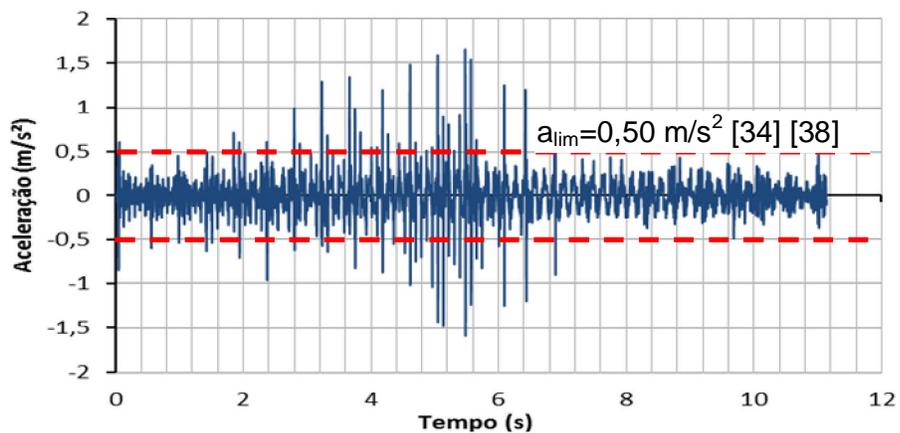


Figura 55: Aceleração ao longo do tempo. Seção B. Perfil de alma cheia VS 900x191. Vão de 25m.

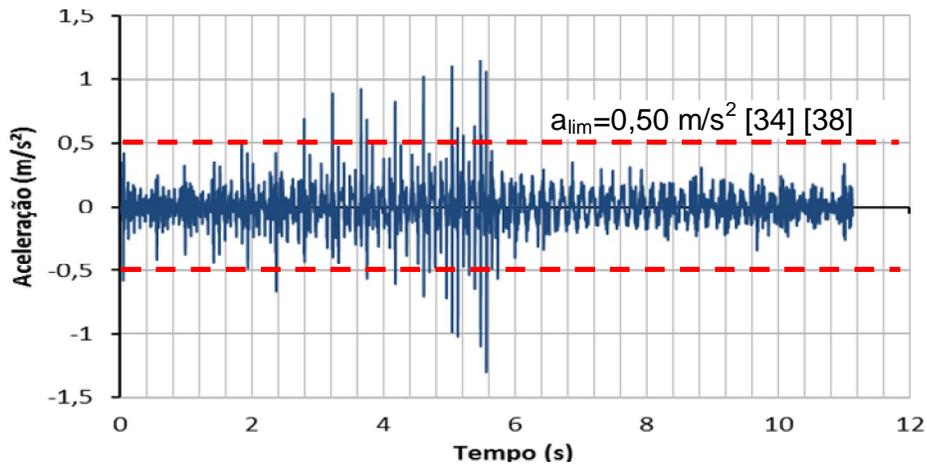


Figura 56: Aceleração ao longo do tempo. Seção B. Perfil celular de 16 furos VS 1160x164. Vão de 25m.

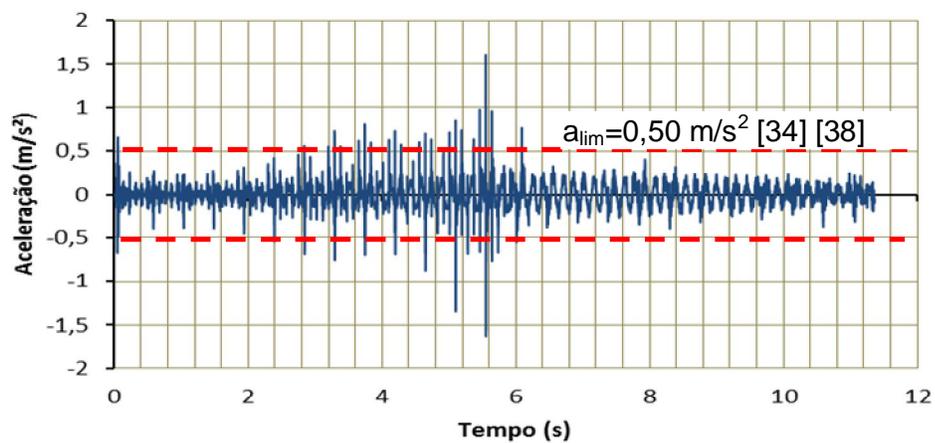


Figura 57: Aceleração ao longo do tempo. Seção B. Perfil celular de 31 furos VS 1160x164. Vão de 25m.

Em seguida, a Tabela 22 ilustra os valores numéricos das acelerações de pico encontradas, no que tange aos modelos estruturais em estudo. A carga dinâmica relacionada a uma pessoa atravessando as passarelas, através da linha centro-longitudinal da laje de concreto, de acordo com as Equações (40) a (43), foi aplicada durante um tempo de caminhada da ordem de 8 s a 20 s, de acordo com o ritmo da caminhada de cada pedestre (normal e rápida) e com o comprimento do vão de cada modelo. As acelerações de pico foram comparadas com os limites recomendados por normas e recomendações de projeto [34] [37] [38].

Tabela 22 - Acelerações de pico das passarelas investigadas.

Vão (m)	Modelos Estruturais	Acelerações de Pico (m/s ²)
15,0	Sólido	1,80
	Celular com 15 furos	1,64
	Celular de 31 furos	1,77
17,5	Sólido	1,70
	Celular com 16 furos	1,55
	Celular de 31 furos	1,67
20,0	Sólido	2,00
	Celular com 16 furos	1,70
	Celular de 31 furos	1,90
22,5	Sólido	1,50
	Celular com 16 furos	1,36
	Celular de 31 furos	1,50
25,0	Sólido	1,60
	Celular com 16 furos	1,45
	Celular de 31 furos	1,57
27,5	Sólido	1,50
	Celular com 15 furos	1,36
	Celular de 30 furos	1,47
30,0	Sólido	1,10
	Celular com 15 furos	1,00
	Celular de 30 furos	1,08
*a _{lim} = 0,15 m/s ² : passarelas internas [34] [38] *a _{lim} = 0,50 m/s ² : passarelas externas [34] [38] *a _{lim} = 0,70 m/s ² [37]		

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 22, verifica-se que os harmônicos ressonantes associados ao caminhar humano influenciam diretamente a resposta dinâmica das passarelas, provocando valores bastante elevados de aceleração. Verifica-se, também, que a caminhada rápida de um pedestre (*heavy walking*) em ressonância com a estrutura produz níveis de impactos dinâmicos consideráveis, superiores ao caminhar normal das pessoas (normal walking), e como consequência gera valores de acelerações de pico bastante elevados. Tal fato é corroborado por outros autores [51] e, também, pode medições experimentais [57].

Por exemplo, os resultados apresentados nas Tabelas 17 a 19 do capítulo anterior, com referência especificamente ao modelo com vão de 25 m, indicam que a proximidade da frequência fundamental da estrutura (Perfil sólido - VS 900x191: $f_{01} = 5,7\text{Hz}$; Perfil celular - VS 1160x164 com 16 furos: $f_{01} = 6,4\text{Hz}$ e Perfil celular - VS 1160x164 com 31 furos: $f_{01} = 5,56\text{Hz}$), com a frequência do terceiro harmônico do passo do pedestre ($f_p = 2,3\text{ Hz}$: $f_p = 3 \times 2,3 = 6,9\text{Hz}$), demonstram que os valores de aceleração de pico ultrapassam os limites estabelecidos em normas de projeto [34] [37] [38], violando os critérios de conforto humano, no que diz respeito a seção central do modelo, conforme ilustrado nas Figuras 55 a 57 e Tabela 22. Verifica-se, ainda, que considerando-se as diferenças da ordem de 2% a 10% entre o valor da frequência fundamental do três modelos analisados (vão de 25m), a diferença final, no que diz respeito aos valores das acelerações de pico é relativamente pequena, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 22.

Na sequência do estudo, a Figura 58 apresenta um gráfico ilustrativo acerca da variação dos valores das acelerações de picos dos modelos em função do vão. Neste gráfico pode-se observar comparativamente todos os modelos estruturais investigados: “alma cheia” e “celulares”.

Deve-se ressaltar que quando as acelerações de pico são obtidas via AISC [38], este guia prático de projeto tende a gerar uma curva representativa dos valores das acelerações com base em um comportamento linear, significando que à medida que o vão dos pisos é aumentado, as acelerações de pico crescem [25].

Em contrapartida, tal fato não ocorre com a metodologia de análise utilizada nesta dissertação, pois o modelo de carregamento utilizado [24] considera uma interação entre a excitação e as características dinâmicas dos modelos estruturais analisados, de acordo com a Figura 58. Assim sendo, existem variações marcantes nas curvas representativas das acelerações referentes a estes modelos, ou seja, o

aumento do vão não necessariamente implica que a aceleração de pico das passarelas aumente de valor, conforme ilustrado na Figura 58.

Na realidade quem comanda o aumento ou decréscimo dos valores das acelerações de pico são os harmônicos ressonantes da excitação, em comparação com as frequências naturais da estrutura analisada e, bem como, o tipo de caminhada do pedestre. A interação entre os harmônicos componentes da excitação dinâmica e as frequências naturais da estrutura é preponderante na análise de conforto humano deste tipo de estrutura, conforme apresentado na Figura 58. Como mencionado anteriormente, tal fato encontra-se em consonância com os resultados obtidos por outros autores [51] [57].

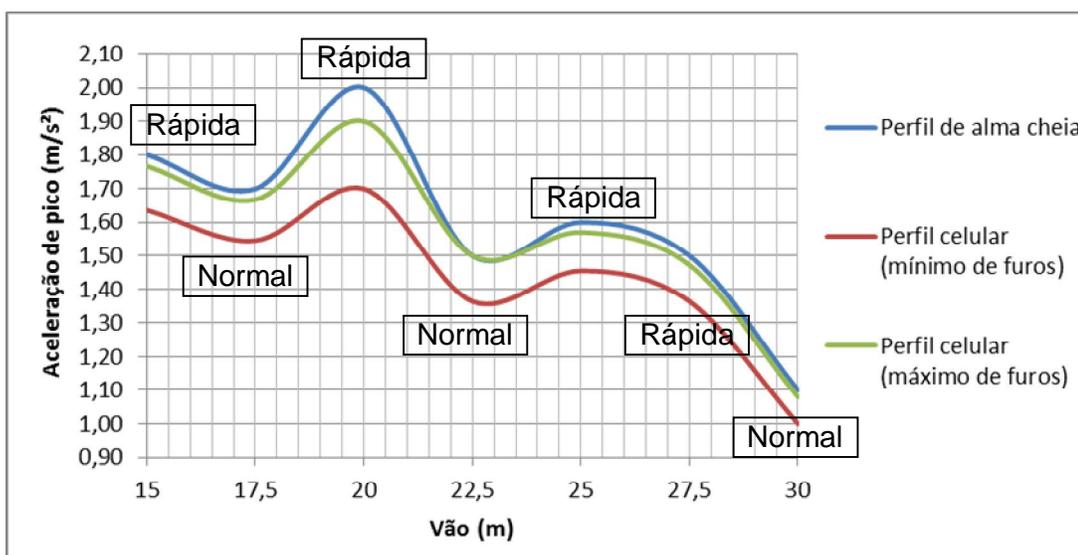


Figura 58: Variação das acelerações de pico em função do vão e do sistema estrutural.

6.4 Considerações Finais

No presente capítulo foram apresentados os resultados das análises de vibração forçada dos três modelos computacionais desenvolvidos referentes aos perfis sólidos e celulares com vãos variando na faixa de 15m até 30m. Estes resultados permitiram a avaliação do conforto humano de cada modelo estrutural, quando submetidos a aplicação dos carregamentos dinâmicos induzidos pelo caminhar dos pedestres.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Introdução

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo a avaliação da resposta dinâmica de passarelas de pedestres, onde o projeto estrutural prevê aberturas na alma das vigas de aço. Pretende-se verificar a influência das aberturas nas almas dessas vigas sobre a resposta dinâmica das passarelas.

Para tal, as ações dinâmicas representativas do caminhar dos pedestres são representadas numericamente por meio de um modelo matemático que considera uma descrição espacial e temporal da carga e inclui o efeito do impacto transiente do calcanhar humano.

Os modelos estruturais investigados correspondem a passarelas mistas (aço-concreto) com 10m até 30m de extensão. São empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do programa Ansys. A resposta dinâmica das passarelas é obtida para duas situações distintas de projeto que consideram as vigas principais sem furo e as vigas principais com abertura de furos na alma.

O comportamento dinâmico das passarelas foi analisado com base na aplicação de carregamentos que simulam numericamente o caminhar de um pedestre (caminhada lenta, normal e rápida) sobre a estrutura.

Uma avaliação crítica sobre a resposta dinâmica das passarelas possibilita verificar a influência dos furos nas almas das vigas metálicas, mediante a obtenção das acelerações de pico, focando aspectos associados ao conforto humano, considerando-se comparações com normas e recomendações de projeto.

7.2 Conclusões

São apresentadas a seguir, as conclusões obtidas ao longo da investigação, onde foi realizado um extenso estudo numérico. Ao longo da dissertação foram apresentadas várias conclusões e estas são aqui apresentadas, de forma itemizada, em que cada item representa um parâmetro utilizado para análise do comportamento dinâmico dos modelos.

a) Modelagem numérico-computacional

Com base na vasta literatura técnica disponível sobre este tema de pesquisa e nas várias análises e comparações de resultados realizadas ao longo do presente trabalho pode-se afirmar que os modelos numérico-computacionais desenvolvidos apresentaram resultados coerentes e confiáveis.

b) Modelagem das ações dinâmicas

O modelo de carregamento representativo da ações dinâmicas impostas pelo caminhar dos pedestres sobre as passarelas foram estudados e implementados, objetivando simular de forma mais realista as componentes geradas pelo caminhar humano.

Verifica-se que os harmônicos componentes da excitação dinâmica associada ao caminhar humano influenciam diretamente a resposta dinâmica das passarelas, provocando valores bastante elevados de aceleração. Verifica-se, também, que a caminhada rápida de um pedestre (*heavy walking*) em ressonância com a estrutura produz níveis de impactos dinâmicos consideráveis, superiores ao caminhar normal das pessoas (normal walking), e como consequência gera valores de acelerações de pico bastante elevados.

c) Frequências naturais e modos de vibração

Em termos qualitativos, os resultados da investigação revelam que as passarela em estudo possuem as primeiras frequências naturais correspondentes aos modos de vibração com preponderância das componentes modais associadas aos efeitos de flexão vertical e de torção.

Quantitativamente, os resultados apresentados indicam diferenças numéricas que podem vir a ser importantes, no que diz respeito ao valor da frequência fundamental das passarelas, em todos os vãos investigados, quando são comparados os casos entre perfis de alma cheia e celulares (número mínimo e máximo de furos). As diferenças entre estes valores chegam a 20% (diferença máxima), como pode ser observado através de uma comparação entre as Tabelas 17 a 19, de acordo com os respectivos vãos.

Destaca-se, também, que os resultados numéricos, associados à frequência fundamental das passarelas estão de acordo com os valores calculados por meio do guia de projeto do AISC [34], demonstrando que os modelos numéricos estão bem calibrados e coerentes com a solução analítica.

d) Acelerações de pico

Foi observado que quando as acelerações de pico são obtidas via AISC [34], este guia prático de projeto tende a gerar uma curva representativa dos valores das acelerações com base em um comportamento linear, significando que à medida que o vão dos pisos é aumentado, as acelerações de pico crescem [25].

Por outro lado, tal fato não ocorre com a metodologia de análise utilizada nesta dissertação, pois o modelo de carregamento utilizado [24] considera a interação entre a excitação e as características dinâmicas dos modelos estruturais analisados. Deste modo, existem variações marcantes nas curvas representativas das acelerações referentes a estes modelos, ou seja, o aumento do vão não necessariamente implica que a aceleração de pico das passarelas aumente de valor.

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que quem governa o aumento ou decréscimo dos valores das acelerações de pico são os harmônicos ressonantes da excitação, em comparação com as frequências naturais da estrutura analisada e, bem como, o tipo de caminhada do pedestre. Foi verificado que a interação entre os harmônicos componentes da excitação dinâmica e as frequências naturais da estrutura é preponderante na análise de conforto humano dos modelos.

Destaca-se que a partir dos resultados quantitativos dos deslocamento e das acelerações do modelo, que os valores máximos acontecem quando o pedestre se encontra caminhando sobre a seção estudada. Os resultados mais significativos para os modelos investigados ao longo desta dissertação estão associados a caminhada rápida do pedestre (*heavy walking*), obtidos na seção central da passarela com vão de 25,0m e com valores de aceleração da ordem de 2m/s^2 .

Foi constatado, ainda, que considerando-se as diferenças entre os valores da frequência fundamental dos modelos analisados ao longo deste trabalho de pesquisa (Perfis sólidos e celulares), a diferença quantitativa final, no que diz respeito aos valores das acelerações de pico são relativamente pequenas.

Finalmente, de acordo com os resultados numéricos apresentados, diante dos

casos de carregamento considerados neste estudo, os modelos investigados violam os critérios de conforto humano ($a_p > a_{lim}$) [34] quando uma ou mais pessoas caminham sobre a laje de concreto das passarelas em praticamente todas as situações de carregamento simuladas.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Desenvolver um modelo “massa-mola-amortecedor” para simular o pedestre, objetivando a consideração do efeito da interação pedestre-estrutura;
- b) Investigar o comportamento dinâmico dos modelos quando submetidos a multidões e pessoas correndo, algo que acontece regularmente na prática real de projeto;
- c) Proceder a uma análise de fadiga estrutural, em conjunto com análise dinâmica, pois os furos nas almas das vigas de aço certamente devem apresentar níveis de concentração de tensões importantes;
- d) Realizar um estudo sobre a influência das ligações viga-coluna na resposta dinâmica das passarelas e incorporar aos modelos de elementos finitos a rigidez real das colunas de aço;
- e) Realizar análises dinâmicas não determinísticas considerando-se para tal, posições aleatórias do ser humano ao caminhar sobre a estrutura.

REFERÊNCIAS

- [1] ARCELORMITTAL: Catálogo - Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars. ACB® Vigas Alveolares, Disponível em: <http://www.arcelormittal.com/sections>, Acesso em: 04 de Outubro de 2011.
- [2] METÁLICA: Catálogo - Disponível em: <http://www.metalica.com.br/images/stories/ld2555/vigas-casteladas-03.jpg>, Acesso em: 07 de Janeiro de 2012.
- [3] WESTOK Bridge Technology: Catálogo - Disponível em 2 de: <http://www.asdwestok.co.uk/Applications/Bridges/Technology.htm>, Acesso em: 1 Janeiro de 2012
- [4] HARPER, C.S. Design in steel: Castellated & cellular beams, British Steel Publications, 1994.
- [5] BBC NEWS. Scores hurt as US bridge collapses. Publicado em 21 de Maio de 2000, Disponível em: <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/americas/757611.stm>, Acesso em: 16 de Setembro de 2012.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2007.
- [7] TREGOLD, T. Elementary Principles of Carpentry. 2nd Ed, Publisher unknown, 1828.
- [8] TILLY, G.; Cullington, D.; Eyre, R. Dynamic Behaviour of Footbridges, IABSE Surveys, pp.13-24, 1984.
- [9] FERNANDES, H. Comportamento dinâmico de passarelas modeladas como vigas sujeitas a vibrações na direção vertical induzidas por pedestres. Tese de doutorado. UFPB. João Pessoa. Brasil, 2007.

- [10] TILDEN, C. J. Kinetic Effects of Crowd, Proceedings. In: ASCE, v. 34, n° 3 (Mar), p. 325-340, 1913.
- [11] LENZEN, K. H. Vibration of Steel Joists. In: Engineering Journal, v. 3(3), p. 133-136, 1966.
- [12] OHLSSON, S. V. Floor Vibrations and Human Discomfort. PhD Thesis - Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1982.
- [13] ALLEN, D. E., RAINER, J. H., PERNICA, G. Vibration Criteria for Assembly Occupancies. In: Canadian Journal of Civil Engineering, v. 12, n° 3, p. 617-623, 1985.
- [14] BACHMANN, H., AMMANN, W. Vibrations in Structures induced by Man and Machines. Structural Engineering Document N° 3e, International Association for Bridges and Structural Engineering, IABSE, Zurich, Switzerland, 1987.
- [15] McCORMICK, M. M., Office Floor Vibration: Design Criteria and Tests, Melbourne Research Laboratories, The Brke Hill Proprietary Company, Lmt., Melbourne, Australia, 1974.
- [16] MURRAY, T. M. Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibrations. In: Engineering Journal, v. 18(2), p. 62-70, 1981.
- [17] ALLEN, D. E., RAINER, J. H. Vibration Criteria for Long Span Floors. In: Canadian Journal of Civil Engineering, v. 3, n° 2, The National Council of Canada, June.
- [18] CANADIAN STANDARD CAN3-S16, 1-M89: Steel Structures for Buildings - Limit States Design. Appendix G: Guide for Floor Vibrations. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1989.

- [19] BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 5400: Steel, Concrete and Composite Bridges Specifications for Loads Part 2. Appendix C., London, UK, 1978.
- [20] ONT83, Ontario Highway Bridge Design Code 1983 and Commentary, Ministry of Transportation and Communication, Highway Engineering Division, Toronto, 1983.
- [21] ELLINGWOOD, B. E., TALLIN, A. Structural Serviceability: Floor Vibrations. In: Journal of Structural Engineering, v. 110, nº. 2, ASCE, p. 401-419, 1984.
- [22] ERIKSSON, P. E. Dynamic Service Actions for Floor Systems. In: Proceedings of Structures Congress XIV - Building an International Community of Structural Engineers, ASCE, v. 1, p. 413-419, Chicago, USA, April, 1996.
- [23] MIYAMORI, Y., OBATA, T., HAYASHIKAWA, T. et al. Study on Identification of Human Walking Model Base don Dynamic Response Characteristics of Pedestrian Bridges. In: The Eighth Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, paper Nº 1066, Nanyang Technological University, Singapore, 5-7 December, 2001.
- [24] VARELA, W.D. Modelo teórico-experimental para análises de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [25] FIGUEIREDO, F. P. Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [26] LIMA, N.L. de A. Efeito da modelagem do carregamento, do impacto do calcanhar humano e do amortecimento estrutural na resposta dinâmica de passarelas mistas, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

- [27] ARAÚJO JUNIOR, M.C. Avaliação experimental da sincronização por densificação de grupos de pedestres em passarelas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Paraíba, Brasil, 2008.

- [28] KNOWLES, P.R. Design of castellated beams for use with BS5950 e BS449, Constrado, 1985.

- [29] RODRIGUES, F. Comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

- [30] ABREU, L.M.P. Determinação do momento fletor resistente á flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares, asociación argentina de mecánica computacional, Buenos Aires, Argentina, 2010.

- [31] SILVEIRA, E.G. Estudo de vigas alveolares com ênfase nos modos de colapso com formação de rótulas plásticas, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFV, Viçosa, 2011.

- [32] OLIVEIRA, L.B. Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura, Dissertação de Mestrado, Viçosa, UFV, 2012.

- [33] ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2009.

- [34] MURRAY, T.M., Allen, D.E., Ungar, E.E. Floor vibrations due to human activity, Steel Design Guide Series, American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA, 2003.
- [35] MUSZYNSKA, A., 2005, "Rotordynamics", Nevada: Taylor & Francis Group.
- [36] SEGUNDINHO, P.G de A. *Estudo das vibrações induzidas por pedestres em passarelas de madeira*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil, 2010.
- [37] European Comitte for Standardization. Eurocode 5: Design of timber structures, Part 2, Bridges, Brussels, Belgium, 1995.
- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 2631/2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuos and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). Switzerland, 1989.
- [39] SWISS NATIONAL STANDARDS. SIA 160: Effects of loads on structures, 1989.
- [40] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP: Bulletin d'information, n. 209, England, London, aug. 1993.
- [41] AMERICAN ASSOCIATION OF SATATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO: Guide specifications for design of pedestrian bridges. USA, aug. 1997.
- [42] PIMENTEL, R.L., Pavic, A., Waldron, P. Evaluation of design requirements for footbridges excited by vertical forces from walking. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28(5), 769-776, 2001.
- [43] European Comitte for Standardization. Eurocode 5: Design of timber structures, Part 2, Bridges, London, UK, 2004.
- [44] Ontario Highway Bridge Design Code by Ontario. OHBDC: Ministry of

transportation and communication. Highway engineering division, 3rd ed., Ontario, Canada, 1991.

- [45] BRO 2004. Publikation 2004:56. Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar, Svensk Byggtjänst, Stockholm, Sverige, 2004.
- [46] RAINER, J.H.; Pernica, G.; Allen, D.E. Dynamic loading and response of footbridges. In: *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.15(1): 66-71, 1988.
- [47] GRUNDMANN, H.; Kreunzinger, H.; Schneider, M. Dynamic calculations of footbridges. *Bauingenieur*, 68(5): 215-225, 1993.
- [48] ELLIS, B. R. & JI, T. Floor vibration induced by dance-type loads: theory and verification. In: *The Structural Engineer*, v. 72, 1994.
- [49] WYATT, T. A. Design Guide on the Vibration of Floors. ISBM I 870004 34 5, The Steel Construction Institute, Berkshire, England, 1989.
- [50] BACHMANN, H. Case Studies of Structures with Man-Induces Vibrations. In: *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n^o. 3, p. 631-647, 1992.
- [51] DEBONA, G. L. Modelagem do comportamento dinâmico de passarelas tubulares em aço e mistas (aço-concreto), Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [53] WARD, J. K. Design of composite and non-composite cellular beams, The Steel Construction Institute, 2^a edição, 1994.
- [54] CLOUGH, R. W., PENZIEN, J; Dynamics of Structures; McGraw-Hill, 634p, 1993.

- [55] CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering. 3rd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, 2007.
- [56] CRAIG JR., R. R. Structural Dynamics. John Wiley & Sons, 527 p, 1981.
- [57] ZÚÑIGA, J. E. V. Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.