



AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA E VERIFICAÇÃO DE PROJETO À FADIGA DE PONTES RODOVIÁRIAS MISTAS (AÇO-CONCRETO)

Guilherme Santana Alencar

guilhermesalencar@gmail.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGE CIV/UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. Pontes rodoviárias mistas (aço-concreto) são submetidas a um grande número de carregamentos repetitivos de diferentes magnitudes. A variação da velocidade do tráfego e a interação dos veículos com a superfície irregular do pavimento são exemplos de fatores que podem causar efeitos dinâmicos sobre estruturas de pontes. Essas ações podem amplificar os efeitos das cargas, gerando nucleação de fraturas ou mesmo propagando-as sobre a ponte, devendo-se realizar uma avaliação da fadiga para verificar a segurança e a durabilidade da estrutura. A correta consideração desses fatores foi realizada através de análises dinâmicas com avaliação do comportamento à fadiga de pontes rodoviárias, levando-se em consideração o tráfego de veículos sobre a superfície irregular do pavimento. A modelagem numérica do projeto investigado foi realizada através do emprego do programa ANSYS e foram utilizadas técnicas de discretização por meio do método dos elementos finitos. Gráficos de resposta no domínio do tempo e da frequência são obtidos para a ponte investigada neste estudo, constituída por quatro vigas de aço longitudinais e por um tabuleiro de concreto armado. O tráfego dos veículos é considerado mediante a simulação de comboios com velocidade constante. As conclusões do presente estudo dizem respeito a uma avaliação da vida útil de serviço de pontes de aço e mistas (aço-concreto), quando submetidas às ações dinâmicas oriundas do tráfego de veículos sobre o pavimento irregular.

Palavras-chave: Pontes rodoviárias mistas, Irregularidades da pista, Análise de fadiga.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as pontes rodoviárias avançam para soluções cada vez mais arrojadas, as quais aliam a experiência e o conhecimento dos engenheiros estruturais à utilização de novos materiais e tecnologias construtivas, em consonância com o avanço das investigações científicas desenvolvidas neste campo de estudo. As obras de arte rodoviárias tornaram-se, nos últimos anos, progressivamente mais leves e esbeltas e, pelo fato de estarem submetidas a ações dinâmicas, como o tráfego de veículos, requerem um nível crescente de conhecimentos teóricos relacionados ao comportamento dinâmico do sistema estrutural.

A avaliação do desempenho de estruturas de engenharia civil ao longo da sua vida útil é fundamental, não apenas para a validação dos modelos e metodologias de dimensionamento, mas também para a prevenção de situações de risco acrescido devido a efeitos de deterioração dos materiais. Em especial as obras de arte rodoviárias, cuja utilização representa dimensão social relevante. Cabe ressaltar, também, que a observação dos tabuleiros das pontes rodoviárias no Brasil revela, com frequência, situações de desgaste prematuro dos pavimentos e dos elementos estruturais.

Neste cenário, constata-se que, em condições de tráfego normal, algumas pontes podem atingir um nível de vibração que compromete significativamente a vida útil da obra de arte. No entanto, a prática normalmente corrente de considerar o carregamento do tráfego de veículos como uma ação de natureza estática contribui para minorar os efeitos das ações dinâmicas sobre o sistema estrutural da ponte, e ignora completamente o seu caráter cíclico. Além disso, estruturas submetidas a ações cíclicas estão sujeitas ao fenômeno da fadiga.

O diagnóstico de estruturas de pontes pode, portanto, ser muito mais bem fundamentado, sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo, se apoiado sobre investigações acerca do comportamento dinâmico da obra de arte, com base no desenvolvimento de modelos numéricos computacionais.

A variação da velocidade do tráfego, o tipo do veículo, a carga por eixo e a superfície irregular do pavimento são exemplos de fatores que podem causar efeitos variáveis sobre estruturas de pontes. Dessa forma, uma consideração apropriada desses fatores motivou o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da resposta dinâmica de pontes e viadutos rodoviários em estruturas de aço e mistas (aço-concreto). Tal metodologia é respaldada pelo emprego de um modelo numérico tridimensional que permite avaliar os diferentes tipos de efeitos dinâmicos, assim como o impacto destes nos problemas relacionados à fadiga e consequentemente na vida útil da estrutura.

O sistema estrutural da ponte mista (aço-concreto) investigada é constituído por quatro vigas mistas longitudinais e por uma laje de concreto. O modelo numérico computacional, desenvolvido para a análise dinâmica da ponte mista considera técnicas usuais de discretização, com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio da utilização do programa ANSYS (ANSYS, 2010). O tráfego dos veículos é considerado mediante a simulação de comboios deslocando-se com velocidade constante. Para avaliação da fadiga estrutural são utilizados os procedimentos para apresentados em normas de projeto (AASTHO, 2012; Eurocode 3, 2003). As conclusões do presente estudo dizem respeito à avaliação da vida útil de serviço de pontes de aço e mistas (aço-concreto), quando submetidas a ações dinâmicas oriundas do tráfego de veículos sobre o pavimento irregular.

2 VERIFICAÇÃO DE PROJETO À FADIGA

O fenômeno da fadiga é especialmente importante para as estruturas de pontes, dado que o tráfego rodoviário provoca nos elementos amplitudes de tensão elevadas, que, se superiores a uma dada amplitude de referência do elemento, podem causar o aparecimento de fissuras. Este dano é cumulativo, isto é, a cada passagem de um veículo este dano aumenta, pelo que, se a estrutura da ponte não estiver devidamente dimensionada à fadiga, pode resultar na interrupção da mesma ou mesmo na falha de alguns dos seus elementos.

Assim, para uma fase preliminar, o principal critério de falha por fadiga utilizado baseia-se na regra de Palmgren-Miner, definido na Equação 1, que considera que a fissura inicia-se quando o dano total acumulado é superior à unidade.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (1)$$

Onde:

D : dano total acumulado;

n_i : número de ciclos associados a uma determinada faixa de tensões $\Delta\sigma_i$;

N_i : número de ciclos a uma amplitude constante $\Delta\sigma_i$ necessários para iniciar a falha.

No que tange ao projeto de pontes rodoviárias, a metodologia clássica para avaliação do dano de fadiga devido a efeitos causados por ações de amplitude variável, como o tráfego de veículos, baseia-se nas curvas S-N, na regra de danos linear de Palmgren-Miner e no algoritmo de contagem de ciclos *rainflow*, como sintetiza o fluxograma da Figura 1.

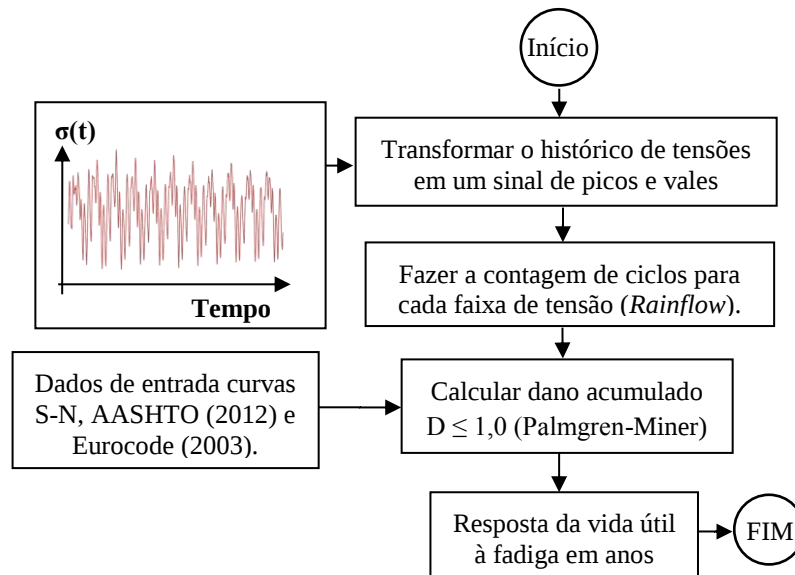


Figura 1. Metodologia para cálculo da vida útil de serviço à fadiga (ALENCAR, 2015)

Com o objetivo de automatizar este procedimento, desenvolveu-se um programa computacional que implementa o fluxograma apresentado. Nessa ferramenta, o usuário deve descrever os dados gerais do problema, que são o detalhe construtivo analisado, a figura

representativa deste detalhe e o número de ciclos com relação a 1 (um) ano, com base no qual é calculado a vida útil de projeto à fadiga. A Figura 2 ilustra a janela principal do programa.

Em seguida, o detalhe deve ser classificado segundo as categorias de resistência à fadiga dos regulamentos AASHTO (2012) e Eurocode 3 (2003). Alternativamente, pode-se optar por utilizar curvas S-N equivalentes de ambos os regulamentos. Além disso, no que diz respeito à norma Eurocode (2003), o programa permite a introdução do fator k_s , associado à redução da resistência à fadiga em razão da forma geométrica, e também a escolha do tipo de tensões analisado (normais ou cisalhantes).

Após a definição do problema, o programa realiza a contagem de ciclos *rainflow* a partir de um histórico de tensões obtido numericamente. Deve-se então, decidir pelo número de casas decimais que será utilizado no cálculo, que altera sensivelmente como as faixas de tensão são agrupadas. A opção “Filtrar” exclui faixas de tensão com dano menor do que 1% do dano total, conforme recomendação do Eurocode 3 (2003), enquanto a opção “Introduzir tensões” faculta ao usuário a exclusão manual de faixas de tensões características de ruído numérico, normalmente menores que 2 MPa.

Amplitude	Ciclo	Amplitude	Ciclos
20.2535	1	29	11
22.0123	1	26	28.5
25.3948	0.5	25	16.5

25	16,5	12,31%	246269	46144000	0,0053369594	45412977	0,0054228697
22	56	41,79%	835821	67712246	0,0123437183	66639535	0,0125424179
21	22	16,42%	328358	77853364	0,0042176496	76619994	0,0042855421
$\Delta\sigma_{\max}$ = 29 MPa	Σ 134	100%	Σ 2000000	D	0.037821382	D	0.0384302012
				T = 1/D	27 anos	T = 1/D	27 anos

Figura 2. Programa de cálculo automático de vida útil de serviço à fadiga segundo os métodos S-N

3 PROJETO ESTRUTURAL DA PONTE MISTA (AÇO-CONCRETO)

O projeto estrutural investigado corresponde a uma ponte rodoviária mista (aço-concreto) de eixo reto, simplesmente apoiada e com vão de 40 m, devido aos autores de Pinho e Bellei (2007) e ilustrada na Figura 3. A ponte constitui-se de quatro vigas soldadas longitudinais em aço ASTM A588, com espaçamento entre eixos de 3,50 m, balanços laterais de 1,25 m e um tabuleiro de 13 m de largura e 0,225 m de espessura em Concreto Armado de classe C25. Além disso, a ponte possui sistemas de travejamento transversal em cantoneiras metálicas de abas iguais espaçados de 5,60 m, aproximadamente.

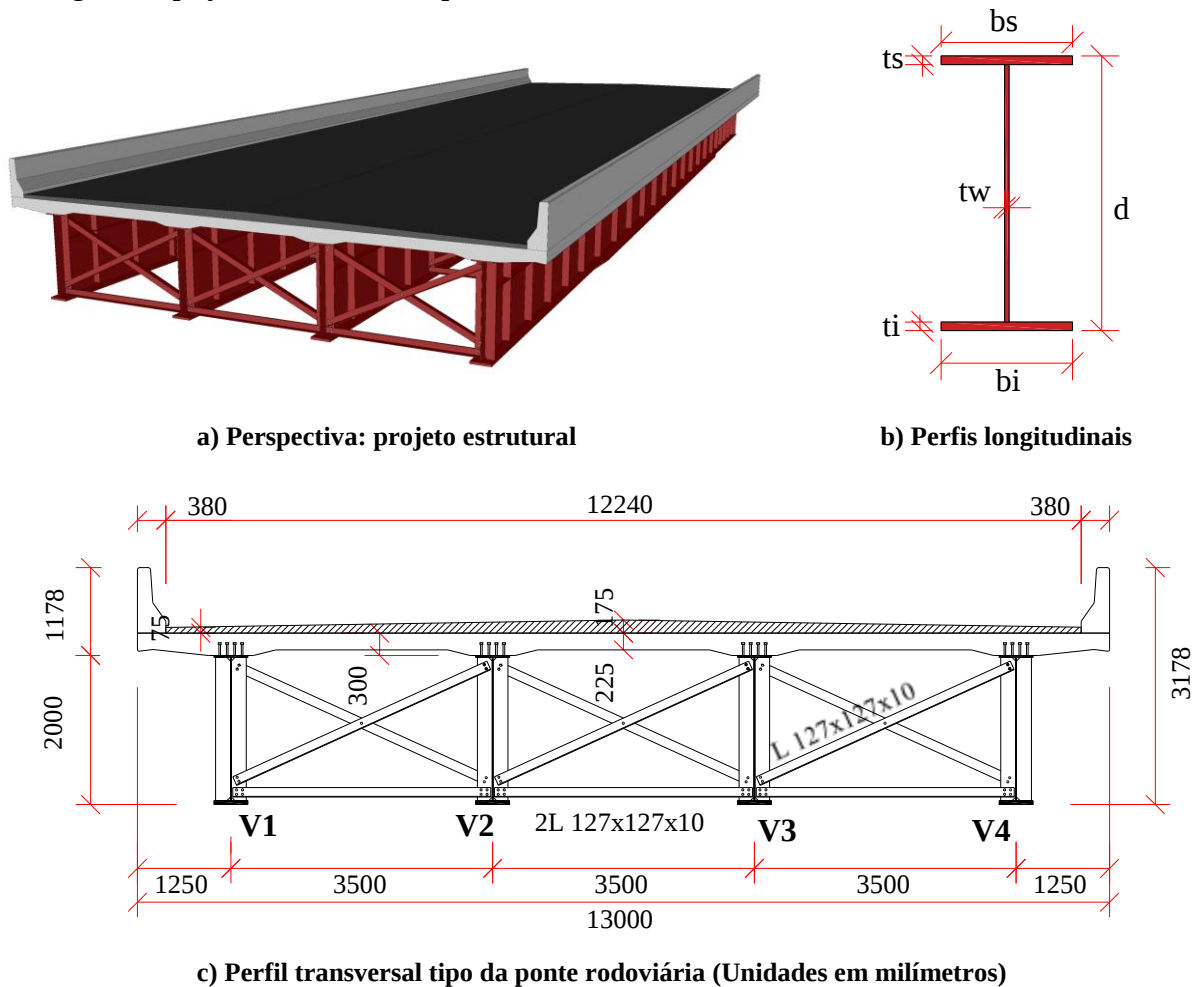


Figura 3. Projeto estrutural da ponte rodoviária mista (aço-concreto)

São adotadas dimensões distintas para as seções transversais das vigas longitudinais, definindo-se dois grupos de perfis soldados: extremos, em dois comprimentos externos de 8,10 m, e central, em um comprimento de 23,8 m. Ambos os grupos de perfis possuem altura de 2000 mm (d), e as espessuras da alma, da mesa superior e da mesa inferior de 9,5 mm (tw), 25 mm (ts) e 50 mm (ti), respectivamente. Para o grupo de perfis extremos tem-se largura da mesa superior (bs) e da mesa inferior (bi) de 450 mm, e para o grupo de perfis centrais tem-se largura da mesa superior (bs) de 500 mm e da mesa inferior (bi) de 670 mm.

Além dos elementos estruturais apresentados, a ponte mista (aço-concreto) estudada possui diversos enrijecedores transversais, longitudinais e de apoio soldados aos perfis. Os

enrijecedores transversais são compostos por uma chapa de 12,5 mm de espessura por 170 mm de largura, os longitudinais são compostos por uma chapa de 12,5 mm de espessura por 170 mm de largura e os enrijecedores de apoio são compostos por duas chapas de 22 mm de espessura por 200 mm de largura.

4 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

O modelo numérico computacional foi implementado com base no emprego do programa ANSYS (2010), com recurso a técnicas usuais de discretização em elementos finitos. A Figura 4 ilustra o modelo em elementos finitos da ponte rodoviária mista (aço-concreto). Os materiais aço e concreto foram definidos com um modelo constitutivo linear elástico.

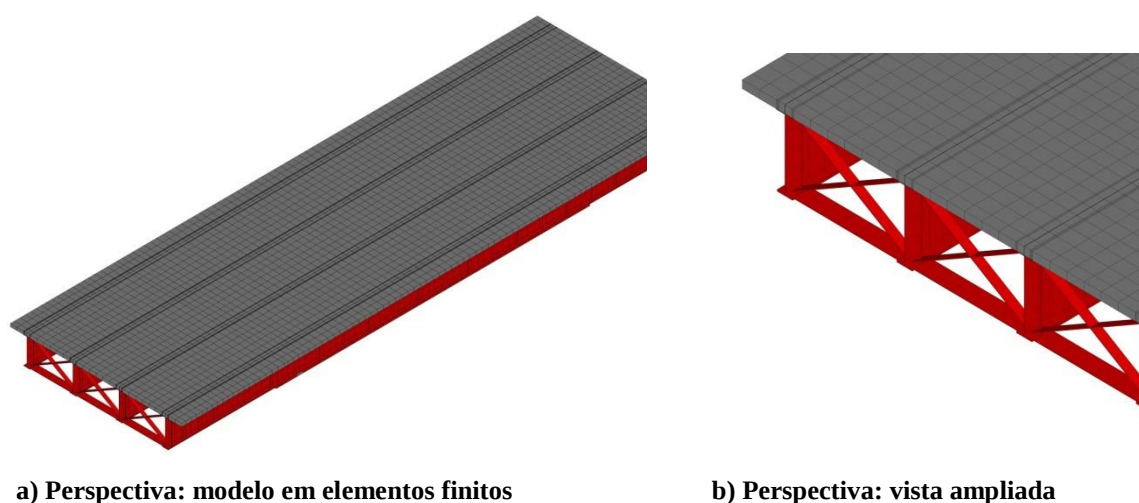


Figura 4. Modelo em elementos finitos da ponte rodoviária mista (aço-concreto)

As barras representativas das cantoneiras metálicas foram modeladas como elementos finitos de viga do tipo BEAM44 da biblioteca de elementos finitos do ANSYS (2010), com dois nós e seis graus de liberdade por nó. Para modelagem das almas e das mesas dos perfis metálicos foram utilizados elementos finitos de casca do tipo SHELL63, possuindo quatro nós e seis graus de liberdade por nó. A laje de concreto do tabuleiro foi modelada utilizando-se elementos finitos de sólidos do tipo SOLID45. Este elemento finito possui oito nós e três graus de liberdade por nó. Assim, o modelo estrutural resultou em aproximadamente 17.500 nós, 16.100 elementos e 105.200 graus de liberdade, sendo que foi adotada uma dimensão aproximada no valor de 0,50 m para a malha de elementos finitos.

O amortecimento estrutural foi considerado de acordo com a formulação proposta por Rayleigh (Clough e Penzien, 1995). De acordo com essa formulação matemática, a matriz de amortecimento é uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez do sistema estrutural investigado. No presente estudo, foi adotado um coeficiente de amortecimento modal de 3 %.

5 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Inicialmente, com base na simulação numérica realizada, são obtidas as frequências naturais e os modos de vibração da ponte rodoviária mista (aço-concreto) investigada. Para o presente modelo, os valores mais baixos de frequências naturais estão associados à flexão

longitudinal e torção axial, iguais a 2,97 Hz e 3,67 Hz, respectivamente. Os principais modos de vibração do sistema estrutural são ilustrados na Figura 5.

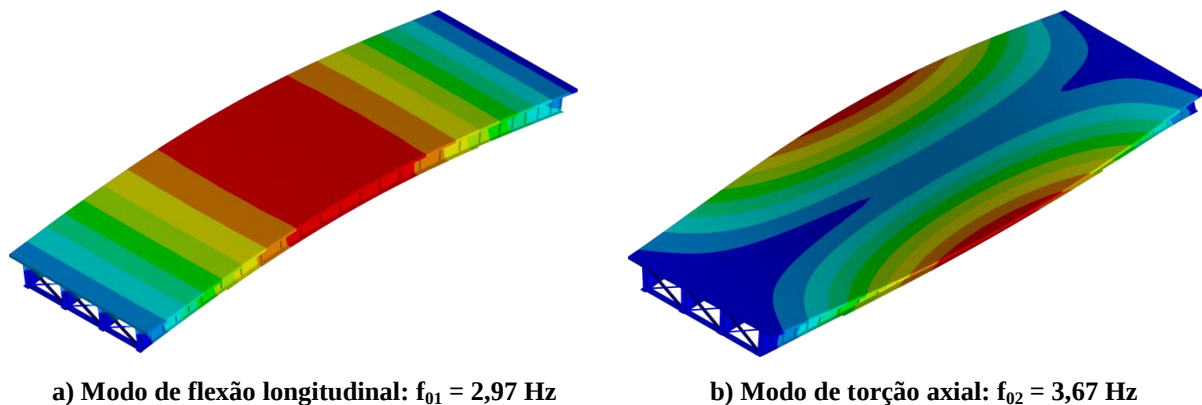


Figura 5. Modos de vibração e frequências naturais da ponte rodoviária mista (aço-concreto)

Observa-se que o valor da frequência fundamental da ponte ($f_{01} = 2,97$ Hz) é relativamente baixo, o que demonstra a alta flexibilidade da mesma. Tal flexibilidade enfatiza a necessidade de uma análise do comportamento dinâmico para esse tipo de estrutura. Neste caso, o primeiro modo é especialmente importante, pois apresenta uma frequência natural próxima de frequências de excitação características da passagem de comboios de veículos em pontes rodoviárias (Leitão, 2014).

6 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS VEÍCULOS

Veículos são normalmente modelados como sistemas dinâmicos constituídos por conjuntos de massa-mola-amortecedor. Nas análises realizadas neste trabalho, utilizou-se o veículo de carga 2C, bastante frequente nas rodovias brasileiras (Rossigali, 2013). A silhueta do veículo 2C, com suas dimensões médias são ilustradas na Figura 6.

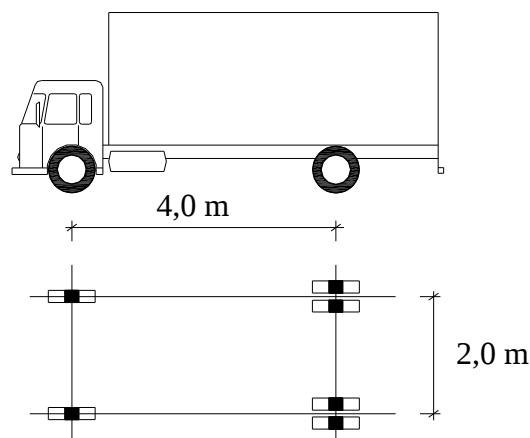


Figura 6. Silhueta do veículo de carga 2C com dimensões médias e distribuição do peso

Segundo a nomenclatura do Quadro de Fabricantes de Veículos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), denomina-se “2C” a um veículo

monolítico de dois eixos, sendo o eixo dianteiro do tipo Direcional Simples (SRS), e o eixo traseiro do tipo Simples de Rodas Duplas (SRD).

O modelo matemático representativo do veículo de carga 2C utilizado nas análises dinâmicas baseia-se no modelo de veículo discreto desenvolvido por Almeida (2006), e constitui-se de sistemas de molas e amortecedores que visam reproduzir a rigidez e o amortecimento dos pneus e do sistema de suspensão da viatura. Este modelo matemático possui 4 graus de liberdade, sendo 3 de translação e 1 de rotação, de acordo com a Figura 7.

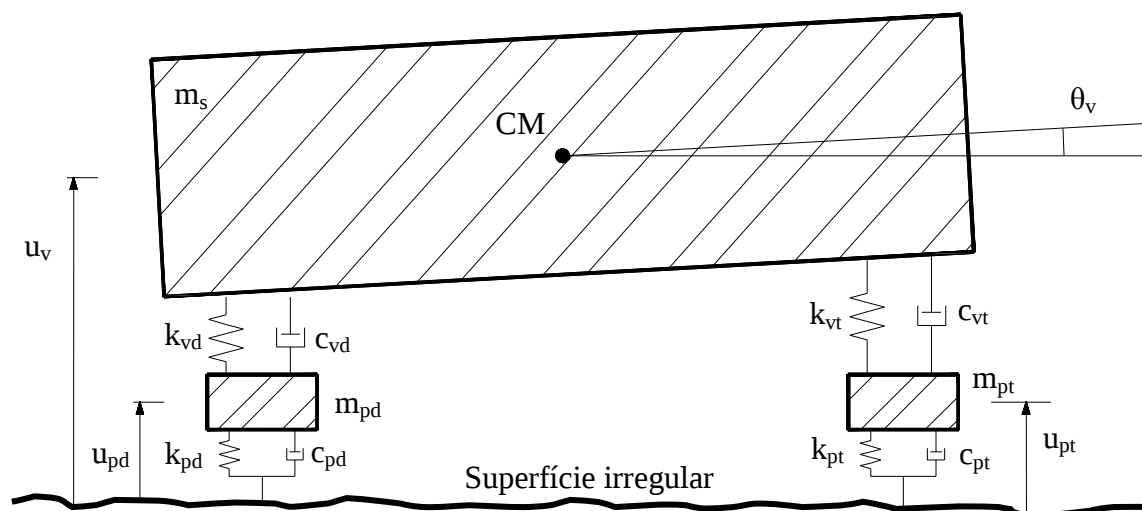


Figura 7. Modelo matemático adotado para os veículos de carga 2C

As propriedades dinâmicas estimadas para o veículo são apresentadas na Tabela 1 (Santos, 2007). Neste caso, faz-se distinção entre as propriedades do eixo dianteiro (SRS) e do eixo traseiro (SRD), ressaltando-se que, por se tratar de um modelo planar, as propriedades apresentadas simulam a resposta de rodas e suspensões atuando em conjunto em cada eixo. Além disso, a distribuição da massa pode ser considerada igualitária, com 50% da massa total do veículo para cada eixo.

Tabela 1. Propriedades dinâmicas do modelo matemático do veículo de carga 2C (Santos, 2007)

Descrição	Símbolo	Valor
Massa total	m	20,3 t
Massa suspensa	m_s	18599 kg
Fração de amortecimento	ξ_i	10,0 %
Rigidez da suspensão dianteira	k_{vd}	864 kN/m
Rigidez do pneu dianteiro	k_{pd}	1620 kN/m
Massa não suspensa dianteira	m_{pd}	635 kg
Rigidez da suspensão traseira	k_{vt}	2340 kN/m
Rigidez do pneu traseiro	k_{pt}	6720 kN/m
Massa não suspensa traseira	m_{pt}	1066 kg
Frequências naturais	f	[1,17 ; 2,08 ; 10,00 ; 14,73] Hz

7 IRREGULARIDADES DO PAVIMENTO

A irregularidade do pavimento é considerada um dos fatores com maior influência na resposta dinâmica do sistema ponte-veículo, e resulta da tolerância do próprio processo construtivo. As irregularidades estão associadas também à própria exploração, que contribui para o agravamento da qualidade da pista ao longo do tempo. Além disso, muitos outros fatores podem provocar desvios no perfil longitudinal, como por exemplo, recalques de fundações, defeitos de alinhamento de trechos do tabuleiro, contraflechas não compensadas e deformações provocadas por ações permanentes (Calçada, 2001).

Devido ao seu caráter essencialmente aleatório, este tipo de irregularidade tem sido concebida com base na teoria dos processos estocásticos, considerando que o perfil de irregularidade pode ser idealizado através da realização de um processo estocástico estacionário, cuja estrutura probabilística pode ser convenientemente descrita pela correspondente função densidade espectral de potência (Silva, 1996). Assim, de acordo com a ISO 8608 (1995), a superfície de um pavimento pode ser descrita em termos de uma função densidade espectral de potência das irregularidades (Equação 2):

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} \quad (2)$$

Onde:

- $G_d(\Omega_0)$: coeficiente de amplitude das irregularidades;
 Ω : frequência espacial cíclica da irregularidade do pavimento;
 Ω_0 : frequência espacial cíclica de referência da irregularidade do pavimento (1 rd/m);
 w : expoente da função densidade espectral de potência das irregularidades ($w = 2$).

Para a classificação de pavimentos, a norma ISO 8608 (1995) apresenta uma sequência de classes em ordem crescente do nível de irregularidades. Cada classe é caracterizada por um coeficiente de amplitude das irregularidades. A Tabela 2 a seguir apresenta os valores médios do coeficiente de amplitude das irregularidades, $G_d(\Omega_0)$, de acordo com a classe da rodovia.

Tabela 2. Valores de $G_d(\Omega_0)$ em cm^3 para diferentes níveis de qualidade do pavimento (ISO 8608, 1995)

Classe da Rodovia	Qualidade do pavimento	Valor médio de $G_d(\Omega_0)$ (cm^3)
A	Excelente	1
B	Bom	4
C	Médio	16
D	Ruim	64
E	Muito Ruim	256

No anexo B do Eurocode 1 (2003) foi incluída a proposta da norma ISO 8608 (1995) para a modelagem das irregularidades do pavimento. Neste anexo é referido também que uma

classificação expedita do nível de qualidade do pavimento pode ser efetuada com base nas seguintes recomendações: i) os pavimentos novos, formados por camadas asfálticas ou em concreto, podem ser considerados com nível de qualidade bom ou mesmo muito bom; ii) os pavimentos antigos que não tenham sofrido obras de conservação podem ser considerados com nível de qualidade médio; iii) os pavimentos constituídos por paralelepípedos de pedra podem ser considerados com um nível de qualidade médio, ruim ou mesmo muito ruim.

Nas análises numéricas realizadas nesta investigação foram considerados pavimentos com nível de qualidade bom, cujo perfil de irregularidade do pavimento, gerado com base na função densidade espectral de potência, está ilustrado na Figura 8.

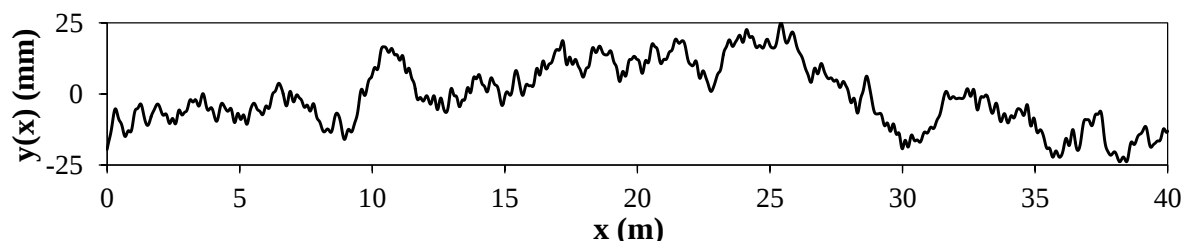


Figura 8. Perfil de irregularidade com nível de qualidade bom

8 ANÁLISE DINÂMICA DO MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

As vibrações causadas pelo tráfego rodoviário provocam deslocamentos e tensões na estrutura que são, de um modo geral, maiores do que aqueles causados por um carregamento totalmente estático. A amplificação destes efeitos ocorre principalmente devido:

1. À forma rápida como se processa o carregamento devido à velocidade dos veículos;
2. À passagem de sucessivos eixos regularmente espaçados que, em determinadas circunstâncias, podem originar fenômenos de ressonância ou de vibração excessiva do tabuleiro. Isto se dá nos casos em que a frequência de excitação coincide com as frequências naturais da ponte ou submúltiplos destas;
3. À variação das cargas aplicadas à ponte devido às irregularidades da pista.

A magnitude da resposta dinâmica depende também de diversos fatores, tais como a massa e o amortecimento da estrutura, as frequências naturais e o vão da ponte, o número, espaçamento, velocidade e cargas por eixo dos veículos e as irregularidades da pista.

As análises dinâmicas realizadas nesta investigação consideram um comboio de três veículos da classe 2C trafegando a velocidade constante, até um determinado número de travessias (t/t_1), definido arbitrariamente para velocidades características de tráfego lento e rápido, 40 km/h e 70 km/h, respectivamente. Para ambos os casos foi definido uma quantidade mínima de 15 passagens ($t/t_1 = 1$), com o objetivo de obter uma resposta por tempo suficiente na fase permanente.

Tendo em vista a influência da posição dos comboios na resposta estrutural em termos de contribuição modal, no que tange ao primeiro modo de flexão longitudinal, foi admitida a hipótese de três faixas de rodagem sobre a largura disponível do tabuleiro. Além disso, para simular uma condição de tráfego intenso, foram considerados comboios de três veículos trafegando simultaneamente nas duas faixas laterais.

Os veículos foram definidos como regularmente espaçados de acordo com as distâncias ilustradas na Figura 9a. Além disso, foi selecionado o nó do modelo em elementos finitos com deslocamentos translacionais verticais máximos, localizado no centro do vão no tabuleiro de concreto, conforme a Figura 9c.

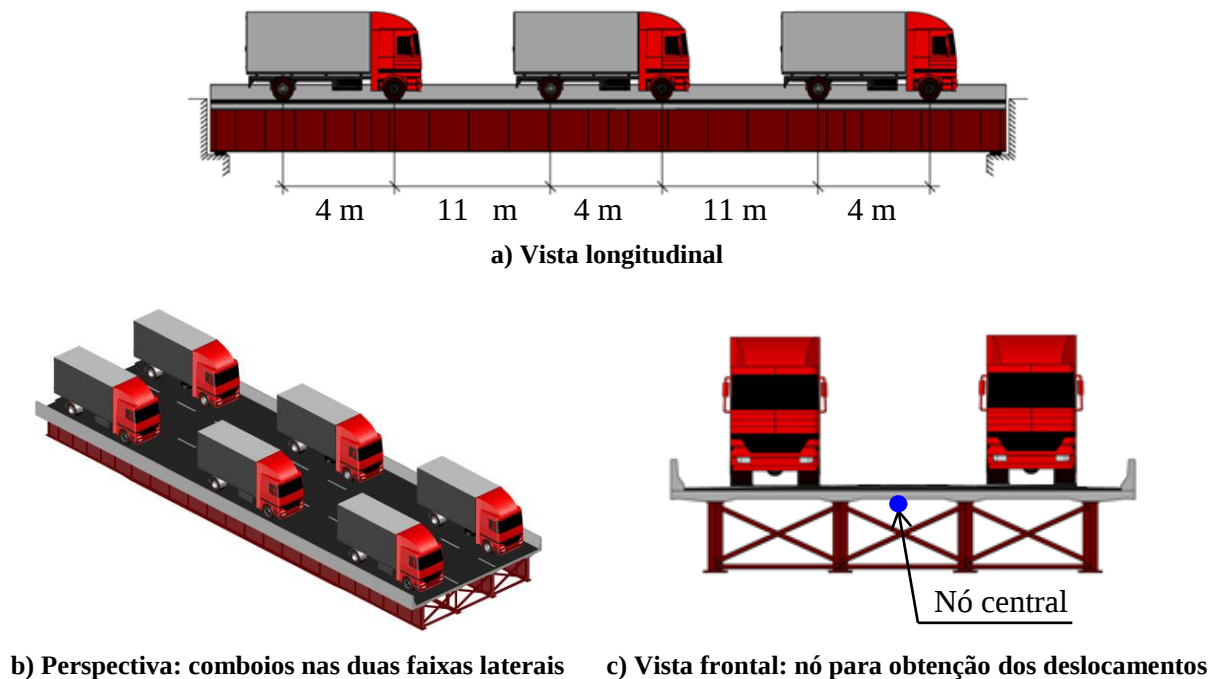


Figura 9. Configuração dos comboios nas faixas de tráfego

A seguir são apresentados, nas Figuras 10 e 11 os gráficos de resposta dos deslocamentos translacionais verticais no centro do vão, no domínio do tempo e da frequência, para velocidades de 40 km/h e 70 km/h, respectivamente. Cabe ressaltar que os resultados a seguir são apenas para irregularidades de pista com nível qualidade bom.

Nos gráficos das respostas foi observado que os casos analisados apresentaram um comportamento permanente após três travessias do comboio de veículos idealizado ($t/t_1 = 3$). A identificação da fase permanente é fundamental, principalmente para uma análise de fadiga.

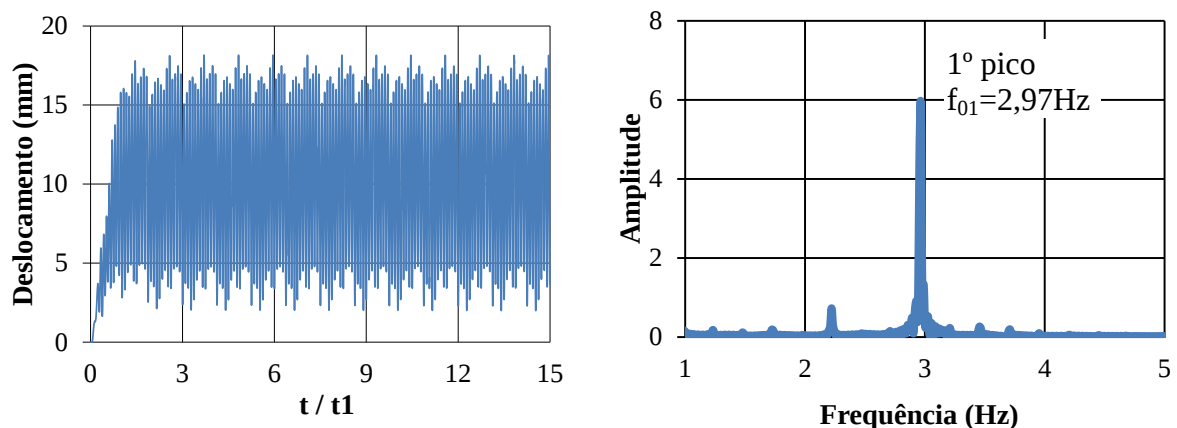


Figura 10. Deslocamentos no centro do vão para veículos com velocidade de 40 km/h

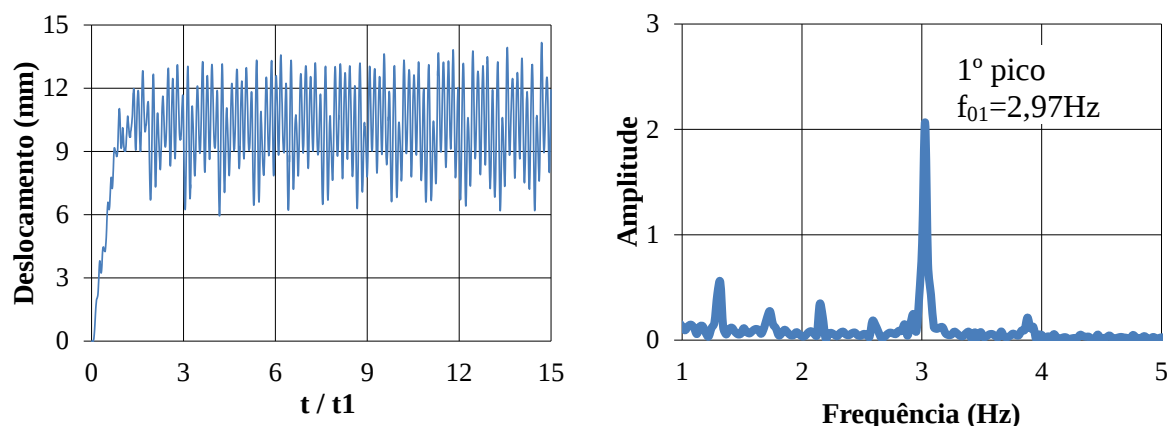


Figura 11. Deslocamentos no centro do vão para veículos com velocidade de 70 km/h

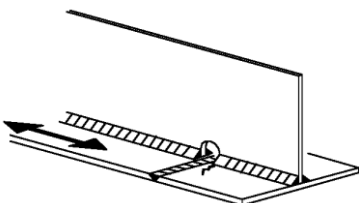
A partir dos resultados obtidos, observa-se no domínio da frequência a presença de um pico em 3 Hz para comboios em ambas as velocidades. O maior pico, associado à velocidade de 40 km/h, provoca um deslocamento máximo de 19 mm, e está associado a uma frequência de travessia no valor de 1,01 Hz ($f=40/3,6/11$), devido à passagem de eixos consecutivos à distância de 11 metros, submúltiplo da frequência fundamental da estrutura ($f_{01} = 2,97$ Hz), o que causa ressonância.

Quanto aos comboios de velocidade de 70 km/h, estes estão associados a frequências de travessia associadas a uma distância entre eixos de 15 m, devido à velocidade, também maior. Deste modo, tem-se que a principal frequência de travessia de um comboio a 70 km/h é de 1,30 Hz, capaz de excitar, no segundo harmônico (2,60 Hz), a frequência fundamental da estrutura (2,97 Hz). No entanto, devido a estes valores apresentarem uma pequena diferença, a resposta associada a 70 km/h possui uma magnitude menor em relação a 40 km/h.

9 VIDA ÚTIL DE SERVIÇO À FADIGA

Para se determinar a vida útil de serviço à fadiga e o dano acumulado é necessário a obtenção das faixas de variação de tensão que ocorrem na estrutura durante a passagem dos veículos. Em seguida, são utilizadas as expressões matemáticas definidas com base nas curvas S-N de cada norma de projeto (AASHTO, 2012; Eurocode 3, 2003) para se obter o dano acumulado e a respectiva vida útil de serviço dos elementos estruturais. É importante enfatizar que cada norma de projeto apresenta uma forma diferente de classificar os detalhes estruturais. O tipo de detalhe estrutural analisado neste projeto é apresentados na Tabela 1.

Tabela 3. Classificação do detalhe estrutural analisado

Detalhe Estrutural Tipo	Descrição	Classe de resistência à fadiga	
		Eurocode 3	AASHTO
	Solda de topo entre a alma e a mesa inferior com furo curvo na emenda	71	D

Os valores de tensão obtidos na análise dinâmica são utilizados para análise de fadiga da ponte e, conseqüentemente, para se determinar a vida útil de serviço da estrutura. A Figura 11 a seguir ilustra um histórico de tensões obtido numericamente para a viga V1 no centro do vão, na ligação entre a alma e a mesa da viga de aço, para comboios de veículos com velocidade de 40 km/h.

Neste gráfico observam-se somente as tensões atuantes de tração no detalhe estrutural devido às cargas móveis, excluindo-se a parcela devido às ações permanentes. Assim, no instante zero não há tensões atuantes, e, conforme os veículos deslocam-se sobre a ponte, as tensões oscilam na fase transiente da resposta, até se atingir a fase permanente. O valor máximo de tensão alcançado na fase permanente é de 33 MPa, enquanto o valor mínimo é de aproximadamente 4 MPa.

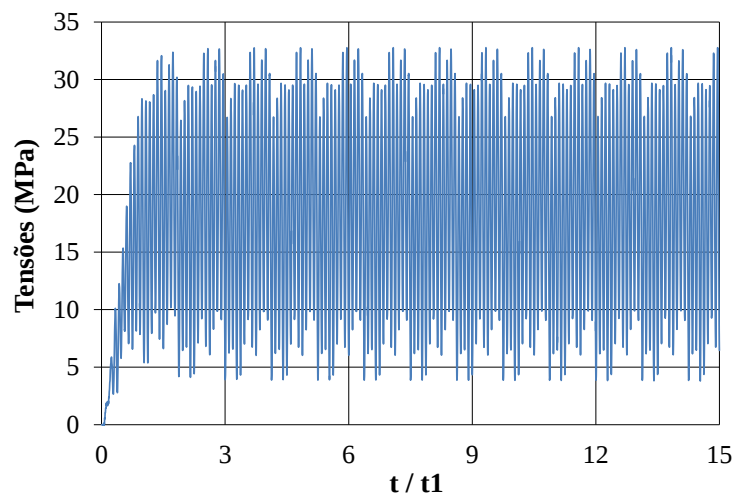


Figura 11. Histórico de tensões no detalhe estrutural analisado na viga V1 para comboios de veículos com velocidade de 40 km/h

Para determinação dos valores de faixa de tensão através da contagem de ciclos foi considerada apenas a resposta da ponte na fase permanente. A Tabela 4 a seguir ilustra o cálculo da vida útil à fadiga para o detalhe estrutural tipo, localizado no centro do vão nas vigas V2 e V3, para comboios de veículos com velocidade de 40 km/h, que resultou em uma vida útil de 27 anos.

Tabela 4. Cálculo de vida útil de serviço à fadiga para o detalhe estrutural tipo nas vigas V2 e V3

$\Delta\sigma$ (MPa)	Ciclos	(%)	n_i	AASHTO LRFD		Eurocode 3	
				N_i	n_i/N_i	N_i	n_i/N_i
29	11	8,21%	164200	29562508	0,0056	29094172	0,0056
26	28,5	21,27%	425400	41021848	0,0104	40371971	0,0105
25	16,5	12,31%	246200	46144000	0,0053	45412977	0,0054
22	56	41,79%	835800	67712246	0,0123	66639535	0,0125
21	22	16,42%	328400	77853364	0,0042	76619994	0,0043
$\Delta\sigma_{\text{máx}} = 29$ MPa	Σ 134	100%	2000000	D	0,0378	D	0,0383
				$T = 1/D$	27 anos	$T = 1/D$	27 anos

Deve-se ressaltar que cada ciclo de tensão foi associado proporcionalmente a 2×10^6 ciclos para avaliação da fadiga do pormenor, valor normalmente considerado para rodovias expressas, rodovias secundárias, estradas e ruas, e uma média tráfego superior a 2500 veículos de carga por dia, segundo a norma de projetos de pontes rodoviárias CALTRANS (2004). A Tabela 5 abaixo resume todas as vidas úteis calculadas segundo este procedimento, para diferentes velocidades e em diferentes localizações na estrutura.

Tabela 5. Vida útil de serviço à fadiga do detalhe estrutural tipo

Velocidade (km/h)	Vigas	$\sigma_{\text{máx}}$ Tração (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Vida-útil de serviço (anos)	
				AASHTO Categoria D Limite: 75 anos	EUROCODE Categoria 71 Limite: 100 anos
40	1 e 4	33,00	29,00	31	29
	2 e 3	32,50	29,00	28	27
70	1 e 4	26,00	16,00	366	343
	2 e 3	26,00	16,00	407	381

Observa-se que o valor da vida útil para velocidades em ressonância é bastante crítico, especialmente 40 km/h, mesmo com um pavimento com nível de qualidade bom. Isto se dá devido aos efeitos adversos causados pela ressonância do sistema estrutural, com amplificação máxima da resposta. No entanto, para comboios de veículos com uma velocidade de 70 km/h, a vida útil encontrada está a favor da segurança e dentro dos limites esperados para vida útil de projeto de pontes rodoviárias, segundo os regulamentos AASHTO (2012) e Eurocode 3 (2003), que apresentam limites de 75 e 100 anos, respectivamente.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo desse projeto de pesquisa foi desenvolver um estudo para a modelagem do comportamento dinâmico e verificação à fadiga em pontes rodoviárias mistas (aço-concreto). A metodologia de análise proposta foi empregada mediante o desenvolvimento de um modelo numérico computacional, via método dos elementos finitos, para avaliação da resposta dinâmica da estrutura e da vida útil à fadiga. Para tal, considera-se a passagem de comboios constituídos por um veículo de carga frequentes nas rodovias brasileiras, introduzindo o efeito dinâmico da interação entre os veículos e a estrutura, inclusive com a modelagem não determinística das irregularidades do pavimento.

As conclusões alcançadas comprovam a influência da configuração do tráfego sobre os valores das faixas de tensão, como por exemplo, a posição transversal dos veículos sobre o tabuleiro, o espaçamento, que está diretamente relacionado às frequências de excitação e à velocidade. Este fato demonstra a importância da realização de estudos de tráfego da via em que o projeto da ponte será executado, de modo a se conhecer a velocidade e a configuração de tráfego mais frequente ao longo da vida útil da estrutura, e, conseqüentemente, as frequências de travessia correspondentes. Em seguida, o estudo do comportamento dinâmico da ponte pode auxiliar, também, no que diz respeito à escolha de uma concepção estrutural que evite frequências naturais próximas ou iguais às frequências de travessia dos veículos, de

modo a mitigar, no curto prazo, os efeitos adversos da ressonância de comboios de veículos para a vida útil da estrutura.

Considerando-se uma velocidade de 70 km/h para pavimentos com nível de qualidade bom a vida útil da ponte em estudo foi da ordem de 343 anos. Para o caso de comboios de veículos com velocidades de 40 km/h, para a configuração de espaçamento adotada, foi obtida uma vida útil da ordem de 27 anos. Esta diferença mostra a influência de parâmetros como velocidade associados ao espaçamento entre os veículos.

Além disso, este projeto de pesquisa permite recomendar, como alternativa para melhorar o desempenho e a vida útil das obras de arte rodoviárias em estruturas de aço e mistas (aço-concreto), rigoroso planejamento dos detalhes construtivos, de modo a se definir uma concepção estrutural que evite pormenores com baixa resistência à fadiga, como o detalhe estrutural tipo analisado. Para o presente projeto, este detalhe estrutural foi proposto originalmente na emenda entre as vigas no centro do vão. Como alternativa, poder-se-ia trocar a posição das emendas soldadas ao longo do comprimento da viga para uma região com baixa concentração de tensões, ou decidir-se por uma emenda parafusada.

Finalmente, destaca-se que a tarefa de prever uma configuração de tráfego mais frequente é algo bastante complexo, em razão do crescimento urbano, da evolução tecnológica e do crescente aumento do peso e da velocidade dos veículos. Portanto, com base nos resultados alcançados, no entendimento do autor, a medida mais racional e efetiva seria a conservação do pavimento da obra de arte, pois inúmeros trabalhos atestam que a garantia de execução de um pavimento com qualidade rigorosa reflete num ganho significativo de vida útil à fadiga para as pontes rodoviárias. Além disso, a manutenção desta é de grande relevância para minorar os riscos de falha por fadiga.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem o suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do País: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

AASHTO, 2012. *LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC.

Almeida, R. S. de, 2006. *Análise de Vibrações de Pontes Rodoviárias Induzidas pelo Tráfego de Veículos sobre o Pavimento Irregular*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

Alencar, G.S., 2015. *Análise dinâmica e verificação à fadiga de obras de arte rodoviárias mistas (aço-concreto) submetidas ao tráfego de veículos sobre o pavimento irregular*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 12.1, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research, 2010.

Calçada, R., 2001. *Avaliação experimental e numérica de efeitos dinâmicos de cargas de tráfego em pontes rodoviárias*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

CALTRANS, 2004. *Bridge Design Specification*, Sixteenth Edition, California Department of Transportation, Sacramento, CA.

Clough, R. W. e Penzien, J. *Dynamics of Structures*, Third Edition, Computer & Structures, Inc, Berkley, CA, 1995.

Eurocode 1, 2003. *Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

ISO 8608, 1995. International Organization for Standardization. *Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data*, Geneva, Switzerland.

Eurocode 3, 2003. *Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue*. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

Leitão, F. N, 2014. Modelagem do comportamento dinâmico e verificação à fadiga de pontes rodoviárias em aço e mistas (aço-concreto). PUC-Rio. Tese de doutorado.

Pinho, F.O. e Bellei, I.H., 2007. *Pontes e viadutos em vigas mistas. Série manual construção em aço*. Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA, pp. 1-138, Rio de Janeiro.

Rossigali, C. E., 2013. Atualização do Modelo de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Santos, E. F. DOS, 2007. *Análise e Redução de Vibrações em Pontes Rodoviárias*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Silva, J.G.S. da, 1996. Análise dinâmica não-determinística de tabuleiros de pontes rodoviárias com irregularidades superficiais. Tese de Doutorado. PUC-Rio.