

Avaliação das frequências verticais de vibração em pontes em arco de pedra através de medições in-situ

Evaluation of vertical natural frequencies in masonry arch bridges using in situ measurements

A. Dick ¹ | M. T. Braz-César ²

¹ Mestre em Engenharia da Construção, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

² Professor Adjunto, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

resumo

As pontes de alvenaria são geralmente estruturas antigas com valor histórico e patrimonial, construídas com base em conhecimentos empíricos para um nível de tráfego consideravelmente diferente daquele que hoje se verifica em estruturas deste tipo. Considerando a grande preocupação da engenharia moderna de evitar o fenômeno da ressonância, o estudo das propriedades dinâmicas dessas estruturas é fundamental, pois permitirá conhecer seu comportamento frente aos carregamentos dinâmicos impostos à estrutura. O presente estudo baseia-se na determinação de parâmetros dinâmicos, nomeadamente frequências próprias associadas aos modos de vibração vertical para um conjunto de trinta e três pontes de arco de alvenaria localizadas no distrito de Bragança, Portugal. Esses parâmetros foram obtidos através de ensaios de vibração ambiental realizados in-situ e a identificação das próprias frequências foi realizada no domínio da frequência utilizando a técnica peak-piking. A identificação das frequências próprias permitiu comparar a influência de alguns parâmetros geométricos das pontes e sua relação e aproximação com a faixa de frequência da fonte de excitação, sendo que 36,36% das pontes apresentam frequências na faixa de frequência naturais dos veículos.

Palavras-chave:

abstract

Masonry arch bridges are generally old structures with historical and patrimonial value, with were built based on empirical rules for traffic loads significantly different of those existents nowadays. Considering the concern of modern engineering in avoid the resonance phenomenon, the study of the dynamic properties of these structures is fundamental, as it will allow to know their behavior under the dynamic loads imposed on the structure. The present study is based on the determination of dynamic parameters, namely own frequencies associated with vertical vibration modes for a set of thirty-three masonry arch bridges located in Bragança district, Portugal. These parameters were obtained through in-situ environmental vibration tests and the identification of the frequencies themselves was performed in the frequency domain using the peak-piking technique. The identification of the own frequencies allowed to compare the influence of some geometric parameters of the bridges and their relation and approximation with the frequency range of the excitation source, thus 36.36% of the bridges present frequencies in the natural frequency range of the vehicles.

Keywords:

1- INTRODUÇÃO

A importância da preservação e utilização do património cultural foi destacada pelo Conselho Europeu como um dos princípios para o desenvolvimento sustentável e de qualidade de vida de uma sociedade, sendo a valorização desse património um compromisso de todas as partes envolvidas (Assembleia da República, 2008).

De entre o património cultural de um povo as pontes antigas integram um conjunto de obras, que ao contrário de ruínas antigas e peças de museus, ainda podem desempenhar o seu propósito inicial, ou seja, podem ser mantidas funcionais (Tilly, 2002).

Em todo o continente europeu é comum encontrar pontes históricas, que apesar da idade ainda fazem parte da estrutura viária. Em Portugal existem inúmeras pontes nomeadamente pontes em arco de alvenaria, como as apresentadas na figura 1 que são caracterizadas como obras antigas com interesse histórico e patrimonial, já que seu uso é pouco relatado atualmente, seja por seu processo construtivo que exige habilidade para conseguir uma boa aparência ou pelo desenvolvimento de materiais mais resistentes e económicos.

Essas estruturas foram construídas baseadas em conhecimentos empíricos e para um tráfego essencialmente diferente do que atua hoje sobre a estrutura, além disso, nessas estruturas que em seu projeto não foram consideradas os aspetos dinâmicos, é fundamental verificar as propriedades dinâmicas estruturais, nomeadamente as frequências próprias, tendo em vista que para evitar a ocorrência do fenómeno de ressonância a estrutura as frequências próprias da estrutura devem estar fora da faixa de frequências provocadas no uso da mesma.

A ocorrência desse fenómeno pode provocar deformações e danos estruturais, podem comprometer a segurança da estrutura, podendo levar ao seu colapso parcial ou total, como os casos da ponte Tacoma Narrows e a ponte suspensa Broughton (Braun, 1941).

Ademais, é de suma importância para essas estruturas estabelecer correlações que auxiliem a prever as frequências próprias por intermédio das suas características geométricas, já os que estudos específicos e realizações de ensaios são em geral onerosos. Nessa conjuntura, estudos anteriores como de (Calçada, 2001) e (Oliveira, 2004), apresentam correlações entre a frequência própria vertical e a largura do vão livre de diversos tipos de pontes, contudo não abrangendo especificamente as pontes em arco de alvenaria.



(a)

(b)

Fig. 1 | (a) Ponte de pedra sobre o rio Tuela (b) Ponte velha de Gimonde

O presente artigo tem como objetivo a identificação das frequências próprias associadas aos modos verticais de um conjunto de trinta e três pontes em arco de alvenaria no Distrito de Bragança, Portugal, por meio de ensaios de vibração ambiental, também conhecidos como *output-only*, com processamento e a análise dos sinais utilizando o método de Welch (Welch, 1967), no domínio da frequência, utilizando a técnica de *peak-piking* para identificar as próprias frequências.

2- METODOLOGIA

A análise experimental modal permite avaliar *in-situ* as propriedades dinâmicas da estrutura, determinando a frequência natural, as configurações e amortecimento dos modos de vibração. Para realização de ensaios em estruturas já em utilização a técnica de ensaio do tipo *output-only* é a que prevê o melhor custo-benefício comparada aos ensaios de vibração forçada, pois não é necessário o uso de equipamentos de excitação e não interrompe o uso corrente da estrutura, apresentando vantagens tanto em relação ao custo quanto à facilidade de execução do ensaio, mormente em estruturas civis, como é o caso das pontes em arco de alvenaria, geralmente difíceis de excitar.

Esta metodologia de ensaio requer que a estrutura no seu uso corrente é excitada suficientemente pelas cargas dinâmicas incidentes na estrutura, como vento, tráfego, micro-terramotos, indústrias, etc., para que se possa mensurar a resposta a essas excitações dinâmicas, e posteriormente identificar os parâmetros modais da estrutura. Nas pontes em geral a passagem de um veículo excita diversos pontos da estrutura, sendo o tipo ideal de excitação, possibilitando que todos os modos sejam excitados e possibilitando a aplicação da técnica *output-only*.

Os ensaios foram realizados em um conjunto de trinta e três pontes em arco de alvenaria, existentes no distrito de Bragança sujeitas a tráfego rodoviário, representadas na figura 2 que foram selecionadas a partir do estudo de (Jesus, 2013), que caracterizou geometricamente estas estruturas.

A campanha de ensaios foi realizada um sistema de aquisição de dados composto por uma placa de aquisição de dados NI USB-4431 com 4 canais de entrada, resolução ACD 24 bits, taxa de amostragem de 1 kS/s à 102,4 kS/s e resolução 2,10 mS/s, um acelerómetro sísmico uniaxial ICP® modelo 393A03, com sensibilidade 1000 mV/g, faixa de frequência de 0,5 a 2000 Hz e um computador portátil com software SignalExpress®. Para fixação do acelerómetro na estrutura, utilizou-se uma argamassa de secagem rápida, que permite a planificação da superfície de forma que o eixo sensível do acelerómetro esteja alinhado com a direcção da medição pretendida (vertical) e o acoplamento rígido do acelerómetro com a utilização de cola instantânea atendendo as recomendações da (ISO 14963, 2003) e (ISO 5348, 1998). Na figura 3 observa-se os equipamentos utilizados para realização dos ensaios.

A locação dos acelerómetros foi realizada sobre o tabuleiro (medição na direcção vertical) sendo longitudinalmente a meio vão de um dos vãos principais da ponte e transversalmente nas duas extremidades da secção conforme observa-se na figura 4.

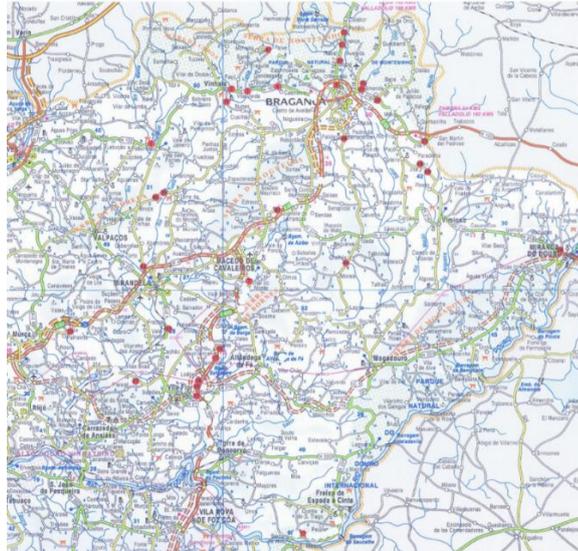


Fig. 2 | Localização das pontes no distrito de Bragança [Fonte: Adaptado de (Jesus, 2013)]



Fig. 3 | Equipamento de medição durante realização de ensaio uniaxial.



(a) Localização longitudinal



(b) Localização transversal

Fig. 4 | Localização dos acelerómetros

Os ensaios foram pré-configurados no software SignalExpress[®] utilizando os dados dos acelerómetros e estabelecendo-se alguns parâmetros necessários à aquisição de dados. Os parâmetros estabelecidos foram: modo de aquisição definido como amostras contínuas; taxa de amostragem $f_s = 1000 \text{ Hz}$ (mínima do software) e tempo de ensaio 600 segundos (Ramos J. L., 2007).

O processamento e análise de sinal foi realizado utilizando o método descrito por (Welch, 1967) consiste na divisão de uma série temporal em n segmentos, que podem ser sobrepostos. É aplicado então uma “janela” a cada segmento e calculado o periodograma modificado para cada segmento por meio da aplicação da transformada de Fourier, obtém-se assim n periodogramas modificados. Para a representação do espectro final é computada a média dos n espectros.

Para a definição do tamanho ideal dos segmentos, considerou-se que como trata-se de sinais aleatórios, os erros normalizados podem ser calculados pela equação (1) para uma sobreposição de sinal de 50% (Rodrigues, 2004). Optou-se pela subdivisão em 60 segmentos, gerando um erro relativo $\varepsilon_r = 11,16\%$ com uma resolução de frequência $\Delta f = 0,1$ Hz.

$$\varepsilon_r [G_{xx}(\omega)] = \sqrt{\frac{6n-1}{8n^2}} \quad (1)$$

Outro parâmetro definido para o processamento de sinal foi a decimação de sinal com fator 10 e interpolação linear, isso fez com que ocorra uma redução da frequência máxima que pode-se identificar sem que ocorra erro de *aliasing*, assim (Rodrigues, 2004) e (Ramos J. L., 2007) sugerem que a frequência máxima de interesse passa a ser 40% da nova frequência de amostragem. Desta forma, como a nova frequência de amostragem é $f_s = 100$ Hz, a frequência máxima de interesse será 40 Hz.

Os sinais foram tratados com filtro passa-banda com uma frequência de corte inferior em 1 Hz e frequência de corte superior, em 40 Hz, com design do filtro IIR de tipologia *Butterworth* e ordem 8 e aplicação de uma função de janela do tipo *Hanning* ao sinal, sendo esta a que atende as demandas de (Welch, 1967) e (Brown, Ewins, & Allemang, 1999).

Os gráficos de densidade espectral de de potência (PSDs) foram obtidos com a aplicação da transformada rápida de Fourier (FTT) no software SignalExpress[®] utilizando o modo de média *peak hold*, que mantém os níveis de picos de uma FTT para a próxima (National Instruments, 2018). Obtém-se assim dois espectros de potência para cada ponte, sendo computada a média entre os dois para a seleção das frequências próprias associadas aos modos verticais. Para determinação das frequências próprias foi utilizada a técnica *peak-piking* manualmente que consiste em selecionar os picos apresentados no PSD.

Após o tratamento dos sinais gerou-se um relatório conforme o modelo apresentado na figura 5 com dados relativos as características geométricas e dados do ensaio de identificação dinâmica com apresentação dos gráficos de densidade espectral de potência para cada ensaio e a média com informação dos picos de potência selecionados para cada ponte.

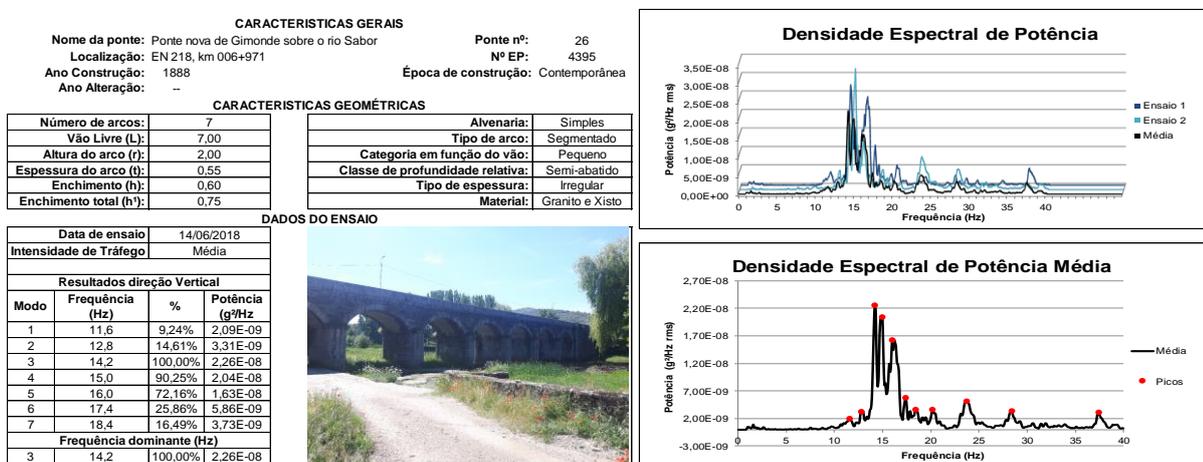


Fig. 5 | Relatório de resultado de ensaio de vibração ambiental na direção vertical para ponte Nova de Gimonde

3- ANÁLISE DE RESULTADOS

As análises e comparações foram realizadas apenas para a primeira frequência vertical, sendo esta a de maior interesse na engenharia. Os valores das frequências identificadas para o modo vertical variam de 6,2 à 25,5 Hz, na figura 6 é apresentada a distribuição dessas frequências em categorias. Nela se pode observar que 36,36% das pontes apresentam frequências na faixa de 10 a 15 Hz, gama esta que condiz com as de frequências naturais dos veículos relacionada a vibração dos eixos dos veículos (Calçada, 2001).

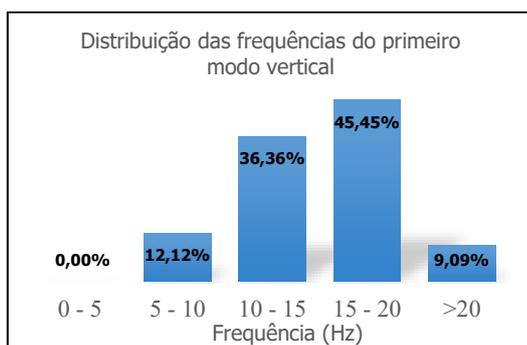


Fig. 6 | Distribuição dos valores de frequência do primeiro modo vertical em categorias

A partir dos dados geométricos de cada estrutura descritos por (Jesus, 2013), realizou-se as correlações entre os parâmetros geométricos de cada estrutura e a frequência própria do primeiro modo vertical.

Para efeito das análises das correlações, as pontes foram categorizadas em estruturas simples (profundidade da estrutura de alvenaria igual a largura do tabuleiro) ou alargadas (demais estruturas); vão profundo (a relação entre a altura e a largura do arco é superior a 0,4); vão do arco (pequena com vão menos que 7,5 m e média com vão compreendido entre 7,5 e 15m).

Foram realizadas correlações utilizando entre parâmetros utilizando lei de potência e linear, na tabela 1 são apresentadas as correlações mais significativas obtidas, sendo os parâmetros geométricos apresentados na figura 7.

É possível observar na tabela 1 que os valores de correlação são baixos quando englobadas todas as estruturas e em que as correlações lineares apresentam valores ligeiramente superiores, isso ocorre devido a grande dispersão dos resultados.

Tabela 1 | Correlações significativas para estimativa da frequência do primeiro modo vertical

Alvenaria			Variável (x)	Potência $y=a.x^b$			Linear $y=c.x+d$		
				a	b	R ²	c	d	R ²
Geral			h^3/L	18,662	0,1323	0,102	20,716	11,849	0,128
Alargada	Profundo	Pequena	L (m)	39,105	0,5310	0,370	-1,694	25,550	0,397
		Média	h^3/L	359,780	1,4343	0,814	182,330	-4,698	0,851
Simples	Profundo	Média	ht (m)	12,692	0,6184	0,532	7,852	4,818	0,618
$y = \text{Frequência (Hz)}$									

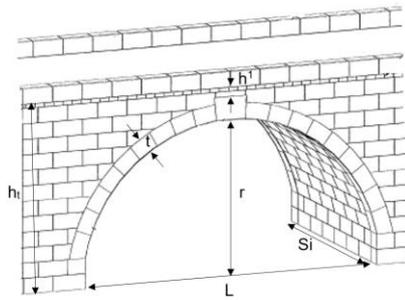


Fig. 7 | Esquema de ponte e arco de alvenaria e seus parâmetros geométricos

Como estudos anteriores de outros tipos de pontes, apontam para leis de potência correlacionando a frequência com o vão máximo do arco. Desta forma optou-se por realizar essa correlação para as pontes em estudo, conforme apresentado na tabela 2, contudo obtém-se uma correlação muito baixa entre os dados.

Os valores de frequência em função do vão livre máximo do arco são apresentados no gráfico da figura 8, juntamente com a lei de potência de L apresentada neste estudo e as leis propostas por Cantieni,1993 (Calçada, 2001) e (Oliveira, 2004).

Na figura 8 é possível observar claramente a dispersão dos resultados de frequência em função do vão máximo, o que já era esperado pois como comportamento dinâmico das estruturas, em geral, depende de fatores intrínsecos da estrutura como a massa, a rigidez e o amortecimento estrutural, esses fatores estão diretamente relacionados com os materiais constituintes da estrutura, técnicas de construção e características geométricas, que nas pontes em arco de alvenaria não são padronizados e variam de estrutura para estrutura, dificultando assim a previsão do comportamento estrutural frente a carregamentos dinâmicos.

Verifica-se que as leis propostas por Cantieni,1993 (Calçada, 2001) e (Oliveira, 2004), apresentam a tendência mais significativa de diminuição da frequência com o aumento do vão máximo do arco, e a correlação proposta apresenta um comportamento mais linearizado, devido a dispersão dos resultados.

Tabela 2 | Parâmetros lei de potencia de L

Potência $y=a.L^b$			
Alvenaria	a	b	R ²
Geral	21,4160	-0,2170	0,0716
$y = \text{Frequência (Hz)} \quad L = \text{vão livre (m)}$			

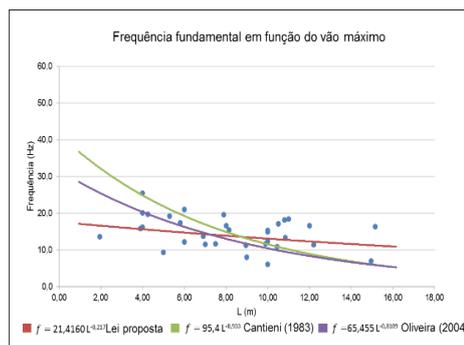


Fig. 8 | Frequência fundamental em função do vão máximo

4- CONCLUSÕES

Conclui-se que em geral as pontes em arco de alvenaria apresentam comportamentos distintos frente aos carregamentos dinâmicos impostos pelo tráfego de veículos. Isso se deve ao comportamento complexo desse tipo de estrutura, bem como a característica desse comportamento ser influenciado por diversos fatores, incluindo a presença de danos estruturais como as fissuras que diminuem a rigidez local da estrutura, alterando assim as suas propriedades dinâmicas e que não foram analisadas no presente estudo.

Em suma, os valores de frequência tendem a diminuir com o aumento do vão livre, entretanto as baixas correlações obtidas entre a frequência fundamental do primeiro modo vertical e as características geométricas das pontes em arco de alvenaria, indicam a necessidade de ampliação da amostra para aumentar a representatividade estatística dos resultados obtidos. Para além disso os autores consideram importante a aplicação de estudos mais específicos nas pontes que apresentam frequências próprias na faixa de 10 a 15 Hz, bem como a análise dos sinais de aceleração obtidos nos ensaios em softwares específicos para aplicação de variantes da técnica *peak-piking* mais avançadas de determinação das frequências e que permitam a determinação dos coeficientes de amortecimento, bem como a comparação entre resultados obtidos por técnicas no domínio do tempo e técnicas de determinação no domínio da frequência.

REFERÊNCIAS

- Assembleia da República. (2008). Resolução da Assembleia da República nº47/2008 de 12 de Setembro. Convenção de Faro-Convenção-Quadro do Conselho da Europa relativa ao valor do Património Cultural para a sociedade, (pp. 6640 - 6652). Faro. Obtido em 26/03/2018, de <http://data.dre.pt/eli/resolassrep/47/2008/09/12/p/dre/pt/html>
- Braun, M. (1941). Differential equations and their applications: An Introduction to Applied Mathematics (3rd Edition ed., Vol. Volume 15). (F. John, J. E. Marsden, & L. Sirovich, Edits.) New York: Springer-Verlag.
- Brown, D., Ewins, D., & Allemang, R. (1999). Modal Analysis: Theory and Applications. Kissimmee, USA: IMAC XVII Pre-Conference Course, .
- Calçada, R. (2001). Avaliação experimental e numérica de efeitos dinâmicos de cargas de tráfego em pontes rodoviárias. Tese de doutoramento , FEUP.
- ISO 14963. (2003). Mechanical Vibration and Shock - Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts. International Organization for Standardization.
- ISO 5348. (1998). Mechanical Vibration and Shock - Mechanical mounting of accelerometers. International Organization for Standardization, Switzerland.
- Jesus, J. J. (2013). Caracterização Geométrico-Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria na Região de Bragança. Tese de Mestrado, Tese de Mestrado. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- National Instruments. (2018). NI LabVIEW SignalExpress©.

- Oliveira, C. (2004). Atualização das bases-de-dados sobre frequências próprias de estruturas de edifícios, pontes, viadutos e passagens de peões a partir de medições expeditas in-situ. *SÍSMICA*, (pp. 575-590).
- Ramos, J. L. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. Doctoral Tesis, Universidade do Minho, Minho.
- Ramos, L., Marques, L., Lourenço, P., De Roeck, G., Campos-Costa, A., & Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1291-1305.
- Rodrigues, J., & Costa, A. C. (Setembro de 1998). Caracterização Dinâmica de Estruturas de Pontes com Base em Ensaio de Vibrações Ambiente. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE)*(44).
- Rodrigues, J. (2004). *Identificação Modal Estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*. PH. D Tesis, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Tilly, G. (2002). *Conservation of bridges*. London: Spon Press.
- Welch, P. (1967). The use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: a Method based on Time Averaging over short Modified Periodograms. *IEEE Transaction on Audio and Electro-Acoustics*, AU-15(2).