



Augusto César Miranda Feijão

**Avaliação de índices modais para identificação
de danos em passarelas metálicas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Prof.^a Elisa Dominguez Sotelino

Coorientador: Cássio Marques Rodrigues Gaspar

Rio de Janeiro
Abril de 2023



Augusto César Miranda Feijão

**Avaliação de índices modais para identificação
de danos em passarelas metálicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof^a. Dra. Elisa Dominguez Sotelino

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr. Cássio Marques Rodrigues Gaspar

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Dr. Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Dr. Diogo Rodrigo Ribeiro

Instituto de Engenharia do Porto - IPP

Rio de Janeiro, 28 de abril de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Augusto César Miranda Feijão

O autor é graduado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2019. Ingressou no programa de Mestrado Acadêmico na PUC-Rio em março de 2020, tendo interesse nas áreas de pesquisa relacionadas à integridade estrutural, detecção de danos e dinâmica das estruturas.

Ficha Catalográfica

Feijão, Augusto César Miranda

Avaliação de índices modais para identificação de danos em passarelas metálicas / Augusto César Miranda Feijão ; orientadora: Elisa Dominguez Sotelino ; coorientador: Cássio Marques Rodrigues Gaspar. – 2023.
86 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Detecção de danos. 3. Dinâmica de estruturas. 4. Curvatura modal. 5. Flexibilidade modal. 6. Energia de deformação modal. I. Sotelino, Elisa Dominguez. II. Gaspar, Cássio Marques Rodrigues. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por todo conhecimento que emana do seu poder criador, e dentro do que crê a fé católica na comunhão dos santos, agradeço a intercessão do grande Santo Tomás de Aquino, grande referência para os acadêmicos.

Agradeço imensamente aos meus orientadores Elisa D. Sotelino e Cássio Marques R. Gaspar pela paciência, disponibilidade e sugestões na minha pesquisa, sobretudo nos períodos mais desafiantes.

Um muito obrigado especial à PUC-Rio, particularmente aos colegas e professores da pós-graduação que foram essenciais para a construção do conhecimento obtido até aqui. Em particular, ao professor Raul Rosas, cujo incentivo foi importante para o meu ingresso na pós-graduação.

Um agradecimento aos professores Paulo Batista Gonçalves e Diogo Rodrigo Ribeiro, membros da banca examinadora, por terem aceitado contribuir com este trabalho.

Aos meus familiares, principalmente meus pais que, foram os principais incentivadores da minha formação acadêmica desde sempre.

Agradeço aos meus amigos, sobretudo os irmãos da Comunidade Católica Shalom, que foram grande suporte e incentivo diante dos desafios para que eu alcançasse mais esse objetivo.

Um agradecimento especial à psicóloga Maria Aparecida, outra grande incentivadora da minha formação acadêmica, e que foi um importante suporte diante das turbulências da pandemia.

Agradeço aos colegas do grupo de pesquisa, Caio Penna e Vitor Gonçalves, que elaboraram e cederam gentilmente os modelos e materiais de trabalho de suas pesquisas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Feijão, Augusto César Miranda; Sotelino, Elisa Dominguez (Orientadora); Gaspar, Cássio Marques Rodrigues (Coorientador). **Avaliação de índices modais para identificação de danos em passarelas metálicas**. Rio de Janeiro, 2023. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dentre as diversas metodologias de detecção de danos, destacam-se os métodos de identificação de danos baseados na resposta da vibração (*Vibration-based damage identification* - VBDI), uma vez que a deterioração presente em elementos estruturais influencia diretamente na resposta dinâmica global e local da estrutura ocasionando alterações nos parâmetros dinâmicos. As diferentes abordagens encontradas na revisão de literatura para detecção dinâmica de danos focam principalmente em estruturas unidimensionais ou retas, que, por sua vez, podem não representar o comportamento dinâmico real de estruturas arrojadas como pontes e passarelas com geometria diferenciada. Alguns índices modais, nomeadamente curvatura modal, flexibilidade modal e energia de deformação modal, foram avaliados para uma passarela de aço com geometria curva. Para isso utilizou-se um modelo de elementos finitos da mesma, de onde foram extraídos os modos de vibração tridimensionais. Além disso, um índice recentemente proposto, denominado vetor resultante, que incorpora coordenadas modais tridimensionais, também é avaliado e comparado aos índices mencionados anteriormente. Os resultados mostram que a precisão dos índices na localização de danos está correlacionada com a região da estrutura onde o dano se encontra. Conclui-se então que para detecção de dano em uma estrutura real, é necessário que se utilize mais de um índice de dano. O impacto da magnitude do dano na acurácia dos índices é também estudado. A influência do dano nas vigas adjacentes e como isso se reflete nos índices também é investigada, a fim de evitar ambiguidade na localização de danos, e para direcionar corretamente programas de inspeção e monitoramento da integridade estrutural.

Palavras-chave

Detecção de danos; dinâmica de estruturas; curvatura modal; flexibilidade modal; energia de deformação modal; passarela

Abstract

Feijão, Augusto César Miranda; Sotelino, Elisa Dominguez (Advisor); Gaspar, Cassio Marques Rodrigues (Co-advisor). **Evaluation of modal indices for damage identification on steel footbridges**. Rio de Janeiro, 2022. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Among the various damage detection methodologies, the Vibration-based damage identification (VBDI) methods stand out, since the deterioration present in structural elements directly influences the global and local dynamic response of the structure, causing changes in the dynamic parameters. The different approaches found in the literature review for dynamic damage detection focus mainly on one-dimensional or straight structures, which in turn may not represent the actual dynamic behavior of bold structures such as bridges and footbridges with different geometry. Some modal indices, namely modal curvature, modal flexibility, and modal strain energy were evaluated for a steel footbridge with curved geometry. For this purpose, a finite element model of it was used, from which the three-dimensional mode shapes were extracted. In addition, a recently proposed index, called resultant vector, which incorporates three-dimensional modal coordinates, is also evaluated and compared to the aforementioned ones. The results show that the accuracy of the indices for damage localization is correlated with the region of the structure where the damage is located. It is then concluded that for damage detection in a real structure, it is necessary to use more than one damage index. The impact of the damage magnitude on the accuracy of the indices is also studied. The influence of damage in adjacent beams and how this is reflected in the indices is also investigated in order to avoid ambiguity in damage location, and to correctly direct inspections and structural integrity monitoring programs.

Keywords

Damage detection; structural dynamics; mode shape curvature; modal flexibility; modal strain energy; footbridge

Sumário

1	<i>Introdução</i>	16
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivo	17
1.3	Metodologia	17
1.4	Estrutura do trabalho	18
2	<i>Fundamentação teórica</i>	20
2.1	Frequências naturais e modos de vibração	20
2.2	Curvatura modal	22
2.3	Flexibilidade modal	23
2.4	Energia de Deformação Modal	24
2.5	Vetor Resultante	26
3	<i>Revisão Sistemática de Literatura (RSL)</i>	28
3.1	Planejamento da RSL	29
3.2	Execução da RSL	29
3.2.1	Localização dos estudos	29
3.2.2	Seleção dos estudos	32
3.3	Extração	33
3.4	Revisão dos trabalhos	33
3.5	Considerações finais sobre a revisão de literatura	42
4	<i>Método da pesquisa</i>	43
4.1	Apresentação da estrutura	43
4.1.1	Passarela	43
4.1.2	Modelagem numérica	44
4.1.3	Frequências Naturais e Modos de Vibração	47

4.2	Avaliação dos Índices de Dano	48
4.2.1	Localização dos danos.....	48
4.2.2	Intensidade dos danos	50
4.2.3	Seleção dos Modos de Vibração.....	51
4.2.4	Extração e aplicação	52
5	Análise dos Resultados.....	53
5.1	Posição do dano na estrutura.....	53
5.1.1	Trechos flexíveis	53
5.1.2	Trechos rígidos.....	63
5.2	Intensidade de danos	67
6	Conclusões e investigações futuras	72
6.1	Conclusões.....	72
6.2	Sugestões para futuros trabalhos.....	74
7	Referências bibliográficas	75
	Apêndice.....	79
	Apêndice A – Resultados da Curvatura Modal separada por modos para os casos 2 e 3	79
	Apêndice B – Código do MATLAB.....	80

Lista de figuras

Figura 2.1 – Níveis de identificação de danos segundo Rytter (1993).	21
Figura 2.2 – Representação gráfica do Vetor Resultante (Gonçalves, 2021).	27
Figura 3.1 – Nuvem de palavras chaves	30
Figura 3.2 – Número de trabalhos sobre os temas entre 1996 e 2021 (siglas: EDM – Energia de Deformação Modal, CM – Curvatura Modal, e FM – Flexibilidade Modal)	34
Figura 3.3 – (a) Modelo em elementos finitos da ponte I-40 e (b) seção transversal da ponte (Nick et al., 2021)).....	36
Figura 3.4 – Passarela do estudo de Panesso et al. (2019): (a) estrutura real, (b) modelo tridimensional indicando região onde os danos foram estudados.....	37
Figura 3.5 – Simulação do dano (a) no modelo experimental e (b) no modelo numérico (Jayasundara et al., 2019)	41
Figura 4.1 – Estrutura da passarela setorizada (Gonçalves, 2021)	44
Figura 4.2 – Seção transversal do modelo computacional da passarela (Adaptado de Gonçalves, 2021)	44
Figura 4.3 – Modelo numérico e identificação dos vãos (Gonçalves, 2021)	45
Figura 4.4 - Componentes da estrutura do modelo renderizado (Gonçalves, 2021)	45
Figura 4.5 – Condições de contorno do modelo (adaptado de Gonçalves, 2021)	46
Figura 4.6 – Identificação das longarinas.....	46
Figura 4.7 – Oito primeiros modos de vibração da passarela e suas respectivas frequências naturais (Gonçalves, 2021)	48
Figura 4.8 – Posição do dano simulado na estrutura	49
Figura 4.9 – Elementos simulados como danificados no (a) caso 1, (b) caso 2 e, (c) caso 3, indicados pelo “X”.	49
Figura 4.10 – Fluxo de trabalho	52

Figura 5.1 – Resultados do Caso 1 para o VR: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	54
Figura 5.2 – Resultados do Caso 1 para FM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	55
Figura 5.3 – Resultados do Caso 1 para CM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	56
Figura 5.4 - Resultados da CM na L1 separado pelos modos selecionados: (a) modo 2, (b) modo 3, (c) modo 4, e (d) modo 6.	57
Figura 5.5 – Resultados do Caso 1 para EDM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	57
Figura 5.6 – Resultados do parâmetro Z_j (EDM) para os elementos da Tabela 5.2.	59
Figura 5.7 – Resultados do Caso 2 para o VR: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3	60
Figura 5.8 – Resultados do Caso 2 para FM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	61
Figura 5.9 – Resultados do Caso 2 para CM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	62
Figura 5.10 – Resultados do Caso 2 para a EDM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3	62
Figura 5.11 – Resultados do Caso 3 para o VR: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	64
Figura 5.12 – Resultados do Caso 3 para a FM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3	64
Figura 5.13 – Resultados do Caso 3 para CM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.	65
Figura 5.14 – Resultados do Caso 3 para EDM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3	66
Figura 5.15 – Comparação do VR no Caso 1 para intensidades de danos de: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal.	67
Figura 5.16 – Comparação da FM no Caso 1 para intensidades de danos de: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal	68
Figura 5.17 – Comparando a CM no Caso de dano 1 para intensidades de danos de: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal.	69

Figura 5.18 – Comparando a EDM no Caso de dano 1 para intensidades de danos de: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal.

.....70

Figura 19 - Curvatura Modal no caso 2 para: (a) modo 2, (b) modo 3, (c) modo 4, e (d) modo 6.79

Figura 20 - Curvatura Modal no caso 3 para: (a) modo 2, (b) modo 3, (c) modo 4, e (d) modo 6.80

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Composição das <i>strings</i> e resultados das buscas nas bases de dados	31
Tabela 3.2 – Critérios de inclusão e exclusão da RSL.....	32
Tabela 3.3 – Resumo das categorias e metodologias de detecção de dano (adaptado de Shih et al., 2009)	33
Tabela 4.1 – Característica dos modos de vibração e frequências naturais do modelo da passarela (Gonçalves, 2021)	47
Tabela 4.2 – Intensidades de dano simulados.....	51
Tabela 5.1 – Variação das frequências naturais para o Caso 1	54
Tabela 5.2 – Resultados para Energia de Deformação Modal para o Caso 1.	58
Tabela 5.3 – Variação das frequências naturais para o Caso 2.....	59
Tabela 5.4 – Variação das frequências naturais para o Caso 3.....	63
Tabela 5.5 – Resumo dos resultados dos índices aplicados aos casos 1, 2 e 3.	66
Tabela 5.6 – Variação das frequências naturais para o Caso 1 com 75% de redução da seção transversal	70
Tabela 5.7 – Resumo da avaliação da intensidade dos danos nos índices modais.....	71

Lista de abreviaturas

<i>CDF</i>	<i>Curvature Damage Factor</i>
<i>MSE</i>	<i>Modal Strain Energy</i>
<i>NUM</i>	Numerador do parâmetro β da Energia de Deformação Modal
<i>DEN</i>	Denominador do parâmetro β da Energia de Deformação Modal
<i>RSL</i>	Revisão Sistemática da Literatura
<i>L1</i>	Longarina 1
<i>L2</i>	Longarina 2
<i>L3</i>	Longarina 3

Lista de símbolos

<i>M</i>	Matriz de massa
<i>K</i>	Matriz de rigidez
ω	Frequência natural angular
λ	Autovalor
φ	Modos de vibração
φ''	Curvatura modal
h	Distância entre dois nós de elementos finitos
F	Matriz de Flexibilidade modal
Ω	Matriz diagonal de autovalores
U_i	Energia de Deformação Modal para uma viga

C_{ij}	Energia de Deformação Modal para um elemento de viga “j”
k	Rigidez de um elemento de viga
F_{ij}	Fração da energia de deformação modal
β	Energia de deformação modal
Z	Energia de deformação modal normalizada
f	Frequência natural
μ	Média
σ	Desvio padrão
VR'	Vetor resultante
Δ	Variação
VR	Índice de dano do vetor resultante
FM	Flexibilidade Modal
CM	Curvatura Modal
EDM	Energia de Deformação Modal

*“Mas junto a vós, Senhor, está a sabedoria,
que conhece as vossas obras desde sempre;
convosco estava ao criardes o universo,
ela sabe o que agrada a vossos olhos,
o que é reto e conforme às vossas ordens.*

*Enviai-a lá de cima, do alto céu,
mandai-a vir de vosso trono glorioso,
para que esteja junto a mim no meu trabalho
e me ensine o que agrada a vossos olhos!”*

Oração do Rei Salomão (Sb 9, 9-10)

1

Introdução

1.1

Motivação

O monitoramento da saúde estrutural (em inglês, *structural health monitoring* - SHM) constitui um extenso e importante campo de pesquisa na engenharia com aplicações variadas. Estruturas como pontes e passarelas estão expostas a diversos tipos de ações deteriorantes que podem causar impacto na sua utilização bem como em sua integridade estrutural, como exposição a fatores ambientais diversos e falta de manutenção contínua. Cargas não previstas em projeto e patologias decorrentes de processos executivos inadequados também contribuem para com a degradação dos elementos estruturais. Nos EUA, de acordo com o levantamento da Sociedade Americana de Engenheiros Civis (*American Society of Civil Engineers* - ASCE), cerca de 7,5% das pontes americanas estão com a estrutura em condições precárias (ASCE, 2021). Desta forma, em qualquer parte do mundo, o desenvolvimento de indicadores para sistemas de monitoramento das estruturas favorece a detecção de danos em seu estágio inicial de desenvolvimento, prevenindo de potenciais acidentes. Particularmente, os métodos não-destrutivos têm recebido crescente importância uma vez que as estruturas civis, sobretudo obras de arte especiais, podem ser monitoradas e inspecionadas em serviço.

Entre as diferentes metodologias para detecção de danos, destacam-se os métodos de identificação de dano baseados no comportamento dinâmico da estrutura uma vez que a deterioração em elementos estruturais altera propriedades físicas da estrutura, que se reflete diretamente na sua resposta dinâmica global. A ideia fundamental desses métodos é que as alterações induzidas por danos nas propriedades geométricas e dos materiais (modificação da rigidez e massa) causam

mudanças detectáveis nas propriedades modais (frequências naturais, amortecimento modal e modos de vibração) da estrutura (Fan & Qiao, 2011). Por esta razão, vários índices modais de danos têm sido estudados na literatura com relação aos diferentes níveis de diagnóstico de danos indicados por Rytter (1993) que classifica as metodologias em quatro níveis: detecção dos danos, localização de danos, quantificação da severidade dos danos e estimativa da vida útil remanescente da estrutura.

Dentro do contexto histórico de falta de manutenção preventiva no Brasil, o assunto da identificação de danos evidencia a relevância das pesquisas neste campo para aplicações práticas em estruturas de diversos níveis de complexidade para os vários níveis de identificação de dano já mencionados.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar numericamente a eficiência de índices modais encontrados na literatura na detecção e localização de danos - níveis 1 e 2 da escala proposta por Rytter (1993) - para passarelas. A partir do modelo de elementos finitos de uma passarela real com geometria arrojada e comportamento bastante flexível, são observadas quais condições afetam a acurácia dos índices na localização dos danos no que diz respeito ao trecho e longarina da estrutura em que o dano se encontra bem como o grau de severidade do dano. O intuito desta avaliação numérica é compreender quais índices podem produzir resultados mais confiáveis para aplicações reais em sistemas de monitoramento baseados na resposta dinâmica da estrutura.

1.3 Metodologia

A metodologia proposta é desenvolvida a partir de uma revisão sistemática de literatura, que se propõe examinar índices modais já

indicados por Gonçalves (2021) para detecção de dano em estruturas de grande porte. Inicialmente são apresentadas as formulações de índices já bem estabelecidos na literatura como flexibilidade modal, curvatura modal e energia de deformação modal. O índice Vetor Resultante, recentemente proposto por Gonçalves (2021), também é examinado uma vez que se propõe a incorporar o comportamento dinâmico tridimensional das estruturas. A lacuna identificada na revisão de literatura refere-se à eficiência destes indicadores em relação à diversas condições nas quais o dano pode estar localizado e como elas afetam a eficiência do índice para detectar danos, particularmente em estruturas reais como passarelas com geometria curva e modos de vibração que alternam entre modos compostos de flexão vertical ou lateral e modos torcionais. São observados como a presença de danos em trechos rígidos e flexíveis da estrutura, e como o grau de severidade do dano influenciam na capacidade dos índices de indicar ou não a presença e localização do dano. Além disso, diversos estudos encontrados focam somente na longarina em que o dano é numericamente introduzido no modelo. Neste sentido, é apresentado o comportamento dos índices para as longarinas adjacentes não danificadas. O intuito é verificar a capacidade destes de localizar espacialmente o dano em relação aos diversos elementos estruturais da passarela, uma vez que a posição do dano não é previamente conhecida em situações reais de monitoramento. A análise dos resultados encontrados assinala para quais condições os índices supracitados são indicados ou não para uma correta localização dos danos na estrutura.

1.4

Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, indicando a motivação da presente pesquisa, seus objetivos e a metodologia proposta.

Em seguida, no Capítulo 2, são introduzidos os conceitos e as formulações referentes aos índices que são analisados neste trabalho como o embasamento teórico para as etapas subsequentes.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da Revisão Sistemática de Literatura sobre o tema. Esta revisão tem por objetivo conhecer as pesquisas desenvolvidas sobre os índices para estruturas de passarelas ou similares, em busca de lacunas em que o tema pode ser desenvolvido.

A metodologia aplicada para avaliação dos índices de danos se encontra no Capítulo 4, no qual é apresentado o modelo numérico de uma passarela curva existente na cidade do Rio de Janeiro – RJ. As diversas condições de contorno, geometria e simulação de danos também estão descritas neste capítulo.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e análises comparando os índices para danos simulados em trechos flexíveis e trechos rígidos da estrutura. Estes resultados também avaliam o comportamento dos indicadores fora da longarina danificada a fim de verificar se a metodologia dos índices é capaz de apontar corretamente a posição do dano na estrutura. Além disso, a capacidade do índice de identificar a presença do dano com diversas intensidades é também examinada neste capítulo.

Por último, o Capítulo 6 traz as principais conclusões sobre a pesquisa realizada, indicando sugestões de investigações futuras sobre o tema.

2 Fundamentação teórica

Neste capítulo são descritos os conceitos essenciais para a compreensão dos índices de dano abordados neste trabalho, apresentando embasamento teórico de cada um deles. A partir do conceito da análise modal, são descritos alguns dos índices conhecidos da literatura, baseados nas frequências naturais e modos de vibração e as suas derivações: curvatura modal, flexibilidade modal e energia de deformação modal. Em seguida, o índice Vetor Resultante, recentemente proposto por Gonçalves (2021), é revisado para a aplicação neste trabalho. Por fim, os índices são comparados em relação suas principais vantagens e desvantagens.

2.1 Frequências naturais e modos de vibração

A análise modal é o processo de determinação das características dinâmicas inerentes de um sistema mecânico do tipo massa-mola-amortecedor em termos de frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento (He & Fu, 2001). Para a vibração livre não-amortecida, temos que a equação do movimento é representada por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{0} \quad (1)$$

Onde \mathbf{M} é a matriz de massa do sistema, $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ é o vetor de acelerações, \mathbf{K} é a matriz de rigidez e, $\mathbf{X}(t)$, o vetor de deslocamentos. A Equação 1 possui como solução geral a Equação 2 do tipo harmônica:

$$\mathbf{X}(t) = \boldsymbol{\varphi} e^{-i\omega t} \quad (2)$$

Substituindo a Equação 2 na Equação 1, obtemos a Equação 3 que constitui um problema de autovalor generalizado.

$$[\mathbf{K} - \lambda\mathbf{M}] \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{0} \quad (3)$$

A solução não-trivial da equação, na qual o determinante do termo $[\mathbf{K} - \lambda\mathbf{M}]$ é igual a zero, é conhecida como equação característica do sistema, para a qual existem n autovalores λ que a satisfazem e n autovetores $\boldsymbol{\varphi}$

associados. Em termos práticos, os autovalores que satisfazem a equação estão relacionados a frequência natural da vibração, uma vez que $\lambda = \omega^2$ e ω representa as frequências naturais de vibração e os autovetores aos modos de vibração associados a cada frequência natural.

No processo de detecção de danos, de acordo com Fan & Qiao (2011), os métodos de identificação de danos baseados na variação das frequências naturais são interessantes, pois as frequências naturais podem ser facilmente obtidas a partir de poucos pontos acessíveis da estrutura e, são normalmente menos contaminados por ruídos em sua aquisição experimental. Em contrapartida, uma das limitações existentes está relacionada à modelagem da estrutura e do dano, uma vez que a maioria dos métodos baseados na variação das frequências são dependentes de modelos numéricos (*model-based*). Outra limitação importante é que, alterações nas frequências causadas por danos podem ser mascaradas por variações causadas por efeitos ambientais ou condições operacionais, como variação de temperatura e a utilização da estrutura. Ademais, por ser uma característica global da estrutura, a frequência natural não é capaz de localizar a posição do dano na estrutura (nível 2 na classificação de Rytter, 1993, Figura 2.1), atestando somente a presença de algum dano na estrutura (nível 1 na classificação de Rytter, 1993). A sensibilidade da frequência natural é discutida no capítulo de análise de resultados.

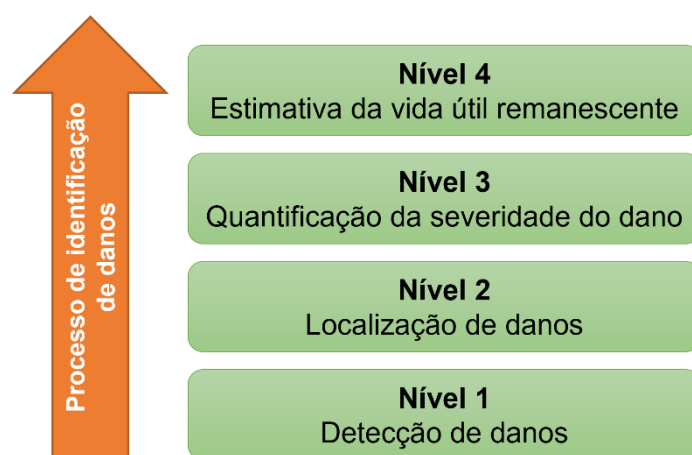


Figura 2.1 – Níveis de identificação de danos segundo Rytter (1993).

Em contrapartida, a utilização de métodos baseados nos modos de vibração para detecção de danos é mais eficiente, pois os modos de vibração contêm informações locais, fato que o torna mais sensível aos danos localizados (Fan & Qiao, 2011). Além disso, os modos são menos sensíveis aos efeitos ambientais, como variações de temperatura, em comparação com as frequências. No entanto, uma série de sensores é necessária para medição mais correta. Como este trabalho tem por objetivo avaliar os índices derivados desses parâmetros modais, não será abordada a eficiência da variação dos modos de vibração puramente aplicados no processo de identificação modal de danos.

2.2

Curvatura modal

Pandey et al. (1991) propôs um novo parâmetro baseado na curvatura dos modos de vibração como índice de dano em estruturas. A curvatura do modo de vibração está relacionada com a rigidez a flexão de uma viga (Equação 4). A premissa deste método é que a ocorrência de danos em um elemento estrutural ocasiona uma redução local da rigidez do mesmo, que por sua vez se refletirá na curvatura da estrutura. Dessa forma, a variação local da curvatura modal entre casos danificado e intacto é utilizada como indicador para localizar o dano.

$$\varphi'' = \frac{M}{EI} \quad (4)$$

O cálculo da curvatura modal é comumente realizado utilizando a aproximação por diferenças finitas centrais, descrita pela Equação 5. Para o nó i do modelo de elementos finitos, a curvatura é calculada utilizando o valor da coordenada modal do nó i e dos nós vizinhos $i - 1$ e $i + 1$, espaçados a uma distância igual de h .

$$\varphi_i'' = \frac{\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}}{h^2} \quad (5)$$

Além desta última, outras técnicas de derivação são utilizadas na literatura para estimar a curvatura tais como interpolação polinomial *spline* cúbica, *splines* cúbicas suavizadas, entre outras (Quaranta et al., 2016). A

maior variação absoluta entre a curvatura no caso danificado (com sobrescrito *) e caso intacto (sem sobrescrito) apontam a posição do dano na estrutura (Equação 6). O índice é também referido frequentemente na literatura como Fator de Dano da Curvatura (*Curvature Damage Factor - CDF*), e computa a contribuição dos n modos de vibração analisados (Equação 7).

$$\Delta\varphi'' = |\varphi''^* - \varphi''| \quad (6)$$

$$CDF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varphi''^* - \varphi''| \quad (7)$$

Quanto mais refinada for a malha de elementos finitos (ou seja quanto menor for a distância h), melhor será a aproximação do cálculo da curvatura, e conseqüentemente, melhor será a acurácia do método na detecção de danos (Abdel Wahab & De Roeck, 1999). Nesse sentido, o refinamento reduz os picos na diferença absoluta das curvaturas em posições diferentes dos danos simulados que poderiam induzir a falsos positivos na detecção de danos. Diversos autores apresentam variações deste índice em vista de minimizar picos intermediários fora da posição dos danos. Rucevskis e Wesolowski (2010) propuseram um índice que calcula a diferença dos quadrados das curvaturas danificada e intacta para identificação de danos em vigas.

2.3 Flexibilidade modal

Como a presença de danos em estruturas ocasiona redução na rigidez dos elementos estruturais, a flexibilidade sendo o inverso da rigidez, foi estudada como um possível método de identificar danos. Nesse sentido, Pandey & Biswas (1994) propuseram como índice de dano a avaliação da matriz de flexibilidade (F), descrita pela Equação 8, antes e após o dano na estrutura.

$$F = \Phi \Omega^{-1} \Phi^T = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\omega_j^2} \varphi_j \varphi_j^T \quad (8)$$

Onde a matriz $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(\omega_j^2)$ e $\boldsymbol{\varphi}_j$ é o vetor das coordenadas modais normalizadas por massa para o modo j . No caso da matriz de flexibilidade, a rápida convergência é uma vantagem da metodologia, pois o inverso da frequência natural na formulação diminui a contribuição modal na matriz de flexibilidade à medida em que o número de modos – consequentemente, o valor das frequências - aumentam. Com isso, é possível obter uma boa estimativa da flexibilidade modal da estrutura utilizando poucos modos de vibração de frequências mais baixas. No entanto, o índice tende a apresentar maiores valores absolutos em trechos da estrutura de maior momento fletor. O grau de liberdade que apresentar o valor máximo da variação mostrada pela Equação 9 indica a localização do dano na estrutura.

$$\Delta \mathbf{F} = | \mathbf{F}^* - \mathbf{F} | \quad (9)$$

2.4

Energia de Deformação Modal

Proposto inicialmente por Stubbs et al. (1995), o presente método usa como parâmetro sensível à presença de danos a alteração da energia de deformação modal (em inglês, *MSE – Modal Strain Energy*) numa sub-região da estrutura.

Para uma viga de comprimento L , considerando a teoria de Euler-Bernoulli, a energia de deformação do modo i (U_i) pode ser descrita pela Equação 10.

$$U_i = \frac{1}{2} \int_0^L k [\varphi_i''(x)^2] dx \quad (10)$$

Onde k é a rigidez da viga, φ_i'' a curvatura modal. A Equação 11 descreve a energia de deformação (C_{ij}) para um determinado elemento do modelo ou sub-região j da estrutura.

$$C_{ij} = \frac{1}{2} \int_j k_j [\varphi_i''(x)^2] dx \quad (11)$$

Portanto, a fração de energia de deformação modal concentrada no elemento j é representada pela Equação 12.

$$F_{ij} = \frac{C_{ij}}{U_i} \quad (12)$$

Considerando que a rigidez à flexão é praticamente constante ao longo de todo comprimento do membro ($k^* = k$), temos a razão entre as rigidezes k_j e k_j^* :

$$\beta_j = \frac{k_j^*}{k_j} = \frac{\int_j [\varphi_i^{*''}(x)^2] dx / \int_0^L [\varphi_i^{*''}(x)^2] dx}{\int_j [\varphi_i''(x)^2] dx / \int_0^L [\varphi_i''(x)^2] dx} = \frac{F_{ij}^*}{F_{ij}} \quad (13)$$

Na qual o numerador F_{ij}^* representa a fração da energia de deformação modal no elemento danificado e, o denominador F_{ij} , a fração da energia de deformação modal no elemento intacto. No entanto, quando o membro é subdividido em grande número de elementos, a fração de energia de deformação concentrada em cada elemento é muito pequena. Desta forma, a fim de evitar possíveis problemas de singularidade na divisão descrita pela Equação 13, Stubbs & Garcia (1996) propuseram o deslocamento do eixo de referência expresso pela Equação 14 para obter o parâmetro β_j que representa a razão entre as frações de energia de deformação modal entre os casos danificado (NUM) e intacto (DEN) com eixo deslocado em uma unidade.

$$\beta_j = \frac{F_{ij}^* + 1}{F_{ij} + 1} = \frac{NUM}{DEN} \quad (14)$$

Rearranjando os termos e levando em considerando os n modos analisados, obtém-se

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\int_j [\varphi_i^{*''}(x)^2] dx + \int_0^L [\varphi_i^{*''}(x)^2] dx \right) \int_0^L [\varphi_i''(x)^2] dx}{\sum_{i=1}^n \left(\int_j [\varphi_i''(x)^2] dx + \int_0^L [\varphi_i''(x)^2] dx \right) \int_0^L [\varphi_i^{*''}(x)^2] dx} \quad (15)$$

Aplicando a normalização, o índice de dano final é definido pela Equação 16.

$$Z_j = (\beta_j - \bar{\beta}) / \sigma_{\beta} \quad (16)$$

Onde $\bar{\beta}$ é a média do parâmetro β_j em cada elemento da viga e σ_{β} é o desvio padrão do parâmetro β_j . As variações no parâmetro β_j são muito pequenas e difíceis de distinguir para avaliar a ocorrência de um dano.

Neste sentido, a normalização destaca melhor a posição real do dano, em relação a outros pontos da estrutura com menor variação da energia de deformação modal. Estes aspectos serão discutidos com mais detalhes na seção de resultados.

Este trabalho se baseia nesta metodologia simplificada da energia de deformação calculada a partir da curvatura modal proposta por Stubbs et al. (1995). Outras formulações e metodologias avaliando variações na energia de deformação para detecção de danos podem ser encontradas em Wang & Xu (2019).

2.5 Vetor Resultante

O índice relacionado à magnitude do Vetor Resultante foi proposto por Gonçalves (2021) no intuito de considerar a variação no comportamento tridimensional dos modos de vibração no processo de detecção de danos. O Vetor Resultante é um índice único que incorpora a variação do comportamento entre a estrutura com dano e a estrutura intacta, para os três eixos (vertical, transversal e longitudinal – Z, Y, X), construindo um vetor resultante que incorpora as variações tridimensionais entre os modos. As Equações 17 e 18, e a Figura 2.2 apresentam o cálculo da variação do VR e a forma gráfica do vetor, respectivamente.

$$VR'_{ij} = \sqrt{\varphi_{x,ij}^2 + \varphi_{y,ij}^2 + \varphi_{z,ij}^2} \quad (17)$$

$$\Delta VR'_{ij} = |VR'^*_{ij} - VR'_{ij}| \quad (18)$$

Onde VR'_{ij} representa o valor do Vetor Resultante referente ao modo de vibração j no nó i do modelo de elementos finitos da estrutura, $\varphi_{x,i}$ representa o modo de vibração, normalizado por massa, considerando a coordenada modal x e, de maneira semelhante, para os modos de vibração considerando as coordenadas y e z . $\Delta VR'_{ij}$ indica a variação de VR'_{ij} entre a estrutura danificada (sobrescrito “*”) e intacta.

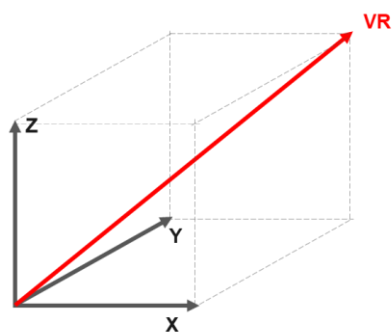


Figura 2.2 – Representação gráfica do Vetor Resultante (Gonçalves, 2021).

Com este índice, a análise isolada de cada componente modal não se faz necessária, nem o conhecimento prévio do comportamento dinâmico da estrutura, já que os modos de flexão, vertical e lateral, e de torção são contemplados em um único indicador. O índice final é obtido pelo somatório da variação do Vetor Resultante para todos os n modos considerados, conforme a Equação 19.

$$VR_i = \sum_{j=1}^n \Delta VR'_{i,j} \quad (19)$$

Os índices mencionados anteriormente também podem ser comparados para dois instantes de tempo que considerem diferentes níveis de comprometimento dos elementos estruturais analisados. Desta forma, o caso considerado como intacto não necessariamente refletiria um caso da estrutura sem danos, mas sim o seu estado inicial de estudo, uma vez que para situações reais dificilmente se obtém resultados para a estrutura totalmente intacta.

3

Revisão Sistemática de Literatura (RSL)

Este capítulo discorre sobre os índices modais existentes para identificação de danos a partir de uma revisão sistemática de literatura (RSL) em busca de lacunas de conhecimento existentes. A RSL desenvolvida por Gonçalves (2021) trouxe um panorama geral acerca dos índices dinâmicos utilizados para detecção de danos. A presente revisão propõe-se a aprofundar o conhecimento sobre estes índices com o enfoque na utilização e comparação dos diversos índices para identificação modal de dano.

A revisão de literatura constitui uma etapa importante da pesquisa visto que permite mapear os trabalhos já desenvolvidos sobre um determinado tema. A sua realização visa obter informações sobre a situação atual do problema de pesquisa, conhecer as publicações existentes sobre o tema e verificar os argumentos similares ou divergentes sobre o assunto, em busca de lacunas existentes (Da Silva & Menezes, 2005).

A revisão de literatura realizada neste trabalho foi conduzida utilizando o fluxo de trabalho proposto pelo programa StArt da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para RSL que divide o processo em três etapas:

- **Planejamento:** identificação dos objetivos e definição do protocolo da revisão;
- **Execução:** identificação dos estudos, seleção e avaliação dos estudos, de acordo com critérios de inclusão e exclusão, a partir da leitura do título e resumo dos artigos;
- **Síntese:** extração e resumo das informações relevantes obtidas dos estudos.

Embora as etapas estejam listadas de forma sequencial, é importante ressaltar que o processo de revisão sistemática é iterativo: a medida em que as etapas ocorrem, o protocolo de pesquisa pode ser refinado e readequado para atender os objetivos da pesquisa.

3.1

Planejamento da RSL

A respeito do monitoramento de integridade estrutural, diversos índices de danos modais têm sido estudados pela literatura. Porém, a utilização predominante em estruturas simples abre margem para a discussão da eficiência destes índices para estruturas mais realísticas considerando sua tridimensionalidade, num momento em que cada vez estas são estudadas e desenvolvidas. Portanto, as perguntas consideradas ao longo da pesquisa são as seguintes:

- (1) Dentre os índices já mencionados, quais índices modais são os mais indicados para identificação modal de danos em estruturas como passarelas metálicas e dentre estes quais são os mais eficientes?
- (2) Como os índices modais podem ser aplicados a estruturas mais arrojadas, não-retilíneas e com modos de vibração tridimensionais para a correta identificação de danos em seus elementos?

Estas perguntas nortearam todo o processo de RSL e de pesquisa.

3.2

Execução da RSL

A etapa de execução pode ser caracterizada por três importantes estágios: localização dos estudos, seleção e extração.

3.2.1

Localização dos estudos

Após a identificação do problema que se deseja abordar na pesquisa, a etapa seguinte da RSL é caracterizada pela composição de sentenças de

busca (*strings*) para as bases de dados a fim de encontrar os artigos relacionados ao tema a ser estudado.

As sentenças de busca seguiram um padrão de construção a partir das palavras-chave iniciais que foram atualizadas a medida em que outros termos se mostraram relevantes para a composição das *strings* de busca. Por exemplo, a *string* "damage detection" AND "footbridge" OR "pedestrian bridge" retornou 108 documentos em uma das bases de dados pesquisada, com muitos trabalhos fora do objetivo desta pesquisa de analisar índices modais.

A figura abaixo mostra uma nuvem de palavras-chave geradas pelo software VOSViewer a partir dos resultados obtidos pela *string* "damage detection" AND "footbridge" OR "pedestrian bridge". As ligações entre essas palavras-chave mostram a relevância da detecção de danos a partir da resposta dinâmica da estrutura, correlacionando também a outras palavras relevantes como “damage identification”, “bridges”, entre outras.

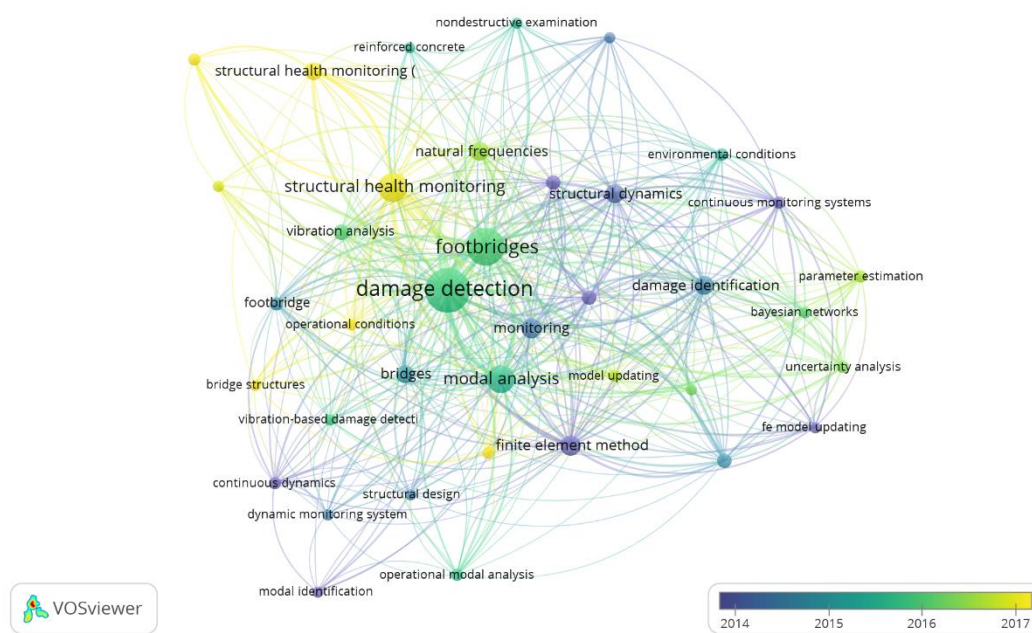


Figura 3.1 – Nuvem de palavras chaves

A respeito das bases de dados, duas bases foram utilizadas para realizar o levantamento bibliográfico dos assuntos abordados: Scopus e Web Of Science. As bases Science Direct e Google Scholar também foram consultadas na busca pelos trabalhos.

Os resultados desta etapa se encontram na Tabela 3.1 que mostra a utilização dos operadores booleanos nas bases de dados. Foram encontrados 429 trabalhos a serem analisados na etapa seguinte.

Tabela 3.1 - Composição das *strings* e resultados das buscas nas bases de dados

SENTENÇAS DE BUSCA					NÚMERO DE TRABALHOS ENCONTRADOS	
"DAMAGE DETECTION" OR "DAMAGE IDENTIFICATION"	AND	"BRIDGE"	AND	MODAL BASED	63	TOTAL: 429
		OR		MODE SHAPE CURVATURE	49	
		"FOOTBRIDGE"		MODAL FLEXIBILITY	145	
		OR		MODAL STRAIN ENERGY	172	
		"PEDESTRIAN BRIDGE"				

Embora o presente estudo tenha um enfoque na aplicação dos índices para passarelas, as bases de dados, no entanto, retornam um número muito baixo de trabalhos que utilizam métodos baseados na resposta da vibração (*vibration-based*) para passarelas. Neste sentido, o termo “bridge” foi acrescentado uma vez que as aplicações dos índices já mencionados são muito mais difundidas para pontes. Além disso, as conclusões podem ser extrapoladas para passarelas, já que a concepção estrutural é bastante similar.

Para o gerenciamento, leitura dos artigos e realização de comentários, foi utilizada a ferramenta Mendeley, junto com a ferramenta StArt, no intuito de auxiliar em todas as etapas citadas do processo de RSL – desde o planejamento até a extração.

3.2.2 Seleção dos estudos

Após a importação dos arquivos de referências para o StArt, uma análise de relevância foi realizada nos títulos, resumos e palavras-chave dos autores. A ferramenta aplica uma pontuação com base na ocorrência das palavras-chave definidas no protocolo da pesquisa. Nesta etapa também foram identificados 116 trabalhos duplicados, desta forma restando 313 para análise de relevância.

A seleção foi realizada a partir da leitura dos títulos e resumos de cada uma das publicações localizadas a fim de identificar trabalhos que fossem condizentes com objetivo da revisão. Os critérios de inclusão e exclusão utilizados para verificar se os artigos encontrados se adequam às expectativas do protocolo de pesquisa se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Critérios de inclusão e exclusão da RSL

Inclusão	Exclusão
Aborda longarinas de pontes ou passarelas	Aborda estruturas submetidas a sismo
Aborda a utilização de índices modais	Aborda detecção de danos, mas não utiliza métodos <i>vibration-based</i> com índices modais
Aborda a comparação de dois ou mais índices modais	Artigo focado na utilização de sensores
Aborda avaliação numérica e/ou experimental dos índices	Abordagem focada em problemas de otimização ou em algoritmos de aprendizado de máquina

Após esta seleção, 41 artigos foram separados para o estágio seguinte da revisão de literatura.

Resumidamente, dentre os artigos não-aceitos, muitas publicações encontradas focam na utilização específica de sensores para obter parâmetros dinâmicos, enquanto outros focam em estruturas do tipo placa (*plate-like*), ou então, problemas de otimização e algoritmos de aprendizado de máquina. Outros artigos também focam em novos métodos para monitoramento estrutural como monitoramento visual (*vision-based methods*) que constituiria um passo posterior a este trabalho. Muitos destes trabalhos com a utilização de algoritmos de otimização ou de inteligência

artificial partem do pressuposto que os índices funcionam para o tipo de estrutura estudado. No entanto, a aplicabilidade dos índices depende do tipo de estrutura e de seu comportamento dinâmico, que é o objetivo deste trabalho.

3.3 Extração

O último estágio dessa segunda etapa consiste na obtenção dos dados relevantes dos estudos selecionados anteriormente. Após leitura dos artigos selecionados, informações relevantes foram extraídas para compor a síntese dos resultados. Uma seleção final dos artigos foi realizada nesta etapa a fim de descartar os artigos que, após a leitura completa, não fossem relevantes para os objetivos da RSL e uma análise descritiva da revisão foi desenvolvida sobre o tema.

3.4 Revisão dos trabalhos

Nesta seção se encontram o resumo e os comentários dos artigos analisados nesta RSL referentes aos índices analisados.

Os resultados mostram a aplicação recorrente dos métodos baseados na vibração (*vibration-based methods*) como meio eficiente de detectar danos em estruturas. A Tabela 3.3 apresenta um panorama que resume as diversas categorias e métodos utilizados para detecção de dano, a partir da resposta modal da estrutura.

Tabela 3.3 – Resumo das categorias e metodologias de detecção de dano (adaptado de Shih et al., 2009)

Categoria	Metodologia
Parâmetros modais	<ul style="list-style-type: none"> • Frequências naturais • Modos de vibração (variação) • Energia de Deformação Modal • Métodos derivados dos modos de vibração

Métodos matriciais	<ul style="list-style-type: none"> • Baseados na Matriz de Rigidez (técnicas de otimização, ajuste de modelo) • Baseados na Matriz de Flexibilidade (Flexibilidade Modal)
Aprendizado de máquina (<i>machine learning</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Algoritmos genéticos (otimização de parâmetros de rigidez, minimização de funções objetivo) • Redes Neurais Artificiais
Outras técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Análise <i>Time-History</i> • Avaliação das Funções Frequência-Resposta (FRF) • Transformada Wavelet • Métodos estatísticos (<i>Statistical Process Control - SPC, Principal Component Analysis - PCA, etc</i>) • Métodos <i>Vision-based</i>

A respeito dos índices baseados nos parâmetros modais, embora a maior parte dos índices modais tenha despontado na década de 90, constata-se pela Figura 3.2 que o tema tem sido abordado com maior frequência em pesquisas para identificação de danos na última década.

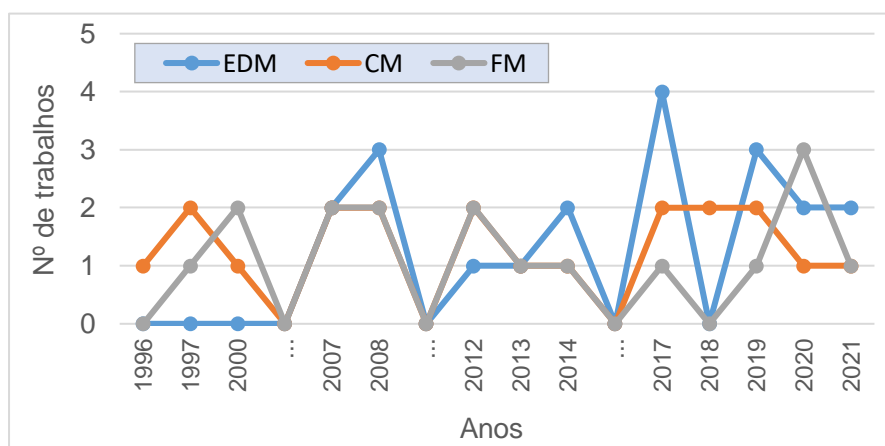


Figura 3.2 – Número de trabalhos sobre os temas entre 1996 e 2021 (siglas: EDM – Energia de Deformação Modal, CM – Curvatura Modal, e FM – Flexibilidade Modal)

As frequências naturais e os modos de vibração são os principais dados de entrada utilizados para os índices de dano. Na revisão conduzida por Brahma et al. (2018) foram comparados a frequência modal, os modos de vibração e a curvatura modal como indicadores. Embora as frequências naturais sejam facilmente obtidas, ela não provê informações espaciais sobre a estrutura já que ela é um parâmetro global da estrutura. Já os modos de vibração possuem informações locais sobre a ocorrência de um

dano. Porém, em relação aos anteriores, a curvatura modal é o índice que obtém um melhor desempenho na localização de danos.

De modo similar, o estudo de Foti (2013) verifica a detecção de dano em uma viga de uma ponte através da variação dos modos de vibração e da curvatura modal. A estrutura retilínea foi modelada com elementos de viga simulando uma das longarinas da ponte e o dano foi introduzido ao reduzir a rigidez à flexão (EI) do elemento no meio do vão da longarina. A comparação entre os métodos investigados mostra que a curvatura é um parâmetro mais sensível a presença de danos na estrutura estudada do que os deslocamentos modais, pois as variações deste último geralmente são muito pequenas, podendo até ocasionar falsos resultados positivos.

Wang et al. (2000) investigou o desempenho das frequências naturais, os modos de vibração e da flexibilidade modal, aplicados ao modelo 3D de uma ponte suspensa com resultados validados experimentalmente. Na maioria dos casos de dano, a sensibilidade das frequências ao dano é baixa, enquanto o método de flexibilidade modal indica claramente os locais de dano usando apenas alguns modos referentes às frequências mais baixas.

A ponte I-40 no Novo México (EUA) foi objeto de vários estudos para avaliar indicadores de dano antes de seu descomissionamento. Jauregui & Farrar (1996) compararam técnicas para avaliar a ocorrência de dano em estruturas – energia de deformação modal, curvatura modal, flexibilidade modal, curvatura da flexibilidade modal, e a variação na matriz de rigidez. Os índices foram analisados numericamente e experimentalmente, tendo como base um modelo de elementos finitos tridimensional de elementos de viga. A partir dos resultados das simulações de danos por fadiga nas vigas metálicas, a energia de deformação modal foi o índice que obteve melhor desempenho na detecção dos danos, seguido da curvatura modal. Por outro lado, a flexibilidade modal não desempenha bem quando o dano não é tão severo. Em praticamente todos os casos de danos, a avaliação da energia de deformação modal e a variação na matriz de rigidez foram bem-sucedidos para identificar os danos considerando apenas dois modos de vibração.

Posteriormente, ao reunir algumas lições aprendidas com a utilização de índices modais diversos nesta mesma ponte, Farrar & Doebling (1997) afirmam que entre os métodos investigados neste estudo, todos identificaram corretamente a localização do dano para o caso de dano mais grave; para danos pouco extensos, os métodos eram inconsistentes e não identificavam com clareza a localização do dano. Além disso, conclui-se que a energia de deformação modal foi o mais confiável para indicar a posição de um dano numa localização específica. Os outros índices apontam apenas a posição do dano ao identificar a maior variação do índice e os demais picos de variação podem causar ambiguidade na análise dos resultados indicando danos em mais de um local.

Mais recentemente, o estudo de Nick et al. (2021) avaliou a ocorrência de danos isolados e múltiplos em longarinas diversas para a mesma ponte I-40 de Jauregui & Farrar (1996) para uma aplicação de redes neurais para quantificar o dano. A partir da modelagem em elementos finitos (Figura 3.3), considerando apenas três modos verticais, o índice baseado na energia de deformação modal foi capaz de localizar com sucesso todos os casos de danos simples ou múltiplos de danos, e intensidades diversas.

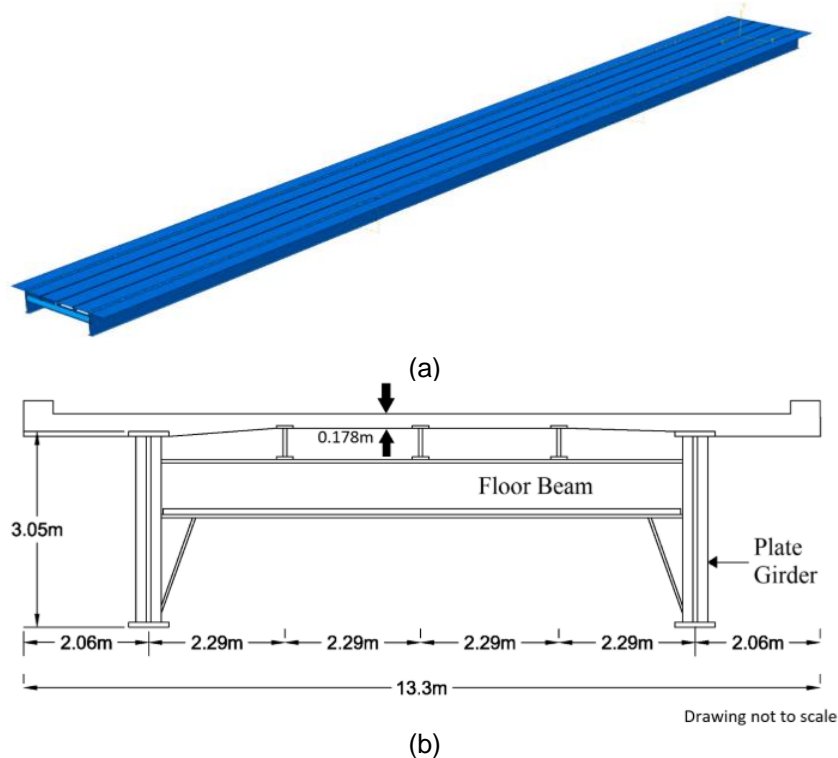


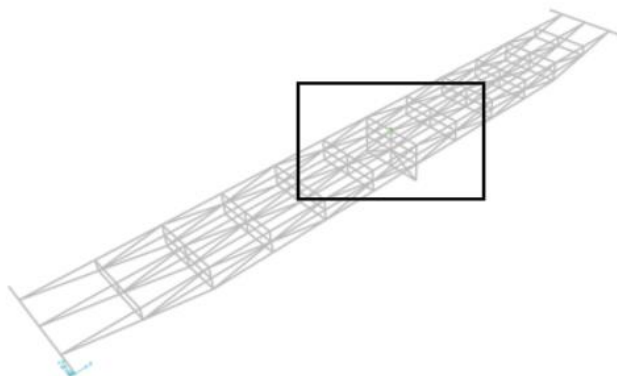
Figura 3.3 – (a) Modelo em elementos finitos da ponte I-40 e (b) seção transversal da ponte (Nick et al., 2021))

Ao analisar resultados numéricos de um modelo 3D elaborado com elementos de viga e validados por resultados experimentais de uma ponte retilínea de referência, Catbas et al. (2008) afirma que a curvatura é vantajosa para certos casos em que os resultados de deslocamentos modais não fornecem mudanças substanciais a ponto de influenciar na detecção de danos. No entanto, os autores alertam que deve-se ter cuidado ao calcular a segunda derivada para curvatura, o que pode levar a erros numéricos. Para danos próximos aos apoios, os índices apontaram anomalias na região próxima, mas não na localização exata.

Dentre os poucos artigos sobre detecção de danos em passarelas, Panesso et al. (2019) avalia numericamente e experimentalmente o desempenho da curvatura modal para aplicação posterior de redes neurais em uma passarela retilínea com estrutura treliçada (Figura 3.4a) que possui modos de flexão e torção. O modelo da passarela foi desenvolvido com elementos de viga tridimensionais (Figura 3.4b) e os danos foram simulados a partir da remoção gradual de elementos diversos da treliça.



(a)



(b)

Figura 3.4 – Passarela do estudo de Panesso et al. (2019): (a) estrutura real, (b) modelo tridimensional indicando região onde os danos foram estudados.

A partir dos resultados numéricos obtidos, a curvatura dos modos de vibração apresentou resultados satisfatórios para quatro dos cinco cenários de dano simulados, indicando a localização correta do dano. No caso experimental, a curvatura não apresentou uma variação significativa exata na posição do dano para alguns modos de vibração, no entanto, apresentando a região aproximada do dano.

O estudo de Moughty & Casas (2017) traz uma revisão bastante completa sobre diversos métodos dinâmicos de detecção de danos, incluindo os índices modais já mencionados. Os modos de vibração e seus derivados podem fornecer informações espaciais úteis para identificação de danos quando fornecidas com números de sensores suficientes e baixos níveis de ruído. Os autores apontam a necessidade de atenção aos erros inerentes da utilização de dados de vibração para calcular as curvaturas a partir da aplicação da diferença finita central.

Ali et al. (2021) aplicaram o índice da Flexibilidade Modal numa passarela retilínea composta por um tabuleiro compósito tendo uma camada de vidro laminado e uma camada do polímero GFRP sob uma viga metálica. Os picos na variação de Flexibilidade Modal ao longo do comprimento da ponte determinados usando os resultados experimentais e numéricos a partir do modelo tridimensional da estrutura previram corretamente os locais de dano em cenários de danos simples e múltiplos. Os resultados numéricos inferiram que o dano no meio do vão ocasiona maiores variações no índice em comparação com danos em outras posições da estrutura.

O estudo de Singh et al. (2020) avalia alguns índices modais para detecção de danos em vigas de concreto armado com diferentes condições de contorno, e concluiu que a flexibilidade modal é mais indicada para detectar danos simples, enquanto para casos de múltiplos danos e para avaliar a severidade do dano, a variação da energia modal é mais adequada para danos múltiplos. A curvatura modal apresentou picos em posições diferentes do dano simulado, especialmente em modos mais altos, sendo menos confiável para detecção nessa condição.

Chan et al. (2009) propõe uma identificação de danos baseada na avaliação simultânea da Energia de Deformação Modal e a Flexibilidade

modal para garantir que situações de múltiplos danos sejam localizados corretamente. A avaliação numérica da ponte retilínea é realizada a partir da modelagem dos elementos estruturais com elementos 2D. Nos diversos casos de danos simulados nas longarinas e no tabuleiro, as discrepâncias nos resultados de cada método foram mitigadas ao avaliar simultaneamente as variações dos dois índices de forma a localizar precisamente a posição do dano, inclusive em danos próximos ao apoio.

Ding et al. (2010) aplicou a flexibilidade modal, energia de deformação modal e curvatura modal para uma ponte estaiada de viga caixão de aço com retilínea. O modelo tridimensional da estrutura levou em consideração a modelagem multi-escala da estrutura na qual a seção central da ponte teve uma discretização mais refinada. Para os diversos casos de dano simulados considerando modos flexurais e torcionais, a energia de deformação modal e o índice de flexibilidade modal se demonstraram complementares na identificação de danos, inclusive para situações com ruído e o índice de curvatura modal teve o pior desempenho.

A flexibilidade modal foi também aplicada por Ni et al. (2008) como índice de danos em um modelo de elementos finitos tridimensional validado de uma ponte estaiada retilínea instrumentada com dezenas de acelerômetros. O indicador funcionou bem em casos de danos simples, inclusive na presença de ruídos artificiais ou ruídos ambientais e operacionais. No entanto, para danos múltiplos, o índice apontou falsos negativos devido à maior sensibilidade de alguns elementos estruturais a variações no parâmetro analisado. Quando os efeitos ambientais e operacionais são levados em consideração, o índice perde significativamente a capacidade de localizar os danos.

O estudo de Tan et al. (2020) avalia dois índices para identificação de danos numa ponte em escala real por meio uma análise numérica, validada por ensaios experimentais, para posterior aplicação de redes neurais. A longarina da ponte foi simulada separadamente com elementos sólidos 3D. A energia de deformação modal foi utilizada para detecção de danos nas longarinas enquanto a flexibilidade modal para avaliar possíveis danos no tabuleiro, considerando apenas 3 modos de vibração verticais. O primeiro índice foi eficiente para detectar os danos de diversas posições e

intensidades, variando linearmente à medida em que a intensidade aumentava. Por sua vez, a flexibilidade apresentou um bom desempenho para localizar os danos no tabuleiro, exceto próximo aos apoios para danos de baixa intensidade, onde naturalmente a estrutura é mais rígida.

Baneen & Kaussar (2018) afirmam que o método da energia modal é um índice com alta estabilidade na detecção modal de danos em comparação aos índices já mencionados. É apresentada uma aplicação da energia de deformação modal sem a necessidade de um modelo de elementos finitos intacto de referência para detecção de danos em uma viga, modelada com elementos sólidos 3D, levando em conta os quatro primeiros modos de flexão. Além disso, a incorporação um fator de escala baseado nas curvaturas modais de cada modo de vibração reduziu os efeitos de ruídos nos dados obtidos experimentalmente.

Yan & Ren (2011) avaliaram a sensibilidade da energia de deformação modal ao realizar um estudo em que foram variados parâmetros como densidade de massa, área da seção transversal, módulo de Young e momento de inércia de uma viga retilínea modelada com elementos de viga. Conclui-se que a energia de deformação modal é mais sensível à parâmetros geométricos, principalmente às variações no momento de inércia, enquanto o parâmetro físico ao qual o índice é menos sensível é o módulo de Young.

Uma avaliação multicritério para identificação de danos em uma ponte em arco é apresentada por Jayasundara et al. (2019), baseado na energia de deformação modal e na flexibilidade modal. Como a estrutura possui modos de vibração tridimensionais, foram separadas as contribuições vertical e lateral para cada índice e selecionados para cada elemento o maior valor absoluto entre os índices da componente lateral e vertical. Os métodos foram estudados em um modelo de elementos finitos validado com um modelo experimental, no qual o dano foi simulado através de um corte na base de um dos montantes da ponte (Figura 3.5). Considerando somente 4 modos de vibração, a capacidade aprimorada do método proposto em comparação com os métodos tradicionais fornece uma menor ambiguidade, evitando alarmes falsos, e há uma indicação mais definida da localização do dano.

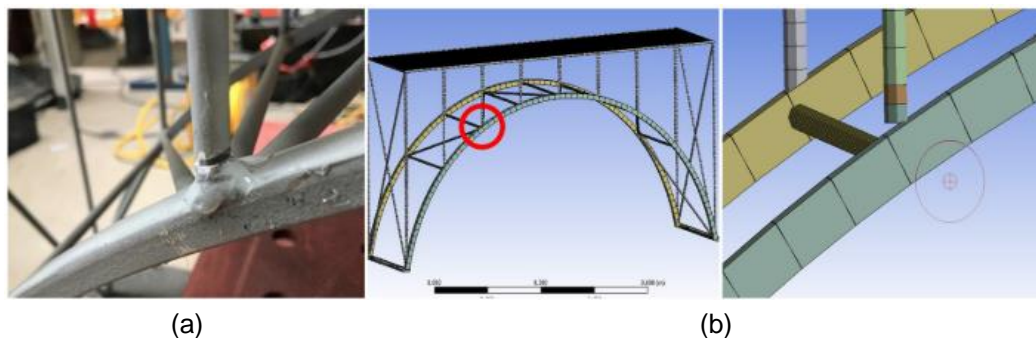


Figura 3.5 – Simulação do dano (a) no modelo experimental e (b) no modelo numérico (Jayasundara et al., 2019)

A flexibilidade modal e a energia de deformação modal são abordadas por Li et al. (2007) para detecção de danos em uma viga de madeira que simula a longarina de uma ponte. A viga com geometria retilínea foi modelada com elementos sólidos 3D considerando somente modos de vibração de flexão. A energia de deformação modal indicou a possível posição do dano em todos os casos simples ou múltiplos de danos, e foi possível estimar a severidade relativa entre os casos de danos, porém, não em valores absolutos. Já a flexibilidade modal foi eficiente para detectar a ocorrência de até dois danos simultâneos. Além disso, o método se mostrou bastante dependente da localização e as condições de contorno. A partir disso, foi proposto num novo método ponderando os resultados de ambos os índices que foi capaz de detectar locais de danos e estimar a gravidade dos danos com um nível razoável de confiança para cenários de danos únicos e múltiplos.

Moradipour et al. (2017) ao aplicar uma variação do método da energia de deformação modal no modelo de elementos finitos de ponte treliçada de aço com geometria retilínea, modelada com elementos unidimensionais, constatou a eficiência do método para detecção de danos, considerando cinco modos de vibração verticais, inclusive na presença de ruídos nos dados. Os resultados indicam que o método é útil para pontes complexas.

O estudo de Gu & Mao (2014) avalia a energia de deformação e uma variação do mesmo índice, a Taxa de Variação da Energia de Deformação Modal (*modal strain energy changes rate method*), que consiste na diferença algébrica do mesmo índice entre os casos danificado e intacto

dividido pelo resultado do caso intacto para cada elemento. Os índices foram analisados considerando uma viga biapoiada simples simulando a longarina de uma ponte. Ao avaliar as frequências naturais, ficou constatado que a variação das mesmas indica a presença de danos na estrutura, mas a alteração nas frequências não é suficiente para apontar a região danificada. A energia de deformação foi capaz de indicar a localização de danos, inclusive para danos de baixa severidade. E o método da taxa de variação da energia de deformação modal foi muito eficiente para apontar danos, obtendo bons resultados com apenas dois modos de vibração.

3.5

Considerações finais sobre a revisão de literatura

A partir da revisão de literatura realizada no item 3.4, é possível constatar a afirmação de Moughty & Casas (2017), de que a teoria dos índices modais é bem estabelecida, mas a sua aplicação em pontes – estendendo, para passarelas - produz resultados que podem ser inconsistentes. Numa perspectiva geral, poucos trabalhos na literatura – sejam eles numéricos ou experimentais - são direcionados à detecção de danos em passarelas utilizando índices modais. Em sua grande maioria, os trabalhos são aplicações em pontes retilíneas, frequentemente simplificadas levando em consideração longarinas isoladas, ou até mesmo as pontes considerando somente os deslocamentos modais na direção vertical.

A partir da revisão dos trabalhos, não é possível estabelecer com unanimidade o melhor índice para detecção de danos em passarelas diante da comprovada influência de diversos aspectos para eficiência dos mesmos. Desta forma, diante de fatores como condições de contorno, região da estrutura e severidade do dano, este trabalho avalia os índices nos Capítulos 4 e 5, levando em consideração estes fatores para uma passarela de concepção estrutural arrojada com comportamento dinâmico complexo.

4

Método da pesquisa

Como citado nos capítulos anteriores, são escassos os estudos sobre a aplicação dos índices de danos modais em estruturas com geometrias complexas e comportamento modal tridimensional. Neste capítulo, é apresentada a metodologia desenvolvida para avaliação dos índices modais de identificação de danos em uma estrutura existente de uma passarela metálica complexa. Neste capítulo são apresentados a estrutura analisada, a sua resposta dinâmica (frequências e modos de vibração), os aspectos de modelagem numérica e como os danos são simulados.

4.1

Apresentação da estrutura

4.1.1

Passarela

Localizada no Terminal do Parque Olímpico – Rio de Janeiro, RJ –, a passarela foi projetada e executada com longarinas de seção tubular metálica sob tabuleiro pavimentado em concreto, apoiado em uma chapa metálica. A passarela foi subdividida em 4 trechos (Figura 4.1). Os trechos 2 e 3 se destacam como os mais flexíveis e susceptíveis a vibrações excessivas induzidas por pedestres (Ribeiro et al., 2021). A mesma estrutura também foi estudada por Gonçalves (2021) para o desenvolvimento do índice de dano modal denominado vetor resultante e na proposta de utilização de redes neurais artificiais para aumentar a eficiência na identificação modal de danos. Uma das seções transversais da passarela pode ser verificada no corte da estrutura, apresentado na Figura 4.2.

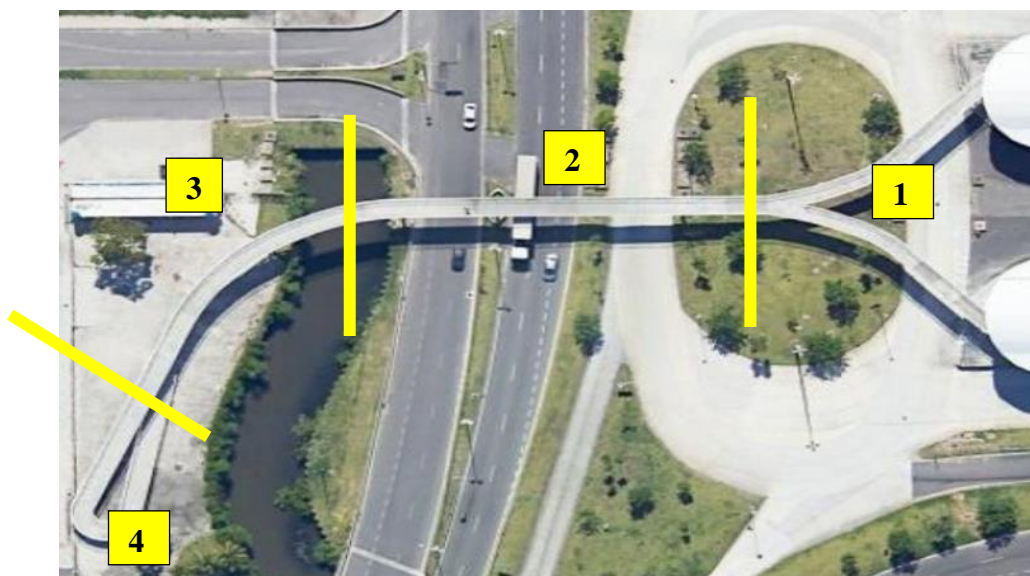


Figura 4.1 – Estrutura da passarela setorizada (Gonçalves, 2021)

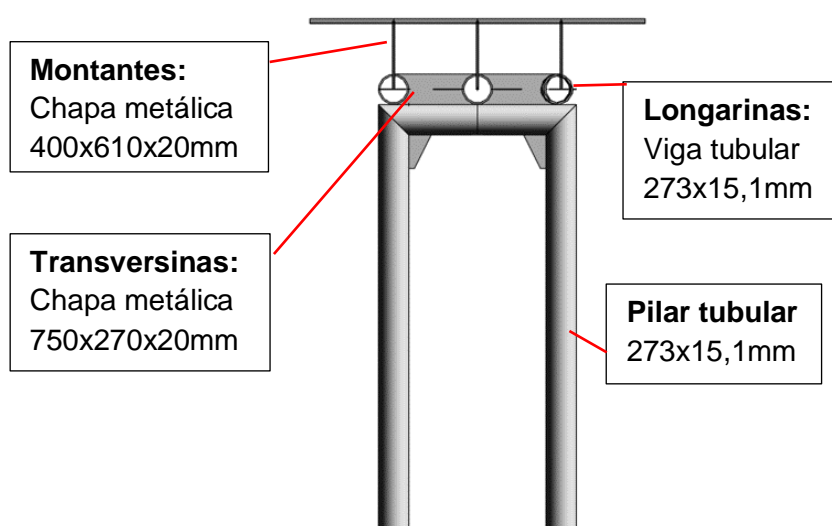


Figura 4.2 – Seção transversal do modelo computacional da passarela (Adaptado de Gonçalves, 2021)

4.1.2 Modelagem numérica

A análise numérica da passarela supracitada foi realizada através do modelo de elementos finitos desenvolvido no software *Robot Structural Analysis*, da Autodesk. Os 4 vãos no modelo (Figura 4.3) representam os trechos 2 e 3 da estrutura mostrados na Figura 4.1, considerando as seções transversais e dimensões originais da estrutura.

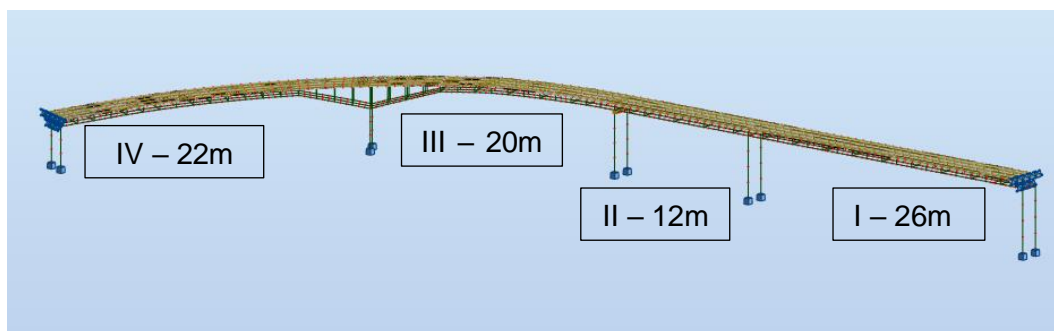


Figura 4.3 – Modelo numérico e identificação dos vãos (Gonçalves, 2021)

As longarinas, montantes e transversinas foram modelados como elementos de viga e as suas ligações como perfeitamente rígidas. Já o tabuleiro, que é composto por uma chapa metálica de 5 mm sob uma laje de concreto de 50 mm de espessura, foi modelado como um elemento de placa único, utilizando o método das seções equivalentes para aproximar a chapa metálica para uma seção de concreto equivalente (Figura 4.4).

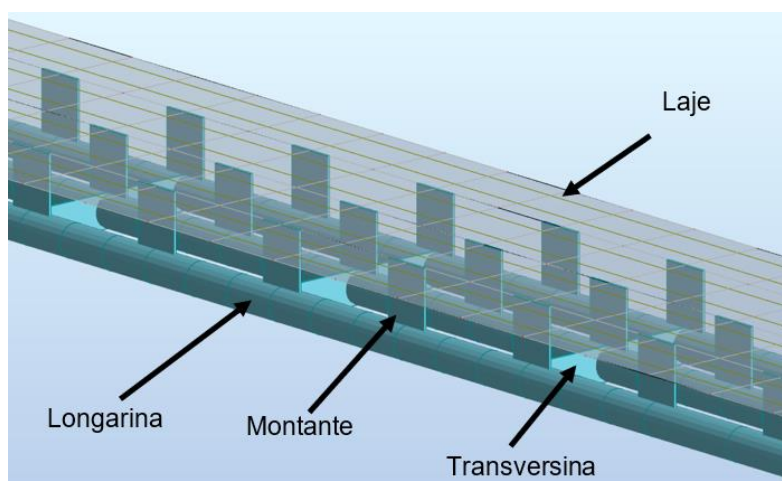


Figura 4.4 - Componentes da estrutura do modelo renderizado (Gonçalves, 2021)

As diversas condições de contorno utilizadas no modelo foram as seguintes:

- Na base dos pilares foram considerados engastes perfeitos, com rotações e translações nulas (apoio dos pilares);
- Nas extremidades do modelo foram considerados apoios de continuidade para simular de forma simplificada os efeitos da continuidade da estrutura. Para estes, foram limitadas apenas as translações na direção longitudinal, no sentido dos trechos

adjacentes não modelados da estrutura. A translação nas demais direções e as rotações são livres (Figura 4.5)



Figura 4.5 – Condições de contorno do modelo (adaptado de Gonçalves, 2021)

Para fins de comparação dos índices nas diversas longarinas da passarela, as mesmas são referidas neste trabalho como Longarina 1, Longarina 2 e Longarina 3, representadas pelas cores azul, vermelho e amarelo, respectivamente, na Figura 4.6.

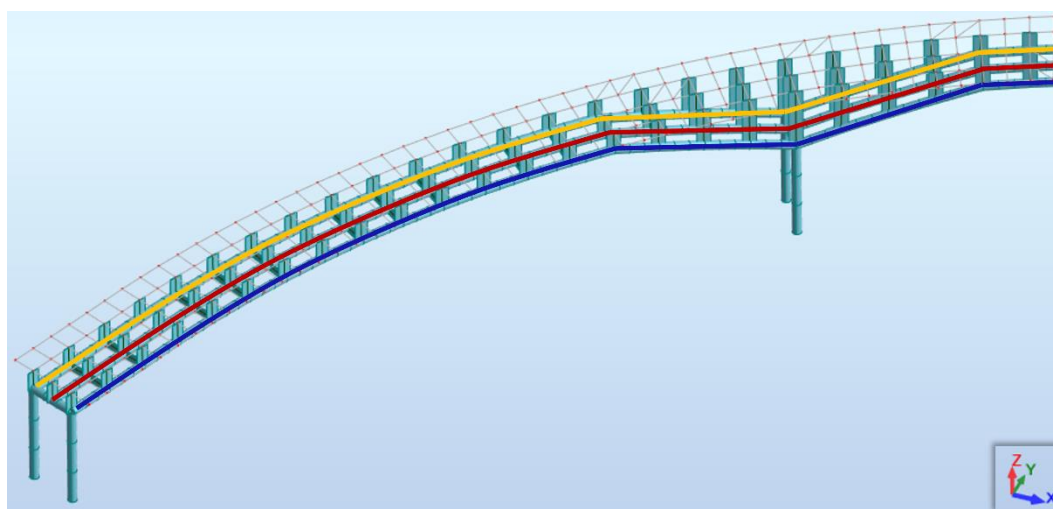


Figura 4.6 – Identificação das longarinas

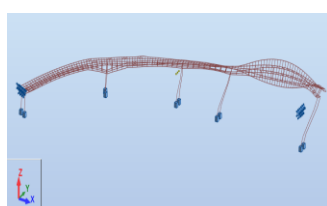
Resumidamente, Longarina 1 (L1) se refere ao elemento estrutural longitudinal mais próximo ao lado interno da parte curva da passarela, enquanto Longarina 3 (L3) se refere ao elemento no lado externo da parte curva da estrutura. Referente à discretização das longarinas, os elementos de viga possuem em geral 0,50m de comprimento nos trechos analisados.

4.1.3 Frequências Naturais e Modos de Vibração

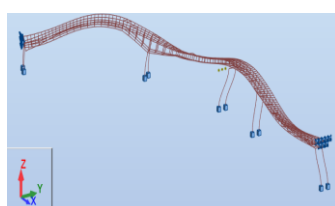
A partir da análise modal realizada no *Robot Structural Analysis*, são obtidos os autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração) da estrutura, que são solução da Equação 3. Vale ressaltar a complexidade dos oito primeiros modos de vibração considerados na análise, representados graficamente na Figura 4.7 e resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Característica dos modos de vibração e frequências naturais do modelo da passarela (Gonçalves, 2021)

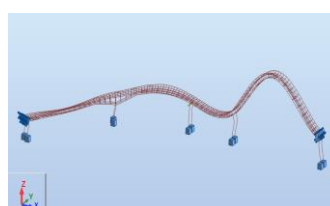
MODO	FREQUÊNCIA NATURAL (HZ)	CARACTERÍSTICA DO MODO
1	2,56	FLEXÃO LATERAL + TORÇÃO
2	3,81	FLEXÃO LATERAL + FLEXÃO VERTICAL
3	4,14	FLEXÃO VERTICAL
4	4,42	TORÇÃO + FLEXÃO VERTICAL
5	5,68	TORÇÃO
6	6,67	FLEXÃO VERTICAL + TORÇÃO
7	7,01	TORÇÃO
8	8,45	TORÇÃO + FLEXÃO LATERAL



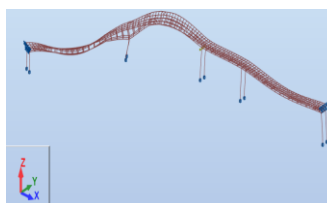
(a) 1º modo (f=2,56 Hz)



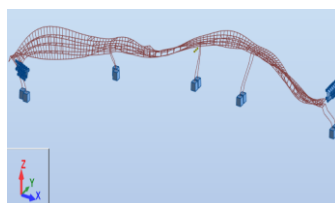
(b) 2º modo (f=3,81 Hz)



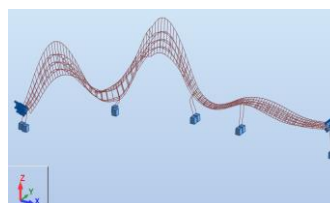
(c) 3º modo (f=4,14 Hz)



(d) 4º modo (f=4,42 Hz)



(e) 5º modo (f=5,68 Hz)



(f) 6º modo (f=6,67 Hz)

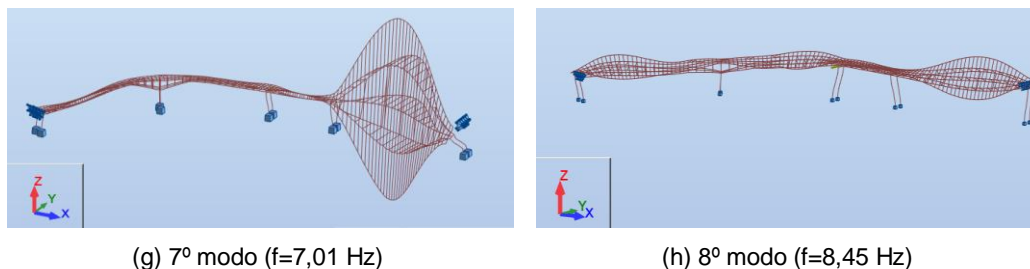


Figura 4.7 – Oito primeiros modos de vibração da passarela e suas respectivas frequências naturais (Gonçalves, 2021)

4.2

Avaliação dos Índices de Dano

Visto a complexidade da geometria e dos modos de vibração desta estrutura, a identificação de danos utilizando índices modais que foram propostos inicialmente para estruturas unidimensionais demanda uma análise mais detalhada. É fundamental levar em consideração as diferentes variáveis - como a posição do dano na estrutura, os modos de vibração considerados, entre outros fatores - para evitar quaisquer equívocos na identificação de danos. Além disso, a análise de estruturas tridimensionais requer que as longarinas sejam avaliadas simultaneamente para que as ações corretivas na estrutura sejam corretamente direcionadas a partir da identificação modal de danos.

Desta seção em diante, os índices serão frequentemente citados a partir da abreviação por suas iniciais:

- VR (Vetor Resultante),
- FM (Flexibilidade Modal),
- CM (Curvatura Modal), e
- EDM (Energia de Deformação Modal).

4.2.1

Localização dos danos

A deterioração de parte de um membro estrutural tem implicação direta nos modos de vibração que, por sua vez, não variam da mesma maneira em cada um dos pontos da estrutura. Por isso, torna-se essencial

analisar os índices considerando o comportamento das diversas regiões da estrutura. No intuito de representar algumas regiões da estrutura, foram simulados três casos de danos distintos, indicados pela Figura 4.8, dentre os quais, os casos 1 e 2 representam regiões mais flexíveis da estrutura, e o caso 3, uma região rígida da estrutura, próximo a um dos apoios.

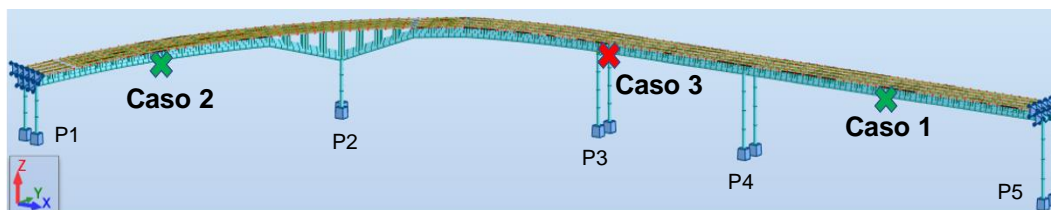


Figura 4.8 – Posição do dano simulado na estrutura

No Caso 1, o dano simulado se encontra no elemento 810 do trecho reto da Longarina L1 (Figura 4.9a). Com o objetivo de avaliar os índices numa região da estrutura com geometria diferenciada – rampa em curva -, o caso 2 considera a presença de um dano no elemento 675 na Longarina L1 (Figura 4.9b). Já o caso 3 foi simulado levando em consideração a presença de dano na região próxima ao pilar P3 da estrutura, no elemento 743 da Longarina L3 (Figura 4.9c). Como os trechos mais rígidos da estrutura possuem menor variação nos deslocamentos modais, este fato tende a refletir de maneira similar na sensibilidade dos índices modais para identificação de danos nessa região da estrutura.

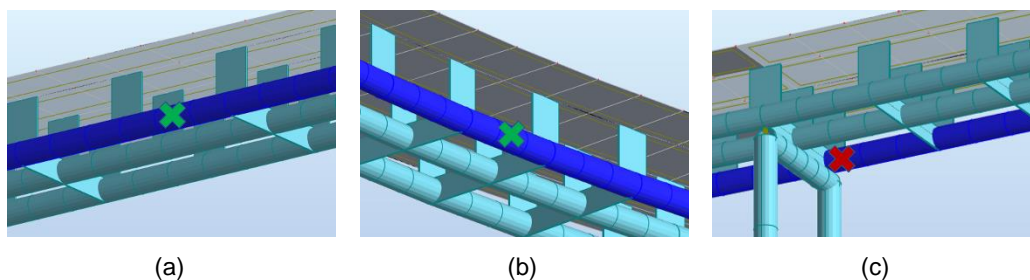


Figura 4.9 – Elementos simulados como danificados no (a) caso 1, (b) caso 2 e, (c) caso 3, indicados pelo “X”.

Para cada um dos três casos mencionados acima, os danos foram inseridos em uma longarina específica. No entanto, os resultados dos índices serão apresentados simultaneamente para as longarinas não

danificadas a fim de atestar a capacidade do índice de localizar o dano em uma estrutura tridimensional e direcionar corretamente os serviços de inspeção e manutenção.

Este estudo não considera danos na região próxima ao pilar P2. Este trecho inclinado possui comportamento bastante enrijecido, deslocando praticamente como um corpo rígido em todos os modos de vibração considerados. Dessa forma, as coordenadas modais não variam consideravelmente para influenciar nos índices, já que todos os índices abordados neste trabalho são baseados na variação dos deslocamentos modais da estrutura. Também não foram considerados neste trabalho a simulação de danos em outros pontos da estrutura como transversinas, montantes e no tabuleiro.

4.2.2

Intensidade dos danos

Danos causados pela corrosão das longarinas podem ser simulados através da redução da espessura da seção transversal do elemento no modelo de elementos finitos (Cinitha et al., 2014; Janeliukstis et al., 2016; Baneen & Kausar, 2018). Os casos de 1 a 3 se concentram em modelos simulados com a presença de corrosão moderada, considerando a perda de 50% de espessura da seção. A extensão do dano é de aproximadamente 0,50m, o que corresponde a um elemento de viga do modelo.

Para cada combinação de posição e intensidade de dano ocorre uma resposta distinta da estrutura. Por este motivo, a Seção 5.2 avalia como o grau de comprometimento do elemento estrutural se reflete na sensibilidade dos índices para outras intensidades de dano. Foram considerados para a mesma localização simulada no caso 1, outros dois casos de dano foram simulados: um de corrosão considerada moderada (25%) e outra situação de corrosão considerada severa (75%). O propósito da simulação de um dano de 75% é verificar se há uma clara mudança na resposta dinâmica da passarela, conseqüentemente no desempenho dos

índices analisados. Os cenários simulados e como eles afetam a seção transversal da longarina se encontram resumidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Intensidades de dano simulados.

Cenários	Espessura da seção tubular (cm)	Redução de espessura
Intacto	1,500	0%
Dano 25	1,125	25%
Dano 50	0,750	50%
Dano 75	0,375	75%

4.2.3 Seleção dos Modos de Vibração

A quantidade de modos selecionados constitui uma importante variável para avaliar a eficiência dos índices na identificação modal de danos. Por outro lado, é essencial que o comportamento dos modos de vibração selecionados seja coerente com a formulação dos índices.

Dessa forma, para aplicação do vetor resultante e da flexibilidade modal, foram selecionados os mesmos oito modos de vibração utilizados por Gonçalves (2021) a fim de abranger os diversos comportamentos modais da estrutura. Para o VR, são consideradas as três coordenadas modais em cada como requer a formulação (Equação 17).

Os demais índices foram avaliados com base na componente vertical (Z) dos modos uma vez que a principal fonte de excitação nesta estrutura é proveniente de carregamento vertical (trânsito de pedestres).

Para a avaliação da curvatura modal, foram considerados os modos de vibração cujo comportamento de flexão vertical é relevante, como os modos 2, 3, 4 e 6. Neste sentido, a utilização da coordenada vertical Z é também a mais adequada à formulação de diferenças finitas utilizada para calcular a curvatura. A estrutura curva da passarela não permite o cálculo da curvatura considerando os deslocamentos modais laterais devido à formulação unidimensional da curvatura.

Por fim, como a formulação da energia de deformação modal utilizada é derivada da curvatura modal, foram considerados os mesmos quatro modos citados anteriormente.

4.2.4

Extração e aplicação

A Figura 4.10 apresenta um resumo do fluxo de trabalho desta pesquisa.

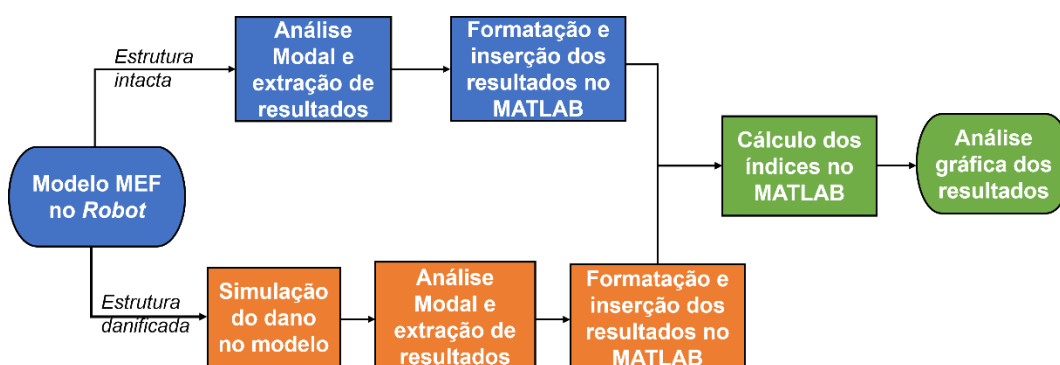


Figura 4.10 – Fluxo de trabalho

Após a simulação dos cinco casos de dano mencionados anteriormente, os resultados da análise modal são extraídos do *Robot*, exportados para uma planilha contendo os nós, frequências naturais e os deslocamentos modais normalizados por massa para o caso simulado. O processo realizado é o mesmo para o caso intacto e para cada um dos casos de dano já mencionados.

Em seguida, os resultados da estrutura intacta e danificada são armazenados nas variáveis do script do MATLAB que, na sequência, calcula cada um dos índices já referidos. Os resultados são extraídos em forma de gráficos de barras, de forma que os índices possam ser avaliados na sua capacidade de identificar corretamente a presença de danos na estrutura.

5 Análise dos Resultados

Neste capítulo, os resultados da aplicação da variação dos índices já mencionados são apresentados e discutidos, levando em consideração a região da estrutura em que eles se encontram, bem como a magnitude do dano presente na estrutura. Os danos foram simulados em determinadas posições da estrutura de modo a avaliar a aplicabilidade dos índices na sua localização. São analisados também os resultados dos índices referentes às longarinas adjacentes não danificadas. Isto é feito pois na prática de uma inspeção a longarina danificada seria desconhecida. Portanto, a avaliação do índice em todas as longarinas é uma forma de testar a capacidade de cada índice localizar apropriadamente a posição do dano na estrutura. Por fim, danos de diversas intensidades foram estudados para examinar a sensibilidade dos índices aos danos de diversas magnitudes.

5.1 Posição do dano na estrutura

5.1.1 Trechos flexíveis

As regiões mais flexíveis da estrutura são trechos onde os maiores valores de deslocamentos modais favorecem para que os índices sejam sensíveis à presença de danos na estrutura. Os casos 1 e 2 (Figura 4.8) foram simulados considerando a ocorrência de danos em elementos do modelo localizados no meio dos vãos indicados.

A Tabela 5.1 mostra os valores das frequências naturais para o caso 1. Para os 8 modos de vibração considerados, a variação da frequência foi praticamente nula, uma vez que o dano simulado está aplicado numa extensão pequena em comparação com as dimensões da estrutura. Desta

forma, a variação da frequência não se mostrou relevante para identificar o dano simulado neste caso.

Tabela 5.1 – Variação das frequências naturais para o Caso 1

Modos	Intacto (Hz)	Dano (Hz)	$ \Delta f $ (%)
1	2,562	2,564	0,051
2	3,808	3,808	0,008
3	4,139	4,140	0,045
4	4,422	4,422	0,004
5	5,682	5,682	0,003
6	6,669	6,669	0,001
7	7,012	7,020	0,114
8	8,452	8,450	0,014

Cada barra dos gráficos a seguir representa os resultados dos índices (eixo vertical) para cada um dos nós das longarinas (eixo horizontal). Para melhor visualização, foram destacados somente os apoios (pilares) da estrutura nos eixos horizontais dos gráficos e os nós do elemento no qual o dano foi simulado estão indicados nos gráficos pelas barras de cor laranja.

Na Figura 5.1 se encontram os resultados para o VR no Caso 1.

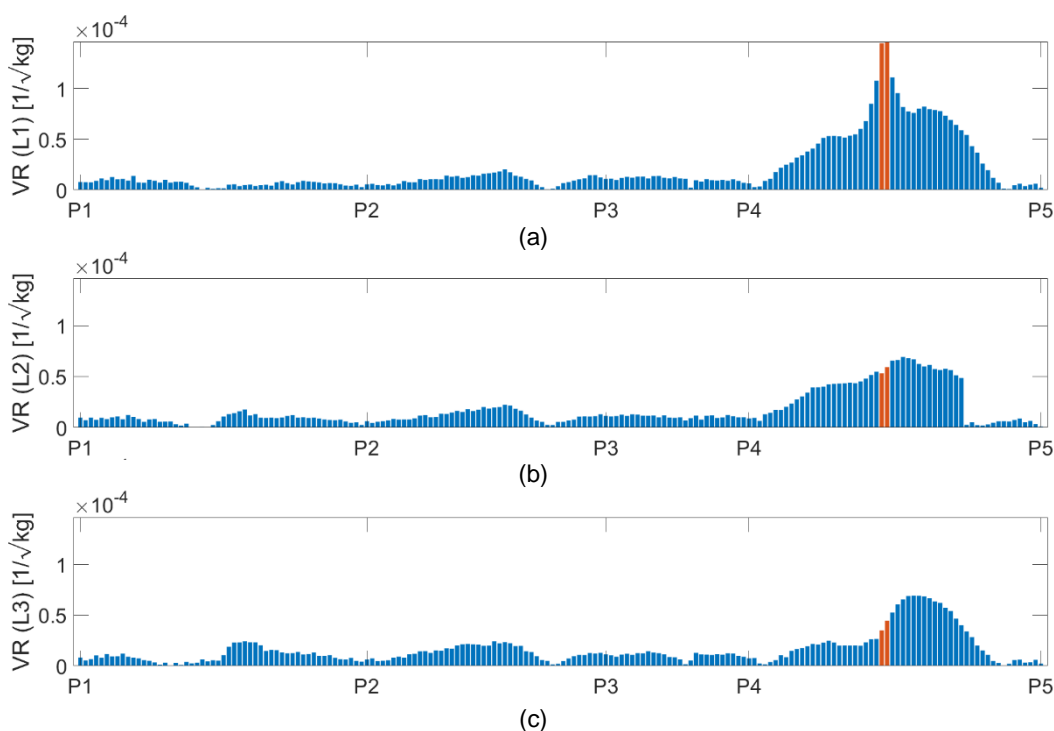


Figura 5.1 – Resultados do Caso 1 para o VR: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

O índice demonstrou-se eficiente, localizando adequadamente o vão da estrutura em que se encontra o trecho danificado. A maior diferença absoluta entre o VR dos casos danificado e intacto, demonstrada pelo gráfico, indica corretamente os nós do elemento danificado (Figura 5.1a). Além disso, os resultados do índice para as longarinas adjacentes L2 (Figura 5.1b) e L3 (Figura 5.1c) confirmam qual seção da estrutura se encontra deteriorada e, os picos mais baixos nas longarinas vizinhas ratificam qual longarina se encontra danificada.

Os resultados da FM nessa região da estrutura atestam a capacidade do índice para identificar este caso de dano. Da mesma forma que o VR, o índice aponta que a presença do dano é também refletida nos elementos vizinhos. Porém, os nós cuja variação absoluta do índice é máxima são corretamente identificados como os nós do elemento simulado neste caso de dano (Figura 5.2a).

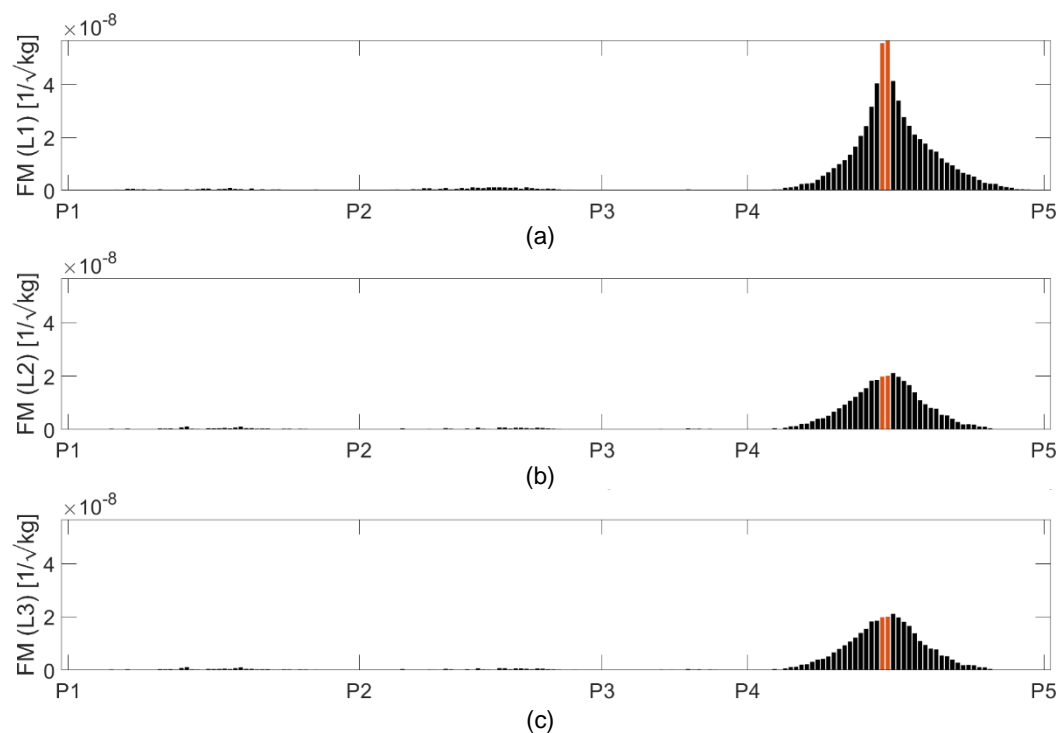


Figura 5.2 – Resultados do Caso 1 para FM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

Observa-se também que a influência do dano nos outros vãos entre os pilares P1 e P4 é bem menor quando comparado com influência do dano no mesmo trecho não-danificado para o VR. Ao analisar a mesma região do dano nas longarinas L2 (Figura 5.2b) e L3 (Figura 5.2c), verifica-se que o índice também identifica corretamente a longarina danificada, sendo útil

para o direcionamento das equipes de inspeção para casos de dano como o simulado.

Os resultados da aplicação da Curvatura Modal (CM) se encontram na Figura 5.3. A CM também foi capaz de localizar corretamente o dano, indicando corretamente a longarina e a posição do dano simulado (Figura 5.3a). Neste caso de dano, se verifica a importância de avaliar simultaneamente as diversas longarinas da passarela, uma vez que os resultados das longarinas adjacentes (Figura 5.3b, c) apresentam diversos picos que, analisados separadamente, não são capazes de indicar com clareza a presença do dano na estrutura.

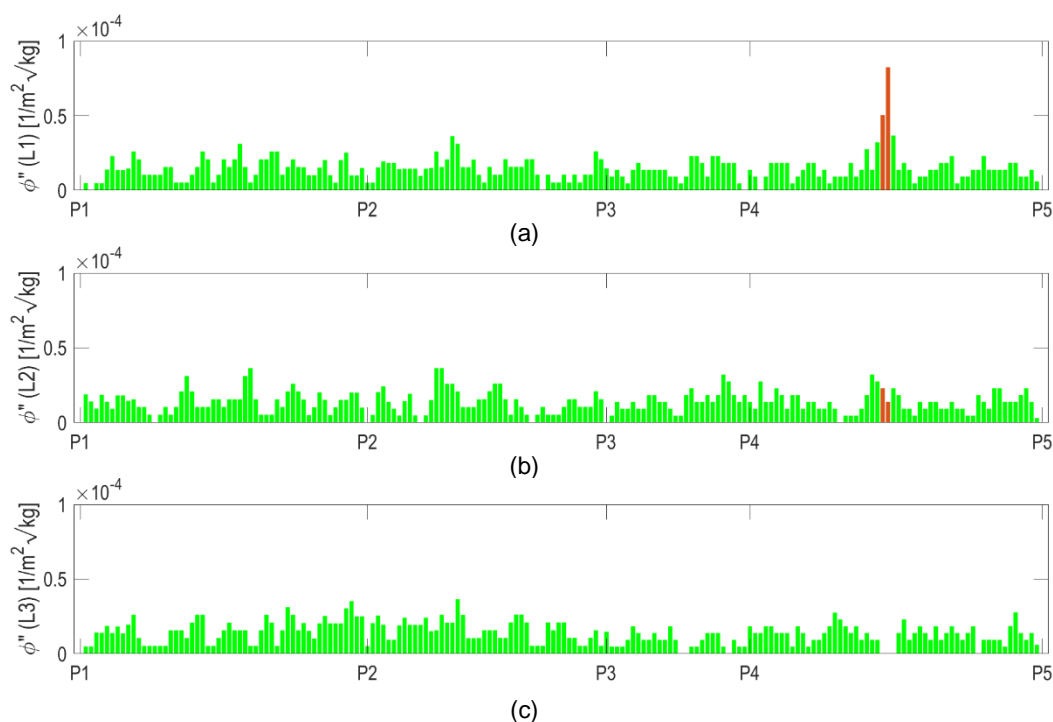


Figura 5.3 – Resultados do Caso 1 para CM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

Alguns dos fatores que influenciam nesse resultado são a escolha da quantidade de modos e das características destes modos selecionados. Modos com comportamento predominantemente de flexão vertical conseguem capturar corretamente a presença do dano. Quando analisados separadamente, estes modos contribuem expressivamente para o resultado (Figura 5.4).

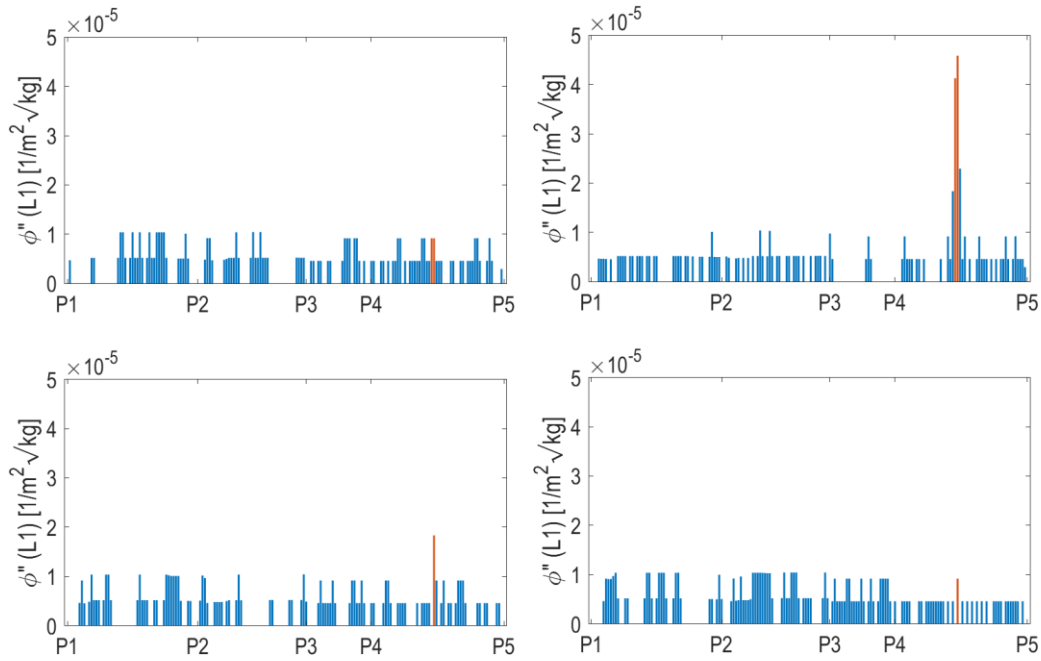


Figura 5.4 - Resultados da CM na L1 separado pelos modos selecionados:

(a) modo 2, (b) modo 3, (c) modo 4, e (d) modo 6.

A EDM, como índice derivado da curvatura modal, foi também capaz de detectar e localizar corretamente o dano na estrutura. O valor máximo do índice aponta corretamente a região bem como o elemento cujo dano foi inserido no modelo (Figura 5.5a).

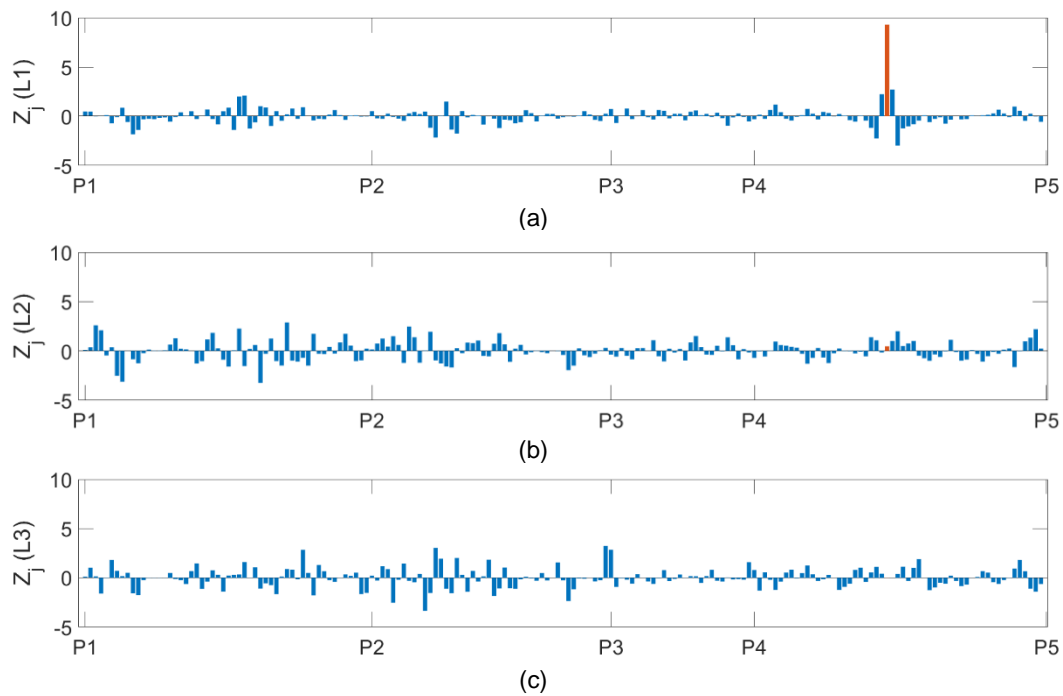


Figura 5.5 – Resultados do Caso 1 para EDM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

Embora a EDM possua em sua formulação o quadrado da curvatura, verifica-se que o índice foi capaz de detectar o dano de forma bastante precisa. A Tabela 5.2 apresenta os resultados do passo a passo do cálculo (Equação 14 e Equação 16) que justifica esse comportamento do índice. Nela se encontram os resultados para o elemento danificado (810) e seus 10 elementos vizinhos na L1.

Tabela 5.2 – Resultados para Energia de Deformação Modal para o Caso 1.

	ELEMENTOS										
	805	806	807	808	809	810	811	775	774	773	772
NUM	4,026	4,018	4,020	4,025	4,028	4,033	4,028	4,023	4,019	4,020	4,026
DEN	4,026	4,019	4,021	4,027	4,025	4,022	4,025	4,026	4,021	4,022	4,027
β_j	1,000	1,000	1,000	0,999	1,001	1,003	1,001	0,999	1,000	1,000	1,000
Z_j	0,042	-0,440	-1,184	-2,258	2,236	9,314	2,705	-2,991	-1,242	-1,034	-0,811

A normalização por meio do teste estatístico Z (*Z-score test*, em inglês) representa uma medida de quantos desvios padrões os resultados estão acima ou abaixo da média aritmética, que é representada pela abscissa zero. Em outras palavras, os resultados positivos de Z_j representam os casos em que a fração de Energia de Deformação Modal no caso danificado (numerador da Equação 14) ultrapassou ao menos 50% a mesma fração do caso intacto (denominador da Equação 14). A presença de danos tende a aumentar a deformação dos elementos estruturais, consequentemente aumentando a energia de deformação modal, o que faz dos resultados positivos desse método mais relevantes para a identificação modal de danos. Dessa forma, o máximo valor positivo do parâmetro Z_j indica qual elemento se encontra danificado, como destacado na Figura 5.6. E torna-se evidente que o índice possui uma sensibilidade maior na região, amplificada pela normalização dos resultados utilizada.

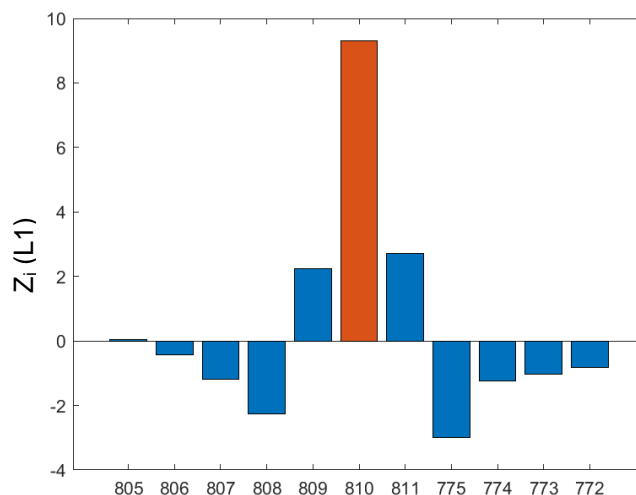


Figura 5.6 – Resultados do parâmetro Z_j (EDM) para os elementos da Tabela 5.2.

Por fim, pode-se concluir também que os resultados das longarinas adjacentes L2 (Figura 5.5b) e L3 (Figura 5.5c) não são conclusivos quando o dano está localizado fora delas. Desse modo, demonstra-se a importância de avaliar simultaneamente os índices nas diversas longarinas da estrutura.

Já no caso 2, o dano é simulado em uma região da estrutura em rampa cuja longarinas são curvilíneas, diferentemente das diversas aplicações dos índices encontradas na literatura. Observa-se novamente que os valores de frequência não apresentam variação significativa após a ocorrência do dano na estrutura (Tabela 5.3). Estes resultados confirmam que a frequência natural é um índice não recomendado para localização de danos.

Tabela 5.3 – Variação das frequências naturais para o Caso 2

Modos	Intacto (Hz)	Dano (Hz)	$ \Delta f $ (%)
1	2,562	2,562	0,000
2	3,808	3,809	0,024
3	4,139	4,139	0,001
4	4,422	4,424	0,040
5	5,682	5,684	0,026
6	6,669	6,670	0,017
7	7,012	7,012	0,001
8	8,452	8,453	0,012

A Figura 5.7 apresenta o resultado para o índice VR aplicados nesta passarela quando o dano do cenário de 50% de redução da seção transversal foi aplicado no elemento 675, localizado no meio do vão entre os pilares P1 e P2.

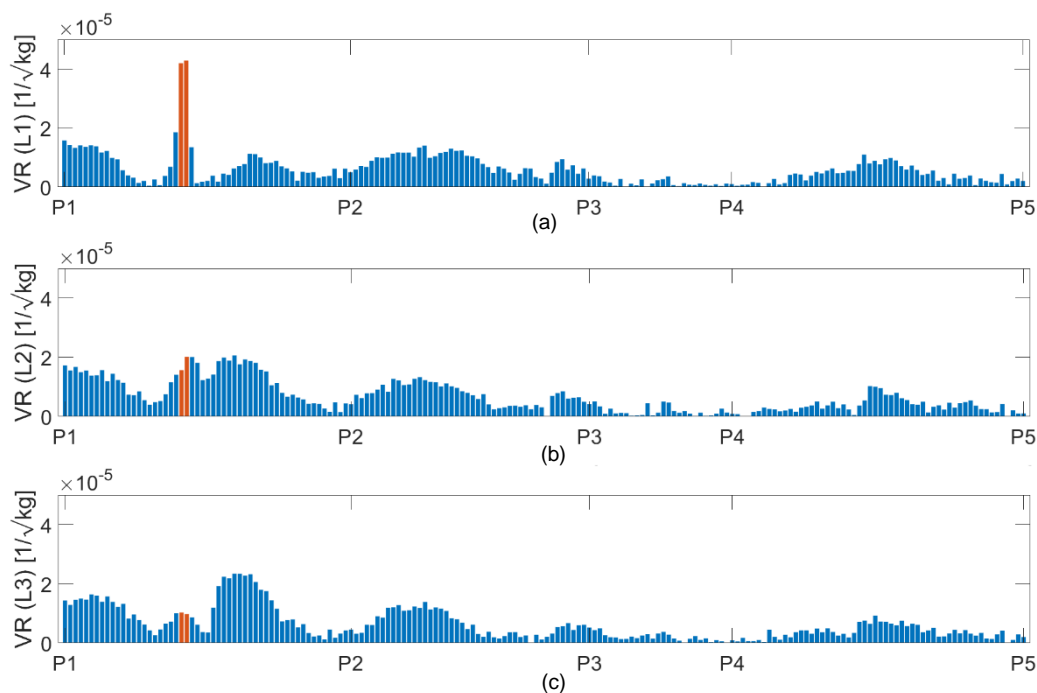


Figura 5.7 – Resultados do Caso 2 para o VR: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3

De modo similar ao caso 1, o VR foi capaz de identificar corretamente a posição e a longarina danificada (Figura 5.7a). Os picos em outras posições são cerca de 50% inferiores ao valor máximo do índice observado na posição do dano.

Semelhantemente, a FM foi um índice eficiente para identificar o dano nessa região (Figura 5.8a), ainda que a geometria e os modos de vibração sejam complexos. Vale ressaltar que em todas as longarinas o índice apresenta maiores variações no vão onde se encontra o dano, enquanto os vãos adjacentes apresentam uma variação da flexibilidade modal praticamente insignificante.

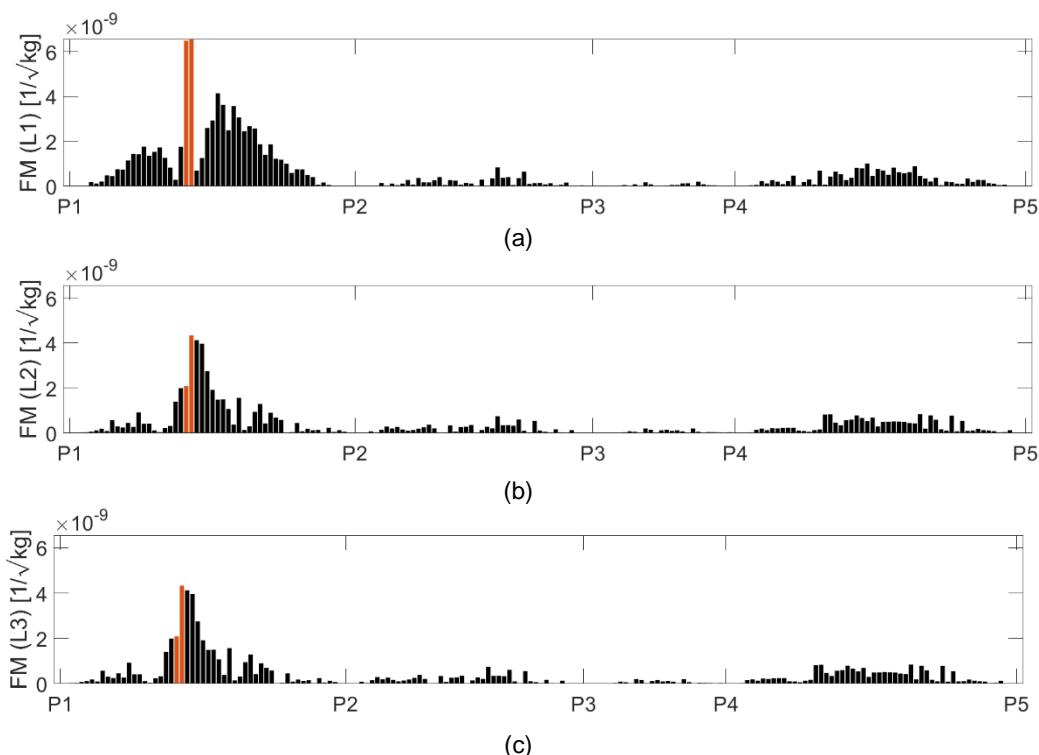


Figura 5.8 – Resultados do Caso 2 para FM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

Os resultados da CM para o caso 2 estão representados na Figura 5.9. A CM novamente foi capaz de identificar corretamente o elemento danificado, indicando valores máximos os nós referentes ao elemento do dano artificial introduzido no modelo. Foi observado o mesmo comportamento do caso 1, no qual o índice apresenta diversos picos menores fora da posição do dano, o que ressalta a importância da análise conjunta das longarinas. A grande variação das coordenadas modais nesta região da estrutura no sexto modo (Figura 4.7f) teve importância fundamental na capacidade do índice de indicar a posição do dano. As contribuições de cada um dos modos de vibração selecionados podem ser verificadas no Apêndice.

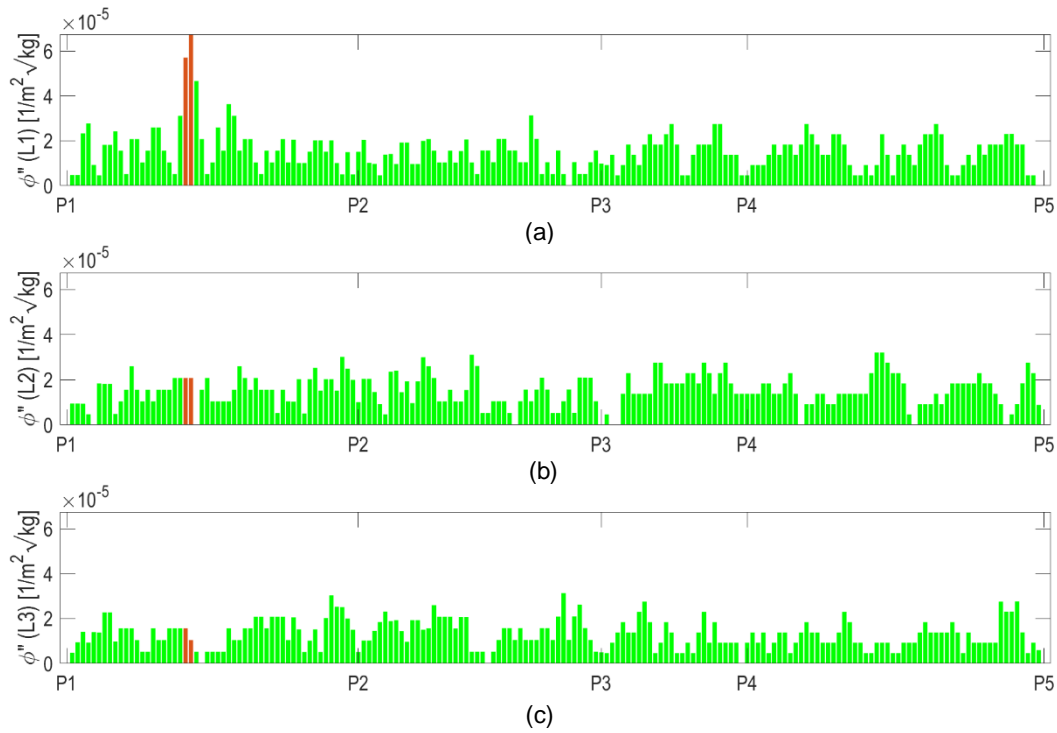


Figura 5.9 – Resultados do Caso 2 para CM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

Por fim, mais uma vez a EDM foi capaz de detectar o dano corretamente, bem como a longarina na qual o dano foi introduzido, apontando na posição do dano no valor máximo positivo do parâmetro Z_j (Figura 5.10a).

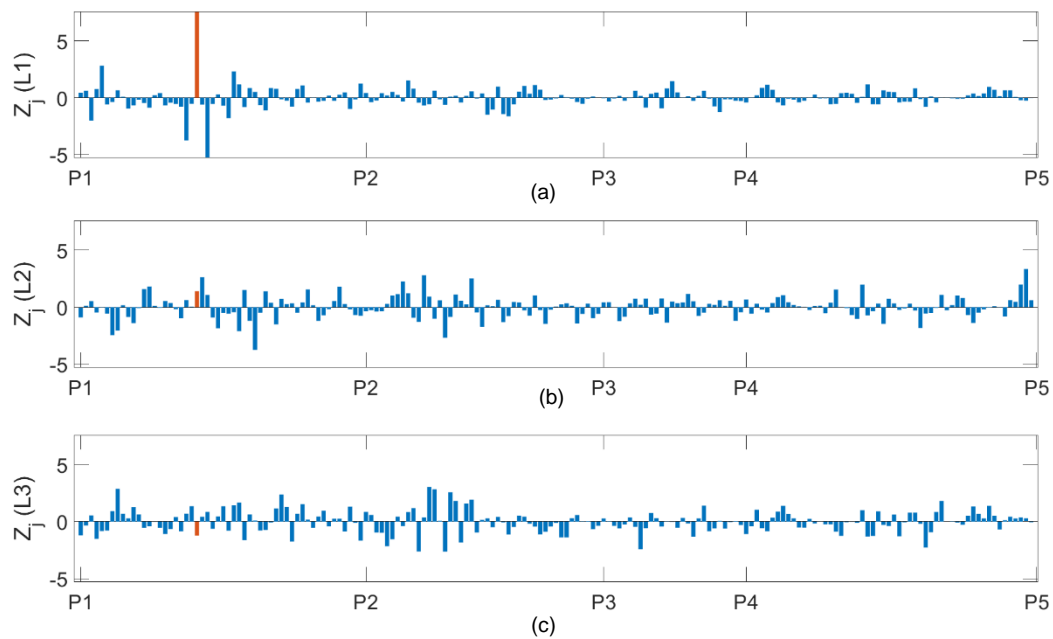


Figura 5.10 – Resultados do Caso 2 para a EDM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3

5.1.2 Trechos rígidos

Diferentemente da seção anterior, os trechos mais rígidos da estrutura possuem menor variação nos deslocamentos modais, o que pode restringir a sensibilidade dos índices modais para identificação de danos na estrutura. Por essa razão, o caso 3 (Figura 4.8) foi simulado levando em consideração um dano de 50% na região próxima ao pilar P3 da estrutura, no elemento 743 da Longarina L3.

Os valores de frequência antes e após a ocorrência do dano na estrutura no caso 3 estão relatados na Tabela 5.4. Verifica-se a variação das frequências é praticamente nula em todos os modos analisados.

Tabela 5.4 – Variação das frequências naturais para o Caso 3

Modos	Intacto (Hz)	Dano (Hz)	Δf (%)
1	2,562	2,562	0,016
2	3,808	3,808	0,007
3	4,139	4,138	0,010
4	4,422	4,420	0,052
5	5,682	5,681	0,023
6	6,669	6,666	0,035
7	7,012	7,012	0,006
8	8,452	8,449	0,026

Os resultados do VR para o caso 3 estão na Figura 5.11.

No caso do VR, o índice detectou a região aproximada do dano na estrutura, sem localizar corretamente os nós do elemento danificado. De fato, isso é esperado uma vez que os deslocamentos são mais restritos na região próxima aos pilares, diminuindo a contribuição das coordenadas nas três direções – particularmente, da coordenada vertical.

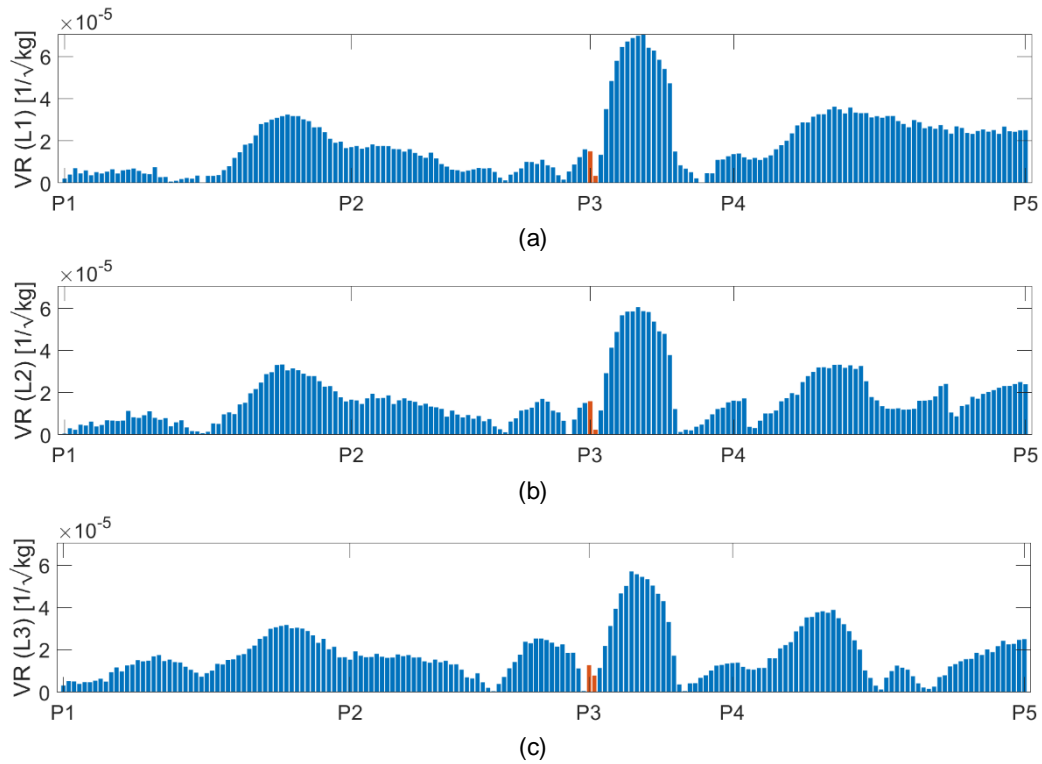


Figura 5.11 – Resultados do Caso 3 para o VR: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

Do mesmo modo, a FM para o caso 3 não foi eficiente na detecção e localização do dano simulado (Figura 5.12). O índice mostra valores máximos na região próxima ao dano, porém, os resultados não permitem concluir qual elemento e qual longarina se encontra danificada.

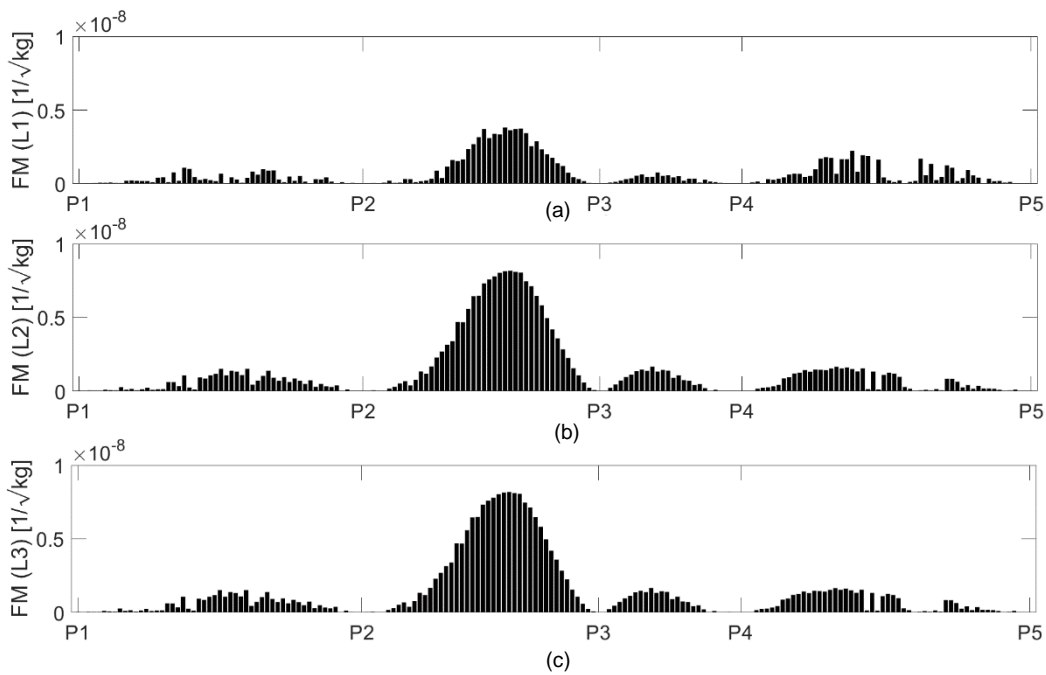


Figura 5.12 – Resultados do Caso 3 para a FM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3

Este comportamento da FM neste caso é decorrente da utilização da coordenada vertical na formulação do índice, numa região em que os deslocamentos verticais são restringidos pelo pilar da estrutura.

Os resultados da CM para o caso 3 são apresentados na Figura 5.13. O índice identificou corretamente a posição do dano quando comparado com os resultados para outros pontos ao longo da extensão das longarinas. O dano simulado na L3 (Figura 5.13c) influenciou também no índice para o elemento paralelo na L2 (Figura 5.13b) que apresentou uma leve alteração nos resultados, indicando a existência de alguma anomalia neste trecho da estrutura.

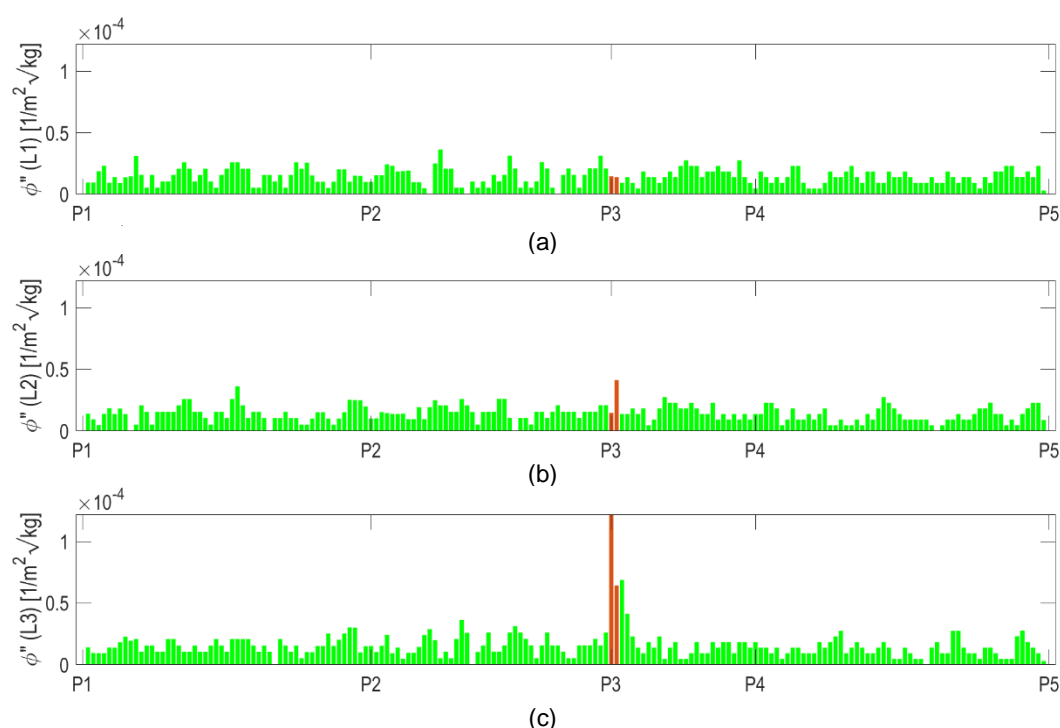


Figura 5.13 – Resultados do Caso 3 para CM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3.

Por conseguinte. A EDM segue apresentando bons resultados na identificação de danos. A Figura 5.14 apresenta os resultados para a EDM no caso 3 para as três longarinas da estrutura. O índice localizou eficientemente o dano, bem como qual longarina se encontra danificada, expresso pelo valor máximo do parâmetro Z_j na Figura 5.14c.

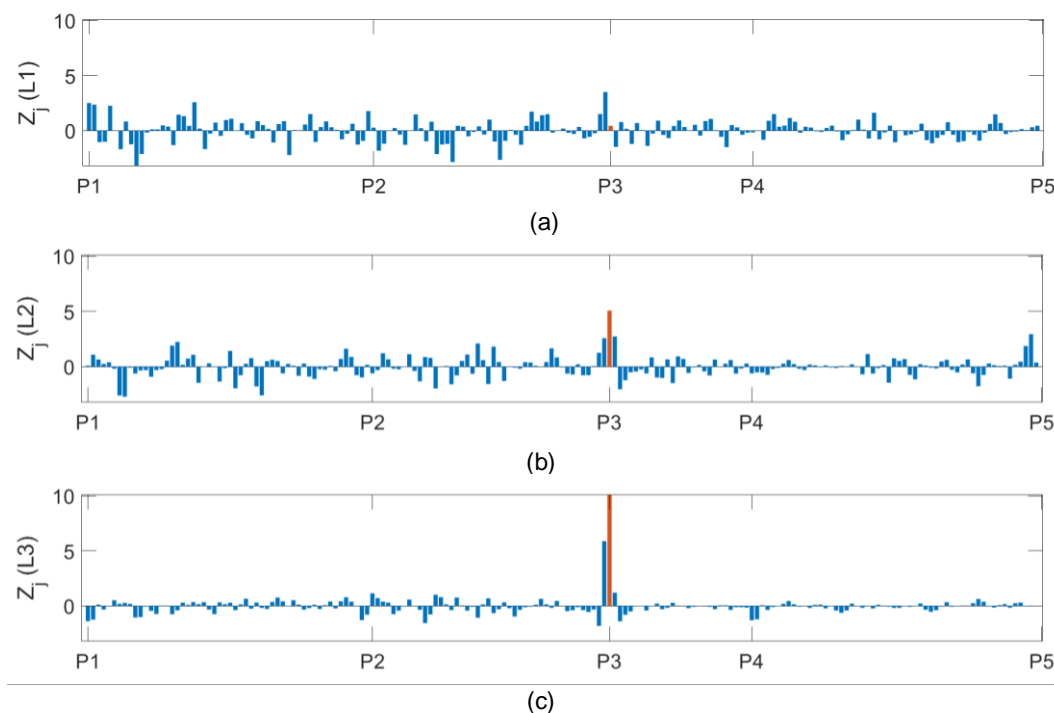


Figura 5.14 – Resultados do Caso 3 para EDM: (a) na L1, (b) na L2, (c) na L3

A Tabela 5.5 apresenta um resumo em relação a eficiência dos índices modais aplicados a passarela analisada nos três casos de danos simulados. É notável que os índices possuem maior sensibilidade nos casos em que os danos se encontram em regiões de maior flexibilidade da estrutura, uma vez que os deslocamentos modais são maiores nessas regiões. Já num trecho mais rígido da estrutura, os índices não apresentam um bom desempenho na detecção de danos, uma vez que os deslocamentos variam numa proporção menor antes e depois da ocorrência do dano. Contudo, a CM e a EDM apresentaram um excelente desempenho localizando corretamente a presença do dano em todos os casos mencionados anteriormente, em particular a EDM, em razão da normalização utilizada pelo método.

Tabela 5.5 – Resumo dos resultados dos índices aplicados aos casos 1, 2 e 3.

Índice \ Caso	Caso 1 (região flexível)	Caso 2 (região flexível-curva)	Caso 3 (trecho rígido)
Vetor Resultante (VR)	✓	✓	✗
Flexibilidade Modal (FM)	✓	✓	✗
Curvatura Modal (CM)	✓	✓	✓
Energia de Deformação Modal (EDM)	✓	✓	✓

5.2

Intensidade de danos

A detecção de um dano em desenvolvimento num elemento estrutural permite uma resposta rápida por parte das equipes de gestão, inspeção e manutenção para evitar prejuízos maiores. Um dos desafios é identificar danos quando estes possuem baixa intensidade, que causam alterações pequenas e difíceis de quantificar nos elementos estruturais. Por outro lado, devido à complexidade da estrutura e dos modos de vibração, os índices de danos podem apresentar resultados ruins até uma determinada intensidade e somente apontar a presença de danos em casos em que a magnitude do dano que já seria crítica. Neste sentido, esta seção avalia a capacidade dos índices de identificar e localizar danos para as três intensidades de dano descritas pela Tabela 4.2. A finalidade desta seção não diz respeito à capacidade de estimar a severidade do dano através dos índices mencionados, mas mostrar que a acurácia do índice pode estar atrelada à intensidade do dano. Todos os gráficos exibidos a seguir são referentes à longarina L1

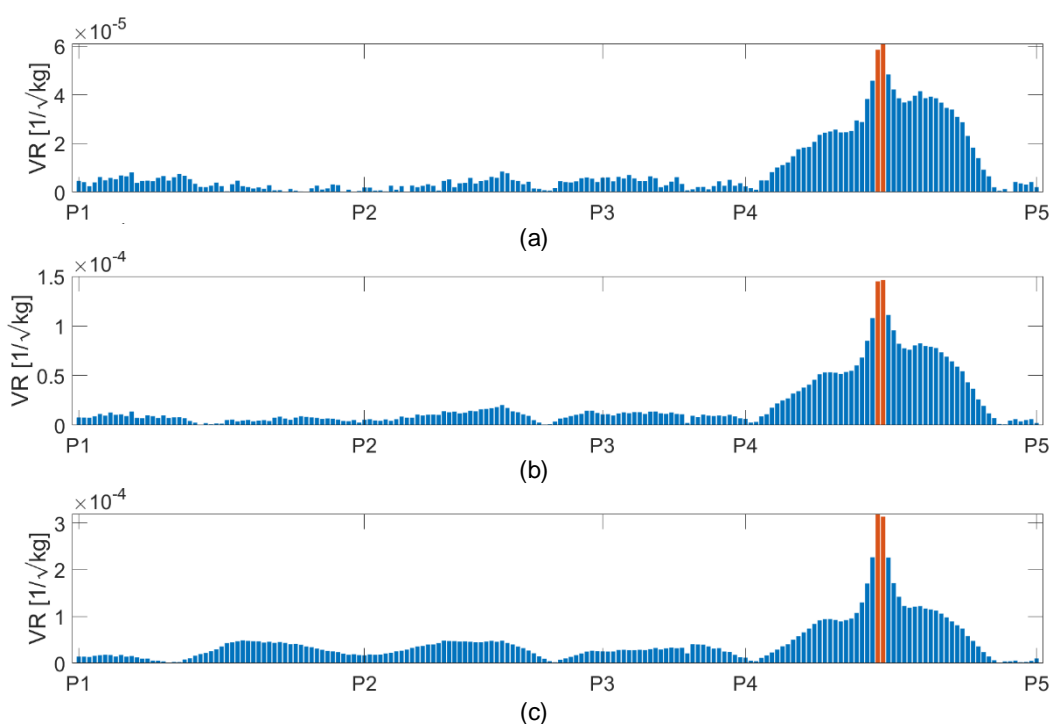


Figura 5.15 – Comparação do VR no Caso 1 para intensidades de danos de:

(a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal.

Os resultados do VR na L1 para estas três intensidades de dano se encontram na Figura 5.15. Observa-se mais uma vez que o índice foi capaz de detectar e localizar corretamente a região e o elemento danificado, independente da magnitude do dano simulado, embora o resultado fique ainda mais evidenciado para danos mais severos.

A FM mais uma vez apresentou um excelente desempenho quando utilizada como índice para detectar o dano no caso 1 nas três intensidades simuladas. O índice apontou corretamente o trecho da estrutura e os nós do elemento danificado, destacados nos gráficos da Figura 5.16.

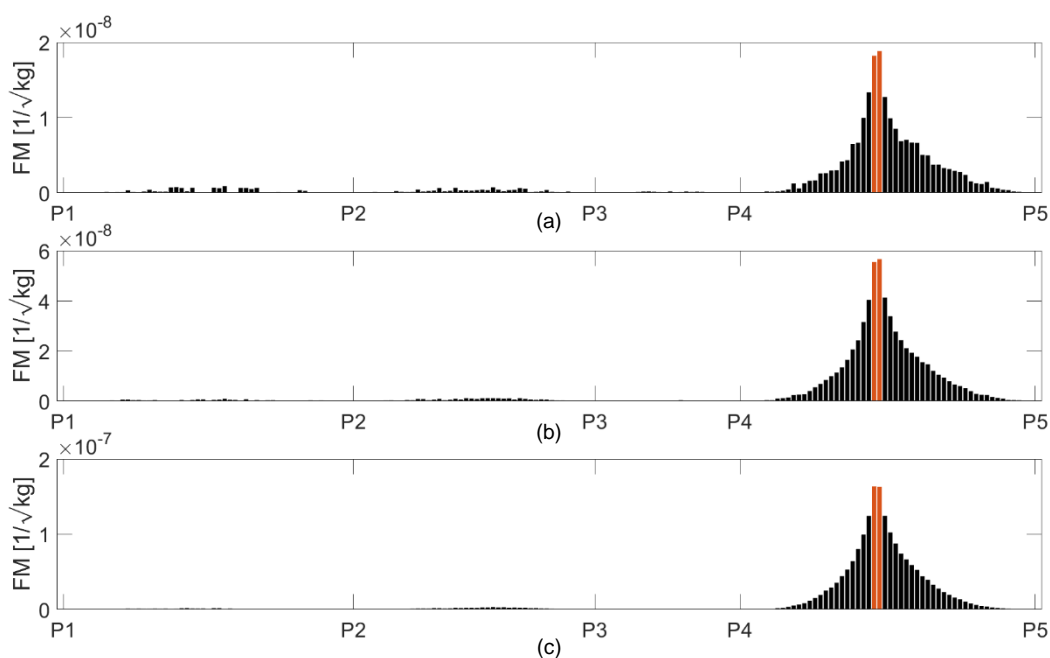


Figura 5.16 – Comparação da FM no Caso 1 para intensidades de danos de:

(a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal

De maneira similar aos casos simulados anteriormente, a CM para os danos que correspondem a 25% de perda da seção transversal por corrosão não foi capaz de localizar corretamente o dano introduzido no modelo. Os diversos picos com valores bem próximos ao valor máximo da variação do índice fora da região danificada dificultam a detecção e podem levar a um falso positivo (Figura 5.17a). No entanto, quando a intensidade do dano se torna expressiva, o índice foi capaz de localizar de forma eficiente o dano, apresentando um valor máximo bem definido em comparação a outras regiões da estrutura (Figura 5.17b, c). Nesse sentido, a utilização do índice está ligada ao menor nível a partir do qual o dano é

detectável, e nesse aspecto, deve-se levar em consideração se este mínimo já não representaria risco eminente de falha para o elemento estrutural analisado.

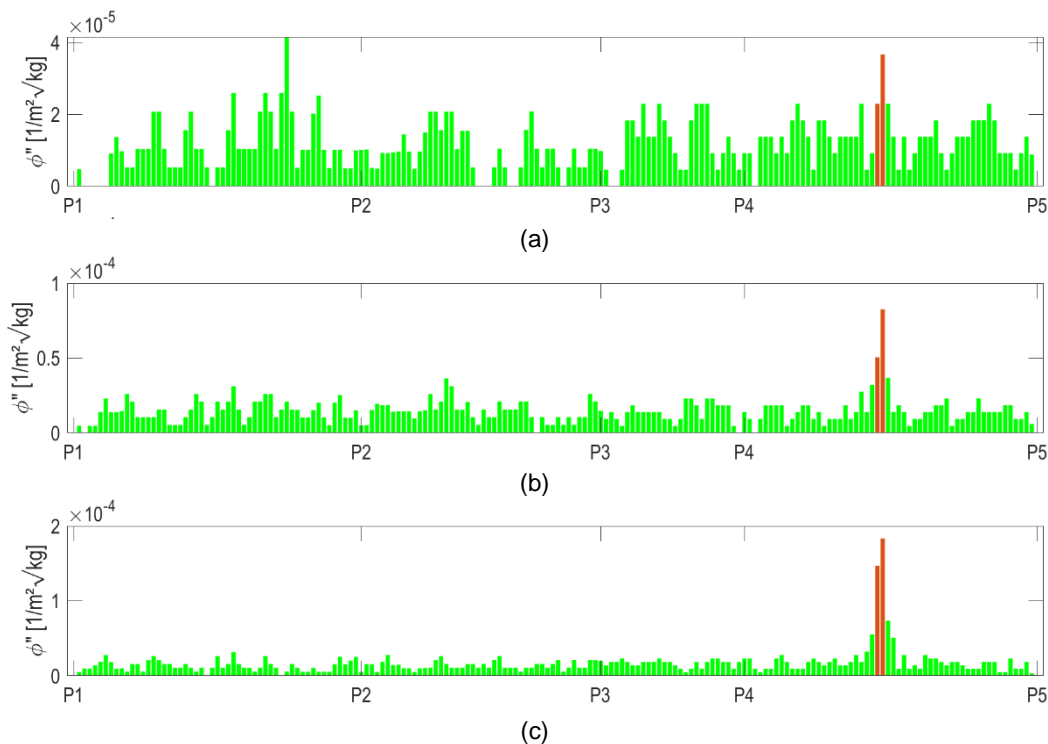


Figura 5.17 – Comparando a CM no Caso de dano 1 para intensidades de danos de:

(a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal.

Por outro lado, a EDM confirma seu bom desempenho na detecção e localização de danos na estrutura. Já para o dano de 25%, o valor máximo do índice localiza corretamente o elemento danificado (Figura 5.18a). A medida em que a magnitude do dano aumenta, o valor máximo do índice na posição do elemento danificado se destaca ainda mais, confirmando a presença de avarias na estrutura (Figura 5.18b, c). Portanto, a EDM é um índice eficiente para detecção e localização de danos independentemente da posição do dano na estrutura e para variadas intensidades de dano.

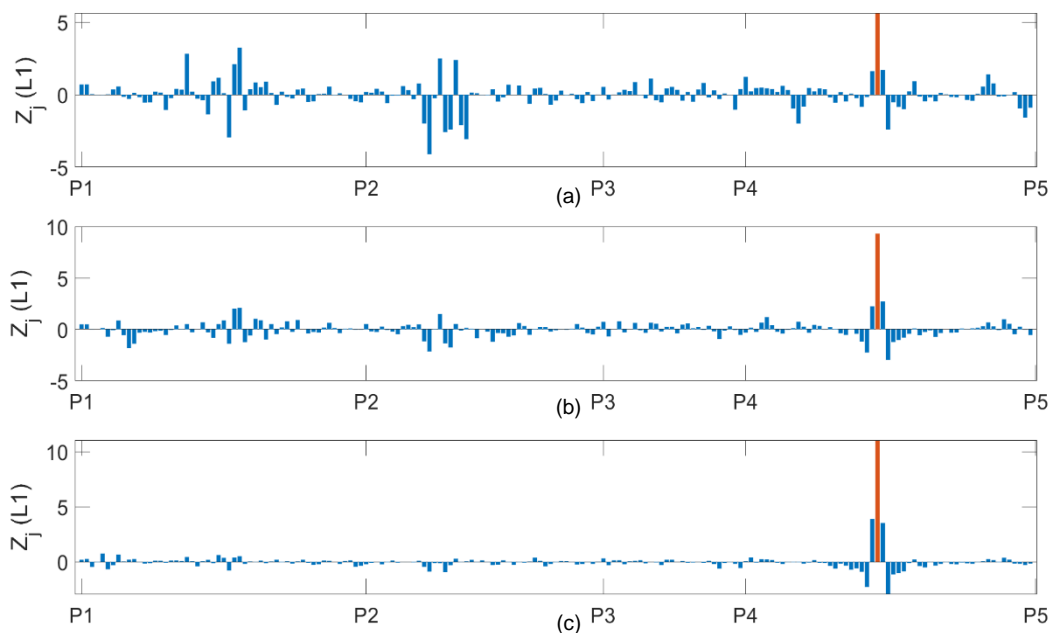


Figura 5.18 – Comparando a EDM no Caso de dano 1 para intensidades de danos de: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75% de redução da seção transversal.

A respeito das frequências naturais, a variação após a ocorrência do dano continua sendo irrisória, mesmo no caso mais severo de 75% de redução da seção transversal, descrito na Tabela 5.6. Desta forma, confirma-se a ineficiência das frequências naturais como indicador de danos para este tipo de estrutura.

Tabela 5.6 – Variação das frequências naturais para o Caso 1 com 75% de redução da seção transversal

Modos	Intacto (Hz)	Dano (Hz)	$ \Delta f $ (%)
1	2,562	2,564	0,0006
2	3,808	3,807	0,0003
3	4,139	4,137	0,0003
4	4,422	4,421	0,0002
5	5,682	5,682	0,0001
6	6,669	6,669	0,0000
7	7,012	7,022	0,0014
8	8,452	8,447	0,0005

Um resumo da avaliação dos índices em relação às intensidades de dano simuladas se encontra na Tabela 5.7. O mesmo comportamento já observado para o caso 1 na seção anterior é demonstrado para danos de baixa intensidade. E quando a severidade do dano é igual ou superior aos 50%, a curvatura modal passa a localizar também a presença de anomalias que possam comprometer a integridade estrutural da longarina.

Tabela 5.7 – Resumo da avaliação da intensidade dos danos nos índices modais.

Índice Caso	Dano 25%	Dano 50%	Dano 75%
Vetor Resultante (VR)	✓	✓	✓
Flexibilidade Modal (FM)	✓	✓	✓
Curvatura Modal (CM)	✗	✓	✓
Energia de Deformação Modal (EDM)	✓	✓	✓

6

Conclusões e investigações futuras

6.1

Conclusões

Este trabalho avalia numericamente a capacidade dos principais índices modais encontrados na literatura, conhecidos como flexibilidade modal, curvatura modal, energia de deformação modal e o índice proposto por Gonçalves (2021), chamado vetor resultante, na detecção de danos de uma passarela com modos de vibração tridimensionais. Este trabalho constitui o passo a diante em relação ao trabalho mencionado anteriormente, no qual os índices foram analisados levando em consideração os aspectos tridimensionais da estrutura completa, sendo verificado para as longarinas adjacentes à danificada, bem como a influência da posição do dano na estrutura e o grau de comprometimento do elemento danificado na estrutura na eficiência destes índices.

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- A eficiência dos índices é bastante condicionada às condições de contorno da estrutura e à geometria da estrutura, condições que por sua vez influenciam diretamente no comportamento dinâmico da estrutura. Índices como VR, FM e CM não tiveram um bom desempenho na região próxima ao pilar P3, devido ao comportamento mais rígido deste trecho da estrutura. Como estes índices são derivados da aplicação direta dos deslocamentos modais, a baixa variação dos modos nestas regiões se reflete na dificuldade de avaliar a ocorrência de danos nesta seção da estrutura;
- As frequências naturais, conforme indicado na revisão de literatura, não variam suficiente a ponto de indicar a posição do dano na estrutura;

- O VR é um índice simples que pode auxiliar numa avaliação preliminar, incorporando deslocamentos modais em quaisquer direções. A FM, de maneira similar, aponta corretamente a região e a longarina danificada. No entanto, estes índices apresentam limitações próximo a região dos apoios;
- A CM aplicada à estrutura da passarela para detecção de danos obteve um bom desempenho indicando com valores máximos a posição do dano. O método reforça a importância da análise dos índices para as demais longarinas da estrutura, uma vez que as longarinas danificadas isoladamente apresentaram diversos picos nos resultados. Além disso, os modos de flexão em que o dano se encontra na região de maiores deslocamentos verticais contribuem expressivamente para a eficiência do índice. No entanto, o índice não foi capaz de localizar corretamente danos de baixa severidade;
- A EDM obteve o melhor desempenho em todos os casos de danos simulados para esta passarela;
- A avaliação simultânea das longarinas se demonstra como necessária uma vez que, em situações reais não se sabe previamente a posição do dano. Os índices em geral, com exceção da EDM, ao menos apontam o vão danificado, sendo um bom indicador para direcionar serviços de inspeção. A EDM, por sua vez, apontou com maior precisão a posição e a longarina danificada, em comparação com os resultados das longarinas adjacentes, atestando a posição real do dano.

A avaliação numérica prévia dos índices para estruturas com concepção arrojada e com modos de vibração compostos, favorece o entendimento de qual índice se adequa melhor, evitando falsos positivos em sistemas de monitoramento.

6.2

Sugestões para futuros trabalhos

Como sequência deste trabalho, são referidas abaixo algumas sugestões para aprimoramento da identificação de danos nesta passarela:

- Avaliação de um índice (seja ele modal ou não) que se aplique na região da mísula (próxima ao pilar P2), uma vez que este trecho da estrutura possui comportamento bastante rígido que reduz bastante a sensibilidade dos índices já mencionados, que são baseados nos deslocamentos modais;
- Investigação dos índices modais para danos presentes em outros elementos estruturais como transversinas e tabuleiros, particularmente nas conexões – regiões bastante suscetíveis a ocorrência de danos -, ocorrendo isoladamente ou simultaneamente,
- Análise dos índices com a introdução de ruídos numéricos e/ou fatores ambientais;
- Aplicação de dados reais de monitoramento da estrutura, com avaliação dos índices a partir do número de limitado de graus de liberdade obtidos, ou ainda, com o ajuste do modelo de elementos finitos (*model update*) aos dados obtidos experimentalmente;
- Criação de um índice ponderado considerando os índices estudados, otimizando fatores (pesos) de acordo com função objetivo (caso de dano);
- Consideração de uma modelagem multiescala em elementos finitos a fim de refinar nos trechos mais rígidos e, conseqüentemente, obter resultados para os índices com maior precisão nestes trechos mais difíceis para detecção de dano;
- Avaliação dos índices para casos de *early damage*, nos quais os danos estão em um estágio muito baixo de desenvolvimento a fim de identificar qual seria o limiar a partir do qual o índice é capaz de identificar o dano.

7

Referências bibliográficas

ABDEL WAHAB, M. M.; DE ROECK, G. Damage detection in bridges using modal curvatures: Application to a real damage scenario. **Journal of Sound and Vibration**, v. 226, n. 2, p. 217–235, 1999.

ALI, S. et al. Damage detection of an innovative composite slab-girder pedestrian bridge using vibration characteristics. **Structure and Infrastructure Engineering**, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. A Comprehensive Assessment of America's Infrastructure. **ASCE**, p. 111, 2021.

BANEEN, U.; KAUSAR, Z. A Baseline-Free Modal Strain Energy Method for Damage Localisation. **International Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 607–618, 2018.

BRAHMA NAIDU, S.; YAMINIEEVALLI, I.; MUTHUMANI, K. Computational methodologies for damage prediction and localization in bridges. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 9, n. 4, p. 803–811, 2018.

CATBAS, F. N.; GUL, M.; BURKETT, J. L. Damage assessment using flexibility and flexibility-based curvature for structural health monitoring. **Smart Materials and Structures**, v. 17, n. 1, 2008.

CHAN, T. H. T.; SHIH, H. W.; THAMBIRATNAM, D. P. **Case studies on vibration based damage identification: Multi-criteria approach**. Proceedings of 2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, ICRMS 2009. **Anais...2009**

CINITHA, A.; UMESHA, P. K.; IYER, N. R. An overview of corrosion and experimental studies on corroded mild steel compression members. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 6, p. 1735–1744, 2014.

DA SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. **UFSC, Florianópolis, 4a. edição**, p. 123, 2005.

DING, Y. et al. Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 6, n. 6, p. 725–739, 2010.

FAN, W.; QIAO, P. Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. **Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 1, p. 83–111, 2011.

FARRAR, C. R. ; W.;, D. S. Lessons learned from applications of vibration-based damage identification methods to a large bridge structure. **International Workshop On Structural Health Monitoring**, 1997.

FOTI, D. Dynamic identification techniques to numerically detect the structural damage. **Open Construction and Building Technology Journal**, v. 7, p. 43–50, 2013.

GONÇALVES, V. A.; GASPAR, C. M. R.; SOTELINO, E. D. Detecção dinâmica de danos em passarelas metálicas utilizando variação de modos de vibração. **XII CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS**, p. 641–650, 2021.

GONÇALVES; VÍTOR ABRAHÃO; **Identificação modal de danos em passarelas metálicas com o uso de Redes Neurais Artificiais**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2021.

GU, Y. Q.; MAO, C. F. Study on damage identification of simply supported-beam based on modal strain energy method. **Applied Mechanics and Materials**, v. 578–579, p. 1204–1207, 2014.

HE, J.; FU, Z.-F. Overview of modal. In: **Modal Analysis**. [s.l.: s.n.]. p. 1–11.

JANELIUKSTIS, R. et al. Damage Identification Dependence on Number of Vibration Modes Using Mode Shape Curvature Squares. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 744, n. 1, 2016.

JAUREGUI, D. V.; FARRAR, C. R. Assessment of damage identification algorithms on experimental and numerical bridge data. **Structures Congress - Proceedings**, v. 2, p. 892–899, 1996.

JAYASUNDARA, N. et al. Vibration-based dual-criteria approach for damage detection in arch bridges. **Structural Health Monitoring**, v. 18, n. 5–6, p. 2004–2019, 2019.

LI, J. et al. Damage localisation and severity evaluation of a beam-like

timber structure based on modal strain energy and flexibility approaches. **Journal of Building Appraisal**, v. 2, n. 4, p. 323–334, 2007.

MORADIPOUR, P.; CHAN, T. H. T.; GALLAGE, C. Benchmark Studies for Bridge Health Monitoring Using an Improved Modal Strain Energy Method. **Procedia Engineering**, v. 188, p. 194–200, 2017.

MOUGHTY, J. J.; CASAS, J. R. A state of the art review of modal-based damage detection in bridges: Development, challenges, and solutions. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 7, n. 5, 2017.

NI, Y. Q. et al. Modal flexibility analysis of cable-stayed Ting Kau bridge for damage identification. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 23, n. 3, p. 223–236, 2008.

NICK, H.; AZIMINEJAD, A. Vibration-Based Damage Identification in Steel Girder Bridges Using Artificial Neural Network Under Noisy Conditions. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 40, n. 1, p. 1–22, 2021.

PANDEY, A.; BISWAS, M.; SAMMAN, M. Damage Detection From Mode Changes in Curvature. **Journal of Sound and Vibration**, v. 145, p. 321–332, 1991.

PANDEY, A. K.; BISWAS, M. Damage detection in structures using changes in flexibility. **Journal of Sound and Vibration**, v. 169, n. 1, p. 3–17, 1994.

PANESSO, A. M.; MARULANDA, J.; THOMSON, P. Experimental evaluation of vibration based damage identification techniques on a pedestrian bridge. **DYNA (Colombia)**, v. 86, n. 209, p. 9–16, 2019.

QUARANTA, G.; CARBONI, B.; LACARBONARA, W. Damage detection by modal curvatures: Numerical issues. **JVC/Journal of Vibration and Control**, v. 22, n. 7, p. 1913–1927, 2016.

RIBEIRO, M. C.; GASPAR, C. M. R.; CARDOSO, D. C. T. **Avaliação do Comportamento Dinâmico de Passarelas Submetidas a Atividades Humanas**. XII CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS. **Anais...**Rio de Janeiro: 2021

RUCEVSKIS, S.; WESOLOWSKI, M. Identification of damage in a beam structure by using mode shape curvature squares. **Shock and Vibration**, v. 17, n. 4–5, p. 601–610, 2010.

RYTTER, A. **Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures**. [s.l.] Aalborg Universit, 1993.

SHIH, H. W.; THAMBIRATNAM, D. P.; CHAN, T. H. T. Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach. **Journal of Sound and Vibration**, v. 323, n. 3–5, p. 645–661, 2009.

SINGH, S. B.; AGGARWAL, S.; PRANAV, S. Evaluation of vibration-based damage detection techniques for RC beams. **Indian Concrete Journal**, v. 94, n. 3, p. 52–60, 2020.

STUBBS, M.; GARCIA, G. Application of pattern recognition to damage localization. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 11, n. 6, p. 395–409, 1996.

STUBBS, N.; KIM, J.; FARRAR, C. R. Field Verification of a Nondestructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**, n. December 2013, 1995.

TAN, Z. X. et al. Damage detection in steel-concrete composite bridge using vibration characteristics and artificial neural network. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 16, n. 9, p. 1247–1261, 2020.

WANG, J. Y.; KO, J. M.; NI, Y. Q. Modal sensitivity analysis of Tsing Ma Bridge for structural damage detection. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**, p. 300–311, 2000.

WANG, S.; XU, M. Modal Strain Energy-based Structural Damage Identification: A Review and Comparative Study. **Structural Engineering International**, v. 29, n. 2, p. 234–248, 2019.

YAN, W.-J.; REN, W.-X. A direct algebraic method to calculate the sensitivity of element modal strain energy. **INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN BIOMEDICAL ENGINEERING**, n. September 2009, p. 17, 2011.

Apêndice

Apêndice A – Resultados da Curvatura Modal separada por modos para os casos 2 e 3

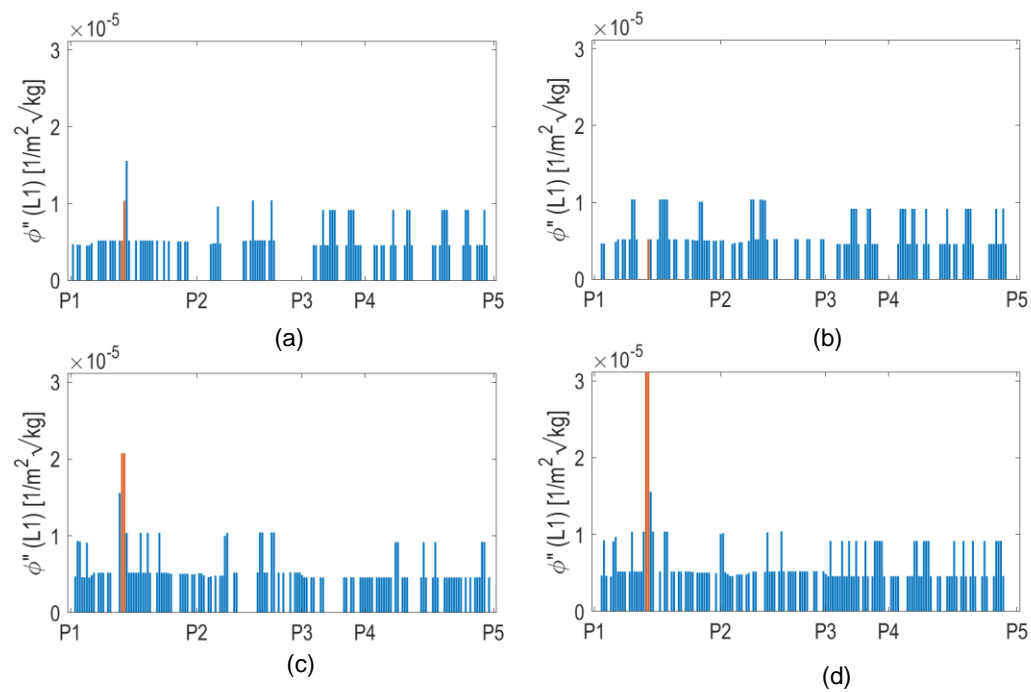


Figura 19 - Curvatura Modal no caso 2 para: (a) modo 2, (b) modo 3, (c) modo 4, e (d) modo 6.

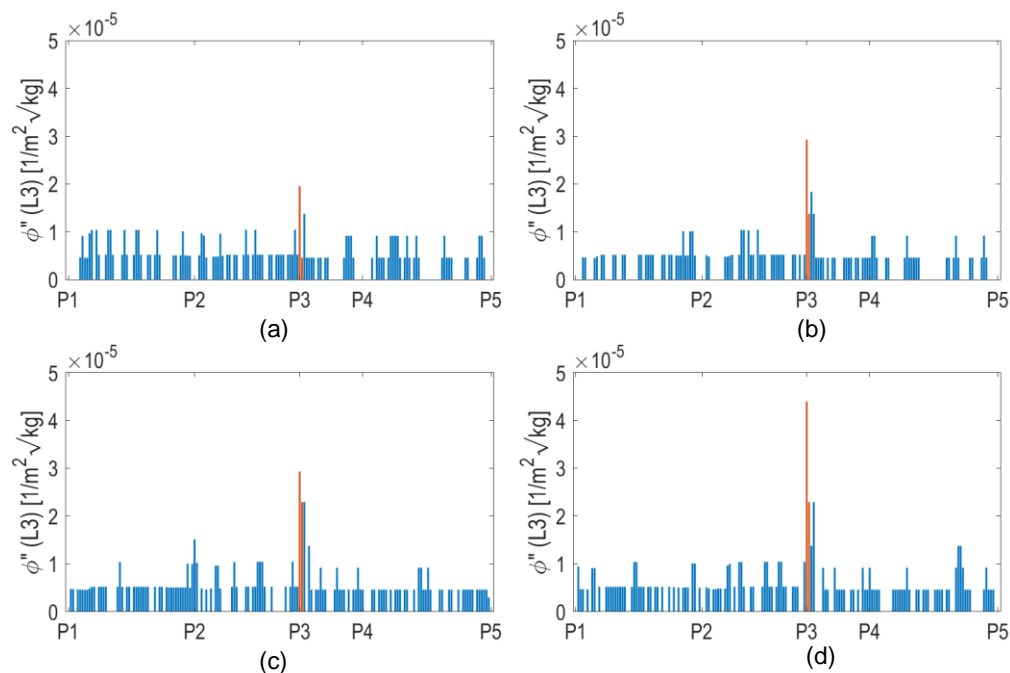


Figura 20 - Curvatura Modal no caso 3 para: (a) modo 2, (b) modo 3, (c) modo 4, e (d) modo 6.

Apêndice B – Código do MATLAB.

Aplicação dos índices de danos

Número de modos utilizados: **8 modos**

Arquivos de entrada e de saída

Leitura dos nós da longarina analisada e dos dados INTACTO:

```
arquivo='DadosRobotR11-p3.xlsx'; %NÃO ALTERAR - leituras dos nós da longarina
arquivo_intacto="INTACTO R11.xlsx"; %NÃO ALTERAR
```

Arquivo de dano (alterável):

DADOS DE ENTRADA:

```
dano_elemento= 810; %alterar
percent=50; %alterar
data= "15 04"; %alterar
nmodes=8; %número de modos de vibração considerados

arquivo_dano=sprintf("DANO%d %d R11.xlsx",percent,dano_elemento)

arquivo_dano = "DANO50 810 R11.xlsx"
```


Dados da estrutura a partir dos arquivos

```

table = readtable(arquivo, 'VariableNamingRule', 'preserve');
nodes = table2array(table(:, [1 6 9]));

elemL1=table2array(table(:,2));
elemL2=table2array(table(:,7));
elemL3=table2array(table(:,10));

elemL1(isnan(elemL1))=[];
elemL2(isnan(elemL2))=[];
elemL3(isnan(elemL3))=[];

elem_num = [elemL1,elemL2,elemL3];

%Por algum motivo quando fazia o "isnan" depois de concatenar
%horizontalmente, virava um vetor linha de 3*numero de elementos.
%Separando os isnan, tá funcionando.

n_elem = numel(elem_num(:,1));
elemsize=table2array(table(:, [3 8 11]));
node_el_size=[nodes elemsize];

nnodes=numel(nodes(:,1));

%Para o xline dos gráficos

[row,col]=find(elem_num==dano_elemento)
node1=nodes(row,col)
node2=nodes(row+1,col)
n1_index=row;
n2_index=row+1;

ticksmedia={'P1' 'P2' 'P3' 'P4' 'P5'};

```

Extraindo resultados da estrutura a partir dos arquivos de entrada

```

casointacto=table2array(readtable(arquivo_intacto, 'VariableNamingRule', 'preserve'));
casodano=table2array(readtable(arquivo_dano, 'VariableNamingRule', 'preserve'));
nnodesresult=numel(casodano(:,1));

```

Acoplando os resultados da estrutura aos nós da estrutura

Este trecho do código põe os resultados da planilha na ordem dos nós da longarina analisada.

- Para estrutura intacta

```

intactoL1=couplingresults(nodes(:,1),nnodes,nmodes,nnodesresult,casointacto);
intactoL2=couplingresults(nodes(:,2),nnodes,nmodes,nnodesresult,casointacto);
intactoL3=couplingresults(nodes(:,3),nnodes,nmodes,nnodesresult,casointacto);

intacto=[intactoL1,intactoL2,intactoL3];

```

- Para estrutura danificada

```

danoL1=couplingresults(nodes(:,1),nnodes,nmodes,nnodesresult,casodano);
danoL2=couplingresults(nodes(:,2),nnodes,nmodes,nnodesresult,casodano);
danoL3=couplingresults(nodes(:,3),nnodes,nmodes,nnodesresult,casodano);

dano=[danoL1,danoL2,danoL3];

```

Função coupling results – organiza os resultados de acordo com a sequência de nós das longarinas analisadas

```
function nodesresults =
couplingresults(nodes,nnodes,nmodes,nnodesresult,caso)

k=1;
nodesresults=zeros((nmodes*nnodes),6);
for i=1:nnodes
    for j=1:nnodesresult
        if caso(j,1)==nodes(i)
            nodesresults(k,:)=caso(j,[1 3:7]);
            k=k+1;
        end
    end
end
end
```

Extração e cálculo da variação das Frequências Naturais

Extraindo as frequências naturais

```
freqint=intacto(1:nmodes,[2 3]); %[Modo, Frequencia em Hz]
freqdano=dano(1:nmodes,[2 3]); %[Modo, Frequencia em Hz]
```

Variação das frequências naturais

```
varfreq=zeros(nmodes,1);
for i=1:nmodes
    varfreq(i)= 100*((freqdano(i,2) - freqint(i,2))/freqint(i,2));
end

deltafreq=[freqdano(:,1) freqint freqdano varfreq];
```

Cálculo do Vetor Resultante

- Estrutura intacta

```
vr_intL1=vres(nodes(:,1),nnodes,nmodes,intactoL1);
vr_intL2=vres(nodes(:,2),nnodes,nmodes,intactoL2);
vr_intL3=vres(nodes(:,3),nnodes,nmodes,intactoL3);
```

- Estrutura danificada

```
vr_damL1=vres(nodes(:,1),nnodes,nmodes,danoL1);
vr_damL2=vres(nodes(:,2),nnodes,nmodes,danoL2);
vr_damL3=vres(nodes(:,3),nnodes,nmodes,danoL3);
```

Função vres – função para cálculo do vetor resultante

```
function vr_int = vres(nodes,nnodes,nmodes,caso)
vr_int=[];
i=1;
for k=1:nnodes
    if nodes(k)==caso(i)
        vr1=0;
        for j=1:nmodes
            if caso(i,2)==j
```

```

        UX=caso(i,4);
        UY=caso(i,5);
        UZ=caso(i,6);
        vr=sqrt(UX.^2+UY.^2+UZ.^2);
        vr1 = vr+vr1;
        i=i+1;
    end
end
vr_int = [vr_int; nodes(k), vr1];
end
end

```

Variação do Vetor Resultante

```

VRfL1=abs((vr_damL1(:,2)-vr_intL1(:,2)));
VRfL2=abs((vr_damL2(:,2)-vr_intL2(:,2)));
VRfL3=abs((vr_damL3(:,2)-vr_intL3(:,2)));

VRFINAL=[nodes, VRfL1, VRfL2, VRfL3];

```

Flexibilidade modal

```

mf_intL1=mflex2(nodes(:,1),nnodes,nmodes,intactoL1);
mf_intL2=mflex2(nodes(:,2),nnodes,nmodes,intactoL2);
mf_intL3=mflex2(nodes(:,1),nnodes,nmodes,intactoL2);

mf_danoL1=mflex2(nodes(:,1),nnodes,nmodes,danoL1);
mf_danoL2=mflex2(nodes(:,2),nnodes,nmodes,danoL2);
mf_danoL3=mflex2(nodes(:,3),nnodes,nmodes,danoL2);

%Usando coordenada Z
MF_L1 = abs((mf_danoL1(:,4) - mf_intL1(:,4)));
MF_L2 = abs((mf_danoL2(:,4) - mf_intL2(:,4)));
MF_L3 = abs((mf_danoL3(:,4) - mf_intL3(:,4)));

VAR_MF=[nodes, MF_L1, MF_L2, MF_L3];

```

Função mflex2 – função para cálculo da flexibilidade modal

```

function modalflex = mflex2(nodes,nnodes,nmodes,modes)
%modos vai corresponder ou intacto ou com dano

modalflex=[];

i=1;
for k=1:nnodes
    flex_x=0;
    flex_z=0;
    flex_y=0;
    for j=1:nmodes
        freq=modes(i,3);
        UX=modes(i,4);
        UY=modes(i,5);
        UZ=modes(i,6);
        flexUY=(1/(freq.^2))*UY.^2;
        flexUZ= (1/(freq.^2))*UZ.^2;
        flexUX=(1/(freq.^2))*UX.^2;
        flex_z=flexUZ+flex_z;
        flex_y=flex_y+flexUY;
        flex_x=flex_x+flexUX;
        i=i+1;
    end
end

```

```

        end
        modalflex = [modalflex; nodes(k) flex_x flex_y flex_z];
    end

```

Curvatura modal

Chamando função para organizar os dados de acordo com os modos

Situação inicial, considerando h = comprimento do elemento

Selecionando modos específicos e organizando modos

```

selectedmodes=[2 3 4 6];
nselected=numel(selectedmodes);

modified_intL1=selectmodes(intactol1,selectedmodes);
modified_intL2=selectmodes(intactol2,selectedmodes);
modified_intL3=selectmodes(intactol3,selectedmodes);

modified_danoL1=selectmodes(danoL1,selectedmodes);
modified_danoL2=selectmodes(danoL2,selectedmodes);
modified_danoL3=selectmodes(danoL3,selectedmodes);

```

Função selectmodes - Função para selecionar e organizar os modos para o cálculo da curvatura

```

function vertmodes = selectmodes(mode,selectedmodes)

vertmodes=[];
nselect=numel(selectedmodes);

for j=1:nselect
    index = mode(:,2)==selectedmodes(1,j);
    vertmodes=[vertmodes; mode(index,:)];
end

vertmodes(:,3)=[]; %deletando a coluna da frequencia natural
end

```

Aplicando casos intacto e com dano na função mcurv5

```

nmodes = nselected;

[curvmodos_L1,curvsum_L1]=mcurv5(nnodes,nmodes,node_el_size(:,[1
4]),modified_intL1,modified_danoL1,selectedmodes);
[curvmodos_L2,curvsum_L2]=mcurv5(nnodes,nmodes,node_el_size(:,[1
4]),modified_intL2,modified_danoL2,selectedmodes);
[curvmodos_L3,curvsum_L3]=mcurv5(nnodes,nmodes,node_el_size(:,[1
4]),modified_intL3,modified_danoL3,selectedmodes);

V_CURVZ=[nodes, curvsum_L1, curvsum_L2, curvsum_L3];

```

Função mcurv5 - Função para selecionar e organizar os modos para o cálculo da curvatura

```

function [curvatura,somacurv] =
mcurv5(nnodes,nmodes,node_el_size,intacto,danificado,selectedmodes)

curvparcial=[]; %será reinicializado a cada loop/modo
curvatura=[]; %resultado final separado por modo
j=1;
somacurv=[]; %resultado final somado

for k=1:nmodes

```

```

index=find(intacto(:,2)==selectedmodes(k),1,"first");
extracted_int=intacto(index:index+nnodes-1,:);
extracted_dano=danificado(index:index+nnodes-1,:);

curvparcial=[intacto(j,1),selectedmodes(k),0,0,0]; %Aplicou valor
zero nos apoios
j=j+1;

for i=2:(nnodes-1)
    h=mean([node_el_size(i-1,2), node_el_size(i,2)]);
    curv_int=( extracted_int(i+1,5) - 2*extracted_int(i,5) +
extracted_int(i-1,5) )/h.^2;
    curv_dano=( extracted_dano(i+1,5) - 2*extracted_dano(i,5) +
extracted_dano(i-1,5) )/h.^2;
    diff = abs(curv_dano - curv_int);
    curvparcial = [curvparcial; extracted_int(i,1),
extracted_int(i,2), curv_int, curv_dano, diff];
    j=j+1;
end

curvparcial=[curvparcial;intacto(j,1),selectedmodes(k),0,0,0];
%Aplicou valor zero nos apoios
curvatura=[curvatura;curvparcial];

end

modo2=curvatura([1:nnodes],5);
modo3=curvatura([(nnodes+1):(2*nnodes)],5);
modo4=curvatura([(2*nnodes+1):(3*nnodes)],5);
modo6=curvatura([(3*nnodes+1):(4*nnodes)],5);

somacurv(:,1) = extracted_int(:,1); %aplica numero dos nós no somacurv

somacurv(:,2)=(modo2+modo3+modo4+modo6);

% "curvatura" retorna a curvatura em cada nó, separado pelos n modos.
Dimensão da matriz: (nmodes*nnodes,5)

end

```

MSE – Energia de Deformação Modal

Flexão Vertical - Utilizando como $f(x)$ a coordenada modal vertical ϕz

```

[mse_L1,z_L1]=mseelem41(nnodes,nnodes,elem_num(:,1),n_elem,elemsize(:,1),curv_
intL1,curv_danoL1,selectedmodes);

[mse_L2,z_L2]=mseelem41(nnodes,nnodes,elem_num(:,1),n_elem,elemsize(:,1),curv_
intL2,curv_danoL2,selectedmodes);

[mse_L3,z_L3]=mseelem41(nnodes,nnodes,elem_num(:,1),n_elem,elemsize(:,1),curv_
intL3,curv_danoL3,selectedmodes);

```

Função mseelem41 – Função para cálculo da EDM

```

function [mse2,z_nmodos] =
mseelem41(nnodes,nnodes,elemnumbers,n_elem,elemsize,curvint,curvdano,sele
ctedmodes)

% Integração numérica usada: regra do trapézio
%resultado informado pela variavel mse é o denominador ou numerador

%versão nova em 12/08/2022

```

```

mse=[];
mse2=[];
modo=zeros(n_elem,1);
z_soma=zeros(n_elem,1);
z_nmodos=zeros(n_elem,2);

NUM_soma=zeros(n_elem,1);
DEN_soma=zeros(n_elem,1);

for k=1:nmodes

    index=find(curvint(:,2)==selectedmodes(k),1,"first");
    intacto=curvint(index:index+nnodes-1,:);
    dano=curvdano(index:index+nnodes-1,:);

    mse_elem_int=zeros(n_elem,1);
    mse_elem_dano=zeros(n_elem,1);

    NUM=zeros(n_elem,1);
    DEN=zeros(n_elem,1);

    j=1;

    %Calculo da integral em cada elemento
    for i=1:(n_elem)
        mse_elem_int(i)=(elemsize(i)/2)*(intacto(j,3).^2 +
        intacto(j+1,3).^2);
        mse_elem_dano(i)=((elemsize(i)/2)*(dano(j,3).^2 +
        dano(j+1,3).^2));
        j=j+1;
    end

    %Somatório total
    mse_total_int = sum(mse_elem_int);
    mse_total_dano = sum(mse_elem_dano);

    %Cálculo do índice
    % O uso do ponto já calcula pra cada elemento, não precisa do for.
    Acima preferi manter

    NUM =(mse_elem_dano./mse_total_dano)+1;
    DEN =(mse_elem_int./mse_total_int)+1;

    modo(:,1)=selectedmodes(k);

    mse=[elemnumbers, modo , NUM, DEN]; %Esse intacto(index:index,2) é
    só pra manter a mesma dimensão do vetor indicando qual é o modo. pode
    seria tb com o vetor do danificado

    NUM_soma=NUM_soma+NUM;
    DEN_soma=DEN_soma+DEN;

    mse2=[mse2;mse];

    z_soma=NUM_soma./DEN_soma;
end

z_nmodos(:,1)=elemnumbers;
z_nmodos(:,2)=normalize(z_soma)
z_nmodos(:,3)=NUM_soma;
z_nmodos(:,4)=DEN_soma;
end

```