

INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS E DAS CONDIÇÕES DE SUPORTE NA ANÁLISE MODAL DE UMA PONTE FERROVIÁRIA EM CONCRETO ARMADO E PROTENDIDO

Rafael Fernando Loureiro Monteiro

Selma Lídia Azevedo Lobato

Regina Augusta Campos Sampaio

Remo Magalhães de Souza

fael.mont@yahoo.com.br

selma@ufpa.br

rsampaio@ufpa.br

remo@ufpa.br

NiCAE – Grupo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia

Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará

Campus Universitário do Guamá, Av. Augusto Corrêa, n. 1, Guamá, Belém-PA

CEP 66.075-900

Resumo. *O presente trabalho abrange a análise modal de uma ponte ferroviária em concreto armado e protendido, através do método dos elementos finitos. A análise tem como objetivo verificar a influência dos tipos de elementos finitos e das condições de suporte do tabuleiro levando em consideração vários modelos numéricos. Foram criados, basicamente, dois modelos completos da estrutura, quais sejam: (a) modelo simplificado apenas com elementos de pórtico espacial; (b) modelo com toda a mesoestrutura e superestrutura em elementos sólidos e as estacas em elementos de pórtico espacial; Para o modelo mais refinado (com elementos sólidos) foi verificada também a influência do tipo de apoio, tendo sido considerados três situações, a saber: 1) modelo com tabuleiro diretamente apoiado sobre rótulas; 2) modelo considerando a presença dos aparelhos de apoio; 3) modelo com os aparelhos de apoio e a presença dos pilares, os quais são considerados engastados na base; 4) modelo considerando a presença dos blocos de coroamento, engastados nos nós onde há presença de estacas de fundação; 5) modelo completo, com a presença das estacas e do solo (simulado através de molas); As análises foram realizadas observando as diferenças entre as frequências naturais e formas modais obtidas a partir dos modelos completos e simplificados. Além disso, os resultados das análises modais dos diversos modelos foram comparados com os resultados experimentais determinados através da monitoração da estrutura sujeita a vibração ocasionada pela passagem de trens de carga. Para a extração dos parâmetros modais na análise experimental foi utilizado o método dos subespaços estocásticos.*

Palavras-chave: *Elementos finitos, pontes, análise modal*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe no Brasil, 30.000 km de ferrovias, destinadas ao tráfego tanto de passageiros, quanto de cargas, sendo este último, o predominante nesse meio. Segundo o BNDES (2008) entre 1959 e 2001, a produção das ferrovias brasileiras cresceu 6,5 % ao ano, apresentando evolução negativa em apenas sete dos 43 anos da série, sendo que boa parte do aumento de produção no período se deve ao incremento do transporte de minério de ferro para exportação.

Devido à grande importância desse tipo de via, destacando-se principalmente as obras de arte que a compõem, como pontes e viadutos, a comunidade científica vem desenvolvendo estudos e pesquisas relacionadas ao comportamento destas construções.

Dentro deste contexto, a Universidade Federal do Pará, em parceria com a companhia Vale, está desenvolvendo estudos que visam avaliar a integridade estrutural das pontes e viadutos ferroviários ao longo da Estrada de Ferro Carajás (EFC), situada nos estados do Pará e Maranhão, através de análises experimentais e numéricas, objetivando conhecer as características dinâmicas das estruturas, quais sejam: frequência natural, amortecimento e modos de vibração. O presente trabalho consiste em estudar o comportamento de uma das pontes da EFC, a ponte sobre o Rio Mearim, situada no interior do estado do Maranhão. Esta ponte é composta por nove vãos biapoiados, sendo oito vãos em concreto protendido e um vão metálico. Este artigo dará enfoque ao estudo de um dos vãos em concreto protendido, considerando-se o seu comportamento independente devido ao fato dos vãos serem biapoiados.

2. OBJETIVO

Tem-se como objetivo realizar a análise modal, experimental e numérica, de um vão em concreto protendido da ponte ferroviária sobre o rio Mearim, avaliando as influências de diversos parâmetros nas frequências naturais e modos de vibração da estrutura, quais sejam:

- massa do trem carregado;
- massa do trem descarregado;
- módulo de elasticidade longitudinal do sistema;
- tipo de elemento finito utilizado e refinamento do modelo numérico com grau crescente de complexidade.

Para a análise modal computacional foi utilizado o programa comercial SAP 2000, e para a análise modal experimental foi utilizado um programa baseado no Método dos Subspaços Estocásticos.

3. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A Ponte sobre o Rio Mearim (possui traçado retilíneo, com comprimento total de 355,4 m constituídos por dois encontros e nove vãos isostáticos, sendo oito vãos em concreto protendido e um vão metálico treliçado. A superestrutura correspondente aos vãos em concreto protendido é formada por tabuleiros constituídos de duas vigas longarinas contínuas, vigas transversinas e laje, possuindo uma seção transversal típica com largura total de 5,85 m. Um arranjo geral do sistema estrutural da ponte é apresentado na Figura 1, com as unidades em metros.

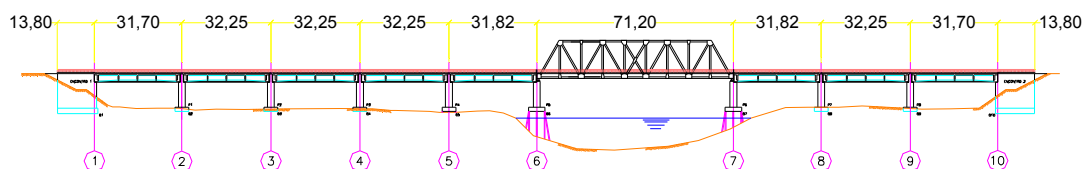


Figura 1 - Esquema geral da ponte.

A Figura 2 mostra a seção transversal típica do vão em concreto protendido. No entanto, a espessura da alma das vigas longarinas varia, longitudinalmente, de 0,70 m a 0,25 m.

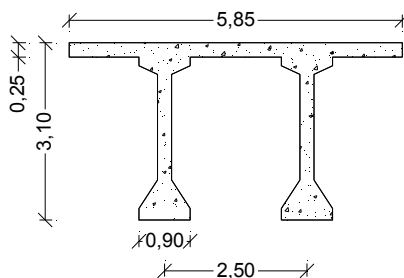


Figura 2 – Seção transversal típica do tabuleiro do vão em Concreto Protendido.

4. MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Levando em consideração a independência entre os vãos da estrutura, já que esta é isostática, modelou-se apenas o vão ente os pilares P8 e P9, sendo este o mesmo instrumentado na análise de campo, para tal análise foi utilizado o programa comercial SAP 2000. Apesar da independência entre os vãos, foi considerada a influência dos vãos adjacentes especificando-se amassa de 56,24 toneladas, referente aos vãos adjacentes, no pilar, na região onde haveria o encontro do pilar com as vigas vizinhas.

4.1. Propriedades do concreto

Foram realizados ensaios em campo (esclerometria e ultrassom) e em laboratório, com corpos de prova extraídos da estrutura, para determinação das propriedades do concreto.

Os valores de módulo de elasticidade encontrados nos ensaios estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Módulos de elasticidade do concreto avaliado nos ensaios de compressão.

Elemento estrutural	Módulos de elasticidade (GPa)		
	Mínimo	Médio	Máximo
Tabuleiro	41,417	43,4015	45,386
Pilar	31,082	33,7215	36,361
Bloco	38,950	41,1520	43,354

4.2. Modelo em elementos de pórtico espacial (barras)

O primeiro estudo realizado a respeito da ponte sobre o rio Mearim consistiu na modelagem da estrutura como um todo, em elementos de barras, chegando-se a conclusão de que os resultados não eram prejudicados utilizando um modelo simplificado representativo de apenas um vão entre os pilares. Posteriormente, foram executadas análises mais detalhadas de um vão entre os pilares P8 e P9, observando a influência das condições de suporte e do uso dos módulos de elasticidades obtidos em campo. Neste artigo será usado o modelo representativo de um vão extraído do trabalho de Lobato *et al* (2008).

A Figura 3 mostra uma vista tridimensional do modelo em elementos de pórtico espacial.



Figura 3 - Vista tridimensional do modelo de pórtico espacial adotado, extraído do trabalho de Lobato *et al* (2008).

4.3. Modelo utilizando-se elementos sólidos

Visando obter resultados mais precisos e mais próximos dos resultados experimentais, foi feita a discretização da ponte usando elementos sólidos para definir praticamente toda a estrutura (blocos de fundação, pilares e viga), deixando apenas as estacas de fundação com modelagem em barras (*frame*) e as chapas no interior dos aparelhos de apoio modeladas em elementos de casca (*shell*). Foram criados dois modelos sólidos para representar a estrutura, o primeiro, considerado uma malha grosseira, com 1224 elementos de barra, 304 de casca e 21832 de sólido e o segundo, aqui denodada de malha refinada, com 1224 elementos de barra, 304 de casca e 56568 de sólido; com o intuito de verificar a influência do grau de discretização nos valores dos resultados.

A Figura 4 mostra uma vista tridimensional e projeções nos três planos, do modelo, com a presença das estacas.

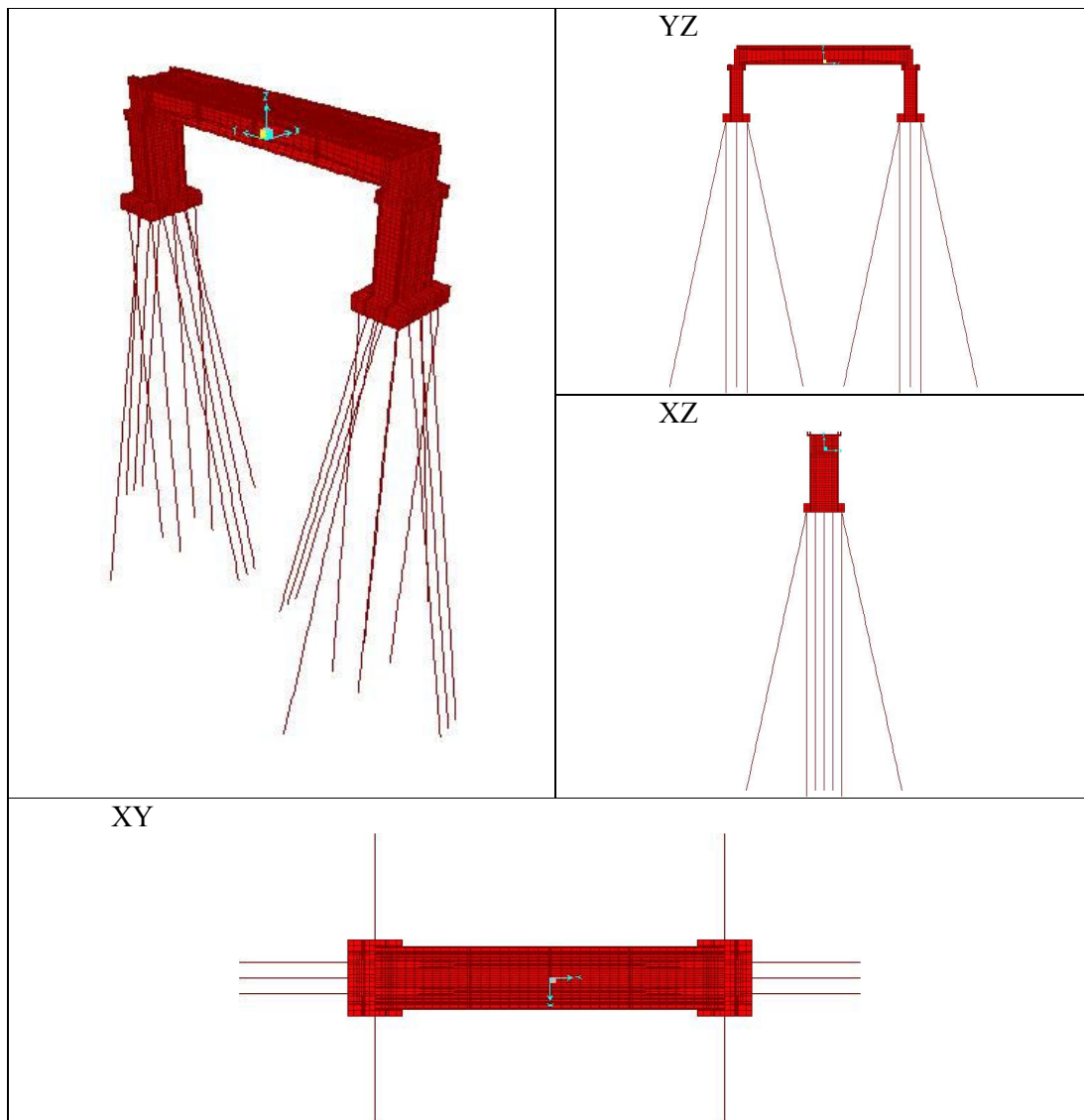


Figura 4 – Modelo numérico de um vão do trecho em concreto protendido, utilizando elementos sólidos.

Para a representação do solo onde as estacas foram cravadas, os elementos de pórtico foram divididos em cinquenta partes com um metro cada e em cada nó entre eles foram acrescentadas elementos de molas (*springs*) com rigidezes de translação em torno dos três eixos, para simular a rigidez do solo. Os valores dessas rigidezes foram obtidos através de estudos dos perfis do solo em ensaios executados previamente.

Com o intuito de limitar o número de graus de liberdade do modelo, foram feitas algumas simplificações, tais como a desconsideração dos guarda-corpos por apresentarem peso próprio desprezível quando comparado ao do restante da estrutura e aos carregamentos que a solicitam.

A Figura 5 mostra uma vista tridimensional mais detalhada do modelo, omitindo as estacas.

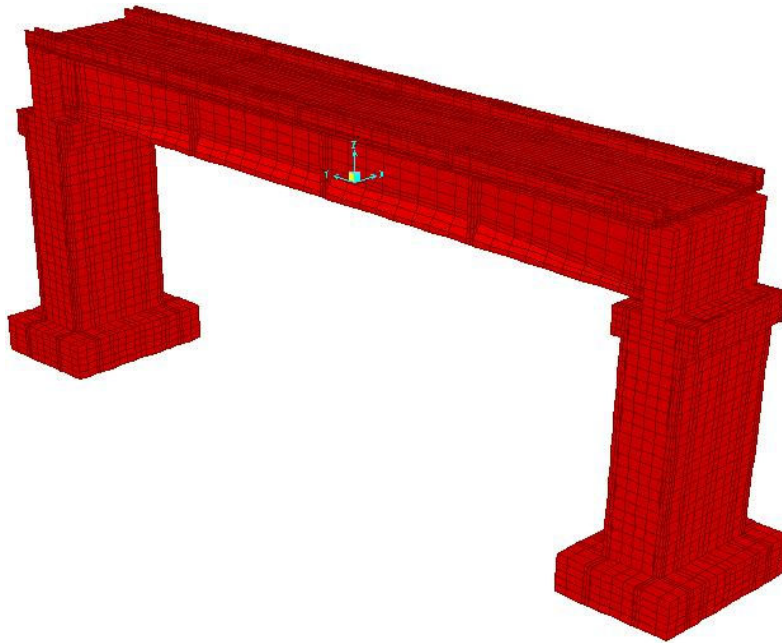


Figura 5 – Vista tridimensional do modelo numérico utilizando elementos sólidos (as estacas foram omitidas).

Outra simplificação realizada diz respeito aos carregamentos, os quais foram distribuídos uniformemente ao longo da área superficial útil do tabuleiro (entre as canaletas). Para a definição dessas cargas somou-se os pesos dos componentes localizados sobre o tabuleiro (lastro, dormente, fixadores e trilho) ao peso do trem carregado.

Simplificou-se também a massa aplicada no pilar referente à viga adjacente, usando-se o valor correspondente à reação de apoio como massa pontual aplicada sobre uma placa de um material indeformável, assentado sobre os aparelhos de apoio, para que fosse distribuída uniformemente sobre eles (Figura 6).

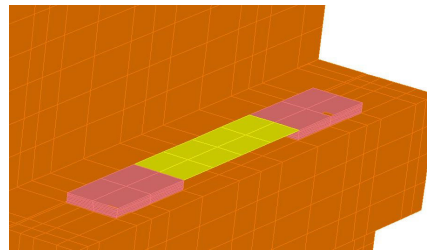


Figura 6 – Modelo do aparelho de apoio com o material indeformável sobre as lâminas de elastômero.

A ponte foi dividida em três elementos estruturais de concreto (blocos, pilares e viga) cada um com módulos de elasticidade distintos. Os valores adotados para os módulos de elasticidade foram obtidos a partir de ensaios com testemunhos retirados da estrutura, adotando-se os resultados mínimos dos ensaios por gerar resultados mais próximos dos valores obtidos na análise experimental.

4.3.1. Estacas e módulo de reação do subsolo

As estacas sobre o rio Mearim são de perfil metálico do tipo UMC-400/191 com inclinação de 12 graus, com profundidade média de 50 m. Para modelagem destas estacas, foram utilizados elementos de barra para. A Figura 7 mostra a seção transversal da estaca metálica.

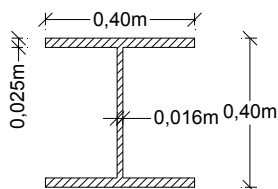


Figura 7 - Seção transversal da estaca.

Ao longo das estacas foram dispostas molas nas três direções do sistema de referência local, a fim de simular a rigidez do solo. Os valores dos módulos de reação do solo (Módulo de Winkler) foram obtidos da análise e avaliação de informações do solo do local onde a ponte foi construída. Mylonakis apud Anjos (2007) relata que, embora aproximados, os modelos que usam a teoria de Winkler são largamente aceitas nas análises de fundações submetidas a carregamento axial ou lateral sob análises estáticas ou dinâmicas. Ressalta-se que o módulo de reação do solo não é uma propriedade apenas do solo, pois depende de características da fundação e do solo, e ainda varia com a profundidade, mesmo em uma camada “homogênea”, além de variar também com a distribuição de carregamento.

4.3.2. Blocos de fundação

Para a discretização dos blocos de coroamento das estacas foram usados 5600 sólidos por bloco, na malha refinada e 1400 por bloco, na malha grosseira. Quanto às dimensões, seguiram todas as especificações de projeto. As características do material utilizado foram extraídas dos ensaios em laboratório, já que os valores reais de resistência e módulo de elasticidade do concreto estão bem acima dos de projeto.

4.3.3. Pilares

Nos pilares a discretização totaliza 3416 sólidos por pilar, para a malha grosseira e 6104 por pilar, para a malha refinada. Novamente foram usadas as mesmas especificações de projeto para as dimensões e os resultados dos testes em laboratório para as características do concreto.

4.3.4. Aparelhos de apoio

Para a modelagem dos aparelhos de apoio foram realizadas sucessivas análises somente destes, para que se criasse um dispositivo com comportamento o mais próximo possível do real. Como resultado foi utilizado uma representação em sólido nas lâminas de elastômero (com discretização de 32 sólidos para cara aparelho de apoio) e lâminas de aço em elementos de casca para representar as várias chapas de aço presentes entre cada camada de elastômero. Devido às aproximações ocorridas na discretização, as propriedades do material da borracha foram aferidas a fim de ajustar os resultados computacionais aos resultados experimentais, sendo adotado um material ortotrópico, onde foi alterado apenas o módulo de

elasticidade vertical (de 2.943,00 kN/m² para 1.471.500,00 kN/m²), quando comparado ao material utilizado no projeto.

5. OBTENÇÃO DOS DADOS

O comportamento dinâmico do vão da ponte (entre os pilares P8 e P9) ocasionado pela passagem do trem, foi monitorado utilizando-se dezesseis acelerômetros de baixa frequência modelo 793L da marca Wilcoxon®. A aquisição dos dados foi feita com o sistema ADS-2000 da marca Lynx, no qual cada acelerômetro foi conectado por cabos apropriados. Foram realizados ensaios com um arranjo de acelerômetros durante a passagem do trem carregado e descarregado. Os acelerômetros foram fixados a chapas metálicas que, por sua vez, foram coladas à face externa da canaleta do tabuleiro da ponte, utilizando-se adesivo apropriado. A Figura 8 ilustra o procedimento do ensaio e a Figura 9 o arranjo dos acelerômetros (A6).

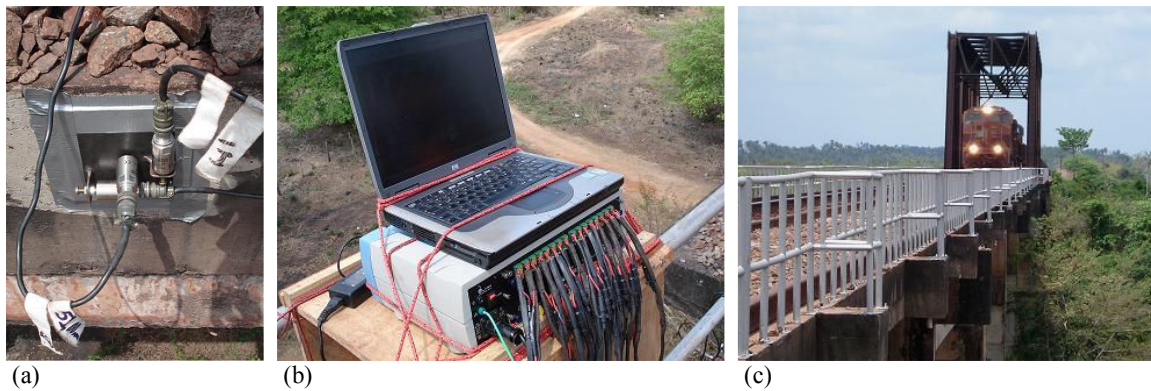


Figura 8 - Obtenção dos dados. a) Acelerômetros fixados à lateral do tabuleiro, em disposição triaxial. b) Sistema de aquisição de dados ADS-2000 Lynx conectado ao notebook. c) passagem do trem

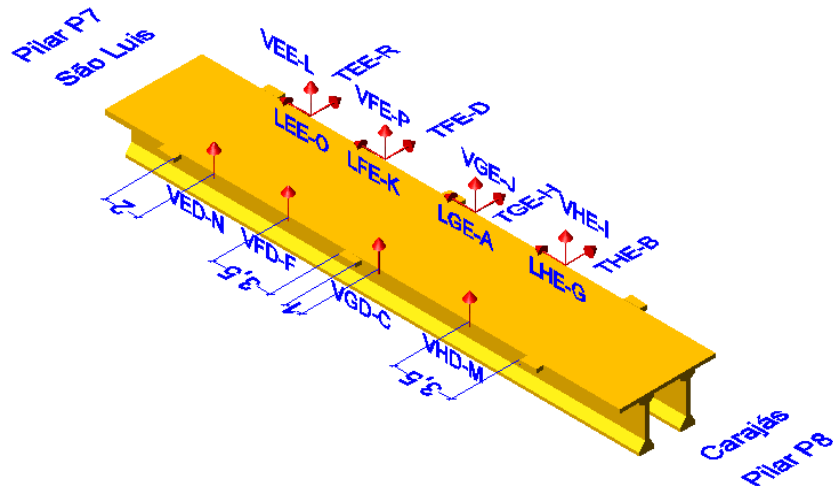


Figura 9 - Arranjo dos acelerômetros.

6. ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

Foram realizados quatro ensaios durante a passagem do trem carregado de minério e dois com o trem descarregado. A título de ilustração, os resultados de um dos ensaios com o trem carregado, são mostrados, no domínio do tempo, na Figura 10.

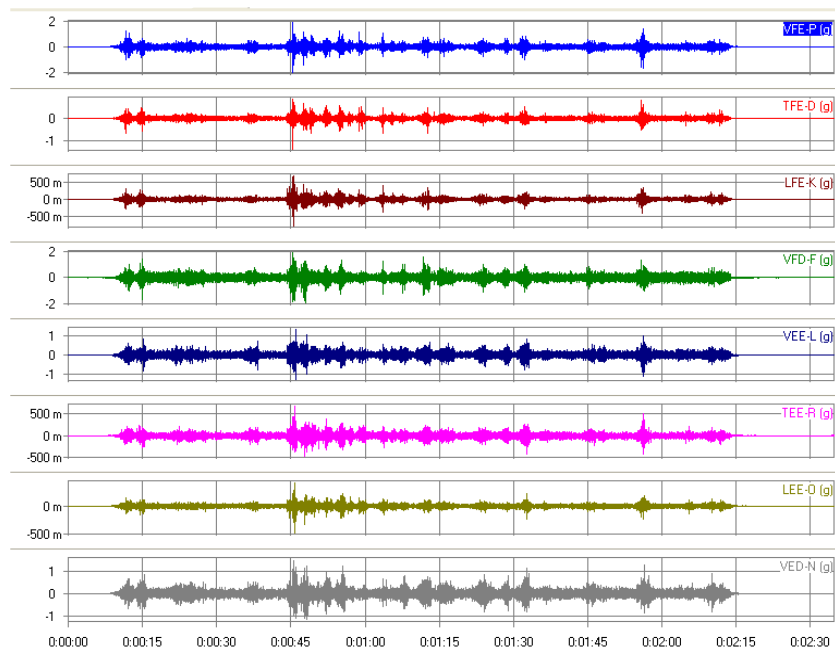


Figura 10 - Séries temporais de aceleração, devido à passagem de um trem de minério carregado (valores em g)

Para extração dos parâmetros modais (frequência natural do sistema e formas modais) usou-se o método de identificação estocástica SSI-COV através de um programa computacional com recursos do *Graphical User Interface* (GUI) da plataforma Matlab® (Amador, 2007). Este é um método de extração de parâmetros modais a partir de medições de vibrações ambientes (vento, tráfego de veículos, passagem de pedestres, etc.) e/ou operacionais (acionamento de motores). Ou seja, através deste tipo de método, as características modais da estrutura são determinadas a partir dos dados de saída apenas (“*output-only data*”), ao contrário de procedimentos mais tradicionais da análise modal experimental, onde a entrada (*input*) é conhecida.

Antes da extração dos parâmetros modais propriamente dita, os sinais obtidos foram filtrados com filtro passa baixa em 20 Hz e foram removidas tendências de crescimento no sinal. Os critérios de tolerância para estabilização do método SSICOV utilizados foram de 1 % para frequência; 2 % para o amortecimento; 2 % para o modo; retardo de 60 e número da ordem do modelo em 80 para todos os ensaios.

A identificação dos modos é feita, na prática, a partir do diagrama de estabilização. Segundo Nunes (2001) este diagrama representa a descrição do sistema através de certo número de modos, aumenta-se o número de modos que descrevem o sistema e verifica-se a consistência das frequências e amortecimentos através da variação destes parâmetros. Segundo o mesmo autor, a idéia é que soluções com mesmos valores de frequência e amortecimento correspondem às ressonâncias reais do sistema físico. A Figura 11 mostra o diagrama de estabilidade para um ensaio com o trem descarregado. Os pontos marcados em

vermelho representam os pólos que estabilizaram e, portanto, indicam possíveis frequências e modos obtidos no ensaio.

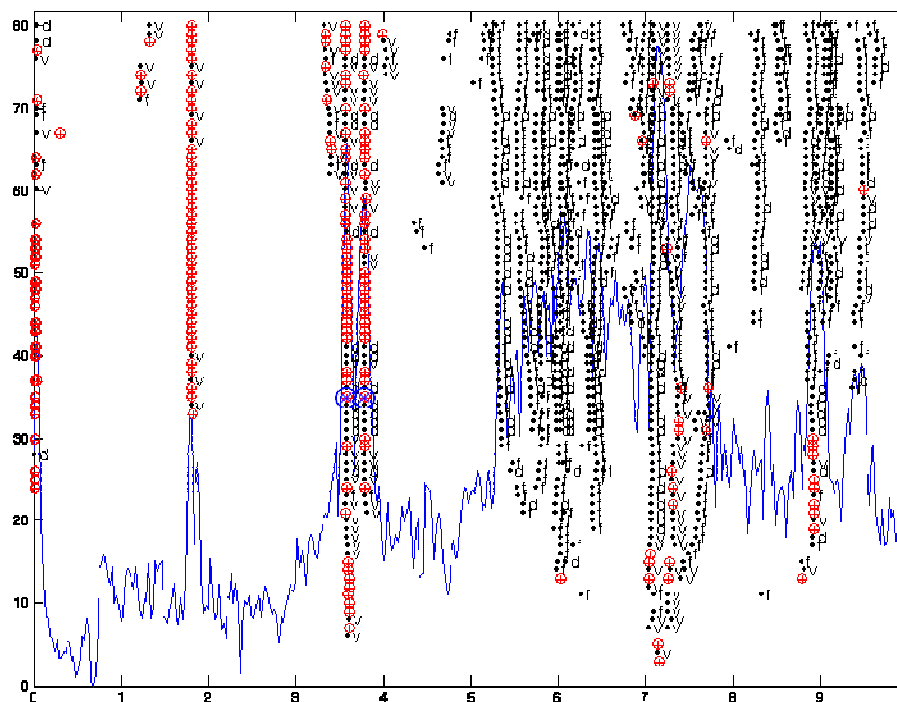


Figura 11 - Diagrama de estabilidade do ensaio Trem descarregado

A Tabela 2 contém os valores das frequências do primeiro modo de flexão e de torção determinadas, através dos ensaios realizados em campo, para o trem carregado e descarregado. Vale ressaltar que, nos ensaios com o trem carregado, não foi possível encontrar o primeiro modo de torção, só sendo possível visualizar o terceiro modo. O mesmo não aconteceu para o ensaio referente ao trem descarregado, onde foram encontrados os primeiro modos tanto de flexão, quanto de torção.

Tabela 2. Frequências do 1º modo de flexão e do modo de torção

Carregamento	Frequência (Hz)	
	1º modo de Flexão	Torção
Trem carregado	3,931	15,972
Trem descarregado	5,136	6,000

A Figura 12 e a Figura 13 mostram, respectivamente, o esboço da configuração modal de flexão e torção para o trem carregado e as figuras 14 e 15 para o trem descarregado:

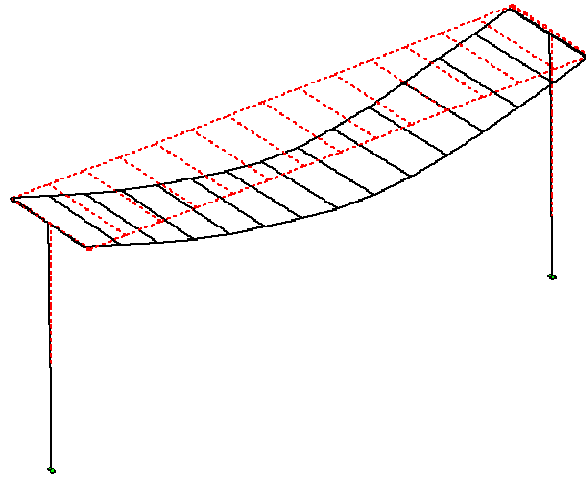


Figura 12 - Ensaio com trem CARREGADO, 1º modo de flexão, $f = 3,931$ Hz

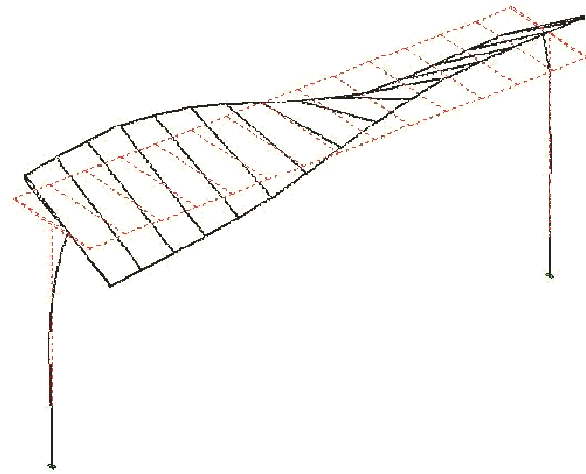


Figura 13 - Ensaio com trem CARREGADO, torção, $f = 15,972$ Hz

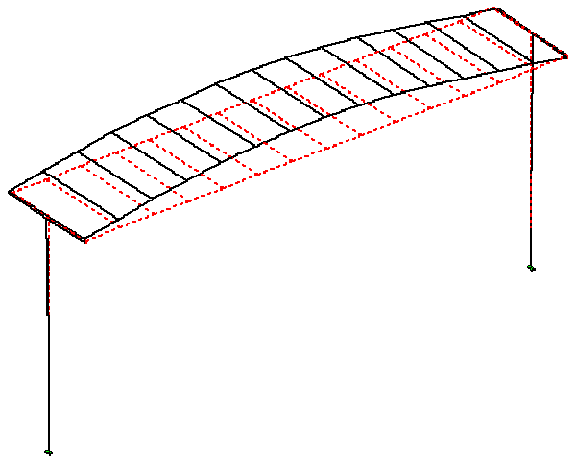


Figura 14 - Ensaio com trem DESCARREGADO, 1º modo de flexão, $f = 5,136$ Hz

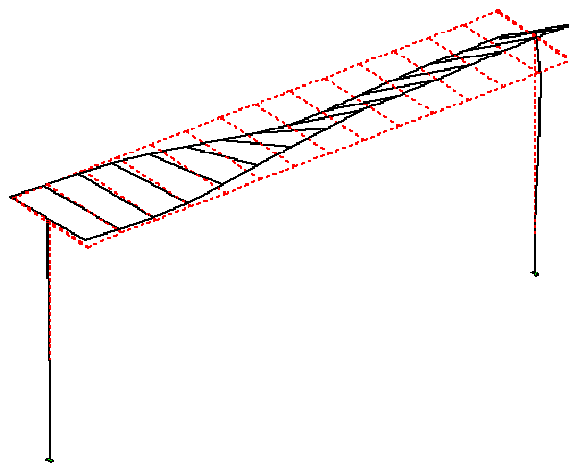


Figura 15 - Ensaio com trem DESCARREGADO, torção, $f = 6,000$ Hz

7. ANÁLISE MODAL NUMÉRICA

Com a criação de um modelo numérico foi possível verificar a influência de vários parâmetros no comportamento dinâmico da ponte. Contudo, primeiramente era necessário obter um modelo que pudesse representar o mais fielmente possível a estrutura original. Para isso, foi realizada inicialmente uma modelagem mais simples, representando praticamente toda a estrutura a ser analisada, por elementos de pórtico espacial (modelo de barras). Assim, pôde-se ajustar este modelo o máximo possível para que a partir dele fosse construído o modelo final.

Com os resultados do modelo de barras e das especificações de projeto, foram criados dois modelos numéricos com praticamente toda a estrutura discretizada em elementos de sólido, o primeiro com uma malha grosseira e o segundo com uma malha mais refinada. A Figura 16 mostra o modo de vibração referente à primeira frequência de flexão e a frequência de torção, ambos para o caso do trem carregado.

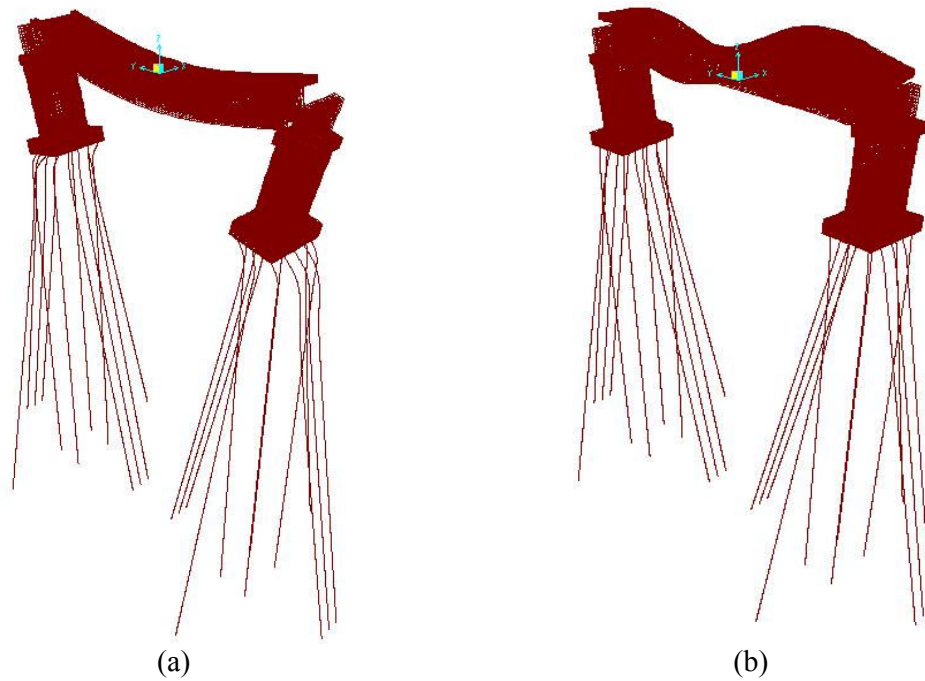


Figura 16 - Modo de vibração de flexão (a) e torção (b) para o trem carregado.

Na Figura 17 tem-se o gráfico comparando os valores das frequências do primeiro modo de flexão entre os três modelos numéricos (barras e sólidos, grosseiro e refinado) com os resultados da análise experimental, para o trem carregado e descarregado. Já a Figura 18, mostra a mesma comparação, porém com as frequências de torção.

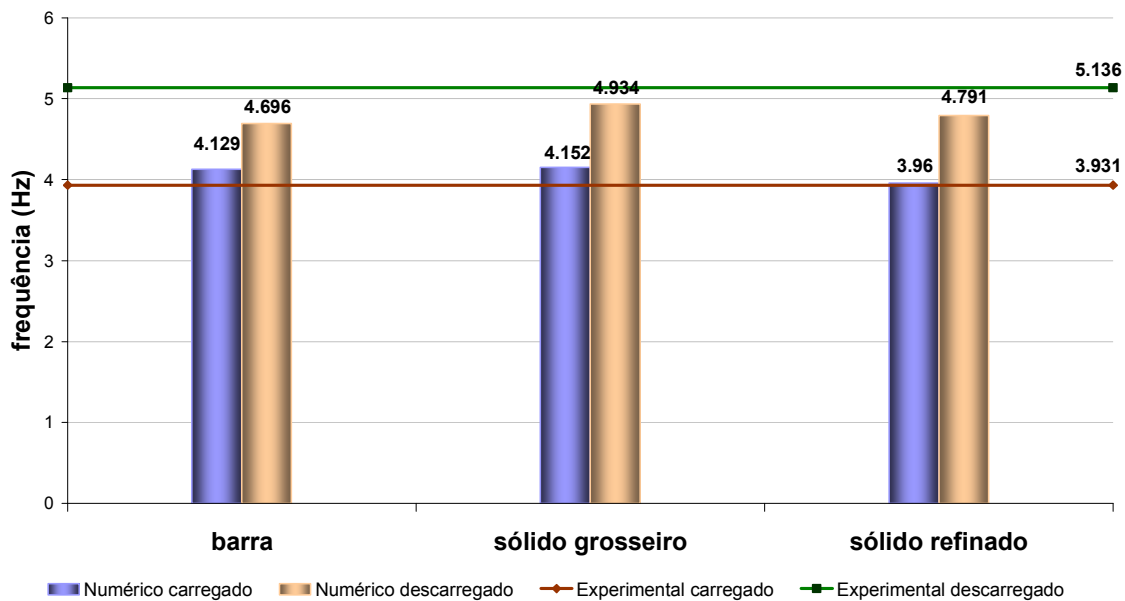


Figura 17 - Comparação entre os modelos numéricos com experimental para as frequências de flexão nos casos do trem carregado e descarregado para o caso de flexão.

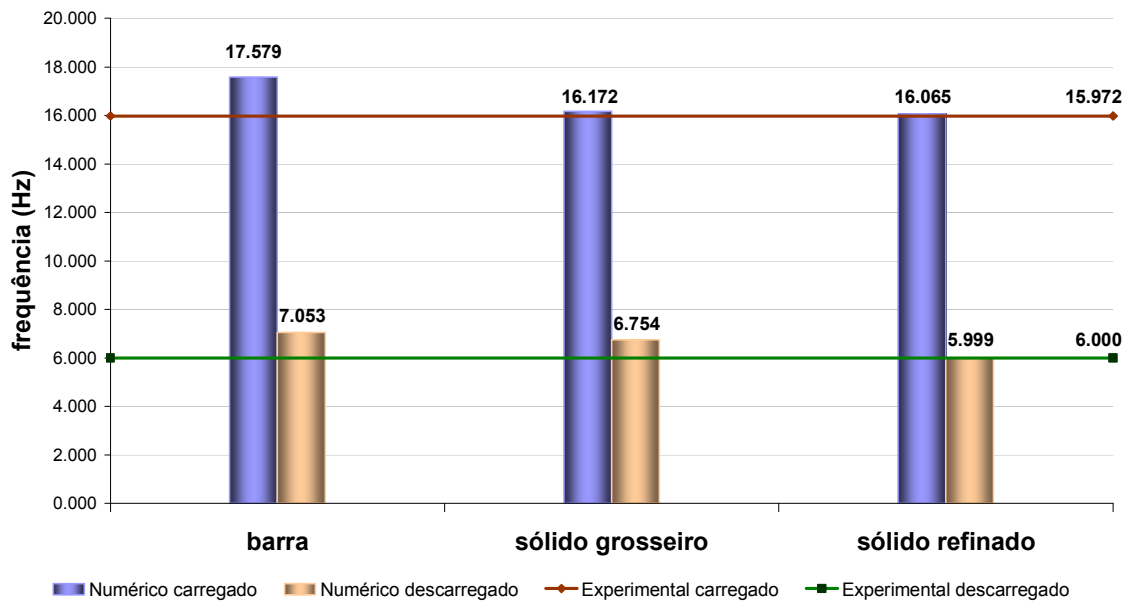


Figura 18 - Comparação entre os modelos numéricos com experimental para as frequências de torção nos casos do trem carregado e descarregado para o caso de torção.

A partir dos resultados obtidos, optou-se pelo uso do modelo sólido com a malha refinada para o estudo do comportamento dinâmico da estrutura, pois este apresentava resultados praticamente iguais aos do modelo experimental. A Figura 18 mostra a comparação entre os resultados do modelo numérico adotado e os resultados experimentais.

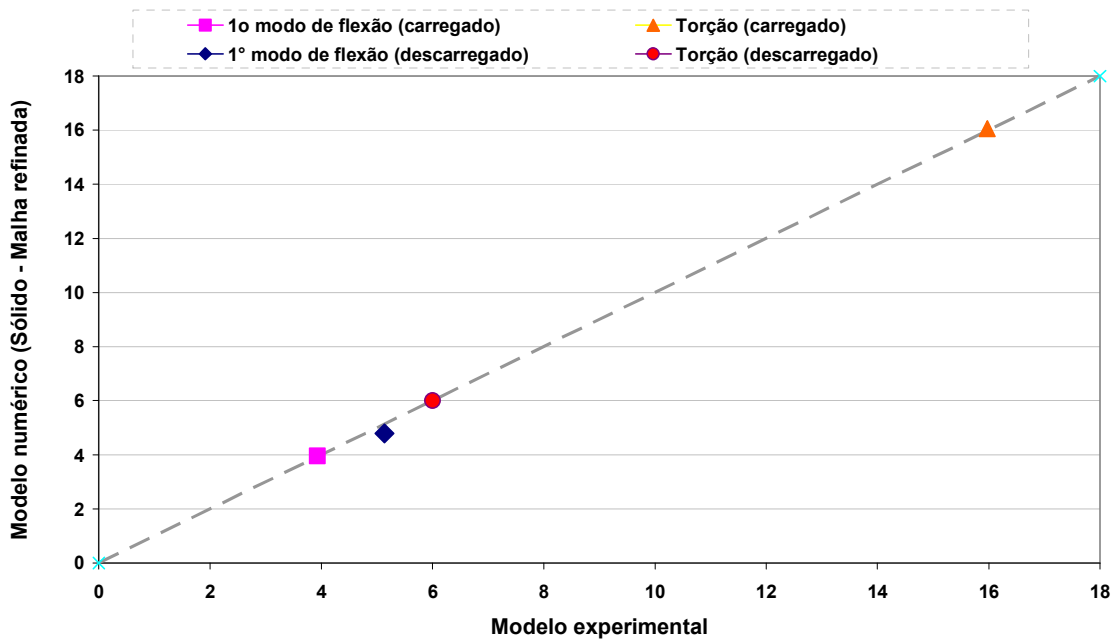


Figura 19 - Comparação entre o modelo sólido (malha refinada) e experimental

Após a escolha do modelo numérico a ser utilizado, realizou-se a análise da influência das condições de suporte. Para isso, foram criados quatro modelos a partir do modelo sólido completo (Tabela 3). Além disso, foi feita a análise da variação do módulo de elasticidade longitudinal dos elementos estruturais, verificando-se a frequência do primeiro modo de flexão e do modo de torção de todos os modelos propostos com os módulos de elasticidade mínimo, médio e máximo (Figuras 19 e 20 e Tabelas 4 e 5).

Tabela 3. Modelos sólidos (malha refinada) usados na análise das condições de suporte

Modelos	Presença de:				
	Viga	Aparelhos de apoio	Pilares	Blocos de fundação	Estacas de fundação
1 (viga biapoiada)	X				
2	X	X			
3	X	X	X		
4	X	X	X	X	
5 (completo)	X	X	X	X	X

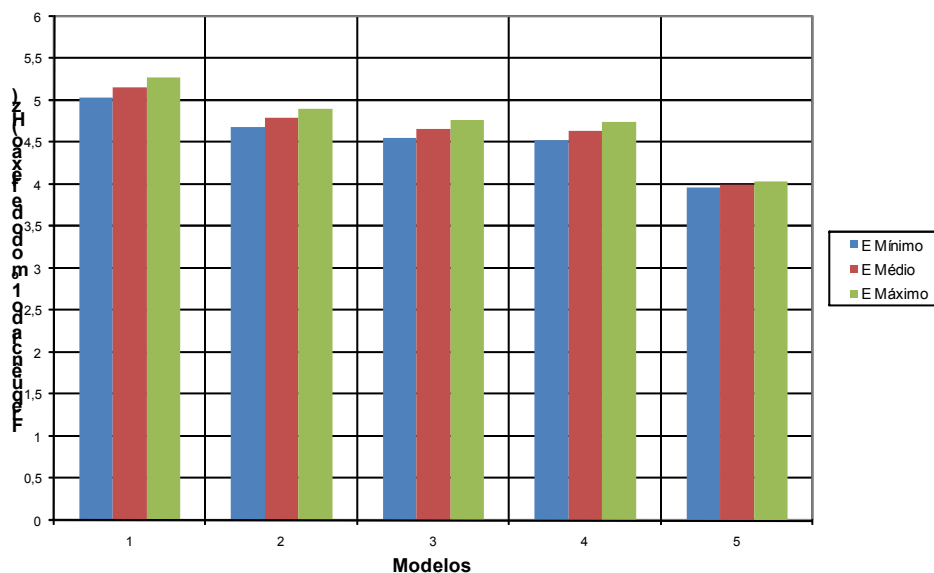


Figura 20 - Variação da frequência de flexão com a inclusão dos elementos: viga sobre rótulas (modelo 1); aparelho de apoio (modelo 2), pilares (modelo 3), blocos (modelo 4) e estacas (modelo 5).

Tabela 4. Frequências do primeiro modo de flexão (modelo numérico com malha refinada)

Modelos	Frequências (Flexão)		
	<i>E Mínimo</i>	<i>E Médio</i>	<i>E Máximo</i>
1	5.036	5.155	5.272
2	4.690	4.797	4.902
3	4.551	4.660	4.767
4	4.532	4.641	4.747
5	3.960	3.995	4.032

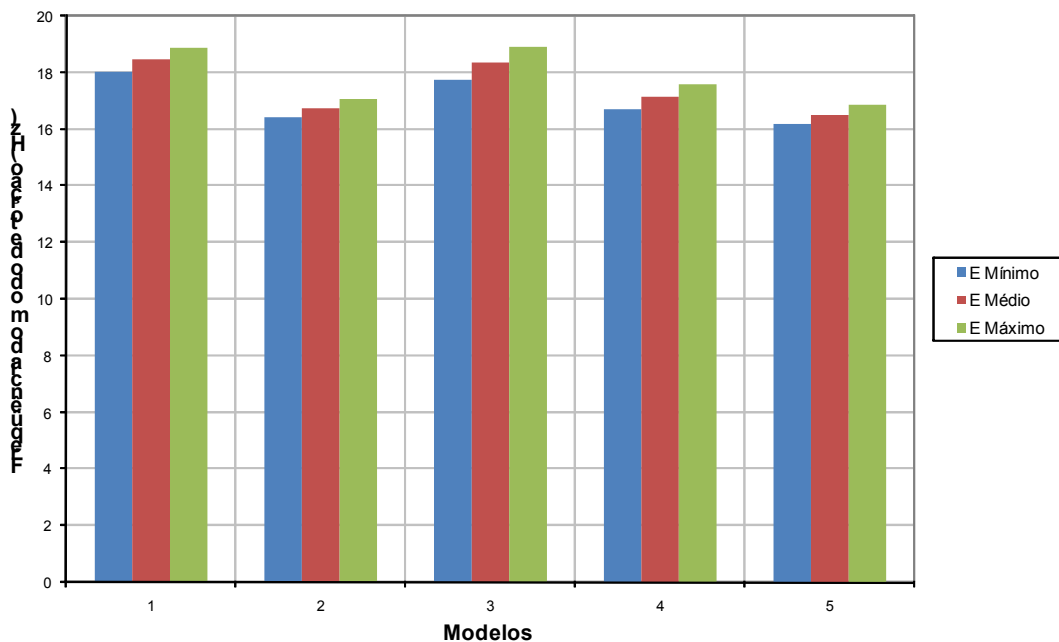


Figura 21 - Variação da frequência de torção com a inclusão dos elementos: viga sobre rótulas (modelo 1); aparelho de apoio (modelo 2), pilares (modelo 3), blocos (modelo 4) e estacas (modelo 5).

Tabela 5. Frequências do modo de Torção (modelo numérico com malha refinada)

Modelos	Frequências (Torção)		
	<i>E Mínimo</i>	<i>E Médio</i>	<i>E Máximo</i>
1	18.011	18.438	18.854
2	16.386	16.723	17.049
3	17.736	18.318	18.890
4	16.635	17.063	17.482
5	16.065	16.418	16.759

De forma a avaliar a validade dos resultados numéricos a partir dos experimentais foi feita uma análise considerando o *Modal Assurance Criteria* (MAC) para verificar se os modos são identificados corretamente. Nas Figuras 22 a 24 observam-se as comparações de frequência e os valores de MAC, os quais, para os ensaios experimentais com o trem carregado, ficaram acima de 0,9, para os modos de flexão e torção.

Flexão, sólido refinado, E mínimo

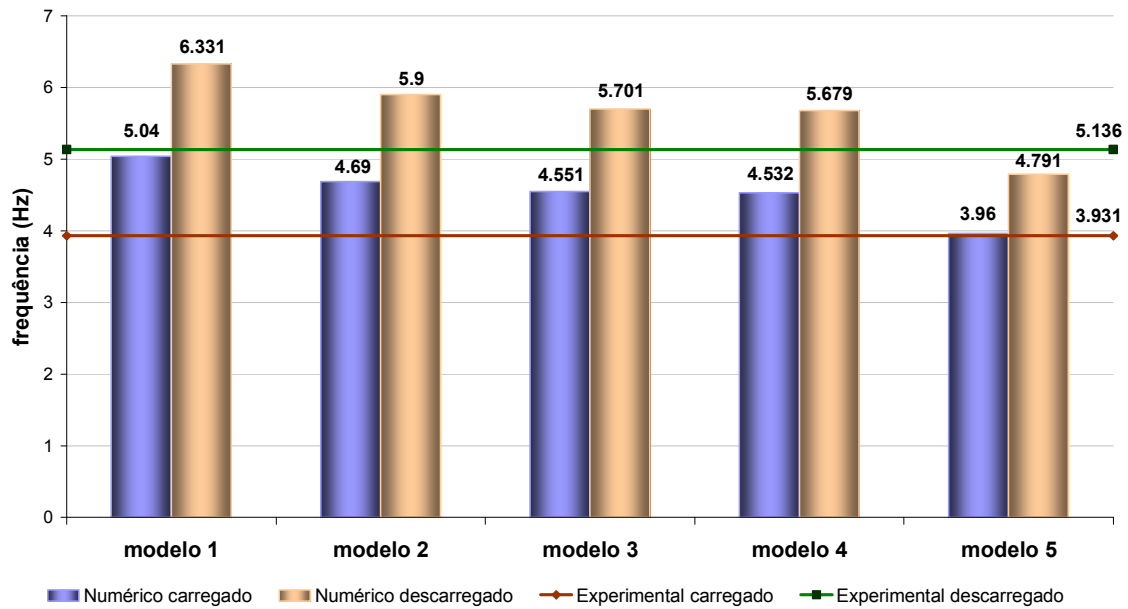


Figura 22 - Comparação entre as frequências de flexão dos modelos numéricos e o da análise experimental.

Flexão, Sólido refinado, E mínimo

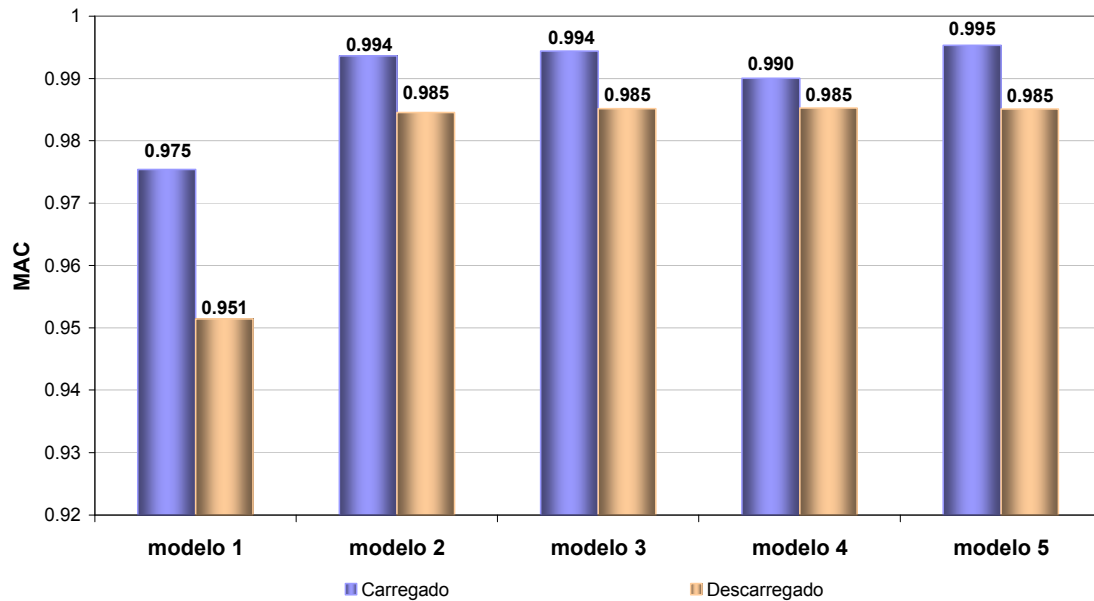


Figura 23 – MAC entre os modelos numéricos (modelo 1, 2, 3, 4 e 5) com trem carregado e descarregado e o modo experimental com trem carregado (3,931 Hz) e descarregado (5,136 Hz), para o 1º modo de flexão.

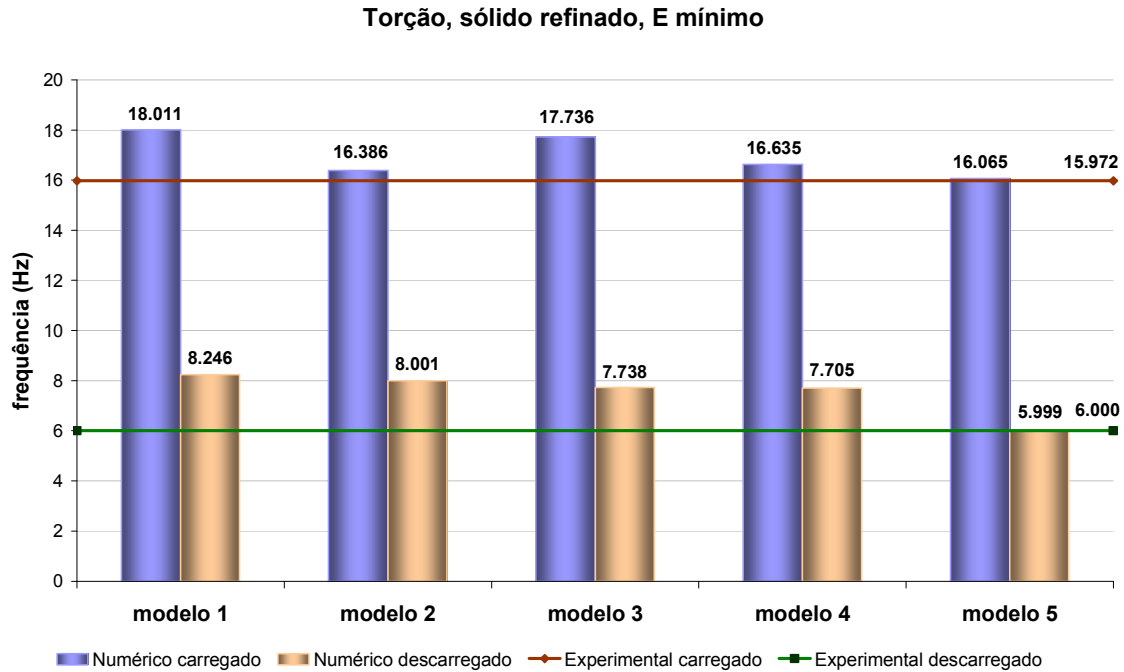


Figura 24 - Comparação das frequências de torção entre os modelos numéricos e os resultados experimentais .

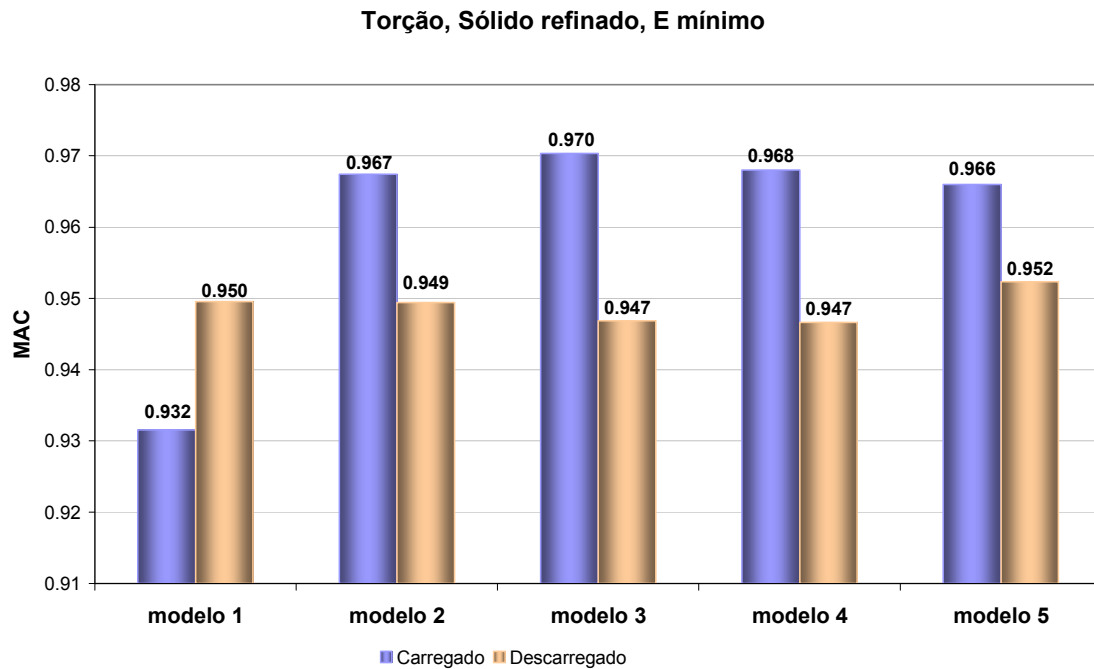


Figura 25 - MAC entre os modelos numéricos (modelo 1, 2, 3, 4 e 5) com trem carregado e descarregado e resultados experimentais com trem carregado (15,972 Hz) e descarregado (6,00 Hz), para o modo de torção.

8. CONCLUSÕES

A modelagem da estrutura considerando todos os elementos (Modelo 5) diferem em mais de 20% em relação ao modelo de viga biapoiada (Modelo 1), para flexão e em mais de 12% para torção. Isto demonstra que para o modelo simplificado os resultados são muito distantes dos valores experimentais, mostrando que a modelagem da estrutura completa faz-se necessária. Porém, ao se considerar somente a viga apoiada nos aparelhos de apoio, os resultados obtidos não ficam muito distantes do modelo completo para o modo de torção, mostrando que a flexibilidade do pilar e pelos elementos de fundação é pequena com a flexibilidade associada ao aparelho de apoio, para esse modo.

A influência da variação do módulo de elasticidade é pequena, para os valores obtidos em campo, principalmente ao se considerar o modelo completo.

Outro aspecto importante observado foi a mudança do comportamento da estrutura quando variada as condições de suporte. Para o modo de torção, as frequências dos modelos 3 e 4 são maiores que as do modelo 2. Isso provavelmente ocorre devido ao grande incremento de massa e rigidez adquirido pela estrutura ao se considera os pilares e os blocos. No modelo 2, a estrutura, apesar de possuir menos graus de liberdade, não possui a grande massa e rigidez dos pilares e blocos e é mais flexível devido aos aparelhos de apoio, fazendo com que a sua frequência fique próxima ao do modelo 5, onde a presença das estacas dá maior flexibilidade à estrutura.

Ao se diminuir o carregamento do trem através da redução da massa referente ao minério, observa-se que o sistema se comporta de uma maneira bem diferente com acréscimo considerável dos valores das frequências para flexão. Neste caso, a contribuição da massa dos componentes da estrutura, principalmente pilares e blocos, passa a ser muito maior nas formas modais, mostrando assim uma diferença significativa entre os modelos com trem carregado e trem descarregado tanto nas formas modais quanto nos valores de frequência natural encontrados.

Todos os valores do MAC ficaram acima de 0,9, mostrando que os modelos numéricos se comportam de forma semelhante à estrutura real e somando-se a isso a proximidade dos valores das frequências, pode-se dizer que os modelos estudados são adequados para analisar o comportamento dinâmico da ponte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia mineradora Vale pela oportunidade de realizar este trabalho, ao Prof. Dr. Luis Augusto Veloso, aos Técnicos Paulo Giovani e Adelma e aos engenheiros (as) Francisco Neto, Lilian Danielly, Rafael Queiroz e Mestre Sandro Amador pelas suas contribuições nos trabalhos de campo e no laboratório.

REFERÊNCIAS

Anjos, G. J. M. Avaliação do módulo de reação do solo, Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, UFPA, Brasil, 2007.

Albuquerque, Carlos Miguel Correia. Comportamento dinâmico de pontes com tabuleiro ortotrópico em vias de alta velocidade. 2008. 291 f. Dissertação (mestrado em estruturas de engenharia civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2008.

- Almeida, Pedro Aires Moreira Montenegro e. Comportamento dinâmico de uma ponte em arco existente para tráfego ferroviário de alta velocidade. 2008. 202 f. Dissertação (mestrado em estruturas de engenharia civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2008.
- Almeida, Ricardo Santos de. Análise de vibrações em pontes rodoviárias induzidas pelo tráfego de veículos sobre pavimentos irregulares. 2006. 162f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- Amador, S. D. R. Programa Computacional com Interface Gráfica para Identificação Estocástica de Parâmetros Modais de Estruturas Cíveis - Aplicação em Pontes e Torres de Linha de Transmissão. (Dissertação). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2007.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 9452: Vistorias de Pontes e Viadutos de Concreto, 1986.
- Beghetto, Fernando Luiz Martinechen. Efeitos dinâmicos em modelo de veículo e ponte ferroviária diante da variação de velocidade e irregularidades verticais da via. 2006. 126f. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.
- Biondi, B.; Muscolino, G.; Sofi, A. A substructure approach for the dynamic analysis of train-track-bridge system. Computers and Structures, vol. 83, p. 2271-2281, 2005. BNDES..
- Bueno, Régis Fernandes. Monitoração, por GPS, de deslocamentos em estruturas com carga dinâmica, 2007. 229f. Tese (doutorado em engenharia) – Departamento de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- Coelho, Bruno Emanuel Zuada. Comportamento Dinâmico de Lajes Sobre Estacas para Suporte de Vias Férreas de Alta Velocidade. 2008. 191 f. Dissertação (mestrado em estruturas de engenharia civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2008.
- Figueiredo, Helder Miguel Sousa. Dinâmica de pontes mistas aço-betão em linhas de alta velocidade. 2007. 355 f. Dissertação (mestrado em estruturas de engenharia civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2007.
- Lobato, S., Sampaio, R., Souza, R., Amador, S., Neto, F., Anjos, G., Azevedo, A., Oliveira, L., Queiroz, R., 2008. Influência das condições de suporte na modelagem numérica de uma ponte ferroviária. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural.
- Nunes, Alexandre. Análise Modal Teórica e Experimental Acústica de Cavidades com Absorção Sonora. Dissertação de mestrado pela Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2001, pp 529-534.

Peeters, B.; Ventura, C. E. Comparative Study of Modal Analysis Techniques For Bridge Dynamic Characteristic. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 17(5), p. 965-988, 2003.

Pfeil, W. *Pontes em Concreto Armado*. Rio de Janeiro, RJ: LPC Editora, v.2. 1989.