
DETECÇÃO DE DANOS EM VIGAS DE ALUMÍNIO USANDO O MÉTODO DAS CURVATURAS MODAIS

DAMAGE DETECTION ON ALUMINIUM BEAMS USING MODE SHAPE CURVATURE METHOD

Ludmila de Souza Bonetti ¹

Marcelo Rodrigo Carreira ²

Ana Raiza Ciscoto Yoshioka ²

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho ³

Resumo: As estruturas civis estão susceptíveis à deterioração mesmo sob condições normais de uso. Dependendo da severidade dos danos, a capacidade resistente da estrutura pode ficar comprometida. Assim, quando houver dúvida quanto a sua integridade é de extrema importância que a detecção dos danos ocorra o mais breve possível. O objetivo desta pesquisa foi investigar a aplicação do método das curvaturas modais na detecção de danos em vigas de alumínio. Foi encontrada grande dificuldade para localizar os defeitos usando o método original proposto por Pandey et al. (1991). A partir das curvaturas modais foi calculado um Índice de Danificação (*ID*) o qual mostrou-se mais sensível e preciso do que o método original. Concluiu-se que o método das curvaturas modais associado ao cálculo do *ID* tem potencial para a detecção de danos em vigas, porém, verificou-se a necessidade de amostrar sinais em uma banda de frequências mais larga a fim de identificar um número maior de modos de flexão e, desta forma, melhorar a sensibilidade na localização dos defeitos.

Palavras-chaves: Análise modal, avaliação não destrutiva, ensaio dinâmico.

Abstract: *The civil structures are sensitive to the deterioration even under normal conditions of use. Depending on the severity of the damages, the resistant capacity of the structure can be compromised. Thus, when there is doubt as to its integrity it is of utmost importance that damage detection be carried out as soon as possible. The objective of this research was to investigate the application of the mode shape curvature method in the damage detection of aluminum beams. It was found great difficulty to locate the defects using the original method proposed by Pandey et al. (1991). From the modal curvatures a Damage Index (ID) was calculated which was more sensitive and precise than the original method. It was concluded that the modal curvature method associated with ID calculation has the potential to damage detection in beams, but the need to sample signals in a wider frequency band was identified in order to identify a larger number of bending mode shapes and thus improve sensitivity in the location of defects.*

Keywords: *Modal analysis, nondestructive evaluation, dynamic test.*

¹Universidade Paranaense, Campus Paranavaí – Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão – Brasil.

³Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas podem sofrer deterioração como resultado de fenômenos como corrosão, ataque químico, acidentes e até mesmo devido ao uso normal. Dependendo da severidade do dano este pode levar a fissuração excessiva, diminuição da vida útil da estrutura e, em casos mais severos, ocasionar a redução da capacidade resistente do elemento danificado.

Neste sentido, a detecção de falhas em estágios iniciais é extremamente importante, pois, além de permitir a intervenção e o reparo dos danos, ainda evita custos de reparação mais elevados.

A avaliação da integridade estrutural usualmente é feita mediante uma inspeção visual seguida por um ensaio não destrutivo. O emprego do ensaio não destrutivo se faz necessário em função das limitações da inspeção visual como a impossibilidade de avaliar o interior do elemento estrutural bem como o fato da avaliação depender do julgamento pessoal do avaliador.

Entre os vários testes não destrutivos aplicáveis na avaliação de estruturas civis, os mais usuais são os ensaios mecânicos estáticos, ultrassom, esclerometria e os ensaios dinâmicos.

Os ensaios dinâmicos podem ser usados na avaliação da rigidez de uma estrutura e até mesmo para acompanhar a evolução de possíveis danos. Para este fim, é necessário o conhecimento tanto da teoria de vibrações mecânicas quanto de análise modal (FARRAR e WORDEN, 2007). Esses ensaios constituem uma maneira rápida e relativamente barata de obter informações importantes a respeito das propriedades mecânicas de uma estrutura. Por meio destes testes é possível verificar a integridade de uma estrutura de uma única vez (DAWARI e VESMAWALA, 2013; ZONTA, 2000). Os ensaios dinâmicos também têm a vantagem de detectar defeitos presentes no interior dos elementos estruturais que não poderiam ser identificados apenas por inspeção visual (ELSHAFEY et al., 2011).

Nas últimas três décadas, a avaliação da integridade estrutural por meio de ensaios dinâmicos tem recebido grande atenção por parte dos pesquisadores. Durante este período, muitos algoritmos para detecção de danos foram desenvolvidos e avaliados (RYTTER, 1993; DAWARI e VESMAWALA, 2013; ELSHAFFEY et al., 2011 e HAMZE et al., 2012).

Rytter (1993) classifica os métodos de detecção de danos por meio de ensaios dinâmicos em quatro níveis como segue: nível 1 – o método fornece uma indicação qualitativa da presença de dano na estrutura; nível 2 – o método também fornece informação sobre a provável localização do dano; nível 3 – o método fornece informação sobre a extensão do dano; nível 4 – o método fornece informação sobre a real segurança da estrutural para um certo estágio de dano.

Em geral, esses métodos de detecção de danos se fundamentam no fato dos defeitos provocarem alterações nos parâmetros modais da estrutura (frequências naturais, coeficientes de amortecimento e modos de vibração) ou ainda na energia de deformação modal. Assim, possíveis danos podem ser identificados através da comparação dos parâmetros modais da estrutura antes e após a danificação (FARRAR e WORDEN, 2007; HAMZE et al., 2012).

A avaliação das diferenças nas frequências naturais (entre a estrutura íntegra e a danificada) é uma forma tradicional de detecção de danos (OWOLABI et al., 2003; KHIEM, 2006, HE e ZHU, 2011). De acordo com Sinou (2013), a detecção de danos a partir das diferenças nas frequências naturais tem as vantagens de empregar um processo experimental clássico e não requer equipamentos caros.

O surgimento de uma fissura em um elemento estrutural acarreta a redução das frequências naturais e leva a um incremento nos coeficientes de amortecimentos modais (DAWARI e VESMAWALA, 2013; HAMZE et al., 2012; BRASILIANO et al., 2002, PANDEY et al., 1991). A redução nas frequências naturais está relacionada com a redução do momento de inércia da seção transversal na região fissurada. Já o aumento nos coeficientes de

amortecimento se deve a uma redução na parcela de energia de deformação recuperada após a plastificação da seção transversal.

Salawu e Williams (1994), destacam que somente as diferenças nas frequências naturais podem não ser suficientes para localizar danos uma vez que defeitos similares em posições diferentes podem resultar em diferenças de mesma magnitude nas frequências. Por outro lado, os modos de vibrar são fortemente influenciados pela posição do defeito. Desta forma, a comparação dos modos de vibrar de uma estrutura antes e após o dano constitui uma técnica mais adequada para a detecção e localização do dano.

Contudo, Ismail e Ong (2012) citam algumas desvantagens em usar os modos de vibração para detecção de danos. Eles afirmam que os danos podem não afetar significativamente os primeiros modos (que frequentemente são os medidos em ensaios dinâmicos com grandes estruturas).

O método das curvaturas modais tem a vantagem de apresentar na região danificada a maior diferença entre as curvaturas modais da viga íntegra e da viga danificada. Desta forma, este método pode ser usado não somente para identificar a presença do defeito, mas também para localizá-lo (PANDEY et al., 1991).

O método das curvaturas modais foi proposto por Pandey et al. (1991). Por meio de simulações numéricas, os autores mostraram que esse método tem grande sensibilidade para detectar danos em vigas. Os autores também mostraram que os parâmetros MAC (*Modal Assurance Criterion*) e COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*) apresentaram alta correlação entre uma viga não danificada e a mesma viga com redução de 50% na rigidez a flexão. Desta forma, os autores também demonstraram a baixa sensibilidade destes parâmetros na detecção de danos.

Genovese Soares (2000) testou o método das curvaturas modais para a localização de danos em vigas e observou que a multiplicação das curvaturas modais pode facilitar a localização dos danos.

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma investigação numérico-experimental sobre a aplicação do método das curvaturas modais na detecção de danos em vigas de alumínio. Observou-se grande dificuldade em localizar os danos usando o método original proposto por Pandey et al. (1991). Para cada cenário de danificação estudado foi calculado um Índice de Danificação (*ID*) a partir da multiplicação das diferenças relativas das curvaturas modais e observou-se que os gráficos de *ID* contribuem para a localização dos defeitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A curvatura de uma viga fletida relaciona-se com a rigidez à flexão da seção transversal de acordo com a Equação (1) (GERE e GOODNO, 2013).

$$\phi_j'' = \frac{M_j}{E_j \cdot I_j} \quad (1)$$

ϕ_j'' = curvatura da viga no nó j (m^{-1});

M_j = momento fletor ($N \cdot m$);

E_j = módulo de Young (N/m^2);

I_j = momento de inércia da seção transversal (m^4);

j = índice referente ao nó onde a curvatura é calculada.

Assim, o surgimento de uma trinca na viga pode levar a uma redução do momento de inércia da seção transversal e, desta forma, há um incremento na curvatura desta seção transversal.

Pandey et al. (1991) calcularam, de forma aproximada, as curvaturas modais em cada ponto j ao longo do comprimento das vigas por diferenças finitas usando a Equação (2).

$$\phi_j'' \cong \frac{\phi_{j-1} - 2\phi_j + \phi_{j+1}}{h^2} \quad (2)$$

ϕ_j = amplitude modal no nó j ;

h = comprimento de cada elemento (m).

Raju e Ramesh (2016) observam que, no método das curvaturas modais, os modos superiores são mais sensíveis aos efeitos da avaria estrutural. Esta característica do método pode dificultar a detecção de danos no modelo físico uma vez que os modos superiores têm um número maior de ondas e, por isso, há a necessidade da medição da resposta em vários pontos ao longo do comprimento do elemento de modo a reconstruir com razoável precisão essas formas modais. Esta é uma das desvantagens do método das curvaturas modais apontada por Zonta (2000).

Alguns pesquisadores têm reportado a obtenção de bons resultados na detecção de defeitos com o método das curvaturas modais (HAMZE et al., 2012; DAWARI e VESMAWALA, 2013; ZONTA, 2000). Entretanto, Salawu e Williams (1994) bem como Genovese Soares (2000) relatam ter encontrado dificuldades para localizar danos em vigas ao usar esse método.

Segundo Ho e Ewins (2000) as curvaturas modais calculadas de forma aproximada conforme Equação (2) são muito sensíveis tanto aos efeitos dos danos quanto aos ruídos nos modos de vibração. Os autores afirmam que a Equação (2) tende a amplificar os ruídos. Este fato poderia explicar porque em investigações experimentais o método não se mostrou tão preciso quanto em estudos numéricos.

2.1 Cenários de danificação estudados

Neste trabalho o método das curvaturas modais foi testado em dois níveis de danificação e com o dano localizado em duas posições diferentes. Nas simulações numéricas, bem como na análise experimental, foi estudado o caso da presença de um único dano em cada viga. Os danos foram posicionados respectivamente na coordenada $x_d = 0,1L$ (onde L é o comprimento) para a viga 1 e na coordenada $x_d = 0,5L$ para a viga 2. Na Figura 1, o posicionamento do dano causado nas vigas é ilustrado.

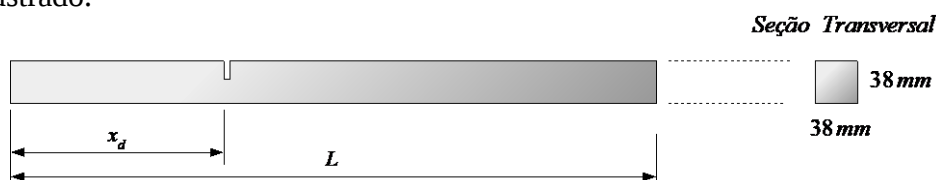


Figura 1. Localização dos danos.

Fonte: Autoria própria (2019).

Em ambas as vigas foi inicialmente simulado o caso de um dano leve ocasionando redução de 10% no momento de inércia e na sequência o método foi avaliado também para o caso de um dano severo representado neste estudo por uma redução de 60% no momento de

inércia da seção transversal. Desta forma, tanto na modelagem numérica quanto na análise experimental foram testados 4 cenários de danificação como mostrado na Tabela. 1.

Tabela 1 - Cenários de danificação testados.

Cenário	Viga	Coordenada do dano (x_d)	Redução (%)	
			Área	Momento de inércia
1	1	0,1L	3,4	10
2			26,3	60
3	2	0,5L	3,4	10
4			26,3	60

Fonte: Autoria própria (2019)

3 MODELAGEM NUMÉRICA

A análise numérica foi realizada usando o método dos elementos finitos. Para tanto, um código computacional foi escrito no programa Scilab versão 5.5.2.

As vigas foram modeladas com comprimento de 800 mm e seção transversal quadrada com 38 mm de lado. Foi adotado o material alumínio com densidade igual a 2700 kg/m³ e módulo de elasticidade igual a 70 GPa. A condição de contorno adotada nas modelagens foi de suspensão livre-livre.

As vigas foram discretizadas em 22 elementos de barra como os mostrados na Figura 2(a).

Na coordenada onde se localiza o dano (x_d) foram usados dois elementos com comprimento de 0,5 mm. Na modelagem das vigas danificadas, foi atribuído um valor menor para o momento de inércia e para a área da seção transversal destes dois elementos em função do cenário de danificação simulado. Os elementos vizinhos ao dano ficaram com comprimento de 39,5 mm e os demais elementos ficaram com comprimento de 40 mm como mostra a Figura 2(b).

Os modelos numéricos ficaram com 46 Graus de Liberdade (GDL) como mostra a Figura 2(c).

Na viga 1 foram alteradas as propriedades geométricas da seção transversal dos elementos 3 e 4 e na viga 2, as alterações foram nos elementos 11 e 12.

As Equações (3) e (4) mostram respectivamente as matrizes locais de massa e de rigidez para o elemento de viga com para as coordenadas de deslocamento mostradas na Figura 2(a).

$$[m^e] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ρ = densidade do material (kg/m³);

A = área da seção transversal (m²);

L = comprimento do elemento (m).

$$[k^e] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Após a obtenção das matrizes globais de massa e de rigidez das vigas foi realizada a análise modal dos modelos numéricos. Foram obtidas as formas modais bem como as frequências naturais dos três primeiros modos de flexão das vigas. Para cada modo de flexão foram calculadas as curvaturas modais usando a Equação (2).

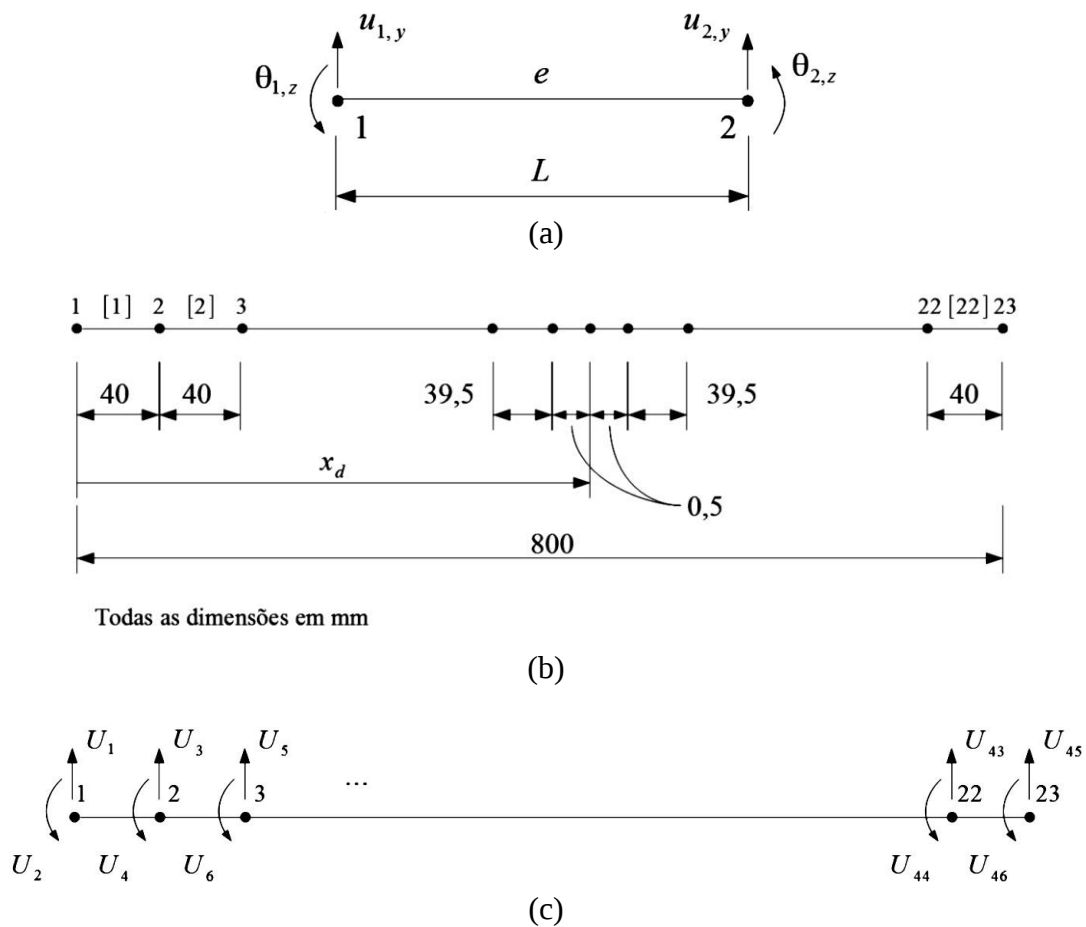


Figura 2. (a) Elemento finito de viga; (b) discretização da viga em 22 elementos; (c) graus de liberdade do modelo.

Fonte: Autoria própria (2019).

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 Materiais

Nos ensaios dinâmicos foram usadas duas vigas de alumínio liga 6063 com seção transversal quadrada de 38 mm de lado e comprimento igual a 800 mm (Figura 3).



Figura 3. Vigas de alumínio usadas nos ensaios.

Fonte: Autoria própria (2019).

4.2 Ensaio de vibração transversal

Inicialmente as vigas foram testadas na condição intacta, ou seja, sem danos. Posteriormente, os danos foram simulados por meio de cortes transversais de modo a reduzir o momento de inércia e a área da seção danificada. Assim, para a condição de dano leve (cenários 1 e 3), foi feito um corte transversal com profundidade de 1,3 mm em toda a largura das vigas. Então, os ensaios dinâmicos foram repetidos nestas vigas. Ao fim dos testes foi simulada a condição de dano severo (cenários 2 e 4) e assim a profundidade dos cortes foi aumentada para 10 mm. Novamente os ensaios dinâmicos foram repetidos nas vigas. O comprimento dos cortes foi de 1,0 mm.

As vigas foram submetidas ao ensaio de vibração transversal livre. Para simular a condição de suspensão livre-livre as vigas foram suspensas por duas molas de pequena rigidez e por linhas de nylon fixadas nos pontos nodais do primeiro modo de flexão como mostrado na Figura 4.

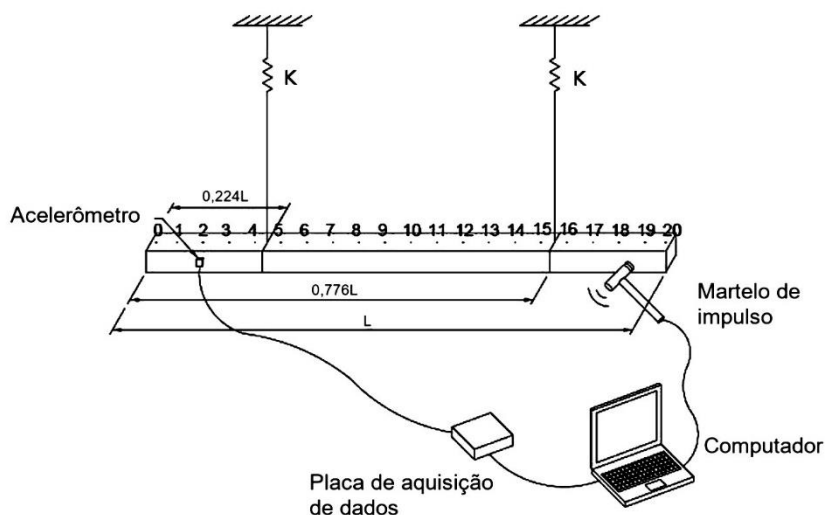


Figura 4. Esquema do ensaio de vibração transversal.

Fonte: Autoria própria (2019).

Foram marcados 21 pontos igualmente espaçados entre si de 40 mm ($0,05L$) ao longo do comprimento das vigas. A vibração livre foi provocada pela aplicação de impactos transversais nesses pontos com um martelo de impulso 8206-002 B&K. No ponto 2 foi fixado um acelerômetro B&K 4507 modelo B-006. Os sinais analógicos foram digitalizados com a placa NI USB 6009 da *National Instruments*.

Os ensaios dinâmicos foram realizados mantendo-se o acelerômetro fixo no ponto 2 e excitando cada um dos 21 pontos com 10 impactos transversais. Para cada ponto excitado foi

obtida a respectiva Função de Resposta em Frequência (FRF) de aceleração a partir da média aritmética dos dez espectros medidos. Foram identificados os parâmetros modais dos três primeiros modos de flexão usando o algoritmo LSCE (*Least Squares Complex Exponential*) implementado no software Impact desenvolvido por Carreira (2012).

O hardware foi configurado para a fazer a aquisição de 32768 amostras com uma taxa de amostragem de 18 kHz resultando em uma resolução de 0,55 Hz para a FRF. A banda de frequências usada para a identificação modal foi de 2 kHz.

5 DETECÇÃO DE DANOS

5.1 Diferença nas curvaturas modais

As curvaturas dos modos de flexão foram calculadas, de forma aproximada por diferenças finitas, nos pontos 1 a 19 mostrados na Figura 4.

A diferença em valor absoluto nas curvaturas modais entre as vigas sem dano e danificadas, em cada ponto, foi calculada pela Equação (5) para cada um dos três modos de flexão.

$$\Delta\phi''_{j,r} = \left| (\phi''_{j,r})^d - (\phi''_{j,r})^i \right| \quad (5)$$

$\Delta\phi''_{j,r}$ = diferença em valor absoluto entre as curvaturas modais no ponto j do modo r ;

$(\phi''_{j,r})^d$ = curvatura modal no ponto j do modo r para a viga danificada;

$(\phi''_{j,r})^i$ = curvatura modal no ponto j do modo r para a viga sem defeito.

A Equação 5 foi usada tanto para os dados obtidos com o modelo numérico quanto para os dados do modelo experimental para os quatro cenários de danificação mostrados na Tabela 1.

5.2 Cálculo do Índice de Danificação

Alternativamente, para localizar os danos, foi feito um tratamento nos dados de forma semelhante a empregada por Genovese Soares (2000). Porém, o diferencial deste trabalho foi que inicialmente, em cada ponto, foi calculada a diferença relativa entre as curvaturas modais conforme Equação (6).

$$DR_{j,r} = \frac{\Delta\phi''_{j,r}}{\Delta\phi''_{máx,r}} \quad (6)$$

$DR_{j,r}$ = diferença relativa, no ponto j do modo r , entre as curvaturas modais da viga íntegra e da viga danificada;

$\Delta\phi''_{máx,r}$ = maior valor absoluto da diferença entre as curvaturas modais do modo r .

Então, o produto das diferenças relativas nas curvaturas modais dos três modos de flexão foi calculado de acordo com a Equação (7). Este produto será chamado aqui de Índice de Danificação (ID).

$$ID_j = DR_{j,1} \cdot DR_{j,2} \cdot DR_{j,3} \quad (7)$$

ID_j = índice de danificação no ponto j .

Para cada cenário testado foi plotado um gráfico mostrando os valores de ID em cada ponto da viga. Assim, no ponto onde houver algum dano deve ser observado um pico de ID .

5.3 Cálculo das diferenças das frequências naturais

As diferenças percentuais entre as frequências naturais das vigas integras e das vigas danificadas também foram calculadas como mostrado na Equação (8).

$$\Delta_f (\%) = \frac{(f_r)^d - (f_r)^i}{(f_r)^i} \cdot 100 \quad (8)$$

$(f_r)^d$ = frequência natural do modo r da viga danificada;

$(f_r)^i$ = frequência natural do modo r da viga sem defeito.

6 Resultados e discussões

Os itens seguintes apresentam os resultados encontrados nesta pesquisa.

6.1 Modos de flexão das vigas intactas

A Figura 5 mostra os três primeiros modos de flexão obtidos na simulação numérica e a Figura 6 mostra os mesmos modos medidos na análise experimental para as vigas 1 e 2 sem danos.

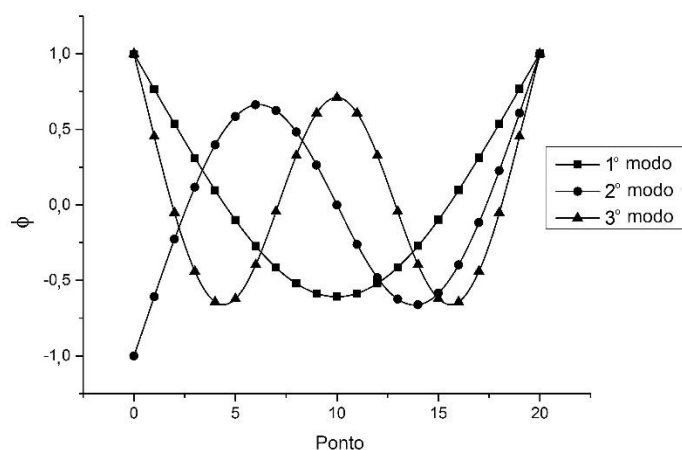


Figura 5. Primeiros três modos de flexão numéricos para a viga sem defeito.

Fonte: Autoria própria (2019).

Pode-se observar que os modos de flexão reconstruídos a partir dos dados experimentais são muito próximos dos respectivos modos obtidos na simulação numérica. Os pequenos

desvios observados na Figura 6 provavelmente se devem a ruídos presentes no processo de medição.

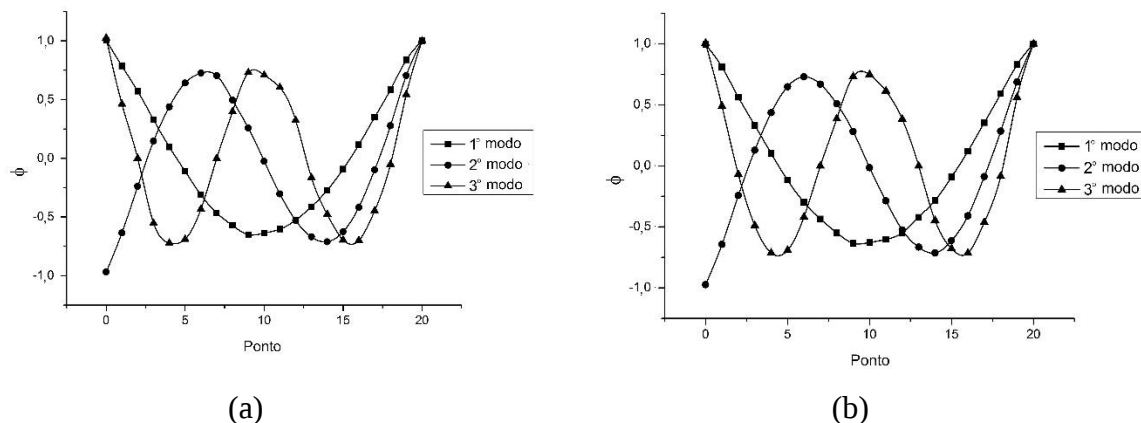


Figura 6. Primeiros três modos de flexão experimentais para as vigas sem defeito: (a) viga 1; (b) viga 2.

Fonte: Autoria própria (2019).

Como já é de conhecimento, em cada forma modal mostrada nas Figuras 5 e 6 há pontos nodais onde $\phi = 0$. Da teoria de Dinâmica sabe-se que se um defeito surgir em um ponto nodal de um determinado modo este modo não será influenciado pela presença do defeito.

6.2 Diferenças nas frequências naturais

As Tabelas 2 e 3 mostram as diferenças nas frequências naturais respectivamente para as vigas 1 e 2. Os números entre parênteses indicam o percentual de diferença entre as frequências naturais.

Tabela 2 - Frequências naturais (Hz) da viga 1.

Modo	Modelagem numérica			Análise experimental		
	Viga intacta	Cenário		Viga intacta	Cenário	
		1	2		1	2
1	310,75	309,96 (-0,25 %)	310,17 (-0,19 %)	313,51	313,35 (-0,05%)	300,73 (-4,08%)
2	856,67	856,53 (-0,02 %)	856,42 (-0,03 %)	851,89	852,31 (0,05%)	852,94 (0,12%)
3	1679,44	1679,39 (-0,03 %)	1678,52 (-0,05 %)	1635,18	1633,94 (-0,08%)	1587,95 (-2,89%)

Fonte: Autoria própria (2019).

Os cenários 1 e 3 não apresentaram diferenças significativas para as frequências naturais. As pequenas diferenças observadas podem ser decorrentes da resolução do próprio equipamento de medição ou de erros de arredondamento. Assim, danos de pequena intensidade provavelmente não são identificados na avaliação da integridade de uma estrutura apenas com a observação das diferenças nas frequências naturais.

O cenário 2, apesar de representar um dano severo, também não mostrou diferenças significativas nas frequências do modelo numérico. No modelo experimental, somente o

primeiro e o terceiro modos mostraram diferenças maiores do que 1% nas frequências naturais. Embora tais diferenças possam indicar a presença de dano não é possível localizá-lo somente com essas informações.

Tabela 3 - Frequências naturais (Hz) da viga 2.

Modo	Modelagem numérica			Análise experimental		
	Viga intacta	Cenário		Viga intacta	Cenário	
		1	2		1	2
1	311,04	310,88 (-0,05 %)	310,64 (-0,13 %)	312,72	312,60 (-0,04%)	312,88 (0,05%)
2	856,64	856,64 (-0,00 %)	856,65 (-0,00 %)	849,88	849,51 (-0,04%)	847,25 (-0,31%)
3	1679,41	1679,26 (-0,09 %)	1678,61 (- 0,05 %)	1632,28	1630,37 (-0,12%)	1613,98 (-1,12%)

Fonte: Autoria própria (2019).

No cenário 4, um dano severo é posicionado na metade do comprimento das vigas. Este ponto coincide com um dos pontos nodais do segundo modo de flexão. Desta forma é esperado que as frequências naturais deste modo não sejam influenciadas pelo defeito como pôde ser observado na Tabela 3. Assim sendo, somente o primeiro e o terceiro modos são afetados pelo defeito. Contudo, verifica-se que as diferenças nas frequências naturais destes modos são desprezíveis no modelo numérico. No modelo experimental, somente o terceiro modo apresentou sensibilidade para indicar a presença de defeito. Apenas com os dados da Tabela 3 também não é possível localizar o defeito para o cenário 4.

Outros pesquisadores como Dawari e Vesmawala (2013), Salawu e Williams (1994), Pandey et al. (1991) e Deokar e Wakchaure (2011) também relatam pequenas ou insignificantes diferenças nas frequências naturais dos modos cujo um dos pontos nodais coincide com a posição do defeito.

6.3 Identificação e localização dos danos

6.3.1 Método das curvaturas modais

As Figuras 7 a 10 mostram os gráficos das diferenças absolutas nas curvaturas modais das vigas respectivamente para os cenários 1 até 4. Os picos de maior diferença nas curvaturas modais deveriam coincidir com os pontos onde os defeitos foram simulados.

Nos cenários 1 e 2, o defeito está na coordenada $x_d = 0,1L$ que coincide com o ponto 2.

Na Figura 7(a) observa-se que o primeiro e o segundo modos exibem picos na posição do defeito. Entretanto, o terceiro modo indica a presença de falsos positivos nos pontos 3 e 6. Assim sendo, não é possível identificar e localizar o dano do cenário 1 para o modelo numérico.

A análise da Figura 7(b) sugere a presença de defeitos nos pontos 2, 3, 11 e 12 enquanto que o defeito está de fato localizado no ponto 2. Os falsos positivos mostrados na Figura 7(b) podem ter origem na amplificação de ruídos conforme mencionado por Ho e Ewins (2000).

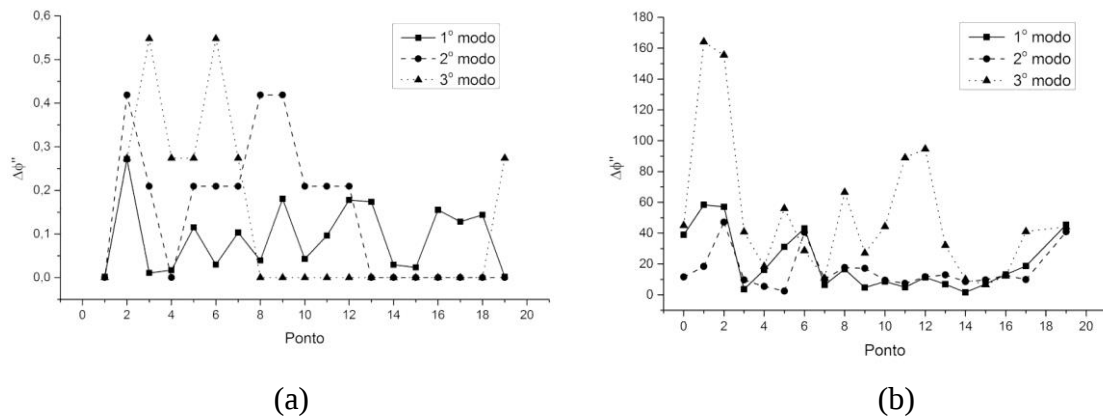


Figura 7. Diferença absoluta entre as curvaturas modais para o cenário 1: (a) simulação numérica e (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

No cenário 2 do modelo numérico, Figura 8(a), verificam-se picos no ponto 2 para os três modos de flexão. Ainda assim, os três modos de vibrar exibem ruídos em diversos pontos tornando difícil identificar a presença de defeitos no cenário 2 do modelo numérico.

No modelo experimental verifica-se um pico de amplitude no ponto 2 seguido por falsos positivos nos pontos 9, 12 e 13. É importante observar que tanto na Figura 8(a) quanto na 8(b) o modo mais alto (terceiro) mostrou-se mais sensível tanto ao defeito quanto aos ruídos. Essa tendência concorda com as afirmações de Raju e Ramesh (2016).

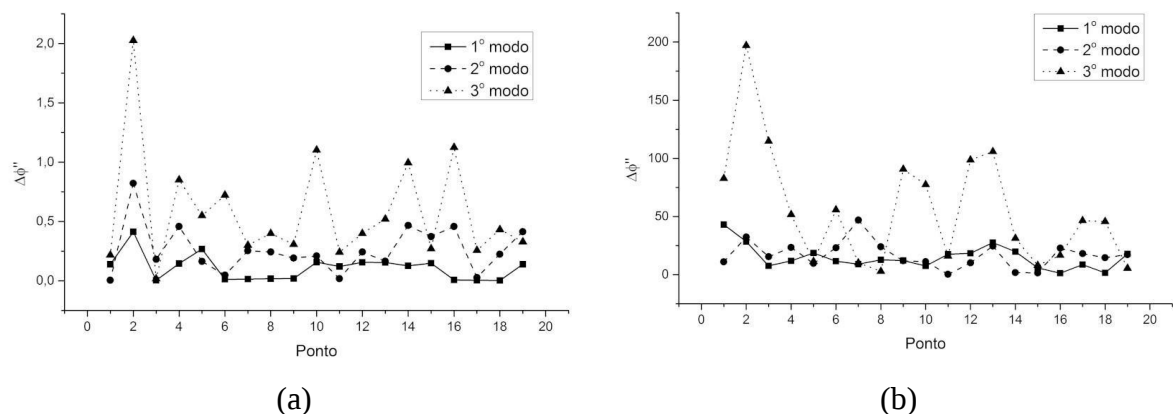


Figura 8. Diferença absoluta entre as curvaturas modais para o cenário 2: (a) simulação numérica e (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

Nos cenários 3 e 4, os defeitos estão localizados na metade do comprimento das vigas e coincidem com o ponto 10 nos gráficos das Figuras 9 e 10.

A Figura 9(a) mostra muitos ruídos nos modos 1 e 3 do modelo numérico. Considerando que nenhum pico destes é coincidente o avaliador poderia concluir que não há dano algum na viga do cenário 3 do modelo numérico e que os picos se tratam apenas de ruídos. Conclusão semelhante pode ser obtida para o modelo experimental.

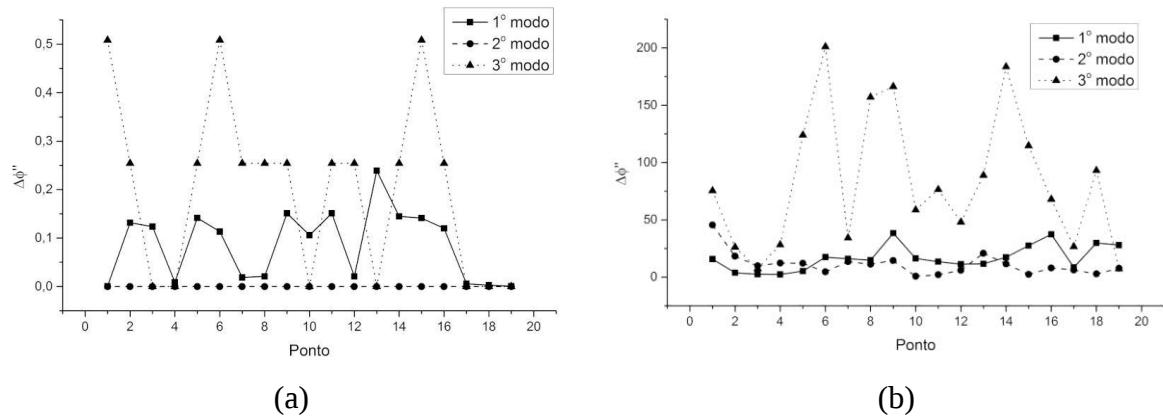


Figura 9. Diferença absoluta entre as curvaturas modais para o cenário 3: (a) simulação numérica e (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 10(a) sugere que há algum dano no ponto 10 do cenário 4 do modelo numérico. Na Figura 10(b) não fica claro haver algum defeito na viga de forma que se tem um resultado inconclusivo.

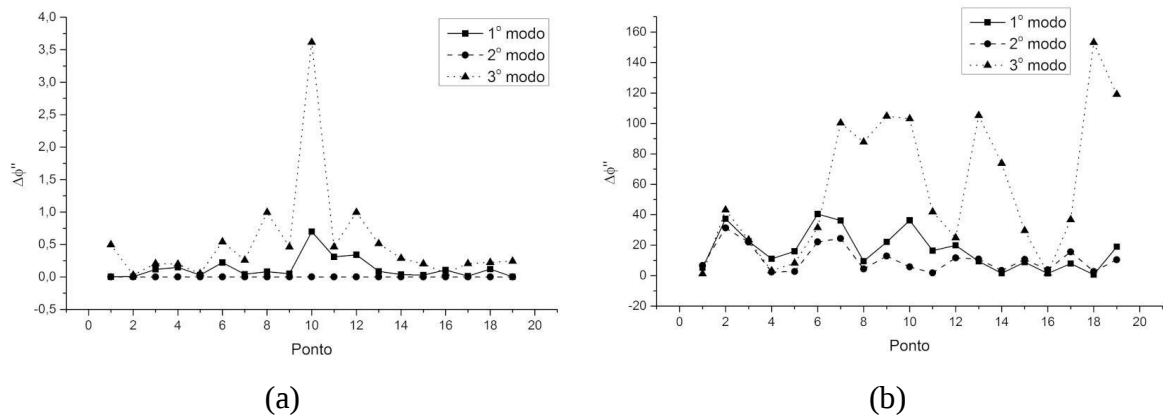


Figura 10. Diferença absoluta entre as curvaturas modais para o cenário 4: (a) simulação numérica e (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

6.3.2 Gráficos do Índice de Danificação

As Figuras 11 a 14 mostram os gráficos de ID calculados ao longo do comprimento das vigas respectivamente para cada um dos cenários mostrados na Tabela 1.

A Figura 11(a) mostra que o gráfico de ID indica claramente a presença de defeito no cenário 1 do modelo numérico. Embora no modelo experimental, Figura 11(b), o defeito tenha sido posicionado no ponto 3 em vez do ponto 2, pode-se dizer que o método apresentou uma razoável precisão neste cenário tendo em vista a pequena redução no momento de inércia.

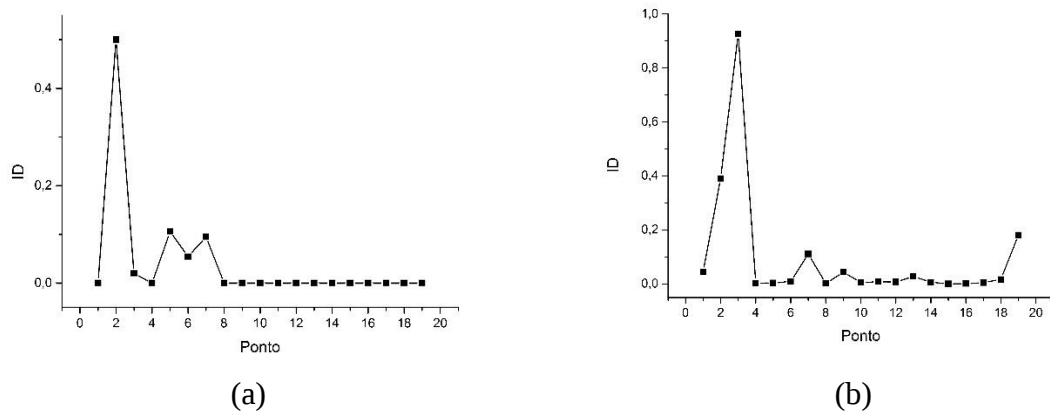


Figura 11. Gráficos de ID para o cenário de dano 1. (a) modelagem numérica; (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se nas Figuras 12(a) e 12(b) que os maiores picos de *ID* coincidem exatamente com os pontos onde os defeitos estão localizados. No entanto, o modelo experimental, Figura 12(b) exibe também um pico no ponto 13 que poderia ser interpretado como um defeito. Este pico pode ter sido causado por ruídos.

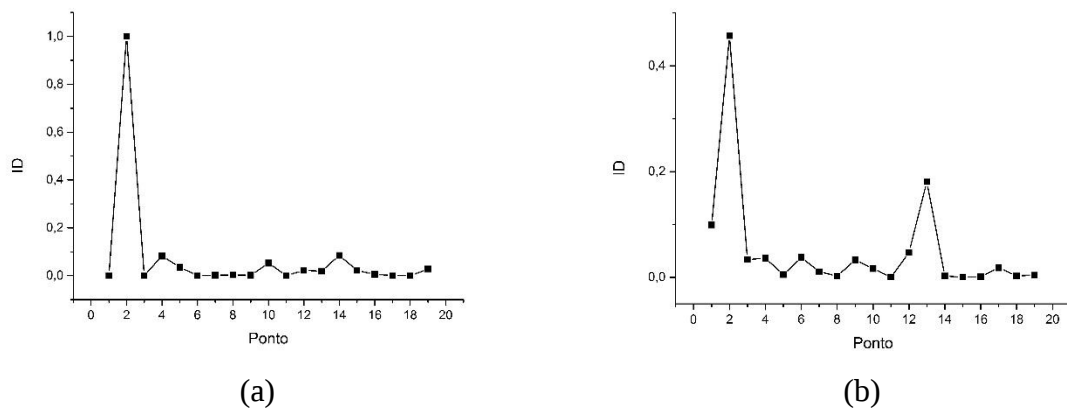


Figura 12. Gráficos de ID para o cenário de dano 2. (a) modelagem numérica; (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 13(a) pode-se observar a presença de picos de *ID* em vários pontos. Porém, no ponto 10, onde o defeito está de fato localizado, o valor de *ID* é igual a zero.

Observando a Figura 13(b) pode-se supor a existência de defeitos nos pontos 6,9 e 14 no modelo experimental. Assim, não se tem um resultado conclusivo também para este modelo.

Cabe observar que no modelo numérico as diferenças nas curvaturas modais do segundo modo foram iguais a zero tanto no cenário 3 quanto no cenário 4. Assim, estas diferenças foram ignoradas no cálculo de *ID* deste modelo. No modelo experimental as diferenças nas curvaturas do segundo modo foram consideradas para o cálculo de *ID* pois foram diferentes de zero.

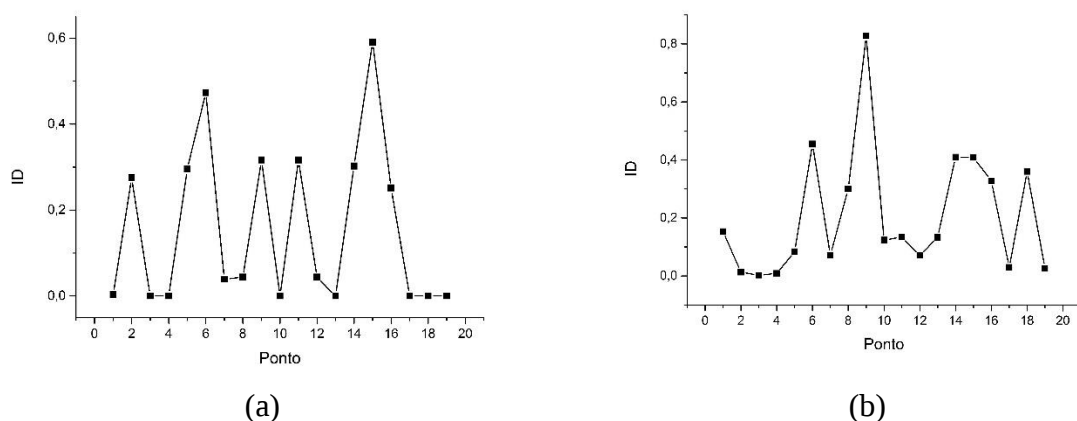


Figura 13. Gráficos de ID para o cenário de dano 3. (a) modelagem numérica; (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se na Figura 14(a) que o defeito foi corretamente posicionado no ponto 10 do modelo numérico. No entanto, no modelo experimental, a Figura 14(b), indica falsos positivos nos pontos 13 e 18.

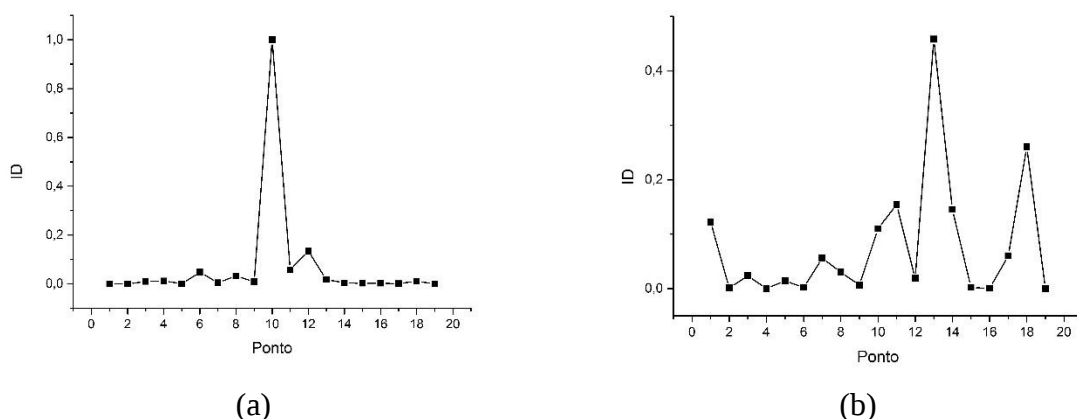


Figura 14. Gráficos de ID para o cenário de dano 4. (a) modelagem numérica; (b) análise experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

Nos cenários 3 e 4, é provável que a identificação dos defeitos tenha sido comprometida pelo fato destes estarem posicionados na metade do comprimento das vigas. Este ponto em particular coincide com pontos nodais dos modos pares de flexão de uma viga em suspensão livre-livre. Assim, nestes cenários apenas dois dos três modos medidos contribuíram para a localização dos defeitos. Este fato associado com a pequena redução no momento de inércia do cenário 3 e a amplificação dos ruídos inerente ao cálculo das curvaturas por diferenças finitas levou a resultados inconclusivos no cenário 3 tanto no modelo numérico quanto no experimental. No cenário 4, a redução no momento de inércia foi expressiva de forma que o efeito dos danos sobressaiu ao efeito dos ruídos e assim foi possível localizar o dano no modelo numérico mesmo com apenas dois modos contribuindo para tanto. Já no modelo experimental a localização ficou comprometida.

Salawu e Williams (1994) também reportaram baixo desempenho na localização de defeitos em vigas de aço e afirmam que um dos pontos-chave para a implementação do método das curvaturas modais é escolher quais modos devem ser utilizados para localizar o dano.

7 CONCLUSÕES

As diferenças nas frequências naturais não permitem a identificação de danos leves e servem apenas como indicadores da presença de danos severos.

A aplicação do método original proposto por Pandey et al. (1991) com três modos de flexão resultou em uma grande dificuldade em localizar com precisão o local danificado.

Aparentemente o *ID* é mais sensível e mais preciso para localizar defeitos do que as diferenças absolutas nas curvaturas modais. Observou-se que o cálculo de *ID* tende a destacar o efeito dos defeitos em relação aos ruídos de medição tornando o processo de identificação mais confiável.

Por fim, conclui-se que o método das curvaturas modais, associado ao cálculo do *ID*, tem potencial para identificar e localizar defeitos com diferentes intensidades e posições ao longo do comprimento das vigas. Entretanto, os resultados apontaram a necessidade de amostrar os sinais do experimento em uma banda de frequências mais larga de modo a identificar um número maior de modos e melhorar a sensibilidade do método.

REFERÊNCIAS

BRASILIANO, A.; DOZ, G. N.; BRITO, J. L. V. Avaliação de Danos em Estruturas por Intermédio das Características Dinâmicas. In: First South-American Congress on Computational Mechanics - III Brazilian Congress on Computational Mechanics - VII Argentine Congress on Computational Mechanics (MECOM 2002), Argentina. CD - Proceedings, 2002. p. 1893-1911, 2002.

CARREIRA, M. R. Avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal. 2012. 385 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CHAUURASIA, A.; PANIGRAHI, S. K.; PATEL, S.S. Damage Identification of Reinforced Concrete Beam Using Modal Curvature Approach. **Journal of Scientific & Industrial Research**. Vol. 77, p. 337-341, 2018.

DAWARI, V.; VESMAWALA, G. Structural Damage Identification Using Modal Curvature Differences. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**. Vol. 4, p. 33-38, 2013.

DEOKAR, A. V; WAKCHAURE, B. V. D. Experimental Investigation of Crack Detection in Cantilever Beam Using Natural Frequency as Basic Criterion. In: International Conference on Current Trends in Technology, 2011, Institute Of Technology, Nirma University. 6p.

ELSHAFEY, A. A.; MARZOUK, H.; HADDARA, M. R. Experimental Damage Identification Using Modified Mode Shape Difference. **Journal of Marine Science and Application**. Vol. 10, p. 150-155, 2011.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An Introduction to Structural Health Monitoring. **Philosophical Transactions of The Royal Society**. Vol. 365, p. 303-315, 2007.

GENOVESE SOARES, M. E. Localização e quantificação de danos em estruturas por meio de suas características dinâmicas. 2000. 120 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. Mechanics of Materials. Cengage Learning. 7th Ed. 2009.

HAMZE, A.; GUEGUEN, P.; ROUX, P.; BAILLET, L. Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to a Plexiglas Beam In: 15th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM). 2012, Porto, Portugal, Anais, p. 22-27.

HE, K.; ZHU, W. D. Structural Damage Detection Using Changes in Natural Frequencies: Theory and Applications. **Journal of Physics Conference Series** (Online). Vol. 305(1), p.1-10, 2011.

HO, Y. K.; EWINS, D. J. On structural Damage Identification with Mode Shapes, In: Conference on System Identification and Structural Monitoring, 2000, Madri, Espanha. Anais, p. 677 – 686.

ISMAIL, Z.; ONG, Z. C. Honeycomb damage detection in a reinforced concrete beam using frequency mode shape regression. **Measurement**. Vol. 45(5), p. 950-959, 2012.

KHIEM, N. T. Damage Detection of beam by natural frequencies: general theory and procedure. **Vietnam Journal of Mechanics**. Vol. 28(2), p. 120 – 132, 2006.

OWOLABI, G. M.; SWAMIDAS, A.S.J.; SESHADRI, R. Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 265, p. 1–22, 2003.

PANDEY, A. K.; BISWAS, M.; SAMMAN, M. M. Damage detection from changes in curvature mode shapes. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 145(2), p.321-332, 1991.

RAJU, G.; RAMESH, L. Crack Detection in Structural Beams by using Curvature Mode Shapes **.IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology**. Vol. 3(2), p 282-289, 2016

RYTTER, A. Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures.1993. 193p. Tese (Doutorado) - Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University. Aalborg.

SALAWU, O. S; WILLIAMS, C. Damage Location Using Vibration Mode Shapes. In: 12th International Modal Analysis Conference, 1994, Honolulu, Hawaii. P. 933-939.

SALGADO, R.; AYALA, G.; CRUZ, P. J. S.; ZAMORA S. A. Performance of Damage Detection Methods used in Bridge Structures through Dynamic Tests in Steel Beams. **American Journal of Civil Engineering**. Vol. 2(2), p. 18-26, 2014.

SASMAL, S.; RAMANJANEYULU, K. Detection and Quantification of Structural Damage of a Beam-Like Structure Using Natural Frequencies. **International Journal of Engineering**. Vol. 1, p. 167-176, 2009.

SINOUE, J. J. A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations. In: Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control, Nova Science Publishers, Inc. , 2009, p.643-702.

ZONTA, D. Structural damage detection and localization by using vibrational measurements. 2000. 158f. Tese (Doutorado em Mecânica das Estruturas) – Departamento de Engenharia, Universidade de Bolonha, Bolonha.