

Análise Dinâmica De Pontes: Estudo Comparativo Entre Cargas Móveis Rodoviárias E Ferroviárias Com O Uso Do Software ANSYS.

Dynamic Analysis of Bridges: A Comparative Study Between Highway and Rail Road Live Loads with ANSYS Software.

Macedo, T. A. (1); Lombardi, D. B. (1); Dutra, R. D. F. (2)

(1) Centro Universitário de Brasília UniCEUB, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, FATECS, Departamento de Engenharia Civil.

(2) Professora Msc., UniCEUB, Departamento de Engenharia Civil.
SEPN 707/709 – Asa Norte, Brasília – DF, 70790-075

Resumo

A atuação de fatores dinâmicos nas estruturas nos leva a uma preocupação com vibrações e respostas estruturais geradas sob essas novas solicitações, pois elas podem gerar desconforto aos usuários e até mesmo causar o colapso da estrutura. Atualmente a análise dinâmica já passa a ser indispensável para o cálculo de grandes estruturas como pontes de concreto armado. Este trabalho apresenta uma comparação gerada com o *software* ANSYS a cerca das deformações sofridas por um modelo de ponte submetido a carregamentos rodoviários ou ferroviários. Como resultados, notaram-se deformações similares, porém vibrações muito mais intensas no modal ferroviário.

Palavra-Chave: Pontes; Dinâmica; ANSYS.

Abstract

This present paper has as objective study the modes and frequencies of bridges' structures caused by dynamic vibrations analyzing different live loads, considering highway and rail road loads. There will be analyzed acceptance, comfort and safety criteria, and there will be demonstrated the design and discretizations of the structure with the finite elements method in the software ANSYS. There was described and analyzed comparatively the most significant modes and frequencies caused by vibrations in both models generated in the software. This paper shows a comparison between the deformation in a bridge model under traffic loads and railroad loads. As results, the deformations were similar, but the vibrations were much more intense with the railroad load.

Keywords: Bridges; Dynamics; ANSYS.

1 Introdução

No Brasil, a frota de carros apresenta uma constante expansão, e a malha ferroviária vem recomeçando a receber investimentos, como por exemplo o “*Programa de Investimento em Logística*” lançado pelo governo federal em 2012. Ao longo de um trecho, rodoviário ou ferroviário, em virtude do relevo da região, muitas vezes faz-se necessária a construção de pontes. Aumentando-se o número de pontes existentes, têm-se lançado novas exigências quanto ao comportamento dinâmico das estruturas viárias, em particular a integridade em trechos de alta velocidade.

Nesse contexto, as pontes de pequeno vão, que são soluções bastante comuns ao longo da malha viária brasileira, são sensíveis à fenômenos de ressonância advindos do passar de trens-tipo, o que segundo ZACHER (2005) pode levar a acelerações excessivas nos tabuleiros e gerar instabilidade e deterioração do lastro nas ferrovias e do asfalto nas rodovias.

A análise dinâmica destas estruturas deve possuir metodologias que contemplem a interação entre o veículo e a estrutura, além da consideração de cargas móveis e do amortecimento global da ponte. Segundo MUSEROS (2002) o modelo físico baseado em cargas móveis não é adequado para o estudo de pontes curtas ($L \leq 20 - 25\text{m}$), uma vez que superestima valores de aceleração e deslocamento das estruturas.

A norma europeia EN1991-2 (2003) propõe a adoção de um coeficiente de amortecimento adicional nos cálculos, a fim de levar em consideração a interação ponte-veículo, favorecendo a utilização do modelo de cargas móveis.

Este artigo pretende avaliar o comportamento dinâmico de uma ponte sob a ação de um carregamento rodoviário, e uma ponte idêntica, sob a ação de um carregamento ferroviário. Os modelos numéricos e análises dinâmicas foram todos desenvolvidos no *software* ANSYS. O presente estudo compara os resultados de deformação e aceleração obtidos para os dois tipos de carregamentos definidos segundo as NBR 7188 (2013) e NBR 7189 (1985).

2 Modelo da ponte

2.1 Descrição

A ponte utilizada na análise foi baseada na estudada pelo livro “Pontes de Concreto Armado” MARCHETTI (2008). A figura 1 abaixo mostra a vista lateral do modelo.

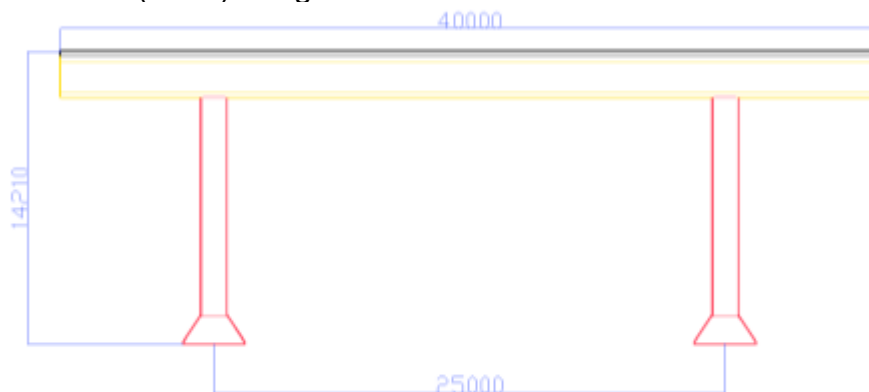
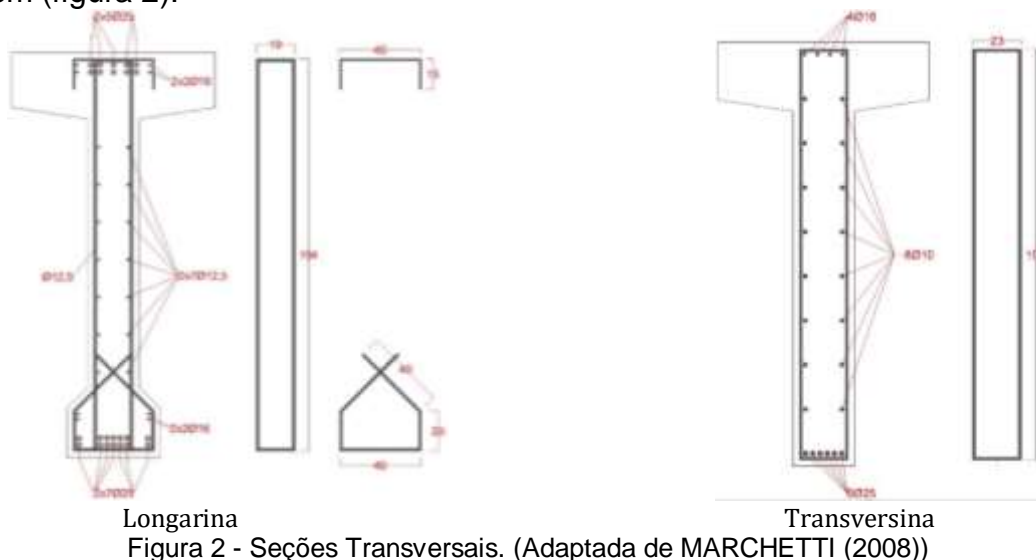


Figura 1 – Projeto da ponte, vista lateral. Cotas em mm. (Adaptada de MARCHETTI (2008))

A ponte possui um vão total de 40m, sendo 25m entre os eixos dos pilares. É constituída por duas vigas longarinas com seção transversal 40x200cm e 3 transversinas com 30x175cm (figura 2).



O Tabuleiro é uma única laje maciça com 20cm de espessura, 40m de comprimento e 8,60m de largura, e serve de suporte para as vias de circulação nos dois sentidos. Considerou-se no modelo numérico a laje simplesmente apoiada nas vigas. Guarda-rodas e outros elementos não-estruturais não foram incluídos.

No modelo rodoviário, a pista é simples e cada faixa de rolamento possui largura $L=3,60m$. O trem tipo escolhido pertence à classe TB 45, com 3 eixos, 450kN de peso total e 5kN/m² de carga uniformemente distribuída em suas 6 rodas. (Figura 3)

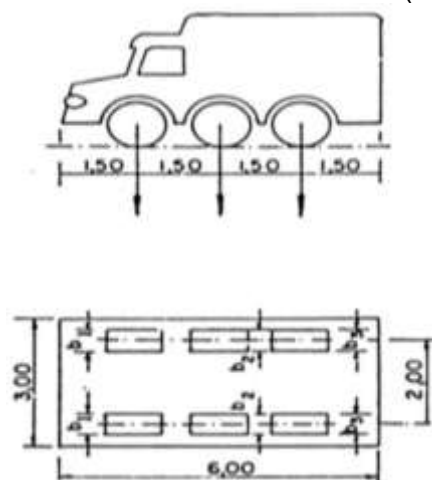
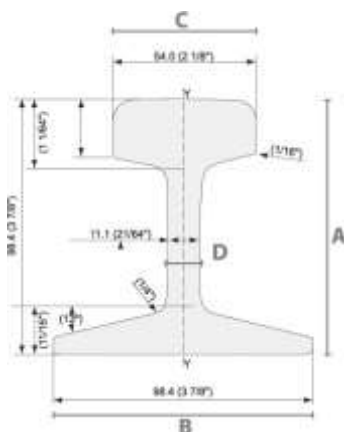


Figura 3 – Caminhão utilizado no trem-tipo TB 45, segundo ABNT NBR 7188. Cotas em m.

No modelo ferroviário, foi escolhida a bitola métrica para os trilhos, com espaçamento de 1000mm entre as faces interiores dos boletos de dois trilhos. O tipo de trilho escolhido foi o TR50 (Figura 4), que possui massa nominal por metro de trilho, segundo a NBR 7590 (2012), igual a 50,35kg/m.



Dimensões do trilho

A (altura)	98,4mm
B (base)	98,4mm
C (boleto)	54,0mm
D (alma)	11,1mm

Figura 4 – Dimensões do trilho TR50.

O modelo de locomotiva adotado para o modelo numérico foi o *TR-3000/BR*, fabricado pela TRANSFESA, cujas propriedades estão listadas na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Características técnicas TR-3000/BR.

Características técnicas		Características técnicas	
Propriedade	Dimensão	Propriedade	Dimensão
Marca	TRANSFESA	Peso	120 t
Modelo	TR-3000/BR	Número de Eixos	6
Velocidade Máxima	130 km/h	Peso por Eixo	20 t
Altura	3,9 m	Potência do Motor	3300 HP
Largura	3 m	Diâmetro da Roda	40 "
Comprimento	19,5 m	Tanque de Combustível	6000 L
Bitola	1000 mm	Líquido de Resfriamento	962 L

2.2 Modelo numérico

As análises dinâmicas foram realizadas com base num modelo numérico de elementos finitos, tridimensional, desenvolvido no *software* ANSYS. Dois modelos foram gerados, um para analisar o carregamento rodoviário, outro para o carregamento ferroviário, a estrutura permaneceu inalterada, mas o tabuleiro foi adaptado para os respectivos veículos.

2.2.1 Estrutura da Ponte

Os modelos foram inteiramente feitos sólidos e as continuidades na estrutura foram levadas em consideração. As barras de aço foram modeladas e adotadas como perfeitamente aderidas ao concreto. As figuras 5 e 6 ilustram os dois modelos desenvolvidos.

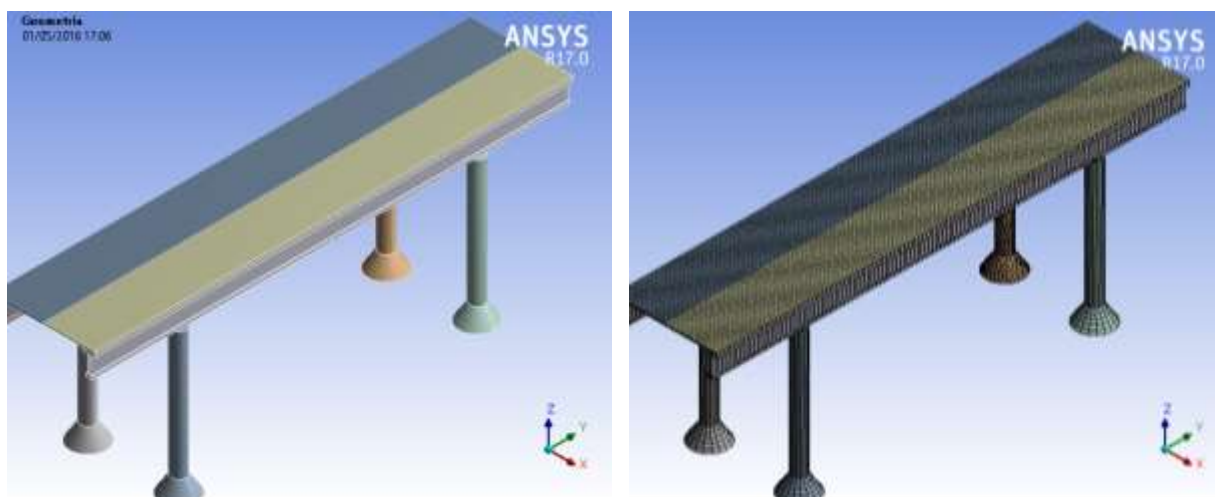


Figura 5 – Modelo numérico tridimensional da ponte rodoviária

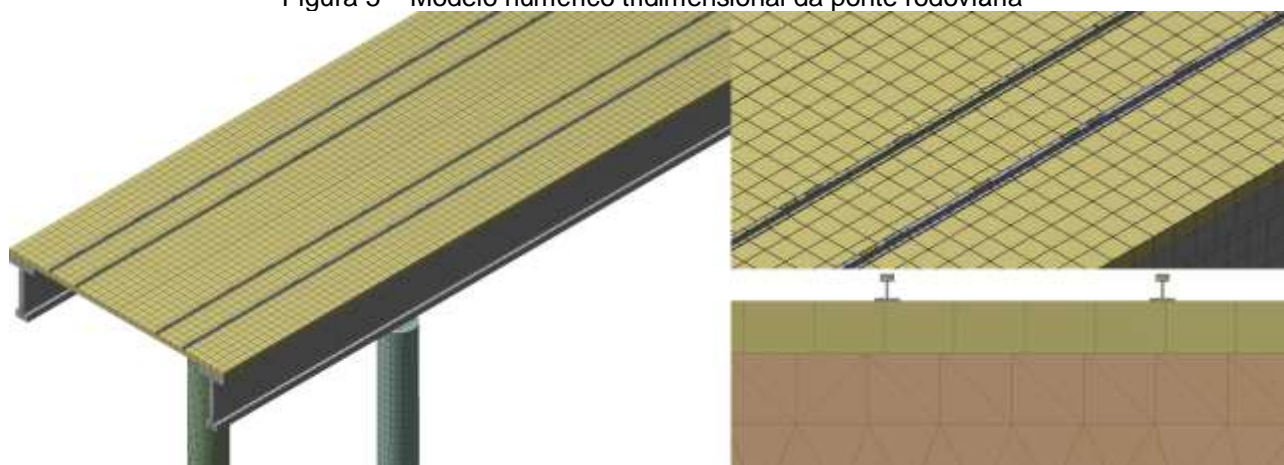


Figura 6 – Modelo numérico tridimensional da ponte ferroviária
(Vista geral, detalhe do tabuleiro e corte transversal)

O modelo transiente dinâmico da ponte foi baseado em parâmetros modais, de frequência de vibração e configurações modais, obtidos por meio da análise modal do ANSYS. As condições verificadas foram: modos de vibração para flexão vertical e torção, frequências naturais dos elementos, acelerações e deslocamentos da estrutura.

A tabela 2 apresenta os valores dos principais parâmetros do modelo numérico da ponte. Os valores dos parâmetros correspondem com os utilizados por MARCHETTI (2008).

Tabela 2 – Parâmetros geométricos e mecânicos do modelo numérico

Parâmetro	Descrição	Valor Adotado	Unidade
ρ_c	Massa Específica do Concreto	2400	kg/m ³
F_{ck}	Resistência a Compressão do Concreto	40	Mpa
E_c	Módulo de Elasticidade do Concreto	35500	Mpa
ν_c	Coefficiente de Poisson do Concreto	0,18	
e_c	Espessura do Tabuleiro	0,65	m
P_s	Massa Específica do Aço	7850	kg/m ³
E_s	Módulo de Elasticidade do Aço	210000	MPa

ν_s	Coefficiente de Poisson do Aço	0,30	
ρ_{las}	Massa Específica do Lastro	1400	kg/m ³
E_{las}	Módulo de Elasticidade do Lastro	145	Mpa
e_{las}	Espessura da Camada de Lastro	0,6	m

Os valores de massa específica e módulo de elasticidade do aço e do lastro foram obtidos conforme a especificação técnica da VALEC (2012) e a rigidez dos apoios de acordo com BONIFÁCIO et. al. (2013).

2.2.2 Carregamento rodoviário

Considerou-se o trem-tipo TB45 locomovendo-se a 60km/h (16,67m/s). Em seguida o tabuleiro foi discretizado de acordo com as posições calculadas do trem-tipo a cada 0,16s, e os carregamentos foram aplicados em função do tempo. Efetuaram-se então as análises Estática Estrutural (Peso Próprio), Modal (Frequências Naturais) e Transiente Estrutural (Carga móvel) a fim de serem obtidos valores de deslocamentos e acelerações gerados na estrutura.

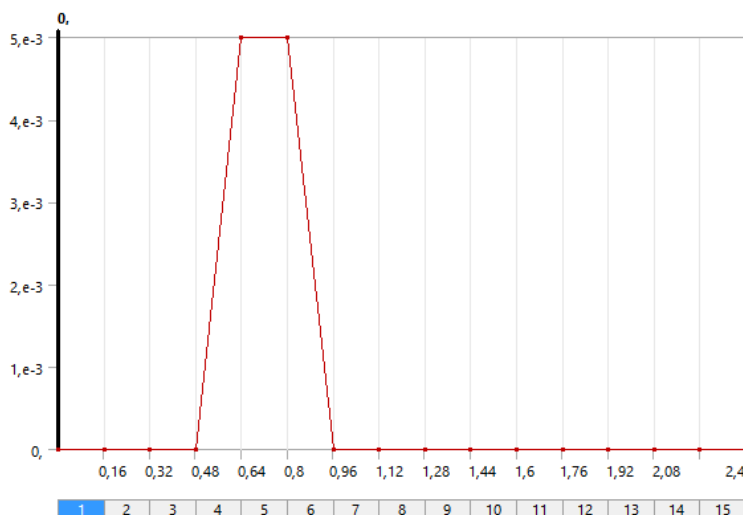


Figura 7 – Load Step definido para cada um dos pontos. [MPa x s]

Tabela 3 – Exemplos de carregamentos definidos em função do tempo

Steps	Time [s]	Pressure [MPa]	Steps	Time [s]	Pressure [MPa]	Steps	Time [s]	Pressure [MPa]
1	0,	5,e-003	1	0,	0,	1	0,	0,
	0,16			5,e-003	0,16		5,e-003	
2	0,32	0,	2		0,32	0,		2
3	0,48		0,	3	0,48		0,	3
4	0,64	0,		4	0,64	0,		4
5	0,8		0,	5	0,8		0,	5
6	0,96	0,		6	0,96	0,		6
7	1,12		0,	7	1,12		0,	7
8	1,28	0,		8	1,28	0,		8
9	1,44		0,	9	1,44		0,	9

10	1,6
11	1,76
12	1,92
13	2,08
14	2,24
15	2,4

10	1,6
11	1,76
12	1,92
13	2,08
14	2,24
15	2,4

10	1,6
11	1,76
12	1,92
13	2,08
14	2,24
15	2,4

2.2.3 Carregamento ferroviário

Considerou-se a locomotiva TR-3000/BR movimentando-se também a 60km/h (16,67m/s). Em seguida o tabuleiro foi discretizado de acordo com as posições calculadas do vagão a cada 0,16s, e os carregamentos de 20tf por eixo foram aplicados em função do tempo. Efetuaram-se então as análises Estática Estrutural (Peso Próprio), Modal (Frequências Naturais) e Transiente Estrutural (Carga móvel) a fim de serem obtidos valores de deslocamentos e acelerações gerados na estrutura.

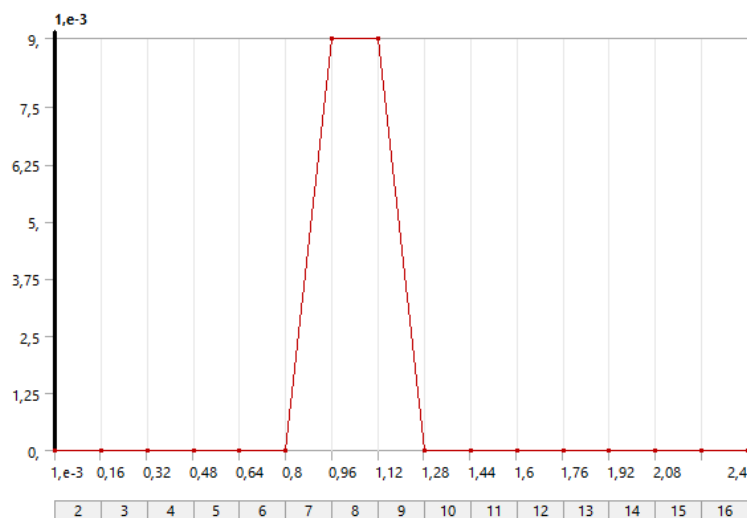


Figura 8 – Load Step definido para cada um dos pontos. [MPa x s]

Tabela 4 – Exemplos de carregamentos definidos em função do tempo

Steps	Time [s]	Pressure [MPa]	Steps	Time [s]	Pressure [MPa]	Steps	Time [s]	Pressure [MPa]
1	0,	9	1	0,	0,	1	0,	0,
	0,16			0,16			9	
2	0,32	0,	2	0,32	0,	2	0,32	9
3	0,48		3	0,48		9		
4	0,64		4	0,64		0,		
5	0,8		5	0,8				
6	0,96		6	0,96				
7	1,12		7	1,12				
8	1,28		8	1,28				
9	1,44		9	1,44				
10	1,6		10	1,6				

11	1,76
12	1,92
13	2,08
14	2,24
15	2,4

11	1,76
12	1,92
13	2,08
14	2,24
15	2,4

11	1,76
12	1,92
13	2,08
14	2,24
15	2,4

3 Análise dinâmica do sistema ponte-veículo

3.1 Modelo rodoviário

Com a análise modal, os seis primeiros modos de vibração obtidos foram os seguintes:

Tabela 5 – Frequências Naturais

Modo	Frequência [Hz]
1	2,2748
2	2,3733
3	2,5329
4	5,7619
5	7,47
6	9,0474

Em seguida, com a análise transiente, determinaram-se as deformações e as acelerações às quais a estrutura foi submetida:

a) Deformações

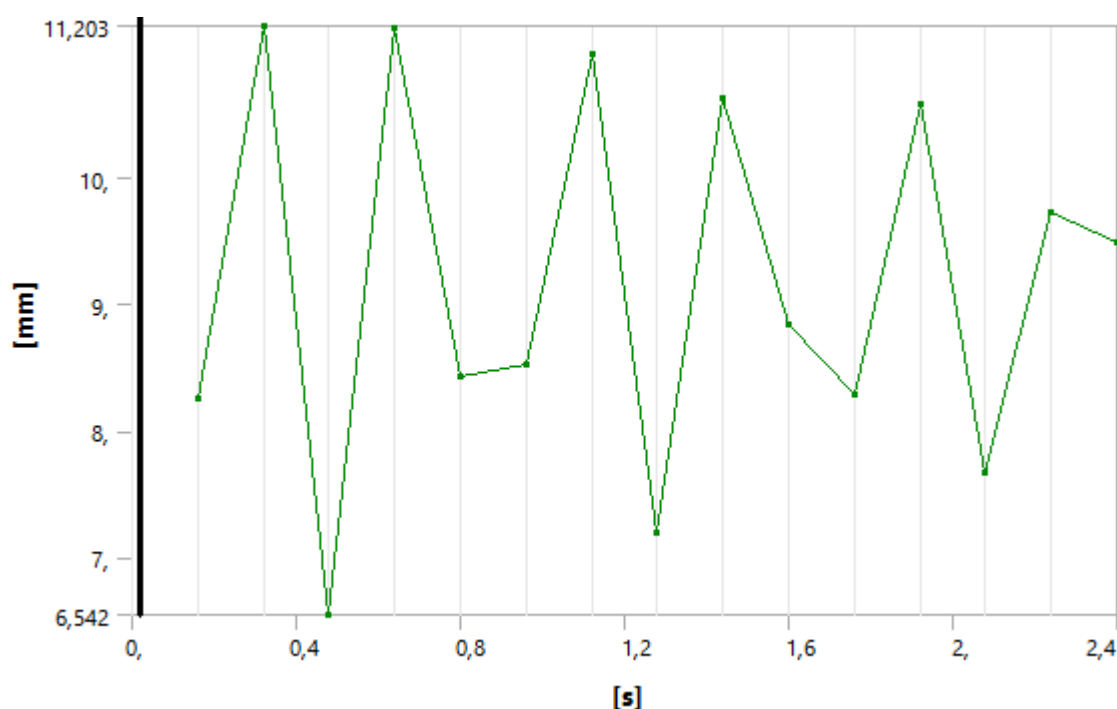


Figura 9 – Deformações máximas da estrutura em função do tempo.

Tabela 6 – Deformações

Tempo [s]	Máximo [mm]
0,16	8,2562
0,32	11,203
0,48	6,542
0,64	11,184
0,8	8,4237
0,96	8,5196
1,12	10,985
1,28	7,1984
1,44	10,635
1,6	8,8465
1,76	8,2887
1,92	10,589
2,08	7,661
2,24	9,7227
2,4	9,488

b) Acelerações

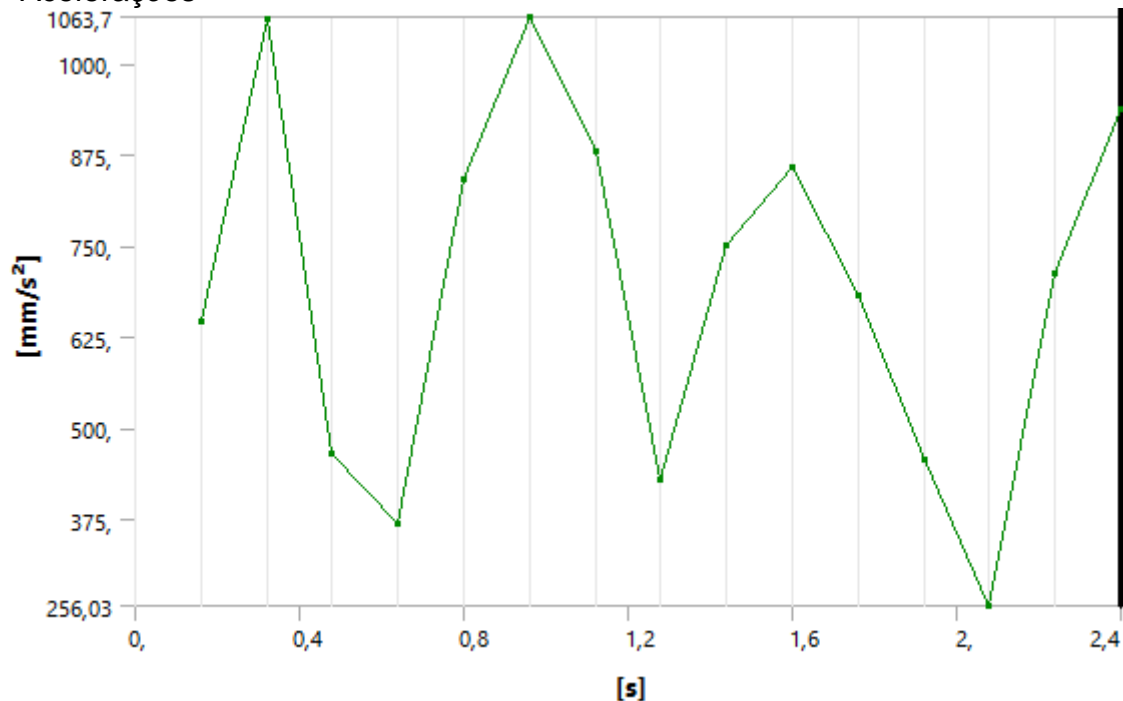


Figura 10 – Acelerações Máximas

Tabela 7 - Acelerações

Tempo [s]	Máximo [mm/s²]
0,16	645,
0,32	1059,7
0,48	465,13
0,64	368,03
0,8	840,43

0,96	1063,7
1,12	878,54
1,28	429,26
1,44	750,24
1,6	856,64
1,76	682,56
1,92	455,67
2,08	256,03
2,24	711,43
2,4	938,52

3.2 Modelo ferroviário

Com a análise modal, os seis primeiros modos de vibração obtidos foram os seguintes:

Tabela 8 – Frequências Naturais

Modo	Frequência [Hz]
1	8,5138
2	11,649
3	14,541
4	16,044
5	17,12
6	18,409

Em seguida, com a análise transiente, determinaram-se as deformações e as acelerações às quais a estrutura foi submetida:

a) Deformações

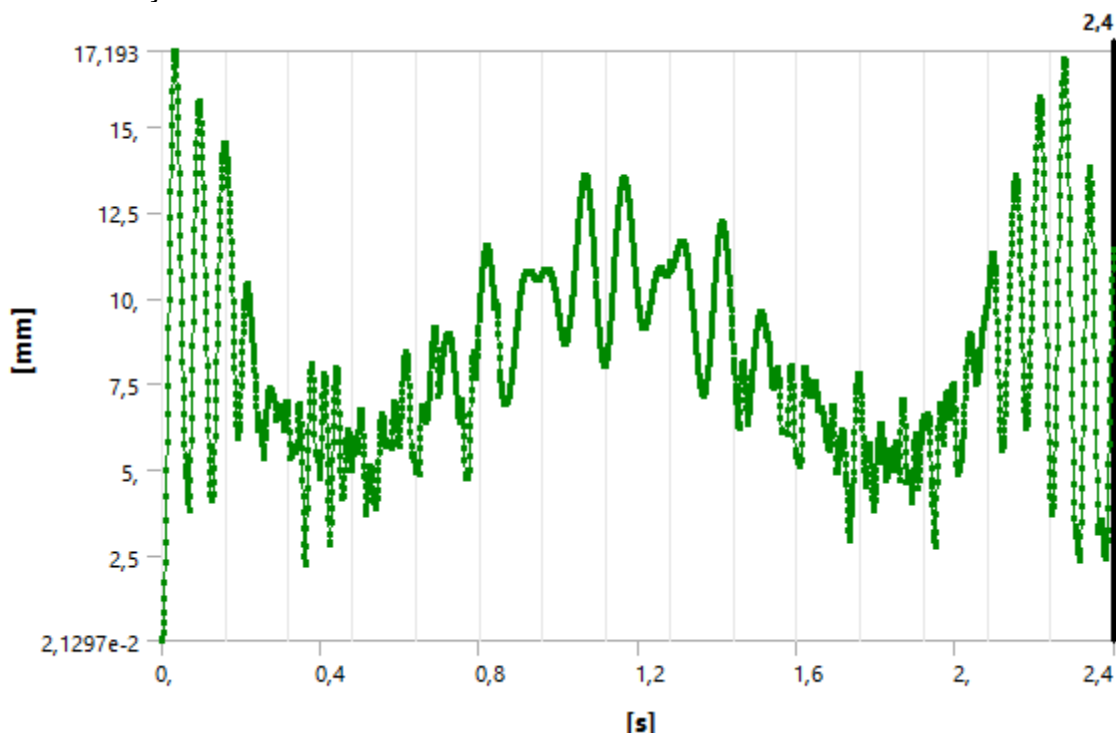


Figura 11 – Deformações Máximas

Tabela 9 – Deformações

Tempo [s]	Máximo [mm]
0,16	14,463
0,32	6,3953
0,48	5,1279
0,64	5,0316
0,8	9,3399
0,96	10,7
1,12	8,1351
1,28	10,942
1,44	8,6266
1,6	5,4004
1,76	7,604
1,92	6,5148
2,08	9,7891
2,24	4,5269
2,4	11,392

b) Acelerações

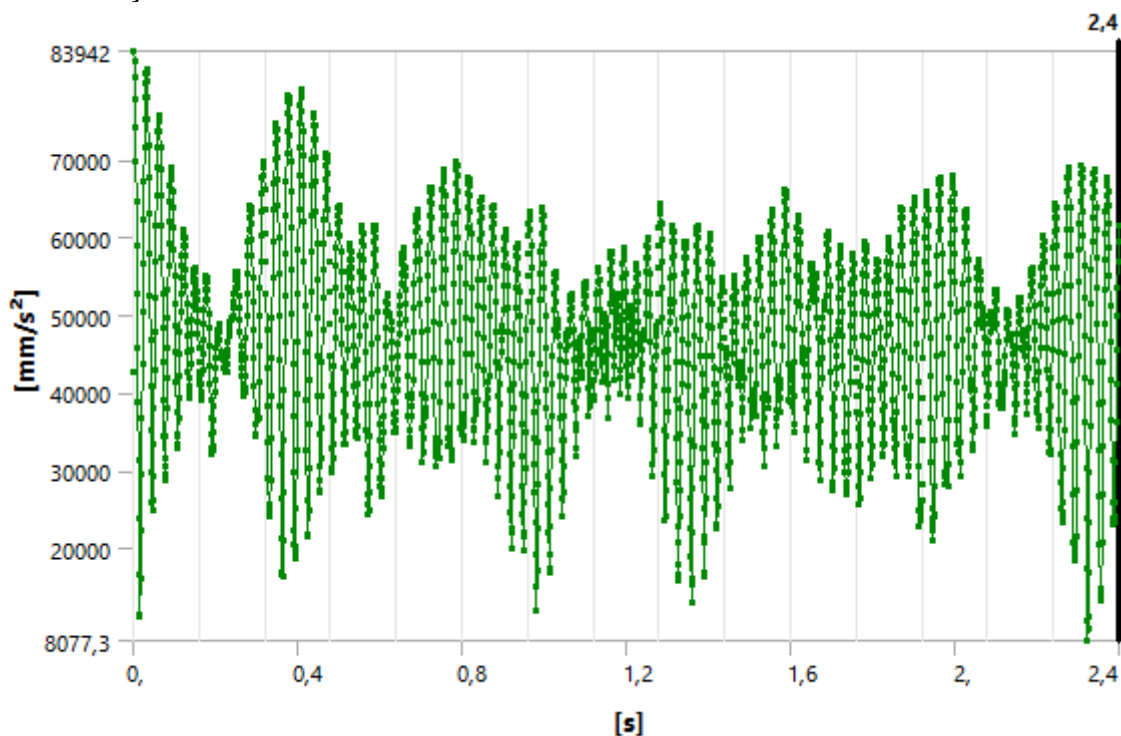


Figura 12 – Acelerações Máximas

Tabela 10 - Acelerações

Tempo [s]	Máximo [mm/s ²]
0,16	44022
0,32	66132
0,48	44597
0,64	37507
0,8	36541
0,96	55011
1,12	45531
1,28	61262
1,44	46998
1,6	41996
1,76	43058
1,92	26024
2,08	38351
2,24	55997
2,4	61612

4 Comparativos

Os dois modelos de pontes analisados, com carregamento rodoviário e ferroviário, possuíam a mesma geometria e trem-tipo se locomovendo a mesma velocidade (60km/h), diferindo unicamente na força aplicada na estrutura e na presença dos trilhos.

Foi observado que as frequências naturais da estrutura aumentaram com a adição do trilho como elemento rígido e as deformações sofridas pelo tabuleiro são superiores com o trem-tipo ferroviário. A deformação máxima com o trem-tipo rodoviário foi calculada 11,184 mm, enquanto com o trem-tipo ferroviário foi de 14,463mm.

Notou-se também que as acelerações máximas sofridas pelo tabuleiro submetido a um carregamento rodoviário foram de 1063,7 mm/s², enquanto com o carregamento ferroviário foi de 66132 mm²/s.

Conclui-se que ambos modais de transporte geram deformações similares, porém o modal rodoviário gera apenas 2% da vibração gerada pelo ferroviário, que acompanha acelerações cerca de 60 vezes maiores.

5 Referências

ABNT, **Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. NBR 7188, Brasil, 2013.

ABNT, **Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias**. NBR 7189, Brasil, 1985.

ABNT, **Trilho Vignole — Requisitos**. NBR 7590, Brasil, 2012.

BONIFACIO et. al., **Análise dinâmica de uma ponte ferroviária de pequeno vão para tráfego de alta velocidade**. IX Congresso de construção metálica e mista, Portugal, 2013.

CARVALHO, M., **Comportamento dinâmico de uma ponte ferroviária de pequeno vão para tráfego de alta velocidade**. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

(CEN), E.C.f.S., **Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges**. EN 1991-2. Bruxelas, 2003.

DNIT, **Especificação Técnica de Material ETM – 002: Lastro Padrão de Brita**. ETM-002, Brasil, 2015.

MARCHETTI, O., **Pontes de concreto armado**. Editora Blucher, São Paulo, 2008.

MUSEROS, P., et al., **Advances in the analysis of short span railway bridges for high speed lines**. Computers & structures. Madrid, Espanha, 2002.

TRANSFESA, **Apostila - Projeto locomotiva TR-3000/BR**. São Paulo, disponível em www.transfesa.com.br (acesso em 06/03/2016).

VALEC, **Estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental EF-151/FNS**. Volume 2.4, Brasil, 2012.

ZACHER, M.e.B., **Dynamic behavior of ballast on railway bridges**. Dynamics of high-speed Railway Bridges. Porto, Portugal, 2005.