

Using RDT and Low Pass Butterworth filters in acceleration data to obtain vibration index from two reinforced concrete viaducts

Jorge Dalmas Braido¹, Zacarias Martin Chamberlain Pravia²

¹Doctoral student in Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) from UPF, Email: 64611@upf.br

²Professor at Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) from UPF, Email: zacarias@upf.br

Resumo

In this work is presented the Vibration Index V (Table 1) which is part of the standard *NBR 15307: Ensaios não destrutivos – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento*. It shows the use of Random Decrement Technique (RDT) and Low Pass Butterworth (BPB) filters in acceleration data sets from two reinforced concrete viaducts decks. RDT filter shows the natural frequencies from the acceleration data which should be removed before the definition of the dynamic parameters. The Low Pass Butterworth filter is used to remove noise from the acceleration data. The sample extraction is performed with an accelerometer from a smartphone. Results from viaducts' Finite Element Models (FEM) are shown. It's known that the bridge's performance is classified from a Condition Index, which is dependent on the inspection team's capacity to identify and classify superficial damages. Using the quantitative performance indicator V makes easier the professional judgment in damages investigation activities and minimize the human influence on the visual inspection final result.

Palavras-chave

Smartphone; RDT; Butterworth; Vibration index

Introdução

O grau de desempenho das estruturas destinadas ao tráfego de veículos descreve as condições estrutural, de função e durabilidade através de um parâmetro numérico de classificação. Este é fornecido por meio de um ranking ou índice da condição, onde se compara o que é verificado *in situ* com um padrão que descreve estas mesmas condições.

Esta classificação é resultado da inspeção visual, método geralmente aplicado para a investigação estrutural. É sabido que esta metodologia apresenta falhas como a subjetividade, falta de instrução da equipe de inspeção, de padronização, de tempo de execução de cada tarefa e o uso de equipamentos inapropriados, entre outros. Além disso, os dados resultantes podem ser incompletos e inconsistentes (MENDES, 2009; MEGAW, 1979; McROBBIE; WRIGHT e CHAN, 2015).

Outra maneira de gerar dados que indicam o grau de desempenho de pontes, viadutos e passarelas é através da execução de ensaios de vibração. Os dados obtidos representam o desempenho estrutural no momento da realização do ensaio e resultam em frequências naturais, taxas de amortecimento, formas modais e, em alguns casos, no índice de vibração V.

O índice V é apresentado pela norma ABNT NBR 15307/2006: *Ensaios não destrutivos – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento* e se relaciona a um nível de dano por meio da magnitude da vibração da estrutura. A norma padroniza a execução de um ensaio de carga dinâmica em grandes estruturas através da medição da vibração operacional, ou seja, sem a indução de fontes de vibração artificiais ou controladas para a realização do ensaio.

A prova de carga bem como o ensaio de vibração exigem a adoção equipamentos específicos para a leitura dos deslocamentos ou acelerações como *strain gauges* e acelerômetros. Neste estudo são adotados apenas smartphones equipados com acelerômetros para o registro de acelerações verticais. O uso deste equipamento de comunicação para a captura de dados no exercício da engenharia em diferentes campos é conhecido como *Mobile Phone Sensing – MPS* (KHAN et al, 2012).

Os smartphones possuem acelerômetros com alta resolução e uma faixa de frequência apropriada para a medição de estruturas. Devido à popularidade, permitem detectar problemas estruturais com maior rapidez

e economia. Além disso, apresentam a capacidade de armazenar informações; sistemas de operações móveis; e comunicação wireless. Alguns pesquisadores constatam que os smartphones possuem sensores encontrados apenas em laboratórios controlados (MATARAZZO et al, 2017; CASTELLANOS-TORO et al, 2018; AMIR, ALAVI e BUTTLAR, 2019).

Apesar da facilidade proporcionada pelo uso de smartphones, os sinais geralmente apresentam um grau de ruído. O ruído pode ser definido como um componente indesejado que interfere na comunicação ou na medição de um sinal. Na extração e processamento de sinais de Obras de Artes Especiais – OAEs, o ruído tem origem através da interação entre estrutura e a fonte de excitação: tráfego de veículos, deslocamento estrutural e eventos da natureza. Outro fator, o equipamento utilizado para a extração de dados também pode ser responsável por gerar ruído (VASEGHI, 2000).

Para minimizar a influência do ruído sobre as amostras extraídas, dois filtros são utilizados: *Random Decrement Technique* – RDT e *Butterworth Passa Baixa* – BPB. Segundo Smith (1999), o uso dos filtros se faz necessário quando o sinal foi contaminado por interferência, ruídos ou outros sinais. O filtro RDT é utilizado para identificar as frequências que compõe o sinal e o filtro BPB é responsável por minimizar a passagem das frequências referentes à fonte de excitação.

Os Modelos em Elementos Finitos – MEF – também foram criados mas apresentam-se apenas os resultados. Assim, minimizam-se as incertezas quanto a identificação das frequências naturais das estruturas e se obtém as formas modais numéricas.

O objetivo deste trabalho é definir o índice de vibração V a partir da aplicação da norma brasileira NBR 15307/2006. São utilizados os filtros RDT e BPB para a filtragem das amostras e a obtenção de frequências naturais através do método *Peak Picking* e taxas de amortecimentos experimentais de dois viadutos em concreto armado localizados em Passo Fundo/ RS. Não são apresentados dados quanto ao máximo deslocamento e aceleração obtidos, tempo de medição, torções ou rotações da obra e a curva de amortecimento que relaciona a amplitude com o amortecimento exigidos pela mesma norma.

Materiais e programa experimental

Estudo de caso

Os estudos de caso são dois viadutos situados na cidade de Passo Fundo/RS. Apresentam a estrutura composta por longarinas em balanço nas extremidades e tabuleiro. Esta configuração é a mais comum no Brasil (RODRIGUES, CASAS e ALMEIDA, 2013).

Os viadutos são designados como viadutos V1 e V2. A Figura 1 e a Figura 2 apresentam os estudos de caso e as principais dimensões onde é possível identificar os elementos que os constituem.

Materiais e métodos

Foram utilizados como equipamentos básicos um celular e um computador.

O celular utilizado foi o Motorola Moto Z force 2, o qual possui acelerômetro triaxial com resolução de 0,0023956299 m/seg² e taxa de amostra de 428 Hz. A aplicação de celular foi o *Vibration Alarm*, desenvolvido pela *Mobile Tools*, a qual é gratuito, apresenta as acelerações na tela em tempo real e permite o salvamento de dados. O sistema operacional é o *Android 9*.

No computador, os modelos numéricos foram criados com o software estudantil *ANSYS Mechanical APDL 2019 R3*, além da seleção e o processamento de dados através do *Excel* e *Scilab*.

No *Excel*, a seleção de dados eliminava a influência do operador ao ativar e finalizar o salvamento manual de dados. No *Scilab* era realizada a aplicação dos filtros RDT; BPB e definição das frequências naturais pelo método *Peak Picking*, taxas de amortecimento pelos métodos de meia potência e queda logarítmica. Em seguida, os dados passavam por uma integração dupla realizada no *Excel*, onde obtiam-se os deslocamentos. A definição do índice de vibração V ocorria no *Scilab*.

Levantamento de dados no campo de operação

Nos viadutos, o celular era posicionado sobre um dos passeios públicos laterais, sendo fixado com fita dupla face para evitar o deslizamento do aparelho sobre a superfície de concreto.

As amostras possuíam duração de cinco minutos. Como era previsto o uso de filtros para minimizar a interferência de fontes de ruído sobre o sinal, o início do salvamento de dados não estava vinculado a uma condição específica de trânsito. O mesmo é válido quando era necessário finalizar o salvamento de dados após decorridos os cinco minutos.

A definição do tempo de duração da amostra não obedece qualquer norma e foi definido de forma deliberada.

Foram extraídas seis amostras em cada viaduto, totalizando doze amostras.

Processamento de dados

Após a extração de dados ocorrem as etapas de seleção, preparação e definição de parâmetros de interesse.

Na etapa de seleção eliminava-se a influência do operador sobre o sinal no início e fim do salvamento de dados. A influência representa o toque na tela do smartphone pelo operador para ordenar o início do salvamento de dados. O toque do dedo sobre a tela é compreendida pelo aparelho como uma aceleração. Ao retirar o dedo da tela, a aceleração diminui de forma contínua até o momento onde passa a registrar apenas os dados referentes à vibração dos tabuleiros dos estudos de caso.

Para finalizar o salvamento de dados, o mesmo processo se repete: é identificado o toque do dedo sobre a tela nos dados, caracterizada por uma aceleração extremamente alta. O intervalo de dados entre estas acelerações extremamente altas é o trecho utilizado.

A seleção de dados é realizada observando os gráficos de aceleração dos dados ainda sem qualquer alteração, onde é possível visualizar os picos de aceleração que não correspondem à vibração estrutural. Os dados são eliminados também de forma manual e não seguem na etapa de processamento.

Com a resposta livre da influência do operador, a preparação é iniciada através do filtro RDT. Este filtro transforma a resposta em queda logarítmica ao eliminar a velocidade inicial e a parte referente à carga aplicada. Mantém apenas a resposta do deslocamento inicial da estrutura (COLE, 1973).

O RDT é aplicado a partir de uma condição de disparo inicial responsável por determinar o início e o fim dos trechos e assim realizar a média prevista na sua metodologia. A condição de disparo utilizada foi a *Level Crossing* por minimizar a variância da amostra e maximizar o número de condições de disparo, além de ser a mais popular (ASMUSSEN, 1997).

A condição de disparo *Level Crossing* é determinada através da obtenção da média *Root Mean Square* - *RMS*, desvio padrão σ , e, por fim, o valor da condição de disparo. A Equação 1 apresenta o *RMS*, a Equação 2 apresenta a condição de disparo *Level Crossing*, a qual é uma constante ao longo do comprimento da amostra.

Após o uso do RDT é conhecida a frequência natural a ser bloqueada ou impedida e se utiliza o filtro Butterworth Passa Baixa-BPB. A característica do filtro BPB é atenuar as frequências maiores que uma frequência desejada. Comparado aos filtros Chebyshev e Elíptico, possui melhor ajuste entre a atenuação e a fase, além de não apresentar ondulação na faixa de passagem ou na faixa de bloqueio (ABDELGAWAD, MAHMUD e YELAMARTHI, 2016).

Como parte da implementação, o filtro BPB exige a adoção de uma ordem com a qual é possível estimar uma redução em dB da resposta. A ordem do filtro será igual a 1 e representa o número de polos necessários para a aplicação do filtro. Segundo Ellis (2004), um filtro de ordem igual a 1 é o mais simples a ser aplicado. A previsão estimada de redução do ruído é de -20 dB. A Figura 3 apresenta a redução de dB estimada onde é destacado em vermelho a projeção para um filtro com ordem igual a 1.

O valor de frequência natural a ser declarado, necessário para que ocorra a atenuação do sinal a partir desta frequência, foi diferente daquela referente à primeira forma modal de flexão vertical identificada nos modelos numéricos.

A frequência limite ou de bloqueio é resultado da média entre as frequências experimentais da estrutura e a frequência referente à outro modo de excitação.

A primeira frequência natural de flexão vertical será conhecida a partir dos modelos numéricos dos viadutos.

Com a resposta livre do ruído e os modelos numéricos definidos, inicia a definição de parâmetros experimentais: frequências naturais, taxas de amortecimento e índice V.

Para o conhecimento das frequências naturais experimentais será utilizado o método de análise modal *Peak Picking*.

O conhecimento da taxa de amortecimento será realizado a partir do pico com maior aceleração registrada e através de dois métodos: meia potência (MP); e decremento randômico logarítmica (DL).

O método da queda logarítmica necessita de um número N de períodos entre o primeiro e último pico considerados. Para definir a quantidade de períodos ótimo foi utilizado o guia para a escolha ideal de períodos N sugerido por Tweten, Ballard e Mann (2014). O valor N adotado foi igual a 11.

Por fim é obtido o índice de vibração V definido pela norma NBR 15307/2006 apresentado na Equação 3 e pela Tabela 1.

Estudo experimental

Os modelos numéricos foram criados com malha de dimensão 15x15 cm. As três primeiras frequências resultantes e as respectivas formas modais numéricas são apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3. É de interesse o valor da frequência natural da primeira forma modal de flexão numérica pois é o modo geralmente excitado pelo tráfego de veículos (RAHMATALLA et al, 2014).

As respostas numéricas e experimentais obtidas na execução das etapas são apresentadas na Tabela 4 e Tabela 5. Foi incluído o parâmetro $f_{estrutura}$ pois o processamento das respostas filtradas pelo RDT indicou a frequência natural experimental estrutural e uma segunda frequência natural que não é de interesse chamada como $f_{adicional}$, a qual se refere a um segundo pico de frequência. Na Tabela 4 e Tabela 5, a frequência natural do modelo numérico se refere ao primeiro modo de flexão vertical retirado da Tabela 2 e Tabela 3.

Viaduto V1

O uso do RDT indicou a frequência natural experimental no viaduto V1.

Para o viaduto V1, a frequência que se refere à primeira forma modal numérica de flexão é igual a $f=12,13$ Hz.

A média das frequências naturais experimentais da estrutura e o segundo pico foram $f_{estrutura}=12,34$ Hz e $f_{adicional}=17,09$ Hz. Assim, a frequência atenuada e implementada no filtro Butterworth Passa Baixa foi de 14,71 Hz. Este valor é a média obtida entre $f_{estrutura}$ e $f_{adicional}$.

Ao analisar a Tabela 4, a diferença entre a média das frequências experimentais resultantes do uso do filtro BPB e a numérica do primeiro modo de flexão do viaduto V1 é de 1,70%.

A análise das taxas de amortecimento para o viaduto V1 apresenta valores de grandezas diferentes. A comparação da resposta obtidas pelos métodos de queda logarítmica e de meia potência apresentou diferenças menores ou iguais a 5%, com exceção das amostras 2 e 3 as quais foram maiores.

O resultado obtido para o índice de vibração V das amostras do viaduto V1 apresentaram valores negativos, indicando a ausência de danos.

Viaduto V2

Para a resposta numérica do viaduto V2, a primeira frequência natural de flexão é igual a $f=7,80$ Hz.

Para o V2, o RDT indicou as frequências naturais experimentais da estrutura apenas para duas amostras.

A média das frequências naturais experimentais da estrutura e do segundo pico foram de $f_{estrutura}=6,68$ Hz e $f_{adicional}=17,32$ Hz. Assim, a frequência atenuada e implementada no filtro Butterworth Passa Baixa foi de 12 Hz.

A amostra número 9 não foi processada pois não possuía duração mínima de cinco minutos.

Após o uso do filtro BPB foi possível conhecer a frequência natural experimental das amostras processadas.

A analisar os resultados do viaduto V2, na Tabela 5, a diferença entre a média das frequências experimentais após a passagem pelo filtro BPB e a numérica do viaduto V2 é de 18,33%.

As taxas de amortecimento também apresentaram valores de grandezas diferentes. A comparação entre os métodos utilizados para determinar a taxa de amortecimento apresentou diferenças menores que 30% para as amostras 8 e 11. As demais amostras apresentaram diferenças ainda maiores.

Os índices de vibração V do viaduto V2 também apresentou valores negativos, indicando a ausência de danos.

Conclusão

Em relação a metodologia adotada, é sabido que a NBR 15307/2006 apresenta os locais onde é indicado extrair as amostras para a prova de carga dinâmica. Porém, estas indicações não foram seguidas já que a maior preocupação situava-se em avaliar os tabuleiros.

Embora este trabalho apresente a aplicação de dois filtros – RDT e BPB, foi projetado e executado em um primeiro momento apenas com o uso do filtro RDT. O BPB só foi incorporado à metodologia quando o RDT não foi capaz de minimizar o ruído de modo efetivo nas amostras do viaduto V2. Na Tabela 5 é possível verificar as respostas obtidas após o uso do filtro BPB a partir da quinta coluna ($f_{estrutura}$).

No viaduto V1, em relação aos resultados obtidos, a diferença das frequências numérica e experimental não permite que sejam identificados danos. Para ser efetivo na indicação de danos, as variações das frequências naturais devem ser maiores que 5% (SALGADO et al, 2014).

Em relação às frequências numéricas e experimentais obtidas para o viaduto V2, a diferença existente pode indicar a presença de danos. Contudo, é possível que esta diferença seja atribuída ao nível de ruído presente nas amostras desta estrutura. Outro aspecto importante, em um estudo envolvendo os mesmos viadutos, Braidó e Pravia (2019) verificaram que o viaduto V2 apresenta menores acelerações máximas em comparação ao viaduto V1. Esta característica pode exigir um maior grau de redução de ruído do filtro BPB. Outra hipótese, pode existir uma relação inversa entre a aceleração máxima e o ruído existentes: quanto menor a aceleração máxima, maior a interferência do ruído sobre os parâmetros resultantes. Vale destacar que esta afirmativa não pode ser realizada sem maiores estudos.

Para as taxas de amortecimento do viaduto V1, considerando as amostras com diferenças menores ou iguais a 5%, não obedecem ao que é geralmente verificado: taxas de amortecimento obtidas pelo método da meia potência são superestimadas e se apresentam com valores maiores que aquelas obtidas pelo método da queda logarítmica. Neste caso, as taxas de amortecimento obtidas pelo método da queda logarítmica são maiores (HE e FU, 2001).

Para as taxas de amortecimento do viaduto V2, com exceção da última amostra, o método de meia potência foi superior ao obtido pelo método de queda logarítmica. Isso, porém, não garante que os valores estejam corretos.

Em relação as taxas de amortecimento, existe mais de um indicativo sobre um limite que possa representar dano em uma estrutura a partir da análise desta propriedade. Enquanto Bachmann et al (1995) indicam que o amortecimento não deve exceder 2%, Li et al (2014) indicam que para OAEs em concreto armado simplesmente apoiadas, o amortecimento não deve exceder 3,5%. Assim, considerando as taxas de amortecimento com diferença menor ou igual a 5%, o viaduto V1 pode apresentar um dano em estágio inicial. Para o viaduto V2, nenhuma observação pode ser realizada devido à diferença existente entre as respostas.

Considerando o índice de vibração V, acredita-se que este parâmetro represente o nível de dano para o viaduto V1 o qual possui frequências naturais experimentais e numérica com diferenças menores que 3% e amortecimento próximo a 3,5%, indicando que danos iniciais já podem ser verificados. Essa hipótese considera também a maior sensibilidade apresentada pelo amortecimento à presença de danos (CAO et al, 2017).

Para o viaduto V2, acredita-se que o índice V não represente a condição da estrutura. Esta constatação tem base nas características dos outros parâmetros dinâmicos definidos: a diferença de frequências naturais experimentais; a variação nas taxas de amortecimento; e a incapacidade de definir as frequências após o RDT.

No caso do filtro RDT, o seu uso pode ser benéfico em casos onde já se conhecem as frequências naturais experimentais. Caso contrário, exige a complementação através do MEF dos estudos de caso.

Segundo Casas e Rodrigues (2015), embora o índice de vibração V possa indicar de maneira simplificada o nível de dano em grandes estruturas, ainda não possui a capacidade de apresentar diferenças entre os níveis de dano.

Portanto, o uso da norma NBR 15307 com o único objetivo de definir o índice de vibração V deve vir acompanhado pela modelagem numérica e experimental como é previsto pelo procedimento. Além disso, o conhecimento dos resultados prévios deveriam apresentar, se possível, a evolução dos parâmetros dinâmicos até o momento do último ensaio.

Figuras, Fotografias e Tabelas (modelos)

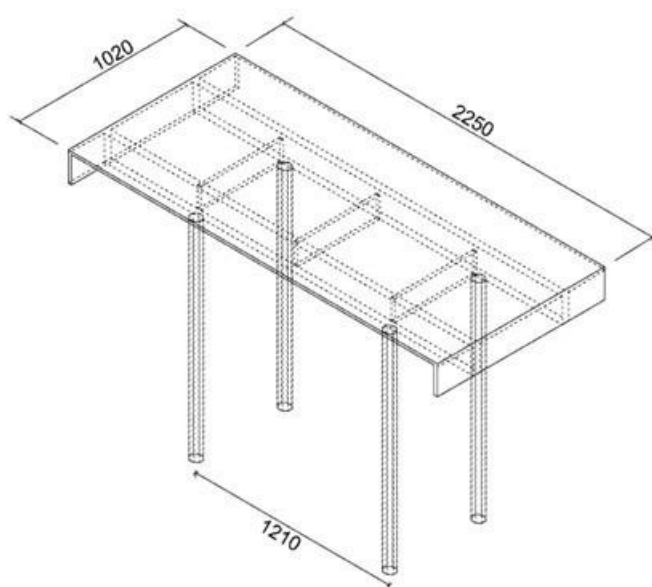


Figura 1 - Viaduto V1

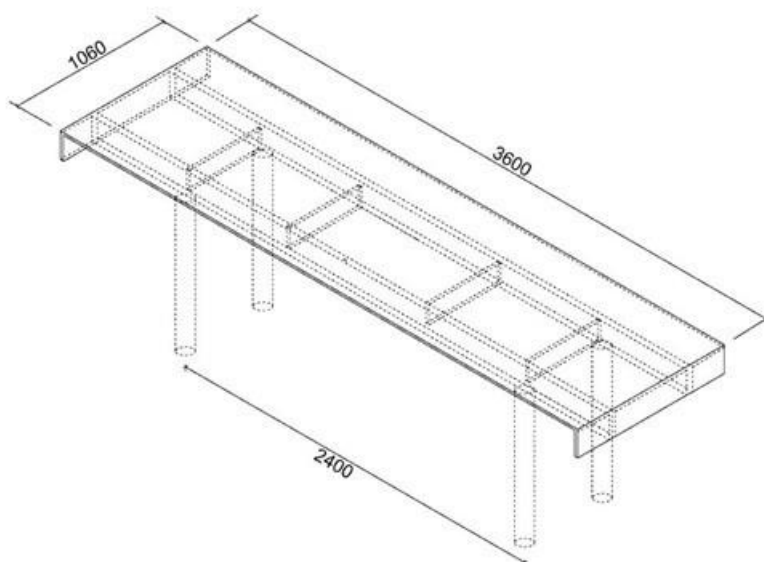


Figura 2 - Viaduto V2

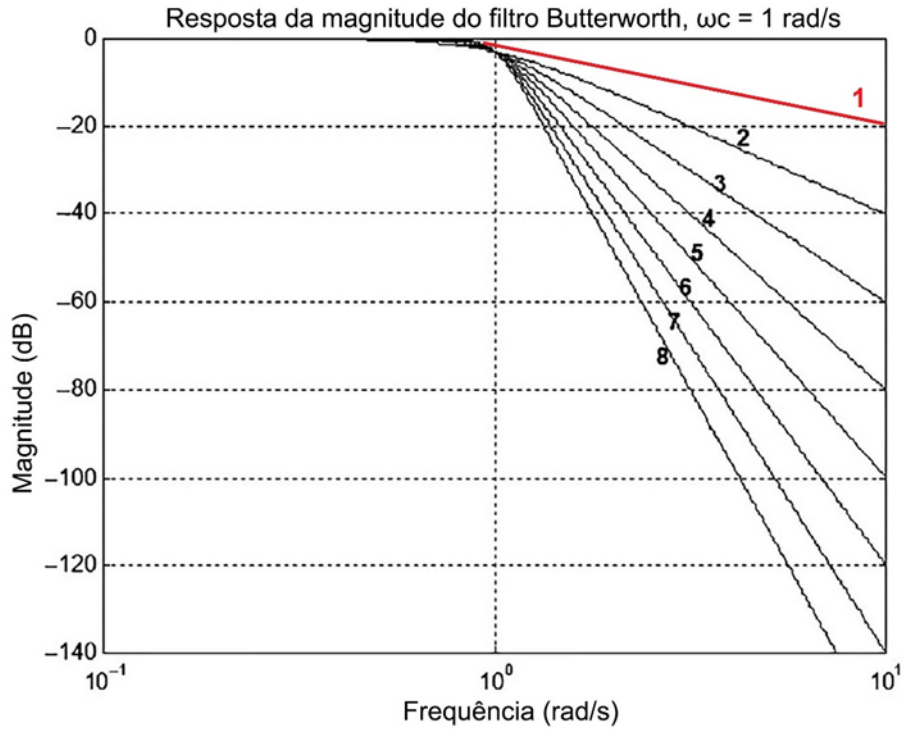


Figura 3 - Magnitude da resposta do Filtro Butterworth com relação a ordem n (adaptado de THOMPSON, 2013)

Tabela 1 - Níveis de danos em função do índice de vibração V

V	Nível de danos
10 - 30	Nenhum dano
30 - 40	Danos leves
40 - 50	Danos severos
50 - 60	Colapso

Fonte: NBR 15307 (2006)

Tabela 2 - MEF viaduto V1 - Resultados

Frequência natural (Hz)	Forma modal numérica
11,59	Torção
12,13	Flexão
13,64	Transversal

Tabela 3 - : MEF viaduto V2 - Resultados

Frequência natural (Hz)	Forma modal numérica
7,13	Torção
7,80	Flexão
9,42	Transversal



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 4 - Viaduto V1 - Resultados obtidos

Amostra	Modelo numérico (Hz)	Filtro RDT		Butterworth k=1			Índice de vibração V	Nível de dano
		$f_{estrutura}$ (Hz)	$f_{adicional}$ (Hz)	$f_{estrutura}$ (Hz)	$\xi_{MP}(\%)$	$\xi_{DL}(\%)$		
1	12,13	12,86	17,99	12,86	3,73	3,92	-33,99	Nenhum
2		12,15	16,08	12,15	6,20	5,19	-21,77	Nenhum
3		12,22	18,58	12,22	2,65	3,37	-24,42	Nenhum
4		12,61	17,76	12,61	3,36	3,49	-19,35	Nenhum
5		11,96	17,75	11,96	4,18	4,26	-23,39	Nenhum
6		12,26	14,38	12,26	3,52	3,65	-35,35	Nenhum
	Média	12,34	17,09	12,34				

Tabela 5 - Viaduto V2 - Resultados obtidos

Amostra	Modelo numérico (Hz)	Filtro RDT		Butterworth k=1			Índice de vibração V	Nível de dano
		$f_{estrutura}$ (Hz)	$f_{adicional}$ (Hz)	$f_{estrutura}$ (Hz)	$\xi_{MP}(\%)$	$\xi_{DL}(\%)$		
7	7,80	-	17,34	6,10	4,86	0,99	-97,93	Nenhum
8		6,74	17,97	6,74	1,83	1,49	-114,50	Nenhum
9		-	-	-	-	-	-	Nenhum
10		-	17,01	5,76	4,36	1,86	-116,82	Nenhum
11		-	17,24	6,62	5,89	4,17	-90,71	Nenhum
12		6,62	16,94	6,62	1,57	2,14	-88,42	Nenhum
	Média	6,68	17,32	6,37				

Equações

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad (1)$$

Onde:

n é o número de dados;

x_n^2 é o dado da aceleração.

$$a = \sqrt{2} * \sigma_x \quad (2)$$

Onde:

σ_x é o desvio padrão da amostra.

$$V = 10 \log(160\pi^4 A^2 f^3) \quad (3)$$

Onde:

V é o índice de vibração adimensional;

A é a amplitude de vibrações, em centímetros;

f é a frequência, em Hertz (Hz).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Referências

ABDELGAWAD, A; MAHMUD, A; YELAMARTHI, K. Butterworth Filter Application for Structural Health Monitoring, *International Journal of Handheld Computing Research*, p.15-29, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.4018/IJHCR.2016100102> >

AMIR, H. ALAVI, H, A; BUTTLAR, G, W. An overview of smartphone technology for citizen-centered, real-time and scalable civil infrastructure monitoring, *Future Generation Computer Systems*, p. 651-672, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.059> >

ASMUSSEN, J, C. Modal analysis based on the Random Decrement Technique – Application to Civil Engineering Structures, Aalborg Univeristy, Dinamarca (Tese de doutorado), 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15307/2006 Ensaios não destrutivos –Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas - Procedimento, 2006.

BACHMANN, H. AMMANN, J, W. DEISCHL, F. EISENMANN, J. FLOEGL, I. HIRSCH, H, G. KLEIN, K, G. LANDE, J, G. MAHREHOLTZ, O. NATKE, G, H. NUSSBAUMER, H. PRETLOVE, J, A. RAINER, H, J. SAEMANN, E. STEINBEISSER, L. *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Basel: Birkhäuser Verlag 1995. ISBN-13- 978-3-0348-9955-0. Disponível em: < <http://doi.org/10.1007/978-3-0348-9231-5> >

BRAIDO, D, J; PRAVIA, C, M, Z. Avaliação da superestrutura de dois viadutos em concreto armado através da aplicação da nbr 15307, In: *Seminário Regional de Engenharia Estrutural, VI, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.*

CAO, S, M; SHA, G, G; GAO, F, Y; OSTACHOWICZ, W. Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features, *Smart Materials and Structures*, v. 26, n. 4, p. 1-14, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/aa550a> >

CASAS, R, J; RODRIGUES, F. Bridge Condition and Safety Based on Measured Vibration Level. In: *IABSE Workshop: Safety, Robustness and Condition Assessments of Structures, Helsinki, Finland, 2015.*

CASTELLANOS-TORO, S; MARMOLEJO, M; MARULANDA, J; CRUZ, A; THOMSON, P. Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones, *Construction and Building Materials*, p. 490-504, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.089> >

COLE, A, H. On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures random decrement signatures, *NASA CR-2205*, 1973.

ELLIS, G. *Control system design guide: a practical guide*, 3 ed., Elsevier Academic Press, London, 2004. ISBN 0-12-237461-4

HE, J; FU, Z. *Modal Analysis*. 1. ed. Oxford: University of Oxford, Reino Unido: ButterWorth-Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5079 6

KHAN, Z, W ; XIANG, Y ; Y AALSALEM, Y, M ; ARSHAD, Q. Mobile Phone Sensing Systems: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 15, p. 1-26, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2012.031412.00077> >

LI, P; WANG, Y; LIU, B; SU, L. Damping Properties of Highway Bridges in China, *Journal of Bridge Engineering*, v. 19, 2014. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000578](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000578) >

MATARAZZO, T; VAZIFEH, M; PAKZAD, S; SANTIA, P; C, RATTI, C. Smartphone data streams for bridge health monitoring. In: *International Conference on Structural Dynamics - EUROLYN, 10th, 2017, Itália.*

McROBBIE, G, S; WRIGHT, A, M; CHAN, A. Can technology improve routine visual bridge inspections? *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, p. 197-207, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1680/jbren.12.00022> >

MEGAW, D, E. Factors affecting visual inspection accuracy, *Applied Ergonomics*, v.10, p.27-32, 1979. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(79\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0003-6870(79)90006-1) >

MENDES, C, T, P. Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras. *Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (Tese de doutorado)*, 2009.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

RAHMATALLA, S; HUDSON, K; LIU, Y; EUN, C. Finite element modal analysis and vibration-wave forms in health inspection of old bridges, *Finite Elements in Analysis and Design*, p. 40-46, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2013.09.006> >

RODRIGUES, S, F, J; CASAS, R, J; ALMEIDA, O, A, P. Fatigue-safety assessment of reinforced concrete (RC) bridges: application to the Brazilian highway network, *Structure and Infrastructure Engineering*, p.601-616, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2011.598939> >

SALGADO, R. CRUZ, S, J, P. AYALA, G. ZAMORA, A, S. Performance of damage detection methods used in bridge structures through dynamic tests in steel beams, *American Journal of Civil Engineering*, p. 18-26, 2014. Disponível em: < <http://doi.org/10.11648/j.ajce.20140202.12> >

SMITH, W, S. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal processing*, 2. Ed, California Technical Publishing, 1999. ISBN: 0-9660176-7-6

THOMPSON, M. *Intuitive Analog Circuit Design*, 2. ed, Newnes, 722 pag., 2013. ISBN 0124058663

TWETEN, J, D; N, BALLARD, Z; MANN, P, B. Minimizing error in the logarithmic decrement method through uncertainty propagation, *Journal of Sound and Vibration*, p. 2804-28011, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.024> >

VASEGHI, V, S. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. 2 Ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2000, 473 p. ISBN: 0-471-62692-9