

# Aspectos da Influência de Transversinas no Comportamento Dinâmico de Pontes

*Hugo Medeiros de Oliveira<sup>1</sup>  
Lucas Teotônio de Souza<sup>2</sup>  
Paula de Oliveira Ribeiro<sup>3</sup>*

## Resumo

Estudos mostram a importância dos elementos de transversinas em pontes e viadutos construídos por vigas pré-moldadas, aumentando a rigidez do tabuleiro e contribuindo com a distribuição de cargas móveis. Em contrapartida, em virtude da elevada dificuldade de serem moldadas in loco, tanto em termos de consumo de material quanto de demanda de mais mão de obra, muitos engenheiros têm optado por não empregar estes elementos em suas obras. Com isso, a estrutura se torna mais deformável, devendo ser analisada mais criteriosamente. Em termos de esforços, já são mostrados os efeitos destas opções de projeto sobre as lajes e longarinas da estrutura, mas não a influência em seu comportamento dinâmico. Neste cenário, o presente trabalho consiste na comparação de resultados obtidos para o comportamento dinâmico de pontes de concreto armado com 10, 20 e 30 m de comprimento e quatro longarinas biapoiadas, considerando duas condições: transversinas ligadas à laje e sem transversinas. Verifica-se as frequências naturais, além do deslocamento máximo e Fator de Amplificação Dinâmica (FAD) em virtude da passagem do veículo na superestrutura. Para este fim, são concebidos modelos em casca, grelha e unifilar das estruturas, sendo utilizado o SAP2000 e um programa de simulação de tráfego.

**Palavras-chave:** pontes, transversinas, SAP2000.

## 1 Introdução

As transversinas são elementos estruturais que compõem a superestrutura de pontes e viadutos. Segundo Judice *et al.* [1], as transversinas têm a principal função de elevar a rigidez transversal do tabuleiro e, desta forma, melhorar a distribuição das cargas móveis pelas vigas principais. No entanto, nos últimos anos vem sendo prática usual a não utilização de vigas transversinas em pontes de concreto armado. Sua utilização vem decrescendo por apresentar certa dificuldade de execução principalmente quando se têm vigas longarinas pré-moldadas. O custo adicional do uso de transversinas no travamento da estrutura de pontes de concreto armado deve ser levado em conta, devido também ao aspecto executivo das mesmas.

O emprego de vigas transversinas em pontes é requerido com a finalidade de ligar as longarinas. As transversinas podem ser introduzidas nos apoios, sendo

chamadas de transversinas de apoio (TA), e ao longo do vão, sendo chamadas de transversinas intermediárias (TI).

As transversinas têm sido largamente usadas desde o início das construções de pontes em concreto armado. A princípio, seu uso foi baseado em considerações e observações empíricas. Atualmente, a quantidade e o posicionamento das TI é um assunto que vem recebendo atenção especial de engenheiros e pesquisadores em todo o mundo [2].

### 1.1 Estado da arte

Araújo *et al.* [2] realizou uma avaliação comparativa entre os valores de momentos fletores a serem utilizados em projetos de pontes rodoviárias com longarinas protendidas pré-moldadas obtidos com e sem o uso de transversina intermediária. O objetivo principal foi verificar a influência desses elementos nos valores

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, hugo.oliveira@coc.ufrj.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.souza@coc.ufrj.br

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, paula\_ribeiro@usp.br

dos momentos nas longarinas. Utilizando modelo de grelha na modelagem, a presença da transversina intermediária reduziu os esforços tanto na longarina extrema quanto na longarina central. O mesmo não ocorreu com o modelo sólido, no qual se observou que a redução do momento na viga externa foi acompanhada por aumento desse esforço na viga central.

Judice *et al.* [1] avaliou a distribuição de cargas em pontes e viadutos com e sem transversinas internas. Foram analisados modelos em elementos finitos, baseados em tabuleiros reais com seção transversal em vigas múltiplas e os resultados obtidos foram comparados com os propostos na literatura técnica. Concluiu-se que as situações com e sem transversina, em termos de carga na longarina, a existência da transversina teve pouca influência.

Em 2010, Judice *et al.* [3] em continuação ao estudo anterior desenvolveu modelos computacionais com a representação de lajes, longarinas e transversinas com elementos finitos do tipo casca. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos por modelos de menor complexidade e com valores propostos na literatura técnica. Os Modelos 3D e Casca foram os que melhor representaram o comportamento da estrutura, pois capturam o funcionamento conjunto de todas as partes da mesma. O modelo 3D, entretanto, foi considerado pelos autores o mais complexo em termos da interpretação de resultados.

Fulgêncio, de Paula e Azevedo [4] realizaram um estudo comparativo para distribuição de solicitações e valores de deformações em uma ponte rodoviária de concreto armado com e sem o emprego de vigas transversinas no travamento da estrutura. Foi observado que o uso de vigas transversinas proporcionou menores valores de deformações na ponte em estudo. Por meio da análise estrutural realizada com o auxílio do programa SAP 2000, percebeu-se que com o aumento do número de transversinas na ponte, maior foi o acréscimo de rigidez na estrutura gerando assim uma menor deformação da mesma. Observou-se também uma maior distribuição das solicitações com a presença das transversinas, tanto da carga permanente quanto da carga variável.

Cavalcante e Barboza [5] realizaram um estudo numérico no programa SAP 2000 para pontes de vigas pré-moldadas e moldadas *in loco* para diferentes quantidades de transversinas, além de variar as ligações do tabuleiro com os pilares intermediários como flexíveis e monolíticas. Concluiu-se que o uso de transversinas intermediárias aumentou os deslocamentos verticais no tabuleiro, mas reduziu os deslocamentos relativos entre longarinas a partir da redistribuição de solicitações, enquanto as forças de tração nas longarinas foram reduzidas, nos pilares não houve variações nos deslocamentos, mas ocorreu redução das solicitações devido à ação do vento.

## 1.2 Objetivos

Fundamentado no cenário supracitado, o presente trabalho apresenta a comparação de resultados obtidos para o comportamento dinâmico de pontes de concreto armado com quatro longarinas biapoiadas considerando duas condições: transversinas ligadas à laje e sem transversinas. Verifica-se as alterações em termos de frequências naturais, além do deslocamento máximo e Fator de Amplificação Dinâmica (FAD) em virtude da passagem do veículo na superestrutura. Para cumprir com os objetivos, são concebidos três tipos de modelos: em elementos de casca, de onde obtém-se as características dinâmicas, modelo de grelha ajustado, do qual são obtidos frequências e modos de vibração para a criação do último, o unifilar, utilizado na determinação dos deslocamentos dinâmicos máximos. As análises são realizadas com auxílio do programa comercial SAP 2000, fundamentado no Método dos Elementos Finitos, e da ferramenta IVPE, desenvolvida na COPPE [6], que simula a interação veículo-pavimento-estrutura.

## 2 Modelagem das Estruturas

### 2.1 Descrição dos modelos

A estrutura base consiste em uma ponte rodoviária constituída por quatro longarinas pré-fabricadas, biapoiadas e igualmente distribuídas. São estudados três modelos com largura do tabuleiro constante igual a 12,0 m e vãos de 10, 20 e 30 m, denominados, respectivamente, LB-10, LB-20 e LB-30. Foram adotadas duas transversinas de extremidade e uma transversina intermediária em todos os casos analisados. Na seção transversal das pontes admite-se duas proteções do tipo barreira NEW JERSEY em cada extremidade com 0,40 m cada, totalizando 11,20 m de largura possível para tráfego de veículos.

Os elementos da estrutura são fabricados em concreto com resistência característica  $f_{ck} = 40$  MPa. Pela NBR6118 (2014), o módulo de elasticidade longitudinal é  $E_{cs} = 32$  GPa e o coeficiente de Poisson,  $\nu = 0,2$ . Na análise dinâmica, a taxa de amortecimento  $\xi$  para todos os primeiros modos de vibração das estruturas foi considerada igual a 2,5%, tomando como base o trabalho de Araújo [8]. Ressalta-se a exceção para as simulações considerando veículos trafegando a 1,0 km/h, nas quais considerou-se  $\xi = 25\%$ , a fim de diminuir o efeito dinâmico e obter uma resposta estática. A Figura 1 apresenta a seção genérica do caso em estudo e a Tabela 1 as dimensões dos modelos, ambos com unidade em centímetros.

**Tabela 1** – Dimensões dos modelos analisados

Estrutura	Longarina (cm)					Transversina (cm)		
	h	b <sub>s</sub>	b <sub>i</sub>	b <sub>a</sub>	h <sub>s</sub>	h <sub>i</sub>	h <sub>t</sub>	b <sub>t</sub>
LB-10	120	35	30	15	12	15	100	25
LB-20	140	45	40	15	15	18	120	30
LB-30	160	50	45	15	15	20	140	40

**2.2 Descrição do modelo de casca**

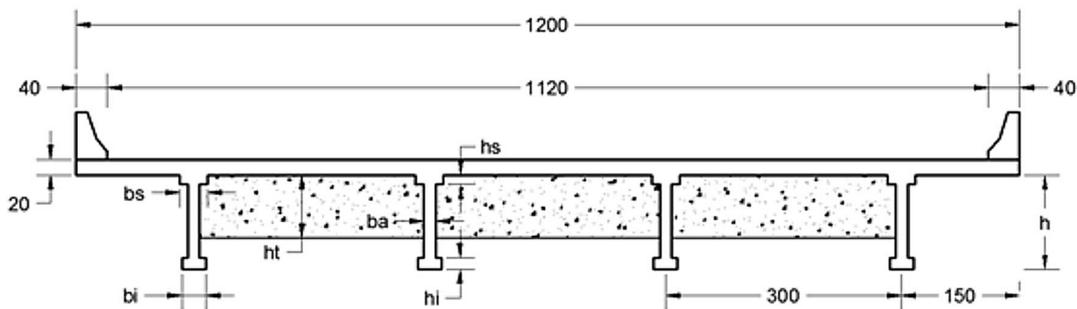
A primeira etapa da modelagem das pontes consiste na elaboração de modelos em elementos de casca para a análise estática e de vibrações livres, os quais são utilizados no ajuste dos modelos de grelha. Este é o modelo mais completo empregado para fins deste estudo, onde os componentes estruturais são representados em sua linha média. A conexão entre o topo das vigas longarinas e transversinas com a laje do tabuleiro é viabilizada por meio do uso de elementos de ligação, que têm elevada rigidez e massa nula.

Os componentes da estrutura foram discretizados para se obter elementos retangulares com todas as dimensões não excedendo 0,30 m. Além disso, optou-se por uma malha “mais quadrada” possível, de sorte a evitar a distorção dos elementos durante a análise. Para as condições de contorno, foram impedidas as translações das três direções nos pontos onde existem

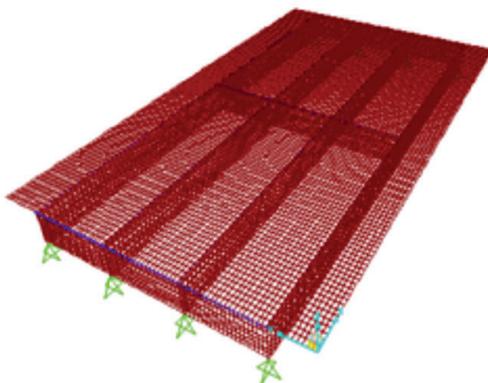
apoios. A Figura 2 mostra o modelo de casca para estrutura LB-20, com transversinas.

**2.3 Descrição do modelo de grelha**

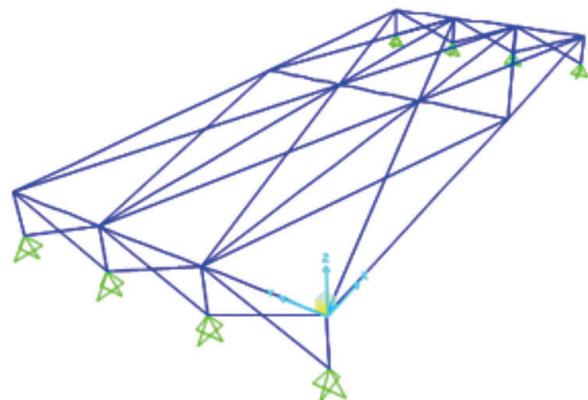
A partir do modelo em elementos de casca descrito na seção 2.2, ajusta-se um modelo de grelha por meio da comparação direta das formas modais de flexão e torção da estrutura, bem como suas frequências naturais e deslocamentos devido a cargas estáticas sendo ainda comparadas as massas globais dos dois modelos. O modelo ajustado de grelha é utilizado para a obtenção dos autovalores e autovetores da estrutura que serão utilizados para a criação do modelo unifilar. O modelo de grelha é constituído de elementos de barras tridimensionais cada uma com doze graus de liberdade sendo seis de translação e seis de rotação para representar os componentes da ponte. Esses elementos são mais fáceis de serem implementados e processados matematicamente do que os modelos com elementos em casca. No entanto muitas das características da estrutura não podem ser representadas perfeitamente nesse tipo de modelo devido à característica unidimensional de seus elementos. As representações da rigidez da laje em seu próprio plano e da posição excêntrica do apoio em relação ao eixo das longarinas são feitas por elementos de rigidez [7]. A Figura 3 mostra o modelo de grelha para estrutura LB-20, com transversinas.



**Figura 1** – Corte transversal genérico das pontes.



**Figura 2** – Modelo de casca 3D da ponte LB-20.



**Figura 3** – Modelo de grelha 3D da ponte LB-20.

## 2.4 Descrição do modelo unifilar e programa de interação veículo-pavimento-estrutura

O modelo unifilar é uma modelagem simplificada, onde a estrutura da ponte é representada com elementos de barra alinhados ao eixo longitudinal da obra, construído a partir das formas modais de vibração, de flexão vertical e torção, de um modelo de grelha tridimensional da estrutura [8]. O modelo de grelha é ajustado a um modelo de casca em termos de rigidez e características dinâmicas [7]. Esta sequência foi utilizada na análise de todas as estruturas neste trabalho, portanto, para cada estrutura foram feitos três modelos matemático-numéricos distintos.

As principais vantagens do modelo unifilar estão relacionadas à eficiência no tempo de processamento e a facilidade da obtenção das solicitações seccionais nas longarinas a partir do histórico de amplitudes modais aplicados ao modelo de grelha (modelo intermediário) [8]. Por esses motivos é interessante estabelecer as condições para as quais a solução obtida com modelo unifilar seja representativa da modelagem mais completa, que seria o modelo de casca.

Já a modelagem do veículo é feita por um sistema plano de massas e molas associadas com vários graus de liberdade [8]. Rossigali [9] mostra que o veículo com maior frequência de passagem nas

rodovias brasileiras é o caminhão de três eixos (3C) classificado como: monolítico com conexão tipo reboque, eixo dianteiro isolado com dois pneumáticos e eixos traseiros em tandem duplo. Sendo assim, esse será o veículo considerado neste trabalho.

Para o método unifilar, o veículo de três eixos é representado por um modelo mecânico plano composto por uma massa suspensa, que representa o corpo do veículo e a carga nele transportada, apoiada em três massas não suspensas, que compreendem os conjuntos eixo-roda-pneu, Figura 4. A ligação entre essas massas é feita por meio das suspensões formadas pelo conjunto mola-amortecedor e por fim as massas não suspensas se apoiam no pavimento da estrutura por meio do conjunto mola-amortecedor equivalentes aos pneus. O modelo matemático é composto pelos seguintes graus de liberdade: deslocamento vertical e rotacional da massa suspensa como corpo rígido e deslocamentos verticais das três massas não suspensas, resultando em cinco graus de liberdade (5 GL).

A interação dinâmica entre o veículo e a estrutura da ponte é caracterizada pela excitação realizada pelo veículo, que atua como um sistema mecânico, quando trafega pela mesma sob determinada velocidade. Tal excitação é resultante do efeito inercial da massa suspensa do veículo, o movimento vertical é induzido pela irregularidade geométrica do pavimento e pelo

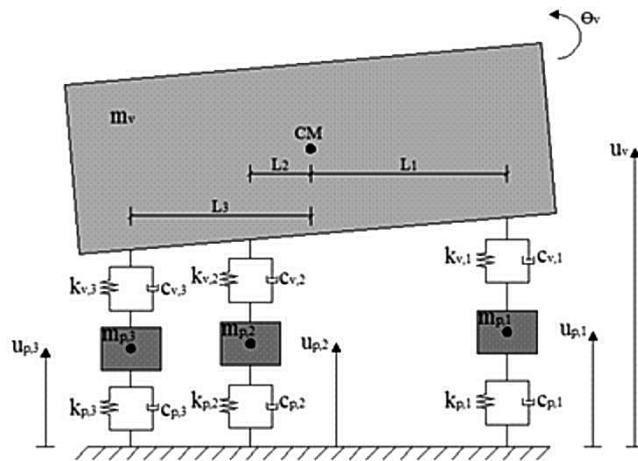


Figura 4 – Modelo mecânico plano para veículo de três eixos [10].

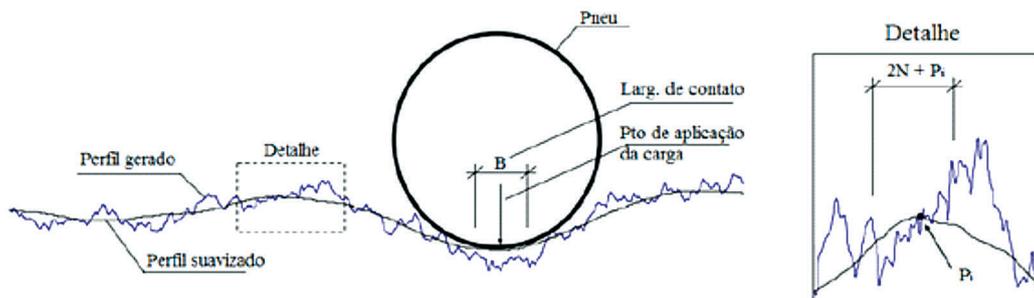


Figura 5 – Perfil de rugosidade longitudinal e processo de suavização [6].

próprio movimento da estrutura. O sistema mecânico-estrutural de um eixo do veículo 3C acoplado à estrutura flexível cuja superfície de contato é dada pelo perfil rugoso do pavimento apresenta em cada ponto de contato do veículo com a estrutura forças de interação de componentes elástica e de amortecimento, que são funções do movimento da massa do eixo considerado em relação ao movimento da estrutura. A Figura 5 apresenta um aspecto genérico de perfil de rugosidade longitudinal e o processo de suavização.

Os modos de flexão e torção do modelo unifilar foram obtidos de maneira análoga à apresentada em Araújo [8]. O modelo unifilar com seus autovetores, por sua vez, é excitado com um veículo trafegando em condições pré-determinadas, com as características da estrutura, do pavimento e do veículo. Essa mesma sequência de modelagem foi utilizada por Melo [6], Mota [7] e Araújo [8].

A análise dinâmica da interação veículo-pavimento-estrutura será feita a partir do programa IVPE v5, que utiliza um modelo simplificado unifilar com elementos de barra alinhados, construído a partir de formas modais de vibração de flexão vertical e torção, de um modelo de grelha tridimensional calibrado da estrutura. O programa que será utilizado neste trabalho encontra-se validado experimentalmente para veículo do tipo 3C, Mota [7].

### 2.5 Modelo analítico-numérico unifilar da interação veículo-pavimento-estrutura

Conforme descrito na seção 2.4, a análise da interação veículo-pavimento-estrutura realizada pelo programa IPVE utiliza elementos de barra de um modelo unifilar, onde se consideram os modos de flexão vertical e torção transversal das pontes. Os modos são obtidos de um modelo de grelha da estrutura,

que por sua vez são ajustados de um modelo de casca em termos de rigidez e características dinâmicas [8]. Os modos de flexão vertical  $\phi_{ij}$  são calculados pela média das amplitudes modais extraídas do modelo 3D e os modos de torção pela rotação da seção transversal  $\alpha_{ij}$  obtida pela relação entre as amplitudes verticais, conforme apresentado nas equações (1), (2) e Figura 6. Os valores obtidos são então normalizados.

Modos de flexão

$$\phi_{ij} = \frac{\phi_{v1} + \phi_{v2}}{2} \tag{1}$$

Modos de torção

$$\alpha_{ij} = \frac{\phi_{T1} - \phi_{T2}}{e} \tag{2}$$

Para caracterização das irregularidades do pavimento que irão gerar as excitações ao veículo, adota-se funções de densidade espectral obtidas experimentalmente. Neste trabalho utiliza-se um espectro de rugosidade do pavimento ajustado de Honda *et al.* [11], assim,

$$S(\omega_k) = \bar{\alpha} \cdot \omega_k^{-\beta} \tag{3}$$

onde  $\bar{\alpha}$  é o coeficiente espectral de rugosidade e depende do estado de conservação do pavimento,  $\beta$  é o expoente de rugosidade do espectro que depende do material que constitui o pavimento e  $\omega_k$  é a frequência de rugosidade em ciclos por metro. Neste estudo foram adotados valores de  $\beta = 2,03$  para pavimento asfáltico e  $\bar{\alpha} = 0,5 \cdot 10^{-6}$  considerando-se a condição do pavimento boa. Para que o contato entre o pavimento e o pneu seja representado de forma mais realística, o

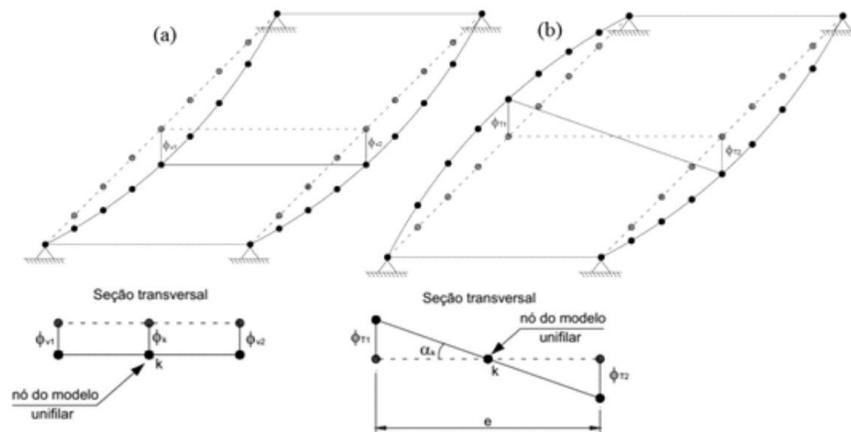


Figura 6 – Representação dos modos de flexão vertical (a) torção; (b) [8].

perfil é ainda suavizado pelo método da média móvel, Figura 5. Além das informações modais da estrutura, são necessários dados do veículo, como rigidez e amortecimento do pneu e suspensão, massa não suspensa e peso aplicado em cada eixo.

### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1 Determinação das propriedades dinâmicas

As estruturas analisadas foram modeladas por elementos de casca, a partir do qual, foi possível determinar as frequências naturais e modos de vibração para cada caso. Buscou-se comparar os valores das frequências de forma a verificar as possíveis diferenças nos casos com e sem transversina. Serão avaliados em cada estrutura os dois primeiros modos de flexão vertical e torção. Os resultados de vibração livre do modelo de casca serão ainda utilizados no ajuste do modelo de grelha. A Tabela 2 mostra os valores para as pontes em análise.

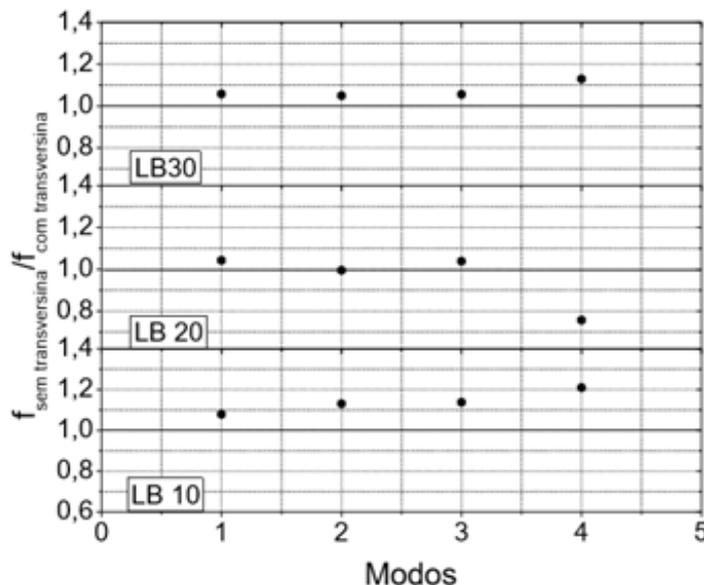
A Figura 7 mostra a relação entre os valores das frequências naturais nas estruturas sem e com transversina. Em todas as estruturas, a frequência natural das pontes sem transversina é maior que nos modelos com transversina. Esse fato pode ser explicado uma vez que, nas pontes sem transversina, a massa total é menor, ocorrendo redução da contribuição da mesma no peso da estrutura. Fica evidenciado também que, a redução da rigidez das pontes pela ausência da transversina, para os casos da flexão vertical e torção, não contribui de forma significativa nas frequências naturais, sendo estas maiores nas pontes sem transversinas.

#### 3.2 Ajuste dos modelos de grelha

Como forma de melhor representar as pontes a partir do modelo de grelha, adota-se o processo de ajuste que visa aproximar o comportamento dinâmico e estático deste modelo com o de casca 3D. Para isso, são incluídos além das longarinas e transversinas, elementos longitudinais que representam a rigidez da laje e transversina e montantes que representam a altura

**Tabela 2** – Frequências naturais dos modelos em casca analisados.

Estruturas	Frequências (Hz)					
	LB-10		LB-20		LB-30	
	C o m Transv.	S e m Transv.	C o m Transv.	S e m Transv.	C o m Transv.	S e m Transv.
1º Flexão	24,88	26,85	9,57	9,98	5,14	5,44
2º Flexão	34,86	39,43	18,95	18,86	10,80	11,34
1º Torção	23,93	27,24	9,51	9,88	5,21	5,50
2º Torção	34,95	42,29	19,05	14,43	13,14	14,84



**Figura 7** – Relação entre as frequências naturais dos modelos, em casca sem e com transversina.

das longarinas no apoio, Figura 3. O ajuste é realizado determinando seções fictícias para estes elementos de forma a se obter resultados próximos ao modelo de casca.

Para os componentes longitudinais utilizou-se elementos quadrados, sendo necessário, portanto, a obtenção da dimensão de seu lado. Para os montantes, com seção retangular, fixou-se a largura, equivalente a razão entre a área e a altura do perfil, logo o ajuste é responsável por determinar a altura da seção transversal. As propriedades desses elementos são iguais à do concreto, no entanto, atribui-lhes valor de massa nulo.

O ajuste foi realizado comparando-se as frequências naturais de flexão e torção até o segundo modo. Foram também determinados os deslocamentos máximos na longarina 1 devido a uma carga pontual de 100 kN aplicada sobre a mesma, considerando também o peso próprio. Os resultados obtidos pelo programa SAP2000 estão apresentados na Tabela 3.

Os valores tanto de deslocamento quanto frequências naturais se aproximaram em todos os casos, portanto, é válida a adoção dos modelos de grelha para determinação dos modos e frequências fundamentais a

serem utilizados no modelo unifilar, a partir do qual serão obtidos os deslocamentos dinâmicos devido à passagem do veículo sobre as pontes.

### 3.3 Cálculo dos deslocamentos dinâmicos máximos

Fundamentado na descrição dos modelos apresentados neste trabalho e utilizando o programa IVPE, foram determinados os deslocamentos máximos nas pontes devido à passagem de um veículo 3C, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4.

As velocidades dos veículos trafegando sobre as estruturas variam de 20 km/h a 120 km/h, aumentando com intervalo de 20 km/h. Além dos deslocamentos, obteve-se os Fatores de Amplificação Dinâmica (FAD's), determinados comparando os deslocamentos máximos obtidos para cada velocidade com o resultante da passagem do veículo a 1 km/h, adotado neste trabalho como a resposta estática. Em todos os casos, considera-se a contribuição dos dois primeiros modos de flexão e de torção, portanto, quatro modos no total. A Tabela 5 apresenta os deslocamentos máximos das pontes para cada velocidade analisada.

Tabela 3 – Resultado do ajuste do modelo de grelha 3D.

Estrutura	Modelo	Deslocamento (m)		Frequências (Hz)			
		Peso Próprio	C. Pontual	1º Flexão	2º Flexão	1º Torção	2º Torção
LB-10 Com Transv.	Casca	0,0005	0,0003	24,88	34,86	23,92	34,95
	Grelha	0,0005	0,0003	24,80	36,91	25,52	45,27
LB-10 Sem Transv.	Casca	0,0004	0,0003	26,85	39,43	27,24	42,29
	Grelha	0,0004	0,0003	27,59	41,33	28,03	36,83
LB-20 Com Transv.	Casca	0,0034	0,0009	9,57	18,95	9,51	19,05
	Grelha	0,0037	0,0011	9,13	19,65	9,51	23,43
LB-20 Sem Transv.	Casca	0,0032	0,0010	9,98	18,86	9,88	14,43
	Grelha	0,0031	0,0012	9,57	20,13	9,60	16,91
LB-30 Com Transv.	Casca	0,0120	0,0180	5,14	10,80	5,21	13,14
	Grelha	0,0121	0,0190	5,12	11,12	5,51	14,20
LB-30 Sem Transv.	Casca	0,0108	0,0021	5,44	11,34	5,50	14,84
	Grelha	0,0120	0,0022	5,53	12,00	5,71	14,40

Tabela 4 – Propriedades do veículo 3C utilizado na determinação dos deslocamentos dinâmicos.

Eixo	Peso (kN)	Dist. Eixos (m)	K <sub>s</sub> (kN/m)	K <sub>p</sub> (kN/m)	C <sub>s</sub> (kNs/m)	C <sub>p</sub> (kNs/m)	m <sub>p</sub> (t)
1	67,5	-	580	1680	6	2	0,635
2	91,25	4,8	1180	3360	12	4	1,066
3	91,25	1,3	1180	3360	12	4	1,066

A Figura 8 apresenta a relação entre os deslocamentos máximos das pontes com e sem transversina para cada velocidade analisada.

Verifica-se que os deslocamentos das pontes LB-10 e LB-30 são sempre maiores nos casos com transversina. O mesmo não ocorre nas pontes LB-20, onde os maiores deslocamentos ocorrem nas estruturas sem transversina. Para as duas condições de transversinas, a maior variação é evidenciada na ponte LB-30, com 30% de diferença. Nas demais estruturas, essa variação não ultrapassou 10%.

A Tabela 6 apresenta os FAD calculados para cada situação e a máxima amplificação dentre as velocidades avaliadas.

Tal como ocorre com os deslocamentos, o máximo FAD no caso de estrutura sem transversina é maior que na ponte com transversina apenas no modelo LB-20, conforme apresentado na Fig. 9. Apesar disso, em todas as situações, os FAD máximos são próximos nos dois casos.

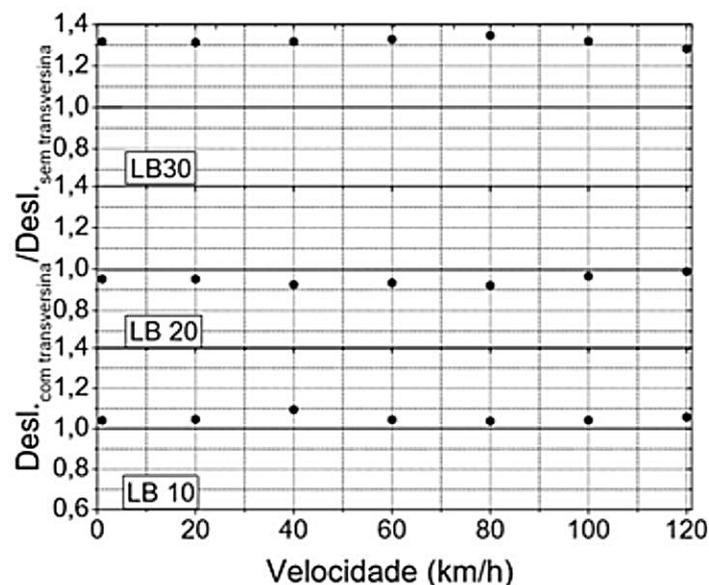
## 4 Conclusões

A modelagem tridimensional das pontes utilizando elementos de casca é a que melhor representa a estrutura, por reproduzir o funcionamento global de cada componente analisado. No entanto, a própria literatura mostra que os resultados obtidos são de difícil compreensão, tornando-se conveniente a análise a partir de outros modelos, como o caso do modelo de grelha e unifilar. Por esse fato utiliza-se o modelo de casca das estruturas no ajuste do modelo de grelha de forma a se obter respostas estáticas e dinâmicas próximas nos dois casos.

Os elementos de transversinas que compõem a superestrutura têm a principal função de elevar a rigidez transversal do tabuleiro e melhorar a distribuição das cargas móveis. O presente trabalho avaliou o papel deste elemento estrutural em relação ao funcionamento dinâmico em modelos de pontes, tendo em vista a tendência de suspensão destes em projetos.

**Tabela 5** – Deslocamentos máximos para as pontes Com e Sem transversinas devido à passagem do veículo 3C.

Estrutura		Deslocamentos (m)						
		V=1km/h	V=20km/h	V=40km/h	V=60km/h	V=80km/h	V=100km/h	V=120km/h
LB-10	Com	0.000434	0.000449	0.000488	0.000471	0.000408	0.000444	0.000514
	Sem	0.000417	0.000429	0.000446	0.000451	0.000393	0.000426	0.000486
LB-20	Com	0.001769	0.001969	0.001972	0.002061	0.001904	0.001818	0.001582
	Sem	0.001858	0.002067	0.002131	0.002207	0.002067	0.001882	0.001600
LB-30	Com	0.005214	0.005281	0.005770	0.005477	0.005760	0.006234	0.005896
	Sem	0.003957	0.004020	0.004379	0.004122	0.004276	0.004724	0.004596



**Figura 8** – Relação entre os deslocamentos máximos para as pontes Com e Sem transversinas devido à passagem do veículo 3C.

Para isso, fez-se a comparação entre as frequências naturais e modos de vibração de pontes biapoiadas com vãos de 10, 20 e 30 m. Além disso, calculou-se os deslocamentos dinâmicos máximos devido à passagem do veículo 3C padrão.

Em todas as estruturas analisadas, a frequência natural das pontes sem transversinas é maior que nos modelos com transversina. Isso porque, nesse último, a massa total é maior, sendo a principal responsável por esta característica nos exemplos estudados. Além disso, a redução da rigidez das pontes pela ausência da transversina não contribuiu significativamente com as frequências naturais, já que essas ficaram maiores nas pontes sem transversinas. Isto é, a perda de rigidez com a ausência de transversinas é menor que a perda de massa, logo as frequências fundamentais são maiores.

Obteve-se os deslocamentos máximos para as pontes analisadas e não se verifica nenhuma tendência de situação crítica no que diz respeito às estruturas com e sem transversinas. Isso, pois para os modelos LB-10 e LB-30 os deslocamentos foram maiores nas pontes com transversina, ocorrendo o inverso para a ponte LB-20. Ao se comparar os FAD, que são o

principal indicativo da contribuição do efeito dinâmico na estrutura, percebe-se que, da mesma forma que para os deslocamentos, não existe uma tendência. Apesar disso, conclui-se concluir que, ao analisar os FAD máximos, os valores mantiveram-se próximos nos casos com e sem transversina. Portanto, em termos de comportamento dinâmico devido à interação veículo-pavimento-estrutura, a existência ou não da transversina tem pouca influência.

## Referências

- [1] JUDICE, F. M. S., PERLINGEIRO, M. S. P. L., DIAZ, B. E. e SOUZA LIMA, S. **Avaliação da distribuição transversal de cargas em tabuleiros de pontes sem transversinas internas.** In: 50º Congresso Brasileiro de Concreto. 16 p. Salvador, 2008.
- [2] ARAUJO, M. C., CAI, S. C. S., TEIXEIRA, P. W. G. N. e NEIVA, V. M. **Distribuição transversal de cargas em ponte de concreto protendido pré-moldada: avaliação da influência das transversinas com uso de procedimentos da NBR 6118/2003, do**

Tabela 6 – FAD’s para as pontes Com e Sem transversinas.

Estrutura		FADs						
		V=20km/h	V=40km/h	V=60km/h	V=80km/h	V=100km/h	V=120km/h	Máximo
LB-10	Com	1.035	1.126	1.086	0.940	1.024	1.186	1.186
	Sem	1.029	1.072	1.081	0.944	1.022	1.166	1.166
LB-20	Com	1.114	1.115	1.166	1.076	1.028	0.895	1.166
	Sem	1.112	1.147	1.188	1.112	1.013	0.861	1.188
LB-30	Com	1.013	1.107	1.050	1.105	1.196	1.131	1.196
	Sem	1.016	1.106	1.042	1.080	1.194	1.161	1.194

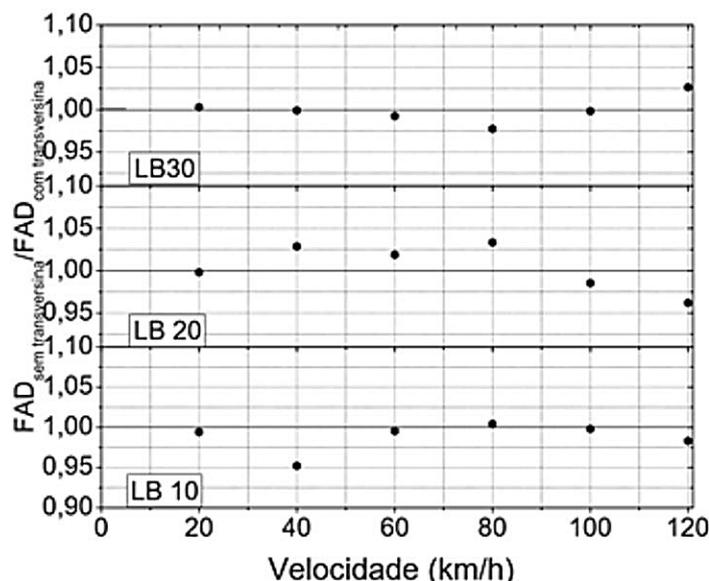


Figura 9 – Relação FAD's para as pontes Sem e Com transversinas.

**LaDOTD e de modelos de elementos finitos sólidos.**

In: 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado. 12 p. São Carlos, 2005.

[3] JUDICE, F. M. S., PERLINGEIRO, M. S. P. L., DIAZ, B. E. e SOUZA LIMA, S. **Avaliação da Distribuição de Cargas em Tabuleiros de Pontes sem Transversinas Internas – 2ª Parte.** In: III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, Brasil, 2010

[4] FULGÊNCIO, J. P. T. O. R.; DE PAULA, F. A.; AZEVEDO, C. P. B. **Análise do Uso de Transversinas em Pontes de Concreto Armado.** In: VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

[5] CAVALCANTE, G. H. F., BARBOZA, A. S. R. **Análise da influência de transversinas no comportamento estrutural de pontes em vigas pré-moldadas e moldadas “in loco”.** In: IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

[6] MELO, E. S. **Interação dinâmica veículo-estrutura**

**em pequenas pontes rodoviárias.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[7] MOTA, H. C. **Esforços extremos em pontes para modelo de cargas móveis no Brasil.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

[8] ARAÚJO, A. O. **Modelos analítico-numéricos para interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura de ponte rodoviária.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

[9] ROSSIGALI, C. E. **Atualização do Modelos de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil. Tese de D.Sc.** COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

[10] MENDONÇA, R. F. **Geração de Dados para Modelo Dinâmico de Cargas Móveis em Pontes.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

[11] HONDA, H., KAJIKAWA, Y., KOBORI, T. **Spectra of Road Surface Roughness on Bridges.** In: Journal of the Structural Division, v. 108, ST 9, p. 1956-66, 1982.