

# ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DE UMA PONTE METÁLICA FERROVIÁRIA

Selma L. A. Lobato, José P. R. Neto, Sandro D. R. Amador, Remo M. de Souza, Regina A. C. Sampaio

Neste trabalho são apresentados os resultados da análise modal experimental e computacional da ponte em estrutura metálica situada sobre o rio Mearim (Maranhão). Essas análises foram realizadas com objetivo de aferir os modelos numéricos utilizados em na análise estrutural do vão metálico, possibilitando uma maior precisão nas simulações computacionais do comportamento estático e dinâmico da estrutura. A estrutura analisada pode ser visualizada na Figura 1.

## Análise Modal Experimental

Nos ensaios experimentais, visando à avaliação do comportamento dinâmico da estrutura metálica da ponte devido à passagem de veículos, foram utilizados 16 acelerômetros piezo-elétricos de baixa frequência (ICP) que foram distribuídos ao longo da ponte seguindo quatro arranjos distintos. Em cada um desses arranjos foi instrumentada uma parte da estrutura. Posteriormente, utilizando o conceito dos acelerômetros de referência, as formas modais parciais obtidas em cada um desses arranjos foram agrupadas para determinar as formas modais completas da estrutura.

Os acelerômetros foram fixados a chapas metálicas que, por sua vez, foram coladas à face externa da canaleta do tabuleiro da ponte, tais acelerômetros foram conectados a um sistema de aquisição de dados através de cabos, dispostos segundo diversos arranjos. A Figura 2 ilustra o procedimento do ensaio.

Um exemplo das séries temporais e os respectivos espectros obtidos em um acelerômetro são mostrados na Figura 3.

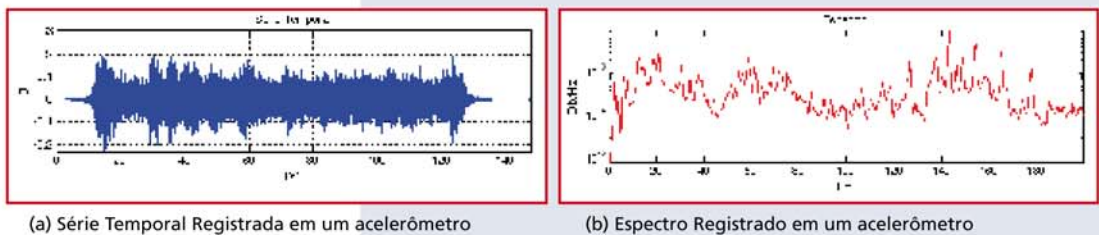


Figura 1 – Vista lateral da ponte metálica



Figura 2 – Obtenção dos dados. a) Acelerômetros fixados à lateral do tabuleiro, em disposição triaxial. b) Sistema de aquisição de dados ADS-2000 Lynx conectado ao notebook. c) passagem do trem

Figura 3 – Séries temporais e espectros obtidos em um acelerômetro

## Tratamento de Dados

Para extração dos parâmetros modais (frequência natural do sistema e formas modais) usou-se o método de identificação estocástica SSI-COV através de um programa computacional com recursos do Graphical User Interface (GUI) da plataforma Matlab® desenvolvido na Universidade Federal do Pará como dissertação de mestrado de AMADOR (2007). Este é um método de extração de parâmetros modais a partir de medições de vibrações ambientes (vento, tráfego de veículos, passagem de pedestres, etc.) e/ou operacionais (acionamento de motores). Ou seja, através deste tipo de método, as características modais da estrutura são determinadas a partir dos dados de saída apenas ("output-only data"), ao contrário de procedimentos mais tradicionais da análise modal experimental, onde a entrada (input) é conhecida.

A identificação dos modos é feita, na prática, a partir do diagrama de estabilização. Segundo NUNES (2001) este diagrama representa a descrição do sistema através de certo número de modos, aumenta-se o número de modos que descrevem o sistema e verifica-se a consistência das frequências e amortecimentos através da variação destes parâmetros, segundo o mesmo autor a idéia é que soluções com mesmos valores de frequência e amortecimento correspondem às ressonâncias reais do sistema físico. Um exemplo desta identificação de parâmetros através do diagrama de estabilidade é mostrado na Figura 4.

### Acoplamento dos Modos de Vibração Parciais Obtidos em Cada Arranjo

Foi possível nos ensaios de vibração do vão metálico da ponte ferroviária sobre rio Mearim acoplar os parâmetros modais de um ou mais arranjos realizados nos ensaios de vibração com objetivo de determinar a forma modal completa da estrutura ensaiada. O resultado do acoplamento dos modos de vibração dos arranjos realizados foi o primeiro modo de flexão transversal com frequência natural de 2,561 Hz e fator de amortecimento no valor de 2,394%, sua forma modal é apresentada na Figura 5.

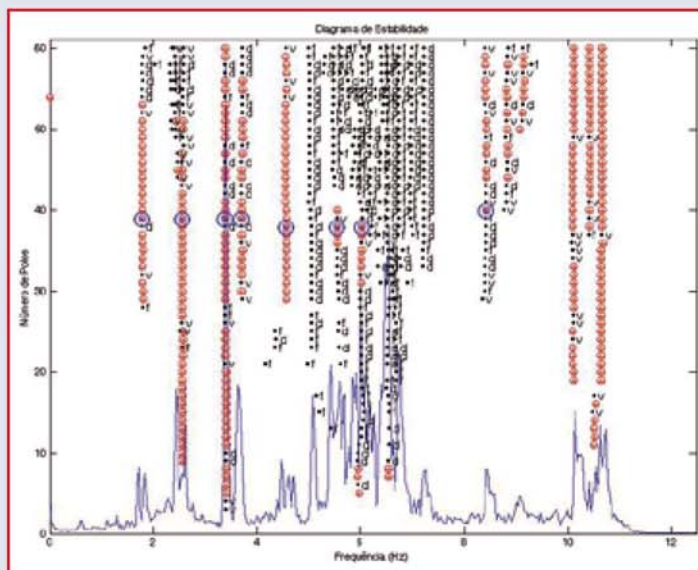


Figura 4 - Diagrama de estabilidade de um ensaio com trem descarregado de minério

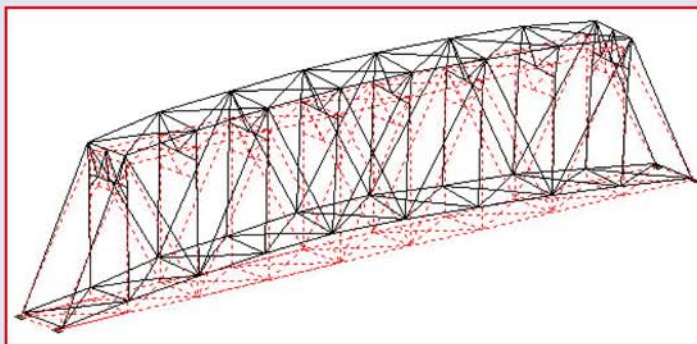


Figura 5 - Forma modal resultante do acoplamento de todos os arranjos: 2,561 Hz; 2,394%.

## Acoplamento Parcial dos Modos de Vibração

Utilizando o conceito dos sensores de referência, as formas modais parciais obtidas nos diversos arranjos de um experimento de vibração podem ser reunidas para compor a forma modal completa da estrutura. Esse conceito consiste em escolher alguns dos sensores disponíveis no ensaio como sensores de referência e estabelecer qual o posicionamento deles sejam comuns em todos os arranjos.

Apesar de apenas uma forma modal ter sido obtida com acoplamento de todos os arranjos, quando se acoplou somente alguns arranjos foram obtidas três formas modais completas, como mostram os resultados apresentados na Figura 6.

## Análise Modal Computacional

Com objetivo de aferir a precisão dos modelos computacionais até então utilizados na análise estática da ponte em estudo, foi realizada a análise modal computacional da estrutura. Na Figura 7 é mostrada os parâmetros modais obtidos com o modelo computacional. A partir dos resultados experimentais obtidos nos ensaios de vibração da estrutura foi possível calibrar o modelo computacional criado para reproduzir o comportamento estático e dinâmico da estrutura.

## Comparação Entre os Resultados Experimentais e Computacionais

Os resultados da análise modal experimental mostrados na Figura 6 foram comparados com os resultados teóricos obtidos com emprego do método dos elementos finitos. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos em ambas as análises.

**Tabela 1**  
Comparação entre os resultados computacionais e experimentais

Modo	Frequência natural (Hz)		Variação entre métodos (%)
	Modos Computacionais	Modos Experimentais	
1º modo de flexão lateral	1,343	0,826	62,59%
1º modo de flexão transversal	2,606	2,550	2,20%
2º modo de flexão transversal	5,007	5,979	16,26%

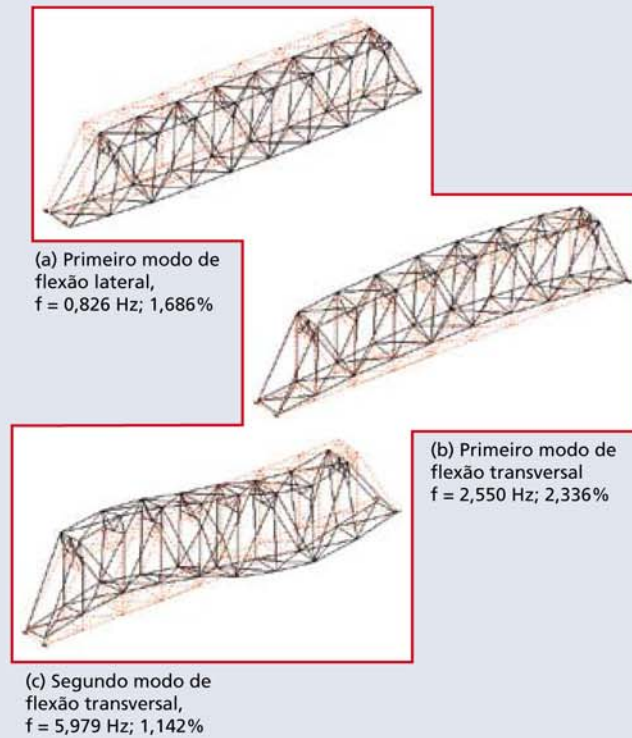


Figura 6 - Formas modais do vão metálico resultantes do acoplamento parcial

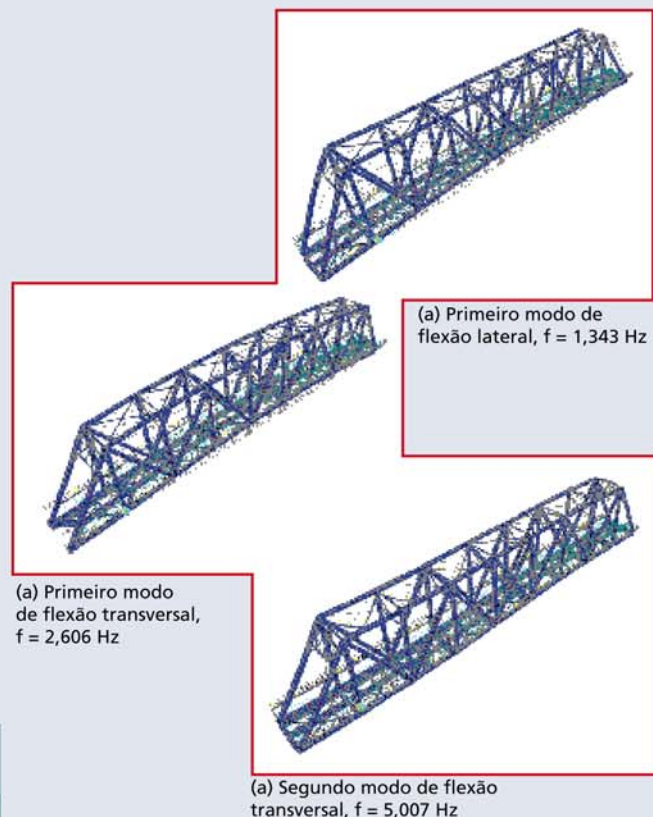


Figura 7 – Parâmetros modais obtidos com modelo numérico

## Conclusões

Analisando as séries temporais obtidas nos ensaios, verificou-se que os resultados mais precisos foram obtidos com as séries temporais coletadas com a passagem do trem descarregado. Uma das explicações para esse fato é que a massa do trem carregado influenciou nas características dinâmicas da estrutura durante a realização dos ensaios. Estima-se que essa influência ocorre de tal sorte que os parâmetros dinâmicos não estabilizam durante a criação dos diagramas de estabilidade para os arranjos realizados nos ensaios da ponte, tornando a identificação de parâmetros menos precisa.

Com base nos ensaios de vibração realizado na ponte em estudo, verificou-se também que dependendo da velocidade e também das irregularidades nos rodeiros, a ponte pode ser excitada de maneira distinta a cada passagem de comboio. Analisando os resultados obtidos nesses ensaios verificou-se que as acelerações máximas medidas são em torno de 1 g na direção perpendicular ao plano do tabuleiro com o trem descarregado, e de 1.4 g com o trem carregado nesta mesma direção. Outro aspecto observado a partir das análises realizadas foi que, em geral, os primeiros modos de vibração com frequências naturais abaixo de 6 Hz são mais excitados com a passagem do comboio na velocidade de cruzeiro do que os modos de vibração com frequências naturais acima 6 Hz.

### AGRADECIMENTOS

Companhia Vale do Rio Doce, Fundação de amparo e desenvolvimento de pesquisa, Universidade Federal do Pará.

### Referência bibliográfica

- AMADOR, S. D. R. Programa Computacional com Interface Gráfica para Identificação Estocástica de Parâmetros Modais de Estruturas Cíveis - Aplicação em Pontes e Torres de Linha de Transmissão. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Pará, 2007.
- LOBATO, Selma L. A. L.; SAMPAIO, R.A.C.; SOUZA, R.; AMADOR, S.; NETO, F.; ANJOS, G.; AZEVEDO, A.; OLIVEIRA, L.; QUEIROZ, R. Influência das condições de suporte na modelagem numérica de uma ponte ferroviária. In: XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2008, Santiago.
- NUNES, Alexandre. Análise Modal Teórica e Experimental Acústica de Cavidades com Absorção Sonora. 2001. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2001.
- SEEBLA, engenharia de projetos. Obra no 13 - Ponte sobre o rio Mearim, memórias descritivas e de cálculo. Vale, 1978.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Relatório Técnico, primeira etapa. Volume 4: Obra de Arte Especial n. 13 - Ponte sobre o Rio Mearim. 2008.

