



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS  
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING  
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

## ATUALIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DA PONTE SOBRE O RIO OIAPOQUE

**Rosanna Duarte Fernandes Dutra**

[rosannabsb@gmail.com](mailto:rosannabsb@gmail.com)

Centro Universitário de Brasília, UniCEUB, Brasília/DF, Brasil

Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil

**Iviane Cunha Santos**

[ivianecunha@hotmail.com](mailto:ivianecunha@hotmail.com)

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e Universidade de Brasília

Brasília/DF, Brasil

**José Luís Vital de Brito**

[jlbrito@unb.br](mailto:jlbrito@unb.br)

Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil

**Resumo:** A atualização do modelo numérico atualizado é um procedimento para determinar os parâmetros de incerteza de um modelo inicial, com base em resultados experimentais, visando atingir modelo atualizado mais apropriado. No entanto, o sucesso da atualização depende de um modelo numérico bem concebido, um teste experimental controlado e na capacidade para integração dos dados experimentais e numéricos. Este Artigo descreve o emprego das técnicas de atualização implementados em pacotes de software comerciais, visando a identificação do comportamento global da ponte sobre o rio Oiapoque. Como referência do processo de atualização do modelo numérico foram utilizados os dados do ensaio experimental. Com o modelo numérico atualizado pretende-se avaliar a capacidade de prever a integridade estrutural por meio dos métodos de atualização utilizando os dados das respostas dinâmicas.

**Palavras-chave:** Elementos Finitos, Dinâmica, Otimização, ANSYS

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui cerca de 60 mil quilômetros de estradas federais pavimentadas, a maior parte foi construída há mais de 25 anos, junto a estas estão as Obras-de-Arte Especiais, pontes, viadutos, passarelas, passagens inferiores e túneis, que necessitam de grandes e contínuas intervenções para preservação. A avaliação das estruturas permite a programação de obras de reparação e gestão das infraestruturas de forma econômica com atenuação significativa dos custos.

Um nível adequado de segurança de projetos novos e existentes de grandes estruturas como as de pontes, pode ser alcançado se as propriedades dinâmicas destas, tais como frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento são determinadas com precisão. Análise modal é uma técnica que estima as características dinâmicas (parâmetros modais) de uma estrutura. Estes parâmetros modais podem servir de base para atualização de modelos de elementos finitos, para controle estrutural, detecção de danos, avaliação do estado, e de longo prazo vigilância da saúde da estrutura.

Segundo Xin et al. (2005) procedimentos gerais para análise modal podem incluir análises analíticas e experimentais. A análise modal analítica é o processo de determinar as propriedades dinâmicas de uma estrutura baseada na solução vibração livre das equações de movimento. O método dos elementos finitos (FEM) é atualmente uma maneira comum de realizar uma análise modal analítica do estaiada pontes (Ren e Obata, 1999), no qual é possível conhecer a geometria, condições de contorno e propriedades do material, a estrutura é expressa na forma de matriz, fornecendo informação para determinar os parâmetros modais estruturais que descrevem as propriedades dinâmicas da estrutura. Porém considerando que muitas simplificações são feitas no processo de modelagem das estruturas complexas e devida a incertezas no material e propriedades geométricas a confiabilidade dos resultados da análise modal de análise muitas vezes é questionável se o modelo FEM não é validado experimentalmente. O ensaio dinâmico de uma estrutura fornece uma descrição fiel de suas características dinâmicas. A análise modal experimental é então um processo de identificação os parâmetros modais baseados nas medições dinâmicas.

A resposta dinâmica das alterações estruturais, devido a alterações nas dimensões dos elementos, condições de contorno, a massa e a deterioração das propriedades mecânicas de materiais, incluindo o processo de danos, ou a ocorrência simultânea de todos estes fenômenos, afeta o comportamento dinâmico de estruturas, fazendo com que a mudança nos valores das frequências, modos e coeficientes de amortecimento. Usando dos métodos de otimização e com base em índices que levam em conta a diferença entre as frequências numéricas e experimentais, foi desenvolvido o modelo numérico da Ponte Internacional do Oiapoque, realizou-se primeiro a análise de sensibilidade que teve como objetivo definir os parâmetros a serem considerados e, finalmente, com o modelo numérico e posse dos dados experimentais anteriormente coletado, procedeu-se otimização dos parâmetros da estrutura, usando a o software comercial FEMTools e ModeFrontier, a fim de obter o modelo numérico atualizado que pode ser usado com confiabilidade em outras análises.

A principal contribuição deste trabalho foi desenvolver um modelo numérico atualizado, que proporciona uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais e conduz a uma representação mais precisa da estrutura.

Como referência para o processo de atualização do modelo numérico foi utilizado os dados do ensaio experimental realizado em 2011 pela empresa IEME Brasil (IEME BRASIL, 2011). Por fim, o modelo numérico atualizado poderá ser utilizado em análises futuras como forma de avaliar a capacidade de prever a integridade estrutural, como por exemplo utilizando métodos de detecção e localização de danos.

## 1.1 Atualização de Modelos de Pontes

Segundo Martins *et al.*(2015) o objetivo do processo de atualização do modelo de elementos finitos é ajustar os parâmetros do modelo de elemento finito tal que o erro entre os parâmetros dinâmicos identificados experimentalmente e aqueles obtidos do modelo numérico seja minimizado. Foi realizada a atualização numérica das forças do cabo de uma ponte estaiada e os resultados mostram que é possível formular e resolver o problema de determinação das forças no cabo que permanecem com forças de pré-esforço concretas como um problema de otimização, incluindo todos os aspectos relevantes na análise estrutural de uma ponte estaiada concreto, ou seja, as fases de construção, os efeitos dependentes do tempo e as não-linearidades geométricas.

Merce (2007) coloca que o modelo numérico em elementos finitos atualizado é obtido a partir de um modelo numérico e de um modelo modal experimental, na tentativa de superar os erros existentes em ambos os modelos, de tal forma que as propriedades modais obtidas numericamente se aproximem ao máximo das obtidas

experimentalmente. Ainda segundo a autora é necessário realizar uma análise de sensibilidade para a definição dos parâmetros de atualização em relação à função objetivo e também em relação a todas as variáveis de estado. Os resultados obtidos proporcionam a verificação de qual é o parâmetro que influencia em uma determinada frequência.

## 2 ESTUDO DE CASO – PONTE SOBRE O RIO OIAPOQUE

A Ponte Internacional do Oiapoque, concluída em 2011, situa-se na fronteira entre o Brasil no Estado do Amapá e o Território Francês na Guiana Francesa. A localização da ponte do lado do Brasil é no município do Oiapoque e no lado da Guiana Francesa no município de Saint Georges de l'Oyapock. A ponte sobre o Rio Oiapoque liga Macapá a Caiena dando continuidade às rodovias BR-156/AP: trecho Entroncamento da BR-156/AP – Ponte/Rio Oiapoque – Entroncamento RN 2 (Guiana Francesa). O projeto foi elaborado pela Maia Melo Engenharia em outubro de 2008 e a empresa responsável pela execução foi o Consórcio EGESA/CMT.

### 2.1 Detalhes do Projeto

O projeto foi elaborado pela Maia Melo Engenharia (2008). A ponte tem comprimento total de 378m e é composta por um tabuleiro estaiado com comprimento de 345m e duas caixas de equilíbrio com comprimento de 16,5m. Longitudinalmente a ponte é constituída por três vãos, sendo o vão principal medindo 245m e dois vãos de equilíbrio medindo 50m. Os gabaritos de navegação adotados para o local têm largura de 50m e altura livre de 15m, localizado no meio do vão estaiado. 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. A ponte tem dois planos de estais ligando o tabuleiro ao mastro em sistema intermediário.

A plataforma tem largura de 13,70m, onde a seção transversal é constituída por um passeio para pedestres com largura de 2,52m livre, e por uma pista carroçável de 9,0m, abrigando duas faixas de 3,50m, e duas faixas de segurança de 1,00m cada. Também constituem o tabuleiro duas defensas intransponíveis incorporadas nas longarinas e uma mureta lateral de 0,20m, totalizando 13,70m de largura total. A seção transversal é constituída de duas vigas longarinas com 1,27m 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 7,0m.

O mastro em forma de “H” é composto por dois pilares quadrados com seção vazada e dimensões iguais a 6,0m x 2,05m e paredes com espessura de 40cm e 50cm respectivamente, travados na altura do tabuleiro por uma viga com seção em caixão e laje superior com espessura de 50cm e laje inferior com espessura de 30cm. Sobre esta viga são apoiados aparelhos metálicos sobre os quais serão apoiadas as longarinas da ponte. A partir do nível do tabuleiro o mastro sobe com uma seção retangular, vazada e com dimensões variando de 6,0m x 2,05m a 4,0m x 2,05m, até o nível do segundo travamento que também terá seção vazada. A partir deste nível o mastro passa a ter seção retangular vazada e com dimensões constantes iguais a 4,0m x 2,05m de onde sairão os estais. Neste último trecho temos um terceiro travamento com seção caixão. No topo do mastro tem uma laje de fechamento com espessura de 0,4m. O concreto utilizado nos mastros tem  $F_{ck}=35\text{MPa}$ . Os estais são compostos por dois planos que ligam o tabuleiro ao mastro. Estes estais são fabricados com aço CP-177RB. A obra foi projetada atendendo as normas brasileiras, considerando o veículo classe TB-45, a seguir a Fig. 1 apresenta a ponte após a construção.



Figura 1: Ponte sobre o Rio Oiapoque- Vista Lado Guiana Francesa

## 2.2 Ensaio Dinâmico

O ensaio dinâmico foi realizado pela empresa IEME Brasil conforme Relatório IEME Brasil (2011) com o objetivo de avaliar o comportamento em relação ao seu projeto executivo.

As monitorações dinâmicas da ponte foram realizadas entre os dias 26/09/2011 a 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, e por meio de vibração forçada gerada por um equipamento denominado Vibrodina.

A partir dos resultados obtidos experimentalmente pode-se obter os gráficos do módulo da função de transferência, 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, desse modo, a partir da análise dos gráficos citados foi possível determinar as frequências naturais e as deformadas modais da estrutura. A Fig. 2 apresenta o módulo e a parte imaginária da função de transferência.

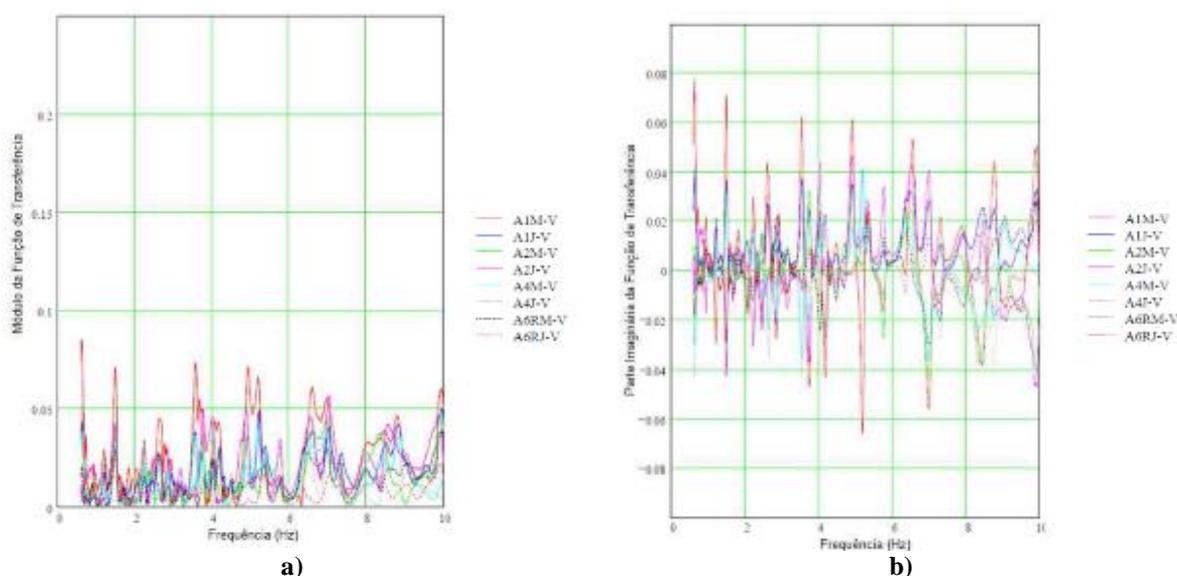


Figura 2: a) Módulo da função de transferência, b) Parte Imaginária da função de transferência

Fonte: (IEME Brasil, 2011)

## 3 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi desenvolvido na versão educacional do Software ANSYS versão R15. Para a construção do modelo foram utilizados elementos de barras e cascas, onde as vigas principais e as transversinas foram modeladas como elementos de barra BEAM188, as lajes dos apoios e a laje principal foram modeladas como elementos de casca SHELL181, onde as espessuras foram adotadas conforme projeto, os mastros em seção variável em caixão foram modelados como elementos BEAM188 com 6 seções diferentes ao longo da altura, os estais foram modelados como elementos BEAM188 e foram aplicadas as cargas de protensão previstas no projetos numa primeira análise, e as cargas finais do relatório final de projeto para uma segunda análise, a aplicação das cargas de protensão nos estais teve o objetivo de evitar os problemas de deformações excessivas considerados na análise estática, devido a excentricidade geométrica das cargas. A Fig. 3 apresenta o modelo numérico desenvolvido.

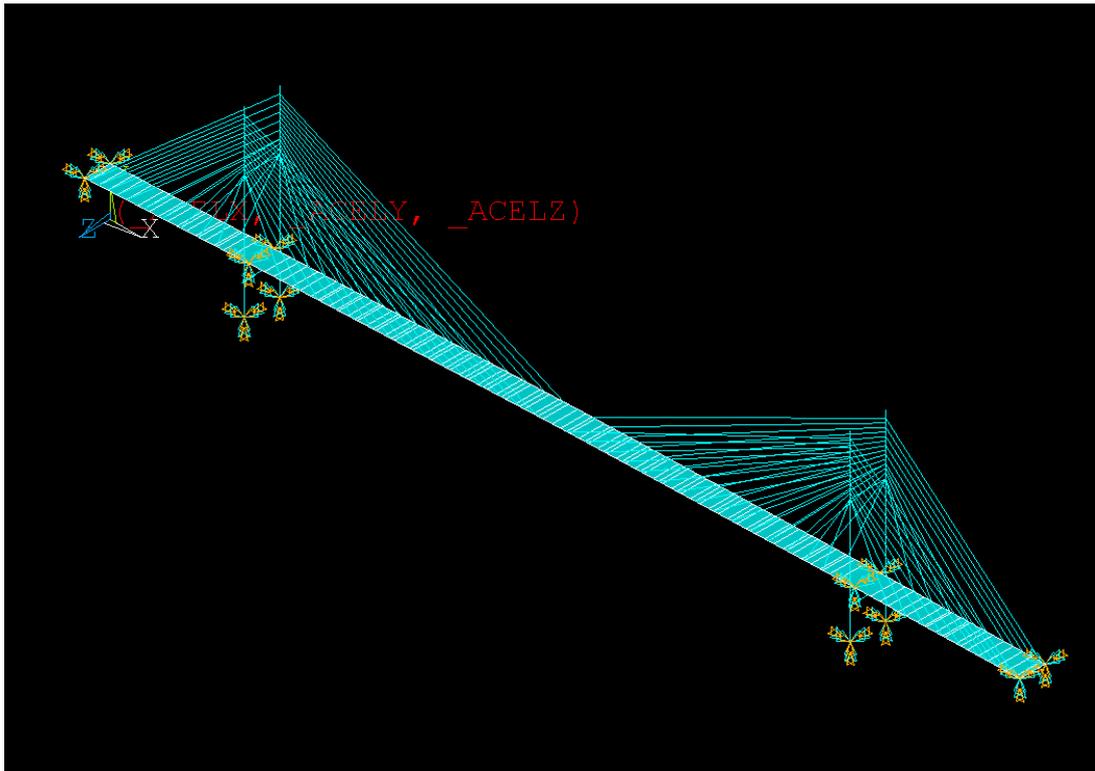
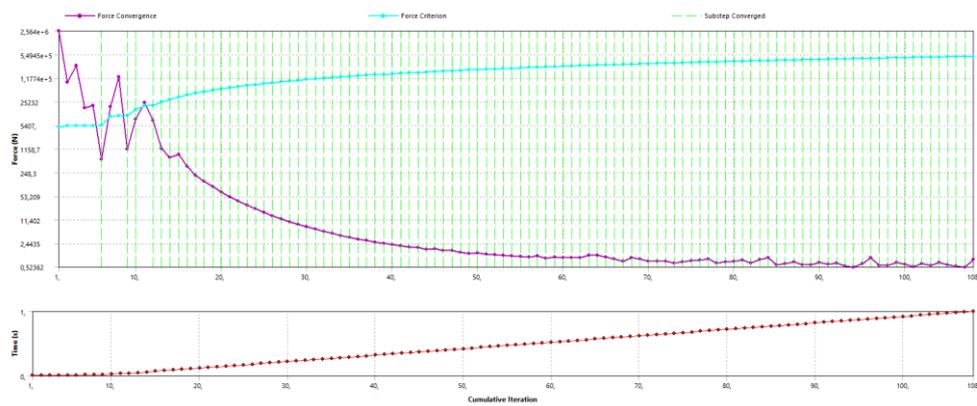


Figura 3: Modelo Numérico da Ponte

Foram realizadas duas etapas de análise, a primeira estática não-linear considerando as não-linearidades geométricas devido as grandes deformações, a ação da força de protensão nos cabos e ação da aceleração da gravidade, nesta etapa foram obtidas a deformada final ponto de partida para a segunda etapa, análise modal com objetivo determinar as frequências e modos de vibração naturais da estrutura, onde as não-linearidades, tais como plasticidade e elementos de contato, foram ignoradas. Para a resolução dos problemas de autovalores e autovetores no *software* ANSYS foi utilizado o método do Subespaço.

A estrutura não-linear é analisada por meio de uma série iterativa de aproximações lineares. No programa ANSYS o processo iterativo utiliza o Método de Newton-Raphson e a cada iteração são conhecidas as forças de equilíbrio, medidas pela diferença entre as forças internas e externas. A Figura a) apresenta o gráfico das iterações realizadas para a convergência das forças durante o processo de convergência e Figura b), c), d) e e) a seção deformada final obtida após a análise não-linear da Ponte onde são apresentadas as deformadas totais, nos estais, torres e tabuleiros respectivamente.



a)

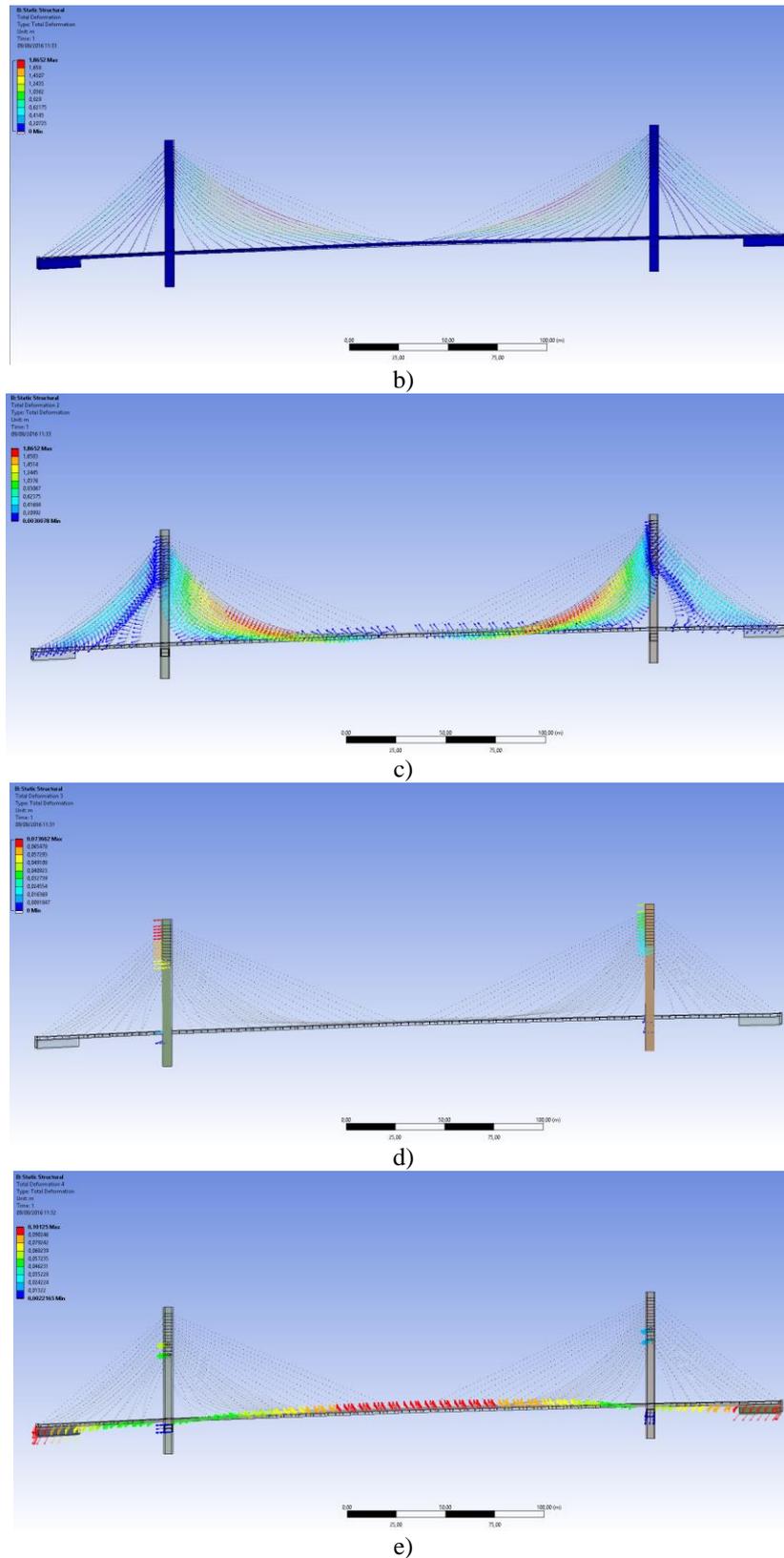


Figura 4: Análise Estática a) Gráfico de convergência da força na análise não-linear; b) Deformada Total; c) Deformada Estais; d) Deformada Torres; e) Deformada Tabuleiro

Como pode ser observado nos gráficos das deformações, as deformações nos estais governam a deformação total da estrutura e é a principal causa das não-linearidades do modelo.

## 4 ATUALIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Após o desenvolvimento do modelo numérico onde foi realizada uma análise estática e modal, para determinação numérica da deformação e dos modos e frequências naturais de vibração, procedeu a atualização do modelo baseado nos dados de resposta das frequências experimentais conforme Relatório de Monitoração (IEME BRASIL, 2011).

Para a correlação entre os dados experimentais e numéricos foram consideradas as diferenças percentuais entre as frequências medida pelo índice FER. Desse modo, para o modo experimental  $g$  e um modo numérico  $h$ , o índice é dado pela Eq. (1):

$$FER_{gh} = \frac{\lambda_h - \lambda_g}{\lambda_g} \quad (1)$$

onde,  $\lambda_h$  representa a frequência natural numérica do modo  $h$  e  $\lambda_g$  representa a frequência experimental do modo  $g$ .

Na atualização do modelo numérico foi utilizado os *softwares* ANSYS e ModeFrontier que fornece vários tipos análise para diferentes tipos de aplicações. O *software* ModeFrontier é composto de muitas ferramentas para diferentes análises como: análise de sensibilidade, atualização automática de modelos em elementos finitos, otimização utilizando algoritmos genéticos, etc.

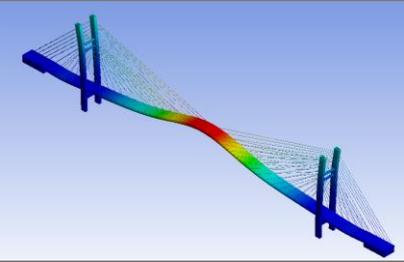
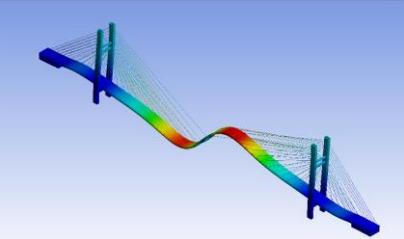
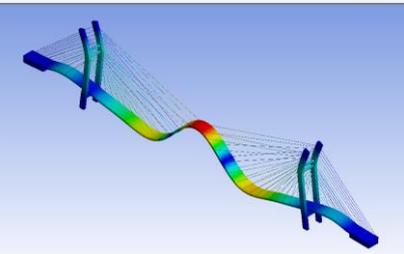
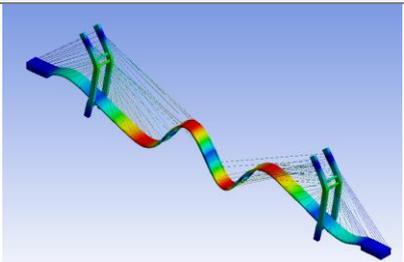
Na fase de otimização foi empregado o método de otimização direta disponível no *Software* ModeFrontier onde foram testados dois métodos de otimização: MOGA (*Algoritmos Genéticos para Multiobjective Optimization*), com uma abordagem multiobjectivo da otimização para um resultado mais geral e o NLPQL (*Non Linear Programação quadrática Lagrangian*) usando um algoritmo baseado no gradiente ideal para otimizações locais, para uma abordagem mais refinada.

### 4.1 Modelo Inicial

Com a consideração das características da estrutura conforme definido no Projeto Executivo (Maia Melo Engenharia, 2008) e por intermédio do modelo desenvolvido foram obtidos os modos e as frequências naturais.

A comparação dos resultados entre as frequências numéricas e experimentais da ponte é apresentada na Tab. 1.

Tabela 1: Comparação das frequências numéricas e experimentais – Tabuleiro

Configuração	Modos Numérico	Frequências (Hz)		FER
		Numérica	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%

Conforme pode ser observado na Tab. 1 os valores das frequências numéricas e experimentais apresentam uma relativa grande dispersão, com diferenças percentuais de até 13.71% no primeiro modo. Estas diferenças podem ser atribuídas a complexa calibração do modelo, as não-linearidades e a calibração das cargas nos estais.

## 4.2 Análise de Sensibilidade

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.

Segundo Mottershead e Friswell (1993), a análise de sensibilidade também é capaz de identificar o sentido da variação do parâmetro de atualização, determinando se esta é diretamente ou inversamente proporcional à variação da variável de estado ou da função objetivo.

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

$$\delta_z = S_C \cdot \delta_A \quad (2)$$

$$S_C = \frac{\delta_z}{\delta_A} = \frac{Z_m - Z}{A_m - A} \quad (3)$$

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.

A análise de sensibilidade foi realizada no *software* ModeFrontier, com o objetivo de avaliar a correlação entre os parâmetros de carregamento: Força nos cabos, módulo de elasticidade, densidade e seção das vigas principais, transversinas e mastro com a frequência. A Fig. 5 apresenta os coeficientes de sensibilidades obtidos na análise.



Figura 5: Coeficiente de Sensibilidade

Como resultado do estudo de sensibilidade, concluiu-se que, o parâmetro de maior impacto sobre a resposta de frequência foi o módulo de elasticidade dos cabos, com um coeficiente de sensibilidade de 0.932. Os parâmetros de elasticidade e massa específica do concreto, apresentaram coeficientes de correlação com as respostas de 0.588, 0.571, respectivamente. A inércia da viga principal e transversinas, apresentaram coeficientes de 0.489 e 0.415.

A forças nos cabos apesar de apresentar relativo alto coeficiente, não foram consideradas nas análises de otimização dos parâmetros uma vez que os valores finais das cargas são conhecidos (IEME BRASIL, 2011). Os demais parâmetros que apresentaram correlação com valores inferiores a 0,3 não foram considerados na análise futura de otimização.

Assim, com base na análise de sensibilidade, decidiu-se trabalhar com os parâmetros: módulo de elasticidade dos cabos, elasticidade e massa específica do concreto e inércia da viga principal e transversinas, que mostraram maior coeficiente de sensibilidade.

### 4.3 Atualização do Modelo Numérico

Nesta seção, a atualização do modelo numérico compreendeu a otimização automática dos parâmetros selecionados na análise de sensibilidade realizando a minimização do índice FER, que relaciona as frequências numéricas e experimentais, assim como testar os intervalos de variação dos parâmetros.

O primeiro passo foi correlacionar as frequências e então realizou a otimização automática visando avaliar a eficácia dos métodos de otimização em aproximar as frequências experimentais e numéricas. As atualizações foram realizadas nos *softwares* ModeFrontier e *Design Exploration* ANSYS, sendo feita uma comparação de resultados encontrados por meio final.

### 4.3.1 Atualização ModeFrontier

A estrutura de otimização no *software* ModeFrontier foi definida conforme a Estrutura apresentada na Fig. 6.

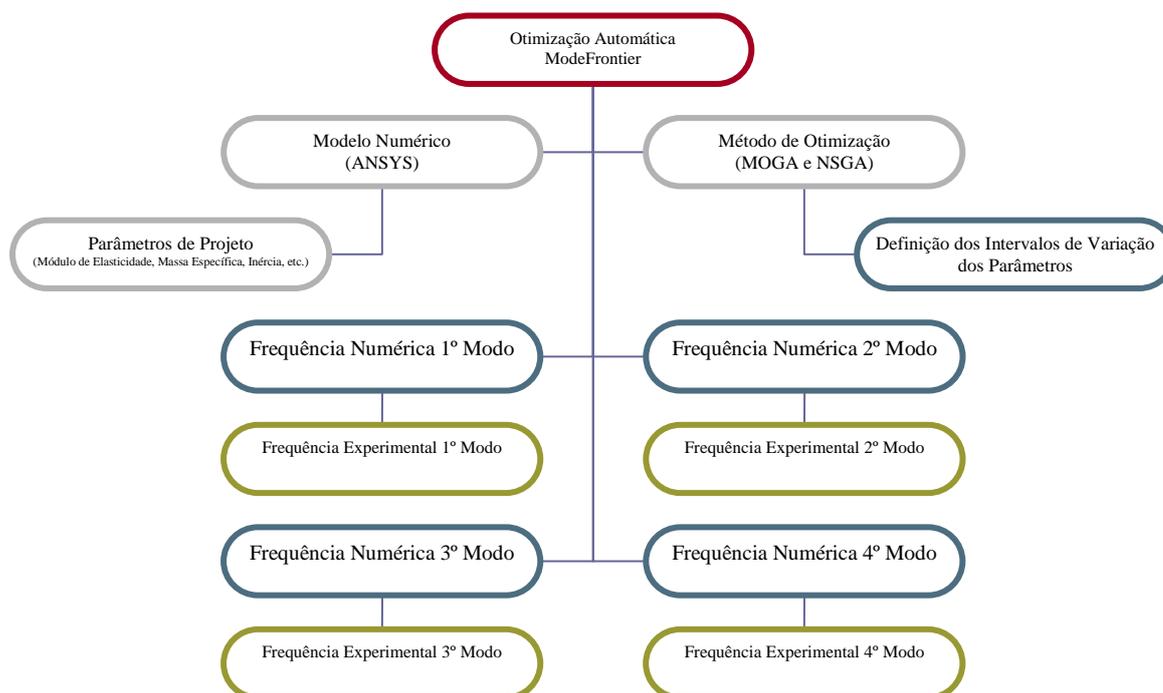


Figura 6: Estrutura da Otimização dos Parâmetros na Simulação com Dano

Os parâmetros de entrada foram força nos cabos, módulo de elasticidade, massa específica e momento de inércia das vigas principais, transversinas e mastro. Estes parâmetros foram correlacionados com as quatro frequências dos modos verticais medidos no ensaio experimental.

Os valores ótimos para os parâmetros estão relacionados na Tab. 2 e foram utilizados para desenvolver modelo atualizado.

Tabela 2: Valores Finais dos Parâmetros obtidos no Processo de Atualização

Parâmetro	Inicial	Atualizado	Diferença (%)
Módulo de Elasticidade Concreto (Pa)	3,53E+10	3,07E+10	-13,03%
Módulo de Elasticidade dos Cabos (Pa)	2,00E+11	1,84E+11	-8,00%
Momento de Inércia da Viga Principal (m <sup>2</sup> .m <sup>2</sup> )	0,32013	0,59573	86,09%
Momento de Inércia da Transversina (m <sup>2</sup> .m <sup>2</sup> )	1,22E-02	2,45E-02	100,81%
Densidade do Concreto (Kg/m <sup>3</sup> )	2,60E+03	2,72E+03	4,69%

Os parâmetros apresentaram grande variação em relação aos parâmetros iniciais, atribui-se estas variações as simplificações realizadas no modelo do tabuleiro para aproximar o tabuleiro em forma de caixão de concreto a uma estrutura em grelha, composta por duas vigas laterais, transversinas enrijecidas e laje desenvolvida por meio de elemento de casca.

A comparação entre as frequências experimentais e do modelo numérico atualizado é apresentada na Tab. 3.

Tabela 3: Comparação das frequências numéricas e experimentais – Tabuleiro

Configuração	Frequências (Hz)		FER
	Numérico	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%

Assim, podemos notar que os valores numéricos das frequências otimizadas se aproximaram aos valores obtidos no ensaio experimental, diminuindo o erro, conforme índice FER.

#### 4.3.2. Atualização ANSYS

Os parâmetros de entrada foram baseados nos parâmetros utilizados anteriormente: força nos cabos, 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. Foi realizada otimizações de cada parâmetro através do software ANSYS. A Tabela 4 mostra os valores dos parâmetros obtidos e modificados no processo de otimização do programa ANSYS.

Tabela 4: Valores Finais dos Parâmetros obtidos no Processo de Atualização

Parâmetro	Inicial	Atualizado	Diferença (%)
Elasticidade do Concreto(Pa)	3,53E+10	3,65 E+10	3
Densidade do concreto(Kg/m <sup>3</sup> )	2,60E+03	2618,8 E+10	0,6
Altura das Vigas Transversinas (m)	1,111	1,43	22
Altura da Viga Pricpal (m)	1,81	1,91	5

Assim, no modelo numérico atualizado desenvolvido com os valores obtidos na otimização dos parâmetros. A comparação dos resultados entre as frequências numéricas e experimentais da ponte é apresentada na Tab. 5.

Tabela 5: Comparação das frequências numéricas e experimentais – Tabuleiro

Configuração	Frequências (Hz)		FER
	Analítica	Experimental	
1º vertical	0.7571	0,75	0,095%
2º vertical	1,4951	1,40	6,79%
3º vertical	2.6687	2,65	0,70%
4º vertical	3,7064	3,60	2,95%

## 5 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 às condições de projeto.

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.

Contudo, podemos notar que com a consideração dos valores obtidos na otimização dos parâmetros do modelo numérico da estrutura, considerando a redução na inércia da viga principal e transversinas, módulo de elasticidade dos cabos e do concreto e massa específica do concreto levou a valores de frequências mais próximos as frequências encontradas no ensaio experimental. Fato que demonstra a dificuldade na representação de estrutura complexas por meio de modelos numéricos, como pontes estaiadas, e confirmando a importância do processo de atualização do modelo para a melhor representação da estrutura.

Considerando que a atualização do modelo numérico da estrutura foi realizada apenas com base nos parâmetros de resposta de frequências e ainda considerando que o sucesso no processo de otimização dos parâmetros depende fortemente da qualidade e quantidade de dados de resposta utilizados, podemos concluir que melhores resultados no processo de atualização poderiam ter sido alcançados se houvesse os dados referentes aos

modos de vibração onde poderiam ser calculados os índices MAC (*Modal Assurance Criterion*) proposto por ALLEMANG (2003) que correlacionaria os modos numéricos e os experimentais.

Por fim, a proposta de modelo numérico atualizado evidencia a dificuldade na representação de estrutura complexas por meio de modelos numéricos e demonstra a importância no processo de atualização e otimização dos parâmetros.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer ao apoio prestado pelas seguintes instituições:

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasil;
- Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília
- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq);
- Licença Acadêmica ModeFrontier ESTECO; e
- Licença Acadêmica FEMTools.

## **BIBLIOGRAFIA**

- ALLEMANG, R. J. (Agosto de 2003). The Modal Assurance Criterion Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration Magazine*, 37(8), 14-21.
- BRASLIANO, S. S., 2005. Identificação de Sistemas e Atualização de Modelos Numéricos com vista a Avaliação de Integridade Estrutura. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF
- IEME BRASIL. (2011). *Relatório de Avaliação estrutural da Ponte Estaiada sobre o Rio Oiapoque*. São Paulo: DNIT.
- MAIA MELO ENGENHARIA. (2008). *Projeto Básico - Ponte Internacional sobre o Rio Oiapoque BR-156/AP*. Brasília: DNIT.
- Martins, A. M. B., Simões, L.M.C, Negrão, J.H.J.O. (2015) Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities. *Engineering Structures, Computers and Structures* 155 (2015), 18-27
- MERCE, R. N. (2007). Metodologia para atualização de modelos numéricos de pontes com base em dados experimentais. Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- MOTTERSHEAD, J., & FRISWELL, M. (22 de outubro de 1993). Model Updating in Structural Dynamics: A Survey. *Journal of Sound and Vibration*, 167(2), 347-375.
- REN, WX., PENG, X., LIN, Y. (2005). Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge. *Engineering Structures, Computers and Structures* 27 (2005) 535 - 548
- REN WX, OBATA M. Elastic-plastic seismic behavior of long span cable-stayed bridges. *J Bridge Engrg, ASCE* 1999;4(3):194-203.