

Deteção de Falhas em Estruturas por meio de Análise Experimental Dinâmica

Leandro dos Reis Lopes¹, Fernando Vianna Brasil Medeiros²

¹Instituto Militar de Engenharia / Engenharia de Fortificação e Construção /
leandrolopes.lrl@gmail.com

²Instituto Militar de Engenharia / Engenharia de Fortificação e Construção /
nando.vbrasil7@gmail.com

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo a aplicação de Análise Experimental Dinâmica no Monitoramento da Integridade de Estruturas. Visa a identificação modal de uma estrutura ou parte dela e a utilização da variação dos parâmetros modais para detectar o surgimento de falhas relacionadas à perda de rigidez das seções, bem como localizá-las e acompanhar o seu avanço ao longo do tempo. Foram implementados dois algoritmos: o primeiro, extrai os parâmetros modais de uma estrutura por meio da Transformada de Wavelet Contínua (*Continuous Wavelet Transform*) com Wavelet-mãe de Cauchy; o segundo, para monitoramento da integridade estrutural, compara os parâmetros modais da estrutura em dois instantes e, por meio da variação da curvatura modal, é capaz de identificar o surgimento de uma falha, localizá-la e inferir sobre o avanço de sua intensidade. Ambos algoritmos foram validados numericamente em um modelo de viga em elementos finitos e aplicados experimentalmente em um modelo reduzido de pórtico plano de dois andares (*Shear Building*). Para aquisição dos dados de vibração do modelo reduzido, foram utilizados dois acelerômetros FBG (*Fiber Bragg Grating*). O algoritmo de extração dos parâmetros modais, ao ser aplicado na viga numérica, permitiu a obtenção dos parâmetros modais até o sétimo modo de vibração com precisão de 0,005% na frequência modal, 1,0% no amortecimento modal e apresentou R^2 em torno de 0,98 para as formas modais. Quanto à identificação de falhas, o método da variação da curvatura modal permitiu não apenas a detecção do surgimento da falha, mas a sua localização e acompanhamento da evolução. Os mesmos algoritmos ao serem aplicados no pórtico plano, permitiram a localização da falha inserida em uma das barras no modelo. Por fim, destaca-se que os algoritmos desenvolvidos podem vir a integrar um plano de monitoramento da integridade de estruturas, pois permitem localizar uma região da estrutura onde ocorre uma redução da rigidez, bem como acompanhar a evolução dessa redução. Os métodos desenvolvidos podem ser consolidados para aplicação em vigas e estais de pontes ou em áreas críticas de edifícios altos.

Palavras-chave

Dinâmica das Estruturas ; Análise Modal Experimental ; Monitoramento da Integridade Estrutural ; Transformada *Wavelet* Contínua ; Identificação de Falhas.

Introdução

O monitoramento da integridade estrutural, ou *Structure Health Monitoring*, vem sendo pesquisado como forma de reduzir a imprevisibilidade do aparecimento de danos em estruturas. Trata-se de um problema antigo e clássico, cuja solução foi abordada sobre

diversos aspectos, entre eles está o recente campo da análise do comportamento dinâmico das estruturas, ou análise modal experimental, que se destaca por oferecer métodos não destrutivos de identificação estrutural e de detecção de falhas, que nesse contexto, significa qualquer variação da rigidez inicial de uma estrutura, seja por meio de fissuras, plastificação de seções ou alteração da geometria.

Este trabalho tem como objetivos a implementação de um algoritmo em MATLAB® para a identificação modal baseado na utilização da Transformada *Wavelet* Contínua, sua validação numérica e a aplicação prática em um modelo reduzido de *Shear Building*. Além disso, objetiva-se a utilização de métodos de detecção de falhas por meio da variação dos parâmetros modais obtidos com o algoritmo implementado.

A identificação modal, em sua essência, consiste na aplicação de técnicas em sinais de entrada e saída de um sistema para a obtenção de seu comportamento dinâmico. A análise tem por objetivo a extração dos seguintes parâmetros modais: frequências naturais, amortecimentos e modos de vibração. Segundo ARAGÃO FILHO (2008), os métodos de identificação modal de sistemas podem ser classificados pela variável de representação teórico-experimental em três categorias: domínio do tempo, domínio da frequência e domínio tempo-frequência. O presente trabalho visa a realização da identificação modal no domínio tempo-frequência, mais especificamente, por meio da Transformada *Wavelet* Contínua. Não serão abordados outros métodos de identificação modal.

A validação numérica dos algoritmos implementados foi realizada por meio da simulação de um sinal de resposta de um sistema estrutural simples, viga retangular metálica bi-engastada, à uma carga de impacto. O referido sinal foi gerado por meio do Método dos Elementos Finitos.

Transformada *Wavelet* Contínua

Esta seção destina-se apenas a apresentar a definição da Transformada *Wavelet* Contínua, informações mais detalhadas a respeito de resolução local no tempo e frequência, domínio de localização, fator de qualidade da transformada, bem como as relações entre as transformadas de deslocamento, velocidade e aceleração serão omitidas. Para uma apresentação mais precisa do assunto, reportar-se ao excelente artigo de LE e ARGOUL (2003).

Seja uma função $\psi(t)$ bem localizada no tempo e na frequência. $\psi(\cdot)$ é a função de análise de janela integrável e contínua por partes chamada *wavelet*-mãe. É associada a uma família de *wavelets* $\psi(b;a)(t)$ de funções $\psi(t)$ alargadas/comprimidas e transladadas

$$\psi_{(b,a)}(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

onde a e b são respectivamente parâmetros relativos ao inverso da frequência (dilatação) e ao tempo.

A *wavelet* tem uma forma constante, mas um comprimento que é variável e proporcional ao parâmetro de dilatação a . Seja um sinal $u(t)$ de energia finita e contínuo por partes, a transformada *wavelet* deste sinal é dada pelo produto de convolução:

$$T_{\psi}[u](b, a) = \langle u, \psi_{(b,a)}(t) \rangle = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

Aplicando o teorema de Parseval à equação 2, a transformada *wavelet* do sinal $u(t)$ no domínio da frequência é dada por:

$$T_{\psi}[u](b, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{u}(\omega) \overline{\hat{\psi}(a\omega)} e^{i\omega b} d\omega \quad (3)$$

A *wavelet*-mãe é não nula e independente de ω real se o coeficiente C_{ψ} definido pela equação 4 é finito.

$$C_{\psi} = \int_0^{+\infty} |\hat{\psi}(a\omega)|^2 \frac{da}{a} \quad (4)$$

Esta condição implica que $\hat{\psi}(t)$ definida por $\hat{\psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt$ tem valor 0 na origem, isto significa que $\psi(t)$ deverá obrigatoriamente oscilar.

Uma vez satisfeita essa condição, o sinal $u(t)$ pode ser recuperado através da expressão:

$$u(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} T_{\psi}[u](b, a) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da}{a} db \quad (5)$$

Identificação Modal de Sistemas Mecânicos Lineares

Consideremos um sistema com vários graus de liberdade com amortecimento viscoso proporcional. As respostas livres no ponto k de um dado sistema com N graus de liberdade, de deslocamento $u_k(t)$, velocidade $\dot{u}_k(t)$ e aceleração $\ddot{u}_k(t)$ são escritos segundo a base modal:

$$u_k(t) = \sum_{j=1}^N u_{kj}(t) = \sum_{j=1}^N \Phi_{kj} \rho_j e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\tilde{\omega}_j t - \varphi_j) \quad (6)$$

$$\dot{u}_k(t) = \sum_{j=1}^N \dot{u}_{kj}(t) = -\sum_{j=1}^N \Phi_{kj} \rho_j \omega_j e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\tilde{\omega}_j t - \varphi_j - \delta_j) \quad (7)$$

$$\ddot{u}_k(t) = \sum_{j=1}^N \ddot{u}_{kj}(t) = \sum_{j=1}^N \Phi_{kj} \rho_j \omega_j^2 e^{-\xi_j \omega_j t} \cos(\tilde{\omega}_j t - \varphi_j + \theta_j) \quad (8)$$

Onde j é o índice do modo e Φ_{kj} é o termo (k, j) da matriz modal composta pelos vetores próprios $\Phi_j = [\Phi_{1j}, \Phi_{2j}, \dots, \Phi_{Nj}]^T$.

Cada um destes vetores pode ser normalizado com base no deslocamento máximo, no qual temos $\Phi_{\{mj\}} = 1$. Para o modo j , $\tilde{\omega}_j$ e ω_j são respectivamente a pulsação própria amortecida e não amortecida, ξ_j é a taxa de amortecimento e ρ_j é definido:

$$\rho_j = \left\{ \left[\frac{\dot{Y}_j(0) + \xi_j \omega_j Y_j(0)}{\tilde{\omega}_j} \right]^2 + [Y_j(0)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Sendo $Y_j(0)$ o deslocamento modal inicial e $\dot{Y}_j(0)$ a velocidade modal inicial do modo j .

$$\varphi_j = \arctan\left\{ (c_{j0} + \xi_j) / \sqrt{1 - \xi_j^2} \right\} \quad (10)$$

$$\delta_j = \arctan\left\{ \sqrt{1 - \xi_j^2} / \xi_j \right\} \quad (11)$$

$$\theta_j = \arctan\left\{ 2\xi_j \sqrt{1 - \xi_j^2} / (1 - 2\xi_j^2) \right\} \quad (12)$$

As equações 6, 7 e 8 pode ser escritas como:

$$\sum_{j=1}^N A_{kj}(t) \cos(\alpha_{kj}(t)) \quad (13)$$

Onde temos 14 (ou 15 ou 16):

$$\begin{cases} \alpha_{u_{kj}}(t) = \tilde{\omega}_j(t) - \varphi_j + \frac{\pi}{2} (1 - \text{sgn}(\Phi_{kj})) \\ A_{u_{kj}}(t) = |\Phi_{kj}| \rho_j e^{-\xi_j \omega_j t} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \alpha_{u_{kj}}(t) = \widetilde{\omega}_j(t) - \varphi_j - \delta_j + \frac{\pi}{2} \left(1 - \text{sgn}(\Phi_{kj})\right) \\ A_{\dot{u}_{kj}}(t) = |\Phi_{kj}| \rho_j \omega_j e^{-\xi_j \omega_j t} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \alpha_{\ddot{u}_{kj}}(t) = \widetilde{\omega}_j(t) - \varphi_j - \theta_j + \frac{\pi}{2} \left(1 - \text{sgn}(\Phi_{kj})\right) \\ A_{\ddot{u}_{kj}}(t) = |\Phi_{kj}| \rho_j \omega_j^2 e^{-\xi_j \omega_j t} \end{cases} \quad (16)$$

Segundo LE (2003), os dados para a identificação modal vêm sob forma de funções instantâneas: a amplitude $A_{u_{kj}}(t)$ (ou $A_{\dot{u}_{kj}}(t)$ ou $A_{\ddot{u}_{kj}}(t)$) e a fase $\alpha_{u_{kj}}(t)$ (ou $\alpha_{\dot{u}_{kj}}(t)$ ou $\alpha_{\ddot{u}_{kj}}(t)$) de cada componente, extraídos da Transformada Wavelet Contínua da resposta livre $u(t)$ (ou $\dot{u}(t)$ ou $\ddot{u}(t)$) no ponto k . As relações instantâneas simples $R(t)$ entre os dados e os parâmetros modais foram deduzidas das equações 6, 7 e 8. A estimativa dos parâmetros modais é realizada utilizando-se técnicas de minimização de erros, método dos Mínimos Quadrados, com um critério de erro definido como a diferença entre as funções instantâneas do ensaio $R^{ensaio}(t)$ e as obtidas do modelo $R^{modelo}(t)$.

Detecção de Falhas em Estruturas – Método da Variação da Curvatura Modal

Foi proposta por RYTTER (1993) a classificação dos métodos de detecção de falhas em quatro níveis, segundo o nível de informação que eles fornecem acerca do dano na estrutura:

- Nível 1: Determinação da presença de uma falha
- Nível 2: Localização de uma falha
- Nível 3: Quantificação da severidade de uma falha
- Nível 4: Predição da vida útil residual

No presente trabalho, temos como objetivo apenas a identificação da falha em uma estrutura, porém foram empregados métodos que permitem a localização e a quantificação da severidade dos danos, chegando no nível 3 da classificação de Rytter.

Os métodos clássicos de detecção de falhas em estruturas são baseados na variação das características modais da estrutura (frequências naturais, amortecimentos modais e formas modais) para detectar e localizar os danos. O presente trabalho focou na utilização do Método de Variação da Curvatura Modal.

A curvatura em uma estrutura está diretamente relacionada à rigidez à flexão, conforme a equação 17.

$$v''(x) = \frac{M(x)}{EI} \quad (17)$$

em que E é o Módulo de Young e I é o Momento de Inércia da seção considerada. A diminuição da rigidez à flexão EI tem por consequência o aumento da curvatura na seção considerada. Como as variações de curvatura são locais e dependem da variação da rigidez à flexão, as variações de curvatura podem ser utilizadas para detectar e localizar falhas em estruturas.

De maneira geral, para se calcular a curvatura modal partindo da forma modal, utiliza-se a diferença finita centrada, conforme a equação 18

$$\phi_k''(x_i) = \frac{\phi_k(x_{i+1}) - 2\phi_k(x_i) + \phi_k(x_{i-1}))}{h^2} \quad (18)$$

em que h é o passo de diferenciação, suposto constante, entre dois pontos de medida e $\phi_k(x_i)$ é a forma modal do $k^{\text{ésimo}}$ modo no ponto de abscissa x_i .

A diferença absoluta entre a curvatura modal da estrutura íntegra e da estrutura danificada é um bom indicador de danos e permite a localização da falha na estrutura. Além disso, a utilização da curvatura dos primeiros modos fornece resultados mais precisos que a curvatura dos modos mais elevados.

No caso de se utilizar várias formas modais para a identificação da falha, os valores absolutos das variações da curvatura modal de cada modo podem ser adicionados para fornecer um parâmetro único:

$$\Delta^{CM}(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\phi_{ik}'' - \phi_{ik}''^*| \quad (19)$$

A diferença entre as curvaturas modais deve ser máxima na região onde ocorre a falha, pois é lá onde a redução da rigidez à flexão é maior.

Experimentalmente, a deformada modal é geralmente determinada a partir de um número reduzido de sensores. Dessa forma, se a distância h entre os sensores é muito elevada, ou seja, se temos um número de sensores disponíveis reduzido, o cálculo por diferenças finitas centradas introduzirá um erro considerável no valor de curvatura modal. A esse erro numérico deve-se acrescentar o erro de medição experimental devido a ruído de captação e outras fontes perturbadoras do resultado. Logo, a utilização dessa abordagem torna-se limitada.

Para sanar esse problema, pode-se realizar um maior número de ensaios, alterando as posições dos sensores, com o cuidado de manter um sensor fixo, que fará o papel de sensor principal. Partindo-se do pressuposto que os sensores não interferirão com o comportamento dinâmico da estrutura, por terem massa insignificante comparado à própria estrutura, a forma modal extraída será a mesma para cada ensaio. Dessa forma, é suficiente normalizar todas as formas modais obtidas com relação ao sensor principal e montar uma forma modal com tantos pontos quanto seja necessário para uma boa discretização da estrutura.

Implementação do Algoritmo de Identificação Modal

O algoritmo de identificação modal implementado utiliza como parâmetro de entrada um sinal de resposta de uma estrutura à estímulos dinâmicos, podendo ser a vibração natural da estrutura em uso, ou a resposta à uma carga de impacto especialmente gerada para a aquisição do sinal. Por só utilizar o sinal de resposta do sistema estrutural, este método de identificação modal pode ser caracterizado como *output-only*.

Para não tornar demasiado extenso o presente artigo, foram omitidos os aspectos práticos para a implementação do algoritmo tais como a wavelet-mãe utilizada (wavelet-mãe de Cauchy), a forma de cálculo numérico por meio da *Fast Fourier Transform* (FFT), o tempo de aquisição mínimo do sinal para determinação de um domínio no plano tempo-frequência no qual os efeitos de borda possam ser desprezados e a escolha de parâmetros para a wavelet-mãe para que se consiga isolar as componentes de um sinal de várias frequências naturais. Para mais informações acerca desses aspectos, reportar-se à tese de LE (2011).

Validação Numérica do Algoritmo de Identificação Modal

Esta seção destina-se a apresentar a validação numérica do algoritmo de identificação modal implementado em MATLAB®. Para tanto, utilizou-se o problema de vibração de

vigas, que possui modelagem teórica analítica já consagrada e é de fácil implementação numérica por meio do método de elementos finitos.

Para determinação dos parâmetros modais de uma viga (frequência e forma modal) foi resolvido analiticamente a equação de vigas (20) com as condições de contorno para engastamento (21), para os n primeiros modos.

$$\frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (20)$$

$$\begin{cases} w(x_0, t) = 0 \\ \theta(x_0, t) = \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Com o objetivo de gerar numericamente um sinal de vibração amortecida de uma viga bi-engastada, foi simulada por meio do método de elementos finitos uma viga com as características constantes da tabela 1.

Tabela 1 – Características da Viga Numérica Simulada

Comprimento (m)	1
Largura (mm)	40
Espessura (mm)	3
Área de Seção Transversal (m ²)	1,20E-03
Momento de Inércia (m ⁴)	9,00E-07
Módulo de Young (Pa)	6,90E+10

A viga numérica foi discretizada em 100 elemento, cada nó com 2 graus de liberdade (translação e rotação), teve suas frequências naturais e formas modais determinados resolvendo o problema clássico de Dinâmica das Estruturas para vibração livre não amortecida (22).

$$[M]^{-1}[K]\{X\} - \lambda[I]\{X\} = \{0\} \quad (22)$$

Utilizou-se a técnica de truncamento para determinar uma base representativa da vibração da viga com os 10 maiores autovalores e seus respectivos autovetores. As matrizes de rigidez e massa foram projetadas nessa base.

Resolveu-se por meio do algoritmo de Runge-Kutta de 4^a ordem o problema de vibração amortecida da viga numérica, excitada por uma força $F = 1$ kN, aplicada durante um intervalo de tempo de 0,002 segundos na posição 22,7 cm, na direção de menor momento de inércia. Introduziu-se os amortecimentos viscosos modais de $A = 0,5$ em cada modo.

A resposta obtida foi projetada novamente à base canônica, de onde foi possível obter os dados de aceleração dos nós da viga no tempo de simulação 5 segundos. Foram utilizados os dados de vinte nós igualmente espaçados, representando vinte acelerômetros acoplados à viga.

A figura 1 apresenta o sinal de aceleração no tempo para o meio da viga, gerado numericamente pelo método dos elementos finitos, bem como sua Transformada de Fourier, onde podem ser detectados os picos referentes aos oito primeiros modos de vibração viga numérica.

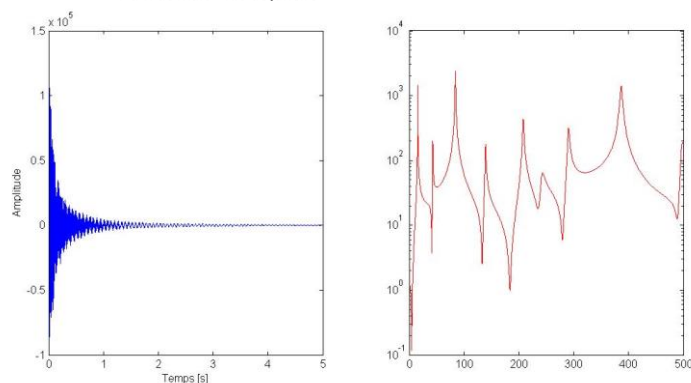


Figura 1 – Sinal de aceleração gerado numericamente e seu espectro de frequências.

Os parâmetros modais gerados por MEF foram compatíveis com a solução teórica-analítica para a viga em questão, e os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Comparação entre frequência teórica e frequência obtida por MEF para a viga numérica

Modo de Vibração	Frequência MEF (Hz)	Frequência Teórica (Hz)	Variação (%)
1	15,589	15,518	0,462
2	42,972	42,775	0,462
3	84,243	83,855	0,462
4	139,257	138,617	0,462
5	208,027	207,070	0,462
6	290,550	289,213	0,462
7	386,827	385,048	0,462

A tabela 3 apresenta os resultados de frequência natural e amortecimento modal obtidos por meio do algoritmo de identificação modal, comparando-os às frequências naturais e amortecimentos modais do sinal gerado numericamente por meio do método dos elementos finitos. Percebe-se que a identificação modal teve sucesso em recuperar a frequência natural e o amortecimento modal do sinal gerado, com uma variação da ordem de 0,005% para a frequência natural e de 1,0% para os amortecimentos modais.

Tabela 3 – Resultados da Identificação Modal

Modo de Vibração	Freq. Identificada (Hz)	Freq. MEF (Hz)	Var. o (%)	Amort. Identificado	Amort. MEF	Var. (%)
1	15,589	15,589	0,003	0,501	0,500	0,206
2	42,972	42,972	0,001	0,497	0,500	0,598
3	84,240	84,243	0,003	0,496	0,500	0,847
4	139,255	139,257	0,002	0,496	0,500	0,824
5	208,017	208,027	0,005	0,496	0,500	0,714
6	290,534	290,550	0,005	0,496	0,500	0,843
7	386,810	386,827	0,004	0,495	0,500	1,025

A figura 2 apresenta as formas modais teóricas para a viga bi-engastada. Pode-se comparar esses resultados com os apresentados pela figura 3, que mostra as formas modais da viga numérica, obtidos através do algoritmo de identificação modal implementado. Foram utilizados no algoritmo de identificação modal os sinais de aceleração em 19 pontos igualmente espaçados no interior da viga bi-engastada, obtendo-se assim, formas modais de 21 pontos, ao considerar-se os extremos da viga.

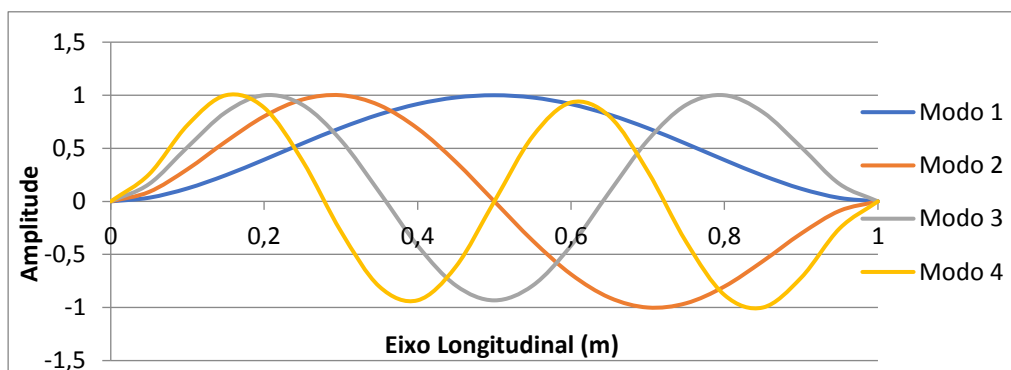


Figura 2 – Formas modais teóricas – Viga bi-engastada

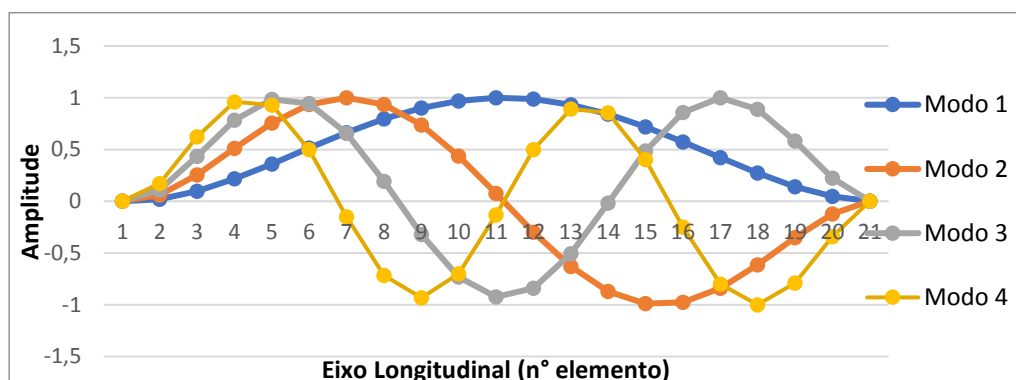


Figura 3 – Formas modais identificadas – Viga numérica

Validação Numérica da Detecção de Falhas

Para a detecção de falhas em uma estrutura por meio do método de variação da curvatura modal, foi simulado numericamente um sinal de vibração de viga amortecida, da mesma maneira explicada anteriormente, entretanto, foi inserida gradualmente uma redução de rigidez na viga no elemento número 30, reduzindo a seção de 10% a 50%. Os sinais gerados numericamente foram analisados pelo algoritmo de identificação modal, extraíndo-se da viga as frequências naturais, os amortecimentos modais e as formas modais.

O gráfico da figura 4 apresenta a variação da curvatura modal para os cinco níveis de dano inseridos na viga numérica. Pode-se notar um pico na exata posição da falha na viga (elemento 30 de 100). Além disso, percebe-se o aumento da variação da curvatura modal com o aumento do dano, o que indica que esse método também pode ser usado para o monitoramento da evolução da severidade da falha, ou seja, o método em questão atinge o nível 3 da classificação de Rytter.

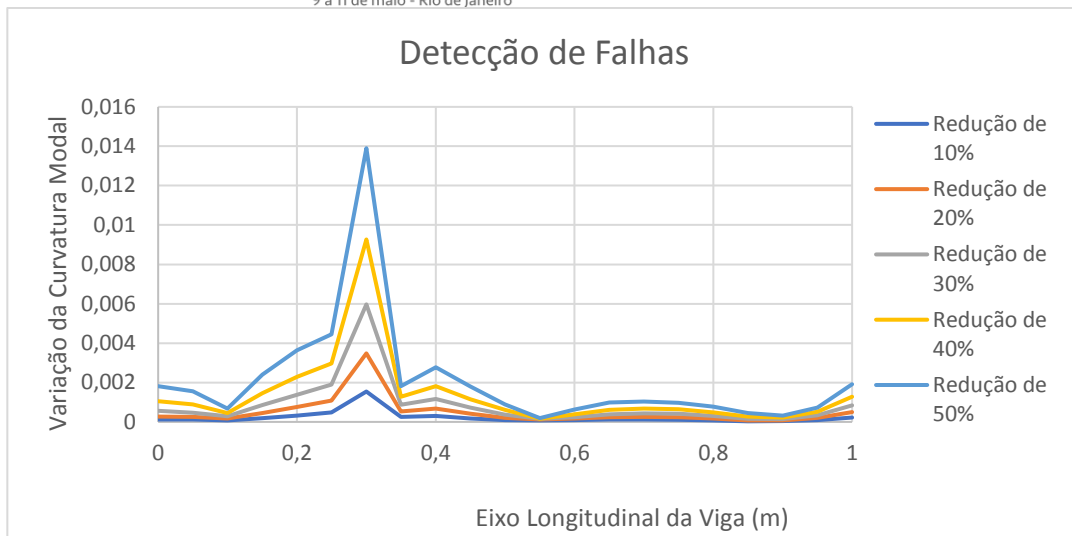


Figura 4 – Variação da Curvatura Modal.

Detecção de Falhas de um Pórtico Plano de Dois Andares

A vibração de um pórtico plano de dois andares é um problema simples de dinâmica das estruturas, apresentaremos a seguir a solução da vibração livre de tal pórtico tendo em vista o estudo experimental do mesmo. A abordagem adotada é a apresentada por MOREIRA (1977).

O esquema estrutural do pórtico plano é o mostrado na figura 5, sendo L o comprimento das barras verticais, J o momento de inércia da seção transversal das barras, suposto igual para todas as barras, a massa M da estrutura está toda concentrada nos pavimentos de rigidez infinita, as barras, todas de mesmo material de módulo de Young E , são consideradas perfeitamente engastadas no solo e nos pavimentos rígidos.

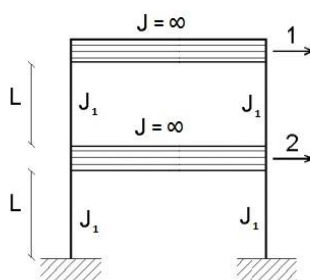


Figura 5 – Modelo de Pórtico Plano de dois Andares (*Shear Building*).

Para o modelo teórico apresentado, temos as frequências naturais f_1 e f_2 , onde $k = 12EJ/l_3$, e as formas modais respectivas são

$$f_1 = \left(\sqrt{\frac{6+\sqrt{20}}{2} \frac{k}{M}} \right)^{-1} \quad (23)$$

$$f_2 = \left(\sqrt{\frac{6-\sqrt{20}}{2} \frac{k}{M}} \right)^{-1} \quad (24)$$

$$\varphi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0,618 \end{pmatrix} \text{ e } \varphi_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1,618 \end{pmatrix} \quad (25)$$

A figura 6 apresenta a vista frontal e lateral do pórtico experimental de dois andares (*Shear Building*) confeccionado. As chapas de alumínio utilizadas possuem dimensão 510x107x1,8 em milímetros.

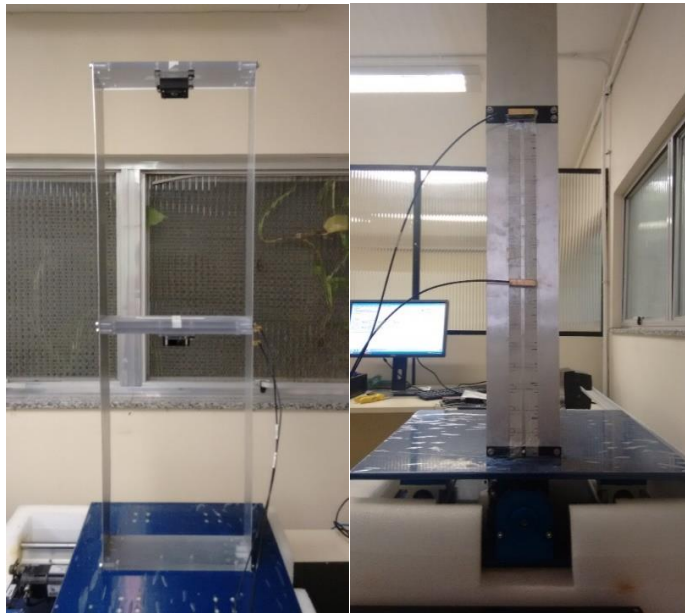


Figura 6 – Modelo experimental de pórtico de dois andares (*Shear Building*).

Para a captação da aceleração foram utilizados dois acelerômetros FBG da marca Micron Optics e um interrogador de dados da mesma marca. O software utilizado para obtenção dos sinais foi o MOI Enlight.

Ao proceder-se a análise modal experimental do pórtico plano de dois andares, com objetivo de realizar uma detecção de falhas, deve-se fazer distinção entre o comportamento oscilatório global da estrutura, apresentado nas equações 23, 24 e 25, do comportamento oscilatório de cada componente da estrutura em si. Os componentes, uma barra por exemplo, fazem parte da estrutura e a ela estão ligados por suas vinculações.

Para a detecção de uma falha inserida em uma das barras do pórtico experimental, será necessário a identificação modal do seu comportamento local. Ou seja, devem ser medidos os parâmetros modais a barra em questão com precisão suficiente para possibilitar a localização da falha.

Para a identificação do comportamento local da barra segundo a vibração global da estrutura, foram realizadas marcações na barra de 15 pontos de medição sem considerar os pontos de engaste. Um dos acelerômetros, o principal, foi mantido fixo, enquanto o segundo foi sendo nos outros pontos de medição, para que se pudesse obter uma forma modal bem discretizada.

Esse procedimento de obtenção de forma modal se baseia na premissa de que a variação da posição dos acelerômetros na estrutura não afeta o comportamento vibratório da mesma, tendo em vista que a massa do acelerômetro é pequena se comparada à massa da estrutura.

Ao se utilizar esse procedimento para objetos de estudo de massa reduzida, a massa dos acelerômetros, ao ser deslocada pela estrutura, pode induzir variações nos parâmetros

modais da mesma, tendo como consequência a perda na confiabilidade dos métodos de detecção de falhas baseado na variação dos parâmetros modais. Entretanto, como as estruturas da Engenharia Civil possuem massa muito mais elevada que os instrumentos de medida, não se nota tal perda de confiabilidade.

A grande vantagem deste procedimento é a possibilidade de realizar a identificação da forma modal de uma estrutura com uma grande quantidade de pontos de medida mesmo quando se possui uma restrição no número de sensores utilizados. Essa possibilidade é de grande valia para a detecção de falhas, tendo em vista que, para o método de variação da curvatura modal, uma forma modal bem discretizada da estrutura é imprescindível para a correta localização da falha.

A figura 7 apresenta a forma modal para a barra inferior do pórtico de dois andares referente à frequência natural de 2,47 Hz, para o pórtico íntegro. Percebe-se que a ligação da barra com o pavimento intermediário apresentou boa rigidez, pois a derivada da forma modal neste ponto tende a 0 (ligação engastada), já a ligação com a base não apresentou tal rigidez.

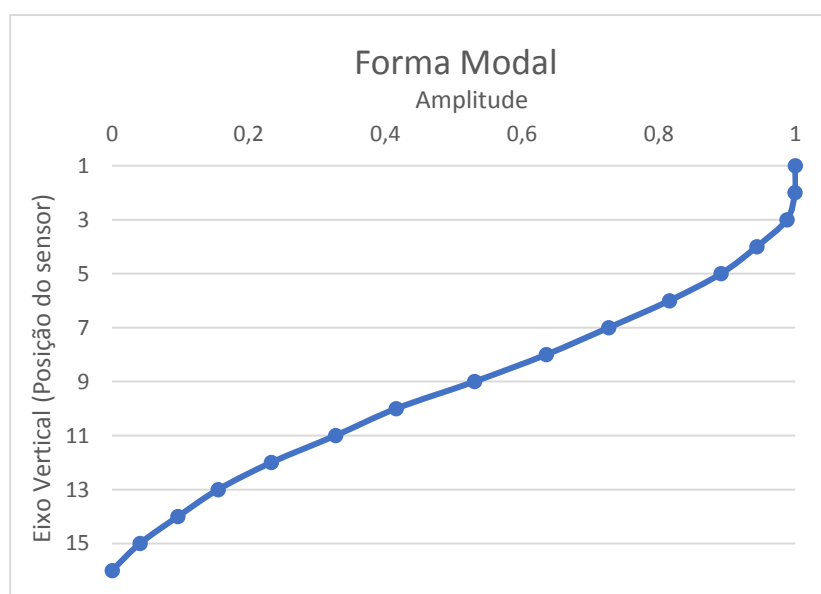


Figura 7 – Forma Modal para a barra inferior do *Shear Building*.

O gráfico da figura 9 apresenta a variação da curvatura modal da barra entre seu estado íntegro e com redução de rigidez no elemento 12. Pode-se notar um pico na exata posição da falha inserida no elemento 12, conforme mostra a figura 8. Dessa forma, conclui-se que o algoritmo de detecção de falhas por meio da variação da curvatura modal teve êxito em detectar a fissura.



Figura 8 – Redução da Seção da barra do pórtico no ponto 12.

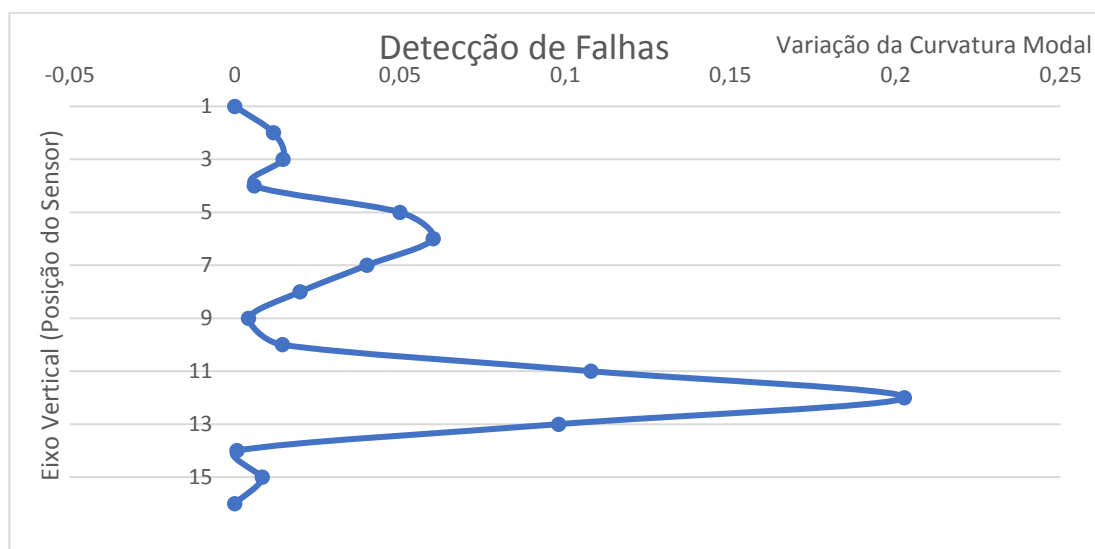


Figura 9 – Variação da Curvatura Modal para a barra estudada

Conclusões

O presente trabalho propôs-se a realizar a detecção de falhas em estruturas por meio da Análise Modal Experimental, utilizando a técnica de extração dos parâmetros modais de uma estrutura por meio da Transformada *Wavelet* Contínua. Foi implementado um algoritmo de identificação modal que permite a extração dos parâmetros modais de uma estrutura com base apenas na sua vibração livre.

O algoritmo de extração dos parâmetros modais, ao ser aplicado na viga numérica, permitiu a obtenção dos parâmetros modais até o sétimo modo de vibração com precisão de 0,005% na frequência modal, 1,0% no amortecimento modal e apresentou R^2 em torno de 0,98 para as formas modais.

Quanto à identificação de falhas, foi utilizado o método da variação da curvatura modal que permitiu não apenas a detecção do surgimento da falha, mas a sua localização e acompanhamento da evolução para a viga numérica, chegando ao Nível 3 da classificação de Rytter.

Os mesmos algoritmos ao serem aplicados no pórtico plano, permitiram a extração dos parâmetros modais do pórtico estudado e, pela variação da curvatura modal da barra fissurada do pórtico, foi possível a localização da falha.

Por fim, destaca-se que os algoritmos desenvolvidos podem vir a integrar um plano de monitoramento da integridade de estruturas, pois permitem localizar uma região da estrutura onde ocorre uma redução da rigidez, bem como acompanhar a evolução dessa redução. Os métodos desenvolvidos podem ser consolidados para aplicação real em vigas e estais de pontes ou em áreas críticas de edifícios altos.

Referências

- ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. Identificação de Estruturas em Operação através de análise modal híbrida. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- LE T-P. Auscultation dynamique des structures à l'aide de l'analyse continue en ondelettes. Tese (doutorado em Engenharia Civil) – L'Université de Toulouse, Toulouse, 2011.
- LE T-P.; ARGOU, P. Continuous wavelet Transform for modal identification using free decay response. *Journal of Sound and Vibration*, v. 277. 2003.
- MOREIRA, D. F. Análise Matricial de Estruturas. 1. Ed. São Paulo: LTC/EDUSP, 1977. 404 p.
- NAJM, D. Quels capteurs de vibrations pour la surveillance de santé des structures mécaniques? 290 p. Tese (Doctorate en Structure et Matériaux) – L'Université Paris-Est, Paris, 2015.
- RYTTER, A. Vibration based inspection of civil engineering structures. 1993. 200 p. Tese (Doctor in Philosophy in civil Engineering) – University of Aalborg, Dinamarca, 1993.