

Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone

Medição de características de vibração de pontes de concreto usando telefonia móvel

Z. M. C. PRAVIA^a
zacarias@upf.br

J. D. BRAIDO^a
jorgebraido@gmail.com

Abstract

This research presents an alternative way to perform a bridge inspection, which considers the dynamics parameters from the structure. It shows an experimental phase with use of a mobile phone to extract the accelerations answers from two concrete bridges, from those records is feasible to obtain natural frequencies using the Fast Fourier Transform (FFT). Numerical models with uses finite element model (FEM) allow to determine the natural frequencies from the two concrete bridges and compare with the experimental phase of each one. The final results shows it's possible to use mobiles phones to extract vibration answers from concrete bridges and define the structural behavior of bridges from natural frequencies, this procedure could be used to evaluate bridges with lower costs.

Keywords: modal analysis, structural identification, inspection, monitoring.

Resumo

O presente artigo apresenta uma forma alternativa de inspeção para pontes que considera os parâmetros dinâmicos da estrutura. Trabalha na fase experimental com a extração de dados de aceleração com um aparelho de telefonia móvel e determinação de frequências naturais pelo uso da transformada rápida de Fourier (FFT) em dois viadutos em concreto. Ocorre ao mesmo tempo a modelagem em elementos finitos (MEF) de cada viaduto para a obtenção numérica das frequências. Posteriormente, é realizada a comparação entre as medições experimentais e os modelos numéricos. Os resultados finais mostram que é possível utilizar aparelhos de telefonia móvel para extrair dados de vibração e conhecer o comportamento estrutural de pontes através de frequências naturais, o que pode vir a ser usado para avaliação quantitativa e manutenção de pontes de maneira econômica.

Palavras-chave: análise modal, identificação estrutural, inspeção, monitoramento.

^a Postgraduate Program in Civil Engineering (PPGEng), University of Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS, Brazil.

1. Introdução

Instaladas em locais com relevo acidentado para vencer depressões, rios ou mares, ou em áreas urbanas para facilitar o deslocamento de veículos, as pontes normalmente são sistemas estruturais com inspeção onerosa e que exige pessoas com experiência. Para utilizar a inspeção visual é necessário o acesso aos locais onde se encontram os elementos estruturais, que devido à posição normalmente são difíceis de alcançar. Dessa forma, pode-se identificar a existência de fissuras, deformações excessivas e armaduras expostas a olho nu. Embora de fácil execução, esta técnica de inspeção é subjetiva, pois permite que mudanças nas propriedades dos materiais, que compõem os elementos estruturais, passem despercebidas.

Para suprir esta deficiência utiliza-se o monitoramento de estruturas, que trabalha por meio da instrumentação da estrutura e é capaz de realizar a inspeção através dos parâmetros modais dinâmicos. A definição desses parâmetros permite conhecer o comportamento dinâmico do sistema estrutural e definir a necessidade da manutenção.

Os estudos de caso desta pesquisa são dois viadutos em concreto, com diferentes vãos, localizados em Passo Fundo, Rio Grande do Sul, ambos executados em concreto e instaladas sobre ferrovia. As estruturas serão identificadas por Viaduto V1 e Viaduto V2. Foram executadas fases experimental e numérica. O objetivo é comparar as respostas dos modelos numéricos de acordo com as fases experimentais de cada viaduto com os valores obtidos de modelos numéricos. Além disso, comprovar que as respostas de vibração dos viadutos podem ser realizadas com aparelhos celulares. A definição do amortecimento foi possível graças à técnica do decaimento logarítmico aplicado às respostas extraídas em domínio do tempo.

O processo compreende três etapas: fazer a estrutura vibrar; extrair a resposta da aceleração por meio de acelerômetros e; analisar as respostas obtidas. A análise modal operacional foi utilizada para a vibração da estrutura através do deslocamento de caminhões sobre os viadutos. A extração de dados foi realizada por meio de um acelerômetro que equipa um aparelho de telefonia móvel. A análise de resultados foi possível após a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) às amostras extraídas. O comparativo de respostas é realizado entre as respostas das amostras experimentais e o modelo numérico em elementos finitos (MEF) de cada viaduto em análise.

O estudo lembra o que é realizado por [YOON], que utiliza um celular equipado com acelerômetro para verificar a frequência natural em trinta passarelas de aço em Seul, na Coreia do Sul, estes autores não estudaram os modelos numéricos, apenas as medições experimentais. Os modelos atuais de telefones móveis são capazes de realizar tal tarefa, pois estão munidos de um acelerômetro interno, que faz a leitura da vibração nos eixos X, Y e Z, e com taxas de aquisição de 50 a 200 Hz, dependendo do modelo e com excelente precisão.

Para que fossem atingidos os objetivos utilizou-se a análise modal, técnica que permite definir as características dinâmicas de um sistema através de um modelo matemático que melhor representa o comportamento da estrutura [HE]. A análise modal pode ser executada de maneira experimental ou operacional, porém neste estudo será destacada apenas a forma operacional do método devido ao seu uso.

A Análise Modal Operacional foi desenvolvida durante a década de 70 [THOMAS] e tem chamado atenção na engenharia devido às aplicações em plataformas marinhas, construções, torres, pontes e outras estruturas [ZHANG]. A técnica baseia-se na leitura da resposta da vibração, sendo descrita em torno de seus parâmetros modais: frequência natural, taxa de amortecimento e formas modais.

Na forma operacional é necessário realizar, apenas, as medições da resposta da estrutura. Não existe qualquer controle sobre as forças de excitação, nem é possível quantificá-las. A origem da excitação pode ter várias fontes, por exemplo: vento, tráfego de veículos e funcionamento de máquinas na estrutura [MENDES]. Segundo [BAYRAKTAR], em comparação com a análise modal experimental, a análise modal operacional é um processo rápido e não interfere com a operação da estrutura, pois usa uma fonte de excitação que já atua no sistema, além de as respostas medidas apresentarem as condições reais de operação. Segundo [MASJEDIAN], a forma operacional apresenta resultados referentes a todo o sistema em análise; é adequado para estruturas grandes e complexas e; pode ser utilizado no controle de vibração de estruturas e para identificar danos.

A análise modal pode ser executada por dois processos. O primeiro utiliza a técnica de discretização (Método dos Elementos Finitos), de onde é possível obter matrizes de massa e rigidez da estrutura. E a segunda que utiliza dados experimentais para definir frequências naturais, amortecimento e modos de vibração [LIMA]. É possível trabalhar utilizando a análise modal teórica e experimental em conjunto. Por exemplo, utilizando modelos experimentais, em escala, e numéricos, é possível realizar um refinamento da estrutura, através da comparação entre os modelos [9].

A comparação das respostas, além de indicar se o modelo numérico está calibrado, permite identificar a mudança no desempenho estrutural devido à ocorrência de danos. A resposta altera devido à degradação dos seus componentes à progressiva ou repentina variação da distribuição e intensidade do carregamento [ORCESI]. Em geral, o dano estrutural é relacionado como uma mudança nas propriedades físicas (massa, amortecimento e rigidez) da estrutura que afeta adversamente seus parâmetros modais (frequências naturais e formas modais). Em outras palavras, a existência do dano estrutural pode resultar em mudanças nas características dinâmicas da estrutura [ZHAO].

A transformada rápida de Fourier (FFT) é aplicada às amostras do comportamento de cada estudo de caso e transforma os dados em domínios de tempo em frequência. Como resultado, nos gráficos de frequência, destacam-se picos que indicam as frequências naturais da estrutura e definem a existência dos modos de vibração [SAHIN].

A análise de respostas obtidas é realizada através da comparação de respostas dos modelos numéricos, em elementos finitos (MEF), e experimentais. O comparativo de respostas é realizado de maneira contínua, onde se busca validar o modelo numérico.

A frequência de pontes em geral é fortemente dependente do comprimento do vão e do tipo de construção da ponte. Embora possuam, geralmente, valores de frequência entre 2 Hz e 4 Hz [[13] BACHMANN], podem variar em uma faixa de frequência de 0 (zero) a 14 Hz.

Segundo [MOHSENI], o comprimento do vão e o ângulo de inclinação influenciam na frequência natural de pontes. À medida

que o comprimento aumenta, a frequência fundamental diminui. O ângulo de inclinação quando aumenta também causa um aumento na frequência fundamental de pontes. O ângulo de inclinação interfere também no modo de vibração de estruturas. Pontes com ângulo de inclinação de 0° a 45° possuem formas modais de flexão dominantes.

A taxa de amortecimento da estrutura é determinada através do decremento aleatório, técnica que utiliza o registro da resposta da excitação em queda harmônica. Pode ser determinado manualmente através da análise das respostas em domínio do tempo [INMAN] [CANTIENI].

É definido por meio de uma relação que considera um número n de períodos consecutivos, positivos e inteiros, e o valor das amplitudes dos picos de início e fim considerados.

1.1 Justificativa

Segundo [17] ALSAIF, as pontes são elementos chave para o sistema de infraestrutura, pois através delas é possível determinar a capacidade de suporte do tráfego da rede viária. Comparadas às estradas, possuem maior custo de construção e manutenção, motivo pelo qual estimula uma análise mais precisa para evitar gastos desnecessários.

Verificada a necessidade de se realizar a inspeção em pontes, podem-se utilizar ferramentas atuais para a correta avaliação da estrutura. A identificação estrutural, também conhecido como sistema de monitoramento, encaixa-se neste contexto por ser capaz de indicar a necessidade de fortalecimento ou substituição de pontes existentes por meio da instrumentação da estrutura [18] WIBERG. A obtenção de dados dinâmicos pode ser realizada através da instalação de acelerômetros nas obras de arte especiais a serem avaliadas.

Além disso, as leituras dos dados de vibração são ideais para serem utilizados como base para um sistema de monitoramento contínuo, desde que sejam de fácil coleta e forneçam o comportamento global relativo através de poucos sensores [19] OWEN. Segundo [20] NEGRÃO e SIMÕES, o monitoramento não é exclusivo apenas para estruturas que necessitem de recuperação. No caso de futuras pontes, um conseqüente aumento do comprimento do vão, combinado com o desejo de utilizar lajes do tabuleiro mais esbeltas, levanta preocupações acerca do comportamento dinâmico. Mais, as novas pontes também devem ser monitoradas antes de entrar em operação, onde estão em perfeito estado fornecendo informações úteis para uma avaliação posterior.

Segundo [21], ao abordar a sustentabilidade, destaca-se a longevidade que estas estruturas podem atingir se obedecerem a três parâmetros: aumento da capacidade de transporte; aumento da vida útil de serviço e; aprimoramento do gerenciamento, fortalecendo e reparando sistemas. O aumento de vida útil pode ser obtido apenas com a execução adequada de inspeção e manutenção.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Estudos de caso

As obras de arte especiais avaliadas estão localizadas em áreas pertencentes ao município de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul (RS), ambas instaladas sobre ferrovia. As estruturas serão identificadas por Viaduto V1 e Viaduto V2.

2.1.1 Viaduto V1

Localizado na rodovia BR 285, entre Carazinho e Lagoa Vermelha, no município de Passo Fundo, nas proximidades do distrito industrial. Possui 22,50 m de extensão e largura de 10,20 m, com vão máximo central de 12,10m. É composto por 2 longarinas; 5 transversinas, 4 pilares e 4 apoios. As coordenadas geográficas do viaduto V1 são: $28^\circ 13' 51,08''\text{S}$; $52^\circ 24' 01,26''\text{O}$.

2.1.2 Viaduto V2

Localiza-se na estrada Perimetral Leste, RS-135, no município de Passo Fundo. Possui 36,00 m de extensão e 10,60m de largura, com vão máximo central de 24,00 m. É constituído por 2 longarinas, 6 transversinas, 4 pilares e 4 apoios. As coordenadas geográficas do viaduto V2 são: $28^\circ 16' 14,16''\text{S}$; $52^\circ 21' 53,58''\text{O}$.

2.2 Materiais e métodos

Para a realização da pesquisa foram utilizados um celular e um computador. Com o celular, equipado com acelerômetro triaxial, se extraíam as respostas da aceleração dos viadutos. O processamento de informações capturadas, de modo a obter as frequências naturais, foi realizado com o computador. O celular utilizado foi o Motorola Razr™ D1.

Para o salvamento dos dados de vibração foi utilizado o Vibration Monitoring, aplicativo gratuito desenvolvido pela Mobile Tools para o sistema Android. O aplicativo relatou as vibrações do aparelho de telefonia móvel em tempo real e salvou as vibrações registradas em memória. O acelerômetro possui uma resolução de $0,0039 \text{ m/s}^2$, valor fornecido pelo aplicativo em uso. A taxa de amostragem é de 100 amostras/segundo, com tempo para cada

Figura 1 – Interface gráfica do Vibration Monitoring

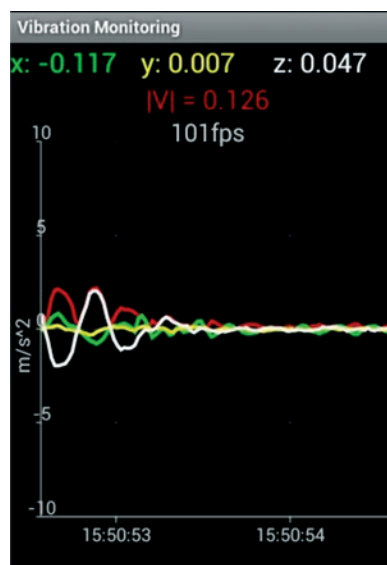
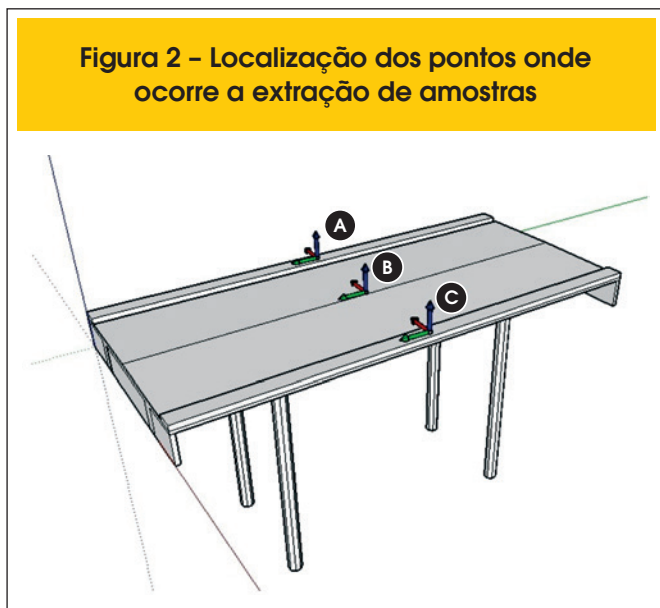


Figura 2 – Localização dos pontos onde ocorre a extração de amostras



amostra de 0,01 s. A aferição do acelerômetro foi realizada através de uma mesa vibratória. A Figura 1 apresenta a interface gráfica do Vibration Monitoring.

Para a modelagem do viaduto foi utilizado o software SAP2000, plataforma para programação em elementos finitos que executa análise estática ou dinâmica, linear ou não linear para a análise e projeto de estruturas.

Para o processamento do sinal transformando-o em domínio de frequência foi utilizado o Scilab, software gratuito com código aberto, utilizado para a programação de algoritmos numéricos que englobam vários aspectos dos problemas de computação científica.

2.3 Levantamento no campo dos sinais de operação

O acelerômetro foi posicionado no meio do maior vão de cada viaduto ferroviário, de modo a obter o comportamento mais amplificado da estrutura. As acelerações verticais foram extraídas à direita e à esquerda da seção transversal e sobre a faixa de sinalização que separa as faixas de rolagem de cada viaduto. A Figura 2 apresenta a localização dos pontos onde ocorre a extração de amostras.

O tempo de extração de dados iniciava assim que um caminhão deixava de trafegar sobre o viaduto, e finalizava antes que outro caminhão, em qualquer sentido, alcançava o mesmo viaduto. Dessa forma se assegurava que o viaduto vibre apenas pelas suas características físicas, sem sofrer influência da interação entre caminhão e estrutura. O início e fim de salvamento de dados também obedeciam ao mesmo critério. O acionamento do salvamento de dados era manual.

A condição ideal para o salvamento de dados era quando apenas um caminhão trafegava sobre o viaduto. A Figura 3 apresenta a condição ideal para que ocorra o início de salvamento de dados. Em (1) o caminhão se aproxima do viaduto, que está em repouso. Em (2) o caminhão se desloca sobre o viaduto, excitando-o. Em (3), ao sair do viaduto, a estrutura responde ao estímulo do veículo e vibra até entrar novamente em repouso.

Nenhuma espécie de excitação controlada foi utilizada (exemplo: caminhão com dimensões e pesos conhecidos, com velocidade e peso pré-determinado), devido à escolha do método de excitação da estrutura ser operacional. O viaduto estava em operação sujeito ao tráfego atuante diário.

A Figura 4 apresenta o resultado do deslocamento do caminhão sobre o viaduto e demonstra quando é que inicia o salvamento de dados. Em (a), antes de o caminhão alcançar o viaduto, não existe qualquer deslocamento atuando sobre a estrutura. Em (b), após a saída do caminhão, o viaduto vibra devido à existência das acelerações, onde ocorrem os deslocamentos verticais, é nesse momento que inicia o salvamento de dados.

Para que os dados não fossem alterados pela ocorrência da vibração, o celular foi fixado nos pontos escolhidos com fita dupla face.

2.4 Processamento de dados obtidos em campo e comparação com o modelo numérico

O processamento de dados foi realizado pela aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) às amostras.

O modelo numérico executado em elementos finitos, através do SAP2000, apresentou no fim da análise as frequências naturais e formas modais de acordo com as propriedades dos elementos atribuídos à estrutura.

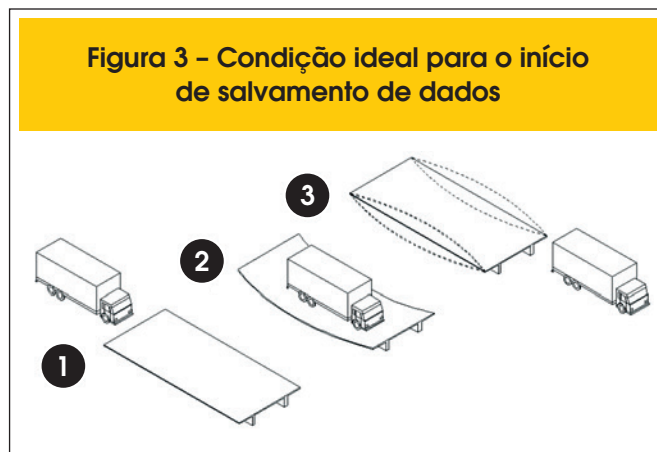
A comparação dos modelos foi realizada através dos valores de parâmetros modais finais obtidos nas fases experimental e numérica.

2.5 Análise dos modelos numéricos

A análise e a calibração dos modelos ocorreram de modo a adotar diferentes módulos de elasticidade. Os ajustes finalizaram assim que os dois modelos, experimental e numérico, responderam de maneira aproximada.

A Figura 5 apresenta de forma sucinta a metodologia aplicada. Em (a) a ponte, instrumentada para a medição, é submetida a forças de excitação originárias do tráfego de veículos. A resposta, extraída em domínio de tempo, é aplicada à transformada rápida de Fourier (FFT) e transforma-se em domínio de frequência. Os picos resultantes da transformação de domínios representam a frequência natural do viaduto em análise.

Figura 3 – Condição ideal para o início de salvamento de dados



Em (b) a ponte é modelada fisicamente (em elementos finitos) onde, efetuados os ajustes do modelo, é possível obter os parâmetros modais de frequência e forma modal. A taxa de amortecimento é obtida experimentalmente.

3. Estudo experimental

3.1 Viaduto V1

Nos pontos A, B e C foram realizadas 7 extrações de dados:

- A: sobre o passeio público - Amostra 1, 2, 3 e 4;
- B: no centro das pistas de rolagem, sobre a sinalização – não foram executadas medições neste ponto devido à possibilidade de o tráfego destruir o aparelho de telefonia móvel;
- C: sobre o passeio público - Amostra 5, 6, 7.

3.1.1 Sinais em domínio do tempo

As respostas obtidas podem ser classificadas como vibração livre. A Figura 6 apresenta uma das fontes de vibração utilizadas e a Figura 7 uma das amostras extraídas no viaduto V1.

3.1.2 Amortecimento do viaduto V1

Para o viaduto V1 obteve-se um taxa de amortecimento médio de $\xi=0,0175$. Ou seja, a taxa de amortecimento é de 1,75%. Na

Tabela 1 são apresentadas as taxas de amortecimentos obtidas ao aplicar a técnica do decremento aleatório em todas as amostras. Na amostra 7 não foi possível conhecer o amortecimento devido à amostra não obedecer o decremento logarítmico necessário.

3.1.3 Sinais em domínio de frequência do viaduto V1

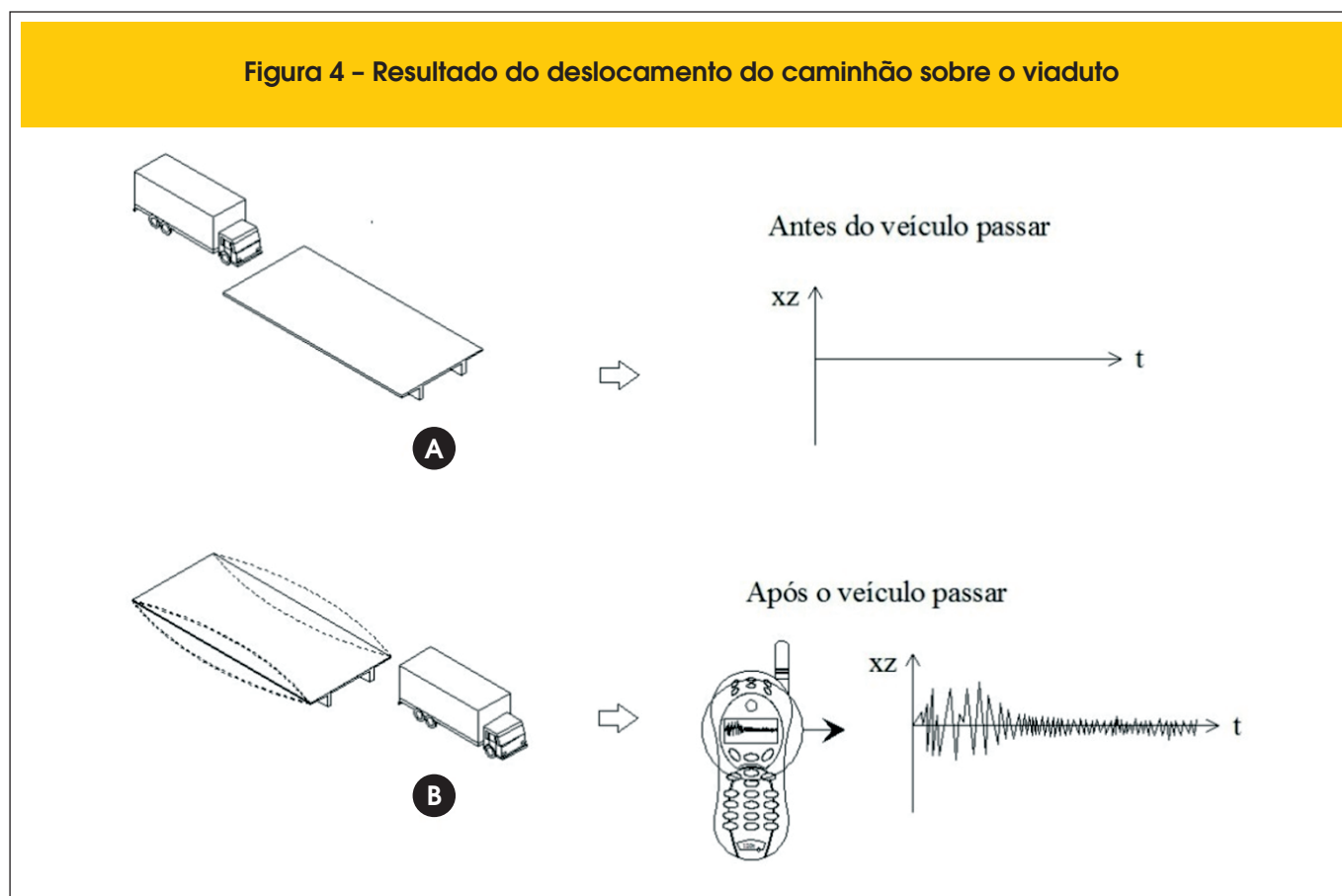
Convertidas em domínio de frequência, as amostras 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 manifestaram picos de frequência que variam de 7 a 14 Hz. As amostras 1, 2, 3 e 4 extraídas sobre o ponto A, manifestaram picos de frequência de $f_1= 12,30$ Hz; $f_2= 13,08$ Hz; $f_3= 11,72$ Hz e; $f_4= 12,60$. As amostras 5, 6 e 7, extraídas sobre o ponto C, apresentaram frequências de $f_5= 14,45$ Hz; $f_6= 13,08$ Hz e; $f_7= 7,81$. A Figura 8 apresenta a amostra 1, obtida no viaduto V1, em domínio de frequência. O pico de frequência natural identificado é de 12,30 Hz.

3.2 Viaduto V2

Foram realizadas nove extrações de amostras nos pontos A, B e C do viaduto V2:

- A: sobre o passeio público - Amostra 1, 2, 3;
- B: no centro das pistas de rolagem, sobre a sinalização – Amostra 7, 8, 9;
- C: sobre o passeio público - Amostra 4, 5, 6.

Figura 4 – Resultado do deslocamento do caminhão sobre o viaduto



3.2.1 Sinais em domínio do tempo

A Figura 9 apresenta uma das amostras extraídas no viaduto V2.

3.2.2 Amortecimento do viaduto V2

Para o viaduto V2 obteve-se uma taxa de amortecimento médio de $\xi=0,012$. Ou seja, a taxa de amortecimento do Viaduto V2 é 1,2%. Na Tabela 2 são apresentados os valores de amortecimento para cada amostra extraída no viaduto V2. Nas amostras 6, 7 e 8 não foi possível conhecer o amortecimento devido às amostras não obedecerem ao decaimento logarítmico necessário.

3.2.3 Sinais em domínio de frequência do viaduto V2

As amostras extraídas apresentaram valores de frequência que variam de 5,96 Hz a 7,42 Hz. Nas amostras 4, 5, 7 e 9 ocorrem além das frequências relacionadas à estrutura, picos próximos a 15 e 20 Hz que podem estar associados à fonte de vibração da estrutura e a interação entre caminhões e o viaduto. As frequências das amostras 6 e 8 sofreram interferência do tráfego e apresentam ruído, onde é impossível identificar a frequência referente à estrutura. A Figura 10 apresenta a amostra 1, obtida no viaduto V2, em domínio de frequência. O pico de frequência natural identificado é de 6,44 Hz.

Figura 5 - Síntese da metodologia

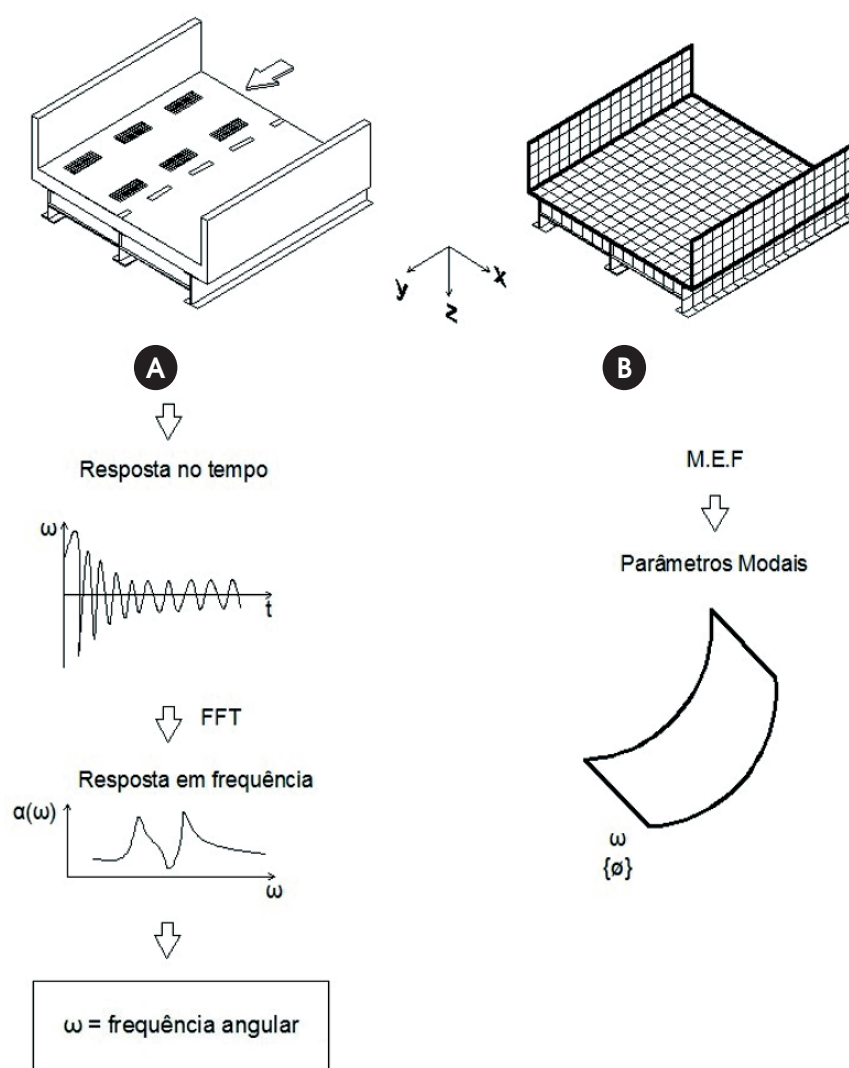


Figura 6 - Fonte de vibração da estrutura para uma amostra no viaduto V1



Figura 8 - Frequência resultante da amostra 1 no viaduto V1

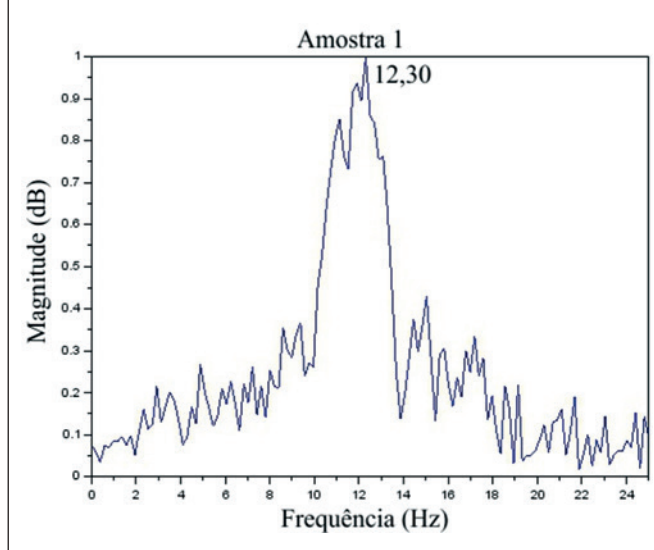
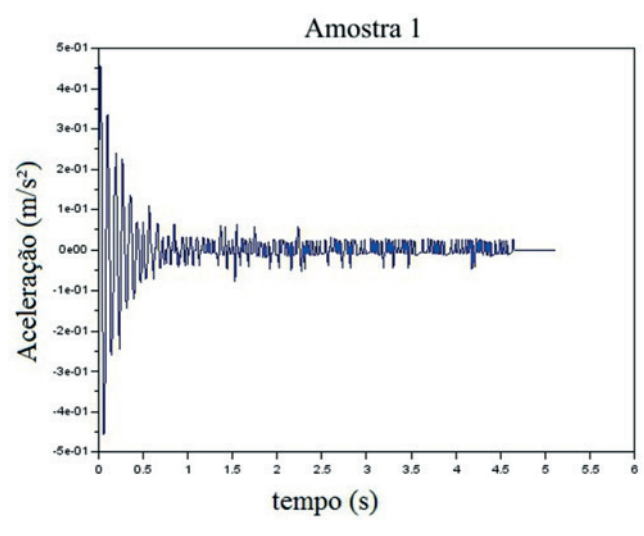


Figura 7 - Amostra 1 extraída no viaduto V1



4. Modelagem numérica

4.1 Viaduto V1

O modelo numérico do viaduto V1 foi dividido em uma malha de aproximadamente 50x50 cm no tabuleiro; 50x18 cm nas longarinas e; 50x18 cm nas transversinas. A análise executada é por cascas.

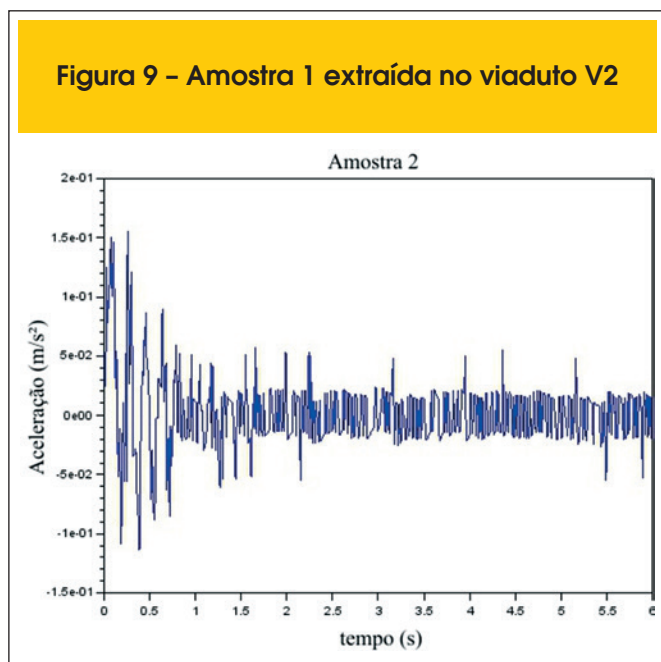
4.1.1 Condições de contorno

Os quatro pilares existentes foram considerados engastados. Nas extremidades longitudinais, onde as longarinas e as transversinas se encontram foi restringido o movimento de translação em Z. Nas

Tabela 1 - Taxa de amortecimento obtida no viaduto V1

Amostra	Amortecimento (ξ)
1	0,020
2	0,013
3	0,027
4	0,011
5	0,015
6	0,019
7	-
Taxa média de amortecimento	0,0175
Desvio padrão (σ)	0,0058
Coefficiente de variação	33%

Figura 9 - Amostra 1 extraída no viaduto V2



transversinas das extremidades, em cada lateral foi restringido o movimento de translação nos eixos X e Y.

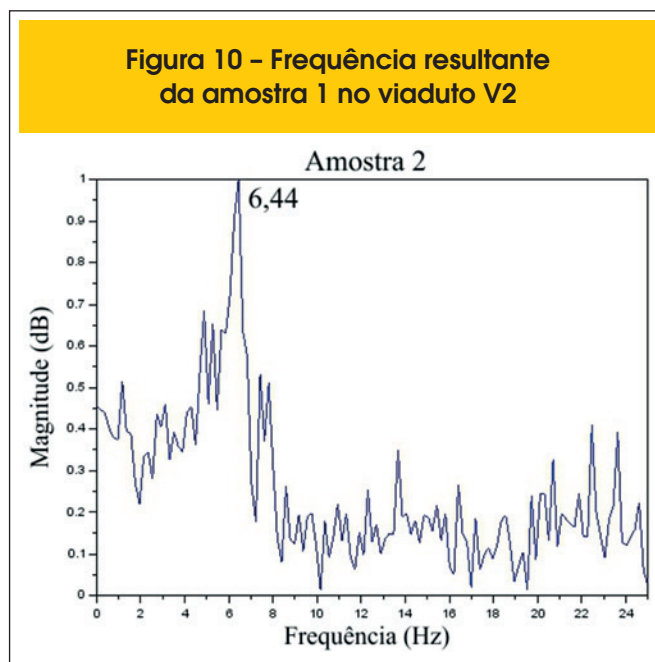
4.1.2 Propriedades do material

A propriedade de material atribuída ao modelo numérico segue ao que é especificado para um concreto com peso específico de 25 KN/m³ e 20 MPa de resistência, com coeficiente de Poisson de 0,2 e módulo de elasticidade de 25 GPa [22].

Tabela 2 - Taxa de amortecimento obtida no viaduto V2

Amostra	Amortecimento (ξ)
1	0,012
2	0,007
3	0,014
4	0,013
5	0,015
6	-
7	-
8	0,0175
9	-
-	33%
0,010	-
Taxa média de amortecimento	0,012
Desvio padrão (σ)	0,003
Coefficiente de variação	25%

Figura 10 - Frequência resultante da amostra 1 no viaduto V2



4.1.3 Massas existentes

Foram adicionadas massas correspondentes aos guarda-corpos ao modelo numérico.

4.1.4 Frequências naturais e modos de vibração

As frequências naturais e os modos de vibração obtidos após a análise modal foram: $f_1 = 11,64$ Hz com modo de torção; $f_2 = 12,03$ Hz com modo de flexão; $f_3 = 13,78$ com modo de torção. Considerando a frequência natural e a forma modal anexada ao modelo numérico, o que mais se aproxima do que é verificado experimentalmente é o modelo com frequência $f_2 = 12,03$ Hz e forma modal de flexão. A Figura 11 apresenta as formas modais resultantes da análise efetuada com o SAP2000. A Tabela 3 [Tabela 3] apresenta os modos de vibração e frequências naturais associadas à estrutura.

4.2 Viaduto V2

Para o modelo numérico do viaduto V2, a malha do tabuleiro possuía dimensões de aproximadamente 50x50 cm; 50x20 cm nas longarinas e; 50x20 cm nas transversinas. Também foi executada a análise por cascas.

4.2.1 Condições de contorno

Foram adotadas as condições de contorno iguais àquelas inseridas no viaduto V1.

4.2.2 Propriedades do material

As propriedades de material anexadas ao modelo numérico do viaduto V2 seguem ao que foi especificado em projeto, o qual foi possível obter acesso, onde o concreto possuía resistência de

Figura 11 – Formas modais do modelo numérico do viaduto V1

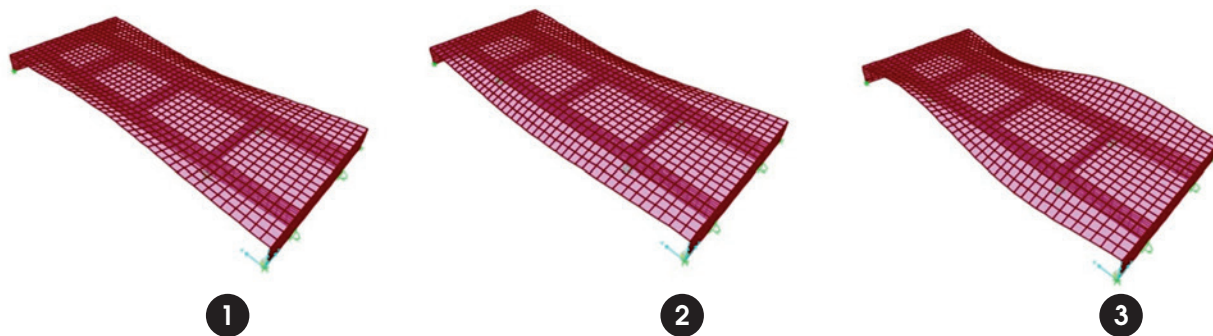


Tabela 3 – Frequências e formas modais do viaduto V1

Modos de vibração	Frequência f (Hz)	Forma modal
1	11,64	Torção
2	12,03	Flexão
3	13,78	Torção

Tabela 4 – Frequências e formas modais do viaduto V2

Modos de vibração	Frequência f (Hz)	Modo
1	6,93	Torção
2	7,57	Flexão
3	10,13	Transversal

18 MPa. O peso específico de 25 KN/m³, com coeficiente de Poisson de 0,2 [22].

O módulo de elasticidade adotado foi de 20 GPa, determinado através da equação 1:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{fck} \quad (1)$$

Sendo o parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade (α_E):

$$\alpha_i = 0.8 + 0.2 \cdot \frac{fck}{80} \leq 1.0 \quad (2)$$

Embora a equação 1 seja utilizada para determinar o módulo de elasticidade para concretos com resistência de 20 MPa a 50 MPa, adotou-se a mesma metodologia para obedecer os critérios estabelecidos na norma NBR 6118/2014.

4.2.3 Massas existentes

Foram adicionadas massas correspondentes aos guarda-corpos ao modelo numérico.

4.2.4 Frequências naturais e modos de vibração

As frequências e os modos de vibração obtidos foram: f1=6,93 Hz com modo de torção; f2=7,57 Hz com modo de flexão; f3=10,13 Hz com modo transversal.

Considerando a frequência e a forma modal, a que mais se assemelha com o resultado experimental é a frequência f2=7,57 Hz com modo de flexão. A Figura 12 apresenta as formas modais resultantes da análise efetuada com o SAP2000. A Tabela 4 apresenta os modos de vibração e frequências naturais associadas à estrutura.

4.3 Avaliação do resultado

Ao avaliar o viaduto V1 e considerar as formas modais e as frequências anexadas ao modelo numérico, a que mais se aproxima do que é verificado experimentalmente é a frequência de 12,03 Hz com modo de flexão. As respostas experimentais que mais se assemelham ao modelo numérico são as amostras 1 e 4. Os resultados da fase experimental apresentaram valores de frequência que variam entre uma faixa de 7,81 Hz a 14,45 Hz.

Ao analisar a fase experimental e o modelo numérico do viaduto V2, a amostra 4 com frequência de 7,42 Hz, destaca-se como a mais próxima àquela obtida com o modelo numérico de 7,57 Hz e modo de flexão. Os valores de frequência da fase experimental variam

Figura 12 – Formas modais do modelo numérico do viaduto V2



de 5,96 a 7,42 Hz. A Tabela apresenta as frequências numéricas e experimentais resultantes nos viadutos V1 e V2. As frequências obtidas nos viadutos V1 e V2 obedecem ao que é exposto por [13], que apresenta uma faixa de frequências para pontes de 0 a 14 Hz.

Ao avaliar os resultados de amortecimento obtidos, [13] indica que os valores deste parâmetro para pontes em geral não deve ser maior que 2%.

Tanto no Viaduto V1 quanto no Viaduto V2 obtiveram valores de amortecimento menores que 2%. O Viaduto V1 apresentou amortecimento de 1,75% e o Viaduto V2 de 1,2%.

5. Conclusões

Ao observar os resultados obtidos e a metodologia desenvolvida, é possível afirmar que a excitação natural, adotada neste caso como o tráfego de caminhões, mostrou-se eficaz por fazer a estrutura vibrar. Dessa forma, foi possível extrair os dados de aceleração necessários.

O acelerômetro triaxial que equipa o aparelho de telefonia móvel foi capaz de obter dados de vibração dos viadutos. É, portanto, uma alternativa ao tradicional ensaio de vibração executado com acelerômetros criados para este fim.

Tabela 5 – Frequências numéricas e experimentais resultantes

	Modelo numérico		Fase experimental	
	Modo de vibração	Frequência (Hz)	Amostra	Frequência (Hz)
Viaduto V1	1 - Torção	11,64	1	12,31
	2 - Flexão	12,03	2	13,08
	3 - Torção	13,78	3	11,72
	-	-	4	12,60
	-	-	5	14,45
	-	-	6	13,08
	-	-	7	7,81
Viaduto V2	1 - Torsion	6.93	1	6,05
	2 - Flexion	7.57	2	6,44
	3 - Transverse	10.13	3	6,25
	-	-	4	7,42
	-	-	5	6,44
	-	-	6	Ruído
	-	-	7	5,96
	-	-	8	Ruído
	-	-	9	6,49

A extração de dados ocorreu de maneira rápida e simplificada, porém exigiu cuidados para evitar que as amostras extraídas fossem afetadas pelo tráfego de veículos. Mesmo assim, obteve-se um pequeno número de amostras inutilizadas pela interação entre veículos e a estrutura. O tempo de duração das amostras, embora variante, indicou a frequência natural das estruturas sem interferir nos resultados. As frequências obtidas experimentalmente se adequam ao que é exposto por [13] BACHMANN et al, onde permanecem em uma faixa de valores de 0 a 14 Hz para pontes.

Tanto o viaduto V1 quanto o V2 apresentam modelos numéricos com respostas muito próximas do que é verificado experimentalmente. Desta forma é possível afirmar que os modelos estão calibrados e prontos para possíveis simulações em torno do desempenho estrutural de cada viaduto.

O amortecimento resultante em cada viaduto ficou abaixo de 2%, valor que é estabelecido por [13] BACHMANN et al para pontes em geral.

Portanto, o processo de utilizar a excitação natural para extração de dados de vibração com celulares munidos de acelerômetros é apropriado, confiável e muito econômico. Os resultados finais obtidos, numérico e experimentalmente, permitem afirmar que é possível determinar a frequência natural, o amortecimento e monitorar obras de arte especiais de maneira alternativa, sem a necessidade de intervir no tráfego, com baixo custo, confiabilidade e maior facilidade por meio de aparelhos de telefonia móvel.

6. Referências bibliográficas

- [1] YOON et al. Vibration Measurements of Steel Foot-bridges using Mobile-phone. *Applied Mechanics and Materials*, v. 470, 2014, p. 471-493. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.470.777>
- [2] HE, J. FU, Z. Modal Analysis. 1. ed. Oxford: University of Oxford, 1. ed. 2001. 291 p. http://papai.ucoz.hu/konyvek/He-Fu_Modal-Analysis.pdf
- [3] THOMAS et al. Identification of modal parameters by operational modal analysis for the assessment of bridge rehabilitation. In: 2nd, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL OPERATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 2007. http://www.academia.edu/829984/IDENTIFICATION_OF_MODAL_PARAMETERS_BY_OPERATIONAL_MODAL_ANALYSIS_FOR_THE_ASSESSMENT_OF_BRIDGE_REHABILITATION
- [4] ZHANG et al. An overview of operational modal analysis: major development and issues. In: 1st, INTERNATIONAL OPERATIONAL MODAL ANALYSIS, 2005. [http://vbn.aau.dk/en/publications/an-overview-of-operational-modal-analysis\(eacacb00-346d-11db-a718-000ea68e967b\).html](http://vbn.aau.dk/en/publications/an-overview-of-operational-modal-analysis(eacacb00-346d-11db-a718-000ea68e967b).html)
- [5] MENDES, P; OLIVEIRA, S. Análise dinâmica de estruturas: utilização integrada de modelos de identificação modal e modelos de elementos finitos. LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2008.
- [6] BAYRAKTAR et al. Ambient Vibration Tests of a Steel Foot-bridge. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 29, 2010; p. 14-24. <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-009-0061-9>
- [7] MASJEDIAN, H, M; KESHMIRI, M. A review on operational modal analysis researches: classification of methods and applications. In: 3, IOMAC'09, INTERNATIONAL OPERATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 2009. <http://www.iomac.dk/sync/uploads/d1a86b9c8297ae2d1736272a-1c2a4b8e.pdf>
- [8] LIMA, A, N, M. Testes modais utilizando martelo instrumentado em estruturas de baixas frequências naturais, João Pessoa, 2006, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, 58 p. http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=319
- [9] MEIRELLES, B, F, J. Análise dinâmica de estruturas por modelos de elementos finitos identificados experimentalmente, Guimarães, 2007, Tese (Doutorado) - Universidade de Minho, 344 p. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/8059/1/PHD-Meireles%20Revision%20e.pdf>
- [10] ORCESI, D, A; FRANGOPOL, M, D. Bridge Performance Monitoring Based on Traffic Data. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 139, 2013, p. 1508-1520. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000582](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000582)
- [11] ZHAO, J; ZHANG, J. Structural Damage Identification Based on the Modal Data Change. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, v. 4, 2012, p. 59-66. <http://dx.doi.org/10.5815/ijem.2012.04.08>
- [12] SAHIN, A; BAYRAKTAR, A. Forced-Vibration Testing and Experimental Modal Analysis of a Steel Footbridge for Structural Identification. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 42, 2014, p. 695-712. <http://dx.doi.org/10.1520/JTE20130166>
- [13] BACHMANN et al. *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Birkhäuser Verlag, 1995. 248 p.
- [14] MOHSENI et al. A Simplified Method to Estimate the Fundamental Frequency of Skew Continuous Multicell Box-Girder Bridges. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 11, 2014, p. 649-658. <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-78252014000400006>
- [15] INMAN, D. J. *Engineering Vibration*. 3. ed. Upper Saddle River, New Jersey. Pearson Education, Inc., 2007. 669 p.
- [16] CANTIENI, R. Dynamic Load Testing of Highway Bridges, *IABSE PERIODICA*, v. 3, 1984, p. 75-84. <http://dx.doi.org/10.5169/seals-38337>
- [17] ALSAIF et al. Field study for the evaluation of steel bridges in Riyadh City. In: SAUDI ENGINEERING CONFERENCE (SEC7), 7., 2007, Riyadh, Arábia Saudita. <http://faculty.ksu.edu.sa/mmadany/Publications/list%20Publication/Field%20Study%20for%20the%20Evaluation.pdf>
- [18] WIBERG, J. Bridge monitoring to allow for reliable dynamic FE modelling: a case study of the new Årsta Railway Bridge. Stockholm, Sweden: KTH, 2006. 151 p. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:9925/FULLTEXT01.pdf>
- [19] OWEN, S, J; PEARSON, R, S; The use of dynamic data for the structural health monitoring of bridges. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING SURVEYS FOR CONSTRUCTION WORKS AND STRUCTURAL ENGINEERING, 1., 2004, United Kingdom. https://www.fig.net/nottingham/proc/ts_04_1_owen_pearson.pdf
- [20] NEGRÃO, O, H, J; SIMÕES, C, M, L. Dimensionamento e otimização da geometria de pontes em tirantes metálicas. In: III, ENCONTRO NACIONAL DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 1992. http://www.researchgate.net/publication/236133594_Dimensionamento_e_Otimizacao_da_Geometria_em_Pontes_de_Tirantes_Metlicas

- [21] LOUIS, A. R. Sustainable Bridges: Green Links to the Future, Ohio, 2010, Dissertação (Mestrado) - The Ohio State University, 91 p. https://etd.ohiolink.edu/ap:0:0:APPLICATION_PROCESS=DOWNLOAD_ETD_SUB_DOC_ACCNUM:::F1501_ID:osu1274455847, attachment
- [22] ASSOCIAÇÃO BRAASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.