



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

Influência das Irregularidades do Pavimento Asfáltico na Resposta Dinâmica de Pontes e Viadutos Rodoviários

Cristiano Hoss¹, Igor Hoffman², Guilherme Alminhana³, Felipe Pagnussatt⁴, Letícia Miguel⁵

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS/ Hoss & Hoffman – Engenharia e Consultoria/ Fundador/ cristiano.hoss.sk@gmail.com;

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS/ Hoss & Hoffman – Engenharia e Consultoria/ Cofundador/ igor-s-h@hotmail.com;

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, guilherme.alminhana@ufrgs.br;

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, felipepagnussatt@gmail.com;

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, letffm@ufrgs.br.

Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar a resposta de deslocamentos através de análise dinâmica em uma ponte rodoviária causada pela passagem de um trem-tipo sobre pavimento, levando em consideração as irregularidades da pista e os efeitos dinâmicos da interação entre a ponte e o veículo. Comparou-se os resultados obtidos através da análise dinâmica com a metodologia aproximada proposta pela NBR 7188:2013. Foi utilizado o modelo de veículo de três eixos (TB45 – 450 kN), proposto por Almeida (2006), com velocidade constante de 72 km/h, e um modelo de ponte rodoviária com seção mista de aço e concreto, modelada como uma viga contínua com quatro apoios em sua extensão e sem balanços. Para a obtenção do perfil de irregularidade do pavimento da ponte foi utilizada a norma ISO 8608:1995, considerando classe C. As equações de movimento são numericamente resolvidas pelo uso do Método de Newmark (1959). As respostas obtidas mostram que as irregularidades consideradas geram efeitos dinâmicos verticais consideráveis sobre a estrutura, que conseqüentemente resultou em valores maiores de deslocamentos verticais, quando comparado aos deslocamentos previstos segundo a metodologia aproximada proposta pela NBR 7188:2013. Portanto, conforme a análise dinâmica realizada, o tráfego de veículos e o perfil de irregularidades do pavimento rodoviário são fatores significativos a serem observados durante o projeto de pontes rodoviárias, haja visto que ao se desprezar tais efeitos a segurança estrutural será afetada.

Palavras-chave

Resposta dinâmica; pontes; irregularidades do pavimento.

1. INTRODUÇÃO

As pontes e viadutos rodoviários são definidos pela NBR 7188:2013 como qualquer estrutura destinada a permitir a transposição de um obstáculo, natural ou artificial, por veículos rodoviários. A construção dessas obras especiais constitui os projetos de estradas em que o greide previsto sobrepõe rios, lagos, zonas de preservação ambiental, vales e montanhas, e malhas viárias e ferroviárias no caso de viadutos.

A Confederação Nacional de Transportes (CNT) realizou em 2018 uma pesquisa com o objetivo de avaliar as condições das rodovias pavimentadas brasileiras. Ao todo 107.161 km de malhas rodoviárias foram avaliadas, sendo que 50,9% apresentaram algum tipo de deficiência relacionada ao estado do pavimento asfáltico (37,0% classificados como regulares, 9,5% ruim e 4,4% péssimo). Além disso, os recursos financeiros disponibilizados para o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

destinados a manutenção e conservação das rodovias no país são insuficientes, e sofreram acentuadas reduções nos últimos anos, que por consequência contribui para a permanência do estado precário do pavimento rodoviário de muitas rodovias nacionais e estaduais (EXAME, 2019).

Devido a estes indicativos, para projetos de pontes, é de extrema importância o estudo das ações dinâmicas causadas pelo movimento vertical do trem-tipo considerado para o projeto, já que as irregularidades da pista provocam movimentos oscilatórios nos veículos que trafegam sobre as pontes. A NBR 7188:2013 permite que os carregamentos móveis sejam relacionados aos estáticos através da introdução de coeficientes de impacto vertical.

Em vista de tais apontamentos, este trabalho apresenta os resultados obtidos, através de simulação computacional matricial de estruturas, dos deslocamentos previstos em uma ponte rodoviária ao considerar a ação dinâmica vertical causada pela passagem do trem-tipo, resultado da introdução da simulação das irregularidades na pista ao longo da ponte, segundo modelo proposto pela norma ISO 8608:1995. Os resultados foram comparados com os obtidos através da metodologia indicada na norma brasileira.

2. PONTE RODOVIÁRIA ANALISADA

A estrutura analisa faz parte da malha rodoviária federal pertencente ao DNIT, localizada no estado do Pará, na BR-290. O projeto original da obra é da década de 80, realizado com base nas diretrizes normativas da antiga NB 6. A obra é uma ponte em estrutura mista com longarinas de alma cheia, tabuleiro rodoviário de 5,95 m, sendo 4,25 m de pista de rolamento e 1,70 m de passeio externo. Na Figura 1 é apresentada uma seção transversal da obra existente.

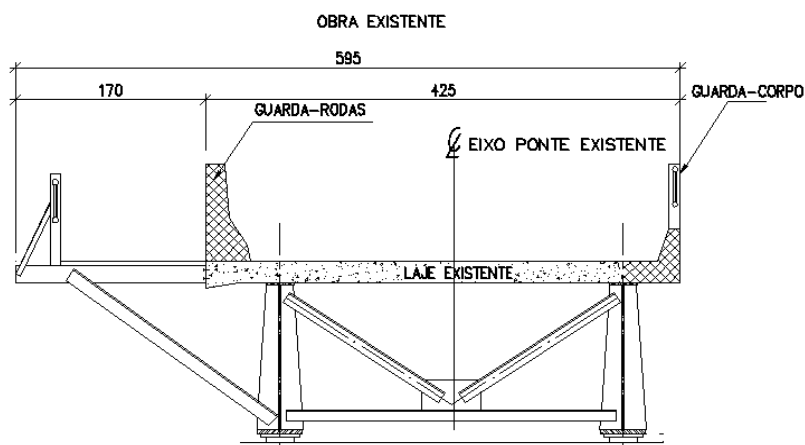


Figura 1 – Seção transversal da ponte já existente.

A obra de arte em questão passou por um processo de reforço estrutural e ampliação no ano de 2016. O tabuleiro rodoviário foi ampliado para 14,40 m, sendo composto por duas faixas de tráfego em cada sentido mais acostamento lateral e passeio, conforme pode-se observar na Figura 2.

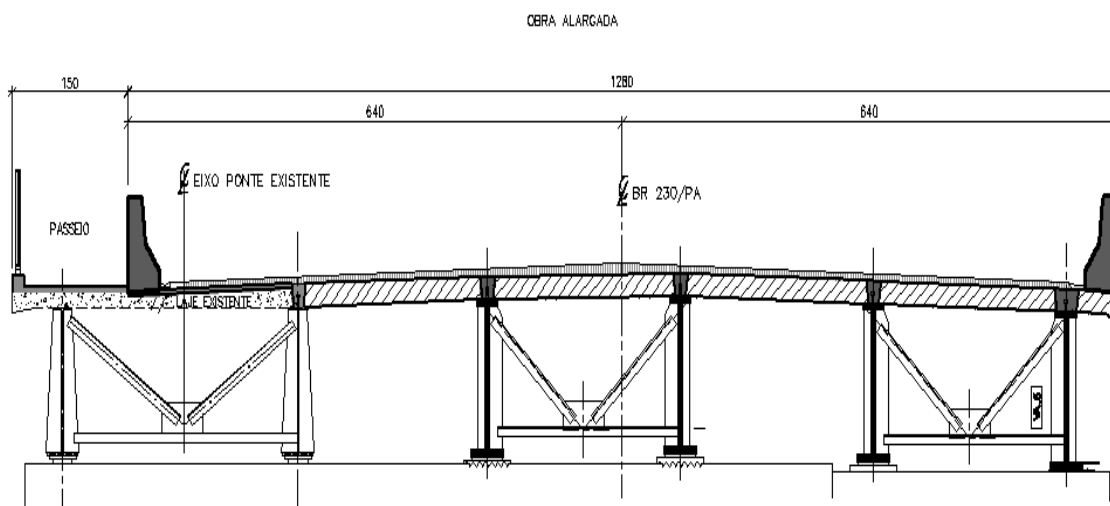


Figura 2 – Seção transversal da ponte após a ampliação.

A superestrutura de ampliação é composta por uma solução mista com longarinas metálicas de alma cheia com inércia longitudinal semelhante às longarinas existentes. As lajes de concreto armado pré-fabricadas são solidarizadas aos perfis de Aço Corten, altamente resistente à ação atmosférica, via conectores de cisalhamento (*stud bolt*).

As análises numéricas foram realizadas considerando apenas a ação do trem tipo trafegando sobre a estrutura. Para a solução do problema dinâmico as propriedades geométricas da seção transversal, aqui adotadas, foram calculadas conforme a abordagem da NBR 8800:2008 para cargas de curta duração (natureza transitória), que é o caso da carga móvel.

3. MODELOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados os modelos numéricos considerados para este trabalho referentes ao perfil de irregularidades do pavimento, modelo numérico para a estrutura da ponte e do veículo-tipo.

3.1 Perfil de irregularidades do pavimento

Neste trabalho optou-se, para a análise do comportamento dinâmico da ponte, por um modelo que simula as irregularidades do pavimento seguindo as prerrogativas estabelecidas na norma ISO 8608:1995. Na presente norma, pode-se estabelecer o grau de irregularidades da pista em função de uma dada densidade espectral desejada. A Equação 1 apresenta a expressão recomendada pela norma.

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\omega} \quad (1)$$

Destaca-se que na Equação 1, n_0 é a frequência espacial de referência, tomado como 0,1 ciclos/m; n é a frequência espacial, que varia entre 0,011 e 2,83 ciclos/m; ω é o coeficiente que determina a inclinação da PSD (*Power Spectral Density*); $G_d(n)$ é a PSD de deslocamento em função da frequência espacial, em m^3 ; $G_d(n_0)$ é a PSD de referência, em m^3 , que possui os valores conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – PSD de referência, segundo a ISO 8608:1995.

Classe de estrada	$G_d(n_0)$ [10^{-6}]		
	Limite Inferior	Valor Médio	Limite Superior
A	0	16	32
B	32	64	128
C	128	256	512

Para a análise empregaram-se parâmetros relativos ao padrão C (valor médio), visto que este é usualmente empregado em estudos similares aos desenvolvidos neste trabalho, tal como pode se ver em Almeida (2006), Pagnoncelli (2017) e Miguel et al. (2016).

De modo a transformar a densidade espectral estabelecida, segundo a metodologia proposta pela ISO 8608:1995, nas irregularidades ao longo do pavimento da ponte empregou-se a transformação proposta por Shinozuka e Jan (1972), que é apresentada na Equação 2.

$$u_p(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2 \cdot G_d(n_i) \cdot \Delta n_i} \cos(2\pi n_i x + \varphi_i) \quad (2)$$

Sendo $u_p(x)$ o perfil de irregularidades oriundo da transformação do espectro da ISO 8608:1995 em função da coordenada x , N é o número de intervalos da banda de frequências n_i ; φ_i é um ângulo aleatório de fase que varia entre 0 e 2π ; Δn_i é o intervalo de variação das frequências em Hz.

3.2 Modelo numérico da ponte analisada

A análise da ponte foi feita seguindo uma modelagem com o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), onde o tabuleiro da ponte foi discretizado em elementos de viga de Euler-Bernoulli bidimensionais, considerando apenas os graus de liberdade de deslocamento verticais no plano bidimensional e uma rotação perpendicular ao plano dos elementos.

Dado que a análise deste trabalho avalia o comportamento dinâmico da estrutura montaram-se as matrizes de massa e rigidez conforme os modelos propostos por Felippa (2001) e McGuire et al. (2000). Para este trabalho não foram consideradas as não linearidades físicas (plastificação dos materiais) e geométricas (efeitos de grandes deslocamentos e deformações) da estrutura. Além disso, tem-se que a matriz de amortecimento foi aproximada utilizando-se o modelo proposto por Rayleigh, supondo o amortecimento como viscoso, conforme apresentado por Almeida (2006). Para a montagem das matrizes empregadas neste trabalho utilizaram-se os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos elementos finitos para montagem das matrizes.

Propriedade	Valores
Massa linear (ρ)	14.600 kg/m
Momento de inércia (I)	0,2328 m ⁴
Módulo de elasticidade longitudinal do material (E)	200 GPa
Comprimento (L)	2 m
Razão de amortecimento (ξ)	0,02%

Tomando a ponte avaliada e seguindo a metodologia do MEF, discretizou-se a estrutura em 50 elementos de barra, utilizando o comprimento dado na Tabela 2. Sendo assim, a estrutura modelada apresenta ao todo 51 nós, resultando ao final o total de 102 graus de liberdade, tal como segue ilustrado na Figura 3, que foi modelada no software SAP2000.

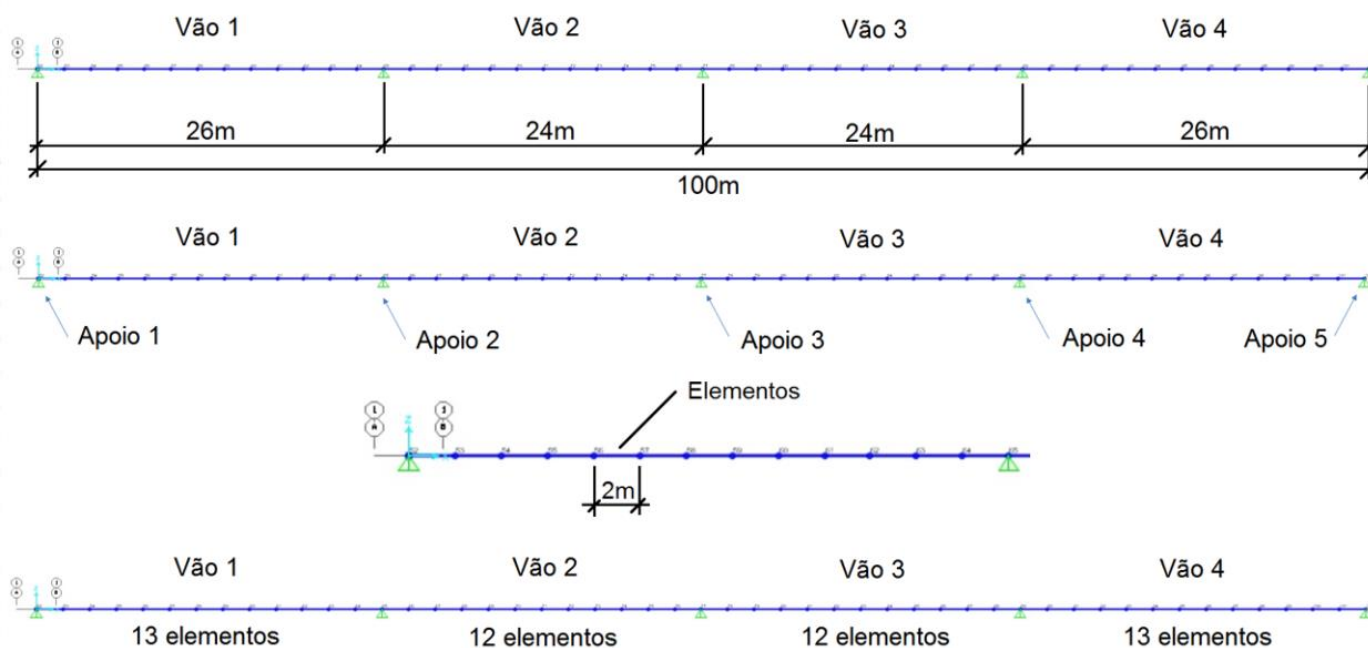


Figura 3 – Modelo da estrutura em elementos finitos no SAP2000.

3.3 Modelo do veículo-tipo

O modelo de veículo a ser empregado na análise do comportamento dinâmico da ponte baseou-se em um dos propostos no trabalho de Almeida (2006), que possui três eixos e quatro massas, similar ao TB-450 apresentado pela NBR 7188:2013. Abaixo segue, ilustrado na Figura 4, o modelo empregado.

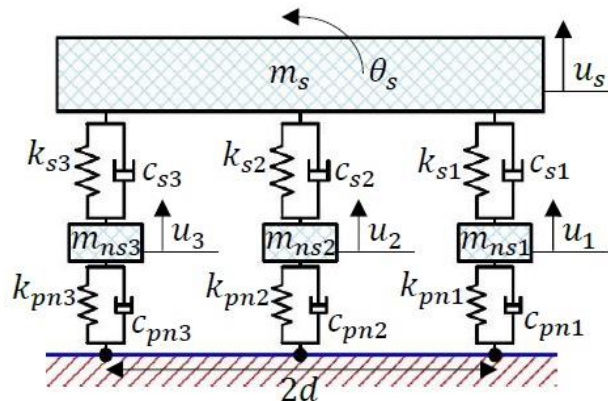


Figura 4 – Modelo tipo do veículo empregado (adaptado de Pagnoncelli (2017)).

Neste trabalho, a interação entre massa suspensa (m_s) e massa não suspensa (m_{nsi}) não foi considerada, assim como o ângulo (θ_s). Também se suprimiu os valores de c_s e k_s , referente às constantes de amortecimento e de rigidez da suspensão, respectivamente. Por fim, o deslocamento u_s da massa suspensa também não foi considerado, pois o objetivo deste trabalho não é avaliar os deslocamentos no veículo, e sim na ponte. As propriedades do veículo tipo utilizadas na simulação computacional seguem apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do veículo-tipo empregado.

Propriedade	Valores
Massa suspensa (m_s)	40000 kg
Massa não suspensa (m_{nsi})	1667 kg
Velocidade do veículo	20 m/s
Distância entre eixos (d)	2 m
Amortecimento dos pneus (c_{pni})	6,2832 kN.s/m ²
Rigidez dos pneus (k_{pni})	30184 kN/m

Para o modelo ilustrado na Figura 4 e seguindo as simplificações estabelecidas, tem-se que as forças exercidas no pavimento para cada eixo do veículo (f_v) podem ser avaliadas utilizando-se a Equação 3.

$$f_v = -\left(\frac{m_s}{3} + m_{nsi}\right) \cdot g + c_{pni} \cdot (-\dot{u}_p) + k_{pni} \cdot (-u_p) \quad (3)$$

Sendo g a aceleração gravitacional; \dot{u}_p e u_p são, respectivamente, a derivada primeira e a irregularidade do pavimento no nó do elemento finito em questão. Destaca-se que as forças nodais exercidas pelos eixos no tabuleiro da ponte devem ser interpoladas ao longo do movimento do veículo sobre os elementos finitos do modelo discretizado da ponte (ALMEIDA, 2006).

3.4 Solução do sistema de equações de movimento

Para a solução da análise dinâmica pretendida para o trabalho tem-se que, para a metodologia do MEF, resolver um sistema de equações matriciais, tal como o indicado na Equação 4.

$$\mathbf{M}\{\ddot{U}\} + \mathbf{C}\{\dot{U}\} + \mathbf{K}\{U\} = \{F\} \quad (4)$$

Onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do modelo; $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$ e $\{U\}$ são, respectivamente, os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento nodais da ponte; por fim, tem-se que $\{F\}$ é o vetor de forças nodais ocasionadas pelo movimento do veículo sobre a ponte.

De modo a realizar a solução do sistema matricial construído na análise da modelo da ponte empregou-se o Método de Newmark (1959), através da criação de um *script* em linguagem FORTRAN, cujos valores para os parâmetros γ e β foram de 0,5 e 0,25, respectivamente (PAGNONCELLI, 2017).

4. RESULTADOS

Neste trabalho analisou-se o comportamento da ponte em vibração forçada (tráfego de um veículo tipo). Ao final, também é apresentada uma comparação entre os deslocamentos máximos observados nos quatro vãos livres da ponte em vibração forçada em relação a abordagem estática amplificada, proposta pela NBR 7188:2013.

4.1 Validação do modelo numérico da ponte considerado

A validação do modelo numérico considerado para representar a estrutura da ponte foi realizado através da obtenção dos modos de vibração e frequências naturais analiticamente, que foram determinados pelo método dos autovalores e autovetores, considerando as matrizes de massa e rigidez utilizadas nas análises estruturais dinâmicas neste estudo. Os cálculos foram feitos através de um *script* em linguagem MATLAB, e os resultados obtidos foram comparados com os apresentados pelo modelo descrito no *software* SAP200. A Figura 5 mostra os resultados das frequências naturais da estrutura em relação aos seis primeiros modos de vibração.

Modo de vibração	f_n (Hz) - MATLAB	f_n (Hz) - SAP2000	Modo de vibração	f_n (Hz) - MATLAB	f_n (Hz) - SAP2000
1	4,44	4,42	4	9,54	9,33
2	4,97	4,93	5	17,63	17,24
3	7,10	6,99	6	18,51	18,01

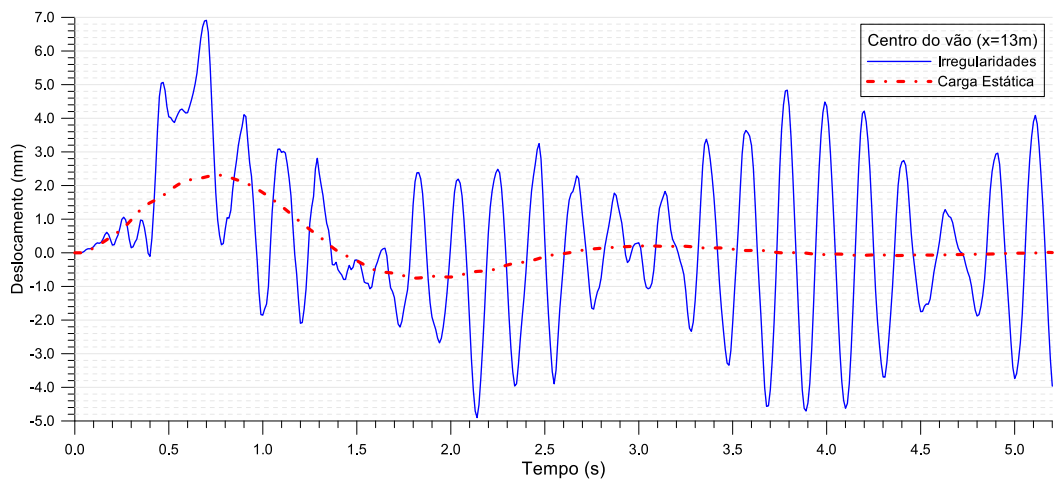
Figura 5 – Frequências naturais obtidas no método analítico através de *script* em MATLAB em comparação aos resultados no SAP2000.

4.2 Vibração forçada

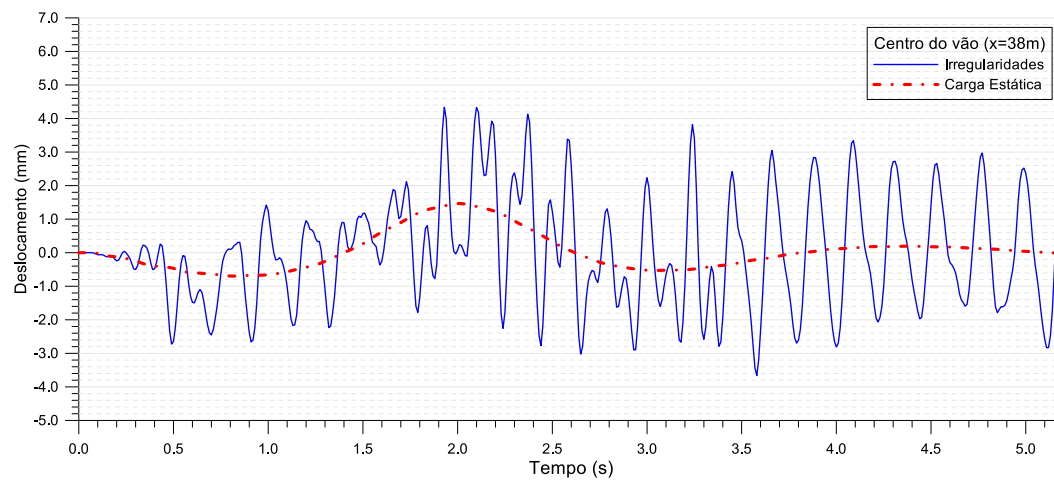
Resolvendo-se o sistema de equações do problema em Elementos Finitos, considerando o tráfego do caminhão sobre o tabuleiro da ponte, pode-se avaliar a resposta da estrutura para os centros dos 4 vãos livres. Os históricos de deslocamentos para os referidos pontos seguem ilustrados na Figura 6.

Analisando-se os resultados ilustrados na Figura 6, verifica-se que os maiores deslocamentos (δ_{din}) observados encontram-se quando o veículo está localizado nos vãos extremos da estrutura. Tal resposta se mostra coerente com o comportamento esperado, uma vez que nestes pontos a rigidez da ponte é menor do que aquela que se encontra mais ao centro. Sendo assim, através da análise, constatou-se que os maiores deslocamentos (extremos) resultaram em 6,92 mm no primeiro vão, e 9,03 mm no último. Já nos vãos centrais, os deslocamentos observados ficaram próximos aos valores de 4,20 mm para o 2º vão, e de 6,18 mm para o 3º vão. Os resultados obtidos via análise da Figura 6 seguem resumidos na Tabela 4, onde são apresentados os deslocamentos dinâmicos e estáticos para os pontos analisados na ponte rodoviária em estudo.

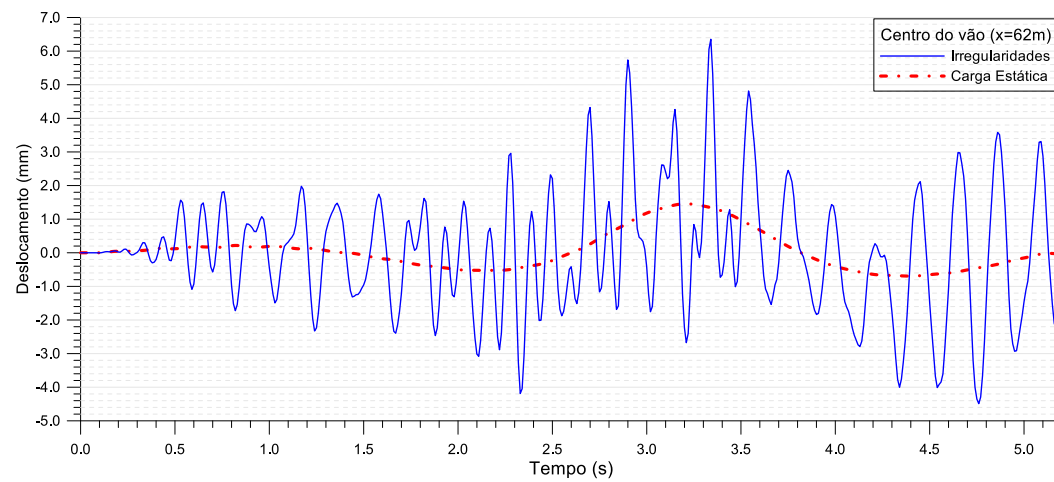
1° Vão



2° Vão



3° Vão



4° Vão

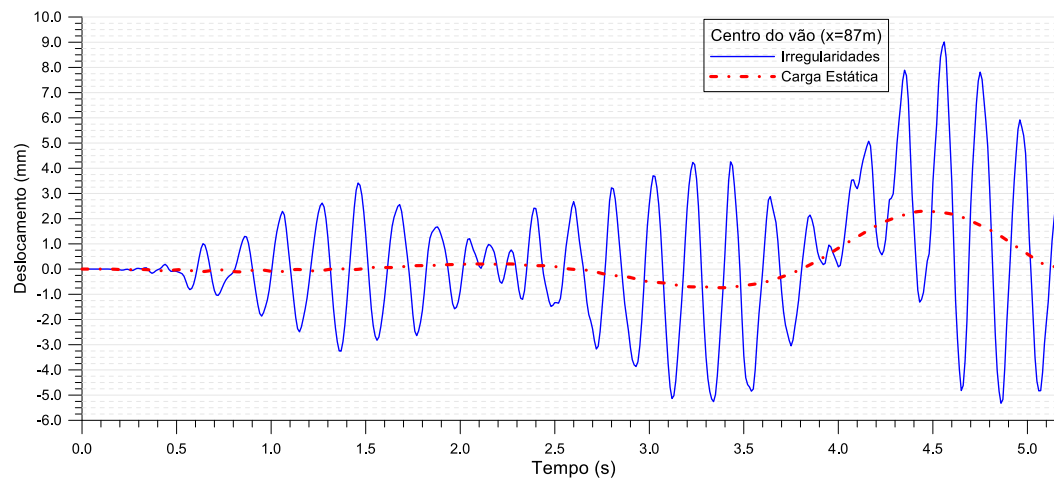


Figura 6 – Histórico de deslocamentos no centro dos vãos da ponte.

Tabela 4 – Deslocamentos máximos dinâmicos (δ_{din}) e estáticos (δ_{est}) nos centros dos vãos livres.

Vão	δ_{din} (mm)	δ_{est} (mm)
1	6,92	2,31
2	4,20	1,47
3	6,18	1,48
4	9,03	2,27

Um ponto de destaque visto, durante a análise dos resultados, é de que os deslocamentos máximos observados não necessariamente coincidem com o veículo passando no nó de centro do vão, tal como fora observado para o primeiro vão, que é justificado pelo perfil de irregularidades adotado, que pode resultar em pontos com maiores acelerações verticais em regiões diferentes ao centro de vão, resultando em deslocamentos verticais maiores nessas regiões. Além disso, verifica-se que após a passagem do veículo a ponte passa a oscilar em vibração livre.

4.3 Comparação entre avaliação dinâmica e NBR 7188:2013

Segundo a metodologia exposta pela NBR 7188:2013, o coeficiente de impacto vertical (CIV), ou de majoração dos efeitos estáticos, para a ponte em estudo deve possuir o valor de 1,35, conforme pode ser visto no Anexo B da NBR 7188:2013, para um vão livre médio de 25m de extensão. Sendo assim, pode-se majorar o deslocamento estático obtido utilizando-se a Equação 5.

$$\delta_{est,m} = CIV \cdot \delta_{est} \quad (5)$$

Utilizando-se a Equação 5, os resultados obtidos para o deslocamento estático majorado ($\delta_{est,m}$) para cada centro de vão da ponte estudada, assim como os deslocamentos dinâmicos seguem resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação entre os deslocamentos na ponte.

Vão	$\delta_{est,m}$ (mm)	δ_{din} (mm)	$\delta_{est,m} / \delta_{din}$ (%)
1	3,12	6,92	45,09
2	1,98	4,20	47,14
3	2,00	6,18	32,36
4	3,06	9,03	33,89

Analisando-se os resultados contidos na Tabela 5, vê-se que os deslocamentos estáticos majorados utilizando os preceitos da NBR 7188:2013 são inferiores daqueles fornecidos via análise dinâmica. Observando-se a relação $\delta_{est,m} / \delta_{din}$, tem-se que o procedimento sugerido pela NBR 7188:2013 apresenta deslocamentos, para certos pontos, da ordem de 32,36% a 47,14% dos valores obtidos via análise dinâmica. Com isso, pode-se afirmar que a abordagem simplificada apresentada na NBR 7188:2013, não prevê de forma adequada os efeitos dinâmicos gerados pela influência das irregularidades para o caso de um pavimento de categoria C, tendo em vista o método de modelagem numérica empregado e a ponte analisada.

5. CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados pode-se concluir que há considerável diferença entre os deslocamentos obtidos via análise dinâmica em comparação aos estáticos majorados, segundo modelo adotado pela NBR 7188:2013. Sendo assim, pode-se dizer que essa diferença pode levar, em casos extremos, a uma significativa redução da vida útil da estrutura, afetando sua resistência à fadiga e exigindo maior nível e quantidade de reparos e manutenções, ou levando até mesmo a necessidade de reforços.

Os projetos de pontes devem analisar o efeito das irregularidades no pavimento, visto a significativa diferença entre os valores obtidos neste trabalho e a resposta dinâmica resultante segundo metodologia proposta pela NBR 7188:2013.

Sendo fato que a qualidade dos pavimentos existentes, na realidade das rodovias brasileiras, é inferior quando comparada ao pavimento inicial, sugere-se que haja a incorporação de fatores que relacionem o estado do pavimento asfáltico da rodovia ao coeficiente de impacto vertical apresentados pela NBR 7188:2013. Entretanto, a sugestão destes valores, e sua metodologia, não fazem parte do objetivo deste trabalho.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFRGS, assim como a professora Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel pelas ajudas prestadas durante as fases de concepção dos algoritmos programados e na avaliação dos resultados. Também estendemos a gratidão ao prof. Dr. Américo Campos Filho pelas contribuições relacionadas ao artigo e aos demais colegas envolvidos neste trabalho. Somos gratos ao apoio financeiro disponibilizado pelo CNPQ e CAPES.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. C. Análise de vibrações em pontes rodoviárias induzidas pelo tráfego de veículos sobre pavimentos irregulares. 2006. 162 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. [2] TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry, London: Thomas Telford, 2ed, 1997, 459 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- FELIPPA, C. A. Introduction to Finite Element Methods. Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures, University of Colorado. Boulder, Colorado, 2001.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8608: Mechanical vibration – Road surface profiles –Reporting of measured data. Switzerland, 1995.
- MCGUIRE, W; GALLAGHER, R. H.; ZIEMIAN, R. D. Matrix Structural Analysis. 2nd, USA, 2000.
- MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; TORII, A. J.; MIGUEL, L. F. F.; BECK, A. T. Robust design optimization of TMDs in vehicle-bridge coupled vibration problems. Engineering Structures, v. 126, p. 703-711, 2016.
- PAGNONCELLI, A. P. Proposição de um modelo para obter a resposta dinâmica de pontes rodoviárias considerando a interação veículo-ponte. 2017. 28 f. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial. – Brasília: CNT: SEST SENAT, 2018. 405 p.
- SHINOZUKA, M., JAN, C. M. Digital Simulation of Random Process and its Applications. Journal of Sound and Vibration, vol. 25, n° 1, pp 111-128, 1972.

DNIT NÃO TEM DINHEIRO SUFICIENTE PARA MANUTENÇÃO DE RODOVIAS: Órgão precisa de 6 bilhões de reais, mas só tem 3,9 bilhões. [s. L.], 11 fev. 2018. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/economia/dnit-nao-tem-dinheiro-suficiente-para-manutencao-de-rodovias/>>. Acesso em: 08 mar. 2019.