



ESTUDO DA RESPOSTA DINÂMICA E VERIFICAÇÃO DE PROJETO À FADIGA DE PONTES RODOVIÁRIAS MISTAS (AÇO-CONCRETO) COM INTERAÇÃO PARCIAL

Bruno Dias Rimola

brunorimola@uol.com.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ

Rua São Francisco Xavier, 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, 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Guilherme Santana Alencar

guilherme.alencar@fe.up.pt

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)

Rua Dr. Roberto Farias, s/n, 4200-465, Porto, Portugal

Resumo. *O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia de análise para o estudo da resposta dinâmica e determinação da vida útil à fadiga de pontes rodoviárias mistas, considerando-se o efeito da interação parcial aço-concreto. Para tal, considera-se um tratamento estatístico dos resultados provenientes de análises dinâmicas no domínio do tempo, desenvolvidas sobre o projeto de uma ponte rodoviária mista (aço-concreto), quando submetida ao tráfego de veículos sobre pavimentos irregulares. O sistema estrutural investigado tem como base uma ponte mista, simplesmente apoiada, com vão de 40,0m. Um estudo paramétrico é desenvolvido para identificar, o efeito das irregularidades do pavimento sobre o comportamento dinâmico da ponte mista investigada e, em seguida, a verificação do projeto à fadiga do sistema é realizada. Os resultados obtidos são avaliados no que se refere à vida útil à fadiga de detalhes estruturais da obra de arte.*

Palavras-chave: *Pontes rodoviárias, Dinâmica estrutural, Verificação de projeto à fadiga.*

1 INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento estrutural dinâmico de pontes e viadutos rodoviários submetidos a cargas dinâmicas é, atualmente, um tema bastante explorado por diversos pesquisadores em universidades e institutos de pesquisa em todo o mundo (Rimola, 2016). O desenvolvimento de modelos matemáticos mais refinados, que levem em consideração o efeito da interação dinâmica existente entre a ponte, os veículos que sobre ela trafegam e o pavimento da obra de arte, se faz necessário, de maneira que os valores dos esforços e deslocamentos inerentes à resposta estrutural dinâmica da ponte sejam mais realistas.

A avaliação do desempenho de obras de arte ao longo da sua vida útil é relevante 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. 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.

Assim sendo, objetivando contribuir para o estudo do problema em questão, investiga-se o comportamento estrutural de uma ponte mista (aço-concreto) constituída por quatro vigas de aço longitudinais e por uma laje de concreto. O modelo numérico desenvolvido para a análise dinâmica considera o efeito da interação parcial aço-concreto, sendo concebido mediante emprego de 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 apresentados na norma de projeto 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 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS VEÍCULOS

2.1 Veículos de carga reais

Adota-se a nomenclatura do Quadro de Fabricantes de Veículos (QFV) (DNIT, 2012) para as classes de veículos. A partir de dados de tráfego em rodovias federais publicados pelo DNIT, Rossigali (2006) efetuou um estudo estatístico objetivando gerar uma base de dados composta por veículos com maior frequência de ocorrência. De acordo com Rossigali (2006), foram levantadas as frequências de classes de veículos no posto de fiscalização P51 do DNIT, localizado em uma rodovia no estado do Espírito Santo. Rossigali (2006) observou que as distribuições e os valores representativos do posto P51 são bastante semelhantes ao padrão geral da malha viária nacional. A Fig. 1 apresenta as dimensões médias dos veículos mais frequentes encontrados nas rodovias brasileiras. Nesta distribuição são consideradas apenas as seis classes de veículos de carga, excluindo-se as classes de veículos leves e utilitários.

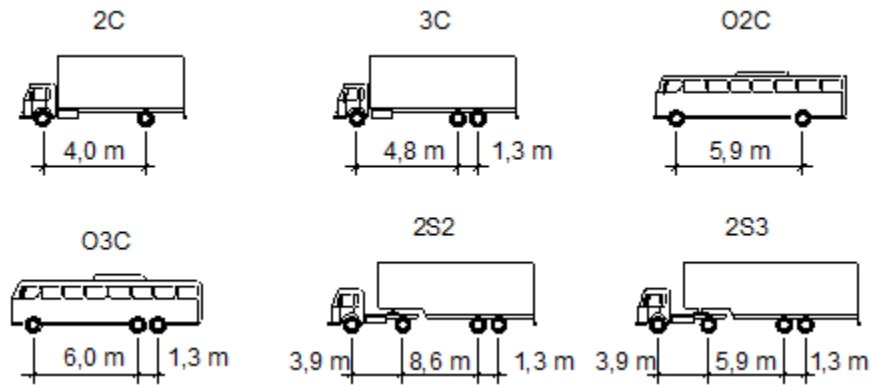


Figura 1. Dimensões médias de veículos frequentes (Rossigali, 2006)

2.2 Modelo matemático dos veículos

No âmbito desta investigação, o modelo matemático utilizado nas análises dinâmicas baseia-se no modelo de veículo discreto desenvolvido por Almeida (2006), sendo constituído por sistemas de molas e amortecedores que visam representar a rigidez e o amortecimento dos pneus e o sistema de suspensão do veículo. Este modelo matemático possui 4 graus de liberdade, sendo 3 de translação e 1 de rotação, de acordo com a Fig. 2.

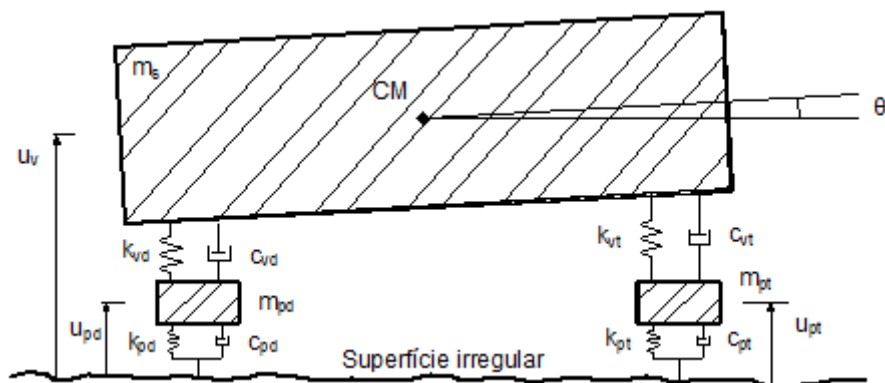


Figura 2. Modelo de veículo simplificado com 4 graus de liberdade

O modelo com 4 graus de liberdade empregado nesta pesquisa busca representar um veículo de carga monolítico da classe 2C, bastante frequente nas rodovias brasileiras.

2.3 Características dinâmicas do modelo de veículo de carga da classe 2C

As características dinâmicas do veículo utilizado neste trabalho estão representadas na Tabela 1. Com relação aos amortecimentos do modelo, esses são determinados em função da fração de amortecimento indicada na Tabela 1, com recurso às equações dinâmicas deduzidas por Almeida (2006) para o veículo bidimensional de dois eixos da Fig. 1. As frequências naturais do veículo utilizado nesta pesquisa, Figs. 1 e 2, são calculadas segundo as equações de equilíbrio dinâmico desenvolvidas em Almeida (2006) e Silva (1996). Estas frequências estão de acordo com os valores das frequências de veículos de classes correlatas, cujos valores, medidos experimentalmente, são apresentados por Rossigali (2006).

3 MODELAGEM DAS IRREGULARIDADES DO PAVIMENTO

O modelo de irregularidade longitudinal de um pavimento pode ser considerado como um conjunto dos desvios da superfície que afetam a qualidade de rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a rodovia. Dessa forma, a irregularidade é uma grandeza física mensurável direta ou indiretamente, que por sua vez permite uma melhor avaliação de custo operacional dos veículos, conforto, segurança, velocidade de percurso e economia das viagens. Tais irregularidades podem ter origem nas imperfeições ocorridas durante o processo construtivo, assim como podem resultar de problemas ocorridos após a construção, como resultado da atuação do tráfego, pois a contínua solitação imposta pelo tráfego ao pavimento altera as condições de sua superfície com o passar do tempo.

Tabela 1. Características dinâmicas do modelo simplificado do veículo da classe 2C

Características dinâmicas	Valor	Unidade
Massa total (m)	20,3	t
Massa suspensa (m_s)	18599	kg
Fração de amortecimento	10,0	%
Frequência natural associada à rotação de m_s	1,17	Hz
Frequência natural associada à translação de m_s	2,08	Hz
Frequência natural associada à m_{pt}	10,00	Hz
Frequência natural associada à m_{pd}	14,73	Hz
Eixo dianteiro tipo SRS (direcional simples)		
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
Eixo traseiro tipo SRD (simples de rodas duplas)		
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

Além disso, o aparecimento das irregularidades também pode ser fruto de fatores ambientais como, por exemplo, a combinação da água das chuvas e as elevadas variações de temperatura que, em conjunto com as solicitações impostas pelo tráfego, podem provocar deformações plásticas no revestimento asfáltico, e, conseqüentemente, diminuir a capacidade de suporte do pavimento. No decorrer dos anos, excelentes trabalhos sobre características de irregularidades de pavimento foram apresentados pela comunidade científica, como Silva (1996), Almeida (2006), Leitão (2009) e Leitão (2014).

A distribuição do perfil irregular do pavimento é considerada segundo modelo randômico com base na densidade espectral do pavimento. O tipo de pavimento escolhido para as análises são de qualidade ruim, observando-se que essas categorias são definidas segundo a classificação das irregularidades do pavimento que pode ser encontrada nos autores Silva (1996) e Almeida (2006).

No que tange à modelagem das irregularidades não determinísticas, o ponto de partida desta abordagem é a representação da função das irregularidades, $v_b(x)$, com base em seu espectro complexo de Fourier. Deve-se então discretizar a função $v_b(x)$ para gerar um conjunto de amostras de irregularidades aproximando a distribuição das mesmas por uma série finita de harmônicos, conforme a Eq. (1).

$$v_b(x) = \sum_{i=1}^N v_{bi} \cos[\omega_i x - \phi_i]. \quad (1)$$

Onde v_{bi} é a amplitude real da parte harmônica, ω_i a frequência do harmônico i , ϕ_i o ângulo de fase do harmônico i determinado e N o número de harmônicos. A amplitude da parte harmônica das irregularidades, v_{bi} , e a densidade espectral das irregularidades, $\Phi_{vbvb}(\omega_i)$, são definidas, respectivamente, pelas Eqs. (2) e (3), a seguir.

$$v_{bi} = \sqrt{2\Delta\omega\Phi_{vbvb}(\omega_i)}. \quad (2)$$

$$\Phi_{vbvb}(\omega) = \Phi(\omega_0) \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right]^{-w}. \quad (3)$$

Onde $\Phi_{vbvb}(\omega_i)$ é a densidade espectral das irregularidades, $\Delta\omega$ denota o intervalo de discretização e w representa a ondulabilidade da pista, tomada com um valor igual a 2 (Silva, 1996). Um aspecto interessante referente à modelagem das irregularidades de um pavimento é que para se determinar a densidade espectral das mesmas, $\Phi_{vbvb}(\omega_i)$, faz-se necessária a determinação de um coeficiente de amplitude, $\Phi(\omega_0)$. Este coeficiente de amplitude representa o volume das irregularidades em relação a uma superfície perfeitamente plana, sendo seus valores expressos em cm^3/m para uma frequência básica das irregularidades equivalente a uma por metro e ondulabilidade da pista igual a dois. O coeficiente $\Phi(\omega_0)$ é determinado em função da qualidade do pavimento, conforme ilustra a Tabela 2.

Tabela 2. Classificação das irregularidades do pavimento, coeficiente de amplitude em cm^3 , $\Phi(\omega_0)$ (Silva, 1996)

Qualidade do pavimento	Limite inferior	Valor médio	Limite superior
Excelente	0,5	1	< 2
Boa	2	4	< 8
Média	8	16	< 32
Ruim	32	64	< 128
Muito ruim	128	256	< 512

As irregularidades da pista são definidas segundo modelo não determinístico com base na densidade espectral do pavimento. Adota-se para as irregularidades aleatórias uma distribuição normal e um processo randômico fracamente estacionário de segunda ordem (Silva, 1996). Objetivando ilustrar a forma e a amplitude das irregularidades, apresenta-se na Fig. 3 um perfil de irregularidade gerado com base no modelo matemático para pistas de qualidade ruim, utilizado neste trabalho. No eixo das abscissas estão representadas, em metros, as coordenadas horizontais ao longo do comprimento da ponte e no das ordenadas, em milímetros, as amplitudes das irregularidades. Assim sendo, as forças dinâmicas oriundas do pavimento irregular são geradas com base na interação dos veículos com os perfis de irregularidades não determinísticos, definidos com base na densidade espectral da pista, ilustrados genericamente de acordo com a Fig. 3.

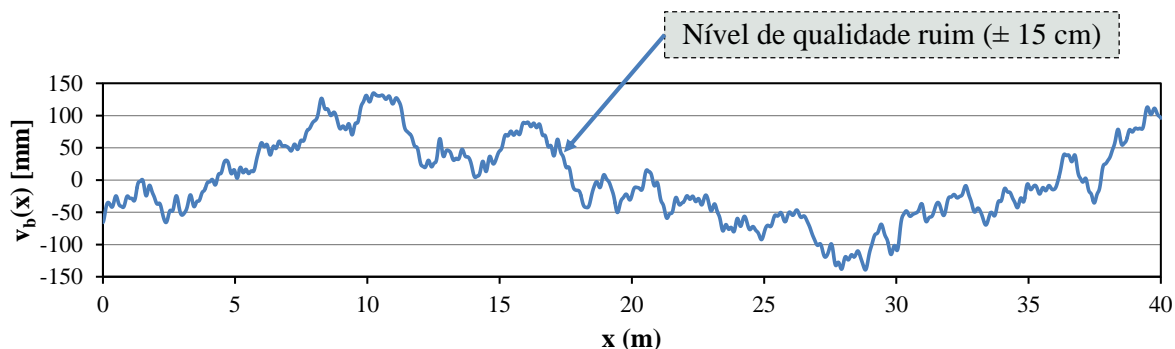


Figura 3. Exemplo de amostra de irregularidade para qualidade da pista ruim [$\Phi(\omega_0) = 64 \text{ cm}^3$]

4 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

O modelo estrutural investigado, Fig. 4, refere-se a uma ponte rodoviária mista (aço-concreto) simplesmente apoiada, de eixo reto e com vão de 40 m, composta por quatro vigas metálicas longitudinais que suportam o tabuleiro de concreto. As vigas possuem espaçamento entre eixos de 3,50 m, além de balanços laterais com comprimento de 1,25 m, formando o tabuleiro com 13 m de largura. A laje de concreto possui espessura de 0,225 m (22,5 cm), guarda-roda de concreto tipo “New Jersey” com 0,88 m (88 cm) de altura e oito estruturas de diafragmas composta por cantoneiras de abas iguais ao longo de toda a estrutura.

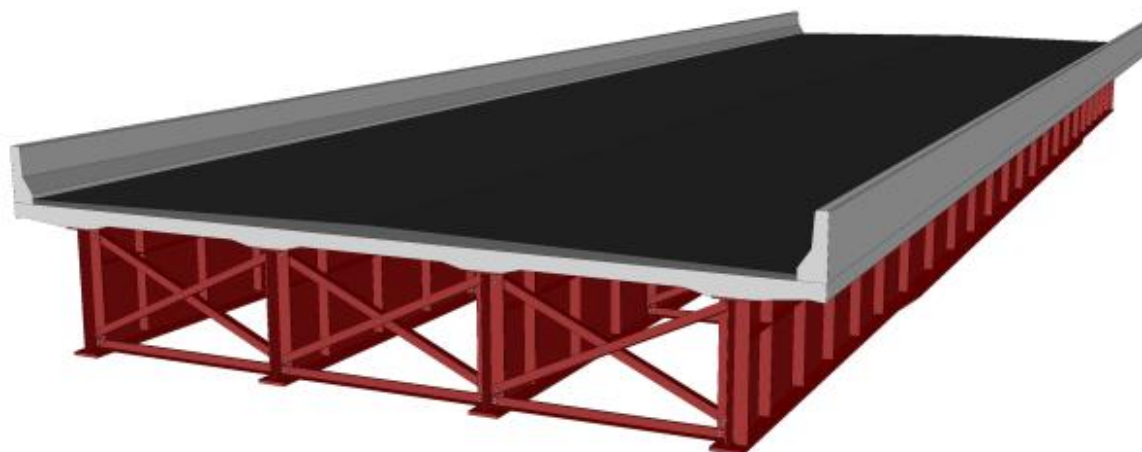


Figura 4. Modelo estrutural investigado (Alencar, 2015)

A Fig. 5 ilustra a seção transversal da estrutura na região do apoio, com indicação do tabuleiro, do guarda-roda, dos perfis metálicos e do diafragma transversal, apresentando as respectivas dimensões, em milímetros (mm). Com o intuito de facilitar a apresentação de resultados, as vigas são numeradas como V1, V2, V3 e V4. Conforme apresentado em Pinho e Belley (2007), dois tipos distintos de perfis são considerados para as vigas ao longo do comprimento da ponte, com a finalidade de otimizar a utilização dos mesmos. Um tipo refere-se ao perfil utilizado no trecho central do vão e outro está associado aos trechos extremos. A Fig. 6 apresenta a vista superior da estrutura, ilustrando os perfis metálicos adotados para as vigas e agrupando os perfis utilizados em “perfis centrais” e “perfis extremos”. Para os elementos estruturais em aço foi considerado o aço do tipo ASTM A588 e concreto do tipo C25 para o tabuleiro.

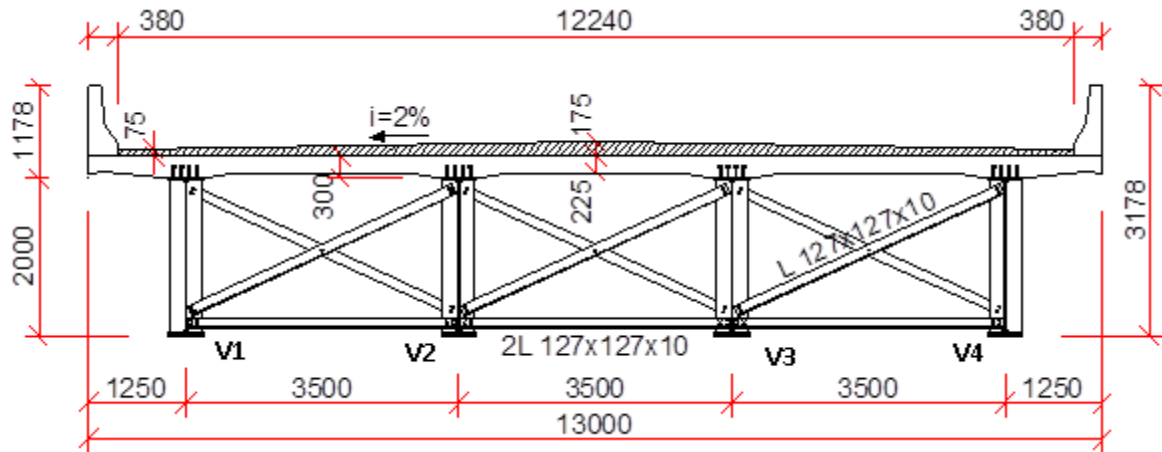


Figura 5. Seção transversal do apoio da ponte (Alencar, 2015)

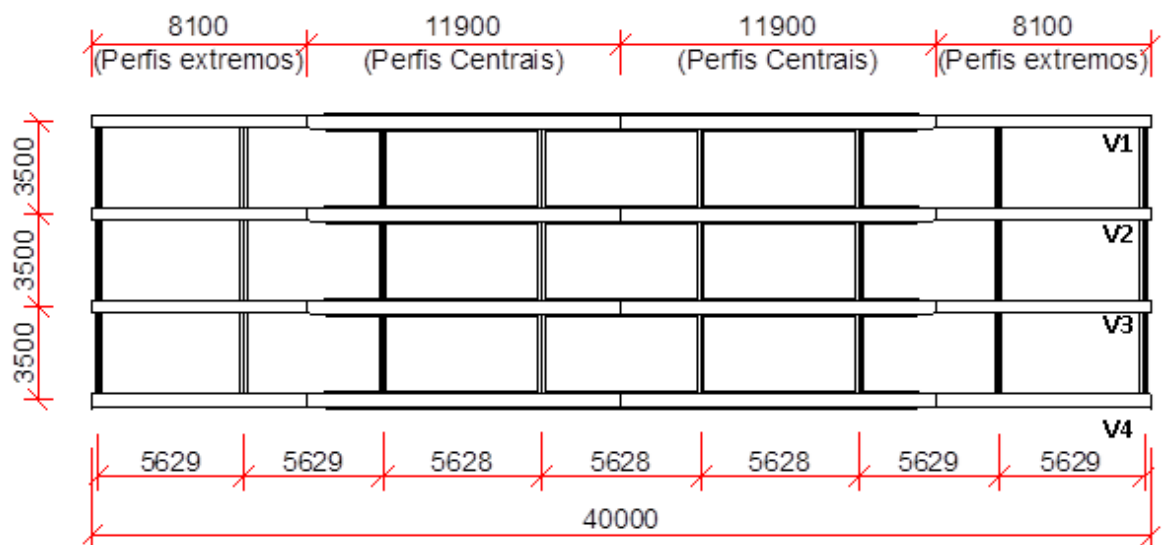


Figura 6. Vista superior da ponte (Alencar, 2015)

A ponte rodoviária estudada é concebida como estrutura mista (aço-concreto), o que torna necessária a presença de elementos que realizem a conexão entre o aço das vigas e o concreto do tabuleiro. Os elementos responsáveis pelo desempenho de tal função neste projeto são os conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (*stud bolts*), de diâmetro de 19 mm, soldados à mesa superior das vigas longitudinais.

No projeto apresentado por Pinho e Belley (2007), o dimensionamento dos conectores de cisalhamento foi feito de forma a garantir a interação total com base nos conectores do tipo *stud bolt* referidos no parágrafo anterior, tendo sido considerados 4 por seção e afastados de aproximadamente 50 cm no sentido longitudinal da estrutura.

No presente estudo, foi considerada uma metodologia com base na consideração da interação parcial entre a laje de concreto e as vigas em aço. No presente estudo foram utilizados os conectores do tipo *stud bolt* com diâmetro de 19 mm, com rigidez inicial igual a aproximadamente 200 kN/mm, conforme apresentado no trabalho desenvolvido por Ellobody e Young (2005). A Fig. 7, elaborada por Lopes et al. (2012), apresenta a curva força versus deslizamento, obtida a partir de ensaios experimentais por Ellobody e Young (2005), no que diz respeito ao tipo de conector de cisalhamento empregado nesse estudo.

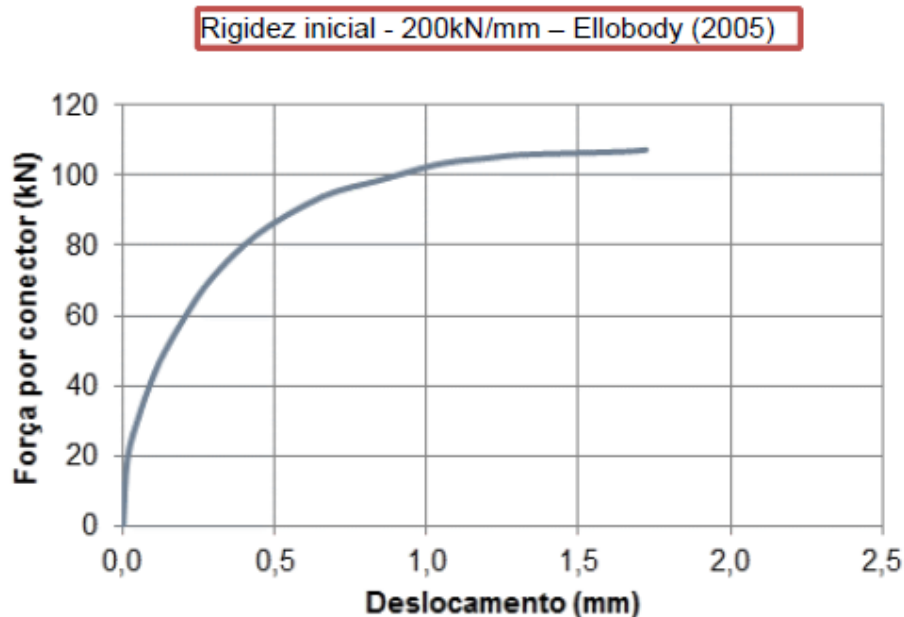


Figura 7. Curva força x deslizamento dos conectores de cisalhamento para o conector do tipo stud bolt com diâmetro de 19 mm (Lopes et al., 2012)

A Tabela 3 apresenta o número de conectores utilizado em cada viga de aço, de forma a garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos sólidos, representativos da laje de concreto e os elementos de placa, representativos das vigas metálicas, simulando o comportamento de um sistema estrutural misto (aço-concreto) com interação parcial.

Tabela 3. Características e quantidades de conectores de cisalhamento utilizados para a ponte estudada

Tipo de conector	f_{ck} (MPa)	Rigidez inicial (kN/mm)	Referência utilizada	Número de conectores por viga	
				Interação total	Interação parcial
Stud bolt 19 mm	34,6	200	Ellobody e Young (2005)	324	162

5 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS DA PONTE

O modelo numérico-computacional tridimensional da ponte estudada foi elaborado utilizando-se técnicas de discretização usuais, via método dos elementos finitos (MEF), com base no emprego do programa ANSYS (2009). A estrutura da ponte mista foi elaborada através da utilização de elementos de sólidos, de casca e de viga em um modelo com um total de 17.452 nós e aproximadamente 105.252 graus de liberdade. O comprimento dos elementos finitos que compõem a malha do modelo numérico-computacional é de aproximadamente 0,50 m, gerando um total de 16.112 elementos.

O modelo constitutivo dos materiais estruturais (aço e concreto) foi definido como linear-elástico. Os elementos de contraventamento, representativos das cantoneiras metálicas, foram conectados diretamente aos nós que constituem as vigas metálicas. As Figs. 8 e 9 apresentadas a seguir ilustram a complexidade do modelo computacional tridimensional.

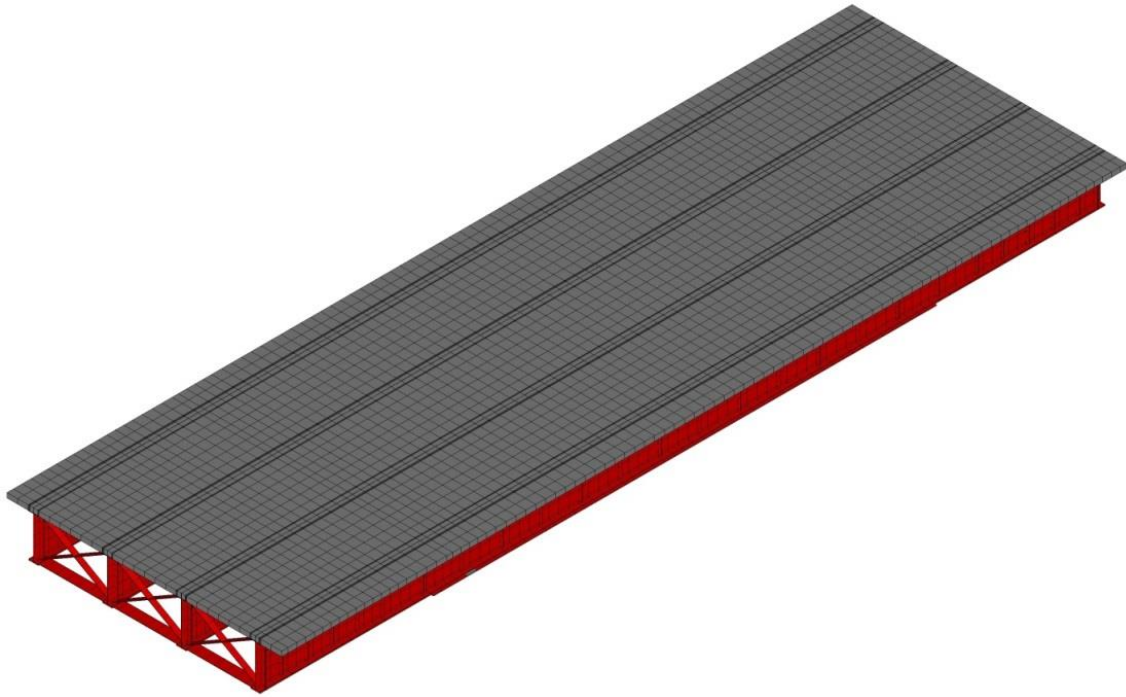


Figura 8. Modelo em elementos finitos, perspectiva completa (Alencar, 2015)

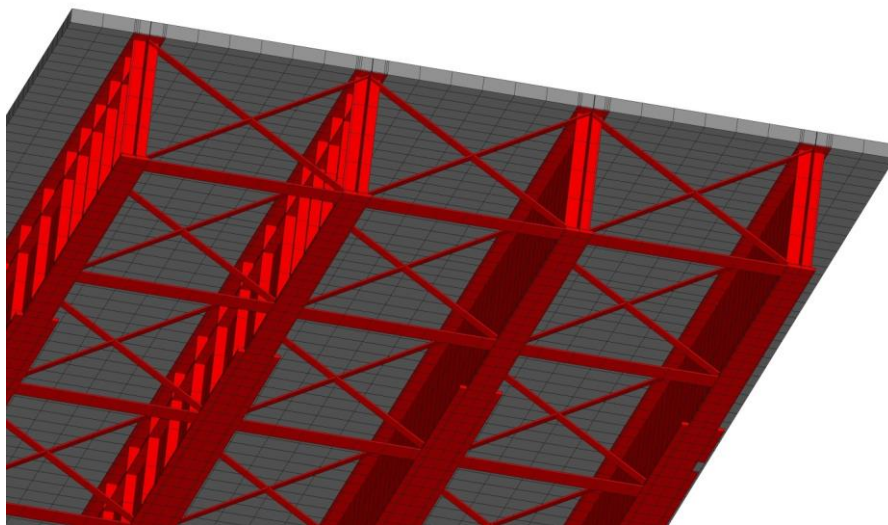


Figura 9. Modelo em elementos finitos, perspectiva inferior (Alencar, 2015)

Para modelagem das almas e mesas dos perfis metálicos e enrijecedores, foram utilizados elementos finitos de casca do tipo SHELL63, que possuem quatro nós e seis graus de liberdade por nó. Para modelagem da laje de concreto foram utilizados elementos sólidos do tipo SOLID45, que possuem oito nós e três graus de liberdade por nó. Elementos finitos de viga, onde são considerados os efeitos de flexão e de torção, foram utilizados para modelar as demais peças estruturais da ponte metálica. As barras de contraventamento que compõem os diafragmas foram modeladas a partir de elementos de viga tridimensionais do tipo BEAM44, que possuem dois nós e seis graus de liberdade por nó. Elementos finitos de mola linear do tipo COMBIN14 foram utilizados para modelar os conectores de cisalhamento. Estes elementos finitos possuem dois nós e três graus de liberdade por nó e são responsáveis pela conexão entre a mesa superior e a laje, a partir de nós coincidentes.

No que tange à modelagem numérica do efeito da interação parcial aço-concreto, outro ponto importante a ser considerado na discretização do modelo numérico-computacional refere-se à metodologia utilizada para modelar os conectores de cisalhamento. Para tanto, adota-se a seguinte estratégia: durante a discretização da malha em elementos finitos, nós coincidentes, tanto na parte inferior da laje de concreto quanto na parte superior dos perfis de aço das vigas foram utilizados. Esses nós foram alocados de maneira a representar a posição real dos conectores de cisalhamento no tabuleiro da ponte.

A partir do emprego do elemento finito COMBIN14 realiza-se o acoplamento, vinculando o nó na mesa superior do perfil de aço ao nó existente na parte inferior da laje de concreto. Esse acoplamento foi realizado sem que todos os graus de liberdade fossem inteiramente compatibilizados, ou seja, o grau de liberdade na direção correspondente ao deslizamento da laje sobre o perfil foi liberado. Deste modo, foi possível simular numericamente a rigidez dos conectores na direção do deslizamento da laje sobre o perfil, com base no emprego de uma curva força *versus* deslizamento (Lopes et al., 2012; Ellobody e Young, 2005).

5.1 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento estrutural da ponte analisada é formulado com base na matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera duas principais parcelas, uma relativa à taxa de contribuição da matriz de massa e outra à taxa de contribuição da matriz de rigidez. Alguns autores consultados tais como Leitão (2014); Pravia (2003); Silva (1996); e, ainda, o guia de projeto AISC 11 (Murray et al., 2003) orientam quanto à decisão dos valores para a taxa de amortecimento modal (ξ_i) de acordo com determinadas condições da estrutura.

De acordo com as referências mencionadas, estruturas de aço apresentam coeficientes de amortecimento entre 1 e 4%. Quando medidos experimentalmente em pontes metálicas, os coeficientes de amortecimento apresentam-se geralmente inferiores a 0,5%. No entanto, como se trata de uma concepção de projeto, decidiu-se adotar um coeficiente de amortecimento no valor de 3% ($\xi_i = 3\%$) para todos os modos. Deste modo, a Tabela 4 apresenta os parâmetros α e β utilizados nas análises dinâmicas, para a modelagem do amortecimento da estrutura da ponte mista desenvolvida nesse estudo.

Tabela 4. Parâmetros α e β utilizados nas análises dinâmicas

f_{01} (Hz)	f_{02} (Hz)	ω_{01} (rad/s)	ω_{02} (rad/s)	α	β
2,6632	3,1944	16,73	20,07	0,00163024	0,54752567

5.2 Estratégia de aplicação do carregamento dinâmico

As análises realizadas no presente trabalho consideram um comboio de três veículos reais da classe 2C, e incluem o efeito da mobilidade da carga interagindo com as irregularidades da pista. As respostas foram obtidas variando-se o perfil de irregularidade dos pavimentos para uma velocidade de travessia de 70 km/h, tendo sido considerados 30 perfis de irregularidade diferentes. Além disso, os comboios de veículos são semi-infinitos, isto é, no instante inicial não há tráfego sobre a ponte, e, após a entrada do primeiro veículo, os comboios repetem-se ininterruptamente, comboio após comboio, até um determinado número de travessias (definido como t/t_1), escolhido arbitrariamente e adotado igual a 15 na presente investigação.

O espaçamento entre o eixo direcional simples e o eixo simples de rodas duplas de dois veículos consecutivos foi adotado igual a 11 metros, conforme ilustrado na Fig. 10. Assim, os espaçamentos entre os veículos foram limitados pelo comprimento da ponte e por um espaçamento mínimo entre veículos consecutivos, coerente com a velocidade máxima analisada. Os comboios foram posicionados nas duas faixas laterais, estando os comboios das duas faixas em concordância ao longo do tempo de análise.

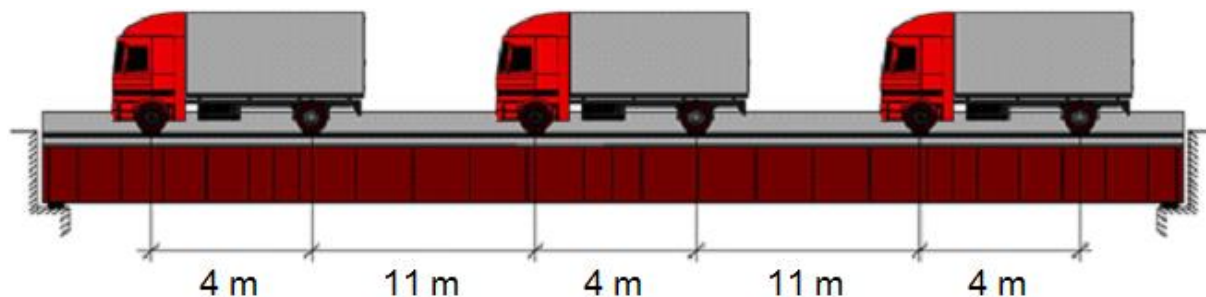


Figura 10. Espaçamento entre os veículos do comboio (Alencar, 2015)

6 ANÁLISE DINÂMICA

6.1 Análise modal da ponte mista com interação parcial aço-concreto

Inicialmente são obtidas as frequências naturais e os modos de vibração da ponte rodoviária mista (aço-concreto) com interação parcial. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, pode-se verificar que o valor da frequência fundamental (f_{01}) da ponte, de acordo com a presente metodologia de análise, praticamente coincide com os valores calculados com base no emprego de outra estratégia de análise (Murray et al., 2003) e fica bastante próximo do valor calculado pelo programa desenvolvido por Silva (1996).

Tabela 5. Frequências naturais obtidas por diferentes métodos de análise

Frequências Naturais da Ponte (Interação Parcial)						GDYNABT	AISC
f_{0i} (Hz) ANSYS (2009)						Silva (1996)	Murray et al. (2003)
f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}	f_{05}	f_{06}	f_{01} (Hz)	f_{01} (Hz)
2,66	3,19	6,07	8,09	8,91	11,56	2,85	2,65

Na Tabela 5 pode-se perceber que a pequena diferença entre os valores da frequência fundamental, para diferentes metodologias, fornece um bom indicativo de coerência no que diz respeito ao modelo numérico-computacional. Os modos de vibração apresentados no presente estudo, em termos de comportamento, estão de acordo com os estudos apresentados anteriormente por Pravia (2003) e Leitão (2009) e Leitão (2014), que se basearam em pontes de aço e mistas (aço-concreto).

Observa-se que o valor da frequência fundamental da ponte, $f_{01} = 2,66$ Hz, é relativamente baixo, o que demonstra a alta flexibilidade da mesma. Tal flexibilidade enfatiza a necessidade de se analisar a resposta dinâmica para esse tipo de estrutura. Esse primeiro modo é de especial interesse para a análise do comportamento dinâmico da estrutura quando submetida a carregamentos reais por apresentar uma frequência de vibração baixa e próxima a muitas frequências de excitação características da passagem de comboios de veículos

conhecidos. Na Fig. 11 são apresentados os quatro primeiros modos de vibração referentes às quatro primeiras frequências da ponte em estudo.

O segundo modo de vibração refere-se à torção axial da estrutura. O valor da segunda frequência natural da estrutura também é relativamente baixo, o que demonstra o efeito e a importância da torção nesse tipo de estrutura. O terceiro modo de vibração refere-se à flexão lateral das vigas. Esse modo já apresenta um valor bem maior que os dois primeiros, mas ainda assim é de interesse para uma análise de resposta dinâmica por apresentar acentuada flexão das vigas concentrados em determinados pontos fundamentais da estrutura. O quarto modo de vibração refere-se ao segundo modo de flexão longitudinal da estrutura.

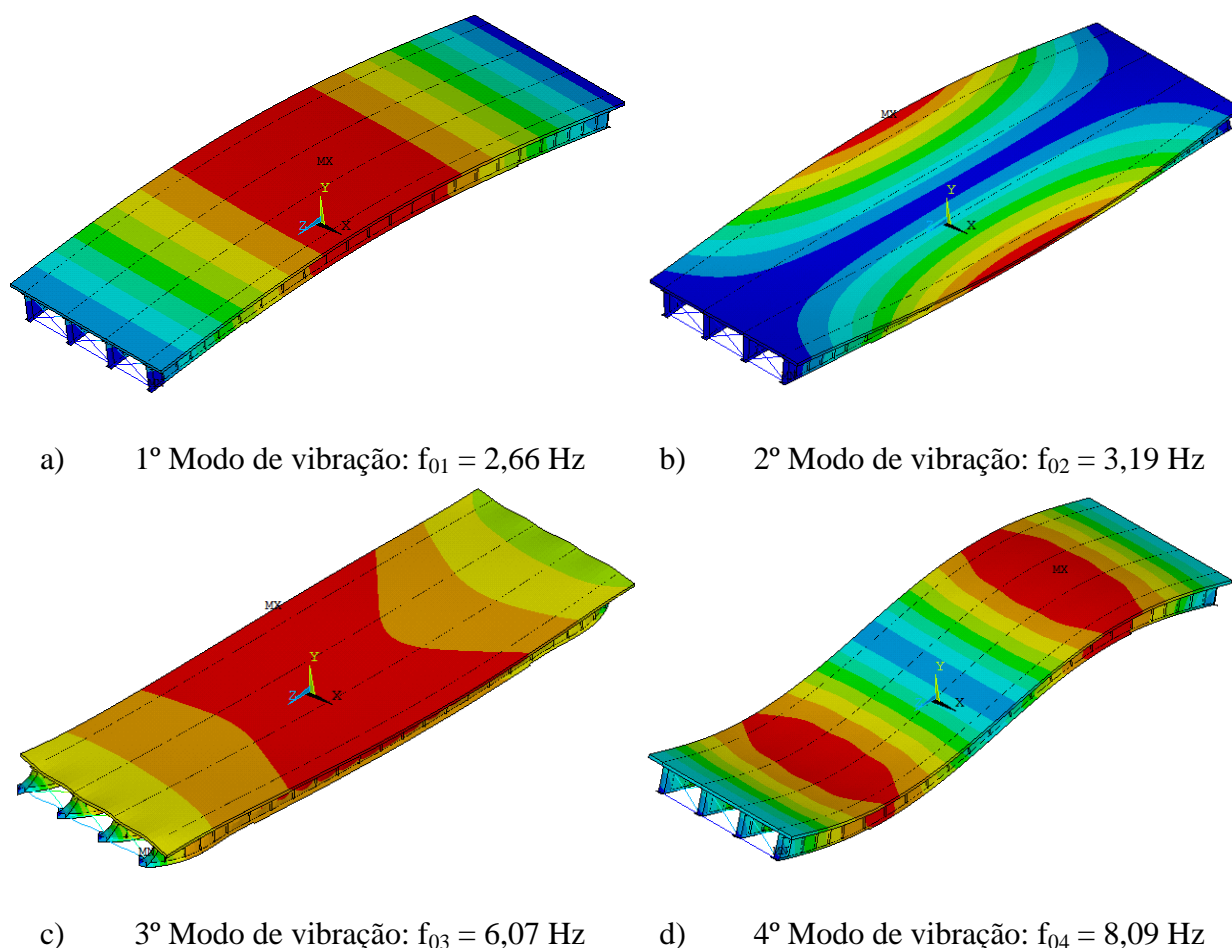


Figura 11. Modos de vibração da ponte mista (aço-concreto) investigada

6.2 Análise do comportamento dinâmico geral do sistema

As análises realizadas neste item consideram um comboio de três veículos reais da classe 2C, e incluem o efeito da mobilidade da carga interagindo com as irregularidades da pista. As respostas foram obtidas variando-se o perfil de irregularidade dos pavimentos para uma velocidade de travessia de 70 km/h, tendo sido considerados 30 perfis de irregularidade diferentes. Além disso, os comboios de veículos são semi-infinitos, isto é, no instante inicial não há tráfego sobre a ponte, e, após a entrada do primeiro veículo, os comboios repetem-se ininterruptamente, comboio após comboio, até um determinado número de travessias (definido como t/t_1), escolhido arbitrariamente e adotado igual a 15 na presente investigação.

Inicialmente é selecionado o nó referente ao meio do vão da ponte mista (aço-concreto), onde ocorrem os valores máximos de deslocamentos translacionais verticais, considerando o comboio composto por três veículos do tipo 2C trafegando sobre as duas faixas laterais da ponte. A Fig. 12 apresenta os gráficos de resposta dos deslocamentos translacionais verticais no domínio do tempo e da frequência para um perfil de irregularidade de pavimento com qualidade ruim. Observando os gráficos apresentados na Fig. 12, é possível constatar que a resposta da estrutura, no domínio do tempo, passa a apresentar um comportamento permanente após um tempo de pelo menos três vezes o tempo referente à passagem sobre a ponte de um veículo com a velocidade considerada ($t/t_1 = 3$). A identificação da fase permanente é de grande importância, especialmente no que tange a verificação à fadiga.

No que concerne aos deslocamentos, é possível observar que o gráfico apresentado na Fig. 12, no domínio do tempo, apresenta um comportamento, do ponto de vista qualitativo, similar aos apresentados por Silva (1996), Leitão (2014) e Alencar (2015).

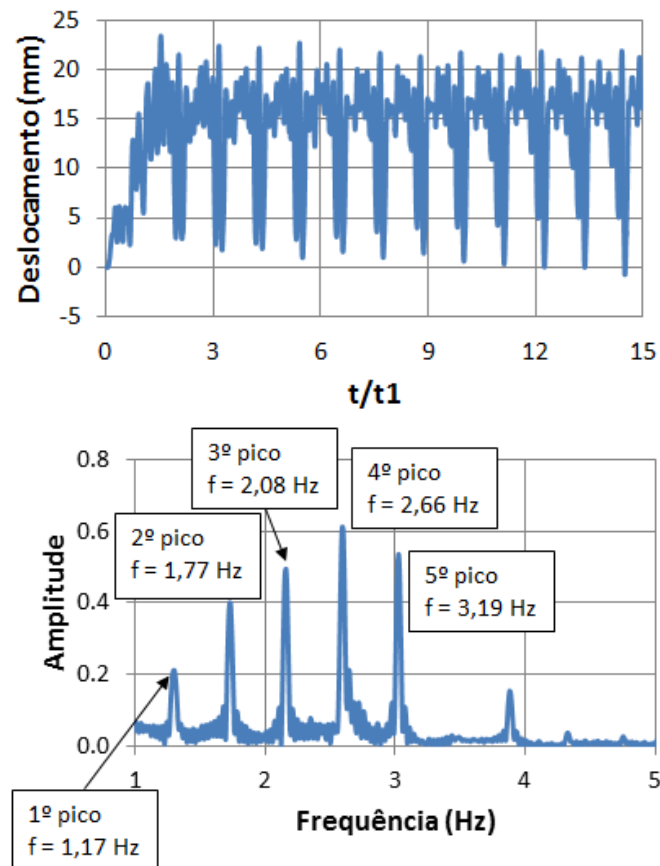


Figura 12. Deslocamento no nó central da ponte no domínio do tempo e da frequência, qualidade das irregularidades do pavimento ruim, comboio nas duas faixas laterais, velocidade 70 km/h

No que tange ao gráfico da Fig. 12, no domínio da frequência, é possível ver a existência de cinco picos com magnitudes da mesma ordem de grandeza. O primeiro e o terceiro picos estão relacionados às frequências de rotação e translação da massa suspensa do veículo representativo da carga móvel (1,17 Hz e 2.08 Hz). O segundo pico está relacionado à frequência de travessia do comboio sobre a ponte com velocidade constante de 70 km/h. O quarto pico, que apresenta a maior amplitude, está relacionado à frequência do primeiro modo de vibração da estrutura, modo este correspondente ao primeiro modo de flexão da estrutura. Por fim, o quinto pico está relacionado à segunda frequência da ponte, correspondente ao primeiro modo de torção da estrutura.

7 VERIFICAÇÃO À FADIGA ESTRUTURAL

Para avaliação da fadiga e obtenção da vida útil, através da regra de danos cumulativos de Palmgren-Miner, em termos de anos, é necessário especificar um número de ciclos base com referência a 1 (um) ano (Pravia, 2003). Assim, de acordo com a Tabela 6, que indica valores de média diária de tráfego (MDT) e número de ciclos de acordo com o tipo de rodovia, será considerado um número de ciclos de 2 milhões por ano (rodovia “caso I”). As análises são feitas para os comboios apresentados no item 5.2, trafegando sobre pavimento com qualidade ruim.

Tabela 6. Média diária de tráfego e numero de ciclos (Pinho e Belley, 2007)

Tipo de rodovia	Caso	MDT	Número de ciclos
Rodovias expressas, rodovias secundárias, estradas e ruas	I	2.500 ou mais	2.000.000
Rodovias expressas, rodovias secundárias, estradas e ruas	II	Menos que 2.500	500.000
Outras rodovias, estradas e ruas não incluídas em casos I ou II	III	-	100.000

Dessa forma, cada faixa de variação de tensão é considerada projetada sobre um número de ciclos de referência de 2 milhões, possíveis de acontecerem em 1 (um) ano, proporcionalmente à sua incidência sobre o tempo total de cada análise. Outros casos podem ser selecionados, dependendo da classe de rodovia especificada para o projeto, com a ressalva de que, para um número de ciclos de referência menor, deverão ser obtidos valores de vida útil maiores, e, conseqüentemente, outro tipo de avaliação da fadiga estrutural. Os tipos de detalhes estruturais analisados neste trabalho estão em conformidade com o Eurocode 3 (2003), parte 1-9, e encontram-se representados na Tabela 7.

Tabela 7. Descrição dos detalhes construtivos analisados

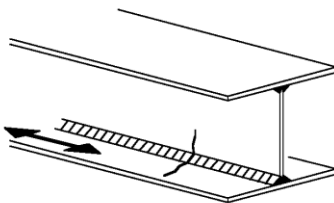
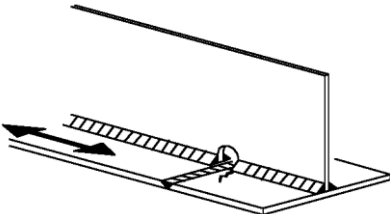
Descrição	Detalhe	Região
Detalhe I: solda automática ou totalmente mecânica de topo sem interrupção executada em ambos os lados.		Nas vigas V1, V2, V3 e V4, na ligação entre a alma e a mesa inferior no centro do vão.
Detalhe II: solda de topo longitudinal, de filete ou solda descontínua com furo curvo na emenda de altura não superior a 60 mm.		Nas vigas V1, V2, V3 e V4, na ligação entre a alma e a mesa inferior no centro do vão.

Tabela 8. Verificação à fadiga do detalhe estrutural I das vigas V1 e V4 (Velocidade: 70km/h.)

Irregularidades da Pista	$\sigma_{\text{máx}}$ Tração (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Dano (D)	EUROCODE Categoria 125 Limite: 100 anos
01	39,2	41	5,1E-04	
02	44,2	51	2,8E-03	
03	52,1	53	2,8E-03	
04	42,2	51	1,7E-03	
05	36,4	38	8,8E-05	
06	27,3	27	0,0	
07	35,1	42	5,8E-05	
08	42,5	43	9,3E-04	
09	42,2	47	1,5E-03	
10	34,0	37	0,0	
11	47,5	52	2,6E-03	
12	34,8	46	2,0E-03	
13	37,3	45	9,7E-04	
14	56,8	67	1,7E-02	
15	40,2	41	5,4E-05	
16	33,4	35	0,0	
17	33,9	37	0,0	
18	39,0	43	2,3E-04	100 anos
19	45,2	56	3,0E-03	
20	30,5	31	0,0	
21	44,8	45	6,6E-04	
22	56,5	62	6,0E-03	
23	50,3	61	9,5E-03	
24	34,2	38	4,4E-05	
25	34,8	45	1,2E-03	
26	47,3	48	6,4E-04	
27	30,1	31	0,0	
28	34,2	40	6,4E-05	
29	51,6	53	4,2E-03	
30	37,2	40	4,1E-05	
Valores Máximos Médios	40,5	45	2,4E-03	
	Dano	D_m	2,4E-03	
	Vida Útil (Anos)	$T_m = 1/D_m$	416,7	416,7 > 100 - OK

Tabela 9. Verificação à fadiga do detalhe estrutural I das vigas V2 e V3 (Velocidade: 70km/h.)

Irregularidades da Pista	$\sigma_{\text{máx}}$ Tração (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Dano (D)	EUROCODE Categoria 125 Limite: 100 anos
01	38,0	40	3,6E-04	
02	43,0	49	2,6E-03	
03	51,7	52	3,4E-03	
04	41,3	50	1,3E-03	
05	36,1	38	4,6E-05	
06	27,5	28	0,0	
07	34,2	41	5,7E-05	
08	41,6	42	9,2E-04	
09	40,8	45	1,3E-03	
10	33,9	37	0,0	
11	45,9	51	2,8E-03	
12	33,6	45	2,2E-03	
13	36,1	44	1,0E-03	
14	56,4	67	1,9E-02	
15	38,6	39	5,1E-05	
16	33,8	35	0,0	
17	32,5	35	0,0	
18	37,6	41	1,7E-04	100 anos
19	45,1	56	3,4E-03	
20	29,8	30	0,0	
21	44,8	45	6,8E-04	
22	56,6	62	6,1E-03	
23	49,3	60	9,7E-03	
24	33,9	37	0,0	
25	34,0	44	1,6E-03	
26	46,2	47	7,6E-04	
27	28,8	30	0,0	
28	33,9	40	1,5E-04	
29	52,0	53	4,7E-03	
30	36,6	39	4,1E-05	
Valores Máximos Médios	39,8	44	2,7E-03	
	Dano	D_m	2,4E-03	
	Vida Útil (Anos)	$T_m = 1/D_m$	370,4	370,4 > 100 - OK

Tabela 10. Verificação à fadiga do detalhe estrutural II das vigas V1 e V4 (Velocidade: 70km/h.)

Irregularidades da Pista	$\sigma_{\text{máx}}$ Tração (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Dano (D)	EUROCODE Categoria 71 Limite: 100 anos
01	39,2	41	1,7E-02	
02	44,2	51	3,1E-02	
03	52,1	53	4,8E-02	
04	42,2	51	3,1E-02	
05	36,4	38	1,8E-02	
06	27,3	27	7,3E-05	
07	35,1	42	8,1E-03	
08	42,5	43	2,1E-02	
09	42,2	47	2,7E-02	
10	34,0	37	8,3E-03	
11	47,5	52	3,6E-02	
12	34,8	46	4,8E-02	
13	37,3	45	2,1E-02	
14	56,8	67	1,2E-01	
15	40,2	41	1,1E-02	
16	33,4	35	7,0E-03	
17	33,9	37	1,1E-02	100 anos
18	39,0	43	1,1E-02	
19	45,2	56	4,3E-02	
20	30,5	31	8,2E-04	
21	44,8	45	2,4E-02	
22	56,5	62	6,8E-02	
23	50,3	61	9,0E-02	
24	34,2	38	2,1E-02	
25	34,8	45	2,7E-02	
26	47,3	48	1,3E-02	
27	30,1	31	1,7E-04	
28	34,2	40	8,2E-03	
29	51,6	53	6,4E-02	
30	37,2	40	5,0E-03	
Valores Máximos Médios	40,5	45	2,8E-02	
	Dano	D_m	2,4E-03	
	Vida Útil (Anos)	$T_m = 1/D_m$	35,7	35,7 < 100 - ÑOK

Tabela 11. Verificação à fadiga do detalhe estrutural II das vigas V2 e V3 (Velocidade: 70km/h.)

Irregularidades da Pista	$\sigma_{\text{máx}}$ Tração (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Dano (D)	EUROCODE Categoria 71 Limite: 100 anos
01	38,0	40	1,8E-02	
02	43,0	49	3,1E-02	
03	51,7	52	5,4E-02	
04	41,3	50	3,2E-02	
05	36,1	38	1,7E-02	
06	27,5	28	9,7E-05	
07	34,2	41	9,2E-03	
08	41,6	42	2,2E-02	
09	40,8	45	2,8E-02	
10	33,9	37	9,6E-03	
11	45,9	51	4,3E-02	
12	33,6	45	5,7E-02	
13	36,1	44	2,2E-02	
14	56,4	67	1,3E-01	
15	38,6	39	1,2E-02	
16	33,8	35	8,2E-03	
17	32,5	35	1,1E-02	100 anos
18	37,6	41	1,2E-02	
19	45,1	56	5,0E-02	
20	29,8	30	8,7E-04	
21	44,8	45	2,8E-02	
22	56,6	62	7,3E-02	
23	49,3	60	9,7E-02	
24	33,9	37	2,4E-02	
25	34,0	44	3,2E-02	
26	46,2	47	1,5E-02	
27	28,8	30	1,8E-04	
28	33,9	40	1,0E-02	
29	52,0	53	7,6E-02	
30	36,6	39	5,2E-03	
Valores Máximos Médios	39,8	44	3,1E-02	
	Dano	D_m	2,4E-03	
	Vida Útil (Anos)	$T_m = 1/D_m$	32,3	32,3 < 100 - ÑOK

As Tabelas 8 a 11 apresentam os resultados da verificação à fadiga estrutural dos detalhes construtivos I e II apresentados na Tabela 7. Observa-se que o valor da vida útil da ponte, em relação aos detalhes estruturais investigados (Tabela 7), para velocidades de travessia dos veículos de 70 km/h, atende aos critérios de projeto limites do Eurocode (2003), no que diz respeito ao detalhe construtivo I (Tabelas 7, 8 e 9). Pode-se verificar que o detalhe construtivo I se mostrou bastante eficiente no que tange à resistência à fadiga, apresentando vida útil superior ao limite imposto pela norma Eurocode (2003). Por outro lado, quando o detalhe estrutural II é considerado na análise (Tabelas 7, 10 e 11), a vida da útil da ponte não atende aos limites definidos pelo Eurocode (2003). Tal fato ocorre devido aos efeitos causados pela ressonância existente entre o sistema “veículo-ponte-irregularidades” e a própria ponte, com amplificação da resposta dinâmica estrutural do modelo estrutural, em relação à frequência de excitação correspondente a velocidade de travessia dos veículos de 70 km/h. Além disso, o detalhe construtivo II, por pertencer a uma classe de resistência inferior, se mostrou mais conservativo para os casos avaliados no presente trabalho de pesquisa.

8 CONCLUSÕES

O presente estudo investigou o comportamento estrutural dinâmico não determinístico de uma ponte mista, com base na consideração do efeito da interação parcial aço-concreto, submetida ao tráfego de comboios de veículos sobre diversos perfis de irregularidades de pista. O sistema estrutural investigado corresponde a uma ponte mista (aço-concreto), simplesmente apoiada, com vão de 40,0 m. A metodologia de análise desenvolvida considera a influência do efeito da interação veículo-pavimento-estrutura sobre a resposta estrutural dinâmica da estrutura. O modelo numérico representativo do sistema foi desenvolvido e analisado com base na utilização do programa em elementos finitos ANSYS (2009).

No que tange à análise de vibração livre, foi verificado que o modelo estrutural apresenta frequências naturais relativamente baixas, com a frequência fundamental na ordem de 2,66 Hz. Este fato torna-se relevante para o projeto estrutural, pois se trata de uma estrutura bastante flexível, o que pode vir a causar problemas associados a vibrações excessivas, desconforto aos usuários, fadiga estrutural e, em casos extremos, colapso da estrutura.

No que diz respeito aos resultados obtidos nas verificações referentes à fadiga estrutural neste presente estudo, pode-se observar que o detalhe construtivo II ultrapassa o limite de vida útil estabelecido pela norma Eurocode (2003) [Vigas V1 e V4: $T_m = 35,7$ anos < 100 anos (Limite) Eurocode (2003); [Vigas V2 e V3: $T_m = 32,3$ anos < 100 anos (Limite) Eurocode (2003)]. Por outro lado, as verificações referentes ao detalhe construtivo I indicam que o mesmo apresentou vida útil à fadiga bastante superior do limite mínimo de 100 anos preconizado pelo Eurocode 3 (2003).

Finalmente, os autores do trabalho de pesquisa destacam que a tarefa para previsão de 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 dos autores, a investigação precisa continuar no sentido do desenvolvimento de um estudo paramétrico extenso, no qual serão analisadas outras configurações de veículos, velocidades distintas de travessia dos comboios, qualidades de pavimento diferentes e outras lasses de detalhes estruturais da obra de arte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES, CNPq e FAPERJ, que possibilitaram a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

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

Almeida, R. S., 2006. *Análise de vibrações em pontes rodoviárias induzidas pelo tráfego de veículos sobre pavimentos irregulares*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

ANSYS Swanson Analysis Systems Inc., 2009. Theory Reference (versão 12.1).

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2012. Quadro de fabricantes de veículos. Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. Brasília. – Disponível em <www.dnit.gov.br>.

Ellobody, E.; Young, B., 2005. Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting. *Journal of Constructional Research*, v. 62, pp. 682-694.

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

Leitão, F. N., 2009. *Verificação à fadiga de pontes rodoviárias mistas (aço-concreto)*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Leitão, F. N., 2014. *Modelagem do comportamento dinâmico e verificação à fadiga de pontes rodoviárias em aço e mistas (aço-concreto)*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.

Lopes, E. D. C.; et al., 2012 *Análise dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações dinâmicas humanas rítmicas*. *Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural*, Rio de Janeiro, Brasil.

Murray, T. M.; Allen, D. E.; Ungar, E. E., 2003. *Floor vibration due to human activity*. Steel Design Guide Series, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.

Pinho, F. O.; Belley, I. H., 2007. Pontes e viadutos em vigas mistas. Série “Manual de Construção em Aço”. Centro Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro, Brasil.

Pravia, Z. M. C., 2003. *Estabilidade de estruturas de pontes metálicas com fraturas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

Rimola, B. D., 2016, *Análise da Resposta Estrutural Dinâmica e Verificação de Projeto à Fadiga de Pontes Rodoviárias Mistas (Aço-Concreto)* [Em desenvolvimento]. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Rossigali, C. E., 2006. *Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

Silva, J. G. S. da, 1996. *Análise dinâmica não-determinística de tabuleiros de pontes rodoviárias com irregularidades superficiais*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil