



III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas
Estruturas: atuais realizações e projetos futuros
Rio de Janeiro, 21 a 23 de abril de 2010



Modelagem por Elementos Finitos para a Análise Modal de uma Ponte Ferroviária Protendida.

Dra. Regina Augusta Campos Sampaio

Professora da Universidade Federal do Pará, rsampaio@ufpa.br

Dr. Remo Magalhães de Souza

Professor da Universidade Federal do Pará, remo@ufpa.br

Jennefer Lavor Bentes

Graduanda da Universidade Federal do Pará, jenneferlb@hotmail.com

Caio Felipe Laurindo

Graduando da Universidade Federal do Pará, caiolaurindo@hotmail.com.br

Resumo:

Este trabalho apresenta a análise modal de uma ponte ferroviária protendida, constituída por sete vãos isostáticos e superestrutura do tipo viga invertida. A ponte analisada é parte de um projeto de pesquisa que tem como objetivo desenvolver uma metodologia para monitoramento da integridade estrutural de pontes ferroviárias ao longo da estrada de ferro Carajás (EFC). Foram desenvolvidos quatro modelos em elementos finitos no programa comercial SAP2000. Em dois modelos a superestrutura é modelada em elementos de barra (*frame*), e os outros dois com elementos do tipo casca (*shell*). Foi considerado todo o carregamento permanente da estrutura; as massas equivalentes aos elementos da via, tais como: lastro, dormentes e trilhos; as propriedades dos elementos de apoio (neoprenes) e a interação solo-estrutura, de modo que os modelos numéricos tivessem o comportamento mais próximo daquele apresentado pela estrutura real. Os modelos numéricos foram calibrados a partir dos dados da análise dinâmica experimental realizada na estrutura, e após a calibragem foram comparadas as respostas da análise modal obtida nos modelos.

Palavras-chave:

Análise modal, pontes ferroviárias, elementos finitos.



1 Introdução

Este trabalho descreve os procedimentos realizados na modelagem numérica de uma ponte ferroviária protendida e os resultados da análise modal obtida dos modelos desenvolvidos.

A estrutura se trata de uma ponte ferroviária protendida de sete vãos isostáticos, localizada ao longo da Estrada de Ferro Ponta da Madeira – Carajás (EFC), construída na década de 80 e solicitada de forma contínua por trens carregados com minério de ferro.

A representação numérica da estrutura consistiu em desenvolver quatro modelos numéricos em elementos finitos no software comercial *SAP2000* e para a calibração destes modelos foram tomados os resultados da análise dinâmica experimental realizada na obra.

No desenvolvimento dos modelos numéricos, tornou-se primordial o conhecimento das características da estrutura e dos carregamentos que a solicitam. Por isso, o trabalho consistiu em inicialmente estudar os projetos e a memória de cálculo da obra, para em seguida poder definir as características da modelagem.

No capítulo seguinte é feita uma descrição geral da ponte.

As propriedades dos elementos estruturais estão descritos no terceiro capítulo. Neste também está descrita de que forma foi considerada a conectividade entre a superestrutura e a mesoestrutura, e a interação solo-estrutura, ambas com a utilização de elementos de mola.

No quarto capítulo estão descritos os modelos numéricos desenvolvidos, e ao final, apresenta-se de que forma os modelos numéricos foram calibrados e os parâmetros modais (frequências e modos) obtidos na análise modal.

2 Descrição da Obra

A ponte sobre o Rio Buriticupu está localizada no Km365 da Estrada de Ferro Ponta da Madeira – Carajás. Trata-se de uma ponte construída na década de 80, com comprimento total de 188,60m, constituída por sete vãos de 24,20m e dois encontros de 9,60m cada. A superestrutura é formada pelo tabuleiro com largura de 6,75m, por duas vigas invertidas de altura variável, com protensão longitudinal e transversinas em concreto armado apoiando-se em aparelhos de apoio de neoprene fretado nos encontros e nos apoios intermediários.

A mesoestrutura é formada pelos 6 pilares e 2 encontros. Os pilares tem uma altura total de 9,99m, sendo que nos 7,79 primeiros metros o pilar possui seção retangular vazada e no comprimento restante possui seção variável maciça. Os encontros são do tipo caixa constituído por paredes, laje inferior, blocos de coroamento dos tubulões, alas e placa de transição em concreto armado.

A infraestrutura é em tubulões de concreto armado engastados em blocos. Quatro tubulões nos apoios intermediários e seis nos encontros.

A Figura 1 apresenta uma vista longitudinal da ponte, a Figura 2 uma vista geral e a Figura 3 a seção transversal da superestrutura.

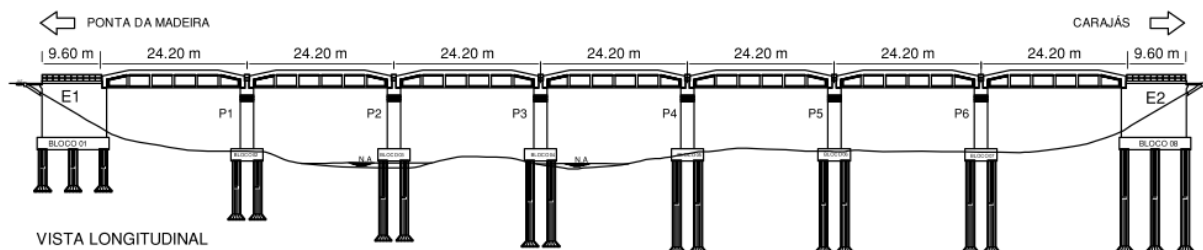


Figura1 - Vista longitudinal da Ponte sobre o Rio Buriticupu



Quanto à massa, propriedade importante para a análise modal, esta foi considerada no programa *SAP2000* a partir do carregamento aplicado. Contudo, a massa rotacional devido ao carregamento próprio da estrutura foi calculada a parte e atribuída aos modelos.

Tabela 1 - Peso do carregamento permanente considerado no modelo numérico.

Elemento	Peso
Seção em viga invertida	25 kN/m ³
Pilares	25 kN/m ³
Canaletas, argamassa, lastro, trilhos e acessórios	55,261 kN/m
Transversina central	32,362 kN
Transversina Apoio	37,786 kN
Refúgio, incluindo guarda-corpo	6,35 kN

3.2 Módulo de elasticidade

Na determinação do módulo de elasticidade do concreto a ser utilizado nos modelos, admitiu-se inicialmente o módulo de elasticidade secante conforme recomendação da NBR 6118/2003, por se tratar de um modelo com finalidade de análise estrutural. O valor do módulo de elasticidade secante do concreto foi obtido da expressão 3.1. Nesta expressão utilizou-se o f_{c_k} especificado na memória de cálculo que foi de 26MPa para a superestrutura, 18 MPa para a mesoestrutura e 16MPa para a infraestrutura.

$$E_{sec} = 0.85 \times 5600 \sqrt{f_{c_k}} \quad 3.1$$

Ainda quanto à determinação do módulo de elasticidade do concreto para a representação do material no modelo numérico, foram extraídos testemunhos da obra na região da superestrutura e da mesoestrutura para serem submetidos a ensaio de compressão, de acordo com a NBR8522/2003. Tal ensaio identificou o valor mais aproximado do real módulo de elasticidade apresentado pelo concreto em cada elemento estrutural.

Tabela 2 – Módulos de elasticidade obtidos no ensaio de compressão dos testemunhos

Testemunho	Módulo de Elasticidade (GPa)
Encontro E1 – CP01	28,7
Encontro E1 – CP02	30,1
Laje lado esquerdo – CP01	45,49
Longarina lado esquerdo – CP01	40,72
Longarina lado direito – CP01	40,72
Pilar P3 lado esquerdo – CP 01	28,90
Pilar P3 face São Luis – CP 02	32,04



3.3 Neoprene

Na região do apoio, os aparelhos de apoio de neoprene fretado foram representados por elementos de mola com as propriedades mecânicas calculadas segundo Pfeil (1997). O coeficiente de elasticidade transversal do neoprene utilizado foi de 0,98 MPa e coeficiente de poisson de 0,5.

Na conectividade do centro da seção do tabuleiro ao elemento de mola, foram utilizadas barras com rigidez infinita.

A Tabela 3 representa as rigidezes consideradas no elemento de mola, as referidas direções da tabela na Figura 4 (b), e a simulação da conectividade utilizada nos modelos numéricos, na Figura 4 (a).

Tabela 3 – Rigidezes do aparelho de apoio

Direção	Rigidez (kN/m)
Axial (direção x)	12340000,00
Cisalhamento em y	8406,00
Cisalhamento em z	8406,00
Rotação em torno de x	74400,00
Rotação em torno de y	109200000,00
Rotação em torno de z	44640,00

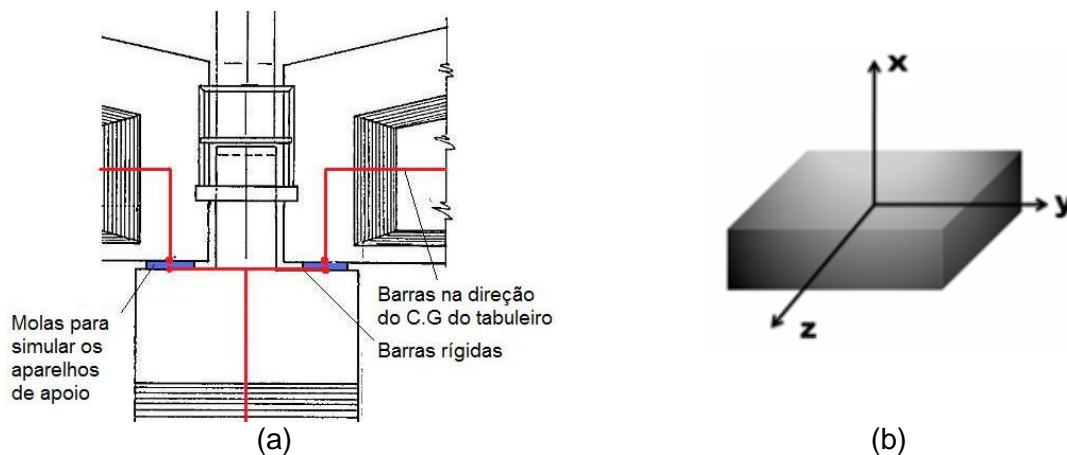


Figura 4 - (a) simulação da junta de dilatação (b) Direções de referência.

3.4 Molas na Fundação

A interação solo-estrutura foi considerada nos modelos com a utilização de elementos de mola distribuídos ao longo do comprimento dos tubulões, com a respectiva rigidez da camada de solo atribuída à mola. Tais rigidezes foram calculadas de acordo com as camadas de solo identificadas a partir dos ensaios SPT descritos nos projetos.

A Tabela 4 apresenta as rigidezes obtidas para o tubulão T10, sendo K_H a rigidez horizontal e K_V a rigidez vertical.

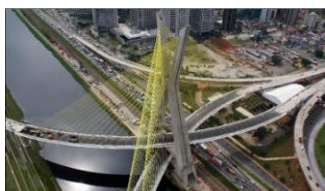
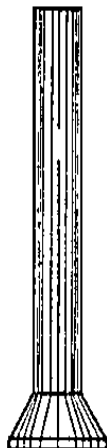


Tabela 4 – Rigidezes dos elementos de mola da fundação no tubulão T10

Profundidade (m)	N SPT	K_H (kN/m)	K_V (kN/m)
1	3	4251	9605
2	5	7413	15888
3	7	10702	22079
4	5	7413	15888
5	16	26585	48841
6	16	26585	48841
7	16	26585	48841
8	4	-	-
9	5	-	-
9,8	20	-	-
9,8	-	22919238	26261627



4 Modelos Numéricos

A modelagem numérica da ponte ferroviária consistiu em inicialmente desenvolver dois modelos em elementos finitos (*Modelo I* e *Modelo II*) no programa comercial *SAP2000*. A principal diferença entre os modelos está na modelagem da superestrutura, sendo que no *Modelo I* a seção foi atribuída como um elemento de barra (*frame*), e no *Modelo II* como elementos de casca (*shell*).

A principal justificativa para a o desenvolvimento de dois modelos distintos, está que no *Modelo I* quando toda a seção é representada apenas por uma barra, esta se apresenta mais rígida, o que pode interferir nos resultados da análise modal, enquanto que no *Modelo II* a seção é modelada com elementos de casca com melhor discretização, possibilitando a identificação de modos de difícil visualização no *Modelo I*.

Na análise modal realizada nos dois modelos a estrutura apresentou um comportamento global dos modos. Dessa forma, visando simplificar a análise modal, foram criados mais dois modelos numéricos (*Modelo III* e *Modelo IV*) representativos de um único vão da estrutura.

A seguir, estes modelos estão melhores descritos.

4.1 Modelo I e Modelo II

No *Modelo I*, mais especificamente, a superestrutura da ponte foi modelada em elementos finitos do tipo *frame*, ou seja, a seção transversal do tabuleiro foi representada por uma única barra. No *Modelo II* a superestrutura foi modelada com elementos *shell*.

Os encontros de ambos foram representados por elementos de casca e os pilares com elementos de barra. A superestrutura da ponte é simplesmente apoiada pelos pilares e encontros, conectados pelos aparelhos de apoio do tipo neoprene fretado. Esta conexão com os elementos de mola no modelo numérico está descrita na seção 3.3.

Na fundação dos modelos os blocos também foram modelados em elementos de casca e os tubulões em elementos de barra. Nos tubulões a interação solo-estrutura foi considerada inserindo a rigidez do solo com elementos de mola (conforme seção 3.4).



A Figura 5 ilustra o *Modelo I* da ponte e a Figura 6 o *Modelo II*.

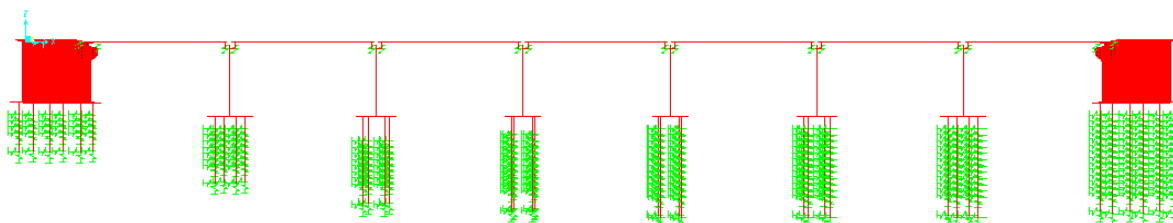


Figura 5 – Vista longitudinal do *Modelo I* da Ponte sobre o Rio Buriticupu

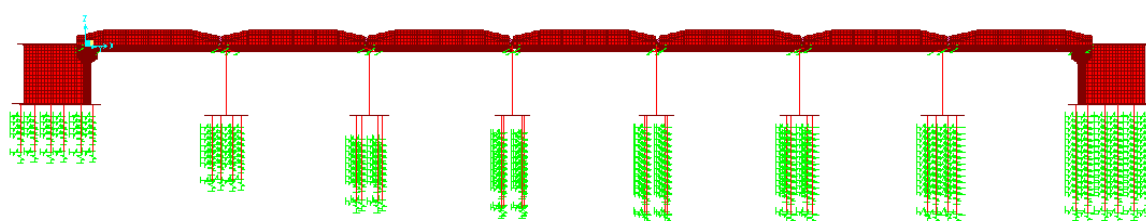


Figura 6 - Vista longitudinal do *Modelo II* da Ponte sobre o Rio Buriticupu

4.2 Modelo III e Modelo IV

Visando simplificar a análise modal, foram desenvolvidos outros dois modelos numéricos representativos de um único vão da estrutura (*Modelo III* e *Modelo IV*). Os modelos se diferenciam quanto à modelagem da superestrutura, assim como no *Modelo I* e *Modelo II*. No *Modelo III* a superestrutura foi modelada com elementos *frame* e no *Modelo IV* com elementos *shell*. A Figura 7 (a) apresenta o *Modelo III* e a Figura 7 (b) o *Modelo IV*.

Apesar de todos os vãos da superestrutura serem idênticos, os tubulões na fundação apresentam comprimentos variados. Devido a esta diferença na fundação o vão modelado foi o mesmo instrumentado no trabalho experimental de Sampaio et al 2010, pois assim posteriormente foi possível a calibragem a partir do *Modelo III*.

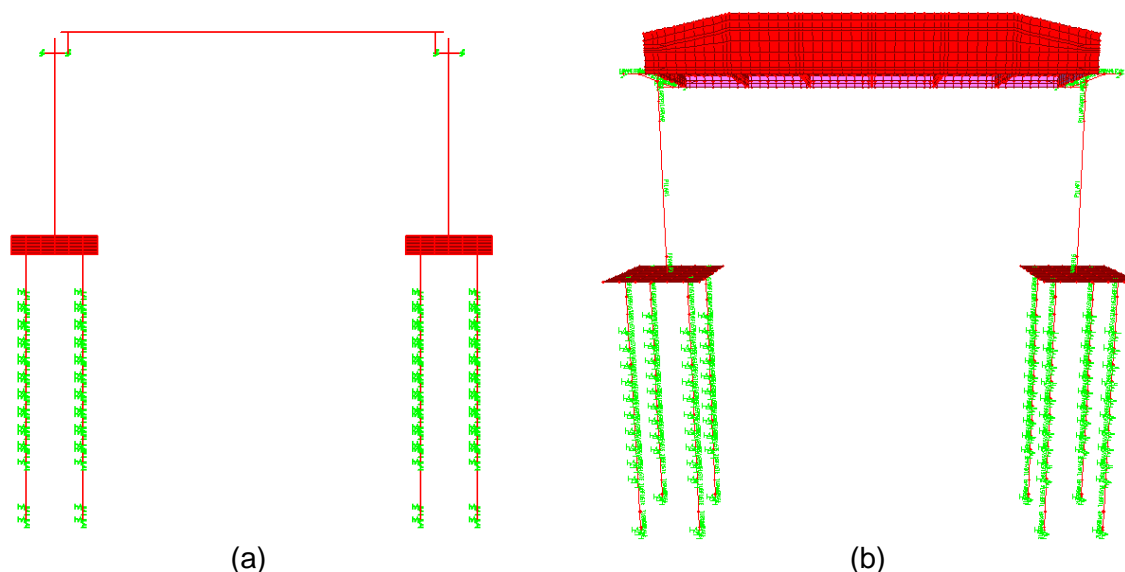


Figura 7 – (a) Vista longitudinal do *Modelo III* (b) Vista longitudinal do *Modelo IV*



5 Análise Modal

As primeiras análises do comportamento modal da estrutura foram realizadas nos modelos representativos da obra completa, *Modelo I* e *Modelo II*. Nestes modelos, a estrutura apresentou um comportamento modal global, ou seja, apesar dos vãos da ponte serem isostáticos, estes não apresentaram modos independentes.

Devido a esse comportamento outros dois modelos representativos de apenas um vão da estrutura foram criados, com o objetivo de simplificar a análise modal e de calibrar os modelos a partir dos resultados da análise dinâmica experimental apresentados no trabalho de Sampaio et al, 2010.

A calibragem dos modelos consistiu em comparar os parâmetros modais apresentados pelos modelos numéricos com os resultados da análise experimental. De forma a tornar o modelo mais representativo com a estrutura real, foram aplicados os módulos de elasticidade obtidos nos ensaio de compressão dos testemunhos extraídos da obra. O Modelo III foi o modelo inicialmente tomado para a calibragem e os valores dos módulos de elasticidade adotados neste modelo foram atribuídos aos outros.

Em seguida foi feita uma comparação entre os parâmetros modais apresentados pelos *Modelos III* e *IV* (junto aos resultados experimentais), e apresentada a identificação modal obtida nos *Modelos I* e *II*.

5.1 Calibragem dos modelos numéricos

A calibragem dos modelos é feita a partir do Modelo III, pois é o modelo representativo da ponte mais simplificado. Para a calibragem tomou-se os resultados da análise experimental apresentados no trabalho de Sampaio et al, 2010 e modificou-se o módulo de elasticidade do concreto do modelo até se obter os parâmetros modais do modelo mais próximos com os da análise experimental.

Os módulos de elasticidade alterados foram os referentes ao concreto da superestrutura e dos pilares. Ao final os valores admitidos foram: 40,72 GPa para o concreto da superestrutura e 30 GPa para o concreto dos pilares.

Após o Modelo III calibrado os mesmos módulos de elasticidade foram atribuídos aos outros modelos.

Dos resultados obtidos na análise dinâmica experimental, foram tomadas as três primeiras freqüências naturais com seus respectivos modos, identificados tanto no método SSI (Stochastic Subspace Identification) quanto no EFDD (Decomposição no Domínio da Freqüência Aumentada), com a utilização de um dispositivo de aplicação de carga dinâmica denominado Drop Weight.

A Tabela 5 apresenta as freqüências naturais obtidas na análise modal experimental e as freqüências naturais obtidas no *Modelo III* e no *Modelo IV* calibrados.

Tabela 5 – Freqüências obtidas na análise experimental, no *Modelo III* e no *Modelo IV*

Modo	Freqüência (Hz)			
	Análise Experimental		Análise Numérica	
	SSI	EFDD	Modelo III	Modelo IV
Flexão vertical no tabuleiro da ponte	6,999	7,077	7,84	7,09
Torção no tabuleiro da ponte	9,918	10,26	9,42	10,51
Flexão vertical e lateral no tabuleiro da ponte	28,84	28,96	30,58	29,64



Da a Figura 10 estão ilustrados os modos identificados nos modelos numéricos e apresentados na Tabela 5.

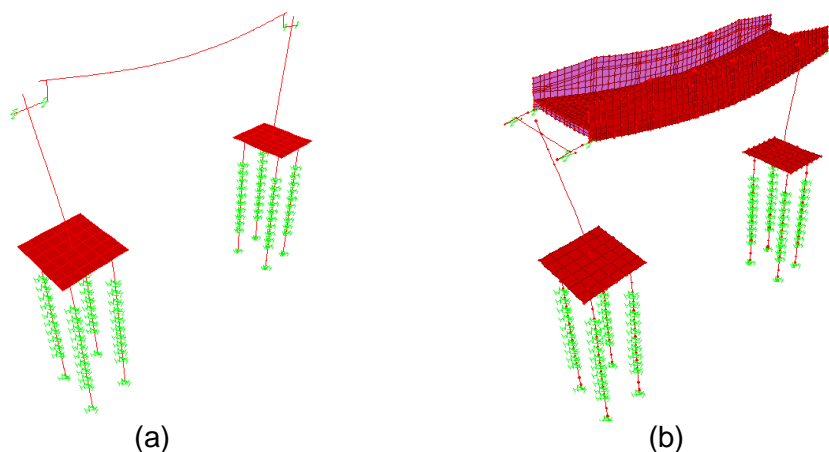


Figura 8 – Flexão vertical no tabuleiro da ponte (a) *Modelo III*, frequência 7,84 Hz (b) *Modelo IV*, frequência 7,09 Hz

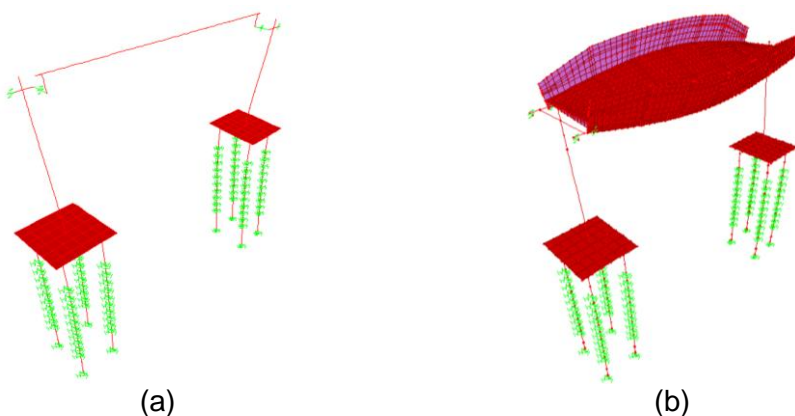


Figura 9 – Torção no tabuleiro da ponte (a) *Modelo III*, frequência 9,42 Hz (b) *Modelo IV*, frequência 10,52 Hz

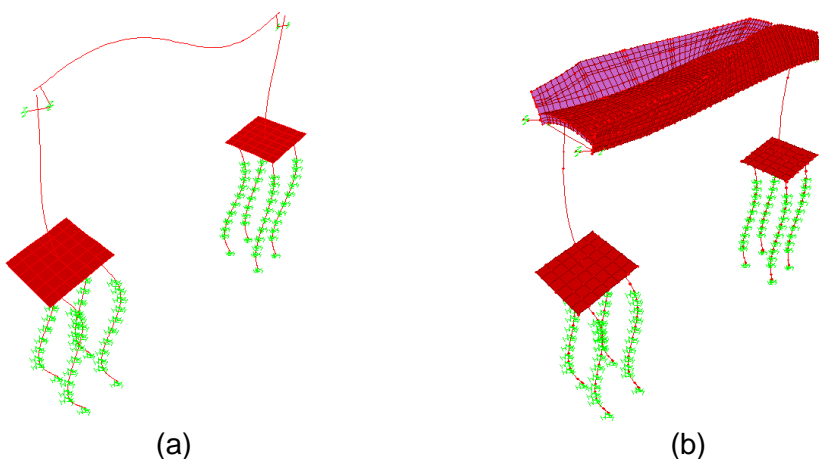
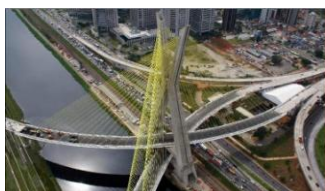


Figura 10 - Flexão vertical e lateral no tabuleiro da ponte (a) *Modelo III*, frequência 30,58 Hz (b) *Modelo IV*, frequência 29,64 Hz



5.2 Identificação Modal – *Modelo I* e *Modelo II*

Após o desenvolvimento do *Modelo I* e *II*, realizou-se a análise modal para a identificação das principais freqüências naturais com seus modos associados. Na análise destes modelos foram identificados os dois primeiros modos registrados na análise experimental e nos outros dois modelos.

A Tabela 6 apresenta as principais freqüências naturais obtidas nos modelos I e II e que também foram identificadas nos modelos III e IV, e na análise experimental.

Tabela 6 – Freqüências naturais identificadas no Modelo I e Modelo II

	Modo	Frequência (HZ)
<i>Modelo I</i>	Flexão vertical no tabuleiro da ponte	7,08
	Torção no tabuleiro da ponte	9,95
<i>Modelo II</i>	Flexão vertical no tabuleiro da ponte	6,94
	Torção no tabuleiro da ponte	10,13

Os modelos apresentaram um comportamento modal global da estrutura, como pode ser observado na Figura 11 e na Figura 12.

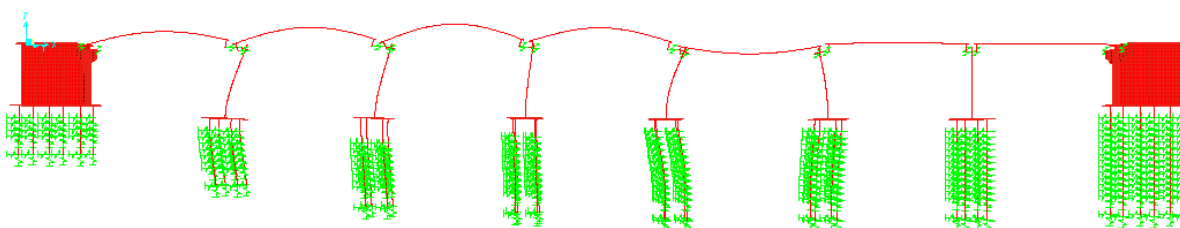


Figura 11 - Flexão vertical no tabuleiro do *Modelo I* com freqüência igual a 7,08 Hz

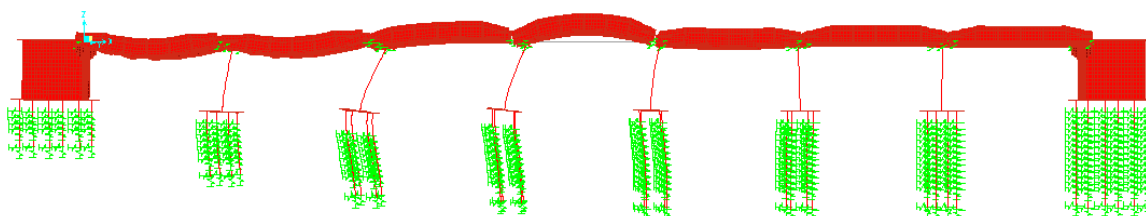


Figura 12 - Flexão vertical no tabuleiro do *Modelo II* com freqüência igual a 6,94 Hz



6 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho consistiu em desenvolver um modelo numérico representativo da ponte ferroviária a partir de elementos finitos. Os procedimentos desenvolvidos para a modelagem se mostraram adequados quando na obtenção da análise modal os resultados são aproximados aos registrados na análise experimental.

Na análise desta ponte se pode observar que apesar da obra consistir no conjunto de múltiplos vãos isostáticos, o comportamento modal destes não são independentes, o que indicou a necessidade de criar os outros dois modelos não inicialmente previstos no início do trabalho.

A análise experimental foi primordial para a calibragem dos modelos. Apesar de a calibragem ser feita apenas com a modificação das propriedades do material e apresentar resultados satisfatórios, ainda é necessário aprimorar os modelos, o que pode ser feito com pequenas variações das rigidezes dos aparelhos de apoio e da fundação.

A partir destes modelos numéricos representativos da estrutura, outras análises dinâmicas ou estáticas podem ser obtidas, inclusive com a consideração de outros níveis de carregamentos.

7 Referências Bibliográficas

- [1] H. XIA, N. ZHANG, R. GAO. Experimental analysis of railway bridge under high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration* 282 (2005) 517–528.
- [2] K. LIU, E. REYNDERS, G. DE ROECK, G. LOMBAERT. Experimental and numerical analysis of a composite bridge for high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration* 320 (2009) 201–220.
- [3] R. CALÇADA; A. CUNHA; R. DELGADO. Dynamic Analysis of Metallic Arch Railway Bridge. *Journal of Bridge Engineering* / July / August (2002) 214 – 222.
- [4] RICARDO PIMENTEL, RUI CALÇADA, RAIMUNDO DELGADO. Experimental Evaluation of Traffic and its Effects on a Short Span Railway Bridge. *7th European Conference on Structural Dynamics* / July (2008).
- [5] DIOGO RIBEIRO, PEDRO ALMEIDA, RUI CALÇADA, RAIMUNDO DELGADO. Experimental Analysis and Model Updating of a Bowstring Arch Railway Bridge. *7th European Conference on Structural Dynamics* / July (2008).
- [6] COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. SAP2000. *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley, California, USA.
- [7] SAMPAIO. R.A.C, DE SOUZA. R.M, BENTES. J.L, BARICHELLO, C. V. M. Análise Dinâmica Experimental de Ponte Ferroviária em Concreto Protendido. *III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas* / Abril (2010).