



Vibrações em Pontes Pedonais

Recomendações Técnicas de Projecto



Índice Geral

1	Introdução	4
2	Definições	4
3	Metodologia de projecto	6
4	Passos de aplicação	9
4.1	Passo 1: Avaliação de frequências naturais	9
4.2	Passo 2: Verificação da gama crítica de frequências naturais.....	9
4.3	Passo 3: Caracterização das situações de projecto	9
4.3.1	Passo 3a: Caracterização de classes de tráfego	11
4.3.2	Passo 3b: Caracterização de classes de conforto	12
4.4	Passo 4: Caracterização do amortecimento estrutural	13
4.4.1	Modelo de amortecimento	13
4.4.2	Factores de amortecimento para acções de serviço.....	14
4.4.3	Factores de amortecimento para vibrações elevadas.....	14
4.5	Passo 5: Determinação da aceleração máxima	15
4.5.1	Modelos de acções harmónicas	15
4.5.2	Método dos espectros da resposta para fluxos de peões.....	19
4.6	Passo 6: Verificação de critérios para "lock-in" lateral	21
4.7	Passo 7: Verificação do nível de conforto	22
5	Avaliação de propriedades dinâmicas de pontes pedonais.....	22
5.1	Introdução.....	22
5.2	Medição da resposta	23
5.2.1	Medição da resposta ambiental para identificação de frequências naturais críticas	23
5.2.2	Medição aproximada de factores de amortecimento associados a frequências naturais críticas	23
5.2.3	Medição da resposta induzida por um peão isolado	23
5.2.4	Medição da resposta induzida por um grupo de peões.....	24
5.2.5	Medição da resposta induzida por um fluxo contínuo de peões	24
5.3	Ensaio de identificação.....	25
5.3.1	Ensaio de vibração forçada	25
5.3.2	Ensaio de vibração ambiental	25
5.3.3	Ensaio de vibração livre.....	25
5.4	Instrumentação.....	26
5.4.1	Transdutores para medição da resposta	26

5.4.2	Dispositivos para identificação	26
6	Controlo de vibrações	27
6.1	Introdução.....	27
6.2	Modificação de massa	27
6.3	Modificação de frequência.....	28
6.4	Modificação do amortecimento estrutural.....	28
6.4.1	Introdução	28
6.4.2	Medidas simples.....	28
6.4.3	Dispositivos adicionais de amortecimento.....	29
7	Referências	32

Símbolos frequentemente utilizados

a_{limit}	aceleração limite de acordo com uma classe de conforto	[m/s ²]
a_{max}	aceleração calculada para uma situação de projecto definida	[m/s ²]
B	largura	[m]
d	densidade de peões sobre uma superfície	[P/m ²]
f, f_i	frequência natural para o modo considerado	[Hz]
f_s	frequência da passada de um peão	[Hz]
P	amplitude da força devida a um peão isolado	[N]
$P \times \cos(2\pi ft)$	carga harmónica devida a um peão isolado	[N]
L	comprimento	[m]
m^*	massa modal	[kg]
M	massa	[kg]
n	número de peões sobre a superfície carregada S ($n = S \times \text{densidade}$)	[P]
n'	número equivalente de peões sobre uma superfície carregada S	[P/m ²]
$p(t)$	carga distribuída em superfície	[kN/m ²]
S	área da superfície carregada	[m ²]
δ	decremento logarítmico	[-]
μ	massa distribuída por unidade de comprimento	[kg/m]
$\Phi(x)$	modo de vibração	[-]
ψ	Coeficiente de redução para ter em conta a probabilidade de a frequência da passada se situar na vizinhança da frequência natural do modo considerado	[-]
ξ	factor de amortecimento estrutural	[-]

1 Introdução

O estudo das vibrações corresponde actualmente a um aspecto de importância crescente ao nível do projecto de pontes pedonais. A concepção de pontes mais sofisticadas (tais como pontes atirantadas ou tipo catenária), com vãos cada vez maiores, e a utilização de materiais de construção mais eficientes têm originado estruturas ligeiras, com uma elevada relação entre sobrecargas de utilização e acções permanentes. Em resultado desta tendência, muitas pontes pedonais têm-se tornado susceptíveis a vibrações quando sujeitas a acções dinâmicas. As acções dinâmicas mais frequentes em pontes pedonais, para além da acção do vento, correspondem às forças induzidas pelos peões em andamento normal ou corrida.

Os trabalhos de investigação que estão na base destas Recomendações Técnicas e do Documento de Base que as acompanha foram desenvolvidos por:

- Christiane Butz e Christoph Heinemeyer do RWTH Aachen University, Alemanha,
- Andreas Keil, Mike Schlaich, Arndt Goldack e Stefan Trometer de Schlaich Bergermann und Partner, Alemanha,
- Mladen Lukić, Bruno Chabrolin, Arnaud Lemaire and Pierre-Olivier Martin, do Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, França,
- Álvaro Cunha e Elsa Caetano da Faculdade de Engenharia do Universidade do Porto, Portugal.

no contexto do projecto de investigação RFS-CR-03019 "Advanced Load Models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimised Design Guidelines for Steel Footbridges (SYNPEX)" suportado financeiramente pelo Research Fund for Coal and Steel (RFCS).

Informação mais detalhada em relação à fornecida nestas Recomendações Técnicas pode ser encontrada no Documento Base [1], que inclui também referências adicionais.

2 Definições

As definições aqui apresentadas relacionam-se com a aplicação das presentes recomendações.

Aceleração	A quantidade que traduz a taxa de variação da velocidade com o tempo (representada por dv / dt ou d^2x / dt^2), normalmente ao longo de um determinado eixo.
Amplificação	Incremento da magnitude de uma quantidade variável, sem alterar qualquer outra propriedade.
Amortecedor	Dispositivo montado em estruturas para redução de amplitudes de vibração através de um método de



	dissipação de energia.
Amortecimento	<p>Amortecimento corresponde a qualquer efeito, quer inerente a um sistema, quer nele propositadamente incorporado, tendente a reduzir a amplitude de vibração de um sistema oscilatório. O amortecimento é a dissipação de energia de um sistema dinâmico com o tempo ou a distância. Numa estrutura, o amortecimento total compreende</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amortecimento material e estrutural • Amortecimento induzido por elementos não estruturais • Amortecimento por radiação
Acção dinâmica	Acção responsável por acelerações significativas da estrutura ou de components estruturais
Massa modal = massa generalizada	<p>Um sistema de múltiplos graus de liberdade pode ser analisado através da combinação das respostas de vários osciladores de um grau de liberdade (1-GL) com frequências naturais coincidentes:</p> $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k^*}{m^*}}$ <p>onde f é a frequência natural, expressa em Hz k^* é a rigidez modal m^* é a massa modal.</p> <p>Assim, a massa modal pode ser interpretada como a massa activada num modo de vibração específico.</p>
Modo de vibração	Padrão de deformação característico de um sistema dinâmico, no qual o movimento de qualquer ponto é um harmónico simples com a mesma frequência. Dois ou mais modos podem coexistir num sistema de múltiplos graus de liberdade.
Frequência natural	<p>A frequência natural é a frequência de vibração livre de um sistema. No caso de um sistema de múltiplos graus de liberdade, as frequências naturais são as frequências dos modos de vibração. Cada estrutura tem tantas frequências naturais e modos de vibração associados, quantos os graus de liberdade.</p> <p>A frequência natural de um sistema de um grau de liberdade (1-GL) é dada pela equação:</p>

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

onde K é a rigidez
 M é a massa.

A forma de avaliação das frequências naturais é descrita na secção 4.1.

A frequência f é o inverso do período de oscilação T ($f = 1 / T$).

Ressonância	Um sistema está em ressonância quando qualquer alteração de frequência de uma vibração forçada, mesmo que pequena, origina um decréscimo de resposta do sistema. Quando o amortecimento é baixo, a frequência de ressonância é aproximadamente igual à frequência natural do sistema (frequência de vibração livre).
Espectro de resposta	Um espectro de resposta é um gráfico que representa os valores máximos da resposta permanente (em deslocamento, velocidade ou aceleração) de uma série de osciladores lineares de um grau de liberdade com frequências naturais distintas, cujo movimento é forçado pela vibração. O gráfico resultante pode ser utilizado para captar a resposta de qualquer sistema linear, dada a sua frequência natural de oscilação. O espectro de resposta contém informação precisa acerca da distribuição da energia de vibração para várias frequências.
Espectro	Descrição de qualquer sinal dependente do tempo como uma série de componentes de uma só frequência, cada uma com uma amplitude e, eventualmente, fase.

3 Metodologia de projecto

A ocorrência de um número crescente de problemas de vibração verificados em pontes pedonais nos últimos anos mostra que estas estruturas não devem continuar a ser projectadas apenas para cargas estáticas, mas também tendo em conta o seu comportamento dinâmico. O projecto deve ter em conta o nível de vibrações induzidas pelos peões na sua utilização. É importante notar que não existem actualmente códigos disponíveis para o efeito.

Embora, do ponto de vista do Projectista, essa falta de regulamentação permita uma grande liberdade, e por isso uma grande variedade de soluções estruturais inovadoras, é todavia de vital importância que a ponte satisfaça requisitos de conforto fixados pelo cliente ou dono de obra. A questão "Será que a ponte satisfará os critérios de conforto quando vibrar?" desempenha um papel importante no processo de dimensionamento, podendo a inclusão de dispositivos de controlo de vibrações tornar-se necessária.

Os princípios gerais de uma metodologia de projecto proposta são apresentados na Figura 3-1.

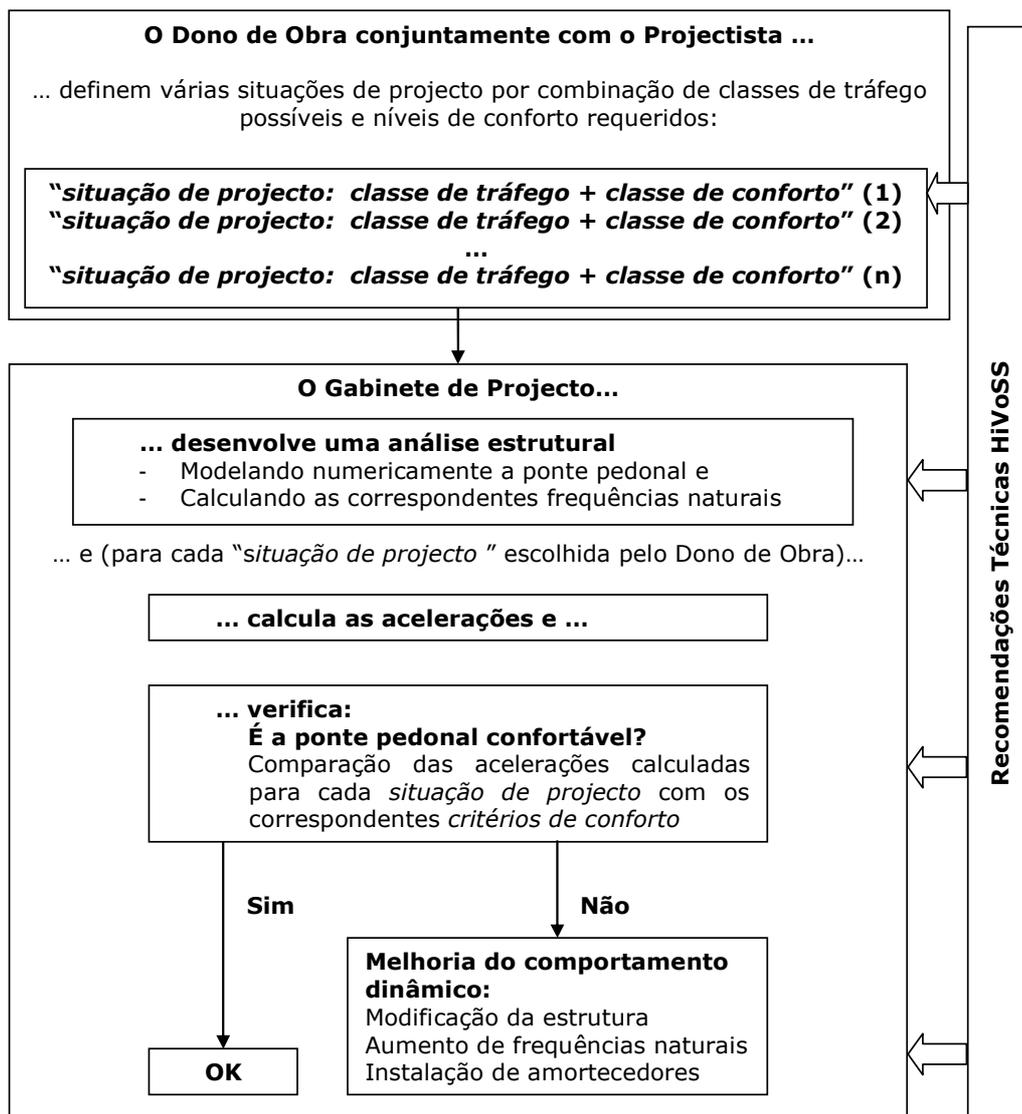


Figura 3-1: Metodologia de projecto

O organigrama da Figura 3-2 mostra como verificar o comportamento dinâmico da ponte pedonal na fase de projecto e como estas recomendações podem ser aplicadas. Os vários passos mencionados no organigrama serão discutidos na secção 4.

Problemas de segurança decorrentes de tensões excessivas ou fadiga podem também ocorrer e devem igualmente ser considerados no projecto de pontes pedonais. Todavia estas recomendações tratam apenas de situações reversíveis de funcionamento em serviço, tal como definido nos Eurocódigos. Regras de projecto para tensões excessivas e fadiga não são contempladas. Deve notar-se que todas as verificações habituais em relação a Estados Limite de Utilização (ELU) e Estados Limite Últimos (ELU) devem ser conduzidas de acordo com as normas em vigor.

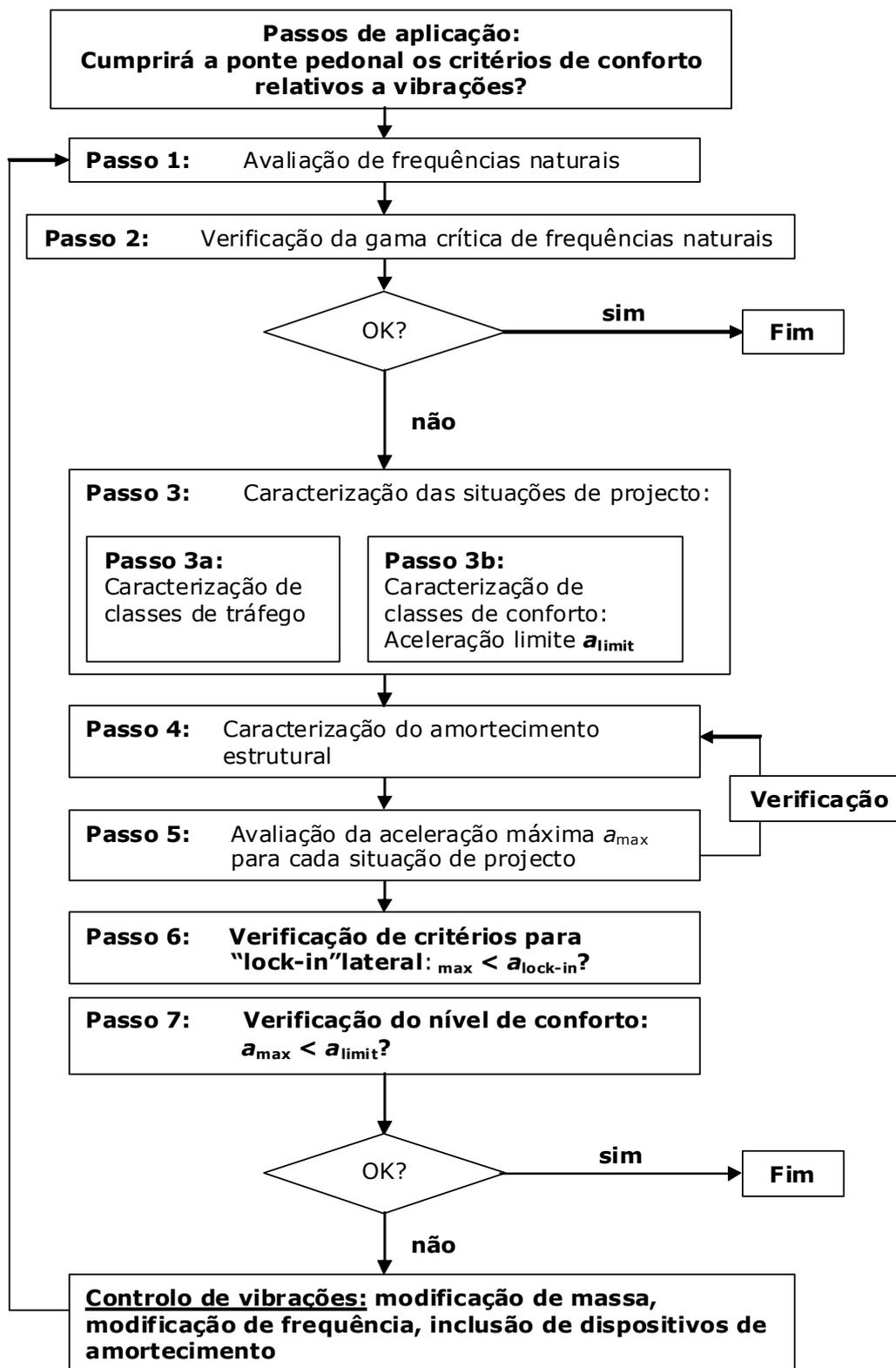


Figura 3-2: Organigrama para aplicação destas recomendações

4 Passos de aplicação

4.1 Passo 1: Avaliação de frequências naturais

A avaliação de naturais de pontes pedonais em fase de projecto pode ser realizada através de diferentes formas, especialmente para verificação preliminar da estrutura em termos de vibrações, designadamente:

- com base no método dos elementos finitos (FE);
- recorrendo a fórmulas, e.g. para vigas, lajes e cabos.

Deve ter-se em consideração que as propriedades dos materiais, a complexidade da estrutura, o tipo de superfície do tabuleiro, as condições fronteira e os guarda-corpos podem originar discrepâncias, em termos de frequências naturais, entre valores calculados e medidos experimentalmente sobre a estrutura real.

Recomenda-se que a massa dos peões seja considerada no cálculo de frequências naturais apenas quando a massa modal associada aos peões for superior a 5 % da massa modal do tabuleiro.

4.2 Passo 2: Verificação da gama crítica de frequências naturais

As gamas críticas de frequências naturais f_i de pontes pedonais são:

- para vibrações verticais e longitudinais:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2,3 \text{ Hz}$$

- para vibrações laterais: $0,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1,2 \text{ Hz}$

Pontes pedonais com frequências relativas a vibrações verticais ou longitudinais

$$2,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

podem ser excitadas em ressonância pelo 2º harmónico da acção dos peões [1].

Nesse caso, a gama de frequências crítica para vibrações verticais e longitudinais alarga-se a:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

Vibrações laterais não são afectadas pelo 2º harmónico da acção dos peões.

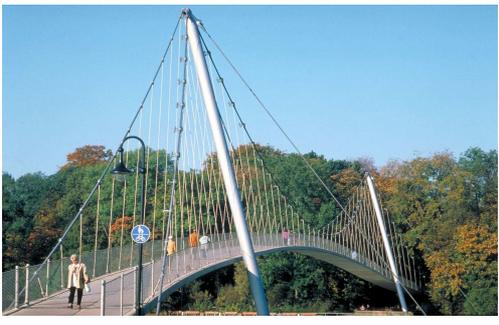
Nota: A excitação vertical através do segundo harmónico da acção dos peões pode ter lugar. Todavia, até ao presente, não há referência de vibrações significativas em pontes pedonais motivadas pelo segundo harmónico.

4.3 Passo 3: Caracterização das situações de projecto

O dimensionamento de uma ponte pedonal inicia-se especificando-se diferentes situações de projecto relevantes – conjuntos de condições físicas representativas das situações que poderão ocorrer na realidade durante um certo intervalo de tempo. Cada situação de projecto é definida por uma classe de tráfego esperada (cf. secção 0) e um nível de conforto escolhido (cf. secção 4.3.2).

Há situações de projecto que podem ocorrer uma vez durante o período de vida útil da ponte pedonal, como a inauguração da ponte, enquanto outros ocorrem diariamente, como é o caso do tráfego às horas de ponta. A Tabela 4-1 caracteriza genericamente algumas situações de tráfego típicas que podem ter lugar em pontes pedonais. O tipo de tráfego pedonal esperado e a densidade de tráfego, conjuntamente com os requisitos de conforto, têm um efeito significativo sobre o comportamento dinâmico exigido da ponte.

Tabela 4-1: Situações de tráfego típicas

	<p>Peões isolados e pequenos grupos</p> <p>Número de peões: 11</p> <p>Dimensão do grupo: 1-2 P</p> <p>Densidade: 0,02 P/m²</p> <p>Nota: P = peão</p>
	<p>Tráfego muito fraco</p> <p>Número de peões: 25</p> <p>Dimensão do grupo: 1-6 P</p> <p>Densidade: 0,1 P/m²</p>
	<p>Tráfego fraco</p> <p>Exemplo: Tráfego ocasional</p> <p>Número de peões: 60</p> <p>Dimensão do grupo: 2-4 P</p> <p>Densidade: 0,2 P/m²</p>
	<p>Tráfego excepcionalmente denso</p> <p>Exemplo: Cerimónia de abertura</p> <p>Densidade: > 1,5 P/m²</p>

No sentido de se alcançar uma conveniente compreensão do comportamento dinâmico da ponte, recomenda-se a consideração de diferentes situações de projecto prováveis. Um exemplo relativo a este aspecto é apresentado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Exemplo de especificação de situações de projecto significativas

Situação de projecto	Descrição	Classe de tráfego (cf. 0)	Ocorrência esperada	Classe de conforto (cf. 4.3.2)
1	Inauguração da ponte	TC4	uma vez na vida útil	CL3
2	Tráfego em horas de ponta	TC2	diariamente	CL1
3	Passeio a pé ao fim de semana	TC1	semanalmente	CL2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4.3.1 Passo 3a: Caracterização de classes de tráfego

As classes de tráfego pedonal e as correspondentes densidades de fluxo de peões são definidas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Classes de tráfego pedonal e densidades

Classe de tráfego	Densidade d (P = peão)	Descrição	Características
TC 1*)	grupo de 15 P; $d = 15 P / (B L)$	Tráfego muito fraco	(B=largura do tabuleiro; L=comprimento do tabuleiro)
TC 2	$d = 0,2 P/m^2$	Tráfego fraco 	Confortável e andamento livre Ultrapassagem é possível Peões isolados podem escolher livremente a passada

Classe de tráfego	Densidade d (P = peão)	Descrição	Características
TC 3	$d = 0,5 P/m^2$	Tráfego denso 	Andamento ainda não restringido Ultrapassagem pode ser inibida intermitentemente
TC 4	$d = 1,0 P/m^2$	Tráfego muito denso 	Liberdade de movimento é restringida Andamento perturbado Ultrapassagem já não é possível
TC 5	$d = 1,5 P/m^2$	Tráfego excepcionalmente denso	Andamento desagradável Engarrafamento Já não é possível escolher livremente a passada

*) Um fluxo de peões equivalente é calculado para a classe TC1 dividindo o número de peões pelo comprimento L e pela largura B do tabuleiro da ponte.

Formações de peões, procissões ou marchas militares não são tidas em consideração na classificação geral de tráfego, necessitando portanto de um estudo suplementar.

4.3.2 Passo 3b: Caracterização de classes de conforto

Os critérios de conforto humano são em geral traduzidos por uma aceleração limite para a ponte pedonal. Quatro classes de conforto são neste contexto recomendadas e apresentadas na Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Classes de conforto definidas com gamas de aceleração limite

Classe de conforto	Grau de conforto	Vertical a_{limit}	Lateral a_{limit}
CL 1	Máximo	< 0,50 m/s ²	< 0,10 m/s ²
CL 2	Médio	0,50 – 1,00 m/s ²	0,10 – 0,30 m/s ²
CL 3	Mínimo	1,00 – 2,50 m/s ²	0,30 – 0,80 m/s ²
CL 4	Desconforto inaceitável	> 2,50 m/s ²	> 0,80 m/s ²

Note-se que as gamas de aceleração indicadas traduzem apenas um critério de conforto; critérios de “lock-in” para vibrações horizontais são apresentados na secção 4.6.

4.4 Passo 4: Caracterização do amortecimento estrutural

O nível de amortecimento existente condiciona significativamente a amplitude das oscilações induzidas pelos peões. A atenuação das vibrações, i.e., a dissipação de energia no interior da estrutura, depende quer do amortecimento intrínseco dos materiais de construção, o qual tem natureza distribuída, quer do efeito local de dispositivos de apoio ou outros sistemas de controlo. Amortecimento adicional é também introduzido por elementos não-estruturais, como guardas ou pavimentos.

Em geral, o amortecimento depende do nível das vibrações, pois maiores amplitudes de vibração originam maior fricção entre elementos estruturais, não-estruturais e dispositivos de apoio.

A co-existência de vários mecanismos de dissipação no interior da estrutura torna o amortecimento um fenómeno complexo, cuja caracterização rigorosa só pode basear-se em medições realizadas após a construção da ponte pedonal, incluindo a instalação de guardas, pavimento e de quaisquer outros elementos não-estruturais.

Pontes pedonais ligeiras e flexíveis são também afectadas pelo vento, o qual gera amortecimento aerodinâmico, podendo um incremento da velocidade do vento originar um acréscimo de amortecimento. Este amortecimento adicional pode ser tido em consideração no âmbito de estudos aerodinâmicos, mas não para a avaliação de efeitos induzidos pelos peões.

4.4.1 Modelo de amortecimento

Tendo em vista o desenvolvimento de uma modelação numérica de projecto, é necessário especificar um modelo de amortecimento e definir os correspondentes parâmetros. A abordagem habitual baseia-se em amortecedores lineares viscosos, o que implica que as forças de amortecimento geradas são proporcionais à taxa de variação dos deslocamentos com o tempo (velocidade). Este modelo tem a vantagem de conduzir a equações de equilíbrio dinâmico lineares, cuja solução analítica pode ser facilmente obtida. Contudo, é apenas



uma aproximação do amortecimento real da estrutura para níveis baixos de oscilação.

A inclusão de sistemas de controlo (cf. secção 6) pode conduzir a estruturas para as quais a matriz de amortecimento não pode ser considerada proporcional e, conseqüentemente, a análise modal convencional deixa de ser aplicável. A sintonização do sistema de controlo e análise da resposta da estrutura amortecida requer então algoritmos mais poderosos, nomeadamente cálculos iterativos baseados em métodos de integração directa, ou então o recurso a formulações em espaço de estado.

4.4.2 Factores de amortecimento para acções de serviço

Tendo em vista o projecto de pontes pedonais satisfazendo um certo nível de conforto, o que constitui uma condição de serviço no sentido estabelecido pelos Eurocódigos, a Tabela 4-5 recomenda valores mínimos e médios do factor de amortecimento.

Tabela 4-5: Factores de amortecimento de acordo com o material de construção para condições de serviço

Tipo de construção	Mínimo ξ	Médio ξ
Betão armado	0,80%	1,3%
Betão pré-esforçado	0,50%	1,0%
Mista aço-betão	0,30%	0,60%
Aço	0,20%	0,40%
Madeira	1,0%	1,5%
Catenária	0,70%	1,0%

4.4.3 Factores de amortecimento para vibrações elevadas

Tabela 4-6: Factores de amortecimento de acordo com o material de construção para vibrações elevadas

Tipo de construção	Factor de amortecimento ξ
Betão armado	5,0%
Betão pré-esforçado	2,0%
Aço, juntas soldadas	2,0%
Aço, juntas aparafusadas	4,0%
Elastómeros reforçados	7,0%

Acções intencionais podem produzir níveis de oscilação elevados em pontes pedonais ligeiras, os quais conduzem a factores de amortecimento mais elevados, como se indica na Tabela 4-6.

4.5 Passo 5: Determinação da aceleração máxima

Quando uma ou mais situações de projecto (cf. secção 4.3) estão definidas e os valores do amortecimento estão determinados (cf. secção 4.4), o passo seguinte consiste no cálculo da aceleração máxima a_{max} para cada situação de projecto.

Há vários métodos para calcular a aceleração da ponte; estas recomendações sugerem o uso de um dos métodos referidos na Figura 4-1, os quais serão discutidos nos capítulos seguintes.

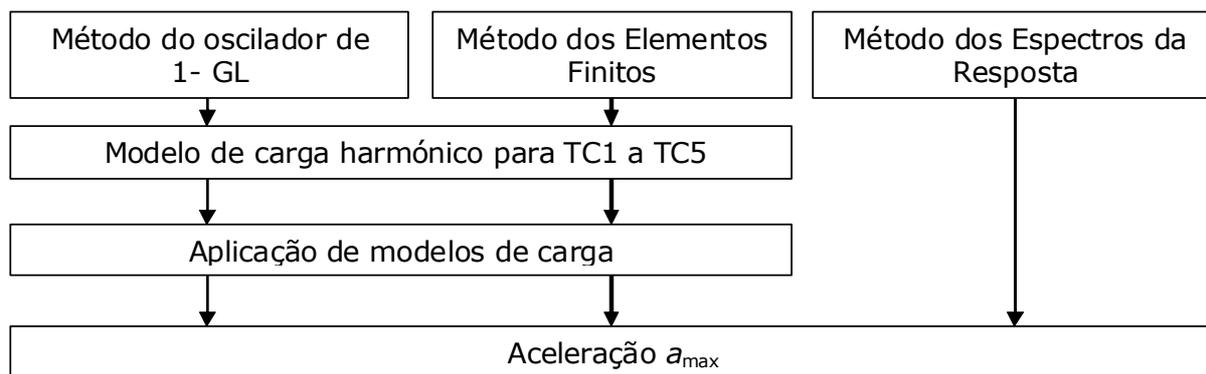


Figura 4-1: Vários métodos para cálculo da aceleração

Nota: É importante verificar se a aceleração calculada com os parâmetros de amortecimento considerados para níveis baixos ou elevados de vibrações (cf. secção 4.4) corresponde à aceleração na estrutura construída (cf. secção 5). A experiência tem evidenciado que é muito difícil prever o amortecimento estrutural da ponte construída, apresentando as correspondentes estimativas uma grande dispersão, que se pode consequentemente reflectir nas estimativas da aceleração.

4.5.1 Modelos de acções harmónicas

4.5.1.1 Número equivalente de peões para fluxos contínuos

Uma vez desenvolvida uma modelação numérica da ponte pedonal, escolhidas as situações de projecto e correspondentes modelos de carga, e especificados os factores de amortecimento, a resposta da ponte pode ser calculada. Modelos de acções harmónicas tornam-se necessários para calcular a aceleração utilizando quer métodos assentes em discretizações em elementos finitos, quer na idealização através de um sistema de um único grau de liberdade (cf. Secção 4.5.1.3). Para a modelação de um fluxo de peões constituído por n peões "aleatórios", deve determinar-se um fluxo ideal de n' peões perfeitamente sincronizados (cf. Figura 4-2). Estes peões estariam sincronizados apenas entre si (sem ter em conta a influência da vibração da estrutura sobre a frequência da passada). Os dois fluxos são supostos causar o mesmo efeito sobre a estrutura, mas o fluxo equivalente pode ser modelado como uma acção determinística.

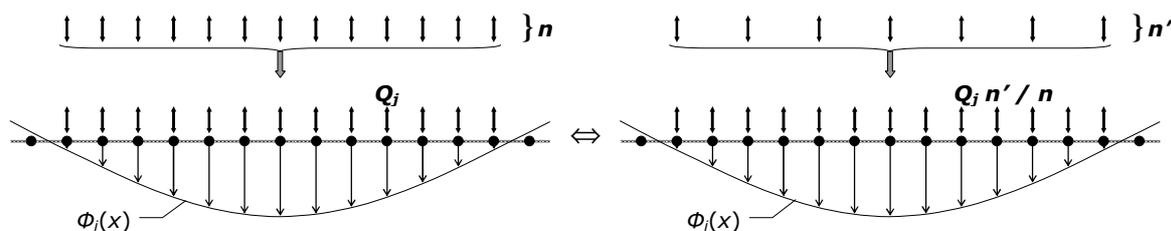


Figura 4-2: Equivalência dos fluxos

Para a avaliação da resposta induzida pelo grupo ou fluxo de peões, a aplicação de uma acção distribuída harmónica ao longo da ponte (simulando um número equivalente de peões em posições fixas) satisfaz quase todos os requisitos do ponto de vista prático em termos do projecto de pontes pedonais.

Deve ter-se cuidado na escolha da gama de frequências para a qual este tipo de cálculo faz sentido. O problema da influência da estrutura sobre o comportamento dos peões não é tido em consideração, podendo contribuir para um agravamento da resposta.

4.5.1.2 Aplicação de modelos de carga

No procedimento de dimensionamento recomendado, são fornecidos modelos de carga harmónicos para cada classe de tráfego TC1 a TC5 (cf. Tabela 4-3). Há dois modelos de carga distintos para cálculo da resposta da ponte pedonal induzida por fluxos de peões, em função da respectiva densidade:

- Modelo de carga para TC1 a TC3 (densidade $d < 1,0 \text{ P/m}^2$)
- Modelo de carga para TC4 a TC5 (densidade $d \geq 1,0 \text{ P/m}^2$)

Ambos os modelos usam uma acção distribuída uniforme harmónica $p(t)$ [N/m^2], que representa o fluxo equivalente de peões para efeito de cálculo:

$$p(t) = P \times \cos(2\pi f_s t) \times n' \times \psi \quad \text{Eq. 4-1}$$

onde $P \times \cos(2\pi f_s t)$ é a acção harmónica devida a um peão isolado,

P é a componente da força devida a um peão isolado com uma frequência de passada f_s ,

f_s é a frequência da passada, a qual é assumida igual à frequência natural da ponte em consideração,

n' é o número de peões equivalente sobre a superfície carregada S ,

S é a área da superfície carregada,

ψ é o coeficiente de redução que tem em conta a probabilidade de que a frequência da passada se aproxime da gama crítica de frequências naturais em consideração.

A amplitude da acção do peão isolado P , o número equivalente de peões n' (percentil 95%) e o coeficiente de redução ψ estão definidos na Table 4-7, considerando a excitação no primeiro ou no segundo harmónicos da acção do peão (ver Secção 4.2). Table 4-7: Parameters for load model of TC1 to TC5

P [N]		
Vertical 280	Longitudinal 140	Lateral 35
Coeficiente de redução ψ		
Vertical e longitudinal		Lateral
Número equivalente n' de peões sobre a superfície carregada S para o modelo de carga de:		
TC1 a TC3	(densidade $d < 1,0$ P/m ²): $n' = \frac{10,8\sqrt{\xi \times n}}{S}$ [1/m ²]	
TC4 a TC5	(densidade $d \geq 1,0$ P/m ²): $n' = \frac{1,85\sqrt{n}}{S}$ [1/m ²]	

onde ξ é o factor de amortecimento estrutural e

n é o número de peões sobre a superfície carregada S ($n = S \times d$).

O modelo de carga para grupos de peões (TC1) tem em conta um movimento livre dos peões. Consequentemente, a sincronização entre os membros do grupo é igual à de um fluxo de baixa densidade. No caso de fluxos densos (TC4 e TC5) o andamento vem perturbado, tornando-se o movimento do fluxo mais lento e aumentando a sincronização. Para além do valor limite superior de 1,5 P/m², o andamento dos peões torna-se praticamente impossível, reduzindo-se os efeitos dinâmicos significativamente. Quando um fluxo se torna denso, a correlação entre peões aumenta, mas as acções dinâmicas tendem a diminuir.

Na Figura 4-3 uma acção harmónica $p(t)$ é aplicada à estrutura em correspondência com um modo de vibração particular.

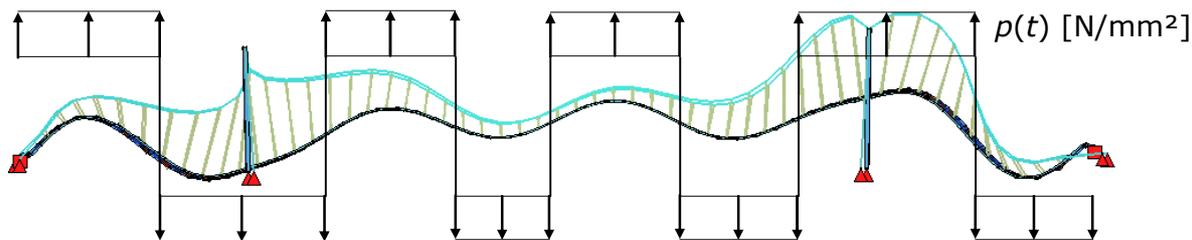


Figura 4-3: Aplicação de uma acção harmónica de acordo com o modo de vibração $\Phi(x)$

Os modelos de carga harmónicos referidos descrevem as acções induzidas por fluxos de peões em andamento sobre a ponte pedonal. Algumas pontes pedonais podem além disso ser afectadas pela acção de peões em corrida (“joggers”), a qual é descrita adicionalmente em [1].

4.5.1.3 Método do oscilador de 1-GL

Em geral, o comportamento dinâmico de uma estrutura pode ser avaliado através de uma análise modal, na qual uma oscilação arbitrária da estrutura é descrita por uma combinação linear de várias oscilações harmónicas distintas nas frequências naturais da estrutura. Por isso, a estrutura pode ser transformada em vários osciladores lineares equivalentes, cada um com um grau de liberdade. Cada sistema de um grau de liberdade (1-GL) (cf. Figura 4-4) tem uma frequência natural e uma massa, que são iguais a cada frequência natural da estrutura e à correspondente massa modal.

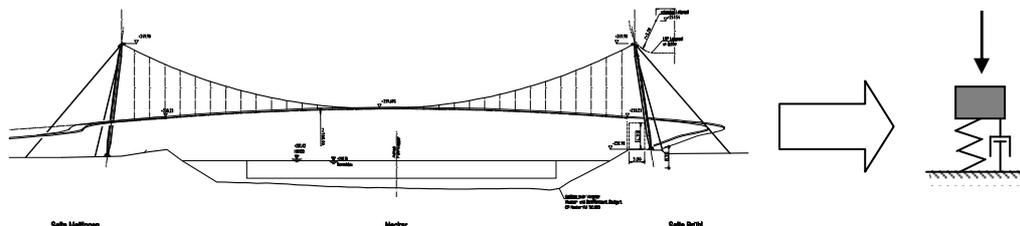


Figura 4-4: Oscilador equivalente de 1-GL para uma frequência natural / modo de vibração da estrutura

A ideia básica consiste em usar um sistema equivalente de 1-GL para cada frequência natural da ponte pedonal situada na gama crítica de frequências naturais e calcular a aceleração máxima associada para uma acção dinâmica.

A aceleração máxima a_{max} em ressonância para o sistema de 1-GL é calculada por:

$$a_{max} = \frac{p^* \cdot \pi}{m^* \cdot \delta} = \frac{p^* \cdot 1}{m^* \cdot 2\xi} \tag{Eq. 4-2}$$

onde p^* é a acção generalizada

m^* é a massa (modal) generalizada

ξ é o factor de amortecimento estrutural e

δ é o decremento logarítmico.

4.5.2 Método dos espectros da resposta para fluxos de peões

Na fase de projecto, não é necessária a aplicação de uma análise passo-a-passo no domínio do tempo em todos os casos.

O objectivo de um método de dimensionamento espectral é encontrar uma forma simples de descrever a excitação estocástica e a resposta do sistema com um nível de fiabilidade específico.

Assume-se que:

- o valor médio da frequência da passada, $f_{s,m}$, do fluxo de peões coincide com a frequência natural da ponte considerada, f_i ,
- a massa da ponte é uniformemente distribuída,
- as configurações modais são sinusoidais,
- não existe acoplamento modal,
- o comportamento estrutural é linear-elástico.

A "máxima aceleração de pico" da resposta do sistema foi escolhida como grandeza de dimensionamento. Na verificação de dimensionamento, esta aceleração é comparada com a aceleração limite correspondente à classe de conforto a verificar.

Para diferentes densidades dos peões, a aceleração característica, correspondente ao percentil 95% da aceleração máxima, pode ser determinada de acordo com as fórmulas e tabelas seguintes.

Esta aceleração máxima é definida pelo produto de um factor de pico $k_{a,d}$ por um desvio padrão de aceleração σ_a :

$$a_{\max,d} = k_{a,d} \sigma_a \quad \text{Eq. 4-3}$$

Nota: O factor de pico $k_{a,d}$ serve para transformar o desvio padrão da resposta σ_a no valor característico $a_{\max,d}$. Em estados limite de serviço, o valor característico é o percentil 95%, $k_{a,95\%}$. Ambos os factores são derivados de simulações de Monte Carlo baseadas em simulações numéricas passo-a-passo no domínio do tempo de vários fluxos de peões sobre várias geometrias de ponte.

O resultado é uma equação empírica para a determinação da variância da aceleração da resposta:

$$\sigma_a^2 = k_1 \xi^{k_2} \frac{C \sigma_F^2}{m * f_i^2} \quad \text{Eq. 4-4}$$

$$\text{onde } k_1 = a_1 f_i^2 + a_2 f_i + a_3$$

$$k_2 = b_1 f_i^2 + b_2 f_i + b_3$$

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ são constantes

f_i é a frequência natural considerada que coincide com o valor médio da frequência da passada do fluxo de peões



- ξ é o factor de amortecimento estrutural
- C é a constante caracterizadora do máximo do espectro das acções
- $\sigma_F^2 = k_F n$ é a variância da excitação (forces induzidas pelos peões)
- k_F é uma constante
- $n = d \times L \times B$ número de peões sobre a ponte, com
 d : densidade de peões, L : comprimento da ponte,
 B : largura da ponte
- m^*_i é a massa modal do modo considerado i

As constantes a_1 a a_3 , b_1 a b_3 , C , k_F [kN²] e $k_{a,95\%}$ estão indicadas na Tabela 4-8 para acelerações verticais e na Tabela 4-9 para acelerações laterais.

Tabela 4-8: Constantes para acelerações verticais

d [P/m ²]	k_F [kN ²]	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
$\leq 0,5$	$1,20 \times 10^{-2}$	2,95	-0,07	0,60	0,075	0,003	-0,040	-1,000	3,92
1,0	$7,00 \times 10^{-3}$	3,70	-0,07	0,56	0,084	0,004	-0,045	-1,000	3,80
1,5	$3,34 \times 10^{-3}$	5,10	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	3,74

Tabela 4-9: Constantes para acelerações laterais

d [P/m ²]	k_F [kN ²]	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
$\leq 0,5$	$2,85 \times 10^{-4}$	6,8	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,06	-1,005	3,77
1,0		7,9	-0,08	0,44	0,096	0,007	-0,071	-1,000	3,73
1,5		12,6	-0,07	0,31	0,120	0,009	-0,094	-1,020	3,63

Alternativamente, para se obter uma estimativa simplificada da massa modal envolvida, por forma a se assegurar um dado limite de conforto a_{limit} para um dado tráfego de peões, é deduzida uma expressão que é válida para $f_{s,m} = f_i$:

$$m_i \geq \frac{\sqrt{n} (k_1 \xi^{k_2} + 1.65 k_3 \xi^{k_4})}{a_{\text{limit}}}$$

- onde m^*_i é a massa modal do modo considerado i
- n é o número de peões sobre a ponte
- ξ é o factor de amortecimento estrutural
- k_1 a k_4 são constantes (cf. Tabela 4-10 para modos de flexão verticais e de torsão e Tabela 4-11 para modos de flexão laterais)

Tabela 4-10: Constantes para avaliação da massa modal (vertical) necessária

d [P/m ²]	k_1	k_2	k_3	k_4
≤ 0,5	0,7603	0,468	0,050	0,675
1,0	0,5700		0,040	
1,5	0,4000		0,035	

Tabela 4-11: Constantes para avaliação da massa modal (lateral) necessária

d [P/m ²]	k_1	k_2	k_3	k_4
≤ 0,5	0,1205	0,45	0,012	0,6405
1,0				
1,5				

O método de dimensionamento foi elaborado a partir de modelos de pontes baseados em elementos de viga. Se o comportamento estrutural da ponte diferir significativamente do traduzido por modelos desse tipo, os limites de aplicabilidade do método espectral podem ser ultrapassados.

4.6 Passo 6: Verificação de critérios para "lock-in" lateral

O número de peões susceptível de despoletar o fenómeno de sincronização lateral (lock-in), o qual corresponde ao número de peões N_L que pode conduzir ao anulamento do amortecimento global, produzindo uma súbita amplificação da resposta, pode ser definido como:

$$N_L = \frac{8\pi\xi m^* f}{k} \quad \text{Eq. 4-5}$$

onde ξ é o factor de amortecimento estrutural

m^* é a massa modal

f é a frequência natural

k constante (300 Ns/m aproximadamente na gama 0,5-1,0 Hz).

Outra abordagem consiste em definir a amplitude de aceleração susceptível de iniciar o fenómeno de "lock-in":

$$a_{\text{lock-in}} = 0,1 \text{ a } 0,15 \text{ m/s}^2 \quad \text{Eq. 4-6}$$

Experiências recentes têm demonstrado a adequabilidade de ambas as fórmulas para descrever o iniciar do fenómeno de "lock-in".

Nota: Não têm sido observados em pontes pedonais fenómenos de sincronização de fluxos de peões com vibrações verticais.

4.7 Passo 7: Verificação do nível de conforto

De acordo com a metodologia de verificação de projecto caracterizada na Figura 3-2, a resposta calculada para as situações de projecto especificadas e correspondentes modelos de carga tem de ser comparada com os limites de conforto especificados dados na Tabela 4.4. A não satisfação desses limites implica a necessidade de melhorar o comportamento dinâmico da ponte pedonal. Essas medidas incluem:

- modificação da massa;
- modificação da frequência;
- modificação do amortecimento estrutural;
- adição de amortecimento.

Para uma ponte já construída, o procedimento mais simples baseia-se no aumento do amortecimento estrutural, o qual pode ser alcançado quer através da implementação de dispositivos de controlo adicionais, quer através da actuação sobre elementos não-estruturais, tais como guarda-corpos ou revestimentos de pavimentos (cf. capítulo 6).

5 Avaliação de propriedades dinâmicas de pontes pedonais

5.1 Introdução

A caracterização experimental do comportamento dinâmico de uma ponte pedonal pode constituir uma importante componente do projecto, podendo ser desenvolvida com dois níveis de complexidade distintos:

- **Nível 1**- Identificação de parâmetros estruturais, com o objectivo de calibrar modelos numéricos e eventualmente sintonizar dispositivos de controlo. Frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento são os parâmetros de interesse;
- **Nível 2**- Medição da resposta dinâmica da ponte induzida pelos peões para análise de critérios de conforto e/ou correlação com resposta simulada.

A adopção de uma das estratégias acima mencionadas depende das características da estrutura e dos objectivos do estudo.

Ensaio de **Nível 2** podem ser considerados como ensaios correntes que devem ser realizados no final da construção de qualquer ponte pedonal susceptível a vibrações, proporcionando informação importante do ponto de vista do dimensionamento e verificação de segurança. Com base nos resultados desses ensaios, o dono de obra pode decidir incluir medidas de controlo ou não. Deve notar-se que o recurso a ensaios experimentais para verificar a classe de conforto de uma ponte pedonal específica requer a realização de medições para todos os fenómenos vibratórios e situações de projecto considerados no desenvolvimento dos modelos de carga e envolve a obtenção de valores característicos da resposta.

Ensaios de **Nível 1** são necessários quando é claro que o comportamento dinâmico da ponte pedonal está para além dos limites de aceitabilidade, tornando-se necessária a implementação de medidas de controlo. O dimensionamento adequado de dispositivos de controlo exige um conhecimento rigoroso dos parâmetros estruturais, nomeadamente frequências naturais e modos de vibração.

Este capítulo apresenta recomendações gerais para a realização de ensaios e análise de dados em pontes pedonais.

5.2 Medição da resposta

A realização de ensaios de **Nível 2** deve ter em conta os seguintes aspectos:

1. Identificação de frequências naturais críticas;
2. Identificação de factores de amortecimento;
3. Medição da resposta induzida por um peão isolado;
4. Medição da resposta induzida por um pequeno grupo de peões;
5. Medição da resposta induzida por um fluxo contínuo de peões.

A verificação de limites de aceitabilidade de vibração para uma ponte pedonal específica deve basear-se nos resultados destes ensaios, tendo em consideração o tipo de utilização particular dessa ponte.

5.2.1 Medição da resposta ambiental para identificação de frequências naturais críticas

Estes ensaios devem preferencialmente ser conduzidos com a ponte fechada ao trânsito de peões. Assumindo ter sido realizada uma análise dinâmica prévia, proporcionando estimativas de frequências naturais e modos de vibração, as secções instrumentadas devem corresponder às secções de máxima resposta modal estimada para as frequências críticas esperadas.

5.2.2 Medição aproximada de factores de amortecimento associados a frequências naturais críticas

Estimativas aproximadas de factores de amortecimento associados a frequências naturais críticas podem ser obtidas a partir de um ensaio de vibração livre simples, no qual um peão salta/flecte os joelhos/balança num ponto fixo a uma certa frequência, tentando induzir uma resposta ressonante da ponte para o modo de vibração correspondente. Após alguns ciclos de excitação, a acção do peão é subitamente interrompida e a resposta em vibração livre é registada. Este processo deve ser repetido algumas vezes, de modo a alcançar estimativas médias dos coeficientes de amortecimento em função da amplitude de oscilação.

5.2.3 Medição da resposta induzida por um peão isolado

Os ensaios descritos anteriormente permitem uma actualização das frequências críticas esperadas. A resposta da ponte pedonal é então medida em secções relevantes (secção de máximo deslocamento modal para cada frequência crítica),

considerando o movimento de um único peão sobre a ponte. Vários tipos de movimento devem ser explorados, em função das frequências de interesse:

- andamento, para frequências naturais críticas inferiores a 2,5 Hz;
- andamento ou corrida, para frequências naturais críticas entre 2 Hz e 3 Hz;
- corrida, para frequências naturais acima de 3 Hz.

Dadas as características aleatórias da excitação, vários ensaios devem ser realizados para cada combinação de frequência e movimento, tipicamente cerca de 5. Deve ser usado um metrónomo para assegurar que a frequência de passada correcta é alcançada. Os valores máximos de aceleração e deslocamento dinâmico (que pode também ser derivado da aceleração) da ponte devem ser registados para cada série temporal coligida, e o valor de pico da resposta induzida por um peão pode ser tomado como o máximo dos picos das respostas dos vários ensaios. O peso do peão deve ser anotado. Sempre que a ponte tenha uma inclinação não-simétrica, a resposta deve ser registada com o peão movendo-se no sentido descendente.

5.2.4 Medição da resposta induzida por um grupo de peões

A resposta deve ser medida em duas situações:

- andamento / corrida do grupo em utilização normal, e
- andamento / corrida do grupo com o objectivo de induzir uma resposta elevada (vandalismo).

Sempre que possível, o grupo deve ser constituído por 10 peões se a largura do tabuleiro for não superior a 2.5 m e por 15 peões no caso da largura ser superior. A resposta deve ser medida considerando o especificado na secção 5.2.3 para o atravessamento por um peão isolado. A resposta associada ao grupo sincronizado deve ser colhida de novo fazendo uso de um metrónomo, de modo a alcançar a sincronização numa frequência particular.

Dado ser expectável que a presença de pessoas sobre o tabuleiro possa originar um incremento dos coeficientes de amortecimento e que, para amplitudes de vibração elevadas, esses coeficientes aumentem, sugere-se que sejam efectuadas medições da resposta em vibração livre da ponte após aplicação de uma excitação em ressonância por um grupo de peões, saltando sobre uma posição fixa.

5.2.5 Medição da resposta induzida por um fluxo contínuo de peões

A medição da resposta induzida por um fluxo contínuo de peões reveste-se igualmente de interesse tendo em vista a determinação da resposta da ponte pedonal sob diferentes condições de utilização. Esta medição deve especialmente ser considerada em pontes pedonais claramente susceptíveis a vibrações, nomeadamente apresentando uma tendência para efeitos de sincronização. Os procedimentos de medição são idênticos aos adoptados nos ensaios com um peão isolado ou um grupo de peões, descritos nas secções 5.2.3 e 5.2.4.

5.3 Ensaios de identificação

A identificação de parâmetros modais, i.e., frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento, de uma estrutura é realizada através dos ensaios anteriormente designados de **Nível 1**. Pode aplicar-se uma técnica de análise modal convencional, baseada em ensaios de vibração forçada ou, alternativamente, a identificação pode ser efectuada com base em ensaios de vibração ambiental ou de vibração livre. Os parâmetros básicos dos ensaios são estabelecidos para ambos os casos nas secções seguintes.

5.3.1 Ensaios de vibração forçada

Os ensaios de vibração forçada são a base das técnicas de análise modal tradicional e proporcionam os resultados mais precisos, dado que utilizam excitações e respostas controladas. Este facto é particularmente relevante no que respeita à estimativa de coeficientes de amortecimento, cuja qualidade é altamente afectada por incertezas na medição. A técnica de identificação a aplicar depende do tipo de excitação empregue. Contudo, há o risco de que a energia da excitação associada a frequências naturais baixas seja pouca, tornando a relação sinal-ruído muito baixa.

Os dispositivos usados nestes ensaios,

The devices used for these tests,

- martelo de impulsos e
- vibrador,

são descritos na secção 5.4.2.1.

5.3.2 Ensaios de vibração ambiental

Os ensaios de vibração ambiental utilizam as acções ambientais correntes sobre a estrutura como acções de excitação, assumindo-se que o conteúdo em frequência destas é aproximadamente constante na gama de frequências de interesse. Embora esta hipótese não seja necessariamente válida, os ensaios de vibração ambiental têm-se tornado uma alternativa extremamente atractiva para a identificação de parâmetros modais em estruturas de engenharia civil, dados os limitados recursos requeridos, e a elevada precisão dos sensores actualmente disponíveis. O uso destas técnicas pode proporcionar erros significativos na determinação de estimativas de coeficientes de amortecimento.

5.3.3 Ensaios de vibração livre

Os ensaios de vibração livre consistem no registo da resposta estrutural associada à libertação súbita de um cabo tensionado ou outro dispositivo que cause um desvio inicial da posição de equilíbrio da estrutura. Estes ensaios são relativamente pouco dispendiosos quando realizados no final da construção da ponte pedonal e proporcionam estimativas precisas de coeficientes de amortecimento dos modos excitados. Constituem uma alternativa aos ensaios de vibração forçada, sendo expectável a obtenção de estimativas modais de qualidade superior em relação aos ensaios de vibração ambiental.

Sendo objectivo a identificação de amortecimentos, as medições devem ser efectuadas com velocidades de vento inferiores a 2-5 m/s.

5.4 Instrumentação

5.4.1 Transdutores para medição da resposta

Os limites de aceitabilidade relativos ao conforto humano dos peões são geralmente definidos em termos de aceleração, e por isso é essa a quantidade normalmente medida.

Os acelerómetros são sensores que emitem sinais eléctricos proporcionais à aceleração numa certa banda de frequências, podendo basear-se em diferentes princípios de funcionamento. Para a maioria das pontes pedonais, a gama de frequências de interesse é 0,5 – 20 Hz. Assim, as especificações usuais para os acelerómetros são:

- Gama de frequência (com 5% de linearidade): 0,1 – 50 Hz;
- Sensibilidade mínima: 10 mV/g
- Gama de medida: $\pm 0,5$ g

5.4.2 Dispositivos para identificação

5.4.2.1 Equipamentos de excitação

Equipamentos de excitação possíveis, tendo em vista a realização de ensaios de vibração forçada, são um martelo de impulsos (cf. Figura 5-1) ou um vibrador (cf. Figura 5-2).



Figura 5-1: Martelo de impulsos para aplicações de engenharia civil



Figura 5-2: Vibrador electromagnético para aplicações de engenharia civil. Montagem vertical

Nota: Referência a estes dispositivos é efectuada no Documento Base [1].

5.4.2.2 Transdutores para medição da excitação

Um aspecto importante no ensaio de pontes pedonais é a medição da excitação induzida pelos peões, quer em passagem isolada, quer em grupos.

A análise directa da acção concentrada aplicada por um peão em andamento pode ser efectuada através da instrumentação de uma plataforma com transdutores de força. No caso de um grupo de peões em andamento, é também importante medir o grau de sincronização dos peões, o qual pode ser analisado através do registo por câmaras de vídeo e subsequente processamento de imagem.

6 Controlo de vibrações

6.1 Introdução

Seguindo a metodologia de verificação de dimensionamento indicada na secção 3, a resposta calculada para os modelos de carga especificados tem de ser comparada com os limites de conforto. A não satisfação desses limites ou dos critérios de "lock-in" implica a necessidade de desenvolver medidas que melhorem o comportamento dinâmico da ponte pedonal. Estas medidas incluem a modificação de massa, de frequências ou de amortecimento estrutural.

6.2 Modificação de massa

No caso de pontes pedonais muito ligeiras, o uso de lajes de betão pesadas ao nível do tabuleiro pode melhorar a resposta dinâmica às acções dos peões, como consequência do aumento de massa modal. Esta abordagem é particularmente relevante no caso de pontes do tipo catenária.

6.3 Modificação de frequência

Tradicionalmente, a rigidez estrutural é modificada por forma a que a frequência deixe de cair na gama de frequências crítica, quer para vibrações verticais, quer laterais. A frequência é proporcional à raiz quadrada do quociente entre a rigidez e a massa, e por isso uma alteração adequada da frequência requer geralmente alterações estruturais significativas. No projecto de pontes modernas, em que o objectivo consiste em construir estruturas leves e graciosas do ponto de vista estético, estas alterações são normalmente impraticáveis uma vez concluída a construção, mas podem ser consideradas na fase de projecto.

6.4 Modificação do amortecimento estrutural

6.4.1 Introdução

O incremento do amortecimento estrutural é outra medida possível para reduzir os efeitos dinâmicos dos peões numa ponte pedonal. Para uma ponte existente, a abordagem mais simples baseia-se no aumento do amortecimento estrutural, o qual pode ser alcançado quer actuando ao nível de certos elementos no interior da estrutura, quer através da implementação de dispositivos de amortecimento externos.

O uso de dispositivos de amortecimento externos para absorver vibrações estruturais excessivas pode ser uma solução eficaz em termos de fiabilidade e custo. Estes dispositivos podem basear-se em técnicas de controlo activo, semi-activo ou passivo. Considerando aspectos como o custo, requisitos de manutenção e experiência prática, a opção usual recai sobre os dispositivos passivos, que incluem amortecedores viscosos, amortecedores de massas sintonizadas (TMD), amortecedores de pêndulo, amortecedores de colunas de líquido sintonizados (TLCD) ou amortecedores de líquidos sintonizados (TLD). Os mais vulgarizados são os amortecedores viscosos e os TMDs.

6.4.2 Medidas simples

As guardas são consideradas geralmente elementos não-estruturais cuja geometria e características são definidas de acordo com considerações de índole arquitectónica. Contudo, tem sido observado que estes elementos podem contribuir para um aumento de rigidez e de amortecimento da ponte pedonal, especialmente no caso de estruturas muito flexíveis. O uso de malha de alumínio, por exemplo, tem mostrado contribuir para um significativo aumento do amortecimento da ponte pedonal, em virtude da fricção gerada entre fios durante as vibrações. Todavia, não é possível quantificar o aumento de amortecimento, pois este é fortemente dependente da amplitude das vibrações.

De forma semelhante, o uso de elastómeros em apoios e revestimentos pode contribuir para um amortecimento acrescido da ponte pedonal, mas deve ter-se presente que as propriedades dos elastómeros se degradam com o tempo, sendo necessária uma manutenção regular.

A escolha de ligações aparafusadas em vez de soldadas é uma outra medida que pode contribuir para um amortecimento global mais elevado, em consequência da fricção desenvolvida na transferência da carga entre elementos.

6.4.3 Dispositivos adicionais de amortecimento

A Tabela 6-1 lista alguns exemplos de estruturas em que sistemas de amortecimento foram implementados, indicando-se as características dessas medidas e o efeito global sobre o comportamento dinâmico.

Tabela 6-1: Pontes pedonais em que foram implementados sistemas de amortecimento

Ponte	Número de vãos / vão [m]	Tipo	Frequências controladas [Hz]	Direcção dominante de vibração	Tipo de sistema de amortecimento implementado	Efeito do amortecimento do sistema no comportamento global
T-Bridge, Japão	2 vãos, 45+134	Ponte atirantada, viga caixão metálica contínua	0,93	Lateral	Amortecedores de líquidos sintonizados de tipo "sloshing", no interior de viga caixão. Total de 600 caixas, massa de 0,7% da massa generalizada do modo de vibração lateral do tabuleiro.	Deslocamento lateral do tabuleiro reduzido de 8,3mm para 2,9mm
Millennium Bridge, Londres	3 vãos, 108+144+80	Catenária suspensa	0,8 (principal) 0,5 1,0	Lateral	Amortecedores viscosos e amortecedor de massas sintonizadas para controlo de movimentos horizontais. Amortecedores de massas verticais para controlo da oscilação vertical, frequências entre 1,2 e 2,0Hz	Vibrações tornaram-se imperceptíveis para os utilizadores
Forchheim Bridge, Alemanha	1 vão, 117,5	Atirantada	1,0 to 3,0	Vertical	1 TMD	
Solférino Bridge, Paris	vão central, 106	Arco	0,81 1,94 2,22	Lateral Vertical Vertical	1 TMD lateral com 15000kg de massa e 2 TMDs verticais com massas de 10000kg e 7600kg	Aumento do amortecimento estrutural de 0,4% para 3,5% (lateral), e de 0,5% para 3% e 2% (vertical)
Ponte Pedro e Inês, Coimbra	vão central, 110	Arco abatido / viga	0,85 1,74; 1,80;2,34; 2,74; 3,07; 3,17	Lateral Vertical	1 TMD lateral com 14800kg e 6 TMDs verticais	Aumento do amortecimento lateral de 0,5% para 4% e do amortecimento vertical de 0,3%-2,2% para 3%- 6%

Nota: Informação mais detalhada acerca dos dispositivos acima descritos é apresentada no Documento Base [1].

6.4.3.1 Amortecedores viscosos

Os amortecedores viscosos (cf. Figura 6-1) são dispositivos usados para dissipar vibrações através da deformação de um fluido viscoso ou material sólido.

Um dos dispositivos mais usuais consiste num pistão no interior de um cilindro, causando a deformação e fluxo de um fluido e a produção de calor. A força resultante desse tipo de dispositivos depende da viscosidade do fluido e é proporcional à velocidade relativa de ambas as extremidades, dependendo por isso a eficiência de um amortecedor viscoso da possibilidade de instalar o amortecedor ligando pontos da estrutura com valores significativos de velocidade relativa. Em algumas configurações, o movimento do pistão induz escoamento do fluido através de aberturas calibradas, caso em que a dissipação ocorre por variação de volume do fluido. Este último tipo de amortecedor é menos dependente da temperatura que o primeiro, o qual se baseia essencialmente nas propriedades viscosas do fluido.

Amortecedores visco-elásticos constituem uma categoria diferente de amortecedores, que dissipam energia por deformação por corte de um material sólido, normalmente um polímero.



Figura 6-1: Um exemplo de amortecedores viscosos instalados

6.4.3.2 Amortecedores de massas sintonizados

Os amortecedores de massas sintonizados consistem em massas concentradas que são ligadas a uma estrutura através de elementos de rigidez e de amortecimento. Estes dispositivos são dimensionados de forma a transformarem a frequência crítica em duas novas frequências (uma abaixo e outra acima da frequência inicial), proporcionando o deslocamento relativo entre a estrutura e o TMD dissipação de energia. Como a massa da estrutura é muito mais elevada que a massa dos TMDs, o movimento do TMD envolve normalmente grandes deslocamentos quando comparados com o movimento da estrutura.

A Figura 6-2 mostra dois exemplos de TMDs, um vertical e um horizontal, instalados em pontes pedonais.



Figura 6-2: Exemplos de TMDs instalados

6.4.3.3 Amortecedores de pêndulo

Os amortecedores de pêndulo (cf. Figura 6-3) são um tipo específico de amortecedores de massas sintonizados, que são usados para supressão de vibrações horizontais. A principal diferença em relação a um TMD reside no facto de não serem utilizadas quaisquer molas, excepto em casos em que as frequências a suprimir são superiores a 1 Hz. A massa é suspensa por elementos de barra, o que reduz forças de atrito em relação a um apoio horizontal normal.

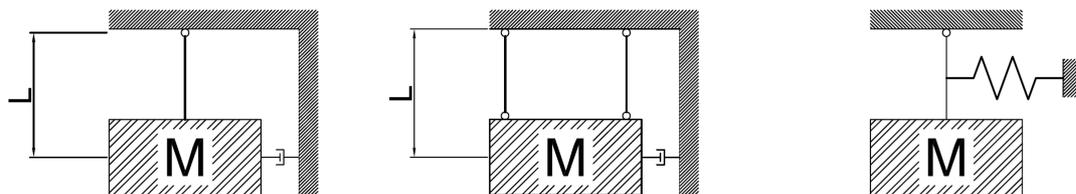


Figura 6-3: Exemplo de sistemas de pêndulo

6.4.3.4 Amortecedores de colunas de líquido sintonizados

Um amortecedor de colunas de líquido sintonizado (TLCD) consiste num tubo em forma de U (cf. Figura 6-4), cheio de um fluido (usualmente água), cujas propriedades são sintonizadas de tal forma que as forças na base do dispositivo, resultantes do movimento do líquido, contrariem o movimento horizontal do seu apoio. Este princípio de funcionamento é por isso idêntico ao de um TMD. Contudo, há várias vantagens em relação a outros tipos de dispositivos de amortecimento, tais como a fácil sintonização de frequência e amortecimento, fácil acomodação, construção simples e custos de manutenção quase nulos.

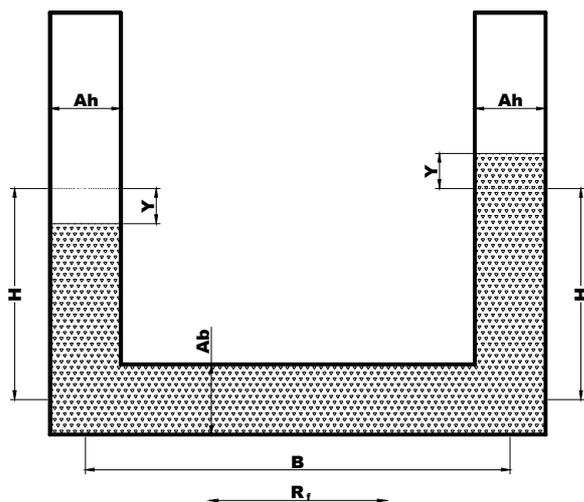


Figura 6-4: Esquema de um TLCD

O amortecimento óptimo de um TLCD deve ser o mesmo de um TMD equivalente. O TLCD tem amortecimento intrínseco devido a turbulência do fluido e, inserindo uma válvula de controlo ou uma placa com orifício no tubo horizontal, o amortecimento do TLCD pode ser adicionalmente melhorado. Contudo, não há literatura específica com informação relativa à quantificação do amortecimento do TLCD, pelo que este deve ser sempre obtido a partir de ensaios sobre protótipos de TLCDs.

6.4.3.5 Amortecedores de líquidos sintonizados

Os amortecedores de líquidos sintonizados (TLDs) são dispositivos de controlo passivo que consistem em tanques rígidos cheios com um líquido (cf. Figura 6-5) para atenuar vibrações horizontais de estruturas. Vantagens como baixo custo, activação a partir de um nível de vibração praticamente nulo, fácil ajuste da frequência natural e fácil instalação em estruturas existentes, têm contribuído para um aumento do interesse em relação a estes dispositivos. Contudo, o movimento do fluido pode ser altamente não-linear, em consequência do rebrandamento de ondas que pode ocorrer para vibrações de alta amplitude.

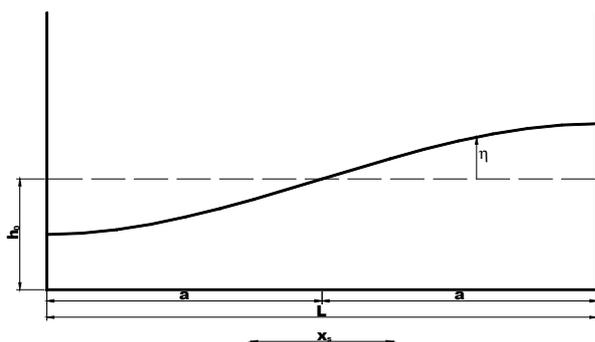


Figura 6-5: Esquema de um TLD

7 Referências

- [1] HiVoSS (Human induced Vibrations of Steel Structures): Vibrações em Pontes Pedonais – Documento Base, Setembro 2008.