

**ESTUDO DE MÉTODOS NUMÉRICOS BASEADOS NAS
CARACTERÍSTICAS MODAIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS
EM VIGAS**

MARIA FERNANDA SOARES PETRUCI TERRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
DEZEMBRO -2009**

**ESTUDO DE MÉTODOS NUMÉRICOS BASEADOS NAS
CARACTERÍSTICAS MODAIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS
EM VIGAS**

MARIA FERNANDA SOARES PETRUCI TERRA

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Orientadora: Profa. Patrícia Habib Hallak

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

DEZEMBRO - 2009

**ESTUDO DE MÉTODOS NUMÉRICOS BASEADOS NAS
CARACTERÍSTICAS MODAIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE
DANOS EM VIGAS**

MARIA FERNANDA SOARES PETRUCI TERRA

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Aprovada em 03 de Dezembro de 2009

Comissão Examinadora:

Profª. Michèle Schubert Pfeil (Doutora, Engenharia Civil) – UFRJ

Prof. Flávio de Souza Barbosa (Doutor, Engenharia Civil) – UFJF

Prof. Sergio Luis González Garcia (Doutor, Engenharia Civil) – UENF

Prof. Patrícia Habib Hallak (Doutor, Engenharia Civil) – UENF - orientadora

Dedico aos meus pais, irmãos
e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a professora Patrícia Habib Hallak, pelo privilégio de contar com sua competente orientação durante a realização desta pesquisa.

Aos professores do Laboratório de Engenharia Civil LECIV - UENF, pela ajuda e colaboração prestadas.

Aos colegas e amigos pela amizade e companheirismo.

A todos os funcionários do Laboratório de Engenharia Civil LECIV - UENF, pelo apoio.

À UENF, pela bolsa de estudo.

À minha família, pela compreensão e confiança.

Índice

Resumo	13
Abstract	14
Capítulo I – Introdução	15
I.1 – Motivação	17
I.2 – Objetivos	19
I.3 – Escopo do trabalho	20
Capítulo II - Técnicas de Detecção de Danos no Âmbito da Engenharia Civil	21
II.1- Detecção de Danos no Contexto da Avaliação Dinâmica Estrutural	21
II.2 – Classificação dos métodos de detecção de danos	23
II.3 Revisão de trabalhos numéricos para a detecção de danos	26
II.4– Revisão de métodos para detecção de danos utilizados neste trabalho	30
II.4.1. Método do MAC e do COMAC	31
II.4.2. Método da Variação da Flexibilidade (MVF)	32
II.4.3 Método da Variação da Curvatura da Flexibilidade (MVCF)	36
Capítulo III – Modelagem Computacional e Ferramentas Numéricas Utilizadas	39
III.1 – Metodologia de trabalho	40
i . Etapa I	40
ii . Etapa II	40

III.2 – Descrição da viga e sua modelagem	42
III.3– Descrição dos Programas Computacionais Utilizados	46
III.3.1 – Programa de Dinâmica	46
III.3.2 – Programa Midas	47
III.3.3 – Algoritmos de Detecção de Danos	49
Capítulo IV – Resultados	51
IV.1 – Parâmetros utilizados	51
IV.2 – Resultados Obtidos com os Dados Vibracionais dos Problemas de Autovalor	55
i. Freqüências Naturais de Vibração	55
i. MAC / COMAC	60
ii. MVF	71
iii. MVCF	81
IV.3. – Resultados Obtidos com os Dados do Programa de Identificação Modal	92
i. Freqüências Naturais de Vibração	91
ii. MVF	94
iii. MVCF	98
IV.4 – Comparação dos Métodos	100
Capítulo V – Conclusão Final	103
V.1 – Conclusão	103
V.2 – Propostas de Trabalhos Futuros	104
Bibliografia	105
ANEXO I	109
ANEXO II	115

Lista de Figuras

Figura 1 – Ponte General Dutra danificada, Campos dos Goytacazes, RJ	17
Figura 2 – Acidente no estádio da Fonte Nova, Bahia	18
Figura 3 – Variação de flexibilidade de viga em balanço	36
Figura 4 – Curvatura da flexibilidade de viga simplesmente apoiada	39
Figura 5 – Curvatura de flexibilidade de viga simplesmente apoiada em função do aumento de dano	38
Figura 6 – Elemento de pórtico plano adotado e numeração dos graus de liberdade	43
Figura 7 – Esquema estrutural da viga biapoiada e engastada-livre	43
Figura 8 – Discretização da viga biapoiada e engastada-livre	44
Figura 9 – Perfil da viga I	44
Figura 10 – Cinco primeiros modos de vibração da viga biapoiada (a) sem dano (b) danificada em 50%E no elemento 20	58
Figura 11 – Cinco primeiros modos de vibração da viga engastada-livre (a) sem dano (b) danificada em 50%E no elemento 20	59
Figura 12 – Variação de flexibilidade de viga em balanço	60
Figura 13 – Comparação do percentual indicador MAC com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre	61
Figura 14 – Comparação do coeficiente COMAC com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga biapoiada, utilizando 3 modos de vibração	62
Figura 15 – Comparação do coeficiente COMAC com o aumento da	

severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre, utilizando 3 modos de vibração	63
Figura 16 – Comparação do indicador MAC com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoiada	64
Figura 17 – Comparação do indicador MAC com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre	64
Figura 18 – Comparação do coeficiente COMAC com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoiada	65
Figura 19 – Comparação do coeficiente COMAC com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre	66
Figura 20 – Comparação do coeficiente COMAC em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga biapoiada	67
Figura 21 – Comparação do coeficiente COMAC em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga engastada-livre	67
Figura 22 – Indicador MAC para dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga biapoiada	68
Figura 23 – Indicador MAC para dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga engastada-livre	69
Figura 24 – Comparação do coeficiente COMAC com modificações no posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada	69
Figura 25 – Comparação do coeficiente COMAC com modificações no posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga engastada-livre	70
Figura 26 – Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga biapoiada.	71
Figura 27 – Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da	

severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre	72
Figura 28 – Comparação da Variação da Flexibilidade com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoiada	73
Figura 29 – Comparação da Variação da Flexibilidade com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre	74
Figura 30 – Comparação da Variação da Flexibilidade em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga biapoiada	75
Figura 31 – Comparação da Variação da Flexibilidade em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga engastada-livre	75
Figura 32 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga biapoiada	76
Figura 33 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga biapoiada	77
Figura 34 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e 30 da viga biapoiada	77
Figura 35 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga biapoiada	78
Figura 36 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga engastada-livre	79
Figura 37 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga engastada-livre	79
Figura 38 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e 30 da viga engastada-livre	80
Figura 39 – Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga engastada-livre	80

Figura 40 – Comparação da CF com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga biapoiada.	81
Figura 41 – Comparação da CF com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre	82
Figura 42 - Comparação da CF com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoiada.	83
Figura 43 - Comparação da CF com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre.	84
Figura 44 - Comparação da CF em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga biapoiada.	85
Figura 45 – Comparação da CF em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga engastada-livre	85
Figura 46 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga biapoiada	86
Figura 47 - Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga biapoiada.	87
Figura 48 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e 30 da viga biapoiada.	87
Figura 49 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga biapoiada.	88
Figura 50 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga engastada-livre.	88
Figura 51 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga engastada-livre.	89
Figura 52 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e	

30 da viga engastada-livre.	89
Figura 53 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga engastada-livre.	90
Figura 54 - Modos de vibração para viga biapoiada danificada em 50% sem ruído e com Midas	93
Figura 55 – Modos de vibração para viga biapoiada danificada em 50% com ruído \cong 5% e com Midas. O 5º modo não foi encontrado (*)	93
Figura 56 – Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da severidade do dano múltiplo no elemento 20 da viga biapoiada sem ruído.	94
Figura 57 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da severidade do dano múltiplo no elemento 20 da viga biapoiada com ruído.	95
Figura 58 - Comparação da Variação da Flexibilidade com a mudança de posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada sem ruído.	96
Figura 59 - Comparação da Variação da Flexibilidade com a mudança de posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada com ruído.	96
Figura 60 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento do número de modos do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada no elemento 20 com ruído.	97
Figura 61 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento do número de modos do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada no elemento 20 sem ruído.	97
Figura 62 – MVCF para vigas biapoiadas com dano de 50% no elemento 20, sem ruído e utilizando os 3 primeiros modos	98
Figura 63 – MVCF para vigas biapoiadas com dano de 50% no elemento 20, com ruído e utilizando os 3 primeiros modos	99

Lista de Tabelas

Diagrama 1 – Classificação de métodos de detecção de danos	24
Tabela 1 – Propriedades da viga utilizada	45
Tabela 2 – Valores de E adotados na variação da intensidade do dano	52
Tabela 3 – Parâmetros utilizados nas análises dos métodos	53
Tabela 4 – Casos implementados sem a utilização do MIDAS	54
Tabela 5 – Casos implementados com a utilização do MIDAS	55
Tabela 6 – Tabela comparativa de frequências naturais em função da severidade do dano simples	56
Tabela 7– Tabela comparativa de frequências naturais em função do posicionamento do dano simples	56
Tabela 8 - Tabela comparativa de frequências naturais em função da severidade do dano simples utilizando o Midas.	91
Tabela 9 - Tabela comparativa de frequências naturais em função do posicionamento do dano simples utilizando o Midas	92
Tabela 10 - Avaliação dos métodos e parâmetros utilizados nas análises	101

Resumo

Danos estruturais são considerados perdas de rigidez localizadas que comprometem o desempenho de uma estrutura. Em muitos casos, o uso de dados vibracionais na avaliação dos danos estruturais tem fornecido bons resultados.

Colaborando com esta tendência, neste trabalho foram implementados algoritmos que permitem detectar a existência de danos em estruturas a partir das características modais.

Dentre a metodologia empregada foram escolhidos os métodos seguintes: MAC / COMAC, Método da Variação de Flexibilidade e Método da Variação da Curvatura de Flexibilidade. Os três métodos são implementados em linguagem computacional MatLab[®] e o dano é modelado através da redução do módulo de elasticidade do material da estrutura.

A identificação, a localização e a quantificação do dano são pesquisadas para modelos computacionais de vigas metálicas, a partir da análise da influência dos parâmetros de severidade, posicionamento, número de modos, quantidade de danos e introdução de ruído.

Aplicando-se os métodos implementados aos parâmetros modais obtidos dos modelos computacionais que simulam o comportamento dinâmico das vigas com ou sem a presença de danos, busca-se avaliar o método mais apropriado para a detecção de danos em vigas.

Abstract

Structural damages are considered local stiffness loss which compromises the performance of a structure. In many cases, the use of vibrational data on structural damage evaluation has been providing good results.

Colaborating to this trend, on this work it was implemented algorithms that allow us to detect the existence of damages in structures based on modal characteristics.

Among the methodology employed, it was chosen the following methods: MAC / COMAC, Flexibility Variation Method and Flexibility Curvature Variation Method. All of them are implemented in computer language MatLab®. The damage is modeled through reduction of structure elastic modulus.

The damage identification, localization and quantification are reserached for computational models of metallic beams, from the analysis of the influence of severity, position, number of modes, quantity of damages and noise introduction parameters.

By applying the implemented methods to the modal parameters obtained from the computational models that simulate the dinamic behaviour of the beams - existing damage or not, this study aims at evaluating the most apropiate method for detecting damage on beams.

Capítulo I - Introdução

Sistemas estruturais estão sujeitos a um processo de deterioração que se dá por combinação de falhas de projeto, cargas não esperadas, problemas construtivos ou degradação gradual e natural ao longo da vida útil da estrutura. Este processo de deterioração gera regiões danificadas cujas principais características são perdas localizadas na rigidez da estrutura (*Barbosa et al, 2004*).

Vários podem ser os tipos de dano: formação de fraturas por fadiga, fissuração por solicitações excessivas, perda de material por desgaste ou corrosão e plastificação localizada, que podem tornar a estrutura imprestável para os fins aos quais se destina (*Borges et al, 2004*).

Desta forma, o dano pode ser definido em termos gerais, como as variações introduzidas em um sistema que afetam adversamente seu atual ou futuro desempenho. Implícito nesta definição está o conceito de que dano não tem significado sem uma comparação entre dois diferentes estados do sistema, um dos quais é assumido como inicial e quase sempre é o estado não danificado (*Carrillo, 2004*).

Muitas vezes uma simples inspeção visual não é suficiente para detectar e identificar o dano e, muito menos quantificar o seu grau de severidade. Assim, o problema de avaliação da integridade estrutural tem sido tratado mediante o uso de técnicas sofisticadas de monitoração, quer seja através de ensaios de controle destrutivo ou de controle não destrutivo.

A primeira faz-se valer de uma análise e inspeção dos componentes estruturais levando-os ao seu estado limite último com vistas a avaliar a capacidade resistente existente ou mesmo a capacidade resistente residual. A segunda técnica insere-se num contexto mais amplo no qual a análise da estrutura é feita sem a interferência em seu funcionamento ou mesmo sem a necessidade de extração das amostras para posterior ensaio (Gomes, 2004).

Por não afetarem estruturalmente as construções, os processos não-destrutivos estão sendo desenvolvidos e ganhando cada vez mais confiabilidade, destacando-se aqui os métodos de detecção de danos através de análise dinâmica estrutural (*Doebling et al, 1996 apud Barbosa et al, 2004*).

A necessidade de um método de detecção de dano global que possa ser aplicado a estruturas complexas tem conduzido ao desenvolvimento de métodos que examinam variações nas características de vibração da estrutura (*Carrillo, 2004*). A realização de ensaios vibratórios ou de impacto em estruturas de pontes já é praticada desde o século XIX como procedimento de acompanhamento e detecção de danos em pontes ferroviárias. Estes, contudo, eram feitos de forma prática e intuitiva. Foi após a segunda grande guerra que estes ensaios foram formalizados, devido à necessidade de monitoração constante dos aviões de guerra (*Alvandi, 2003*).

Os procedimentos modernos, que representam uma continuidade sofisticada dos primeiros realizados no século XIX, encontram respaldo nas melhorias das capacidades de cálculo e de algoritmos cada vez mais precisos para a detecção do dano em estruturas.

Dentre esses procedimentos destaca-se o de avaliação dinâmica que, em primeiro lugar, realiza a determinação das características modais da estrutura, processo este denominado identificação modal. Essas informações obtidas com a estrutura em serviço são comparadas com as mesmas da estrutura obtida sem a existência do dano, tendo em vista que anomalias estruturais conduzem modificações nos parâmetros dinâmicos.

Atualmente, o procedimento de avaliação dinâmica tem se tornado uma ferramenta eficaz para a determinação das características mecânicas e do desempenho estrutural.

As técnicas atuais de diagnósticos se dividem em varias categorias, mas são na grande maioria métodos de detecção locais. Algumas destas técnicas necessitam que parte da estrutura a ser inspecionada seja acessível e que a região danificada seja conhecida a priori. Face ao exposto, a utilização da avaliação dinâmica torna-se uma técnica não destrutiva aplicada no diagnóstico estrutural e, como tal, merece uma atenção especial.

I.1 – Motivação

O monitoramento de estruturas para detecção de danos é uma prática difundida nos países mais desenvolvidos, onde existe a preocupação da realização de manutenção preventiva. No Brasil, este conceito ainda não é muito aplicado e difundido e o que se observa com isso são acidentes estruturais como o que ocorreram na Ponte General Dutra da BR 101 na zona urbana da Cidade de Campos dos Goytacazes, RJ no fim de 2006 e o desastre acontecido no estádio da Fonte Nova na Bahia em 2007, mostradas na Figura 1 e na Figura 2, respectivamente.



Figura 1 - Ponte General Dutra danificada. Campos dos Goytacazes, RJ. (fonte: www.campos.rj.gov.br)



Figura 2 - Acidente na arquibancada do estádio da Fonte Nova, Bahia. (fonte: www.globo.com/oglobo)

Grandes obras foram construídas algumas décadas atrás e, atualmente muitas destas obras já se aproximam do final de suas vidas úteis. Os custos dessa reposição, somados ao transtorno que seria gerado, criam a necessidade de se prolongar suas vidas úteis. Para tanto, torna-se necessário o desenvolvimento de metodologias de verificação da integridade estrutural e localização de danos. (Gadea,2002)

Vale ressaltar ainda que algumas obras no Brasil datam de algumas décadas e, por isso, necessitam de uma análise para a detecção de danos causados, principalmente, pelo longo tempo de utilização. Também, a monitoração das estruturas antigas se faz necessária visto que algumas normas técnicas brasileiras foram atualizadas e modificadas, sendo importante uma nova análise e verificação estrutural.

O panorama apresentado mostra a necessidade de desenvolvimento de metodologias para a verificação da integridade das estruturas. Segundo Alvandi (2003) o aumento de pesquisas nesta área da engenharia civil é o resultado de vários fatores. Em primeiro lugar, há a necessidade de testes, monitoramento e avaliação para garantir a segurança das estruturas e sistemas utilizados. Em segundo lugar, o envelhecimento das edificações e os elevados custos de reparação fortalecem a necessidade do desenvolvimento de técnicas para detectar danos ou deterioração precoces. Aliado a esses fatores, a comunidade científica testemunha os avanços na tecnologia para ensaios

dinâmicos e da informática tem contribuído para as recentes melhorias na detecção por análise de vibração.

Assim, cada vez mais se procura tecnologias com bons desempenhos, baixos custos e com prazos de concepção curtos. A concepção de que os resultados têm que ser gerados em prazos curtos dificulta a utilização de metodologias tradicionais e experimentais (Meirelles, 2007) e abre espaço para a avaliação dinâmica, uma das técnicas mais utilizadas e estudadas por pesquisadores.

Logo, a detecção de danos em sistemas estruturais através da avaliação dinâmica tornou-se um desafio, através do qual se procura estabelecer técnicas experimentais e analíticas mais adequadas e precisas para uma melhor avaliação do estado de conservação estrutural.

I.2 – Objetivos

Uma das etapas da avaliação dinâmica consiste no desenvolvimento e aplicação de técnicas para a identificação do dano mediante a análise das propriedades dinâmicas da estrutura em serviço ou da comparação destes parâmetros com os de uma estrutura similar isenta de danos.

Inserido neste contexto, o objetivo desta dissertação está em implementar algoritmos de identificação de danos e aplicá-los a modelos de vigas. Desta forma, partindo-se dos dados vibracionais dos modelos de vigas intactos e danificados busca-se detectar e localizar os danos.

Foram implementados e comparados três métodos de detecção de dano, tais como: MAC / COMAC, Método da Variação da Flexibilidade e Método da Variação da Curvatura de Flexibilidade, visando identificar o método mais eficiente para cada tipo de falha. Além disso, o trabalho teve por objetivo analisar a influência de determinados parâmetros e a influência destes no desempenho de cada método de identificação.

Em um contexto geral, esse estudo desenvolve uma metodologia não destrutiva para a rápida e precisa detecção de danos em estruturas, possibilitando, assim, que a UENF atue neste ramo da engenharia civil, criando competências em avaliação estrutural e, mais precisamente, em detecção de danos.

I.3 – Escopo do trabalho

No capítulo II são citadas algumas técnicas de identificação de danos baseados nas respostas dinâmicas encontradas na bibliografia utilizada. Sucintamente, resume-se o trabalho de diversos autores apresentando as suas conclusões e resultados. Esse mesmo capítulo trata dos métodos de detecção de danos trabalhados nesse estudo.

O capítulo III apresenta a metodologia adotada e todas as suas etapas, bem como as propriedades da estrutura analisada, sua geometria e os algoritmos implementados.

O capítulo IV fornece os resultados das implementações, as análises de cada método para cada parâmetro utilizado como variável. Ao final, apresenta-se uma tabela onde o desempenho de cada método é avaliado.

O capítulo V conclui o trabalho e ressalta uma provável continuação desse estudo.

Capítulo II - Técnicas de Detecção de Danos no Âmbito da Engenharia Civil

O desenvolvimento de metodologias para identificação de danos é de grande importância para a garantia da segurança estrutural e conforto dos usuários. Normalmente, a inspeção visual é a primeira abordagem utilizada, porém não permite a completa avaliação estrutural, pois a análise se dá somente nas faces externas da estrutura, desconsiderando a parte interna (Gadea, 2002). Assim, encontram-se na bibliografia inúmeras técnicas de detecção de danos e, dentre elas, aquelas que utilizam ensaios de vibração.

Este capítulo, portanto, tem por finalidade apresentar alguns dos métodos utilizados na detecção de danos estruturais baseados em respostas dinâmicas. Inicialmente, mostra-se a importância destes no contexto da avaliação dinâmica estrutural. Na sequência tem-se uma pequena abordagem de trabalhos desenvolvidos sobre o assunto, apresentando-se a seguir os aspectos teóricos dos principais métodos encontrados na literatura baseados na análise das respostas das estruturas a ensaios vibratórios.

II.1- Detecção de Danos no Contexto da Avaliação Dinâmica Estrutural

A maioria dos métodos baseados em testes vibratórios parte do pressuposto de que os danos estruturais promovem alterações nos parâmetros estruturais da estrutura (massa, rigidez, flexibilidade), que provocam mudanças

nos seus parâmetros dinâmicos (frequências naturais, modos de vibração, amortecimento).

No intuito de utilizar ensaios de vibração para a detecção de danos, a comunidade científica tem sido motivada a desenvolver métodos mais racionais para a avaliação das propriedades dinâmicas. Desta forma, a avaliação dinâmica das estruturas é uma metodologia atualmente empregada para a determinação das suas características mecânicas e avaliação do seu desempenho.

Segundo Alvandi (2003) um dos objetivos da avaliação dinâmica é, em primeiro lugar, a determinação das características modais da estrutura, processo denominado de identificação modal, que inclui a determinação das frequências, modos de vibração e taxa de amortecimento. Para este processo de identificação, é necessário excitar a estrutura para produzir uma resposta a cada modo pertinente da análise. Desta forma, a seleção da excitação para a realização dos ensaios vibratórios é uma das dificuldades que deve ser contornada. Assim, encontra-se atualmente na literatura a utilização de ensaios sob excitações ambientes, tais como vento, pedestres em passarelas, veículos em pontes, etc. Este recurso tem se tornado cada vez mais popular, pois possibilita compreender o comportamento das estruturas em serviço sem a necessidade de interrupção das suas operações. Contudo, vale ressaltar que estes testes necessitam de instrumentação e uma gama de tratamentos adequados aos sinais obtidos.

Nos ensaios sob excitação ambiente, a identificação das fontes de excitação é também um desafio. Assim, dentre as técnicas para processamento desses sinais, as técnicas de análise modal chamadas de Análise Modal Operacional (OMA), permitem trabalhar apenas com os dados de saída, não necessitando de detalhes sobre a força.

No entanto, estas mudanças são pequenas demais para garantir o sucesso da identificação do dano em todos os casos. Além disso, fatores ambientais como gradiente de temperatura entre dois ensaios dinâmicos podem levar a diferenças de parâmetros vibracionais da mesma magnitude do

que aqueles causados por danos. Conseqüentemente, as técnicas mais avançadas, baseadas em monitoramento de vibração têm sido propostas a fim de amplificar estas pequenas alterações. Esses métodos têm ganhado popularidade devido aos avanços significativos nos métodos de análise modal e em tecnologia de monitoramento (Rolando, 2008).

II.2 – Classificação dos métodos de detecção de danos

Pode-se definir um sistema de classificação, dividindo os métodos de detecção de dano em quatro níveis (Rytter, 1993 *apud* Carrillo, 2004 e Alvandi, 2003):

Nível 1: Métodos que detectam a presença de dano na estrutura;

Nível 2: Métodos que localizam o dano na estrutura;

Nível 3: Métodos que quantificam a severidade do dano na estrutura;

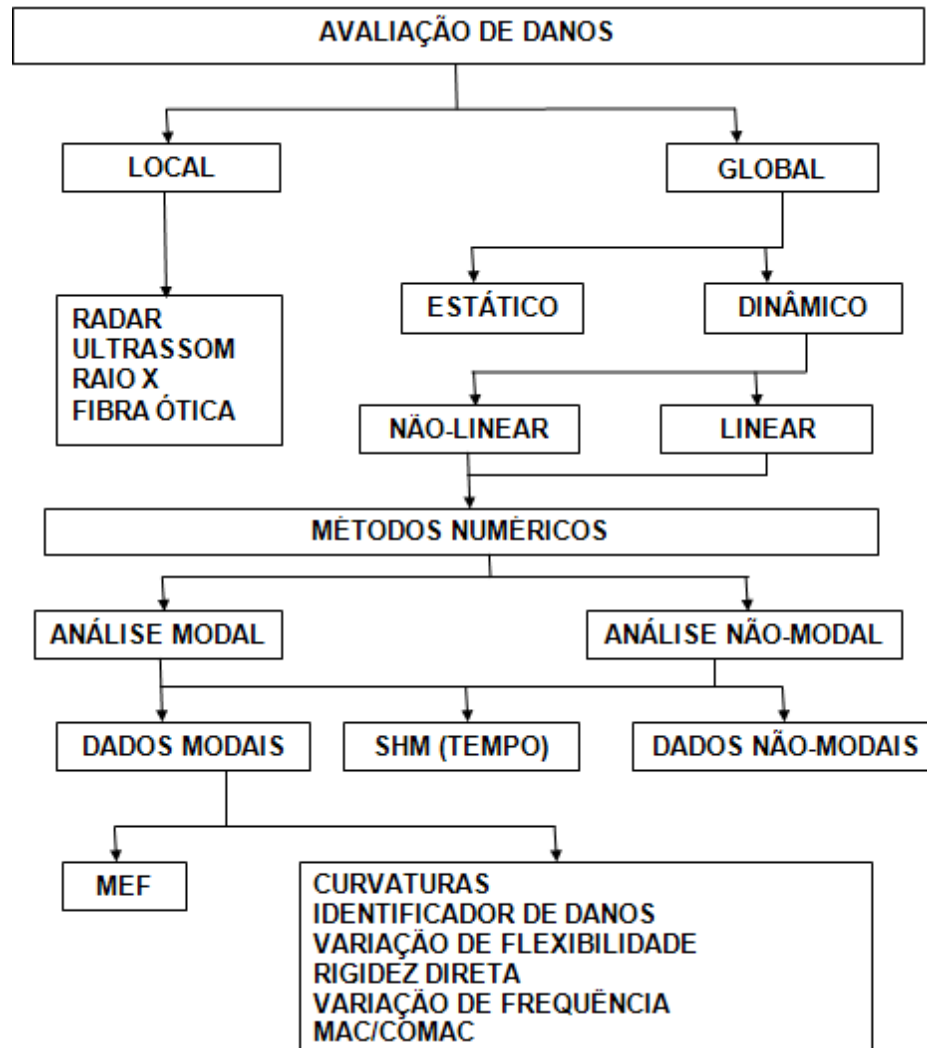
Nível 4: Métodos que prevêm a vida útil remanescente da estrutura.

Salgado et al (2006) em seu trabalho também classifica dessa forma os métodos de detecção de danos.

De acordo com Carrillo (2004), uma outra classificação pode ser feita, diferenciando entre os métodos que utilizam somente dados experimentais (abordagem baseada na resposta da estrutura) para localizar a falha, e métodos que precisam de dados experimentais e modelos analíticos (métodos de ajuste de modelos ou – model updating methods) para resolver o problema de detecção.

Segundo Rolando (2008), a avaliação do dano pode ser dividida em análise local e análise global, sendo o último subdividido em análise estática e análise dinâmica, como apresenta o Diagrama 1.

Diagrama 1 – Classificação de métodos de detecção de danos (Ramos, 2007 apud Rolando, 2008)



Para este trabalho são utilizados métodos numéricos baseados na análise modal seguindo a teoria do Método dos Elementos Finitos (MEF). Essa teoria funciona através da análise individual de cada elemento da estrutura, onde a união de todas essas análises nos fornece uma malha, contendo as características elementares da estrutura.

Alvandi (2003) em seu trabalho de doutorado apresenta alguns métodos de detecção, classificando-os como métodos baseados nas

mudanças das propriedades modais e métodos baseados em parâmetros derivados das propriedades dinâmicas.

No primeiro têm-se os seguintes métodos:

- i. Métodos baseados nas mudanças das frequências naturais. As frequências são indicadores sensíveis da integridade estrutural e diminuem em presença de danos. Todavia, segundo o referido autor, a baixa sensibilidade da mudança de frequência em relação ao dano deve exigir instrumentação muito refinada ou grandes danos. Saliendo que as frequências são resultados de propriedades globais da estrutura, não fornecendo informações quanto a posição localizada do defeito
- ii. Métodos baseados nas mudanças nas formas modais. Neste caso, freqüentemente são utilizados coeficientes de correlação entre modos como os coeficientes MAC (Modal Assurance Criterion) e COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion).

Dentre os métodos baseados em parâmetros derivados das propriedades dinâmicas, citam-se os métodos apresentados abaixo:

- iii. Método baseado na curvatura dos modos de vibração. Este método avalia a variação na curvatura dos modos próprios através da análise de suas derivadas, visto que há uma ligação direta entre a curvatura dos modos de vibração e as deformadas de flexão.
- iv. Método baseado na mudança de flexibilidade. Este se baseia no fato de que a presença de danos reduz a rigidez da estrutura. Como a flexibilidade é a inversa da rigidez, a redução da rigidez deve aumentar a flexibilidade da estrutura. Assim, a mudança de flexibilidade pode ser usada para detectar e localizar danos.
- v. Método baseado na curvatura de flexibilidade. Este é uma combinação dos dois últimos métodos e aproveita, portanto, os

mesmos princípios de mudança da flexibilidade com os danos e a associação da curvatura com a deformada por flexão da viga.

II.3 Revisão de trabalhos numéricos para a detecção de danos

Dentre os trabalhos pesquisados, cita-se o princípio de Redes Neurais Artificiais apresentado por Gomes (2004) através de um exemplo numérico. É um método alternativo e avançado capaz de adaptar e tratar dados incompletos e com presença de ruídos.

Para isso, é criado um banco de dados do comportamento da estrutura em termos de suas características modais através de um modelo de elementos finitos calibrados e após, feita uma comparação entre variações de frequências diferentes (estrutura intacta) dos bancos de dados. Assim, o cenário obtido dessa comparação equivale ao cenário correspondente ao dano.

A desvantagem desse método é a criteriosa escolha de amostra para o banco de dados. O grande número de elementos torna inviável a construção desse banco, visto a necessidade de grande volume de dados para a maior precisão dos resultados, uma vez que o baixo número de dados pode transmitir análises de dano grosseiras.

Carrillo (2004) apresenta a aplicação numérica e a comparação entre os métodos baseados na curvatura de flexibilidade, MVF e MVCF. Através da simulação de diferentes porcentagens de perdas de rigidez em uma viga metálica, a identificação e localização do dano são analisadas por ambos os métodos.

Tanto o MVF quanto o MVCF apresentam bons resultados na detecção do dano, porém o MVCF identifica melhor os de baixa severidade sobre a variação da flexibilidade para viga biapoiada é maior do que o efeito de um único dano de maior severidade.

Baseado nas alterações produzidas pelo dano nos modos de vibração da estrutura, Brasiliano et al (2002) apresentam o método do Erro na Equação de Movimento e o combinado com as técnicas APC (Approximate Parameter Change). O método do erro localiza o dano, observando o erro presente na equação do movimento e, quantifica o dano minimizando o erro na equação de movimento por meio de um processo iterativo. Já a técnica APC permite identificar a região danificada, a partir de alterações produzidas pelo dano nos parâmetros do sistema como rigidez e massa da estrutura. O método do erro apresenta melhores resultados, visto que permite uma quantificação e localização satisfatória dos danos, mesmo em danos de pequenas magnitudes.

Salgado et al (2006) utilizam a detecção de danos para a análise de uma ponte, onde se modela uma viga metálica do tipo Euler-Bernoulli de perfil I com carga móvel (tráfego intenso) e a presença de um ruído. Utiliza método do nível I: MAC; e métodos do nível II: COMAC, Curvatura das Formas Modais, Indicador de Dano e Análise de Wavelet. Esse último método se tornou famoso por não exigir uma comparação entre estruturas de dois estados distintos (intacta e danificada), bastando somente os dados da estrutura danificada. O método é oriundo da Transformada Contínua de Wavelet, definindo a decomposição linear da função avaliada. Salgado et al (2006) concluem que ao avaliar a estrutura fazendo uso do ruído, os métodos não identificaram com sucesso o dano.

Perera et al (2007) apresentam um método para detectar, localizar e quantificar os danos estruturais. Para isso, é formulado um problema de otimização de duas funções, onde uma depende da flexibilidade modal e outra interfere na localização do dano. As funções são minimizadas através de um algoritmo genético. Assim, através de comparações entre os resultados do algoritmo e de testes experimentais de vibração em vigas foi concluído que esse procedimento é bastante promissor.

Wu Di et al (2007) afirmam que a prática de redução uniforme da rigidez em estruturas a fim de modelar numericamente o dano é suspeita, pois os resultados tendem a dar exatos quando é fornecida uma descrição correta do local dos danos, o que experimentalmente é muito difícil. O estudo

apresenta um modelo de elementos que fornece os diferentes tipos de danos e decompõem a matriz desse elemento em matrizes de autovalores e autovetores. Os resultados indicam que a exata identificação dos danos não depende somente de um bom algoritmo de medição e sim, também da descrição correta dos danos na modelagem inicial. Afirma que para uma boa detecção do dano é necessário uma boa aquisição de dados de entrada, principalmente os experimentais.

A idéia básica de Ndambi et al (2002) é que as técnicas baseadas nas características dinâmicas de vibração trabalham diretamente nas propriedades físicas causadas por um dano e, também mudarão a característica do sistema dinâmico. Para isso Ndambi et al (2002) avaliam danos relativos à alteração observada nas características dinâmicas e ao nível do dano introduzido na estrutura, onde é notado que as freqüências são afetadas pelo acúmulo de fissuras na estrutura.

Doebbling et al (1998) desenvolveram um método para localizar danos utilizando como indicador a alteração da energia de deformação modal. Classificam os métodos de acordo com o nível de detecção de dano, com base em modelos lineares e não-lineares e na dificuldade associada à implementação, fazendo uma extensa revisão bibliográfica dos métodos numéricos para detecção de danos.

A sensibilidade das características vibracionais de uma estrutura em relação à variação geométrica e quantitativa dos danos utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) é analisada por Barbosa (2004) e também por Alvandi (2003). O posicionamento e a severidade do dano são avaliados mediante a variação das freqüências naturais da estrutura, comprovando a eficiência e a robustez do Método de Indicador de Danos (MID) aplicado a experimentos numéricos danificados. O MID, que é baseado na variação da energia de deformação da flexão da estrutura com e sem dano, mostra-se capaz de localizar e quantificar aproximadamente o dano estrutural em qualquer parte da estrutura, mesmo em regiões que pouco afetam as características modais.

Borges (2004) apresenta uma técnica de identificação em estruturas reticuladas planas, na qual as variações de energia de deformação de flexão são comparadas, utilizando-se de dados modais de vibração incompletos obtidos experimentalmente. Visando aumentar o número de graus de liberdade observados na estrutura, duas técnicas de interpolação são empregadas, a primeira usando splines e outra, polinômios cúbicos. Os resultados indicaram que o modelo de identificação de dano, juntamente com um processo de interpolação para obtenção dos graus de liberdade ausentes do modo de vibração, funciona adequadamente. Consegue-se em quase todos os casos analisados, localizar o dano e obter uma indicação relativa de seu valor. A interpolação por meio de polinômios cúbicos mostrou-se mais eficiente em relação à interpolação por splines.

Já Alvandi (2003) desenvolve em seu trabalho duas aproximações para detecção de danos e os aplica ao estudo de algumas estruturas entre elas a Ponte I40, localizada em Albuquerque no Estado do Novo México. Na primeira aproximação foram observadas somente variações das características modais de frequência e modos de vibração; na segunda valeu-se de ensaios experimentais para avaliar mudanças em determinados indicadores construídos com dados experimentais. Enquadram-se nesta última métodos que examinam as curvaturas das deformadas próprias, mudanças na matriz de flexibilidade e o método de curvatura de flexibilidade. Segundo suas observações a segunda aproximação é muito mais promissora que a primeira, pois a comparação direta dos parâmetros modais é pouco sensível aos danos.

Carrillo (2007) apresenta um novo algoritmo híbrido autoconfigurado PSOS (Particle Swarm Optimization – Simplex) para avaliação da integridade estrutural a partir de respostas dinâmicas. Neste trabalho a formulação da função objetivo para o problema de minimização definido emprega Funções de Resposta em Frequência e/ou dados modais do sistema. O algoritmo híbrido proposto é comparado com outros algoritmos e demonstrou melhor desempenho.

II.4 – Revisão de métodos para detecção de danos utilizados neste trabalho

Como já dito anteriormente, as estruturas em serviço estão susceptíveis a ambientes que podem danificá-las de forma a comprometer o seu desempenho estrutural. A inspeção regular pode detectar eventuais defeitos e garantir a segurança para uso diário. No entanto, a necessidade de abordagens abrangentes para avaliação quantitativa dos danos tem levado ao desenvolvimento e métodos de investigação contínua para análise das alterações nas características de vibração que estão relacionadas a existência de danos estruturais.

Em sistemas estruturais, a existência de dano leva a modificações nas características dinâmicas de vibração, que são as frequências, modos vibracionais e amortecimento. Estas propriedades da estrutura em serviço podem ser obtidas através de ensaios dinâmicos e a análise de um dano é realizada através da observação da resposta dinâmica, onde se determinam variações perceptíveis nas características modais. A posição geométrica do dano é detectada a partir de distúrbios nas suas características dinâmicas, onde a degradação da rigidez local é a grande responsável pelo dano, os quais podem ser obtidos através de testes dinâmicos.

Para isso, existem diversos métodos propostos baseados em dados dinâmicos. Descrevem-se nesta seção aqueles que nos últimos anos tem despertado a atenção dos pesquisadores devido aos avanços significativos nos métodos de análise modal e nas tecnologias de aquisição dos sinais.

Optou-se nesta pesquisa por implementar os métodos: Parâmetros MAC (*Modal Assurance Criterion Coordinate*) e COMAC (*Modal Assurance Criterion*); Método da Variação de Flexibilidade (MVF) e Método da Variação da Curvatura de Flexibilidade (MVCF). Esta escolha se justifica pela aparente facilidade de implementação e os promissores resultados apontados na literatura.

II.4.1. Método do MAC e do COMAC

Quando dados experimentais de vibração da estrutura estão disponíveis, as medidas de correlação entre os dados analíticos e os medidos fornecem informação útil sobre a qualidade do modelo. Esta correlação pode ser usada para ajustar o modelo analítico para o problema de detecção de dano.

O índice que correlaciona os modos de vibração de uma estrutura intacta com os da danificada é denominada $MAC_{(ij)}$, como apresenta a equação 1.

$$MAC_{(ij)} = \frac{\left| \sum_{k=1}^n [\phi_0]_k^i [\phi_d]_k^j \right|^2}{\sum_{k=1}^n ([\phi_0]_k^i)^2 \sum_{k=1}^n ([\phi_d]_k^j)^2} \quad (1)$$

onde $[\phi_0]_k^i$ e $[\phi_d]_k^j$ são os conjuntos dos graus de liberdade k da estrutura intacta e danificada respectivamente e i e j são as formas modais de cada um desses conjuntos.

Esse índice é apresentado em forma de matriz cuja diagonal principal é composta por valores que variam de zero a um, onde zero demonstra completa ortogonalidade entre os modos analisados e um a total identidade entre os mesmos. Quanto mais perto do zero forem os valores da diagonal da matriz, mais distintos são os modos.

Ao comparar duas estruturas idênticas, igualmente danificadas ou igualmente intactas, o índice $MAC_{(ij)}$, aplicado a “ n ” modos de vibração, torna-se uma matriz identidade de ordem n . Ele somente indica a existência de uma desigualdade entre os modos estudados.

Assim, o índice $MAC_{(ij)}$ é apenas um indicativo da existência de dano, sendo caracterizado como método de detecção do dano de nível I.

O parâmetro $COMAC_i$ demonstra a concordância num mesmo ponto entre vários modos de vibração das estruturas intacta e danificada, possuindo caráter local.

$$COMAC_i = \frac{\left| \sum_{k=1}^n [\phi_0]_k^i [\phi_d]_k^i \right|^2}{\sum_{k=1}^n ([\phi_0]_k^i)^2 \sum_{k=1}^n ([\phi_d]_k^i)^2} \quad (2)$$

Seu valor varia entre zero e um, sendo zero completa discordância entre os modos e um, total concordância entre os mesmos.

Assim, com a definição desses índices é possível identificar a existência do dano ou não. Se o parâmetro $MAC_{(ij)}$ for uma matriz identidade e o $COMAC_i$ for um em todos os pontos analisados, pode-se afirmar que a estrutura é intacta. Caso contrário desconfia-se da presença de um dano (Genovese et al, 2000).

A região onde se localiza o dano é próxima ao ponto onde o índice $COMAC_i$ é o mais discordante, ou seja, o mais próximo de zero, podendo se encontrar à direita ou à esquerda do mesmo.

II.4.2. Método da Variação da Flexibilidade (MVF)

Este método consiste em comparar a matriz de flexibilidade da estrutura danificada com a matriz de flexibilidade da estrutura sem dano. A matriz de flexibilidade é definida como a inversa da matriz de rigidez estática, sendo possível ser gerada a partir dos modos de vibração.

Previamente, o método exige a normalização das formas modais, como mostra a equação (3), (Clough, 1975).

$$[\phi] = [q] \cdot [M_g]^{1/2} \quad (3)$$

onde $[q]$ é a matriz de formas modais do sistema não normalizada, $[M_g]$ é a matriz de massa generalizada e $[\phi]$ é a matriz de formas modais normalizadas com relação à massa.

Através do conceito de ortogonalidade apresentado pela equação 4 e da matriz $[\phi]$, obtém-se expressões para a matriz de rigidez e de flexibilidade da estrutura em função dos parâmetros modais.

$$[\phi]^T \cdot [M] \cdot [\phi] = [I] \quad (4)$$

Para vibração livre é possível representar o problema de auto-valor em termos de rigidez pela equação 5.

$$[K] \cdot [\phi] = [M] \cdot [\phi] \cdot [\Omega] \quad (5)$$

onde $[\Omega]$ é a matriz diagonal de autos-valores ω^2 e $[K]$ é a matriz de rigidez.

Como a inversa da matriz de rigidez é a matriz de flexibilidade, podemos obter a equação 6 através de uma pré-multiplicação da matriz de flexibilidade $[f]$, e pós-multiplicação de $[\Omega]^{-1}$ na equação 5.

$$[\phi] \cdot [\Omega]^{-1} = [f] \cdot [M] \cdot [\phi] \quad (6)$$

A equação 6 representa o problema de auto-valor em termos da flexibilidade. Os autos-vetores das equações 5 e 6 são os mesmos, mas os respectivos autos valores são recíprocos (Berman e Flannelly, 1971 *apud* Carrillo e Laier, 2006).

Assim, a equação 4 pode ser escrita de outra forma, como demonstrado nas equações 7 e 8.

$$[\phi]^T \cdot [M] = [\phi]^{-1} \quad (7)$$

$$[M] \cdot [\phi] = [\phi]^T^{-1} \quad (8)$$

Usando a propriedade da equação 7 na equação 5 e pós-multiplicando por $[\phi]^{-1}$, é possível se obter a equação 9, onde se tem a expansão da matriz de rigidez em termos de auto-vetores e auto-valores.

$$[K] = [M] \cdot [\phi] \cdot [\Omega] \cdot [\Omega]^T \cdot [M] \quad (9)$$

Já a matriz de flexibilidade pode ser expandida em função de seus auto-valores e auto-vetores pela equação 10, onde se substitui a equação 8 na equação 6 e pós-multiplica por $[\phi]^T$.

$$[f] = [\phi] \cdot [\Omega]^{-1} \cdot [\phi]^T \quad (10)$$

Os resultados dados pelas equações 9 e 10 podem ser escritos como somatórios das contribuições modais (Berman e Flannelly, 1971 *apud* Carrillo e Laier, 2006), como mostram as equações 11 e 12.

$$[f] = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i^2} \{\phi\}_i \{\phi\}_i^T \quad (11)$$

$$[K] = [M] \cdot \left(\sum_{i=1}^N \omega_i^2 \{\phi\}_i \{\phi\}_i^T \right) \cdot [M] \quad (12)$$

onde N é o número de graus de liberdade.

Para os métodos que utilizam diferenças entre matrizes de rigidez para detectar danos, deve-se medir pelo menos os modos de vibração de frequências altas para se obter uma estimativa precisa da rigidez. Porém, isso não se faz viável na prática, pois só se consegue medir modos de baixas frequências. Assim, nota-se na equação 12 que a contribuição modal à matriz de rigidez aumenta à medida que a frequência aumenta. Entretanto, a equação 11 mostra que à medida que a frequência aumenta, a contribuição modal à matriz de flexibilidade diminui.

O raciocínio usado para localizar e quantificar danos em vigas pode ser resumido da seguinte forma: como a presença de uma fissura ou dano localizado dentro de uma estrutura reduz sua rigidez e como a flexibilidade é a inversa da rigidez, uma redução de rigidez deve incrementar a flexibilidade do conjunto. Tem-se, pois, a indicação da presença de dano (Pandey,1994 e Biswas, 1995 *apud* Carrillo e Laier, 2006).

Para se identificar um dano na estrutura utilizando esse método deve-se calcular os parâmetros modais do sistema, podendo ser experimental ou numérico. Assim, estima-se a matriz de flexibilidade através da equação 11 para a estrutura sem dano e depois, estima-se para a estrutura com dano. Após, calcula-se a matriz de variação de flexibilidade $[\Delta]$.

$$[\Delta]=[f]-[f^D] \quad (13)$$

onde $[f]$ é a matriz de flexibilidade da estrutura intacta e $[f^D]$ é a matriz de flexibilidade da estrutura danificada

Como forma de avaliação, é possível fazer um gráfico com a variação de flexibilidade para cada nó medido, assim o dano ficará localizado no ponto onde houver uma brusca variação de flexibilidade, como mostra o exemplo da Figura 3 extraído do trabalho de Carrillo (2004). Neste trabalho foi analisada uma viga em balanço e foi introduzido um dano gradativo em determinado elemento da estrutura. Nota-se na Figura 3 que quanto mais severo o dano, mais acentuada é a variação da flexibilidade.

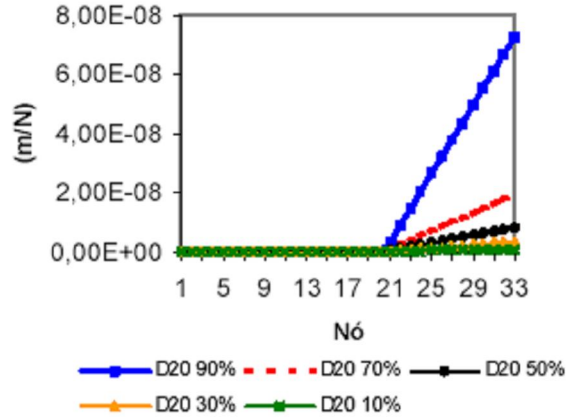


Figura 3 – Variação de flexibilidade de uma viga em balanço (Carrillo, 2004)

II.4.3 Método da Variação da Curvatura da Flexibilidade (MVCF)

O coeficiente de flexibilidade de uma estrutura é entendido como sendo o deslocamento que um determinado grau de liberdade j sofre quando é aplicada uma força unitária na direção i . Assim, se os elementos de uma linha i da matriz de flexibilidade forem todos somados, o que se tem como resultado é a deformada por flexão v da estrutura quando uma carga uniforme unitária for aplicada simultaneamente em todos os graus de liberdade.

Recorrendo então aos conceitos da Resistência dos Materiais, a derivada segunda da deflexão vertical v será:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -\frac{M}{EI} \quad (14)$$

sendo M o momento fletor e I o momento de inércia.

Sabe-se que o dano está relacionado a perda de rigidez localizada (diminuição de EI). Assim, tomando a derivada segunda dos deslocamentos por flexão em uma estrutura discretizada, que nada mais é do que a curvatura de flexibilidade, o dano pode ser detectado por uma descontinuidade desta derivada em regiões que ocorrem redução de rigidez.

Assim, esse método é vantajoso porque não depende de comparação entre os estados da estrutura: intacto e danificado. A curvatura da flexibilidade pode ser calculada empregando-se o método da diferença central (Lu, Ren e Zhao, 2002 *apud* Carrillo e Laier, 2006).

$$CF_i^c = \frac{(f^D_{(i-1,i-1)} - 2f^D_{i,i} + f^D_{(i+1,i+1)})}{\Delta h^2} \quad (15)$$

onde CF_i^c é o i -ésimo elemento do vetor de curvatura da flexibilidade; $f_{i,i}^D$ é o i -ésimo elemento diagonal da matriz de flexibilidade danificada (equação (9)) e Δh é o comprimento do elemento ou distância entre pontos de medição.

Na Figura 4, mostra-se a variação da curvatura de flexibilidade de uma viga simplesmente apoiada com danos de 50% na rigidez nos elementos 4, 16, 20 e 28. Observa-se claramente que a variação da curva de flexibilidade indica exatamente as posições dos danos.

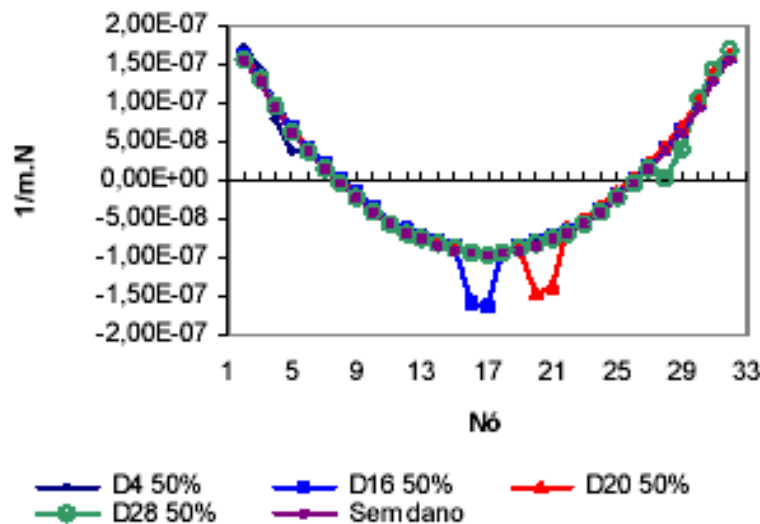


Figura 4 - Curvatura da Flexibilidade de uma viga simplesmente apoiada (Carrillo, 2004)

Nota-se na Figura 5, que para a mesma posição do dano na viga, quanto maior a redução de rigidez, mais visível é a descontinuidade da curva de flexibilidade.

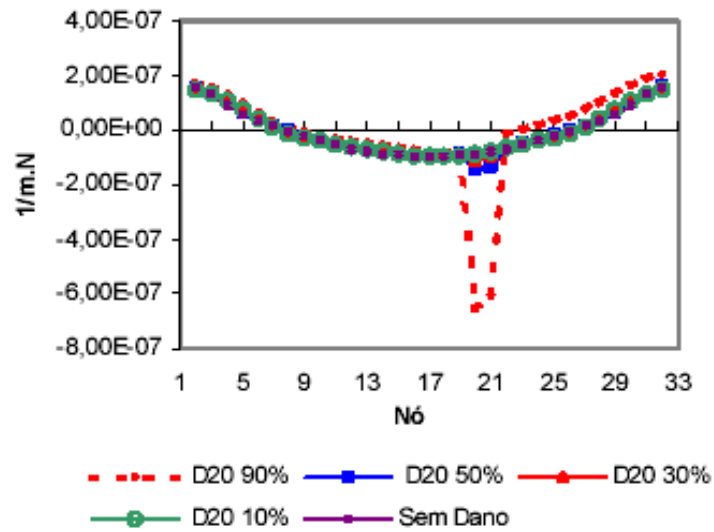


Figura 5 - Curvatura de Flexibilidade de uma viga simplesmente apoiada em função do aumento de dano. (Carrillo, 2004)

No Anexo I dessa dissertação encontram-se outros métodos de identificação de danos também retirados das referências bibliográficas pesquisadas.

Capítulo III – Modelagem Computacional e Ferramentas Numéricas Utilizadas

A análise dinâmica de uma estrutura pode ser considerada uma extensão da análise estática, pois se acrescenta à análise a variação no tempo e frequência. Por meio dessas análises e simulações pode-se determinar se a estrutura responde aos requisitos funcionais através da sua resposta ao carregamento dinâmico aplicado. Assim, o parâmetro estrutural que mais afeta a resposta dinâmica da estrutura pode ser identificado e, tendo a funcionalidade da estrutura melhorada ou danificada (Meirelles, 2007).

Nos últimos anos, a análise modal teórica teve grande progresso, já que o desenvolvimento e aplicação de métodos numéricos mais eficientes para a análise estática e dinâmica foram grandes temas de pesquisas pela comunidade científica (Freitas, 2008).

Na análise modal teórica, o procedimento se baseia na formulação de um modelo matemático discreto através de matrizes de massa e rigidez da estrutura, obtida pelo Método de Elementos Finitos (MEF). Após, a solução do modelo matricial leva a formulação do problema de autovalor e autovetor, onde a solução gera as características dinâmicas da estrutura, como: modos normais de vibração e as frequências naturais. (Freitas, 2008)

O objetivo então deste capítulo é o de apresentar a metodologia utilizada na execução da pesquisa, incluindo, principalmente, a descrição da viga em estudo e a sua modelagem, dos programas utilizados e as implementações computacionais.

III.1 – Metodologia de trabalho

O estudo dessa dissertação é composto de propriedades dinâmicas baseadas somente em simulações numéricas.

Sucintamente, a metodologia segue os passos descritos abaixo:

i. Etapa I

A primeira etapa do trabalho consistiu na implementação e validação numérica dos algoritmos de detecção de danos MAC/COMAC, MVF e MVCF. Para essa análise simples os dados de entrada, que são os modos de vibração e frequências naturais, foram gerados numericamente em um programa de análise dinâmica.

Assim, esta etapa consistiu:

- a) Na modelagem e simulação da estrutura, intacta e danificada, em um programa em elementos finitos para obtenção dos modos de vibração e frequências naturais de cada caso analisado;
- b) Implementação computacional dos métodos de detecção de danos MVF, MVCF e MAC/COMAC. A entrada para este programa são os dados gerados na etapa Ia;
- c) Análise dos resultados.

ii. Etapa II

Uma vez que se pretende dispor de modelos dinâmicos confiáveis, é necessário melhorar as técnicas de modelagem, incluindo a identificação das propriedades dinâmicas, a análise modal, a formulação do comportamento estrutural, etc.

Assim, uma vez validado o programa de identificação de danos, procedeu-se a introdução de ruídos em alguns casos nesse estudo para

garantir proximidade da realidade experimental com a modelagem numérica. Isso porque os modos vibracionais obtidos experimentalmente não são lidos da maneira clássica e teórica. Normalmente estes possuem sinais indesejáveis, oriundos da má calibragem de equipamentos e até mesmo de superposição de sinais.

No senso comum, a palavra ruído significa barulho, som ou poluição sonora não desejada. Algo que interfere no processo de interpretação de alguma coisa e, na maioria das vezes, pode dizer que o ruído é um sinal indesejável.

Na dinâmica, o ruído pode ser associado à interferência na recepção de sinais realizados durante leituras dinâmicas, ao exemplo de uma pequena variação nos modos vibracionais de uma estrutura, sem que o mesmo comprometa significativamente os valores lidos.

A modelagem do ruído neste trabalho é introduzida a partir da adição de um número randômico aos deslocamentos verticais. Esse número randômico é calculado utilizando a milésima parte do tamanho da matriz de deslocamento e a função “randn” do Matlab.

Desta forma, utilizando-se novamente o programa de análise dinâmica que nos fornece a resposta em vibração livre vertical da estrutura e com auxílio do programa de identificação das propriedades dinâmicas de estruturas, disponível na rede mundial de computadores, MIDAS (*Modal Identification of Deformable Systems*), obtem-se novamente as propriedades dinâmicas de modos vibracionais e frequências naturais.

Estas respostas servem então de entrada para o programa de identificação de danos e, após procede-se a análise dos resultados.

Assim, os passos seguidos nesta etapa foram:

- a) Simulação em vibração livre para os casos analisados e obtenção da resposta da estrutura;

- b) Introdução de ruídos à resposta então obtida em a;
- c) Identificação das propriedades dinâmicas utilizando os dados obtidos em b através do programa MIDAS;
- d) Com os modos e frequências naturais obtidos em c procede-se a análises para identificação de danos.

III.2 – Descrição da viga e sua modelagem

O trabalho apresenta a análise dinâmica de uma estrutura metálica do tipo viga e uma posterior detecção de dano. O desempenho dos métodos de detecção de dano é estudado para cada viga analisada, segundo suas características modais, quantidades de danos, seu posicionamento e o nível de dano.

Na modelagem da viga considera-se o modelo de viga de Euler-Bernoulli, onde se despreza a deformação por cortante. Neste caso, as seções transversais da viga se mantêm planas e normais em relação à linha neutra da viga durante a flexão. A taxa de amortecimento considerada é nula e o Δt é de 0,005s.

As matrizes de rigidez e massa locais desses elementos, considerando elemento plano com seus 2 graus de liberdade por nó, serão:

$$[K] = \frac{6EI}{L^3} \begin{bmatrix} 2 & L & -2 & L \\ L & \frac{2L^2}{3} & -L & \frac{L^2}{3} \\ -2 & -L & 2 & -L \\ L & \frac{L^2}{3} & -L & \frac{2L^2}{3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[M] = \frac{\rho SL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13 \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13 & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

onde $[K]$ é a matriz de rigidez, L é o comprimento, E é o módulo de elasticidade, I é o momento de inércia, $[M]$ é a matriz de massa, ρ é o peso específico do material e S é a área da seção transversal.

A Figura 6 esquematiza os graus de liberdade dos elementos adotados na discretização via MEF da viga.



Figura 6 – Elemento de viga e numeração dos graus de liberdade

Para o modelo dinâmico, adotaram-se comportamento linear e amortecimento proporcional a massa e a rigidez.

A viga analisada é composta por quarenta elementos finitos de tamanhos iguais e condições de contorno dos tipos: biapojada e engastada-livre, como apresentada na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente. Foi considerado elemento de viga de 4 graus de liberdade, linear e elástico.

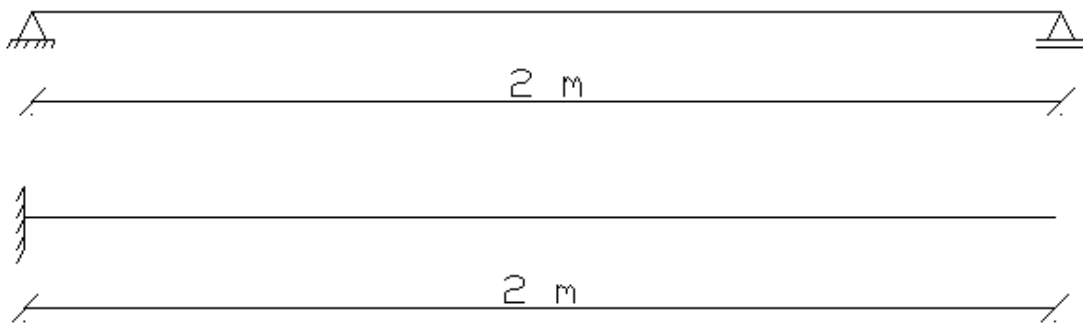


Figura 7 - Esquema estrutural da viga biapojada e engastada-livre

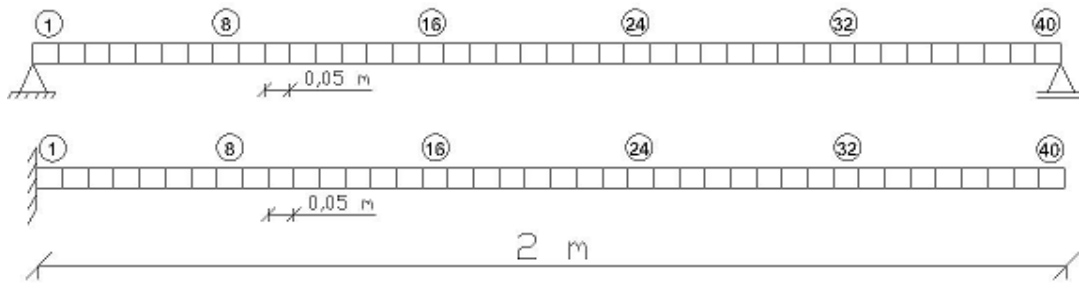


Figura 8 - Discretização da viga biapoiada e engastada-livre

As vigas analisadas são compostas por um perfil *I 6" W 200 x 15*, comprimento de 2 metros e tem as propriedades apresentadas na Tabela 1. A Figura 9 mostra o perfil da viga a ser utilizada.

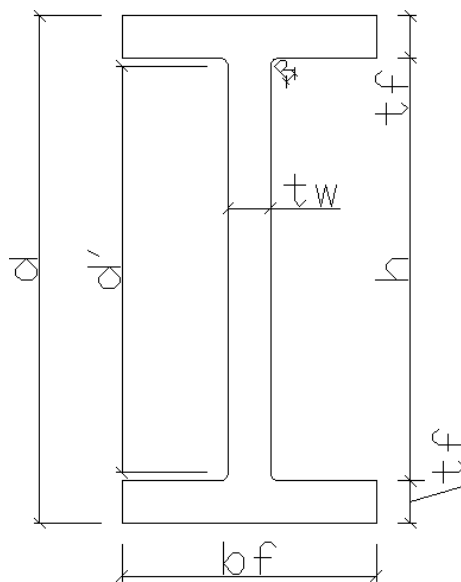


Figura 9 - Perfil da viga I

Tabela 1 - Propriedades da viga utilizada

TABELA DE BITOLAS GERDAU			
Bitola		mm x kg/m	W 200 x 15,0
Massa Linear		kg/m	15
d		mm	200
b_f		mm	100
Espessura - t_w		mm	4,30
Espessura - t_f		mm	5,20
h		mm	190,00
d'		mm	170,00
Área		cm ²	19,40
EIXO X-X	I_x	cm ⁴	1305,00
	W_x	cm ²	130,50
	r_x	cm	8,20
	Z_x	cm ³	147,90
EIXO Y-Y	I_y	cm ⁴	87,00
	W_y	cm ²	17,40
	r_y	cm	2,12
	Z_y	cm ³	27,30
r_t		cm	2,55
I_t		cm ⁴	2,05
Esbeltez da Aba - λ_f		$b_f/2t_f$	9,62
Esbeltez da Alma - λ_w		d'/t_w	39,44
C_w		cm ⁶	8,22
u		m ² /m	0,77

Para a realização deste trabalho, são primeiramente adotadas as seguintes hipóteses:

- a) A estrutura possui um comportamento linear geométrico e o material que a compõe possui um comportamento linear elástico;

- b) Há invariância temporal dos parâmetros físicos, isto é, dos modos e frequências naturais de vibração;
- c) O dano na estrutura é linear, ou seja, para a estrutura inicialmente elástica linear permanece elástica linear após o surgimento do dano.

III.3– Descrição dos Programas Computacionais Utilizados

III.3.1 – Programa de Dinâmica

O ponto de partida do trabalho é o programa de análise dinâmica desenvolvido por Savaris (2007) na disciplina de Dinâmica das Estruturas. Este programa em elementos finitos é aplicado na discretização por elementos de viga, em linguagem computacional Matlab.

O algoritmo do programa segue os passos descritos abaixo:

i. Leitura dos dados de entrada:

- a) Número de nós e número de elementos;
- b) Coordenada inicial e coordenada final de cada elemento;
- c) Conectividade e propriedades dos elementos de área, momento de inércia e módulo de elasticidade de cada elemento;
- d) Cargas externas aplicadas;
- e) Condições de contorno em x, y e z para cada nó (0 para livre e 1 para restringido);
- f) Massa linear por número de elemento;

- g) Taxa de amortecimento;
 - h) Tempo inicial e final da simulação;
 - i) Número de iterações;
 - j) Número de modos e modos selecionados para a análise;
 - k) Direção dos deslocamentos para saída dos resultados.
- ii. **Montagem do vetor de cargas externas;**
 - iii. **Montagem das matrizes de massa e rigidez para elemento de pórtico plano e no referencial global;**
 - iv. **Introdução das condições de contorno (técnica do zero ou um);**
 - v. **Cálculo dos autovetores e autovalores e obtenção dos modos e frequências naturais da estrutura;**
 - vi. **Utilização do método da superposição modal para solução das equações de equilíbrio, procedendo da seguinte forma:**
 - a) Desacoplamento das equações de equilíbrio;
 - b) Solução das equações desacopladas para cada coordenada generalizada de cada modo de vibração utilizando o método da diferença central;
 - c) Obtenção dos deslocamentos finais somando a contribuição dos modos de vibração envolvidos no problema. Os deslocamentos verticais da estrutura são utilizados para a introdução do ruído e a aplicação do MIDaS.

III.3.2 – Programa Midas

O Midas foi desenvolvido por Cury (2008) na Universidade Federal de Juiz de Fora com o objetivo de disponibilizar um conjunto de rotinas capazes de realizar a identificação modal de sistemas deformáveis.

Existe uma versão web executada pelo servidor pertencente ao NUMEC (Núcleo de Pesquisa em Métodos Computacionais em Engenharia) acessada pelo endereço: www.midas.ufjf.br. Nessa versão o usuário deve fazer o cadastro no endereço e carregar três arquivos de entrada contendo os dados solicitados e mencionados no tutorial do programa, encontrado no mesmo endereço web.

Por questões de praticidade foi adquirida a versão em Matlab desse mesmo programa Midas e adaptada para o programa de análise dinâmica. Nessa versão adaptada, é necessário somente um arquivo de entrada – formato *.txt* – contendo os dados necessários para a implementação do programa.

No Anexo II encontram-se alguns parâmetros que compõe o arquivo de entrada do Midas (Cury, 2008).

O programa consta de cinco passos: MIDaS-Ident; MIDaS-Trunc; MIDaS-Filter; MIDaS-Assembly e MIDaS-Visual.

O MIDaS-Ident é a principal rotina, pois é capaz de realizar a identificação modal de sistemas no domínio do tempo, onde os arquivos contendo os sinais provenientes das medições dinâmicas (aceleração, deslocamentos, deformações, etc.) são analisados simultaneamente. É possível visualizar um histograma com as freqüências identificadas, onde através dele é possível definir as faixas de freqüências a serem efetivamente analisadas nas próximas etapas.

O MIDaS-Trunc é a segunda rotina, capaz de definir o número de freqüências que continuarão na análise e na definição dos limites inferior e superior de corte. Os resultados deste algoritmo são as freqüências naturais, taxas de amortecimento e amplitudes das componentes dos modos de vibração truncados.

O MIDaS-Filter é a terceira rotina e tem como objetivo realizar o processo de filtragem dos parâmetros modais, de forma a definir o intervalo de

confiança das freqüências naturais ou das taxas de amortecimento. Os resultados deste algoritmo são as freqüências naturais, taxas de amortecimento e amplitudes das componentes dos modos de vibração filtrados.

O MIDaS-Assembly é a quarta rotina, capaz de organizar as freqüências e modos de vibração naturais e as taxas de amortecimento após o processo de filtragem. Após essa rotina, considera-se que o processo de identificação modal está totalmente completo.

O MIDaS-Visual é a quinta e última rotina, tendo como objetivo preparar e gerar gráficos com os modos próprios de vibração, obtidos do algoritmo anterior, para sua visualização.

Após as etapas do MIDaS, os modos vibracionais e as freqüências são obtidos como respostas e utilizados como dados de entrada nos algoritmos de detecção de danos

III.3.3 – Algoritmos de Detecção de Danos

A última parte do programa desenvolvido consta dos métodos de detecção de danos, onde o usuário deverá escolher qual dos três métodos deverá ser aplicado.

Inicialmente é necessário fazer a leitura dos modos vibracionais e das freqüências desejadas para o trabalho. Estes podem ser oriundos da análise dinâmica direta sem a introdução do ruído ou da introdução do mesmo e análise no MIDAS.

Realizadas as devidas leituras, o programa solicita a inserção de dados como: número de nós, número de modos e comprimento efetivo de cada elemento. Após, pede-se que escolha o método: Método da Variação da Flexibilidade, Método da Variação da Curvatura de Flexibilidade ou Método das Formas Modais.

No Método da Variação da Flexibilidade calcula-se a flexibilidade da estrutura intacta, depois da estrutura danificada, subtrai a danificada da intacta e se obtém o delta. O gráfico é construído a partir do máximo valor absoluto de cada coluna do delta.

No Método da Variação da Curvatura de Flexibilidade, calcula-se a flexibilidade da estrutura danificada e depois se calcula a curvatura de flexibilidade. Gera-se o gráfico da curvatura e faz a análise.

Para o cálculo do parâmetro *MAC*, utiliza-se uma variável auxiliar que armazena a multiplicação de cada elemento da matriz de modos da estrutura intacta pela a matriz de modos da estrutura danificada, faz o somatório e eleva-se ao quadrado, obtendo o numerador do parâmetro. Já para o denominador, as variáveis auxiliares armazenam a soma do quadrado dos modos de vibração e, posteriormente, a multiplicação das somas referentes às estruturas intactas e danificadas. Assim, calcula-se o parâmetro *MAC* mediante a divisão do numerador pelo denominador.

Para o cálculo do parâmetro *COMAC*, também foram utilizadas variáveis auxiliares. No numerador, o quadrado do somatório dos valores absolutos da multiplicação entre o modo vibracional intacto e danificado. No denominador, a multiplicação do somatório do quadrado dos modos vibracionais intactos pelo somatório do quadrado dos modos vibracionais danificados. Assim, basta calcular a razão entre o numerador e denominador do *COMAC*.

Todas as etapas do programa computacional desenvolvido foram validadas utilizando exemplos encontrados nas referências bibliográficas, e assim submetidos a uma posterior implementação.

Capítulo IV – Resultados

Nesse capítulo serão apresentados os resultados e análises comparativas dos métodos em função de determinados parâmetros utilizados na identificação de danos em estruturas do tipo viga.

Os resultados apresentados se dividem em duas partes, conforme o procedimento descrito no capítulo III. Na primeira, apresentam-se os desempenhos dos métodos com os dados de entrada de modos e frequências naturais simulados virtualmente no programa de dinâmica. Na segunda parte, devido a ausência de dados experimentais, optou-se por introduzir ruídos na resposta dinâmica da estrutura a vibração livre. Com auxílio do programa Midas, obtiveram-se os modos e frequências naturais que serviram de dados de entrada para os algoritmos de identificação.

Nos itens que seguem têm-se os parâmetros utilizados e seus valores e as respostas para cada caso analisado. Por fim, faz-se um compêndio do desempenho de cada método.

IV.1 – Parâmetros utilizados

Foram analisadas as influências de determinados parâmetros nas análises. Os parâmetros então considerados foram: severidade do dano; posicionamento do dano; número de modos; quantidade de danos e a introdução do ruído nos deslocamentos verticais.

A severidade do dano é um fator importante para a análise dos resultados, pois se espera que quanto maior for a intensidade do dano mais vulnerável estará a estrutura, já que a vulnerabilidade da estrutura está diretamente vinculada a perda de rigidez.

Para este trabalho, foram considerados níveis de dano em 10%, 50% e 90% do módulo de elasticidade (E) do material da estrutura, como mostra a Tabela 2. O valor padrão é 50% de E, ou seja, é mantido fixo enquanto se faz variar os demais.

Tabela 2 - Valores de E adotados na variação da intensidade do dano.

Sem Dano (MPa)	90% E (MPa)	50% E (MPa)	10% E (MPa)
205000	184500	102500	20500

Outro parâmetro analisado é o posicionamento do dano. Uma descontinuidade, ou, ponto de inflexão, ou até mesmo uma anomalia pontual nos gráficos dos resultados é indicativo da existência de falhas. Assim, fazendo-se variar a localização, essa anomalia também se alterará no gráfico, acompanhando a variação do posicionamento, como apresentado na Figura 4 retirada de Carrillo (2004). Logo, a região próxima ao elemento onde se encontra a anomalia é a região aonde se posiciona o dano.

Para o posicionamento do dano, consideram-se a localização $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do vão da estrutura, respectivamente os elementos 10, 20 e 30. Para valor padrão adota-se $\frac{1}{2}$ do vão.

O estudo do aumento do número de modos de vibração tem por objetivo analisar até que ponto eles conseguem fornecer informações mais completas e precisas para a identificação do dano em estruturas. Para isso foram implementados exemplos com 1, 3 e 5 modos de vibração com o intuito de avaliar a influência do mesmo na eficiência da identificação do dano nas estruturas. O valor padrão considerado é de 3 modos de vibração.

Outro parâmetro analisado são as combinações de dois ou mais posicionamentos dos danos, denominados danos múltiplos. Nesse caso, são implementados somente combinações de posicionamento, já que combinações de severidade ou modos de vibração seria inviável.

A Tabela 3 mostra resumidamente os parâmetros que foram considerados nas análises de cada método. Os valores em negrito e contornados por um retângulo constituem valores padrões.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados nas análises dos métodos.

Parâmetros	Condições analisadas
Condição dos apoios	Biapoiada, Engastada-livre
Severidade do dano	10%E, 50% E , 90%E
Posição do dano	Elemento 10, Elemento 20 , Elemento 30
Número de modos	1, 3 , 5
Número de danos	Danos simples , Danos múltiplos

Fazendo uma seleção e uma combinação dos parâmetros obteve-se uma série de gráficos que apresentam os resultados encontrados, sendo possível realizar comparações pertinentes. A Tabela 4 e a Tabela 5 resumem os casos implementados, totalizando em 50 gráficos.

Tabela 4 – Casos implementados com dados vibracionais obtidos diretamente da equação de auto-valor.

SEM MIDAS												
Métodos	Danos Simples					Métodos	Danos Múltiplos					
	Qtde	Severidade	Localização	Modos	Apoio		Qtde	Severidade	Localização	Modos	Apoio	
MVF	1	10%, 50%, 90%	1/2	3	Biapoiada	MVF	1	50%	1/4, 1/2	3	Biapoiada	
	1	10%, 50%, 90%	1/2	3	Engastada-livre		1	50%	1/4, 1/2	3	Engastada-livre	
	1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Biapoiada		1	50%	1/4, 3/4	3	Biapoiada	
	1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Engastada-livre		1	50%	1/4, 3/4	3	Engastada-livre	
	1	50%	1/2	1, 3, 5	Biapoiada		1	50%	1/2, 3/4	3	Biapoiada	
	1	50%	1/2	1, 3, 5	Engastada-livre		1	50%	1/2, 3/4	3	Engastada-livre	
Total	6					Total	8					
MVCF	1	10%, 50%, 90%	1/2	3	Biapoiada	MVCF	1	50%	1/4, 1/2	3	Biapoiada	
	1	10%, 50%, 90%	1/2	3	Engastada-livre		1	50%	1/4, 1/2	3	Engastada-livre	
	1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Biapoiada		1	50%	1/4, 3/4	3	Biapoiada	
	1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Engastada-livre		1	50%	1/4, 3/4	3	Engastada-livre	
	1	50%	1/2	1, 3, 5	Biapoiada		1	50%	1/4, 3/4	3	Engastada-livre	
	1	50%	1/2	1, 3, 5	Engastada-livre		1	50%	1/2, 3/4	3	Biapoiada	
Total	6					Total	8					
Mac/Comac	2	10%, 50%, 90%	1/2	3	Biapoiada	Mac/Comac	1	50%	1/2, 3/4	3	Engastada-livre	
	2	10%, 50%, 90%	1/2	3	Engastada-livre		1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Biapoiada	
	2	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Biapoiada		1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Engastada-livre	
	2	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Engastada-livre		Total	8				
	1	50%	1/2	3, 5	Biapoiada		Mac/Comac	2	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Biapoiada
	1	50%	1/2	3, 5	Engastada-livre		Mac/Comac	2	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Engastada-livre
Total	10					Total	4					

Tabela 5 - Casos implementados com dados experimentais simulados numericamente.

COM MIDAS					
Métodos	Sem Ruído				
	Qtde	Severidade	Localização	Modos	Apoio
MVF	1	10%, 50%, 90%	1/2	3	Biapoiada
	1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Biapoiada
	1	50%	1/2	1, 3, 5	Biapoiada
MVCF	1	50%	1/2	3	Biapoiada
Total	4				
Métodos	Com Ruído - 5%				
	Qtde	Severidade	Localização	Modos	Apoio
MVF	1	10%, 50%, 90%	1/2	3	Biapoiada
	1	50%	1/4, 1/2, 3/4	3	Biapoiada
	1	50%	1/2	1, 3, 5	Biapoiada
MVCF	1	50%	1/2	3	Biapoiada
Total	4				

IV.2 – Resultados Obtidos com os Dados Vibracionais dos Problemas de Autovalor

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com as propriedades dinâmicas simuladas pelo programa de dinâmica. Primeiramente, faz-se uma comparação da variação das frequências naturais em função da severidade e posicionamento dos danos. Na seqüência são apresentados os resultados obtidos da aplicação dos métodos analisados neste trabalho em função dos parâmetros da Tabela 3.

i. Frequências Naturais de Vibração

Além de analisar os métodos de identificação de danos apresentados no capítulo II, esse capítulo também fornece um estudo sobre a variação das frequências naturais de vibração da estrutura para os diversos tipos de casos trabalhados.

A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam a comparação dos valores em Hertz (Hz) das frequências naturais da estrutura trabalhada, considerando respectivamente a severidade e o posicionamento do dano simples. Conjuntamente, apresentam-se as diferenças percentuais em relação às vigas não danificadas.

Tabela 6 – Tabela comparativa de frequências naturais em função da severidade do dano simples

(a) Valores absolutos das frequências

Frequencia (Hz)	Viga biapoiada				Viga engastada-livre			
	Sem dano	90%E	50%E	10%E	Sem dano	90%E	50%E	10%E
1	165,84	165,38	161,85	137,67	59,07	59,03	58,70	55,96
2	663,37	663,36	663,24	662,39	370,03	369,01	361,23	311,99
3	1492,59	1488,55	1458,59	1300,19	1035,71	1035,69	1035,50	1034,15

(b) Diferenças percentuais em relação à viga intacta (%)

Frequência (Hz)	Viga biapoiada			Viga engastada-livre		
	90%E	50%E	10%E	90%E	50%E	10%E
1	0,28	2,41	16,99	0,07	0,62	5,27
2	0,00	0,02	0,15	0,28	2,38	15,68
3	0,27	2,28	12,89	0,00	0,02	0,15

Tabela 7 – Tabela comparativa de frequências naturais em função do posicionamento do dano simples

(a) Valores absolutos das frequências

Frequencia (Hz)	Viga biapoiada				Viga engastada-livre			
	Sem dano	¼ do vão	½ do vão	¾ do vão	Sem dano	¼ do vão	½ do vão	¾ do vão
1	165,84	163,96	161,85	163,64	59,07	57,77	58,70	59,04
2	663,37	647,75	663,24	647,85	370,03	369,89	361,23	366,37
3	1492,59	1471,71	1458,59	1479,46	1035,71	1021,17	1035,50	1008,63

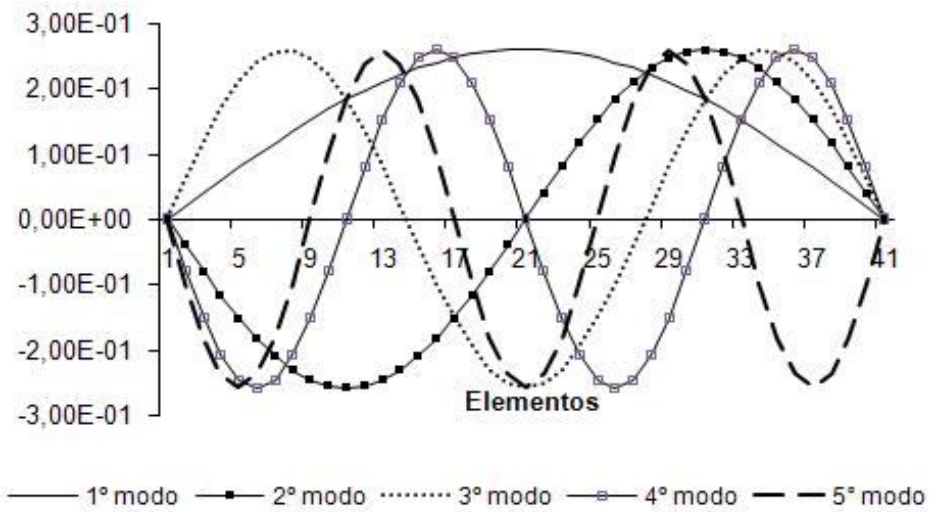
(b) Diferenças percentuais em relação à viga intacta (%)

Frequência (Hz)	Viga biapoiada			Viga engastada-livre		
	¼ do vão	½ do vão	¾ do vão	¼ do vão	½ do vão	¾ do vão
1	1,13	2,35	1,30	65,16	44,24	31,58
2	2,35	0,02	2,34	64,60	45,55	30,62
3	1,4	2,28	0,88	64,40	44,77	32,42

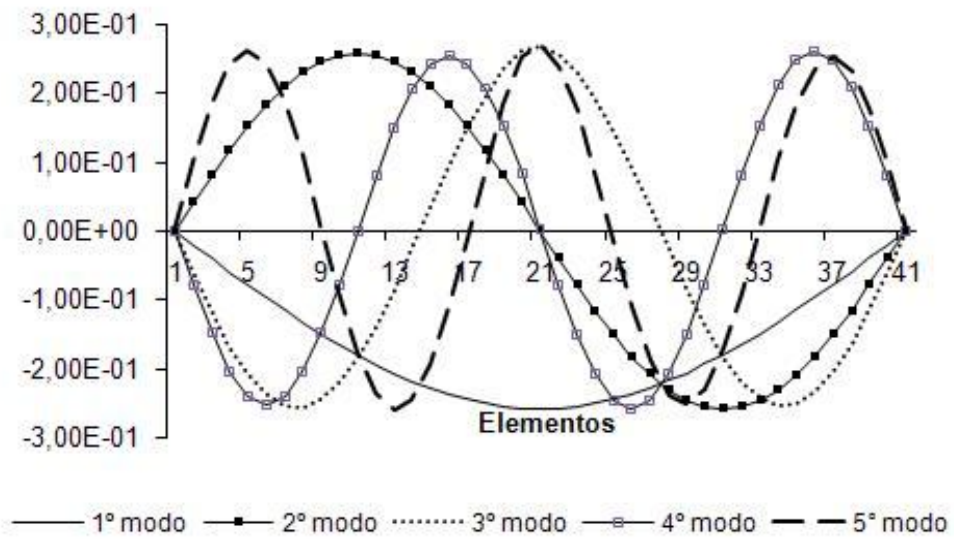
Observa-se na Tabela 6(a) que o aumento da severidade do dano simples produz uma redução não linear das freqüências. Na Tabela 7(a) percebe-se na viga biapoiada que a menor freqüência aparece para o dano no meio do vão, o elemento mais distante dos apoios. Na viga engastada-livre, também acontece a mesma situação, a menor freqüência simulada se encontra no elemento 30, o elemento estudado mais distante do engaste. Com isso, entende-se que o posicionamento do dano que mais reduz a freqüência da estrutura está relacionado com o posicionamento do maior momento fletor.

Observa-se ainda que as freqüências são influenciadas pela posição onde ocorre o dano. Todavia, comparações dessa natureza servem mais como indicativo da existência ou não de anomalias sendo, portanto, um procedimento classificado como nível I na classificação proposta por Rytter (1993). Carrillo (2004) conclui da mesma forma a representatividade das freqüências na identificação do dano.

A Figura 10 apresenta os cinco primeiros modos de vibração para a viga biapoiada (a) sem dano e (b) danificada em 50%E. Enquanto a Figura 11 apresenta os modos vibracionais para viga engastada-livre (a) sem dano e (b) com dano de 50% E.

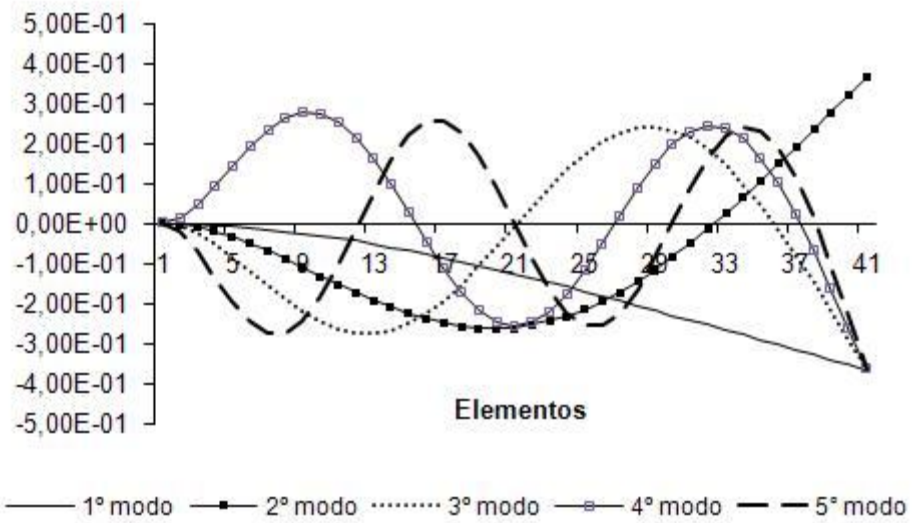


(a)

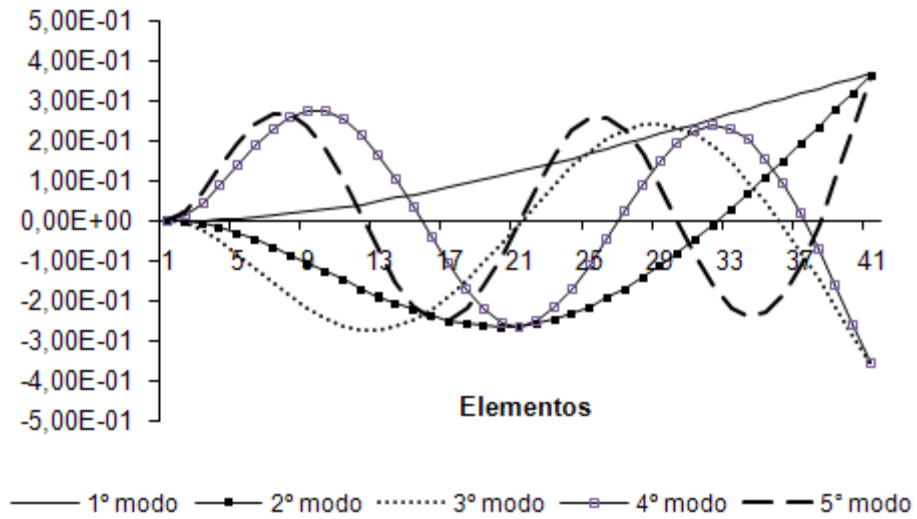


(b)

Figura 10 - Cinco primeiros modos de vibração da viga biapoiada (a) sem dano (b) danificada em 50%E no elemento 20



(a)



(b)

Figura 11 - Cinco primeiros modos de vibração da viga engastada-livre (a) sem dano (b) danificada em 50%E no elemento 20.

ii. MAC / COMAC

Apresentam-se nesta seção os resultados do desempenho do *MAC* e *COMAC*, considerando os parâmetros de severidade, posicionamento, número de modos e quantidade de danos.

a) Severidade do dano

A Figura 12 e a Figura 13 apresentam os resultados obtidos para o *MAC* para vigas biapoiada e engastada-livre, respectivamente.

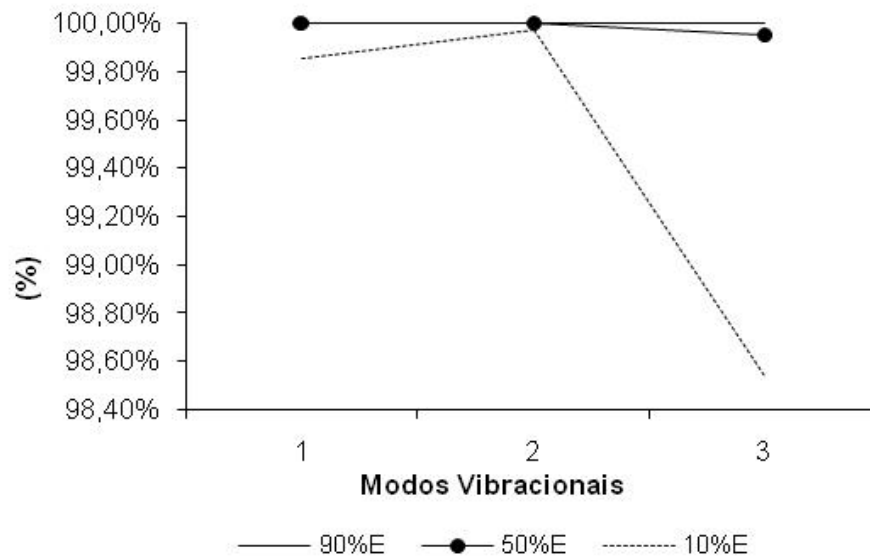


Figura 12 - Comparação percentual do indicador *MAC* com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga biapoiada.

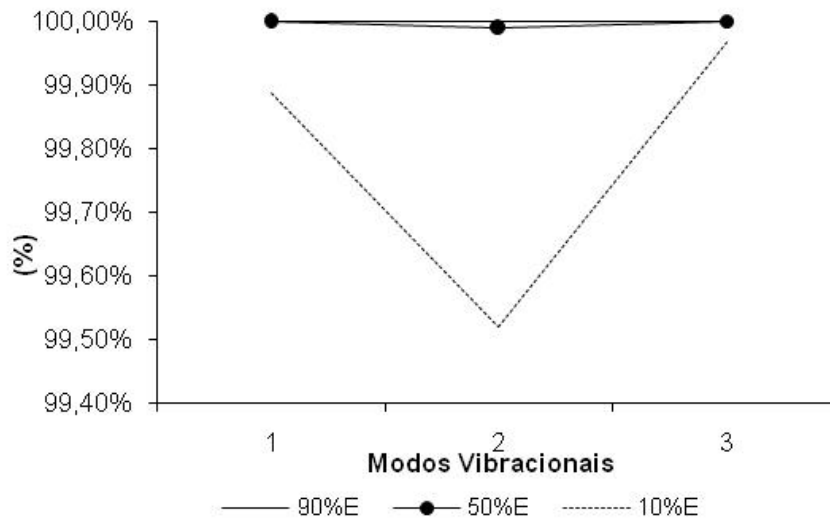


Figura 13 - Comparação do percentual indicador *MAC* com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre.

Os resultados de *MAC* apresentados indicam a existência de dano, pois os valores do índice de correlação são menores do que 100%.

Observa-se que para danos muito pequenos a correlação se aproxima de 100%, já que a diferença de valores dos módulos de elasticidade trabalhados é pequena. Por isso, o resultado do dano de 10%E é mais fácil de ser analisado por apresentar uma menor correlação entre os estados intacto e danificado, gerando um gráfico mais acentuado.

Na viga biapoiada, o segundo modo vibracional se aproxima de 100% enquanto os demais se afastam. Isso está relacionado a forma modal da viga estudada. Na Figura 10 (b), o elemento 20 danificado se encontra próximo ao eixo zero no segundo modo vibracional, enquanto no primeiro e terceiro modos se encontra afastado do eixo.

Na viga engastada-livre essa mesma análise pode ser feita, ao observarmos a proximidade dos 100% do *MAC* no terceiro modo vibracional. Na terceira forma modal, o elemento 20 danificado é próximo ao eixo zero, como mostra a Figura 11 (b).

Logo, conclui-se que a forma modal da estrutura trabalhada influencia até certo ponto no *MAC*. E, fazendo-se uma minuciosa análise entre o comportamento do *MAC* e da forma modal da estrutura é possível ter uma idéia de um provável posicionamento. Porém, torna-se inviável, pois requer uma minuciosa análise comparativa e um grande número de dados.

A Figura 14 e a Figura 15 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos do *COMAC* para a viga biapoiada e engastada-livre. Para uma melhor análise, foi utilizado o complementar do *COMAC*, ou seja, *1-COMAC*.

Descartou-se o *COMAC* para 90%E, pelo gráfico não ser tão representativo em comparação aos demais, e pelos resultados não serem tão diferentes do problema sem dano.

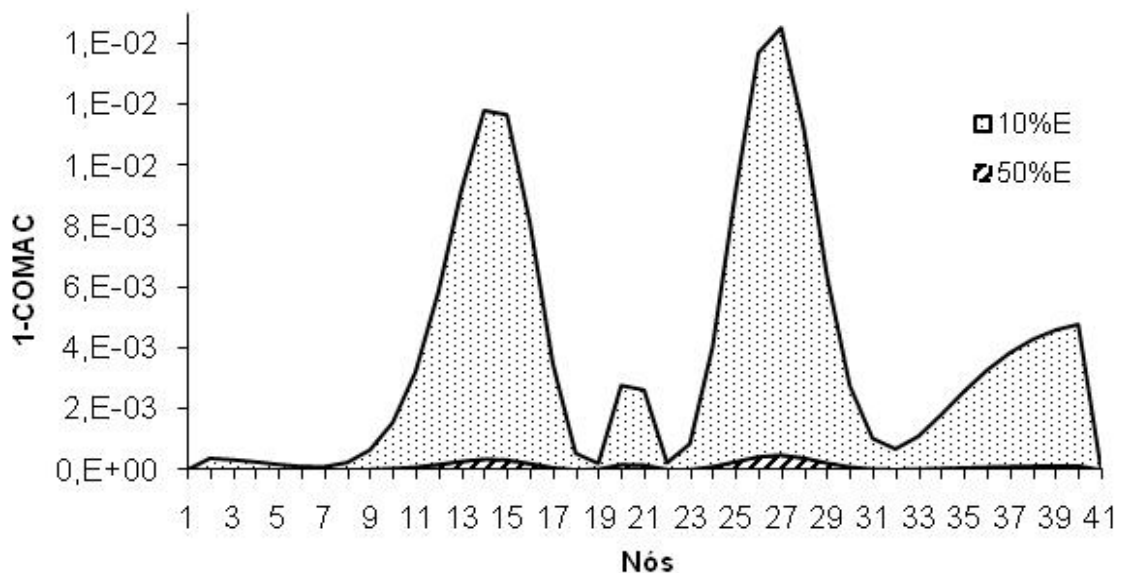


Figura 14 – Comparação do coeficiente *COMAC* com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga biapoiada, utilizando 3 modos de vibração.

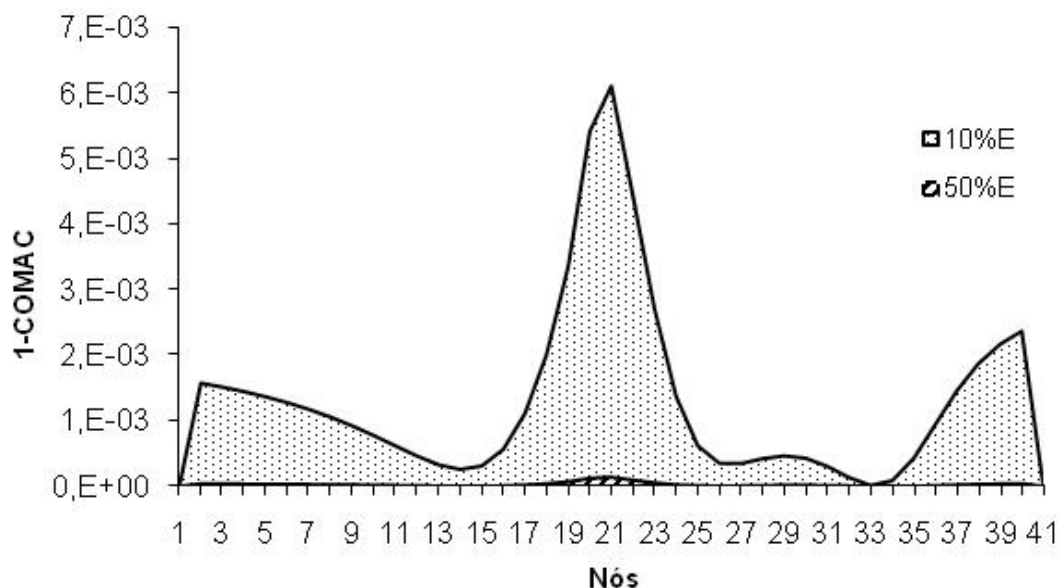


Figura 15 - Comparação do coeficiente *COMAC* com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre, utilizando 3 modos de vibração.

Nota-se que quanto maiores os índices de redução de rigidez, maiores são as áreas do gráfico, indicando que o *COMAC* possui uma sensibilidade na quantificação do dano. Mediante uma comparação, o método é capaz de apontar qual estrutura está mais vulnerável, porém não consegue determinar a intensidade do dano.

Observa-se que em ambas as Figuras, existem picos em destaques ao longo dos elementos das vigas. Após descartar os picos relacionados aos apoios, as áreas restantes em destaques são possíveis regiões danificadas. Assim, qualquer investigação do dano deveria priorizar essas áreas.

b) Posicionamento do dano

A Figura 16 e a Figura 17 apresentam os gráficos do *MAC* para vigas biapoiada e engastada-livre, respectivamente.

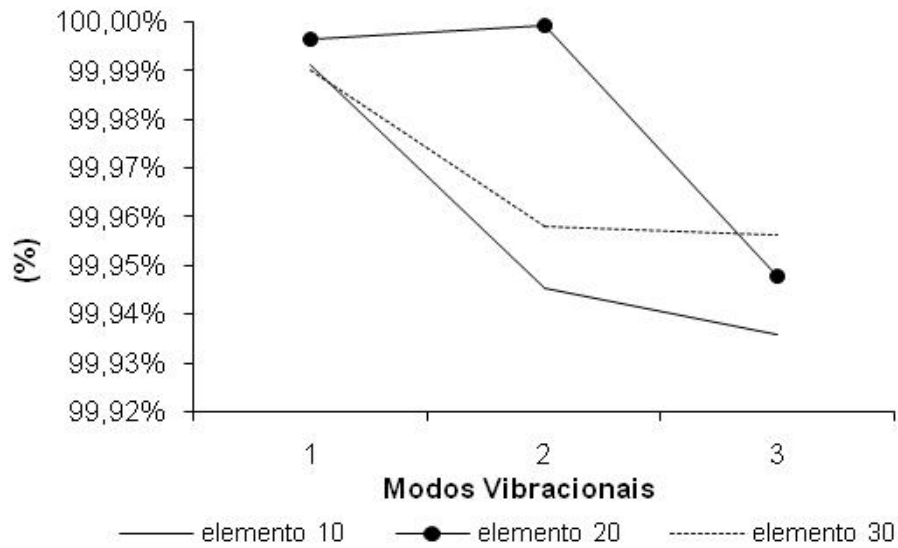


Figura 16 - Comparação do indicador *MAC* com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoiada.

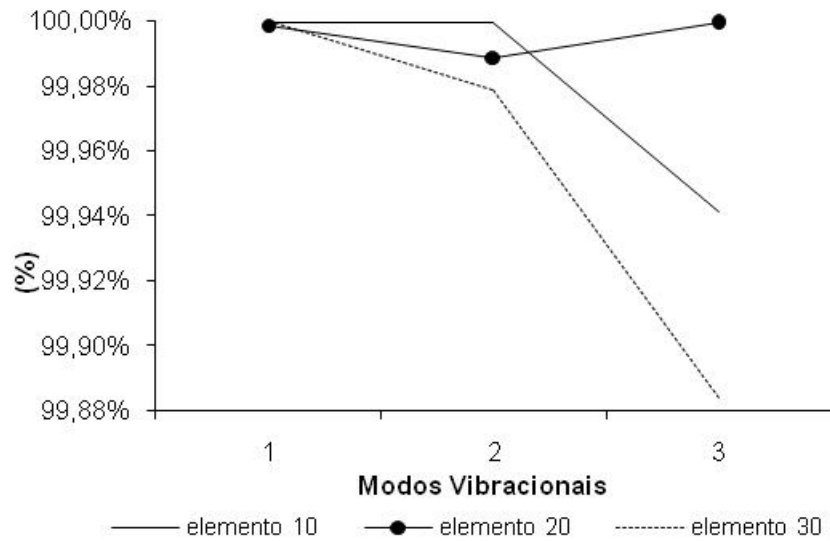


Figura 17 - Comparação do indicador *MAC* com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre.

O *MAC* é influenciado de alguma maneira pela forma modal da estrutura. Observa-se que os elementos onde a forma modal corta o eixo zero, ou onde se

encontram os apoios, possuem um indicativo de dano em 100%. Existe uma relação de proporção ainda desconhecida entre a distância da forma modal do eixo zero com o *MAC*.

Pode-se citar os gráficos do elemento 20. Na viga biapoiada, o elemento 20 apresenta a máxima amplitude da primeira forma modal, sendo *MAC* menor do que 100%. Na segunda forma modal, o corte no eixo zero encontra-se no elemento 20, sendo o *MAC* igual a 100%. No terceiro modo, o elemento 20 apresenta valores próximos ao máximo, sendo o *MAC* menor do que 100%. O mesmo também acontece para a viga engastada-livre.

Assim, é possível afirmar que após uma extensa análise e comparações entre valores de *MAC* e as possíveis formas modais da estrutura, existe uma possibilidade de conseguir apontar uma área danificada, porém sem nenhuma precisão concreta.

A Figura 18 e a Figura 19 mostram os gráficos do *COMAC* para vigas biapoiada e engastada-livre, respectivamente.

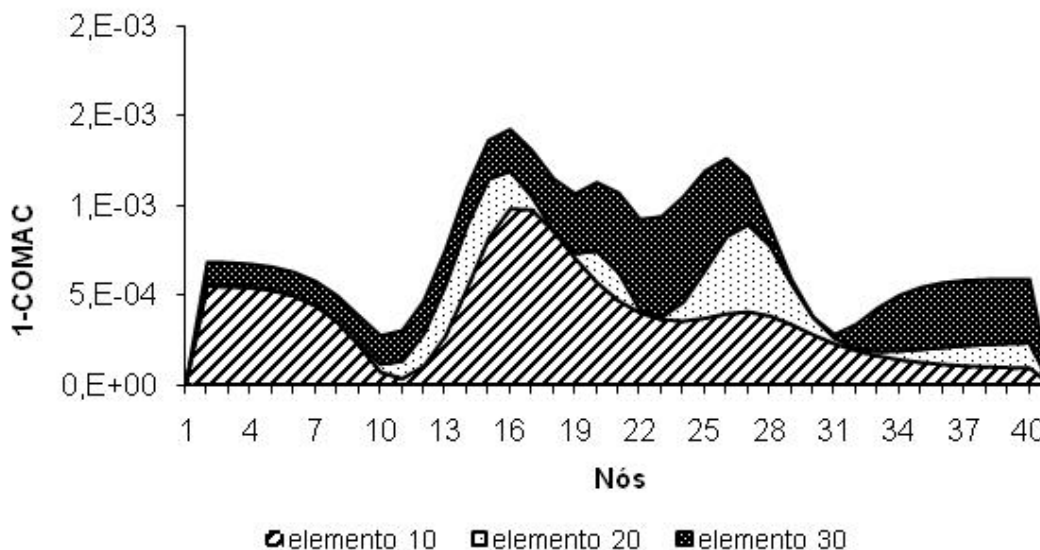


Figura 18 - Comparação do coeficiente *COMAC* com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoiada.

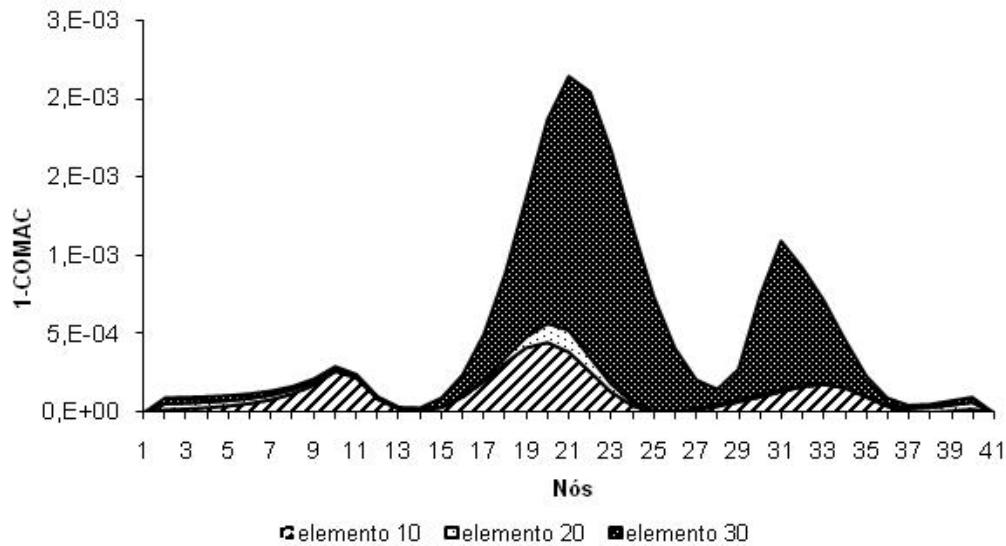


Figura 19 - Comparação do coeficiente *COMAC* com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre.

Percebe-se que ambas possuem um indicativo de anomalia na estrutura. O *COMAC* consegue quantificar a intensidade do dano, porém falha ao tentar localizar a região onde se encontra o mesmo.

c) Número de Modos

Ao analisar a influência do número de modos na detecção de danos, descarta-se o *MAC*, já que o seu gráfico é desenvolvido para cada modo.

Quando se faz variar a quantidade de modos, a Figura 20 e a Figura 21 apresentam uma comparação dos coeficientes *COMAC* considerando 3 e 5 modos.

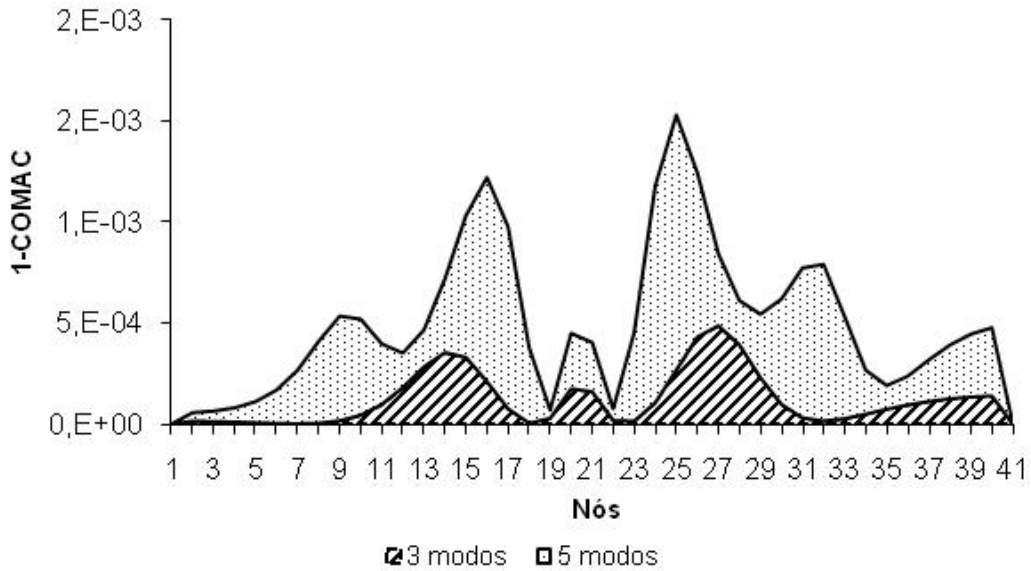


Figura 20 - Comparação do coeficiente *COMAC* em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga biapoiada.

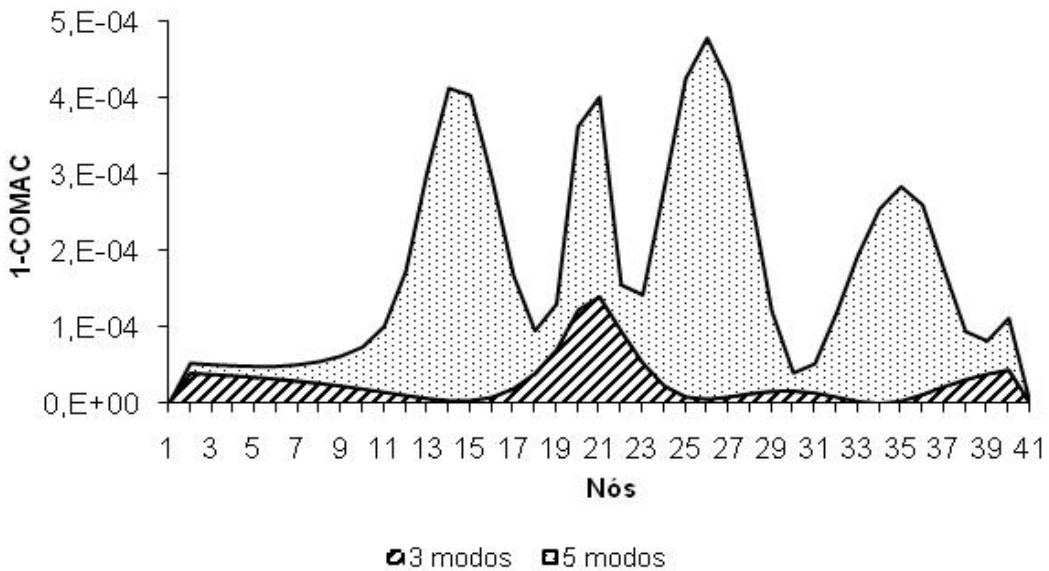


Figura 21 - Comparação do coeficiente *COMAC* em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga engastada-livre.

Na análise somente com o primeiro modo de vibração obteve-se correlação completa entre os modos da estrutura intacta e danificada e, por isso,

não está representada na figura. Assim, uma análise utilizando este método e apenas um modo de vibração é muito evasiva e não fornece informações verdadeiras com a realidade do problema. Aumentando-se o número de modos, observam-se curvas com padrão praticamente semelhantes, com algumas diferenças irrelevantes para a análise que se pretende.

d) Danos Múltiplos

Da Figura 22 até a Figura 25, são apresentados resultados do *MAC* e do *COMAC* para danos múltiplos utilizando os três primeiros modos vibracionais e sem a presença do ruído.

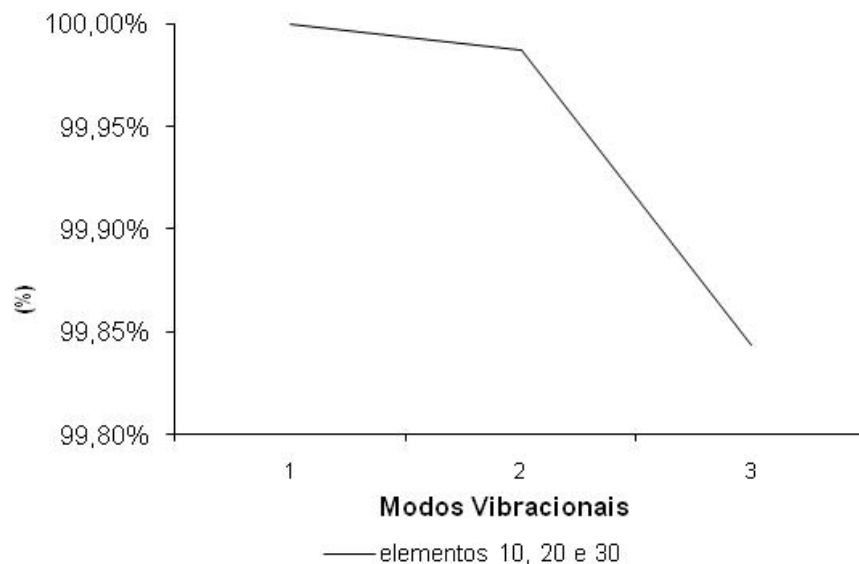


Figura 22 – Indicador *MAC* para dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga biapoiada.

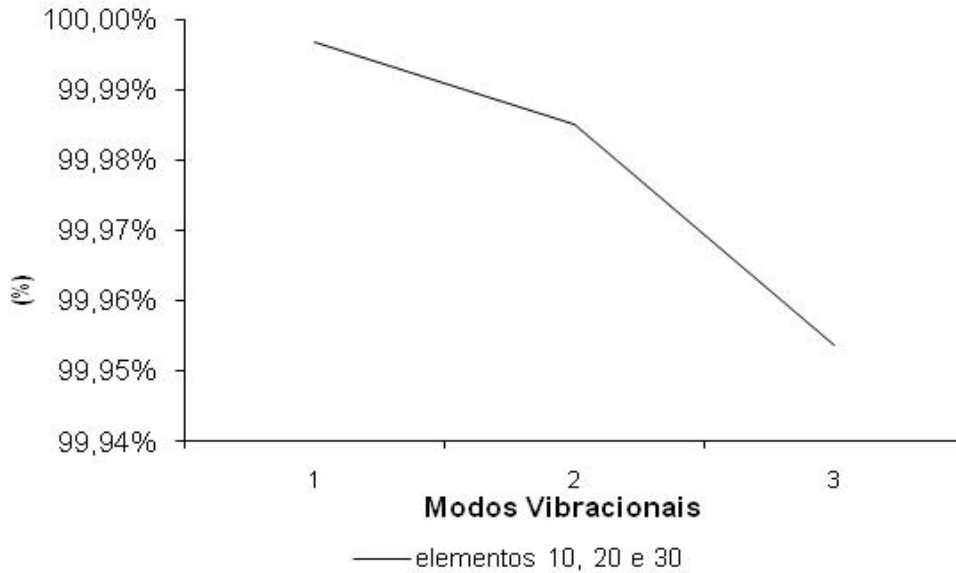


Figura 23 – Indicador *MAC* para dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga engastada-livre.

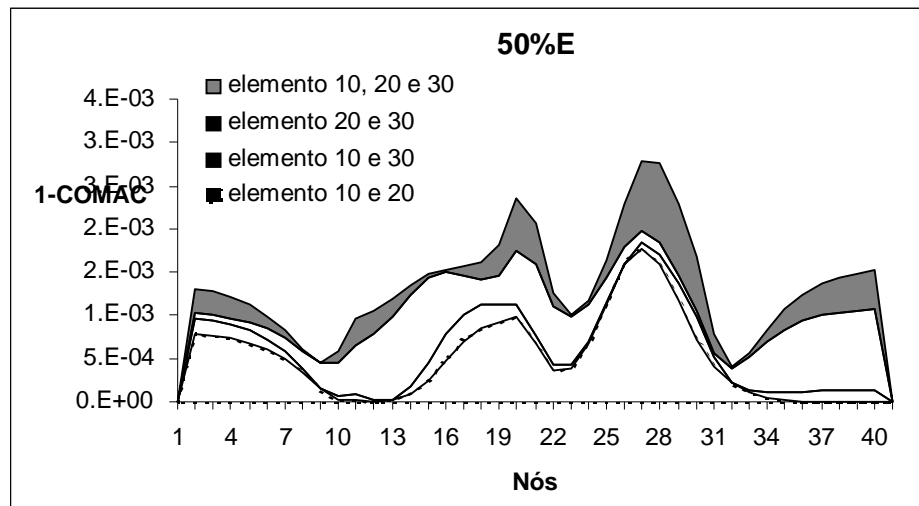


Figura 24 - Comparação do coeficiente *COMAC* com modificações no posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga biapoçada.

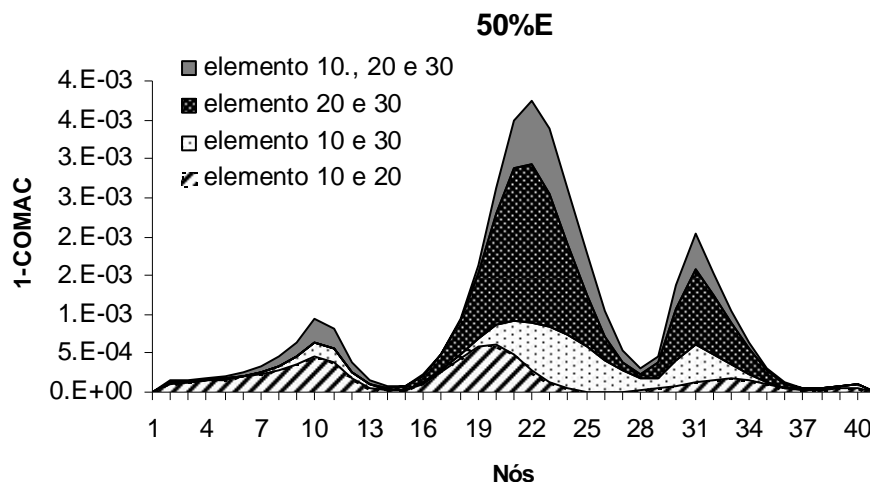


Figura 25 - Comparação do coeficiente *COMAC* com modificações no posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga engastada-livre.

Para danos múltiplos, o *MAC* se mostra eficiente na indicação da existência do dano, porém o *COMAC* não consegue localizar a região danificada.

O coeficiente de correlação *MAC* apenas indica a existência de danos na estrutura, não servindo, obviamente, como indicativo da posição. O coeficiente *COMAC*, além de indicar a existência do dano, também fornece informações sobre a sua localização. Contudo, este parâmetro possui caráter local e, sob o ponto de vista de uma análise global, observa-se indicativos de possíveis danos em regiões não danificadas, dificultando, desta forma, a interpretação dos resultados.

Desta forma, podem ser classificados como Nível I no sistema de classificação proposto por Rytter em 1993 *apud* Carrillo, 2004.

iii. MVF

Neste item analisa-se o desempenho do MVF apresentado no capítulo II quando se faz variar a severidade, o posicionamento, o número de modos e a quantidade de danos.

a) Severidade do dano

Na Figura 26 e na Figura 27 são mostradas as variações do parâmetro Δ que representa a diferença da flexibilidade das vigas intactas e danificadas. Estas são apresentadas ao longo do vão, para a viga biapoçada e engastada-livre, respectivamente.

Nota-se que o MVF indica a existência e localização do dano. O local do dano é indicado por um ponto de inflexão na curva da diferença de flexibilidade, como apresentado por Carrillo (2004).

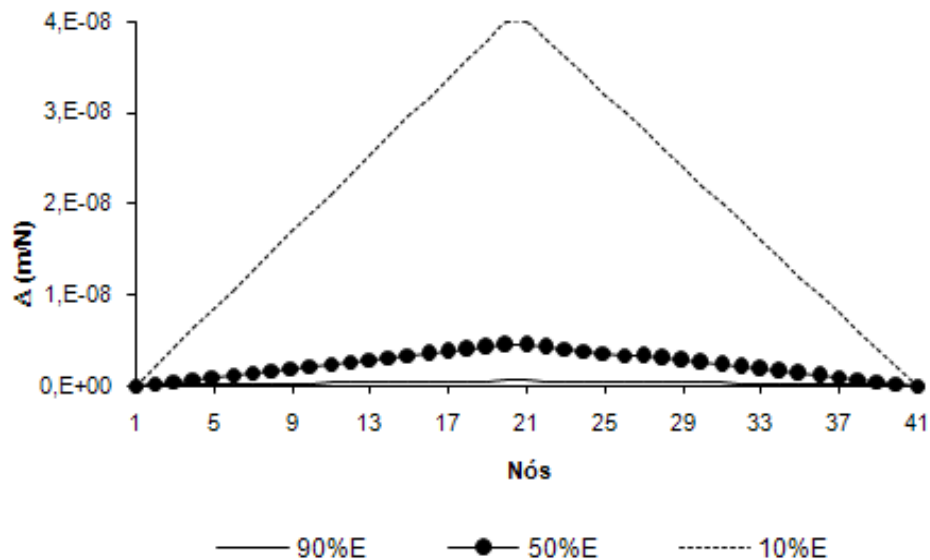


Figura 26 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga biapoçada.

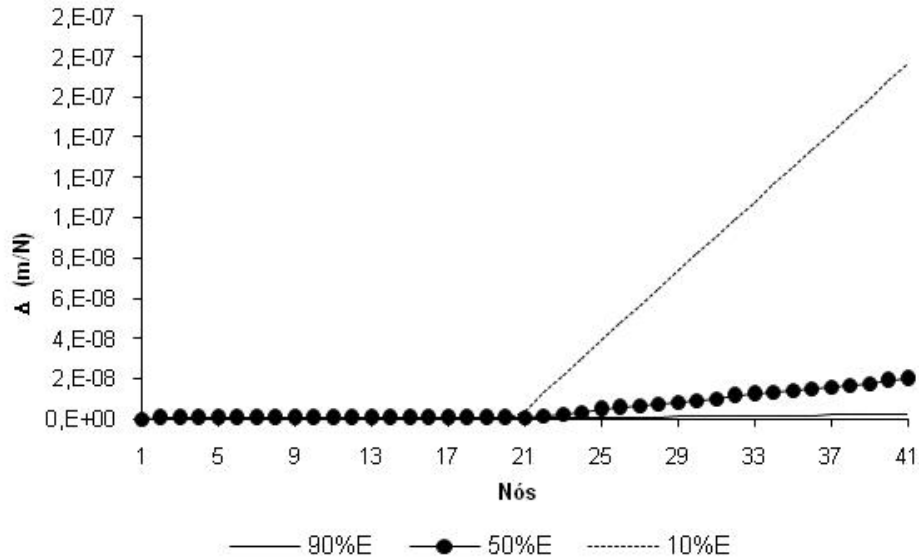


Figura 27 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre.

Para danos com baixa severidade, os valores de Δ é próximo de zero, já que as propriedades da estrutura danificada são próximas as da intacta. Observa-se mudança de comportamento das curvas na seção que ocorre o dano. Em vigas biapoiadas, valores altos do nível de dano geram pontos de inflexão acentuados. Nas vigas engastada-livre, o Δ tende a verticalização a medida que aumenta-se a severidade do dano.

De uma forma geral, esse método é classificado como nível II, pois identifica a existência e localiza a região do dano. Todavia, o método é sensível a severidade do dano e para se ter informações sobre a influência do grau de severidade seriam necessárias análises comparativas entre vários graus de severidade.

b) Posicionamento do dano

Na Figura 28 e na Figura 29 apresentam-se o coeficiente Δ ao longo do vão, para os casos biapoado e engastado-livre, para as diferentes posições dos danos.

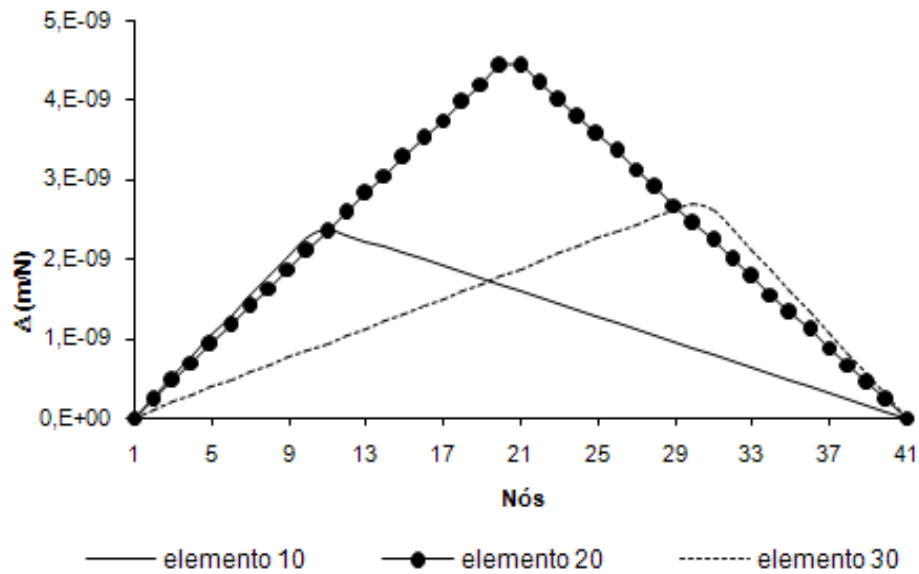


Figura 28 - Comparação da Variação da Flexibilidade com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoada.

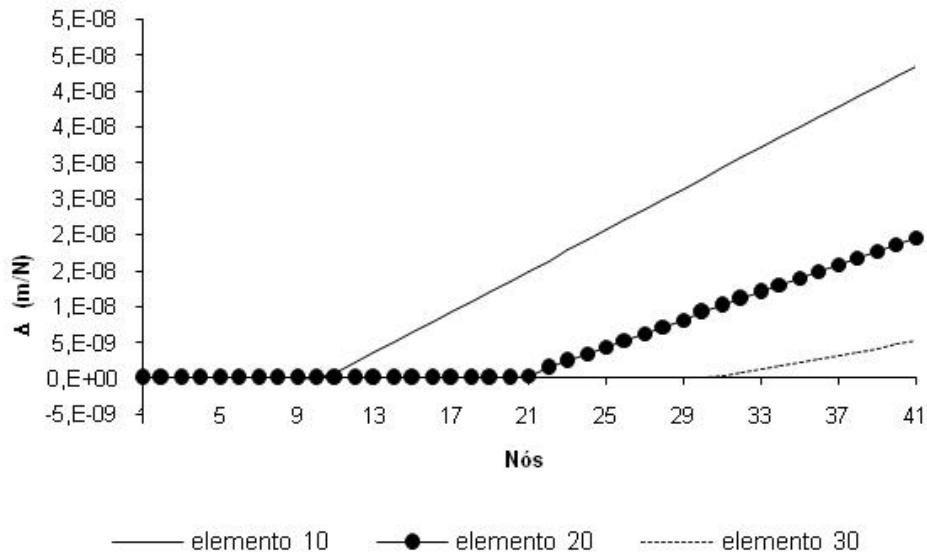


Figura 29 - Comparação da Variação da Flexibilidade com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre.

Analisando estas figuras nota-se que o MVF foi preciso na localização do elemento danificado tanto para vigas biapoiadas quanto para engastada-livre utilizando os três primeiros modos de vibração. O ponto de inflexão, para a viga biapoiada, acompanha claramente o elemento danificado. E na viga engastada-livre, o elemento do qual aumenta o ângulo de inclinação da reta também acompanha o elemento danificado.

Assim, observando os resultados fornecidos, conclui-se que é possível localizar precisamente as regiões onde se encontram os danos.

c) Número de Modos

Investiga-se neste item a influência do número de modos no desempenho do MVF. Na Figura 30 e na Figura 31 são apresentadas as curvas do parâmetro Δ ao longo dos vãos das vigas, considerando 1, 3 e 5 modos de vibração.

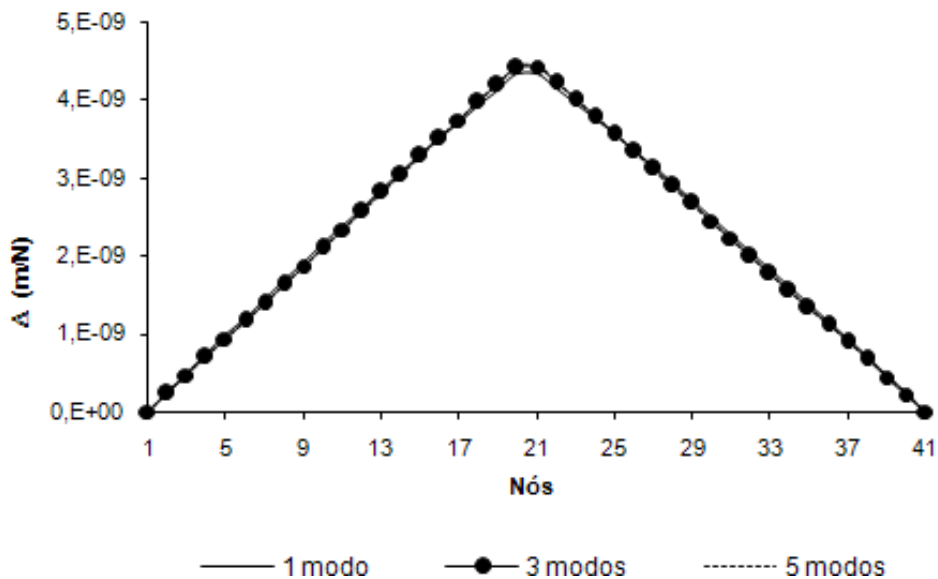


Figura 30 - Comparação da Variação da Flexibilidade em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga biapoçada.

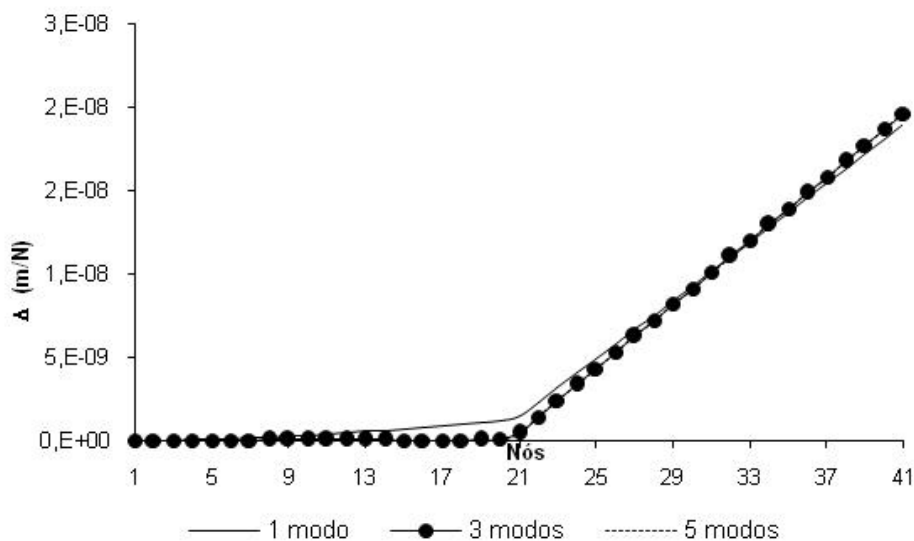


Figura 31 - Comparação da Variação da Flexibilidade em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga engastada-livre.

A variação do número de modos não interfere na identificação. Contudo, a curva com apenas um modo se destaca ligeiramente das demais. Assim, vê-se que a contribuição de, pelos menos, mais dois modos podem melhorar a

precisão dos resultados. Quanto maior o número de modos utilizados, mais preciso são os resultados. Todavia, muitas vezes torna-se inviável, devido a dificuldade em encontrar todos os modos.

d) Danos Múltiplos

A identificação de danos múltiplos para o MVF pode ser observado na Figura 32 até a Figura 39.

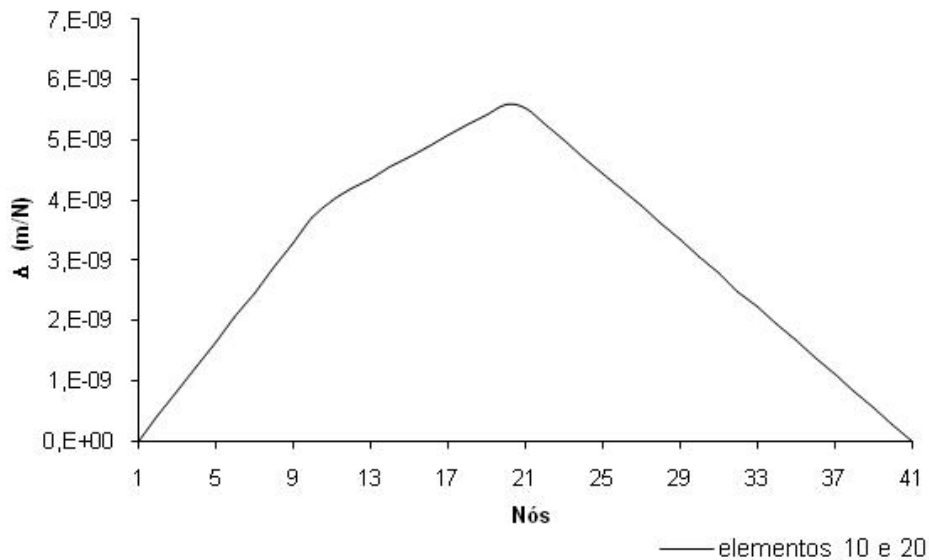


Figura 32 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga biapoiada.

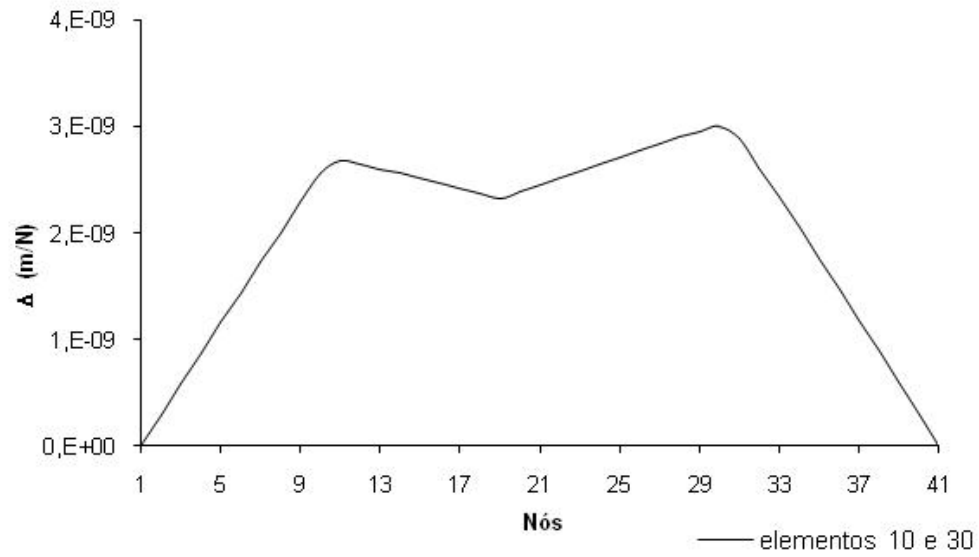


Figura 33 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga biapoçada.

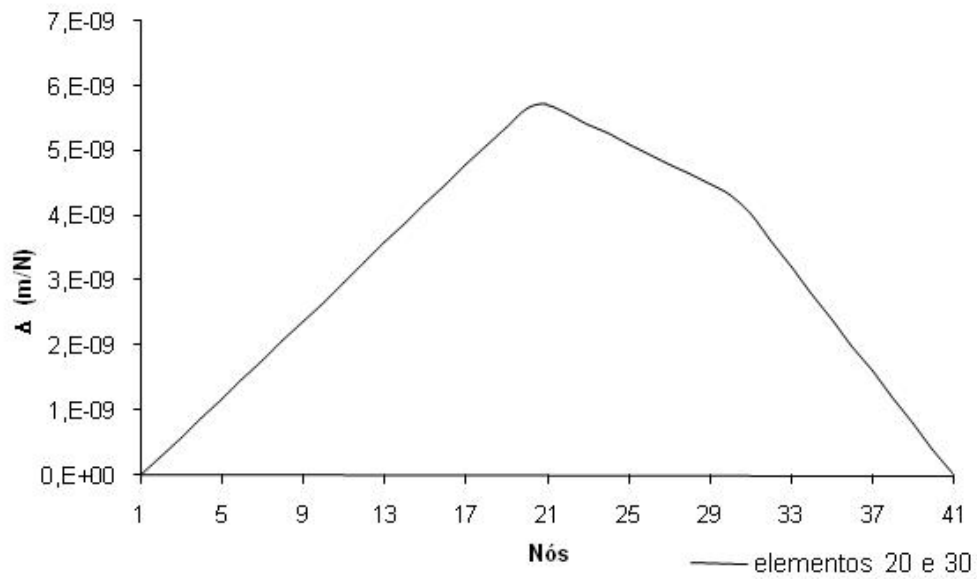


Figura 34 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e 30 da viga biapoçada.

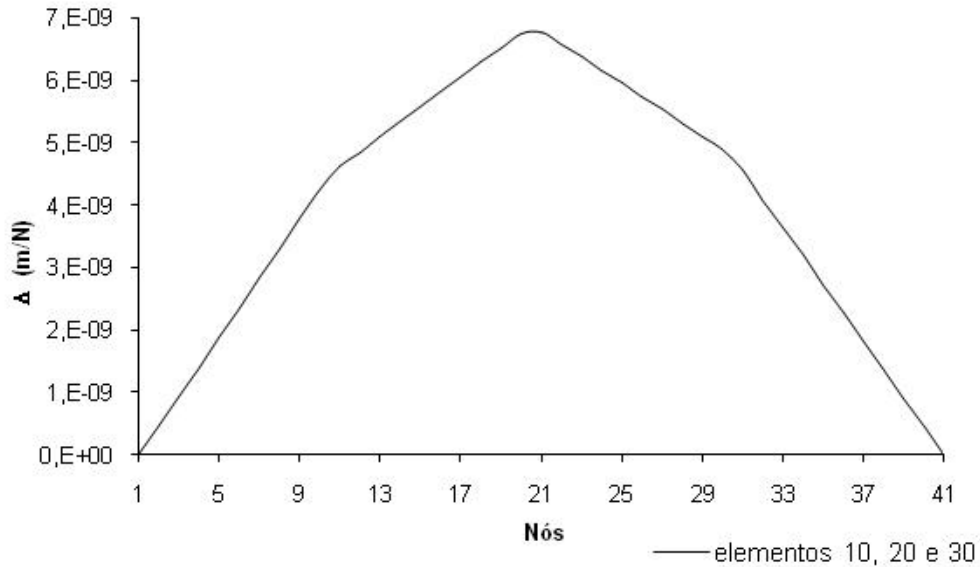


Figura 35 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga biapoiada.

O MVF mostrou-se pouco sensível a combinação de danos múltiplos, como pode ser observado. Para vigas biapoiadas, a identificação é imprecisa devido a dificuldade em fazer a leitura correta do gráfico.

Em casos com grandes quantidades de danos, o gráfico não é nítido e o número elevado de pontos de inflexão pode fazer com que o leitor interprete erroneamente a curva. Da mesma forma, a identificação das localizações das regiões do dano fica comprometida quando existem danos múltiplos muito próximos.

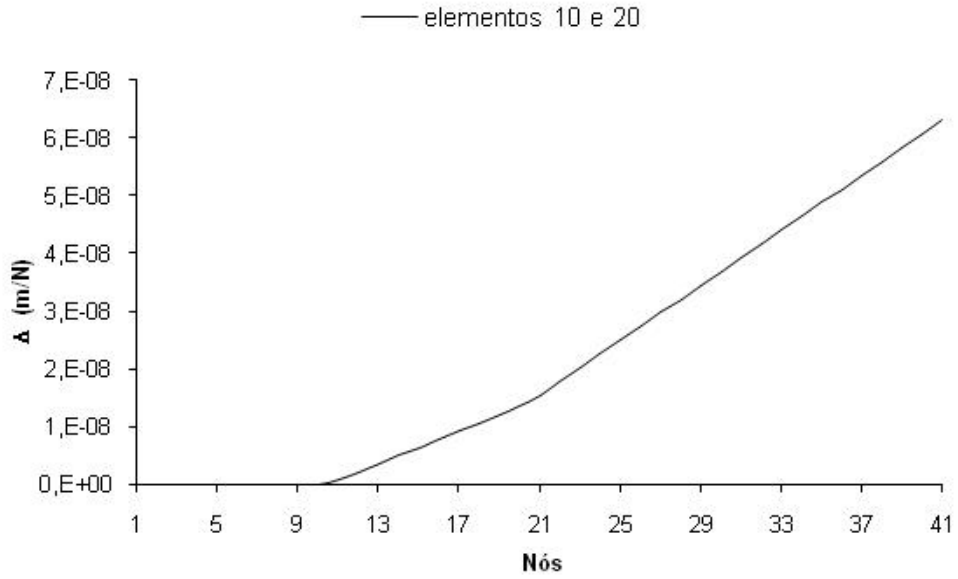


Figura 36 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga engastada-livre.

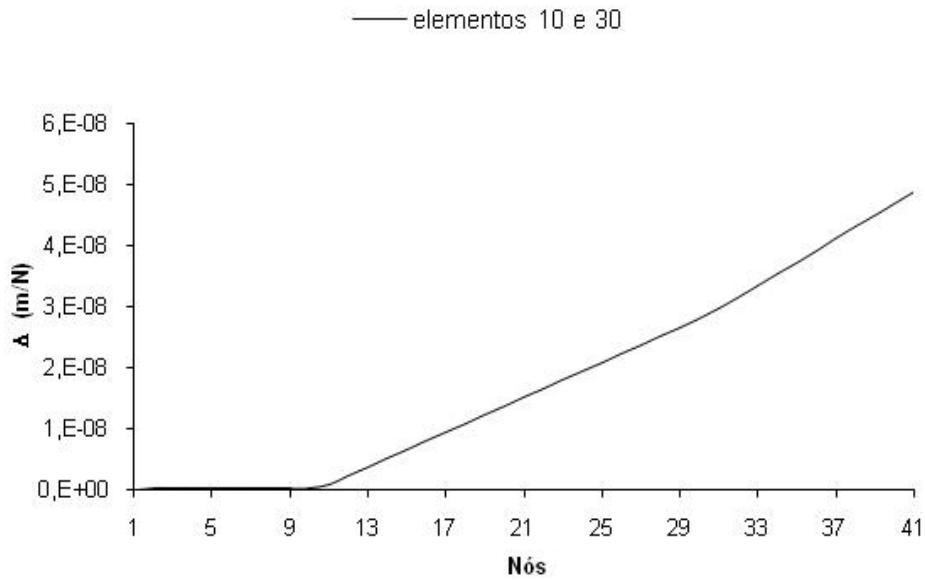


Figura 37 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga engastada-livre.

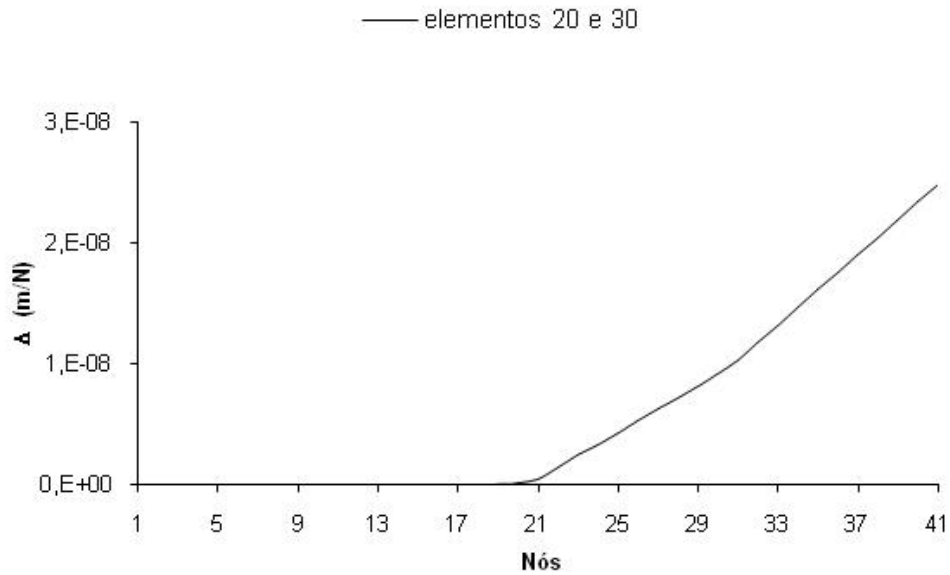


Figura 38 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e 30 da viga engastada-livre.

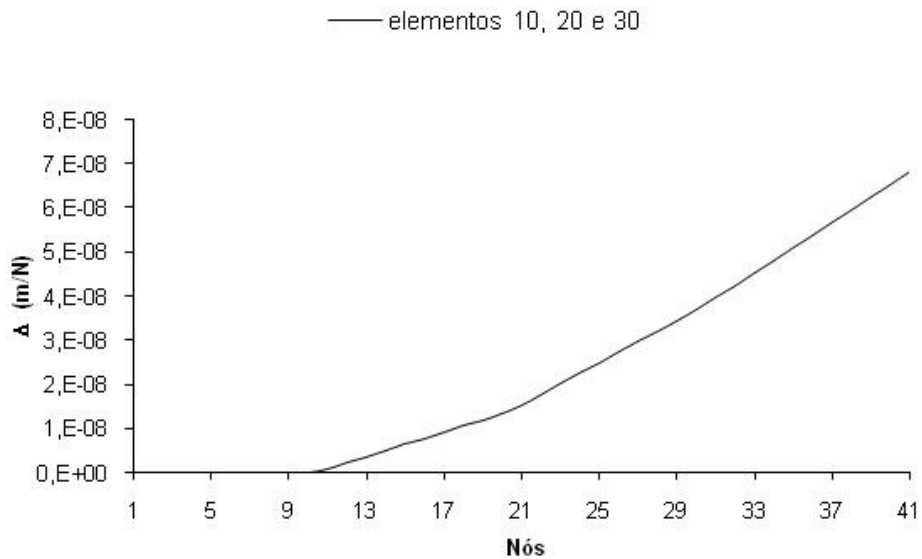


Figura 39 - Variação da Flexibilidade com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga engastada-livre.

Conclui-se que para danos múltiplos a identificação do dano acontece, porém a localização exata do mesmo é muito relativa e varia de acordo com a interpretação que se dá do gráfico.

Nas vigas biapoiadas, a interpretação correta é mais fácil uma vez que muda o sentido do gráfico. Já em vigas engastada-livre, não é tão trivial, pois a partir do segundo ponto de inflexão não é perceptível qualquer mudança na trajetória do gráfico.

iv. MVCF

Apresentam-se nesta seção os resultados do desempenho do MVCF considerando os mesmos parâmetros de severidade, posicionamento, número de modos e quantidade de danos.

a) Severidade do dano

A Figura 40 e a Figura 41 apresentam para o MVCF, a comparação das severidades do dano simples de 50%E, utilizando os três primeiros modos de vibração.

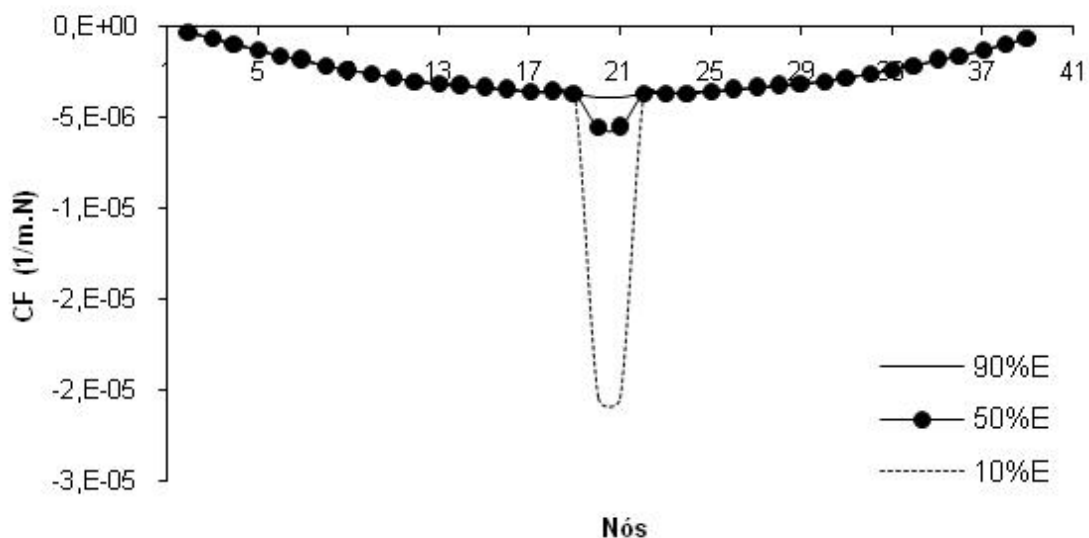


Figura 40 – Comparação da CF com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga biapoiada.

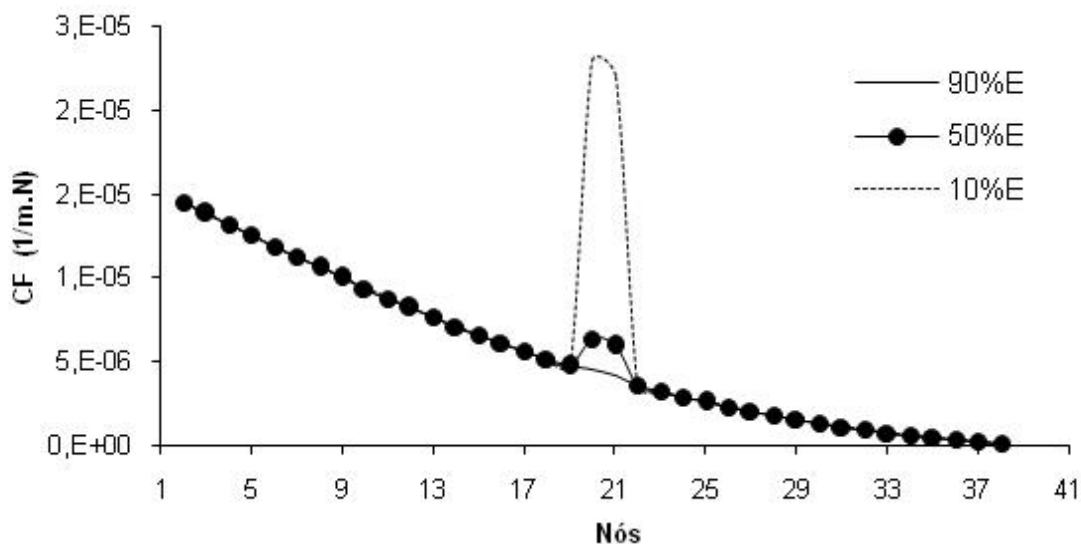


Figura 41 – Comparação da CF com o aumento da severidade do dano simples no elemento 20 da viga engastada-livre

Nota-se nestas figuras que o local do dano é identificado como uma descontinuidade na curvatura de flexibilidade devida à redução de rigidez naquele local. Isto porque a curvatura de flexibilidade é a segunda derivada da linha elástica da estrutura, e está vinculada a rigidez EI . Quanto maior o dano, menor é EI e maior é a descontinuidade presente na curvatura, o que pode ser observado

Pode-se observar que o método MVCF, como o anterior, localizou e detectou a severidade do dano. Desta forma, pode também ser classificado como Nível II.

A relação entre a severidade do dano e os indicativos de dano CF não é linear. Na Figura 40 e na Figura 41, nota-se que as distâncias entre as curvas aumentam à medida que a severidade aumenta.

b) Posicionamento do dano

A Figura 42 e a Figura 43 demonstram a curvatura de flexibilidade para diferentes posicionamentos do dano de 50%E, considerando na análise os três primeiros modos de vibração.

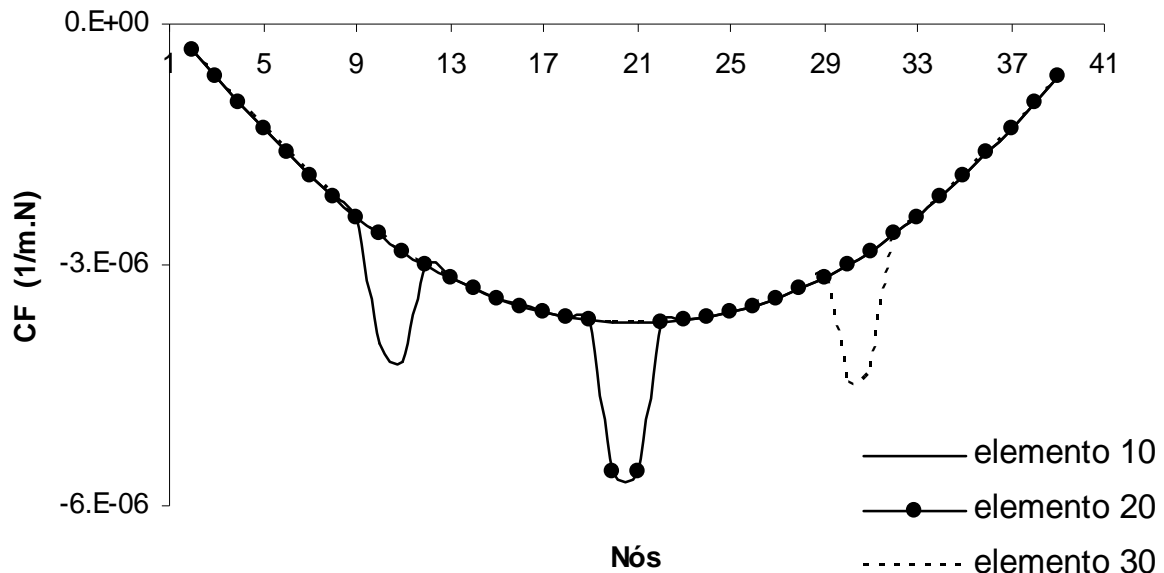


Figura 42 - Comparação da CF com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga biapoiada.

Quanto à posição do dano, as figuras mostram que o algoritmo identifica danos em qualquer posição da viga, sendo a descontinuidade proporcional ao momento fletor nas seções.

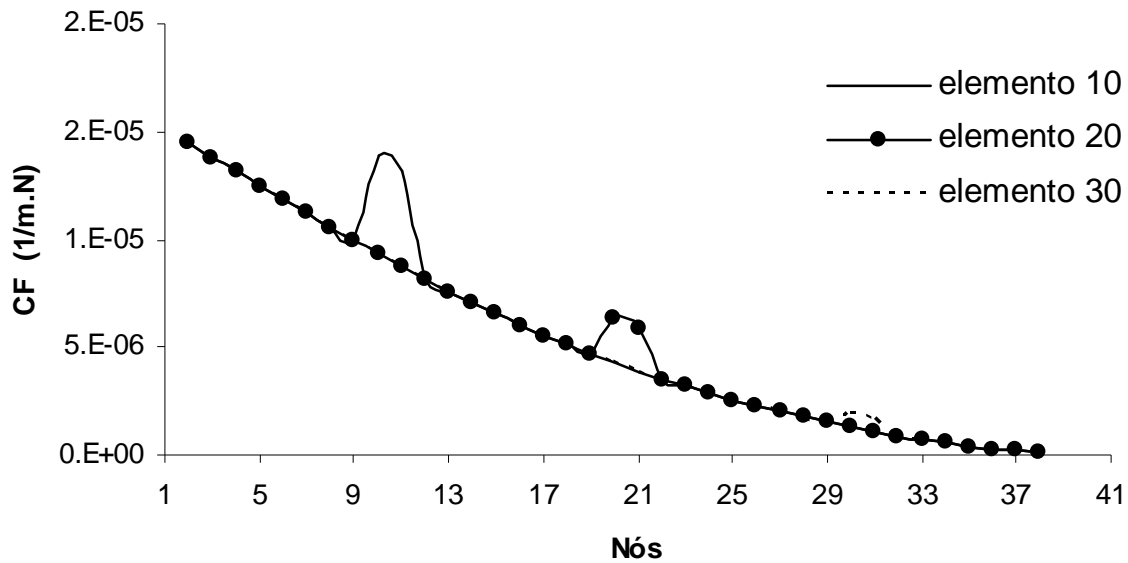


Figura 43 - Comparação da CF com modificações no posicionamento do dano simples de 50%E da viga engastada-livre.

Percebe-se que, da mesma forma que para o MVF, os parâmetros estão relacionados aos momentos nas seções, pois, a CF diminui quando o dano se aproxima dos apoios, para a viga biapoiada e, próximo ao extremo da viga engastada-livre

c) Número de Modos

A influência do número de modos na identificação do dano de 50%E, no elemento 20, é apresentado na Figura 44 e na Figura 45, onde se comparam as curvaturas de flexibilidade para três diferentes quantidades de modos.

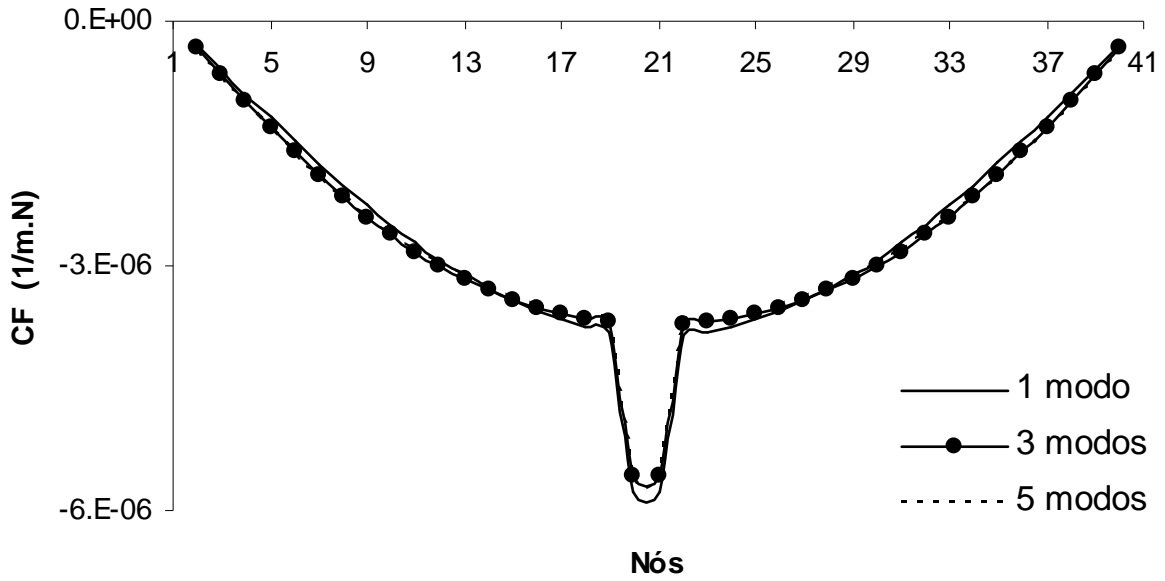


Figura 44 - Comparação da CF em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga biapoçada.

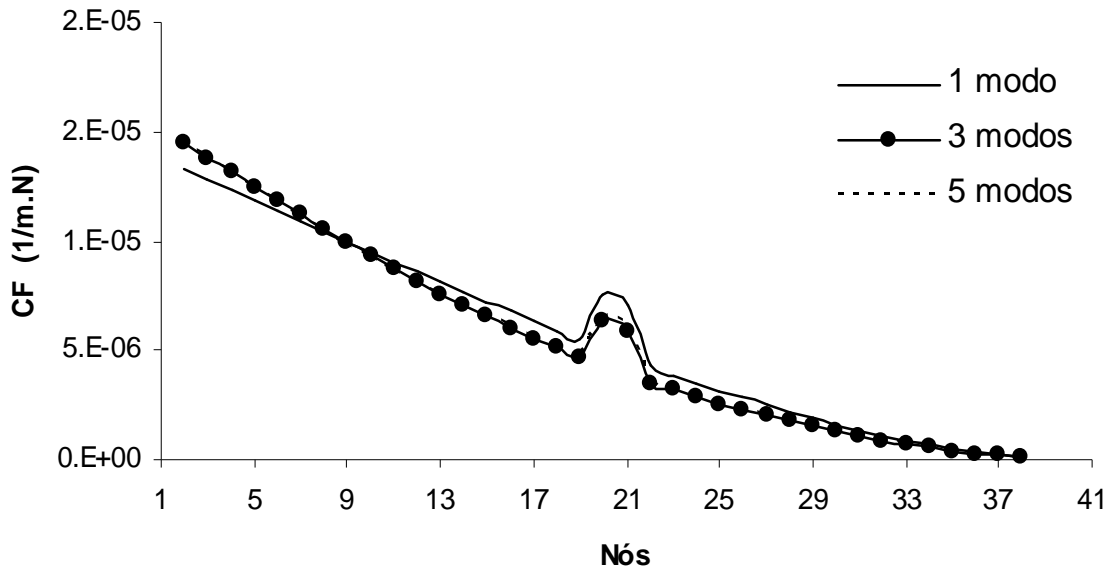


Figura 45 - Comparação da CF em relação ao número de modos com dano simples de 50%E na viga engastada-livre.

Mais uma vez, nota-se nas figuras que o número de modos não altera os resultados, mas que a análise feita com maiores quantidades de modos é mais

precisa. Porém, quanto maior a quantidade de modos, mais inviável se torna a análise.

Carrillo (2004) conclui da mesma forma para a viga biapoiada, porém em seu trabalho o MVCF falhou na identificação do dano em vigas engastada-livre, enquanto esse estudo apresenta resultados satisfatórios.

d) Danos Múltiplos

As combinações do posicionamento do dano de 50%E, denominado danos múltiplos estão ilustradas da Figura 46 até a Figura 53. Foram analisadas, respectivamente, as seguintes combinações: danos nos elementos 10 e 20, 10 e 30, 20 e 30 e 10, 20 e 30, para as vigas biapoiada e engastada-livre

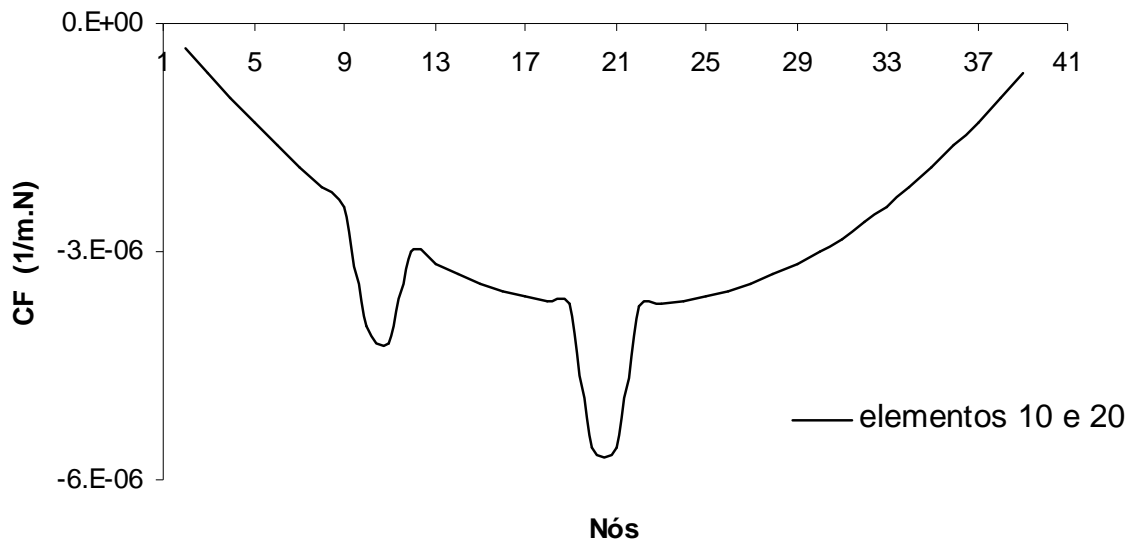


Figura 46 - Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga biapoiada.

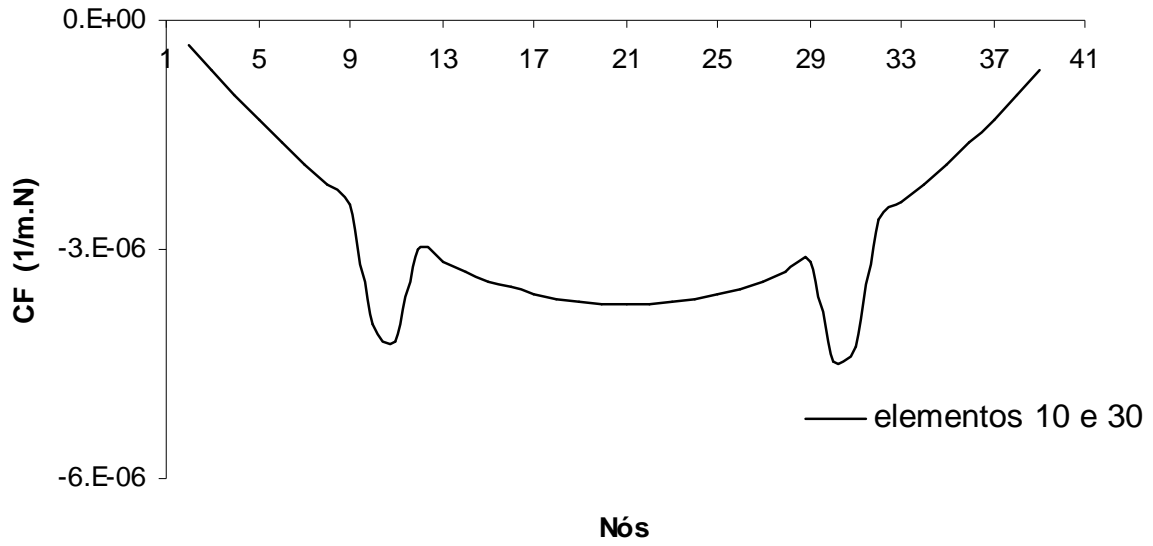


Figura 47 - Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga biapoiada.

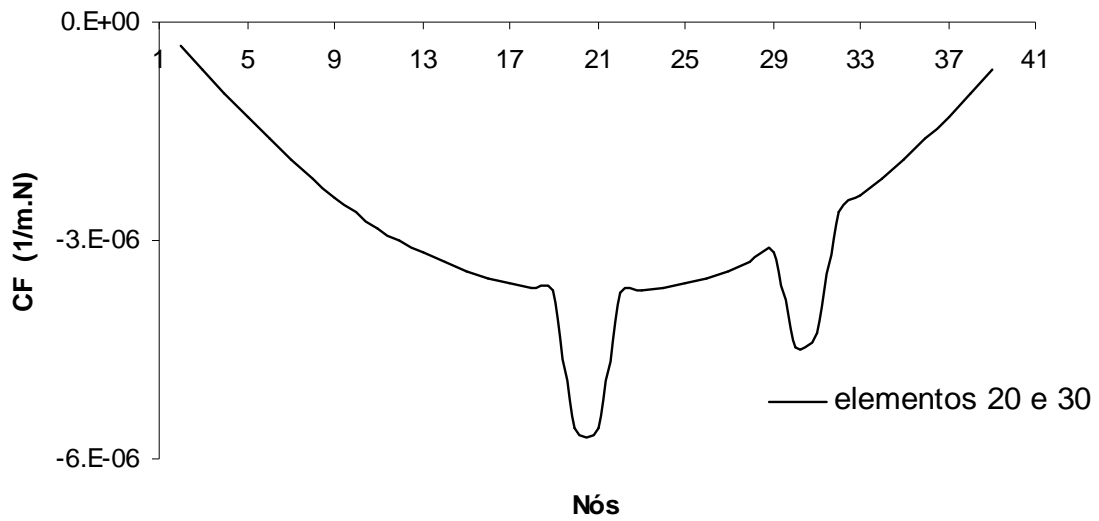


Figura 48 - Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e 30 da viga biapoiada.

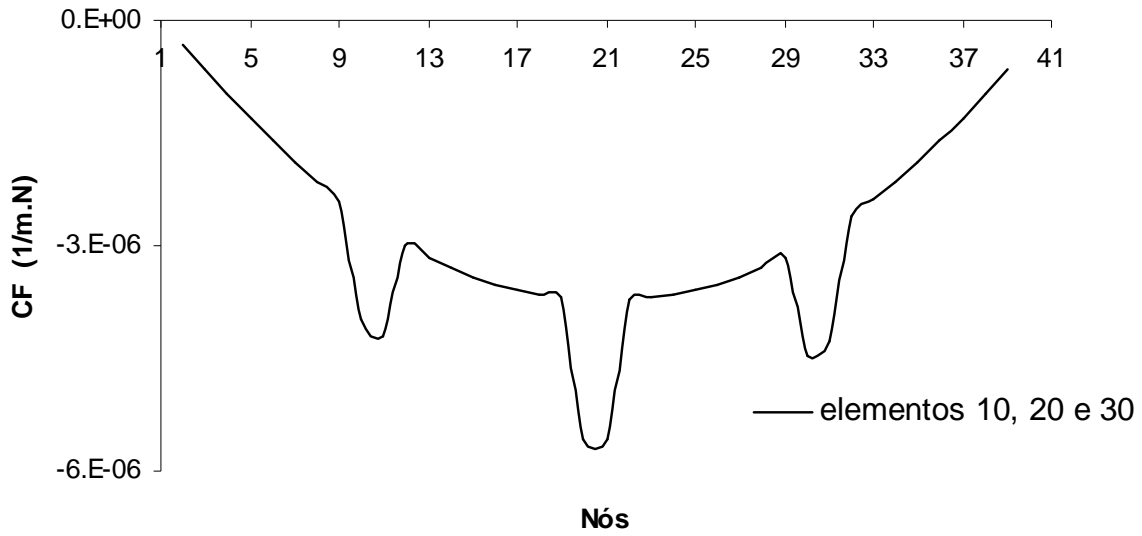


Figura 49 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga biapoieda.

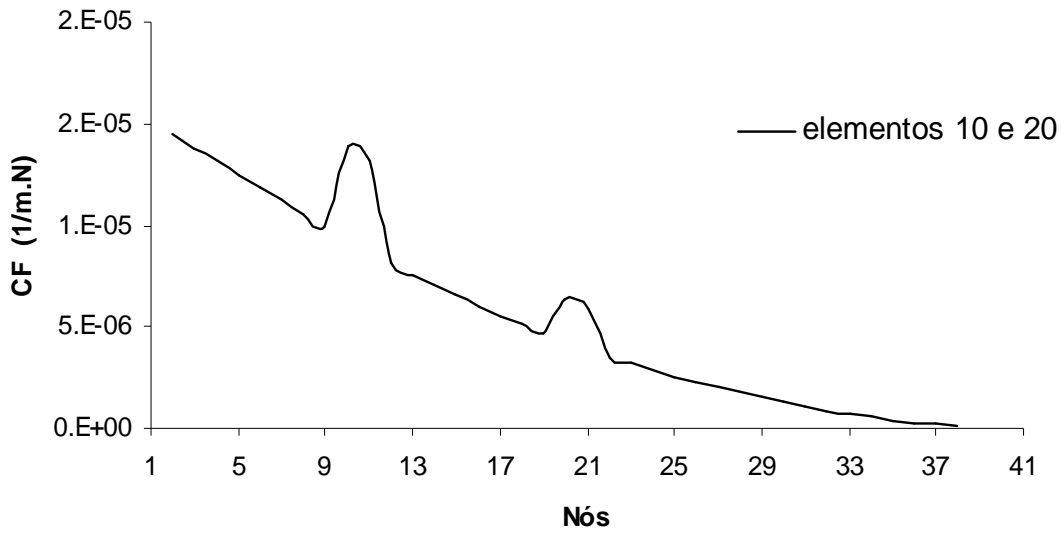


Figura 50 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 20 da viga engastada-livre.

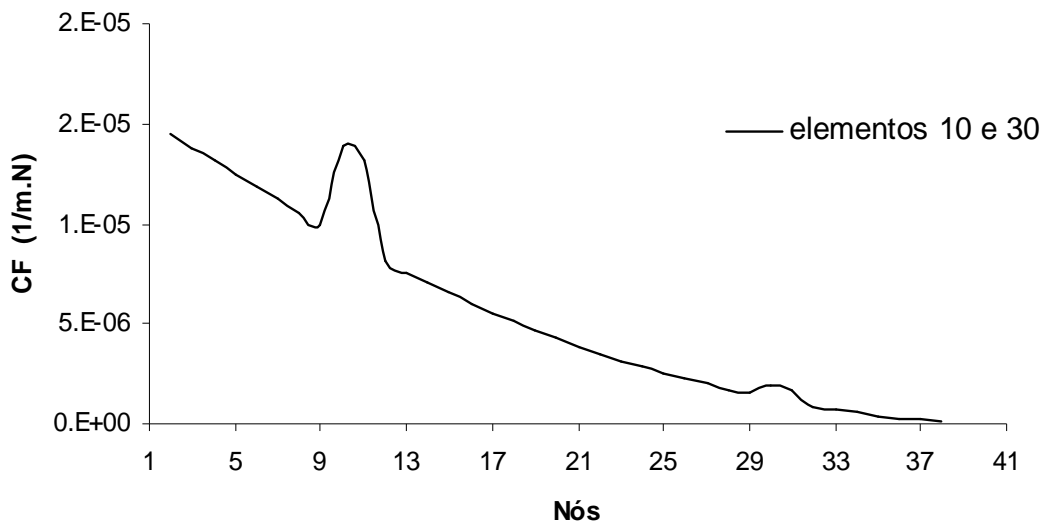


Figura 51 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10 e 30 da viga engastada-livre.

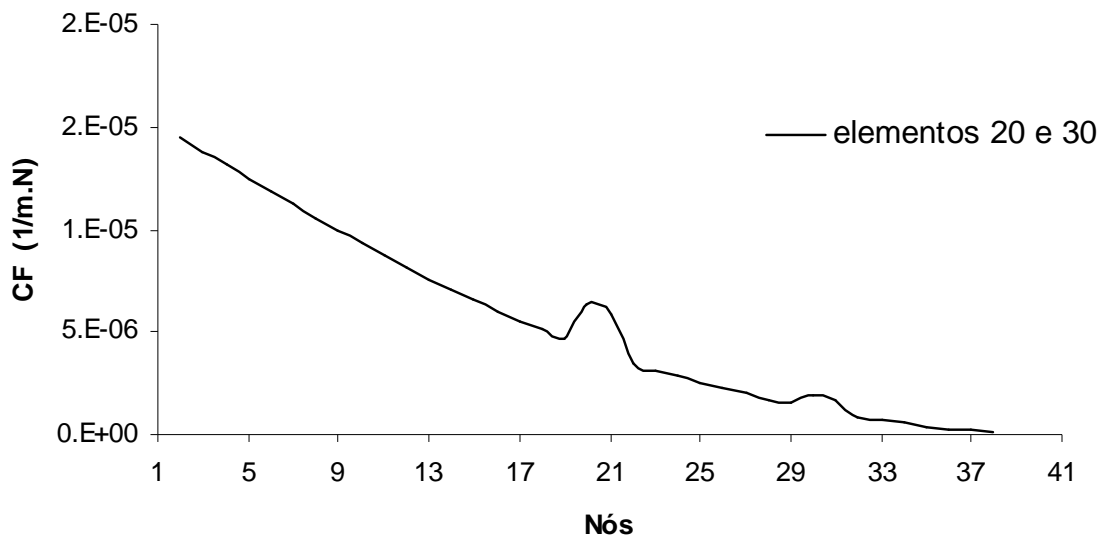


Figura 52 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 20 e 30 da viga engastada-livre.

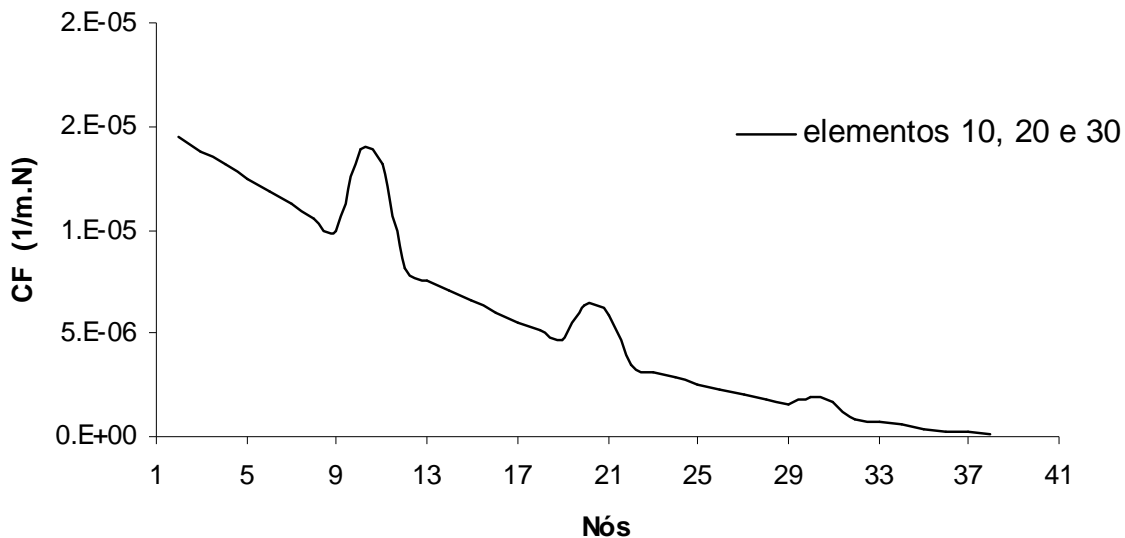


Figura 53 – Variação da CF com dano múltiplo de 50%E nos elementos 10, 20 e 30 da viga engastada-livre.

O método identifica danos combinados. Os resultados decorrentes da introdução de danos múltiplos mostram que este método é mais eficiente do que o MVF, pois os três danos introduzidos estão nítidos nas figuras.

Os sinais dos valores da curvatura de flexibilidade acompanham os sinais dos valores do momento fletor. Em vigas biapoiadas, o momento fletor é negativo. Já em vigas engastadas-livre, o momento fletor é positivo.

IV.3. – Resultados Obtidos com os Dados do Programa de Identificação Modal

Com os exemplos apresentados na seção anterior, analisou-se o desempenho dos métodos utilizando as propriedades dinâmicas obtidas virtualmente do programa de dinâmica. No intuito de aproximar as simulações numéricas às experimentais, foram realizados testes com a introdução de

ruídos. Para isso, utilizou-se o programa de identificação Midas que possibilitou aproximar as propriedades dinâmicas das simulações às propriedades reais da estrutura. Neste programa foram introduzidos ruídos aos deslocamentos verticais oriundos do programa de dinâmica.

Devido aos resultados não muito satisfatórios dos coeficientes *MAC* e *COMAC*, optou-se por analisar somente o *MVF* e o *MVCF*.

Para cada método foram feitas em duas análises. Primeiramente, foram analisados resultados sem ruído para verificar o desempenho dos métodos de detecção com os dados do Midas. Após estas análises, foram introduzidos ruídos ao sistema, como mencionado no capítulo 3. O nível do ruído nas simulações foi próximo de 5%, variando entre 4,9% e 5,1%.

As análises para as duas condições de apoio forneceram resultados semelhantes. Por este motivo, optou-se em apresentar a condição biapoiada.

i. Freqüências Naturais de Vibração

A seguir, a Tabela 8 apresenta as freqüências naturais das vigas biapoiada e engastada-livre, retiradas do Midas com dano simples de 50%E no elemento 20 com a utilização dos três primeiros modos de vibração. Em (a), valores sem a introdução de ruído. Em (b), valores com a introdução do ruído. Observa-se, que alguns modos não foram possíveis de ser identificados devido a influencia da presença do ruído.

Tabela 8 - Tabela comparativa de frequencias naturais em função da severidade do dano simples utilizando o Midas

Frequencia (Hz)	(a) Viga biapoiada sem ruído				(b) Viga biapoiada com ruído			
	Sem dano	90%E	50%E	10%E	Sem dano	90%E	50%E	10%E
1	165,861	165,404	161,869	137,68	165,299	165,249	161,768	137,866
2	664,590	664,574	664,457	663,604	662,337	663,758	666,728	661,888
3	1506,752	1502,6	1471,795	1309,4931	1503,476	*	1473,488	*

* Modos não encontrados.

A Tabela 9 apresenta a comparação em função do posicionamento da viga sem e com a introdução do ruído.

Tabela 9 - Tabela comparativa de frequências naturais em função do posicionamento do dano simples utilizando o Midas

Frequencia (Hz)	(a) Viga biapoiada sem ruído				(b) Viga biapoiada com ruído			
	Sem dano	¼ vão	½ vão	¾ vão	Sem dano	¼ vão	½ vão	¾ vão
1	165,861	163,976	161,869	163,662	165,299	163,871	161,768	163,366
2	664,590	648,886	664,457	648,983	662,337	653,002	666,728	648,469
3	1506,752	1485,276	1471,795	1493,253	1503,476	1474,161	1473,488	1497,878

Assim como para os resultados mostrados nas Tabelas 6 e 7, a frequência diminui à medida que a intensidade do dano aumenta como mostra a Tabela 8. A análise do dano pela frequência depende da comparação entre os estados intacto e danificado. Pode-se classificar essa análise como nível I, pois apenas indica a existência do dano, mas não consegue quantificar com precisão a sua intensidade.

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam os modos vibracionais para viga biapoiada com e sem a introdução do ruído, com danos simples de 50%E no elemento 20. Na Figura 55, o quinto modo vibracional não foi encontrado pelo Midas.

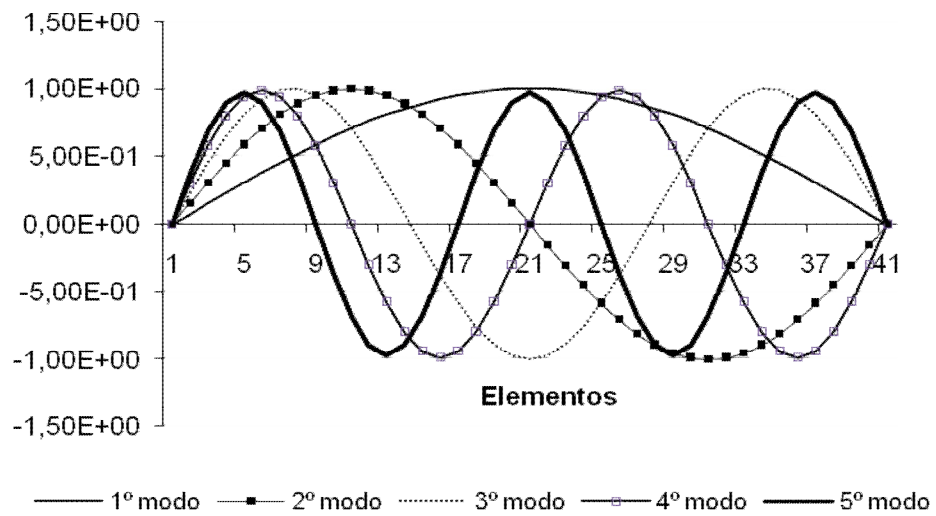


Figura 54 - Modos de vibração para viga biapoada danificada em 50% sem ruído e com Midas

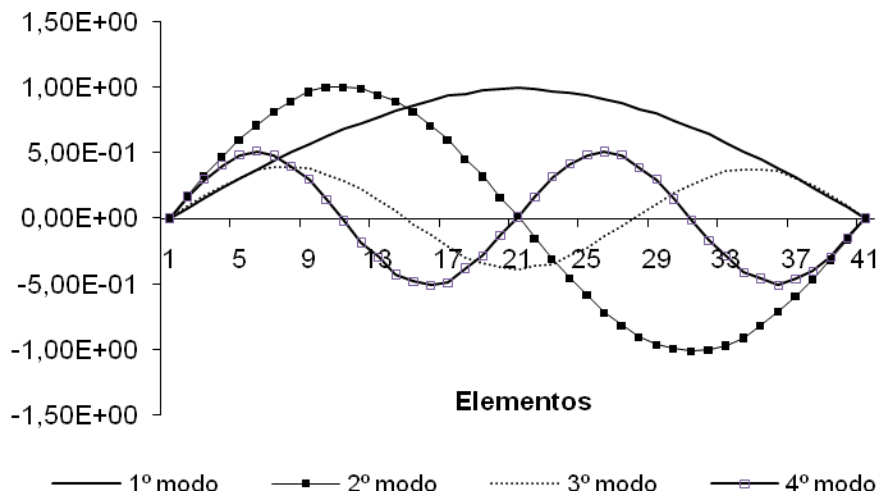


Figura 55 – Modos de vibração para viga biapoada danificada em 50% com ruído \cong 5% e com Midas. O 5º modo não foi encontrado (*).

ii. MVF

São apresentados os resultados do MVF utilizando os dados obtidos do programa Midas.

a) Severidade do Dano

A Figura 56 e a Figura 57 apresentam os valores de Δ comparando o grau de severidade do dano para vigas biapoiadas sem e com a introdução do ruído, respectivamente.

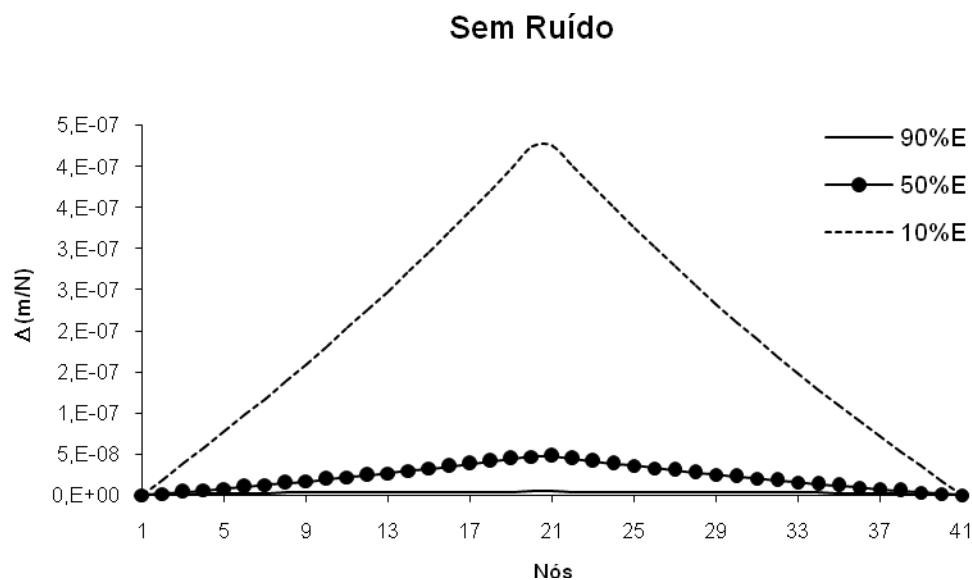


Figura 56 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da severidade do dano múltiplo no elemento 20 da viga biapoiada sem ruído.

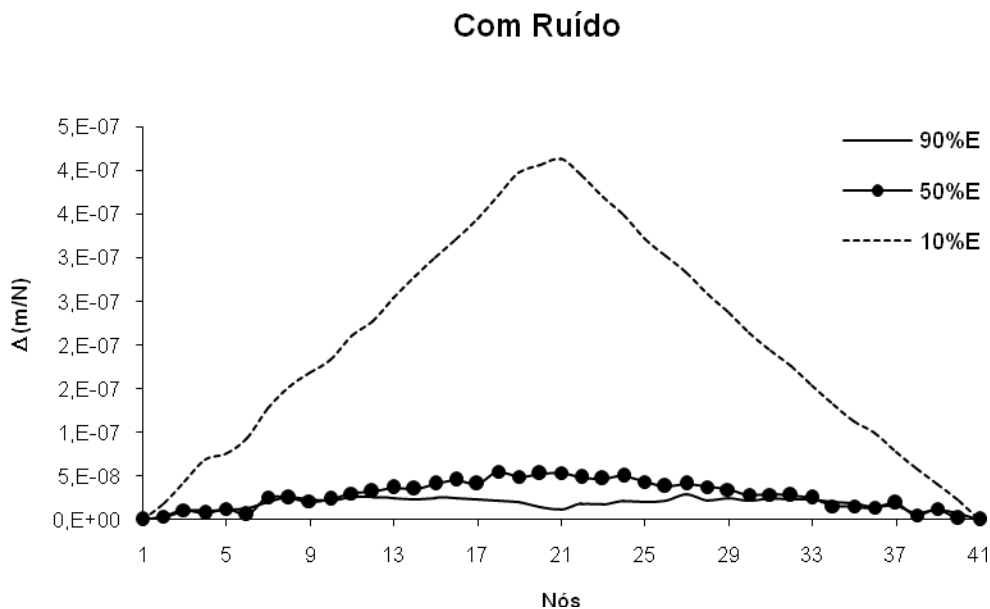


Figura 57 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento da severidade do dano múltiplo no elemento 20 da viga biapoiada com ruído.

Nota-se que é identificado o dano e é possível fazer a sua quantificação em ambos os casos. A curvatura da modelagem com ruído possui uma não uniformidade ao seu longo em comparação a modelagem sem ruído, porém os valores do Δ são muito próximos.

b) Posicionamento do dano

A Figura 58 e a Figura 59 demonstram a Variação da Flexibilidade ao utilizar o Midas, sem e com a introdução do ruído.

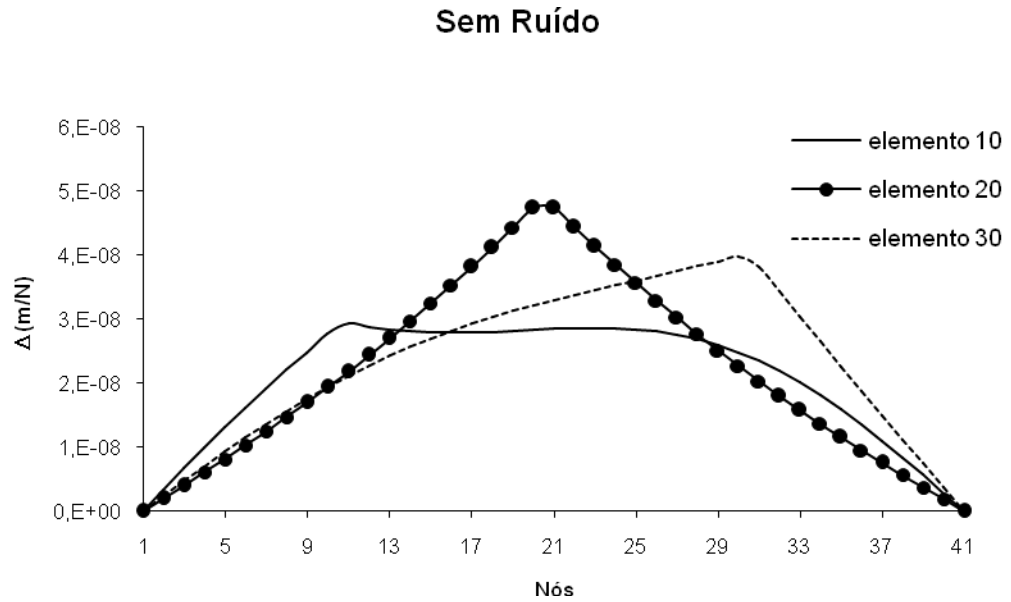


Figura 58 - Comparação da Variação da Flexibilidade com a mudança de posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada sem ruído.

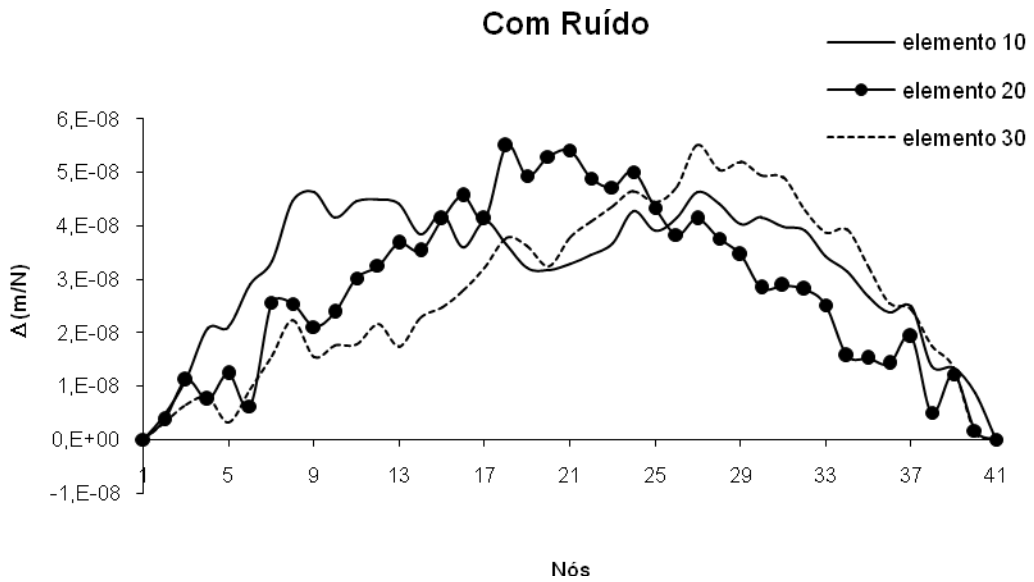


Figura 59 - Comparação da Variação da Flexibilidade com a mudança de posicionamento do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada com ruído.

Percebe-se que com a introdução do ruído, os Δ não possuem uma linearidade, o que não impede a identificação da posição do dano. Nesse caso, observa-se uma pequena variação nos valores do Δ para sem e com o ruído.

c) Número de Modos

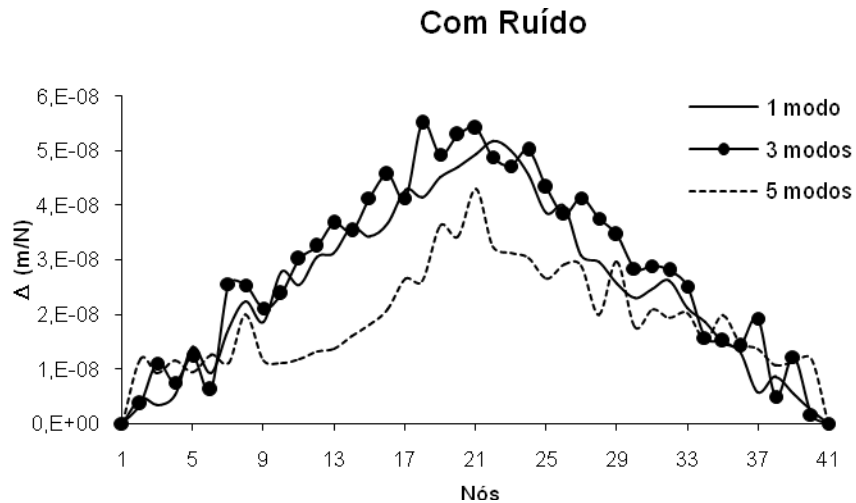


Figura 60 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento do número de modos do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada no elemento 20 com ruído.

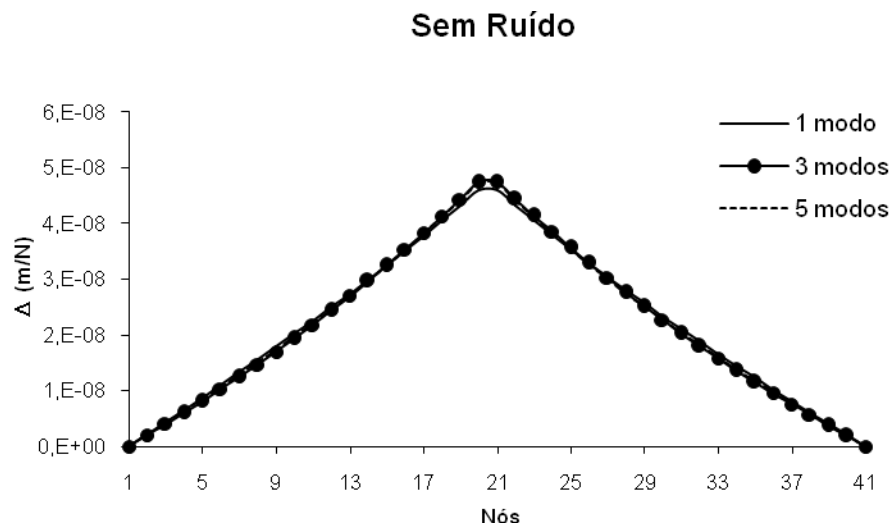


Figura 61 - Comparação da Variação da Flexibilidade com o aumento do número de modos do dano múltiplo de 50%E da viga biapoiada no elemento 20 sem ruído.

As mesmas conclusões desse método sem a utilização do Midas são observadas ao introduzir o ruído. Quanto maior o número de modos utilizado, mais precisos são os resultados.

Em resumo, a inserção do ruído nos deslocamentos verticais faz com que os modos de vibração deixem de ser limpos e passem a ter sinais indesejados, apresentando uma não linearidade nos valores de Δ .

iii. MVCF

A Figura 62 a Figura 63 apresentam os resultados para o MVCF, sem e com a introdução de ruído.

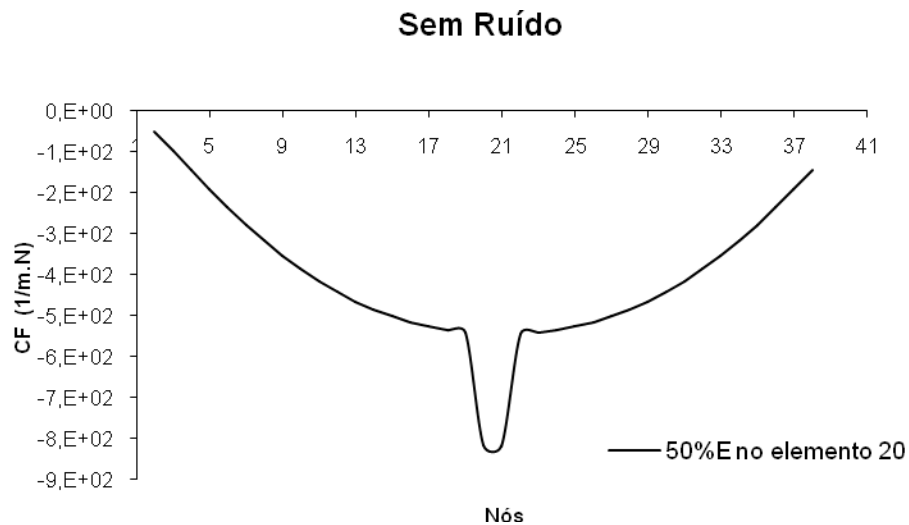


Figura 62– MVCF para vigas biapoiadas com dano de 50% no elemento 20, sem ruído e utilizando os 3 primeiros modos.

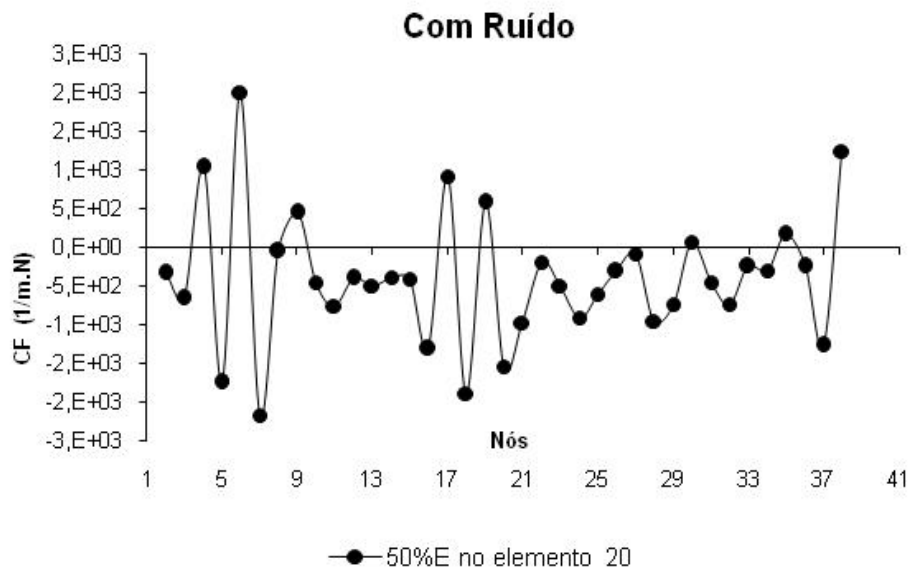


Figura 63 - MVCF para vigas biapoiadas com dano de 50% no elemento 20, com ruído e utilizando os 3 primeiros modos.

Nesse método, as análises de severidade, posicionamento e número de modos foram omitidas devido ao mau desempenho do MVCF com a introdução do ruído.

Na Figura 62, o MVCF apresenta resultado semelhante ao encontrado sem a utilização do Midas. A Figura 63 mostra o desempenho do mesmo exemplo da Figura 62, porém com a introdução do ruído. A introdução do ruído, nesse caso, comprometeu os resultados e o gráfico não apresentou nenhuma conclusão pertinente sobre o método.

Mediante as Figuras apresentadas, principalmente as sem ruído, prova-se que o MIDAS é capaz de nos fornecer características dinâmicas confiáveis e reais. O fato de alguns casos e até mesmo métodos não atingirem resultados satisfatórios deve-se a presença do ruído e, também ao nível de ruído utilizado na modelagem.

Além disso, muitas vezes esse acréscimo de sinal nos deslocamentos verticais compromete a identificação das propriedades da estrutura de tal forma que dificulta a obtenção de alguns modos vibracionais. Assim, as análises para cada método foram realizadas sem ruído e com ruído, no intuito de se avaliar se este procedimento conduziria a resultados satisfatórios e a influência do ruído nas respostas.

O que se conclui é que a inserção do ruído contaminou de tal forma as propriedades dinâmicas da estrutura que fez com que o MVCF não obtivesse resultados satisfatórios.

IV.4 – Comparação dos Métodos

Visando uma análise global de todos os resultados apresentados nesse capítulo, comparam-se os métodos e parâmetros estudados. Com um intuito de facilitar a comparação entre os métodos e os casos trabalhados, foi montada a Tabela 10, avaliando e pontuando cada método de detecção de danos e o seu desempenho. Os seguintes conceitos foram adotados:

R → Ruim;

B → Bom;

O → Ótimo

Tabela 10 - Avaliação dos métodos e parâmetros utilizados nas análises.

		Severidade		Posicionamento		Número de Modos		Danos Múltiplos		
		Biapoiada	Engaste	Biapoiada	Engaste	Biapoiada	Engaste	Biapoiada	Engaste	
Sem Midas	Sem Ruído	Frequência	B	B	R	R	B	B	-	-
		MVF	O	O	O	O	O	O	O	O
		MVCF	O	O	O	O	O	O	O	O
		MAC/COMAC	B/R	B/R	B/R	B/R	R	R	B/R	B/R
Com Midas	Com Ruído	Frequência	B	R	B	R	B	B	-	-
		MVF	B	R	B	R	R	R	-	-
		MVCF	R	R	R	R	R		-	-
		MAC/COMAC	-	-	-	-	-	-	-	-
Com Midas	Sem Ruído	Frequência	B	B	R	R	B	B	-	-
		MVF	O	R	O	R	O	R	-	-
		MVCF	O	R	O	R	O	R	-	-
		MAC/COMAC	-	-	-	-	-	-	-	-

Analisando as referências bibliográficas, encontramos resultados semelhantes ao desse estudo. Em alguns casos, os métodos de detecção de danos avaliados neste trabalho apresentaram desempenho piores do que os encontrados nas análises.

Em Carrillo (2004), por exemplo, o MVCF apresentou bons resultados quanto ao posicionamento do dano para a viga biapoiada, porém falhou para a viga engastada-livre. No presente trabalho, os resultados para a viga engastada-livre foram surpreendentes, pois se detecta perfeitamente o posicionamento e as diferentes intensidades do dano. Lu (2001) também utiliza esse método e chega à conclusão que numerosas combinações de danos provocam uma confusão nos picos da curvatura e compromete a identificação.

O MVF apresentado por Ndami(2002) apresenta resultados satisfatórios para a indicação da existência do dano, porém não consegue localizar o mesmo. Acredita-se que isso ocorra devido a complexa modelagem do dano utilizada. Neste estudo, o MVF identifica e intensifica o dano, tanto para vigas biapoiadas quanto para a engastada-livre. Carrilo (2006) consegue identificar, localizar e quantificar o dano neste método.

Os parâmetros MAC e o COMAC não apresentaram resultados confiáveis para a detecção, sendo o pior método analisado. Eles somente indicam a existência do dano e possíveis regiões do mesmo. Em casos, de danos múltiplos, as áreas apontadas com possibilidade de estarem danificadas se confundem e acabam por comprometer toda a estrutura. Genovese (2000) conclui da mesma forma, afirmando que grandes perturbações nos locais de maior deslocabilidade leva a falsa idéia de que essas regiões estariam danificadas. Assim, como nesse trabalho, o COMAC em Genovese (2000) não consegue localizar corretamente o dano.

Da mesma forma que nesse estudo, Palma (2007) introduz o ruído no sistema analisado com o objetivo de aproximar as simulações numéricas das experimentais. Também conclui que esse procedimento não é trivial e requer um estudo específico, pois as incertezas e os sinais aleatórios introduzidos comprometem as propriedades da estrutura de tal forma que os métodos de detecção de danos apresentam resultados absurdos.

Capítulo V – Conclusão

V.1 – Conclusão

Os métodos de detecção de danos ganham expressão no meio científico porque existe uma política de conscientização sobre a importância de manutenção das estruturas e, conseqüente avaliação de integridade estrutural. A metodologia tem atraído a atenção de vários pesquisadores devido à facilidade para implementação em estruturas de grande porte e por apresentar nas bibliografias resultados promissores. A priori a modelagem numérica na detecção de danos vem sendo utilizada apenas para detectar e localizar danos, porém com a junção de outras metodologias pode ser possível se obter técnicas sofisticadas que permitam serem realizadas predições de vida útil.

O trabalho analisa os parâmetros MAC e COMAC, o Método da Variação da Flexibilidade e o Método da Variação da Curvatura de Flexibilidade, sem e com a introdução de ruídos. Para a introdução do ruído, o programa Midas foi utilizado para gerar os dados dinâmicos.

Os resultados obtidos nos testes numéricos foram satisfatórios, pois as técnicas foram capazes de identificar o dano nas estruturas analisadas, independente da severidade, do posicionamento e do número de modos utilizados nos testes.

O MAC e COMAC apresentaram falhas em algumas análises, o que nos remete a uma insegurança e desconfiança do método. Com a introdução do ruído, o MVCF não obteve resultado satisfatório.

De uma maneira geral, os resultados obtidos nos exemplos simulados, mostraram-se bastante promissores dentro do objetivo e metodologia de cada método.

V.2 – Propostas de Trabalhos Futuros

Como continuação deste trabalho se propõe uma investigação de novos e mais modernos métodos de detecção de danos, e uma possível comparação dos resultados obtidos nesse trabalho com futuros testes numéricos com dados obtidos experimentalmente.

A introdução do ruído nos deslocamentos verticais virtualmente é também, uma proposta de trabalho futuro. É interessante analisar o comportamento dos métodos com diferentes níveis de ruído, com a inserção de danos combinados e em vigas engastadas-livre.

Outra proposta seria a forma de modelar o dano. Nesse trabalho o dano foi modelado através da redução do módulo de elasticidade da estrutura. Na literatura, a modelagem do dano pode ser feita através da redução da massa.

Bibliografia

Alvandi, A. (2003) “Contribution à l’Utilisation Pratique de l’Evaluation Dynamique pour la Detection d’Endommagements dans les Ponts”, tese de doutorado da Ecole National de Ponts et Chausseés, Paris, França.

Barbosa, F.S., Borges, C.C.H., Cury, A. A (2004) “Modelo de identificação de dano estrutural baseado na variação das características modais de uma estrutura”, XXV CILAMCE Iberian Latin-American Congress on Computational Methods, Recife, PE.

Bathe, K.J. (1995) Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, 1037p.

Borges, C.C.H., Barbosa, F.S., Cury, A.A. (2004) ”Detecção de Dano em Estruturas Usando Dados Modais Incompletos”, XXV CILAMCE Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Recife, PE.

Brasiliano, A., Doz, G. N., Brito, J. L. V. (2002) “Avaliação de Dano em Estrutura por Intermédio das Características Dinâmicas”, Mecânica Computacional Vol. XXI, S. R. Idelsohn, V. E. Sonzogni and Cardona (Eds.) Santa Fe-Paraná, Argentina, October 2002, pag 1893-1911 .

Carrillo, O. J. B. (2004) “Detecção de Dano a partir da Resposta Dinâmica da Estrutura – Estudo Analítico com Aplicação a Estruturas do Tipo Viga”, Dissertação em mestrado, São Carlos, SP.

Carrillo, O. J. B., Laier, J. E. (2006) “Detecção de Dano a partir da Resposta Dinâmica da Estrutura: Estudo Analítico com Aplicação a Estruturas do Tipo Viga”, Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 35, p. 29-45, São Carlos, SP.

Carrillo, O. J. B. (2007). Algoritmo Híbrido para Avaliação da Integridade Estrutural: uma Abordagem Heurística. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

Clough, R., Penzien, J, Dynamics of Structures, McGraw-Hill International Editions, 1975.

Cury, Alexandre A.. MIDaS - Um Sistema Computacional Baseado em Aplicações Web para Identificação Modal de Sistemas Dinâmicos Deformáveis, Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Brasil. 2008.

Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B (1998) “A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods”, Engineering Analysis Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM

Freitas, Thiago Caetano de. Tese, Identificação de parâmetros modais utilizando apenas as respostas da estrutura : 2008, Fac. Eng. - Ilha Solteira

Gadéa, A. S. M. Identificação de Danos Estruturais a Partir das Funções de Resposta em Frequência (FRF), Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

Genovese, M., Carvalho, G. N. D., Oliveira, Alessandro S., Brito, José Luís V. Análise experimental para avaliação da integridade estrutural por meio das alterações nas características dinâmicas. In: 29as Jornadas Suldamericanas

de Ingenieria Estructural - Jubileo Prof Julio Ricaldoni. Punta del Este, Uruguay, 2000.

Gomes, H. M. (2004) “Redes Neurais Artificiais para Detecção de Danos”, Mecánica Computacional Vol. XXIII, G.Buscaglia, E.Dari, O.Zamonsky (Eds.), Bariloche, Argentina, pp. 3351-3367.

Jauregui, D. V., Farrar, C. R., 1996, “Comparison of Damage Identification Algorithms on Experimental Modal Data From a Bridge”, 14th International Modal Analysis Conference Dearborn, Michigan

Laier, J. E., Begambre, O. (2006). Identificação de Fissuras em Vigas Metálicas Usando Dados Modais, Cadernos de Engenharia de Estruturas, v. 8, n. 32, p. 157-160, São Carlos, SP.

Lu, Q., Ren, G. and Zhao, Y. (2001). Multiple Damage Location with Flexibility Curvature and Relative Frequency Change for Beam Structures, Journal of Sound and Vibration, pp.1101—1114.

Meireles, J. F. B., 2007. Análise Dinâmica de estruturas por Modelos de Elementos Finitos Identificados Experimentalmente. Tese de Doutorado da Universidade de Minho.

Ndambi, J. M., Vantomme, J., Harri, K., 2002, “Damage Assessment in Reinforced Concrete Beams Using Eigenfrequencies and Mode Shape Derivates”. Engineering Structures 24, pag 501–515.

Palma, Paulo H. T., “Identificação Experimental e Controle Ativo de Vibrações Aplicadas em Estruturas Inteligentes”. Dissertação de Mestrado. 2007, Fac. Eng. - Ilha Solteira

Perera, R., Ruiz, A., Manzano, C., 2007, "An Evolutionary Multiobjective Framework for Structural Damage Localization and Quantification", Engineering Structures 29, pag 2540 – 2550.

Rolando, S. E., 2008. Métodos de Detecção de Dano em Pontes Mediante a Utilização de Técnicas de Monitorização Dinâmica: Avaliação e Aplicação. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Minho.

Salgado, R. Cruz, P. J. S., Raos, L. F. e Lourenço P. B., 2006. Comparison between damage detection methods applied to beam structures. Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost.

Savaris, G., 2007, Programa de Análise Dinâmicas de Pórticos Planos, UENF.

Tutorial do Midas, [www.midas,ufjf.br](http://www.midas.ufjf.br)

Wu Di, S. S. L., 2007, "Eigen-Parameter Decomposition of Element Matrices for Structural Damage Detection", Engineering Structures 29, pag 519 – 528.

ANEXO I

A. Método das Variações de Frequência

Consiste em identificar a presença, estimar a localização e quantificar o dano a partir de variações nas frequências naturais. Porém as variações nas frequências naturais não são suficientes para dar uma localização ao dano, sendo necessário um modelo analítico prévio. De acordo com Doebling (1998), testes em 40 pontes de estradas interestaduais apontaram que variações em frequências não indicam sensivelmente o dano.

A variação de frequência natural da estrutura devida à presença do dano é modelada em função do vetor posição do dano e da redução da rigidez.

$$\delta w_i = f_i(\Delta K, \{\rho\}) \quad (15)$$

Assim, expandindo a equação 15 em função do estado não danificado, $\Delta K = 0$, desprezando os termos de segunda ordem, e analisando todos os termos nulos da expansão em torno do estado não danificado, obtemos a equação 16 para o modo i .

$$\delta w_i = \Delta K \cdot h_i(\{\rho\}) \quad (16)$$

Comparando diferentes modos e considerando que a variação de rigidez seja independente da frequência, a equação 17 apresenta que a variação da frequência entre os dois modos é função apenas da localização do dano.

$$\frac{\delta w_i}{\delta w_j} = \frac{h_i(\{\rho\})}{h_j(\{\rho\})} = g(\{\rho\}) \quad (17)$$

Portanto, onde a relação teórica $\delta\omega_i/\delta\omega_j$ for igual ao valor medido experimentalmente serão, portanto, possíveis locais danificados.

Pode-se fazer também uma análise de sensibilidade ou uma análise de perturbação para se obter as variações de frequências. Pode-se realizar isso com uma pequena variação de rigidez ΔK na matriz $[K]$, e com variações similares nos outros parâmetros, como demonstrado na equação 18 de análise dinâmica.

$$([K + \Delta K] - [M + \Delta M](\lambda + \Delta\lambda))\{q + \Delta q\} = 0 \quad (18)$$

onde,

$[M]$ = matriz de massa global do sistema;

$[\Delta M]$ = variação da matriz de massa;

$\{\lambda\}$ = autos valores do sistema;

$\{\Delta\lambda\}$ = variação dos autos valores;

$\{q\}$ = autos vetores do sistema;

$\{\Delta q\}$ = variação dos autos vetores do sistema.

Assim, fazendo diversas operações na equação 18 é possível encontrar a equação 19 que expressa a variação das freqüências naturais em função das variações de rigidez ΔK , da matriz de massa original e das formas modais.

$$\Delta\lambda_i = \frac{\{q\}_i^T \Delta K \{q\}_i}{\{q\}_i^T [M] \{q\}_i} \quad (19)$$

Logo, as medidas das variações de freqüência em um par de modos indicarão o local onde possivelmente existe dano, ou seja, pontos onde a relação da variação de freqüência determinada experimentalmente é igual à relação teórica, como apresenta a equação 20.

$$\left(\frac{\delta\omega_i}{\delta\omega_j} \right)_{ex} = \left(\frac{\Delta\lambda_i}{\Delta\lambda_j} \right) \quad (20)$$

A comparação das variações de freqüências medidas experimentalmente para um modo, com valores obtidos pela análise de sensibilidade para um elemento danificado (grau de dano conhecido), fornece uma indicação da severidade do dano em termos de grau de danificação introduzido no modelo teórico (Carrillo, 2004).

B. Variações da Curvatura das Formas Modais e Variações da Energia de Deformação

Pela expressão clássica da resistência, a equação 21, nota-se que a redução de EI do módulo de elasticidade E , e do momento de inércia I , produz um aumento na grandeza da curvatura v'' na seção.

$$v'' = \frac{M}{EI} \quad (21)$$

onde, M é o momento de flexão na seção

O princípio desse método é que a diferença absoluta da curvatura das formas modais entre a estrutura intacta e danificada apresente um máximo na região danificada. As curvaturas são calculadas através das formas modais usando uma aproximação de diferença central, como apresenta a equação 22.

$$v_{ij}'' = \frac{(q_{(i+1)j} - 2q_{ij} + q_{(i-1)j})}{l^2} \quad (22)$$

Já a diferença absoluta da curvatura (DC) é dada pela equação 23.

$$DC = \left| v_k'' - v_k''^D \right| \quad (23)$$

v_k'' = curvatura da forma modal k da estrutura intacta

$v_k''^D$ = curvatura da forma modal k da estrutura danificada

Para analisar todos os modos medidos, é proposto o chamado fator de dano de curvatura (FDC), equação 24, onde traça uma média aritmética das diferenças da curvatura entre a estrutura sadia e a danificada (Wahab e De Roeck, 1999, *apud* Carrillo, 2004).

$$FDC = \frac{\sum_{k=1}^n \left| v_k'' - v_k''^D \right|}{n} \quad (24)$$

onde, n é o número de modos considerado.

A partir da equação 25 da energia de deformação U para a viga Euler-Bernoulli sem dano, onde L é o comprimento e u é uma função que representa a

deformada da viga, que pode ser expresso por uma forma modal qualquer, $q_i(x)$.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 q_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (25)$$

É possível estabelecer o índice de dano ξ , equação 26, onde ξ é a relação entre os somatórios das variações da rigidez à flexão g_{il} na viga danificada e na viga intacta para o modo de vibração i .

$$\xi_l = \frac{\sum_{i=1}^p g_{il}^D}{\sum_{i=1}^p g_{il}} \quad (26)$$

onde, l é a sub região da viga.

As regiões com $\xi_l = 1$ não estão danificadas. Quanto maior for o índice de dano, maiores são as chances de o dano estar localizado no elemento l .

C. Método da Checagem da Unidade

Esse método parte de uma matriz erro, equação 27 cuja relação pseudo-inversa é entre a matriz de flexibilidade medida dinamicamente da estrutura danificada $[f^D]$ e a matriz de rigidez da estrutura intacta $[K]$.

$$[e] = [f^D] \cdot [K] - [I] \quad (27)$$

onde, $[I]$ é matriz identidade.

Lin (1990) propôs esse método para localizar erros na modelagem e usou a localização do elemento com maior erro em cada coluna para determinar a posição do erro (Carrillo, 2004). Essa matriz de erro pode ser usada para detectar a maior variação de flexibilidade nos graus de liberdade da estrutura.

D. Método da Matriz Erro de Rigidez

Neste método a matriz erro $[e]$ gerada é em função da variação de flexibilidade $[\Delta f]$ e da matriz de rigidez $[K]$, na estrutura sem dano, equação 28.

$$[e] = [K] \cdot [\Delta f] \cdot [K] \quad (28)$$

Este método se assemelha ao anterior por utilizar a matriz de rigidez e tender a ser pouco utilizado, visto que, é difícil de determinar a matriz de rigidez só com medidas experimentais.

ANEXO II

Esse anexo apresenta os parâmetros para o arquivo de entrada do MIDAS.

- i. **ext** - Extensão dos arquivos de dados que podem ser utilizados:
 - a) ext = mat → extensão.mat (arquivos Matlab)
 - b) ext = dat → extensão.dat (arquivos texto)

- ii. **tfic** - Tipo dos arquivos de dados.
 - a) tfic = 1 → dados do tipo texto prontos. Este caso se refere às situações em que o sinal adquirido possui média igual a zero para todas as vias de medida.
 - b) tfic = 2 → dados do tipo texto em que é necessária a translação do sinal em relação à média. Este caso se aplica para sinais que possuem média diferente de zero e ocorre em situações em que existem ruídos com valor constante em todo o sinal.
 - c) tfic = 3 → dados do tipo texto em que é necessária a translação do sinal em relação à média e também é necessário fazer o sinal rotacionar em relação ao eixo das abscissas. Este caso ocorre quando da presença do ruído linear.
 - d) tfic = 4 → dados do tipo.mat (idem ao caso 1).
 - e) tfic = 5 → dados do tipo .mat (idem ao caso 2).
 - f) tfic = 6 → dados do tipo .mat (idem ao caso 3).

- iii. **Vfi** - Arquivos que serão utilizados na análise. Os arquivos são lidos de acordo com a ordem numérica dos arquivos submetidos.

- iv. **Mvm** - tipos de medidas para análise. Entre os arquivos escolhidos em Vfi com a extensão ext, escolhe-se as medições que farão parte da análise. Esta variável é uma matriz que possui o número de linhas igual ao número de arquivos lidos e que contém os tipos de medições úteis a cada arquivo. Existem duas particularidades a respeito das duas primeiras colunas:
- a) 1ª coluna: Referência para normalização dos modos próprios.
 - b) 2ª coluna: Base para cálculo das funções de correlação. Esta coluna indica a série de medidas para qual serão definidas as condições de desencadeamento do método do Decremento Aleatório. Os modos são formados sem esta medida.
- v. **ref** – as medições utilizadas para a normalização dos modos próprios (1ª coluna da matriz Mvm) podem ou não fazer parte dos modos de vibração que se desejam obter.
- a) Ref = 1 → 1ª coluna faz parte do vetor próprio.
 - b) Ref = 2 → 1ª coluna não faz parte do vetor próprio.
- vi. **deltat** – tempo de amostragem dos sinais.
- vii. **flag(3)** – tipo de condições de desencadeamento do método do Decremento Aleatório.
- a) flag(3) = 1 → Passagem de Nível.
 - b) flag(3) = 2 → Extremo Local.
 - c) flag(3) = 3 → Passagem de Zero.
 - d) flag(3) = 4 → Ponto Positivo.
 - e) flag(4) – Tipo de pseudo-medidas do Método de Ibrahim.
 - f) flag(4) = 1 → Divisão dos Sinais.
 - g) flag(4) = 2 → Defasagem dos Sinais.

- viii. **Nf** – número de freqüências próprias desejadas. Normalmente esse valores são definidos entre 5 e 15, nos problemas de engenharia.

- ix. **pNpf** – razão entre o número de pontos da janela de correlação e o número total de pontos do sinal. Geralmente o valor de pontos a serem utilizados para cálculo das correlações é definido entre 500 e 1000, pois valores superiores acarretam perdas de desempenho nos cálculos e valores inferiores causam imprecisões no processo de identificação.

- x. **a1 e a2** – parâmetros para determinação dos pontos de desencadeamento do método do decremento Aleatório .

- xi. **deltai e deltaf** – parâmetros de valores mínimos e máximos, respectivamente, para as defasagens das pseudomedidas do Método de Ibrahim (geralmente <50).

- xii. **Nr** – Número de análises para filtragem das freqüências.

- xiii. **Binf, Bsup e Ofb** - Bandas de Freqüência para a filtragem dos sinais (em Hz) e Ordem da filtragem de banda (Ofb). As Bandas possuem mínimo de 0 e máximo $\text{deltaf}/2$, se Binf for igual à Bsup evita a filtragem.

Assim, encontram-se algumas as variáveis utilizadas no arquivo de entrada do Midas.