

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Théo Piero de Barros**

**ANÁLISE DINÂMICA EM PASSARELA SUJEITA À  
MOVIMENTAÇÃO HUMANA**

Porto Alegre  
junho de 2009

**THÉO PIERO DE BARROS**

**ANÁLISE DINÂMICA EM PASSARELA SUJEITA À  
MOVIMENTAÇÃO HUMANA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Roberto Domingo Rios**

Porto Alegre  
junho de 2009

**THÉO PIERO DE BARROS**

**ANÁLISE DINÂMICA EM PASSARELA SUJEITA À  
MOVIMENTAÇÃO HUMANA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, junho de 2009

Prof. Roberto Domingo Rios  
Dr. pela Universidade Federal de Rio Grande do Sul  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Inácio Benvegnu Morsch (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Marcelo Maia Rocha (UFRGS)**  
Dr. techn. pela Universidade Innsbruck/Áustria

**Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Roberto Domingo Rios, orientador deste trabalho, pelos conselhos, pela disponibilidade e pelas palavras de apoio.

À Professora Carin Maria Schmitt, pelas sugestões e críticas apresentadas durante toda a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Rubem Clécio Schwingel, por, gentilmente, disponibilizar as plantas utilizadas neste trabalho.

Aos demais professores, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação.

Aos meus amigos e colegas, pela convivência e pelo companheirismo.

À Aline, pela presteza e voluntariedade na revisão deste trabalho.

À minha família, por acreditar em mim.

À Silvana, amor da minha vida, por ter cruzado o meu caminho e pela compreensão durante as minhas ausências.

Aos meus pais, por talharem o meu caráter.

É fácil apagar as pegadas; difícil, porém,  
é caminhar sem pisar o chão.

*Lao-Tsé*

## RESUMO

BARROS, T. P. **Análise Dinâmica em Passarela Sujeita à Movimentação Humana**. 2009. 60 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Os problemas de vibrações tornam-se cada vez mais importantes devido à frequente necessidade de se otimizar os projetos estruturais. Com a disseminação dos materiais de construção de alta resistência surgem projetos com vãos maiores e reduzidas seções. Isso gera elementos mais esbeltos e contendo mais juntas de dilatação ou soldas, o que os torna mais flexíveis. Houve, ainda, mudanças na natureza e na intensidade das cargas atuantes, como a movimentação de veículos de grande porte, a utilização de pesados equipamentos vibratórios em indústrias ou a ação das torcidas organizadas em passarelas de acesso aos estádios e arquibancadas. Todos esses fatores são, portanto, motivos para uma análise dinâmica. Dentro dos problemas dinâmicos apresentados na Engenharia Estrutural, ocupam lugar de destaque aqueles produzidos por atividades humanas como caminhar, correr e pular, que são particularmente importantes em estruturas como passarelas para pedestres. Dessa forma, o presente trabalho visa determinar o comportamento teórico de uma passarela de pedestres, a ser construída sobre a rodovia BR-116, no município de Esteio, no Rio Grande do Sul, devido aos efeitos dinâmicos gerados pela movimentação humana a fim de avaliar seus prováveis níveis de conforto. Para tal, esta estrutura foi modelada pelo método dos elementos finitos e submetida à análise de vibração livre e forçada. As respostas estáticas e dinâmicas foram obtidas com a utilização do programa computacional SAP2000. Realizou-se a análise de vibração livre com o intuito de se encontrar as características dinâmicas, determinando, assim, seus primeiros modos e frequências naturais de vibração. Para a análise da vibração forçada, submeteu-se a passarela a carregamentos dinâmicos produzidos pela movimentação de pedestres caminhando, correndo e pulando. A partir disso, observou-se que a passarela possui alta flexibilidade, apresentando características desfavoráveis ao seu comportamento. Conseqüentemente, obteve-se uma resposta insatisfatória no que tange ao conforto dos usuários, ainda que a passarela de pedestres tenha sido considerada segura para os carregamentos estudados.

Palavras-chave: dinâmica; vibrações; ações induzidas pelo homem; passarelas de pedestres.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: passarela de pedestres de Esteio/RS.....	13
Figura 2: desenho esquemático das etapas da pesquisa.....	15
Figura 3: distribuição normal para a frequência de passo para uma caminhada normal...	19
Figura 4: função de carregamento durante o caminhar.....	21
Figura 5: função de carregamento durante o correr.....	23
Figura 6: função de carregamento durante o pular.....	24
Figura 7: limites de desconforto causado por vibrações em pisos de edifícios residenciais, escolares e comerciais devidas ao caminhar de pessoas.....	28
Figura 8: seção do vão central da passarela.....	37
Figura 9: planta de situação.....	38
Figura 10: corte longitudinal.....	39
Figura 11: detalhe da torre.....	40
Figura 12: modelo da passarela de pedestres no SAP2000.....	42
Figura 13: função do carregamento.....	48
Figura 14: aceleração vertical para uma pessoa caminhando.....	50
Figura 15: aceleração vertical para três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s.....	50
Figura 16: aceleração vertical para uma pessoa correndo.....	51
Figura 17: aceleração vertical para três pessoas correndo defasadas de 0,8 s.....	51
Figura 18: aceleração vertical para uma pessoa pulando.....	52
Figura 19: aceleração vertical para três pessoas pulando.....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: correlação entre os parâmetros $f_s$ , $v_s$ e $l_s$ .....	18
Quadro 2: frequência de passo durante a caminhada.....	19
Quadro 3: valores de razão de amortecimento para passarelas de pedestres.....	31
Quadro 4: locação da passarela de Esteio.....	36
Quadro 5: característica dos materiais empregados na construção da passarela de pedestres.....	36
Quadro 6: resultados da análise de vibração livre.....	43
Quadro 7: caracterização dos carregamentos utilizados na modelagem numérica.....	48
Quadro 8: valores máximos de aceleração, velocidade e deslocamento.....	53
Quadro 9: acelerações relativas para cada regulamento.....	54
Quadro 10: deslocamentos relativos.....	55

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	12
2.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
2.2 OBJETIVO PRINCIPAL .....	12
2.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS .....	12
2.4 HIPÓTESES .....	13
2.5 DELIMITAÇÕES .....	14
2.6 LIMITAÇÕES .....	14
2.7 DELINEAMENTO .....	14
<b>3 VIBRAÇÕES DEVIDAS ÀS ATIVIDADES HUMANAS</b> .....	17
3.1 CAMINHAR .....	18
3.2 CORRER .....	21
3.3 PULAR .....	23
<b>4 AÇÕES DINÂMICAS INDUZIDAS POR PESSOAS: REGULAMENTOS</b> .....	25
4.1 NBR 6118: PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO .....	25
4.2 NBR 7188: CARGA MÓVEL EM PONTE RODOVIÁRIA E PASSARELA DE PEDESTRE .....	26
4.3 NBR 8800: PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE AÇO DE EDIFÍCIOS .....	27
4.4 EUROCODE 1: AÇÕES SOBRE AS ESTRUTURAS .....	29
4.5 CEB 209: PROBLEMAS DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS .....	30
4.6 AFGC: PASSARELAS DE PEDESTRES .....	31
<b>5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA</b> .....	33
<b>6 MODELO NUMÉRICO ANALISADO</b> .....	35
6.1 DESCRIÇÃO DA PASSARELA DE PEDESTRES .....	35
6.2 MODELO DA PASSARELA DE PEDESTRES NO SAP2000 .....	41
<b>7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	43
7.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO LIVRE .....	43
7.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO FORÇADA .....	46
<b>8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	57
REFERÊNCIAS .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

Com o constante avanço na resistência dos materiais empregados na construção civil têm-se estruturas cada vez mais esbeltas e, com isso, mais flexíveis, o que as torna mais suscetíveis às ações dinâmicas. Além disso, a diminuição do amortecimento estrutural e a mudança na natureza e na intensidade das cargas contribuem para esse novo contexto.

A movimentação humana, através do ato de caminhar, de correr ou de pular, impõe esforços dinâmicos aos elementos estruturais. Tal comportamento está particularmente presente em passarelas de pedestres, onde estes esforços podem gerar um desempenho insatisfatório.

Cabe salientar que, geralmente, as passarelas são projetadas para resistir à ação de cargas estáticas, sem considerar características peculiares como a de pessoas em movimento. Além disso, é importante destacar o elevado número destas estruturas que tem apresentado alguma forma de dano devido às cargas dinâmicas.

Felizmente, a evolução computacional permite ao projetista estimar com crescente facilidade e precisão o comportamento das estruturas sujeitas aos carregamentos dinâmicos, ao mesmo tempo que exige que o engenheiro civil conheça consideravelmente essa área.

O presente trabalho está dividido em 8 capítulos com a finalidade de apresentar de forma clara o estudo realizado. Neste primeiro capítulo, estão apresentadas as considerações iniciais e a estrutura como o trabalho está organizado.

O capítulo 2 apresenta o método de pesquisa, onde são descritos o problema de pesquisa, os objetivos principais e secundários, a hipótese formulada, as delimitações, as limitações e o delineamento das etapas do trabalho.

No capítulo 3, é apresentada uma revisão bibliográfica relativa aos carregamentos dinâmicos induzidos pelo homem, onde são descritas as ações de pessoas caminhando, correndo e pulando.

No capítulo 4, são listados regulamentos nacionais e internacionais relativos ao projeto de passarelas de pedestres e suas recomendações quanto aos valores de vibração permitidos nas estruturas relativos ao critério de conforto.

O capítulo 5 apresenta a formulação matemática utilizada para a determinação dos modos de vibração, frequências naturais e a resposta de uma estrutura submetida a um carregamento qualquer.

No capítulo 6, são feitas a apresentação da passarela de pedestres estudada e a descrição do modelo computacional adotado em elementos finitos através do programa SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2005).

No capítulo 7, são expostos os resultados das análises de vibração livre e forçada e são feitas as considerações relativas às cargas dinâmicas induzidas por pedestres na passarela.

Por fim, no capítulo 8, encontram-se as considerações finais e algumas propostas para trabalhos futuros.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

O método de pesquisa aplicado baseia-se nas etapas da pesquisa científica com a definição do problema de pesquisa, objetivos, hipóteses, delimitações, limitações e delineamento.

### **2.1 PROBLEMA DE PESQUISA**

A presente pesquisa visa responder ao seguinte questionamento: a passarela em estudo, potencialmente suscetível às ações dinâmicas devidas à movimentação de pedestres, se comportará de forma satisfatória quanto ao conforto?

### **2.2 OBJETIVO PRINCIPAL**

Como objetivo principal, tem-se a verificação do comportamento da passarela devido às ações geradas por pedestres, avaliando, assim, seus níveis teóricos de conforto.

### **2.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS**

Além do objetivo principal, são apontados objetivos secundários necessários para a conclusão do projeto. Sejam eles:

- a) caracterização das cargas dinâmicas atuantes em passarelas de pedestres produzidas pela ação humana;
- b) definição dos limites aceitáveis de conforto para a utilização de passarelas de pedestres;
- c) levantamento das normas reguladoras no que tange a obrigatoriedade do estudo dinâmico em passarelas de pedestres;
- d) busca da formulação matemática necessária para o entendimento do fenômeno de comportamento dinâmico.

## 2.4 HIPÓTESE

Com o intuito de responder o problema de pesquisa, formula-se a hipótese de que a ausência de um estudo dinâmico da passarela de pedestres, em fase de projeto, resulta em deficiências no que tange ao conforto dos usuários.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho está delimitado pela escolha da estrutura, ou seja, é relativo à passarela de pedestres estaiada, em concreto pré-moldado, protendida a ser construída no município de Esteio, no estado do Rio Grande do Sul, na rodovia BR-116, km 256. Uma perspectiva da passarela de pedestres pode ser visualizada na figura 1.

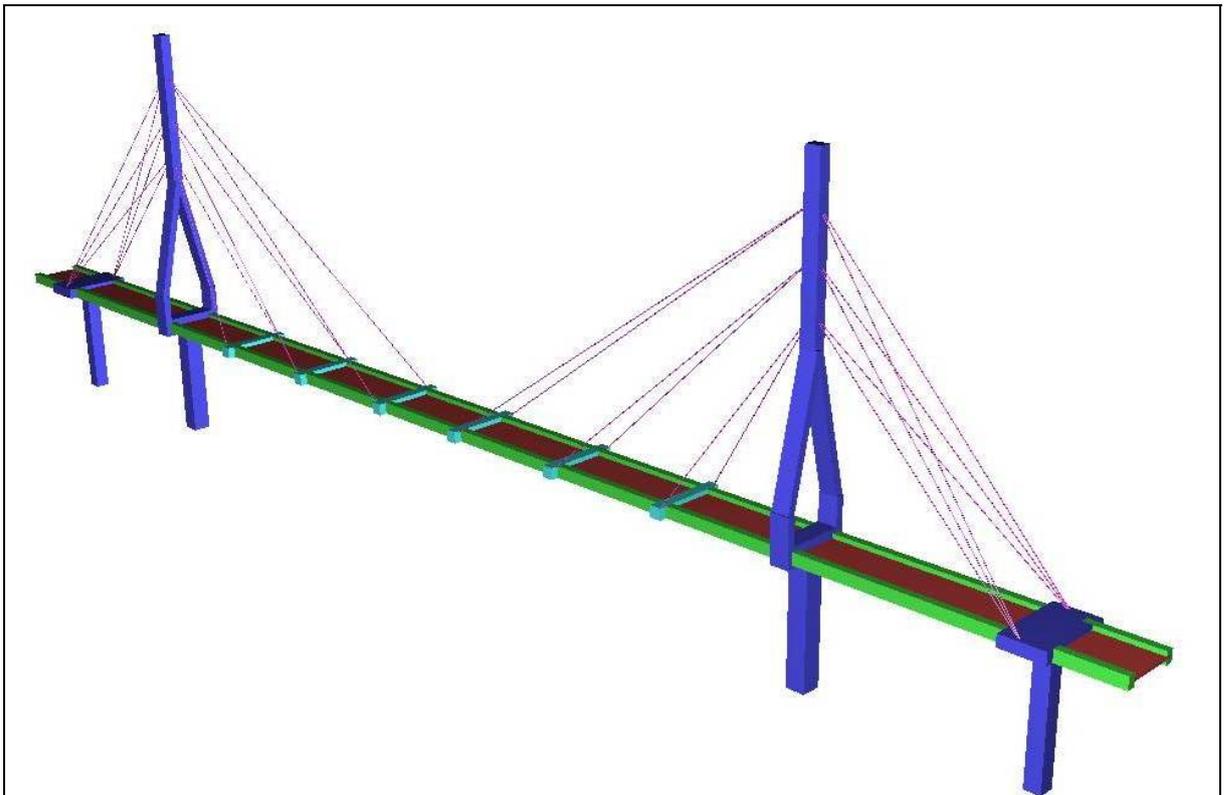


Figura 1: passarela de pedestres de Esteio/RS

## 2.6 LIMITAÇÕES

Este projeto apresenta algumas limitações, a constar:

- a) o estudo visa à caracterização do comportamento da passarela de pedestres sujeita às ações produzidas pela movimentação humana como caminhar, correr e pular. Não foram considerados demais carregamentos dinâmicos como vento, colisão de veículos, explosões ou sismos;
- b) tendo em vista que não se teve acesso à memória de cálculo, somente às plantas de anteprojeto, os dados ausentes nestas foram arbitrados;
- c) o movimento de pessoas produz forças nas direções horizontal e vertical. As primeiras foram desprezadas, no presente estudo, dada a sua pequena magnitude em comparação com as forças verticais;
- d) não foi considerado o efeito de fadiga.

## 2.7 DELINEAMENTO

No delineamento, são apresentadas as etapas executadas durante o andamento do projeto, um desenho esquemático representando a relação entre estas etapas, bem como o detalhamento de cada uma delas. As etapas são listadas conforme segue:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição das cargas;
- c) caracterização da estrutura;
- d) formulação matemática;
- e) estudo de normas;
- f) modelagem;
- g) análise final;
- h) conclusões.

O desenho esquemático da figura 2 apresenta as relações entre cada uma destas etapas.

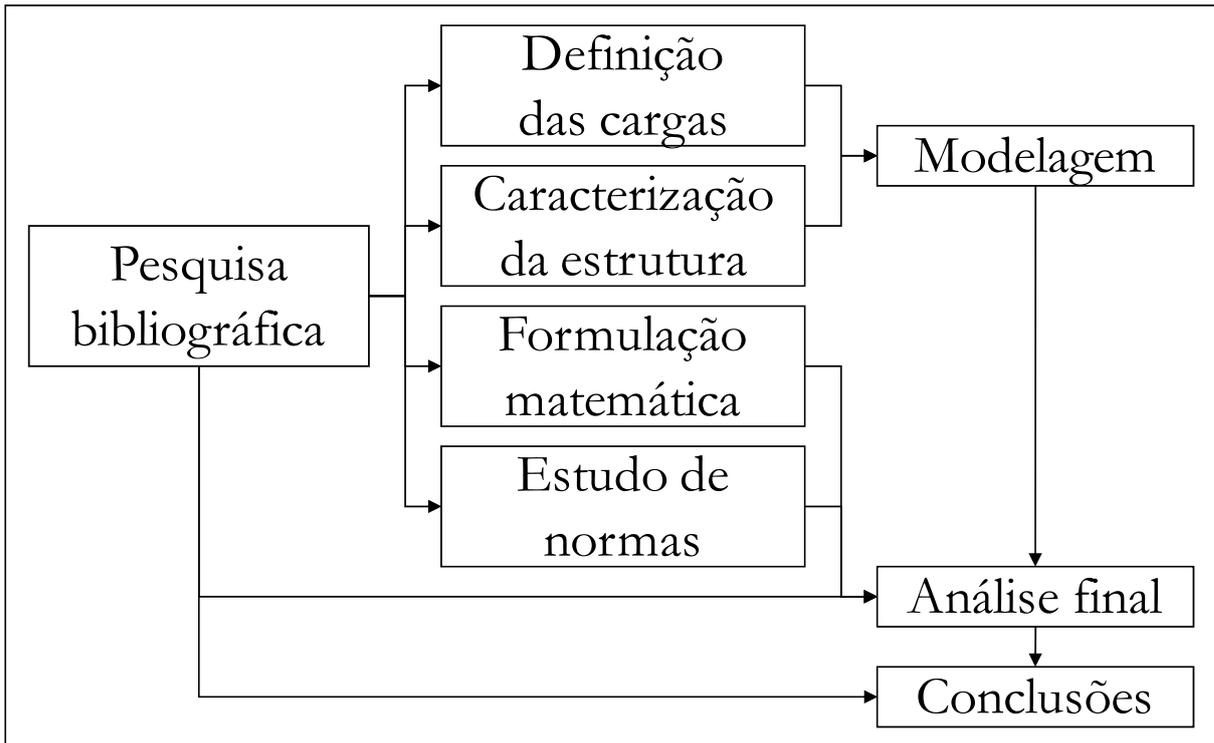


Figura 2: desenho esquemático das etapas da pesquisa

Inicialmente, realizou-se a pesquisa bibliográfica, a qual serviu de base para as demais etapas do projeto de pesquisa. Esta fase compreende, principalmente, a caracterização do carregamento dinâmico devido ao movimento de pedestres, o levantamento dos regulamentos relativos ao projeto de passarelas de pedestres quanto às cargas e limites de conforto e a busca pela formulação matemática necessária ao seu entendimento.

A caracterização das cargas dinâmicas foi baseada em trabalhos de diversos autores, entre os quais foram selecionados os principais tipos de cargas geradas pela movimentação humana aplicáveis ao estudo e pôde-se descrever matematicamente este carregamento. As cargas descritas são as relativas às ações de caminhar, de correr e de pular.

Em posse das plantas de anteprojeto da passarela de pedestres, onde constam as dimensões dos elementos que a compõem, as características dos materiais empregados e demais informações, foi possível caracterizar a estrutura.

Após terem sido definidos os carregamentos dinâmicos e conhecendo-se a estrutura, partiu-se para a modelagem da passarela de pedestres em um programa computacional de elementos finitos. Fez-se um modelo estrutural teórico e aplicaram-se os carregamentos conforme previsto.

Em paralelo, procurou-se o embasamento matemático necessário para a obtenção das respostas de vibração livre e para os resultados dos carregamentos dinâmicos.

Realizou-se, ainda, o levantamento de algumas Normas Técnicas e guias nacionais e internacionais referentes ao projeto de passarelas de pedestres e valores limites para a aceitabilidade quanto ao conforto humano.

Com a resposta do modelo computacional e baseado na regulamentação pôde-se avaliar o potencial comportamento da passarela de pedestres quanto ao conforto de seus usuários.

Finalmente, foram apresentadas as considerações finais e sugeridos temas para trabalhos futuros.

### 3 VIBRAÇÕES DEVIDAS ÀS ATIVIDADES HUMANAS

A mobilidade humana induz diferentes carregamentos dinâmicos às diferentes estruturas. Como exemplo disso, pode-se citar torcidas comemorando em arquibancadas de estádios, público em salas de concerto, mergulhadores durante o salto em um trampolim, pessoas em salões de dança, ginastas em academias e pedestres caminhando, correndo ou pulando em passarelas.

Cargas estáticas são, por definição, cargas constantes ou muito pouco variáveis no tempo. Por outro lado, cargas dinâmicas, que são função do tempo, podem ser classificadas em quatro categorias:

- a) cargas harmônicas ou puramente senoidais;
- b) cargas periódicas que se repetem a intervalos regulares de tempo chamados períodos;
- c) cargas aleatórias que variam de forma arbitrária;
- d) cargas de impulsão que caracterizam as cargas de muito curta duração.

De forma aproximada, a ação de pedestres é uma ação variável no tempo e que pode ser classificada na categoria de cargas periódicas (L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL, 2006).

A ciência que estuda os fundamentos mecânicos das atividades biológicas, em especial as musculares é conhecida como Biomecânica. Esta procura determinar padrões que reproduzam características individuais ou de grupos específicos. A tarefa de ajustar equilíbrio e postura durante o caminhar é extremamente complexa. Vários modelos foram propostos por diversos autores a fim de analisar os dados cinéticos e cinemáticos no corpo humano (BALTAR, 2000).

Pode-se caracterizar o carregamento devido ao movimento de pessoas, caminhando ou correndo, através de sua razão de passo ( $fs$ ), velocidade de avanço ( $vs$ ), comprimento do passo ( $ls$ ) e pela função de carregamento com o tempo (WHEELER, 1982). O quadro 1 mostra valores médios para essas correlações.

<b>Tipo de Movimento</b>	<b><math>f_s</math> (Hz)</b>	<b><math>v_s</math> (m/s)</b>	<b><math>l_s</math> (m)</b>
Caminhada lenta	~ 1,7	1,1	0,60
Caminhada normal	~ 2,0	1,5	0,75
Caminhada rápida	~ 2,3	2,2	1,00
Corrida lenta	~ 2,5	3,3	1,30
Corrida Rápida	> 3,2	5,5	1,75

Quadro 1: correlação entre os parâmetros  $f_s$ ,  $v_s$  e  $l_s$  (WHEELER, 1982)

Além destes carregamentos dinâmicos, pode ser conveniente estudar as cargas devidas à ação de pessoas pulando. Quando se pula, são geradas cargas de grande magnitude e estas podem ser particularmente prejudiciais às estruturas mais flexíveis. Como exemplo disso, pode-se citar um tipo de ação de vandalismo, no qual uma ou mais pessoas pulam no centro do vão de uma passarela de pedestres visando provocar dano.

Neste ponto do trabalho, descrevem-se os modelos matemáticos dos principais carregamentos dinâmicos para uma passarela de pedestres gerados pela movimentação humana. Sejam eles: caminhar, correr e pular.

### 3.1 CAMINHAR

Durante a caminhada ao menos um dos dois pés do pedestre está em contato com o piso sobre o qual ele se movimenta, isto é, antes que se tire a ponta do primeiro pé do chão, o calcanhar do segundo já voltou a encostar o piso.

A frequência dos passos durante o ato de caminhar foi avaliada experimentalmente por diversos autores, conforme compilado no quadro 2 e possui um valor próximo de 2 Hz.

<b>Autor</b>	<b>Frequência</b>
Leonard (1966)	1,7 a 2,3 Hz
Matsumoto et al. (1972)	1,99 Hz e desvio padrão de 0,173 Hz (505 pessoas)
Bachmann et al. (1987)	1,6 a 2,4 Hz
Kerr e Bishop (2001)	média de 1,9 Hz (40 pessoas)
Živanović et al. (2007)	1,87 Hz e desvio padrão de 0,186 Hz (939 pessoas)

Quadro 2: frequência de passo durante a caminhada  
(baseado em BODGI, 2008, p. 30)

A figura 3 mostra a curva de distribuição normal das frequências após a experiência realizada por Matsumoto et al. (1972) com 505 pessoas, onde se obteve uma frequência média de passo para uma caminhada normal de 1,99 passos por segundo (1,99 Hz) e um desvio padrão de 0,173 Hz.

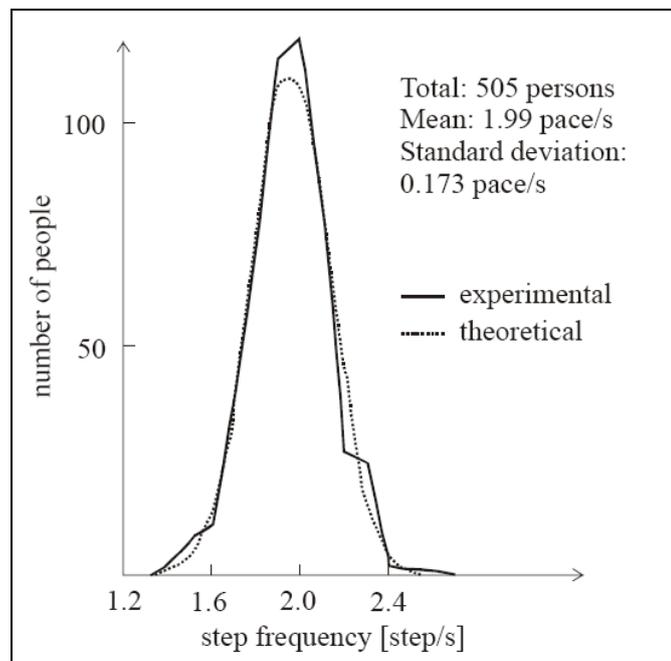


Figura 3: distribuição normal para a frequência de passo para uma caminhada normal (MATSUMOTO et al., 1972)

Pode-se, ainda, dizer que, 50% das pessoas caminha com uma frequência entre 1,9 e 2,1 Hz ou, alternativamente, que 95% das pessoas caminha com uma frequência entre 1,65 e 2,35 Hz (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, n. 209, 1991).

Além da frequência de passo, é importante que se conheça a forma do carregamento dinâmico. Este carregamento pode ser modelado através de uma função periódica em séries de Fourier (BACHMANN; AMMANN, 1987). Retendo-se os três primeiros termos da série obtém-se a fórmula 1:

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) + \Delta G_2 \cdot \text{sen}(4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_2) + \Delta G_3 \cdot \text{sen}(6 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_3) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$F_p(t)$  - função de carga do passo variando no tempo;

$G$  - peso da pessoa;

$f_s$  - razão de passo;

$\Delta G_n$  - componente de carga (amplitude) relativa ao n-ésimo harmônico;

$\varphi_n$  - ângulo de fase do n-ésimo harmônico relativo ao primeiro harmônico;

$n$  - número do n-ésimo harmônico.

Bachmann e Ammann (1987) sugerem a utilização dos seguintes valores para os parâmetros da função  $F_p(t)$ :

$$G = 800 \text{ N}$$

$$f_s = 2,0 \text{ Hz}$$

$$\Delta G_1 = 0,4 \cdot G$$

$$\Delta G_2 = \Delta G_3 = 0,1 \cdot G$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$$

Adotando-se estes parâmetros na fórmula 1, para um período, obtém-se o gráfico da figura 4.

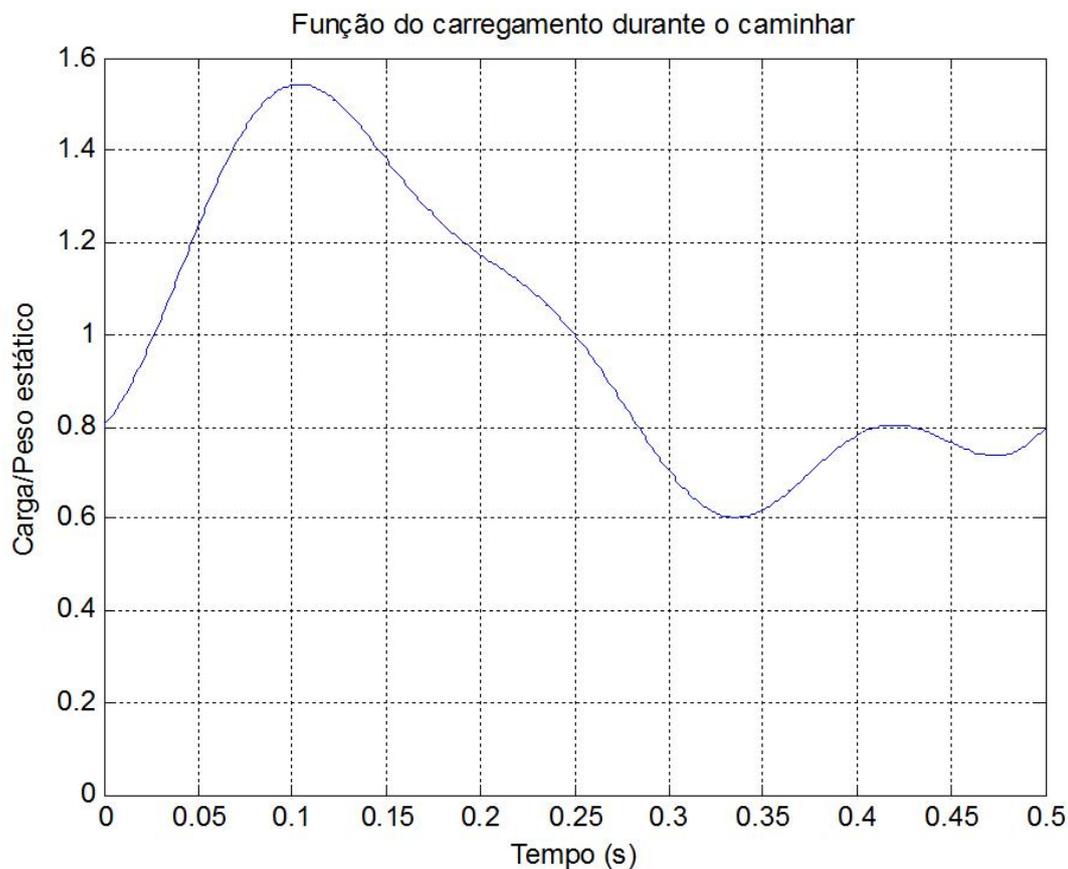


Figura 4: função de carregamento durante o caminhar

Observam-se, no gráfico, dois picos de força correspondentes, respectivamente, ao contato do calcanhar e da ponta do pé com o chão. Nota-se, ainda, no primeiro pico de força, que o efeito de caminhar, assim parametrizado, gera um carregamento aproximadamente 50% maior que o peso de uma pessoa parada.

### 3.2 CORRER

Quando se aumenta a velocidade da caminhada, os picos da função carga x tempo da figura 4 aproximam-se até tornarem-se um só. Na corrida, onde os pés ficam temporariamente sem contato com o solo, observa-se uma descontinuidade da carga (BALTAR, 2000).

A função carga x tempo para corrida pode ser expressa por uma sequência de impulsos semissenoidais (WHEELER, 1982). Para um período, a função é dada pelas fórmulas 2 e 3:

$$F_p(t) = k_p \cdot G \cdot \text{sen}\left(\pi \cdot \frac{t}{t_p}\right) \quad \text{para } t \leq t_p \quad (\text{fórmula 2})$$

$$F_p(t) = 0 \quad \text{para } t_p \leq t \leq T_p \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

$k_p$  - carga dinâmica máxima;

$G$  - peso da pessoa;

$t_p$  - tempo de contato;

$T_p$  - período do passo.

Baltar (2000) sugere os seguintes valores a serem adotados para uma pessoa correndo com uma frequência de passo de 2,50 Hz, um passo de 1,30 m de comprimento e uma velocidade de 3,25m/s:

$$k_p = 2,1875$$

$$G = 800 \text{ N}$$

$$t_p = 0,275 \text{ s}$$

Para um período, estes parâmetros inseridos nas fórmulas 2 e 3, geram o gráfico da figura 5.

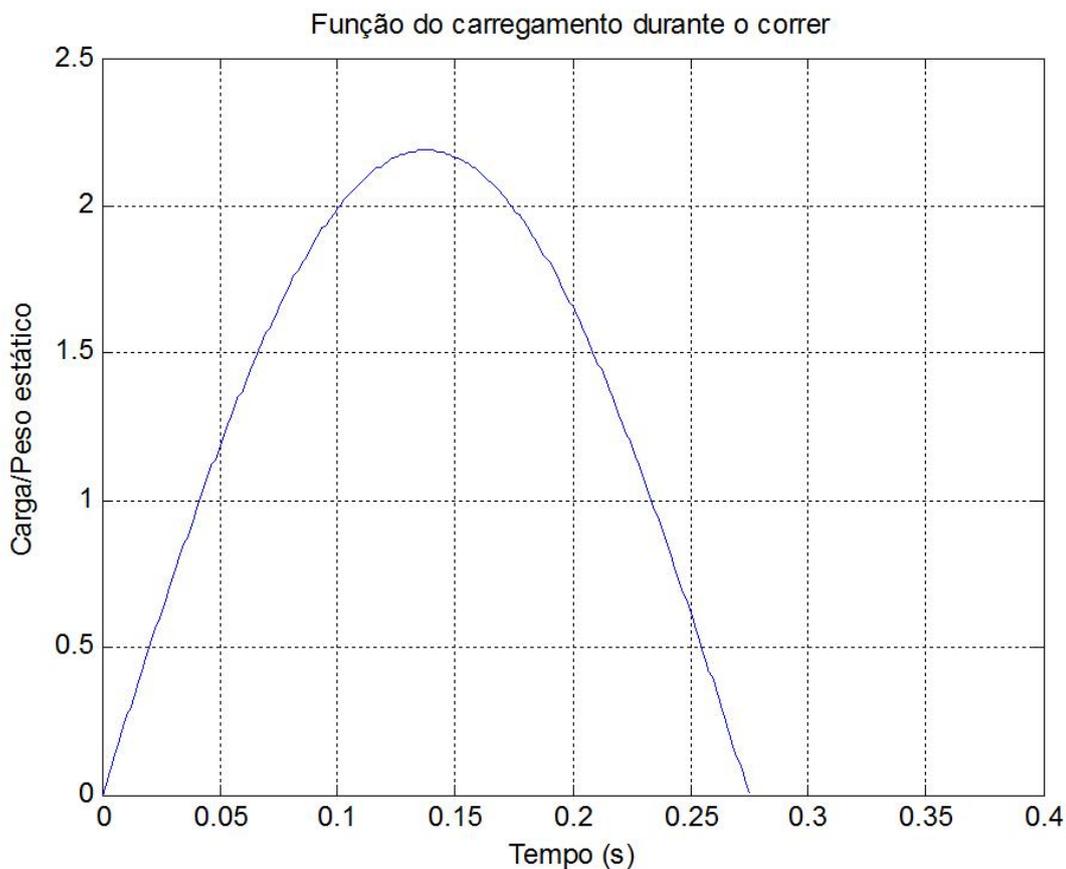


Figura 5: função de carregamento durante o correr

Tornam-se claras, a partir do gráfico, a presença de um único pico de força e a descontinuidade do carregamento. A amplificação da carga dinâmica é da ordem de 2,2 para o ato de correr, isto é, uma pessoa correndo com as características abordadas produz um carregamento consideravelmente maior (120%) do que a mesma pessoa estaticamente.

### 3.3 PULAR

Diferentemente de caminhar ou correr, a ação de pular, aqui estudada, refere-se unicamente ao deslocamento vertical, ou seja, diz respeito a uma pessoa pulando sobre um mesmo ponto, sem avançar sua posição.

Pode-se adotar, neste caso, a mesma formulação utilizada para o correr, alterando-se somente seus parâmetros. Para uma pessoa pulando com uma frequência de 2,0 Hz, adotam-se os seguintes valores (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1991):

$$k_p = 6,0$$

$$G = 800 \text{ N}$$

$$t_p = 0,15 \text{ s}$$

Aplicando-se estes valores nas fórmulas 2 e 3, obtém-se o gráfico da figura 6.

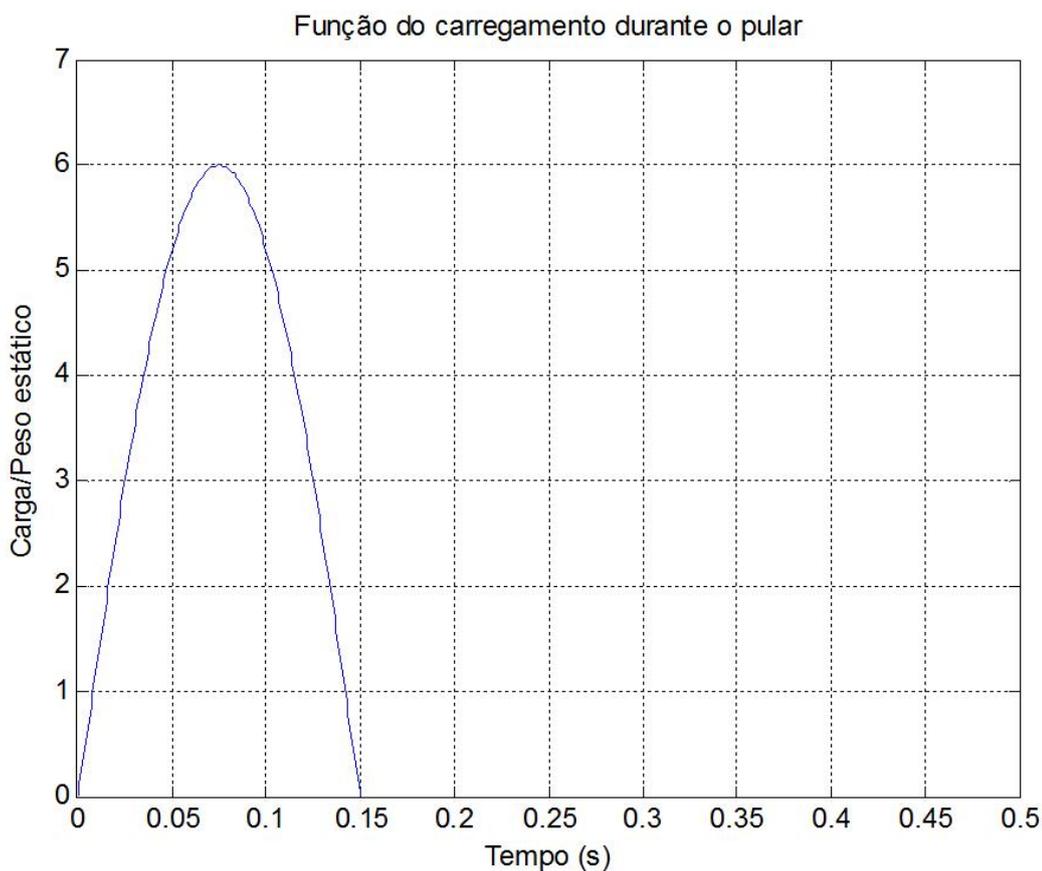


Figura 6: função de carregamento durante o pular

A partir da figura, pode-se observar o reduzido tempo de contato dos pés com o solo, assim como a amplificação da força em 6 vezes.

## **4 AÇÕES DINÂMICAS INDUZIDAS POR PESSOAS: REGULAMENTOS**

O presente capítulo trata do problema de vibrações em passarelas de pedestres devidas à movimentação humana segundo Normas Técnicas e Guias Nacionais e Internacionais. Reunem-se, aqui, as prescrições existentes nestes documentos relativas ao carregamento dinâmico gerado por pedestres, faixas de frequências naturais a serem evitadas, valores de amortecimento, bem como limites de conforto, para o pedestre, relacionados às vibrações.

Estão listados a seguir, os Regulamentos estudados neste trabalho:

- a) Normas Técnicas brasileiras,
  - NBR 6118/2003: projeto de estruturas de concreto armado;
  - NBR 7188/1982: carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre;
  - NBR 8800/1986: projeto e execução de estruturas de aço de edifícios;
- b) Normas Técnicas e Guias internacionais,
  - Eurocode 1/2004: ações sobre as estruturas;
  - CEB 209/1991: problemas de vibrações em estruturas;
  - AFGC/2006: passarelas de pedestres.

### **4.1 NBR 6118/2003: PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

A NBR 6118 fixa os requisitos básicos exigíveis para projeto de estruturas em concreto simples, armado e protendido, excluídas aquelas em que se empregam concreto leve, pesado ou outros especiais. Além disso, estabelece os requisitos gerais a serem atendidos pelo projeto como um todo, bem como os requisitos específicos relativos a cada uma de suas etapas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Esta Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 1) define que: “As ações dinâmicas podem provocar estados limites de serviço e estados limites últimos

por vibração excessiva ou por fadiga dos materiais.”. Visando assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, esta Norma recomenda afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura ( $f$ ) da frequência crítica ( $f_{crit}$ ), que depende da destinação da respectiva edificação (fórmula 4):

$$f > 1,2.f_{crit} \quad \text{(fórmula 4)}$$

O comportamento das estruturas sujeitas a ações dinâmicas cíclicas que originam vibrações pode ser modificado por meio de alterações em alguns fatores, como ações dinâmicas, frequência natural (pela mudança da rigidez da estrutura ou da massa em vibração) e aumento das características de amortecimento.

Na falta de valores determinados experimentalmente, pode-se adotar a frequência crítica ( $f_{crit}$ ) de 1,6 a 4,5 Hz para passarelas de pedestres, conforme indicado nesta Norma.

#### 4.2 NBR 7188/1982: CARGA MÓVEL EM PONTE RODOVIÁRIA E PASSARELA DE PEDESTRE

A NBR 7188 fixa as condições exigíveis de cargas móveis a serem consideradas no cálculo das pontes rodoviárias e das passarelas de pedestres (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982).

Define passarela de pedestres como “toda e qualquer estrutura destinada a permitir a transposição, por pedestres, de um obstáculo natural ou artificial.” e carga móvel como “sistema de cargas representativo dos valores característicos dos carregamentos provenientes do tráfego a que a estrutura está sujeita em serviço”. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, p.1).

Passarelas para pedestres são, pela Norma, classificadas em uma classe única onde a carga móvel é uma carga uniformemente distribuída de 5 kN/m<sup>2</sup>, não majorada. Ao considerar esta simplificação do carregamento móvel como uma carga uniformemente distribuída, a Norma

faz uma análise estática equivalente, isto é, despreza o comportamento dinâmico produzido pela movimentação das pessoas.

### 4.3 NBR 8800/1986: PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE AÇO DE EDIFÍCIOS

A NBR 8800, baseada no método dos estados limites, fixa as condições exigíveis que devem ser obedecidas no projeto, na execução e na inspeção de estruturas de aço para edifícios, executadas com perfis laminados ou soldados não híbridos e com ligações feitas por parafusos ou soldas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986). No anexo N desta Norma (Vibrações em Pisos) são apresentados alguns limites de desempenho relativos ao desconforto tolerável devidos às vibrações.

Na faixa de frequência entre 2 e 8 Hz, para vibrações senoidais contínuas, na qual as pessoas são mais sensíveis à vibração, o limite corresponde a cerca de 0,5% da aceleração da gravidade ( $g$ ), isto é, aproximadamente  $0,049 \text{ m/s}^2$ , conforme a figura 7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986).

Segundo esta Norma, o limite de projeto para vibrações transientes, em termos de aceleração de pico inicial, eleva-se com o aumento do amortecimento. Isto se deve ao fato de as pessoas considerarem as vibrações contínuas muito mais desconfortáveis do que as vibrações que rapidamente se extinguem.

Conforme esta Norma, vibrações contínuas causadas por atividades humanas podem ser um problema para pisos com grandes vãos. Pessoas sozinhas ou em grupo podem criar forças periódicas com frequência na faixa de 1 a 4 Hz. Assim, frequências naturais menores que 5 Hz devem ser evitadas em pisos. Para atividades muito repetitivas, é possível ter alguma ressonância quando o impacto rítmico ocorrer a cada dois ciclos de vibração do piso e, assim sendo, é recomendável que a frequência destes pisos seja no mínimo 10 Hz, a menos que haja um considerável amortecimento. A NBR 8800 ainda indica que “vibrações indesejáveis devidas ao impacto do caminhar de pessoas podem ocorrer em sistemas de pisos com pouco amortecimento, em residências, escolas, escritórios e ocupações similares” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986, p. 1).

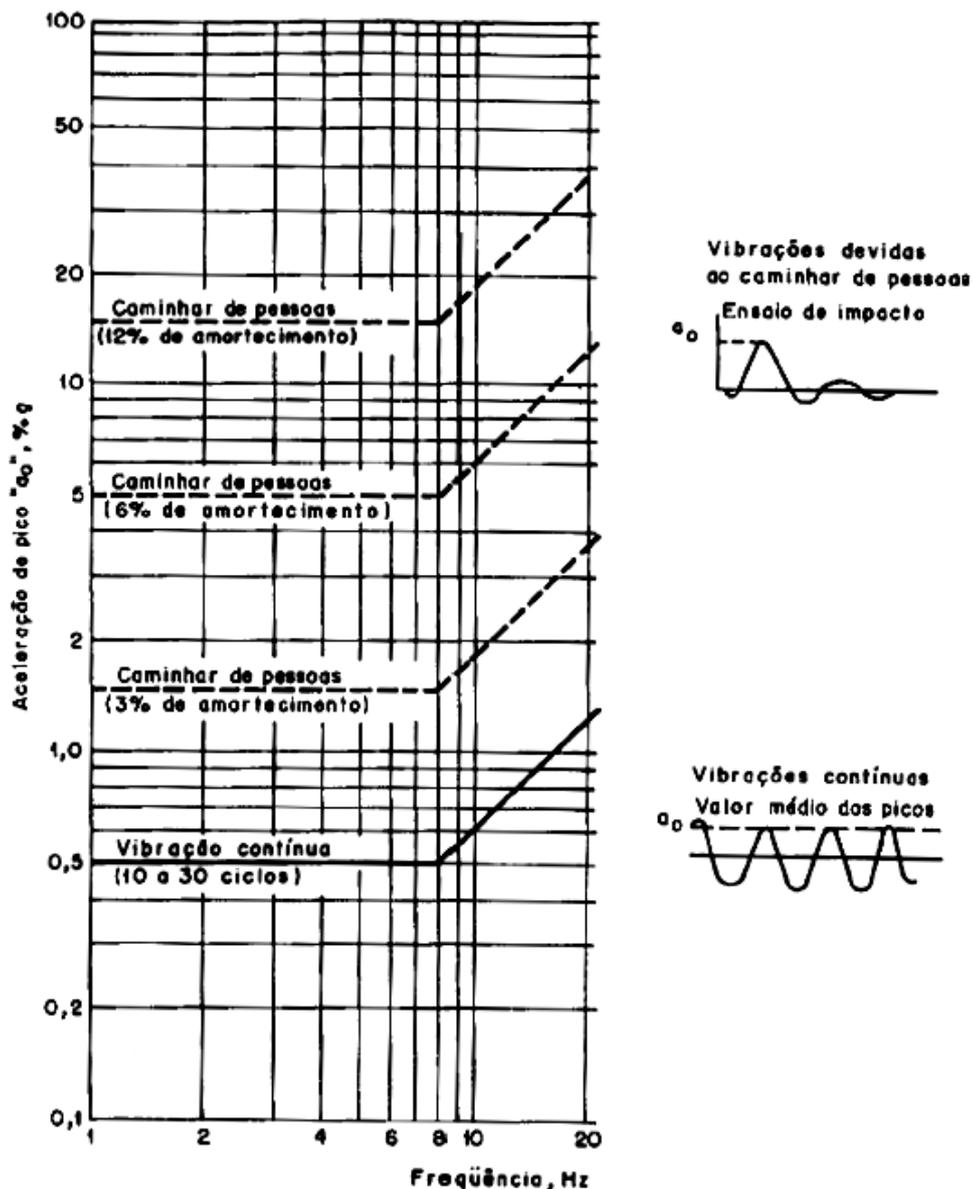


Figura 7: limites de desconforto causado por vibrações em pisos de edifícios residenciais, escolares e comerciais devidas ao caminhar de pessoas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986)

Para se avaliar a aceitabilidade de uma dada vibração, segundo a Norma, é necessário conhecer a frequência, o amortecimento e a aceleração de pico devidos ao impacto do calcanhar das pessoas. Caso não seja possível fazer um projeto com base em ensaios, tais parâmetros devem ser calculados como a seguir.

A frequência natural ( $f_1$ ), em Hz, pode ser estimada para um sistema simplesmente apoiado, com vigas em uma só direção pela fórmula 5:

$$f_1 = 1,57 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_{tr}}{m \cdot L^4}} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$f_1$  - frequência natural;

$E$  - módulo de elasticidade do aço;

$I_{tr}$  - momento de inércia da seção transformada (concreto transformado em aço) considerando a largura efetiva do concreto igual ao espaçamento entre vigas;

$L$  - vão da viga;

$m$  - massa da seção considerada, por unidade de comprimento, ao longo da vão.

Ao contrário da frequência, o amortecimento é, em geral, mais difícil de ser estimado. Pela Norma, um piso em aço e concreto, sem divisórias, possui amortecimento da ordem de 3 a 4% do amortecimento crítico e de cerca de 2% se a construção for mista com interação total.

#### 4.4 EUROCODE 1/2004: AÇÕES SOBRE AS ESTRUTURAS

Esta Norma Técnica, constituindo uma parte do Eurocode 1, define as ações sobre pontes devidas ao tráfego rodoviário, aos pedestres e ao tráfego ferroviário, compreendidos, quando for o caso, os efeitos dinâmicos e as forças centrífugas, as ações de frenagem, de acelerações e acidentais (L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, 2004).

Para o cálculo de passarelas de pedestres, esta Norma indica ser conveniente definir uma carga uniformemente repartida  $q_{fk}$  aplicada unicamente às partes desfavoráveis da superfície de influência, longitudinal e transversalmente. O modelo de carregamento de multidão (correspondente a  $q_{fk} = 5,0 \text{ kN/m}^2$ ) pode ser especificado a fim de cobrir os efeitos estáticos

de uma multidão densa contínua quando tal risco existe. Onde a aplicação deste modelo não é requerido, o valor recomendado é dado pela fórmula 6:

$$q_{fk} = 2,0 - \frac{120}{L - 30} \text{ kN} / \text{m}^2; 2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 \leq q_{fk} \leq 5,0 \text{ kN} / \text{m}^2 \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

$L$  - comprimento em metros.

Quanto à adoção de modelos dinâmicos de cargas devidas aos pedestres, esta Norma indica que:

- a) segundo as características dinâmicas da construção, convém determinar as frequências próprias (correspondentes às vibrações verticais, horizontais e de torsão) da estrutura principal do tabuleiro baseado em um modelo estrutural apropriado;
- b) as forças exercidas pelos pedestres com uma frequência idêntica a uma das frequências próprias da construção podem provocar ressonância e devem ser levadas em consideração nas verificações de estado limite relacionadas às vibrações;
- c) convém definir critérios de conforto assim como modelos dinâmicos apropriados para as cargas devidas aos pedestres.

#### 4.5 CEB 209/1991: PROBLEMAS DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS

Este Guia trata de forma prática o problema de vibrações em estruturas. Fornece parâmetros e procedimentos a serem adotados em fase de projeto e, quando for o caso, medidas corretivas para se minimizarem os efeitos indesejáveis decorrentes da ausência de um estudo dinâmico.

As modernas passarelas de pedestres estruturalmente eficientes, particularmente em aço e em concreto protendido, possuem um amortecimento muito baixo. Contudo, não é possível prever com a precisão adequada o valor deste amortecimento. O uso de experiências passadas permanece como o melhor guia para os projetos. Dados de 43 passarelas de pedestres no Reino Unido mostram valores para a razão de amortecimento viscoso (medido para o nível de

vibração causado por um pedestre caminhando na frequência natural da estrutura) conforme quadro 3 (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1991).

<b>Tipo de construção</b>	<b>mínimo</b>	<b>médio</b>	<b>máximo</b>
Concreto armado	0,008	0,013	0,020
Concreto protendido	0,005	0,010	0,017
Compósito	0,003	0,006	-
Aço	0,002	0,004	-

Quadro 3: valores de razão de amortecimento para passarelas de pedestres (baseado em COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1991)

Como o amortecimento de passarelas de pedestres é naturalmente muito baixo, o Comité Euro-Internacional du Béton (1991) recomenda a adoção de uma fina camada de asfalto de alta viscosidade na superfície de contato do pedestre com a passarela, salientando ser este o meio mais econômico e apropriado de se reduzir o efeito de impacto do pedestre na estrutura.

São indicados, ainda, neste Guia, alguns valores toleráveis de aceleração vertical. Para uma frequência de 2 Hz, estes valores ficam entre 0,43 e 0,7 m/s<sup>2</sup>.

#### 4.6 AFGC/2006: PASSARELAS DE PEDESTRES

Este Guia tem por objetivo reunir conhecimento sobre o comportamento vibratório de passarelas sob a ação de pedestres e fornecer recomendações sobre a estratégia a ser adotada para concepção e dimensionamento destas estruturas (L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL, 2006).

Ressalta, ainda, a conveniência de se precisar a noção de conforto. Efetivamente, esta noção é fortemente subjetiva. Em particular:

- a) de um indivíduo para outro, as mesmas vibrações não são sentidas de uma mesma maneira;
- b) para um mesmo indivíduo, pode-se definir vários níveis,
  - da percepção das vibrações;
  - ligado a diferentes graus de desconforto (tolerável para uma curta duração, incômodo, inadmissível);
  - fixado relativamente às consequências que estas mesmas vibrações podem ter sobre a perda de equilíbrio ou mesmo sobre a saúde;
- c) além disso, estando em pé, sentado, em movimento ou não, um mesmo indivíduo pode ser sensível de maneiras diferentes às vibrações;
- d) é, também, conhecido que existe uma diferença entre as vibrações da estrutura e as realmente sentidas pelo pedestre. Por exemplo, o que é sentido pelo pedestre, depende particularmente de sua duração de exposição à vibração.

Além disso, afirma ser mais cômodo se basear naquilo que pode ser facilmente calculável ou mensurável. Assim, os níveis de vibração sentidos pelos pedestres são, geralmente, medidos em função do valor de pico da aceleração vertical, chamado  $a_{crit}$ . Este valor não deve ser ultrapassado para se respeitar o critério de conforto.

Ainda indica que, para vibrações verticais de frequência em torno de 2 Hz, valor usual de uma caminhada, parece haver um consenso entre diversos autores um valor de  $a_{crit} = 0,5$  a  $0,8$  m/s<sup>2</sup>.

## 5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Este capítulo apresenta a formulação matemática utilizada para se obterem as frequências e os modos de vibração.

A equação de equilíbrio para um sistema com  $n$  graus de liberdade submetido a carregamentos dinâmicos pode ser dada pela fórmula 7 (CLOUGH; PENZIEN, 2003):

$$M\ddot{v}(t) + C\dot{v}(t) + Kv(t) = F(t) \quad (\text{fórmula 7})$$

onde  $M$ ,  $C$  e  $K$  são respectivamente as matrizes de massa, de amortecimento e de rigidez do sistema, de dimensão  $N \times N$ ,  $v(t)$ ,  $\dot{v}(t)$  e  $\ddot{v}(t)$  representam, respectivamente, os vetores de deslocamentos, velocidades e acelerações generalizadas deste sistema, sendo  $F(t)$  o vetor de cargas generalizadas.

Segundo Clough e Penzien (2003), as equações de movimento para um sistema em vibração livre não amortecido, podem ser obtidas da fórmula 7, omitindo-se a matriz de amortecimento e o vetor de cargas aplicadas, resultando na fórmula 8:

$$M\ddot{v}(t) + Kv(t) = 0 \quad (\text{fórmula 8})$$

Para resolver a equação diferencial linear acima, assume-se como solução uma equação do tipo harmônico dada pela fórmula 9:

$$v(t) = v_0 \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

$v_0$  - vetor que representa a deformada do sistema (não dependente do tempo);

$\omega$  - frequência angular do movimento;

$\theta$  - ângulo de fase.

Substituindo-se a fórmula 9 na fórmula 8 e omitindo-se o termo em seno arbitrário, obtém-se a expressão da fórmula 10:

$$(K - \omega^2 M)v_0 = 0 \quad (\text{fórmula 10})$$

Para que esta equação linear e homogênea admita uma solução não-trivial ( $v_0 \neq 0$ ), é necessário que o determinante seja o indicado na fórmula 11:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (\text{fórmula 11})$$

O que conduz a um sistema de autovalores e autovetores, sendo  $\omega^2$  o autovalor e  $v_0$  o autovetor. A fórmula 11 representa uma equação algébrica em  $\omega^2$ , onde as suas raízes positivas ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N$ ) são as frequências naturais de vibração e o vetor  $v_0$  associado a cada uma das frequências corresponde fisicamente a um modo de vibração natural.

## 6 MODELO NUMÉRICO ANALISADO

Este capítulo descreve a passarela de pedestres estudada em termos de localização, dimensões das peças estruturais, materiais e propriedades empregados. Em seguida, detalha o modelo computacional adotado em função da geometria da estrutura e das cargas dinâmicas para as análises desejadas.

### 6.1 DESCRIÇÃO DA PASSARELA DE PEDESTRES

A estrutura estudada refere-se à passarela de pedestres a ser construída no município de Esteio, no estado do Rio Grande do Sul, sobre a rodovia BR-116. O projeto é composto por três vãos, sendo o central de 48,00 m e os extremos de 11,84 m, além de dois balanços de 4,20 m, totalizando 80,08 m. Em cada extremidade da passarela existem sete rampas de acesso intercaladas por seis patamares. Possui quatro pilares, sendo os dois externos de 6,12 m de altura e os dois centrais, torres de 23,47 m de altura. Em cada torre, são fixados seis estais para a sustentação do tabuleiro do vão central (através de transversinas de 0,60 m de largura, 0,60 m de altura e 3,90 m de comprimento) e seis para ancoragem nos pilares externos. A utilização dos cabos de estais permite a utilização de tabuleiros consideravelmente mais leves e, conseqüentemente, mais esbeltos. Os vãos são formados por duas longarinas de concreto protendido de 0,40 m de largura por 0,60 m de altura unidas pelo tabuleiro de concreto de 2,30 m de largura e 0,15 m de espessura, totalizando uma largura de 3,10 m.

Foi adotado, no modelo computacional, o valor médio da razão de amortecimento para passarelas de pedestres em concreto protendido igual a 0,010 (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1991).

Os dados sobre a localização da passarela de pedestres estudada podem ser visualizados no quadro 4.

<b>Localização</b>	
Rodovia	BR-116/RS
Lote	Único
Trecho	Divisa SC/RS – Jaguarão
Subtrecho	Entr. RS-118 (Sapucaia do Sul) / Entr. BR-386 (A) (Canoas)
Segmento	km 256,00

Quadro 4: locação da passarela de Esteio (baseado em BRASIL, 2007)

O quadro 5 caracteriza as propriedades dos materiais empregados no projeto da passarela de pedestres e seções dos cabos dos estais.

<b>Características dos materiais</b>	
Concreto da superestrutura	$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
Concreto dos blocos	$f_{ck} = 20 \text{ MPa}$
Cabos dos estais	Dywidag Ø32 mm (barras)
Cabos de protensão	Ø12,7 mm – CP-190RB
Aço	CA-50

Quadro 5: característica dos materiais empregados na construção da passarela de pedestres (baseado em BRASIL, 2007)

Neste ponto, são apresentadas, para uma clara compreensão da estrutura, as figuras:

- a) 8: seção do vão central da passarela;
- b) 9: planta de situação;
- c) 10: corte longitudinal;
- d) 11: detalhe da torre.

A seção do vão central da passarela de pedestres (figura 8) mostra a configuração do tabuleiro com suas duas vigas protendidas. A disposição das rampas de acesso e os patamares intermediários podem ser observados na figura 9: planta de situação. A configuração dos estais, servindo de pontos de apoio para o tabuleiro, unidos às torres e ancorados nos pilares, externos fica caracterizada no corte longitudinal (figura 10). O detalhe da torre na figura 11 indica os pontos de partida dos estais e a posição de passagem com o tabuleiro.

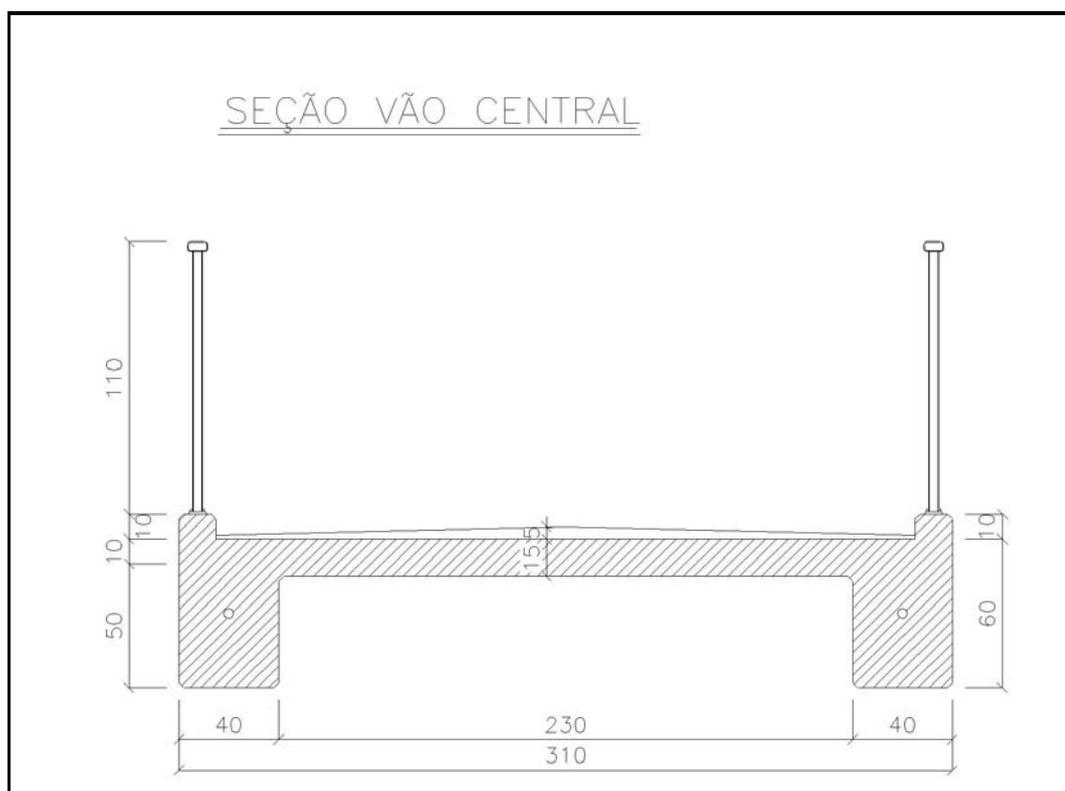


Figura 8: seção do vão central da passarela (BRASIL, 2007)

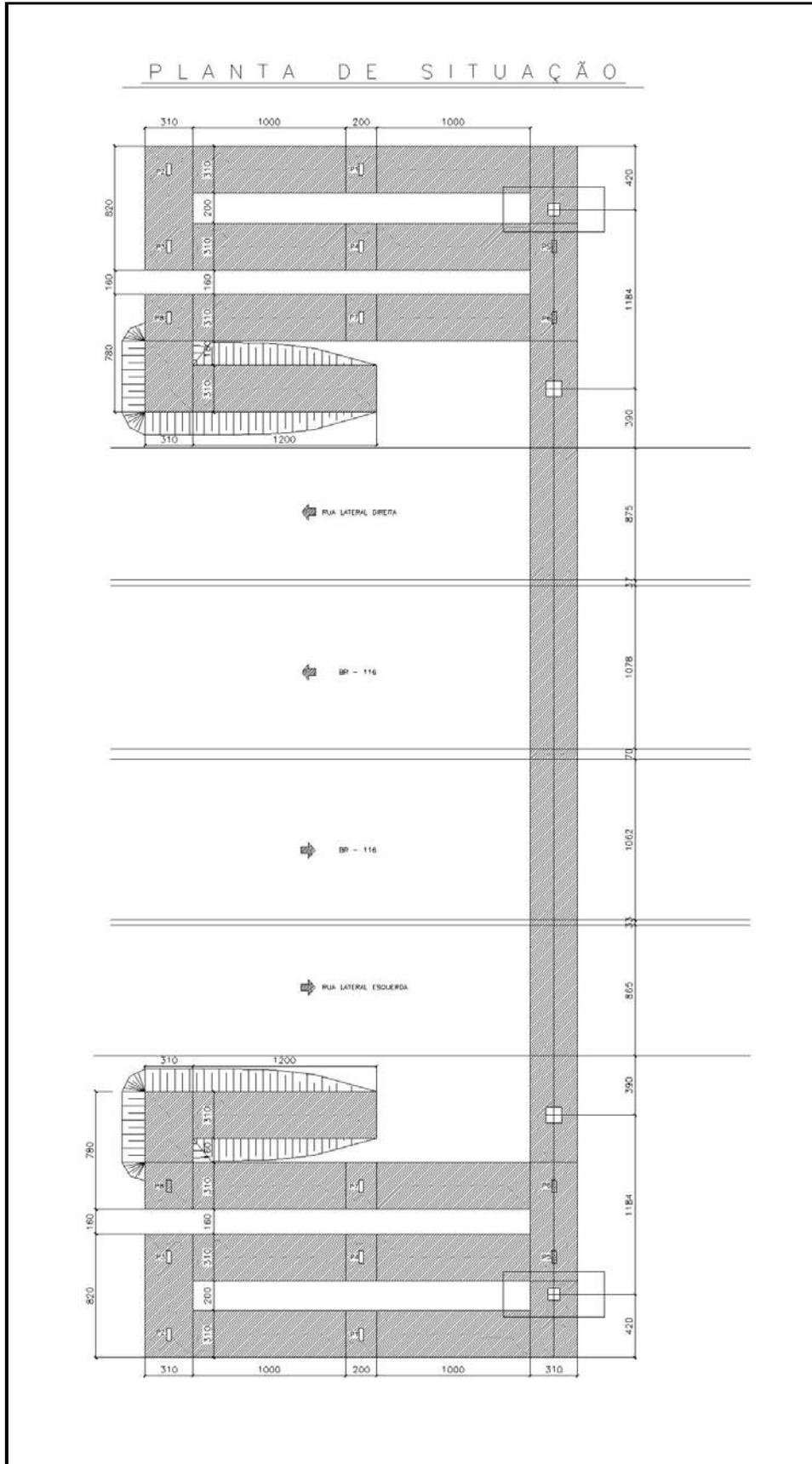


Figura 9: planta de situação (BRASIL, 2007)

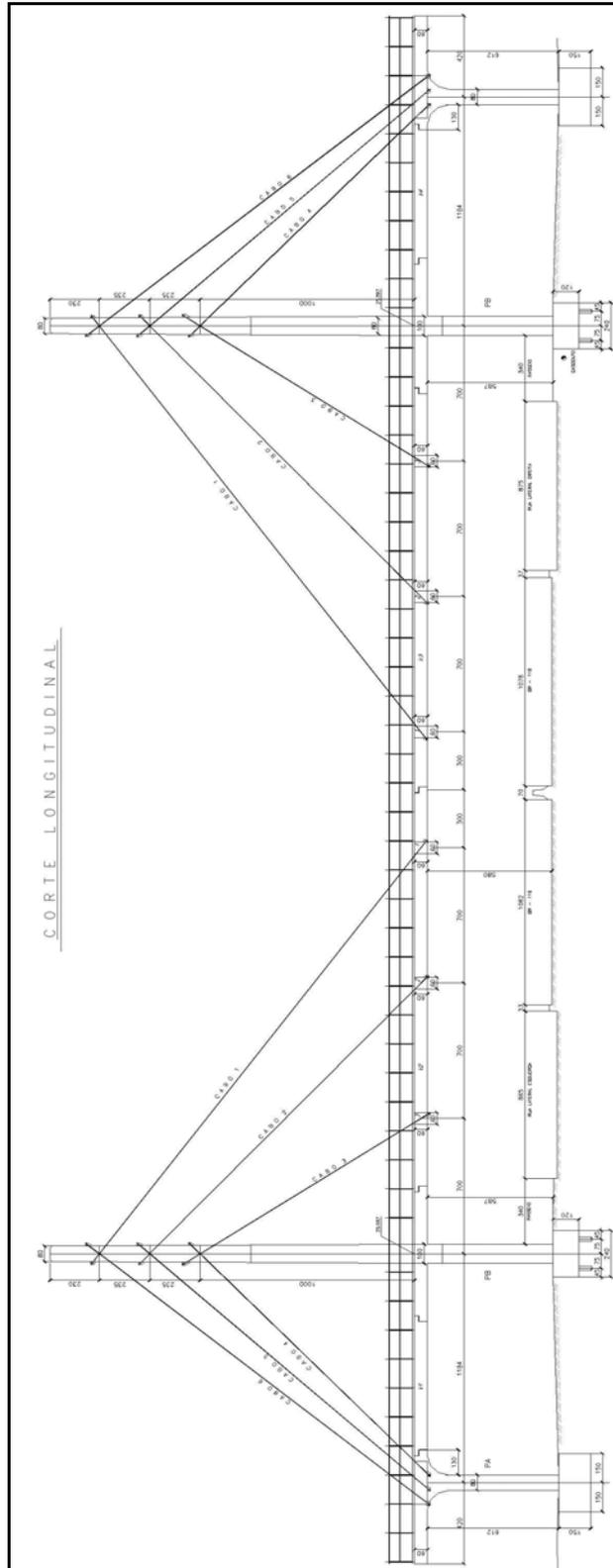


Figura 10: corte longitudinal (BRASIL, 2007)

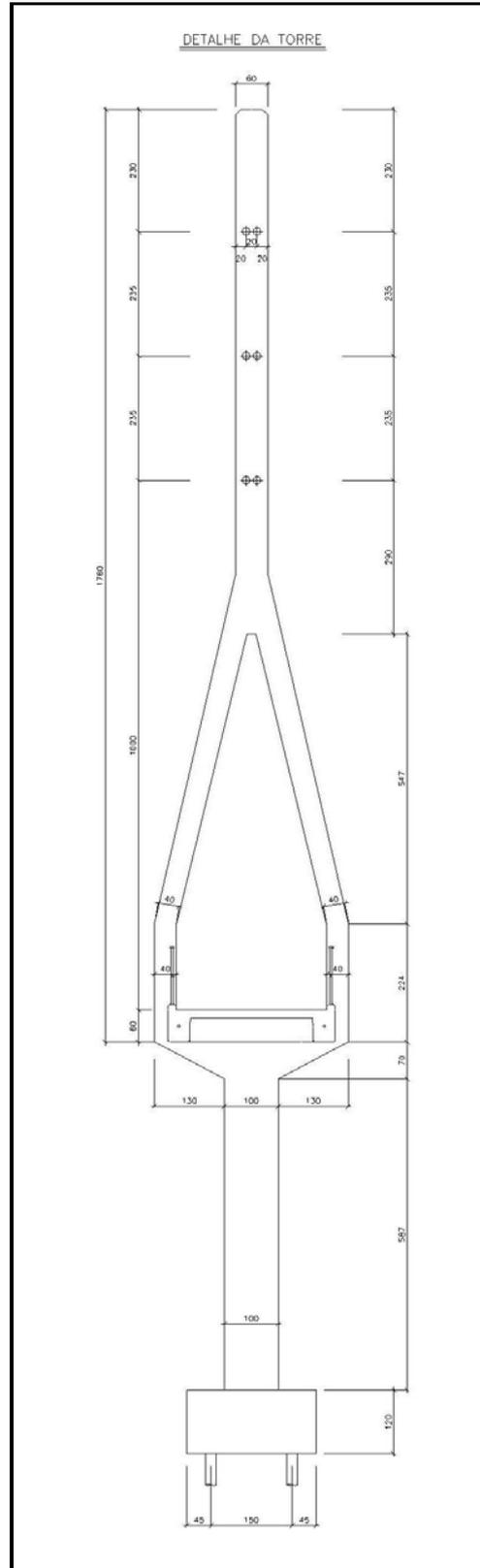


Figura 11: detalhe da torre (BRASIL, 2007)

## 6.2 MODELO DA PASSARELA DE PEDESTRES NO SAP2000

Para a modelagem da estrutura, utilizou-se o programa computacional SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2005) que se baseia no método dos Elementos Finitos e permite fazer uma análise tanto estática quanto dinâmica. Este programa oferece uma série de opções quanto às propriedades dos materiais, formas de carregamento e tipos de análise. Para a passarela de pedestres estudada, os pilares, as torres, as longarinas e as transversinas foram modelados com o elemento *Frame* ao passo que para o tabuleiro, utilizou-se o elemento *Shell-Thin*. A modelagem dos estais se fez através de elementos do tipo *Tendon*. Engastes rígidos foram usados nas vinculações da base dos quatro pilares, visto que dados sobre o solo não constavam nas plantas de anteprojeto e que, geralmente, este tipo de consideração está a favor da segurança.

Após o lançamento da estrutura no programa, os carregamentos para as análises estática e dinâmica foram inseridos. O peso próprio da estrutura foi considerado como caso de carga do tipo *Dead*. O Programa calcula o peso de cada elemento baseado no peso por unidade de volume definido para cada material. O peso do revestimento e dos parapeitos, também do tipo *Dead*, foi considerado como carga distribuída por superfície e linear, respectivamente. A carga accidental, do tipo *Live*, foi adotada como carga distribuída ao longo da superfície do vão central. Para os carregamentos dinâmicos, descritos no capítulo 3, utilizaram-se casos de carga do tipo *Live* e caso de análise do tipo *Time History*, assim, os carregamentos para cada passo foram inseridos como cargas concentradas nos nós do eixo do tabuleiro do vão central.

Uma perspectiva do modelo estrutural da passarela de pedestres de Esteio, lançado no SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2005) pode ser conferida na figura 12.

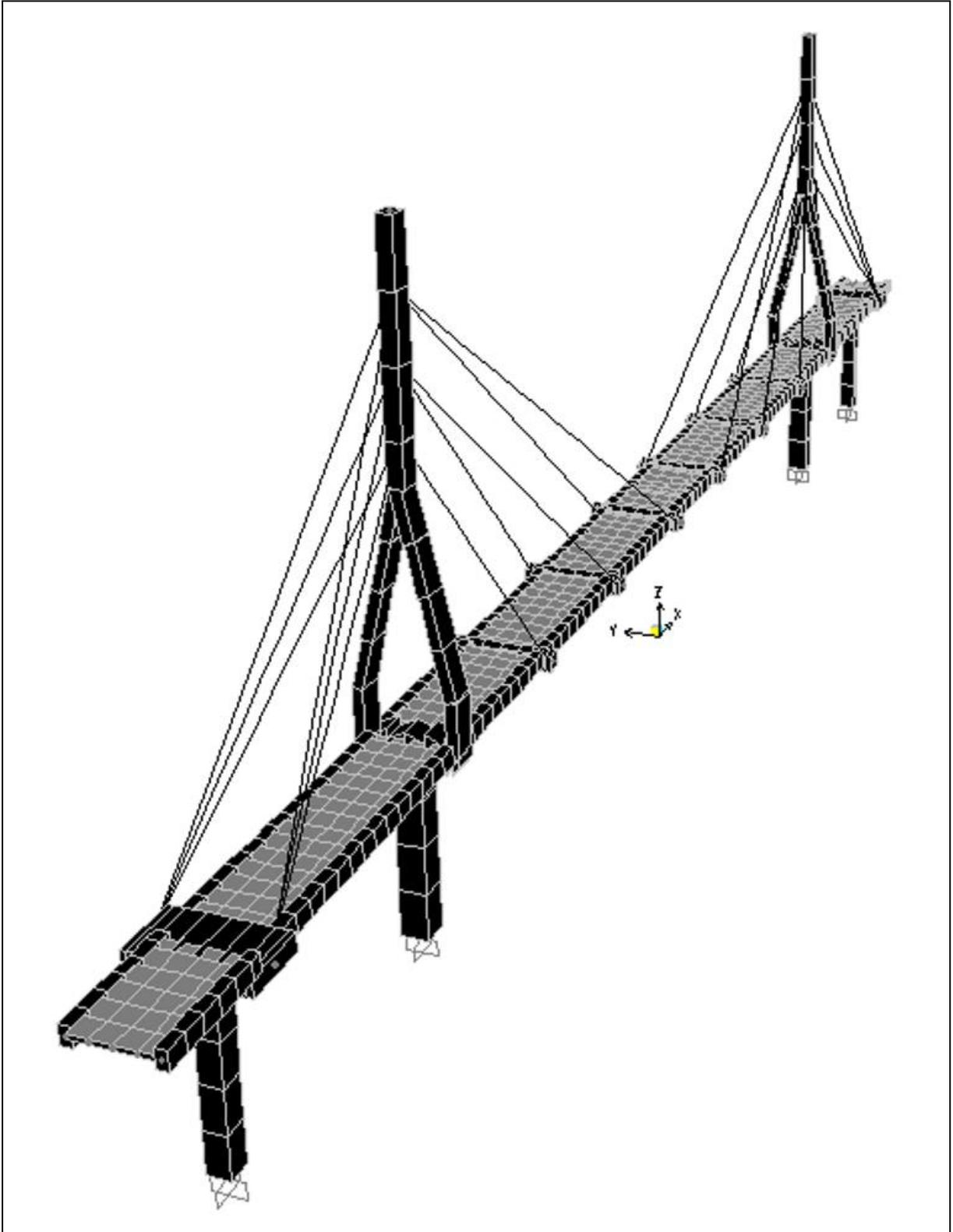


Figura 12: modelo da passarela de pedestres no SAP2000

## 7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a construção do modelo estrutural da passarela de pedestres com geometria, propriedades, condições de contorno e carregamentos adequados no programa computacional SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2005), procederam-se as análises de vibração livre e forçada.

### 7.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO LIVRE

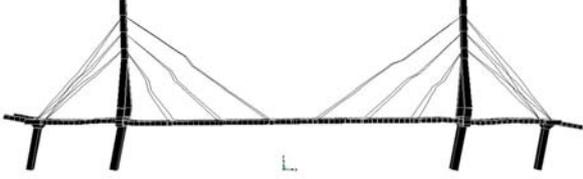
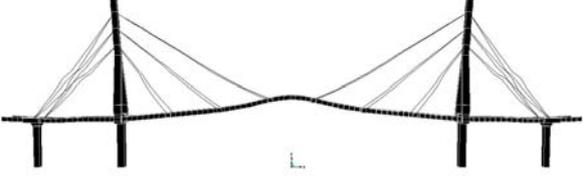
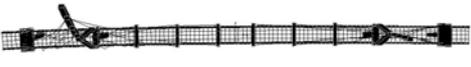
Através da análise de vibração livre ou análise modal, determinam-se as frequências nas quais o sistema pode oscilar livremente (frequências naturais) e as configurações deformadas, isto é, os modos de vibração. Esta análise considera a massa e a rigidez da estrutura baseada na geometria e nas propriedades dos materiais empregados, conforme visto no capítulo 5.

O quadro 6 apresenta o resultado da análise de vibração livre para os 12 primeiros modos de vibração, com suas respectivas frequências, classificações e vistas deformadas.

Modos	Frequência (Hz)	Classificação	Vistas dos modos de vibração
1	1,26	Flexão lateral	
2	1,75	Flexão lateral	

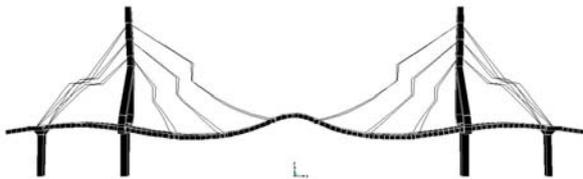
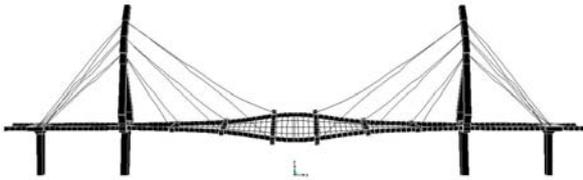
continua

continuação

Modos	Frequência (Hz)	Classificação	Vistas dos modos de vibração
3	2,85	Flexão lateral	
4	2,85	Axial	
5	3,99	Flexão vertical	
6	4,28	Flexão lateral	
7	4,66	Flexão lateral	

continua

continuação

Modos	Frequência (Hz)	Classificação	Vistas dos modos de vibração
8	5,93	Flexão vertical	
9	5,95	Flexão lateral	
10	7,77	Flexão lateral	
11	8,83	Flexão vertical	
12	9,37	Torção	

Quadro 6: resultados da análise de vibração livre

Observa-se, do quadro 6, que os três primeiros modos de vibração, cujas frequências são de 1,26, 1,75 e 2,85 Hz, respectivamente, assim como os modos 6 (4,28 Hz), 7 (4,66 Hz), 9 (5,95 Hz) e 10 (7,77 Hz) representam flexões laterais, caracterizando a pequena rigidez lateral da estrutura. Estes modos são importantes para a consideração de cargas como a ação do vento atuando perpendicularmente ao plano da passarela ou carregamentos horizontais de pedestres (não considerados neste estudo). O quarto modo de vibração com 2,85 Hz de frequência, representa um modo axial. A consideração deste é importante para o estudo de acelerações e frenagens de veículos, o que não é o caso em uma passarela de pedestres. Em contrapartida, os modos 5, 8 e 11, com frequências de 3,99, 5,93 e 8,83 Hz, respectivamente, representam flexões verticais. A importância deste tipo de modo de vibração, assim como os modos de torção (modo 12, com 9,37 Hz), está ligada às cargas no sentido da força da gravidade. Estes modos são os mais facilmente excitáveis pela movimentação humana, visto que o carregamento se dá principalmente através de forças verticais.

Esta estrutura apresenta algumas de suas frequências naturais dentro da faixa considerada crítica, que é de 1,6 a 4,5 Hz, conforme a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) ou menores que 5 Hz, segundo a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986). Além disso, convém salientar que as frequências do segundo (4 Hz) e terceiro (6 Hz) harmônicos para uma caminhada normal de 2 Hz podem ser importantes, particularmente para estruturas com frequências naturais coincidentes (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1991). Curiosamente, este é o caso da passarela de pedestres estudada. O primeiro modo de vibração vertical possui um valor de frequência praticamente igual a 4 Hz ao passo que o segundo possui um valor muito próximo de 6 Hz. Desta forma, se faz importante uma análise dos carregamentos variáveis no tempo.

## 7.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO FORÇADA

A análise de vibração forçada ou análise dinâmica transiente é uma técnica utilizada para determinar a resposta de uma estrutura submetida à ação de um carregamento variável no tempo. Pode-se, através dela, determinar as variações com o tempo para os deslocamentos, esforços e tensões na estrutura como resposta a uma combinação de carregamentos estáticos e transientes.

Com base na análise de vibração livre e fundamentado nos estudos dos diversos autores apresentados no capítulo 3, foram escolhidas as frequências de passo para as ações de caminhar, correr e pular. Esta escolha procurou descrever os carregamentos de forma a maximizar os efeitos observados na passarela de pedestres estudada. Assim, escolheu-se uma frequência de passo de 2,0 Hz para a ação de caminhar (caminhada normal), cujos primeiros harmônicos praticamente coincidem com o dos primeiros modos de vibração vertical. A mesma consideração pode ser feita para se descrever a ação de pular, onde ainda se reduziu ao máximo o tempo de contato dos pés com o piso, amplificando a carga. Tendo em conta que as frequências de corrida não coincidem com as dos modos verticais, optou-se por descrever uma corrida lenta, conforme visto no quadro 1.

Os carregamentos relativos às ações de caminhar e correr, foram modelados unicamente para a travessia do vão central, desprezando-se os efeitos dos passos nos vãos adjacentes. Esta consideração deve-se ao fato de que, neste caso, passos nos vãos externos pouco influenciam as amplitudes observadas no vão central, além de aumentarem consideravelmente o tempo despendido pelo programa para o cálculo. Para os casos de pessoas pulando, foi escolhido o ponto de aplicação das cargas no centro do vão central. Este é o local que apresenta as maiores amplitudes.

Partindo das frequências de passo escolhidas, obtém-se o tempo de passo, sendo este o inverso daquele. Após se adotar um comprimento de passo, conforme sugerido, chega-se a uma velocidade de passo, que é a razão deste comprimento pelo tempo de passo. Dividindo-se o comprimento do vão central de 48,00 m pelo comprimento de passo, encontra-se o número de passos necessários para percorrê-lo, e o produto deste com o tempo de passo nos fornece o tempo total para atravessar o vão central. É, ainda, preciso estabelecer o tempo de contato dos pés com o piso para que se determine o valor da carga máxima do passo.

Com os dados acima, obtém-se a função dos carregamentos no tempo para uma pessoa de peso igual a 800 N (BACHMANN; AMMANN, 1987) caminhando, correndo e pulando. Estes dados estão compilados no quadro 7.

<b>Característica</b>	<b>Caminhar</b>	<b>Correr</b>	<b>Pular</b>
Frequência de passo (Hz)	2,0	2,5	2,0
Tempo de passo (s)	0,50	0,40	0,50
Tempo de contato com o piso por passo (s)	0,50	0,275	0,15
Comprimento de passo (m)	0,75	1,30	-
Velocidade de passo (m/s)	1,50	3,25	-
Número de passos para atravessar o vão	64	37	-
Tempo para atravessar o vão (s)	32,00	14,77	-

Quadro 7: caracterização dos carregamentos utilizados na modelagem numérica

A figura 13 compara estes carregamentos em função da relação da carga dinâmica pelo peso estático do pedestre para um tempo de 2,0 s.

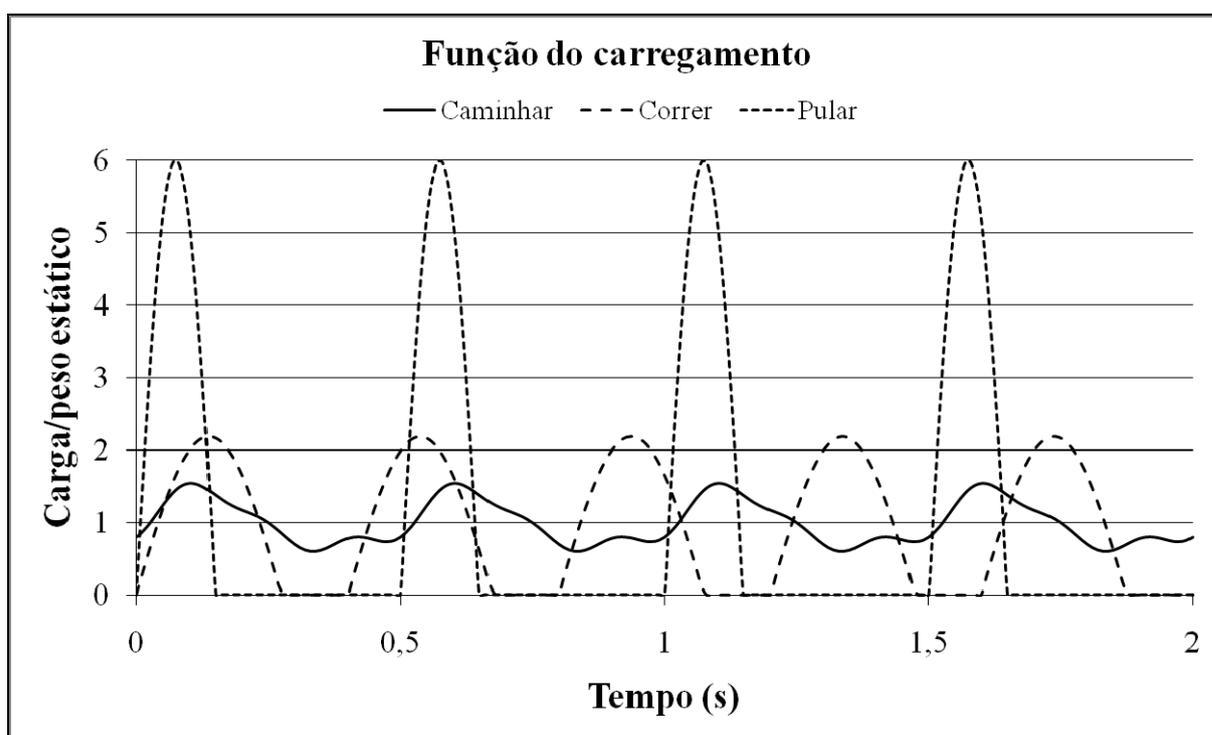


Figura 13: função do carregamento

É interessante observar, na figura 13, a amplificação dinâmica para cada um dos carregamentos, isto é, o quanto a carga de uma pessoa em movimento é maior do que a carga desta mesma pessoa parada. Enquanto a ação de caminhar apresenta um fator de multiplicação de aproximadamente 1,5, o correr, mostra um fator na ordem de 2,2 e o pular aponta um fator de 6,0. Além disso, percebe-se a relação deste fator com o tempo de contato dos pés com o solo.

Os carregamentos estudados fazem referência a uma única pessoa, porém é de interesse que se conheça, também, o comportamento da passarela de pedestres submetido à movimentação de mais de um pedestre movendo-se simultaneamente. Desta maneira, além da consideração de uma pessoa isolada, escolheu-se estudar o efeito de três pessoas se movimentando de forma sincronizada, interagindo com a passarela de pedestres. O efeito de várias pessoas será maior se elas estiverem se movendo em fase, assim, para as ações de caminhar e correr, estipulou-se que estas pessoas estariam se locomovendo em fila, defasadas de dois períodos, ou seja, de dois passos. Para a ação de pular, admitiu-se que três pessoas estão pulando, simultaneamente, tão próximo quanto possível do centro do vão, representando a ação de vandalismo.

Estes carregamentos foram inseridos no SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2005) para cada um dos seguintes casos analisados a seguir:

- a) uma pessoa caminhando;
- b) três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s;
- c) uma pessoa correndo;
- d) três pessoas correndo defasadas de 0,8 s;
- e) uma pessoa pulando no centro do vão;
- f) três pessoas pulando no centro do vão.

Convém salientar que os gráficos a seguir não estão representados em uma mesma escala para o eixo do tempo, nem para o eixo das acelerações. Procedeu-se desta maneira com o intuito de se ter uma melhor visualização, pois os extremos de aceleração de cada caso de carregamento variam fortemente.

Para o caso de uma pessoa caminhando, foram necessários 64 passos e 32 s para atravessar o vão central da passarela. As acelerações decorrentes deste carregamento estão ilustradas na figura 14.

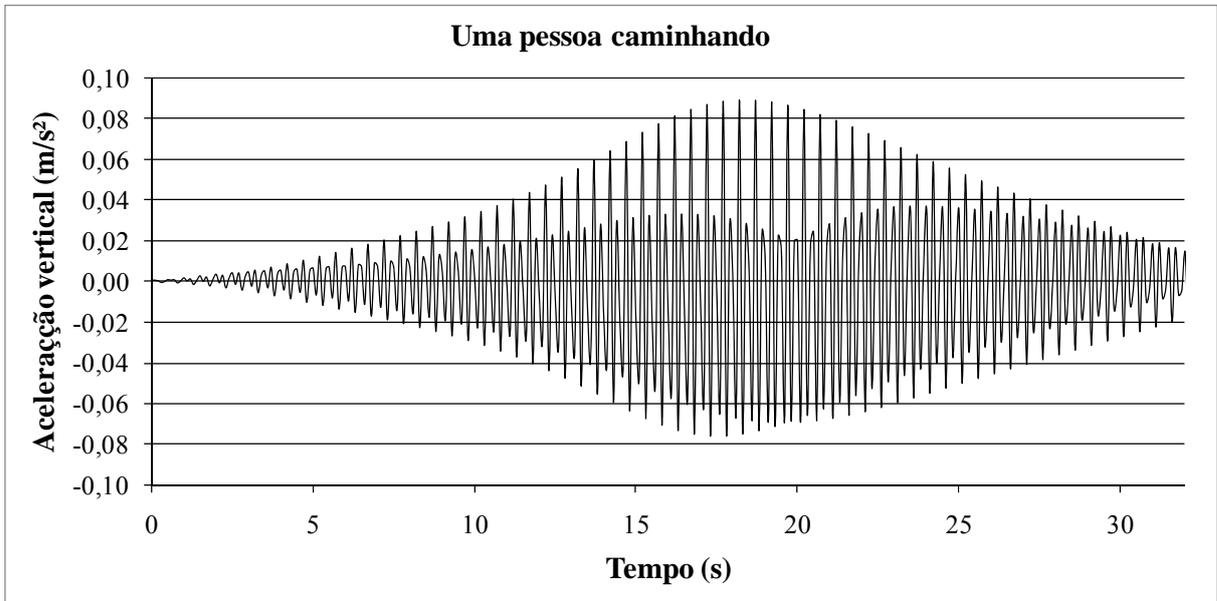


Figura 14: aceleração vertical para uma pessoa caminhando

O tempo para três pessoas cruzarem o vão central da passarela foi de 33 s e cada uma delas precisou de 64 passos. A figura 15 mostra a variação das acelerações para este caso.

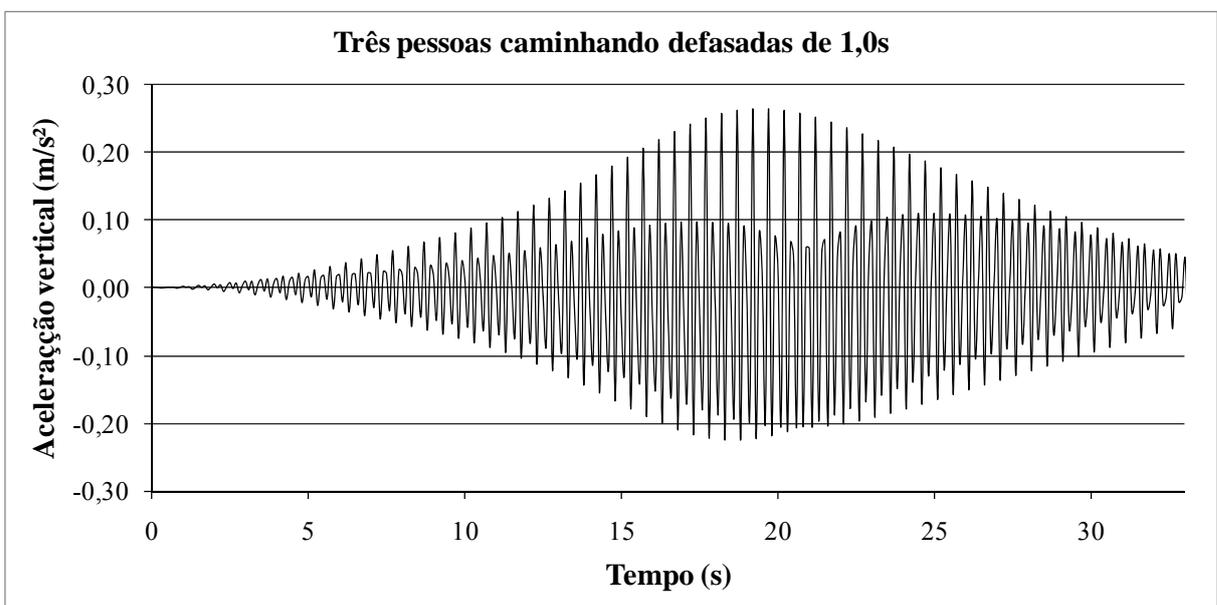


Figura 15: aceleração vertical para três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s

Para se correr pelo vão central da passarela, foram precisos 37 passos, o que leva a um tempo de travessia de 32 s. As acelerações possuem a variação no tempo ilustrada a seguir (figura 16).

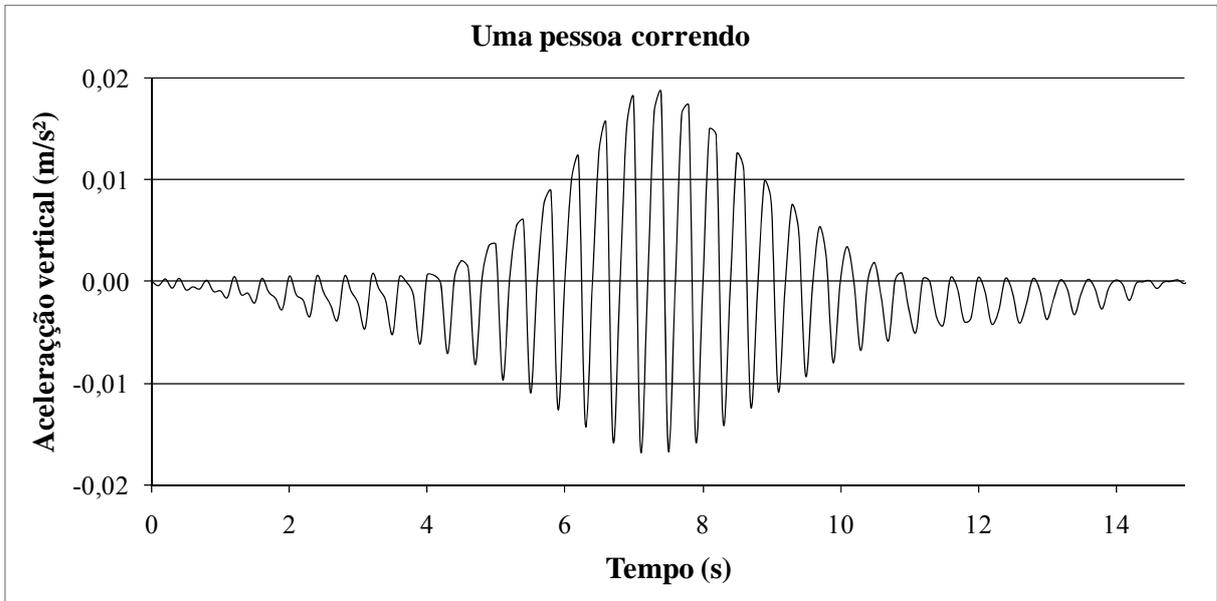


Figura 16: aceleração vertical para uma pessoa correndo

Em 16 s, foi possível que três pessoas cruzassem o vão central da passarela correndo, cada uma com 37 passos. A figura 17 ilustra o histórico das acelerações para este caso.

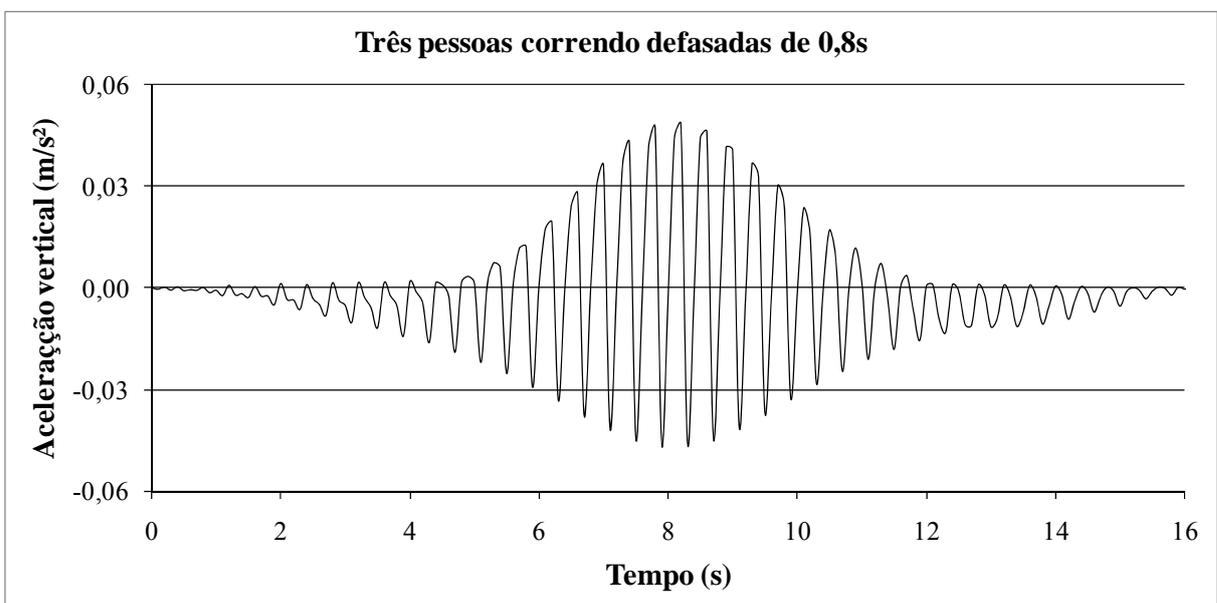


Figura 17: aceleração vertical para três pessoas correndo defasadas de 0,8 s

Uma pessoa, pulando sobre um mesmo ponto no centro do vão da passarela, provoca uma aceleração variável (figura 18) que atinge sua máxima amplitude em torno de 15 s.

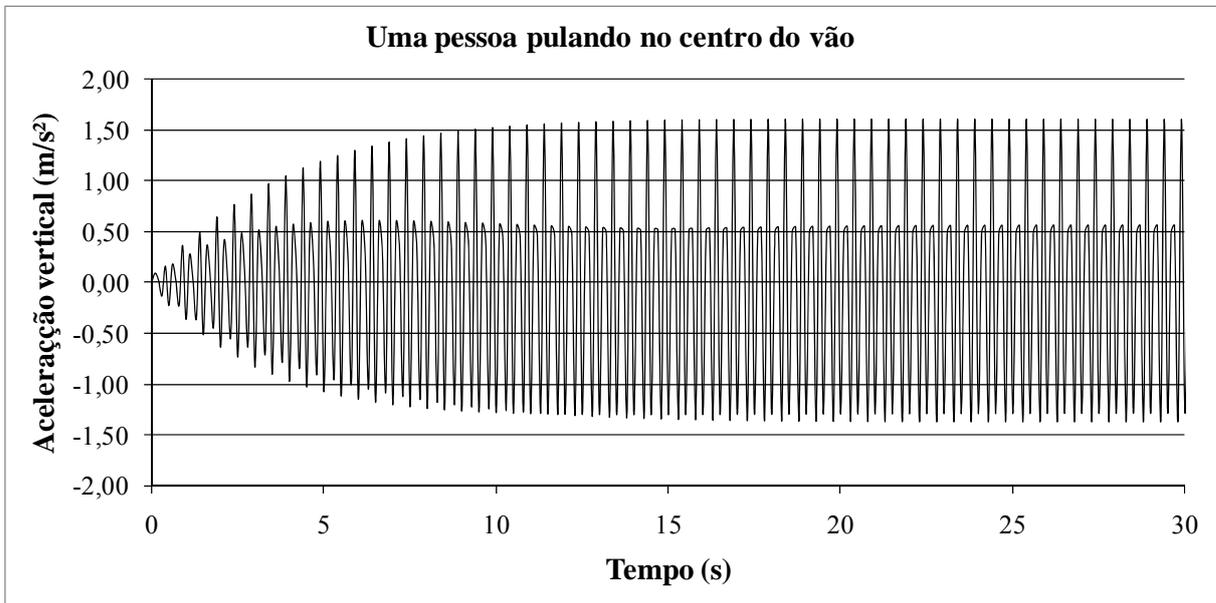


Figura 18: aceleração vertical para uma pessoa pulando

Em aproximadamente 12 s, três pessoas pulando no meio do vão, são capazes de atingir o valor máximo de aceleração para a passarela de pedestres estudada (figura 19).

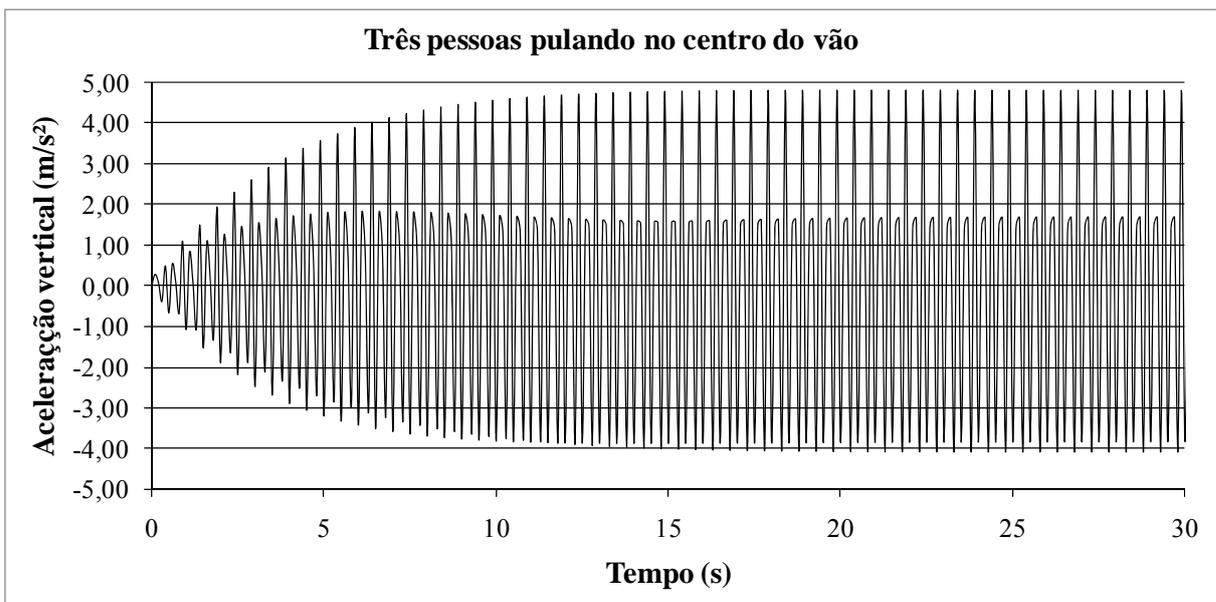


Figura 19: aceleração vertical para três pessoas pulando

No quadro 8, estão reunidos os módulos dos valores de pico de aceleração, velocidade e deslocamentos para cada um destes casos.

<b>Valores máximos</b>	<b><math> a_z </math> (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b><math> v_z </math> (cm/s)</b>	<b><math> d_z </math> (mm)</b>
Uma pessoa caminhando	0,089	0,328	0,180
Três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s	0,265	0,974	0,539
Uma pessoa correndo	0,018	0,100	0,095
Três pessoas correndo defasadas de 0,8 s	0,048	0,284	0,264
Uma pessoa pulando no centro do vão	1,608	6,430	2,580
Três pessoas pulando no centro do vão	4,796	19,177	7,700

Quadro 8: valores máximos de aceleração, velocidade e deslocamento

Observa-se, neste quadro, a forte diferença nos valores apresentados para os diversos carregamentos. Por exemplo, a aceleração máxima para três pessoas pulando é, aproximadamente, 260 vezes maior do que para uma pessoa correndo. Pode-se notar, também, que a ação de correr foi menos impactante que a ação de caminhar, apesar desta possuir amplificação de carga menor que aquela. Isto ocorre, pois a frequência da caminhada, com suas harmônicas praticamente coincidentes com as dos modos verticais, entra na faixa de ressonância com a estrutura, amplificando os efeitos por ela sentidos. Por sua vez, a corrida não é capaz de excitar fortemente nenhum dos modos de vibração vertical da passarela de pedestres, por não possuir frequências coincidentes. A ação de pular, conforme esperado, mostrou-se a mais danosa. Isto se deve a três condições:

- a) o alto fator de impacto do carregamento;
- b) a escolha da frequência de pulo coincidente com a frequência natural da estrutura;
- c) a aplicação continuada do carregamento no ponto mais crítico do vão.

A aceitabilidade quanto ao conforto refere-se aos valores de pico de acelerações. A ordem de grandeza destes resultados fica mais clara quando se apresentam as relações entre os dados obtidos do modelo e os limites estabelecidos pelos regulamentos. Adotaram-se os valores menos conservadores dos regulamentos apresentados no capítulo 4, sejam eles:

- a) NBR 8800/1986: 0,049 m/s<sup>2</sup>;
- b) CEB 209/1991: 0,7 m/s<sup>2</sup>;
- c) AFGC/2006: 0,8 m/s<sup>2</sup>.

Em outras palavras, dividiu-se o valor de pico de aceleração de cada caso pelo valor de aceleração crítica indicado nestes regulamentos. Estas relações podem ser vistas no quadro 9.

<b>Relação <math>a_z/a_{z,crit}</math></b>	<b>NBR 8800 (1986)</b>	<b>CEB 209 (1991)</b>	<b>AFGC (2006)</b>
Uma pessoa caminhando	1,82	0,13	0,11
Três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s	5,41	0,38	0,33
Uma pessoa correndo	0,37	0,03	0,02
Três pessoas correndo defasadas de 0,8 s	0,98	0,07	0,06
Uma pessoa pulando no centro do vão	32,82	2,30	2,01
Três pessoas pulando no centro do vão	97,88	6,85	6,00

Quadro 9: acelerações relativas para cada regulamento

Neste quadro, valores menores que 1,0 representam o atendimento às recomendações das normas quanto ao conforto. Assim, observa-se que a passarela de pedestres será considerada desconfortável pela NBR 8800/1986 para as ações de caminhar e pular, chegando a valores de até 98 vezes o valor da aceleração crítica para três pessoas pulando no centro do vão. Os valores recomendados pela NBR 8800/1986 podem ser considerados demasiadamente restritivos, visto que se referem, mais particularmente, a lajes de edifícios, onde pessoas paradas, sentadas ou deitadas, possuem um nível de percepção muito maior do que pessoas em

movimento. Em contrapartida, tanto o CEB 209/1991, quanto a AFGC/2006, foram elaborados especificamente para passarelas de pedestres. Desta forma, para a ação de vandalismo, a estrutura não atende aos padrões estabelecidos nestes regulamentos, uma vez que mesmo uma pessoa isolada é capaz de induzir nesta estrutura uma aceleração com o dobro do permitido para que se considere a passarela confortável.

Uma segunda análise dos resultados gerados pelos carregamentos escolhidos pode ser feita. Esta se refere aos deslocamentos. Tendo-se em vista que a passarela de pedestres foi dimensionada para uma carga estática, conforme sugerido pela NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982), deslocamentos menores que os provocados por este carregamento devem estar previstos no cálculo, sendo aceitos estruturalmente. Assim, para se estimar um possível dano estrutural, compararam-se os deslocamentos máximos verificados na análise de vibração forçada para cada carregamento com os deslocamentos observados na análise estática  $d_z$ . Estes deslocamentos são:

- a) carga permanente: 44,999 mm;
- b) carga acidental aplicada no vão central: 10,860 mm;
- c) uma pessoa parada no meio do vão central: 0,051 mm.

Somando-se o carregamento permanente e o acidental, sem majoração, obtém-se o deslocamento em Estado Limite de Serviço de 55,859 mm que corresponde a uma deformação de aproximadamente 1/860 do vão. O quadro 10 apresenta as relações dos deslocamentos máximos obtidos na análise dinâmica com os valores relativos às cargas acidentais e de uma pessoa parada.

<b>Relação <math>d_z/d_{z,est}</math></b>	<b>Carga acidental</b>	<b>Uma pessoa parada</b>
Uma pessoa caminhando	0,02	3,56
Três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s	0,05	10,65
Uma pessoa correndo	0,01	1,88
Três pessoas correndo defasadas de 0,8 s	0,02	5,22
Uma pessoa pulando no centro do vão	0,24	51,00
Três pessoas pulando no centro do vão	0,71	152,20

Quadro 10: deslocamentos relativos

Neste quadro, valores menores que 1,0, na coluna de carga acidental, representam uma deformação menor que a apresentada para o caso mais crítico desta carga, sendo, desta forma, considerado não prejudicial à estrutura. Assim, para nenhum caso estudado espera-se dano à passarela de pedestres. Porém, deve-se notar que três pessoas pulando no centro do vão induziram à estrutura um valor de 71% do deslocamento esperado para a carga acidental calculada estaticamente. Conseqüentemente, para um número maior de pessoas, podem-se esperar valores de deslocamentos não previstos em fase de projeto.

Por outro lado, é interessante observar o efeito da amplificação das deformações devido aos carregamentos dinâmicos na passarela de pedestres estudada. Apesar de possuir um fator de amplificação em torno de 2,2, conforme visto no capítulo 3, a amplificação do deslocamento para a ação de uma pessoa correndo é de apenas 1,88. Isto ocorre dada a diferença das frequências naturais da estrutura e do carregamento. Em contrapartida, para uma pessoa caminhando, com amplificação de carga de aproximadamente 1,5, o deslocamento é 3,56 vezes maior que para uma pessoa parada, indicando ressonância. O resultado mais relevante aparece na comparação entre uma pessoa pulando e uma parada, onde, partindo de um fator de amplificação de carga de 6,0, chega-se a um deslocamento 51 vezes maior que o relativo ao peso desta pessoa.

## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, estão apresentadas as principais conclusões a respeito do comportamento da passarela de pedestres estudada e encontram-se algumas sugestões para a continuidade desta pesquisa.

De acordo com os resultados obtidos no capítulo 7, a passarela pode ser considerada flexível, visto que possui frequências naturais dentro da faixa dita crítica, ou seja, é facilmente excitada pelo movimento de pessoas, merecendo assim, um estudo dinâmico dos carregamentos.

O fato de que os primeiros modos de vibração são flexões laterais indica a baixa rigidez da estrutura neste sentido, podendo ser prejudicial para a ação do vento agindo perpendicularmente ao eixo da passarela ou, ainda, para carregamentos horizontais devidos à movimentação de pedestres.

A resposta da estrutura depende principalmente da coincidência ou não das frequências naturais com as dos carregamentos aplicados. Em menor grau, depende, também, da forma do carregamento no tempo.

Considerando que, em apenas 15 s, uma única pessoa pulando no meio do vão central da passarela é capaz de provocar acelerações da ordem do dobro do permitido para o conforto, é conveniente prever a ação de vandalismo em fase de projeto.

Os resultados relativos aos deslocamentos da passarela devidos aos carregamentos estudados não apresentaram valores superiores aos observados para a carga de multidão. Apesar disso, para um número maior de pessoas, podem-se esperar deslocamentos não aceitáveis estruturalmente.

A importância do estudo dinâmico pode ser comprovada, ainda, pelo fato de uma pessoa pulando no meio do vão central da passarela de pedestres estudada, com uma frequência de 2,0 Hz, após aproximadamente 15 s, produz um deslocamento vertical 51 vezes maior que esta mesma pessoa parada no local.

O assunto de dinâmica de estruturas aplicado às passarelas de pedestres devido à movimentação humana está longe do esgotamento. Assim, listam-se algumas sugestões para pesquisas futuras:

- a) estudar o comportamento da passarela de pedestres sob a ação de outros tipos de carregamentos, como um maior número de pessoas se movendo de forma sincronizada ou aleatória;
- b) estudar a viabilidade, tanto técnica quanto econômica, de se adotarem amortecedores para a minimização ou eliminação do problema de vibrações em passarelas de pedestres;
- c) após a conclusão da passarela de Esteio, fazer medições em campo calibrando experimentalmente o modelo numérico adotado;
- e) dada a baixa rigidez lateral da passarela, pode ser interessante um estudo das ações do vento e dos carregamentos horizontais devidos à movimentação de pedestres.

## REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8800**: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites). Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto armado – procedimento: ações dinâmicas e fadiga. Rio de Janeiro, 2003.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. **Vibrations in Structures Induced by Man and Machines**. Zurich: IBASE, 1987.

BALTAR, A. C. U. C. V. **Vibrações Induzidas por Atividades Humanas em Passarelas**. 2000. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

BODGI, J. **Synchronisation piétons-structure**: Application aux vibrations des passerelles souples. 2008. 206 f. Thèse (Docteur en Structures et Matériaux) – L'École Nationale des Ponts et chaussées. Paris.

BRASIL Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Passarela de Esteio**. Projeto de obras-de-arte especiais, jun. 2007.

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

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, Bulletin d'Information 209, **Vibration Problems in Structures: practical guidelines**. Lausanne, Switzerland, Aug. 1991.

COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION. **Analysis Reference Manual for SAP2000®**. Berkeley, 2005.

KERR, S. C.; BISHOP, N. W. M. **Human induced loading on flexible staircases**. Engineering Structure, n. 23, p. 37-45. 2001.

L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. **Passerelles Piétonnes - Évaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons**. Edité par Sétra, mars 2006.

L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, 2004. **Eurocode 1**: Actions sur les structures – Partie 2: Actions sur les ponts, dues au trafic. Saint-Denis, 2004.

LEONARD, D. R. **Human tolerance level for bridge vibrations**, TRRL, n. 34, Road Research Laboratory, 34. 1966.

MATSUMOTO, Y.; SATO, S.; NISHIOKA, T.; SHIOJIRI, H. **A study on design of pedestrian over-bridges**. Transactions of JSCE, n. 4, p. 50-51, 1972.

WHEELER, J. E. Prediction and Control of Pedestrian – Induced Vibration in Footbridges, Proceedings of the ASCE. In: **Journal of Structural Division**, v. 108, n. ST9, p. 2045-2065, oct. 1982.

ŽIVANOVIĆ, S.; RAVIĆ, V.; EL-BAHNASY, I.; PAVIĆ, A. Statistical characterisation of parameters defining human walking as observed on an indoor passerelle. In: EXPERIMENTAL VIBRATION ANALYSIS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 2007, Porto, Portugal. **Resumos...** Porto, Portugal: EVACES'07, 2007. p. 219-225.