UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Hugo Aguiar Vitório Mendonça

Análise comparativa de métodos de identificação de dano em vigas de aço

Maceió 2024

HUGO AGUIAR VITÓRIO MENDONÇA

Análise comparativa de métodos de identificação de dano em vigas de aço

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wayne Santos de Assis

Maceió 2024

Catalogação na Fonte Universidade Federal de Alagoas Biblioteca Central Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto - CRB-4 - 1767

M539a	Mendonça, Hugo Aguiar Vitório. Análise comparativa de métodos de identificação de dano em vigas de aço / Hugo Aguiar Vitório Mendonça 2024. 85 f. : il.
	Orientador: Wayne Santos de Assis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.
	Bibliografia: f. 81-85.
	1. Identificação, Métodos de. 2. Análise modal. 3. Planejamento de experimentos. 4. Vigas. I. Título.
	CDU:624.072.2





ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM VIGAS DE AÇO

HUGO AGUIAR VITORIO MENDONÇA

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 25 do mês de março do ano de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis (Orientador – PPGEC/UFAL)

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima (Avaliador Interno – PPGEC/UFAL)

Prof. Dr. Higor Sérgio Dantas de Argôlo (Avaliador Externo ao Programa – UFS)

Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas Tel/Fax: (82) 3214-1863 E-mail: <u>ppgec@ctec.ufal.br</u> Homepage: www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec

RESUMO

O presente trabalho realizou uma análise comparativa entre métodos de identificação de dano baseados na análise modal, de modo a auxiliar no processo de Monitoramento da Integridade Estrutural (do inglês Structural Health Monitoring - SHM) em vigas de aço. Para isso, foram usados modelos de vigas de aço gerados em software comercial de elementos finitos Abaqus, modelados com diferenças em parâmetros como nível de dano, localização do dano e tipo de suporte. Após obtenção dos resultados de deslocamento da deformada modal são adicionados mais dois parâmetros: nível de ruído e o uso ou não de um método de filtragem de ruídos para suavizar os resultados. Como são quatro os métodos de identificação de dano comparados: Diferença da Curvatura Modal (DCM), Diferença da Curvatura Modal Modificada (DCMM), Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração (MSDBI) e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado (MSDBIM), foi realizado um Planejamento de Experimentos (do inglês Design of Experiments – DOE) para comparar e verificar a eficácia de cada método em identificar e possivelmente localizar os danos, além de observar a capacidade de distinção entre diferentes níveis de dano para cada combinação por meio de análise estatística que se estendeu para definir a influência dos parâmetros na resposta de cada um dos métodos de identificação de dano. Os resultados obtidos mostraram que os métodos estudados são muito eficientes em condições de operação sem ruídos, porém a presença de ruídos dificulta a correta identificação de dano, mesmo com a utilização da filtragem de ruídos para suavizar os dados modais. Os métodos modificados localizaram melhor o dano em relação aos originais, e os métodos DCM e DCMM localizaram melhor o dano em relação aos métodos MSDBI e MSDBIM.

Palavras-chave: métodos de identificação de dano, análise modal, planejamento de experimentos.

ABSTRACT

This research aimed to perform a comparative analysis between damage identification methods based on modal analysis, to cooperate with the Structural Health Monitoring (SHM) process in steel beams. To achieve that, steel beam models were be generated via commercial finite elements software Abaqus with differences in parameters such as damage level, damage location and boundary conditions. After obtaining results for mode shape displacement, two more parameters are added: noise level and the use or not of a curve fit to smooth data. As there are four methods of damage identification compared: DCM, DCMM, MSDBI and MSDBIM, it was issued a full factorial Design of Experiments (DOE) to analyze and to check the effectiveness of each method in detecting and possibly localizing damage, in addition to observe the ability to distinguish different levels of damage to each model through statistical analysis that was extended to study the influence of factors in the problem response of each damage identification methods. The results obtained show that the methods have high effectiveness to locate damage in noiseless conditions, however the presence of noise decreases the correct identification of damage, even with regression fit to smooth modal data. The modified methods performed better when compared to the originals, and the methods DCM and DCMM located the damage more easily than MSDBI and MSDBIM.

Keywords: damage identification methods, modal analysis, design of experiments.

1. INT	RODUÇÃO	6	
1.1.	Justificativa	8	
1.2.	Objetivos	8	
2. REFERENCIAL TEÓRICO9			
2.1.	Dano em estruturas	9	
2.2.	Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM)	13	
2.3.	Dinâmica das estruturas	18	
2.4.	Análise modal	19	
2.4.	1. Diferença da Curvatura Modal (DCM)	23	
2.4.2	2. Indicador Baseado em Dados de Modos de Vibração (MSDBI)	25	
2.5.	Ruído em dados modais	27	
2.6.	Análise estatística	29	
3. METODOLOGIA			
3.1.	Cenários estudados		
4. RESULTADOS		41	
4.1.	Cenário 1	41	
4.2.	Cenário 2	44	
4.3.	Cenário 3	47	
4.4.	Cenário 4	49	
4.5.	Cenário 5		
4.6.	Cenário 6	54	
4.7.	Cenário 7	56	
4.8.	Cenário 8	59	
4.9.	Cenário 9	61	
4.10.	Cenário 10	63	
4.11.	Cenário 11	66	
4.12.	Cenário 12	68	
5. DISCUSSÕES		71	
5.1.	Análise do DOE – iteração 1	72	
5.2.	Análise do DOE – iteração 2	77	
6. Conclusões			

1. INTRODUÇÃO

A engenharia deve suprir as necessidades da sociedade com os menores custos possíveis durante o ciclo de vida da edificação, por meio do equilíbrio entre os custos de manutenção e os custos de construção (Figura 1), mantendo a segurança estrutural. Apenas considerando os Estados Unidos, estima-se que cerca de 230.000 pontes necessitam de manutenção, com custo estimado de cerca de U\$22.7 bilhões ao ano (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2021).





Fonte: Adaptado de Possan e Demoliner (2013).

Fatores como o aumento da concentração populacional em centros urbanos e a verticalização das cidades resultaram em construções civis mais esbeltas e desafiadoras do ponto de vista estrutural. Tais construções são possíveis em parte devido a melhores técnicas de construção, dos materiais utilizados, da qualificação de mão de obra especializada e da constante evolução das normas, o que cria, em estruturas de grande porte, uma recomendação de monitoramento de desempenho que assegure o funcionamento de forma segura dessas estruturas por toda a vida útil.

O desenvolvimento da engenharia estrutural se traduz em estruturas mais complexas e otimizadas, o que possibilita que estas trabalhem mais próximas da falha, fato que traz mais

atenção ao processo de danificação. Ao mesmo tempo, houve avanços consideráveis no entendimento de como os materiais falham e na prevenção destas, sendo fundamental que os engenheiros estruturais conheçam e apliquem as melhores práticas disponíveis (ANDERSON, 2017; FERREIRA e HANAI, 2017).

O surgimento de danos leva à diminuição das seções transversais e/ou da rigidez da estrutura. Essas alterações físicas em relação à estrutura íntegra são utilizadas em várias técnicas que visam a detecção do dano. Tradicionalmente, a identificação do dano em estruturas civis é realizada a partir de inspeções visuais baseadas no conhecimento do inspetor e nos limites operacionais de esforços, deformações ou condições de estabilidade estrutural.

O dano pode surgir e progredir a um colapso estrutural devido a múltiplas condições adversas causadas por fatores naturais ou ligados à intervenção humana. Tal colapso pode ser catastrófico em termos de perdas de vidas, econômicas, e em relação aos impactos sociais subsequentes, motivos mais que suficientes para demonstrar a necessidade de identificar o dano antes do colapso estrutural (AVCI et al., 2021; HOU e XIA, 2020).

Para identificar danos e suprir a demanda de estruturas que sofrem o processo de envelhecimento e deterioração, surgiu o ramo do Monitoramento da Integridade Estrutural, do termo originário *Structural Health Monitoring* (SHM) que visa acompanhar, de forma não destrutiva, as características relacionadas à vida útil de um componente ou sistema estrutural durante sua operação, possibilitando a identificação da ocorrência de danos nos estágios iniciais, por meio da captação de dados via sensores, com posterior processamento e análise desses dados, permitindo um maior nível de segurança estrutural (ADAMS, 2007; ASSIS, 2007; PEREIRA, 2012).

Um bom método de identificação de dano pode ser tido como aquele que é capaz de identificar o dano rapidamente com rigor e que seja utilizável em situações diversas. Para utilizações práticas, este método deve ser replicável em processos de automação e possuir um sistema de funcionamento independente do utilizador, evitando subjetividades. No processo de escolha do método, devem ser considerados fatores como a tipologia da estrutura, além da facilidade de acesso aos elementos e tipo de equipamento disponível em caso de ensaio experimental (GUERREIRO, 2014).

1.1. Justificativa

Na prática é impossível evitar completamente a existência de fissuras ou de falhas nos materiais utilizados em construções por maior que seja o controle de qualidade, pois todos os elementos têm descontinuidades e microfissuras inerentes ao próprio processo de fabricação, o que deve ser evitado é a fratura do componente estrutural. A fratura pode ser definida como a ruptura de um componente estrutural ou como a rápida expansão de uma fissura que se traduz em grandes deformações, na perda da capacidade de resistir às cargas de projeto devido à redução de rigidez ou mesmo no completo colapso estrutural.

O campo de Patologia das Estruturas vem recebendo mais atenção nos últimos anos e já é possível encontrar uma vasta literatura destinada à recuperação e à reabilitação de estruturas que apresentem manifestações patológicas. O processo de degradação é natural e resta aos engenheiros responsáveis identificar e corrigir os problemas no estágio inicial, o que é improvável quando o único tipo de inspeção é visual. Estruturas de grande porte como pontes, túneis e barragens causam grandes transtornos à população caso ocorram problemas graves como falha estrutural ou interdição para manutenções. Para atenuar esses problemas, podem ser utilizados métodos de identificação de dano não-destrutivos conjuntamente à análise automatizada em tempo real dos dados obtidos.

Na busca de contribuir com esta área da engenharia, o presente trabalho visa comparar métodos de identificação de dano que utilizam a análise modal em situações variadas de danificação e encontrar qual, dentre estes, é o mais apropriado para cada situação estudada.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo analisar comparativamente quatro métodos de identificação de dano em relação à capacidade de identificar, localizar e distinguir diferentes níveis de danificação em variadas combinações de parâmetros para vigas de aço. Este objetivo é baseado na capacidade dos métodos estudados de identificarem dano, na capacidade dos métodos distinguirem distintos níveis de danificação e no estudo da influência da variação dos níveis dos parâmetros na variável resposta por meio de simulações computacionais. Por serem diversos os parâmetros variados, espera-se definir qual dos métodos estudados é o mais competente em identificar e localizar dano em vigas de aço com o auxílio da análise estatística, para auxiliar os profissionais da área de monitoramento estrutural caso surja a oportunidade de escolher apenas um deles para acompanhamento de uma estrutura real.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para a utilização dos métodos de identificação de dano, este capítulo apresenta, de forma resumida, conceitos sobre dano em estruturas, monitoramento da integridade estrutural, dinâmica das estruturas, análise modal, ruído em dados modais e análise estatística.

2.1. Dano em estruturas

Profissionais da área de Engenharia das Estruturas e a sociedade em geral têm cada vez mais se preocupado com a vida útil de estruturas, o que acarreta a busca de técnicas eficientes para identificação de danos em estruturas e no desenvolvimento progressivo de pesquisas na área de integridade estrutural. O problema de identificação do dano é complexo devido à grande quantidade de variáveis envolvidas, sejam elas experimentais ou computacionais (SILVA, 2015; MORALES, 2012).

Dano, de forma geral, é definido como uma mudança, proposital – no caso de experimentos – ou não, que afeta negativamente o material ou as propriedades das estruturas, como mudanças nas condições de contorno e na conectividade do sistema, na geometria da seção transversal ou em qualquer outro fator que provoque comportamento indesejado na estrutura. De forma simples, o dano em estruturas civis é tido como a diminuição da rigidez de um ou vários elementos devido a uma redução no módulo de elasticidade do material. O dano afeta o desempenho presente e/ou futuro da estrutura (ADAMS, 2007; FARRAR e WORDEN, 2013; MORALES, 2009).

A crescente necessidade de avaliação de estruturas existentes para propósitos de manutenções durante a vida útil faz com que os métodos de identificação de dano sejam cada vez mais estudados. Tais métodos tiveram uma evolução lenta e estável até a popularização dos computadores pessoais e da programação, que possuem maiores capacidades de armazenamento e de processamento de dados, permitindo uma evolução mais rápida e dinâmica, além de possibilitar que os métodos sejam modelados e testados computacionalmente (GATTULLI, 2016).

O processo de identificação de danos é geralmente estruturado nos seguintes níveis (RYTTER, 1993; WENZEL, 2008):

- Nível 1: Detecção de dano é identificado se existe ou não dano;
- Nível 2: Localização do dano considera que a estrutura está danificada e determina a localização do dano;
- Nível 3: Extensão do dano determina a severidade do dano;

• Nível 4: Vida útil - vida útil remanescente após o dano quantificado.

Pereira (2012) adicionou um nível intermediário, para que seja especificado qual o tipo de dano está presente na estrutura, resultando em uma sequência hierárquica de níveis como visto na Figura 2.





Fonte: Adaptado de Pereira (2012).

Farrar e Worden (2013) dizem que os engenheiros e os cientistas dos materiais são os profissionais que mais estudam o dano. A abordagem ao problema é usualmente feita por uma ou mais das seguintes perguntas:

- i. Existe dano?
- ii. Qual é a causa do dano?
- iii. Uma vez presente, como os efeitos do dano podem ser mitigados?
- iv. Quão rápido o dano se espalhará e ultrapassará os limites críticos?
- v. O que pode ser feito para prevenir o dano no futuro?

É possível responder cada pergunta com foco diferente baseado no objetivo do profissional. Para a classe dos engenheiros civis, por exemplo, o item i está ligado à mera identificação do dano, a pergunta ii serve para refletir sobre possíveis alterações estruturais, seja no projeto ou nas técnicas de execução, que evitem o surgimento de dano em casos similares. O item iii carrega a ideia de intervenção na estrutura com manutenções corretivas. O item iv traz a questão se será necessário interditar a estrutura e evacuar as áreas pertinentes. Já o item v preocupa-se em encontrar os tipos de manutenção preventiva mais viáveis para cada situação. O pesquisador, para definir uma metodologia de identificação de dano, deve responder algumas questões (MORALES, 2012):

- i. Qual será o modo de representação do dano?
- ii. Haverá utilização de modelo numérico para a condição íntegra?
 - a. Esse modelo é adequado?
- iii. A resposta da estrutura é suficientemente sensível aos níveis de dano esperados?
- iv. Qual a qualidade esperada para as medições realizadas?
- v. Quanta informação deve ser obtida para garantir a identificação do dano de forma confiável?

Morales (2012) explica que o modo de representação do dano tem a ver com a modelagem do dano, ou seja, quais parâmetros estruturais – massa, amortecimento e rigidez - são afetados quando há dano. Em estruturas não amortecidas, é comum dizer que apenas a matriz de rigidez é afetada. Um modelo numérico para a condição íntegra deve ser definido com cautela, pois pode apresentar muitos erros devido a condições de contorno, conexões, fontes de rigidez, malha de elementos finitos e tipos de elementos utilizados. Quanto ao nível de sensibilidade e a qualidade da resposta da estrutura, é necessário levar em consideração se os métodos escolhidos são capazes de identificar o dano e apenas o dano, ou seja, aqueles devem distinguir o que é dano e o que é ruído nas medições, mesmo que para isso precisem de técnicas adicionais de "filtragem" dos resultados. A última questão está diretamente ligada à locação otimizada de sensores e de observações, visto que alguns métodos, para identificarem corretamente o dano, precisam de medições pouco práticas.

Defeitos como microfissuras e vazios ocorrem em elementos estruturais antes mesmo da aplicação de carregamentos devido a defeitos de fabricação ou problemas de estocagem e transporte no caso de pré-fabricados. Para materiais de comportamento frágil provocam a alteração das linhas de tensões, que causam uma concentração de tensões e o consequente processo de evolução das fissuras (Figura 3). A cada ciclo ou instante de carregamento este efeito é intensificado até que a estrutura perca sua capacidade de suporte, chegando assim à ruína (JUNIOR, 2014; LIMA JUNIOR, 2020; PITUBA, 2003; VAN MIER, 2013).



Figura 3 - Processo de fissuração em materiais de comportamento frágil.

Fonte: Adaptado de Junior (2014).

Nas estruturas de metal a fissura normalmente surge por um processo lento e estável devido a repetidas aplicações de ciclos de carregamento acima de um certo limite ou por um processo rápido e instável de fratura. Em um metal quando uma fissura se propaga ocorre um movimento de deslocamento nos arredores da ponta da fissura, região que sofre plastificação. O regime plástico diferencia-se do elástico pois aquele produz deformações permanentes, irreversíveis. Para que haja o crescimento da fissura em metais, é necessário que existam descontinuidades e que haja tensões de tração normais às descontinuidades (ANDERSON, 2017; DEUS, 1997; RUSSO et al., 2016).

Metais estruturais falham de maneira dúctil ou de maneira frágil, a depender de condições como temperatura, velocidade da deformação, resistência à rigidez e condições de contorno. O comportamento dúctil é tipicamente precedido de grande plastificação, com deformações lentas, e a superfície de falha tem uma orientação de aproximadamente 45 graus em relação à tensão aplicada. Já o comportamento frágil ocorre com pouca ou nenhuma plastificação do aço, sendo uma falha mais abrupta, mais rápida e a falha ocorre em uma orientação normal à tensão aplicada. Ainda sobre o comportamento de materiais utilizados na engenharia estrutural, temse, na Tabela 1 o comportamento típico de fratura de alguns deles (RUSSO et al., 2016).

Material	Comportamento típico de fratura
Aço de alta resistência	Elástico linear
Aço de baixa e média resistência	Elástico plástico
Metais submetidos a altas temperaturas	Viscoplástico
Metais submetidos a grandes taxas de	Dinâmico viscoelástico
deformação	
Cerâmicas monolíticas	Elástico linear
Compósitos cerâmicos	Elástico linear
Cerâmicas submetidas a altas temperaturas	Viscoplástico

Tabela 1 - Comportamento típico de fratura em certos materiais. Adaptado de Anderson (2017)

Tanto os concretos de alta resistência quanto os aços de alta resistência utilizados na construção civil sob condições normais de solicitação à fissuração apresentam crescimento da fissura tipicamente instável quando a energia necessária para aumentar a fissura é menor que a energia liberada por uma extensão incremental da fissura, ou seja, a fissura se propaga mesmo sem o aumento do carregamento externo, levando possivelmente a estrutura a um colapso catastrófico (FERREIRA e HANAI, 2017).

Os métodos de identificação de dano aplicados computacionalmente usualmente baseiam-se em problemas de modelagem para caracterizar a estrutura. Deve-se ter em mente que um modelo é como a pintura de uma paisagem: pode-se tentar ao máximo reproduzir aquela paisagem, mas sempre existirão diferenças, ou seja, um modelo busca ao máximo aproximar-se da realidade, mas ele nunca pode ser tido como a estrutura por si própria e as considerações apropriadas nada mais fazem que minimizar os erros. Para modelagem em elementos finitos, é ainda necessário utilizar malha apropriada e entender que, ao inserir dano em um elemento, o elemento inteiro é tido como danificado, logo, para danos locais, é interessante ter uma discretização apropriada (MORALES, 2012).

2.2. Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM)

Tradicionalmente, a identificação do dano é baseada em inspeções de cunho visual, realizadas por um inspetor especializado. Já a resposta para o dano, do ponto de vista da engenharia tradicional, é a realização de manutenções e a definição de limites operacionais, relacionados aos esforços, deformações ou condições de estabilidade da estrutura. Muito embora esse sistema seja útil para a detecção e a reparação de danos superficiais como fissuras, elas são incapazes

de detectar danos internos e/ou pequenos, como corrosão interna e danos em locais de difícil acesso. A dificuldade de acesso é uma das principais desvantagens, pois compromete a segurança dos inspetores e aumenta os custos envolvidos. Além disso, por ser realizado diretamente por um inspetor, as condições da estrutura terminam sendo subjetivas, o que pode causar diferenças no julgamento entre dois inspetores. A falta de efetividade desses processos de inspeção, em conjunto com a idade avançada de algumas estruturas resulta em uma dificuldade crescente de se manter a integridade das estruturas (AN et al., 2019; FARRAR e WORDEN, 2013; FERREIRA, 2008).

A inspeção visual de estruturas, tanto após acidentes quanto em condições de operação, tem como grande impedimento o fato de que as conexões e pontos críticos da estrutura são usualmente cobertas por revestimentos ou outras soluções arquitetônicas. A inspeção local realizada por profissionais muitas vezes é atrasada devido a condições climáticas, falta de iluminação, equipamentos apropriados, inacessibilidade ao terreno e outras dificuldades de campo (AVCI et al., 2017; KIREMIDJIAN et al., 1997).

O SHM serve para mitigar estes problemas e atender à demanda das estruturas que sofrem o processo de envelhecimento e deterioração. O SHM auxilia também a identificação de estruturas criticamente danificadas, mas não detectadas prontamente, além de possibilitar que acidentes em estruturas como barragens sejam rapidamente comunicados à população e aos órgãos governamentais, permitindo correta evacuação da população e alocação de equipes de resgate (KIREMIDJIAN et al., 1997).

O processo do SHM pode ser implementado como uma estratégia capaz de identificar danos a estruturas dos mais diversos campos, de engenharia mecânica a aeroespacial, de forma remota e contínua. Tais campos requerem elevada precisão e exatidão e possuem sistemas de SHM largamente implementados há vários anos. Um exemplo didático são os sensores de temperatura e pressão instalados em automóveis: caso a temperatura do motor passe dos limites projetados, o motorista é avisado por uma luz ou mensagem no painel. Isso vale também para os sensores de pressão: instalados nos pneus, verificam se a pressão está diferente da recomendada pelo fabricante, caso positivo, surge uma mensagem no painel que avisa o problema para o motorista. O campo da engenharia civil ingressou tardiamente nesse ramo e requer diferentes abordagens, porém tem muito a se beneficiar do SHM. Embora o ingresso tenha ocorrido tardiamente, a produção acadêmica e o avanço na área de SHM ligada a estruturas de civis é massiva nos últimos anos (KIREMIDJIAN et al., 1997; WENZEL, 2008).

Um sistema de SHM é um processo científico não-destrutivo de acompanhar as seguintes características relacionadas à vida útil de um componente ou sistema estrutural durante sua operação (ADAMS, 2007):

- i. As cargas que atuam na estrutura;
- ii. O dano mecânico causado pelas cargas;
- iii. O processo de danificação da estrutura;
- iv. O desempenho futuro da estrutura após a deterioração.

Os sistemas de SHM se valem de tecnologias como sensores, sistemas de aquisição de dados, sistemas de transmissão de dados, técnicas de processamento de sinal etc., para complementar as inspeções tradicionais, possibilitando a identificação, localização e quantificação de dano, além da previsão de vida útil restante. Com essas informações, o engenheiro responsável deve ser capaz de realizar manutenções e manter a estrutura em funcionamento com segurança (AMANCIO, 2016; AN et al., 2019).

O principal apelo dos sistemas de SHM é identificar o dano em estruturas quando este ainda está no estágio inicial, possibilitando manutenções corretivas eficazes. Os sistemas de SHM permitem a avaliação frequente ou mesmo contínua da integridade estrutural, possibilitando um maior nível de segurança estrutural (ASSIS, 2007; PEREIRA, 2012).

O SHM tem como objetivo monitorar o comportamento de estruturas para identificar a ocorrência de danos ou deteriorações por meio da captação de dados de sensores, o processamento e a consequente análise desses dados. Esses sistemas são elementos chave em estratégias efetivas para manutenções baseadas nas condições estruturais e têm grande potencial de oferecer benefícios econômicos e de segurança. A aplicação prática dos sistemas de SHM na engenharia civil, porém, ainda é limitada a obras grandes devido aos custos e à mão de obra envolvidos no processo. É visível que ainda existe espaço para melhorias e para popularização da SHM na engenharia civil. Como exemplo, com o objetivo de desenvolver sistemas de SHM mais acessíveis, Silva et al. (2019) desenvolveram um sistema de baixo custo para SHM com Arduino, extensômetros e transdutores de deslocamento em um sistema que pode ser acompanhado por aplicativos de celular em tempo real, encontrando valores interessantes para deformações e forças. Isso, porém, não muda o fato de que os sistemas de SHM devem ser prioridades em uma gama específica de aplicações, levando em consideração o tipo de carregamento, tipo de falha esperada, projetos arrojados, quantidade de componentes interconectados, vida útil desejada, entre outros parâmetros (ADAMS, 2007; CHEN e NI, 2018).

Embora a área da SHM na engenharia civil esteja em alta e com grande potencial de crescimento, ela ainda é relativamente nova. Devido à pouca idade, embora já existam estratégias de identificação de dano instaladas em estruturas, é difícil demonstrar exemplos claros de mudanças na condição estrutural, pois essas mudanças na maioria das implementações ainda não ocorreram. Quando ocorrem danos com a presença de um sistema de SHM, as respostas obtidas tornam-se uma referência para a verificação de métodos de identificação de dano existentes e para o desenvolvimento de novos métodos (AN et al., 2019).

Para que haja a disseminação e a popularização dos sistemas de SHM na prática, é necessário que o setor da construção civil, que é bastante conservador, seja convencido que aqueles trazem benefícios econômicos e de segurança quando comparados ao sistema de manutenções tradicional. É fundamental, para o sucesso do sistema de SHM, que haja intenso planejamento e deliberação entre as partes interessadas, caso contrário o sistema se tornará um grande banco de dados, ao invés de oferecer meios eficientes para que os operadores tomem decisões corretas (PEREIRA, 2012).

As técnicas de SHM podem ser divididas entre locais e globais. A identificação de dano por técnicas globais leva em consideração as características, em especial dados modais, da estrutura a nível sistêmico, como a frequência natural, o modo de vibração e a matriz de flexibilidade, para localizar e quantificar o dano. Um ponto negativo das técnicas globais é que estas são comumente insensíveis ao dano local. As técnicas locais são responsáveis por detectar e caracterizar o dano local, são tipicamente precisas e altamente sensíveis ao dano, porém os sensores precisam estar localizados nos pontos críticos, ou seja, é difícil que um extensômetro colocado em um local aleatório detecte uma fissura nova, porém, caso a fissura já tenha sido detectada por inspeção visual ou alguma outra técnica não destrutiva, é viável que um extensômetro seja direcionado a essa fissura, com o objetivo de acompanhar seu progresso (AN et al., 2019).

Enquanto os métodos globais podem identificar a presença de danos, os métodos locais podem localizá-los com precisão e avaliar a extensão dos danos. Ambos fornecem informações em tempo real aos operadores para controle estrutural e para projetos estruturais por meio de modificações futuras para melhorar o desempenho de componentes (AN et al., 2019; ADAMS, 2007).

A estratégia de um sistema de SHM consiste em vários componentes, mas é sempre baseada em um simples esquema hierárquico consistente de três níveis distintos, mas interrelacionados (KIREMIDJIAN et al., 1997):

i. Os sensores;

ii. A estrutura;

iii. A central de monitoramento.

Os sensores são os responsáveis por captar todos os dados da estrutura continuamente ou em períodos que sejam suficientes para prover dados significativos, a depender do tipo de dado captado. Por exemplo, pode ser suficiente obter uma amostra de temperatura a cada um minuto; porém, caso o dado captado seja a vibração da estrutura, a amostra deveria ser obtida a cada milissegundo. Também é necessário verificar a posição ideal dos diferentes sensores. Sensores podem ser ativos, quando transmitem sinais, ou passivos, quando recebem esses sinais. No campo da Engenharia Civil, esses sensores medem grandezas como deformação, aceleração, deslocamento, temperatura, umidade relativa e forças. Os sensores só devem ser implementados quando são realmente necessários para o monitoramento estrutural, e devem ter os requisitos de entrada e de saída claramente definidos controlados (ADAMS, 2007; BOLLER, 2009).

Os sensores utilizados não identificam os danos nas estruturas, mas sim a resposta da estrutura a cargas ou a atuadores implementados. Dependendo do tipo de dano a ser identificado e a tecnologia de sensores utilizada, as medições podem estar mais ou menos relacionadas à presença de dano. O problema então recai em um processo de reconhecimento de padrões. Este processo (Figura 4) pode se iniciar em uma ação externa, que tem como consequência deformações, deslocamentos ou vibrações na estrutura. Tais repostas estruturais são lidas pelos transdutores, que devem ter suas localizações otimizadas. Esses sinais, analógicos, são então convertidos e enviados para uma unidade de computação capaz de ler os dados e, por meio de algum algoritmo, transformá-los em informação sobre a integridade da estrutura (FALCAO, 2017; PEREIRA, 2012).





Fonte: Adaptado de Falcão (2017).

As técnicas de SHM também têm seus pontos fracos e suas limitações. Como exemplo, citamse as condições operacionais e ambientais, que podem alterar significativamente as respostas da estrutura, podendo mascarar mudanças causadas por danos como a fadiga do aço. Condições extremas causam também outro problema no longo prazo: a manutenção dos sensores em si. Quando os sensores são colocados nas superfícies das estruturas, estes ficam expostos a variações de temperatura, umidade, chuvas, radiação solar etc., sendo necessário prever a monitoração dos próprios sensores, de preferência de forma independente, além de implementar sistemas de SHM que não tenham o monitoramento interrompido e saibam diferenciar um sensor danificado de um íntegro, de forma a evitar a transmissão de dados errôneos (PEREIRA, 2012).

Em estruturas complexas, surgem muitas dificuldades para criar um modelo numérico preciso. Neste caso, a modelagem em elementos finitos via imagens é uma técnica que pode facilitar a criação do modelo. Métodos baseados em imagens captadas por drones em conjunto com *machine learning* e aqueles que se valem de inteligência artificial e do ramo *Big Data* (megadados) são promissores e provavelmente serão o futuro desta área para detecção de alguns tipos de dano como fissuração, corrosão, deformações e deslocamentos indesejáveis (AN et al., 2019; SUN et al., 2020).

2.3. Dinâmica das estruturas

As estruturas sofrem ações que usualmente variam com o tempo, sendo qualificadas como dinâmicas no caso do desenvolvimento de forças de inércia relevantes. Estas ações causam vibrações nas estruturas que podem causar desconfortos, provocar fadiga nos materiais, e danificá-las, afetando a vida útil delas. São dois os parâmetros dinâmicos em um modelo de estrutura não amortecido: as frequências (ω) e os modos naturais de vibração (Φ). Para uma estrutura amortecida, surgem também os fatores de amortecimento (ξ) (SORIANO, 2014).

Para serem consideradas dinâmicas, considera-se que as forças elásticas resistentes não são desenvolvidas suficientemente rápidas para manter o equilíbrio, causando uma modificação da condição cinética do sistema com o objetivo de mantê-lo em equilíbrio por meio das forças de massa ou de inércia. Com isso o sistema tem seu equilíbrio assegurado pela segunda lei de Newton. O movimento do sistema tem forma de oscilação devido à sucessiva troca de energia potencial em cinética e vice-versa, causando a vibração da estrutura (LIMA JUNIOR, 2020).

A frequência natural é a frequência do modelo correspondente à oscilação harmônica em um dos modos de vibração. A primeira (menor) frequência natural é chamada de frequência fundamental. O modo natural de vibração é a configuração dos graus de liberdade que permite a oscilação livre e harmônica simples para uma determinada frequência característica do

modelo. Nele, o modelo tem a influência apenas de forças elásticas e de inércia. O modo natural associado à menor frequência é chamado de modo fundamental de vibração (SORIANO, 2014).

Os fatores de amortecimento são especialmente importantes para evitar a ressonância, que ocorre quando a frequência de cargas dinâmicas oriundas de atividades rítmicas, como motores rotativos e movimentos de torcida, se aproxima da frequência fundamental da estrutura. O amortecimento é responsável pela dissipação da energia associada à vibração de uma estrutura, diminuindo a amplitude da vibração livre e atenuando os picos de aceleração e deslocamento de estrutura excitada por carregamento dinâmico (CARVALHO, 2002).

A resposta estrutural na análise dinâmica depende primariamente de três matrizes, sendo essas: matriz de rigidez [K], matriz de massa [M] e matriz de amortecimento [C]. A matriz de rigidez leva em consideração a contribuição à rigidez de cada elemento, a matriz de massa é montada em função da massa linear e do comprimento de cada elemento, e a matriz de amortecimento é uma combinação linear entre a matriz de massa e a matriz de rigidez (LIMA JUNIOR, 2020).

O dano, que pode ser quantificado e identificado a partir da perda de rigidez na estrutura, altera suas características dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento). Há, na literatura, grande variedade de métodos de identificação de dano propostos que utilizam dados modais, recaindo na análise modal (ALTUNISIK et al., 2018; HE e FU, 2001).

A identificação de dano por meio de características dinâmicas da estrutura tornou-se mais atrativa para pesquisadores da área de engenharia civil devido à facilidade da implementação. A ideia básica da detecção de dano baseada na vibração é que o dano, o qual surge na forma de uma perda de rigidez local na estrutura, altera suas propriedades dinâmicas (ALTUNISIK et al., 2018).

2.4. Análise modal

A análise modal pode ser caracterizada como a determinação dos parâmetros dinâmicos inerentes de um sistema, sejam as frequências, os modos naturais de vibração ou os fatores de amortecimento e baseia-se em uma junção de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a idealização da estrutura através de um modelo matemático. A dinâmica de uma estrutura pode ser decomposta por sua frequência e posição e a análise modal tem como premissa o fato de que a resposta da vibração de um sistema dinâmico pode ser representada como uma combinação dos seus modos de vibração (HE e FU, 2001; LIMA JUNIOR, 2020; SORIANO, 2014).

Normalmente a análise experimental é usada no estudo exploratório de fenômenos de interesse e para verificar e validar resultados advindos de métodos analíticos. Por meio da análise experimental é possível obter o comportamento real de uma estrutura, fornecendo resultados que não podem ser alcançados por modelos numéricos. Ainda assim a análise teórica é fundamental, pois ela fornece a base para a análise experimental, ditando quais modos de obtenção de informação podem ser mais apropriados em cada situação. A análise teórica também auxilia a explicação de fenômenos e resultados obtidos nos experimentos e permite a extrapolação destes para obter uma previsão de comportamento da estrutura em outros cenários e ao longo da vida útil (HE e FU, 2001; JULIANI, 2014).

Na análise experimental (Figura 5), a principal informação a ser obtida em uma análise modal é, usualmente, a aceleração, a velocidade ou o deslocamento, devido ao fato que essas três grandezas físicas representam o movimento da estrutura ao longo do tempo. Para cada tipo de grandeza há um sistema de medição adequado (JULIANI, 2014).





Fonte: Adaptado de Ewins (2000).

Uma análise teórica, como ilustrado pelo roteiro presente na Figura 6, baseia-se em um problema direto, onde, partindo das propriedades físicas e geométricas da estrutura, define-se um modelo espacial. Com o modelo pronto, realiza-se a análise modal, obtendo-se o conjunto de frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento do modelo. Por fim, para analisar a resposta da estrutura sob determinadas condições de excitação, é conveniente utilizar-se de uma excitação normalizada para comparações futuras, obtendo-se uma resposta normalizada, que pode ser particularizada para determinadas situações. No caso, a resposta contém o conjunto de soluções para excitações de força senoidal com amplitude unitária aplicadas individualmente em pontos da estrutura, para todas as frequências de uma faixa específica de interesse $H_{ii}(\omega)$. Esta resposta é um conjunto de Funções de Resposta em

Frequência (FRFs), que deve ser definida em toda a faixa de frequências de interesse, ou de Funções de Resposta ao Impulso (FRIs) e das respostas estruturais ao longo do tempo (h(t)) (EWINS, 2000; LIMA JUNIOR, 2020).



Figura 6 - Roteiro para análise modal teórica.

Fonte: Adaptado de Ewins (2000).

A ideia principal da identificação de dano por parâmetros modais é a de que o dano causa uma perda de rigidez na estrutura, e essa perda de rigidez altera seus parâmetros dinâmicos. Vários são os métodos propostos para detecção, localização e caracterização de dano por análise modal (ALTUNISIK et al, 2018).

Os parâmetros dinâmicos escolhidos para determinar a integridade de uma estrutura devem ser suficientemente sensíveis ao dano esperado. Além disso, o método deve ser capaz de lidar com os dados obtidos para que o ruído neles presente não interfira nos resultados. Diversos trabalhos são dedicados à procura pelo método de análise modal mais pertinente para cada aplicação (MORALES, 2012).

A análise modal tem alguns pontos fracos. Primeiro, é difícil identificar dano leve em estruturas, pois este produz pequenas mudanças nos parâmetros dinâmicos, recaindo no problema de a resposta não ser suficientemente sensível ao dano, visto no tópico referente ao SHM. Além disso, o ruído nas medições diminui a chance de identificar o dano corretamente, pois ele esconde as mudanças na resposta da estrutura e leva o método a detectar um cenário incorreto de dano. Logo, faz-se necessário verificar se o ruído presente nas medições é compatível com o método de identificação de dano escolhido. Ao se aplicar um método de análise modal, mesmo que teórico, também é necessário verificar a aplicabilidade deste em estruturas reais. Alguns métodos requerem medições em vários graus de liberdade e em vários modos de vibração, sendo praticamente impossível replicar experimentalmente, e fazendo-se necessário

a utilização de técnicas numéricas para igualar as dimensões dos modelos experimental e teórico, fato que introduz erros numéricos aos resultados (MORALES, 2012).

Os métodos de análise modal para identificação de dano em vigas são baseados em conceitos como:

- Frequência natural
- Modo de vibração
- Matriz de flexibilidade
- Curvatura modal

Esses métodos são largamente estudados. Vários destes são destaque para o progresso recente e tendências futuras nos métodos de identificação de dano para estruturas de grande porte, sendo primariamente utilizados para detecção e localização de dano com as seguintes características gerais:

- Métodos baseados em frequência natural: localização precisa do dano e identificação da severidade do dano são difíceis devido a altos níveis de ruído, baixa sensitividade a danos pequenos e baixa precisão do modelo numérico. Com esses métodos o foco deve estar voltado à identificação dos danos (AN et al., 2019).
- Métodos baseados no modo de vibração: são os métodos mais estudados. Usam as respostas dinâmicas nos estados intacto e danificado para identificar e localizar o dano. Várias metodologias derivadas surgiram baseado nestes, como os que utilizam flexibilidade, curvatura modal e deformação modal. (AN et al., 2019; DUVNJAK et al., 2021; LIMA JUNIOR, 2020).
- Métodos baseados na matriz de flexibilidade: embora seja relativamente mais simples extrair a matriz de flexibilidade das características modais, a matriz de flexibilidade pode não localizar tão bem dano como a matriz de rigidez para os casos de dano próximo a suportes. São utilizados para detectar e localizar o dano (AN et al., 2019; SCHOMMER et al., 2017).
- Métodos baseados na curvatura modal: baseados na variação entre as curvaturas dos modos de vibração. Utilizados para identificar e localizar dano. A curvatura é relacionada diretamente com o nível de dano e inversamente com a rigidez da estrutura. Na prática, demandam uma grande quantidade de sensores, principalmente quando se necessitam de muitos modos de vibração (AN et al., 2019; FARRAR e WORDEN, 2013; LIMA JUNIOR, 2020).

Lima Junior (2020) estudou identificação de danos em vigas via análise modal e realizou uma comparação entre vários métodos modais em uma viga de concreto simples com dano único e em uma viga de aço com dano único e com dano múltiplo. Dos métodos estudados por ele destacam-se dois para a análise deste trabalho: Diferença da Curvatura Modal (DCM) e Indicador Baseado em Dados de Modos de Vibração (MSDBI). Ambos os métodos utilizam apenas modos de vibração vertical.

2.4.1. Diferença da Curvatura Modal (DCM)

A curvatura de uma viga depende da rigidez à flexão (EI) da seção transversal (equação 1), assim como a curvatura modal. Pandey, Biswas e Samman (1991) relacionaram (equação 2) a diferença absoluta entre a curvatura modal de nós intactos e danificados a um indicador $DCM_{(j,i)}$, que foi comprovado ser um bom indicador para identificar e para localizar dano em vigas em certas situações.

$$k = \Phi^{\prime\prime} = \frac{M}{EI} \tag{1}$$

Onde:

 Φ'' é a curvatura na seção estudada;

M é o momento fletor na seção estudada;

E é o módulo de elasticidade do material;

I é o momento de inércia da seção estudada.

O indicador DCM, utilizado em modos numéricos, é dado por:

$$DCM_{(j,i)} = \left| \Phi_{d(j,i)}'' - \Phi_{(j,i)}'' \right|$$
(2)

Onde o subscrito d indica que a estrutura está danificada e os subscritos (j, i) indicam respectivamente o nó e o modo de vibração estudado.

As curvaturas modais podem ser definidas pela aproximação do Método das Diferenças Finitas (MDF) ao usar o deslocamento da deformada modal nos nós estudados ($\phi_{(j,i)}$), de modo que:

$$\Phi_{d(j,i)}^{\prime\prime} = \frac{\phi_{d(j+1,i)} - 2\phi_{d(j,i)} + \phi_{d(j-1,i)}}{L^2}$$
(3)

$$\Phi_{(j,i)}^{\prime\prime} = \frac{\phi_{(j+1,i)} - 2\phi_{(j,i)} + \phi_{(j-1,i)}}{L^2}$$
(4)

Sendo:

 $\phi_{(j,i)}$ o deslocamento da deformada modal da estrutura íntegra no nó j e modo de vibração i;

 $\phi_{d(j,i)}$ o deslocamento da deformada modal da estrutura danificada no nó *j* e modo de vibração *i*;

L o comprimento do elemento de viga.

Em testes experimentais, a curvatura modal pode ser obtida diretamente pela medição das deformações ao invés do deslocamento ou da aceleração. Para seções danificadas, são obtidos valores de curvatura modal significativamente maior que em seções íntegras, justificando o método da diferença da curvatura modal para identificar danificação na estrutura.

Lima Junior (2020) comparou alguns métodos modais para identificação de dano, entre esses o da Diferença da Curvatura Modal, e inferiu que em situações nas quais o deslocamento modal apresente espelhamento ao comparar a configuração íntegra com a danificada podem dificultar a identificação e a localização do dano com um pressuposto de que não só as partes danificadas mas sim quase todos os nós da viga apresentariam diferenças significativas que indicariam suposta danificação, aumentando o número de falsos-positivos identificados.

Figura 7 - Configuração do deslocamento da deformada para: (a) estrutura íntegra e (b) estrutura danificada.



Fonte: Lima Junior (2020).

Para contornar esta situação, Lima Junior (2020) modificou o método, criando o método da Diferença de Curvatura Modal Modificado (DCMM), na qual a equação 2 é substituída pela equação 5:

$$DCMM_{(j,i)} = \left| \left| \Phi_{d(j,i)}^{\prime\prime} \right| - \left| \Phi_{(j,i)}^{\prime\prime} \right| \right|$$
(5)

O método original da Diferença da Curvatura Modal requere, ao menos, os dados referentes aos cinco primeiros modos para a estrutura íntegra e para a estrutura danificada. Já para o método modificado, sugere-se que, para o uso de *m* modos de vibração, o índice *DCMM_{jn}* seja definido por:

$$DCMM_{jn} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{DCMM_j^i}{DCMM_{máx}^i}$$
(6)

Onde $DCMM_{max}^{i}$ é o maior valor obtido de DCMM para cada modo, entre todos os nós estudados.

Por fim, Lima Junior (2020) assumiu que o conjunto dos indicadores de todos os nós representa uma variável aleatória normalmente distribuída e utilizou um indicador normalizado $nDCMM_{in}$, dado por:

$$nDCMM_{jn} = m\acute{a}x \left[0, \left(\frac{DCMM_{jn} - m\acute{e}d(DCMM_{jn})}{desvio(DCMM_{jn})} \right) \right]$$
(7)

Onde $m \acute{e} d (DCMM_{jn})$ é o valor médio do $DCMM_{jn}$ em todos os nós e $desvio(DCMM_{jn})$ é o desvio padrão calculado para o $DCMM_{jn}$ em todos os nós.

De forma análoga, este trabalho utilizou a mesma forma de representação para o método DCM, de modo que:

$$DCM_{jn} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{DCM_j^i}{DCM_{máx}^i}$$
(8)

$$nDCM_{jn} = m\acute{a}x \left[0, \left(\frac{DCM_{jn} - m\acute{e}d(DCM_{jn})}{desvio(DCM_{jn})} \right) \right]$$
(9)

Tais formas de indicadores normalizados foram escolhidos pois facilitam a comparação gráfica entre os métodos de identificação de dano estudadas.

2.4.2. Indicador Baseado em Dados de Modos de Vibração (MSDBI)

Criado por Yazdanpanah, Seyedpoor e Bengar (2015), este indicador é utilizado para identificação de danos estruturais em vigas por meio de comparação entre as respostas dinâmicas nos estados íntegro e danificado, similar ao método DCM.

$$MSDBI_{j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \left| \left[\left| \Phi_{d(j,i)}^{\prime\prime} - \Phi_{(j,i)}^{\prime\prime} \right| (\phi_{d(j,i)})^{2} \right] - \left[\left(\left| \Phi_{d(j,i)}^{\prime} \right| - \left| \Phi_{(j,i)}^{\prime} \right| \right)^{2} (\phi_{(j,i)}) \right] \right|$$
(10)

Onde:

MSDBI_i é o indicador baseado nos modos de vibração do *j*-ésimo nó;

 $\Phi'_{(j,i)}$ é a inclinação modal do *j*-ésimo nó da estrutura íntegra para o *i*-ésimo modo de vibração; $\Phi'_{d(j,i)}$ é a inclinação modal do *j*-ésimo nó da estrutura danificada para o *i*-ésimo modo de vibração;

m é o número de modos de vibração.

Ao aplicar os métodos o autor do presente trabalho verificou que após calcular o indicador $MSDBI_j$ da equação 10 sem nenhuma normalização prévia, há a possibilidade de que o indicador seja dominado por um ou dois modos apenas, o que pode prejudicar a identificação e localização de danos em vigas. Para reduzir tal efeito indesejado, o indicador foi calculado da seguinte forma, similar à das equações 2 e 5:

$$MSDBI_{(j,i)} = \sum_{i=1}^{m} \left| \left[\left| \Phi_{d(j,i)}^{\prime\prime} - \Phi_{(j,i)}^{\prime\prime} \right| (\phi_{d(j,i)})^2 \right] - \left[\left(\left| \Phi_{d(j,i)}^{\prime} \right| - \left| \Phi_{(j,i)}^{\prime} \right| \right)^2 (\phi_{(j,i)}) \right] \right|$$
(11)

Só então foi utilizada representação similar às das equações 6 e 8:

$$MSDBI_{jn} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{MSDBI_j^i}{MSDBI_{máx}^i}$$
(12)

O método assume ainda que o conjunto do MSDBI de todos os nós representa uma variável aleatória normalmente distribuída, de modo que ele pode ser representado de uma forma normalizada por:

$$nMSDBI_{jn} = m\acute{a}x \left[0, \left(\frac{MSDBI_{jn} - m\acute{e}d(MSDBI_{jn})}{desvio(MSDBI_{jn})} \right) \right]$$
(13)

Onde: $m \acute{e} d(MSDBI_{jn})$ é o valor médio do $MSDBI_{jn}$ em todos os nós e $desvio(MSDBI_{jn})$ é o desvio padrão calculado para o $MSDBI_{jn}$ em todos os nós.

Os valores das inclinações modais utilizadas no *MSDB1* podem ser calculados por meio do MDF:

$$\Phi'_{(j,i)} = \frac{\phi_{(j+1,i)} - \phi_{(j-1,i)}}{2L}$$
(14)

$$\Phi'_{d(j,i)} = \frac{\phi_{d(j+1,i)} - \phi_{d(j-1,i)}}{2L}$$
(15)

Seguindo o mesmo pensamento aplicado à modificação do método da DCM, Lima Junior (2020) modificou a equação 11 para que as curvaturas modais fossem consideradas em valor absoluto, de modo que:

$$MSDBIM_{(j,i)} = \left| \left[\left| \left| \Phi_{d(j,i)}^{"} \right| - \left| \Phi_{(j,i)}^{"} \right| \right| (\phi_{d(j,i)})^2 \right] - \left[\left(\left| \Phi_{d(j,i)}^{'} \right| - \left| \Phi_{(j,i)}^{'} \right| \right)^2 (\phi_{(j,i)}) \right] \right|$$
(16)

$$MSDBIM_{jn} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{MSDBIM_j^i}{MSDBIM_{máx}^i}$$
(17)

$$nMSDBIM_{jn} = m\acute{a}x \left[0, \left(\frac{MSDBIM_{jn} - m\acute{e}d(MSDBIM_{jn})}{desvio(MSDBIM_{jn})} \right) \right]$$
(18)

Em que:

 $m\acute{e}d(MSDBIM_{jn})$ é a média do $MSDBIM_{jn}$ em todos os nós; $desvio(MSDBIM_{jn})$ é o desvio padrão do $MSDBIM_{jn}$ em todos os nós.

2.5. Ruído em dados modais

Existem alguns estudos sobre a influência dos ruídos nos dados modais para identificação de danos. Shi, Law e Zang (2000) usam um método que usa a diferença entre a resposta modal íntegra e a resposta modal danificada de uma estrutura, baseado na energia de deformação modal. Para o artigo, os autores simularam condições de operação por meio de ruído aleatório e obtiveram resultados que os ruídos de 7% atrapalham a localização de dano, principalmente para dano múltiplo, porém o método usado foi capaz de localizar o dano com erro máximo de 14% para ruídos de 5%.

Jahangir, Hasani e Esfahani (2021) estudaram a localização de dano em vigas de concreto armado via *wavelets* com dados modais contaminados por ruído gaussiano. Em um dos passos do estudo, para simular condições de operação, o ruído foi adicionado aos deslocamentos modais. Os autores dizem que a adição de ruído gaussiano, que é um ruído que tem uma função de densidade de probabilidade de formato gaussiano, faz sentido quando se deseja simular condições reais de operações, e dizem que o ruído prejudica os métodos modais de identificação de dano baseados em deslocamentos modais, mas que ao utilizar dados de curvatura modal os métodos foram capazes de identificar o dano, mesmo com ruído, porém não citaram o nível de ruído adicionado.

Quanto aos métodos estudados neste trabalho, Cao et al. (2014) realizaram uma pesquisa teórica envolvendo o método do DCM e verificaram que embora seja um método popular, há uma

grande desvantagem nos métodos que envolvem a curvatura modal das estruturas: são muito vulneráveis ao ruído existente nos dados de deslocamentos modais.

Yang et al. (2017) realizaram um estudo sobre a identificação de dano por meio da curvatura modal e concluíram que os métodos são bastante suscetíveis ao ruído, principalmente ao utilizar o MDF para calcular a curvatura modal, sendo os índices de danificação facilmente confundidos com ruído, principalmente para baixos níveis de danificação.

Em relação ao comportamento do MSDBI na presença de ruído, Navabian et al. (2015) concluem que mesmo para baixos níveis de ruído (1%) o método não é o mais eficaz em localizar corretamente o dano em estruturas de placas como tabuleiros de pontes, por resultar em alguns falsos positivos.

Chartrand (2011) explica tal fato ao verificar que ao utilizar o MDF para calcular as derivadas de um conjunto de dados com ruído gaussiano, o ruído é amplificado de tal forma (Figura 8) que tentar limpar os ruídos nas derivadas é um processo muito custoso e que dificilmente traz resultados satisfatórios. Visto que os métodos de identificação de dano DCM, DCMM, MSDBI e MSDBIM são calculados com derivadas calculadas pelo MDF, é esperado que estes sejam afetados negativamente por ruído.

Figura 8 – a) Função f = |x - 0.5| com ruído Gaussiano de média 0 e desvio padrão 0.05 adicionado. b) Derivada f' calculada via Método das Diferenças Finitas após ruído adicionado.



Fonte: Chartrand (2011).

O modelo geral para um sinal com ruído pode ser dado por:

$$Dados_{com \, ruido} = (1 + p * randn) * Dados_{sem \, ruido}$$
(19)

Onde p é o nível de ruído, por exemplo, para um ruído de 3%, p = 0,03. A função *randn* é uma função do *software* MATLAB que gera números aleatórios provenientes da distribuição

normal padrão da equação 20, onde x é uma variável aleatória real de média 0 e variância 1. A parcela *Dados_{sem ruído}* é o vetor de dados modais original, sem ruído.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$
(20)

2.6. Análise estatística

O campo da estatística engloba a coleta, apresentação, análise e uso de dados para auxiliar a tomada de decisões, resolução de problemas e planejamento de produtos e processos. Engenheiros devem resolver problemas de forma eficiente embasados em princípios científicos com métodos que seguem a ideia da Figura 9. A estatística é importante para engenheiros devido ao grande número de aplicações práticas de engenharia que envolvem algum tratamento de dados, a consequente interpretação dos mesmos e a relação destes com o modelo proposto para o problema em estudo. O pensamento estatístico de fato auxilia no planejamento, condução, análise e interpretação de dados de experimentos na engenharia (MONTGOMERY e RUNGER, 2003; ROSS, 2020).





Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2003).

Uma hipótese estatística é uma afirmação sobre os parâmetros de uma ou mais populações. É chamada de hipótese pois não é sabido primariamente se a afirmação é verdadeira ou falsa. O teste de hipóteses é então uma técnica de inferência estatística utilizada para aceitar ou rejeitar como verdadeira uma determinada hipótese sobre uma população com base em um teste realizado com uma amostra desta população.

São duas as hipóteses em um teste: a hipótese nula (H_0) , que é a declaração a ser testada, e a hipótese alternativa (H_a) . No teste é examinado se os dados analisados fornecem evidências suficientes para rejeitar H_0 ou se falham em rejeitar H_0 . Importante citar que o fato de aceitar,

ou falhar em rejeitar, uma dada hipótese H_0 não é suficiente para afirmar que ela é verdadeira, apenas significa que os dados analisados (provenientes da amostra) são consistentes com a hipótese nula. Testes de hipóteses são utilizados para auxiliar no processo de tomada de decisões em vários ramos da engenharia (MONTGOMERY e RUNGER, 2003; ROSS, 2020; WASSERMAN, 2004).

Existem dois tipos de erros em um teste de hipóteses:

- Erro tipo I: ocorre ao rejeitar H_0 quando esta é verdadeira;
- Erro tipo II: ocorre ao não rejeitar H_0 quando esta é falsa.

A probabilidade de ocorrer um erro tipo I é chamada de nível de significância (α), e a probabilidade de ocorrer um erro tipo II é representada por β . Já o poder ou potência do teste de hipóteses é definido como a probabilidade de rejeitar corretamente uma hipótese nula quando esta é falsa e é dado por $(1 - \beta)$. O p-valor é outro termo bastante utilizado em testes de hipóteses e pode ser definido como o menor valor de α para o qual H_0 pode ser rejeitada com os dados fornecidos, ou seja, se o valor de p for menor que α , então H_0 pode ser rejeitada (WASSERMAN, 2004).

Os testes de hipóteses mais tradicionais são paramétricos e baseiam-se na ideia que os dados provêm de uma certa distribuição conhecida. Para os casos em que não é possível afirmar de certeza que os dados obedecem a uma certa distribuição podem ser utilizados os testes de hipóteses não-paramétricos, que ignoram a distribuição dos dados. Para os casos em que se sabe a distribuição à qual os dados obedecem, é interessante utilizar os testes paramétricos, pois estes são mais assertivos (BONNINI et al., 2014).

Métodos estatísticos são necessários para uma análise objetiva e conclusões significantes dos dados extraídos se o problema estudado envolve erros experimentais, caso das situações em que há ruído ambiental nos dados. O Planejamento de Experimentos (do inglês *Design of Experiments* - DOE) refere-se ao processo de planejar o experimento de forma que dados apropriados possam ser coletados e analisados por métodos estatísticos. Esses aspectos são relacionados pois o método de análise depende do tipo de coleta de dados. O DOE possui alguns princípios básicos, sendo estes: aleatoriedade, replicação e seccionamento (ANTONY, 2014; MONTGOMERY, 2020):

 A aleatoriedade é o pilar da estatística e se faz presente pela ordem de experimentação, visto que os erros devem ser independentes e normalmente distribuídos, o que faz com que os efeitos de fatores externos sejam diminuídos.

- A replicação é a repetição independente do experimento para cada variável e é importante pois permite que o experimentador obtenha estimativas do erro experimental, fazendo com que seja possível determinar se as diferenças observadas são estatisticamente relevantes. Importante destacar que a replicação aqui é diferente de repetições de medições, por exemplo: medir três vezes o diâmetro em uma única peça de concreto é uma repetição de medições, enquanto medir o diâmetro de três peças de concreto de um lote qualquer realizado com um único molde é uma replicação.
- O princípio do seccionamento é utilizado para reduzir a variabilidade introduzida por variáveis que possam influenciar os resultados, mas que não são de grande valia para o experimentador, como a influência de diferentes fornecedores de determinado material na resistência dele.

Seguindo o conceito presente na Figura 9, um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes no qual são feitas mudanças intencionais nas variáveis de entrada de um processo, para assim observar e analisar as mudanças nas variáveis de saída. Ao se fazer essas mudanças intencionais a uma ou mais variáveis em um experimento e tentar determinar como o resultado foi influenciado por estas mudanças é importante entender que algumas variáveis podem ser predominantes ao influenciar mais a resposta que outras. O objetivo do DOE é então identificar a influência de cada variável e suas interações entre outras variáveis no resultado. Quando experimentos são mal formulados, nem os mais sofisticados métodos de análise de dados são capazes de extrair resultados úteis. O DOE é uma técnica poderosa utilizada para explorar novos experimentos e para otimizá-los. (ANTONY, 2014; RANGEL, 2019, MONTGOMERY, 2020).

Antony (2014) cita que as variáveis de entrada são chamadas de fatores e as variáveis de saída podem ser chamadas de resposta do experimento. Os fatores podem ser qualitativos ou quantitativos. Para fatores quantitativos, é necessário decidir a faixa de interesse e como eles serão medidos e controlados durante o experimento. Um exemplo de variável quantitativa é a resistência à compressão do concreto em experimentos de flexão de viga que pode ser 20 MPa e 50MPa. Já os fatores quantitativos são discretos e, em um experimento de fundações pode ser o tipo de solo: arenoso, argiloso ou siltoso. Esses diferentes valores que os fatores podem assumir são os chamados níveis do fator. No caso do experimento de flexão de viga o *fck* do concreto tem dois níveis e no de fundações o fator tipo de solo tem três níveis.

A resposta é o resultado do experimento, também chamada de variável resposta ou variável dependente, por exemplo: a quantidade de espécimes de concreto que atendem à especificação em um determinado lote experimental. A interação entre dois fatores existe quando o efeito de

um fator A na resposta é diferente ao se variar os níveis de um fator B, o que ocorre na parte b) da Figura 10. No caso da parte a) da Figura 10 não há interação entre os fatores A e B pois as retas são paralelas. No DOE usualmente são estudadas as influências das interações de segunda ordem (ANTONY, 2014).



Figura 10 – a) DOE, sem interação entre os fatores A e B. b) DOE, há interação entre os fatores A e B.

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2003).

Um planejamento fatorial completo é o estudo no qual em cada réplica do experimento são estudadas todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Por exemplo, se existem *a* níveis do fator A e *b* níveis do fator B, cada replicação terá todas as combinações de *ab*. Aplicações do DOE na engenharia podem ser úteis pois a maioria dos problemas estudados na área possuem grande número de variáveis envolvidas. É interessante notar, porém, que em 71% das aplicações práticas de DOE publicadas no ramo da engenharia o número de fatores envolvidos é menor ou igual a 5, levando à conclusão que engenheiros tendem a utilizar conhecimento prévio para minimizá-los, ou que resultados considerados ruins são omitidos e não são publicados (ILZARBE et al, 2008).

Em um DOE com mais de quatro fatores, o princípio da esparsidade normalmente se aplica. De acordo com este princípio, o comportamento de um sistema normalmente é ditado pelos efeitos principais e pelas interações de baixa ordem, de forma que as interações entre três fatores e acima podem ser desprezadas. As interações desprezadas são combinadas e utilizadas como uma estimativa do erro (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Se o DOE é o planejamento do experimento, podem ser aplicados testes estatísticos variados nos resultados obtidos, porém todos têm o mesmo objetivo: entender a influência dos efeitos de cada fator, as interações entre os fatores e tentar predizer o modelo. Para entender os efeitos de cada fator e suas interações, pode ser utilizada a Análise de Variância (ANOVA).

3. METODOLOGIA

Na seção do referencial bibliográfico foi estudada a necessidade de monitoramento estrutural que assegure desempenho adequado durante a vida útil das estruturas de grande porte por meio do SHM, que visa identificar a ocorrência de danos no estágio inicial, possibilitando intervenções pontuais para a manutenção das condições ideais de funcionamento estrutural.

Entre os métodos utilizados no SHM estão os aqui estudados: DCM, DCMM, MSDBI e MSDBIM. Para realizar a análise comparativa entre estes métodos deve-se entender que, para um método ser utilizado em situações práticas, este deve identificar o dano rapidamente e com exatidão em diversas situações, devendo ainda ser replicável em processos de automação independente do utilizador do sistema.

Com isso, o presente trabalho teve como metodologia a simulação de modelos de viga de aço em *software* comercial de elementos finitos Abaqus. Estes modelos, para simular situações diversas, diferem entre si pelos seguintes parâmetros: nível de danificação, tipo de apoio, localização do dano, nível de ruído gaussiano, dimensões da viga, filtragem ou não dos dados de deslocamento modais obtidos e método de identificação de dano.

Como são diversos os parâmetros variados, foi realizado um DOE fatorial completo $2^3 \times 3^1 \times 4^2 \times 10^1$, totalizando 3840 resultados a serem analisados para comparar os efeitos e por consequência a importância dos fatores na localização de dano nas vigas estudadas. Os fatores e seus níveis foram os seguintes:

- Fator A é o dano, que foi transmitido à estrutura por meio da redução do módulo de elasticidade nos elementos danificados, para facilitar a modelagem em elementos finitos. Os 10 níveis deste fator são: 1%, 2.5%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%;
- Fator B é o método de identificação de dano. São 4 níveis: DCM, DCMM, MSDBI e MSDBIM;
- Fator C é o método de filtragem dos dados. São 2 os níveis: sem filtragem (SF) e com filtragem por regressão de soma de senos (CF);
- Fator D é o ruído. São 4 níveis: sem ruído adicionado (SR) e com ruído (CR) gaussiano nos valores de 1%, 2% e 4%;

- Fator E é o local de danificação. Os níveis são 3: dano único no meio do vão (MV), dano simultâneo no apoio esquerdo e no apoio direito (ED), e dano simultâneo no apoio esquerdo e no meio do vão (EM);
- Fator F é o tipo de apoio. São utilizados dois tipos de apoio, ou seja, dois níveis para este fator: viga biapoiada (SA) e viga biengastada (ENG);
- Fator G são as dimensões da viga utilizada. São 2 níveis para este fator: viga V1 e viga V2.

Os 4 métodos de identificação de dano utilizados baseiam-se em 3 dados: deslocamento Φ , inclinação Φ' e curvatura da deformada modal Φ'' , que podem ser obtidos por meio do MDF com os valores do deslocamento da deformada modal. Para obter os resultados de Φ foi utilizado o *software* comercial de elementos finitos Abaqus.

Foram geradas 132 simulações no Abaqus: 2 tipos de vigas, com 2 tipos de apoios e 11 níveis diferentes de danificação (condição íntegra + 10 níveis de redução de rigidez) em 3 possíveis locais de danificação para os nós de interesse. Como todos os métodos utilizados usam a diferença entre os dados modais da estrutura íntegra e a danificada, foram obtidos resultados de Φ nos 5 primeiros modos de vibração para cada uma das 120 combinações.

Estes resultados de Φ obtidos diretamente do Abaqus compõem as combinações SR SF (sem ruído, sem filtragem de dados). Os diferentes níveis de ruído adicionados resultam em mais 3 combinações possíveis: CR (1%) SF (com ruído adicionado de 1%, sem filtragem de ruído), CR (2%) SF (com ruído adicionado de 2%, sem filtragem de ruído) e CR (4%) SF (com ruído adicionado de 4%, sem filtragem de ruído). Ao utilizar a regressão por soma de senos aos dados sem ruídos, são obtidos os dados utilizados nas combinações SR CF (sem ruído, com filtragem de ruídos), CR (1%) CF, CR (2%) CF, CR (4%) CF que indicam que há ruído e que foi utilizada filtragem de ruídos. Após estes passos, são 960 combinações de Φ , onde cada uma é composta por uma matriz *i x j*, onde *i* é o número de modos de vibração (5) e *j* é o número de nós de interesse para cada viga.

O ruído gaussiano foi adicionado aos dados de deslocamento modal da estrutura íntegra e da estrutura danificada via *software* Matlab conforme equação 19. Como o objetivo da adição destes é simular condições reais de uso, o autor decidiu utilizar um vetor ruído aleatório para a condição íntegra da estrutura e um vetor ruído aleatório para a condição danificada da estrutura,
pois na prática são momentos diferentes de captação de dados e as condições não necessariamente serão idênticas.

A filtragem dos ruídos foi realizada por regressão via Matlab, com a função *fit* por soma de senos, visto que os dados modais são periódicos e o ajuste realizado resulta em altos coeficientes de determinação (R²) entre os dados inseridos e a função resultante. Em aplicações práticas os dados obtidos por sensores possuem ruído, e por este motivo a filtragem de dados foi aplicada tanto nas situações sem ruído como nas situações com ruído.

A identificação de dano foi realizada por meio dos 4 métodos para cada situação estudada: DCM, DCMM, MSDBI e MSDBIM, totalizando 3840 resultados de identificação de dano para as situações envolvidas.

Os índices de danificação citados durante análise dos resultados são os índices $nDCM_{jn}$, $nDCMM_{jn}$, $nMSDBI_{jn}$ e $nMSDBIM_{jn}$. Estes índices foram comparados graficamente nos resultados e, para melhor entender o comportamento dos métodos de identificação de dano utilizados, foi utilizado um indicador *K*, dado pela seguinte relação:

$K = \frac{\text{maior índice de danificação entre os nós danificados}}{\text{maior índice de danificação entre os nós íntegros}}$

Tal indicador é diretamente proporcional à qualidade com a qual o método identifica o dano na condição estudada. Por basearem-se na diferença da resposta entre a estrutura íntegra e a estrutura danificada, os métodos têm como resposta índices de dano em cada nó, sendo que onde não há dano o valor deve ser 0 ou próximo de 0. Sabendo disso, a ideia é que se há dano haverá algum valor nos nós danificados e se o nó é íntegro os valores de índice devem ser próximos a 0.

Quanto maior K, melhor o método identifica e localiza o dano, pois maior é a relação entre o índice obtido nos nós danificados e o índice obtido nos nós íntegros. Para o caso de dano múltiplo, o valor do numerador será o menor entre o maior de cada zona danificada. Quanto mais próximo de 0 o valor de K, menos capaz o método é de identificar claramente a zona danificada.

O valor máximo considerado para K foi de 3, pois no caso de os índices serem todos 0 nos nós íntegros, K tenderá ao infinito. Além disso, pode-se dizer que K = 3 é um indicativo de que o método realiza com clareza a identificação e a localização do dano na estrutura e facilita a análise estatística do experimento estudado.

K concatena o resultado de identificação de dano em um número de 0 a 3 e por este motivo foi considerado a variável resposta quantitativa do DOE, que teve sua análise estatística feita via *software* Minitab.

3.1.Cenários estudados

Por se tratar de uma quantidade elevada de resultados, para simplificar as comparações, optouse pela divisão das modelagens em 12 cenários baseados no tipo de apoio, na localização do dano e no tipo de viga utilizada. As vigas de aço ASTM A572 utilizadas são de seção do tipo I e tem as dimensões de suas seções transversais especificadas na Figura 11 e na Tabela 2.



Figura 11 - Seção da viga estudada

Tabela 2 - Dimensões das seções transversais das vigas V1 e V2 (medidas em milímetros).

Viga	h	b1	b2	t1	t2	t3
V1	600	220	220	19	19	12
V2	317	167	167	13.2	13.2	7.6

A viga V1 foi utilizada nos cenários 1 a 6 e a viga V2 foi utilizada nos cenários de 7 a 12. As propriedades do aço ASTM A572 utilizadas como dados de entrada para o Abaqus são especificadas na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades do aço									
	Símbolo	Valor	Unidade						
Coeficiente de Poisson	ν	0.3	-						
Módulo de elasticidade	E	2.05*109	Ра						
Densidade	ρ	7800	kg/m ³						
Tensão de escoamento	f _y	395*10 ⁶	Pa						
Tensão de ruptura	f _u	530*10 ⁶	Pa						

Para os cenários 1, 2 e 3, foi utilizada a viga V1 biapoiada (Figura 12) com 110cm de comprimento, sendo 90cm de vão livre e 10cm em balanço de cada lado. Cada elemento da viga possui 5cm, com exceção dos elementos danificados destacados em vermelho na Figura 12 que possuem 5mm de comprimento e foram utilizados para introduzir os danos, transmitidos à viga pela redução da rigidez da seção. O cenário 1 é caracterizado pelo dano no meio do vão, o cenário 2 pelo dano nos apoios esquerdo e direito simultaneamente e o cenário 3 pelo dano introduzido simultaneamente no apoio esquerdo e no meio do vão.

-	, <u>,</u>
Tensão real	Deformação plástica
σ (Pa)	$\boldsymbol{\varepsilon}_p$
3.50E+08	0
3.58E+08	0.02176
4.84E+08	0.076
5.29E+08	0.1286
5.38E+08	0.1554
6.00E+08	0.3
6.58E+08	0.5602

Tabela 4 - Propriedades do aço na plasticidade

Figura 12 - Configuração dos elementos danificados nos cenários de 1 a 3.



Para cálculo de K nestes cenários foram considerados como danificados os nós dos elementos danificados e os nós dos elementos imediatamente próximos. Os nós são especificados na Tabela 5 e na Figura 13.





Cenário	Nós danificados
1	11, 12 e 13
2	2, 3 e 4 + 20, 21 e 22
3	2, 3 e 4 + 11, 12 e 13

Tabela 5 - Nós considerados danificados nos cenários de 1 a 3.

Para dano múltiplo o nível da redução de rigidez aplicada foi a mesma nas diferentes seções danificadas. Exemplo, no cenário 2, ao reduzir a rigidez em 5% no elemento danificado próximo ao apoio esquerdo, necessariamente o elemento danificado próximo ao apoio direito terá uma redução de rigidez de 5%. Tal fato se aplica para todos os cenários com dano múltiplo: cenários 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11 e 12.

Nos cenários de 4 a 6, a viga continua sendo V1, porém ela é considerada engastada em ambas as extremidades e tem 90cm de comprimento. Cada elemento da viga novamente possui 5cm, com exceção dos elementos nos quais o dano é introduzido, destacados em vermelho na Figura 14, que possuem 5mm. O cenário 4 tem por característica o dano no meio do vão, o cenário 5 tem o dano introduzido simultaneamente nos apoios esquerdo e direito, e o cenário 6 tem como característica o dano introduzido simultaneamente no apoio esquerdo e no meio do vão.

Figura 14 - Configuração dos elementos danificados nos cenários de 4 a 6.



Para cálculo de K nestes cenários foram considerados como danificados os nós dos elementos danificados e os nós dos elementos imediatamente próximos, conforme pode ser visto na Tabela 6. A vista lateral junto com a discretização dos nós é esquematizada na Figura 15.

Cenário	Nós danificados
4	9, 10 e 11
5	1 e 2 + 18 e 19
6	1 e 2 + 9, 10 e 11

Tabela 6 - Nós considerados danificados nos Cenários de 4 a 6



Figura 15 - Vista lateral e discretização dos nós da viga V1 utilizada nos cenários de 4 a 6.

Nos cenários de 7 a 10, a viga utilizada é a viga V2. A viga é biapoiada e tem 600cm de comprimento com um vão entre apoios de 540cm e um balanço de 30cm em cada extremidade. Cada elemento da viga possui 30cm. O cenário 7 tem por característica o dano no meio do vão, o cenário 8 tem o dano introduzido simultaneamente nos apoios esquerdo e direito, e o cenário 9 tem como característica o dano introduzido simultaneamente no apoio esquerdo e no meio do vão. Os elementos danificados são destacados na Figura 16.





Para cálculo de K nestes cenários foram considerados como danificados os nós dos elementos danificados e os nós dos elementos imediatamente próximos, conforme pode ser visto na Tabela 7. A vista lateral junto com a discretização dos nós é esquematizada na Figura 17.

Cenário	Nós danificados
7	9, 10, 11 e 12
8	1, 2, 3 e 4 + 18, 19, 20 e 21
9	1, 2, 3 e 4 + 9, 10, 11 e 12

Tabela 7 - Nós considerados danificados nos Cenários de 7 a 9.



Figura 17 - Vista lateral e discretização dos nós da viga V2 utilizada nos cenários de 7 a 9.

Por fim, para os cenários 10, 11 e 12, foi utilizada a viga V2 biengastada com 600cm de comprimento. Cada elemento da viga possui 30cm. Os elementos danificados em cada cenário são destacados em vermelho na Figura 18. O cenário 10 é caracterizado pelo dano no meio do vão, o cenário 11 pelo dano nos apoios esquerdo e direito simultaneamente e o cenário 12 pelo dano introduzido simultaneamente no apoio esquerdo e no meio do vão.

Figura 18 - Configuração dos elementos danificados nos cenários de 10 a 12.



Nestes cenários, para o cálculo de K, foram considerados como danificados os nós dos elementos danificados e os nós dos elementos imediatamente próximos, conforme pode ser visto na Tabela 8. A vista lateral junto com a discretização dos nós é esquematizada na Figura 19.

Figura 19 - Vista lateral e discretização dos nós da viga V2 utilizada nos cenários de 10 a 12.



Cenário	Nós danificados
10	9, 10, 11 e 12
11	1, 2 e 3 + 19, 20 e 21
12	1, 2 e 3 + 9, 10, 11 e 12

Tabela 8 - Nós considerados danificados nos cenários de 10 a 12.

4. RESULTADOS

Os comentários dos resultados foram divididos por cenário e levam em consideração todos os gráficos apresentados com índice de danificação no nó do elemento citado (nDCMnj, nDCMMnj, nMSDBInj e nMSDBIMnj). Os gráficos foram construídos com estes índices no eixo Y e os nós das vigas no eixo X. Ou seja, em uma situação ideal (como na Figura 20a) espera-se que os nós danificados (eixo X) apresentem um alto índice de dano (eixo Y) e que os nós íntegros não apresentem índice de dano. Os elementos danificados são destacados em cada gráfico para facilitar a compreensão do leitor. Para facilitar a fluidez do texto apenas alguns gráficos são apresentados nesta seção. Falsos positivos e falsos negativos ocorrem quando há índice de danificação considerável em elementos íntegros da viga e quando não há índice de danificação em elementos danificados da viga respectivamente, como na Figura 20b.



Além dos gráficos dos índices, as discussões englobam as tabelas de K. K entre 0 e 1 é um indicativo de que o método foi incapaz de identificar e localizar o dano corretamente, pois os maiores valores de danificação ocorrem em nós íntegros. K entre 1 e 2 é um indicativo que o método identificou dano nas regiões danificadas, porém possui falsos positivos, pois a relação entre o maior valor em nó danificado e o maior valor em nó íntegro não é tão alto. K entre 2 e 3 é um indicativo que o método localizou dano nas regiões danificadas com certa clareza pois indica altos índices em nós danificados e baixos índices em nós íntegros.

4.1. Cenário 1

O cenário 1 tem como característica a viga V1 biapoiada e o dano introduzido no meio do vão. Para este cenário, na combinação SR SF os 4 métodos de identificação de dano identificam e localizam com clareza o dano em quase todos os níveis de danificação, sendo DCMM o mais consistente. Graficamente, alguns falsos positivos ocorrem nos apoios em alguns níveis de danificação, visto também em K (Tabela 9) que possui altos valores para alguns níveis de danificação e valores não tão significativos em outros níveis de danificação. Quando se adicionou ruído, em qualquer uma das combinações restantes CR SF ou CR CF, independentemente do nível de ruído, obteve-se um péssimo resultado, com muitos falsos positivos em toda a extensão da viga, sendo os métodos incapazes de identificar dano no meio do vão, corroborado por K<1 para quase todas estas combinações. Ao se adicionar ruídos e filtragem dos dados é difícil identificar dano com clareza nos elementos danificados para o cenário 1. Graficamente os 4 métodos indicam falsos positivos em toda extensão da viga.

		Tab	oela 9 -	- Valore	s de K	obtide	os para	o Cer	nário 1			
		Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
		kDCM	2.75	3.00	3.00	3.00	1.20	1.04	1.47	1.52	1.14	3.00
	SD SE	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	2.55	3.00	3.00	3.00	2.64	3.00
SR SF SR CF CR (1%) SF CR (1%) CR (2%) CR (2%) CR (2%) SF CR (4%) SF CR (4%) SF	SK SI	kMSDBI	1.56	1.51	3.00	2.94	1.79	0.94	2.95	1.60	0.94	3.00
		kMSDBIM	1.56	1.50	3.00	2.92	1.82	1.33	3.00	3.00	1.43	3.00
	kDCM	0.31	0.87	0.63	0.54	0.86	0.47	0.65	0.84	0.82	1.48	
	SP CF	kDCMM	0.33	0.55	0.63	0.42	0.73	0.46	0.60	0.90	1.30	0.91
	SKUP	kMSDBI	1.12	1.09	1.24	1.91	1.90	0.95	1.00	1.78	0.89	1.14
		kMSDBIM	1.43	1.07	1.00	2.03	1.61	1.10	0.99	1.19	0.85	1.11
	CD	kDCM	0.38	0.38	0.21	0.25	0.38	0.40	0.38	0.22	0.30	0.34
	CR (1%)	kDCMM	0.24	0.24	0.25	0.36	0.22	0.40	0.37	0.23	0.33	0.39
	(170) SF	kMSDBI	0.63	0.59	0.66	0.65	0.51	0.60	0.56	0.60	0.41	0.36
	51	kMSDBIM	0.52	0.59	0.67	0.68	0.55	0.60	0.56	0.64	0.41	0.37
	CD	kDCM	0.51	0.52	0.34	0.36	0.40	0.46	0.32	0.34	0.50	0.44
	CK (1%)	kDCMM	0.41	0.06	0.00	0.14	0.52	0.00	0.00	0.00	0.40	0.31
	(170) CF	kMSDBI	0.37	0.09	0.42	0.53	0.22	0.08	0.26	0.11	0.11	0.12
	C1	kMSDBIM	0.63	0.00	0.51	0.40	0.00	0.00	0.02	0.25	0.00	0.07
	CD	kDCM	0.38	0.40	0.20	0.25	0.39	0.40	0.37	0.22	0.30	0.09
	CK (2%)	kDCMM	0.34	0.40	0.39	0.45	0.30	0.45	0.58	0.34	0.46	0.29
	(270) SF	kMSDBI	0.65	0.57	0.64	0.64	0.48	0.58	0.53	0.57	0.45	0.36
	51	kMSDBIM	0.56	0.62	0.70	0.70	0.58	0.63	0.60	0.67	0.50	0.47
	CD	kDCM	0.20	0.32	0.07	0.19	0.22	0.24	0.26	0.38	0.21	0.27
	CK (2%)	kDCMM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	(276) CF	kMSDBI	0.45	0.28	0.51	0.74	0.48	0.43	0.57	0.64	0.35	0.36
	C1	kMSDBIM	0.42	0.00	0.37	0.38	0.00	0.00	0.07	0.14	0.05	0.07
	CD	kDCM	0.39	0.42	0.17	0.23	0.41	0.39	0.34	0.20	0.28	0.10
	CK (4%)	kDCMM	0.90	0.99	0.97	1.03	0.79	0.79	1.29	0.80	0.93	0.67
	(470) SF	kMSDBI	0.60	0.54	0.60	0.58	0.46	0.59	0.52	0.55	0.52	0.36
	51	kMSDBIM	0.71	1.24	1.24	0.80	1.14	1.25	0.97	1.29	0.95	0.86
	CD	kDCM	0.04	0.32	0.00	0.21	0.16	0.28	0.16	0.38	0.24	0.36
	UK (4%)	kDCMM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	(470) CF	kMSDBI	0.66	0.51	0.85	1.09	0.59	0.93	0.64	0.81	0.69	0.67
	CI	kMSDBIM	0.58	0.11	0.46	0.62	0.21	0.14	0.29	0.32	0.18	0.20

Na combinação SR CF, embora os métodos identifiquem dano na região do meio do vão, todos eles identificam dano em vários nós íntegros da viga. Os métodos identificam dano nos apoios em quase todos os níveis de danificação, erroneamente, com mais frequência nos métodos DCM e DCMM. MSDBI e MSDBIM foram superiores para esta combinação, pois mesmo com falsos positivos resultaram em índices de danificação relativamente altos nos elementos danificados.



Ao comparar os resultados dos métodos originais com os modificados, nota-se que eles se confundem em várias situações, mas que no geral os modificados parecem ser mais capazes de localizar o dano. Cabe destacar que, para o cenário 1, ao se observar a Tabela 9 e a Figura 21 há uma grande influência negativa dos ruídos nos resultados dos métodos e a filtragem de ruídos aplicada se mostrou ineficaz. A melhor das combinações neste cenário é SR SF, para todos os 4 métodos.

4.2. Cenário 2

O cenário 2 se dá pela viga V1 biapoiada, com dano múltiplo presente nos dois apoios. Para este cenário foram considerados danificados os nós 2, 3 e 4. Na combinação SR SF os métodos DCM e DCMM se apresentaram como excelentes opções, visto que ambos identificaram com clareza as regiões danificadas para todos os níveis de danificação ao apresentar baixos índices de danificação nas seções íntegras e altos índices nas seções danificadas. MSDBI e MSDBIM graficamente apresentaram falsos positivos na região central da viga. Os valores de K (Tabela 10) corroboram estes resultados. Há uma grande discrepância entre os métodos neste cenário, pois se DCM e DCMM obtiveram K=3 para todos os níveis de danificação, tem-se K<1 para quase todos os níveis de redução de rigidez em MSDBI e MSDBIM.

Tabela 10 - Valores de K obtidos para o Cenário 2

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SD SE	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SR SF SR CF CR (1%) SF CR (2%) SF CR (2%) SF CR SF	kMSDBI	0.85	1.29	0.62	0.10	0.69	0.08	1.00	0.15	1.75	0.37
	kMSDBIM	0.85	1.29	0.89	1.08	0.76	0.68	2.00	0.61	0.75	0.94
	kDCM	1.72	1.36	1.89	1.59	1.82	3.00	3.00	1.48	3.00	3.00
SR CF	kDCMM	1.83	1.83	1.01	1.35	1.10	1.22	1.30	1.34	1.54	2.96
SICCI	kMSDBI	1.49	2.92	0.78	0.49	0.73	0.78	0.33	1.18	0.31	0.51
	kMSDBIM	0.99	3.00	0.91	0.69	0.67	0.95	1.66	0.83	0.72	0.90
CP	kDCM	0.87	0.49	0.46	1.89	1.35	2.56	3.00	3.00	3.00	2.50
(1%)	kDCMM	0.85	0.60	0.33	0.97	1.04	0.75	1.07	2.20	2.35	1.78
SF	kMSDBI	0.98	0.99	0.67	0.72	0.94	0.96	1.12	1.44	1.03	0.64
	kMSDBIM	0.68	0.89	0.67	0.73	0.64	0.74	0.90	0.83	0.67	0.69
CP	kDCM	0.53	1.41	1.25	1.58	0.81	1.26	3.00	2.68	3.00	3.00
(1%)	kDCMM	0.69	1.38	0.78	1.10	0.84	0.47	0.40	0.77	0.66	0.49
CF	kMSDBI	1.43	2.65	0.46	0.50	0.74	0.01	0.30	0.48	0.36	0.36
	kMSDBIM	1.70	2.62	0.92	0.61	0.75	0.44	0.73	0.65	0.13	0.34
CP	kDCM	0.86	0.46	0.43	1.77	1.27	2.15	3.00	3.00	3.00	2.10
(2%)	kDCMM	0.79	0.78	0.48	0.79	0.73	0.69	1.07	1.36	1.45	1.98
SF	kMSDBI	0.95	0.96	0.85	0.90	0.90	1.23	0.68	1.69	0.78	1.24
$SR SF \begin{cases} k \\ k$	kMSDBIM	0.95	0.96	0.85	0.88	0.87	0.93	0.82	1.09	0.91	1.20
CR	kDCM	1.66	3.00	1.71	1.35	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.59
(2%)	kDCMM	1.78	2.36	1.52	1.00	1.73	1.75	2.14	1.86	1.24	1.91
CF	kMSDBI	1.12	1.92	0.34	0.57	0.84	0.45	0.22	0.99	0.45	1.76
SF CR (1%) CF CR (2%) SF CR (2%) CF CR (2%) CF CR (4%) SF	kMSDBIM	1.12	1.85	0.72	0.90	0.48	0.48	1.32	1.13	0.57	1.02
CR	kDCM	0.88	0.47	0.42	1.72	1.23	1.91	2.67	1.56	3.00	1.85
(4%)	kDCMM	0.70	1.14	0.32	0.95	0.60	0.72	1.06	1.23	0.79	2.09
SF	kMSDBI	0.90	0.89	0.81	0.88	0.85	1.03	0.22	1.43	0.49	1.14
	kMSDBIM	0.46	0.54	0.27	0.33	0.33	0.30	0.56	0.45	0.32	0.64
CR	kDCM	0.96	1.54	1.09	1.44	1.29	1.09	3.00	0.77	2.07	2.14
(4%)	kDCMM	1.04	1.18	0.35	0.44	0.58	0.58	0.82	0.34	0.54	0.57
CF	kMSDBI	0.86	1.39	0.39	0.41	0.85	0.45	0.53	0.93	0.77	1.17
	kMSDBIM	1.22	1.54	0.48	0.86	0.88	0.79	1.05	1.03	0.71	1.82

Na combinação SR CF, DCM e DCMM identificam e localizam o dano graficamente de maneira satisfatória, porém o resultado de K é prejudicado ao passo que os nós 5 e 19 apresentam altos índices de danificação e neste cenário foram considerados danificados os nós 2, 3 e 4 no apoio esquerdo e nós 20, 21 e 22 no apoio direito. Os métodos MSDBI e MSDBIM não são consistentes para todas as combinações e possuem muitos falsos positivos na extensão da viga.

Ao adicionar ruído há grande diferença entre os métodos estudados: o método DCM possui ótimos resultados para níveis de danificação mais altos, porém não a ponto de identificar e localizar com precisão o dano para todos os níveis de redução de rigidez. Graficamente MSDBI e MSDBIM possuem vários falsos positivos em nós íntegros e não são capazes de identificar com clareza o dano em quase nenhum nível de redução de rigidez. Ocorre uma situação inusitada na qual os resultados são melhores com ruído de 4% do que com o ruído de 1% para alguns níveis de redução de rigidez, o que pode ser explicado pela aleatoriedade, o que reforça a ideia de se usar várias combinações e depois realizar a análise estatística.

Ao adicionar ruídos e filtragem dos dados, embora os níveis de K sejam marginalmente maiores em algumas combinações, ocorrem muitos falsos positivos em toda a extensão da viga para quase todos os métodos, o que impossibilita a identificação e localização com clareza do dano nas vigas. O único método que parece ter alguma validade nesta combinação é o método DCM, porém é deficiente principalmente em menores níveis de redução de rigidez. No cenário 2 a filtragem de dados parece melhorar os resultados quando há ruído, mas piorar quando não há ruído.



Figura 22 - Resultados para o cenário 2.

b)

Ao comparar os resultados dos métodos originais com os modificados, nota-se que eles se confundem em várias situações. O método DCM demonstra ser o mais consistente com maiores valores de K devido aos altos índices em nós danificados e baixos índices em nós íntegros. Há uma grande influência negativa dos ruídos nos resultados dos métodos, enquanto a filtragem de

dados foi pouco eficaz na presença de ruído. A melhor das combinações neste cenário é SR SF, para todos os 4 métodos.

4.3. Cenário 3

O cenário 3 caracteriza-se pela presença de dano múltiplo na viga V1 biapoiada, sendo os danos localizados no apoio esquerdo e no centro do vão da viga. Na combinação SR SF o método DCM foi capaz de identificar o dano no apoio esquerdo e apresentou a possibilidade de dano no meio do vão, porém apresentou um alto nível de danificação no apoio direito, uma falha visto que tal seção era íntegra neste cenário.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	2.67	1.97	2.30	1.59	1.38	1.33	1.21
CD CE	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SR SF SR CF (1%) CR (1%) CR (2%) SF CR (2%) CF CR (2%) CF	kMSDBI	1.10	1.13	1.11	1.57	1.27	1.07	0.81	1.29	1.39	1.30
	kMSDBIM	0.86	1.13	1.11	1.57	0.79	1.68	1.00	1.51	2.20	1.60
	kDCM	1.22	1.56	0.47	0.92	1.66	1.06	0.62	0.69	0.98	0.91
SR CF	kDCMM	1.17	1.04	0.35	0.59	1.05	0.86	1.26	0.68	0.92	1.25
SICCI	kMSDBI	1.12	1.27	0.79	0.59	0.92	1.23	1.03	0.40	0.46	0.49
	kMSDBIM	0.92	0.44	0.45	0.64	0.59	0.83	0.92	0.58	0.89	0.29
CP	kDCM	0.81	0.61	0.53	0.74	0.82	1.32	1.10	1.06	1.08	1.02
(1%)	kDCMM	0.45	0.75	0.19	0.68	0.50	0.40	0.45	1.02	1.36	1.03
SF	kMSDBI	1.10	1.22	0.73	0.63	0.56	1.44	0.59	0.41	0.45	0.36
	kMSDBIM	0.54	0.53	0.43	0.63	0.53	0.64	0.59	0.47	1.36	0.73
CR	kDCM	1.05	1.01	0.42	0.73	1.07	0.81	0.72	0.88	1.16	0.78
(1%)	kDCMM	0.77	0.57	0.69	0.51	0.53	0.71	0.67	0.56	1.05	0.34
CF	kMSDBI	1.42	1.03	0.90	0.48	1.06	1.23	0.47	0.36	0.62	0.43
	kMSDBIM	1.62	1.17	0.91	0.43	0.73	0.81	0.76	0.35	0.56	0.47
CR	kDCM	0.80	0.61	0.53	0.71	0.71	1.21	0.97	0.95	0.96	0.88
(2%)	kDCMM	0.89	0.79	0.65	0.73	0.58	0.83	0.46	0.59	0.87	0.85
SF	kMSDBI	1.04	1.18	0.71	0.93	0.68	1.38	1.09	0.76	0.40	0.53
	kMSDBIM	1.06	1.18	0.72	000 2.67 1.97 2.30 1.59 000 3.00 3.000 3.000 3.000 111 1.57 1.27 1.07 0.81 111 1.57 0.79 1.68 1.000 $.47$ 0.92 1.66 1.06 0.62 $.35$ 0.59 1.05 0.86 1.26 $.79$ 0.59 0.92 1.23 1.03 $.45$ 0.64 0.59 0.83 0.92 $.53$ 0.74 0.82 1.32 1.10 $.19$ 0.68 0.50 0.40 0.45 $.73$ 0.63 0.56 1.44 0.59 $.43$ 0.63 0.53 0.64 0.59 $.42$ 0.73 1.07 0.81 0.72 $.69$ 0.51 0.53 0.71 0.67 $.90$ 0.48 1.06 1.23 0.47 $.91$ 0.43 0.73 0.81 0.76 $.53$ 0.71 0.71 1.21 0.97 $.65$ 0.73 0.58 0.83 0.46 $.71$ 0.94 0.74 0.96 0.99 $.25$ 1.97 0.75 1.44 0.71 $.90$ 1.12 0.58 0.79 0.78 $.84$ 1.02 1.16 1.19 0.47 $.54$ 0.57 0.33 0.53 0.35 $.52$ 0.68 0.65 1.42 0.86 $.03$ 1.36 1.2	1.18	1.23	1.09			
CR	kDCM	1.07	1.41	1.25	1.97	0.75	1.44	0.71	0.82	0.98	0.90
(2%)	kDCMM	0.98	1.09	0.90	1.12	0.58	0.79	0.78	0.76	0.86	1.21
CF	kMSDBI	1.03	1.25	0.84	1.02	1.16	1.19	0.47	0.78	1.00	0.46
	kMSDBIM	0.72	0.60	0.54	0.57	0.33	0.53	0.35	0.77	0.37	0.45
CR	kDCM	0.77	0.60	0.52	0.68	0.65	1.42	0.86	0.86	0.87	0.77
(4%)	kDCMM	0.78	1.27	1.03	1.36	1.26	1.01	0.89	0.98	1.72	0.76
SF	kMSDBI	0.92	1.11	0.71	0.88	0.49	1.27	0.95	0.43	0.16	0.23
	kMSDBIM	0.82	1.02	1.00	1.02	0.97	1.09	0.87	1.00	1.68	0.90
CR	kDCM	0.42	1.22	0.73	0.79	0.87	1.41	0.80	0.77	1.00	0.88
(4%)	kDCMM	0.56	0.37	0.81	0.47	0.56	1.08	0.87	0.75	0.91	0.97
CF	kMSDBI	0.81	1.07	0.97	1.39	1.29	0.82	0.35	0.63	0.85	0.71
	kMSDBIM	0.87	0.76	0.86	0.84	0.52	0.81	0.80	1.28	0.45	1.28

Tabela 11 - Valores de K obtidos para o Cenário 3.

O método DCMM foi o que melhor se comportou para o cenário 3 (Figura 23 e Tabela 11), localizando com clareza as duas regiões danificadas, com apenas pequenas perturbações no resto da viga, que destoam das regiões danificadas. Embora o nível de redução de rigidez fosse o mesmo, os métodos DCM e DCMM apresentaram maiores índices nos elementos próximos ao apoio esquerdo comparado ao meio do vão. Os métodos MSDBI e MSDBIM se mostraram mais uma vez incapazes de determinar com clareza as regiões danificadas por resultar altos índices em várias partes íntegras da viga, com um adendo que MSDBIM identifica menos falsos positivos que MSDBI.

Embora os valores de K sejam prejudicados (pois há altos índices de danificação no nó 5, não contabilizado como nó danificado neste cenário), é possível observar que, graficamente, a combinação SR CF é capaz de localizar o dano no apoio esquerdo para os métodos DCM e DCMM. Muitos falsos positivos são identificados nos métodos MSDBI e MSDBIM, em toda a extensão da viga, enquanto DCM e DCMM indicam falsos positivos no apoio direito.

Ao se adicionar ruído as combinações CR SF e CR CF têm resultados pífios visto que nenhum dos métodos é consistente na identificação e localização de dano para os níveis de redução de rigidez estudados. É interessante observar que o método DCM indica falsos positivos com índices altos nos apoios para quase todos os níveis de redução de rigidez. Diferente do que ocorreu no cenário 2, a filtragem de dados não se mostrou eficiente.





Comparando um a um os resultados dos métodos originais com os modificados, nota-se que há uma certa superioridade dos modificados com relação aos seus pares. O método DCMM demonstra ser o mais consistente com maiores valores de K devido aos altos índices em nós danificados e menores índices em nós íntegros, embora indiquem falsos positivos no apoio íntegro. Há uma grande influência negativa dos ruídos nos resultados dos métodos. A melhor das combinações neste cenário é SR SF, para todos os 4 métodos. Os métodos se mostram ligeiramente melhores para maiores índices de danificação quando há ruído adicionado.

4.4.Cenário 4

No cenário 4 a viga V1 é biengastada e tem por configuração de danificação a mesma do cenário 1, ou seja, dano único no meio do vão. Na combinação SR SF os 4 métodos têm excelentes resultados como pode ser visto na Figura 24.

Os métodos modificados (DCMM e MSDBIM) se mostraram mais eficazes, ambos sendo capazes de identificar corretamente o dano no centro do vão e com pequenas perturbações nas regiões íntegras da viga para todos os índices de danificação. Embora os métodos originais identifiquem o dano no meio do vão, estes possuem falsos positivos, principalmente para redução de rigidez de 25%.

As combinações CR SF e CR CF resultam em índices muito similares ao indicar dano nos nós próximos ao elemento danificado (porém sem indicar dano no elemento danificado em si) e falsos positivos. A variação do nível de ruído para 1% já incapacita os métodos de localizarem o dano neste cenário.

A adição de ruído dificulta os métodos de localizar corretamente os elementos danificados, ao indicar dano em seções íntegras, e ao resultar em índices de danificação perto de 0 na região danificada. Tal fato pode ser observado com clareza nos valores de K, visto que quase todos com ruído são próximos a 0. Há uma leve melhora nos métodos DCM e DCMM para maiores reduções de rigidez, mesmo assim são incapazes de localizar o dano com clareza.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
SR SF SR CF CR (1%) SF CR (2%) CR (2%) CR (2%) SF CR (2%) SF CR (2%) SF CR (2%) CF CR (2%) CF	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.56	3.00	3.00	3.00
	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBI	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.80	3.00	3.00	0.99
	kMSDBIM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kDCM	0.97	0.73	0.76	0.95	1.08	0.91	0.96	0.85	1.02	1.49
SR CF	kDCMM	0.97	0.73	0.76	0.96	0.88	0.83	0.79	0.78	0.84	0.98
SICCI	kMSDBI	0.67	0.63	0.59	0.71	0.91	0.76	1.20	0.64	0.56	1.24
	kMSDBIM	0.67	0.63	0.59	0.71	0.69	0.58	0.52	0.48	0.40	0.33
CD	kDCM	0.12	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.36	0.33	0.45	0.89
(1%)	kDCMM	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.34	0.49	0.63
SF	kMSDBI	0.37	0.37	0.36	0.33	0.17	0.19	0.64	0.20	0.20	0.56
	kMSDBIM	0.37	0.37	0.36	0.33	0.01	0.03	0.04	0.05	0.05	0.08
CD	kDCM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.45	0.47	0.61	1.11
(1%)	kDCMM	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.19	0.46	0.51	0.66	0.67
CF	kMSDBI	0.30	0.30	0.28	0.11	0.15	0.18	0.67	0.25	0.30	0.68
ĊF	kMSDBIM	0.30	0.30	0.28	0.11	0.09	0.12	0.17	0.19	0.23	0.24
CD	kDCM	0.14	0.11	0.03	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.04	0.55
(2%)	kDCMM	0.13	0.11	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.14	0.29
SF	kMSDBI	0.36	0.36	0.36	0.35	0.40	0.32	0.68	0.15	0.16	0.55
	kMSDBIM	0.35	0.34	0.34	3.00 3.00	0.12	0.13				
CP	kDCM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.10	0.15	0.49
(2%)	kDCMM	0.10	0.06	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.15	0.19	0.25
CF	kMSDBI	0.29	0.29	0.28	0.27	0.46	0.24	0.68	0.08	0.08	0.61
	kMSDBIM	0.37	0.37	0.36	0.34	0.34	0.14	0.05	0.07	00 3.00 3. 00 3.00 3. 00 3.00 3. 00 3.00 3. 00 3.00 3. 00 3.00 3. 00 3.00 3. 00 3.00 3. 35 1.02 1. 78 0.84 0. 54 0.56 1. 48 0.40 0. 33 0.45 0. 34 0.49 0. 20 0.20 0. 35 0.05 0. 47 0.61 1. 51 0.66 0. 25 0.30 0. 10 0.14 0. 11 0.12 0. 10 0.14 0. 15 0.16 0. 16 0.18 0. 07 0.07 0. 08 0.40 0.31 00 0.00 0. <tr< td=""><td>0.08</td></tr<>	0.08
CP	kDCM	0.14	0.13	0.11	0.02	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.29
(4%)	kDCMM	0.23	0.22	0.19	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SF	kMSDBI	0.34	0.34	0.34	0.34	0.37	0.36	0.63	0.34	0.26	0.53
	kMSDBIM	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.42	0.42	0.40	0.31	0.17
CD	kDCM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.43
Ск (4%)	kDCMM	0.08	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.14	0.18
CF	kMSDBI	0.24	0.24	0.24	0.24	0.39	0.38	0.68	0.36	0.18	0.54
	kMSDBIM	0.13	0.13	0.14	0.13	0.16	0.15	0.17	0.16	0.18	0.20

Tabela 12 - Valores de K obtidos para o Cenário 4.



Para este cenário 4, é nítido que o ruído adicionado reduz muito a capacidade dos métodos de identificarem e localizarem corretamente o dano tanto graficamente quanto comparando os valores de K presentes na Tabela 12. A filtragem de dados parece adicionar falsos positivos em seções íntegras da viga e deslocar a região danificada para um nó próximo. A combinação SR SF é a melhor das combinações neste cenário para todos os 4 métodos.

4.5.Cenário 5

O cenário 5, que se caracteriza pelo dano nas duas extremidades da viga V1 biengastada, teve resultados parecidos com o cenário 2. Na combinação SR SF os métodos DCM e DCMM foram capazes de identificar as regiões danificadas com altos índices, enquanto apresentaram valores próximos a zero nas regiões íntegras. Os métodos MSDBI e MSDBIM indicam dano nos nós danificados, porém indicam vários falsos positivos em regiões íntegras intermediárias. Este cenário trouxe péssimos resultados para as demais combinações.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	2.65	0.55	1.68	0.59	2.14	3.00	3.00
SR SF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBI	1.58	1.56	1.56	0.17	0.05	1.01	0.00	0.00	0.43	0.71
	kMSDBIM	1.58	1.56	1.56	1.58	1.57	1.58	1.72	1.91	1.91	1.90
	kDCM	1.87	2.56	2.02	1.96	0.49	1.43	0.53	0.60	2.09	1.78
SR CF	kDCMM	1.87	2.06	1.58	1.59	1.63	1.58	1.69	1.92	2.05	2.39
SICCI	kMSDBI	0.18	0.16	0.13	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.05
	kMSDBIM	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.13	0.24	0.38	0.39
CD	kDCM	0.84	0.66	0.65	0.00	0.03	1.51	0.31	0.17	0.87	1.12
(1%)	kDCMM	0.69	0.48	0.53	0.67	0.78	0.87	0.98	1.08	1.18	1.29
SF	kMSDBI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	kMSDBIM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
CR (1%)	kDCM	0.21	0.14	0.20	0.00	0.02	0.20	0.17	0.00	0.50	0.31
	kDCMM	0.09	0.03	0.09	0.12	0.22	0.43	0.54	0.63	0.65	0.74
CF	kMSDBI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	kMSDBIM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CR	kDCM	0.89	0.81	0.64	0.00	0.00	1.15	0.10	0.00	0.58	0.83
(2%)	kDCMM	0.79	0.70	0.51	0.55	0.64	0.72	0.77	0.80	0.82	0.88
SF	kMSDBI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	kMSDBIM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CR	kDCM	0.27	0.11	0.00	0.31	0.11	0.00	0.21	0.07	0.34	0.30
(2%)	kDCMM	0.19	0.04	0.00	0.15	0.21	0.23	0.26	0.31	0.41	0.72
ĊF	kMSDBI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	kMSDBIM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CR	kDCM	0.91	0.88	0.81	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.36	0.62
(4%)	kDCMM	0.69	0.65	0.57	0.51	0.48	0.51	0.64	0.79	0.82	0.84
SF	kMSDBI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	kMSDBIM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CR	kDCM	0.14	0.15	0.12	0.00	0.09	0.00	0.30	0.00	0.42	0.18
(4%)	kDCMM	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.08	0.30	0.30
CF	kMSDBI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-	kMSDBIM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela 13 - Valores de K obtidos para o Cenário 5.

Ao adicionar ruído, é visível tanto graficamente quanto nos valores de K que nenhum método se destaca positivamente para todos os níveis de redução de rigidez. DCM localiza dano nas regiões danificadas para alguns níveis de redução de rigidez, porém todos os métodos indicam

muitos falsos positivos em regiões íntegras da viga. A filtragem dos dados não se mostrou eficaz, pois piorou os resultados quando comparado aos seus pares sem filtragem.



Para este cenário o método que mais se destaca é o método DCMM, seguido por DCM. A combinação SR SF é a única capaz de localizar o dano com clareza. A filtragem de ruídos utilizada adicionou falsos positivos e foi incapaz de melhorar os resultados. O ruído adicionado impediu a correta localização dos elementos danificados.

4.6. Cenário 6

O cenário 6 (Figura 26) é semelhante ao cenário 3 por apresentar dano no apoio esquerdo e no centro do vão, com a diferença de ser uma viga V1 biengastada. Na combinação SR SF os métodos modificados se destacam, com K=3 para todos os níveis de redução de rigidez (Tabela 14): o método DCMM identifica e localiza com clareza os danos, embora apresente maiores indicadores no apoio esquerdo que no centro do vão, mesmo os níveis de danificação sendo iguais.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	2.94	2.95	1.60	1.84	1.92	1.98	0.49
SR SF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBI	3.00	3.00	3.00	1.58	1.60	0.99	1.84	1.86	1.90	1.20
	kMSDBIM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kDCM	0.62	1.19	1.86	1.92	2.08	1.28	1.45	1.45	1.38	0.77
SR CF	kDCMM	0.95	1.91	1.25	2.17	2.74	2.57	2.24	2.07	2.03	1.92
SRUT	kMSDBI	0.25	0.62	0.55	0.55	0.38	1.44	1.21	1.21	1.24	1.27
	kMSDBIM	0.26	0.63	0.57	1.28	1.11	0.97	1.27	1.04	0.94	0.85
CD	kDCM	0.99	1.07	0.92	0.17	0.14	0.57	0.61	0.68	0.75	0.41
(1%)	kDCMM	0.84	0.91	0.74	0.48	0.45	0.59	0.79	1.06	1.42	1.82
SF	kMSDBI	0.37	0.37	0.48	0.48	0.49	0.55	0.75	0.75	0.75	0.54
51	kMSDBIM	0.37	0.37	0.48	0.36	0.36	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33
CR (1%)	kDCM	0.24	0.47	0.52	0.38	0.29	0.67	0.82	0.83	0.93	0.60
	kDCMM	0.25	0.48	0.53	0.44	0.45	0.45	0.70	0.59	0.72	1.07
CF	kMSDBI	0.30	0.29	0.34	0.49	0.49	0.46	0.87	1.01	1.05	0.74
	kMSDBIM	0.30	0.29	0.34	0.31	0.29	0.33	0.31	0.35	0.32	0.36
CD	kDCM	0.96	1.00	1.07	0.45	0.26	0.52	0.49	0.51	0.53	0.39
(2%)	kDCMM	0.86	0.90	0.96	0.76	0.57	0.45	0.55	0.66	0.77	0.89
SF	kMSDBI	0.36	0.36	0.36	0.72	0.47	0.36	0.54	0.55	0.55	0.33
	kMSDBIM	0.35	0.34	0.34	0.59	0.37	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32
CD	kDCM	0.35	0.42	0.48	0.44	0.36	0.79	0.87	0.94	0.96	0.64
(2%)	kDCMM	0.28	0.34	0.56	0.67	0.55	0.52	0.50	0.49	0.52	0.59
(270) CF	kMSDBI	0.29	0.29	0.25	0.47	0.47	0.34	0.66	0.66	0.66	0.47
	kMSDBIM	0.37	0.37	0.32	0.22	0.33	0.33	0.40	0.42	0.42	0.34
CD	kDCM	0.94	0.96	1.00	0.71	0.60	0.69	0.52	0.48	0.43	0.36
(4%)	kDCMM	0.73	0.75	0.79	0.85	0.66	0.43	0.29	0.27	0.25	0.29
(470) SF	kMSDBI	0.34	0.34	0.34	0.45	0.44	0.46	0.66	0.63	0.63	0.35
21	kMSDBIM	0.44	0.44	0.44	0.43	0.42	0.25	0.42	0.43	0.43	0.43
CD	kDCM	0.12	0.14	0.18	0.41	0.42	0.97	1.03	1.01	1.02	0.78
UK (4%)	kDCMM	0.13	0.21	0.37	0.56	0.59	0.68	0.67	0.68	0.69	0.68
CF	kMSDBI	0.24	0.24	0.24	0.48	0.45	0.49	0.70	0.67	0.61	0.42
C1	kMSDBIM	0.14	0.14	0.14	0.16	0.38	0.30	0.21	0.21	0.23	0.23

Tabela 14 - Valores de K obtidos para o Cenário 6.

Ainda sobre a combinação SR SF, o método MSDBIM também é excelente pois possui altos índices nos nós danificados e baixos índices em nós íntegros. Os métodos originais são capazes de identificar dano nas regiões danificadas, porém o método DCM não é capaz de identificar o

dano central em todos os níveis de danificação e apresenta altos índices no apoio direito para maiores níveis de redução de rigidez, já o método MSDBI apresenta vários falsos positivos em nós intermediários da viga.



A filtragem dos dados impede a correta localização do dano nas combinações SR CF e CR CF. Nos métodos MSDBI e MSDBIM a filtragem dos dados não parece fazer diferença

significativa. Nas combinações com ruído, nenhum dos 4 métodos é capaz de identificar o dano apenas nos nós danificados para todos os níveis de redução de rigidez.

Para este cenário os métodos que mais se destacam são DCMM e MSDBIM. A combinação SR SF é a mais capaz de se identificar e localizar o dano. A filtragem de ruídos foi incapaz de reduzir falsos positivos. Quando houve ruído, os métodos falharam em localizar corretamente os elementos danificados.

4.7. Cenário 7

O cenário 7 tem por característica a viga V2 biapoiada, com dano introduzido no meio do vão. Neste cenário a combinação SR SF tem ótimos resultados para os métodos modificados em todos os níveis de danificação. Os métodos originais por sua vez não são capazes de identificar os elementos danificados com clareza pois são obtidos vários falsos positivos em elementos íntegros.

De uma forma geral todas as outras combinações possuem altos índices de danificação em nós íntegros, o que dificulta a distinção entre regiões íntegras e danificadas, principalmente para menores níveis de redução de rigidez. Ao passo que se aumenta o nível de redução de rigidez os métodos conseguem localizar melhor o dano, com maiores valores de K (Tabela 15).

Método 1% 2.50% 5% 10% 15% 20% 25% 30% 35% 40% **kDCM** 0.46 0.51 0.36 0.37 0.38 0.42 0.57 0.64 0.72 0.81 **kDCMM** 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 SR SF **k**MSDBI 0.59 0.59 0.59 0.59 0.59 0.60 0.61 0.62 0.64 0.66 **kMSDBIM** 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 **kDCM** 0.78 0.86 0.39 0.94 0.68 0.57 0.66 1.07 1.23 1.23 1.01 1.79 1.38 1.74 1.20 1.35 2.17 3.00 3.00 2.85 **kDCMM** SR CF **kMSDBI** 0.56 0.71 0.59 0.87 0.81 0.84 0.67 1.00 1.25 1.38 **kMSDBIM** 0.89 1.89 1.02 2.11 1.69 1.11 2.11 2.31 2.44 1.96 **kDCM** 0.59 0.68 0.69 0.74 0.79 0.85 0.92 1.00 1.10 1.22 CR 0.75 1.08 1.25 1.41 1.59 1.78 2.05 2.39 **kDCMM** 0.38 0.49 (1%)**k**MSDBI 0.60 0.61 0.62 0.62 0.51 0.55 0.60 0.66 0.73 0.82 SF kMSDBIM 0.64 0.64 0.69 0.83 1.06 1.19 1.30 1.42 1.54 1.69 **kDCM** 0.30 0.39 0.49 0.58 0.70 0.86 0.87 0.72 0.97 1.08 CR 0.98 2.47 2.26 **kDCMM** 0.16 0.15 0.65 1.39 2.61 1.60 3.00 (1%)**kMSDBI** 0.28 0.37 0.46 0.57 0.71 0.86 0.58 0.55 0.84 1.25 CFkMSDBIM 0.40 0.45 0.98 1.00 1.82 2.60 2.08 2.01 1.69 3.00 **kDCM** 0.55 0.67 0.74 0.77 0.82 0.88 0.95 1.02 1.11 1.22 CR 1.42 **kDCMM** 0.35 0.42 0.56 0.82 1.04 1.24 1.57 1.73 1.91 (2%) kMSDBI 0.68 0.67 0.68 0.65 0.62 0.68 0.75 0.63 0.66 0.83 SF **kMSDBIM** 0.80 0.80 0.76 0.79 0.94 1.09 1.25 1.36 1.47 1.58 **kDCM** 0.19 0.17 0.19 0.33 0.43 0.56 0.58 0.98 0.99 1.02 CR 0.06 0.20 0.41 0.59 0.87 1.00 2.03 1.60 2.22 **kDCMM** 0.05 (2%) 0.23 0.28 0.36 0.39 0.40 0.51 0.33 0.62 0.79 **k**MSDBI 0.98 CF **kMSDBIM** 0.24 0.46 0.61 0.71 0.76 1.01 0.82 1.53 1.59 2.04 1.06 **kDCM** 0.61 0.59 0.66 0.81 0.86 0.92 0.99 1.15 1.26 CR 0.59 **kDCMM** 0.24 0.21 0.17 0.31 0.45 0.72 0.84 0.96 1.09 (4%) **kMSDBI** 0.78 0.73 0.70 0.72 0.74 0.75 0.76 0.77 0.80 0.89 SF 0.44 kMSDBIM 0.37 0.33 0.31 0.33 0.34 0.56 0.72 0.88 1.04 **kDCM** 0.42 0.38 0.37 0.54 0.61 0.67 0.83 0.63 0.82 0.85 CR **kDCMM** 0.23 0.17 0.25 0.42 0.48 0.56 0.71 0.61 0.75 0.73 (4%) **kMSDBI** 0.51 0.45 0.59 0.67 0.70 0.81 0.87 0.58 0.84 1.03 CF 0.39 0.45 0.64 0.66 0.85 0.99 kMSDBIM 0.42 0.74 0.99 1.18

Tabela 15 - Valores de K obtidos para o Cenário 7.



Neste cenário a combinação SR SF é a na qual o dano é melhor identificado e localizado, sendo os métodos modificados DCMM e MSDBIM muito superiores aos originais. A filtragem dos dados falhou em reduzir os falsos positivos. Quanto maior o ruído, pior foram os resultados, e a presença de ruído incapacita a localização em baixos níveis de danificação. A principal diferença deste cenário para os anteriores é a viga, que tem dimensões mais condizentes com vigas utilizadas na prática.

4.8. Cenário 8

O cenário 8 é descrito pela viga V2 biapoiada e o dano é introduzido nos dois apoios. A combinação SR SF tem excelentes resultados para todos os 4 métodos. Tanto graficamente (Figura 28) quanto pelos valores de K, todos iguais a 3 na Tabela 16. Os índices de danificação são altos nos nós danificados e muito baixos nos nós íntegros, o que é perfeito para correta localização de dano.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SR SF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBI	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBIM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.16
SR CF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.87	2.86
SRCI	kMSDBI	0.58	0.38	0.73	0.66	0.58	0.81	0.76	1.86	1.81	0.87
	kMSDBIM	0.58	0.38	0.73	0.66	0.58	0.81	0.76	1.33	1.08	1.10
CR (1%)	kDCM	0.25	0.33	0.55	0.78	0.96	1.15	1.38	1.74	2.22	1.50
	kDCMM	0.25	0.33	0.55	0.78	0.96	1.15	1.33	1.63	2.27	3.00
SF	kMSDBI	0.15	0.16	0.21	0.22	0.30	0.45	0.60	1.28	1.39	0.96
	kMSDBIM	0.16	0.16	0.21	0.22	0.30	0.45	0.61	0.88	0.84	1.38
CR (1%)	kDCM	1.31	0.71	1.12	1.87	2.01	1.89	1.89	1.95	2.20	1.44
	kDCMM	1.31	0.71	1.12	1.85	2.00	1.88	1.85	2.35	3.00	3.00
CF	kMSDBI	0.49	0.25	0.09	0.19	0.28	0.49	0.56	0.84	0.96	0.78
	kMSDBIM	0.49	0.25	0.09	0.19	0.28	0.49	0.56	0.63	0.71	0.74
CR	kDCM	0.30	0.23	0.30	0.47	0.54	0.63	0.75	0.91	1.09	0.89
(2%)	kDCMM	0.21	0.16	0.29	0.46	0.53	0.63	0.76	0.95	1.23	1.62
SF	kMSDBI	0.16	0.11	0.16	0.22	0.25	0.24	0.38	0.92	1.02	0.85
	kMSDBIM	0.13	0.08	0.13	0.19	0.21	0.22	0.35	0.78	0.90	0.94
CR	kDCM	0.66	0.61	0.97	1.37	1.39	1.40	1.52	1.48	1.50	1.04
(2%)	kDCMM	0.66	0.62	0.97	1.36	1.38	1.39	1.50	1.45	1.60	2.18
ĊF	kMSDBI	0.30	0.22	0.33	0.16	0.17	0.36	0.44	0.70	0.67	0.68
	kMSDBIM	0.30	0.22	0.33	0.16	0.17	0.36	0.44	0.54	0.57	0.68
CR	kDCM	0.34	0.28	0.24	0.24	0.29	0.33	0.38	0.46	0.57	0.54
(4%)	kDCMM	0.26	0.23	0.19	0.26	0.33	0.36	0.44	0.55	0.69	0.90
SF	kMSDBI	0.12	0.11	0.10	0.15	0.19	0.24	0.28	0.55	0.67	0.68
	kMSDBIM	0.02	0.01	0.01	0.07	0.11	0.15	0.19	0.60	0.70	0.77
CR	kDCM	0.34	0.51	0.65	0.75	0.82	0.78	1.11	1.22	1.15	0.83
(4%)	kDCMM	0.31	0.42	0.51	0.59	0.64	0.65	0.98	1.21	1.19	1.38
CF	kMSDBI	0.28	0.27	0.21	0.27	0.15	0.19	0.35	0.52	0.61	0.68
	kMSDBIM	0.21	0.22	0.15	0.20	0.11	0.14	0.28	0.42	0.51	0.67

Tabela 16 - Valores de K obtidos para o Cenário 8.

Ao adicionar ruído, as combinações CR SF e CR CF mantém resultados robustos nos métodos DCM e DCMM para altos níveis de danificação, enquanto os métodos MSDBI e MSDBIM ainda localizam os elementos danificados, porém registram falsos positivos com índices de danificação relativamente altos em nós íntegros, o que pode ser notado por valores de K<2 em

quase todos os níveis de redução de rigidez. Quando há presença de ruído os métodos são incapazes de localizar dano em menores níveis de redução de rigidez. Quanto maior o nível de ruído, piores os resultados.



Ao adicionar a filtragem de dados, a combinação SR CF mantém resultados robustos, principalmente nos métodos DCM e DCMM, porém mesmo mantendo resultados robustos, não

parece melhorar os resultados em nenhuma das situações deste cenário, se mostrando inconsistente para diferentes níveis de redução de rigidez.

Mais uma vez a combinação SR SF se mostrou a mais eficiente. Os métodos DCM e DCMM se comportaram bem tanto na combinação SR SF quanto nas combinações SR CF e em níveis de danificação >30% nas combinações CR SF e CR CF para ruído de 1% e de 2%.

4.9. Cenário 9

O cenário 9 possui configuração similar ao cenário 3, com a viga V2 biapoiada e o dano introduzido simultaneamente apoio esquerdo e no meio do vão. O método que se destaca na combinação SR SF é o DCMM, seguido pelo DCM.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	2.91	2.74	2.60	2.54	2.49	2.46	2.48
SR SF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBI	0.67	0.62	0.63	0.64	1.19	1.36	1.99	1.31	1.03	0.89
	kMSDBIM	1.50	1.46	1.36	1.45	3.00	3.00	3.00	3.00	2.48	2.00
	kDCM	1.53	0.83	1.39	1.08	0.91	1.32	1.23	1.49	2.22	2.49
SR CF	kDCMM	1.24	1.37	2.44	1.90	2.59	1.66	1.17	2.38	3.00	2.65
511 01	kMSDBI	0.46	0.25	0.52	0.37	0.85	0.94	0.77	0.85	0.69	0.80
	kMSDBIM	0.75	0.29	0.68	0.45	1.40	0.79	0.78	1.03	1.74	1.41
CR	kDCM	0.30	0.35	0.49	0.72	0.86	1.17	1.49	1.81	1.92	1.99
(1%)	kDCMM	0.37	0.33	0.48	0.75	0.91	1.13	1.25	1.55	2.27	3.00
SF	kMSDBI	0.51	0.51	0.54	0.76	0.92	1.05	1.13	1.33	1.19	1.30
	kMSDBIM	0.57	0.57	0.61	0.76	0.94	1.05	1.10	1.18	1.35	1.47
CR (1%)	kDCM	0.74	0.41	0.37	0.50	0.36	0.60	0.68	0.85	1.62	1.95
	kDCMM	1.10	0.77	0.52	0.53	0.59	1.24	0.60	1.60	2.82	2.38
ĊF	kMSDBI	0.28	0.29	0.22	0.47	0.48	0.68	0.56	0.67	0.70	0.81
	kMSDBIM	0.30	0.28	0.30	0.56	0.52	0.64	0.46	0.73	0.86	0.79
CR	kDCM	0.32	0.33	0.38	0.53	0.66	0.73	0.84	0.96	1.15	1.61
(2%)	kDCMM	0.31	0.33	0.39	0.53	0.69	0.81	0.87	1.01	1.21	1.94
SF	kMSDBI	0.55	0.54	0.54	0.57	0.63	0.76	0.90	1.02	1.29	1.48
	kMSDBIM	0.56	0.55	0.55	0.65	0.74	0.86	1.00	1.08	1.17	1.39
CR	kDCM	0.21	0.15	0.07	0.05	0.12	0.42	0.47	0.92	1.16	1.58
(2%)	kDCMM	0.24	0.11	0.09	0.15	0.20	0.31	0.36	0.81	1.16	1.99
CF	kMSDBI	0.38	0.34	0.31	0.22	0.18	0.22	0.31	0.54	0.37	0.52
	kMSDBIM	0.42	0.37	0.31	0.18	0.21	0.29	0.40	0.28	0.43	0.53
CR	kDCM	0.37	0.34	0.35	0.42	0.49	0.57	0.67	0.75	0.83	1.11
(4%)	kDCMM	0.22	0.21	0.21	0.21	0.25	0.34	0.41	0.50	0.60	0.92
SF	kMSDBI	0.60	0.57	0.57	0.57	0.56	0.57	0.60	0.69	0.97	1.35
	KMSDBIM	0.39	0.37	0.37	0.32	0.33	0.3/	0.45	0.54	0.64	1.09
CR	kDCM	0.20	0.20	0.17	0.06	0.12	0.14	0.19	0.25	0.21	0.51
(4%)		0.15	0.20	0.14	0.09	0.22	0.20	0.29	0.41	0.21	0.46
ĊF		0.39	0.50	0.44	0.27	0.27	0.27	0.26	0.25	0.26	0.52
	KMSDBIM	0.30	0.25	0.23	0.30	0.32	0.27	0.30	0.46	0.45	0.52

Tabela 17 - Valores de K para o Cenário 9.

O método MSDBIM localiza o dano nos elementos danificados, porém possui altos índices de danificação em elementos intermediários íntegros. MSDBI é um método que não se comporta bem para este cenário, mesmo na combinação SR SF.



Os métodos DCMM e DCM foram capazes de identificar o dano para ruído de 1%, 2% e 4% em altos níveis de danificação, porém apresentaram regiões de falsos positivos. Para níveis de

danificação mais baixos em combinações com ruído nenhum dos métodos localiza o dano com robustez. Os métodos MSDBI e MSDBIM resultaram em altos índices de danificação em regiões íntegras, o que impossibilita a correta localização do dano. A filtragem de ruídos não parece melhorar os resultados de K nem gráficos e pioram os resultados em várias situações.

De forma geral, no cenário 9, os métodos que mais se destacam são DCMM e DCM. A combinação SR SF é a mais competente em identificar e localizar o dano. O ruído adicionado impossibilita completamente os métodos estudados de identificarem dano em baixos níveis de danificação, porém os métodos parecem ser robustos o suficiente para localizar o dano em altos níveis de danificação. Quanto maior o nível de ruído, piores os resultados.

4.10. Cenário 10

No cenário 10 a viga V2 é biengastada e o dano se localiza no meio do vão. A combinação SR SF possui excelentes resultados para DCM, DCMM e MSDBIM, com destaque para o método DCMM. O método MSDBI tem seus resultados prejudicados pelos altos índices de danificação em nós íntegros (Figura 30).

Os cenários com ruído adicionado e sem filtragem de dados (CR SF) demonstram algo interessante: quanto maior o ruído, piores os resultados, e o mesmo ocorre para menores níveis de danificação. O método DCMM se destaca positivamente junto do método DCM, sendo capaz de localizar corretamente os elementos danificados mesmo para o nível de ruído de 2% quando o nível de danificação é alto. O mesmo ocorre em menores proporções quando há filtragem dos dados, que parece mais prejudicar do que ajudar a localizar o dano neste cenário.

Tabela 18 - Valores de K para o Cenário 10.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.03
SR SF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBI	1.42	1.43	1.43	1.45	1.47	1.49	1.51	1.55	1.61	0.97
	kMSDBIM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kDCM	1.17	0.91	1.22	1.10	1.16	1.22	1.22	1.32	1.40	1.36
SR CF	kDCMM	1.05	1.37	1.54	1.81	2.83	1.57	1.62	1.73	1.86	2.12
SICCI	kMSDBI	0.81	0.65	0.98	0.74	0.79	0.82	0.82	0.83	0.87	1.52
	kMSDBIM	0.83	0.67	1.05	0.70	0.93	0.78	0.78	0.78	0.87	2.54
CP	kDCM	0.32	0.54	0.82	1.26	1.53	1.75	1.94	2.14	2.38	1.94
(1%)	kDCMM	0.46	0.60	0.73	1.23	1.57	1.89	2.22	2.62	3.00	2.77
SF	kMSDBI	0.81	0.79	0.68	0.74	1.02	1.18	1.29	1.39	1.50	1.30
	kMSDBIM	0.66	0.71	0.73	0.79	1.15	1.38	1.58	1.75	1.89	1.12
CR (1%) CF	kDCM	0.00	0.00	0.11	0.39	0.63	0.88	1.04	1.14	1.04	1.20
	kDCMM	0.00	0.00	0.13	0.33	0.50	0.77	0.94	1.46	1.62	1.83
	kMSDBI	0.29	0.31	0.35	0.27	0.48	0.69	0.86	0.98	1.14	1.01
	kMSDBIM	0.40	0.38	0.45	0.49	0.58	0.59	0.75	0.93	1.05	1.44
CR	kDCM	0.32	0.42	0.60	0.86	1.05	1.26	1.40	1.52	1.63	1.86
(2%)	kDCMM	0.39	0.48	0.59	0.77	1.06	1.28	1.47	1.65	1.84	1.97
SF	kMSDBI	0.76	0.77	0.78	0.71	0.70	0.91	1.09	1.21	1.32	1.05
	kMSDBIM	0.65	0.67	0.71	0.78	0.77	0.99	1.25	1.43	1.52	0.87
CR	kDCM	0.00	0.00	0.03	0.34	0.63	0.94	1.04	1.09	1.10	0.77
(2%)	kDCMM	0.00	0.00	0.09	0.43	0.70	0.81	0.83	0.90	1.11	1.32
ĊF	kMSDBI	0.21	0.21	0.21	0.25	0.33	0.49	0.69	0.77	0.96	0.44
	kMSDBIM	0.25	0.23	0.23	0.25	0.29	0.39	0.51	0.57	0.73	0.49
CR	kDCM	0.42	0.38	0.47	0.64	0.78	0.92	1.01	1.10	1.19	1.29
(4%)	kDCMM	0.23	0.20	0.30	0.40	0.53	0.69	0.84	0.99	1.10	1.21
SF	kMSDBI	0.70	0.68	0.69	0.71	0.73	0.74	0.77	0.95	1.14	0.82
	kMSDBIM	0.56	0.55	0.56	0.58	0.57	0.55	0.66	0.82	1.02	0.68
CR	kDCM	0.00	0.00	0.00	0.06	0.47	0.74	0.79	0.75	0.75	0.73
(4%)	kDCMM	0.00	0.00	0.05	0.22	0.77	0.91	0.90	0.87	0.96	0.92
CF	kMSDBI	0.18	0.13	0.12	0.14	0.71	0.89	0.79	0.83	0.86	0.21
	kMSDBIM	0.14	0.15	0.17	0.19	0.63	0.72	0.68	0.71	0.69	0.21



Novamente a combinação SR SF é a que os métodos obtêm melhores resultados pois indicam e localizam o dano nas regiões corretas com consistência. O método DCMM se destaca entre os estudados, com os maiores valores de K e melhores resultados graficamente. O ruído impossibilita a correta localização do dano em níveis de redução de rigidez mais amenos enquanto a filtragem dos dados não auxiliou a identificação dos elementos danificados.

O cenário 11 é similar ao cenário 5, pois caracteriza-se pela viga V2 biengastada. Na combinação SR SF os métodos DCM e DCMM são excelentes, pois apresentam altos índices de danificação apenas nos nós danificados e índices próximos a 0 nos nós íntegros, tanto é que os valores de K presentes na Tabela 19 são iguais a 3 para estes métodos nessa combinação. Os métodos MSDBI e MSDBIM são incapazes de localizar com clareza o dano e possuem muitos falsos positivos, com uma ligeira superioridade do modificado. Em alguns níveis de redução de rigidez tem-se K<1.

Tabela 19 - Valores de K para o Cenário 11.											
	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SP SF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SK SF	kMSDBI	0.79	0.95	1.24	1.80	2.20	2.79	0.68	0.84	0.97	0.99
	kMSDBIM	0.79	0.95	1.24	1.80	2.20	2.79	3.00	3.00	2.77	1.50
	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SR CF	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SRCI	kMSDBI	0.77	1.14	0.63	1.22	1.82	3.00	0.96	1.29	1.26	1.31
	kMSDBIM	0.77	1.14	0.63	1.22	1.81	3.00	3.00	3.00	2.45	1.96
CD	kDCM	1.14	1.13	1.27	1.61	2.04	2.69	2.36	2.61	2.56	2.46
(1%) SF	kDCMM	0.78	0.67	0.69	1.22	1.71	2.31	2.80	2.78	2.28	1.67
	kMSDBI	0.29	0.31	0.39	0.56	0.69	0.80	0.16	0.24	0.41	0.52
	kMSDBIM	0.12	0.05	0.00	0.20	0.39	0.58	0.77	0.94	1.05	1.02
CR (1%) CF	kDCM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.69	1.81	2.25	2.36
	kDCMM	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	kMSDBI	0.54	0.49	0.49	0.74	1.03	1.33	0.41	0.47	0.97	0.77
	kMSDBIM	0.55	0.37	0.31	0.57	0.86	1.16	1.60	2.03	1.93	1.21
CD	kDCM	1.23	1.13	1.15	1.33	1.57	1.83	1.24	1.54	1.92	2.00
(2%)	kDCMM	0.90	0.75	0.67	0.71	1.02	1.29	1.78	2.00	1.67	1.31
SF	kMSDBI	0.33	0.32	0.36	0.48	0.63	0.74	0.08	0.15	0.35	0.49
	kMSDBIM	0.19	0.13	0.07	0.01	0.16	0.32	0.50	0.70	0.87	1.04
CP	kDCM	2.59	2.00	1.94	1.88	1.87	1.94	0.82	0.92	1.07	1.02
(2%)	kDCMM	1.41	1.20	1.29	1.41	1.49	1.31	1.38	1.44	1.63	1.62
CF	kMSDBI	0.34	0.37	0.45	0.66	0.94	1.15	0.41	0.55	0.84	0.99
	kMSDBIM	0.21	0.13	0.13	0.33	0.57	0.80	0.98	1.05	1.24	1.03
CP	kDCM	1.13	1.20	1.14	1.18	1.27	1.38	0.86	0.97	1.08	1.21
(4%)	kDCMM	0.72	0.71	0.62	0.57	0.57	0.63	0.82	0.90	0.89	0.83
SF	kMSDBI	0.35	0.38	0.40	0.48	0.59	0.72	0.08	0.19	0.34	0.54
	kMSDBIM	0.15	0.14	0.09	0.03	0.00	0.00	0.15	0.29	0.48	0.65
CP	kDCM	1.38	1.34	1.12	1.58	1.54	1.50	0.62	0.54	0.51	0.46
ск (4%)	kDCMM	0.53	0.53	0.49	0.93	0.98	1.02	1.05	0.86	0.71	0.56
CF	kMSDBI	0.42	0.44	0.33	0.69	0.85	0.98	0.18	0.28	0.47	0.57
C1	kMSDBIM	0.08	0.06	0.09	0.24	0.34	0.45	0.47	0.58	0.70	0.97

Para este cenário as combinações com ruído adicionam vários falsos positivos, presentes de forma considerável para os métodos MSDBI e MSDBIM desde 1% de ruído e nos métodos DCM e DCMM mais presentes a partir de 2% de ruído. Há uma clara superioridade nestas combinações dos métodos DCM e DCMM, com destaque para o método modificado. A filtragem de dados é inconsistente pois melhora os resultados para algumas combinações e piora em outras.



Neste cenário a melhor combinação é novamente SR SF e o melhor método é DCMM. A adição de ruído gaussiano dificulta, mas não impede totalmente a identificação de dano pelos métodos

estudados, principalmente para maiores níveis de redução de rigidez e menores níveis de ruído. Os métodos MSDBI e MSDBIM apresentam vários falsos positivos ao adicionar ruído.

4.12. Cenário 12

Por fim, o último cenário estudado, o cenário 12 é composto pela viga V2 biengastada com dano inserido simultaneamente no apoio esquerdo e no meio do vão. Na combinação SR SF, embora os valores de K vistos na Tabela 20 sejam satisfatórios para DCM e DCMM, apenas o DCMM é constante graficamente, visto que o DCM identifica com clareza apenas o dano no apoio esquerdo (Figura 32), sendo os índices de danificação muito baixos no meio do vão. MSDBI e MSDBIM indicam melhor o dano no meio do vão, mas possuem mais falsos positivos em seções íntegras da viga, além de não localizar com clareza o dano do apoio esquerdo.

Ao adicionar ruídos, os métodos DCM e DCMM continuam superiores, principalmente nas combinações CR SF. Os métodos MSDBI e MSDBIM não têm o mesmo desempenho, possuindo vários falsos positivos e com índice de identificação de dano relativamente baixo nos elementos danificados. A filtragem de dados não é eficaz em diminuir falsos positivos nem em aumentar os índices em elementos danificados.

	Método	1%	2.50%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	kDCM	2.89	2.92	2.96	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
SR SF	kDCMM	2.31	2.34	2.39	2.48	2.59	2.72	2.86	3.00	3.00	3.00
SIC SI	kMSDBI	0.92	0.93	0.94	0.97	0.99	1.01	1.04	1.08	1.25	1.58
	kMSDBIM	0.72	0.71	0.71	0.70	0.69	0.71	0.79	0.97	1.54	2.39
SR CF	kDCM	1.63	2.05	1.72	2.05	1.69	3.00	1.98	2.37	2.23	2.37
	kDCMM	1.52	1.85	1.72	1.58	1.33	1.96	1.45	1.65	1.58	1.62
	kMSDBI	0.02	0.52	0.77	0.81	0.94	0.91	1.20	1.47	1.51	1.52
	kMSDBIM	0.12	0.49	0.66	0.64	0.73	0.99	0.88	1.08	1.47	1.55
CR (1%) SF	kDCM	0.68	0.61	0.67	0.98	1.26	1.48	1.69	1.90	2.04	2.00
	kDCMM	0.30	0.34	0.45	0.51	0.83	1.11	1.41	1.66	1.73	1.62
	kMSDBI	0.57	0.56	0.52	0.43	0.60	0.78	0.84	0.86	1.00	1.31
	kMSDBIM	0.57	0.56	0.53	0.46	0.58	0.72	0.85	0.97	1.12	1.45
CD	kDCM	1.34	2.22	1.71	2.04	1.57	1.93	2.55	1.84	2.09	2.66
(1%)	kDCMM	1.17	1.70	1.22	1.28	1.42	1.45	2.90	2.97	2.09	3.00
CF	kMSDBI	0.24	0.23	0.16	0.10	0.19	0.38	0.72	0.80	0.86	1.14
	kMSDBIM	0.33	0.27	0.22	0.20	0.24	0.40	0.73	0.76	0.86	1.14
CD	kDCM	0.68	0.60	0.55	0.63	0.83	1.01	1.20	1.40	1.63	1.91
(2%)	kDCMM	0.36	0.30	0.36	0.49	0.49	0.68	0.92	1.07	1.11	1.09
SF	kMSDBI	0.63	0.59	0.58	0.55	0.51	0.54	0.58	0.63	0.75	0.96
51	kMSDBIM	0.57	0.56	0.56	0.53	0.50	0.49	0.61	0.74	0.85	1.05
CR	kDCM	1.05	1.63	1.34	1.23	1.18	1.40	1.53	1.62	2.19	2.57
(2%) CF	kDCMM	1.04	1.06	0.65	0.72	0.75	1.10	1.55	1.81	2.14	2.97
	kMSDBI	0.20	0.18	0.11	0.12	0.06	0.08	0.18	0.24	0.37	0.71

Tabela 20 - Valores de K para o Cenário 12.



69

Assim como em todos os outros cenários, a combinação SR SF é a que os métodos de identificação de dano estudados melhor localizam as regiões danificadas. A filtragem de dados não foi eficaz. Os métodos MSDBI e MSDBIM apresentam altos índices de danificação em elementos íntegros e o método DCMM foi o mais capaz de localizar as regiões danificadas corretamente. O ruído adicionado prejudicou os métodos de identificação de dano, adicionando falsos positivos e diminuindo os índices de danificação nos nós danificados, principalmente para níveis de redução de rigidez mais baixos.
5. DISCUSSÕES

Segundo Herzog, Francis e Clarke (2019) há trabalhos científicos que contêm resultados estatísticos incompatíveis com as conclusões teóricas dos autores, e eles resumem que não se deve acreditar cegamente nos resultados dos programas estatísticos, mas sim interpretá-los em conjunto com o conhecimento prévio. Logo, a análise estatística utilizada neste trabalho é apenas mais uma etapa de análise dos resultados que leva em consideração a teoria envolvida e os resultados já apresentados na seção anterior com o devido senso crítico do autor e o mínimo de vieses possível.

Os padrões observados durante a análise gráfica e dos valores de K presentes na seção anterior em uma tentativa de considerar os efeitos das variações de um parâmetro por vez podem ser resumidos em:

- Ao se variar os níveis de redução de rigidez, parece haver diferença significativa nos índices de danificação encontrados, quando há ruído, principalmente na viga V2. Quanto maior o dano, mais eficazes são os métodos em localizar o dano;
- A adição de ruído gaussiano aos dados modais reduz drasticamente a capacidade dos métodos de localizar o dano com precisão na maioria das combinações estudadas;
- A filtragem de dados utilizada não parece ser eficaz, pois não é constante em diminuir os falsos positivos nem em aumentar os índices de dano em elementos danificados;
- Os diferentes tipos de apoio não parecem influenciar muito os índices de danificação: para alguns cenários a viga biengastada tem melhores resultados e em outros a viga biapoiada tem melhores resultados;
- O local do dano não parece influenciar muito a localização do dano, porém o DCM, MSDBI e MSDBIM não conseguem identificar o dano múltiplo com igualdade: frequentemente apenas um dos elementos danificados possui altos níveis de danificação, embora isto não se transmita ao K da forma que foi calculado, pois escolheu-se o maior índice de danificação entre todos os nós danificados como a parcela do numerador da equação;
- Os métodos DCM e DCMM localizam melhor os danos nos cenários estudados. Os métodos modificados são melhores que os originais em várias situações;
- A diferença entre as vigas V1 e V2 não se traduz em uma influência significativa nos índices de danificação encontrados para os cenários sem ruído, porém quando há ruído a viga V2 parece ter melhores resultados.

Além disto, notou-se que os métodos MSDBI e MSDBIM possuem vários falsos positivos, mesmo nas combinações sem ruído. Na viga V1, é praticamente impossível identificar com clareza o dano a partir do momento que o ruído é adicionado.

No geral o uso da filtragem dos dados por regressão de soma de senos se mostrou pouco eficaz visto que o objetivo por trás do uso destas era melhorar as combinações CR SF para os casos em que dados obtidos em estruturas reais fossem contaminadas por ruído. O que se notou foi que quando a combinação CR SF identifica o dano com clareza, a combinação CR CF não diminui os falsos positivos nem aumenta os índices de danificação nos elementos danificados.

5.1. Análise do DOE – iteração 1

Realizou-se a análise dos resultados via DOE com fatorial completo. Como já citado, foram utilizados como fatores o nível de redução de rigidez, o nível de ruído, a filtragem dos dados, o tipo de apoio, a localização do dano, os métodos de identificação de dano e a seção transversal/comprimento da viga. A variável resposta considerada foi K.

O primeiro resultado analisado é o gráfico das interações de dois fatores para as médias ajustadas de K, presente na Figura 33. Quando a interação entre um par de fatores for forte o suficiente, os efeitos dos fatores principais separados podem ter pouco significado. Se graficamente as diferentes curvas em um quadro de interação são paralelas, não há interação.

É possível verificar de forma geral que há interações pontuais entre alguns fatores de segunda ordem. Para diferentes níveis de danificação, na coluna "Dano", parece haver uma interação em Dano*Viga: há uma clara diferença entre os resultados médios da viga V1 e da viga V2, com destaque positivo para a viga V2, principalmente quando os níveis de danificação são maiores. Na coluna "Método" há interação em Método*Ruído: para menores níveis de ruído, há diferença significativa entre os métodos, porém quando o ruído aumenta todos os métodos tendem a ter a mesma média de K, com valores baixos. Na interação Método*Local há diferença significativa para DCM e DCMM, porém MSDBI e MSDBIM têm resultados semelhantes para diferentes localizações dos elementos danificados.

A coluna "Filtragem" tem uma interação interessante entre Filtragem*Ruído: quando há ruído, os resultados são parecidos nas combinações SF e CF, porém são piores em CF, e quando não há ruído os resultados são muito piores para as combinações com filtragem de dados, o que nos reforça o sentimento que a filtragem de dados não cumpriu com seu objetivo no presente estudo.

A coluna de "Ruído" tem uma interação em Ruído*Viga: a viga V1 tem resultados muito ruins para qualquer nível de ruído enquanto a viga V2 é capaz de ter resultados satisfatórios para menores níveis de ruído, degradando a resposta ao passo que o ruído aumenta. A coluna "Local" não parece ter interações robustas e por último é possível verificar uma interação em Apoio*Viga: na viga V2 os cenários com apoios biengastados obtiveram melhores resultados, o contrário do que ocorre na viga V1.





Com isto podem ser analisados o gráfico dos efeitos principais, visto na Figura 34. A ideia é simples: a variável do eixo Y é a média de K. Logo, quanto mais alto o valor de K para o nível do fator, melhor ele localiza os elementos danificados.



Ao analisar a Figura 34, é possível observar que as conclusões são em sua maioria semelhantes às obtidas pelas análises anteriores. De fato, é visível que quanto maior o nível de dano, maior a capacidade dos métodos de identificá-lo. O método utilizado também influencia muito: DCM e DCMM estão em um patamar muito acima dos métodos MSDBI e MSDBIM, com destaque para os pares modificados. O fator filtragem por sua vez vai contra o que o autor desejava, ao passo que a presença da filtragem dos dados piora e muito os resultados obtidos.

O ruído segue a mesma lógica esperada e apresentada no fator dano, porém em ordem inversa, é claro: quando não há ruído os resultados são bons, pois a média de K>1,75, porém quanto maior o ruído, piores são os métodos em identificar corretamente os elementos danificados. A localização do dano parece mudar os resultados obtidos: os métodos identificaram melhor o dano para dano múltiplo nas duas extremidades, seguido de dano múltiplo na extremidade esquerda e meio do vão e por último o dano único no meio do vão. O tipo da viga é outro fator que influencia bastante: a viga V1 apresentou resultados muito piores que os resultados da viga V2, principalmente devido aos cenários com ruído, como foi visto no gráfico das interações.

O fator ruído causa mudanças significativas: as simulações com ruído de 4% têm valor médio de K = 0,54, enquanto as simulações sem ruído têm valor médio de K = 1,79. Este foi o fator que mais implicou em diferença dos valores de K, o que ratifica as primeiras impressões.

O fator filtragem dos dados também tem um nível dominante: o nível sem filtragem. Ora, se visualmente pelos resultados da seção anterior é visível que ao adicionar filtragem os índices dos nós danificados se mantêm ou diminuem e os índices dos nós íntegros aumentam, é esperado que a combinação sem filtragem seja superior às combinações com filtragem.

Entre os métodos utilizados novamente há uma superioridade se considerados como conjunto os métodos DCM e DCMM comparados aos métodos MSDBI e MSDBIM. A diferença é grande e favorável aos métodos DCM e DCMM. Comparar os métodos originais e os modificados traz à tona o fato de que os métodos modificados obtiveram melhores resultados que os métodos originais.

Para auxiliar a análise, foi realiza a análise de variância (ANOVA) no Minitab, onde foram mantidas apenas os efeitos principais e as interações de 2 fatores (Tabela 21). A hipótese nula é a de que o termo estudado não exerce efeito estatisticamente significativo sobre a resposta K. Se p-valor for maior que 0,05, não é possível rejeitar a hipótese nula.

Por apenas levar em consideração os efeitos principais e interações de 2 fatores o erro é relativamente alto, o que pode ser comprovado pelo ajuste da ANOVA, visto pelo coeficiente de determinação R², que para esta ANOVA é de 71,40%, ou seja, uma regressão linear com estes fatores explica cerca de 71% dos dados da variável resposta.

	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fatores	167	2030,27	12,157	54,90	0,000
Principais	20	1358,71	67,936	306,79	0,000
Dano	9	69,61	7,734	34,93	0,000
Método	3	175,00	58,332	263,43	0,000
Filtragem	1	77,17	77,174	348,52	0,000
Ruído	3	928,83	309,611	1398,19	0,000
Local	2	30,72	15,360	69,37	0,000
Apoio	1	10,03	10,033	45,31	0,000
Viga	1	67,35	67,349	304,15	0,000
Interações de 2 fatores	147	671.56	1 568	20.63	0.000
Dano*Método	27	16.02	0.503	20,03	0,000
Dano*Filtragem	0	1 00	0,393	0.55	0,000
Dano*Ruído	27	18.42	0,121	3.08	0,041
Dano*Local	18	3 53	0,082	0.89	0,000
Dano*Anoio	9	1 59	0,170	0,80	0,575
Dano*Viga	9	49.52	5 502	24.85	0,000
Método*Filtragem	3	4 58	1 525	6.89	0,000
Método*Ruído	9	98.31	10.923	49.33	0.000
Método*Local	6	119.44	19,907	89.90	0.000
Método*Apoio	3	8,91	2,972	13,42	0,000
Método*Viga	3	20,80	6,932	31,30	0,000
Filtragem*Ruído	3	151,83	50,610	228,55	0,000
Filtragem*Local	2	25,11	12,553	56,69	0,000
Filtragem*Apoio	1	0,52	0,520	2,35	0,125
Filtragem*Viga	1	6,37	6,368	28,76	0,000
Ruído*Local	6	11,66	1,944	8,78	0,000
Ruído*Apoio	3	13,77	4,592	20,74	0,000
Ruído*Viga	3	34,50	11,500	51,94	0,000
Local*Apoio	2	15,07	7,533	34,02	0,000
Local*Viga	2	22,04	11,019	49,76	0,000
Apoio*Viga	1	48,48	48,477	218,92	0,000
Erro	3672	813,12	0,221		
Total	3839	2843,38			

Tabela 21 - Análise de variância para K do experimento realizado.

O p-valor é menor que o nível de significância de 5% em todos os fatores principais e apenas é maior que 0,05 em quatro interações de 2 fatores: Dano*Filtragem, Dano*Local, Dano*Apoio

e Filtragem*Apoio, não sendo possível concluir que essas interações são estatisticamente significativas para a resposta de K.

Ainda sobre a ANOVA, é possível verificar pelo Valor F a influência do fator sobre a variável resposta. Embora a análise estatística diga que alguns termos do modelo do DOE como Filtragem*Apoio possuam significância estatística, é necessário separar por patamares a influência dos fatores na variável resposta K. Quanto maior o Valor F do termo, maior a influência do fator sobre K.

Destacam-se as interações entre Ruído*Viga, Filtragem*Local, Filtragem*Ruído, Método*Ruído, Método*Local e Local*Viga. Estas interações são ligeiramente diferentes das percebidas graficamente, o que demonstra a necessidade de se confrontar os resultados com análises complementares. Entre os fatores principais destacam-se os fatores Método, Filtragem e principalmente Ruído e Viga, enquanto o nível de dano por si só não tem uma influência tão grande.

Foram utilizadas diferentes ferramentas para comparação entre os métodos de identificação de dano estudados: Gráficos, relações entre os índices de danificações obtidos, análise de efeitos principais e de interações entre dois fatores do DOE e ANOVA. Com estas ferramentas, é possível inferir algumas observações sobre a identificação de dano nas vigas de aço estudadas.

A viga do tipo V1 obteve resultados muito inferiores àqueles obtidos na viga V2, o que se dá principalmente quando há ruído e quando há filtragem de dados. Tal fato é explicado pela análise dos valores de frequência obtidos nos modos de vibração estudados: como a seção transversal é muito robusta para um vão muito pequeno, obtiveram-se altos valores de frequência, o que poderia ser contornado por uma malha mais densa de sensores, porém neste estudo já foi densa: um nó a cada 5cm. A viga V2, que possui dimensões mais condizentes com estruturas reais, tem respostas melhores nas situações com ruído, mesmo possuindo nós mais esparsos, de 30 em 30cm.

A filtragem de dados se mostrou ineficaz da forma que foi aplicada, pois não obteve êxito em diminuir índices de danificação em nós íntegros, diminuindo os erros do tipo I (falsos positivos), nem aumentou os índices de danificação em nós danificados, pelo contrário, dificultou a localização do dano em quase todas as combinações e cenários estudados.

Dito isto, como estes fatores foram adicionados na análise arbitrariamente, decidiu-se realizar uma análise estatística sem os resultados da viga V1 e sem a filtragem dos dados. Tal decisão não foi tomada simplesmente para aumentar os valores de K e maquiar os dados, para uma suposta validação dos métodos utilizados, mas sim para entender melhor a real influência dos

fatores estudados, com o menor erro possível, tanto graficamente quanto pela ANOVA, visto que serão menos fatores e o mesmo número de interações levadas em consideração.

5.2. Análise do DOE – iteração 2

Para esta iteração foram considerados os fatores Dano, Método de identificação, Ruído, Local e Apoio, com os mesmos níveis apresentados anteriormente. A variável resposta considerada foi K. Graficamente (Figura 35) e analisando a ANOVA (Tabela 22), as interações entre Dano*Local e Dano*Apoio são as únicas onde não é possível afirmar que exercem efeito estatisticamente significativo sobre a resposta K. Algumas interações são mais relevantes que outras, o que pode ser visto pelo valor F.

Destacam-se na ANOVA as interações Método*Apoio, Método*Ruído, Método*Local, Local*Apoio e Ruído*Local, embora graficamente nenhuma chame muita atenção, pois no geral as tendências se repetem nestas interações, com algumas exceções como a interação Dano*Ruído, na qual é possível ver que, quando não há ruído, os métodos identificam quase que igualmente o dano para pequenos níveis de redução de rigidez e para altos níveis de redução de rigidez, enquanto que, na presença de ruído, são necessários maiores níveis de danificação para que haja distinção do que é dano e o que é ruído.



Figura 35 - Gráfico de interações 2 a 2 para média ajustada de K.

Como nenhuma das interações entre os pares é muito forte, presume-se que os resultados dos efeitos principais prevalecem. Neste sentido, a interpretação dos resultados vistos na Figura 36 são que quanto maior o nível de dano, mais correta é a identificação dos elementos danificados. Os métodos DCM e DCMM são superiores aos métodos MSDBI e MSDBIM, com destaque positivo para os métodos modificados, sendo a média ajustada de DCMM a mais alta.



A presença de ruídos reduz a capacidade dos métodos de localizar corretamente o dano, trazendo muitos falsos positivos, e quanto maior o nível de ruído adicionado, pior é o resultado dos métodos. A localização do dano e o tipo de apoio não parecem ter forte influência sobre os resultados nesta iteração de DOE.

	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fatores	128	692,405	5,409	35,86	0,000
Principais	18	545,958	30,331	201,05	0,000
Dano	9	56,702	6,300	41,76	0,000
Método	3	55,076	18,359	121,69	0,000
Ruído	3	428,043	142,681	945,79	0,000
Local	2	3,983	1,991	13,20	0,000
Apoio	1	2,155	2,155	14,28	0,000
Interações de 2 fatores	110	146,447	1,331	8,83	0,000
Dano*Método	27	6,680	0,247	1,64	0,022
Dano*Ruído	27	21,201	0,785	5,20	0,000
Dano*Local	18	1,734	0,096	0,64	0,871
Dano*Apoio	9	1,070	0,119	0,79	0,627
Método*Ruído	9	46,748	5,194	34,43	0,000
Método*Local	6	20,945	3,491	23,14	0,000
Método*Apoio	3	19,581	6,527	43,26	0,000
Ruído*Local	6	18,416	3,069	20,35	0,000
Ruído*Apoio	3	2,206	0,735	4,87	0,002
Local*Apoio	2	7,867	3,933	26,07	0,000
Erro	831	125,364	0,151		
Total	959	817,770			

Tabela 22 - Análise de variância para K do experimento realizado, iteração 2.

Por apenas levar em consideração os efeitos principais e interações de 2 fatores, mas ter menos fatores o erro diminui em relação à iteração 1, o que pode ser comprovado pelo ajuste da ANOVA, visto pelo coeficiente de determinação R², que para esta ANOVA é de 84,67%, ou seja, uma regressão linear com estes fatores explica cerca de 84% dos dados da variável resposta.

Ao retirar arbitrariamente os fatores filtragem dos dados e viga V1, diminui-se o erro e é possível analisar com mais certeza os resultados obtidos de que os termos que mais influenciam os resultados de K são, nesta ordem: ruído (quanto maior o nível de ruído, menor a capacidade de identificar o dano), método utilizado, fator no qual o método DCMM possui melhor desempenho, seguido de DCM, MSDBIM e MSDBI, e nível de dano, onde quanto maior o nível de dano, mais facilmente são localizados os elementos danificados.

6. CONCLUSÕES

Os métodos estudados são a princípio métodos válidos para utilização em sistemas de SHM para identificação e localização do dano em vigas de aço pois se encaixam em algumas premissas como reduzir a subjetividade das inspeções visuais, podem ser aplicados de forma remota e contínua, por meio de *softwares*, podem ter rotina automatizada para avisar os técnicos responsáveis no caso de detecção de *outliers* que indiquem dano, são não-destrutivos e são capazes de identificar o dano em estágio inicial.

O ruído adicionado atrapalhou muito a identificação de dano, sendo a variável mais relevante nas análises realizadas, incapacitando a correta localização dos elementos danificados principalmente em estágios iniciais de danificação, fase na qual o SHM é de grande valia. Para situações com ruído os métodos estudados foram inconclusivos na identificação e localização do dano, com muitos falsos positivos e alguns falsos negativos.

Entre os métodos estudados, há uma clara superioridade dos métodos DCM e DCMM quando comparados com os métodos MSDBI e MSDBIM. Quando se comparam os métodos originais e os métodos modificados por Lima Junior (2020), nota-se uma superioridade dos métodos modificados. Entre os 4 métodos, o que melhor localizou dano nas situações estudadas foi DCMM.

Para utilizar estes métodos em estruturas reais é necessário um aprofundamento sobre o modo de filtragem dos dados modais. É necessário que o método de filtragem seja capaz de suavizar os dados de deslocamento da deformada modal, visto que o método das diferenças finitas (MDF) amplifica o ruído para a identificação de dano em vigas de aço que usam as derivadas de inclinação modal e curvatura modal.

Em trabalhos futuros resta como principais sugestões encontrar um método mais eficaz de filtragem dos ruídos nos dados modais e o estudo de diferentes formas de obtenção das inclinações e curvaturas modais. É interessante validar os resultados experimentalmente e testar outras configurações de danificação, menos simétricas, além de testar materiais como o concreto armado e se valer de algumas inferências obtidas neste presente trabalho para suprimir a variação de fatores que têm menos significância estatística.

REFERÊNCIAS

ADAMS, D. E. **Health monitoring of structural materials and components**: methods with applications. John Wiley & Sons, 2007.

ALTUNISIK, A. C.; OKUR, F. Y.; KARACA, S.; KAHYA, V. Vibration-based damage detection in beam structures with multiple cracks: modal curvature vs. modal flexibility methods. **Nondestructive testing and evaluation**, v. 34, n. 1, p. 33-53, 2019.

AMANCIO, D. T. Avaliação da integridade estrutural de elementos de concreto armado a partir das propriedades modais obtidas por técnicas de excitações aleatórias e transientes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE 2021 Report Card for America's Infrastructure. Disponível em: <u>https://infrastructurereportcard.org/wp-</u> content/uploads/2020/12/Bridges-2021.pdf. Acesso em 10 de Agosto de 2022, 2021.

AN, Y.; CHATZI, E.; SIM, S. H.; LAFLAMME, S.; BLACHOWSKI, B.; OU, J. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 26, n. 10, p. e2416, 2019.

ANDERSON, T. L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC press, 2017.

ANTONY, J. Design of Experiments for Engineers and Scientists. 2ª ed, Elsevier, 2014.

ASSIS, W. S. Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil. Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

AVCI, O., ABDELJABER, O., KIRANYAZ, S., HUSSEIN, M., GABBOUJ, M., & INMAN, D. J. A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2020. 147, 107077. doi:10.1016/j.ymssp.2020.107077

BOLLER, C. Structural Health Monitoring: an introduction and definitions. In: Encyclopedia of structural health monitoring, 2009.

BONNINI, S., CORAIN, L., MAROZZI, M., SALMASO, L. **Nonparametric hypothesis testing**: rank and permutation methods with applications in R. 1^a ed, John Wiley & Sons, 2014.

CAO, M.; XU, W.; OSTACHOWICZ, W.; SU, Z. Damage identification for beams in noisy conditions based on Teager energy operator-wavelet transform modal curvature. **Journal of Sound and Vibration**, v. 333, n. 6, p. 1543-1553, 2014.

CARVALHO, F. W. L. **Procedimento experimental para avaliação do fator de amortecimento em estruturas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

CHARTRAND, R. Numerical differentiation of noisy, nonsmooth data. International Scholarly Research Notices, v. 2011, 2011.

CHEN, H. P.; NI, Y. Q. Structural health monitoring of large civil engineering structures. John Wiley & Sons, 2018.

DEUS, E. P. Análise do processo de fraturamento em vigas de pontes de aço sob efeito de fadiga. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

DUVNJAK, I.; DAMJANOVIC, D.; BARTOLAC, M.; SKENDER, A. Mode Shape-Based Damage Detection Method (MSDI): Experimental Validation. **Applied Sciences**, v.11, n. 10, p. 4589, 2021.

EWINS, D. J. Modal testing: theory, practice and application. 2. ed. RSP, 2000.

FALCAO, V. B. Aplicação de metodologias de reconhecimento de padrões para detecção de dano em vigas de concreto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. Structural health monitoring: a machine learning perspective. John Wiley & Sons, 2013.

FERREIRA, F. S. Uma abordagem numérico-experimental para a identificação de dano estrutural utilizando o método simulated annealing. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FERREIRA, L. E. T.; HANAI, J. B. Mecânica da fratura e fraturamento do concreto. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2017, p. 260-301.

GATTULLI, V. Implementation of identification methodologies on large-scale structures. In: **Identification methods for structural health monitoring**. CHATZI, E. N.; PAPADIMITRIOU, C. v. 567, 2016.

GUERREIRO, M. A. J. **Identificação de dano estrutural com base em análise modal.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

HE, J.; FU, Z. Modal Analysis. Butterworth-Heinemann, 2001.

HERZOG, M. H.; FRANCIS, G.; CLARKE, A. Understanding statistics and experimental design: How to not lie with statistics. Springer Nature, 2019.

HOU R., XIA Y. Review on the new development of vibration-based damage identification for civil engineering structures: 2010–2019, **Journal of Sound and Vibration**, 2020.

ILZARBE, L., ÁLVAREZ, M. J., VILES, E., TANCO, M. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review. **Quality and reliability engineering international**, 2008.

JAHANGIR, H.; HASANI, H.; ESFAHANI, M. R. Damage localization of RC beams via wavelet analysis of noise contaminated modal curvatures. **Journal of Soft Computing in Civil Engineering**, v. 5, n. 3, p. 101-133, 2021.

JULIANI, T. M. **Detecção de danos em pontes em escala reduzida pela identificação modal estocástica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2014.

JUNIOR, W. M. P. Análise numérica de estruturas de concreto armado com fibras utilizando mecânica do dano. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

KIREMIDJIAN. A. S.; STRASER, E. G.; MENG, T.; LAW, K.; SOHN, H. Structural damage monitoring for civil structures. **International Workshop-Structural Health Monitoring.** SHM, 1997. p. 371-382.

LIMA JUNIOR, W. J. **Identificação de danos em vigas via análise modal.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 10^a ed, John Wiley & Sons, 2020.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied statistics and probability for engineers. 3^a ed, John Wiley & Sons, 2003.

MORALES, J. D. V. **Detecção de dano em estruturas utilizando algoritmos genéticos e parâmetros dinâmicos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MORALES, J. D. V. **Detecção de dano via inteligência computacional e análise dinâmica.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

NAVABIAN, N.; BOZORGNASAB, M.; TAGHIPOUR, R.; YAZDANPANAH, O. Damage identification in plate-like structure using mode shape derivatives. Archive of Applied Mechanics, v. 86, p. 819-830, 2016.

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

PEREIRA, J. T. M. N. Applicability of the statistical pattern recognition paradigm for structural health monitoring of bridges. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Católica Portuguesa, 2012.

PITUBA, J. J. C. **Sobre a formulação de um modelo de dano para o concreto**. Tese de Doutorado em Engenharia Estrutural, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista técnico-científica do CREA-PR**, ISSN 2358-5420, n.1, out 2013.

RANGEL, I. C. S. S. **Identificação de danos via metamodelos, análise modal e inferência bayesiana em estruturas de engenharia**. Tese de doutorado em modelagem computacional. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2019.

ROSS, S. M. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. 6^a ed. Academic Press, 2020.

RUSSO, F. M.; MERTZ, D. R.; FRANK, K. H.; WILSON, K. E. **Design and evaluation of steel bridges for fatigue and fracture** – Reference Manual. The Federal Highway Administration, 2016.

RYTTER, A. Vibrational based inspection of civil engineering structure. PhD Thesis, University of Aalborg, Aalborg, 1993.

SCHOMMER, S.; MAHOWALD, J.; NGUYEN, V.H.; WALDMANN, D.; MAAS, S. Health monitoring based on dynamic flexibility matrix: theoretical model versus in-situ tests. **Engineering**. 2017.

SHI, Z.I.; LAW, S. S.; ZHANG, L.M. Structural damage detection from modal strain energy change. Journal of engineering mechanics, v. 126, n. 12, p. 1216-1223, 2000.

SILVA, J. B. L. P.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; FORTI, N. C. S.; PIMENTEL, L. L., BRANQUINHO, O. C. Desenvolvimento de sistema de baixo custo para monitoramento de integridade estrutural. **Revista Matéria**, ISSN 1517-7076, p. e-12528, 2019.

SILVA, R. S. Y. R. C. Monitoramento e identificação numérico e experimental de danos em vigas e pontes de aço e concreto utilizando transformadas de wavelet. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SORIANO, H. L. Introdução à dinâmica das estruturas. Elsevier, Rio de Janeiro, 2014.

SUN, L., SHANG, Z., XIA, Y., BHOWMICK, S., NAGARAJAIAH, S. Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence: From Condition Assessment to Damage Detection. **Journal of Structural Engineering**, 2020.

VAN MIER, J. G. M. Concrete fracture: a multiscale approach. CRC press, 2013.

WASSERMAN, L. All of statistics: a concise course in statistical inference. 2a ed. Springer, 2004.

WENZEL, H. Health monitoring of bridges. John Wiley & Sons, 2008.

YANG, Z. B., RADZIENSKI, M., KUDELA, P.; OSTACHOWICZ, W. Fourier spectralbased modal curvature analysis and its application to damage detection in beams. **Mechanical** systems and signal processing, v84, p. 763-781, 2017.

YAZDANPANAH, O.; SEYEDPOOR, S.; BENGAR, H. A. A new damage detection indicator for beams based on mode shape data. **Structural engineering Mechanics.** v. 53, p. 725-744, 2015.