



FACULDADE
ENGENHARIA

FACULTY OF ENGINEERING

COVILHÃ | PORTUGAL

ENGINEERING FOR EVOLUTION

November 27 28 29

ICEUBI 2019

University of Beira Interior

Faculty of Engineering Covilhã :: Portugal



ISSN 2183-9891

Book of Proceedings - Volume 2

www.iceubi.ubi.pt

Covilhã :: Portugal
November 27 28 29

ICEUBI 2019

International
Congress on Engineering



International Congress on Engineering
University da Beira Interior
“Engineering for Evolution”

Covilhã (Portugal), November 27-29, 2019

UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
CALÇADA DA FONTE DO LAMEIRO
6200-358 COVILHÃ | PORTUGAL

Tel: +351 275 242 051
E-mail: iceubi2019@ubi.pt
<http://iceubi.ubi.pt>

ICEUBI 2019

INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR - ENGINEERING FOR EVOLUTION

ORGANIZED BY

FACULTY OF ENGINEERING OF UNIVERSITY OF BEIRA INTERIOR
CALÇADA DA FONTE DO LAMEIRO
6200-358 COVILHÃ | PORTUGAL
<http://www.ubi.pt/Entidade/Engenharia>

INSTITUTIONAL SUPPORT



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS



CONFERENCE CHAIRMAN

JORGE MIGUEL DOS REIS SILVA

CONFERENCE VICE-CHAIRMAN

MARIA DO ROSÁRIO ALVES CALADO

EDITORS

JORGE MIGUEL DOS REIS SILVA

MARIA DO ROSÁRIO ALVES CALADO

BOOK OF PROCEEDINGS - VOLUME 2

The editors do not assume any responsibility for the accuracy, completeness or quality of the information provided by any article published.

The information and opinion contained in the publications of are solely those of the individual authors and do not necessarily reflect those of the editors. Therefore, we exclude any claims against the author for the damage caused by use of any kind of the information provided herein, whether incorrect or incomplete. The appearance of advertisements in this Scientific Publications (Abstracts Proceedings - ICEUBI 2019) is not a warranty, endorsement or approval of any products or services advertised or of their safety. The Editors does not claim any responsibility for any type of injury to persons or property resulting from any ideas or products referred to in the articles or advertisements. The sole responsibility to obtain the necessary permission to reproduce any copyright material from other sources lies with the authors and the ICEUBI 2019 Congress cannot be held responsible for any copyright violation by the authors in their article. Any material created and published by ICEUBI 2019 Congress is protected by copyright held exclusively by the referred Congress. Any reproduction or utilization of such material and texts in other electronic, or printed publications is explicitly subjected to prior approval by ICEUBI 2019 Congress.

ISBN: 978-989-654-617-5; [ICEUBI2019 - International Congress on Engineering - Engineering for Evolution - Book of Proceedings, Volume 2]; [PRINT]; [Hardback]

ISBN: 978-989-654-618-2; [Título: ICEUBI2019 - International Congress on Engineering - Engineering for Evolution - Book of Proceedings, Volume 2]; [EPUB]

ISBN: 978-989-654-619-9; [Título: ICEUBI2019 - International Congress on Engineering - Engineering for Evolution - Book of Proceedings, Volume 2]; [PDF / PDF/A]

ISBN: 978-989-654-620-5; [Título: ICEUBI2019 - International Congress on Engineering - Engineering for Evolution - Book of Proceedings, Volume 2]; [CD]

ISBN: 978-989-654-621; [Título: ICEUBI2019 - International Congress on Engineering - Engineering for Evolution - Book of Proceedings, Volume 2]; [Multimedia]

Printed in Portugal by Serviços Gráficos da Universidade da Beira Interior.
Photograph of cover and back cover belongs to University of Beira Interior.
Graphics and Design by Maria Emilia Baltazar and Ricardo Relvas.
Multimedia Design and Programming Rui Costa and Maria Emilia Baltazar.



Identification of vertical frequency response of masonry arch bridges for numerical analysis

Anelise Dick - anelisedick@live.com
Polytechnic Institute of Bragança
Manuel Braz Cesar - brazcesar@ipb.pt
Polytechnic Institute of Bragança
João Roque - jroque@ipb.pt
Polytechnic Institute of Bragança

Abstract

Masonry arch bridges are generally old structures with historical and patrimonial value built based on empirical rules for small traffic loads. Identification of the dynamic properties could be an important parameter to evaluate the response of such bridges to actual traffic loads and to update numerical models used to study its structural response. Thus, this paper presents a expedite method to determine vertical natural frequencies for a set of several masonry arch bridges located in Bragança district, Portugal. The dynamic properties were obtained through environmental vibration tests allowing to identify the dynamic properties in the frequency domain. The identification of the natural frequencies allowed the analysis of the influence of some geometrical parameters of the bridges and the relationship between these and the frequency range of the excitation source. Moreover, the database of the study can be used in future analysis to update FEM models of these structure.

Keywords

Masonry arch bridges, Dynamic properties, Identification

Frequências próprias na direção vertical de pontes em arco de alvenaria a partir de medições expeditas *in-situ*.

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 [1].

Dentre 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 [2].

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 econômicos.



Figura 1 - (a) Ponte de pedra sobre o rio Tuela (b) Ponte velha de Gimonde

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 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, que podem comprometer a segurança da estrutura, podendo levar ao seu colapso parcial ou total. 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 estudos específicos e realizações de ensaios são em geral onerosos. Nessa conjuntura, estudos anteriores [4,5], 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.

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 [6], 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 comparados aos ensaios de vibração forçada, pois não é necessário o uso de equipamentos de excitação, não interrompe o uso corrente da estrutura, apresentando vantagens tanto com relação ao custo quanto a facilidade de execução do ensaio, principalmente em estruturas civis, como é o caso das pontes em arco de alvenaria, que são geralmente difíceis de excitar.

Esta metodologia de ensaio requer que a estrutura no seu uso corrente seja excitada suficientemente pelas cargas dinâmicas incidentes na estrutura, como vento, tráfego, microterremotos, 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 uma ampla gama de modos sejam excitados e permitindo 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 3 que foram selecionadas a partir de um estudo anterior [7], que caracterizou geometricamente estas estruturas.

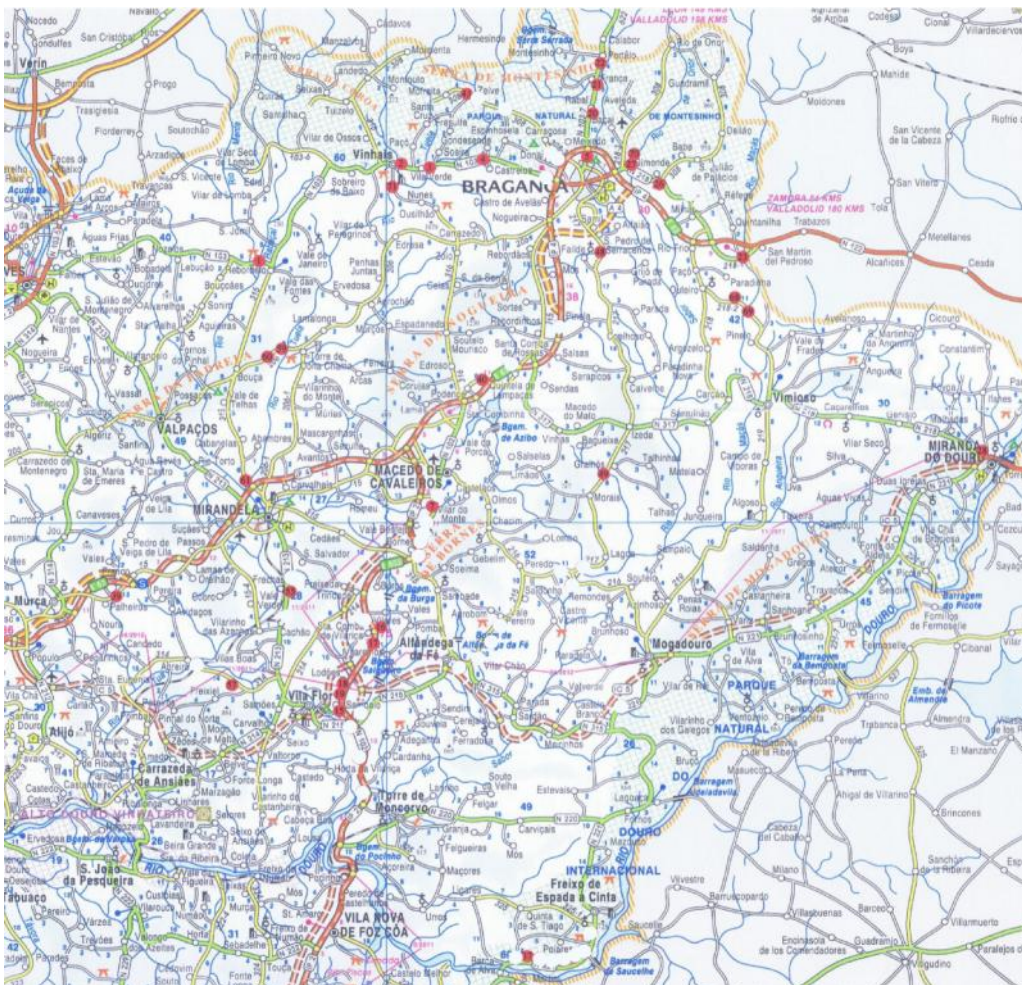


Figura 2 - Localização das pontes no distrito de Bragança

Fonte: Adaptado de [7].

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 à 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 direção da medição pretendida (vertical) e o acoplamento rígido do acelerómetro com a utilização de cola instantânea atendendo as recomendações da ISO 14963 [8] e ISO 5348 [9]. Na figura 3 observa-se os equipamentos utilizados para realização dos ensaios.



Figura 3 - Equipamento de medição durante realização de ensaio uniaxial.

A locação dos acelerómetros foi realizada sobre o tabuleiro (medição na direção 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.

Os ensaios foram pré-configurados no software SignalExpress® utilizando os dados dos acelerómetros e estabelecendo alguns parâmetros necessários à aquisição de dados. Os parâmetros estabelecidos foram: modo de aquisição definido como amostras contínuas; taxa de amostragem $f_s=1000$ Hz (mínima do software) e tempo de ensaio 600 segundos [10].



(a) Locação longitudinal



(b) Locação transversal

Figura 4 - Locação dos acelerómetros

O processamento e análise de sinal foi realizado utilizando o método descrito por Welch [6] que 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 tratam-se de sinais aleatórios, os erros normalizados podem ser calculados pela equação (1) para uma sobreposição de sinal de 50% [11]. Optou-se pela subdivisão em 60 segmentos, gerando um erro relativo $\epsilon_r=11,16\%$ com uma resolução de frequência $\Delta f=0,1$ Hz.

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

Outro parâmetro definido para o processamento de sinal foi a decimação de sinal com fator 10 e interpolação linear, isso acarretou em uma redução da frequência máxima que pode-se identificar sem que ocorra erro de *aliasing*, assim sugere-se que a frequência máxima de interesse passa a ser 40% da nova frequência de amostragem [10, 11]. 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 [6, 12].

Os gráficos de densidade espectral 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 [13]. 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, conforme apresentado na figura 5. Para determinação das frequências próprias foi utilizada a técnica *peak-piking* manualmente que consiste em selecionar os picos apresentados no PSD.

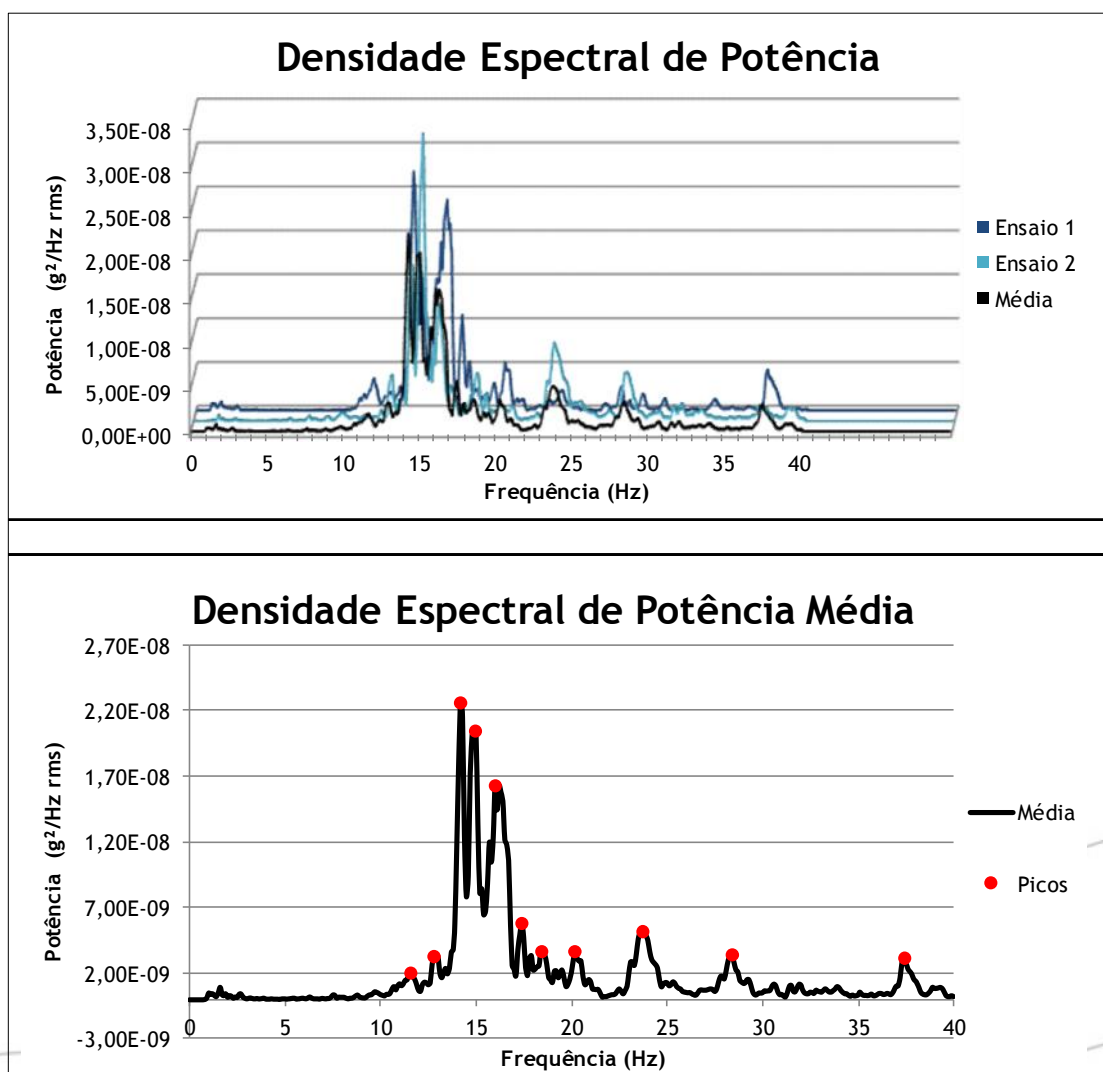


Figura 5 - Densidades Espectrais de Potência (PSDs) na direção vertical para ponte Nova de Gimonde

3 - Análise de resultados

As análises e comparações foram realizadas apenas para a primeira frequência vertical, sendo esta a de maior interesse para este tipo de estrutura. 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.

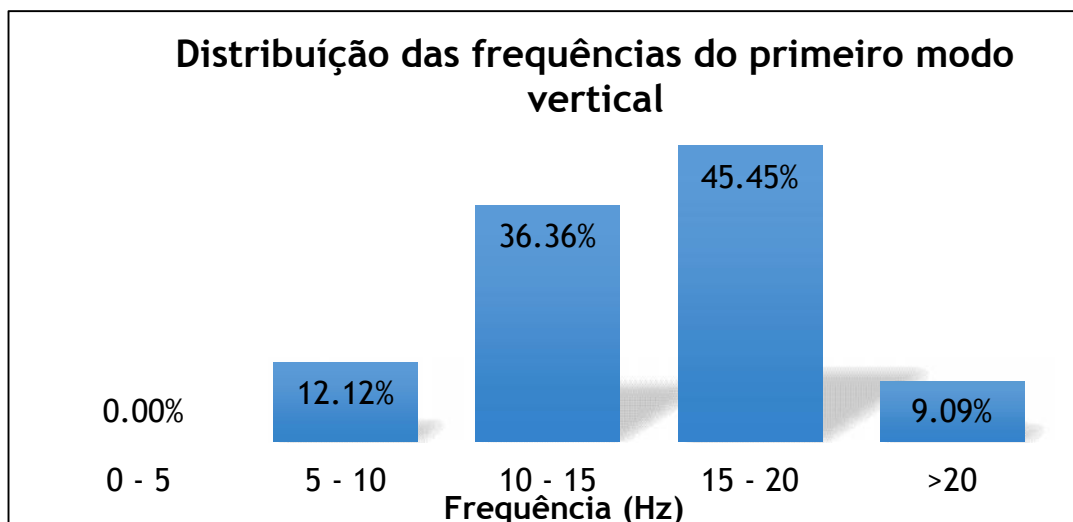


Figura 6 -Distribuição dos valores de frequência do primeiro modo vertical em categorias

Observa-se na figura 6 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 [4].

A partir dos dados geométricos de cada estrutura descritos em [7], realizou-se 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 inferior a 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.

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^1/L	18,6620	0,1323	0,1022	20,7160	11,8490	0,1285
Alargada	Profundo	Pequena	L (m)	39,1050	0,5310	0,3699	-1,6938	25,5500	0,3971
		Média	h^1/L	359,7800	1,4343	0,8141	182,3300	-4,6983	0,8507
Simple	Profundo	Média	ht (m)	12,6920	0,6184	0,5318	7,8515	4,8178	0,6185

$y = \text{Frequência (Hz)}$

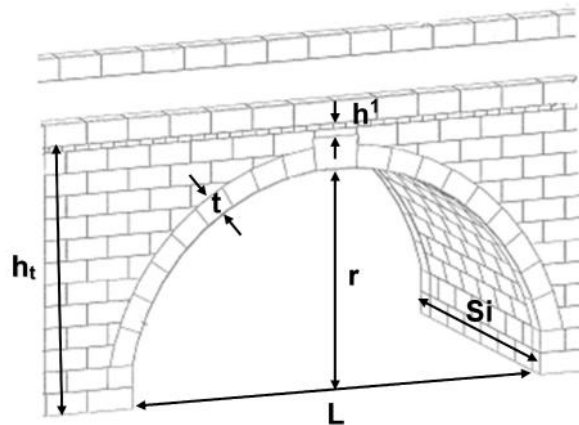


Figura 7 - Esquema de ponte e arco de alvenaria e seus parâmetros geométricos

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. Como estudos anteriores de outros tipos de pontes, apontam para leis de potência correlacionando a frequência com o vão máximo do arco. 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.

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 = Frequência (Hz) L = vão livre (m)

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 [4] e Oliveira [5].

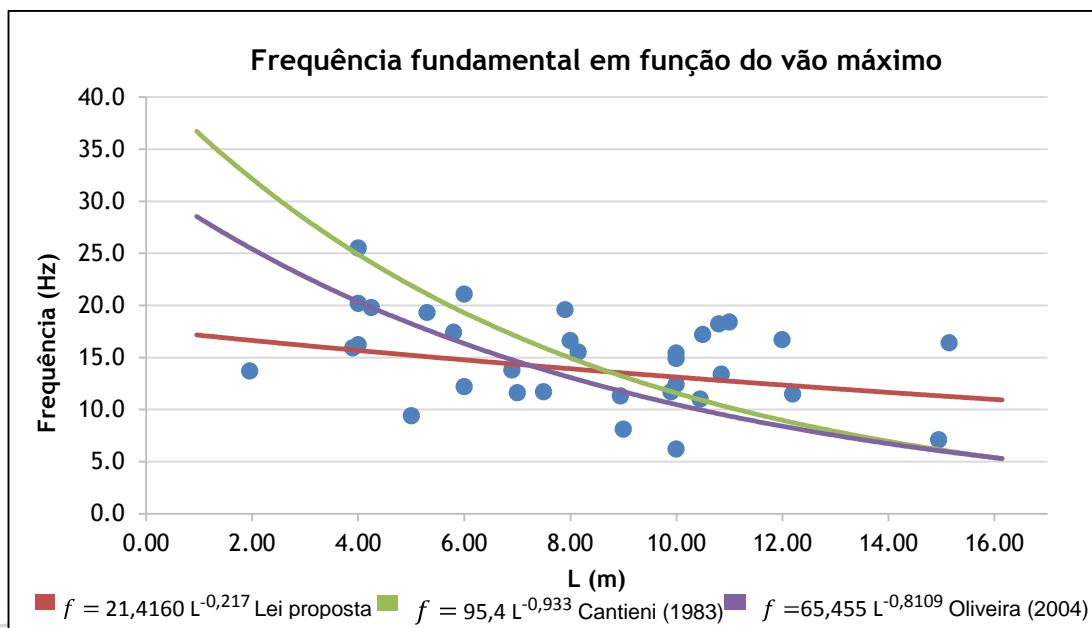


Figura 8 - Frequência fundamental em função do vão máximo

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 [4] e Oliveira [5] 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.

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, assim como a análise dos sinais de aceleração obtidos nos ensaios em softwares específicos para aplicação de variantes da técnica *peak-piking* mais avançadas para determinação das frequências e que permitam a determinação dos coeficientes de amortecimento, e a comparação entre resultados obtidos por técnicas no domínio do tempo e técnicas de determinação no domínio da frequência. Além disso, considera-se importante que estudos futuros analisem a influência do material de enchimento sobre o arco e do atual estado de conservação da estrutura nas frequências naturais dos modos verticais.

Referências

- [1] Assembleia da República. *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.
- [2] G. Tilly. *Conservation of bridges*. Spon Press, London, UK, 2002.
- [3] M, Braun. *Differential equations and their applications: An Introduction to Applied Mathematics*. 3rd Edition, Vol 15, Springer-Verlag, New York, USA, 1941
- [4] R. Calçada. *Avaliação experimental e numérica de efeitos dinâmicos de cargas de tráfego em pontes rodoviárias*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2001.
- [5] C.S. Oliveira. *Actualização das bases-de-dados sobre frequências próprias de estruturas de edifícios, pontes, viadutos e passagens de peões a partir de medições expeditas in-situ*. 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Guimarães, Portugal, 2004.
- [6] P.D. Welch. *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). 1967.
- [7] J. J. C. de Jesus. *Caraterização Geométrico-Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria na Região de Bragança*. Tese de Mestrado. Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2013.
- [8] ISO 14963. *Mechanical Vibration and Shock - Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts*. International Organization for Standartization, 2003.
- [9] ISO 5348. *Mechanical Vibration and Shock - Mechanical mounting of accelerometers*. International Organization for Standartization, 1998.

- [10] J. L. F. S. Ramos. *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Minho, 2007.
- [11] J. Rodrigues. *Identificação Modal Estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2004.
- [12] D. L. Brown, D. J. Ewins e R. J. Allemang. *Modal Analysis: Theory and Applications*. IMAC XVII Pre-Conference Course, Kissimmee, USA, 1999.
- [13] National Instruments. *NI LabVIEW SignalExpress*®. 2018.