



AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS DA OBRA DE ARTE 58 DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS

Marcela Santos da Silva

Francisco de Assis das Neves

marcelass_1505@yahoo.com.br

neves.assis@gmail.com

Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Morro do Cruzeiro, 354000-000, Minas Gerais, Ouro Preto, Brasil

Andre Margalho Daltro

andredaltro1301@gmail.com

Faculdade Metropolitana de Marabá

Rod. BR 230, S/N, 68507-765, Pará, Marabá, Brasil

Sandoval José Rodrigues Júnior

Ronaldson José de França Mendes Carneiro

srodrigues.jr@gmail.com

ronaldson.carneiro@gmail.com

Universidade Federal do Pará

Rua Augusto Corrêa, 01, 66075-110, Pará, Belém, Brasil

Patrick Anderson Bahia Vieira da Silva

pa_bvieira@hotmail.com

Faculdade Metropolitana da Amazônia

Av. Visconde de Souza Franco, 66053000, Pará, Belém, Brasil

Resumo. Com o passar dos anos, as estruturas podem apresentar problemas ocasionados a partir da utilização, como: pequenas fissuras, oxidação em elementos metálicos, deslocamentos excessivos, entre outros. O monitoramento dessas por meio de ensaios ganhou mais importância, por permitir a identificação das suas características dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração e taxa de amortecimento). A estimativa dos parâmetros modais utilizando ensaios pode ser realizada de duas formas, a análise modal

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC,
Brazil, November 5-8, 2017.

experimental e a Análise Modal Operacional (AMO). A AMO é denominada também de análise modal output-only, onde a estimativa dos parâmetros é realizada a partir somente dos dados de saída. Esta tem se mostrado bastante eficiente e usual, principalmente para a validação e refinamento de modelos de elementos finitos, modificação de estruturas, detecção de falhas e análise de estruturas complexas. Deste modo, o presente trabalho objetiva estimar os parâmetros modais da Obra de Arte Especial (OAE) 58 da Estrada de Ferro Carajás, a partir de dados experimentais obtidos por meio da AMO, utilizando o software comercial ARTeMIS Modal e o método de identificação estocástica de subespaço (SSI-UPC).

Palavras-chave: *Análise modal operacional, Parâmetros modais, Identificação estocástica em subespaços*

1 INTRODUÇÃO

A avaliação das condições de segurança de grandes estruturas de Engenharia Civil tem início nas fases iniciais de concepção do projeto, durante a construção e em eventuais fases posteriores ao término da construção para verificação quanto à necessidade de reabilitação ou reforço. Essa verificação pode ser realizada a partir do desenvolvimento de modelos numéricos para análise estática e dinâmica fundamentados, em geral, em formulações de elementos finitos. Conhecer o comportamento estrutural por meio de modelos numéricos é de grande importância, no entanto a complexidade da estrutura real obriga que sejam realizadas algumas simplificações, desse modo nem sempre o modelo representa com perfeição o comportamento real da estrutura.

Com o objetivo de obter respostas mais próximas as condições reais, as técnicas de identificação dos parâmetros modais da estrutura (frequências naturais, modos de vibração e taxa de amortecimento) com base na realização de ensaios dinâmicos, surgiram como uma ferramenta de grande interesse, no sentido de dar suporte à análise de correlação entre parâmetros identificados e calculados, contribuindo de maneira mais efetiva para a atualização e validação experimental dos modelos numéricos desenvolvidos e consequente avaliação da capacidade de carga efetiva das estruturas.

A estimativa dos parâmetros modais utilizando ensaios pode ser realizada de duas formas, sejam elas: a análise modal experimental e a análise modal operacional. Na primeira, também denominada de análise modal do tipo *input-output*, os resultados são obtidos por meio das medições das respostas dinâmicas oriundas de excitações (carregamentos) externos medidos. Desse modo, os parâmetros modais são estimados a partir da relação entre os dados de entrada (excitação aplicada) com os dados de saída (resposta dinâmica). Na análise modal operacional, denominada de análise modal *output-only*, a estimativa dos parâmetros modais é realizada a partir somente dos dados de saída.

A análise modal operacional tem se mostrado bastante eficiente e usual, principalmente para a validação e refinamento de modelos de elementos finitos, modificação de estruturas, detecção de falhas e análise de estruturas complexas. Neste contexto, foram feitas análises referente à aquisição de dados utilizando a análise modal operacional (OMA), realizada na OAE 58 – Ponte sobre o Igarapé Surpresa. A estrutura foi submetida a diferentes tipos de excitação, sejam eles: durante a passagem do trem carregado; descarregado; apenas sob a ação do vento e a vibrações com características aleatórias introduzidas por pessoas saltando. Os sinais referentes à passagem do trem foram utilizados apenas para medir a aceleração da estrutura, por se tratar de uma ação que não acontece permanentemente; os referentes ao vento não foram suficientes para excitar a estrutura. Desse modo, os sinais utilizados para a realização análise modal operacional, por meio do software comercial ARTeMIS Modal, foram os referentes a vibrações com características aleatórias introduzidas por pessoas saltando, por apresentar menos sinais espúrios. Este trabalho surgiu a partir de um projeto entre Fapemig – Vale – UFOP – UFPA.

2 IDENTIFICAÇÃO ESTOCÁSTICA EM SUBESPAÇOS

O método de Identificação Estocástica em Subespaços (SSI) consiste em um método de identificação modal no domínio do tempo, que pode ser baseado na análise das funções de

correlação da resposta dos sistemas estruturais (SSI-COV) ou com ajuste direto às séries de resposta de um sistema (SSI-DATA) (Rodrigues, 2004).

Na identificação de sistemas estocásticos, aqueles em que os dados de entrada apresentam magnitude desconhecida (aleatória), admite-se que a força de excitação tem característica de um sinal de ruído branco, com média zero. Essa condição precisa ser atendida, para que as formulações do método tenham validade.

Os algoritmos de identificação estocástica em subespaço calculam modelos de estado de espaço a partir dos dados de saída. Van Overschee et al. (1996) e Peeters (2000) apresentam a formulação do método.

2.1 SSI-Data

O método de Identificação Estocástica em Subespaços (SSI) é usado para identificar as matrizes do sistema, $\mathbf{A}$ e $\mathbf{C}$, a partir das medições de saída do sistema, $\mathbf{y}_k$. Seguindo a abordagem utilizada por Van Overschee et al. (1996) e Weng et al. (2008), os procedimentos adiante mostram as etapas para o cálculo das matrizes do sistema.

a) Utilizando os dados de saída (medidos) $\mathbf{y}_k$, a matriz de Hankel ($\mathbf{Y}$), é construída por:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{N-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+N-2} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+N-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+N-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p \\ \mathbf{Y}_f \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Em que:

- i é um índice definido pelo usuário, correspondente ao número de blocos de linhas, que deve ser maior que a ordem n do sistema. Uma vez que cada bloco de linha apresente l linhas (número de canais de saída), a matriz $\mathbf{Y}$ deve conter $2li$ linhas.
- N corresponde ao número de colunas da matriz de Hankel. Para assegurar que todas as amostras de tempo do vetor de saída preencham essa matriz, o valor de N deve ser igual a $s - 2i + 1$.

b) Calcular a projeção ortogonal ($\mathbf{P}$) das séries de resposta do “futuro” $\mathbf{Y}_f$ no espaço das séries de resposta do “passado” $\mathbf{Y}_p$:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Y}_f / \mathbf{Y}_p = \mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_p^T (\mathbf{Y}_p \mathbf{Y}_p^T)^\dagger \mathbf{Y}_p. \quad (2)$$

Onde $\bullet^\dagger$ é a matriz pseudo-inversa (Moore-Penrose) de $\bullet$. Os produtos $\mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_p^T$ e $\mathbf{Y}_p \mathbf{Y}_p^T$ são matrizes de Toeplitz das funções de correlação da resposta. No entanto, a Equação (2) é apenas a definição da projeção ortogonal de espaços $\mathbf{P}$, pois através dela não é possível obter a indicação da forma como essa projeção é calculada no método SSI-DATA (Rodrigues, 2004). Desse modo, a projeção ortogonal para o método SSI-DATA é calculada por meio da decomposição QR.

c) Realizar a decomposição em valores singulares (SVD) da projeção ortogonal ($\mathbf{P}$). Neste caso é usado para decompor a projeção ortogonal da matriz de Hankel:

$$\mathbf{P} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T. \quad (3)$$

d) Determinar a ordem n do sistema, a partir da inspeção do posto da matriz $\mathbf{S}$ (número de valores singulares não-nulos) e particionar SVD de maneira a obter $\mathbf{U}_1$ e $\mathbf{S}_1$:

$$\mathbf{USV}^T = (\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2) \begin{pmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{pmatrix}. \quad (4)$$

e) Calcular a matriz de observabilidade estendida ($\mathbf{\Gamma}_i$):

$$\mathbf{\Gamma}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \dots \\ \mathbf{CA}^{l-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

f) Utilizando $\mathbf{\Gamma}_i$, calculam-se as matrizes de estados $\mathbf{A}$ do sistema:

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Gamma}_i^\dagger \bar{\mathbf{\Gamma}}_i. \quad (6)$$

Onde $\mathbf{\Gamma}_i \in \mathbb{R}^{l(i-1) \times n}$ significa $\mathbf{\Gamma}_i$ sem as últimas l linhas (número de canais) e $\bar{\mathbf{\Gamma}}_i \in \mathbb{R}^{l(i-1) \times n}$ significa $\mathbf{\Gamma}_i$ sem as primeiras l linhas.

g) A matriz $\mathbf{C}$ pode ser determinada a partir das primeiras l linhas de $\mathbf{\Gamma}_i$ conforme mostrado na Equação (5).

Após a determinação das matrizes de estado ($\mathbf{A}$ e $\mathbf{C}$), por meio do método SSI-DATA, os parâmetros modais (frequências naturais ω_i , modos de vibração ϕ_i e as taxas de amortecimento ξ_i) do sistema dinâmico são determinados. Este cálculo ocorre a partir da extração dos autovalores μ_i e autovetores ψ_i de $\mathbf{A}$, porém como o cálculo destes autovalores μ_i ocorre para um tempo discreto (com passos de tempo Δ_t), é necessário fazer uma transformação para o tempo contínuo.

h) Cálculo dos autovalores de $\mathbf{A}$ no tempo contínuo (λ_i):

$$\lambda_i = \frac{\ln(\mu_i)}{\Delta_t}. \quad (7)$$

Em que os autovalores (μ_i ou λ_i) de $\mathbf{A}$, também denominados de polos, são números complexos que aparecem em pares conjugados.

As frequências naturais são os módulos (amplitudes dos vetores no plano imaginário-real) dos polos de $\mathbf{A}$, onde $\text{Im}(\blacksquare)$ representa a parte imaginária e $\text{Re}(\blacksquare)$ a parte real de $\blacksquare$, denotados por:

$$\omega_i = |\lambda_i| = \sqrt{\text{Im}(\lambda_i)^2 + \text{Re}(\lambda_i)^2} \quad (\text{rad/s}). \quad (8)$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (\text{Hz}). \quad (9)$$

Assim, calculam-se as taxas de amortecimento:

$$\xi_i = \frac{-\text{Re}(\lambda_i)}{|\lambda_i|} \cdot 100 \quad (\%). \quad (10)$$

Os modos de vibração ϕ_i são obtidos a partir da multiplicação da matriz $\mathbf{C}$ pelos autovetores (ψ_i) de $\mathbf{A}$:

$$\phi_i = \mathbf{C}\psi_i. \quad (11)$$

Desse modo, os três parâmetros modais do sistema estão calculados para os vários modos identificados. O número de modos obtidos é igual ao número de autovalores de **A** que tenham par conjugado e com componente imaginária positiva. Por esse motivo, uma vez que esta matriz é de ordem n (ordem do modelo), conclui-se que, no máximo, $n/2$ modos poderão ser identificados.

3 ESTUDO DE CASO: OBRA DE ARTE ESPECIAL (OAE) 58 – PONTE SOBRE O IGARAPÉ SURPRESA

A ponte sobre o Igarapé Surpresa corresponde à obra de número 58 da Estrada de Ferro Carajás, estando situada no Km 842 + 600. Essa OAE é estruturada em concreto armado com extensão total de 117,50 metros, constituída por quatro vãos contínuos de 22,50 metros cada e dois encontros, sendo o encontro E1 (lado Ponta da Madeira) de 10,15 metros e o encontro E2 (lado Carajás) de 17,35 metros, apresentando traçado em tangente e curva de concordância vertical. A Figura 1 ilustra a seção longitudinal desta obra.

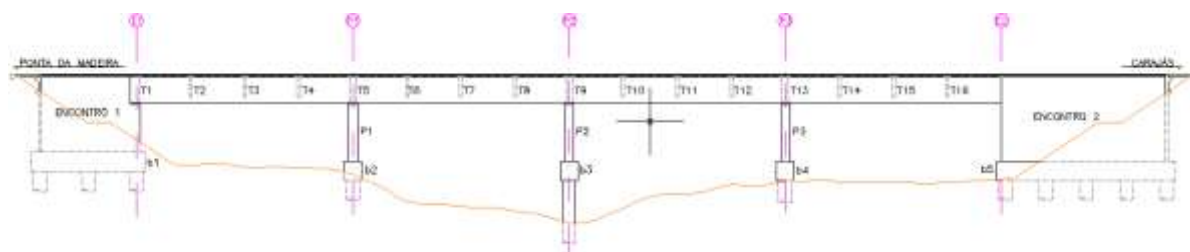


Figura 1. Vista longitudinal da estrutura (Rodrigues Júnior et al , 2012)

A superestrutura da ponte constitui-se de duas longarinas contínuas, vigas secundárias (transversinas) distribuídas a cada 7,50 metros no vão do tabuleiro. As longarinas e o tabuleiro formam um sistema estrutural contínuo, estando simplesmente apoiado sobre aparelhos de apoio de neoprene fretado, no encontro à esquerda (E1 - lado Ponta da Madeira) e nos apoios intermediários (pilares) e engastado no encontro à direita (E2 - lado Carajás). O tabuleiro possui largura total de 5,85 metros. Os encontros são do tipo “caixa”, constituídos por paredes, laje superior, alas e bloco de coroamento em concreto armado sobre tubulões. O encontro direito é cheio com brita ou material com $\gamma = 1,8 \text{ t/m}^2$. A mesoestrutura é formada por pilares isolados de seção retangular de 1,00 m x 2,80 m e altura de 6,00 m (P1, P2 e P3), assentes sobre blocos de coroamento em concreto armado sobre tubulões, conforme ilustra a Figura 2. Os tubulões apresentam fuste 1,40 m de diâmetro, com base alargada de 2,60 m que constituem a infraestrutura da ponte.

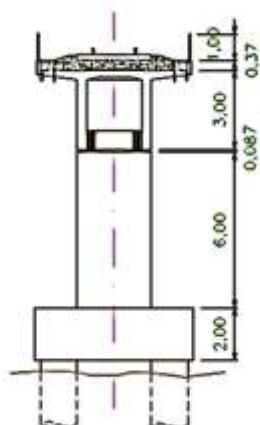


Figura 2. Seção transversal da estrutura (Rodrigues Júnior et al, 2012)

Em virtude da quantidade de acelerômetros disponíveis e da dificuldade de instrumentação da ponte, foi necessária a utilização de três configurações distintas de posicionamento (arranjo). Para integrar os resultados destes, foram utilizados acelerômetros de referência, que são acelerômetros comuns aos três arranjos.

Os acelerômetros piezoelétricos utilizados no ensaio eram uniaxiais baixa frequência, da marca Wilcoxon 793L, com resposta de frequência entre 0,2 Hz e 2300 Hz e sensibilidade de 500 mV/g, dispostos em três arranjos de forma a medir a aceleração na direção vertical e transversal. Os acelerômetros foram posicionados a 1/3 e a 2/3 do vão, de acordo com a ABNT NBR 15307:2006 - Ensaios não destrutivos – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento e considerando também as configurações modais obtidas no modelo numérico. Após serem fixados nos pontos estabelecidos, os acelerômetros foram conectados ao sistema de aquisição de dados ADS-2000 da LYNX por meio de cabos. A Figura 3, Figura 4 e Figura 5 ilustram a distribuição dos acelerômetros verticais e transversais ao longo do tabuleiro da ponte. Em cada arranjo foram utilizados quatorze acelerômetros, sendo três de referência.

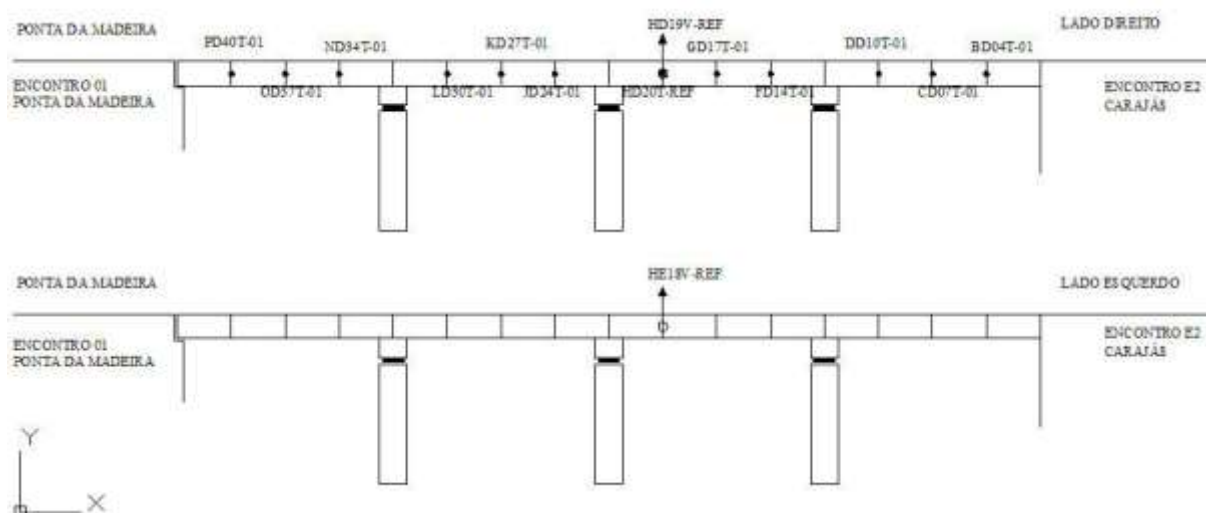


Figura 3. Arranjo 01

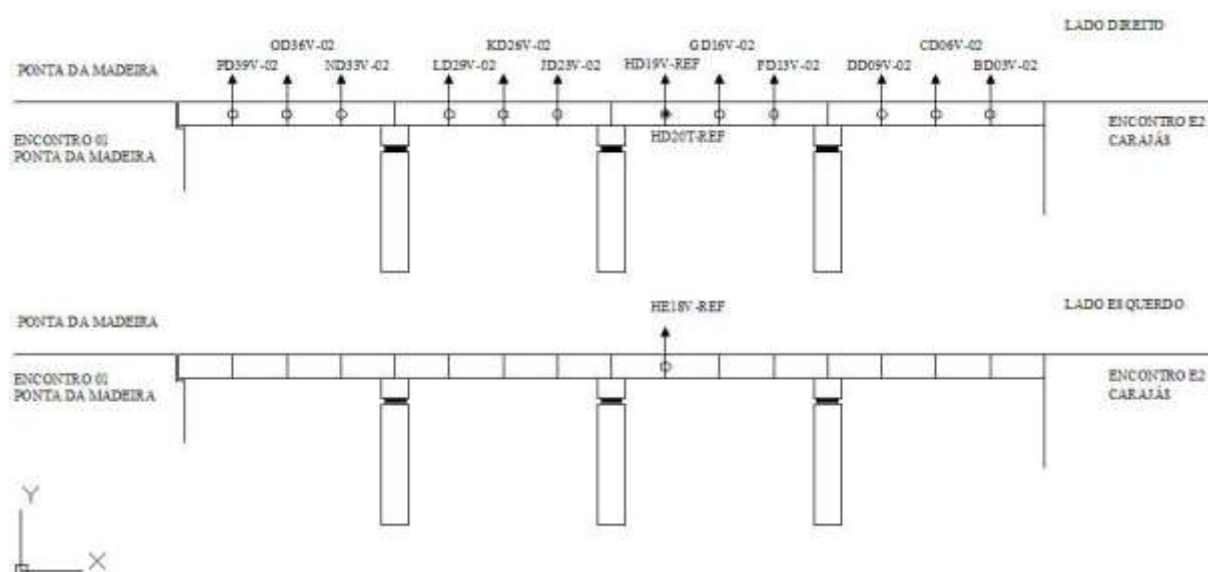


Figura 4. Arranjo 02

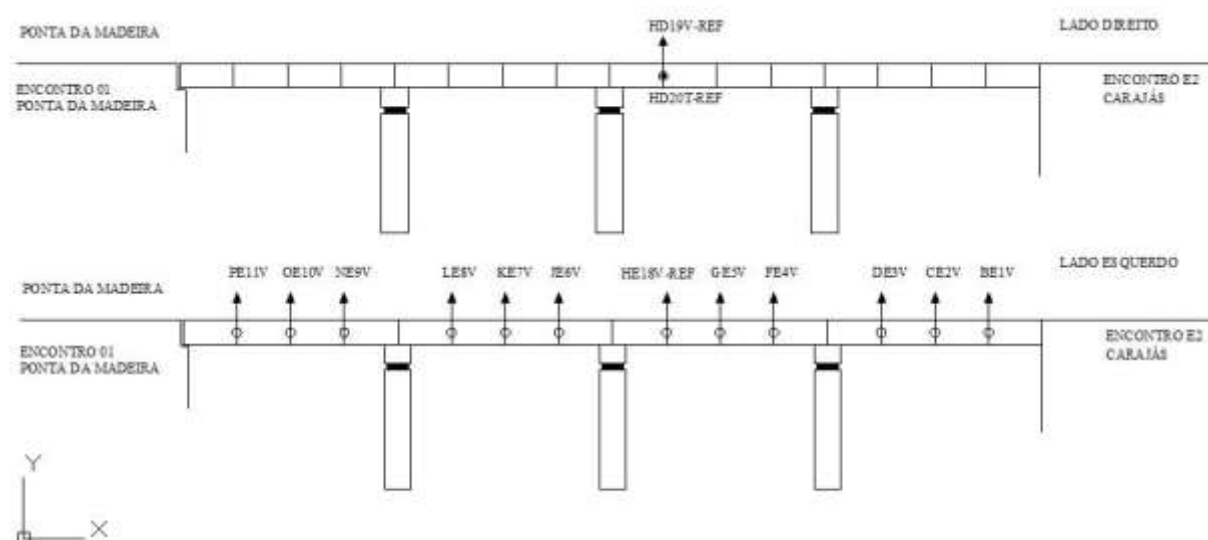


Figura 5. Arranjo 03

A monitoração foi executada a partir da introdução de uma vibração com características aleatórias produzidas por pessoas saltando sobre a ponte. O ensaio teve duração de 04 minutos e 56 segundos e foi realizado com frequência de amostragem de 400 amostras/segundos.

Todas as séries temporais foram filtradas numericamente por um filtro passa alta de 0,2 Hz. Nesse tipo de filtro define-se uma frequência de corte, cujas frequências até esse valor sofrem atenuação infinita, enquanto que frequências superiores a ela sofrem atenuação nula. Optou-se pela frequência de corte de 0,2 Hz visando aumentar a precisão do ensaio, uma vez que a resposta em frequência do acelerômetro utilizado é de 0,2 a 2300 Hz.

A partir dos sinais coletados e pós-processados, foi realizada a identificação dos parâmetros modais utilizando o programa comercial ARTeMIS Modal. Para isso, foram realizados alguns testes, sejam eles:

- Caso I: utilizando os três arranjos;
- Caso II: utilizando apenas os arranjos 02 e 03.

Para o Caso I, em que foram utilizados os três arranjos, os resultados obtidos foram aquém do esperado, haja vista que a quantidade de modos instáveis foi superior ao de modos estáveis. Isso pode ter ocorrido em virtude dos trechos em que não havia energia concentrada, que foram considerados na monitoração. Visando melhorar os resultados, descartou-se o arranjo 01, que apresentava apenas acelerômetros transversais, uma vez que para esse tipo de estrutura os modos físicos esperados são do tipo flexão vertical.

4 RESULTADOS

Na Figura 6 está representada a ponte no programa ARTeMIS Modal. As setas vermelhas ilustram os acelerômetros pertencentes aos arranjos 02 e 03, as setas azuis representam os acelerômetros de referência.

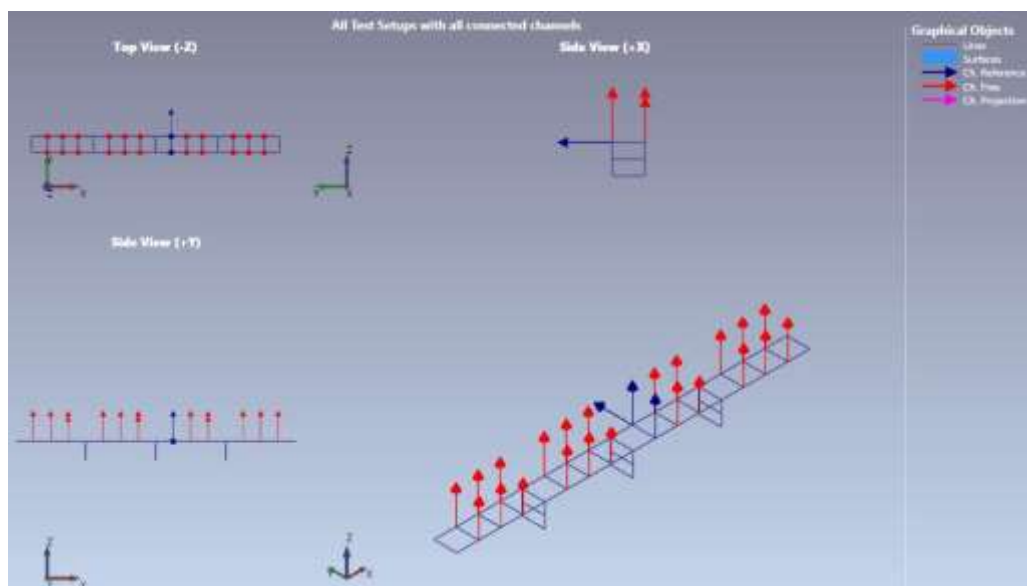


Figura 6. Representação da estrutura no software ARTeMIS modal

A estimativa das propriedades dinâmicas da ponte foram obtidas automaticamente pelo ARTeMIS Modal, a partir do método de identificação estocástica em subespaço com a componente principal não-ponderada (SSI-UPC - Stochastic Subspace Identification – Unweighted Principal Component). Tendo em vista a quantidade de canais presentes no ensaio, foram realizadas algumas análises em que o número de canais de projeção e a ordem do modelo foram alterados. De acordo com Herlufsen et al. (2006), quando um grande número de sinais são medidos simultaneamente, pode haver a estimativa de muitos modos espúrios, em comparação com o número de modos físicos do sistema durante o ajuste do modelo paramétrico. Os canais de projeção são utilizados com o intuito de diminuir a quantidade de informação redundante, e como consequência disso, os modelos estimados tendem a estabilizar-se mais rapidamente.

A ordem do modelo padrão utilizada pelo ARTeMIS Modal é 100, porém esta ordem pode ser alterada pelo usuário. A utilização ou não de canais de projeção fica a critério do

usuário, assim como a quantidade. Entretanto, a escolha dos canais é feita automaticamente pelo ARTeMIS Modal, que seleciona, primeiramente, os canais que apresentam maior correlação em relação aos demais canais, para o caso de haver mais de um arranjo, os acelerômetros de referência são tomados como canais de projeção inicialmente (Sampaio, 2015).

Com o intuito de visualizar a influência dos canais de projeção na estimativa dos parâmetros modais, na primeira análise realizada considerou-se a ordem do modelo padrão do programa e variou-se apenas a quantidade de canais de projeção (03 e 06).

Nessa primeira análise, verificou-se que o diagrama de estabilização que apresentou a maior quantidade de modos foi o referente a 03 canais de projeção, conforme ilustra a Figura 7 e a Figura 8. Aplicou-se o zoom no espectro de frequência, de modo a facilitar a visualização da área com maior concentração de frequências estimadas.

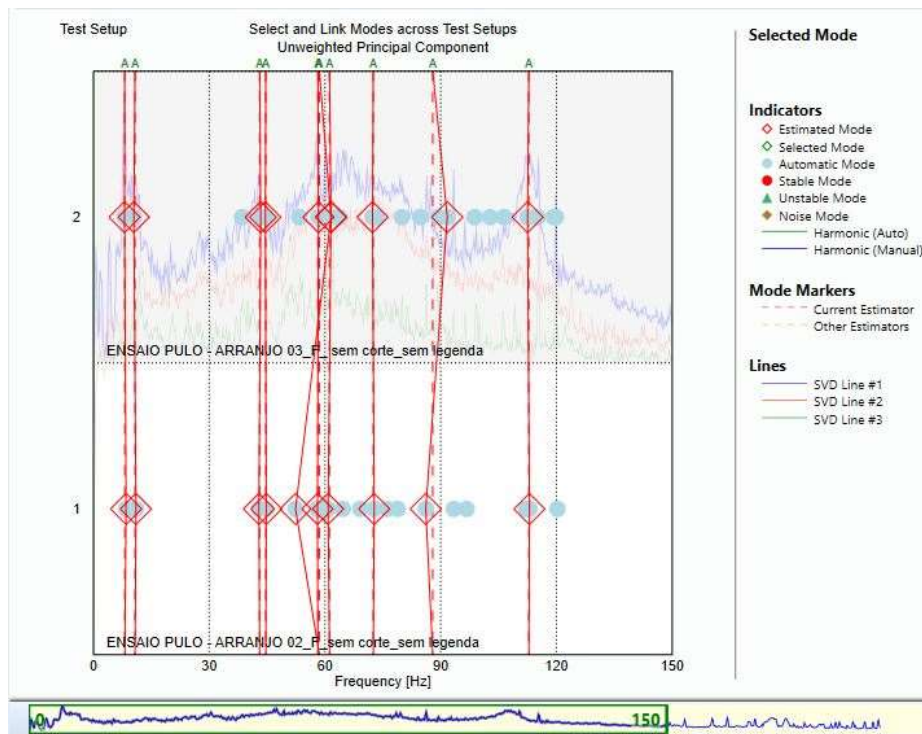


Figura 7. Diagrama de estabilização para ordem do modelo igual a 100 e 03 canais de projeção

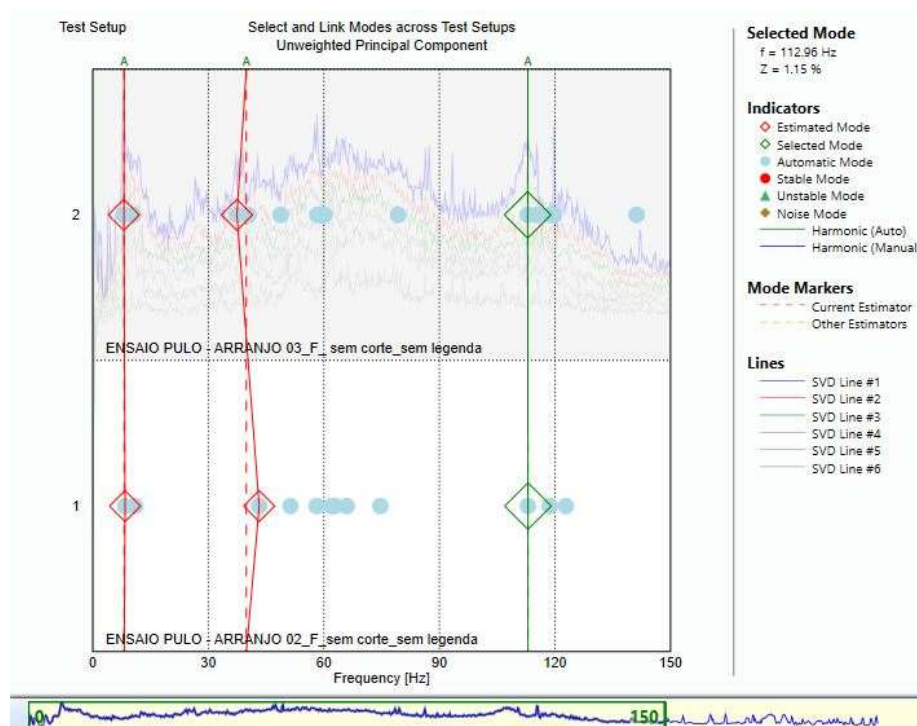


Figura 8. Diagrama de estabilização para ordem do modelo igual a 100 e 06 canais de projeção

A segunda análise consistiu em variar a ordem do modelo para as diferentes quantidades de canais de projeção. Desse modo, foram analisados resultados referentes a ordem do modelo igual a 180, bem como com 03 e 06 canais de projeção. A Figura 9 e a Figura 10 ilustram o diagrama de estabilização para as análises acima descritas. Comparando-se os resultados, optou-se por utilizar os resultados referentes a ordem do modelo igual a 180 e 6 canais de projeção, por este ter apresentado o primeiro modo de flexão com menor valor de complexidade modal.

A complexidade modal corresponde a representação gráfica no plano complexo (plano de Argand) para um dado modo identificado é dada pela representação vetorial das componentes desse modo. Isso significa que quanto maior os valores das componentes imaginárias (representadas no plano fora do eixo horizontal, eixo real) maior a tendência para um modo não físico.

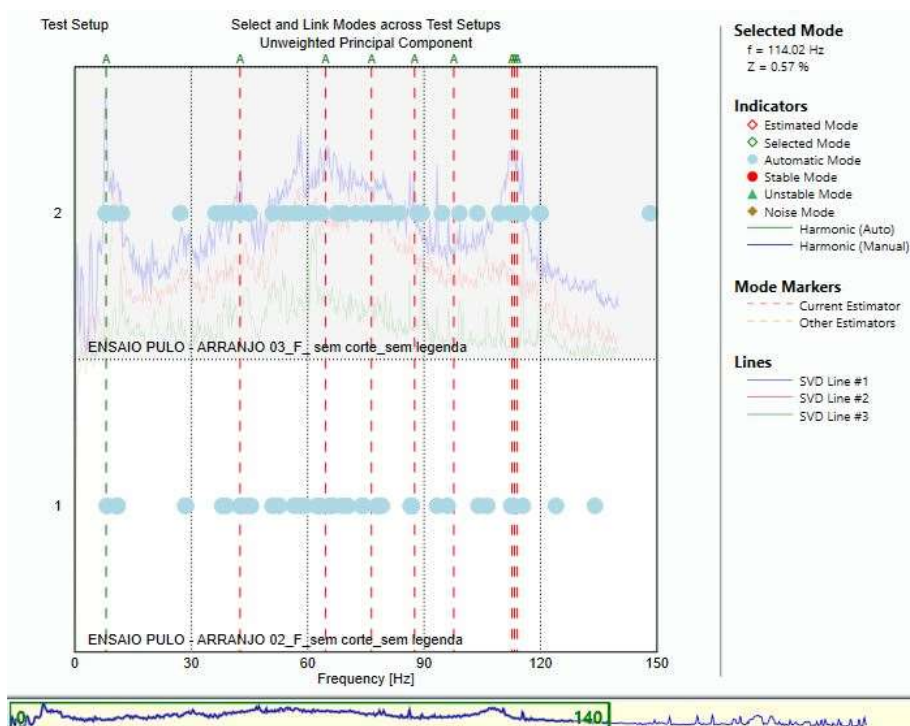


Figura 9. Diagrama de estabilização para ordem do modelo igual a 180 e 03 canais de projeção

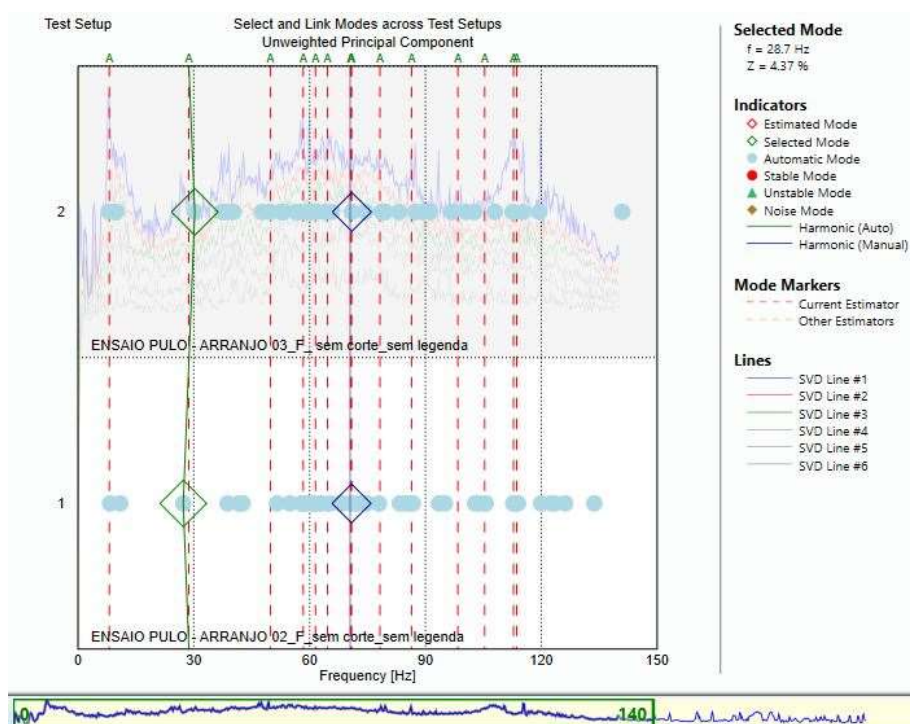


Figura 10. Diagrama de estabilização para ordem do modelo igual a 180 e 06 canais de projeção

Na Tabela 1 estão apresentadas as frequências naturais mais significativas obtidas pelo método.

Tabela 1. Resultados para o método SSI-UPC

Frequência (Hz)	Desvio padrão da frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Desvio padrão amortecimento (Hz)	Complexidade	Tipo de modo
8,111	0,118	2,791	1,421	5,093	Flexão vertical
28,704	1,495	4,369	0,21	62,639	Flexão vertical com torção

A Figura 11 e Figura 12 representam os 02 primeiros modos estimados experimentalmente e as suas respectivas frequências naturais.

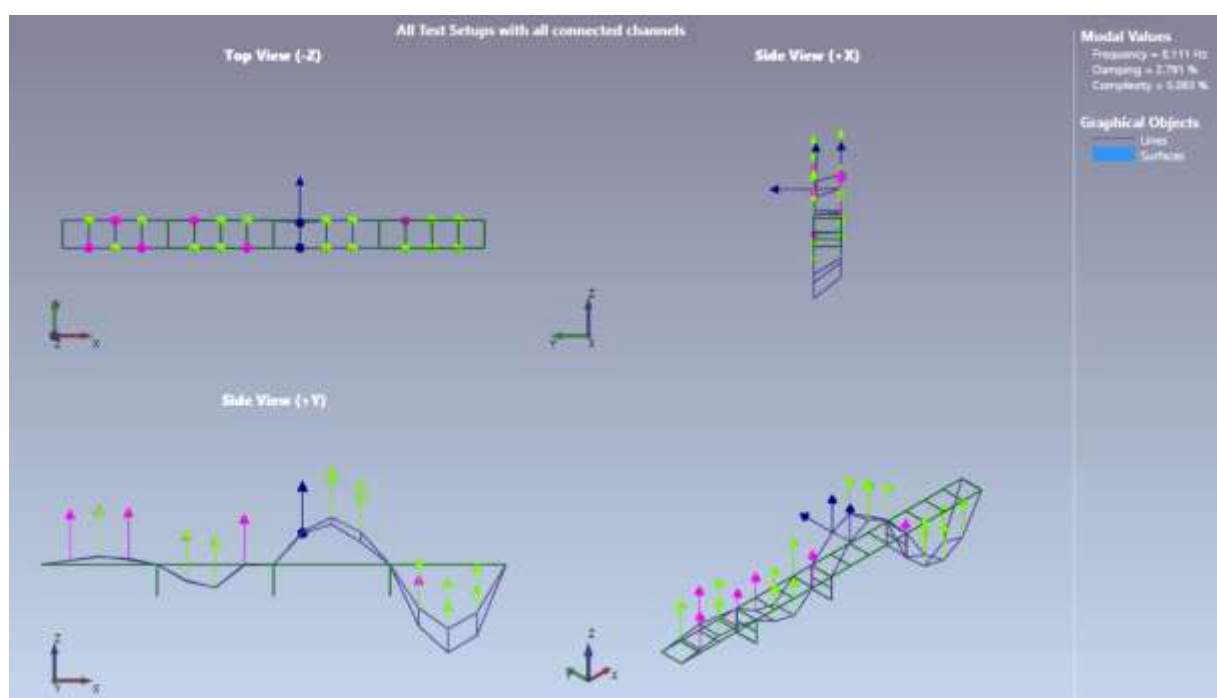


Figura 11. Modo de flexão vertical estimado pelo método SSI-UPC, no software ARTEMIS Modal

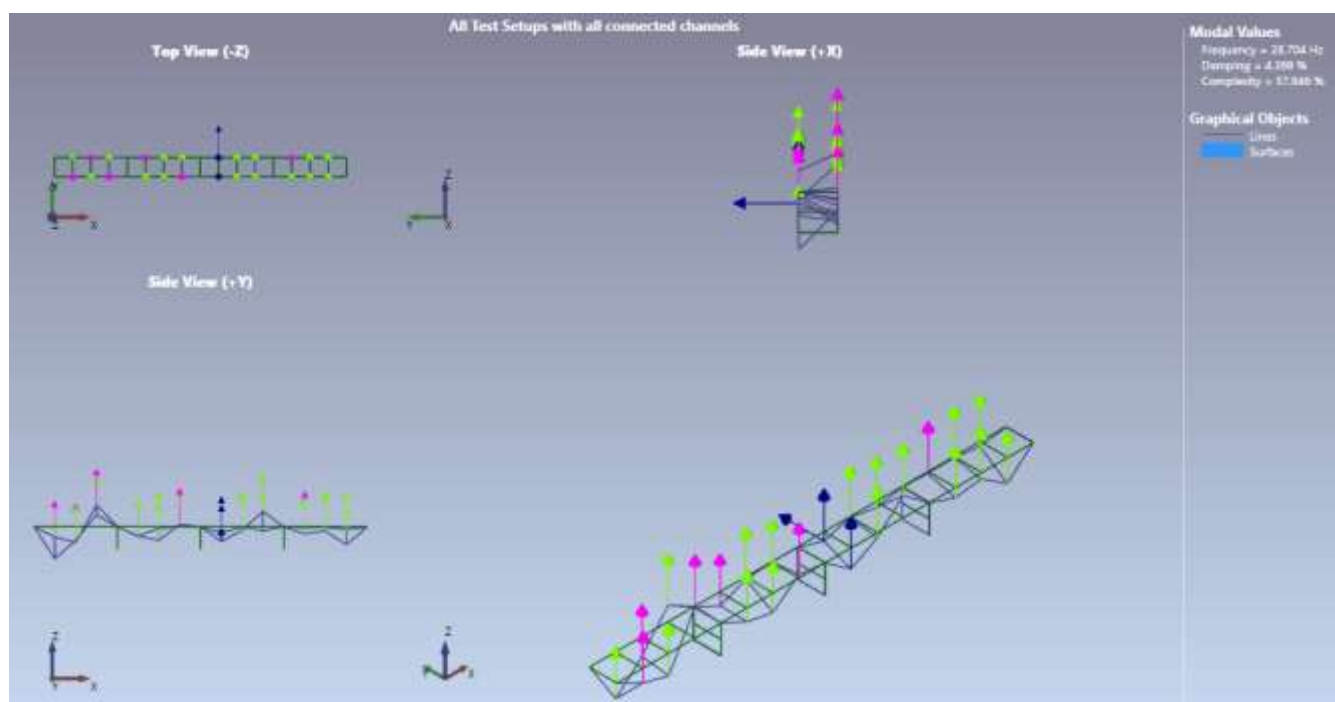


Figura 12. Modo de flexão com torção estimado pelo método SSI-UPC, no software ARTeMIS Modal

A partir da análise dos modos apresentados na Figura 11 e Figura 12 e da Tabela 1, observou-se que dentre os 02 modos apresentados, apenas o primeiro corresponde a um modo físico. Isso pôde ser verificado utilizando o parâmetro de complexidade modal. Esse parâmetro mostrou que a primeira frequência natural de 8,111 Hz, apresentou baixa complexidade modal, desse modo pode ser considerado como um modo físico. O segundo modo pode ser considerado como complexo. A Figura 13 e Figura 14 ilustram os plots referentes a complexidade dos modos estimados.

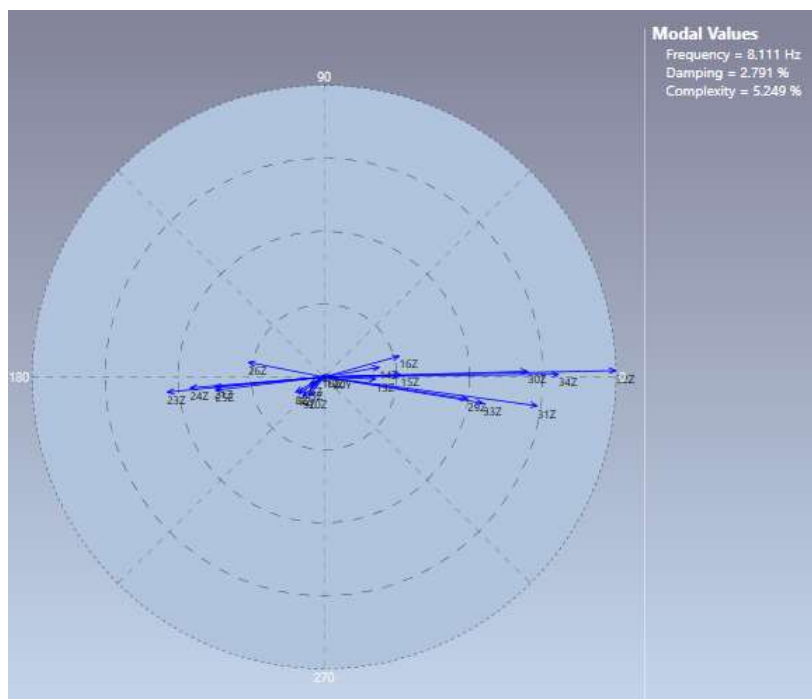


Figura 13. Plot da complexidade modal referente ao primeiro modo obtido

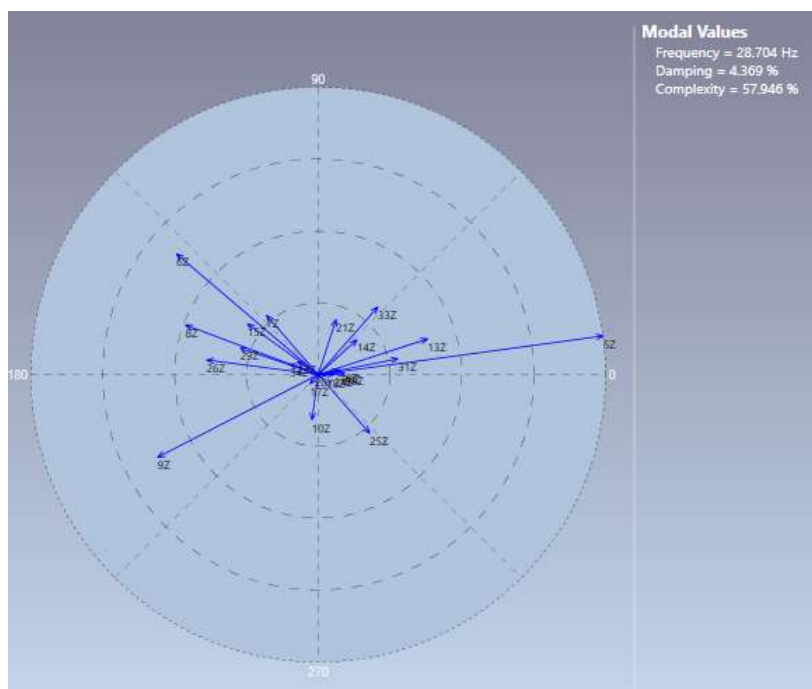


Figura 14. Plot da complexidade modal referente ao segundo modo obtido

Apesar da sofisticação do método utilizado para a obtenção dos parâmetros e dos vários modos obtidos, poucos foram apresentados em virtude da alta complexidade, apenas o 01 apresentou um modo físico (real), isso pode ter ocorrido em virtude da energia aplicada na estrutura ser insuficiente para excitar mais modos.

5 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido teve como objetivo principal obter os parâmetros modais da Obra de Arte Especial 58 – Ponte sobre o Igarapé Surpresa, da Estrada de Ferro (EF) Carajás, a partir de dados experimentais obtidos durante monitoração “in loco”

Neste estudo de caso, a monitoração foi realizada a partir da introdução de uma vibração com características aleatórias produzidas pessoas saltando ao longo da ponte. A frequência de amostragem utilizada durante a aquisição de dados foi de 400 amostras/ segundo.

Para a estimativa dos parâmetros modais, utilizou-se o software comercial ARTeMIS Modal e foram realizados 02 testes: no primeiro utilizou-se os 03 arranjos e no segundo foram utilizados 02 arranjos. Optou-se por analisar apenas os resultados referentes ao segundo teste, uma vez que nesse tipo de estrutura, os modos esperados são do tipo flexão vertical.

O método utilizado para realizar a estimativa dos parâmetros modais foi o SSI-UPC. Para ele, foram realizadas análises variando o número de canais de projeção e a ordem do modelo. A partir dessa variação, observou-se que utilizando 06 canais de projeção e 180 como ordem do modelo, muitos modos novos foram identificados, porém estes apresentavam elevados valores de frequências naturais. Optou-se pela apresentação apenas dos resultados referentes a esse teste, pois nele, o primeiro modo de flexão apresentou a menor complexidade modal.

Apesar da sofisticação do método, apenas um modo físico foi estimado, isso pode ter ocorrido em virtude da energia aplicada na estrutura ser insuficiente para excitar mais modos.

AGRADECIMENTOS

Aos professores e alunos do NICAIE (Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia), grupo associado da UFPA, que gentilmente nos cederam os dados utilizados na pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, à Fundação Gorceix, à Fapemig, à Universidade Federal e Ouro Preto- UFOP e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PROPEC, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15307:2006 - Ensaios não destrutivos – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento.

AqDados 7, Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda, Version 7.0.2.1, 2011.

AqDanalysis 7, Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda, Version 7.0.2.1, 2011.

ARTeMIS Modal, Structure Vibration and Solutions A/S, Version 3.5.0.0, 2014.

Herlufsen, H., Gade, S., Müller, N., 2006. Identification techniques for operational modal analysis – an overview and practical experiences, Proceedings of the IMAC-XXIV: Conference on Structural Dynamics, St Louis, Missouri, USA, January.

Peeters B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, K. U. Leuven, Belgium.

Rodrigues, J., 2004. Identificação modal estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. Tese de Doutorado. FEUP.

Rodrigues Júnior, J., S., Carneiro, M., F., J., R., Sampaio, C., A., R., Daltro, M., A., Silva, S., M., Santos, S., M., Silva, V., B., A., P., Barrichelo, V., 2012. Relatório Final - Obra de Arte Especial n. 58 – Ponte sobre o Igarapé Surpresa. Belém, Pará.

Sampaio, C. A. R., Chan, T. H. T., 2015. Modal parameters identification of heavy-haul railway RC bridges – experience acquired. Structural Monitoring and Maintenance, Vol. 2, No. 1 p. 1-18.

Van Overschee, P., De Moor, B., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, implementation, applications. Kluwer Academic Publishers.

Weng, J.H., Loh, C.H., Lynch, J.P., Lu, K.C., Lin, P.Y., Wang, Y., 2008. Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems. Engineering Structures, v. 30, p. 1820-1830.