



## **Alternativas de medições de vibrações de baixo custo para obras de arte**

**Zacarias Martin Chamberlain Pravia<sup>1</sup>, Jorge Dalmas Braido<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, e-mail: zacarias@upf.br, Doutor em Engenharia Civil

<sup>2</sup> Profissional autônomo, e-mail: jorgebraido@gmail.com, Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

### **Resumo**

É apresentada aqui uma alternativa de baixo custo para a aquisição dos parâmetros de vibração, frequência natural e amortecimento de obras de artes especiais. A metodologia utiliza aparelhos celulares equipados com acelerômetros para extrair amostras de aceleração das estruturas. A vibração, necessária para extração das amostras, é inserida na passarela através da execução de saltos por mais de uma pessoa e na ponte por meio do deslocamento de caminhões. As amostras são extraídas em domínio do tempo. Utiliza a transformada rápida de Fourier (FFT) para determinar a frequência natural da estrutura e a técnica do decaimento logarítmico para conhecer as taxas de amortecimento. A técnica não utiliza qualquer tratamento para a melhoria das amostras. Os estudos de caso foram: uma passarela em concreto protendido e uma ponte em concreto armado. Os resultados obtidos indicam ser possível determinar os parâmetros dinâmicos modais das estruturas em teste com o uso de amostras extraídas por meio de aparelhos de telefonia móvel. Os resultados são válidos para registro de novas obras, controle e inspeção das existentes.

### **Palavras-chave**

Parâmetros de vibração; Identificação estrutural; Inspeção; Monitoramento.

### **Introdução**

Conhecidas como obras de artes especiais, pontes e passarelas possuem inspeção visual normatizada, executada frequentemente em intervalos de tempos programados. Com a finalidade de garantir o correto comportamento do sistema, apontam-se elementos e locais com desconformidades estruturais.

Embora recomendado, o método de inspeção visual é incompleto por ser incapaz de detectar mudanças nas propriedades dos materiais que compõem a estrutura. Para complementar o processo de inspeção, pode-se fazer uso do monitoramento estrutural.

O monitoramento utiliza dispositivos capazes de extrair dados referentes ao comportamento real e atual do sistema. Descreve-se o desempenho estrutural através das propriedades dinâmicas de frequência natural, taxa de amortecimento e forma modal.

Para a definição dos parâmetros modais é necessário a execução do ensaio de vibração, o qual compreende três etapas: fazer a estrutura vibrar; extrair a amostra da aceleração e; analisar a resposta obtida.

A análise modal operacional (OMA), utilizada para determinar os parâmetros dinâmicos, induz à estrutura à vibração através de uma fonte de excitação que já atua na estrutura, sem a necessidade de quantificá-la.



Associadas ao sistema estrutural, as propriedades dinâmicas variam assim que ocorrem avarias estruturais. O dano modifica as propriedades físicas da estrutura (massa, amortecimento e rigidez) e afeta adversamente frequências naturais, taxas de amortecimento e formas modais. Em outras palavras, a existência de danos estruturais pode resultar em mudanças no comportamento da estrutura ([ZHAO](#); [ZHANG](#); 2012).

Segundo [BAYRAKTAR](#) et al (2010), esta técnica é rápida e não interfere com a operação do sistema. Os resultados obtidos referem-se a todo o sistema em análise, o que a torna adequada para estruturas grandes e complexas, além de permitir o controle da vibração e identificação de danos em estruturas ([MASJEDIAN](#); [KESHMIRI](#), 2009).

A medição da aceleração é realizada através de um acelerômetro, que converte a aceleração mecânica em um sinal elétrico proporcional, é o dispositivo mais utilizado na execução de ensaios modais e devido à confiabilidade dos dados obtidos é frequentemente utilizado na medicina ([HE](#) e [FU](#), 2001; [FIGUEIREDO](#), 2007).

Segundo [BAYRAKTAR](#) et al (2010), ao estabelecer as medições em um único ponto de extração é possível conhecer frequências naturais e taxas de amortecimento da estrutura.

As medições realizadas em domínio do tempo são convertidas em domínio da frequência através da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Como resultado, no gráfico de frequência surgem picos que indicam as frequências naturais da estrutura e definem a existência de uma forma modal ([SAHIN](#); [BAYRAKTAR](#), 2014).

A metodologia adotada é similar ao que é executado por [YOON](#) et al (2014), o qual estabelece a frequência natural de trinta passarelas em aço com o uso de um aparelho de telefonia móvel e da análise modal operacional. Além disso, foram executados modelos numéricos para a verificação de respostas.

As fontes de vibração utilizadas foram operacionais, as quais atuam diariamente sobre as estruturas. No viaduto adotou-se o deslocamento de caminhões. Na passarela, a execução de saltos por um grupo de pessoas foi utilizado como energia de vibração.

Os atuais aparelhos de telefonia móvel possuem acelerômetros triaxiais, o que torna possível realizar ensaios de vibração com o uso de celulares. A execução do ensaio por meio destes equipamentos tem por objetivo, além de definir as características de vibração do sistema, facilitar o processo ao executar a extração de amostras em um ponto com apenas um acelerômetro.

Os estudos de caso são um viaduto em concreto armado, localizado na rodovia BR-285, e uma passarela em concreto protendido, instalada sobre a mesma rodovia, ambos em Passo Fundo/ RS. Foram executadas fases experimental e numérica. A definição do amortecimento ocorreu através da técnica de decaimento logarítmico. Os acelerômetros foram calibrados com o uso de uma mesa vibratória.

O ensaio utiliza a vibração livre, onde a estrutura é excitada por uma fonte de excitação, em um estágio inicial apenas, e passa a vibrar livremente até entrar novamente em repouso graças à ação do amortecimento estrutural.

## **Materiais e programa experimental**

### **Estudo de caso**

As duas obras de artes especiais utilizadas neste trabalho pertencem ao município de Passo Fundo/RS.



O viaduto em concreto armado possui 22,50 m de extensão e largura de 10,20 m, com vão máximo central de 12,10m. As coordenadas geográficas do viaduto são: 28°13'51,08"S; 52°24'01,26"O.

A passarela em concreto protendido possui 23,40 m de extensão e largura de 2,20 m, executada em uma única viga com seção transversal em forma de T. As coordenadas geográficas da passarela são: 28°14'15,72"S; 52°22'17,19"O.

## **Materiais e métodos**

Foram utilizados um computador e um celular em cada ensaio de vibração. Com o celular equipado com o acelerômetro triaxial extraíram-se as amostras de aceleração das estruturas. O processamento dos dados foi realizado com o computador.

No teste de vibração do viaduto, o celular utilizado foi o Motorola Razr™ D1. A resolução do acelerômetro é 0,00390625m/s<sup>2</sup>. A taxa de amostragem é de 100 amostras/segundo (100 Hz).

No teste de vibração da passarela utilizou-se o Samsung Galaxy S5. A resolução do acelerômetro, que equipa o celular, é 0,000598 m/s<sup>2</sup>. A taxa de amostragem é de 50 amostras/segundo (50 Hz). Ambos os valores de resolução dos acelerômetros foram fornecidos pelo aplicativo em uso.

O uso de diferentes acelerômetros ocorreu apenas por necessidade. Durante a execução do teste de vibração na passarela, verificou-se que o Motorola Razr™ D1 apresentava problemas, logo utilizou-se o Samsung Galaxy S5. A equipe que executava o ensaio possuía apenas os dois aparelhos.

Para o registro e salvamento de dados de vibração foi utilizado o Vibration Monitoring, aplicativo gratuito desenvolvido pela Mobile Tools para o sistema Android. Os acelerômetros foram aferidos através de uma mesa vibratória.

Os modelos numéricos em elementos finitos foram executados através do SAP2000. O processamento de dados ocorreu em Excel, pertencente ao Microsoft Office.

## **Levantamento no campo de operação**

Nos estudos de casos, o acelerômetro foi posicionado no vão central de cada estrutura, local onde a vibração da estrutura é amplificada. As acelerações verticais foram registradas por estarem associadas ao maior número de danos estruturais.

O início e fim do salvamento de dados foram realizados manualmente.

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

No viaduto, as acelerações verticais foram registradas à esquerda e a direita da seção transversal, sobre o passeio público, e sobre a faixa de sinalização que separa as faixas de rolagem.

A fonte de vibração utilizada foi o deslocamento de caminhões sobre o viaduto.

O tempo de cada amostra era variável. O salvamento dos 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 assegurava-se que o viaduto em teste vibrasse de acordo com as suas características físicas, sem sofrer a influência da interação entre caminhão e estrutura.



Na passarela, o acelerômetro foi posicionado na superfície superior da passarela, local utilizado para os pedestres se deslocarem. As amostras foram extraídas apenas em um ponto. A fonte de vibração utilizada foi a execução de saltos contínuos e ininterruptos por um grupo de pessoas sobre a superfície da passarela. Os saltos cessavam assim que era notória a vibração do sistema.

O salvamento de dados era acionado antes do início da execução dos saltos e finalizava assim que a estrutura entrava em repouso. O tempo de cada amostra também variava. A Figura 1 apresenta o resultado do deslocamento de caminhões, no viaduto, e da execução dos saltos, na passarela.

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

Os modelos numéricos estruturais foram executados em elementos finitos através do software SAP2000. Ao fim da análise modal executada obteve-se a frequência natural associada a cada estrutura.

A taxa de amortecimento foi obtida experimentalmente através da análise das amostras em domínio do tempo e do uso da técnica do decaimento logarítmico.

O processamento de dados ocorreu através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), a qual converte o domínio de tempo em frequência. O método de identificação modal adotado foi o “Peak Picking”, o qual utiliza a identificação dos parâmetros de vibração no gráfico de frequência.

### **Análise dos modelos numéricos**

Os modelos numéricos de cada estrutura foram calibrados através da adoção de diferentes módulos de elasticidade para o concreto armado, no caso do viaduto, e para o concreto protendido, no caso da passarela.

### **Estudo experimental**

No viaduto, foram extraídas 7 amostras ao total, porém não foram executadas extrações sobre a faixa de sinalização pois existia a possibilidade de o aparelho de telefonia móvel ser danificado.

A taxa de amortecimento médio é de  $\xi=0,0175$ . Ou seja, a taxa de amortecimento é de 1,75%.

Os sinais convertidos em domínio de frequência apresentaram frequências de:  $f_1= 12,30$  Hz;  $f_2= 13,08$  Hz;  $f_3= 11,72$  Hz;  $f_4= 12,60$  Hz;  $f_5= 14,45$  Hz;  $f_6= 13,08$  Hz e;  $f_7= 7,81$  Hz.

A Figura 2 apresenta uma das amostras extraídas, com comportamento em decaimento logarítmico destacado, condição considerada ideal para a definição do amortecimento.

A Figura 3 apresenta o gráfico de frequência de uma das amostras extraídas do viaduto e a frequência associada à estrutura.

Na passarela, o amortecimento foi determinado ao analisar a amostra a partir do comportamento em decaimento logarítmico. A taxa de amortecimento resultante foi de  $\xi=1,4\%$ .

Após aplicar a FFT à resposta da vibração, o gráfico de frequência indicou uma frequência natural de 4,88 Hz.



A Figura 4 apresenta a amostra extraída na passarela. Para a definição da taxa de amortecimento considerou-se os dados a partir do tempo de 36,14 segundos.

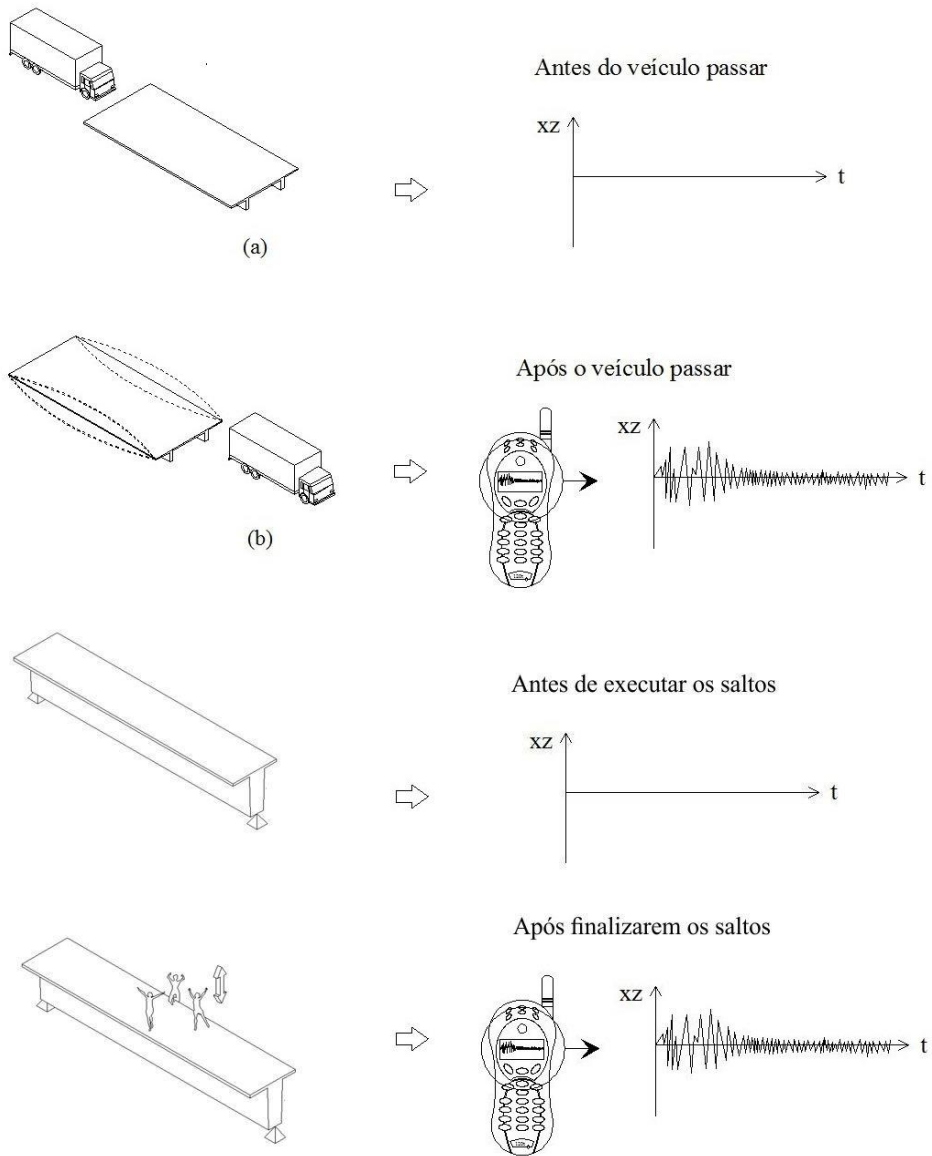
A Figura 5 apresenta a frequência resultante na passarela.

### **Modelagem numérica**

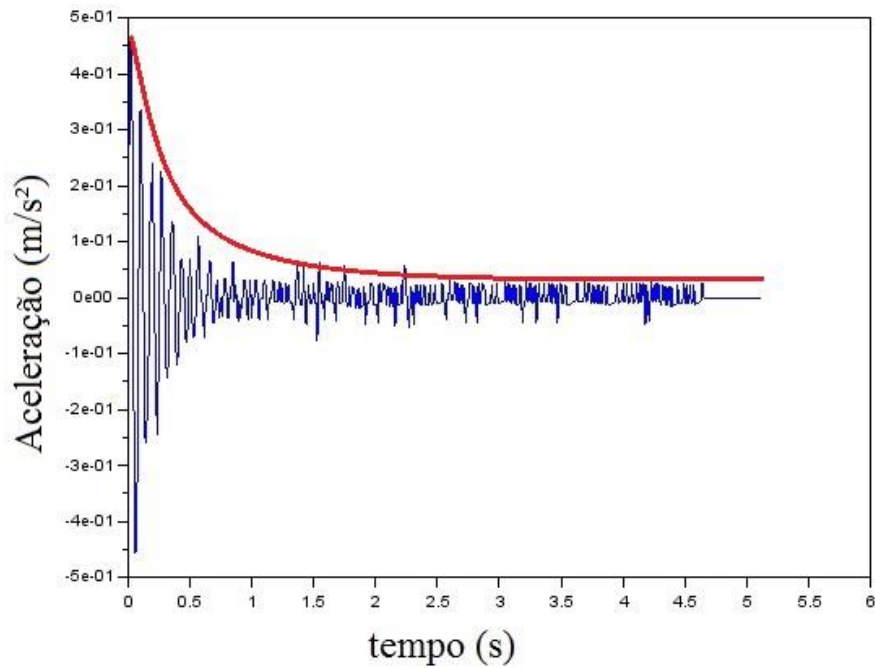
O modelo numérico do viaduto indicou frequências de:  $f_1 = 11,64$  Hz;  $f_2 = 12,03$  Hz;  $f_3 = 13,78$  Hz. As propriedades do material obedecem ao que é adotado para um concreto com módulo de elasticidade de 25 GPa. Para a análise, os elementos foram representados por áreas.

O modelo numérico da passarela indicou uma frequência natural de 4,37 Hz. As propriedades do material utilizadas se referem a um concreto protendido com módulo de elasticidade de 31 GPa. Os elementos foram representados como sólidos para a análise.

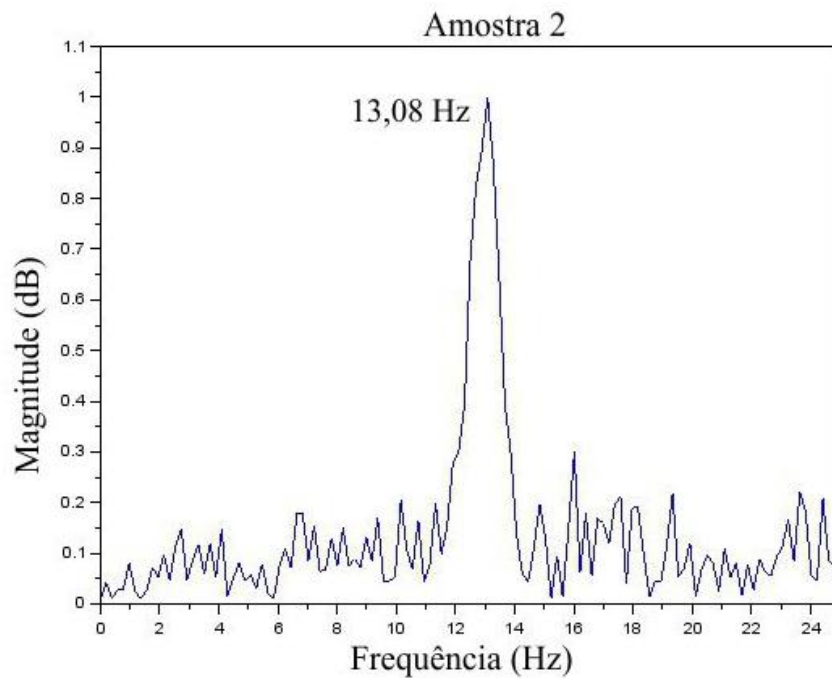
**Figuras e Tabelas**



**Figura 1 – Resultado das fontes de excitação nas estruturas.**



**Figura 2 – Amostra com comportamento em decaimento logarítmico destacado - Viaduto.**



**Figura 3 – Amostra em domínio de frequência - Viaduto.**

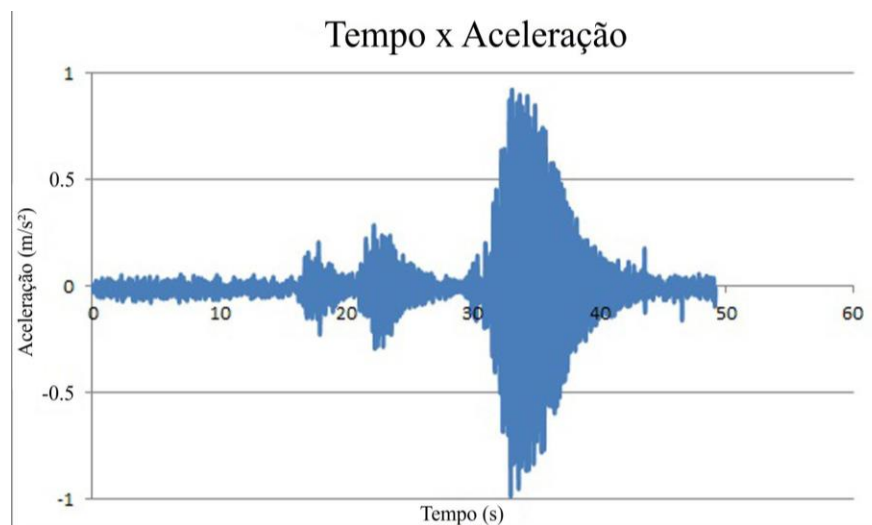


Figura 4 – Amostra extraída da passarela.

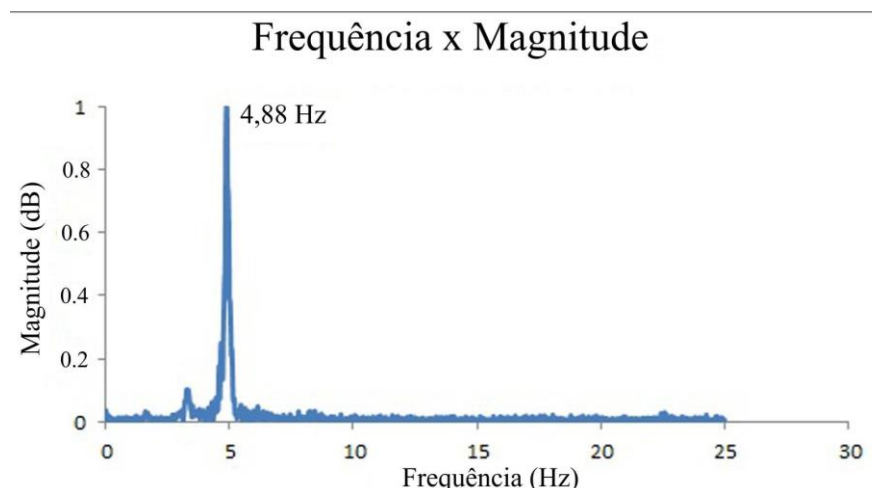


Figura 5 – Amostra em domínio de frequência – Passarela.

## Conclusões

Em relação à execução de etapas preliminares à definição dos parâmetros de vibração, foram obedecidos apenas processos referentes ao ensaio de vibração: fazer a estrutura vibrar, extrair os dados de vibração com acelerômetros e conhecer os parâmetros modais das estruturas.

O uso do tráfego de caminhões e de saltos executados por pessoas foram capazes de fazer as estruturas vibrarem, porém podem-se utilizar outras fontes de excitação.

Os acelerômetros que equipam os atuais aparelhos celulares inteligentes foram capazes de extrair os dados da aceleração vertical das estruturas.

A definição dos parâmetros de frequência natural e taxa de amortecimento foram conhecidos através do uso do Microsoft Excel, software básico que equipa computadores.

As respostas extraídas não sofreram qualquer tratamento anterior ao conhecimento dos parâmetros de vibração das estruturas. Na amostra do comportamento da passarela, apenas selecionou-se um trecho para a definição da taxa de amortecimento.





Em relação à quantidade de amostras extraídas no viaduto, ocorreram várias extrações devido à existência da interação entre veículo e estrutura, o que podia inutilizar as amostras. O número de repetições procurou garantir a vibração da estrutura devido às suas características, sem a ocorrência da interferência do tráfego de caminhões.

Na passarela, a interação entre estrutura e fonte de excitação não existe ou possui pequena influência sobre a resposta extraída, o que justifica a utilização de apenas uma amostra de dados de aceleração.

Ao avaliar as frequências naturais obtidas, elas estão de acordo com o que é apresentado por [BACHMANN](#) et al (1995), o qual indica uma frequência para pontes entre uma faixa de valores entre 0 (zero) a 14 Hz. Pode-se salientar que as frequências experimentais e numéricas foram bastante próximas.

As taxas de amortecimento, menores que 2%, também estão de acordo com o que é apresentado por [BACHMANN](#) et al (1995) para pontes em geral.

O uso de diferentes aparelhos celulares e taxas de amostragem não interferem nos resultados. O teorema de Nyquist afirma que a informação completa de um sinal pode ser capturada por uma taxa de amostragem mínima de 2 vezes a frequência do sistema em análise. Ou seja, os celulares adotados estavam aptos para determinar a frequência natural destas estruturas. Embora maiores taxas de amostragem ofereçam uma resposta mais detalhada ([MEASUREMENT COMPUTING](#), 2014).

Na fase experimental, o uso de apenas um acelerômetro impede o conhecimento da forma modal associada à frequência natural das estruturas. Para conhecê-la deve-se utilizar um número maior de acelerômetros.

Em relação à utilização de acelerômetros dos aparelhos de telefonia móvel, verificou-se que as amostras extraídas convergiram para parâmetros dinâmicos de obras de artes especiais já previstos em revisões bibliográficas existentes, o que confere confiabilidade ao instrumento.

Destaca-se a rapidez e a simplicidade de etapas executadas até os resultados finais obtidos. Além disso, não houve qualquer custo econômico associado ao procedimento, apenas despreendeu-se tempo para o processamento de dados obtidos. A facilidade do processo também pode ser justificada pelo uso de acelerômetros que dispensam cabos para a transferência de informações.

Portanto, pode-se concluir que o uso de acelerômetros de aparelhos celulares para a definição dos parâmetros de vibração de obras de arte especiais é viável e confiável. Entretanto, deve-se atentar para a taxa de amostragem do acelerômetro a fim de evitar a interpretação equivocada de dados.

Os resultados obtidos descrevem o comportamento atual destas estruturas e, futuramente, podem ser úteis para avaliações posteriores ao definir a necessidade de manutenção por meio da comparação de respostas.

## **Agradecimento**

Os autores agradecem à 8ª Delegacia da Polícia Rodoviária Federal pelo auxílio durante o levantamento de informações no viaduto.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

## Referências

BACHMANN et al. *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Birkhäuser Verlag, 1995. 248 p.

BAYRAKTAR et al. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 29, 2010; p. 14-24.

FIGUEIREDO et al. *Aplicações de Acelerômetros*. In: *Instrumentação e aquisição de sinais*, 2007, Lisboa, Portugal.

HE, J. FU, Z. *Modal Analysis*. 1. ed. Oxford: University of Oxford, 2001. 291 p. Butter Worth-Heinemann. Woburn.

MASJEDIAN, H, M; KESHMIRI, M. A review on operational modal analysis researches: classification of methods and applications. In: 3, IOMAC'09, INTERNATIONAL OPERATIONAL OPERATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 2009.

MEASUREMENT COMPUTING. *Data acquisition handbook: A Reference For DAQ And Analog & Digital Signal Conditioning*. 3. ed. Measurement Computing Corporation, Estados Unidos da America, 2014. 133 p.

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.

YOON et al. Vibration Measurements of Steel Foot-bridges using Mobile-phone. *Applied Mechanics and Materials*, v. 470, 2014, p. 471-493.

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.