

Avaliação de projeto de pontes baseada em dados experimentais

Evaluation of bridges design based on experimental data

Iviane Cunha Santos
Fábio Pessoa da Silva Nunes
Rogério Calazans Verly

Resumo

A avaliação das pontes permite programar as intervenções e gerir a infraestrutura de forma económica, com atenuação significativa nos custos. Sabe-se que a resposta dinâmica se modifica devido a alterações nas dimensões dos elementos, condições de contorno, massa e deterioração das propriedades mecânicas, ou a ocorrência simultânea de todos estes fenómenos, incluídos nos processos de dano. Nesse sentido, o artigo descreve a metodologia de otimização de modelo numérico da ponte sobre o rio Oiapoque localizada na Rodovia Federal BR-156, Amapá, Brasil, por meio da comparação entre as frequências numéricas e experimentais. Conduz também uma análise numérica do acréscimo de rigidez fornecido por reforços como forma de propor soluções à recuperação da estrutura. A metodologia adotada foi essencial para atendimento as Normas e Manuais Técnicos e para subsidiar a definição do tipo de intervenção a ser projetado para a estrutura existente.

Abstract

The evaluation of the bridges allows to program interventions and manage infrastructure economically, with significant mitigation costs. It is well known that the dynamic response changes due to changes in the dimensions of the elements, boundary conditions, mass and deterioration of mechanical properties, or the simultaneous occurrence of all these phenomena, included in the damage process. In this sense, the article describes a methodology for optimizing the numerical model of the bridge over the Oiapoque River located at Federal Highway BR-156, Amapá, Brazil, based on the difference between numerical and experimental frequencies. It also leads a numerical analysis of increased stiffness provided by reinforcements in order to offer solutions for recovery of the structure. The methodology adopted was essential to comply with the Standards and Technical Manuals, and to support the definition of the type of intervention to be designed to the existing structure.

Palavras-chave: Pontes / Reabilitação de estruturas / Elementos finitos / ANSYS

Keywords: Bridges / Structural rehabilitation / Finite elements / ANSYS

Iviane Cunha Santos

Engenheira Civil
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Brasília, Brasil
iviane.santos@dnit.gov.br

Fábio Pessoa da Silva Nunes

Engenheiro Civil
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Brasília, Brasil
fabio.nunes@dnit.gov.br

Rogério Calazans Verly

Engenheiro Civil
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Brasília, Brasil
rogerio.calazans@dnit.gov.br

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SANTOS, I. C. [et al.] – Avaliação de projeto de pontes baseada em dados experimentais. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 4. ISSN 2183-8488. (julho 2017) 17-28.

1 Introdução

Segundo o relatório "Perspectivas da Economia Mundial", divulgado pelo Fundo Monetário Internacional (FMI) [1], a recuperação econômica do país exige o aumento dos investimentos em infraestrutura, deixar de fazê-lo pode produzir um impacto negativo na competitividade econômica e as consequências incluem a redução do potencial de crescimento que pode contribuir até para a criação de pressões inflacionárias. O Brasil, por sua vez, possui cerca de 60 mil quilômetros de rodovias federais pavimentadas, junto à estas estão as Obras-de-Arte Especiais: pontes, viadutos, passarelas, passagens inferiores e túneis, que ao longo da vida útil merecem continuada atenção de forma a detectar antecipadamente sinais de alteração dos níveis de segurança estrutural e desempenho funcional.

De tal modo, para preservação e manutenção da infraestrutura é imprescindível a avaliação do estado das estruturas de forma a permitir uma programação das intervenções nas obras e a gestão econômica da infraestrutura, com atenuação significativa nos investimentos.

Segundo o *Manual de Obras-de-arte Especiais*, do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT) [2], as estruturas devem ser projetadas para que possam ser utilizadas durante toda sua vida útil, sem cuidados excepcionais de manutenção e sem necessidade obrigatória de obras de recuperação ou reforço. Ainda que os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novos métodos na área do cálculo estrutural possam superar as limitações e dificuldades na análise da situação atual das obras, a carência de manutenção se apresenta como o principal fator para o surgimento de danos nas estruturas, aumentando a velocidade de degradação e comprometendo a segurança dos usuários [3].

Portanto, o cadastro, as inspeções regulares e o acompanhamento das obras-de-arte apresentam papel fundamental no correto diagnóstico dos danos, visando subsidiar o desenvolvimento de propostas de reabilitação [4].

O artigo propõe a avaliação quantitativa das anomalias que podem ser encontradas nas pontes nas condições de serviço, por meio da análise dinâmica [5] de modelos numéricos desenvolvidos [6], [7] e [8] pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) [9] e [10], de forma a proporcionar uma precisa avaliação da capacidade de serviço das estruturas. Conduz também uma análise numérica do acréscimo de rigidez fornecido por reforços como forma de propor soluções à recuperação da estrutura.

2 Ponte sobre o Rio Oiapoque

A Ponte Internacional Oiapoque situa-se na fronteira entre o Brasil e a Guiana Francesa, e liga a capital do estado do Amapá, Macapá, a capital da Guiana Francesa, Caiena, dando continuidade à rodovia brasileira BR-156 até o entroncamento na Rodovia RN2 na Guiana Francesa.

O projeto foi elaborado pela projetista e consultora Maia Melo Engenharia em outubro de 2008 e a empresa responsável pela execução foi o consórcio formado pelas empresas brasileiras EGESA/CMT.

2.1 Histórico da obra

Em 28 de maio de 1996, foi celebrado em Paris, o Acordo-Quadro de Cooperação entre Brasil e França. Desta forma o governo brasileiro iniciou as negociações com o governo francês para implementar a construção de uma ponte ligando Oiapoque, Brasil, à Saint-Georges, Guiana Francesa. O Acordo foi promulgado por meio do Decreto Nº 2.200 de 8 de abril de 1997, e finalmente em 15 de julho de 2005 foi celebrado o acordo relativo a contratação do projeto e construção, promulgado pelo Decreto Nº 6.250, de 6 de novembro de 2007, onde se definiram as características geométricas preliminares da ponte, como gabarito navegável mínimo, rodovia com duas pistas e uma pista mista para ciclistas e pedestres separada da via central por uma barreira física.

De tal modo, em 2006 o DNIT iniciou o processo de seleção para a execução dos serviços de elaboração de projeto de engenharia para construção da ponte e acessos. O projeto foi elaborado pela projetista e consultora Maia Melo Engenharia, concluído e aprovado em outubro de 2008. Neste contexto, foram realizados também o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), concluídos em junho de 2009, sendo o projeto considerado viável do ponto de vista ambiental, social e econômico.

Em 28 de novembro de 2008 foi publicada a convocação pública internacional para a contratação da construção da ponte. A empresa vencedora da concorrência foi o consórcio formado pelas empresas brasileiras EGESA/CMT. A construção da ponte teve seu início em 2009 e finalmente foi concluída em novembro de 2012.

2.2 Problemas durante a execução

As principais dificuldades encontradas durante a execução decorreram da interrupção da obra ocasionada devido ao atraso na liberação das licenças ambientais, achados arqueológicos na área da fundação no lado brasileiro e revisão no projeto de fundação. As obras da ponte realizadas nas duas margens do rio revelaram sítios arqueológicos que foram pesquisados por equipas francesas e brasileiras. O Institut National de Recherches Archéologiques Préventives – INRAP e o Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá identificaram peças de cerâmica, ricamente elaboradas, que continham depósitos funerários de aldeias indígenas dos séculos XI e XII.

Outro problema foi devido a falhas no projeto básico que indicava que o subsolo da região era formado por rochas graníticas e solo residual dispostos nas margens do rio; assim a fundação foi projetada em estaca raiz executada em solo embutida em rocha, onde os comprimentos variavam entre 6 e 9 metros para os pilares centrais e de 9 a 24 metros nos encontros, com um embutimento mínimo de 5,0 metros em rocha. Contudo, após nova campanha de sondagens realizada no projeto de execução, a geologia da área de construção das fundações apresentou blocos isolados de rochas envoltas em solos residuais. Desta forma, o comprimento das estacas raiz previstas no projeto básico seria insuficiente para garantir o embutimento em rocha de boa qualidade, sendo necessário ou aumentar o comprimento ou modificar a solução para tubulões encamisados atingindo os pontos mais baixos do perfil geológico e eliminando a solução de estaca raiz, sendo adotada a segunda solução.

2.3 Localização

A Ponte Internacional Oiapoque situa-se na fronteira entre o Brasil, município do Oiapoque no estado do Amapá, e a Guiana Francesa, município de Saint-Georges-de-Oyapock. A ponte compõe o Projeto Arco Norte, uma integração rodoviária de interconexão entre Suriname, Guiana Inglesa, Guiana Francesa e os estados de Amapá (capital Macapá) e Roraima (capital Boa Vista) no norte do Brasil, conforme Figura 1.



Figura 1 Arco Norte – integração rodoviária

A escolha do local de implantação da ponte se deu para aproveitar o estreitamento natural do canal do rio Oiapoque.

2.4 Características do projeto

Conforme Projeto Básico [11] e As Built [12], a ponte apresenta um comprimento total de 378 m, composta por um tabuleiro estaiado com comprimento de 345 m e duas caixas de equilíbrio com comprimento de 16,5 m. Longitudinalmente a ponte é constituída por três vãos, o vão principal medindo 245 m e dois vãos de equilíbrio medindo 50 m. Os gabaritos de navegação adotados para o local têm largura de 50 m e altura livre de 15 m, localizada no meio do vão estaiado.

A ponte tem dois planos de tirantes, fabricados com aço CP-177RB, ligando o tabuleiro ao mastro em sistema intermediário.

O mastro em forma de “H” é composto por dois pilares quadrados com seção vazada, travados na altura do tabuleiro por uma viga com seção em caixão. As vigas de travamento do mastro servem de base para os aparelhos de apoio metálicos, sobre os quais serão apoiadas as longarinas da ponte.

A plataforma apresenta uma largura de 13,70 m, sendo a seção transversal constituída por um passeio para pedestres com largura de 2,50 m e por uma pista de 9,0 m, abrigando duas faixas de 3,50 m e duas faixas de segurança de 1,00 m cada. Também constituem o tabuleiro duas barreiras incorporadas nas longarinas e uma mureta lateral de 0,20 m.

A seção transversal é constituída de duas vigas longarinas com 1,27 m de altura nas bordas da pista e uma laje de espessura mínima de 35 cm. O vão central é subdividido em aduelas com comprimento aproximado de 7,0 m.

A obra foi projetada atendendo as normas brasileiras, considerando o veículo classe TB-45, que contempla um veículo de projeto de 450 kN, e o concreto utilizado apresenta a resistência característica $F_{ck} = 35$ MPa.

A Figura 2 apresenta uma imagem da ponte na fase final da construção.



Figura 2 Ponte sobre o Rio Oiapoque – Vista do lado da Guiana Francesa

3 Ensaio dinâmico

O ensaio dinâmico foi realizado pela empresa IEME Brasil [13] com o objetivo de avaliar o comportamento em relação ao previsto no projeto. As monitorações dinâmicas da ponte foram realizadas entre os dias 26/09/2011 e 01/10/2011. A excitação da estrutura se deu de duas formas distintas, com a passagem de veículos a aproximadamente 20 km/h, onde foram posicionadas madeiras transversalmente a pista para aumentar o impacto, Figura 3 a), e por meio de vibração forçada gerada por um vibrador eletromecânico, Vibrodina, Figura 3 b).



Figura 3 Detalhes do ensaio dinâmico a) Caminhões utilizados para a excitação da ponte; b) Posições do Vibrodina

Para essa monitoração foram utilizados acelerômetros do tipo piezo-resistivo, com sensibilidade 20 mV/g. Os acelerômetros foram acoplados a um sistema de condicionamento de sinais, com filtros e amplificadores da marca lotech, modelo WBK 16, e um sistema de aquisição de dados modelo Wavebook/516, ligados a um computador para o armazenamento automático dos resultados onde utilizou-se

o programa WaveView, da marca lotech, para tratamento dos dados.

Os acelerômetros foram posicionados no tabuleiro na direção vertical e transversal ao eixo longitudinal da ponte, a 1/3 e 1/6 do vão, e em alguns tirantes da ponte. Cada prova teve 10 minutos de duração, e os resultados foram gravados a uma frequência de aquisição de 500 Hz. As Figuras 4 a) e 4 b) ilustram as posições dos acelerômetros nas duas torres, e a Figura 4 c) apresenta os detalhes do posicionamento dos acelerômetros.

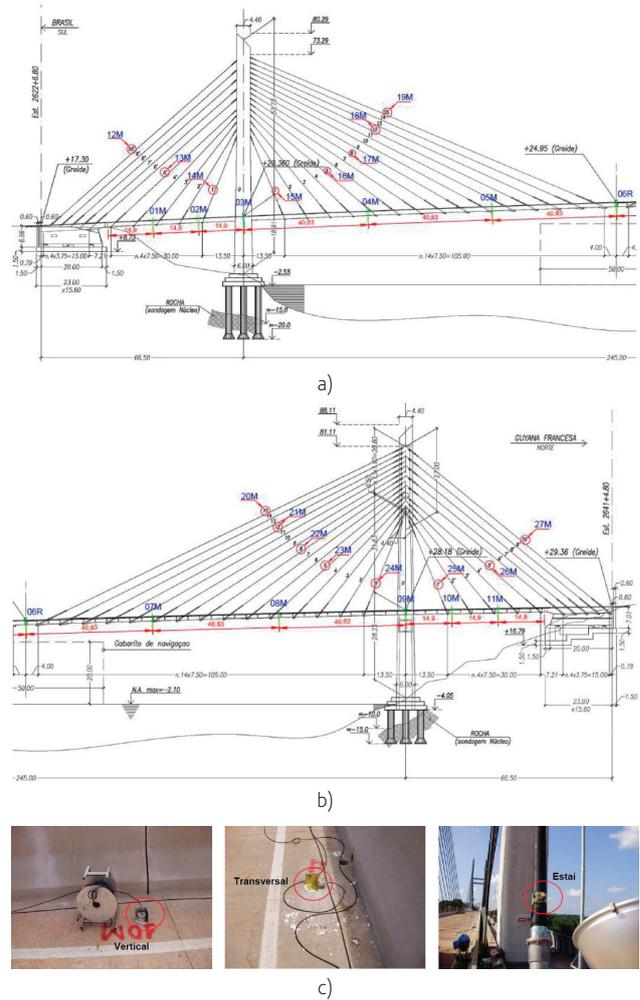


Figura 4 Posicionamento dos acelerômetros: a) Torre Brasil; b) Torre Guiana; c) Detalhes dos acelerômetros no tabuleiro e tirantes (Estai Português Brasil)

A partir dos resultados obtidos experimentalmente pode-se obter os gráficos do módulo da função de transferência, Figura 5 a), onde os picos desses gráficos correspondem às frequências naturais da estrutura. Com a parte imaginária da função de transferência foi possível avaliar a deformada modal, Figura 5 b), e, desse modo, a partir da análise dos gráficos citados foi possível determinar as frequências naturais e as deformadas modais da estrutura.

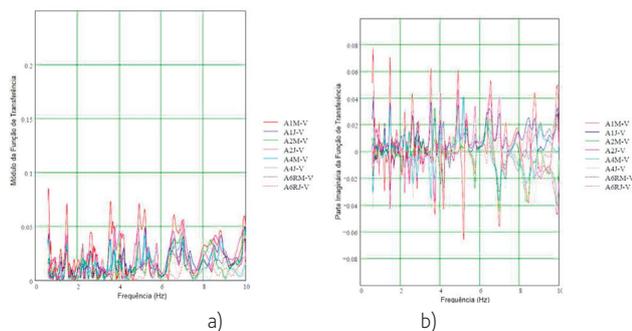


Figura 5 a) Módulo da função de transferência; b) Parte Imaginária da função de transferência

4 Modelo numérico

O modelo numérico 3D foi desenvolvido no Software ANSYS versão R15 [14].

O elemento de viga, com seis graus de liberdade por nó, BEAM188, foi adotado para a representação dos tirantes, vigas, travessas e mastro, sendo este último modelado com seção variável ao longo da altura, adotando ao todo 6 seções diferentes. O elemento de casca, com seis graus de liberdade por nó, SHELL181, foi considerado para a representação das lajes.

A motivação para a modelagem dos tirantes como elementos de viga utilizando o elemento BEAM188, foi incluir o efeito da rigidez a flexão na análise da não-linearidade geométrica com grandes deslocamentos. Para os tirantes foram consideradas ainda as cargas de protensão previstas no projeto, sendo estas escalonadas em fases, simulando o comportamento real da estrutura e evitando os problemas de deformações excessivas provocadas pela excentricidade geométrica.

A Figura 6 apresenta o modelo numérico desenvolvido no software ANSYS.

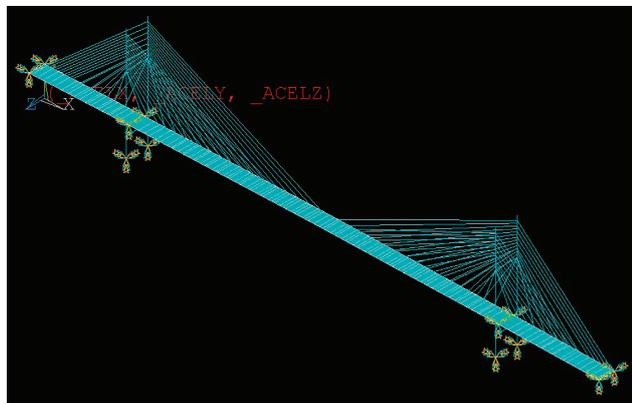
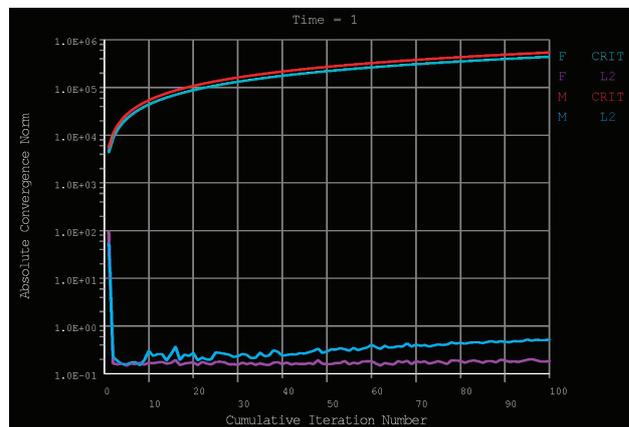


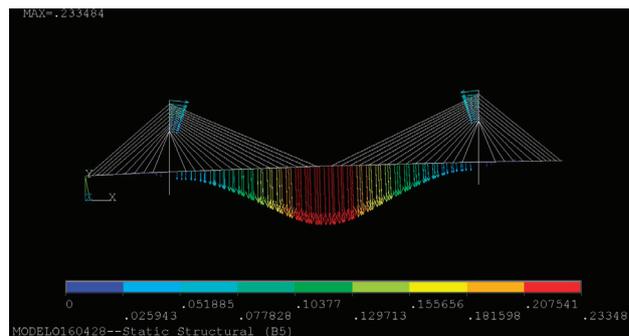
Figura 6 Modelo numérico da ponte

5 Análise estática e modal

A primeira etapa foi a análise estática considerando as não-linearidades geométricas devidas às grandes deformações, onde se considerou a ação da força de protensão nos tirantes e ação da aceleração da gravidade. A Figura 7 a) apresenta os resultados da análise de convergência das não-linearidades geométricas do modelo numérico e a Figura 7 b) apresenta a seção deformada final obtida após a análise não-linear da ponte.



a)



b)

Figura 7 Análise estática: a) Gráfico de convergência da força na análise não-linear; b) Deformada final

A análise modal objetivou determinar as frequências e modos de vibração naturais da estrutura, foi realizada uma análise linear onde as não-linearidades, tais como plasticidade e elementos de contato, foram ignoradas. Para a resolução dos problemas de autovalores e autovetores no programa ANSYS foi utilizado o método Subespaço. Os modos principais são ilustrados na Figura 8 em escala de deformação exagerada para melhor visualização dos modos.

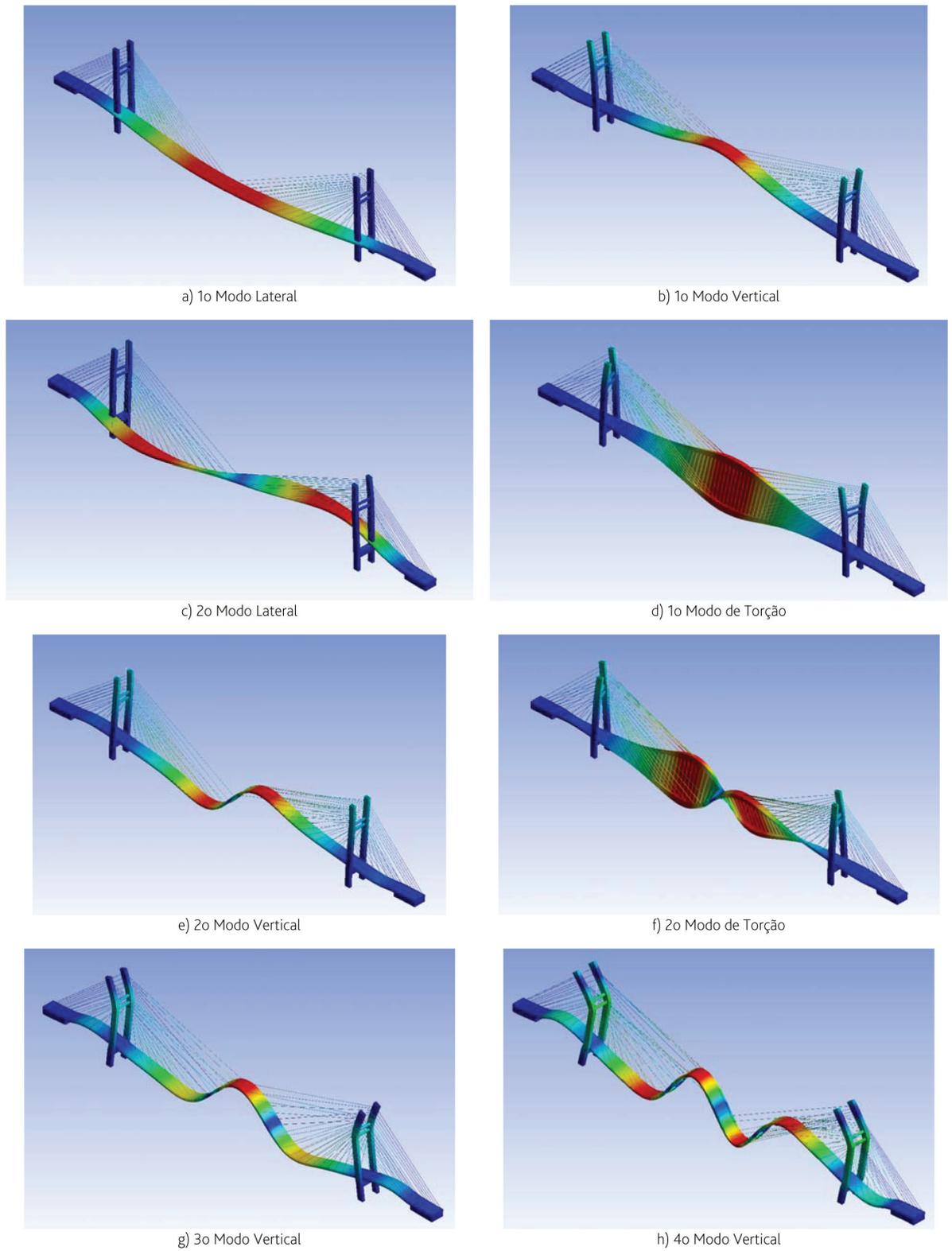


Figura 8 Análise modal

6 Avaliação numérica do modelo de recuperação

Após o desenvolvimento do modelo e análise estática e modal, onde foram determinados a deformação estática e os modos e frequências naturais de vibração, foram consideradas duas situações: a primeira, a estrutura foi modelada sem a consideração das anomalias, conforme projeto final *as built*, e, a segunda situação, foram consideradas anomalias conforme análise de sensibilidade dos parâmetros mais influentes onde tentou simular-se a redução das áreas das seções para a condição de fissuras e trincas, e redução do módulo de elasticidade para representar no modelo numérico a perda da protensão nos tirantes e tabuleiro.

Além da redução da elasticidade devida a relaxação na protensão, ainda foram consideradas nos tirantes a redução da elasticidade para a Elasticidade Equivalente conforme formulação proposta por Irvine [15] e Caetano [16], onde a rigidez axial apresenta uma variação linear em relação ao comprimento, e a tensão axial. Em uma análise linear simplificada, uma rigidez axial pode ser linearizada e poderá ser associada a um determinado nível de comprimento e tensão, por meio da avaliação de um módulo de elasticidade equivalente e E_{EQ} definido como uma função de parâmetro λ^2 , de acordo com a Equação 1:

$$E_{EQ} = \frac{E}{1 + \left(\frac{\lambda^2}{12}\right)} \quad (1)$$

sendo o parâmetro λ^2 definido conforme Equação 2:

$$\lambda^2 = \left(\frac{m \cdot g \cdot L}{T}\right) \cdot \frac{L}{T L_e} \quad (2)$$

onde L e T representam respectivamente o comprimento e a tensão do tirante, m é a massa distribuída ao longo do comprimento e L_e é o comprimento virtual definido como Equação 3:

$$L_e = \int_0^L \left(\frac{ds}{dx}\right)^3 dx \cong L \left[1 + 8\left(\frac{d}{L}\right)^2\right] \quad (3)$$

Para a correlação entre as frequências naturais experimentais e numéricas utilizou-se o índice FER . Assim, para o modo experimental g e um modo numérico h , o índice é dado pela Equação 4:

$$FER_{gh} = \frac{\lambda_h - \lambda_g}{\lambda_g} \quad (4)$$

onde λ_h representa a frequência natural numérica do modo h e λ_g representa a frequência experimental do modo g .

Através da integração entre os softwares *ANSYS* [17] e *ModeFrontier* [18], foram realizadas simulações na fase de otimização empregando dois métodos de otimização: *MOGA* (*Algoritmos Genéticos para Multiobjective Optimization*), com uma abordagem multiobjetivo da otimização para um resultado mais geral, e o *NLPQL* (*Non Linear Programação quadrática Lagrangian*) usando um algoritmo baseado no gradiente ideal para otimizações locais, para uma abordagem mais refinada.

6.1 Análise de sensibilidade dos parâmetros

O cálculo da sensibilidade estrutural consiste na avaliação da alteração das variáveis de resposta em função da variação das variáveis de projeto. Desse modo, a sensibilidade associada com o parâmetro de projeto selecionado é calculada, permitindo assim selecionar os parâmetros mais sensíveis, que serão utilizados no processo de atualização.

De tal modo, na análise de sensibilidade calcula-se o coeficiente de sensibilidade S_c definido como a correlação entre a derivada das variáveis de estado ou da função objetivo e a derivada das variáveis de projeto ou parâmetro de atualização, definido conforme Equação 5 e Equação 6:

$$S_c = \frac{\delta_z}{\delta_A} = \frac{Z_m - Z}{A_m - A} \quad (5)$$

$$\delta_z = S_c \cdot \delta_A \quad (6)$$

onde $\delta_A = A_m - A$ representa a alteração nos parâmetros de atualização; $\delta_z = Z_m - Z$ representa a alteração nas variáveis de estado ou função objetivo.

Desse modo, a análise de sensibilidade realizada no *ModeFrontier* objetivou avaliar a correlação entre os parâmetros: força nos tirantes,

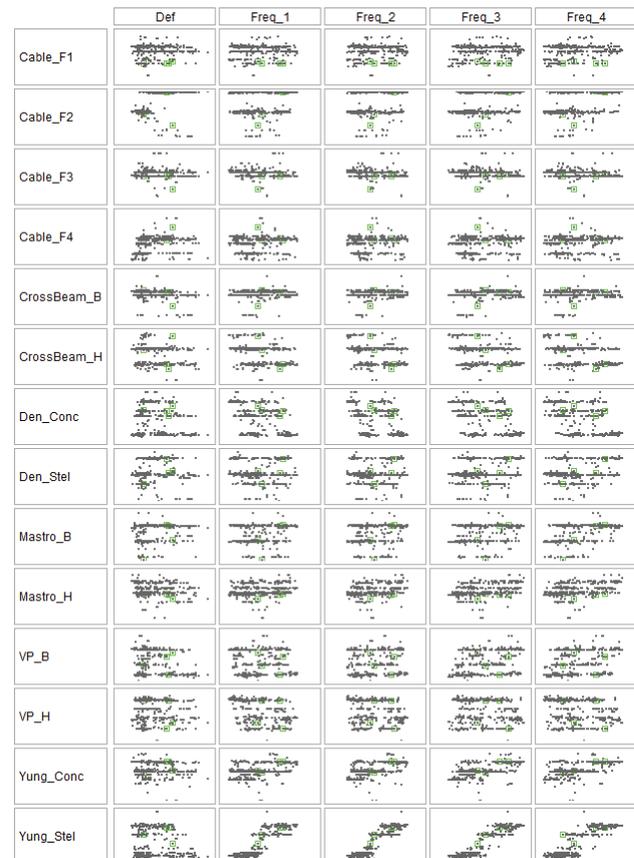


Figura 9 Análise de sensibilidade

módulo de elasticidade, densidade e dimensão dos elementos principais: vigas, transversinas e mastro, com a frequência de resposta da estrutura, conforme ilustrado na Figura 9.

Como um resultado do estudo de sensibilidade, concluiu-se que o parâmetro de maior impacto sobre a resposta de frequência foi o módulo de elasticidade dos tirantes, com um coeficiente de sensibilidade de 0,9. Os parâmetros de Elasticidade e Densidade do Concreto, inércia da Viga Principal e Transversinas apresentaram coeficientes de correlação com as respostas de 0,5, 0,5, 0,39 e 0,40 respectivamente.

Os demais parâmetros apresentaram correlação com valores inferiores a 0,3. Assim, com base na análise de sensibilidade, decidiu-se trabalhar com os parâmetros módulo de Elasticidade dos Tirantes, Elasticidade e Densidade do Concreto e inércia da Viga Principal e Transversinas, que mostraram maior coeficiente de sensibilidade.

6.2 Simulação da estrutura sem dano

Com a consideração das estruturas na condição de projeto, o modelo desenvolvido e os modos e as frequências naturais foram extraídos. A comparação dos resultados entre as frequências numéricas e experimentais da ponte é apresentada na Tabela I.

Tabela I Comparação das frequências numéricas e experimentais – Tabuleiro

Configuração	Frequências		FER
	Analítica	Experimental	
1º vertical	0,6472	0,75	-13,71%
2º vertical	1,5538	1,40	10,99%
3º vertical	2,3656	2,65	-10,73%
4º vertical	3,4013	3,60	-5,52%

Para os estais da ponte onde as frequências foram medidas procedeu-se ao cálculo da correção numérico e experimental apresentado na Tabela II.

Tabela II Comparação das frequências numéricas e experimentais – Estais Guiana

Estais	Frequências		FER
	Analítica	Experimental	
1º 15 vão principal	3,07	3,06	-0,33%
2º 15 vão principal	4,13	4,10	-0,73%
3º 15 vão principal	5,11	5,08	-0,59%

6.3 Simulação da estrutura com dano

Foi criado o modelo numérico com a consideração de anomalias, com o objetivo principal de simular anomalias que podem ser encontradas nas pontes nas condições de serviço.

A Figura 10 apresenta a estrutura de otimização no Programa ModeFrontier, onde os parâmetros de entrada foram força nos tirantes, módulo de elasticidade, densidade e seção das vigas principais, transversinas e mastro. Estes parâmetros foram correlacionados com as quatro frequências dos modos verticais medidos no ensaio experimental assim como a minimização da deformação da análise estática não-linear.

Os valores ótimos para os parâmetros estão relacionados na Figura 11 e foram utilizados para desenvolver o modelo com dano simulado.

Assim, no modelo numérico com dano foram consideradas reduções de seções conforme resultados obtidos na otimização dos parâmetros. A comparação dos resultados entre as frequências numéricas e experimentais da ponte é apresentada na Tabela III.

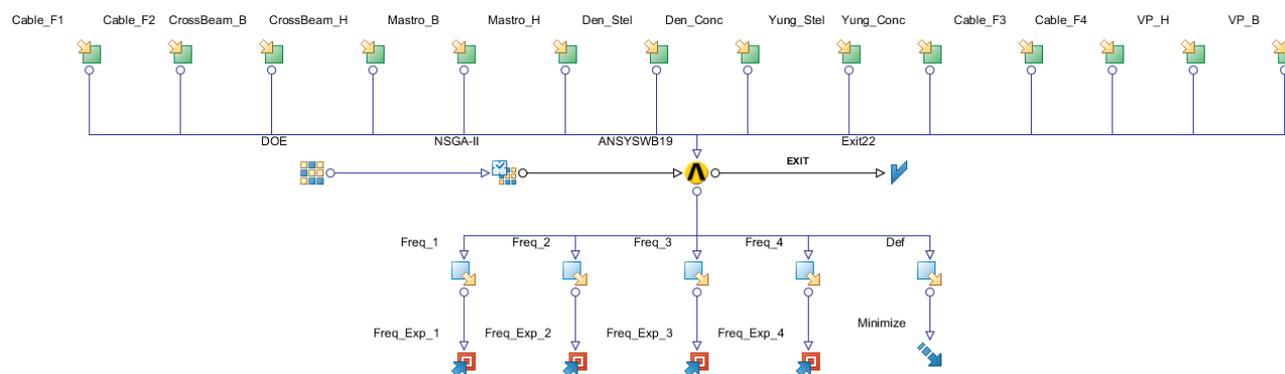
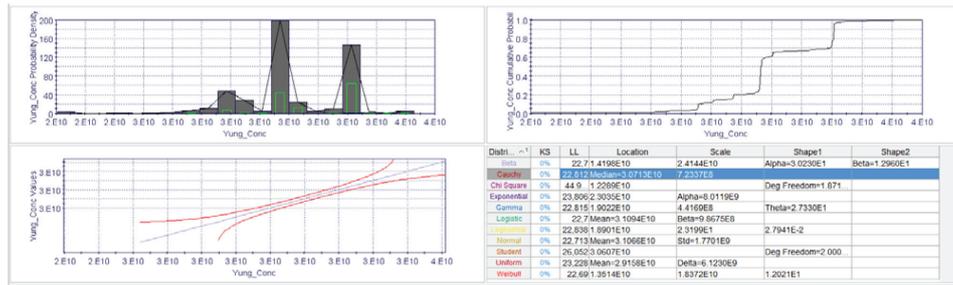
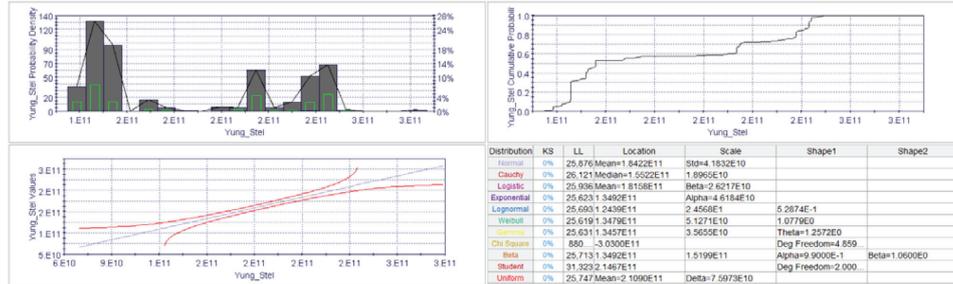


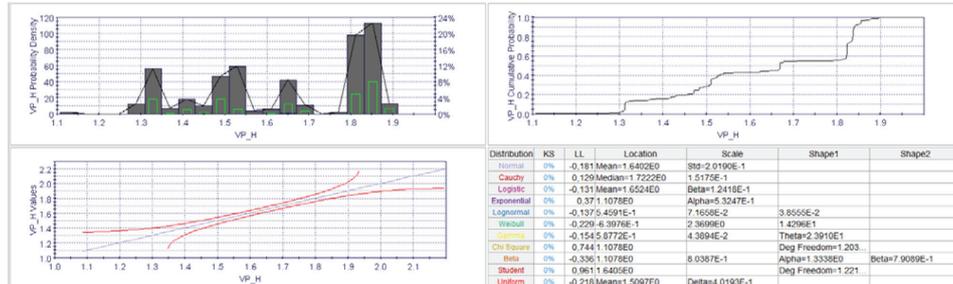
Figura 10 Estrutura da otimização dos parâmetros na simulação com dano



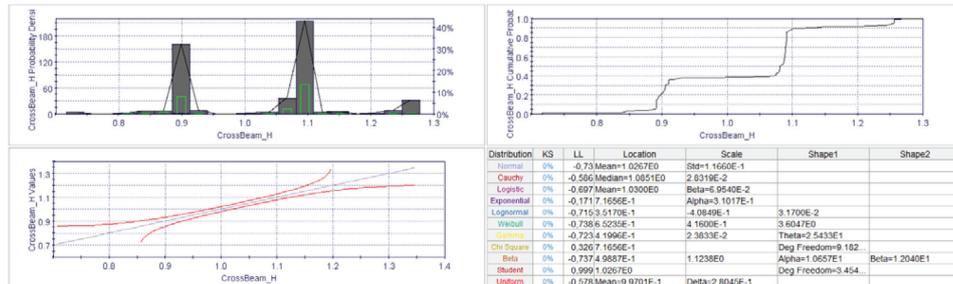
a) Módulo Elasticidade do Concreto



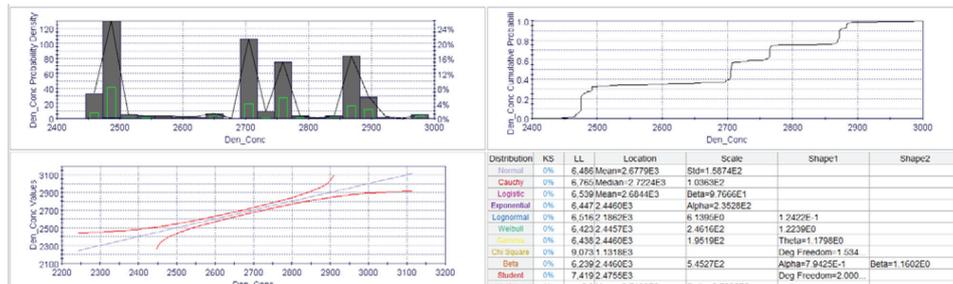
b) Módulo Elasticidade dos Tirantes



c) Inércia da Viga Principal



d) Inércia da Transversina



e) Densidade do Concreto

Figura 11 Valores ótimos dos parâmetros

Tabela III Comparação das frequências numéricas e experimentais – Tabuleiro

Configuração	Frequências		FER
	Análítica	Experimental	
1º vertical	0,7829	0,75	4,39%
2º vertical	1,4291	1,40	2,08%
3º vertical	2,6240	2,65	-0,98%
4º vertical	3,5761	3,60	-0,66%

Pode-se notar que, com a consideração os valores dos danos, as frequências se aproximaram mais das frequências encontradas no ensaio experimental.

6.4 Proposta de recuperação da estrutura

Nesta seção propõe-se o retensionamento dos tirantes de forma a diminuir a deformada estática e aumentar a rigidez global da estrutura. A comparação dos resultados entre as frequências numéricas e experimentais da ponte é apresentada na Tabela IV.

Tabela IV Comparação das frequências numéricas e experimentais – Tabuleiro

Configuração	Frequências		FER
	Análítica	Experimental	
1º vertical	0,75276	0,75	0,37%
2º vertical	1,3437	1,40	-4,02%
3º vertical	2,6213	2,65	-1,08%
4º vertical	3,6314	3,60	0,87%

A consideração do retensionamento dos tirantes levou a representação dos modos e frequências verticais mais próximas às experimentais. Considerando ainda os resultados da inspeção planejada para a estrutura, poderá no futuro analisar-se a capacidade de prever os dados por meio da atualização do modelo numérico e assim obter novos valores de frequências e modos que poderão ser utilizados na avaliação mais precisa da proposta de retensionamento e reforço da estrutura.

7 Conclusão

O objetivo da análise teórica e experimental na estrutura na condição de projeto, sem danos, foi avaliar o comportamento estrutural da ponte estaiada no estágio após a construção quanto ao atendimento as condições de projeto. Assim, o comportamento da ponte pode ser considerado satisfatório, uma vez que o modelo numérico desenvolvido com base nos dados do projeto executivo apresenta resultados próximos aos experimentais avaliados após a conclusão da obra, como pode ser observado por meio do índice de correlação entre as frequências naturais e o índice FER.

No entanto, pode-se notar que a consideração das alterações nos valores dos parâmetros estruturais levou a valores de frequências numéricas próximos aos das frequências experimentais, o que demonstra as incertezas do modelo em representar a estrutura, assim como possíveis existências de danos.

Uma avaliação numérica quantitativa das anomalias que podem ser encontradas nas pontes nas condições de serviço, por meio da análise dinâmica de modelos numéricos, proporciona uma forma adequada de avaliação da capacidade de serviço e ainda possibilita a análise numérica do acréscimo de rigidez fornecido pelo reforço como forma de propor soluções à recuperação da estrutura. No caso de estudo apresentado, a proposta de reforço se ateu no retensionamento dos tirantes como forma de diminuir a deformada estática e aumentar a rigidez global da estrutura.

Por fim, com os resultados da inspeção planejada para estrutura, poderá no futuro avaliar-se a capacidade de prever os danos por meio da atualização do modelo numérico e assim obter novos valores de frequências e modos que poderão ser utilizados na avaliação mais precisa dos valores de retensionamento proposto.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio prestado pelas seguintes instituições e parceiros: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasil; a empresa IEME BRASIL pelo Relatório do Ensaio Dinâmico; e Licença Acadêmica ModeFrontier ESTECO.

Referências

- [1] International Monetary Fund – *World Economic Outlook: Legacies, Clouds, Uncertainties*. Washington, October 2014.
- [2] DNIT – *Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais*. DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, 1996.
- [3] Vitorio, J. – *Pontes Rodoviárias: Fundamentos, Conservação e Gestão*. Recife: 1 Edição, 2002.
- [4] DNIT – *Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2004.
- [5] Clough, R. W.; Penzien, J. – "Dynamics of Structures" (3ª ed.). Berkeley, CA: *Computers & Structures, Inc.*, 2003.
- [6] Fu, C. C.; Wang, S. – *Computational Analysis and Design of Bridge Structures* (Vol. 1). Boca Raton, FL, EUA: CRC Press Taylor & Francis Group. doi:978-1-4665-7985-9, 2014.
- [7] Gimsing, N. J.; Georgakis, C. T. – *Cable Supported Bridges Concept and Design* (3 ed.). Chichester: John Wiley & Sons. doi:1119951879, 9781119951872, 2011.
- [8] Hambly, E. C. – *Bridge Deck Behaviour* (2 ed.). CRC Press, 1991.
- [9] Clough, R. W. – "The Finite Element in Plane Stress Analysis". Proceedings 2nd ASCE Conference on Electronic Computations, (pp. 345-378), Pittsburgh, USA, 1960.

- [10] Greening, P. D. – *Dynamic Finite Element Modelling and Updating of Loaded Structures*. University of Bristol, Bristol, 1999.
- [11] Maia Melo Engenharia. – *Projeto Básico - Ponte Internacional sobre o Rio Oiapoque*. BR-156/AP. Brasília: DNIT, 2008.
- [12] Maia Melo Engenharia – *As Built - Ponte Internacional sobre o Rio Oiapoque*. BR-156/AP. Brasília: DNIT, 2011.
- [13] IEME BRASIL – *Relatório de Avaliação estrutural da Ponte Estaiada sobre o Rio Oiapoque*. São Paulo: DNIT, 2011.
- [14] ANSYS – *ANSYS Mechanical User's Guide Release 15.0*. Canonsburg, 2013.
- [15] Irvine, H. M. – *Cables Structures*. London, England: The MIT, 1981.
- [16] Caetano, E. S. – *Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges*. Zurich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, 2007.
- [17] Software ANSYS – Versão R15, 2015.
- [18] Software ModeFrontier – Versão 2014. Fornecido por ESTECO, 2014.

