



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA SINCRONIZAÇÃO POR
DENSIFICAÇÃO DE GRUPOS DE PEDESTRES EM
PASSARELAS**

por

Moacir Carlos Araújo Junior

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa/ PB
Setembro/2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

MOACIR CARLOS ARAÚJO JUNIOR

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA SINCRONIZAÇÃO POR
DENSIFICAÇÃO DE GRUPOS DE PEDESTRES EM
PASSARELAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Universidade Federal da Paraíba

Orientador: Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel

João Pessoa/ PB
Setembro/2008

A663a Araújo Junior, Moacir Carlos.

Avaliação experimental da sincronização por densificação de grupos de pedestres em passarelas / Moacir Carlos Araújo Junior. - - João Pessoa: UFPB, 2009.

104f.: il.

Orientador: Roberto Leal Pimentel.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT.

1. Passarelas-Pedestres. 2. Vibrações. 3. Sincronização. 4. Cargas.

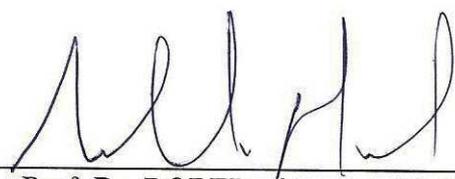
UFPB/BC

CDU: 625.712.34(043)

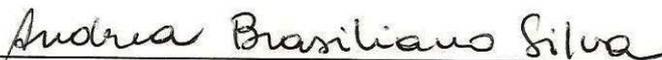
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA SINCRONIZAÇÃO POR DENSIFICAÇÃO DE GRUPOS DE PEDESTRES EM PASSARELAS

por

MOACIR CARLOS ARAÚJO JUNIOR



Prof. Dr. ROBERTO LEAL PIMENTEL - UFPB
(ORIENTADOR)



Prof. Dr. ANDREA BRASILIANO SILVA - UFPE
(EXAMINADOR EXTERNO)



Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA - UFPB
(EXAMINADOR INTERNO)

João Pessoa/ PB
Setembro/2008

Dedico,

*A Deus, a minha mãe Vera, ao meu pai
Moacir, ao meu irmão Hamlet e a minha
Daniela.*

Agradecimentos

A Deus, por me manter de pé em momentos tão difíceis.

Ao professor Roberto Leal Pimentel, por toda a sua dedicação em nos orientar e, acima de tudo, pela paciência e compreensão de um amigo.

Ao professor Jozemar Pereira dos Santos, do Departamento de Estatística da UFPB, pelos esclarecimentos prestados.

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, por toda a dedicação.

Aos companheiros de turma, pela convivência, amizade e apoio.

À colega Halane Maria Braga Fernandes, pelo imenso apoio prestado para a realização desta pesquisa.

À servidora Marluce Pereira, secretária do curso, por todos os serviços prestados.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram por esta vitória.

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	v
Lista de tabelas.....	vii
Lista de abreviaturas e siglas.....	ix
Lista de símbolos.....	x
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xiv
1.0 Introdução	1
1.1 <i>Considerações iniciais.....</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Justificativa.....</i>	<i>3</i>
1.3 <i>Objetivos.....</i>	<i>4</i>
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	<i>4</i>
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	<i>4</i>
1.4 <i>Escopo da dissertação</i>	<i>5</i>
2.0 Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 <i>Exemplos de passarelas que apresentaram vibrações excessivas devido ao fenômeno da sincronização</i>	<i>6</i>
2.1.1 <i>Direção vertical.....</i>	<i>6</i>
2.1.2 <i>Direção lateral.....</i>	<i>6</i>
2.2 <i>Carregamento dinâmico induzido por pedestres ao caminhar</i>	<i>11</i>
2.2.1 <i>Carregamento vertical produzido por um indivíduo</i>	<i>14</i>
2.2.2 <i>Carregamento horizontal produzido por um indivíduo</i>	<i>17</i>
2.2.3 <i>Carregamento de multidão e pequenos grupos de pedestres</i>	<i>19</i>
2.2.4 <i>Fator de majoração de carga.....</i>	<i>21</i>
2.2.5 <i>Efeito lock-in</i>	<i>23</i>
2.3 <i>Definições de conforto.....</i>	<i>25</i>
2.4 <i>Densidade de pedestres</i>	<i>26</i>

3.0	Diretrizes de dimensionamento de passarelas em relação ao carregamento induzido por vários pedestres	28
3.1	<i>Eurocodes:</i>	29
3.1.1	Eurocode 0 – parte 2: Base de cálculo das estruturas.....	29
3.1.2	Eurocode 1 – parte 2: Ações em estruturas	30
3.1.3	Eurocode 5 – parte 2: projeto de estruturas de madeira	30
3.2	<i>Guia Técnico do SÉTRA</i>	33
3.2.1	Determinação da classe da passarela	33
3.2.2	Escolha do nível de conforto pelo proprietário	34
3.2.3	Casos de carregamento dinâmico	35
3.3	<i>Proposta para o Anexo Nacional do Reino Unido (UK-NA) para o Eurocode (Barker & Mackenzie, 2008)</i>	37
3.3.1	Ações dinâmicas a serem consideradas	38
3.3.2	Ações dinâmicas que representam um único pedestre e grupos de pedestres	38
3.3.3	Modelando cargas dinâmicas de pedestres em condições de multidão	43
3.3.4	Recomendações dos limites de serviço para projetos.....	45
3.3.5	Estabilidade lateral devido ao carregamento de multidão	46
3.4	<i>Guia europeu de projeto de passarelas proposto por Heinemeyer & Feldmann (2008)</i> 47	
3.4.1	Níveis de conforto	47
3.4.2	Modelos de carregamento.....	48
3.4.3	Métodos de avaliação	50
3.5	<i>Modelo de carregamento proposto por Venuti et al. (2007)</i>	52
3.6	<i>Análise sobre as normas e diretrizes de dimensionamento de passarelas</i>	54
3.6.1	Número de pedestres na passarela	55
3.6.2	Nível de conforto	55
3.6.3	Efeito Lock-in.....	56
3.6.4	Modelos de carregamento.....	56
4.0	Os testes experimentais	58
4.1	<i>Descrição e objetivos</i>	58
4.2	<i>Protótipo de estudo</i>	59

4.3	<i>Configuração do protótipo</i>	60
4.4	<i>Definição dos grupos de pedestres</i>	61
4.5	<i>Percurso dos pedestres</i>	61
4.6	<i>Definição das densidades de pedestres</i>	62
4.7	<i>Respostas da estrutura durante os testes</i>	63
5.0	Metodologia de processamento de imagens	63
5.1	<i>Determinação dos sinais vibratórios</i>	64
5.2	<i>Determinação das taxas de passo individuais e dos ângulos de fase entre pares de pedestres</i>	66
6.0	Resultados e discussões	69
6.1	<i>Taxas de passo dos pedestres</i>	69
6.2	<i>Ângulos de fase entre pedestres</i>	71
6.2.1	<i>Precisão dos dados obtidos</i>	72
6.2.2	<i>Ângulos de fase com taxa de passo natural</i>	75
6.2.3	<i>Ângulos de fase com taxa de passo induzida</i>	78
6.3	<i>Robustez da metodologia adotada</i>	79
7.0	Conclusões	81
7.1	<i>Sugestões para futuros trabalhos</i>	82
8.0	Referências bibliográficas	83
9.0	Anexos	89

Lista de figuras

Fig. 1 - Millennium Bridge.....	7
Fig. 2 - Pont du Solferino.	8
Fig. 3 - T-Bridge.....	10
Fig. 4 - Distribuição normal da taxa de passo durante a atividade de caminhar.	13
Fig. 5 - Relação entre taxa de passo e velocidade de pedestres.....	14
Fig. 6 – Carregamento vertical induzido por um passo de um pedestre.....	16
Fig. 7 - Carregamento vertical induzido por um pedestre ao caminhar.	16
Fig. 8 - Mecanismo da vibração lateral induzida por pedestres.	17
Fig. 9 – Componente transversal (lateral) da força para uma taxa de passo de 2,0 Hz.....	18
Fig. 10 - Componente longitudinal da força para uma taxa de passo de 2,0 Hz.....	19
Fig. 11 - Multidão na T-Bridge, no Japão.	20
Fig. 12 - Grupos de pedestres	20
Fig. 13 - Relação entre a frequência fundamental na vertical e o coeficiente K_{vert}	32
Fig. 14 - Relação entre a frequência fundamental na horizontal e o coeficiente K_{hor}	33
Fig. 15 - Fator ψ para a atividade de caminhar.....	36
Fig. 16 – Gráfico do fator $k(f_{vert})$ x frequência.....	40
Fig. 17 – Gráfico fator de redução γ x decremento logarítmico.....	40
Fig. 18 – Fator dinâmico de resposta.....	42
Fig. 19 – Cálculo do fator de redução λ	44
Fig. 20 - Limite de estabilidade ao lock-in lateral.....	47
Fig. 21 - Parâmetros para os modelos de carregamento das classes TC1 a TC3.....	49
Fig. 22 - Coeficiente de sincronização entre pedestres em relação à densidade	54
Fig. 23 - Planta de forma do protótipo	59
Fig. 24 - Detalhe transversal do apoio do protótipo	59
Fig. 25 - Protótipo de estudo.	60
Fig. 26 – Percurso dos pedestres durante os testes.....	62
Fig. 27 - Obtenção da coordenada horizontal do ponto de referência de um pedestre.....	64
Fig. 28 - Exemplos de sinais do movimento de pedestres na passarela	65
Fig. 29 - Identificação das passadas de um pedestre	65
Fig. 30 - Cálculo da defasagem média de um par de pedestres.....	67
Fig. 31 - Distribuição das taxas de passo naturais para cada densidade.....	70

Fig. 32 - Ângulos de fase na direção lateral com taxa de passo natural.....	76
Fig. 33 - Ângulos de fase na direção vertical com taxa de passo natural.....	77
Fig. 34 - Ângulos de fase na direção lateral e vertical com taxa de passo induzida.	79

Lista de tabelas

Tabela 1 – Taxas de passo típicas de caminhada.....	13
Tabela 2– Fator dinâmico de carga.....	15
Tabela 3 – Faixas de densidades de pedestres	26
Tabela 4 – Classes de tráfego	27
Tabela 5 – Acelerações máximas	29
Tabela 6 - Faixas de aceleração para vibrações verticais	34
Tabela 7 - Faixas de aceleração para vibrações horizontais.....	35
Tabela 8 - Densidade de pedestres considerada	35
Tabela 9 - Carregamento para multidões esparsas e densas.....	36
Tabela 10 - Carregamento para multidões muito densas.....	37
Tabela 11 - Classificação da passarela	38
Tabela 12 - Parâmetros usados no cálculo de resposta de pedestres	41
Tabela 13 – Fator da configuração dos vãos da passarela, K.....	42
Tabela 14 – Fator k1	45
Tabela 15 – Fator k2	46
Tabela 16 - Fator k3.....	46
Tabela 17 – Níveis de conforto.....	48
Tabela 18 – Massa generalizada e carregamento generalizado.....	52
Tabela 19 – Testes experimentais.....	58
Tabela 20 - Taxas de passo dos pedestres obtidas nos testes experimentais.....	69
Tabela 21 - Taxas de passo de pedestres caminhando livremente	71
Tabela 22 - Conversão dos ângulos de fase.....	72
Tabela 23 - Erros dos sinais discretizados.....	73
Tabela 24 - Ângulos de fase de mesmos pares de pedestres em várias travessias	74
Tabela 25 – Estimativas estatísticas das amostras de ângulos de fase	75

Lista de abreviaturas e siglas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BS	British Standards
CEB	Comité Euro-Internacional du Beton
CMB	Changi Mezzanine Bridge
Eurocode	European Standard
FDC	Fator Dinâmico de Carga
ISO	International Organization for Standardization
NA	National Annex
NBR	Norma Brasileira Registrada
OHBDC	Ontario Highway Bridge Design Code
SÉTRA	Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
TLD	Tuned Liquid Dampers
TMD	Tuned Mass Dampers

Lista de símbolos

G	Peso do pedestre
D	Parâmetro de amortecimento de massa dos pedestres
$m_{passarela}$	Massa da passarela por unidade de comprimento
$m_{pedestre}$	Massa de pedestres por unidade de comprimento
K	Fator que depende da configuração dos vãos da passarela
K_{vert}	Coefficiente de minoração que leva em conta o risco de ressonância de uma passarela na direção vertical.
K_{hor}	Coefficiente de minoração que leva em conta o risco de ressonância de uma passarela na direção horizontal.
$K(f_{vert})$	Fator que combina os efeitos de uma população de pedestres mais realistas, respostas harmônicas e ponderação relacionada à sensibilidade do pedestre com relação à resposta.
S	Área do tabuleiro da passarela
A	Área da superfície de caminhada
b	Largura da superfície de caminhada
l	Comprimento da passarela
α_i	Fator dinâmico de carga
f	Taxa de passo
f_v	Frequência da vibração vertical
f_l	Frequência da vibração horizontal longitudinal
f_t	Frequência da vibração horizontal transversal (lateral)
f_{vert}	Frequência fundamental vertical da passarela
f_{hor}	Frequência fundamental horizontal da passarela
φ_i	Ângulo de fase
λ	Taxa de fluxo (pedestres/s)
ζ	Coefficiente de amortecimento
ξ	Coefficiente de amortecimento crítico
γ	Fator de redução que permite a combinação dessincronizada de ações em um grupo de pedestres
ψ	Fator de minoração para a atividade de caminhar
Ψ	Fator de resposta dinâmica

n	Número de pedestres
n'	Número equivalente de pedestres
n_s	Número de pedestres não correlacionados
d	Densidade de pedestres
j	Número de harmônicos
k_l	Fator considerado pela distribuição espacial da carga ao longo da passarela
t	Tempo
a_{limite}	Aceleração limite de projeto
$a_{vert,1}$	Aceleração da vibração vertical induzida por um pedestre ao caminhar
$a_{vert,n}$	Aceleração da vibração vertical induzida por n pedestres ao caminhar
$a_{hor,1}$	Aceleração da vibração horizontal induzida por um pedestre ao caminhar
$a_{hor,n}$	Aceleração da vibração horizontal induzida por n pedestres ao caminhar
w	Carga vibratória distribuída
w'	Amplitude da carga vertical dinâmica
$p(x)$	Carregamento uniformemente distribuído por comprimento
P_{mov}	Carga em movimento
F_v	Carregamento vertical
F_{ht}	Carregamento horizontal transversal
F_{hl}	Carregamento horizontal longitudinal
F_0	Amplitude de referência
F_{ps}	Componente da força devido à sincronização entre pedestres e estrutura
F_{pp}	Componente da força devido à sincronização entre pedestres
F_s	Componente da força gerada por n pedestres caminhando com uma distribuição de frequências Gaussiana e ângulos de fase aleatórios
C_{fm}	Fator de majoração de carga
P_s	Probabilidade de sincronização
TC	Classe de tráfego
CL	Nível de conforto
M	Massa total da passarela
M_i	Massa generalizada do modo investigado i
μ	Distribuição de massa por comprimento
AM	Ângulo de fase medido
E_{max}	Erro máximo possível

T	Período
T_{med}	Período médio
T_i	Período individual
$T_{med (A-B)}$	Período médio do par de pedestres
$d_{med (^\circ)}$	Defasagem média, em graus
$d_{med (s)}$	Defasagem média, em segundos
d_i	Defasagem individual

Resumo

As passarelas são obras de arte especiais, presentes nos grandes centros urbanos e ao longo das rodovias. Tratam-se de travessias em desnível construídas para aumentar a segurança dos pedestres e facilitar o fluxo de tráfego, já que eliminam os pontos de conflito entre pedestres e veículos. A ocorrência do fenômeno *lock-in* tem levado à interdição para reparos passarelas sujeitas ao carregamento dinâmico induzido por multidões de pedestres ao caminhar. Isso porque a sincronização entre o movimento dos pedestres e os deslocamentos da estrutura tem resultado na ocorrência de vibrações excessivas, nos casos em que a frequência de excitação produzida pelo caminhar dos pedestres se aproxima da frequência natural da passarela. Apesar de diversas pesquisas a respeito do *lock-in*, os resultados ainda são escassos para embasar o desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o fenômeno. A princípio, um outro tipo de sincronização, que ocorre entre pedestres em situações de multidão, devido à densificação, daria início às vibrações na estrutura que originariam o *lock-in*. Contudo, faltam na literatura dados experimentais que comprovem essa teoria. Um estudo experimental a respeito da sincronização entre pedestres devido à densificação foi feito nesta pesquisa. Testes experimentais foram realizados num protótipo de passarela com diferentes densidades de pedestres. Para as densidades investigadas (0,3, 0,7 e 0,9 pedestres/m²), com os pedestres caminhando com sua taxa de passo natural, nenhum indício de sincronização foi verificado. Também foram realizados testes com taxa de passo induzida para verificar a robustez da metodologia utilizada. Os resultados mostraram que o procedimento adotado é válido e pode ser aplicado para outras densidades de interesse.

Palavras-chave: passarelas, vibrações, cargas, sincronização, pedestres.

Abstract

Footbridges are special works of art, present in large urban centers and along the highways. They are built above the roads to improve the safety of pedestrians and facilitate the flow of traffic, since they eliminate the points of conflict between pedestrians and vehicles. The occurrence of the phenomenon *lock-in* has implied the closing for repair of footbridges subject to dynamic loading induced by crowds of walking pedestrians. This is because the synchronization between the movement of pedestrians and the displacement of the structure has resulted in the occurrence of excessive vibration, when the frequency of excitation generated due to walking is close to the natural frequency of the footbridge. Despite several works about the *lock-in*, little has been concluded to try to develop a mathematical model to represent the onset of the phenomenon. In principle, another type of synchronization, which occurs among pedestrians, due to densification in crowd situations, would start rising vibrations in the structure, initiating the *lock-in*. However, there is a lack of experimental data in the literature to prove that theory. An experimental study on the synchronization between pedestrians due to densification was carried out in this research. Experimental tests were conducted on a prototype footbridge with different densities of pedestrians. For the densities investigated (0,3, 0,7 and 0,9 pedestrians/m²) with the pedestrian walking with their natural pacing rate, no evidence of synchronization was found. Tests were also conducted with induced pacing rate, to check the robustness of the methodology used. The results showed that the procedure adopted was valid and can be applied to other densities of interest.

Keywords: footbridges, vibration, loads, synchronization, pedestrian.

1.0 Introdução

1.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento da tecnologia na construção civil tem resultado em obras cada vez mais arrojadas que desafiam os limites impostos pela natureza. Pontes e passarelas com grandes vãos e edifícios cada vez mais esbeltos são exemplos bastante comuns que mostram bem a tendência do setor na atualidade. Projetos que apresentam elementos estruturais com reduzida rigidez são cada vez mais comuns. No entanto, isso muitas vezes é feito sem uma análise eficaz do comportamento dinâmico da estrutura.

A diminuição da rigidez resulta em estruturas com baixas frequências naturais e, conseqüentemente, mais propensas a entrar em ressonância, que ocorre quando as frequências de excitação se aproximam das frequências naturais. A ressonância resulta na ocorrência de vibrações excessivas com um aumento significativo das amplitudes de vibração.

O surgimento de vibrações excessivas pode comprometer a segurança da estrutura, já que impõe um aumento das tensões, ou comprometer seu comportamento em serviço (Estado limite de serviço). A NBR-6118 (2003) define estado limite de vibrações excessivas como o “estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção”.

Um dos primeiros casos que se tem registrado de uma ponte que entrou em colapso devido à vibração induzida por pedestres foi de uma ponte de ferro fundido localizada em Broughton, na Inglaterra em 1831. Na ocasião, sessenta soldados marchavam na ponte quando ela entrou em ressonância e desabou (TILLY *et al.*, 1984 *apud* FERNANDES, 2007). O movimento sincronizado dos soldados deu origem a forças resultantes de elevada intensidade.

No entanto, em estruturas como passarelas de pedestres, a ocorrência de vibrações excessivas geralmente tem trazido maiores problemas ao comportamento em serviço. A sensação de insegurança e o desconforto provocados pela oscilação da estrutura têm resultado na perda da funcionalidade e conseqüente interdição desses equipamentos urbanos. A *Millennium Bridge*, localizada em Londres, por exemplo, ficou interditada por dezoito meses para reparos que contabilizaram sete milhões de dólares (ROBERTS, 2005).

As vibrações em passarelas podem ocorrer tanto na direção vertical como na horizontal, esta última no sentido transversal (direção lateral) ou longitudinal (BACHMANN, 2002). As fontes de excitação mais comuns são aquelas provenientes do tráfego de pedestres, através de atividades como pular, correr e, principalmente, caminhar.

As principais referências de projeto de passarelas, no que diz respeito à vibração induzida por pedestres, podem ser divididas em dois grupos, de acordo com o procedimento de dimensionamento adotado. A NBR 6118 (2003), a CEB (1991) e a AASHTO (1997) têm como critério básico a exclusão de faixa de frequência crítica. Já a ISO 10137 (1992), a OHBDC (1991), a BS 5400 (2006) e o Eurocode 5 (1997), por exemplo, fazem uma avaliação do desempenho dinâmico. Com exceção do Eurocode 5, nenhuma das citadas referências inclui na sua metodologia as vibrações produzidas por grupos de pedestres ou multidões. Adotam como critério as vibrações produzidas por um único pedestre caminhando.

Nos últimos anos, a prática tem demonstrado que os critérios de projeto a vibrações precisam ser reavaliados. Passarelas como a *Pont du Solferino* em Paris no ano de 1999, a *Millennium Bridge* em Londres no ano 2000, a *Changi Mezzanine Bridge* (BROWNJONH *et al.*, 2004a, 2004b) em Singapura em 2004 e a *T-Bridge* no Japão (NAKAMURA, 2003) são alguns exemplos de estruturas que apresentaram vibrações excessivas quando submetidas ao carregamento dinâmico de multidões de pedestres.

A presença de vários pedestres caminhando ao mesmo tempo em uma passarela pode dar origem ao chamado efeito *lock-in*. Consiste no movimento sincronizado dos pedestres com os deslocamentos da estrutura. Esse fenômeno foi abordado primeiramente por Fujino *et al.*(1993) e pode resultar na ocorrência de vibrações excessivas na estrutura.

Um pedestre caminha, em condições normais, com uma taxa de passo média de aproximadamente 2,0 Hz (BACHMANN *et al.*, 1995). Essa é, portanto, a frequência de excitação produzida pelo pedestre. O efeito da intensidade das forças produzidas por um único pedestre ao caminhar é mínimo diante da rigidez da estrutura de uma passarela. No entanto, em grupos onde pedestres caminham de forma sincronizada (mesma taxa de passo e pisando no chão num mesmo instante, ou seja, em fase), as forças individuais tendem a se somar e resultar em forças oscilatórias de intensidade significativa. Se as frequências de oscilação dessas forças se aproximarem de alguma das frequências naturais da passarela, a estrutura poderá entrar em ressonância e vibrar excessivamente. O amortecimento da estrutura será influente na determinação das amplitudes de deslocamento.

O que induz os pedestres a procurarem sincronizar suas passadas com os deslocamentos da estrutura é o desconforto provocado pelo movimento oscilatório. Isso dá

origem a um “ciclo vicioso” já que, à medida que aumenta a quantidade de pedestres sincronizados com a estrutura, as vibrações tendem a aumentar.

Apesar de diversos trabalhos publicados abordando esse fenômeno, ainda há necessidade de estudos que procurem explicar como o *lock-in* se inicia e como progride de uma situação de locomoção tranqüila por parte dos pedestres para um movimento sincronizado (BARKER, 2002).

Segundo Pizzimenti & Ricciardelli (2005), numa multidão podem ocorrer dois tipos de comportamento. O primeiro ocorre quando a densidade de pedestres em toda a passarela for inferior a uma densidade crítica (não especificada). Neste caso, os pedestres caminham de forma independente uns dos outros. O segundo tipo de comportamento ocorre quando a densidade de pedestres em alguma região da passarela é superior a uma densidade crítica. Pode-se formar nesta região um núcleo de sincronização no qual os pedestres tendem a caminhar com similar ângulo de fase e taxa de passo. O movimento sincronizado entre os pedestres dá início ao movimento oscilatório da estrutura, que pode resultar no *lock-in*.

Existem, portanto e em princípio, dois tipos de sincronização: a sincronização entre pedestres e estrutura, conhecida como *lock-in*, e a sincronização entre pedestres, devido à densificação (VENUTI *et al.*, 2007).

Neste trabalho, é apresentado um estudo experimental visando investigar a sincronização por densificação do movimento de grupos de pedestres em passarelas, a partir de imagens filmadas. Tal metodologia vem sendo utilizada para investigar o *lock-in* (YOSHIDA, 2002). Pretende-se contribuir com dados experimentais que apontem a relação da sincronização por densificação com o início do *lock-in*.

1.2 Justificativa

Somente após o incidente na *Millennium Bridge*, em 2000, que teve de ser interditada por apresentar vibrações excessivas, é que a comunidade científica se interessou em estudar de forma mais intensa as vibrações produzidas por vários pedestres e, conseqüentemente, o fenômeno da sincronização, apesar das primeiras observações sobre o fenômeno terem sido relatadas por Fujino *et al.* (1993). Mais tarde, outros casos também surgiram como a *Pont du Solferino*, em Paris, a *Changi Mezzanine Bridge*, em Singapura, a *M-Bridge* e a *T-Bridge*, no Japão.

Diversos modelos matemáticos já foram apresentados abordando o *lock-in* (DALLARD *et al.*, 2001a; ROBERTS, 2005; VENUTI *et al.*, 2007). No entanto, há poucos dados experimentais que permitam comprovar modelos matemáticos que expliquem como o fenômeno se inicia, já que a princípio, a passarela se encontra em repouso, sem apresentar vibrações que induzam os pedestres a caminharem de forma sincronizada.

Estudos experimentais abordando o fenômeno da sincronização por densificação são necessários para que se possa entender como o *lock-in* se inicia.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desta pesquisa é estudar experimentalmente o fenômeno da sincronização por densificação do movimento de grupos de pedestres em passarelas durante a atividade de caminhar.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Revisão na literatura sobre os dois tipos de sincronização, o *lock-in* e a que ocorre entre pedestres devido à densificação;
- Determinação dos sinais vibratórios (sinais que indiquem o movimento dos pedestres) a partir de imagens filmadas dos testes realizados com várias densidades de pedestres;
- Identificação das taxas de passo e ângulos de fase entre pedestres a partir dos sinais vibratórios determinados;
- Avaliação da metodologia adotada;
- Avaliação estatística dos resultados obtidos.

1.4 Escopo da dissertação

Inicialmente é apresentada no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica onde são apresentados casos de passarelas que apresentaram vibrações excessivas devido ao fenômeno do *lock-in* e, em seguida, são abordados o carregamento dinâmico induzido por pedestres ao caminhar, o fenômeno da sincronização, definições de conforto e a importância da densidade do fluxo de pedestres em passarelas.

No Capítulo 3 são apresentadas algumas diretrizes de dimensionamento de passarelas, relacionadas com o carregamento induzido por vários pedestres. São abordados os Eurocodes 0, 1 e 5, o Guia Técnico do SÉTRA (França), duas propostas para os anexos nacionais da norma Européia e um modelo de carregamento proposto por Venuti *et al.* (2007).

Já o Capítulo 4 apresenta toda descrição dos testes experimentais realizados e do protótipo de passarela utilizado.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia adotada para determinar os sinais vibratórios dos pedestres a partir das imagens filmadas dos testes experimentais e os cálculos utilizados na determinação das taxas de passo individuais e dos ângulos de fase entre pares de pedestres.

Já no Capítulo 6 encontram-se os resultados obtidos, a saber: as médias e os desvios padrões das taxas de passo e os histogramas com os ângulos de fase. É apresentada uma análise sobre a precisão destes resultados.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões da pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

Por fim, são listadas as referências bibliográficas utilizadas (Capítulo 8) e os anexos da pesquisa (Capítulo 9).

2.0 Revisão Bibliográfica

2.1 Exemplos de passarelas que apresentaram vibrações excessivas devido ao fenômeno da sincronização

2.1.1 Direção vertical

Não há relatado na literatura casos de passarelas que apresentaram vibração excessiva na direção vertical devido ao *lock-in*.

Segundo Caetano *et al.* (2005), o *feedback* (nomenclatura referente a *lock-in*) foi claramente observado nas vibrações laterais mas não nas vibrações verticais.

Já Heinemeyer & Feldmann (2008) afirmam que não foi observado em passarelas, fluxos de pedestres sincronizados com as vibrações verticais.

A possibilidade de sincronização vertical pode parecer improvável, no entanto não existe nenhuma prova de que efetivamente não possa vir a ocorrer (MCROBIE & MORGENTHAL, 2002).

2.1.2 Direção lateral

Os grandes incidentes relatados em passarelas nos últimos anos, devido ao fenômeno do *lock-in*, ocorreram na direção lateral. Dentre os mais conhecidos estão a *Millennium Bridge*, a *Pont du Solferino*, a *Changi Mezzanine Bridge*, a *Toda-Bridge* e a *M-Bridge*, descritas a seguir.

2.1.2.1 Millennium Bridge

A *Millennium Bridge* está localizada no centro de Londres. Liga dois pontos turísticos da cidade: *St. Pauls Cathedral* e a *New Tate Gallery* (Fig. 1).

Trata-se de uma passarela suspensa por dois grupos de quatro cabos de 120 mm de diâmetro. Possui três vãos: o central com 144 m, o vão norte com 80 m e o vão sul, com 108 m, totalizando 332 m de extensão.



Fig. 1 - Millennium Bridge

A *Millennium* foi aberta ao público em 10 de junho de 2000. No primeiro dia, cerca de 80.000 a 100.000 pessoas cruzaram a passarela. Análises de vídeos mostraram a presença de até 2000 pessoas na passarela ao mesmo tempo, resultando numa densidade máxima de até 1,3 a 1,5 pedestres/m² (DALLARD *et al.*, 2001a). Nesse dia, a *Millennium* apresentou vibrações na direção lateral devido ao carregamento horizontal induzido pelos pedestres, ao caminhar de forma sincronizada com os deslocamentos laterais da estrutura. Foram verificadas amplitudes de deslocamento de até 75 mm no vão central (NEWLAND, 2003). De acordo com Dallard *et al.* (2001a), este vão apresentou vibrações com frequências de 0,5 Hz e 1,0 Hz, primeiro e segundo modos laterais, respectivamente. Já o vão sul, segundo o mesmo autor, apresentou vibrações em torno de 0,8 Hz em um modo lateral e o vão norte, pouco mais de 1,0 Hz em outro modo lateral. Dallard *et al.* (2001a) também afirma que o movimento da passarela foi causado claramente pelo efeito de um significativo carregamento lateral não previsto no projeto e que este carregamento foi devido à sincronização das forças laterais de passo da grande multidão de pedestres presentes.

No dia 12 de junho, dois dias após sua abertura, a passarela foi interditada para estudos, só sendo reaberta ao público, dezoito meses após o incidente (ROBERTS, 2005).

Dentre os diversos estudos realizados na passarela, Dallard *et al.*(2001a, 2001b) propôs um modelo para simular a vibração lateral da *Millennium* assumindo que as forças laterais produzidas pelos pedestres ao caminhar são proporcionais à velocidade lateral da estrutura.

2.1.2.2 Pont du Solferino

Localizada em Paris, a passarela possui uma estrutura de aço em arco com 140 m de comprimento e vão de 106 m. Sua largura funcional varia de 12 m a 14,80 m (SÉTRA, 2006) (Fig. 2).

Foi aberta ao público em dezembro de 1999, quando apresentou vibrações excessivas na direção lateral enquanto os pedestres a atravessavam.

Charles & Bui (2005) realizaram testes na *Solferino* e verificaram que amplitudes de 0,10 a 0,15 m/s² foram registradas quando se iniciou o *lock-in*. Neste estudo, os autores apresentaram um procedimento de projeto para evitar a ocorrência do fenômeno. Segundo os autores, tal procedimento pode ser aplicado também para simples passarelas.

O problema foi contido com a instalação de 14 amortecedores do tipo TMD (*Tuned Mass Dampers*). Após essas intervenções, a passarela foi monitorada com 14 acelerômetros distribuídos ao longo do vão por um período de cinco anos (DANBON & GRILLAUD, 2005).



Fig. 2 - Pont du Solferino (Fonte: <http://media.lcpc.frextingponts_parispasserelle-solferino2.jpg> Acesso em:19/09/2008, 11:25:00).

2.1.2.3 Changi Mezzanine Bridge

É uma passarela localizada dentro de um túnel que conecta dois terminais de passageiros no Aeroporto de Changi, em Singapura. Sua estrutura é constituída de seções tubulares de aço e possui 140 m de vão.

A *Changi Mezzanine Bridge* (CMB) foi aberta ao público em 8 de fevereiro de 2002.

Estudos preliminares realizados durante a construção da passarela até a sua abertura deixaram claro que a estrutura poderia ser facilmente excitada pelo movimento de pedestres no primeiro modo lateral, que possuía frequência natural de 0,9 Hz (BROWNJOHN *et al.* 2004a).

Com a CMB concluída, Brownjohn *et al.* (2004b) realizaram testes com grupos de 10 pedestres caminhando circularmente na passarela. Foram observadas respostas de 0,8775 Hz no primeiro modo lateral com amplitude máxima de 0,17 m/s², que corresponde a 5,5 mm de deslocamento. Segundo os autores, a resposta lateral da estrutura aumentava à medida que o número de pedestres também aumentava e, durante um período de 3 minutos, no qual o número de pedestres se manteve constante, as respostas continuaram crescendo continuamente até um momento em que os níveis pareciam ter ficado incômodos e o andar foi parado. O fenômeno da sincronização lateral foi observado na estrutura (BROWNJOHN & FU, 2005).

2.1.2.4 T-Bridge

Localizada em Toda - Saitama, no Japão, a *Toda Park Bridge* foi inaugurada em 1989. Possui um comprimento total de 179 m por 7,85 m de largura. Seu vão principal mede 134 m. Suas torres possuem 61,4 m de altura de concreto armado. Sua estrutura é composta por dois planos de cabos estaiados, com 11 cabos por plano. A passarela liga um estádio de corrida de lanchas a um terminal de ônibus e está sujeita a travessia de multidões de pedestres (Fig. 3).



Fig. 3 - T-Bridge (Fonte: Miki C. [2007 ou 2008]).

Em 1989, Fujino *et al.* (1993) verificou durante a travessia de uma multidão que pelo menos 20% das pessoas estavam caminhando de forma sincronizada com as vibrações laterais da estrutura.

De acordo com Nakamura & Kawasaki (2006), a passarela apresentou amplitudes de deslocamentos laterais de 10 mm, provocando incômodo e insegurança nos pedestres. A frequência de excitação de 0,93 Hz ocasionou vibrações da estrutura em ressonância no primeiro modo lateral, no qual a frequência natural era de 0,9 Hz. Os autores estimaram pelas fotos tiradas da passarela que a densidade durante o congestionamento era de 0,8 a 1,3 pedestres/m².

Yoshida *et al.* (2007), através de uma câmera filmadora instalada no alto de um edifício na saída da passarela, registrou o movimento de uma multidão que atravessava a *T-bridge* em direção ao terminal de ônibus após o término de uma corrida. A partir das imagens, os autores obtiveram o traçado de diversos pedestres a partir do movimento de suas cabeças. Os deslocamentos laterais da passarela também foram obtidos observando-se o movimento de um ponto de referência na estrutura. Em determinado momento, foram verificados

deslocamentos superiores a 10 mm na direção lateral e uma média de 60% dos pedestres caminhando de forma sincronizada com os movimentos laterais da passarela.

Para suprimir a vibração excessiva, cabos secundários e amortecedores do tipo TLD (*Tuned Liquid Dampers*) foram instalados (NAKAMURA & KAWASAKI, 2006).

2.1.2.5 *M-Bridge*

A *M-Bridge* (*Maple Valley great suspension bridge*) é uma passarela suspensa que cruza o lago Dam, localizada em Nasu Shiobara, no Japão. Construída em 1999, apresentou vibrações excessivas na direção lateral logo após ser aberta ao público.

Possui um comprimento total de 440 m, com um vão principal de 320 m. Sua torre é feita de tubos de aço e possui 26,20 m de altura.

Nakamura & Kawasaki (2006) calcularam, através de um modelo de elementos finitos (FEM), a primeira frequência natural da estrutura na direção lateral como sendo aproximadamente 0,3 Hz. Tal valor se diferenciava daqueles observados em outras passarelas que apresentaram vibrações excessivas na direção lateral. Então, os mesmos autores realizaram medições na estrutura e identificaram a frequência natural no terceiro modo lateral como sendo 0,88 Hz, valor este, bastante próximo à frequência habitual da força lateral produzida pelo caminhar dos pedestres (0,8 a 1,2 Hz). Assim, as vibrações ocorridas na *M-Bridge* foram atípicas, pois se deram no terceiro e não no primeiro modo lateral, como observados nos demais casos de passarelas que apresentaram problemas de vibração excessiva.

2.2 Carregamento dinâmico induzido por pedestres ao caminhar

Os carregamentos dinâmicos induzidos por pedestres em passarelas são resultantes de atividades como caminhar, correr e pular. O caminhar, que é a atividade mais comum, se diferencia do correr pelo fato de que há um contato contínuo com o chão enquanto que nas atividades de correr e pular ocorre um contato descontínuo (SÉTRA, 2006). Em outras palavras, durante a atividade de caminhar, o pedestre mantém sempre pelo menos um pé em contato com a superfície.

A atividade de caminhar dos pedestres gera forças com componentes nas três direções. Na direção vertical, a componente é produzida pelo impacto periódico das passadas. Na direção lateral, as forças são resultantes do movimento oscilatório em torno do centro de gravidade do corpo humano que ocorre entre as passadas (NAKAMURA & KAWASAKI, 2006). Já na direção longitudinal, as forças são geradas devido ao atrito entre os pés e o piso.

A frequência de excitação na direção lateral é igual à metade da frequência na direção vertical e longitudinal. Isso porque, a cada duas passadas do pedestre, são aplicadas duas forças de mesmo sentido na direção vertical e longitudinal enquanto que na direção lateral são aplicadas duas forças de sentidos opostos. Dessa forma, são necessários dois passos para se completar um ciclo oscilatório na direção lateral enquanto que nas outras duas direções, apenas um passo. Conseqüentemente, o período predominante da excitação na lateral é o dobro do período das direções vertical e longitudinal.

O surgimento de vibrações excessivas em passarelas tem sido mais comum nas direções vertical e lateral, esta última devido principalmente ao efeito *lock-in*.

Dois parâmetros de grande importância no carregamento induzido por pedestres ao caminhar são a frequência (taxa de passo) e a velocidade de caminhada.

Diversos estudos, como por exemplo, o de Matsumoto *et al.* (1972), apontam que a taxa de passo (frequência) de pedestres caminhando normalmente variam entre 1,4 e 2,4 Hz (Fig. 4).

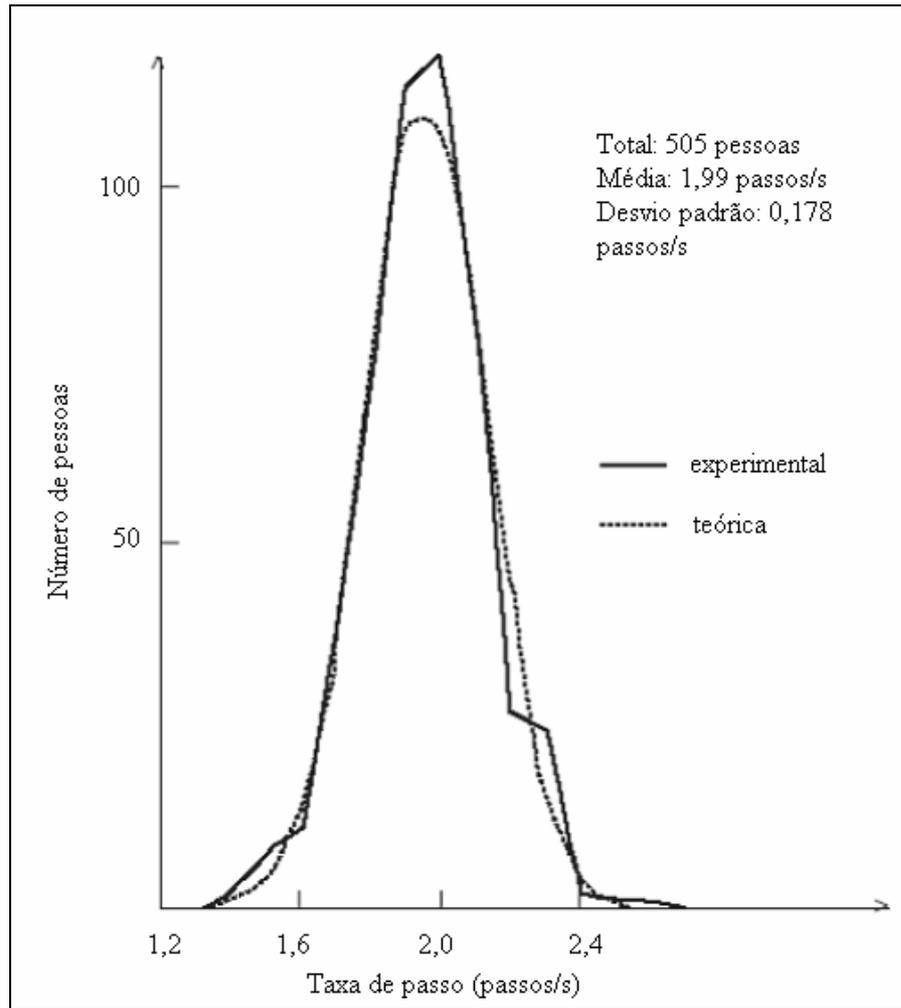


Fig. 4 - Distribuição normal da taxa de passo durante a atividade de caminhar (Fonte: modificado de MATSUMOTO *et al.*, 1972).

Bachmann (2002) classifica a velocidade de caminhada de acordo com faixas de frequência (Tabela 1).

Tabela 1 – Taxas de passo típicas de caminhada

Caminhada	Taxa de passo (Hz)
Lenta	1,40 - 1,70
Normal	1,70 – 2,20
Rápida	2,20 – 2,40

Já Venuti *et al.* (2007) apresentam na Fig. 5 a relação entre a taxa de passo e a velocidade dos pedestres segundo Bertram & Ruína (2001) e Wheeler (1982).

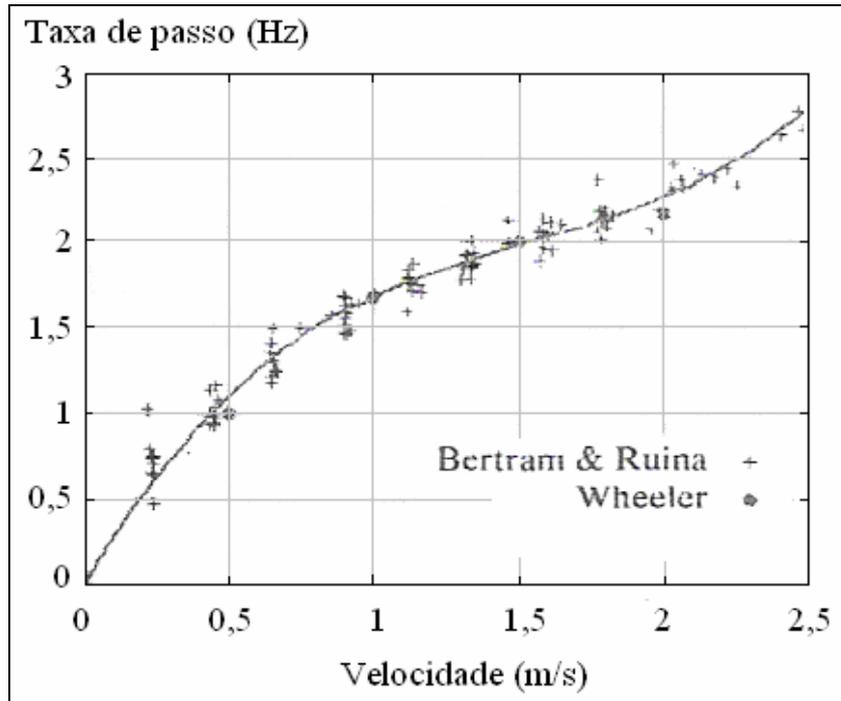


Fig. 5 - Relação entre taxa de passo e velocidade de pedestres (Fonte: modificado de VENUTI *et al.*, 2005).

2.2.1 Carregamento vertical produzido por um indivíduo

Os modelos de carga do andar propostos na literatura são derivados geralmente da suposição que andar é uma atividade perfeitamente periódica. Dessa forma, as cargas dinâmicas podem ser definidas matematicamente através da série de Fourier. A equação (1) define o carregamento vertical induzido por um pedestre ao caminhar:

$$F(t) = G \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^j \alpha_i \text{sen}(2i\pi f_v t - \varphi_i) \right] \quad (1)$$

Onde:

G : peso do pedestre;

f_v : taxa de passo do pedestre;

α_i : fator dinâmico de carga (FDC);

φ_i : ângulo de fase do i -ésimo harmônico em relação ao primeiro harmônico;

j : número total de harmônicos;

O fator dinâmico de carga depende do harmônico a ser considerado. É definido por vários autores de acordo com características como o tipo de piso da plataforma (flexível ou não) e a taxa de passo dos pedestres (f). Além disso, segundo Kerr & Bishop (2001), diferentes pessoas geram diferentes FDCs, mesmo quando caminham com a mesma taxa de passo. A Tabela 2 apresenta alguns desses valores.

Tabela 2– Fator dinâmico de carga (Fonte: HAUKSSON, 2005).

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

Segundo Dallard *et al.* (2001b), a magnitude da componente vertical oscilatória do primeiro harmônico é quase 40% do peso do corpo do pedestre.

O SÉTRA (2006) simplifica a equação (1) considerando o peso médio de um pedestre como sendo 700 N e a frequência média na direção vertical como sendo 2,0 Hz, limitada apenas ao primeiro harmônico:

$$F_v(t) = G + 0,4 \cdot G \cdot \text{sen}(2\pi ft) \quad (2)$$

Kerr & Bishop (2001) explicam as fases do carregamento vertical durante uma passada de um pedestre da seguinte forma, de acordo com a Fig. 6:

- A: tempo do impacto inicial do calcanhar do pedestre;
- B: peso da pessoa mais um componente inercial devido ao impulso da pessoa enquanto em contato com a plataforma;
- C: momento em que a pessoa dobra o joelho, movimenta a perna oposta e transfere o peso do corpo para o outro pé;

- D: momento em que a pessoa empurra com os seus dedos do pé para deixar a plataforma;
- E: momento em que o pé termina o contato completamente com a plataforma.

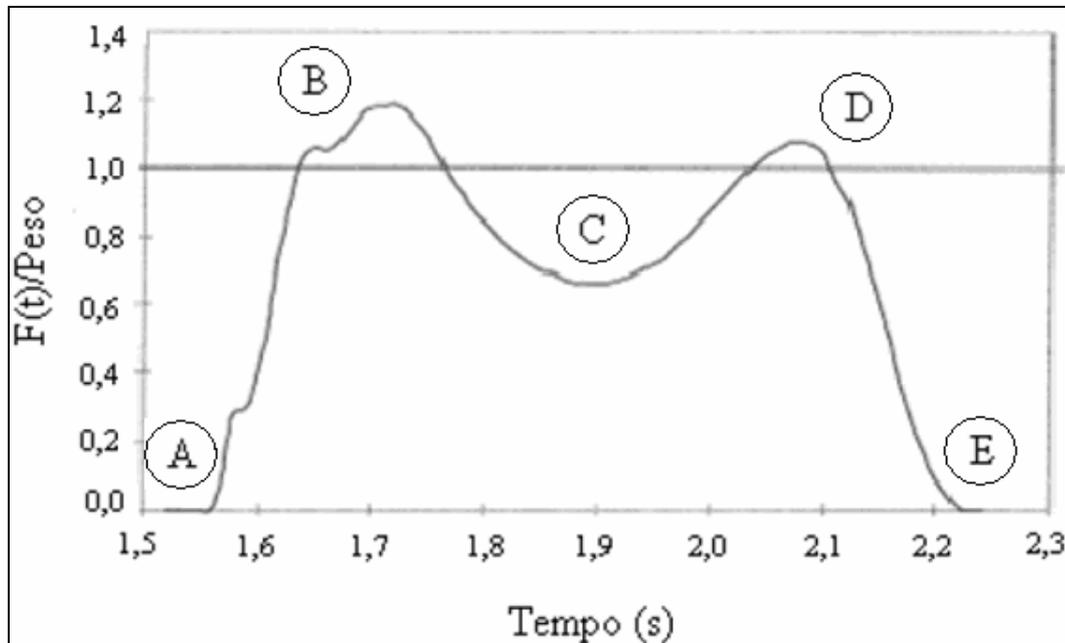


Fig. 6 – Carregamento vertical induzido por um passo de um pedestre.

Durante a atividade de caminhar, há um momento em que o pedestre mantém os dois pés em contato com a plataforma, conforme apresentado na Fig. 7. Nesse período, o carregamento é provocado pelo impacto do calcanhar de uma das pernas juntamente com o contato final dos dedos do pé da outra perna.

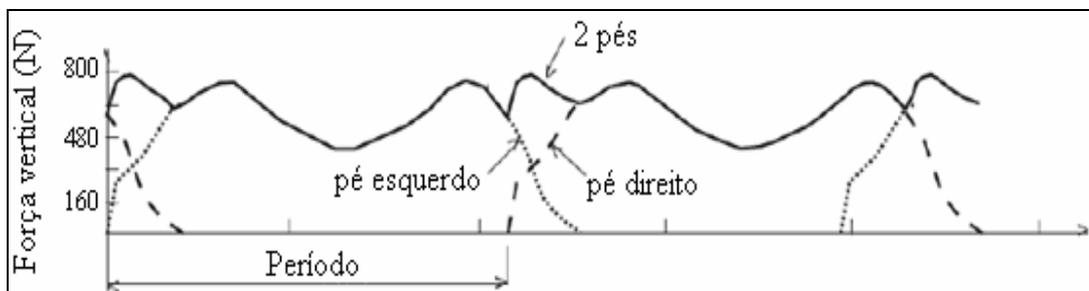


Fig. 7 - Carregamento vertical induzido por um pedestre ao caminhar (Fonte: modificado de ZIVANOVIC *et al.*, 2005).

2.2.2 Carregamento horizontal produzido por um indivíduo

As componentes horizontais da força produzida por pedestres ao caminhar são de pequena intensidade quando comparadas com a componente vertical. No entanto, as pessoas são muito mais sensíveis a vibrações horizontais que a verticais (SÉTRA, 2006).

Na direção lateral, as forças são resultantes do movimento oscilatório em torno do centro de gravidade do corpo humano que ocorre entre as passadas (NAKAMURA & KAWASAKI, 2006), conforme apresentado na Fig. 8. Já na direção longitudinal, as forças são geradas devido ao atrito entre os pés e o piso.

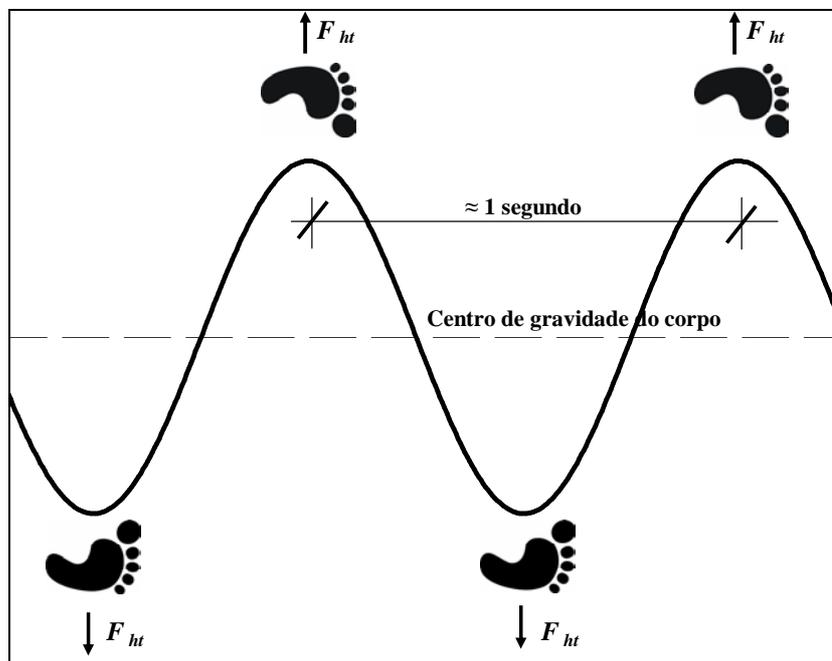


Fig. 8 - Mecanismo da vibração lateral induzida por pedestres.

Segundo Dallard *et al.* (2001a), a componente lateral da força é cerca de 10 vezes menor que a componente vertical, o que resulta em 4 a 5% do valor do peso do pedestre no primeiro harmônico.

De acordo com o SÉTRA (2006), a componente transversal (lateral) da força produzida por um pedestre, limitada ao primeiro harmônico, é dada por:

$$F_{ht}(t) = 0,05 \cdot G \cdot \text{sen} \left[2\pi \cdot \left(\frac{f}{2} \right) \cdot t \right] \quad (3)$$

Onde, f é a taxa de passo do pedestre.

Já a componente longitudinal, segundo a mesma fonte, é dada por:

$$F_{hl}(t) = 0,2 \cdot G \cdot \text{sen}(2\pi ft) \quad (4)$$

As Figs. 9 e 10 apresentam o gráfico da força em função do tempo da componente lateral (transversal) e longitudinal, respectivamente, de um pedestre caminhando com uma taxa de passo de 2,0 Hz.

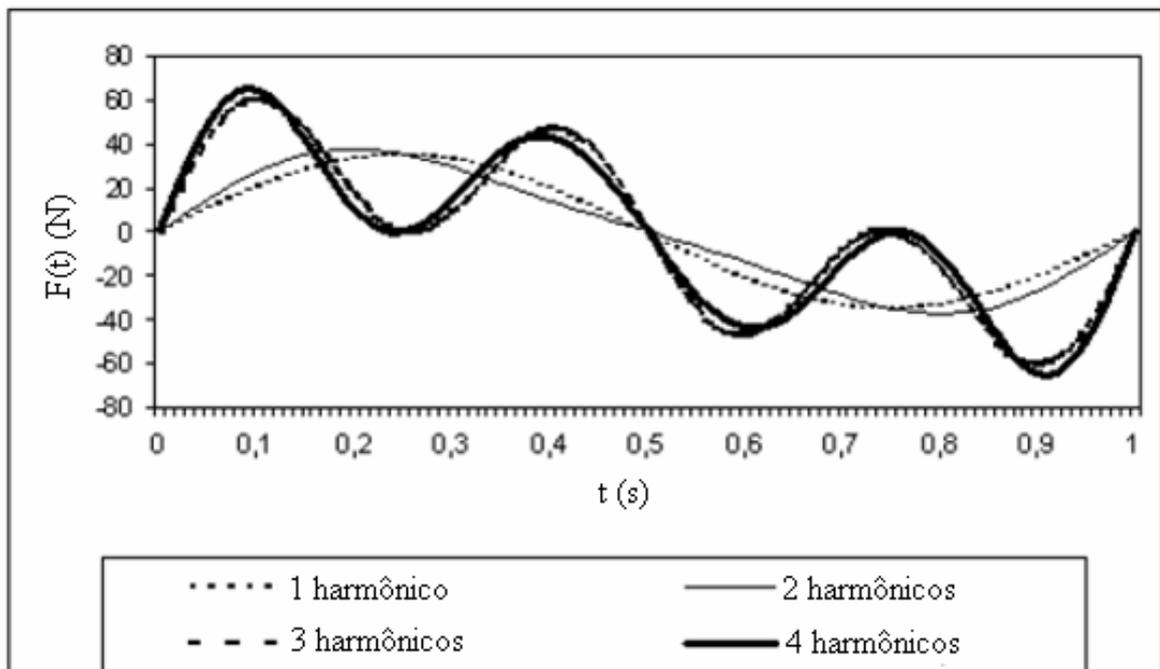


Fig. 9 – Componente transversal (lateral) da força para uma taxa de passo de 2,0 Hz (Fonte: modificado de SÉTRA, 2006).

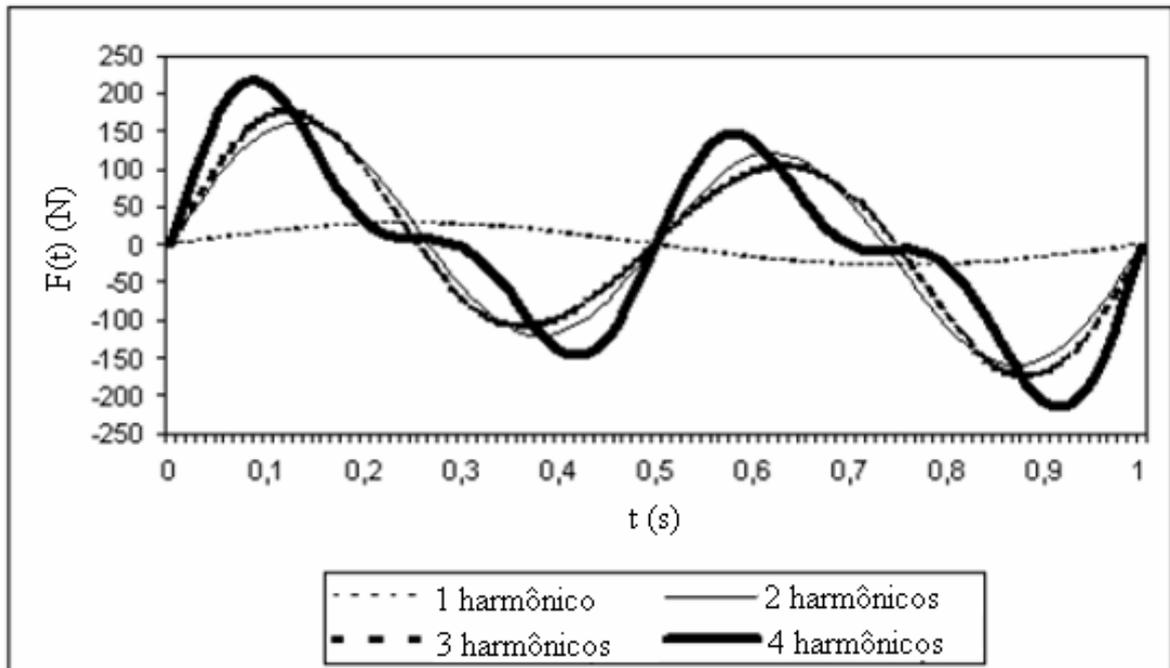


Fig. 10 - Componente longitudinal da força para uma taxa de passo de 2,0 Hz (Fonte: modificado de SÉTRA, 2006).

2.2.3 Carregamento de multidão e pequenos grupos de pedestres

A princípio é importante distinguir os conceitos de multidão e pequenos grupos de pedestres. A multidão está relacionada com uma elevada densidade de pedestres na passarela (Fig. 11). A falta de espaço imposta pela densificação impede que os pedestres desenvolvam sua taxa de passo natural e velocidade. Já o termo “pequenos grupos” se refere a algumas pessoas caminhando juntas (Fig. 12). Não há na literatura um consenso em relação à quantidade de indivíduos que diferencia um pequeno grupo de pedestres de uma multidão. De acordo com Caetano *et al.* (2005), a carga de grupos depende do tamanho da passarela e da frequência de excitação, podendo ser considerada para pequenos grupos a quantidade de 2 a 6 pedestres. Blanco *et al.* (2005) *apud* Fernandes (2007) cita que pequenos grupos não excedendo 15 a 25 pessoas podem ser assumidos para uma sincronização relativamente perfeita.



Fig. 11 - Multidão na T-Bridge, no Japão (Fonte: MIKI C., 2007 ou 2008).



Fig. 12 - Grupos de pedestres. (Fonte: <<http://media-2.web.britannica.com/media2118521-004-8AA00F26.jpg>> Acesso em: 19/09/2008, 13:10:00)

Grande parte das normas de dimensionamento de passarelas adota como critério de projeto um único pedestre caminhando com taxa de passo constante excitando a estrutura em ressonância.

A relação entre a resposta da estrutura e o número de pedestres que a excita não é proporcional. Dessa forma, não é possível obter a resposta devido à excitação de uma multidão simplesmente multiplicando a resposta individual pela quantidade de pedestres presentes.

É fundamental considerar na elaboração do projeto de passarelas a influência de mais de um pedestre, de forma a ampliar a resposta dinâmica resultante da excitação de uma pessoa, já que há diversos casos relatados de passarelas que apresentaram vibrações excessivas produzidas pela excitação de vários pedestres ao caminhar.

Para definir a carga produzida por uma multidão ao caminhar, muitos fatores devem ser considerados. Pimentel (1997) cita a variabilidade no peso do pedestre e na taxa de passo, as defasagens entre os pedestres e até mesmo entre os que caminham com a mesma taxa de passo, os efeitos da densidade, que podem impedir o trânsito livre, e a sincronização entre os pedestres devido à proximidade uns dos outros e à vibração da estrutura. O autor ainda ressalta a possível correlação que pode ocorrer entre esses fatores, resultando em um elevado grau de complexidade a definição desta carga.

2.2.4 Fator de majoração de carga

Procurando relacionar a carga produzida por um pedestre com aquela produzida por um grupo ao caminhar numa passarela, Matsumoto *et al.* (1978) apresentou uma expressão para a majoração de carga. Consiste num fator que multiplicado pela resposta de um indivíduo (amplitude de vibração) fornece o efeito de grupo. Para isso, os autores mostraram que o número de pessoas que chega à passarela segue uma distribuição de Poisson. A equação (5) apresenta o fator de majoração de carga proposto pelos autores:

$$C_{fm} = \sqrt{\lambda \cdot t} \quad (5)$$

Na equação (5), λ representa a taxa de fluxo (pedestres/s) em um determinado período e t é o tempo necessário para se atravessar uma passarela de comprimento L com velocidade V .

Como $\lambda \cdot t$ corresponde ao número de pedestres que se encontram na passarela num determinado período (n), a equação (5) pode ser apresentada como:

$$C_{fm} = \sqrt{n} \quad (6)$$

De acordo com Bachmann (2002), a equação (6) pode ser diretamente utilizada no caso de passarelas com frequência fundamental entre 1,80 e 2,20 Hz. Como taxas de passo inferiores a 1,80 Hz e superiores a 2,20 Hz são menos frequentes, nas passarelas com frequência fundamental entre 2,20 e 2,40 Hz e entre 1,60 e 1,80 Hz o fator C_{fm} pode ser reduzido.

A equação (6) considera os pedestres caminhando com a mesma taxa de passo e com ângulos de fase aleatórios. Estas restrições limitam a aplicação da equação, já que não atende aos cenários urbanos onde o fluxo de grupos de pedestres e multidões em passarelas são possíveis e, conseqüentemente, a sincronização entre eles.

Uma proposta apresentada por Grundmann *et al.* (1993) considera a probabilidade de sincronização na direção vertical de um fluxo de pedestres caminhando livremente, excitando a estrutura no primeiro harmônico (equação (7)).

$$C_{fm} = k_1 \cdot n \cdot P_s \quad (7)$$

Na equação (7), k_1 é um fator relacionado com a distribuição espacial da carga ao longo da passarela e P_s é a probabilidade de sincronização em função da aceleração. O valor de P_s é obtido graficamente a partir da aceleração. Os autores sugerem um valor típico de 0,225, que corresponde a uma aceleração de 0,7m/s² (valor definido pela norma britânica (BS 5400, 2006) como limite aceitável de vibração para uma frequência de 2,0 Hz).

Já Barker (2005) propôs o seguinte fator de majoração para grupos de mais de três pedestres:

$$C_{fm} = 1,188 \cdot \sqrt{n} \quad (8)$$

2.2.5 Efeito lock-in

O *lock-in*, também chamado de *feedback* por alguns autores, é um fenômeno no qual uma multidão de pedestres, caminhando com taxas de passo e ângulos de fase aleatórios, coordenam gradualmente a frequência de caminhada com a frequência de oscilação da passarela e entram em fase com o movimento da estrutura.

A transição de um comportamento aleatório para um comportamento sincronizado por parte da multidão acontece quando um determinado parâmetro é excedido. Esse parâmetro pode ser um número crítico de pedestres na passarela, uma aceleração crítica ou um deslocamento crítico.

Blanco *et al.* (2005) *apud* Fernandes (2007) explica que o *lock-in* ocorre quando a estrutura excede um valor limite de deslocamento e uma pessoa caminhando sincroniza seu movimento com a frequência e o ângulo de fase da oscilação da estrutura. Esse valor limite é o ponto chave no projeto de passarelas de modo a se evitar o surgimento de vibrações excessivas na direção lateral.

Segundo Bachmann (2002), esse valor limite depende da direção da vibração, da idade das pessoas, etc. Para a direção vertical, esse valor limite é de 10 a 20 mm, para uma frequência de vibração de cerca de 2,0 Hz. Para vibrações horizontais com uma frequência de cerca de 1,0 Hz, algumas pessoas passam a sincronizar seus movimentos com a estrutura quando a amplitude excede 2 a 3 mm. Segundo o autor, caso o valor limite seja excedido, as consequências são o aumento das amplitudes de vibração e mais pessoas passam a caminhar de forma sincronizada.

O fenômeno se inicia no momento em que os deslocamentos da estrutura ficam perceptíveis aos pedestres, que deixam de caminhar de forma aleatória e passam a andar em fase e com a mesma frequência de vibração da estrutura.

Segundo o SÉTRA (2006), o conceito de aceleração crítica parece ser mais apropriado do que um número crítico de pedestres. A aceleração corresponde ao que os pedestres sentem em termos de conforto, enquanto que um número crítico de pedestres depende do modo que eles estão posicionados e organizados na passarela.

O movimento sincronizado entre pedestres e estrutura pode ocorrer nas direções vertical e lateral. Não foram encontrados relatos de vibração excessiva na direção longitudinal.

De acordo com Caetano *et al.* (2005), o *feedback* (nomenclatura referente a *lock-in*) foi claramente observado nas vibrações laterais mas não nas vibrações verticais. Na realidade, a percepção humana é maior na vibração lateral do que na vibração vertical. Conseqüentemente, embora a sincronização para a direção vertical possa ocorrer, sua ocorrência necessita de amplitudes mais elevadas.

Baseado em trabalhos presentes na literatura, o fenômeno da sincronização na direção lateral procede na seguinte seqüência:

1. Os pedestres acessam a passarela caminhando de forma aleatória (taxa de passo e ângulos de fase aleatórios);

2. A princípio, enquanto a densidade de pedestres na passarela é inferior a uma densidade crítica, a atividade de caminhar da multidão gera forças horizontais aleatórias na estrutura. As amplitudes de deslocamento da estrutura produzidas nesta fase são, de uma maneira geral, mínimas e ainda não perturbam os pedestres (PIZZIMENTI & RICCIARDELLI, 2005);

3. À medida que o número de pedestres presentes na passarela aumenta e a densidade de pedestres supera uma densidade crítica, pode-se formar um núcleo de sincronização na multidão (PIZZIMENTI & RICCIARDELLI, 2005). Devido à falta de espaço, os pedestres nesse núcleo passam a caminhar com mesma taxa de passo e mesmo ângulo de fase. Inicia-se a sincronização por densificação (sincronização entre pedestres);

4. O movimento sincronizado entre pedestres aumenta o movimento oscilatório da estrutura;

5. Quando a aceleração atinge um valor crítico, amplitudes de deslocamento da estrutura começam a perturbar os pedestres, afetando seu equilíbrio (PIZZIMENTI & RICCIARDELLI, 2005);

6. Para manter o equilíbrio na passarela, os pedestres passam a caminhar com os pés mais afastados e com mesma frequência e fase dos deslocamentos laterais da passarela (HAUKSSON, 2005), dando origem ao *lock-in*, que é o movimento sincronizado entre pedestres e estrutura;

7. Com o *lock-in*, aumentam cada vez mais os deslocamentos laterais da passarela e, conseqüentemente, o desconforto por parte dos usuários;

8. O percentual de sincronização tende a aumentar na passarela, já que cada vez mais pedestres passam a caminhar de forma sincronizada com os deslocamentos da estrutura, com o intuito de reduzir o desconforto. As amplitudes de deslocamento da estrutura são cada vez maiores;

9. O desconforto aos pedestres atinge um nível tal que eles reduzem a velocidade de caminhada ou param. Com isso, a amplitude de vibração não se torna infinitamente grande (DALLARD *et al.*, 2001a).

Apesar de diversos estudos a respeito do *lock-in* (sincronização entre pedestres e estrutura), pouco tem sido feito no sentido de procurar investigar a sincronização por densificação. Estudos experimentais que abordem este tipo de sincronização são necessários para se entender melhor o processo de formação do núcleo de sincronização numa multidão e definir parâmetros como aceleração crítica e densidade crítica de pedestres na passarela.

2.3 Definições de conforto

De acordo com o SÉTRA (2006), a definição de conforto é altamente subjetiva, mas em particular pode-se afirmar que:

- De um indivíduo para outro, as mesmas vibrações não serão percebidas da mesma forma;
- Para um determinado indivíduo, vários limites podem ser definidos. O primeiro é um limiar de percepção à vibração. É seguido por um segundo limite que pode estar relacionado com vários graus de perturbação ou desconforto: tolerável durante um curto período, perturbador e inaceitável. O terceiro limite pode ser determinado em relação às conseqüências que as vibrações podem implicar: perda de equilíbrio, ou mesmo problemas de saúde;
- Além disso, dependendo se o indivíduo está em pé, sentado, movendo-se ou parado, um indivíduo em particular pode reagir diferentemente às vibrações;
- Sabe-se que há uma diferença entre as vibrações da estrutura e as vibrações realmente sentidas pelos pedestres. Por exemplo, a duração com que os pedestres estão expostos às vibrações afeta a sua sensibilidade.
- De uma maneira geral, o limite de conforto à vibração em passarelas é definido por meio de uma aceleração crítica, obtida a partir da frequência natural da estrutura. Assim, o critério de conforto a ser respeitado é representado por este valor que não deve ser excedido. Para as vibrações verticais com uma frequência em torno de 2,0 Hz (frequência média de passo), há aparentemente um consenso na literatura de definir a aceleração crítica no intervalo entre 0,5 e 0,8 m/s².

2.4 Densidade de pedestres

Uma das primeiras decisões a serem tomadas no projeto de passarelas é a definição da largura do tabuleiro, ou seja, a sua capacidade em relação à quantidade de pedestres (SCHLAICH, 2002).

A magnitude das componentes da força produzida pelos pedestres ao caminhar depende da densidade de pedestres da passarela. Isso porque a falta de espaço imposta por elevadas densidades interfere na taxa de passo, na velocidade e no comprimento dos passos dos pedestres. Densidades pequenas permitem que os pedestres caminhem livremente. Segundo Nakamura & Kawasaki (2006), quando os pedestres caminham aleatoriamente, as forças dinâmicas laterais tem diferentes defasagens e tendem a se cancelar. Elevadas densidades podem originar o fenômeno do *lock-in*, que resulta em forças de grande intensidade devido à aplicação sincronizada das forças individuais. Contudo, densidades muito elevadas podem estagnar o fluxo de pedestres.

De acordo com Willford (2002), nas observações na *Millennium Bridge*, o fluxo de pedestres e a taxa de passo tendiam a se tornar irregulares com a multidão quando a densidade era superior a 1,50 pedestres/m² e, quando superava 1,80 pedestres/m², o fluxo podia paralisar por completo. Já Dallard *et al.* (2001a) afirmam que uma densidade de 1,70 pedestres/m² causaria uma redução nas forças provocadas pelos pedestres. Isso porque a proximidade entre os pedestres devido à densificação na passarela dificultaria a atividade de caminhar.

Schlaich (2002) descreve algumas faixas de densidade na Tabela 3:

Tabela 3 – Faixas de densidades de pedestres

Densidade de pedestres	Descrição
0,3 pedestres/m ²	As pessoas podem andar livremente
De 0,4 a 0,6 pedestres/m ²	Aceitável
0,8 pedestres/m ²	Denso
1,0 pedestre/m ²	Muito denso
1,5 pedestres/m ²	Multidão

Já Heinemeyer & Feldmann (2008) apresentam classes de tráfego de pedestres de acordo com a densidade (Tabela 4).

Tabela 4 – Classes de tráfego

Classe de tráfego	Densidade	tráfego	Características
TC1	Grupo de 15 pessoas / S	Muito fraco	S: Área da superfície
TC2	0,2 pessoas/m ²	Fraco	Caminhada livre e confortável ; é possível ultrapassar
TC3	0,5 pessoas/m ²	Denso	Caminhada irrestrita; Ultrapassagem pode ser inibida intermitentemente
TC4	1,0 pessoas/m ²	Muito denso	Movimento é restrito; Situação desconfortável; caminhada obstruída; não é possível ultrapassar;
TC5	1,5 pessoas/m ²	Excepcionalmente denso	Multidão; Cada pedestre não pode mais escolher seu ritmo.

3.0 Diretrizes de dimensionamento de passarelas em relação ao carregamento induzido por vários pedestres

As diretrizes que orientam o dimensionamento de passarelas podem ser divididas em dois grupos, de acordo com o tipo de critério adotado (FERNANDES, 2007):

a) Aquelas que têm como critério a exclusão de faixas de frequências críticas na direção vertical. Pertencem a este grupo o CEB (1991), a AASHTO (1997) e a NBR 6118 (2003), por exemplo.

b) Aquelas que têm como critério a avaliação do desempenho dinâmico, através da estimativa do nível de vibração que a passarela pode apresentar e comparando-os com valores limites. Pertencem a este grupo a norma européia (Eurocode 5, 1997), a norma britânica (BS 5400, 2006), a ISO 10137 (1992) e a norma da província de Ontário (OHBDC, 1991), por exemplo.

As normas do segundo grupo, em geral, adotam como critério de dimensionamento um único pedestre caminhando com taxa de passo constante, de modo a excitar a estrutura em ressonância.

Apesar da ocorrência de diversos incidentes envolvendo multidões, o Eurocode 5 é a única norma que prevê o carregamento dinâmico induzido por vários pedestres.

Além da norma européia, foram abordados também alguns estudos recentes vistos como importantes com relação ao carregamento de multidão e, conseqüentemente, ao fenômeno da sincronização: o Guia Técnico do SÉTRA, publicado em 2006, que estabelece diretrizes de projetos de passarelas na França; os artigos de Barker & Mackenzie (2008) e Heinemeyer & Feldmann (2008), publicados no Footbridge 2008 (Congresso Internacional de Passarelas); e o artigo de Venuti *et al.* (2007) que propõe um modelo de carregamento induzido por pedestres considerando em separado os dois tipos de sincronização, isto é, por densificação e devido à interação pedestre-estrutura (*lock-in*).

3.1 Eurocodes:

Os Eurocodes são um conjunto de normas da comunidade europeia que visam unificar os critérios de dimensionamento de estruturas.

Dentre esses, o Eurocode 0 (Base de cálculo das estruturas), o Eurocode 1 (ações em estruturas) e o Eurocode 5 (Projetos de estruturas de madeira) apresentam diretrizes relacionadas com vibrações produzidas por vários pedestres, aplicáveis a passarelas.

3.1.1 Eurocode 0 – parte 2: Base de cálculo das estruturas

Em seu anexo A2, a norma traz que, dependendo da área analisada do tabuleiro da passarela (área total ou parcial), a presença de grupos de 8 a 15 pedestres caminhando normalmente deve ser considerada como situação rotineira em projetos.

Com relação ao conforto dos pedestres, o critério previsto na norma implica na adoção de uma aceleração máxima em qualquer parte da passarela, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Acelerações máximas

Situação	Aceleração máxima
Vibrações verticais	0,7 m/s ²
Vibrações horizontais (condições normais de uso)	0,2 m/s ²
Vibrações horizontais (condições de multidões excepcionais)	0,4 m/s ²

A norma ainda traz que uma verificação do critério de conforto deve ser realizada sempre que a frequência fundamental da passarela for inferior a 5,0 Hz para vibrações verticais e, a 2,5 Hz para vibrações horizontais e torsionais.

3.1.2 Eurocode 1 – parte 2: Ações em estruturas

Segundo a norma, forças exercidas por pedestres com frequência igual a alguma das frequências naturais da passarela podem resultar em ressonância e precisam ser consideradas na verificação do estado limite em relação às vibrações.

Os efeitos do tráfego de pedestres em passarelas dependem de vários fatores, como por exemplo, do número e do local provável das pessoas simultaneamente na passarela.

Um pedestre caminhando normalmente exerce as seguintes forças simultâneas periódicas:

- Na direção vertical, com uma faixa de frequência entre 1,0 e 3,0 Hz;
- Na direção lateral, com uma faixa de frequência entre 0,5 e 1,5 Hz;

Grupos de pessoas correndo podem atravessar a passarela com uma taxa de passo de 3,0 Hz.

A norma traz ainda que modelos dinâmicos de carga de pedestres e critérios de conforto devem ser definidos nos anexos nacionais de cada país da comunidade. Tal cláusula se deve certamente ao fato de que ainda não há um consenso por parte dos países integrantes da comunidade europeia com relação ao assunto.

3.1.3 Eurocode 5 – parte 2: projeto de estruturas de madeira

Apesar da norma se referir a estruturas de madeira, os procedimentos relacionados à vibração podem ser aplicados para qualquer outro tipo de material.

Em relação ao carregamento dinâmico, é a norma mais completa atualmente para dimensionamento de passarelas, pois além de prever as vibrações vertical e horizontal produzidas por uma pessoa caminhando, é a única que prevê as vibrações produzidas por um grupo de pedestres e para um fluxo contínuo de pessoas.

O critério de conforto a ser aplicado deve ser o previsto no Eurocode 0.

3.1.3.1 Vibrações verticais induzidas por pedestres

a) Para uma pessoa atravessando uma passarela de um só vão, a aceleração em m/s^2 é:

- Com $f_{vert} < 2,5$ Hz:

$$a_{vert,1} = \frac{200}{M \cdot \zeta} \quad (9)$$

- Com $2,5 \text{ Hz} < f_{vert} < 5,0$ Hz:

$$a_{vert,1} = \frac{100}{M \cdot \zeta} \quad (10)$$

Onde:

M é a massa total da passarela;

ζ é o coeficiente de amortecimento;

f_{vert} é a frequência fundamental vertical da passarela.

- b) Para várias pessoas atravessando a passarela:

$$a_{vert,n} = 0,23 \cdot a_{vert,1} \cdot n \cdot K_{vert} \quad (11)$$

Onde:

n é o número de pedestres;

K_{vert} é um coeficiente de minoração que leva em conta o risco de ressonância de uma passarela, de acordo com a frequência. É extraído do gráfico da Fig. 13;

$a_{vert,1}$ é a aceleração vertical para uma pessoa atravessando a passarela.

O número de pedestres n é definido da seguinte forma:

- $n = 13$, para um grupo de pedestres separados;
- $n = 0,6 \cdot S$, para um fluxo contínuo de pedestres.

Onde: S é a área do tabuleiro da passarela em m^2 .

3.1.3.2 Vibrações horizontais induzidas por pedestres

a) Para uma pessoa atravessando uma passarela de um só vão, com uma frequência fundamental entre 0,5 Hz e 2,5 Hz na direção lateral, a aceleração em m/s^2 é:

$$a_{hor,1} = \frac{50}{M \cdot \zeta} \quad (12)$$

b) Para várias pessoas atravessando a passarela:

$$a_{hor,n} = 0,18 \cdot a_{hor,1} \cdot n \cdot K_{hor} \quad (13)$$

Onde K_{hor} é um coeficiente de minoração que leva em conta o risco de ressonância de uma passarela, de acordo com a frequência. É extraído do gráfico da Fig. 14;

O número de pedestres n é definido da seguinte forma:

- $n = 13$, para um grupo de pedestres separados;
- $n = 0,6 \cdot S$, para um fluxo contínuo de pedestres.

Onde: S é a área do tabuleiro da passarela em m^2 .

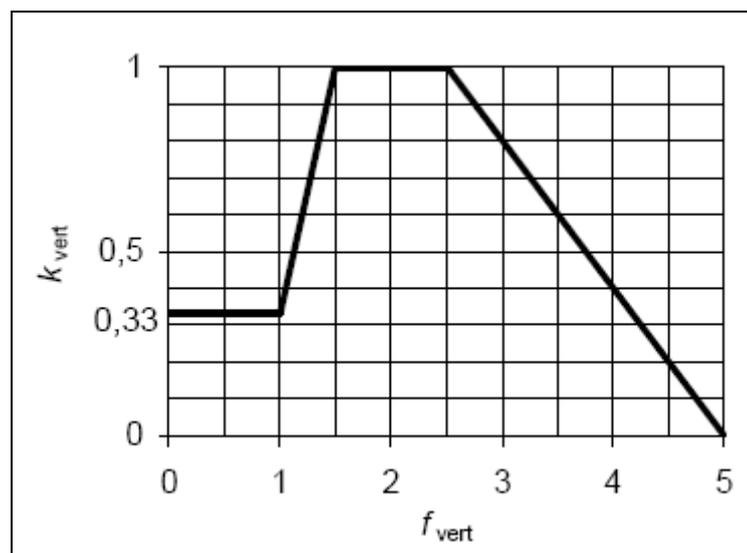


Fig. 13 - Relação entre a frequência fundamental na vertical e o coeficiente K_{vert}

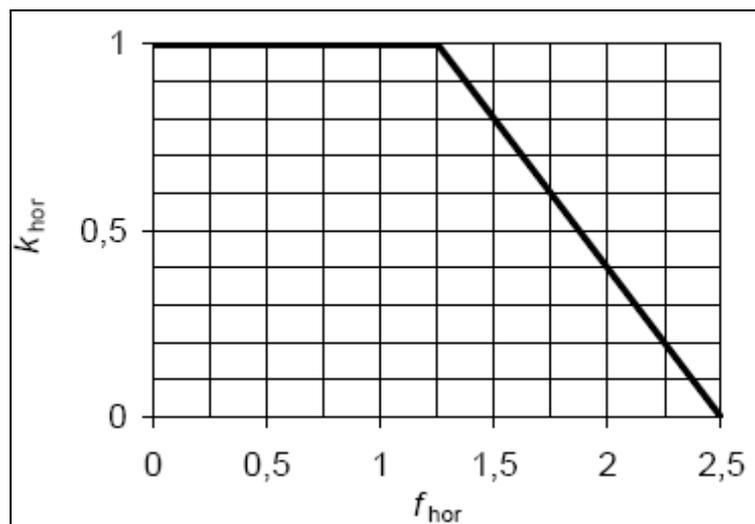


Fig. 14 - Relação entre a frequência fundamental na horizontal e o coeficiente K_{hor}

3.2 Guia Técnico do SÉTRA

Segundo este Guia Técnico, inicialmente o proprietário precisa definir a classe da passarela em função do nível de tráfego ao qual a passarela será imposta e determinar o nível de conforto requerido. Em seguida, a classe da passarela conduz à seleção de casos de carregamento dinâmico, definidos para representar os vários efeitos possíveis do tráfego de pedestres.

3.2.1 Determinação da classe da passarela

A classe da passarela, definida pelo proprietário, irá determinar o nível de tráfego que ela pode suportar. São apresentadas quatro classes:

- Classe IV: raramente a passarela é utilizada, construída para ligar áreas escassamente povoadas;
- Classe III: Passarelas de uso padrão que ocasionalmente podem ser cruzadas por grandes grupos de pessoas, mas que jamais será carregada em toda a sua área de capacidade;
- Classe II: Passarelas urbanas que unem áreas povoadas sujeitas a tráfego pesado e que pode eventualmente ser carregada em toda sua área de capacidade;

- Classe I: Passarelas urbanas que unem áreas de elevada densidade de pedestres ou que freqüentemente é usada por densas multidões (turistas, demonstrações, etc), sujeitas a tráfego muito pesado.

As passarelas de classe IV não necessitam de nenhum cálculo para checar seu comportamento dinâmico.

3.2.2 Escolha do nível de conforto pelo proprietário

O proprietário também determina o nível de conforto a ser conferido à passarela. São definidos três níveis de conforto:

- Conforto máximo: as acelerações sofridas pela estrutura são praticamente imperceptíveis aos usuários;
- Conforto médio: as acelerações sofridas pela estrutura são meramente perceptíveis aos usuários;
- Conforto mínimo: sob configurações de carregamento que raramente ocorrem, as acelerações sofridas pela estrutura são perceptíveis aos usuários, mas não se tornam intoleráveis.

Devido à natureza subjetiva do conceito de conforto, níveis de conforto são associados com faixas de aceleração. As Tabelas 6 e 7 apresentam as quatro faixas, para as acelerações verticais e horizontais. A primeira faixa corresponde ao nível de conforto máximo. A segunda e a terceira, correspondem aos níveis médio e mínimo, respectivamente. Já o quarto nível, corresponde a um nível de aceleração incômodo, que não é aceitável.

Tabela 6 - Faixas de aceleração (em m/s²) para vibrações verticais

Faixas de aceleração	0	0,5	1	2,5
Faixa 1	máximo			
Faixa 2		médio		
Faixa 3			mínimo	
Faixa 4				

Tabela 7 - Faixas de aceleração (em m/s²) para vibrações horizontais

Faixas de aceleração	0	0,1	0,15	0,3	0,8
Faixa 1	máximo				
Faixa 2			médio		
Faixa 3				mínimo	
Faixa 4					

Em todos os casos, na direção horizontal, a aceleração está limitada a 0,10 m/s² de modo a evitar o efeito *lock-in*.

3.2.3 Casos de carregamento dinâmico

Os casos de carregamento descritos a seguir foram definidos para representar de forma simplificada e viável os efeitos de um número maior ou menor de pedestres sobre a passarela.

3.2.3.1 Caso 1: multidões esparsas e densas

Este caso só é considerado para a classe III (multidões esparsas) e a classe II (densas) de passarelas. A densidade de pedestres a ser considerada é de acordo com a classe da passarela, conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8 - Densidade de pedestres considerada

Classe	Densidade da multidão (d)
III	0,5 pedestres/m ²
II	0,8 pedestres/m ²

Esta multidão é considerada ser uniformemente distribuída ao longo de toda a superfície S da passarela.

O número de pedestres envolvidos é: $n = S \cdot d$, onde d é a densidade de pedestres.

O número de pedestres equivalentes, ou seja, o número de pedestres com mesma frequência e em fase, que irão produzir os mesmos efeitos que pedestres aleatórios é: $10,8 \cdot \sqrt{\xi \cdot n}$, onde ξ é o coeficiente de amortecimento crítico. A idéia de se representar uma

multidão por um número de pedestres equivalentes se deve ao fato de que os efeitos de uma multidão caminhando em uma passarela é um fenômeno bastante complexo, em termos de força instantânea aplicada. A utilização deste número equivalente permite a determinação analítica de tais efeitos.

O carregamento a ser considerado é modificado pelo fator de minoração ψ , que faz uma compensação devido ao fato que o risco de ressonância numa passarela torna-se menos provável fora das faixas de frequência entre 1,70 Hz e 2,10 Hz na direção vertical, e entre 0,5 Hz e 1,0 Hz na direção horizontal. Este fator cai a zero quando a frequência na vertical for menor que 1,0 Hz e, na horizontal for menor que 0,3 Hz. Da mesma forma, acima de 2,6 Hz para a direção vertical e 1,3 Hz para a direção horizontal, o fator também se anula. Neste caso, porém, o segundo harmônico deve ser verificado. O fator ψ é obtido na Fig. 15.

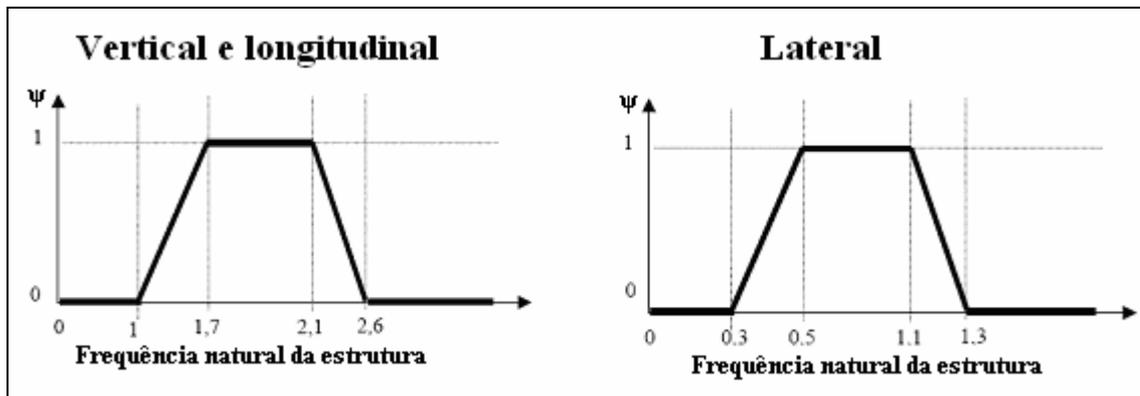


Fig. 15 - Fator ψ para a atividade de caminhar

A Tabela 9 resume o carregamento por unidade de área a ser aplicado para cada direção, para qualquer multidão aleatória.

Tabela 9 - Carregamento para multidões esparsas e densas

Direção	Carregamento por m ²
Vertical (v)	$d \cdot (280N) \cdot \cos(2\pi f_i t) \cdot 10,8 \cdot \sqrt{\xi/n} \cdot \psi$
Longitudinal (l)	$d \cdot (140N) \cdot \cos(2\pi f_i t) \cdot 10,8 \cdot \sqrt{\xi/n} \cdot \psi$
Transversal (t)	$d \cdot (35N) \cdot \cos(2\pi f_i t) \cdot 10,8 \cdot \sqrt{\xi/n} \cdot \psi$

Nas equações de carregamento apresentadas na Tabela 9, o número equivalente de pedestres foi dividido pela área carregada S. Em seguida, esta área foi substituída por n/d

resultando em $d \cdot 10,8 \cdot \sqrt{\xi/n}$ para, finalmente, ser multiplicado pela ação de um único pedestre ($F_0 \cdot \cos(2\pi f_v t)$) e pelo fator de minoração (ψ).

3.2.3.2 Caso 2: Multidão muito densa

Este caso é aplicado em passarelas de classe I. A densidade de pedestres considerada é de 1,0 pedestre/m². Esta multidão é considerada ser uniformemente distribuída sobre a área S, como previamente definido.

É considerado que os pedestres caminham com mesma frequência e com fases aleatórias. Neste caso, o número total de pedestres equivalentes em fase para o número de pedestres com fases aleatórias é $1,85 \cdot \sqrt{n}$.

O segundo fator de minoração ψ , devido as incertezas da coincidência entre a frequência criada pela multidão e a frequência natural da estrutura, também é obtido pela Fig. 15.

A Tabela 10 resume o carregamento a ser aplicado por unidade de área para cada direção.

Tabela 10 - Carregamento para multidões muito densas

Direção	Carregamento por m²
Vertical (v)	$1,0 \cdot (280N) \cdot \cos(2\pi f_v t) \cdot 1,85 \cdot \sqrt{1/n} \cdot \psi$
Longitudinal (l)	$1,0 \cdot (140N) \cdot \cos(2\pi f_v t) \cdot 1,85 \cdot \sqrt{1/n} \cdot \psi$
Transversal (t)	$1,0 \cdot (35N) \cdot \cos(2\pi f_v t) \cdot 1,85 \cdot \sqrt{1/n} \cdot \psi$

3.3 Proposta para o Anexo Nacional do Reino Unido (UK-NA) para o Eurocode (Barker & Mackenzie, 2008)

O UK-NA considera as vibrações de serviços como sendo satisfatórias quando as frequências naturais de vibração excederem 8,0 Hz para passarelas sem carregamento no sentido vertical e 1,50 Hz para passarelas carregadas na direção lateral. Abaixo desses níveis, o projetista precisa avaliar a provável resposta dinâmica da estrutura. O critério adotado

analisa apenas os efeitos das condições normais de funcionamento. Não considera, por exemplo, maratonas, manifestações ou o carregamento sincronizado do vandalismo.

Duas análises distintas são requeridas:

- A determinação da aceleração vertical máxima no tabuleiro da passarela e sua comparação com o critério de conforto;
- Uma análise para determinar a probabilidade de grandes respostas laterais sincronizarem;

3.3.1 Ações dinâmicas a serem consideradas

As passarelas são classificadas em classes para se determinar as ações a serem aplicadas (Tabela 11). O NA considera os efeitos de grupos ao andar e corrida lenta, como também as densidades de multidões específicas.

Tabela 11 - Classificação da passarela

Classe da passarela	Uso da passarela	Tamanho do grupo		Densidade da multidão caminhando (pedestres/m ²)
		Andando	Corrida lenta	
A	Localidades rurais raramente utilizadas e em áreas pouco povoadas	$n = 2$	$n = 0$	0
B	Localidades sub-urbanas	$n = 4$	$n = 1$	0,4
C	Percursos urbanos sujeitos a variações significativas no uso diário	$n = 8$	$n = 2$	0,8
D	Principal acesso a grandes instalações públicas como estádios desportivos ou grandes instalações de transporte público	$n = 16$	$n = 4$	1,5

3.3.2 Ações dinâmicas que representam um único pedestre e grupos de pedestres

As ações dinâmicas representam um grupo com n pedestres onde:

- Os pedestres no grupo fazem um único cruzamento na passarela juntos;

- Cada pedestre no grupo caminha com uma frequência de passo igual à frequência do modo investigado;
- Todos os outros pedestres caminham com fase e taxa de passo aleatoriamente escolhidos do modelo de população de pedestres;

A máxima aceleração vertical de projeto resultante de um único pedestre ou grupos de pedestres deve ser calculada assumindo que estes são representados pela aplicação de uma força vibratória vertical F_v , movendo-se pelo vão da passarela a uma velocidade constante V , como segue:

$$F_v = F_0 \cdot k(f_{vert}) \cdot \sqrt{1 + \gamma \cdot (n - 1)} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f_{vert} \cdot t) \quad (14)$$

Onde:

n é o número de pedestres no grupo;

F_0 é a amplitude de referência da força oscilatória aplicada (N) determinada na Tabela 12 (representa a máxima amplitude da força aplicada pelo pedestre com a mais provável frequência de passo);

f_{vert} é a frequência natural vertical (Hz) do modo em consideração;

$k(f_{vert})$ é fator obtido do gráfico da Fig.16, que combina os efeitos de uma população de pedestres mais realistas, respostas harmônicas e ponderação relacionada à sensibilidade do pedestre com relação à resposta.

γ é um fator de redução que permite a combinação dessincronizada de ações em um grupo de pedestres em função do amortecimento e do vão efetivo. É obtido a partir do gráfico da Fig. 17.

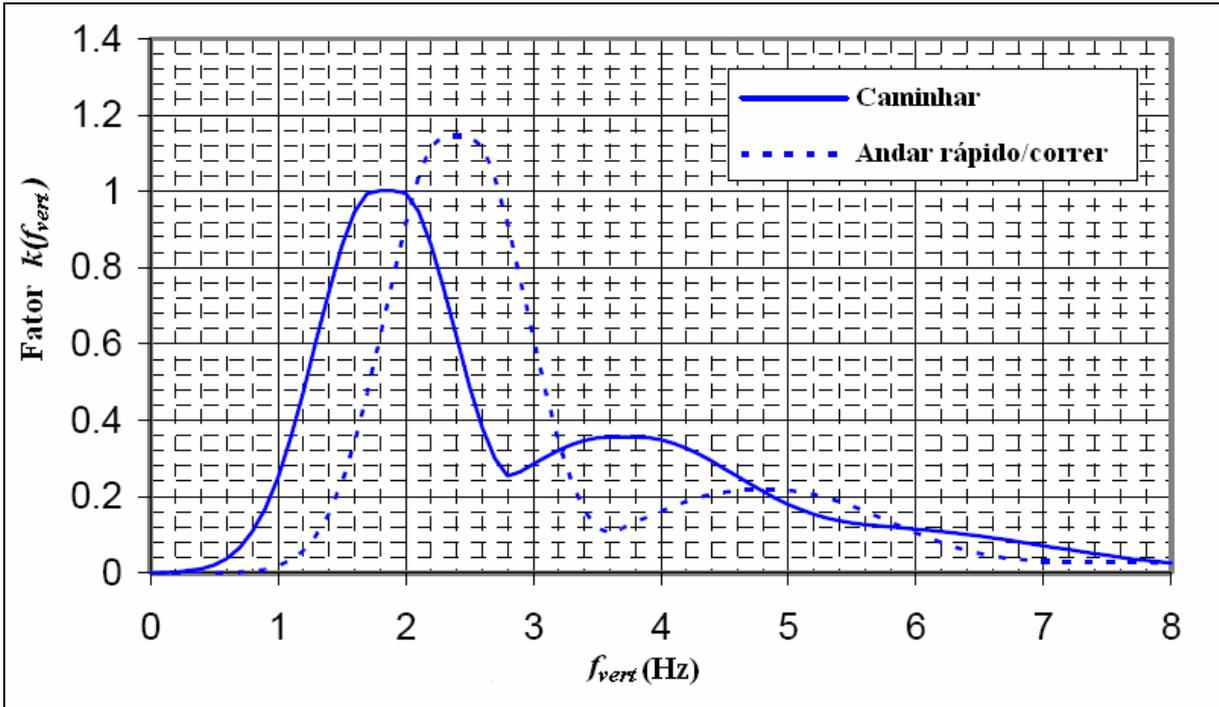


Fig. 16 – Gráfico do fator $k(f_{vert})$ x frequência

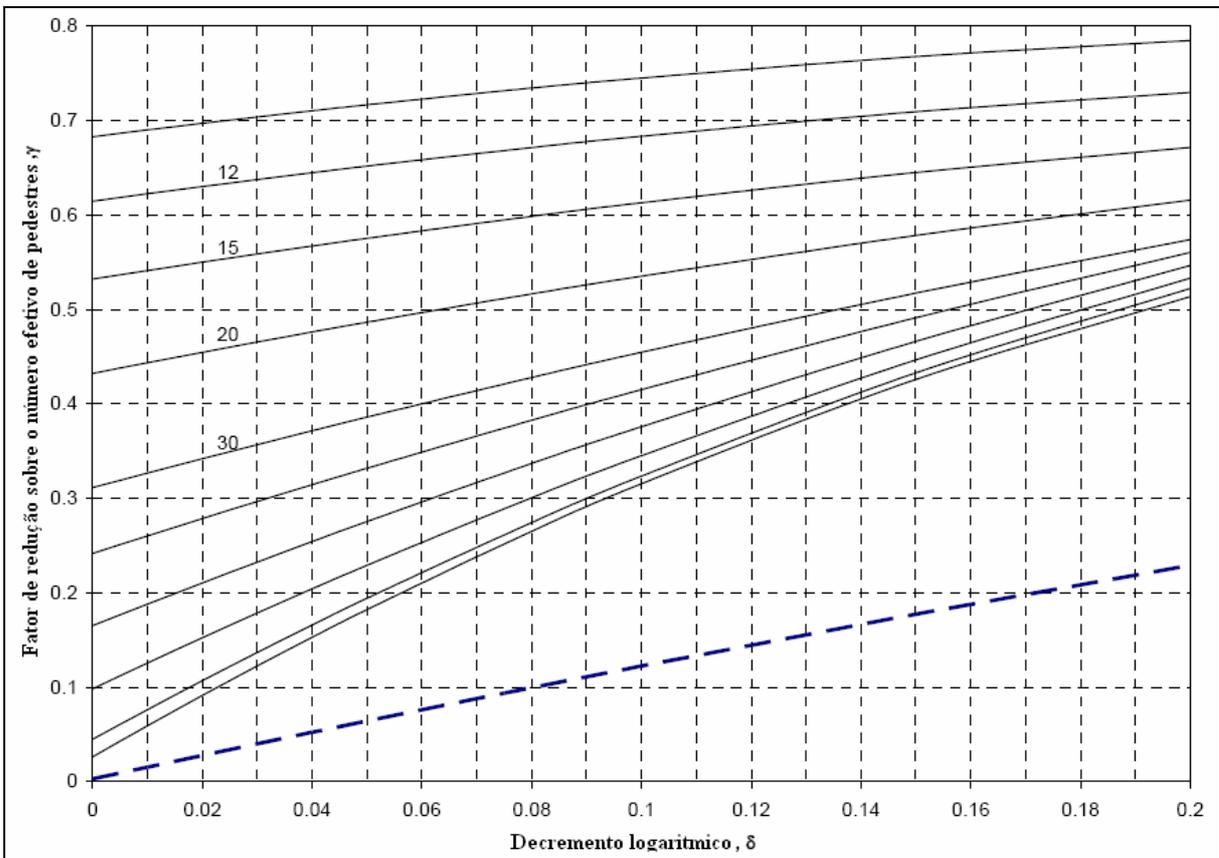


Fig. 17 – Gráfico fator de redução γ x decremento logarítmico

Tabela 12 - Parâmetros usados no cálculo de resposta de pedestres

Parâmetro de carregamento	Caminhar	Corrida lenta
Amplitude de referência, F_0 (N)	280	910
Velocidade do pedestre (m/s)	1,7	3,0

Cabe observar que as ações dos pedestres descritos no NA correspondem ao peso médio de um pedestre de 700 N.

3.3.2.1 Método simplificado para obter a máxima aceleração vertical

O método só é válido para um único vão, ou dois ou três vãos contínuos, superestrutura simétrica, seção transversal constante e suportes idealizados como apoios simples.

A máxima aceleração vertical é dada por:

$$a_{vert,1} = \left(\frac{F'}{M_i} \cdot \gamma_{i\max}^2 \right) \cdot K \cdot \Psi \quad (15)$$

Onde:

F' é a amplitude do carregamento dinâmico dado por: $F' = F_0 \cdot k(f_{vert}) \cdot \sqrt{1 + \gamma \cdot (n-1)}$;

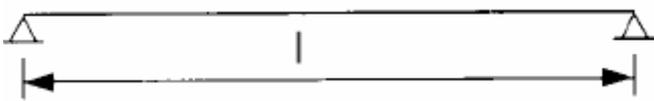
M_i é a massa generalizada do modo investigado i (kg);

$\gamma_{i\max}$ é a componente vertical máxima do modo i ;

K é o fator que depende da configuração dos vãos da passarela (único vão, dois vãos contínuos ou três vãos contínuos), de acordo com a Tabela 13.

Ψ é o fator dinâmico de resposta que depende do comprimento do vão principal da passarela e do decremento logarítmico. É obtido a partir do gráfico da Fig.18. Os autores não informam no artigo quando utilizar o grupo de curvas tracejadas e quando utilizar o grupo de curvas contínuas.

Tabela 13 – Fator da configuração dos vãos da passarela, K

Configuração da passarela	Relação	
	l_1/l	K
	-	1,0
	-	0,7
	1,0	0,6
	0,8	0,8
	0,6 ou menos	0,9

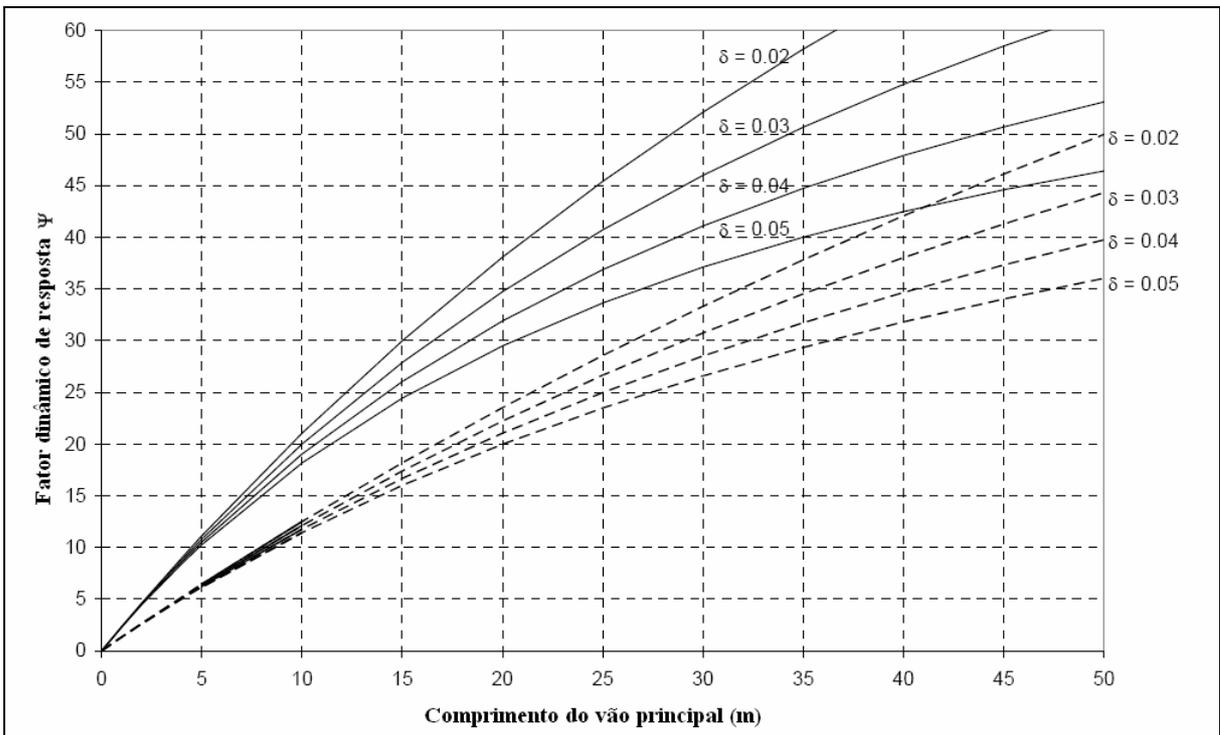


Fig. 18 – Fator dinâmico de resposta

3.3.3 Modelando cargas dinâmicas de pedestres em condições de multidão

Em condições de grande multidão, a velocidade média dos pedestres tende a diminuir. Para refletir esse efeito, nos cálculos das respostas verticais a densidade máxima de multidão é de 1,0 pessoa/m².

A aceleração vertical máxima de projeto resultante de pedestres em condições de multidão deve ser calculada supondo que estes são representados por uma carga distribuída vibratória w (N/m²) aplicada no tabuleiro da passarela por um tempo suficiente para que condições estacionárias sejam alcançadas como segue:

$$w = 1,8 \cdot \left(\frac{F_0}{A} \right) \cdot k(f_{vert}) \cdot \sqrt{\gamma \cdot n / \lambda} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f_{vert} \cdot t) \quad (16)$$

Onde:

n é o número total de pedestres.

$$N = d \cdot S$$

d é a densidade requerida, tendo um valor máximo de 1,0 pessoa/m² (isso porque densidades superiores a este valor tornam o movimento lento e produzem menos respostas verticais);

S é a área da superfície de caminhada (m²);

γ é um fator obtido do gráfico da Fig. 17 que permite uma combinação de ações dessincronizadas no meio de uma multidão;

λ é um fator que reduz o número efetivo de pedestres proporcionalmente à área delimitada no modo de interesse. É calculado de acordo com as equações da Fig. 19, onde S_{eff} é o comprimento do vão efetivo em metros e γ_{max} é a componente vertical máxima.

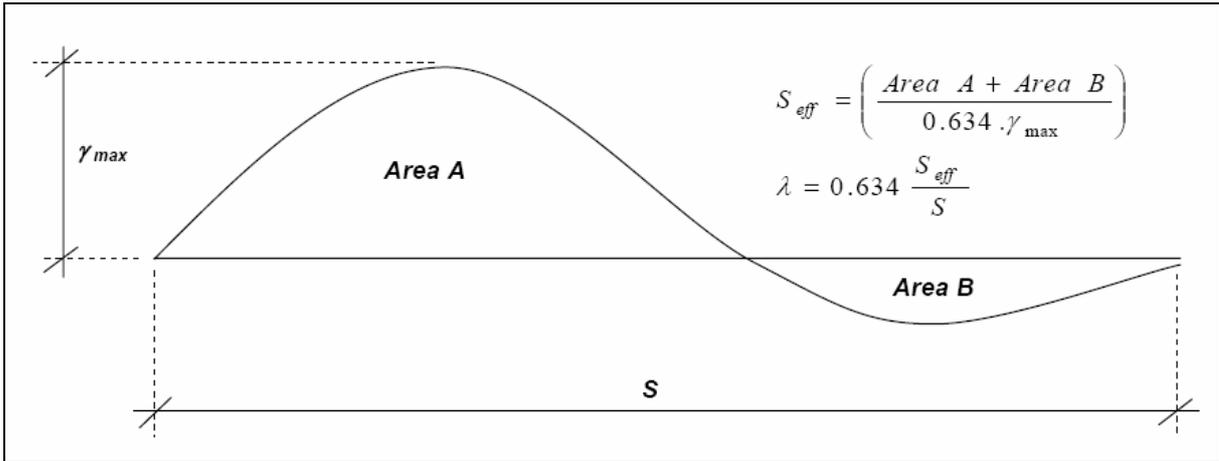


Fig. 19 – Cálculo do fator de redução λ

3.3.3.1 Método para obter a aceleração vertical máxima em condições de multidão

Este método é aplicado para vãos onde a resposta é dominada por um único modo.

A máxima aceleração vertical é dada por:

$$a_{vert,n} = \left(\frac{\int_0^s w' \cdot b \cdot |\gamma_i(x)| \cdot dx}{M_i} \cdot \gamma_{i\max} \right) \cdot \frac{1}{2\xi} \quad (17)$$

Onde:

w' é a amplitude da carga vertical dinâmica (N/m^2), dada por

$$w' = 1,8 \cdot \left(\frac{F_0}{A} \right) \cdot k(f_v) \cdot \sqrt{\gamma \cdot N / \lambda}$$

b é a largura da superfície de caminhada da passarela (m);

M_i é a massa generalizada do modo de interesse i (kg);

$\gamma_i(x)$ é a componente vertical do modo i na posição x ;

$\gamma_{i\max}$ é a componente vertical máxima no modo i ;

ξ é o amortecimento da estrutura: $\xi = \delta / 2\pi$, onde δ é o decremento logarítmico.

3.3.4 Recomendações dos limites de serviço para projetos

A aceleração vertical máxima calculada anteriormente deve ser inferior à aceleração limite de projeto, dada por:

$$a_{limite} = 1,0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \text{ em m/s}^2 \quad (18)$$
$$\text{e } 0,5 \text{ m/s}^2 \leq a_{limite} \leq 2,0 \text{ m/s}^2$$

Onde:

k_1 modifica a sensibilidade dos pedestres de acordo com o uso, de acordo com a Tabela 14;

k_2 é um fator definido de acordo com a redundância da rota, de acordo com a Tabela 15;

k_3 modifica a sensibilidade dos pedestres de acordo com a altura da estrutura, de acordo com a Tabela 16;

k_4 é um fator de exposição definido pelo projetista e pela autoridade competente que reflete outras condições que possam afetar a percepção dos usuários às vibrações. Seu valor varia entre 0,8 e 1,2.

Tabela 14 – Fator k_1

Uso da passarela	k_1
Rota principal para hospitais ou outras rotas extremamente sensíveis	0,6
Rota principal para estádios de futebol ou outras rotas extremamente utilizadas	0,8
Grandes centros urbanos	1,0
Travessias suburbanas	1,3
Ambientes rurais	1,6

Tabela 15 – Fator k_2

Redundância da rota	k_2
Meio de acesso exclusivo	0,7
Rota principal	1,0
Rota alternativa prontamente disponível	1,3

Tabela 16 -Fator k_3

Altura da passarela	k_3
Maior que 8,0 m	0,7
De 4,0 m a 8,0 m	1,0
Menor que 4,0 m	1,1

3.3.5 Estabilidade lateral devido ao carregamento de multidão

O método proposto pelos autores para verificar a estabilidade da estrutura com relação ao *lock-in* consiste na determinação de um parâmetro de amortecimento de massa dos pedestres (D), dado por:

$$D = \frac{m_{passarela} \cdot \xi}{m_{pedestre}} \quad (19)$$

Onde:

$m_{passarela}$ é a massa da passarela por unidade de comprimento;

$m_{pedestre}$ é a massa de pedestres por unidade de comprimento;

ξ é o amortecimento da estrutura: $\xi = \delta/2\pi$, onde δ é o decremento logarítmico.

Para todos os modos de vibração com uma significativa componente lateral e uma frequência inferior a 1,5 Hz, avalia-se a estabilidade de acordo com a curva da Fig. 20.

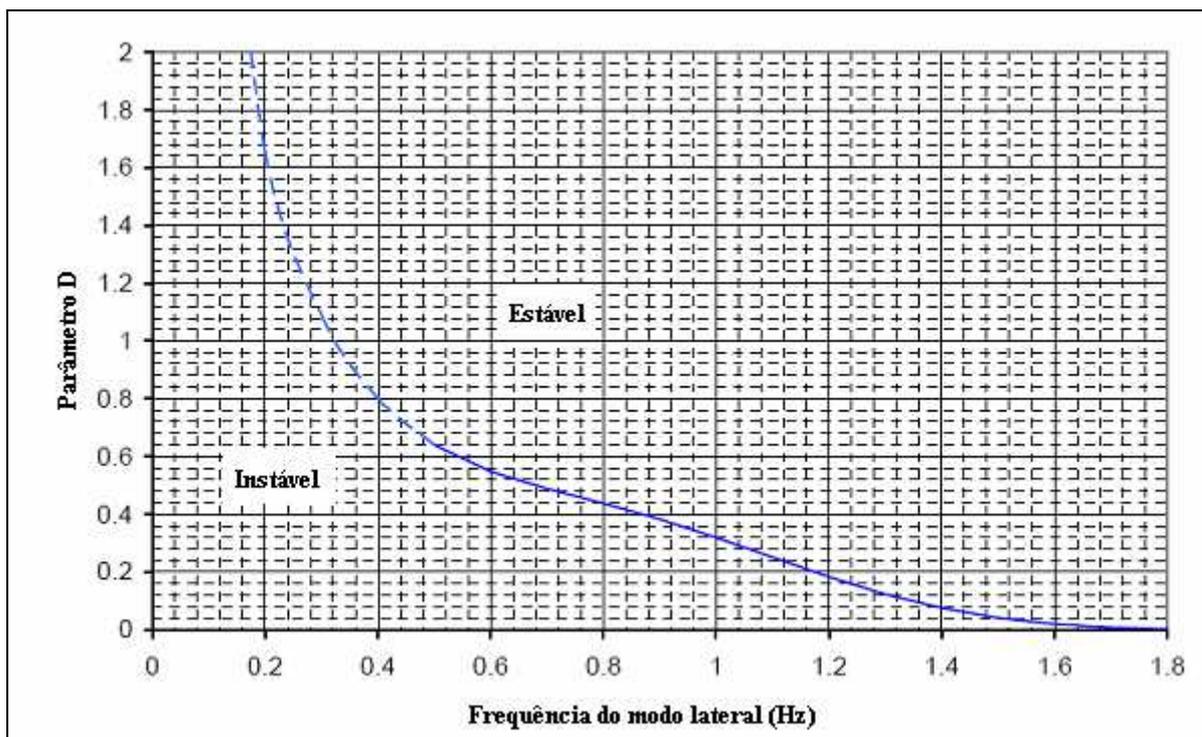


Fig. 20 - Limite de estabilidade ao *lock-in* lateral

Se o parâmetro D para a densidade da multidão obtido na Fig. 20 estiver abaixo do limite de estabilidade, respostas laterais podem ser esperadas. Acima do limite de estabilidade, há indicação que a estrutura é estável para a situação analisada.

3.4 Guia europeu de projeto de passarelas proposto por Heinemeyer & Feldmann (2008)

Segundo os autores, inicialmente é preciso definir a classe de tráfego da passarela, de acordo com a densidade de pedestres (Tabela 4).

3.4.1 Níveis de conforto

Heinemeyer & Feldmann (2008) apresentam quatro níveis de conforto de acordo com a aceleração (Tabela 17). Segundo os autores, a avaliação das vibrações vertical e horizontal em passarelas depende de diversos fatores como: número de pessoas caminhando

na passarela, frequência de uso, posição do corpo humano (sentado, em pé, caminhando), características da excitação (frequência de vibração), tempo de exposição, entre outros.

Tabela 17 – Níveis de conforto

Nível de conforto	Grau de conforto	Nível da aceleração	
		Vertical	Horizontal
CL 1	Máximo	< 0,5 m/s ²	< 0,1 m/s ²
CL 2	Médio	0,5 – 1,0 m/s ²	0,1 – 0,3 m/s ²
CL 3	Mínimo	1,0 – 2,5 m/s ²	0,3 – 0,8 m/s ²
CL 4	Desconforto inaceitável	> 2,5 m/s ²	0,8 m/s ²

A definição dos quatro níveis de conforto para vibrações horizontais considera o efeito *lock-in*. Os autores citam os testes realizados por Charles & Bui (2005) na *Solferino*, que registraram amplitudes de 0,10 a 0,15 m/s² quando se iniciou o *lock-in*.

3.4.2 Modelos de carregamento

O carregamento harmônico oscilatório é definido por:

$$p(t) = G \cdot \cos(2\pi ft) \cdot n' \cdot \psi \quad (20)$$

Onde:

$G \cdot \cos(2\pi ft)$ é o carregamento harmônico causado por um pedestre;

G é o peso de um pedestre;

f é a frequência natural em questão;

n' é o número equivalente de pedestres sobre a superfície carregada S , ou seja,

$$\frac{10,8 \cdot \sqrt{\xi \cdot n}}{S}, \text{ onde } \xi \text{ é o coeficiente de amortecimento crítico.}$$

ψ é o coeficiente de redução que leva em conta a probabilidade da frequência de passo dos pedestres se aproximar da frequência natural em questão. Esse coeficiente é diferente para cada um dos modelos de carregamento apresentados a seguir.

O valor do carregamento depende da densidade da multidão e do comportamento da caminhada. Quando a densidade é inferior a 1,0 pedestre/m², as pessoas não estão interagindo. Se a densidade aumenta, a caminhada livre já não é mais possível e a interação das pessoas caminhando deve ser considerada. Dois grupos de modelos de carregamento são apresentados.

3.4.2.1 Modelos de carregamento das classes TC1 a TC3 (densidade < 1,0 pedestres/m²):

Um carregamento harmônico uniformemente distribuído $p(t)$ representa o fluxo de pedestres equivalentes para os cálculos adicionais. O modelo de carga de grupos de pedestres leva em conta a livre movimentação dos pedestres. Assim, a sincronização entre os membros de um grupo equivale a um fluxo de baixa densidade.

A força estática de um pedestre G , o número equivalente de pedestres n' e o coeficiente de redução ψ são apresentados na Fig. 21.

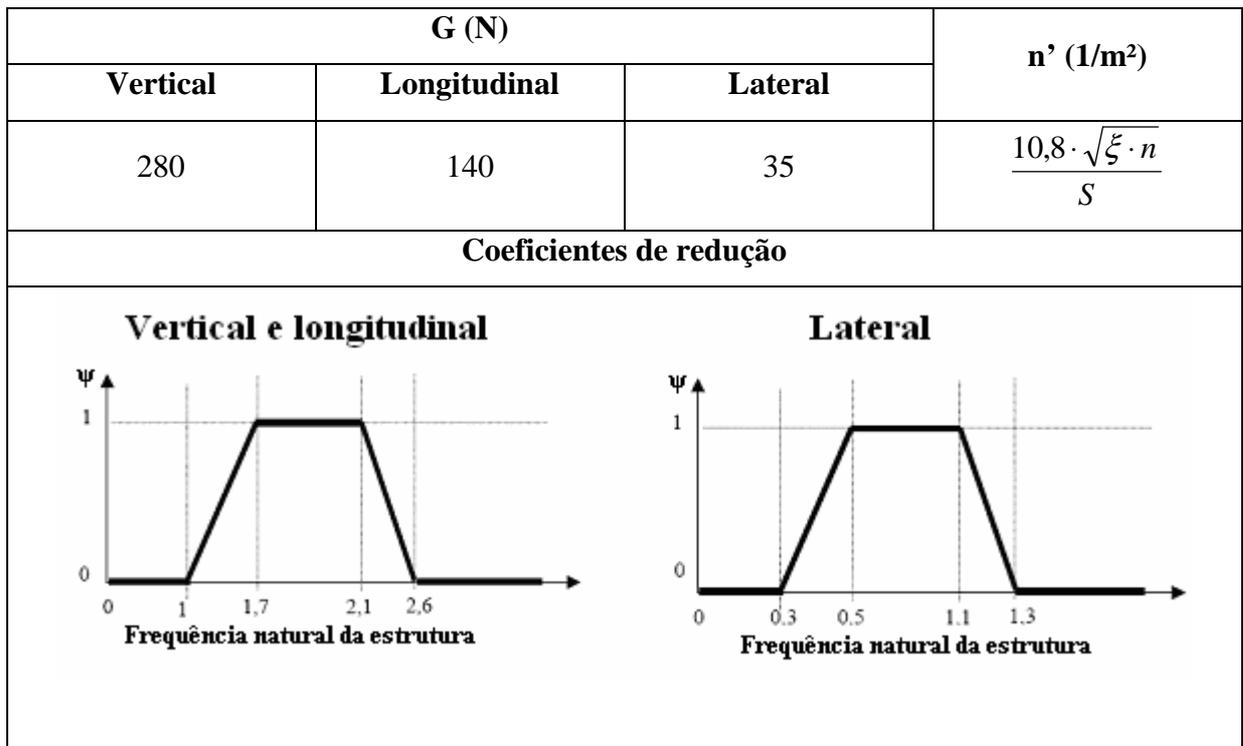


Fig. 21 - Parâmetros para os modelos de carregamento das classes TC1 a TC3

Onde:

ξ é o amortecimento da estrutura;

n é o número de pedestres na superfície carregada ($n = S \cdot d$).

3.4.2.2 Modelos de carregamento para as classes TC 4 e TC 5 (densidade > 1,0 pedestres/m²):

No caso de um congestionamento pesado, a caminhada é obstruída: o avançar é lento e a sincronização aumenta. Além dos valores limites do fluxo denso (até 1,2 , 1,5 ou até mesmo 2,0 pedestres/m²), caminhar se torna impossível reduzindo significativamente os efeitos dinâmicos. Quando um fluxo se torna denso, a correlação entre os pedestres aumenta, mas o carregamento dinâmico tende a diminuir. A amplitude da força dinâmica de um único pedestre G e o coeficiente de redução ψ são os mesmos apresentados no caso anterior. O número equivalente de pedestres n' é dado por:

$$n' = 1,0 \cdot 1,85\sqrt{n} \quad (21)$$

3.4.3 Métodos de avaliação

3.4.3.1 Avaliação espectral:

A seguinte expressão empírica para determinação da variação da resposta para diferentes densidades de pedestres é recomendada:

$$a_{\max} = a_{\max,95\%} = k_{a,95\%} \cdot \frac{d \cdot l \cdot b}{M_i} \cdot \sqrt{C \cdot k_f^2 \cdot k_1 \cdot \xi^{k_2}} \quad (22)$$

Onde:

k_1 , k_2 , k_f e C são constantes, obtidas de acordo com a densidade de pedestres;

$n = d \cdot l \cdot b$: Número de pessoas na passarela, d : densidade de pedestres, l : comprimento da passarela, b : largura da passarela;

f : freqüência natural considerada que coincide com a freqüência média de passo do fluxo de pedestres;

M_i : massa modal do modo considerado;

ξ : coeficiente de amortecimento;

$k_{a,95\%}$: fator de pico para transformar o desvio padrão da resposta para um valor característico.

É assumido que:

- A frequência de passo média do fluxo de pedestres coincide com a frequência natural considerada da passarela;
- A massa da passarela é uniformemente distribuída;
- Os modos de vibração são senoidais;
- Não existe acoplamento entre modos;
- O comportamento estrutural é linear-elástico;
- Para vibrações verticais: $1,25Hz \leq f \leq 2,3Hz$
- Para vibrações horizontais: $0,5Hz \leq f \leq 1,2Hz$

3.4.3.2 Avaliação por um sistema de um grau de liberdade (SDOF):

A idéia básica é usar um único sistema de SDOF equivalente para cada frequência natural da passarela dentro da faixa crítica e calcular a máxima aceleração associada a um carregamento dinâmico.

A máxima aceleração de ressonância para o SDOF é dada por:

$$a_{\max} = \frac{P_i \cdot \pi}{M_i \cdot \delta} = \frac{P_i}{M_i \cdot 2\xi} \quad (23)$$

A massa generalizada M_i e o carregamento generalizado P_i são calculados para uma viga de um único vão de acordo com a Tabela 18.

Tabela 18 – Massa generalizada e carregamento generalizado

Modo de vibração	Massa generalizada M_i	Carregamento generalizado P_i	
		Para um carregamento uniforme $p(x)$	Para uma carga em movimento P_{mov}
$i = 1$	$\frac{1}{2} \cdot \mu \cdot l$	$\frac{2}{\pi} \cdot p(x) \cdot l$	$\frac{2}{\pi} \cdot P_{mov}$
$i = 2$	$\frac{1}{2} \cdot \mu \cdot l$	$\frac{1}{\pi} \cdot p(x) \cdot l$	$\frac{2}{\pi} \cdot P_{mov}$
$i = 3$	$\frac{1}{2} \cdot \mu \cdot l$	$\frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot p(x) \cdot l$	$\frac{2}{\pi} \cdot P_{mov}$

Onde:

i é o modo de vibração investigado;

μ é a distribuição de massa por comprimento;

l é o comprimento da passarela;

$p(x)$ é o carregamento distribuído em KN / m ;

P_{mov} é a carga em movimento em KN .

3.5 Modelo de carregamento proposto por Venuti *et al.* (2007)

Venuti *et al.* (2007) propõe um modelo de carregamento na direção lateral assumindo que a força exercida por um número n de pedestres caminhando na passarela é dada pela soma de três componentes:

$$F_{ht} = F_{ps} + F_{pp} + F_s \quad (24)$$

O primeiro componente da força, devido à sincronização entre pedestres e estrutura, é dado por:

$$F_{ps} = n_{ps} \left[\overline{F_z} \cdot \text{sen}(2\pi f_t t) + \overline{F_z} \cdot \text{sen}(2\pi f_t t) \right] \quad (25)$$

Onde:

$\overline{F_z}$ é a amplitude do componente em fase com a aceleração da estrutura;

$\overline{F_z}$ é a amplitude do componente em fase com a velocidade da estrutura;

f_t é a frequência de excitação lateral;

n_{ps} é o número de pedestres no grupo que estão sincronizados com a estrutura. É dado por:

$$n_{ps} = n \cdot S_{ps} \quad (26)$$

S_{ps} é um coeficiente de sincronização que define o percentual de sincronização entre a multidão e a estrutura. É definido em função de duas variáveis: a velocidade lateral da estrutura e um outro coeficiente, definido através de testes em laboratório.

O segundo componente da força, devido à sincronização entre pedestres, é dado por:

$$F_{pp} = n_{pp} \overline{F_s} \text{sen}(2\pi f_t t) \quad (27)$$

Onde:

$\overline{F_s}$ é a amplitude média da força exercida por um único pedestre com o tabuleiro da passarela imóvel;

n_{pp} é o número de pedestres no grupo que estão sincronizados entre si. É dado por:

$$n_{pp} = n \cdot S_{pp} \cdot (1 - S_{ps}) \quad (28)$$

Onde:

S_{pp} é um coeficiente de sincronização que define o percentual de sincronização entre os pedestres.

Segundo os autores, o coeficiente S_{pp} é definido de uma forma intuitiva em função da densidade da multidão (Fig. 22), devido à falta de dados experimentais relacionando o percentual de sincronização com a densidade de pedestres.

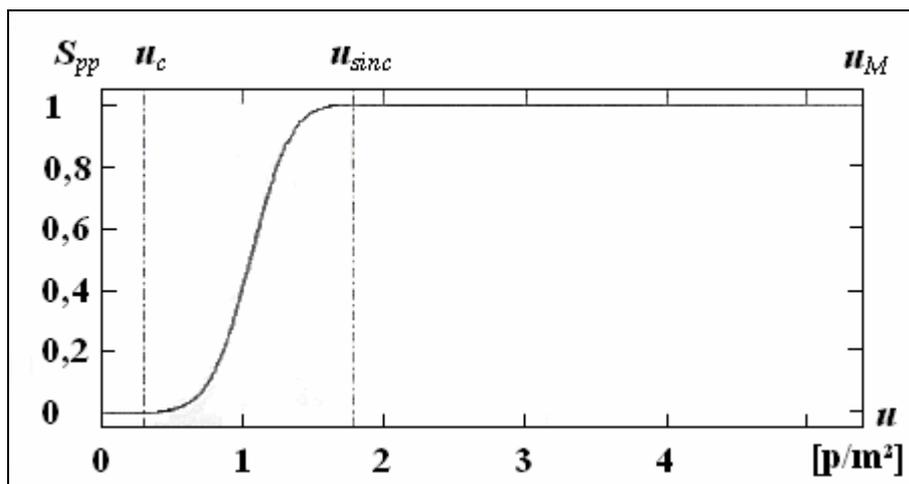


Fig. 22 - Coeficiente de sincronização entre pedestres em relação à densidade

Na Fig. 22, u_c é a densidade limite para o caminhar livre, u_{sinc} é a densidade na qual todos os pedestres estão sincronizados, u_M é a densidade máxima admissível, correspondente a uma velocidade de caminhada nula. Os autores citam referências na literatura que atribuem os seguintes valores para essas três densidade: 0,3 pedestres/m², 1,8 pedestres/m² e 5,4 pedestres/m², respectivamente.

Por fim, o terceiro componente da força F_s é determinado de acordo com o modelo proposto por Matsumoto *et al.* (1978), que define que a força gerada por n pedestres caminhando com uma distribuição de frequências Gaussiana e ângulos de fase aleatórios é \sqrt{n} vezes mais alto que a força produzida por um único pedestre.

$$F_s = \sqrt{n_s} \cdot \overline{F_s} \text{sen}(2\pi f_t t) \quad (29)$$

Onde:

n_s é o número de pedestres no grupo que não estão correlacionados.

3.6 Análise sobre as normas e diretrizes de dimensionamento de passarelas

Este capítulo apresentou algumas diretrizes de dimensionamento que trazem em sua metodologia algum tipo de consideração ou limitação em relação ao efeito *lock-in*.

A seguir é apresentado um comparativo entre as diretrizes citadas em relação a alguns dos principais elementos de projeto de passarelas.

3.6.1 *Número de pedestres na passarela*

Em se tratando do número de pedestres presentes na passarela, o Eurocode 5 prevê apenas situações de grupos de pedestres e fluxo contínuo de pedestres. Para a primeira situação, considera 13 pedestres presentes na passarela e na segunda, uma densidade de 0,6 pedestres/m². Situações diferentes das citadas não são previstas, como por exemplo, densidades de pedestres superiores.

Já Barker & Mackenzie (2008) definem como condição de multidão uma densidade de 1,0 pedestre/m². Afirmam também que esta é a densidade máxima a ser considerada já que a velocidade dos pedestres tende a diminuir após esse valor. Classificam as passarelas em quatro classes, de acordo com o seu uso e tamanho do grupo de pedestres ou da densidade da multidão.

Heinemeyer & Feldmann (2008) classificam as passarelas em cinco classes de acordo com seu uso e densidade de pedestres. Definem como condição de multidão a densidade de 1,0 pedestre/m².

Já o Guia Técnico do SÉTRA (2006) define quatro classes de passarelas, de acordo com o seu uso e com o nível de tráfego que será submetida.

3.6.2 *Nível de conforto*

Com relação ao critério de conforto, o nível de aceleração é o parâmetro usualmente adotado como critério, devido à facilidade de medição.

O Guia Técnico do SÉTRA (2006) e Heinemeyer & Feldmann (2008) apresentam semelhantes graus de conforto de acordo com o nível de aceleração nas direções vertical e lateral.

Já Barker & Mackenzie (2008) definem uma aceleração limite de projeto para vibrações na direção vertical (equação (18)), que é calculada levando-se em consideração a sensibilidade dos pedestres.

O Eurocode 1 ressalta que critérios de conforto devem ser definidos nos anexos nacionais de cada país da comunidade. Contudo, o Eurocode 0 define a aceleração máxima em qualquer parte da passarela como sendo 0,7 m/s² para vibrações verticais, 0,2 m/s² para

vibrações laterais em condições normais de uso e $0,4 \text{ m/s}^2$ em condições de multidões excepcionais.

3.6.3 Efeito *Lock-in*

Sobre o efeito *lock-in*, o Eurocode 5 define no cálculo da aceleração de várias pessoas atravessando a passarela uma provável sincronização de 23% dos pedestres na direção vertical e 18% na direção lateral (equações 11 e 13).

Já o Guia Técnico do SÉTRA (2006) limita a amplitude de vibração em $0,1 \text{ m/s}^2$ na direção lateral de modo a se evitar o *lock-in*.

Heinemeyer & Feldmann (2008) citam os testes realizados na Solferino por Charles & Bui (2005) nas quais se verificou amplitudes de $0,1$ a $0,15 \text{ m/s}^2$ quando se iniciou o *lock-in* e consideram que tais amplitudes devem ser evitadas.

Já Barker & Mackenzie (2008) apresentam um método para verificação da estabilidade lateral da passarela a partir da frequência natural e de um parâmetro de massa de amortecimento dos pedestres.

3.6.4 Modelos de carregamento

Com relação aos modelos de carregamento propostos, o Eurocode 1 ressalta que modelos dinâmicos de carga devem ser definidos nos anexos nacionais de cada país da comunidade.

Barker & Mackenzie (2008) prevêm duas situações de carregamento para a direção vertical: uma para ações dinâmicas produzidas por um único pedestre e grupos de pedestres e outra situação para condições de multidão (densidade de $1,0 \text{ pedestre/m}^2$). No entanto, não apresentam modelos de carregamento na direção lateral.

O Guia Técnico do SÉTRA (2006) propõe casos de carregamento para as três direções (vertical, longitudinal e lateral), para multidões esparsas e densas (densidades de $0,5$ a $0,8 \text{ pedestres/m}^2$) e para multidões muito densas ($1,0 \text{ pedestre/m}^2$). A metodologia adotada utiliza um número equivalente de pedestres e as acelerações calculadas não deverão ser superiores a $0,1 \text{ m/s}^2$ na direção lateral. Dessa forma, evita-se a ocorrência do *lock-in*.

Já Heinemeyer & Feldmann (2008) apresentam duas situações de carregamento para as três direções (vertical, longitudinal e lateral): uma na qual a densidade é inferior a 1,0 pedestre/m² e outra na qual a densidade é superior. A metodologia adotada é idêntica ao do Guia Técnico do SÉTRA.

Por sua vez, Venuti *et al.* (2007) propõem um modelo de carregamento na direção lateral que considera em separado a sincronização devido à interação com o movimento da passarela e com a densidade. Entretanto, esta última não possui confirmação experimental.

4.0 Os testes experimentais

4.1 Descrição e objetivos

Os testes experimentais foram conduzidos com duas variáveis distintas: a densidade de pedestres na passarela e a modalidade da taxa de passo dos pedestres. Foram realizados quatro testes, de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19 – Testes experimentais

Teste	Densidade (pedestres / m²)	Modalidade da taxa de passo
1°	0,3	Natural
2°	0,7	Natural
3°	0,9	Natural
4°	0,7	Induzida

Nos três primeiros testes, na qual a modalidade da taxa de passo era a natural, pretendia-se investigar a ocorrência ou não de sincronização para cada uma das densidades de interesse (0,3 , 0,7 e 0,9 pedestres/m²), com os pedestres caminhando na passarela com sua taxa de passo natural. Tinha-se como finalidade simular de forma mais semelhante possível, situações onde grupos de pedestres caminhassem em passarelas em condições reais.

Já no quarto teste, na qual a modalidade da taxa de passo era a induzida, os pedestres caminhavam na passarela com uma taxa de passo induzida por um sinal sonoro com frequência de 2,1 Hz. Os pedestres foram instruídos a procurarem sincronizar suas passadas com o sinal emitido. Este teste foi realizado com a única finalidade de se verificar a robustez da metodologia adotada (verificação da sincronização através do processamento de imagens). A expectativa era que uma sincronização entre pedestres ocorresse e que a metodologia adotada a identificasse, comprovando sua validade. A elevada frequência de 2,1 Hz do sinal sonoro foi definida para atender também outras pesquisas que vinham sendo feitas em paralelo.

4.2 Protótipo de estudo

Construído inicialmente para o estudo de carga de multidão por Fernandes (2007), o protótipo de passarela no qual os testes experimentais foram realizados possui 1,80m de largura e 11,63m de comprimento útil. Sua laje, situada a cerca de 50 cm acima do nível do terreno, é apoiada em vigas de borda em concreto armado. A Fig. 23 apresenta sua planta de forma.

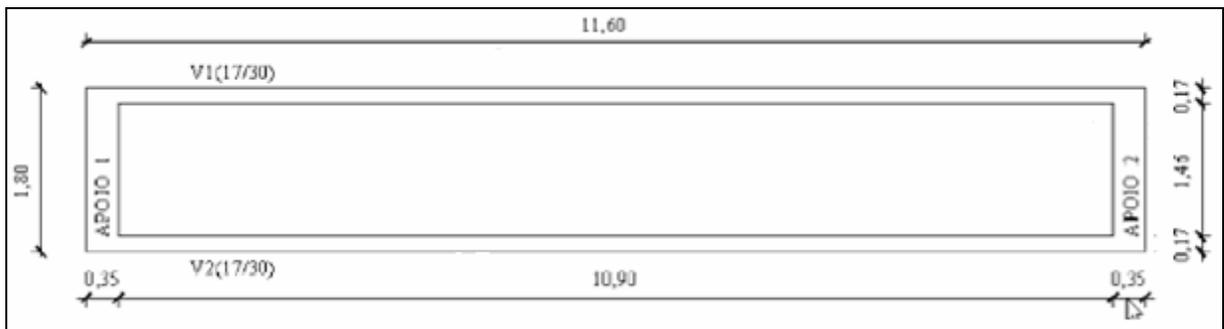


Fig. 23 - Planta de forma do protótipo (Fonte: FERNANDES, 2007).

Já os seus apoios são constituídos por cilindros de concreto que permitem o movimento lateral da passarela caso sejam retirados fixadores removíveis. Assim, o protótipo pode vibrar apenas na direção vertical (mantendo os fixadores) ou nas direções vertical e lateral (retirando os fixadores). A Fig. 24 ilustra em detalhe um dos apoios do protótipo.

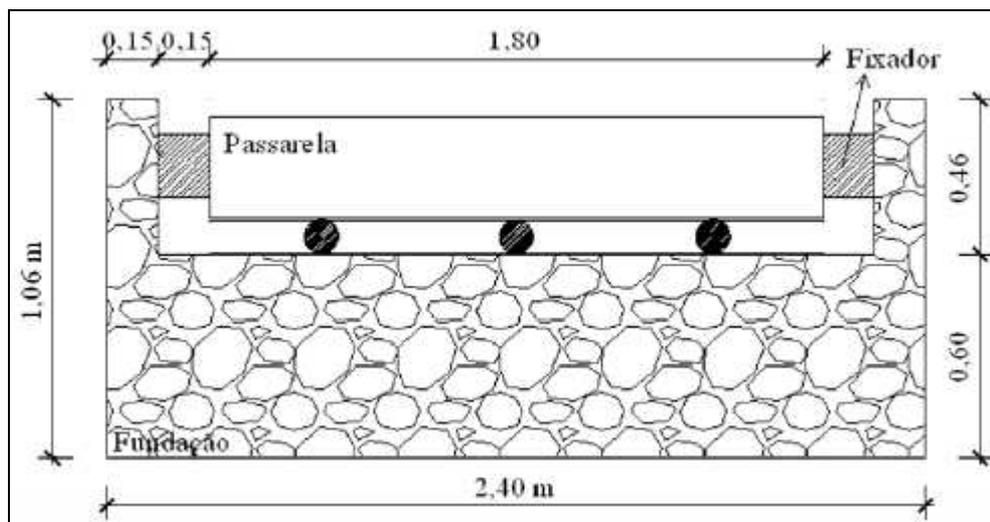


Fig. 24 - Detalhe transversal do apoio do protótipo (Fonte: FERNANDES, 2007).

O acesso à passarela é feito por meio de uma rampa pavimentada com argamassa de cimento com 14% de declividade. Já a saída, se dá num piso pavimentado, no mesmo nível da passarela.

Com relação às propriedades dinâmicas, o protótipo possui uma frequência fundamental vertical de 4,21 Hz e um fator de amortecimento respectivo de 1,0%. Já na direção lateral, sua frequência fundamental é de 9,0 Hz com os fixadores colocados. Maiores informações sobre detalhes das dimensões do protótipo e dos testes modais realizados no mesmo para identificação de suas propriedades dinâmicas podem ser obtidas em Fernandes (2007).

A Fig. 25 apresenta fotos do protótipo de estudo. A Fig. 25 (a) mostra a rampa de entrada na passarela e a Fig. 25 (b), o seu tabuleiro. Em ambas, é possível observar a câmera filmadora fixada num perfil de alumínio ao alto, na saída da passarela, utilizada para registrar os testes experimentais.

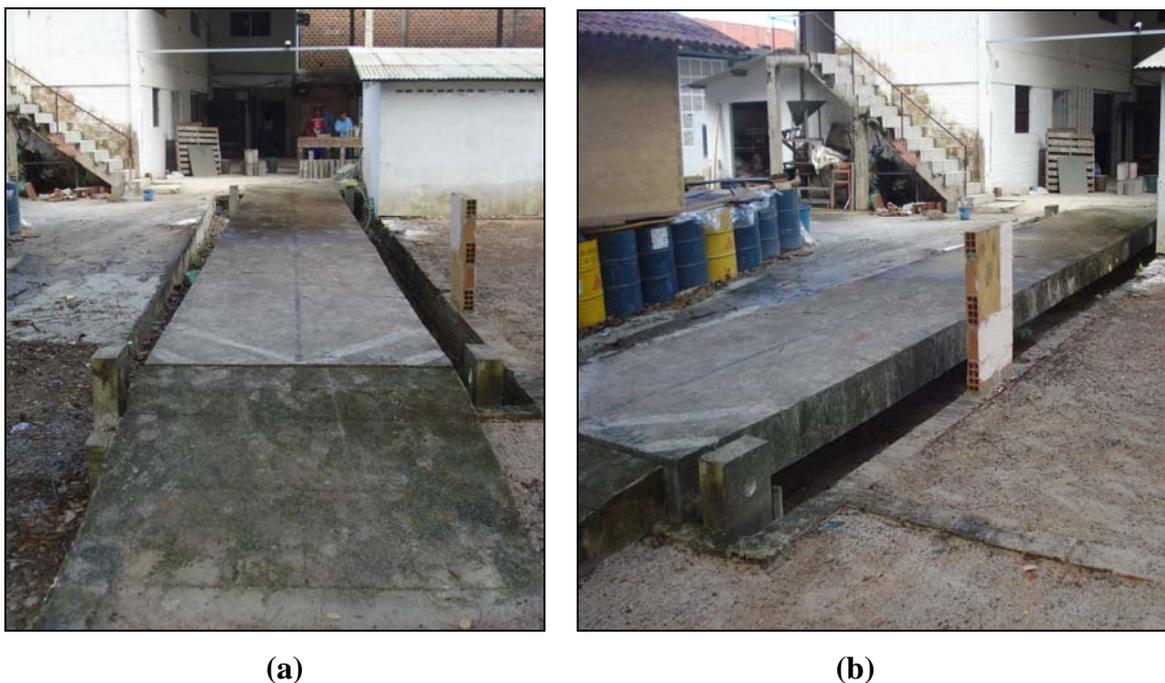


Fig. 25 - Protótipo de estudo. Detalhes da entrada na passarela (a) e do tabuleiro da passarela (b).

4.3 Configuração do protótipo

Para a realização dos testes a passarela foi configurada da seguinte maneira:

- Foram mantidos os fixadores laterais nos suportes, bloqueando os movimentos da passarela nessa direção. Como a finalidade da pesquisa era a de verificar uma eventual sincronização por densificação, outras “fontes” de sincronização, como por exemplo, os deslocamentos laterais da passarela, não poderiam estar presentes;
- Colocou-se uma faixa plástica de advertência em cada uma das duas laterais da passarela reduzindo a largura de passagem dos pedestres de 1,80m para 1,40m, além de simular o efeito de um corrimão. Essa medida reduziu a área útil de circulação e tornou possível a investigação das faixas de densidade de interesse;
- Uma câmera filmadora foi fixada na saída da passarela (ponto B da Fig. 26), alinhada com o seu eixo longitudinal e a uma altura em torno de 3,0m em relação ao nível do piso, de forma a permitir a visualização simultânea da cabeça de vários pedestres (Fig. 25).

4.4 Definição dos grupos de pedestres

A filmagem de cada um dos testes foi fragmentada com a finalidade de reduzir o tamanho dos arquivos em formato digital. Cada fragmento do filme tinha cerca de quatro segundos de duração. Essa medida, sem prévia intenção, acabou por definir, de forma aleatória, os grupos de pedestres a serem analisados. Isso porque em cada fragmento só era possível analisar uma travessia de um único grupo de pedestres.

O tamanho do grupo de pedestres a ser analisado em cada fragmento de filme era variável. Dependia principalmente da quantidade de pedestres presentes no momento na passarela. No 1º teste, no qual a densidade de pedestres era de 0,3 pedestres/m², foram observados os movimentos de grupos de dois a três pedestres. No 2º e 4º testes, nos quais a densidade era de 0,7 pedestres/m², foram observados os movimentos de grupos de até sete pedestres. Já no 3º teste, no qual a densidade era de 0,9 pedestres/m², foram observados os movimentos de grupos de até oito pedestres.

4.5 Percurso dos pedestres

Para a realização dos testes experimentais, definiu-se um percurso fechado no qual os pedestres caminhavam circularmente. Assim, cada pedestre realizava diversas travessias

durante os testes. Tal fato não interferiu nos resultados do ponto de vista que não criou repetitividade das filmagens, conforme será verificado no Capítulo 6.

A Fig. 26 apresenta o percurso realizado pelos pedestres durante os testes.

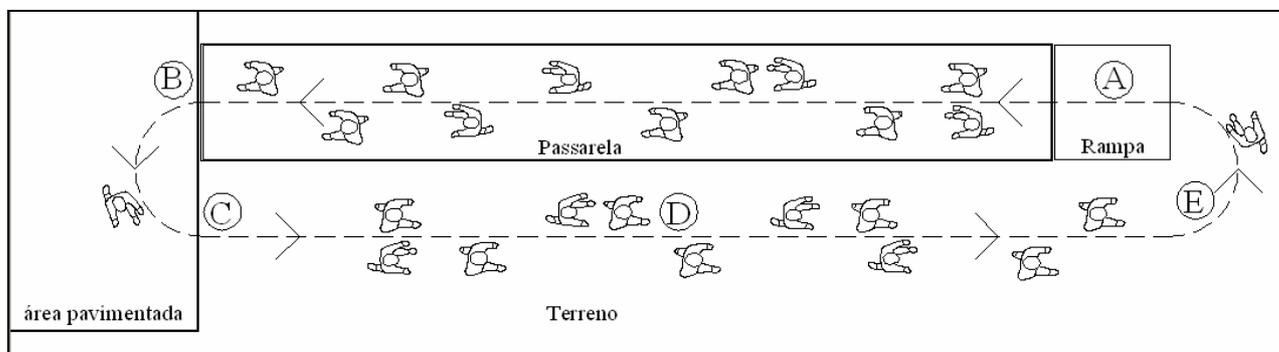


Fig. 26 – Percurso dos pedestres durante os testes

O ponto de entrada na passarela ocorreu pela rampa, ponto A da Fig. 26. O ponto B da mesma figura indica o local de saída da passarela. Não há rampa de saída já que o piso da passarela é nivelado com uma extensa área pavimentada. Já o ponto C indica um pequeno declive do terreno, que funcionava como rampa da área pavimentada ao nível do terreno. O percurso sobre o terreno natural, indicado no ponto D, se deu sobre uma trilha plana. Já o ponto E indica um pequeno aclive do terreno natural, que funcionava como rampa até o início do percurso.

4.6 Definição das densidades de pedestres

No primeiro teste realizado, doze pedestres caminharam com suas taxas de passo naturais no percurso indicado na Fig. 26, apresentando um fluxo médio de cinco pedestres simultaneamente na passarela e resultando numa densidade de 0,3 pedestres/m². No segundo teste, 31 pedestres caminharam com suas taxas de passo naturais no percurso indicado, apresentando um fluxo médio de onze pedestres e resultando numa densidade de 0,7 pedestres/m². No terceiro teste, 48 pedestres caminharam com suas taxas de passo naturais no percurso indicado, com um fluxo médio de 15 pedestres e resultando numa densidade de 0,9 pedestres/m². No quarto teste, os mesmos 31 pedestres do segundo teste caminharam com uma taxa de passo induzida por um sinal sonoro com frequência de 2,1Hz no percurso indicado, apresentando o mesmo fluxo e mesma densidade do segundo teste.

A primeira densidade dos testes foi definida pelo fato de que uma densidade de 0,3 pedestres/m² representa uma condição de escolha irrestrita de velocidade e taxa de passo por um indivíduo em um grupo (GRUNDMANN *et al.* 1993). As demais densidades foram estabelecidas a partir de questões logísticas, de acordo com o número obtido de pedestres voluntários a participarem dos testes.

4.7 Respostas da estrutura durante os testes

Em um estudo realizado em paralelo, Fernandes (2007) efetuou medições na passarela durante a execução dos testes desta pesquisa. A estrutura apresentou na direção vertical vibrações com aceleração de pico média de 0,36 m/s² e 0,62 m/s² quando os pedestres caminharam com taxa de passo natural e induzida, respectivamente. Tais valores atendem ao limite de conforto previsto no Eurocode 5, que é de 0,7 m/s² (ver Tabela 5). Na direção lateral, sendo a frequência natural da passarela nesta direção bastante fora da faixa crítica, não é esperado que haja vibrações perceptíveis que venham a interferir na análise dos resultados. De fato, nenhum dos vários participantes dos testes relatou percepção de vibração tanto na direção vertical quanto na lateral enquanto estavam cruzando a passarela.

5.0 Metodologia de processamento de imagens

Realizados os testes experimentais e obtidos os vídeos do movimento dos pedestres, iniciou-se o processamento das imagens, que consistiu na determinação dos sinais vibratórios, das taxas de passo individuais e dos ângulos de fases entre pares de pedestres.

A metodologia adotada foi baseada em outros trabalhos presentes na literatura como o de Yoshida (2002), por exemplo. Não é de conhecimento do autor a existência de outras técnicas de verificação de sincronização que não sejam baseadas no processamento de imagens.

5.1 Determinação dos sinais vibratórios

A partir dos vídeos em formato digital, com taxas de 30 quadros/s, pôde-se determinar sinais referentes ao movimento de pedestres. Definiu-se como referência para captação do movimento o ponto situado entre os olhos de cada pedestre, obtendo-se as coordenadas em pixels horizontais de alguns pedestres escolhidos aleatoriamente. Fez-se uma correlação do movimento da cabeça dos pedestres com as suas passadas. A Fig. 27 apresenta, como exemplo, a obtenção em dado instante do ponto de referência de um pedestre, utilizando-se o software MATLAB.



Fig. 27 - Obtenção da coordenada horizontal em pixels do ponto de referência de um pedestre.

A obtenção em imagens sucessivas das coordenadas resultou em sinais discretizados que descreviam o movimento de cada pedestre (Fig. 28).

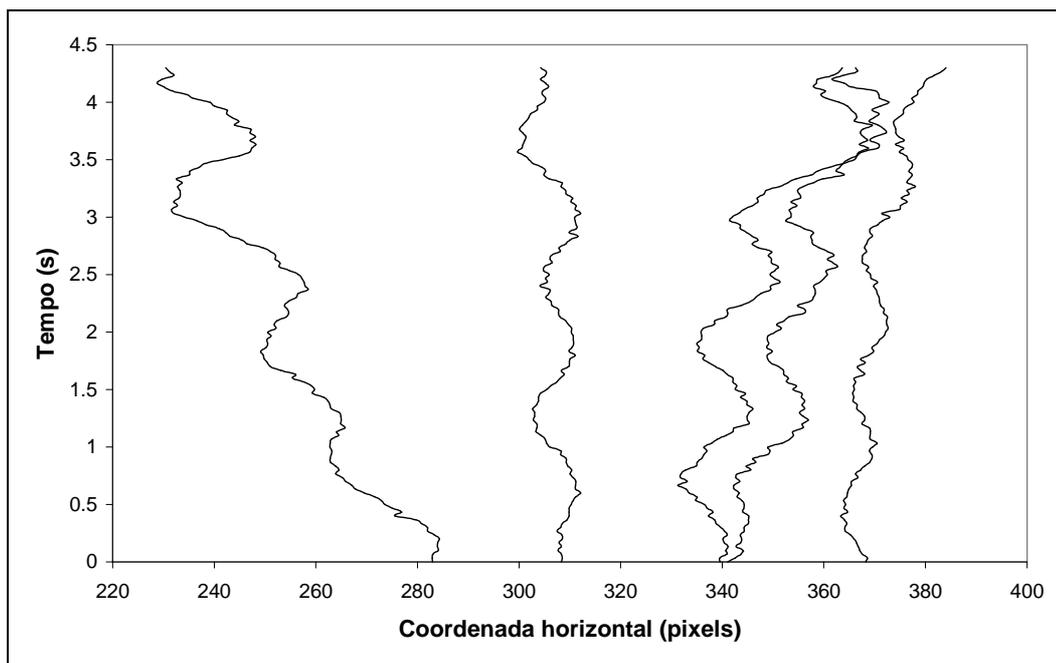


Fig. 28 - Exemplos de sinais do movimento de pedestres na passarela

Os picos dos sinais guardam relação com os instantes em que os pedestres pisavam na passarela. No sinal exemplificado na Fig. 29, os picos 1, 3 e 5 indicam movimentação na qual o pedestre está pisando com o pé direito e os picos 2, 4 e 6, com o pé esquerdo (lembrando que a filmagem foi realizada com os pedestres caminhando em direção à câmera).

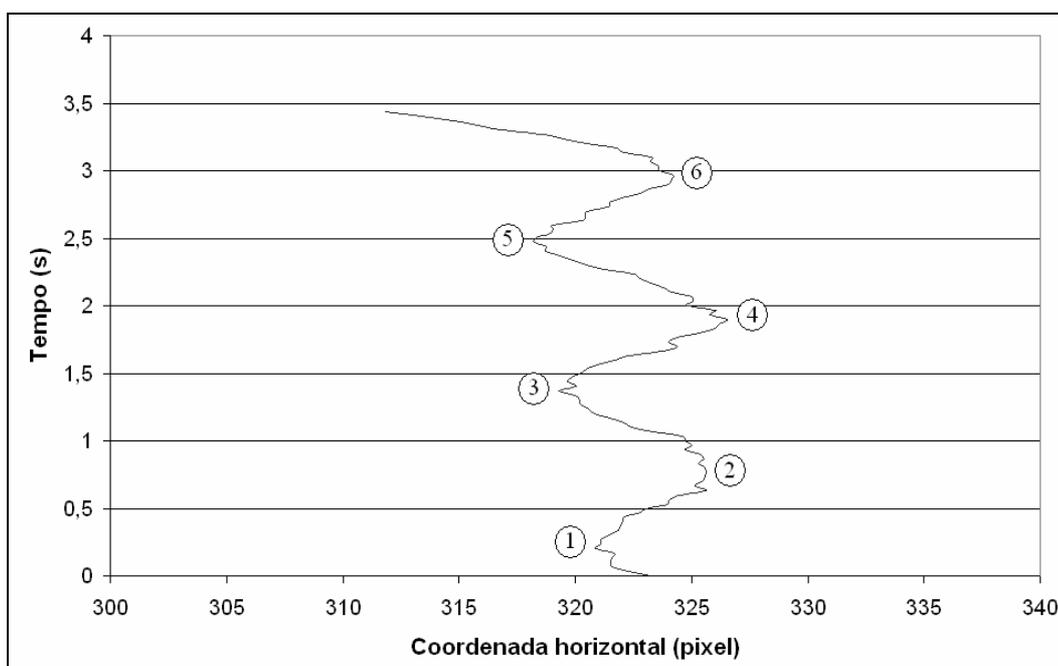


Fig. 29 - Identificação das passadas de um pedestre

5.2 Determinação das taxas de passo individuais e dos ângulos de fase entre pares de pedestres

Os modelos de excitação ao caminhar propostos na literatura são usualmente derivados da suposição que o caminhar é uma atividade perfeitamente periódica (PIZZIMENTI & RICCIARDELLI, 2005). Assim, para determinar a taxa de passo de cada pedestre, calculou-se o período médio entre os picos sucessivos do sinal, de acordo com a equação (30).

$$T_{med} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_z}{z} \quad (30)$$

Na Fig. 29, por exemplo, calculou-se o período entre os picos 2 e 4 e entre os picos 4 e 6. A média aritmética dos dois valores resultava no período médio do movimento oscilatório do pedestre. Observe que esse resultado também seria encontrado com os picos 1, 3 e 5.

Em todas as amostras, o número de picos de cada sinal variou entre três e cinco. Dessa forma, o valor de z na equação (30) variou entre dois e quatro.

Calculado o período médio, a taxa de passo média do pedestre (f) é dada por:

$$f = \frac{1}{T_{med}} \cdot 2 \quad (31)$$

Na equação (31), o fator multiplicador “2” é utilizado porque, para cada ciclo completo de movimento lateral (o que foi detectado pela câmera), foram dadas duas passadas pelo pedestre.

Definidas as taxas de passo dos pedestres de cada grupo, foram calculados os ângulos de fase instantâneos entre pares de pedestres. Dentro de um mesmo grupo, foram feitas todas as possíveis combinações de pares de pedestres de modo a resultar no maior número possível de ângulos de fase. Assim, em um grupo de cinco pedestres, por exemplo, eram determinados dez ângulos de fase, em um grupo de oito pedestres, 28 ângulos de fase. A defasagem média (d_{med}), em segundos, entre dois pedestres é dada pela média aritmética das diferenças de tempo entre os picos do movimento dos dois pedestres, conforme indicado na equação (32).

$$d_{med(s)} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_z}{z} \quad (32)$$

Como em todas as amostras, o número de picos de cada sinal variou entre três e cinco, o valor de z na equação (32) também variou entre três e cinco.

Na Fig. 30, por exemplo, a primeira defasagem de tempo individual seria aquela entre os picos 1A e 1B (primeiro pico do pedestre A com o primeiro pico do pedestre B). A segunda defasagem individual seria aquela entre os picos 2A e 2B e, a terceira defasagem, entre os picos 3A e 3B.

Definido o período médio individual (equação (30)), calculou-se o período médio do par de pedestres ($T_{med(A-B)}$) através da média aritmética dos valores individuais. A partir da defasagem média (equação (32)), em segundos, obteve-se o ângulo de fase, em graus, através da equação (33).

$$d_{med(^{\circ})} = 360^{\circ} \cdot \frac{d_{med(s)}}{T_{med(A-B)}} \quad (33)$$

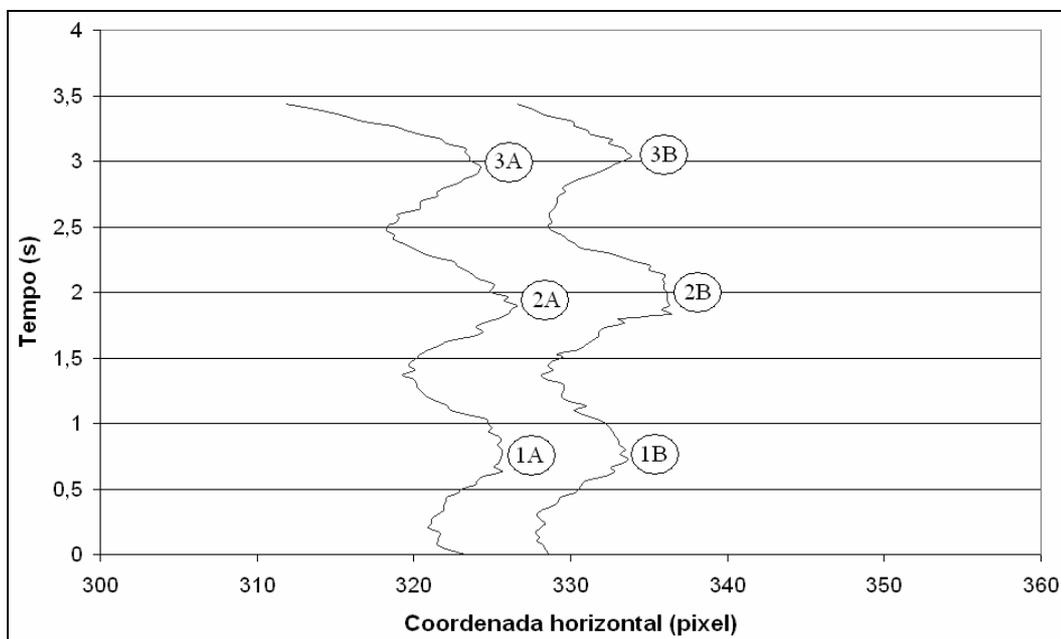


Fig. 30 - Cálculo da defasagem média de um par de pedestres

Vale salientar que, como os pedestres se deslocavam em direção à câmera, a magnitude do deslocamento lateral da cabeça era variável em unidades de pixels, de ciclo para ciclo de vibração (no início da travessia a magnitude era menor do que no final). Dessa forma,

o processamento só permitiu identificar a taxa de passo (frequência de ciclos) de cada pedestre e diferenças de fase entre eles. Não foi possível, por exemplo, determinar o real deslocamento lateral do pedestre durante o caminhar.

6.0 Resultados e discussões

Os resultados obtidos foram as taxas de passo médias dos pedestres com seus respectivos desvios padrões e os histogramas de distribuição de ângulos de fase para as densidades investigadas.

6.1 Taxas de passo dos pedestres

O estudo da taxa de passo é importante já que uma das condições para que haja sincronização do movimento dos pedestres é que eles caminhem com idênticas taxas de passo. A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos nos quatro testes experimentais realizados e a Fig. 31, a distribuição normal dos testes com taxa de passo natural (1°, 2° e 3° testes).

Tabela 20 - Taxas de passo dos pedestres obtidas nos testes experimentais

Teste	Densidade (pedestres/m²)	Taxa de passo	Tamanho da amostra (n° de pedestres)	Média (passos/s)	Desvio padrão (passos/s)
1°	0,3	Natural	84	1,90	0,12
2°	0,7	Natural	264	1,80	0,12
3°	0,9	Natural	351	1,76	0,11
4°	0,7	Induzida	261	2,02	0,09

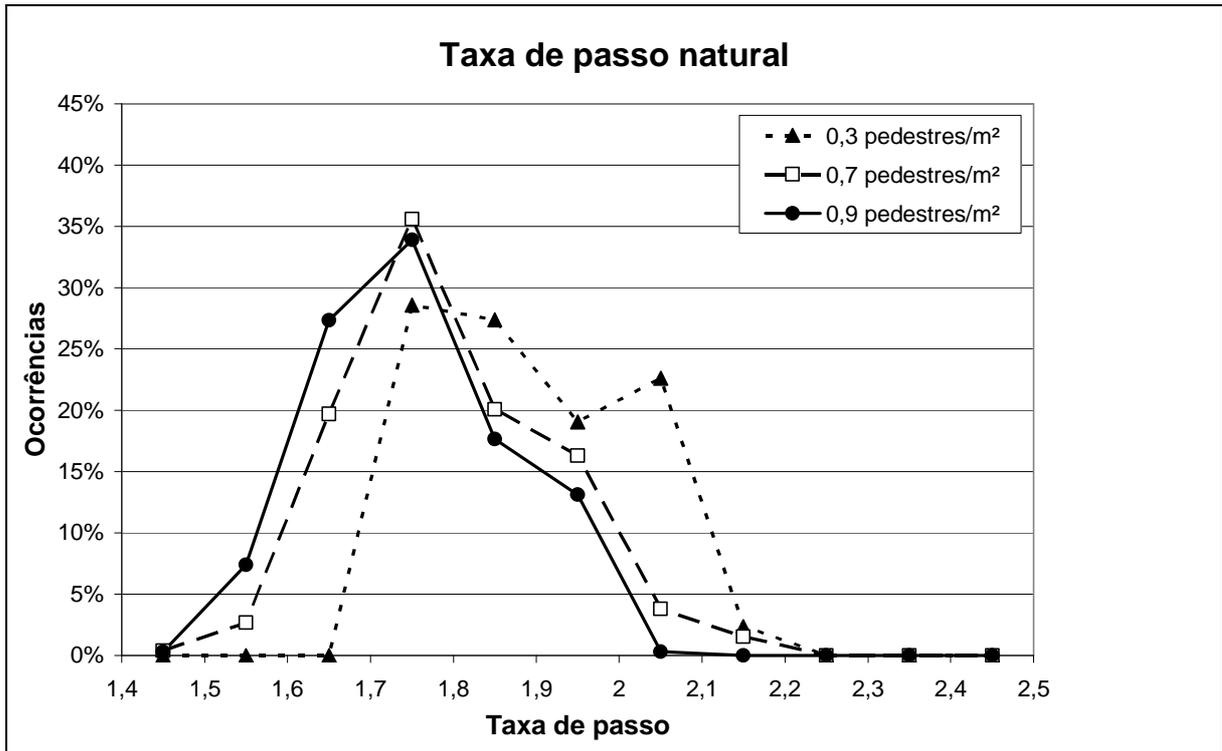


Fig. 31 - Distribuição das taxas de passo naturais para cada densidade

Analisando os resultados do primeiro, segundo e terceiro testes, nos quais os pedestres caminharam com suas taxas de passo naturais, indicados na Tabela 20, percebe-se que as médias das taxas de passo diminuem a medida que a densificação na passarela aumenta, devido à falta de espaço imposta. Este era um resultado já esperado posto que, a partir de 0,3 pedestres/m², diminuiu o espaço disponível para os pedestres se deslocarem livremente. Já os resultados do quarto teste, no qual os pedestres caminharam com uma taxa de passo induzida por um sinal sonoro, indicaram um aumento da taxa de passo média em relação ao segundo teste (densidade de 0,7 pedestres/m² com taxa de passo natural). Tal resultado também já era esperado já que os pedestres foram orientados a procurar sincronizar suas passadas com o sinal sonoro emitido de 2,10 Hz de frequência. Os valores encontrados da taxa de passo média e do desvio padrão no 1º teste, no qual os pedestres caminhavam livremente sem interferência da densificação, mostraram-se próximos dos de outros levantamentos feitos em passarelas reais com tráfego de pedestres, conforme ilustra a Tabela 21.

Tabela 21 - Taxas de passo de pedestres caminhando livremente

Referência	Taxa de passo (Hz)	Desvio padrão (Hz)	Quantidade de pedestres
MATSUMOTO <i>et al.</i> (1972)	1,99	0,178	505
ŽIVANOVIĆ <i>et al.</i> (2005)	1,87	0,186	1976
PACHI & JI (2005)	1,83	0,11	400

Já o desvio padrão indica uma maior ou menor tendência dos pedestres caminharem com a mesma taxa de passo. Pelos valores indicados na Tabela 20 do primeiro, segundo e terceiro testes, nos quais os pedestres caminharam com suas taxas de passo naturais, não se observou tendência à uniformização da taxa de passo e conseqüente sincronização devido à densificação por serem muito aproximados os valores de desvio padrão em todos os casos. A ordem de grandeza observada dos desvios padrões é semelhante aos resultados observados por Pachi & Ji. (2005) em levantamento realizado em passarelas em condições normais de uso. O desvio padrão do quarto teste será discutido mais adiante.

6.2 Ângulos de fase entre pedestres

Os ângulos de fase medidos a partir dos testes experimentais podiam variar de 0° a 360°, de acordo com a ordem de escolha dos pedestres tomados como referência no cálculo da defasagem. Por exemplo, se a defasagem do pedestre A em relação ao pedestre B é de 300°, pode-se afirmar que a defasagem do pedestre B em relação ao pedestre A é de 60°, modificando apenas os referenciais. Como neste estudo os referenciais (pedestre A em relação ao B ou B em relação ao A) são irrelevantes, converteram-se todos os ângulos de fase medidos (M), de acordo com a Tabela 22, de modo que o ângulo de fase entre os dois pedestres fosse representado pelo menor valor.

Tabela 22 - Conversão dos ângulos de fase

Ângulo de fase medido (M)	Ângulo de fase convertido	
	Direção lateral	Direção vertical
0° a 90°	= M	= M
90° a 180°	= M	= 180° - M
180° a 270°	= 360° - M	= M - 180°
270 a 360°	= 360° - M	= 360° - M

Dessa forma, os ângulos de fase na direção lateral variaram de 0° a 180° e, na direção vertical, de 0° a 90°. Nessa última direção, a variação foi menor porque a medição foi a do movimento lateral do corpo durante o caminhar e são necessários dois passos para se completar um ciclo oscilatório na direção lateral enquanto que na direção vertical cada passo corresponde a um ciclo. Assim, ângulos de fase de 170° na direção lateral, por exemplo, correspondem a um ângulo de fase de apenas 10° na vertical.

6.2.1 Precisão dos dados obtidos

Para avaliar a exatidão dos ângulos de fase obtidos, analisou-se a precisão na determinação das defasagens a partir de sinais discretizados. Também foi verificada a confiabilidade estatística da amostra.

6.2.1.1 Precisão na determinação das defasagens e dos períodos a partir de sinais discretizados

Durante a determinação dos sinais vibratórios, cada quadro fornecia um ponto em pixels. A captação de diversos pontos resultou em sinais discretizados que poderiam conduzir a um erro na determinação das defasagens e dos períodos, já que não foi aplicada curva de ajuste aos sinais.

O erro máximo possível corresponde à defasagem entre dois pontos consecutivos do sinal. Conforme mencionado no Capítulo 5, as imagens foram obtidas com taxa de 30 quadros/s. Assim, o erro máximo possível, em segundos, equivale a:

$$E_{\max} = \frac{1}{30\text{quadros} / s} = 0,033s \quad (34)$$

Convertendo-se para graus, temos:

$$E_{\max} = \frac{360^{\circ} \cdot 0,033s}{T} \quad (35)$$

Onde T é o período.

A partir da equação (35), calculou-se os erros máximos possíveis em graus para cada um dos testes experimentais realizados (Tabela 23).

Tabela 23 - Erros dos sinais discretizados

Teste	Período médio (s)	E_{\max} (em graus)
1°	1,05	11,29
2°	1,11	10,69
3°	0,99	12,00
4°	1,14	10,45
5°	1,02	11,70

Os valores apresentados na Tabela 23 correspondem ao erro máximo possível de ocorrer na determinação de cada período ou defasagem individual. Contudo, ressalta-se que, conforme descrito no Capítulo 5, os ângulos de fase entre pedestres e os seus períodos foram calculados a partir da média de várias medições individuais. Dessa forma, seus erros resultantes provavelmente foram inferiores aos apresentados na Tabela 23.

6.2.1.2 Confiabilidade estatística da amostra

Como os mesmos pedestres realizaram várias travessias durante os testes experimentais, verificou-se se este procedimento não estaria resultando numa amostra tendenciosa, caso os ângulos de fase de um mesmo par de pedestres viessem a ser semelhantes em travessias diferentes. Monitoraram-se durante o primeiro teste experimental dois pares de pedestres distintos em sucessivas travessias. Obteve-se o ângulo de fase na

direção lateral entre os pedestres A-B em nove travessias e, entre os pedestres C-D, em seis travessias, conforme apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Ângulos de fase de mesmos pares de pedestres em várias travessias

Travessia	Ângulos de fase	
	Pedestres A-B	Pedestres C-D
1°	27,83°	38,57°
2°	68,21°	70,17°
3°	122,86°	107,28°
4°	71,05°	75,57°
5°	83,30°	163,82°
6°	39,79°	15,69°
7°	15,69°	-
8°	41,36°	-
9°	108,60°	-

Verificou-se que a amostra não era tendenciosa já que, em cada travessia, um mesmo par de pedestres apresentava um ângulo de fase completamente diferente dos ângulos determinados nas demais travessias, demonstrando que cada travessia se configurava como uma situação única.

Em relação à precisão estatística, como todas as amostras são suficientemente grandes ($n > 30$), elas seguiram uma distribuição normal, de acordo com o Teorema Central do Limite.

A Tabela 25 apresenta as estimativas estatísticas calculadas a partir dos dados experimentais obtidos.

Tabela 25 – Estimativas estatísticas das amostras de ângulos de fase

Teste		1°	2°	3°	4°
Tamanho da amostra		42	607	1055	616
Direção lateral	Média	85,93°	90,45°	87,35°	91,85°
	Desvio padrão	55,01°	50,74°	50,90°	57,07°
	Erro padrão da média	16,64°	4,04°	3,07°	4,51°
Direção vertical	Média	41,90°	45,62°	45,72°	38,37°
	Desvio padrão	25,93°	24,54°	25,21°	24,31°
	Erro padrão da média	7,84°	1,95°	1,52°	1,92°

6.2.2 Ângulos de fase com taxa de passo natural

Os três primeiros testes, nos quais os pedestres caminharam com suas taxas de passo naturais, foram realizados com o intuito de se verificar a ocorrência ou não de sincronização nas três densidades analisadas (0,3, 0,7 e 0,9 pedestres/m²).

A seguir são apresentados os histogramas com os ângulos de fase obtidos nesses três primeiros testes na direção lateral (Fig. 32) e na direção vertical (Fig. 33).

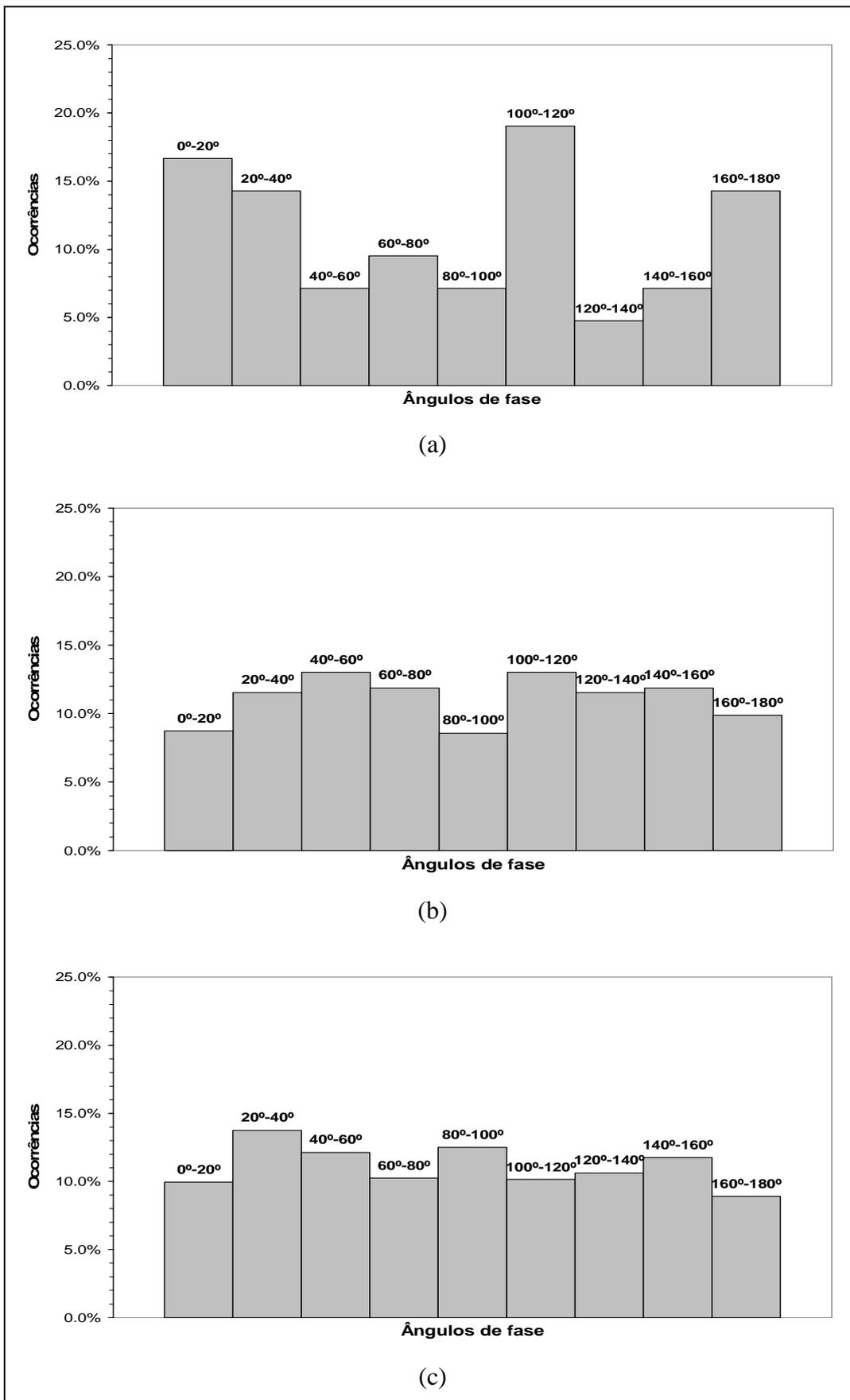


Fig. 32 - Ângulos de fase na direção lateral para a densidade de 0,3 pedestres/m² (a), para a densidade de 0,7 pedestres/m² (b) e para a densidade de 0,9 pedestres/m² (c) com taxa de passo natural

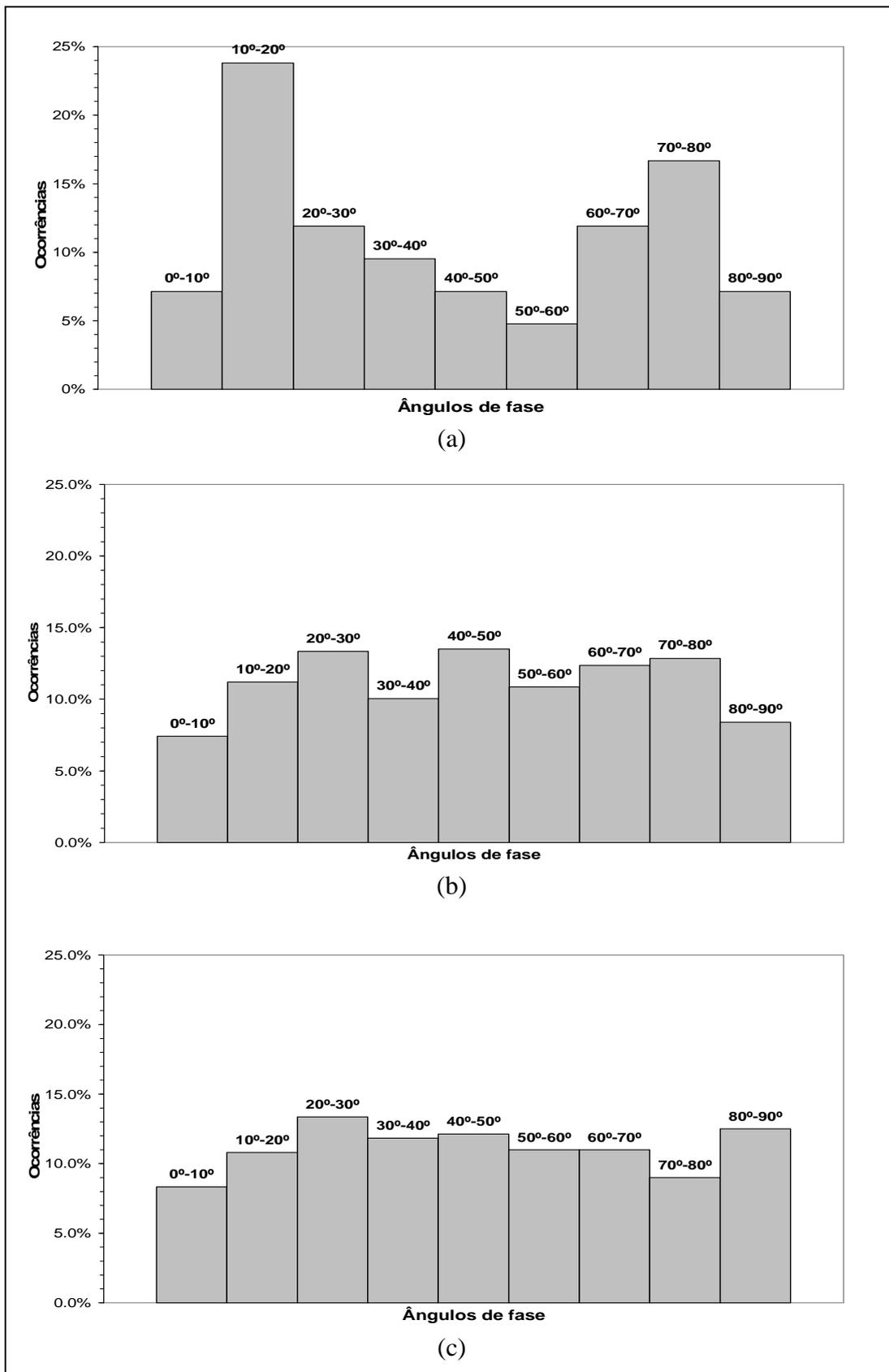


Fig. 33 - Ângulos de fase na direção vertical para a densidade de 0,3 pedestres/m² (a), para a densidade de 0,7 pedestres/m² (b) e para a densidade de 0,9 pedestres/m² (c) com taxa de passo natural

Analisando os histogramas das Figs. 32 e 33, verificou-se não haver nenhum indício de sincronização, nem na direção lateral nem na vertical, com as três densidades investigadas, já que todas as distribuições se mostraram uniformes (as faixas de ângulos de fase de todos os histogramas se aproximam do percentual médio de 11%).

6.2.3 Ângulos de fase com taxa de passo induzida

A única finalidade da realização do teste com taxa de passo induzida (quarto teste) foi para que se pudesse analisar a robustez da metodologia adotada, esperando-se neste caso haver mais indícios de sincronização que nos testes anteriores. Além disso, o número de pedestres caminhando com a mesma taxa de passo deveria ser maior do que nos testes com taxa de passo natural devido ao sinal sonoro. Consequentemente, uma sincronização entre pedestres seria verificada, indicando que a metodologia adotada estaria identificando o comportamento correto, do ponto de vista de sincronização por densificação, para o caminhar natural.

Na Fig. 34 são apresentados os histogramas com os ângulos de fase obtidos no quarto teste com os pedestres caminhando com a taxa de passo induzida.

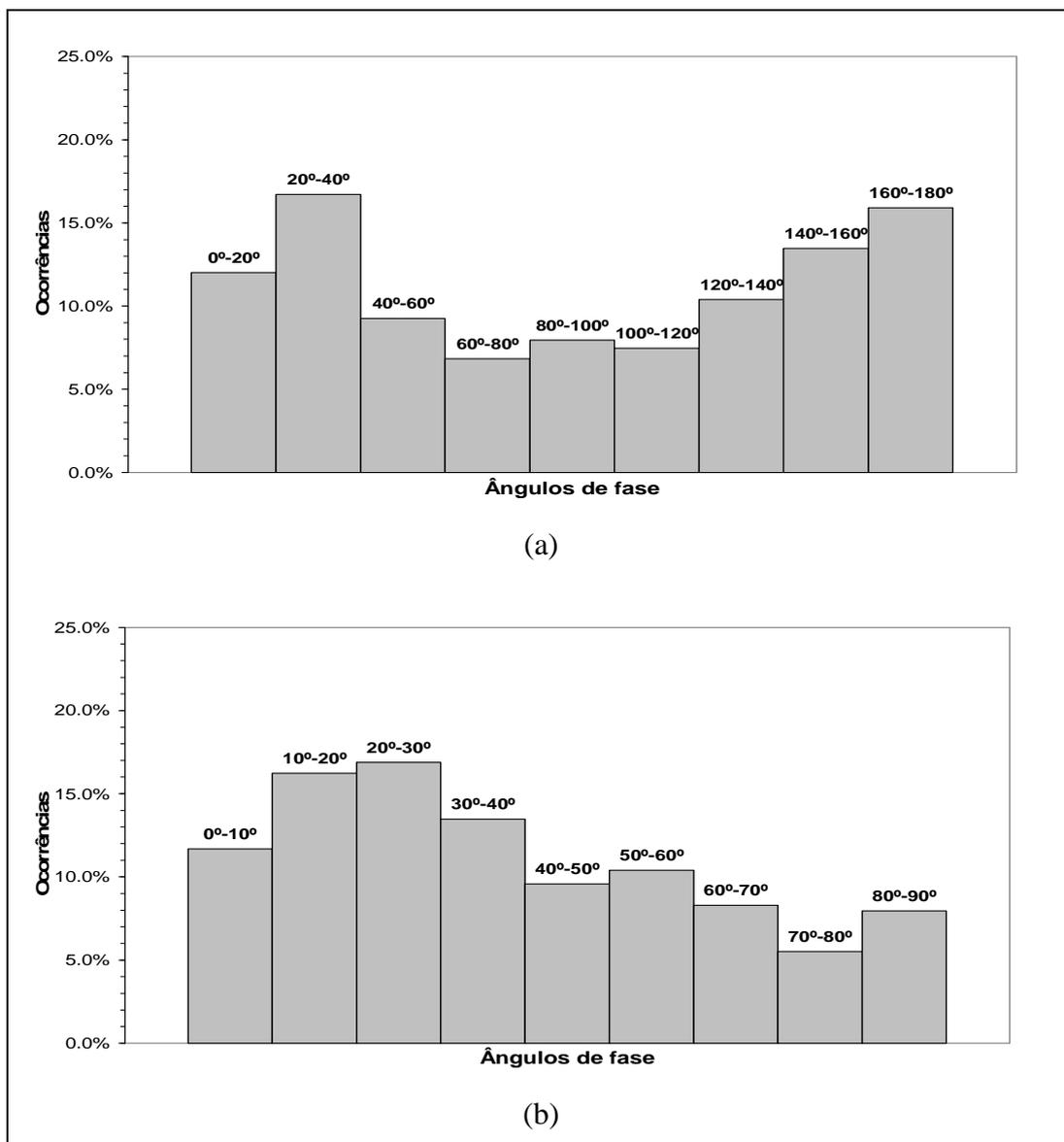


Fig. 34 - Histogramas com ângulos de fase na direção lateral (a) e vertical (b) com densidade de 0,7 pedestres/m² e com taxa de passo induzida.

6.3 Robustez da metodologia adotada

Comparando-se os valores encontrados do desvio padrão do segundo teste (taxa de passo natural) com o do quarto (taxa de passo induzida), ambos com densidade de 0,7 pedestres/m², apresentados na Tabela 20, percebe-se que houve uma redução de 0,12 Hz para 0,09 Hz. Este resultado indica que no quarto teste a quantidade de pedestres caminhando com taxas de passo mais próximas foi maior do que a do segundo. Conseqüentemente, de acordo com as expectativas, verificou-se uma tendência de sincronização na direção vertical (Fig.

34a) no quarto teste. Tal resultado se deve ao fato de que os pedestres procuraram sincronizar suas passadas com o sinal sonoro emitido, sem levar em conta com qual pé pisar (Fig. 34b), até mesmo porque o sinal sonoro não os induzia a esta distinção.

A partir desta avaliação, ficou explícito que a metodologia adotada, identificando o movimento dos pedestres a partir de imagens, é válida.

7.0 Conclusões

O desconforto e a sensação de insegurança provocados pela ocorrência de vibrações excessivas em passarelas têm resultado na perda da funcionalidade e conseqüente interdição desses equipamentos urbanos.

O surgimento de diversos casos de passarelas que apresentaram vibrações excessivas nos últimos anos chamou a atenção da comunidade científica de que a metodologia de dimensionamento de passarelas adotada pelas principais normas internacionais apresenta lacunas.

Uma multidão atravessando uma passarela induzindo vibrações verticais e laterais na estrutura ao caminhar é uma situação possível de ocorrer, principalmente nos grandes centros urbanos. Apesar disso, dentre as normas internacionais de dimensionamento de passarelas, apenas a norma britânica (BS 5400) e a européia (Eurocode 5) prevêm a ocorrência de vibrações na direção lateral e, apenas esta última prevê o carregamento induzido por multidões ou grupos de pedestres.

O efeito *lock-in*, fenômeno no qual uma multidão ou grupos de pedestres sincronizam seus passos com os deslocamentos da estrutura, vem sendo muito estudado nos últimos anos. Diversos modelos matemáticos foram propostos abordando este fenômeno (DALLARD *et al.*, 2001a, BARKER, 2005, etc).

Um outro tipo de sincronização que, a princípio origina o *lock-in*, é a sincronização entre pedestres, devido à densificação. Tal sincronização, ao contrário da anterior, ainda é pouco estudada. Venuti *et al.* (2007) propuseram um modelo de carregamento induzido por pedestres ao caminhar que considera os efeitos da sincronização entre pedestres. Contudo, no mesmo trabalho os autores ressaltam a falta de dados experimentais para este tipo de sincronização.

Assim, com o intuito de contribuir com o preenchimento de tal lacuna, um estudo experimental para verificar uma eventual sincronização que ocorreria entre pedestres devido à densificação em passarelas foi realizado nesta pesquisa. Testes experimentais foram realizados num protótipo de passarela com três densidades distintas: 0,3 pedestres/m², 0,7 pedestres/m² e 0,9 pedestres/m². Determinou-se os ângulos de fase de grupos de pedestres nas direções vertical e lateral (transversal) para cada uma destas densidades, a partir de sinais obtidos através do movimento lateral da cabeça dos pedestres, observados de imagens.

Verificou-se não haver nenhum indício de sincronização em nenhuma das densidades de pedestres analisadas com os pedestres caminhando com a taxa de passo natural.

Determinou-se também as taxas médias de passo dos pedestres. Os valores encontrados para tais taxas de passo se mostraram coerentes com os de outros estudos recentes. Adicionalmente, a variação das taxas de passo naturais, analisada pelo desvio padrão das amostras, apresentou valores bastante aproximados indicando também que não houve tendência dos pedestres caminharem com a mesma taxa de passo apesar da redução de espaço imposta pela densificação.

Verificou-se ainda a robustez da metodologia adotada através da realização de um teste experimental com os pedestres caminhando com uma taxa de passo induzida por um sinal sonoro. De acordo com a expectativa, ocorreu sincronização entre os pedestres e a metodologia a identificou.

Por fim, um procedimento estatístico foi realizado indicando a precisão das amostras. O nível de precisão verificado se mostrou satisfatório, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos.

7.1 Sugestões para futuros trabalhos

Para a continuidade desta pesquisa, sugerem-se os seguintes tópicos:

- Realizar novos testes experimentais com densidades de pedestres superiores (1,0 pedestre/m², 1,2 pedestres/m², 1,4 pedestres/m², etc).
- Estudar o *lock-in* no protótipo, a partir da realização de testes sem os fixadores nos apoios (movimento lateral liberado).

8.0 Referências bibliográficas

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. **Guide Specifications for Design of Pedestrian Bridges**, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. 2003

BACHMANN, H.; PRETLOVE, A.; RAINER, H. **Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines**, pp. 1-28, Basel, 1995.

BACHMANN, H. **Lively Footbridges – a Real Challenge**, Footbridge 2002 – Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Paris, 2002.

BARKER C. **Some observations on the nature of the mechanism that drives the self-excited lateral response of footbridges**. Footbridge 2002 – Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Paris, 2002.

BARKER, C. **Footbridge Pedestrian Vibration Limits – Part 3: Background to Response Calculation**, Footbridge 2005 - Second International Conference, 2005.

BARKER C.; MACKENZIE D. **Calibration of the UK National Annex**, Footbridge 2008 – Third International Conference, 2008.

BERTRAM, J. E.; RUINA, A. **Multiple walking speed-frequency relations are predicted by constrained optimisation**. Journal of Theoretical Biology, N° 209, 2001, pp. 445-453.

BLANCO, C.; BOUILLAD, P.; BODARWÉ, E., *et al.* **Structural Dynamic Design of a Footbridge under Pedestrian Loading**, 9th SAMTECH Users Conference, 2005.

BROWNJOHN, J.; FOK, P.; ROCHE, M.; MOYO, P. **Long Span Steel Pedestrian Bridge at Singapore Changi Airport – Part 1: Prediction of Vibration Serviceability Problems**, *The Structural Engineer*, v. 82, n. 16, pp. 21-27, 2004a.

BROWNJOHN, J.; FOK, P.; ROCHE, M.; OMENZETTER, P. **Long Span Steel Pedestrian Bridge at Singapore Changi Airport – Part 2: Crowd Loading Tests and Vibration Mitigation Measures**, *The Structural Engineer*, v. 82, n. 16, pp. 28-34, 2004b.

BROWNJOHN, J.; NENG FU, T. **Vibration Excitation and Control of a Pedestrian Walkway by Individuals and Crowds**, *Shock and Vibration*, v. 12, n. 5, pp. 333- 347, 2005.

BS 5400-2 BRITISH STANDARDS. **Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Loads**. Part 2, Appendix C. 2006.

CAETANO, E.; CUNHA, A.; FONSECA, A.; *et al.* **Assessment and control of human induced vibrations in the new Coimbra Footbridge**. *Footbridge 2005 – Second International Conference*, 2005.

CEB - COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, **CEB-FIP Model Code 90**. **CEB Bulletin D'Information No. 213/214**, 1993.

CHARLES, P.; BUI, V. **Transversal dynamic actions of pedestrians & Synchronisation**. *Proceedings of Footbridge 2005 – 2nd International Conference*.

DALLARD, P.; FITZPATRICK, A.J.; FLINT, A.; *et al.* **The London Millennium Footbridge**, *The Structural Engineer*, v. 79, n. 22, pp. 17-33, 2001a.

DALLARD, P.; FITZPATRICK, T.; FLINT, A.; *et al.* **London Millennium Bridge: Pedestrian-Induced Lateral Vibration**, *Journal of Bridge Engineering*, v. 6, n. 6, pp. 412-417, 2001b.

DANBON F.; GRILLAUD G. **Dynamic behaviour a steel footbridge. Characterisation and modeling of the dynamic loading induced by a moving crowd on the Solferino Footbridge in Paris**. *Footbridge 2005*.

DAVIES, A. C.; YIN, J. H.; VELASTIN, S. A. **Crowd monitoring using image processing**, Electronics & Communication Engineering Journal 14(7), 1995, 37-47.

EUROCODE 0, **Basis of structural design - Annex A2: Application for bridges (Normative)**, EN1990, European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica, 2005.

EUROCODE 1, **Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges**, EN 1991-2:2003 (E), European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica, 2003.

EUROCODE 5, **Design of Timber Structures – Part 2: Bridges**, ENV 1995-2, European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica, 1997.

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.

FUJINO, Y.; PACHECO, B. M.; NAKAMURA, S.; WARNITCHAI, P. **Synchronization of Human Walking Observed During Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge**, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22(9), 1993, pp. 741-758.

GRUNDMANN, H.; KREUZINGER, H.; SCHNEIDER, M. **Schwingungsuntersuchungen Für Fußgängerbrücken**. Bauingenieur, v. 68, n. 5, pp. 215-225, 1993.

HAUKSSON F. **Dynamic behaviour of footbridges subjected to pedestrian-induced vibrations**. Master's Dissertation, Lund, Sweden, 2005.

HEINEMEYER C.; FELDMANN M. **European design guide for footbridge vibration**. Workshop Footbridge 2008.

HOEL, P. G. **Elementary Statistics**, 4^o Edition, 1981.

ISO 10137 International Organization for Standardization. **Bases for Design of Structures - Serviceability of Buildings against Vibration**, Geneva, Switzerland, 1992.

KERR, S., BISHOP, N. **Human induced loading on flexible staircases**, Engineering Structures, v.23, pp. 37-45, 2001.

MATSUMOTO, Y.; SATO, S.; NISHIOKA, T. *et al.* **A Study on Dynamic Design of Pedestrian Over-Bridges**, Transactions of JSCE, v. 4, pp. 50-51, 1972.

MATSUMOTO, Y.; NISHIOKA, T.; SHIOJIRI, H.; MATSUZARI, K. **Dynamic Design of Footbridges**, IABSE Proceedings, P-17/78, pp. 1-15, 1978.

MCROBIE, A.; MORGENTHAL, G. **Risk Management for Pedestrian-Induced Dynamics of Footbridges**. Footbridge 2002 – Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Paris, 2002

MIKI C. **Failures: the most valuable and important experiences**. Tokyo. [2007 ou 2008]
Disponível em:
<<http://www.ocw.titech.ac.jp/index.php?module=General&action=Download&file=2008-7504-20080422-5,6.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2008, 16:30:30)

NAKAMURA, S. **Field Measurement of lateral vibration on a pedestrian suspension bridge**, The Structural Engineer, 81(22), 22-26, 2003.

NAKAMURA, S; KAWASAKI T. **Lateral vibration of footbridges by synchronous walking**, Journal of Constructional Steel Research 62, 1148–1160, 2006

NEWLAND D. E. **Pedestrian Excitation of Bridges – Recent Results**, Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 2003.

NISHIRO, K.; KASAGI, N.; HIRATA, N. **Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing**, Journal of Fluids Engineering, ASME111, 1989.

OHBDC - **Ontario Highway Bridge Design Code**. Ministry of Transportation and Communications, Highway Engineering Division, 3rd ed., Ontario, Canada, 1991.

OREN, M.; PAPAGEORGIOU, C.; SINHA, P.; OSUNA, E.; POGGIO, T. **Pedestrian detection using wavelet templates**, Proceeding of 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, 193-199.

PIMENTEL, R. **Vibrational Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-Induced Loads**. PhD Thesis, University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering, Sheffield, UK, 1997.

PIZZIMENTI, A. D.; RICCIARDELLI, F. **Experimental evaluation of the dynamic lateral loading of footbridges by walking pedestrians**, Eurodyn 2005.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, M. **Particle image velocimetry**, Springer verlag, Berlin, 1998.

ROBERTS, T. **Lateral Pedestrian Excitation of Footbridge**, Journal of Bridge Engineering, v. 10, n. 1, pp. 107-112, 2005.

SCHLAICH, M., **Planning Conditions for Footbridges**, Footbridge 2002 – Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Paris, 2002.

SÉTRA - Service d'Études techniques des routes et autoroutes. **Footbridges - Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading – Practical Guideline**, 2006.

TILLY, G.; CULLINGTON, D.; EYRE, R. **Dynamic Behaviour of Footbridges**, IABSE Surveys, pp. 13-24, 1984.

VENUTI F.; BRUNO L.; NAPOLI P. **Pedestrian Lateral Action on,lively Footbridges: A New Load Model**, Structural Engineering International, 2007.

WHEELER, J. **Prediction and control of pedestrian induced vibrations in footbridges.** ASCE Journal of the Structural Division, N° 108, pp. 1982, 2045-2065.

WILLFORD, M. **Dynamic Actions and Reactions of Pedestrians,** Footbridge 2002 – Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Paris, 2002.

YOSHIDA, J. **Image analysis of human induced lateral vibration of a pedestrian bridge,** Footbridge 2002.

YOSHIDA J.; FUJINO Y.;SUGIYAMA T. **Image Processing for capturing motions of a crowd and its application to pedestrian-induced lateral vibration of a footbridge.** Shock and vibration 14 (2007) 251-260.

ZIVANOVIC, S., PAVIC, A., and REYNOLDS, P. **Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review.** Journal of Sound and Vibration, v. 279, n 1-2, pp. 1-74, 2005.

9.0 Anexos

Rotina do software Matlab criada por Fernandes (2007) para captura das coordenadas em pixels de uma imagem.

```
Clc
clear all
close all
H=aviread('D:\Engenharia Urbana\PESQUISA\Videos\M4_11_4.avi'); % Leitura do video
for d=121:130; % Colocar a enumeração dos frames
[XX,MM] = frame2im(H(:,d)); % Captura do frame
figure;
image(XX)
zoom
pause
pixval % Mostra as coordenadas da imagem em pixel
[X,Y] = GINPUT
end
```