

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INTEGRIDADE
ESTRUTURAL DE VIGAS E TRELIÇAS PLANAS**

JUAN DIEGO MORENO RESTREPO

ORIENTADORA: GRACIELA N. DOZ DE CARVALHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM – 007A/06

BRASÍLIA/DF: JULHO – 2006

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INTEGRIDADE
ESTRUTURAL DE VIGAS E TRELIÇAS PLANAS**

JUAN DIEGO MORENO RESTREPO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof^a. Graciela N. Doz de Carvalho, Dr. Ing. (UnB)
(Orientadora)**

**Prof^a. Andrea Brasiliano Silva, Dr. (UnB)
(Examinadora Interna)**

**Prof. Remo Magalhães de Souza, Ph.D. (UFPA)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 03 DE JULHO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

MORENO RESTREPO, JUAN DIEGO

Avaliação Numérica da Integridade Estrutural de Vigas e Treliças Planas.

xxii, 125p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2006).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Identificação de danos

2. Integridade estrutural

3. Parâmetros modais

4. Estruturas

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORENO RESTREPO, Juan Diego. (2006). Avaliação Numérica da Integridade Estrutural de Vigas e Treliças Planas. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM-007A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Juan Diego Moreno Restrepo.

TÍTULO: Avaliação Numérica da Integridade Estrutural de Vigas e Treliças Planas.

GRAU: Mestre

ANO: 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Juan Diego Moreno Restrepo

SQN 404 Bloco C Apto 108.

70.485-030 Brasília – DF – Brasil.

**A Deus,
à Sol,
à Francisca Beatriz.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, quem a pesar da minha atitude indiferente por tanto tempo, sempre me ajuda muito sem me abandonar nem por um instante.

À minha mãe, Francisca Beatriz, pelo apoio e conforto durante todo este tempo, pela sua dedicação e seu sacrifício constante para me dar o melhor.

À Sol, quem me acompanha e encoraja para conseguir todos os meus objetivos. Pelo seu amor e sua compreensão para com meus sonhos. Pela sua paciência durante a realização deste trabalho.

À professora Graciela, pela sua orientação neste trabalho e a confiança depositada em mim para desenvolvê-lo.

À Andrea Brasiliano e ao professor José Luis V. de Brito pela ajuda e pelo tempo que me dedicaram quando o precisei.

À minha família brasileira: Diêgo de Almeida, Joel Donizete, Eider Rocha, Enio Amorim por todos os momentos compartilhados e pela amizade. À Sandra Echeverria pela sua ajuda o tempo todo. À Sara Yepes pela sua amizade. Em especial ao Alberto Zuluaga pelo seu apoio, companheirismo e pelos momentos compartilhados onde aprendi tantas coisas para a vida.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE VIGAS E TRELIÇAS PLANAS

Autor: Juan Diego Moreno Restrepo

Orientadora: Graciela N. Doz de Carvalho

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Julho de 2006

Durante os últimos trinta anos, o monitoramento da saúde estrutural (ou *Structural Health Monitoring, SMH*) tem-se desenvolvido rapidamente com o objetivo de estabelecer tanto o local do dano quanto a sua magnitude. Esses danos podem ser produzidos nas estruturas pelos processos de deterioração, aos quais estão submetidas durante toda a vida útil, afetando a capacidade de carga e ao mesmo tempo a segurança desta.

Nesta dissertação, são aplicados dois métodos baseados nas mudanças das propriedades dinâmicas das estruturas produzidas pelo dano. Para o estudo do método de identificação de dano em estruturas usando a mudança na flexibilidade (Pandey e Biswas, 1994), é feita uma análise numérica em vigas com diferentes condições de apoio, níveis e locais de dano. Já para estruturas reticuladas, é aplicado o método de identificação de dano em estruturas submetidas a vibrações ambientes usando vetores de localização de dano, segundo a metodologia de Bernal (2000), e segundo a metodologia de Gao e Spencer (2002). Neste caso, para a análise numérica, simulam-se cenários de dano simples e múltiplo, variando as porcentagens de dano nos elementos. Inclui-se também uma simulação de um ensaio experimental numa das treliças analisadas numericamente para estudar a aplicabilidade do método e os resultados obtidos. É proposta uma metodologia de quantificação de dano para o método proposto por Bernal (2000) a qual baseia-se no índice *MAC (MODAL ASSURANCE CRITERION)* proposto por Allemang e Brown (1982).

O método proposto por Pandey e Biswas (1994) permitiu localizar satisfatoriamente o dano em todos os casos estudados. O método de identificação de dano usando vetores de localização apresentou resultados satisfatórios na identificação quando aplicada a metodologia proposta por Bernal (2000). Já quando aplicada a metodologia proposta por Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos em alguns casos não representaram fielmente o estado da estrutura.

ABSTRACT

NUMERICAL EVALUATION OF STRUCTURAL INTEGRITY IN BEAMS AND PLANAR TRUSSES.

Author: Juan Diego Moreno Restrepo

Supervisor: Graciela N. Doz de Carvalho

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, July 2006

During the last thirty years, the Structural Health Monitoring (SHM) has been quickly developed with the purpose of establishing the local damages and its magnitude. The structures are submitted during its useful life to deterioration processes that can produce damages in them, changing their load capacity and at the same time the structure safety.

In this dissertation, two methods based on the changes of the dynamic properties produced by damage are applied. For the method of damage identification in structures using the changes in the flexibility (Pandey and Biswas, 1994), is accomplished a numerical analysis when it is applied to beams with different support conditions, levels and localization of damage. In the case of truss structures, the method of damage identification in structures under ambient vibrations using the Damage Locating Vectors (DLVs) proposed by Bernal (2000) and the variation to this method proposed by Gao and Spencer (2002), were applied. In this case, for the numerical analysis, simple and multiple damaged scenarios were simulated, varying the level of damage in the elements. It is also included a simulation of an experimental test in one of the analysed trusses, in order to study the applicability of the method and its results. An approach for damage quantification in the Bernal's (2000) methodology is proposed and it is based on the MAC (Modal Assurance Criterion) index developed by Allemang and Brown (1982).

The method proposed by Pandey and Biswas (1994) identified the damage in all of the cases studied. The damage identification method using DLVs yield very satisfactory results when the Bernal's (2000) methodology is applied, meanwhile the results obtained with the Gao and Spencer (2002) methodology in some cases does not represent the real state of the structure.

INDICE

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - ASPECTOS GERAIS	1
1.2 - OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivos Gerais	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
3.1 - MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS USANDO A MUDANÇA NA FLEXIBILIDADE (PANDEY E BISWAS, 1994).....	14
3.2 - MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS USANDO VETORES DE CARGA (BERNAL, 2000).....	15
3.3 - MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A VIBRAÇÕES AMBIENTES USANDO MUDANÇAS NA FLEXIBILIDADE (GAO E SPENCER, 2002).	20
3.4 - QUANTIFICAÇÃO DO DANO NO CASO DA METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE DANO SEGUNDO BERNAL (2000)	23
4 - ANÁLISE NUMÉRICA	24
4.1 - VIGAS – MÉTODO DA MUDANÇA NA FLEXIBILIDADE (PANDEY E BISWAS, 1994)	25
4.1.1 Viga simplesmente apoiada.....	28
4.1.2 Viga engastada.....	30
4.1.3 Viga bi-apoiada com balanço.....	33
4.2 - TRELIÇAS PLANAS - MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS USANDO VETORES DE CARGA (BERNAL, 2000) E MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A VIBRAÇÕES AMBIENTES USANDO MUDANÇAS NA FLEXIBILIDADE (GAO E SPENCER, 2002)	36
4.2.1 Treliza plana T1.....	40
4.2.2 Treliza plana T2.....	54

4.3 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIO EXPERIMENTAL DE TRELIÇA PLANA	66
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
5.1 - MÉTODO DA MUDANÇA NA FLEXIBILIDADE	77
5.2 - MÉTODO DOS VETORES DE LOCALIZAÇÃO DE DANO SEGUNDO BERNAL (2000).....	77
5.3 - MÉTODO DOS VETORES DE LOCALIZAÇÃO DE DANO SEGUNDO GAO E SPENCER (2002)	78
5.4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIO EXPERIMENTAL	79
5.5 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICES	84
APÊNDICE A1 – TABELAS DE RESULTADOS COM O PARÂMETRO WSI NO CASO DA TRELIÇA T1	85
APÊNDICE A2 – TABELAS DE RESULTADOS COM O PARÂMETRO WSI NO CASO DA TRELIÇA T2	89
APÊNDICE A3 – TABELAS DE RESULTADOS COM O PARÂMETRO WSI NO CASO DA TRELIÇA T1SE (SIMULAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL)	93
APÊNDICE A4 – RESULTADOS INTERMEDIARIOS PARA O CASO DA TRELIÇA T2 COM OS ELEMENTOS 1, 9 e 14 DANIFICADOS QUANDO USADA A METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)	98

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 4.1 - Propriedades das vigas.....	25
Tabela 4.2 - Freqüências da viga simplesmente apoiada (sem dano).	29
Tabela 4.3- Freqüências da viga engastada (sem dano).....	31
Tabela 4.4 - Freqüências da viga bi-apoiada com balanço (sem dano).	34
Tabela 4.5 - Características da treliça plana T1.....	40
Tabela 4.6 - Freqüências sem dano da treliça T1.....	42
Tabela 4.7 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 é danificado.....	42
Tabela 4.8 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando o elemento 6 é danificado.	44
Tabela 4.9 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 é danificado.....	44
Tabela 4.10 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando o elemento 12 é danificado.	46
Tabela 4.11 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 são danificados.....	46
Tabela 4.12 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 são danificados.....	48
Tabela 4.13 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 são danificados.....	49
Tabela 4.14 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 são danificados.....	50
Tabela 4.15 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 são danificados.....	52
Tabela 4.16 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 são danificados.....	53
Tabela 4.17 – Elementos adicionais identificados como danificados na treliça T1, quando aplicado o método dos DLVs segundo Gao e Spencer (2002).	54
Tabela 4.18 - Características da treliça plana T2 da segunda aplicação.....	55
Tabela 4.19 - Freqüências da treliça T2 (sem dano).....	56
Tabela 4.20 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 12, 15 e 16 são danificados.	57

Tabela 4.21 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 são danificados (15 e 30% de dano).	58
Tabela 4.22 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 são danificados (40, 50 e 70% de dano).	59
Tabela 4.23 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 são danificados.	60
Tabela 4.24 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 são danificados (15 e 30% de dano).	61
Tabela 4.25 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 são danificados (40, 50 e 70% de dano).	62
Tabela 4.26 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 são danificados.	63
Tabela 4.27 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 são danificados (15 e 30% de dano).	64
Tabela 4.28 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 são danificados (40, 50 e 70% de dano).	65
Tabela 4.29 – Elementos adicionais identificados como danificados na treliça T2, quando aplicado o método dos DLVs segundo Gao e Spencer (2002).	66
Tabela 4.30 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 é danificado.	69
Tabela 4.31 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 é danificado.	71
Tabela 4.32 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 são danificados.	72
Tabela 4.33 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1, 8 e 9 são danificados.	74
Tabela 4.34 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 são danificados.	75
Tabela A.1.1 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 15% de dano.	85
Tabela A.1.2 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 30% de dano.	85
Tabela A.1.3 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 50% de dano.	85

Tabela A.1.4 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 70% de dano.	85
Tabela A.1.5 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 15% de dano.	85
Tabela A.1.6 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 30% de dano.	86
Tabela A.1.7 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 50% de dano.	86
Tabela A.1.8 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 70% de dano.	86
Tabela A.1.9 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 15% de dano cada um.	86
Tabela A.1.10 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 30% de dano cada um.	86
Tabela A.1.11 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 50% de dano cada um.	87
Tabela A.1.12 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 70% de dano cada um.	87
Tabela A.1.13 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 15% de dano cada um.	87
Tabela A.1.14 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 30% de dano cada um.	87
Tabela A.1.15 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 50% de dano cada um.	87
Tabela A.1.16 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 70% de dano cada um.	88
Tabela A.1.17 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 15% de dano cada um.	88
Tabela A.1.18 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 30% de dano cada um.	88
Tabela A.1.19 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 50% de dano cada um.	88
Tabela A.1.20 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 70% de dano cada um.	88

Tabela A.2.1 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 15% de dano cada um.....	89
Tabela A.2.2 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 30% de dano cada um.....	89
Tabela A.2.3 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 50% de dano cada um.....	89
Tabela A.2.4 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 70% de dano cada um.....	90
Tabela A.2.5 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 15% de dano cada um.....	90
Tabela A.2.6 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 30% de dano cada um.....	90
Tabela A.2.7 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 50% de dano cada um.....	90
Tabela A.2.8 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 70% de dano cada um.....	91
Tabela A.2.9 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 15% de dano cada um.....	91
Tabela A.2.10 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 30% de dano cada um.....	91
Tabela A.2.11 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 50% de dano cada um.....	91
Tabela A.2.12 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 70% de dano cada um.....	92
Tabela A.3.1 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 15% de dano.....	93
Tabela A.3.2 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 30% de dano.....	93
Tabela A.3.3 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 50% de dano.....	93
Tabela A.3.4 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 70% de dano.....	93
Tabela A.3.5 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 15% de dano.....	94

Tabela A.3.6 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 30% de dano.	94
Tabela A.3.7 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 50% de dano.	94
Tabela A.3.8 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 70% de dano.	94
Tabela A.3.9 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 15% de dano cada um.	94
Tabela A.3.10 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 30% de dano cada um.	95
Tabela A.3.11 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 50% de dano cada um.	95
Tabela A.3.12 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 70% de dano cada um.	95
Tabela A.3.13 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1, 8 e 9 têm 15% de dano cada um.	95
Tabela A.3.14 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1, 8 e 9 têm 30% de dano cada um.	95
Tabela A.3.15 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 50% de dano cada um.	96
Tabela A.3.16 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 70% de dano cada um.	96
Tabela A.3.17 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 15% de dano cada um.	96
Tabela A.3.18 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 30% de dano cada um.	96
Tabela A.3.19 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 50% de dano cada um.	96
Tabela A.3.20 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 70% de dano cada um.	97
Tabela A.4.1. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do primeiro elemento danificado.	98
Tabela A.4.2. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do segundo elemento danificado.	99

Tabela A.4.3. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do terceiro elemento danificado.	100
Tabela A.4.4. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do quarto elemento danificado.	101
Tabela A.4.5. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do quinto elemento danificado.	102
Tabela A.4.6. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do sexto elemento danificado.	103

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 - Classificação dos métodos de detecção de dano nas estruturas de acordo com o critério utilizado (Zou et al., 2000).....	6
Figura 4.1 – Vigas estudadas com suas condições de apoio.....	25
Figura 4.2 – Elementos de viga com dois graus de liberdade por nó.	26
Figura 4.3 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso das vigas.	27
Figura 4.4 - Discretização em elementos finitos da viga simplesmente apoiada mostrando os elementos danificados e a seção transversal da viga.....	28
Figura 4.5 - Primeiros 5 modos de vibração da viga simplesmente apoiada.	28
Figura 4.6 - Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, <i>et. al.</i> 1994) na viga simplesmente apoiada. (a) elemento 4; (b) elemento 8; (c) elemento 12; (d) elemento 16.	29
Figura 4.7 - Mudança de flexibilidade calculada a partir de 1 modo, 2 modos e 7 modos de vibração para a viga simplesmente apoiada.	30
Figura 4.8 - Discretização em elementos finitos da viga engastada mostrando os elementos danificados e a seção transversal da viga.	31
Figura 4.9 - Primeiros 5 modos de vibração da viga engastada.....	31
Figura 4.10 - Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, <i>et. al.</i> 1994) na viga engastada. (a) elemento 4; (b) elemento 8; (c) elemento 12; (d) elemento 16; (e) elemento 19; (f) elemento 23; (g) elemento 27.	32
Figura 4.11 – Mudança de flexibilidade calculada a partir de 1 modo, 2 modos e 7 modos de vibração para a viga engastada.....	33
Figura 4.12 - Discretização em elementos finitos da viga bi-apoiada com balanço mostrando os elementos danificados e a seção transversal da viga.....	34
Figura 4.13 - Primeiros 5 modos de vibração da viga bi-apoiada com balanço.	34
Figura 4.14 – Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, <i>et. al.</i> 1994) na viga bi-apoiada com balanço. (a) elemento 4; (b) elemento 8; (c) elemento 12; (d) elemento 16.	35

Figura 4.15 – Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, <i>et. al.</i> 1994) na viga bi-apoiada com balanço. (a) elemento 19; (b) elemento 23; (c) elemento 27.	36
Figura 4.16 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso das treliças segundo o método de Bernal (2000).....	38
Figura 4.17 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso das treliças segundo o método de Gao e Spencer (2002).	39
Figura 4.18 - Treliça plana T1 e seção transversal dos elementos componentes.....	40
Figura 4.19 - Distribuição de tensões na treliça T1 quando carregada verticalmente nos nós do banzo inferior.	40
Figura 4.20 - Primeiros 6 modos de vibração da treliça T1.....	41
Figura 4.21 - Elemento 6 danificado na treliça T1.	42
Figura 4.22 - Valores WSI quando o elemento 6 está danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	43
Figura 4.23 - Elemento 12 danificado na treliça T1.	44
Figura 4.24 - Valores WSI quando o elemento 12 está danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.....	45
Figura 4.25 - Elementos 1 e 8 danificados na treliça T1.....	46
Figura 4.26 - Valores WSI quando os elementos 1 e 8 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.....	47
Figura 4.27 - Elementos 1, 8 e 9 danificados na treliça T1.....	48
Figura 4.28 - Valores WSI quando os elementos 1, 8 e 9 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.....	49
Figura 4.29 - Elementos 6, 7 e 12 danificados na treliça T1.....	51
Figura 4.30 – Valores WSI quando os elementos 6, 7 e 12 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	52
Figura 4.31 - Treliça plana T2 e seção transversal dos elementos componentes.....	55
Figura 4.32 - Primeiros 6 modos de vibração da treliça T2.....	55
Figura 4.33 - Elementos 1, 2, 10, 15 e 16 danificados na treliça T2.....	56
Figura 4.34 - Valores WSI quando os elementos 1, 2,10,15 e 16 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.....	58
Figura 4.35 – Elementos 4, 13 e 21 danificados na treliça T2.....	60

Figura 4.36 – Valores WSI quando os elementos 4, 13 e 21 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	61
Figura 4.37 - Elementos 1, 9 e 14 danificados na treliça T2.....	62
Figura 4.38 – Valores WSI quando os elementos 1, 9 e 14 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano.	63
Figura 4.39 – Valores WSI quando os elementos 1, 9 e 14 estão danificados. (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	64
Figura 4.40 - Nó onde foi aplicada a excitação e nós onde foram simulados acelerômetros na treliça T1SE.....	67
Figura 4.41 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso da treliça da simulação numérica segundo o método de Bernal (2000).	68
Figura 4.42 - Elemento 6 danificado na treliça T1SE.....	69
Figura 4.43 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com o elemento 6 danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	70
Figura 4.44 - Elemento 12 danificado na treliça T1SE.....	70
Figura 4.45 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com o elemento 12 danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	71
Figura 4.46 - Elementos 1 e 8 danificados na treliça T1SE.....	72
Figura 4.47 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com os elementos 1 e 8 danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	73
Figura 4.48 - Elementos 1, 8 e 9 danificados na treliça T1SE.....	73
Figura 4.49 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com os elementos 1, 8 e 9 danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	74
Figura 4.50 - Elementos 6, 7 e 12 danificados na treliça T1SE.....	75
Figura 4.51 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com os elementos 6, 7 e 12 danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.	76

Figura A.4.1. Primeiro elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.	98
Figura A.4.2. Segundo elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.	99
Figura A.4.3. Terceiro elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.	100
Figura A.4.4. Quarto elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.	101
Figura A.4.5. Quinto elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.	102
Figura A.4.6. Sexto elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.	103

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

c_i	- Constante utilizada para normalizar a máxima tensão no elemento estrutural
ℓ	- Comprimento do elemento finito considerado
n	- Número de graus de liberdade
$ndlv$	- Número de vetores de localização de dano
nsi_j	- Índice de tensão normalizada no j-ésimo elemento
\vec{nsi}_{j_i}	- Vetor de valores nsi para o i-ésimo vetor de localização de dano
s_i	- i-ésimo valor singular da matriz delta de flexibilidade
svn_i	- Índice utilizado na seleção dos vetores de localização de dano
t	- Tempo
\mathbf{v}	- Matriz diagonal com os índices de massa normalizados
\vec{x}	- Vetor de deslocamento
$\vec{x}(t)$	- Vetor de deslocamento no tempo t (configuração do sistema no tempo t)
$\ddot{\vec{x}}$	- Vetor de aceleração
A	- Área da seção transversal
A_s	- Área de corte
AHTMAC	- Maior TMAC promédio ou “ <i>Averaged Highest TMAC</i> ”
DAM	- Modelo analítico danificado (“ <i>Damaged Analytical Model</i> ”)
DLV	- Vetores de Localização de Dano (“ <i>Damage Locating Vectors</i> ”)
E	- Módulo de elasticidade
F_s	- Constante de deformação por corte
\mathbf{F}	- Matriz de flexibilidade da estrutura
\mathbf{F}_d	- Matriz de flexibilidade da estrutura com dano
\mathbf{F}_u	- Matriz de flexibilidade da estrutura sem dano
\mathbf{F}_Δ	- Matriz delta de flexibilidade
\mathbf{F}_m	- Matriz de flexibilidade da estrutura proveniente dos graus de liberdade medidos
G	- Módulo de deformação transversal
HTMAC _j	- Maior TMAC observado quando o j-ésimo elemento do DAM é danificado
I	- Inércia do elemento

K	- Matriz de rigidez global da estrutura
$\bar{\mathbf{K}}$	- Matriz de rigidez generalizada da estrutura
L	- Comprimento do elemento
$\bar{\mathbf{L}}$	- Vetor de forças estáticas
L	- Matriz de forças estáticas
MAC	- “ <i>Modal Assurance Criterion</i> ”
MEF	- Método dos Elementos Finitos
M	- Matriz de massa global da estrutura
\mathbf{M}_m	- Matriz de massa proveniente dos graus de liberdade medidos
\mathbf{M}_u	- Matriz de massa proveniente dos graus de liberdade não medidos
$\bar{\mathbf{M}}$	- Matriz de massa generalizada da estrutura
N_E	- Número total de elementos no modelo analítico danificado (DAM)
S	- Matriz diagonal resultante da decomposição de valores singulares da matriz delta de flexibilidade
SHM	- Monitoramento da Saúde Estrutural (“ <i>Structural Health Monitoring</i> ”)
SVD	- Decomposição em Valores Singulares (“ <i>Singular Value Decomposition</i> ”)
TAMC	- “ <i>Total Modal Assurance Criterion</i> ”
U	- Matriz ortonormal resultante da decomposição de valores singulares da matriz delta de flexibilidade
V	- Matriz ortonormal resultante da decomposição de valores singulares da matriz delta de flexibilidade
$\bar{\mathbf{W}}\mathbf{SI}$	- Vetor de promédios ponderado dos valores <i>nsi</i>
$\bar{\delta}_j$	- Máximo valor absoluto dos elementos na <i>j</i> -ésima coluna da matriz delta de flexibilidade
δ_{ij}	- Elementos da matriz delta de flexibilidade
ρ	- Peso específico
σ_{ij}	- Tensão no <i>j</i> -ésimo elemento induzida pelo <i>i</i> -ésimo DLV
σ_j	- Tensão característica no <i>j</i> -ésimo elemento estrutural
$\sigma_{j\Sigma}$	- Tensão acumulada no <i>j</i> -ésimo elemento
$\sigma_j _{max}$	- Máxima tensão característica atuante em todos os elementos do mesmo tipo
$\bar{\phi}$	- Vetor de deslocamentos nodais (configuração inicial do sistema)

$\vec{\phi}_i$	- i -ésimo vetor de deslocamentos nodais
$\vec{\phi}^d$	- Vetor de modos de vibração da estrutura danificada
$\vec{\phi}^u$	- Vetor de modos de vibração da estrutura sem dano
ω	- Frequência angular
ω_i	- i -ésima frequência natural de vibração da estrutura
ϕ	- Constante de correção ao corte
Φ	- Matriz de modos de vibração da estrutura
Φ_m	- Matriz de modos proveniente dos graus de liberdade medidos
Φ_u	- Matriz de modos proveniente dos graus de liberdade não medidos
Ω	- Matriz diagonal com os quadrados das frequências naturais de vibração

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - ASPECTOS GERAIS

O monitoramento da saúde estrutural (ou *Structural Health Monitoring, SHM*) surge com a necessidade de detectar o dano não só na área da engenharia civil, mas também na área da engenharia mecânica e da engenharia aeroespacial.

Os principais fatores que têm levado ao desenvolvimento do *SHM* são: as catástrofes com perdas de vida, que são amplamente cobertas pela mídia; a detecção do dano nos estágios iniciais e os avanços técnicos. A preocupação pela detecção do dano é importante haja vista o valor do custo do reparo, que depende da magnitude do mesmo. Este aspecto também está relacionado ao envelhecimento da estrutura e aos custos associados com os reparos para evitar a ruptura dos componentes estruturais ou perdas maiores. Os avanços técnicos tais como o método dos elementos finitos (MEF) e a melhoria nos sensores controlados remotamente, além da velocidade no cálculo computacional e seu custo efetivo, também contribuíram ao rápido desenvolvimento do *SHM*.

Inicialmente o *SHM* era feito utilizando técnicas como: ultra-som, acústica, campos magnéticos, raio X, método “*eddy-current*” (técnica não destrutiva, baseada no princípio do eletromagnetismo) ou a técnica de campos térmicos. Todas elas precisam de uma estimativa prévia do local do dano e da acessibilidade para sua inspeção.

A necessidade de modelos quantitativos, que pudessem ser aplicados a estruturas mais complexas, levou ao estudo e desenvolvimento de métodos mais elaborados, entre eles os que estudam as mudanças nas características de vibração das estruturas. A idéia principal é que os parâmetros modais (frequências, formas modais e amortecimento modal) registram ou revelam qualquer mudança nas propriedades físicas das estruturas (massa e rigidez), sendo função destas.

Geralmente o dano nas estruturas apresenta-se de forma localizada como uma perda de massa e/ou rigidez. Como apontaram Hearn e Testa (1991), a perda de massa pode ser considerada desprezível nas estruturas da engenharia civil, de modo que o dano

caracteriza-se por uma perda de rigidez devida a uma redução na inércia ou na área da seção transversal do elemento estrutural. Como exemplo, cita-se o caso de uma dada fissura que produz perda de rigidez num elemento, não causando efeito algum sobre sua massa. A perda de rigidez também pode ser provocada por uma redução no módulo de elasticidade do elemento devido aos ataques provenientes de agentes químicos.

Pandey e Biswas (1994 e 1995) utilizaram a mudança na matriz de flexibilidade da estrutura para detectar danos em vigas com diferentes condições de apoio, sendo estes danos de natureza linear.

Em 2000, Bernal apresenta uma técnica de detecção de danos onde as estruturas podem ser tratadas como lineares antes e após serem danificadas. O objetivo principal é a determinação de um conjunto de vetores denominados Vetores de Localização de Dano (DLVs), calculados como o espaço nulo da mudança da matriz de flexibilidade medida. O enfoque não depende do tipo de estrutura e pode ser aplicado a cenários de danos simples ou múltiplos.

Em 2002, Bernal introduz dois parâmetros adicionais para dar, ao método, maior robustez. Uma das melhorias no método consiste na seleção dos vetores de dano que são aplicados na estrutura e a outra melhora consiste na combinação da informação de múltiplos vetores de localização de dano.

Yan e Golinval (2005) aplicam uma técnica de identificação do subespaço via covariância para a identificação dos parâmetros modais, os quais são utilizados para realizar a montagem da matriz de flexibilidade correspondente aos graus de liberdade medidos. A matriz de rigidez é obtida pela pseudo-inversão da matriz de flexibilidade. A localização do dano é alcançada pelo registro combinado das mudanças nas duas matrizes ao passar de um estágio sem dano a outro danificado.

Os exemplos encontrados na literatura são, em geral, típicos e muitas vezes faz-se necessária a aplicação dos métodos a estruturas com configurações diferentes e a casos que sejam de particular interesse.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Esta dissertação tem como objetivo principal estudar alguns métodos de identificação de dano em estruturas, baseando-se nas mudanças dos parâmetros modais (frequências e formas modais) para detectar tanto o dano nas estruturas, quanto a sua localização e magnitude, sendo função das propriedades físicas do elemento considerado.

Para tal propósito serão estudados diferentes métodos, com destaque para o método de identificação de danos em estruturas usando as mudanças na flexibilidade (Pandey e Biswas, 1994) e o método dos vetores de localização de danos (ou *Damage Locating Vectors, DLVs*) proposto por Bernal em 2000 e o enfoque apresentado por Gao e Spencer em 2002 para este mesmo método. Estes se baseiam nas mudanças das frequências modais e/ou nas mudanças das formas modais, ou ainda nas mudanças das matrizes de rigidez ou flexibilidade das estruturas, sendo possível também a combinação destes.

1.2.2 Objetivos Específicos

Realizar implementações computacionais do método de Pandey e Biswas (1994), do método de Bernal (2000) e do método de Gao e Spencer (2002) com o intuito de simular os ensaios realizados pelos autores, assim como estudar a sua aplicação em outras estruturas.

Comparar os resultados obtidos ao aplicar os métodos de Bernal (2000) e de Gao e Spencer (2002) ao mesmo conjunto de dados de uma estrutura e observar possíveis dificuldades que os métodos possam apresentar quando aplicados.

1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação é composta de cinco capítulos, sendo o assunto ou escopo de cada um deles detalhado a seguir.

No primeiro capítulo são apresentados alguns aspectos gerais sobre o assunto discutido assim como os objetivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

A revisão bibliográfica, apresentada no segundo capítulo, aborda trabalhos desenvolvidos na área, bem como alguns comentários pertinentes ao assunto em questão.

No terceiro capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que serviram de base para o desenvolvimento da pesquisa, descrevendo-se cada um dos métodos utilizados nesta dissertação.

No quarto capítulo encontram-se as aplicações numéricas, a diferentes tipos de estruturas, dos métodos descritos no capítulo anterior.

Já no quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os efeitos produzidos pelo dano numa estrutura podem ser classificados como lineares e não lineares. A maioria dos estudos reportados na literatura técnica aponta para a detecção de danos lineares.

Uma situação de dano linear é aquela em que a estrutura que inicialmente é elástica e linear continua a se comportar da mesma forma depois que o dano é introduzido. As variações nas propriedades modais são resultados das mudanças na geometria e/ou nas propriedades do material da estrutura, mas a resposta estrutural pode ser modelada utilizando as equações de movimento linear.

Por outro lado, o dano não linear é definido como aquele no qual a estrutura, que inicialmente é elástica e linear, depois da introdução de um dano comporta-se de maneira não linear. Um exemplo disto são as conexões com folgas e polímeros que apresentam comportamento não linear. Um outro exemplo de dano não linear é a formação de uma fissura devida a um esforço de fadiga que provoca a abertura e o fechamento constante da mesma em função das condições normais de operação.

Uma classificação dos métodos de detecção de dano nas estruturas de acordo com o critério utilizado por Zou *et al.* (2000) é apresentada na Figura 2.1.

Os métodos baseados na análise modal para a detecção de dano utilizam informação de todos os parâmetros modais, tais como as frequências naturais, os modos de vibração e a razão de amortecimento modal ou uma combinação de alguns deles. A idéia principal é que os parâmetros modais, ao serem funções das características físicas da estrutura, sofrem mudanças quando há dano na estrutura. Dentre os três parâmetros modais (massa, amortecimento e rigidez), o amortecimento é o mais sensível e a massa é o que apresenta menor sensibilidade.

Os métodos baseados no domínio da frequência detectam o dano utilizando só as frequências da estrutura. O fundamento deste grupo de métodos consiste no fato do dano

produzir uma redução da rigidez estrutural, que por sua vez, produz uma redução nas frequências naturais.

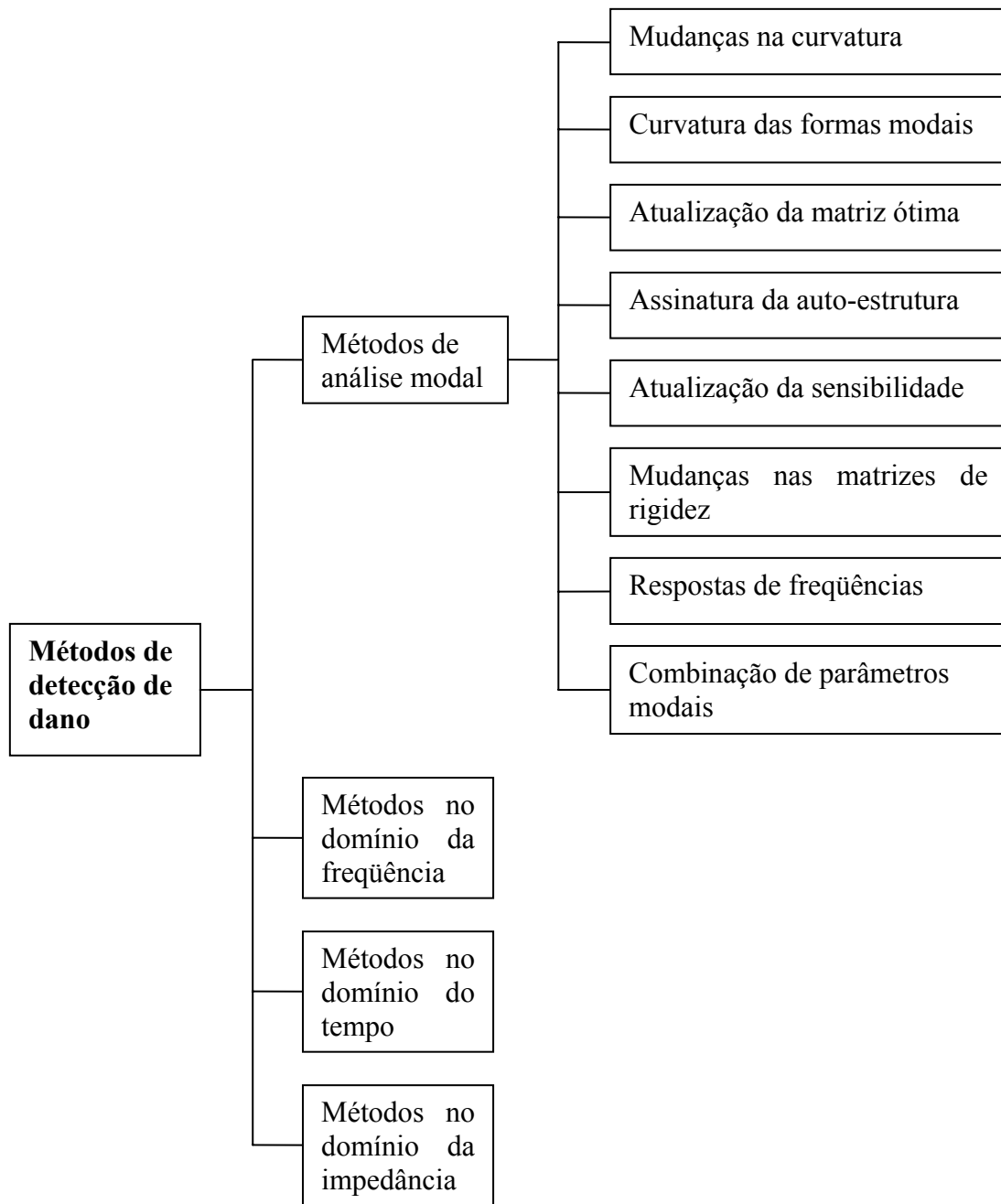


Figura 2.1 - Classificação dos métodos de detecção de dano nas estruturas de acordo com o critério utilizado (Zou et al., 2000).

Os métodos no domínio do tempo usam registros históricos de acelerações. Estes métodos poderiam ser independentes da informação modal para detectar danos, mas eles são normalmente utilizados juntamente com os métodos no domínio da frequência para tal fim.

O dano é estimado utilizando os registros no tempo, da excitação e das respostas de vibração da estrutura. A grande vantagem destes métodos é que podem detectar o dano tanto a nível local quanto global, variando as frequências de excitação.

Como o próprio nome indica, os métodos no domínio da impedância detectam o dano através das mudanças na impedância da estrutura. Qualquer variação na integridade da estrutura, ou em sua rigidez, resultará em mudanças na impedância. Estes métodos simulam o dano como uma mola que se supõe engastada nos extremos do dano. Os métodos no domínio da impedância são particularmente utilizados para detectar danos planos como a separação em camadas.

Provavelmente, o primeiro artigo de identificação de dano por meio de alterações nos padrões de vibração foi publicado por Lifshitz em 1969 (*apud* DOEBLING, 1996), Lifshitz observou a mudança no módulo dinâmico (inclinação da curva tensão-deformação sob carga dinâmica), a qual poderia ser relacionada com uma alteração na frequência como indicador de dano em partículas recheadas com elastômeros.

Adams *et al.* (1978, *apud* DOEBLING, 1996), estudaram um método em que o dano numa estrutura, que pudesse ser representada como unidimensional, pode ser identificado pelas mudanças nas frequências ressonantes associadas com dois modos. Em particular, eles estudaram modos de vibração axiais.

Allemang e Brown em 1982 (*apud* BRASILIANO, 2001), definiram o índice *MAC* (“*Modal Assurance Criterion*”) que proporciona uma medida global da diferença entre dois conjuntos de formas modais correspondentes. Por exemplo, se uma estrutura não se encontra danificada, a matriz do *MAC* é uma matriz identidade. Por outro lado, se aquela estrutura apresenta dano, o índice *MAC* diverge da matriz diagonal e a divergência dependerá da magnitude do dano.

Posteriormente Lieven e Ewins (1988, *apud* BRASILIANO, 2001), definiram o índice *COMAC* (“*Coordinate Modal Assurance Criterion*”) que proporciona uma medida pontual da diferença entre dois conjuntos de formas modais. Este índice varia entre 0 e 1, sendo que o valor 1 indica que as formas modais são idênticas no ponto considerado. Assim, o ponto danificado na estrutura será aquele cujo valor *COMAC* seja mais distante da unidade.

No que possivelmente foi o primeiro uso sistemático de informação referente às mudanças nas formas modais para detectar danos estruturais sem utilizar um modelo de elementos finitos, West (1984, *apud* DOEBLING, 1996), utiliza o índice *MAC* para determinar o nível de correlação que há entre os modos de uma asa não danificada de um satélite espacial, com os modos da mesma asa depois de submetê-la a um carregamento acústico, para detectar a presença do dano.

Pandey *et al.* (1991) investigaram a curvatura das formas modais como possível parâmetro para identificar e localizar o dano numa estrutura. Eles mostraram, para uma viga em balanço e outra simplesmente apoiada, que as mudanças absolutas na curvatura dos modos de vibração encontravam-se nos locais onde as estruturas estavam danificadas. Nas simulações, o dano foi modelado como uma redução no módulo de elasticidade da seção do elemento danificado. Quanto maior era o dano, a curvatura das formas modais aumentava, fato que pode ser utilizado para quantificar o dano.

Hearn e Testa (1991) aplicaram um método de identificação de dano baseado na mudança das formas modais dos primeiros modos da estrutura e das frequências ressonantes. A estrutura ensaiada consistiu em quatro barras de aço soldadas em placas conectoras, a qual foi submetida a carregamentos de fadiga. Os autores observaram que o método não conseguia localizar o dano em regiões simétricas da estrutura, mas que os erros de construção eliminavam as simetrias reais na mesma. Também foi testado um cabo submetido à tração, porém observou-se que as suas frequências naturais eram relativamente insensíveis ao dano. O dano só podia ser observado quando eram aplicados altos níveis de tração nos cabos.

Pandey e Biswas (1994) apresentaram um método de identificação e localização de danos baseado nas mudanças da flexibilidade medida de vigas. O método foi aplicado numericamente a vigas com diferentes condições de apoio (viga livre-livre, viga bi-apoiada e viga engastada) considerando que o dano era de natureza linear. Os resultados foram satisfatórios, pois o método conseguiu identificar corretamente, em todos os casos, o local do dano.

Salawu e Williams (1994, *apud* DOEBLING, 1996) demonstraram que comumente as mudanças na curvatura não localizam corretamente o dano quando usados dados

experimentais. Eles assinalaram que o fator com maior importância é a seleção dos modos que devem ser usados na análise para uma correta localização do dano.

Bernal (2000) introduziu o método dos vetores de localização de dano que são vetores de carga determinados a partir da mudança na matriz de flexibilidade. Os vetores têm a propriedade de induzir campos de tensões cuja magnitude é zero, nos elementos danificados. Os vetores são calculados como o espaço nulo na mudança da matriz de flexibilidade. O método só precisa da informação necessária para a análise estática no estado sem dano, denominada estrutura não danificada. O método foi aplicado a duas estruturas: a primeira, uma viga bi-engastada onde o dano foi simulado como uma redução na rigidez à flexão; a segunda, uma estrutura tipo pórtico “*shear building*” de 10 andares com distribuição de massa e rigidez irregulares, em que o dano foi simulado como uma perda de rigidez. Dos resultados obtidos, pôde-se concluir que o método apresentou um bom comportamento, pois conseguiu identificar o dano nos exemplos apresentados.

Genovese (2000) apresentou o Método do Erro Residual e estudou o Método da Alteração na Curvatura (Pandey *et al.*, 1991) e o Método de localização do dano por meio dos índices *MAC* (Allemang e Brown, 1982) e *COMAC* (Lieven e Ewins, 1988). Foram realizados ensaios dinâmicos em estruturas simples de vigas com dois metros de comprimento onde o dano era introduzido a partir de cortes em locais e magnitudes previamente estabelecidos. Também foram realizadas simulações numéricas onde o dano foi introduzido como uma redução nas propriedades geométricas da seção do elemento danificado.

Brasiliano (2001) avaliou numericamente o Método do Erro Residual apresentado por Genovese (2000). Foi feita uma análise numérica com o objetivo de avaliar sua eficiência quando aplicado a vigas contínuas e pórticos planos. O método também foi aplicado aos dados de frequências e modos de vibração obtidos experimentalmente de uma viga em balanço. Além do método do Erro Residual, outros três métodos de identificação de dano foram utilizados, sendo estes, o Método da alteração na curvatura dos modos de vibração (Pandey *et al.*, 1991), os índices *MAC* (Allemang e Brown, 1982) e *COMAC* (Lieven e Ewins, 1988) e o Método de identificação de dano em estruturas pela variação das características modais (Ferrufino, 1993). A partir dos resultados, verificou-se que o Método do Erro Residual foi eficiente na localização e quantificação de dano nas estruturas analisadas.

Bernal (2002) apresenta algumas mudanças no método dos vetores de localização anteriormente apresentado, introduzindo novos parâmetros para fazer o método mais robusto. O autor introduz um índice para a seleção dos vetores de localização que são aplicados ao modelo e também introduz uma metodologia para combinar as informações dos vetores selecionados. Os vetores foram calculados para dois exemplos numéricos de treliça plana. Um deles com um elemento único danificado e o outro com 250 casos de dano simples, definidos pelo processo de obtenção de dados de Monte Carlo. Os resultados dos exemplos foram satisfatórios e o método conseguiu identificar o dano nos casos analisados.

Gao e Spencer (2002), com o objetivo de evitar a medição da excitação de entrada na estrutura, utilizaram uma técnica de expansão modal em conjunto com o método dos DLVs proposto por Bernal (2002). Uma das vantagens desta formulação é que permite conhecer, além da localização do dano, a magnitude do mesmo. Para provar a validade do método foi realizado um exemplo numérico analisando uma treliça plana com um número limitado de sensores. Foram estudados dois casos: dano em um elemento só e em vários elementos, e o dano foi introduzido como uma redução da rigidez do elemento. Os resultados foram satisfatórios, pois o método conseguiu detectar as regiões danificadas e também quantificá-las.

Gao *et al.* (2004) apresentam uma verificação experimental do método DLV (Bernal, 2002) numa treliça tridimensional com 4,5m de vão, em que o dano foi introduzido substituindo os elementos originais por outros com rigidez reduzida. Foram estudados dois casos de dano simples, cada um deles com 40% de redução de rigidez. No primeiro caso danificou-se um elemento horizontal e no outro, um elemento vertical. O método apresentou resultados satisfatórios levando em conta o número reduzido de sensores utilizados no experimento.

Em 2005, Genovese simulou numericamente um ensaio dinâmico experimental para analisar a aplicabilidade de dois métodos de detecção de dano: o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) e o Método da Alteração na Curvatura (Pandey *et al.*, 1991), considerando a presença de ruído nos sinais (históricos de deslocamento). Foram simuladas estruturas simples de vigas submetidas a um carregamento dinâmico impulsivo, modelando

a estrutura com o Método dos Elementos Finitos onde os históricos de deslocamentos em função do tempo foram obtidos utilizando a integração de Newmark. Também foram implementadas formulações híbridas entre os métodos de localização de dano anteriormente mencionados e a técnica de Redes Neurais Artificiais para auxiliar tanto na detecção do dano quanto no processo de quantificação do mesmo. Genovese (2005) observou que o ruído afeta o processo de avaliação estrutural, dificultando a correta localização e quantificação da região afetada.

Duan *et al.* (2005) aplicam um algoritmo para construir a matriz de flexibilidade proporcional a partir de um grupo arbitrário de formas modais escaladas e frequências modais. A matriz de flexibilidade proporcional é um múltiplo escalar da matriz de flexibilidade real da estrutura em que o múltiplo escalar é teoricamente a primeira massa modal. Em vez de calcular os vetores de localização de dano com a matriz de flexibilidade real, é usada a matriz de flexibilidade proporcional para detectar dano em estruturas submetidas às vibrações ambientes. O método foi aplicado num sistema massa-mola e numa treliça plana com 28 nós e 53 elementos. Em ambos os casos, os danos foram introduzidos em mais de um elemento ao mesmo tempo, e o método conseguiu identificá-los o dano corretamente.

Não se pode concluir que existe um método melhor que outro. Alguns métodos têm melhor desempenho que outros, dependendo do caso estudado, onde os fatores de maior importância são o tipo de estrutura e o cenário de dano (simples ou múltiplo).

É possível observar que na literatura são apresentados poucos exemplos e as estruturas utilizadas variam pouco de um artigo para outro. Por causa disto, é preciso fazer uma análise mais abrangente na qual seja testado um maior número de casos de dano variando a tipologia da estrutura para observar o comportamento dos métodos. Realizando este tipo de análise pode-se obter informação importante a respeito das limitações e das vantagens e desvantagens dos métodos ao serem aplicados numa determinada situação.

Como já foi sugerido por Doebling, *et al.* (1998) “A literatura possui poucos estudos onde métodos diferentes de monitoramento da saúde estrutural são comparados quando aplicados diretamente ao mesmo grupo de dados”.

3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Frequências, modos de vibração e amortecimento são funções da massa e da rigidez da estrutura. Portanto, uma vez que os danos na estrutura alteram suas propriedades físicas (normalmente diminuindo a massa e/ou a rigidez e aumentando a flexibilidade e o amortecimento) haverá também mudanças nos parâmetros modais (frequências e modos de vibração).

Em relação à diminuição da massa, é preciso dizer que geralmente esta não apresenta uma diminuição significativa e é desprezível como apontaram Hearn e Testa (1991). Tanto em estruturas de concreto quanto em estruturas de aço, uma fissura reduz a rigidez sem perda significativa de massa. Já no caso da corrosão que afeta as estruturas metálicas, esta incidirá principalmente na rigidez, pois a incidência na massa será bem menor.

Como descrito no capítulo anterior, os métodos de detecção de dano baseados na análise modal utilizam informação de todos os parâmetros modais ou combinações de alguns deles para detectar o dano. Dentre os parâmetros estruturais, a massa é aquele que tem menor sensibilidade ao dano, como explicado anteriormente e o parâmetro de maior sensibilidade é o amortecimento. Por exemplo, quando uma estrutura está danificada, o dano reduzirá principalmente a rigidez, e em caso de afetar a massa da estrutura, a afetará em pouca intensidade. Por outro lado, a perda de integridade incrementará o amortecimento localmente. Para uma estrutura com baixo amortecimento e a mesma estrutura sem amortecimento, as frequências e os modos naturais de vibração são muito semelhantes, pelo qual, normalmente o amortecimento é considerado nulo.

Para o caso de um sistema de vários graus de liberdade, a equação de equilíbrio do sistema desconsiderando o amortecimento e com força externa nula é:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (3.1)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de massa global da estrutura; \mathbf{K} é a matriz de rigidez global; $\ddot{\mathbf{x}}$ é o vetor de acelerações e \mathbf{x} é o vetor de deslocamentos.

A solução dessa equação é da forma:

$$\vec{x}(t) = \vec{\varphi} \cdot \text{Cos}(\omega t) \quad (3.2)$$

onde $\vec{x}(t)$ é a configuração do sistema no tempo t quando este vibra com frequência ω e $\vec{\varphi}$ é a configuração inicial do sistema ou vetor de deslocamentos nodais.

Derivando a Eq. (3.2) e substituindo na Eq. (3.1) que é a equação do sistema, chega-se a:

$$(\mathbf{K} - \mathbf{\Omega} \mathbf{M})\mathbf{\Phi} = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

onde $\mathbf{\Omega}$ é a matriz diagonal com os quadrados das frequências naturais de vibração ω_i .

Para que esta equação tenha solução diferente da solução trivial, é necessário que:

$$|\mathbf{K} - \mathbf{\Omega} \mathbf{M}| = 0 \quad (3.4)$$

e, a partir desta equação podem ser obtidos os quadrados das frequências características ω_i^2 (autovalores). A cada um desses autovalores corresponde um autovetor $\vec{\varphi}_i$ que representa o modo de vibração correspondente.

Pela propriedade de ortogonalidade entre os modos em relação às matrizes de massa e de rigidez da estrutura tem-se:

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \quad \text{e} \quad \bar{\mathbf{K}} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi} \quad (3.5)$$

onde $\bar{\mathbf{M}}$ é a matriz de massa generalizada; $\bar{\mathbf{K}}$ a matriz de rigidez generalizada e $\mathbf{\Phi}$ é a matriz com os modos de vibração da estrutura $\mathbf{\Phi} = [\vec{\varphi}_1, \vec{\varphi}_2, \dots, \vec{\varphi}_n]$.

Pode-se, então, escrever o quadrado das frequências naturais matricialmente:

$$\mathbf{\Omega} = \bar{\mathbf{M}}^{-1} \bar{\mathbf{K}} \quad (3.6)$$

Na Eq. (3.4), pode-se observar que uma mudança na rigidez da estrutura produzida por algum tipo de dano, faria com que as frequências naturais de vibração da estrutura mudassem e, conseqüentemente, os modos correspondentes também sofreriam mudanças. Com este raciocínio, surge a possibilidade de avaliar a integridade de uma estrutura tentando relacionar o local do dano e sua magnitude com a mudança em maior ou menor grau dos modos e das frequências naturais da estrutura.

3.1 - MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS USANDO A MUDANÇA NA FLEXIBILIDADE (PANDEY E BISWAS, 1994)

Das Eqs, (3.3), (3.5) e (3.6) pode-se expressar a rigidez do sistema como:

$$\mathbf{K} = \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \mathbf{\Omega} \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} = \mathbf{M} \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \vec{\phi}_i \vec{\phi}_i^T \right) \mathbf{M} \quad (3.7)$$

e a flexibilidade como:

$$\mathbf{F} = \mathbf{\Phi} \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{\Phi}^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \vec{\phi}_i \vec{\phi}_i^T \quad (3.8)$$

onde n é o número de graus de liberdade do sistema.

Na Eq. (3.8) pode-se observar que a matriz de flexibilidade converge rapidamente devido à diminuição da contribuição modal quando a frequência aumenta. Como existe uma relação inversamente proporcional ao quadrado da frequência de vibração, à medida que aumenta a frequência, a contribuição dos modos na matriz de flexibilidade diminui com o quadrado da mesma. Portanto, pode-se obter uma boa estimativa da matriz de flexibilidade a partir das frequências mais baixas, que são as que geralmente se obtêm nos ensaios de laboratório.

Tendo os parâmetros modais em ambos os casos da estrutura sem dano e da estrutura danificada, podem-se calcular as matrizes de flexibilidade respectivas \mathbf{F}_u e \mathbf{F}_d . A mudança na matriz de flexibilidade, \mathbf{F}_Δ , provocada pelo dano será:

$$\mathbf{F}_\Delta = \mathbf{F}_u - \mathbf{F}_d \quad (3.9)$$

Lembrando que para uma estrutura de um grau de liberdade, a flexibilidade significa o deslocamento produzido por uma força unitária e fazendo uma analogia para um sistema de vários graus de liberdade, tem-se que cada coluna da matriz de flexibilidade representa o padrão de deslocamentos da estrutura produzido por uma força unitária aplicada no grau de liberdade associado. Deste modo, pode-se detectar e localizar o dano na estrutura a partir da mudança da flexibilidade em cada ponto da estrutura, $\bar{\delta}_j$.

Para cada grau de liberdade j , $\bar{\delta}_j$ é o máximo valor absoluto das componentes da correspondente coluna da matriz delta de flexibilidade \mathbf{F}_Δ :

$$\bar{\delta}_j = \max_i |\delta_{ij}| \quad (3.10)$$

onde δ_{ij} são elementos de \mathbf{F}_Δ .

3.2 - MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS USANDO VETORES DE CARGA (BERNAL, 2000).

Este método, proposto por Bernal (2000), baseia-se na determinação de um conjunto de vetores especiais chamados Vetores de Localização de Dano (*DLVs*), os quais têm a propriedade de, quando aplicados na estrutura como forças estáticas nos pontos onde há sensores para a coleta de dados, não induzirem nenhuma tensão nos elementos danificados.

Para uma estrutura onde o dano é de natureza linear pode-se calcular as matrizes de flexibilidade antes, \mathbf{F}_u e depois do dano, \mathbf{F}_d . Existe um grupo de vetores de forças

estáticas linearmente independentes, $\bar{\mathbf{L}}$, contidos na matriz \mathbf{L} , que satisfazem a seguinte equação:

$$\mathbf{F}_d \mathbf{L} = \mathbf{F}_u \mathbf{L} \Rightarrow (\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_u) \mathbf{L} = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{F}_\Delta \mathbf{L} = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

Para que a Eq. (3.11) seja satisfeita, existem duas alternativas:

- $(\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_u) = \mathbf{0}$, neste caso não seria possível localizar os danos pelas mudanças na flexibilidade, ou
- $(\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_u)$ não possui rango completo (é de rango deficiente) e então a matriz \mathbf{L} contém os vetores que definem o espaço nulo da matriz \mathbf{F}_Δ .

Ainda a Eq. (3.11) implica que os vetores em \mathbf{L} produzem o mesmo deslocamento nos pontos de localização dos sensores antes e depois do dano ou, de outra forma, que os DLVs não produzem nenhuma tensão nos elementos estruturais danificados pois o dano naqueles elementos não afeta o deslocamento nos pontos de localização dos sensores. Portanto os *DLVs* são os vetores em \mathbf{L} .

Uma das formas para calcular a matriz \mathbf{L} é fazendo uma decomposição de valores singulares (“*Singular Value Decomposition*” ou *SVD*) da matriz \mathbf{F}_Δ .

Faz-se necessário, portanto, o cálculo das matrizes, \mathbf{F}_u , \mathbf{F}_d e por último da matriz \mathbf{F}_Δ .

Como visto no método anterior, a matriz de rigidez do sistema pode ser obtida das Eqs. (3.3), (3.5) e (3.6). Substituindo a Eq. (3.5) na Eq. (3.6), tem-se:

$$\mathbf{\Phi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi} = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \quad (3.12)$$

Pré-multiplicando por $(\mathbf{\Phi}^T)^{-1}$ e pós-multiplicando a Eq. (3.12) por $(\mathbf{\Phi})^{-1}$, e ainda levando em conta que a matriz resultante do produto $\mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi}$ e que a matriz $\mathbf{\Omega}$, são diagonais, pode-se escrever:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{\Phi}^T)^{-1} (\mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi})^{1/2} \mathbf{\Omega} (\mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi})^{1/2} (\mathbf{\Phi})^{-1} \quad (3.13)$$

Reescrevendo a Eq. (3.13), tem-se a seguinte expressão para a matriz de rigidez:

$$\mathbf{K} = (\Phi^T)^{-1} \mathbf{v} \Omega \mathbf{v} \Phi^{-1} = \mathbf{M} \Phi \mathbf{v}^{-1} \Omega \mathbf{v}^{-1} \Phi^T \mathbf{M} \quad (3.14)$$

onde \mathbf{v} é a matriz diagonal com os índices de massa normalizados e está dada pela expressão:

$$\mathbf{v} = (\Phi^T \mathbf{M} \Phi)^{1/2} = (\Phi_m^T \mathbf{M}_m \Phi_m + \Phi_u^T \mathbf{M}_u \Phi_u)^{1/2} \quad (3.15)$$

onde o sub-índice m designa graus de liberdade medidos (são aqueles nós onde se coloca um sensor numa análise experimental ou onde se simula um deles numa análise numérica); e u designa os graus de liberdade não medidos (onde não se coloca sensor em algum dos casos).

Sabendo que a relação entre a matriz de rigidez e de flexibilidade é $\mathbf{F} = \mathbf{K}^{-1}$, pode-se obter a matriz de flexibilidade como:

$$\mathbf{F} = (\Phi \mathbf{v}^{-1}) \Omega (\Phi \mathbf{v}^{-1})^T \quad (3.16)$$

A matriz de flexibilidade nos pontos de localização dos sensores pode-se escrever como:

$$\mathbf{F}_m = (\Phi_m \mathbf{v}^{-1}) \Omega^{-1} (\Phi_m \mathbf{v}^{-1})^T \quad (3.17)$$

Uma vez calculadas as matrizes de flexibilidade, é efetuada a SVD da matriz \mathbf{F}_Δ :

$$\mathbf{F}_\Delta = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_0] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} [\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_0]^T \quad (3.18)$$

onde as matrizes \mathbf{U} e \mathbf{V} são ortonormais ($\mathbf{U} \mathbf{U}^T = \mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{I}$ e $\mathbf{V} \mathbf{V}^T = \mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I}$), e \mathbf{S} é a matriz diagonal que contém os valores singulares em ordem decrescente. O sub-índice 1 está associado com os valores singulares que são diferentes de zero e o sub-índice 0 está associado com os valores singulares iguais a zero.

De maneira equivalente:

$$[\mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_1 \quad \mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_0] = [\mathbf{U}_r \mathbf{S}_1 \quad \mathbf{0}] \quad (3.19)$$

Da Eq. (3.19) obtêm-se:

$$\mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_0 = \mathbf{0} \quad (3.20)$$

As Eqs. (3.11) e (3.20) indicam que $\mathbf{L} = \mathbf{V}_0$ e portanto os *DLVs* podem ser obtidos a partir da *SVD* da matriz \mathbf{F}_Δ .

Na Eq. (3.18) os valores singulares correspondentes a \mathbf{V}_0 comumente não são exatamente iguais a zero devido ao ruído presente nos sinais experimentais e aos erros computacionais e, portanto, devem-se selecionar os *DLVs* da decomposição efetuada à matriz \mathbf{F}_Δ . Para tal fim, Bernal (2002) propôs o índice *svn* definido como:

$$svn_i = \sqrt{\frac{s_i c_i^2}{\max_i (s_k c_k^2)}} \quad \text{para } i = 1 : m \quad (3.21)$$

onde m é o número de colunas de \mathbf{V} ; s_i é o i -ésimo valor singular da matriz \mathbf{F}_Δ ; c_i é uma constante utilizada para normalizar a máxima tensão no elemento estrutural, a qual é induzida pela carga estática $c_i \vec{\mathbf{V}}_i$ para ter um valor unitário; e $\vec{\mathbf{V}}_i$ é o vetor singular direito de \mathbf{F}_Δ .

De acordo com Bernal (2002), foi encontrado que o valor de 0,20 funciona bem para uma grande variedade de condições, recomendando assim que sejam selecionados como *DLVs*, aqueles vetores de \mathbf{V} que satisfaçam:

$$svn \leq 0,20 \quad (3.22)$$

Cada um dos *DLVs* selecionados é aplicado ao modelo analítico da estrutura sem dano, então é calculada a tensão em cada um dos elementos estruturais. Logo depois, é calculado o índice de tensão normalizada nsi no j -ésimo elemento, definido como a tensão característica σ_j normalizada pela maior tensão característica atuante em todos os elementos do mesmo tipo, conforme Eq. (3.23).

$$nsi_j = \frac{\sigma_j}{\sigma_j|_{max}} \quad (3.23)$$

Para a seleção do conjunto dos possíveis elementos danificados na estrutura, tem-se a equação:

$$\mathbf{WSI} = \frac{\sum_{i=1}^{ndlv} \overline{nsi}_{j_i}}{ndlv} \quad (3.24)$$

onde:

$$\overline{svn}_i = \max(svn_i, 0.015) \quad (3.25)$$

Na Eq. (3.24) \mathbf{WSI} é uma média ponderada dos valores nsi para cada um dos vetores *DLV*; $ndlv$ é o número de vetores *DLV*; \overline{nsi}_{j_i} é o vetor de valores nsi para o i -ésimo *DLV*. O limite de 0,015 é introduzido para prevenir pesos excessivamente grandes quando svn é muito pequeno.

Assim o conjunto de possíveis elementos danificados estará formado pelos elementos que possuam o parâmetro $WSI \leq 1$ (Bernal, 2002).

3.3 - MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A VIBRAÇÕES AMBIENTES USANDO MUDANÇAS NA FLEXIBILIDADE (GAO E SPENCER, 2002).

Este método baseia-se naquele descrito no item 3.2. Só são apresentadas, então, as diferenças nas formulações matemáticas deles, para o qual é feita uma descrição do funcionamento do método.

Inicialmente constrói-se o modelo analítico da estrutura sem dano. Em seguida é selecionado o modelo analítico danificado (“*Damaged Analytical Model*” ou *DAM*) que é o modelo com um único elemento danificado.

Para isto, têm-se dois passos a serem seguidos: o primeiro passo determina qual elemento, se fosse danificado, poderia gerar o *DAM*. Neste passo, só um elemento de cada vez é danificado e nele são introduzidos diferentes níveis de dano (por exemplo, 10 níveis igualmente distribuídos). São então comparados os modos da estrutura danificada com os modos do modelo para cada nível de dano introduzido em cada um dos elementos por meio do índice *MAC*. Logo depois, utilizando a Eq. (3.26), é calculado o parâmetro *TMAC* (“*Total Modal Assurance Criterion*”), cujo valor pode oscilar entre zero e a unidade, alcançando o valor 1 quando os modos são totalmente iguais e afastando-se da unidade a medida que os modos de ambos os modelos divergem entre eles. Uma vez feita a comparação, o modelo com o maior valor do parâmetro *TMAC* é selecionado. O parâmetro *TMAC* é dado pela equação:

$$TMAC = \prod_{i=1}^n MAC(\bar{\varphi}_i^u, \bar{\varphi}_i^d) \quad (3.26)$$

onde n é o número de graus de liberdade da estrutura; e $MAC(\bar{\varphi}_i^u, \bar{\varphi}_i^d)$ é o valor do “*Modal Assurance Criterion*” calculado para os vetores, $\bar{\varphi}^u$, provenientes dos modos de vibração da estrutura onde foram introduzidos níveis de dano igualmente distribuídos, e os vetores dos modos de vibração da estrutura danificada $\bar{\varphi}^d$, que está dado pela equação:

$$MAC(\bar{\varphi}^u_i, \bar{\varphi}^d_j) = \frac{|\bar{\varphi}^{u_i T} \bar{\varphi}^d_j|^2}{\bar{\varphi}^{u_i T} \bar{\varphi}^u_i \bar{\varphi}^{d_j T} \bar{\varphi}^d_j} \quad (3.27)$$

Supondo que o i -ésimo elemento seja o danificado, no segundo passo, novamente são comparados os modos da estrutura danificada com os modos do modelo com o i -ésimo elemento danificado, selecionado no passo anterior, introduzindo uma maior quantidade de níveis de dano só naquele elemento (por exemplo, 100 níveis de dano). A comparação é feita através do índice MAC , calculando seguidamente o parâmetro $TMAC$ dado pela Eq. (3.26). Neste segundo passo é selecionado o nível de dano correspondente ao modelo com o maior valor do parâmetro $TMAC$.

Depois destes dois passos, *i.e.*, seleção do elemento danificado e o nível de dano, o DAM é fixado. São calculados as frequências e os modos de vibração para a estrutura antes e depois do dano. Com esta informação, podem-se obter as matrizes de flexibilidade a partir da Eq. (3.17), para depois aplicar o método DLV , e assim localizar o elemento danificado na estrutura.

Neste método, a escolha dos elementos danificados é feita baseada na tensão acumulada normalizada para cada elemento, assim:

$$\bar{\sigma}_j = \frac{\sigma_{j\Sigma}}{\max_k(\sigma_k)} \quad (3.28)$$

onde:

$$\sigma_{j\Sigma} = \sum_{i=1}^{ndl} \frac{\sigma_{ij}}{\max_k(\sigma_{ik})} \quad (3.29)$$

Na Eq. (3.29), σ_{ij} é a tensão no j -ésimo elemento induzida pelo i -ésimo DLV ; $\sigma_{j\Sigma}$ é a tensão acumulada no j -ésimo elemento. Na prática, a tensão acumulada normalizada induzida pelos $DLVs$ nos elementos danificados pode não ser exatamente igual a zero

devido ao ruído e às incertezas. Por isto, é necessário trabalhar com limites razoáveis para a escolha dos elementos danificados (Gao e Spencer, 2002).

Se os elementos danificados indicados pelo método do *DLV* não incluem o elemento selecionado pelo *DAM*, deve-se selecionar o *DAM* correspondente ao seguinte maior valor do parâmetro *TMAC*. Este passo é importante, pois o *DAM* com o verdadeiro elemento danificado, não necessariamente produz o maior valor do parâmetro *TMAC* devido ao ruído e às incertezas.

O elemento danificado selecionado pelo *DAM* é realmente o elemento danificado apenas quando é também identificado pelo método *DLV*.

Para o caso de múltiplos elementos danificados é preciso um processo iterativo. Neste caso, um dos elementos danificados é identificado com o processo descrito anteriormente. O *DAM* identificado é o novo modelo base (modelo analítico da estrutura sem dano), e se repete o processo para detectar o próximo elemento danificado.

Um modelo possuindo menos elementos danificados que a estrutura real, apresenta valores de *TMAC* menores que o modelo possuindo igual número de elementos danificados que a estrutura real. Sabendo que o *DAM* com o mesmo número de elementos danificados que a estrutura deve ter mais informação que outros modelos, propõe-se o índice chamado de maior *TMAC* médio ou “*Averaged Highest TMAC*”, para deter o processo iterativo:

$$AHTMAC = \frac{1}{N_E} \sum_{j=1}^{N_E} HTMAC_j \quad (3.30)$$

onde $HTMAC_j$ é o maior valor *TMAC* observado quando o j -ésimo elemento do *DAM* é danificado; e N_E é o número total de elementos no *DAM*.

Se o índice *AHTMAC* para uma nova iteração é menor que para a iteração anterior, o processo iterativo é finalizado.

3.4 - QUANTIFICAÇÃO DO DANO NO CASO DA METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE DANO SEGUNDO BERNAL (2000)

Uma contribuição desta dissertação é a implementação de um procedimento de quantificação de dano no caso em que seja utilizada a metodologia de identificação de danos segundo Bernal (2000).

Uma vez identificados os elementos danificados da estrutura por meio da metodologia proposta por Bernal (2000) é aplicado um procedimento iterativo para realizar a quantificação do nível de dano nos respectivos elementos. O princípio básico do procedimento iterativo é variar a porcentagem de dano em apenas um dos elementos danificados de cada vez, até avaliar todas as possíveis combinações de níveis de dano nos elementos indicados pela metodologia de Bernal (2000).

Em termos computacionais, o método de quantificação está composto por tantas iterações, uma dentro da outra, como elementos danificados sejam identificados na estrutura permitindo abarcar todas as possíveis combinações de dano nos elementos. Cada vez que o dano é variado, usa-se a Eq. (3.26), com o intuito de comparar o modelo da estrutura danificada com o modelo onde foram introduzidos os supostos danos e calculam-se os valores *TMAC* para cada uma das possíveis combinações. Em seguida, é selecionado o modelo com o valor mais alto do parâmetro *TMAC*, que é aquele que carrega as porcentagens de dano nos elementos assinalados pelo método de Bernal (2000).

A diferença desta metodologia de quantificação em relação à metodologia de Gao e Spencer (2002) encontra-se no fato de que o cálculo das porcentagens de dano nos elementos é feita depois de realizar a identificação de todos os elementos danificados na estrutura. Por outro lado, na metodologia de Gao e Spencer (2002) é detectado um elemento de cada vez e imediatamente é calculada a porcentagem de dano correspondente.

4 - ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica foi dividida em três partes. Na primeira foi utilizado o método de identificação de dano em estruturas usando a mudança na flexibilidade (Pandey e Biswas, 1994) para análise de vigas danificadas. Na segunda parte foi utilizado o método de localização de dano em estruturas usando vetores de carga proposto por Bernal (2000) e o método de localização de dano em estruturas submetidas a vibrações ambientes usando mudanças na flexibilidade de Gao e Spencer (2002), para duas treliças planas. Na terceira parte foi simulado um ensaio experimental numa das treliças mencionadas e utilizado o método de identificação de dano em estruturas submetidas às vibrações ambientes usando vetores de localização de dano segundo Bernal (2000).

Na primeira parte foram estudadas três vigas com diferentes condições de apoio: viga simplesmente apoiada, viga engastada e viga bi-apoiada com balanço. Para cada uma delas simularam-se diferentes casos de dano, variando-se a intensidade deste.

Na segunda etapa foram estudadas duas treliças planas com vários cenários de dano em cada uma delas. Nos diferentes cenários, danificaram-se um ou vários elementos ao mesmo tempo para depois aplicar o método dos vetores de localização de dano segundo a metodologia de Bernal (2000) e posteriormente de acordo com a metodologia de Gao e Spencer (2002).

Já na terceira etapa foi simulado um ensaio experimental, em uma das treliças mencionadas no parágrafo anterior, onde a estrutura foi excitada com um carregamento impulsivo num dos nós. Posteriormente os históricos de acelerações verticais e horizontais foram utilizados para a determinação dos modos e das frequências de vibração os quais, por sua vez, possibilitaram o cálculo das matrizes de flexibilidade para depois aplicar a metodologia de Bernal (2000) para localização de dano.

Para a análise numérica foi utilizado o programa computacional Matlab, versão 6.1, com programas desenvolvidos para tais fins. Todos os programas implementados, tanto para a primeira parte quanto para a segunda e a terceira parte, acoplam aplicações de elementos finitos com rotinas criadas para a obtenção dos resultados em cada um dos casos.

4.1 - VIGAS – MÉTODO DA MUDANÇA NA FLEXIBILIDADE (PANDEY E BISWAS, 1994)

Neste trabalho foram estudados três tipos de vigas a saber: viga simplesmente apoiada, viga engastada e viga bi-apoiada com balanço. Estas vigas são apresentadas na Figura 4.1.

Na Tabela 4.1, encontram-se as propriedades das vigas estudadas. O material das vigas é concreto e para a análise numérica destas, foram simulados danos diminuindo em 15, 30, 50 e 70% a inércia do elemento finito correspondente ao local do dano. Na análise por elementos finitos, todas as vigas foram discretizadas em 30 elementos de 0,10 m de comprimento cada, nos quais foram considerados dois graus de liberdade por nó, conforme mostra a Figura 4.2.

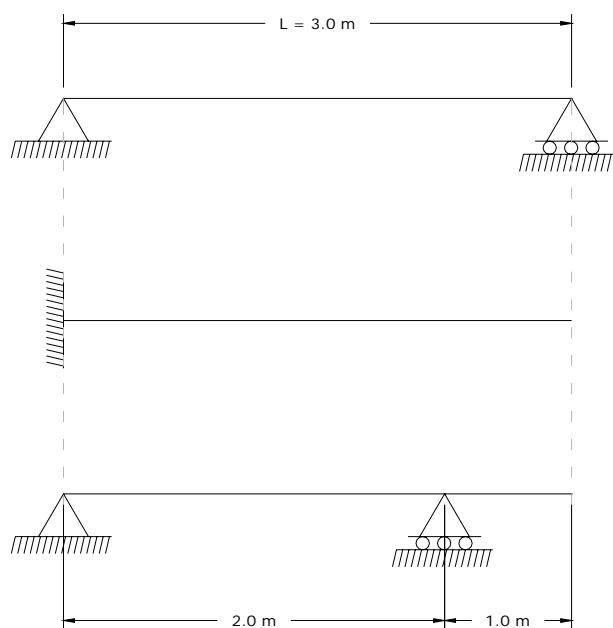


Figura 4.1 – Vigas estudadas com suas condições de apoio.

Tabela 4.1 - Propriedades das vigas.

Propriedade	Valor
Seção dos elementos	Retangular uniforme
Comprimento (L) [m]	3,0
Área da seção transversal (A) [m ²]	0,0336
Momento de Inércia (I) [m ⁴]	$1,16128 \times 10^{-4}$
Módulo de elasticidade (E) [N/m ²]	$2,0 \times 10^{10}$
Massa específica (ρ) [kg/m ³]	2500

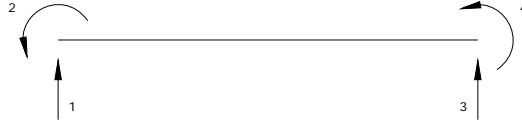


Figura 4.2 – Elementos de viga com dois graus de liberdade por nó.

A matriz de rigidez considerando a deformação por corte (Przemienieck, 1968) e a matriz de massa, para cada elemento de viga, estão dadas pelas Eqs. (4.1) e (4.2) respectivamente.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{\ell^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{\ell^2(1+\phi)} & \frac{-12EI}{\ell^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{\ell^2(1+\phi)} \\ \frac{6EI}{\ell^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{\ell(1+\phi)} & \frac{-6EI}{\ell^2(1+\phi)} & \frac{EI(2-\phi)}{\ell(1+\phi)} \\ \frac{-12EI}{\ell^3(1+\phi)} & \frac{-6EI}{\ell^2(1+\phi)} & \frac{12EI}{\ell^3(1+\phi)} & \frac{-6EI}{\ell^2(1+\phi)} \\ \frac{6EI}{\ell^2(1+\phi)} & \frac{EI(2-\phi)}{\ell(1+\phi)} & \frac{-6EI}{\ell^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{\ell(1+\phi)} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{M} = \rho A \ell \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Na Eq. (4.1), E é o módulo de elasticidade do elemento, I a inércia do elemento, ℓ o comprimento e ϕ é a constante de correção ao corte, que está dada pela Eq. (4.3).

Na Eq. (4.2), ρ é a densidade do material, A a área da seção transversal do elemento e ℓ é o comprimento do elemento:

$$\phi = \frac{12EI}{GA_s \ell^2} \quad (4.3)$$

onde G é o módulo de elasticidade transversal e A_s é a área de corte definida como $A_s = A/F_s$; F_s é a constante de deformação por corte, igual a 1,2 para seções retangulares.

Um diagrama de fluxo básico do programa utilizado para identificação de dano nas vigas é apresentado na Figura 4.3.

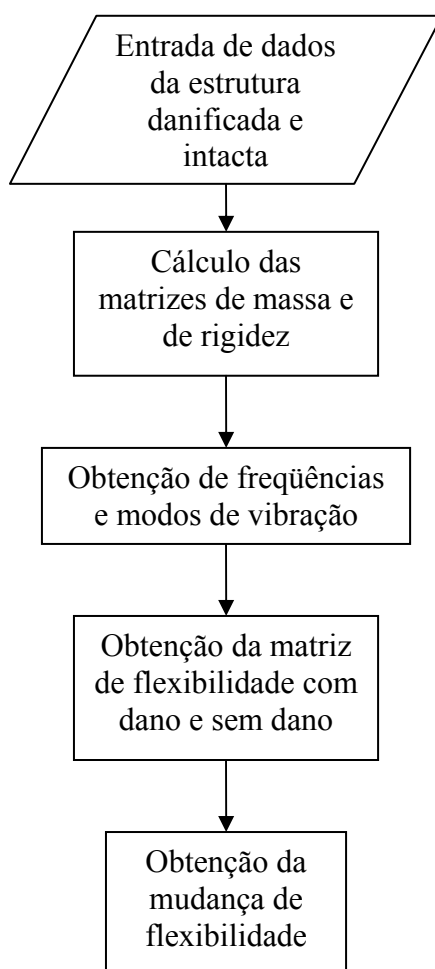


Figura 4.3 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso das vigas.

Com o intuito de trabalhar só com os graus de liberdade translacionais foi preciso realizar a condensação estática da matriz de rigidez para eliminar os graus de liberdade rotacionais da mesma. Feita a condensação estática da matriz de rigidez, a matriz de flexibilidade calculada posteriormente só considera os deslocamentos verticais em cada um dos nós dos elementos em que a viga foi decomposta. Assim pode ser obtida a gráfica da mudança de flexibilidade em cada nó da estrutura.

4.1.1 Viga simplesmente apoiada.

Foram simulados diferentes cenários de dano, com quatro possíveis locais danificados (ver Figura 4.4). Só foram simulados estes quatro locais, devido à simetria da viga.

Um dos locais de dano corresponde exatamente ao nó central resultante da discretização da viga em elementos finitos. Por esta razão o dano foi introduzido no elemento seguinte a este nó, ou seja, no elemento 16.

A discretização em elementos finitos com os elementos danificados pode ser observada na Figura 4.4. Em cada um dos elementos danificados, as porcentagens de dano introduzidas foram 15, 30, 50 e 70%.

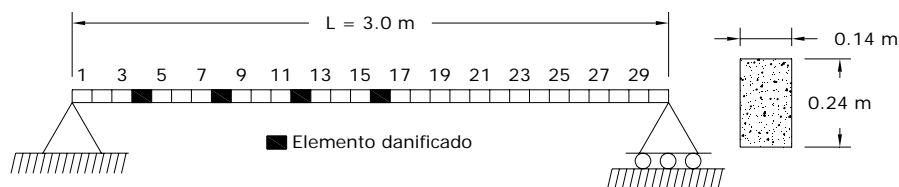


Figura 4.4 - Discretização em elementos finitos da viga simplesmente apoiada mostrando os elementos danificados e a seção transversal da viga.

As sete primeiras frequências obtidas para a viga simplesmente apoiada, encontram-se na Tabela 4.2 e os cinco primeiros modos de vibração da mesma viga são apresentados na Figura 4.5.

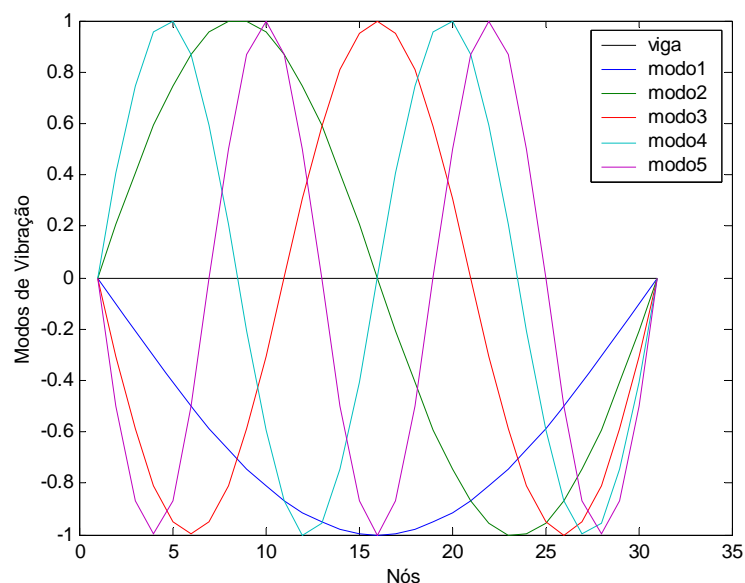


Figura 4.5 - Primeiros 5 modos de vibração da viga simplesmente apoiada.

Tabela 4.2 - Frequências da viga simplesmente apoiada (sem dano).

Modo	Frequências (Hz)
1	33,90
2	133,00
3	287,00
4	486,00
5	717,00
6	970,00
7	1230,00

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados obtidos ao aplicar o método proposto por Pandey e Biswas (1994) nos quatro cenários possíveis.

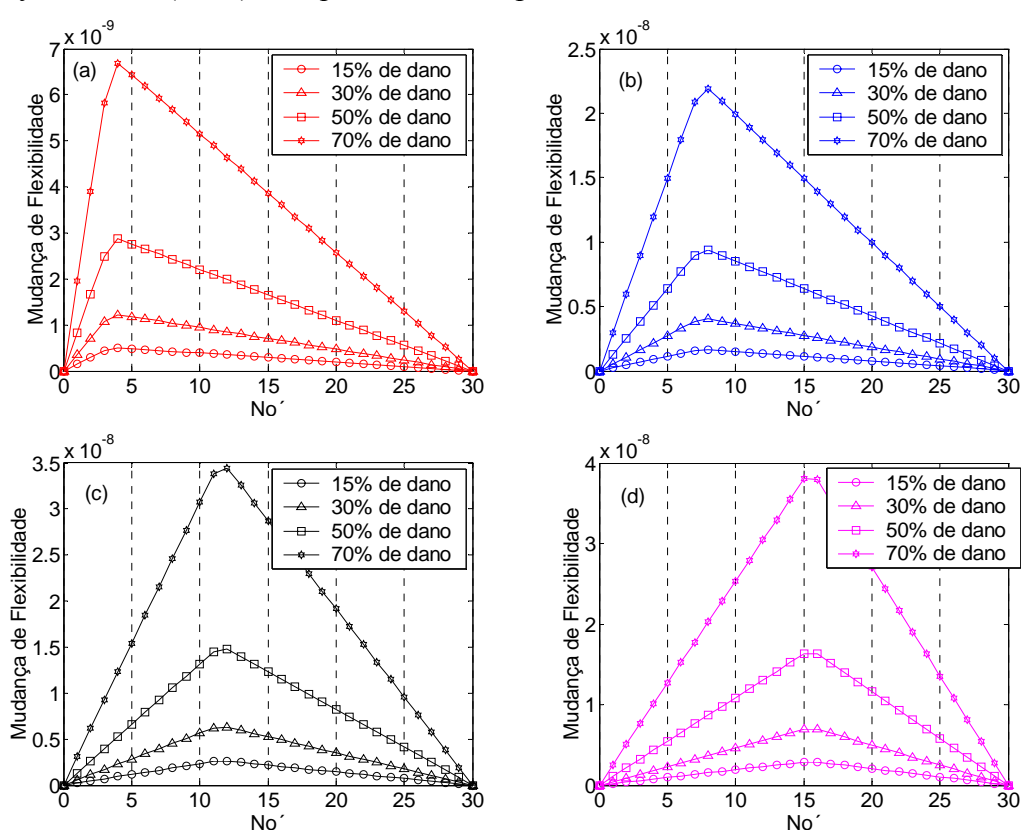


Figura 4.6 - Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, *et. al.* 1994) na viga simplesmente apoiada. (a) elemento 4; (b) elemento 8; (c) elemento 12; (d) elemento 16.

Cada um dos quatro gráficos corresponde a um local de dano diferente, no qual é representada a mudança de flexibilidade da viga para cada uma das porcentagens de dano mencionadas anteriormente. Pode-se observar que a mudança na flexibilidade aumenta com o aumento da porcentagem de dano introduzido na viga e em todos os casos o método conseguiu identificar o local de dano corretamente.

Estes resultados foram obtidos utilizando os sete primeiros modos de vibração da viga. É interessante mostrar o efeito que a quantidade de modos tem na obtenção dos resultados. Para isso, foi obtida a mudança na flexibilidade utilizando um modo, dois modos e sete modos de vibração, no caso da viga danificada no elemento 12 com 50% de redução na inércia. Os resultados são apresentados na Figura 4.7 e observa-se que, mesmo quando são utilizados um ou dois modos, obtém-se uma boa aproximação à curva construída a partir de sete modos, pelo qual, pode-se dizer que uma boa estimativa da mudança na flexibilidade, pode ser obtida a partir dos primeiros dois modos da estrutura.

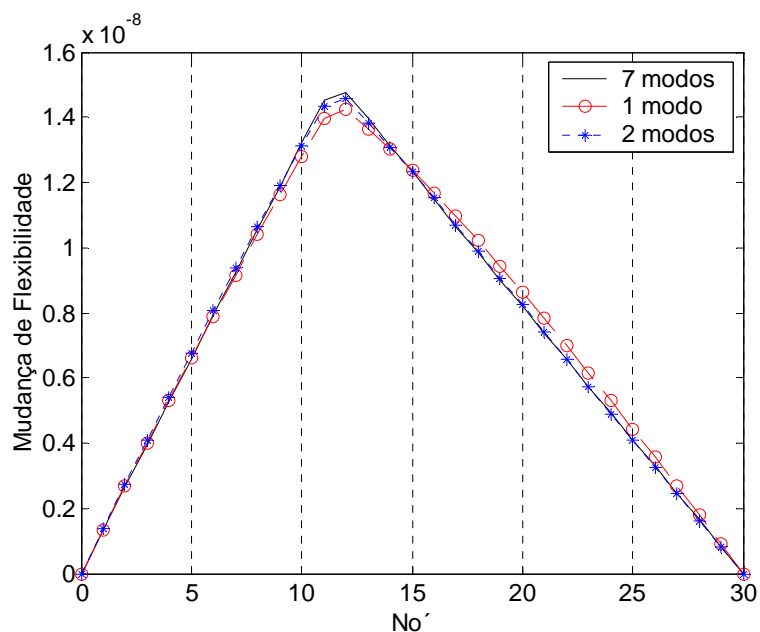


Figura 4.7 - Mudança de flexibilidade calculada a partir de 1 modo, 2 modos e 7 modos de vibração para a viga simplesmente apoiada.

4.1.2 Viga engastada.

Neste caso, foram simulados 7 cenários de dano diferentes conforme ilustrado na Figura 4.8.

A discretização em elementos finitos com os elementos danificados pode ser observada na mesma Figura 4.8 e como no caso anterior, em cada um dos elementos danificados as porcentagens de dano introduzidas foram 15, 30, 50 e 70%.

Já foi esclarecido que um dos locais de dano corresponde exatamente ao nó central resultante da discretização da viga em elementos finitos, e por tanto, o dano foi introduzido no elemento seguinte a este nó, ou seja, no elemento 16.

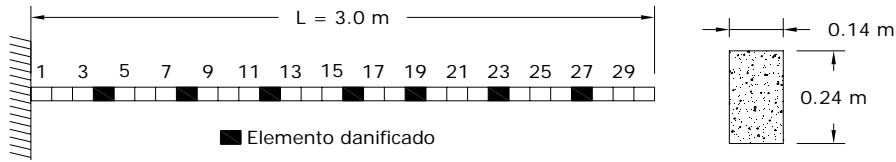


Figura 4.8 - Discretização em elementos finitos da viga engastada mostrando os elementos danificados e a seção transversal da viga.

As sete primeiras freqüências obtidas para a viga engastada, encontram-se na Tabela 4.3 e os cinco primeiros modos de vibração da mesma viga são apresentados na Figura 4.9.

Tabela 4.3- Freqüências da viga engastada (sem dano).

Modo	Freqüências (Hz)
1	12,13
2	74,25
3	200,68
4	375,03
5	586,31
6	823,46
7	1077,27

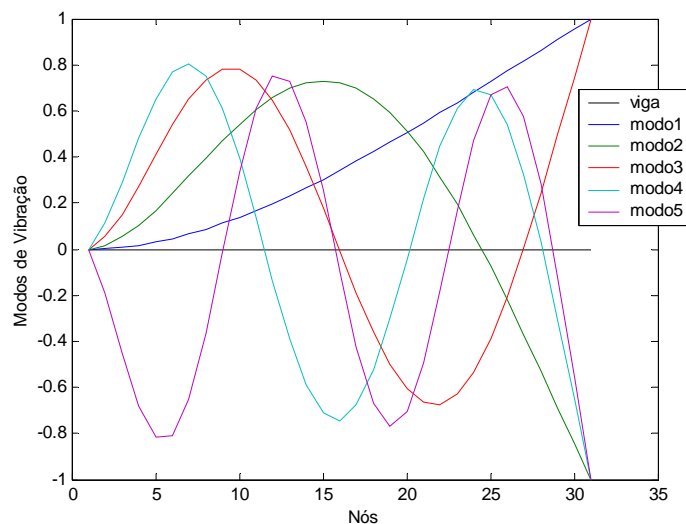


Figura 4.9 - Primeiros 5 modos de vibração da viga engastada.

Os resultados obtidos ao aplicar o método proposto por Pandey e Biswas (1994) na viga engastada nos 7 cenários de dano possíveis, são apresentados na Figura 4.10

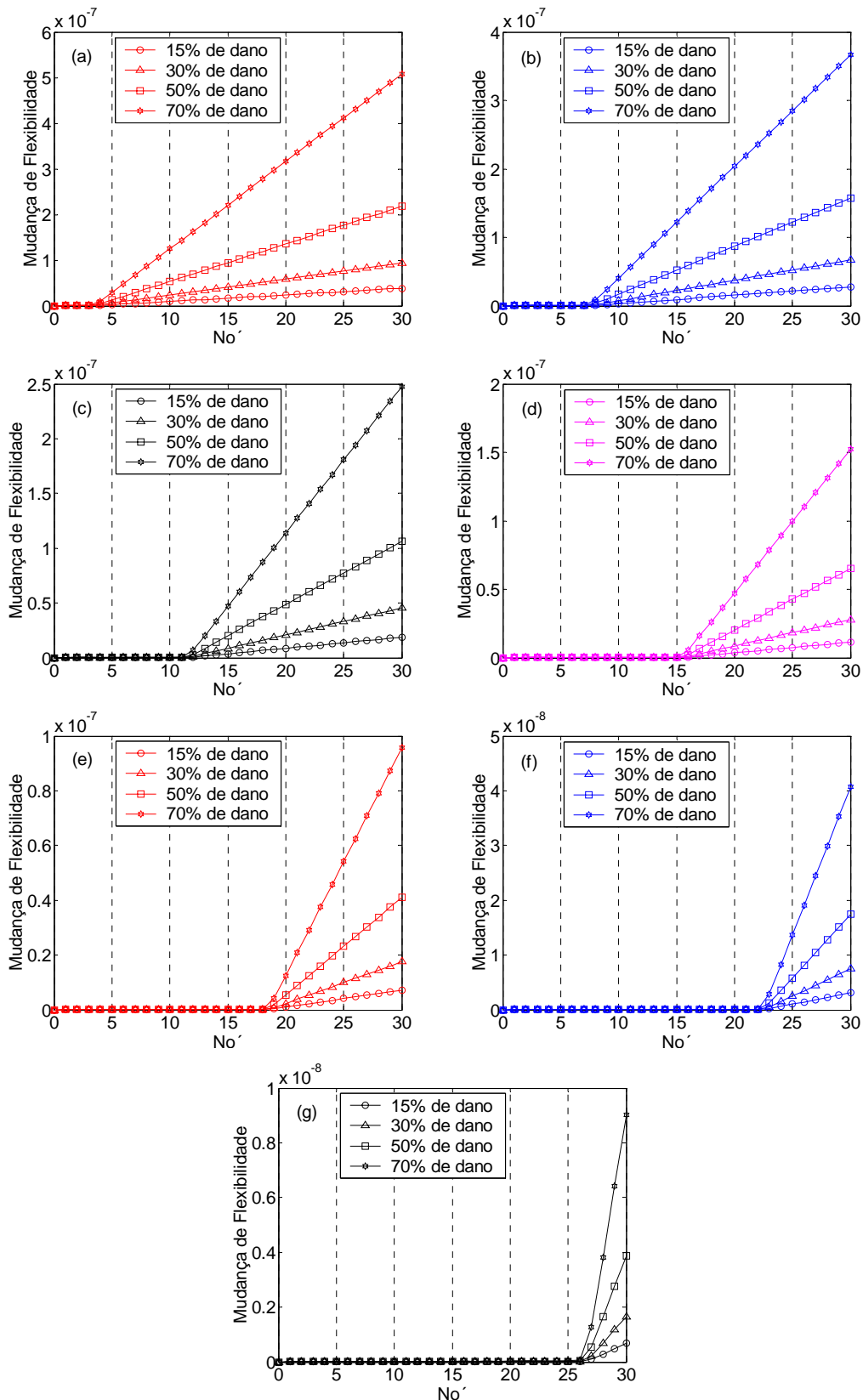


Figura 4.10 - Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, *et. al.* 1994) na viga engastada. (a) elemento 4; (b) elemento 8; (c) elemento 12; (d) elemento 16; (e) elemento 19; (f) elemento 23; (g) elemento 27.

Pode-se observar de forma similar ao caso da viga simplesmente apoiada, que a mudança na flexibilidade aumenta quando a viga encontra-se mais danificada. Neste caso, o método também consegue localizar corretamente a região danificada, pois a partir do local onde este se encontra pode-se observar que a flexibilidade começa a se incrementar. Dependendo da porcentagem de dano no elemento, a mudança na flexibilidade cresce com maior ou menor rapidez, isto é, para danos maiores a mudança na flexibilidade cresce com maior rapidez.

No caso da viga engastada, também se observa o fato de que poucos modos são suficientes para determinar a mudança de flexibilidade da estrutura, como observado na Figura 4.11.

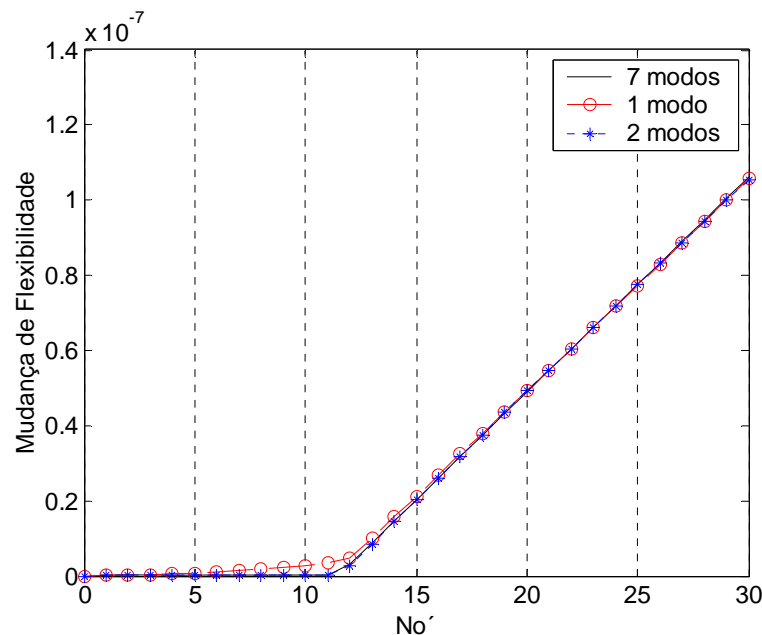


Figura 4.11 – Mudança de flexibilidade calculada a partir de 1 modo, 2 modos e 7 modos de vibração para a viga engastada.

4.1.3 Viga bi-apoiada com balanço.

Neste caso, foram simulados 7 cenários de dano diferentes conforme ilustrado na Figura 4.12.

De forma igual aos dois casos anteriores, um dos locais de dano corresponde exatamente ao nó central resultante da discretização da viga em elementos finitos e, por conseguinte, o dano foi introduzido no elemento seguinte a este nó, ou seja, no elemento 16.

A discretização em elementos finitos da viga estudada, com os elementos danificados pode ser observada na Figura 4.12 e como nos casos anteriores, em cada um dos elementos danificados, as porcentagens de dano introduzidas foram 15, 30, 50 e 70%.

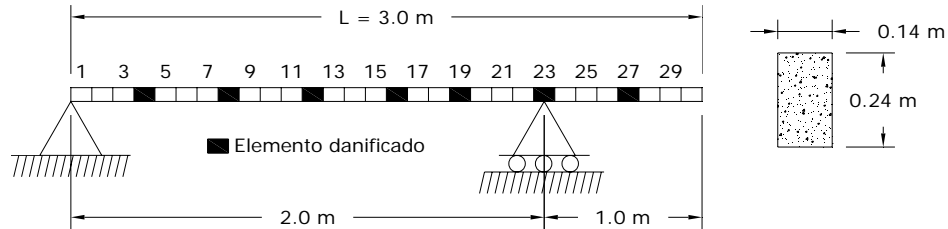


Figura 4.12 - Discretização em elementos finitos da viga bi-apoiada com balanço mostrando os elementos danificados e a seção transversal da viga.

As sete primeiras frequências da viga bi-apoiada com balanço encontram-se na Tabela 4.4 e os cinco primeiros modos de vibração obtidos para a mesma viga são apresentados na Figura 4.13.

Tabela 4.4 - Frequências da viga bi-apoiada com balanço (sem dano).

Modo	Frequências (Hz)
1	48,90
2	112,00
3	311,00
4	492,00
5	641,00
6	994,00
7	1230,00

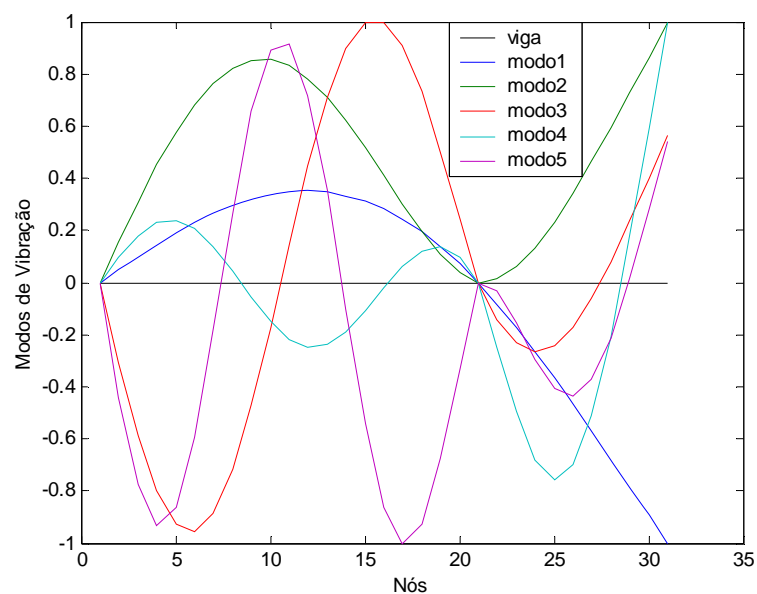


Figura 4.13 - Primeiros 5 modos de vibração da viga bi-apoiada com balanço.

Nas Figura 4.14 e Figura 4.15 apresentam-se os gráficos dos resultados obtidos para a viga bi-apoiada com balanço quando os elementos 4, 8, 12 e 16 são danificados com as percentagens de dano mencionadas anteriormente. Observa-se que para os casos em que o dano encontra-se localizado entre os apoios, a mudança de flexibilidade é muito similar à mudança de flexibilidade obtida para a viga simplesmente apoiada.

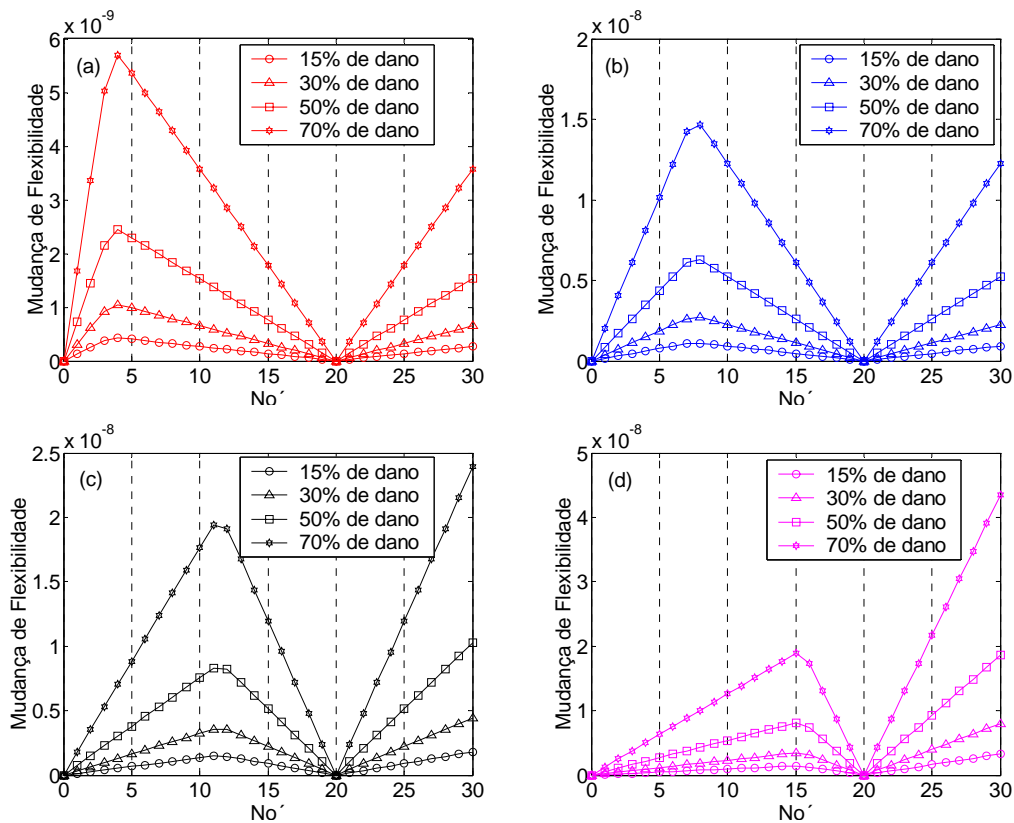


Figura 4.14 – Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, et. al. 1994) na viga bi-apoiada com balanço. (a) elemento 4; (b) elemento 8; (c) elemento 12; (d) elemento 16.

As Figura 4.10 (f) e (g) é igual a Figura 4.15 (b) e (c) respectivamente. Estes dois casos correspondem à viga engastada e à viga bi-apoiada com balanço. Como visto na viga engastada, a mudança de flexibilidade só se apresenta a partir do local do dano. Como os danos localizados nos elementos 23 e 27 da viga bi-apoiada com balanço encontram-se precisamente no balanço da mesma, a mudança de flexibilidade apresenta-se depois destes danos fazendo com que os gráficos sejam iguais. Numericamente os resultados também são iguais devido às propriedades físicas das vigas, como seção, material e geometria, serem as mesmas.

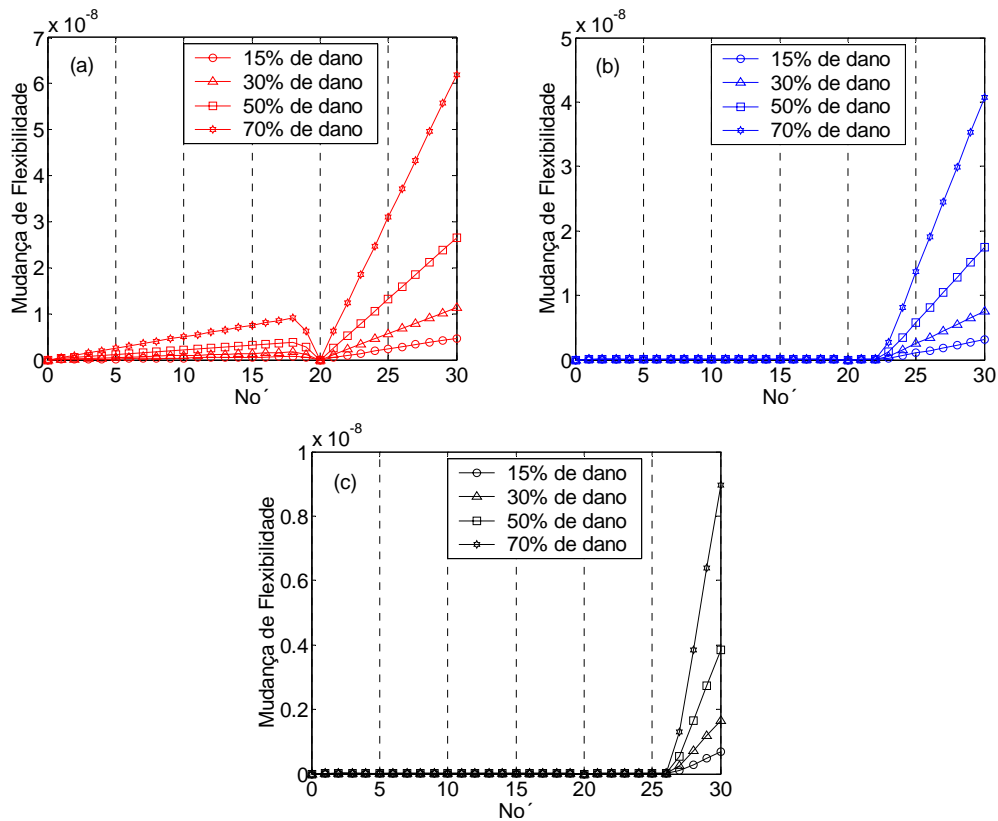


Figura 4.15 – Resultados da aplicação do método de identificação de dano (Pandey, *et. al.* 1994) na viga bi-apoiada com balanço. (a) elemento 19; (b) elemento 23; (c) elemento 27.

O método apresentou resultados satisfatórios na identificação das regiões danificadas. Esperava-se que o método não conseguisse identificar o dano localizado no elemento 23, pois neste elemento a estrutura apresenta deslocamento nulo devido ao apoio, porém, vale a pena ressaltar que o método conseguiu identificar corretamente o dano. Uma possível justificativa disto é que a diferença de flexibilidade é calculada nos nós da viga e não no elemento propriamente dito, o que permite a correta localização do dano.

4.2 - TRELIÇAS PLANAS - MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS USANDO VETORES DE CARGA (BERNAL, 2000) E MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A VIBRAÇÕES AMBIENTES USANDO MUDANÇAS NA FLEXIBILIDADE (GAO E SPENCER, 2002)

Nesta segunda parte foram estudadas duas treliças planas com diferentes condições de apoio e graus de hiperestaticidade. Para todos os exemplos, foram obtidos numericamente os modos e as frequências de vibração para as estruturas danificadas e sem dano.

O dano nos elementos das estruturas foi simulado como uma redução do módulo de elasticidade do material. Neste caso, para a análise por elementos finitos, foi utilizada a matriz de massa consistente, descrita conforme a Eq. (4.4). A Eq. (4.5) corresponde à matriz de rigidez utilizada:

$$\mathbf{M} = \frac{\rho\ell}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{K} = \frac{EA}{\ell} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

onde ℓ é o comprimento do elemento de treliça.

Um diagrama de fluxo básico do programa utilizado para identificar o dano nas treliças segundo o método de Bernal (2000) é apresentado na Figura 4.16, e na Figura 4.17 é apresentado o fluxograma segundo o método de Gao e Spencer (2002). Ambos os métodos foram aplicados a cada treliça.

Como pode ser observado na Figura 4.16, seguindo a metodologia de Bernal (2000), primeiro é feita a identificação do local do dano para depois fazer a quantificação dos danos. Já na metodologia de Gao e Spencer (2002) o processo localiza um dos elementos e seguidamente quantifica o dano nele para depois procurar por mais elementos danificados, se houver (Figura 4.17).

Para a verificação das rotinas programadas em Matlab foram simulados os exemplos realizados pelos métodos.

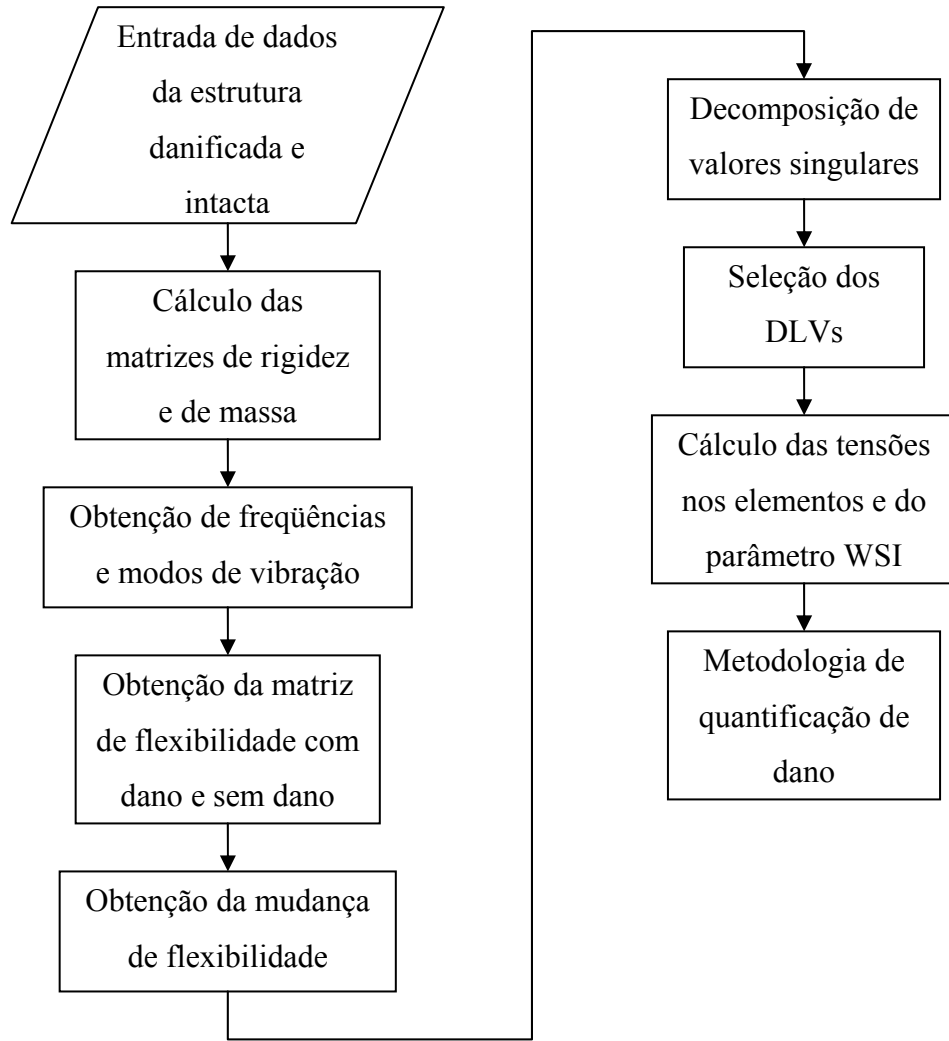


Figura 4.16 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso das treliças segundo o método de Bernal (2000).

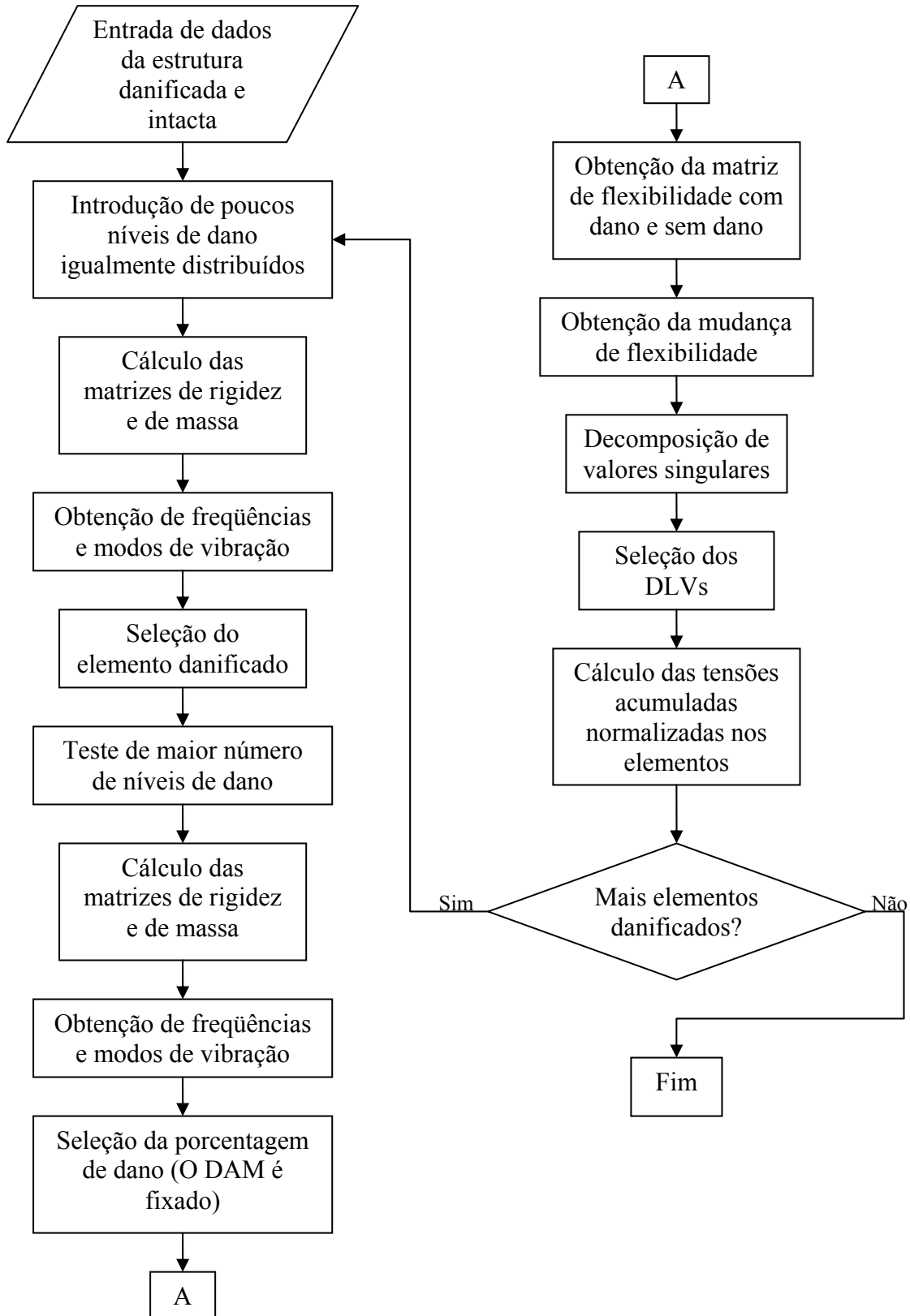


Figura 4.17 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso das treliças segundo o método de Gao e Spencer (2002).

4.2.1 Treliça plana T1.

A primeira treliça plana, denominada T1 apresenta grau de hiperstaticidade total igual a um, proveniente do apoio superabundante que ela tem (se tirássemos o apoio superabundante, a treliça seria isostática). A treliça tem nove nós e 25 elementos, conforme mostra a Figura 4.18, e as suas características encontram-se na Tabela 4.5.

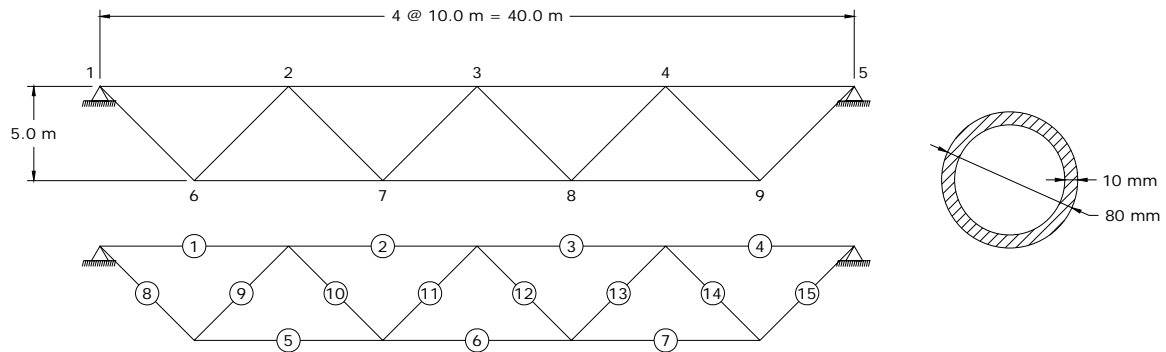


Figura 4.18 - Treliça plana T1 e seção transversal dos elementos componentes.

Tabela 4.5 - Características da treliça plana T1.

Propriedades	Valor
Seção uniforme dos elementos	Circular oca
Área da seção transversal (A) [m ²]	0,0022
Módulo de elasticidade (E) [N/m ²]	2,0 x 10 ¹¹
Massa específica (ρ) [kg/m ³]	7827

Supondo que a treliça T1 da Figura 4.18 seja submetida a carregamentos verticais iguais e de magnitude arbitrária nos nós do banzo inferior (situação mais usual nesta estrutura), os elementos mais solicitados são precisamente os pertencentes a este banzo. Os elementos onze e doze apresentam tensão nula e os elementos do banzo superior ficam submetidos às tensões mais baixas de todos os componentes da treliça (Figura 4.19).

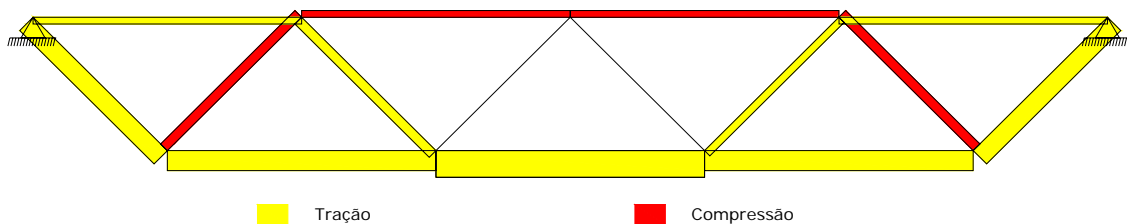


Figura 4.19 - Distribuição de tensões na treliça T1 quando carregada verticalmente nos nós do banzo inferior.

Esta análise foi realizada com o intuito de fazer a escolha dos elementos a serem danificados. Como o método trabalha com as tensões dos elementos da treliça, é de particular interesse a análise dos casos extremos de elementos com a maior e a menor tensão e algumas combinações deles. Embora todos os elementos da estrutura em questão sejam imprescindíveis para a estabilidade da mesma, também foram escolhidos para estudo os elementos que chegam a um dos apoios.

Os seis primeiros modos de vibração da treliça T1 são apresentados na Figura 4.20 e as dez primeiras frequências obtidas para a mesma treliça, encontram-se na Tabela 4.6.

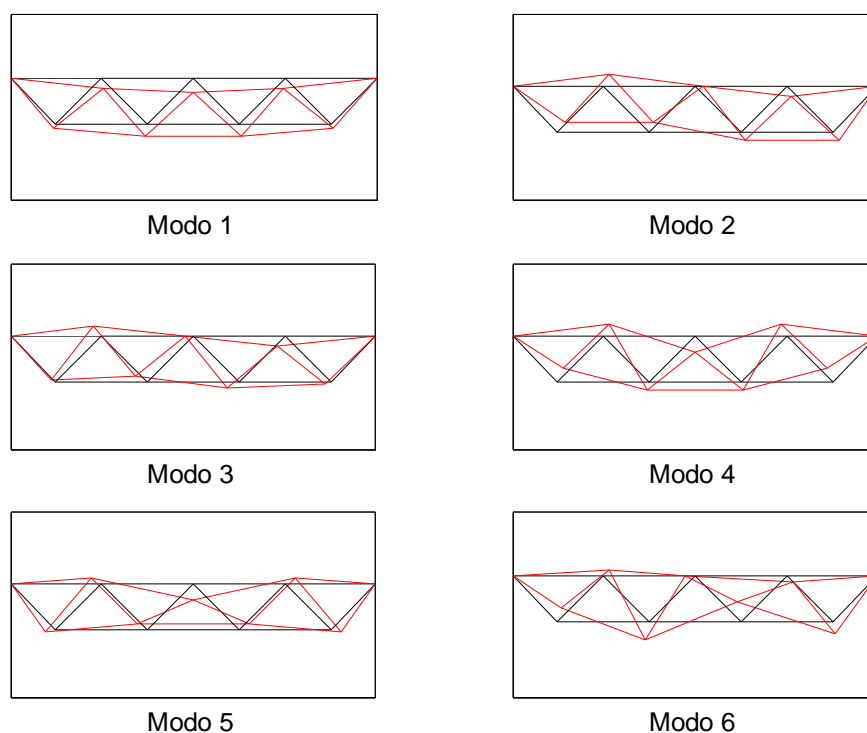


Figura 4.20 - Primeiros 6 modos de vibração da treliça T1.

Pelas razões anteriormente expostas, na análise são simulados os seguintes cenários de dano: o elemento mais solicitado, um dos elementos menos solicitados e três grupos de elementos. Como as metodologias utilizadas são diferentes, fez-se necessário testar um maior número de níveis de dano quando foi usada a metodologia de Gao e Spencer (2002). Para este caso as porcentagens de dano foram de 15, 30, 40, 50 e 70% para todos os cenários. Já quando foi usada a metodologia de Bernal (2000) as porcentagens de dano foram de 15, 30, 50 e 70% para todos os cenários.

Tabela 4.6 - Frequências sem dano da treliça T1.

Modo	Frequências (Hz)
1	1,611
2	4,106
3	6,368
4	8,920
5	12,298
6	13,519
7	17,703
8	18,236
9	19,137
10	20,418

ANÁLISE DE T1 NO CASO DO ELEMENTO 6 DANIFICADO (O MAIS SOLICITADO).

Na Figura 4.21 apresenta-se a treliça T1 com o elemento 6 danificado.

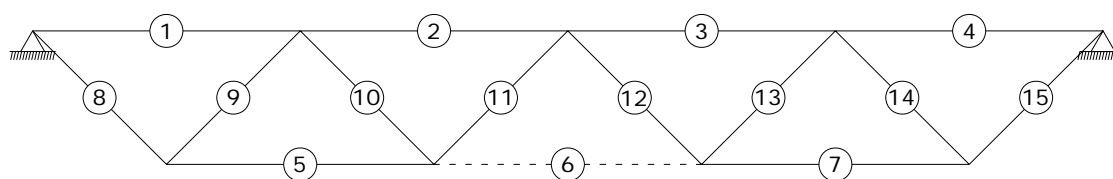


Figura 4.21 - Elemento 6 danificado na treliça T1.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.7 e os resultados do valor do parâmetro WSI de todos os elementos para cada uma das análises são apresentados na Figura 4.22.

Tabela 4.7 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 é danificado.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	6	6	15	0,028
30	6	6	30	0,020
50	6	6	50	0,011
70	6	6	70	0,004

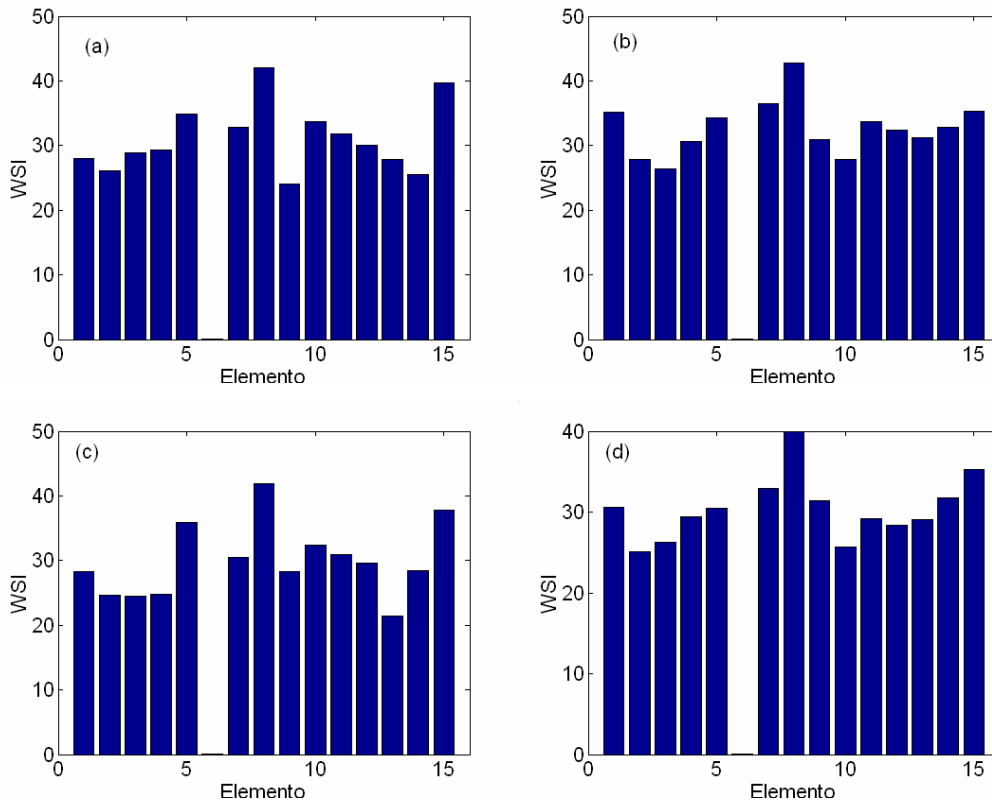


Figura 4.22 - Valores WSI quando o elemento 6 está danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

O método conseguiu identificar corretamente o elemento danificado, e as porcentagens de dano obtidas com o processo de quantificação são iguais às porcentagens de dano introduzidas em cada caso. Dessa forma, o método mostrou-se eficiente em ambos os processos, localização e quantificação do dano. Para as quatro análises, os valores do parâmetro WSI para todos os elementos da treliça são apresentados nos anexos, na Tabela A.1.1, Tabela A.1.2, Tabela A.1.3 e na Tabela A.1.4.

METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.8.

Observando os resultados na Tabela 4.8, pode-se verificar que essa metodologia também se mostrou eficiente quando aplicada neste caso. Na referida tabela, apresentam-se também os resultados de tensão acumulada normalizada para o elemento danificado. Em todos os

casos, os valores são muito pequenos o que permite afirmar, sem cometer erros significativos, que a tensão nestes elementos é nula.

Tabela 4.8 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando o elemento 6 é danificado.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	6	6	15	$1,12 \times 10^{-5}$
30	6	6	30	$9,26 \times 10^{-6}$
40	6	6	40	$9,74 \times 10^{-6}$
50	6	6	50	$6,62 \times 10^{-6}$
70	6	6	70	$3,97 \times 10^{-6}$

ANÁLISE DE T1 NO CASO DO ELEMENTO 12 DANIFICADO (UM DOS MENOS SOLICITADO)

Na Figura 4.23 apresenta-se a treliça T1 com o elemento 12 danificado.

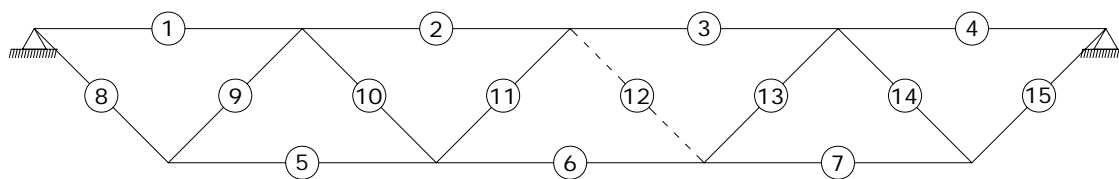


Figura 4.23 - Elemento 12 danificado na treliça T1.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.9 e os resultados do valor do parâmetro WSI de todos os elementos para cada uma das análises realizadas são apresentados na Figura 4.24.

Tabela 4.9 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 é danificado.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	12	12	15	0,048
30	12	12	30	0,035
50	12	12	50	0,020
70	12	12	70	0,009

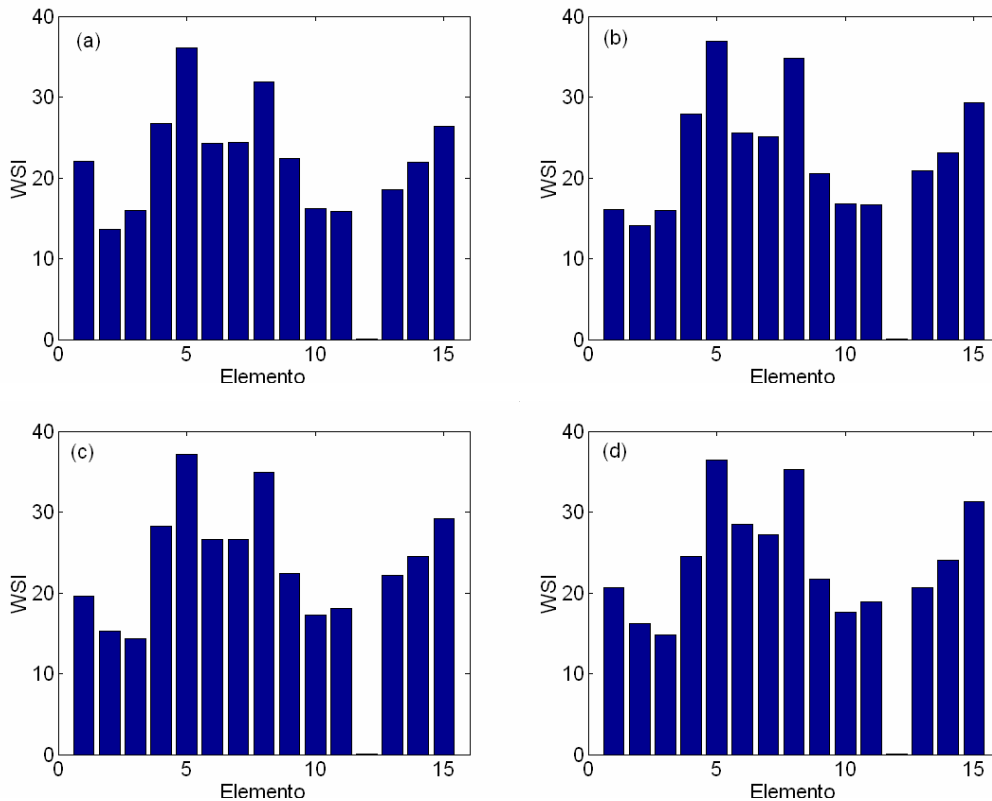


Figura 4.24 - Valores WSI quando o elemento 12 está danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

O método identifica claramente o elemento danificado, pois o valor do parâmetro WSI correspondente é muito pequeno, próximo de zero para cada uma das porcentagens de dano introduzidas. Para as quatro análises, os valores do parâmetro WSI são apresentados nos anexos, na Tabela A.1.5, Tabela A.1.6, Tabela A.1.7 e na Tabela A.1.8.

METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.10.

Nos casos onde foram introduzidos danos de 30, 40, 50 e 70% o método identificou corretamente o dano, pois indicou só o elemento 12 que é aquele realmente danificado e as porcentagens de dano calculadas em cada um destes casos foi correta. Já no caso de 15% de dano o método além do elemento realmente danificado, também indicou o elemento 6 como danificado com 1% de dano. Neste caso, como a porcentagem de dano indicada pelo método foi muito baixa, pode-se concluir que o método apresentou resultados aceitáveis.

Tabela 4.10 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando o elemento 12 é danificado.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	12	12	15	$6,77 \times 10^{-5}$
	-	6	1	$1,22 \times 10^{-5}$
30	12	12	30	$5,58 \times 10^{-5}$
40	12	12	40	$4,78 \times 10^{-5}$
50	12	12	50	$3,98 \times 10^{-5}$
70	12	12	70	$2,39 \times 10^{-5}$

ANÁLISE DE T1 NO CASO DOS ELEMENTOS 1 E 8 DANIFICADOS (PERTO DE UM DOS APOIOS)

Na Figura 4.25 apresenta-se a treliça T1 com os elementos 1 e 8 danificados.

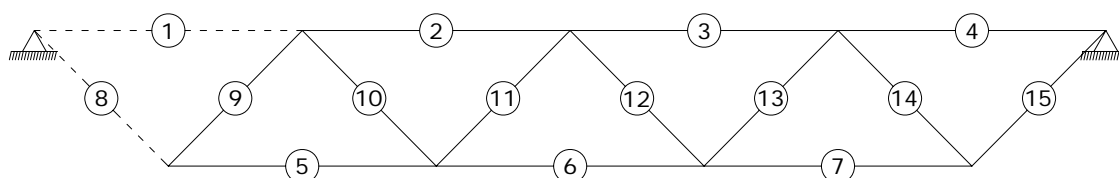


Figura 4.25 - Elementos 1 e 8 danificados na treliça T1.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	1	1	15	0,149
	8	8	15	0,161
30	1	1	30	0,108
	8	8	30	0,115
50	1	1	50	0,060
	8	8	50	0,058
70	1	1	70	0,025
	8	8	70	0,020

O resultado gráfico do parâmetro WSI é apresentado na Figura 4.26, para os diferentes níveis de dano supostos.

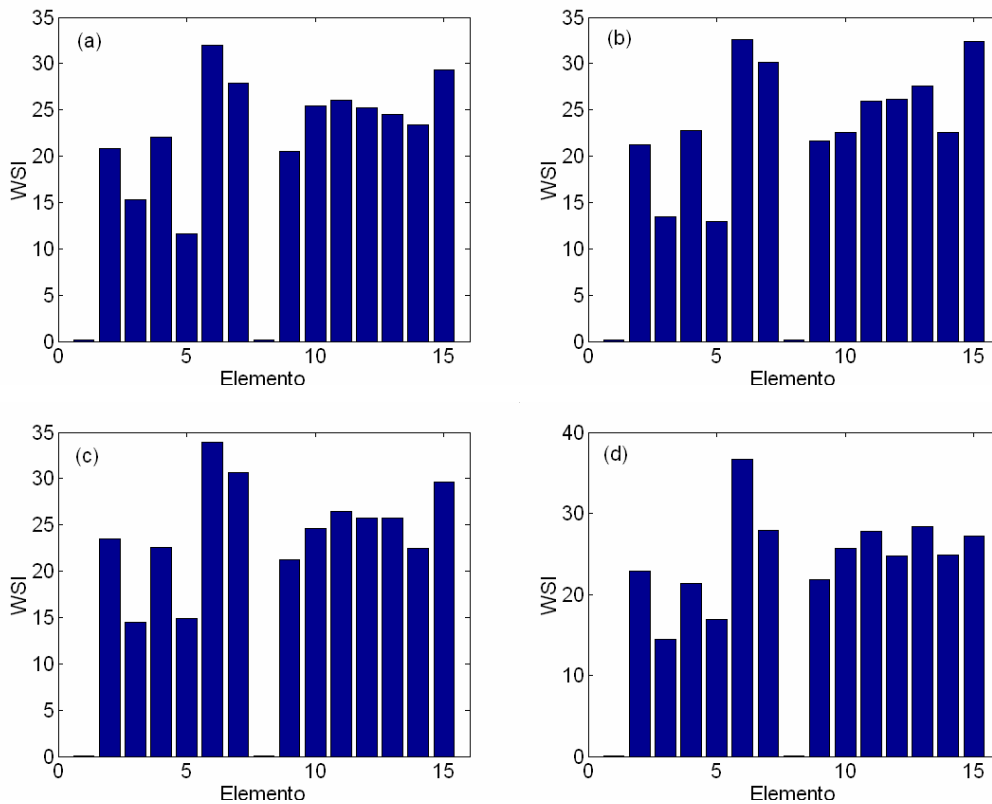


Figura 4.26 - Valores WSI quando os elementos 1 e 8 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

Neste caso, com dois elementos danificados, o método também identificou as regiões danificadas. Claramente, o valor do parâmetro WSI nos elementos danificados encontra-se próximo do valor zero para todas as porcentagens de dano introduzidas. Os valores do parâmetro WSI em todas as análises são apresentados nos anexos, na Tabela A.1.9, Tabela A.1.10, Tabela A.1.11 e na Tabela A.1.12.

METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.12.

Para os casos de 30, 40, 50 e 70% de dano o método identificou as regiões de dano corretamente, pois indicou só os elementos realmente danificados com porcentagens de

dano próximas às porcentagens de dano introduzidas no modelo. Apenas em uma das análises (15% de dano), o método assinalou, além dos elementos realmente danificados, um elemento com 1% de dano, apresentando resultados aceitáveis.

Tabela 4.12 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	1	1	14	$4,00 \times 10^{-4}$
	8	8	14	$1,86 \times 10^{-5}$
	-	6	1	$1,23 \times 10^{-5}$
30	1	1	27	$3,33 \times 10^{-4}$
	8	8	26	$1,52 \times 10^{-5}$
40	1	1	34	$2,74 \times 10^{-4}$
	8	8	34	$1,30 \times 10^{-5}$
50	1	1	42	$2,24 \times 10^{-4}$
	8	8	43	$1,09 \times 10^{-5}$
70	1	1	58	$1,58 \times 10^{-4}$
	8	8	62	$6,52 \times 10^{-6}$

ANÁLISE DE T1 NO CASO DOS ELEMENTOS 1, 8 E 9 DANIFICADOS (PERTO DE UM DOS APOIOS)

Na Figura 4.27 apresenta-se a treliça T1 com os elementos 1, 8 e 9 danificados.

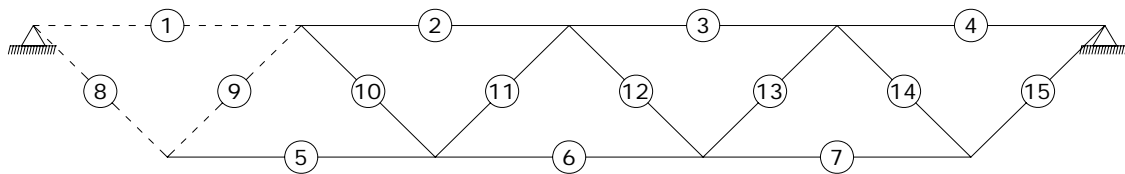


Figura 4.27 - Elementos 1, 8 e 9 danificados na treliça T1.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.13, e o resultado gráfico do parâmetro WSI é apresentado na Figura 4.28, para os diferentes níveis de dano supostos. Os valores do parâmetro WSI para todos os elementos da treliça encontram-se na Tabela A.1.13, Tabela A.1.14, Tabela A.1.15 e na Tabela A.1.16.

Tabela 4.13 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	1	1	15	0,649
	8	8	15	1,566
	9	9	15	2,404
30	1	1	30	0,745
	8	8	30	1,553
	9	9	30	2,475
50	1	1	50	0,815
	8	8	50	1,100
	9	9	50	1,543
70	1	1	70	0,528
	8	8	70	0,496
	9	9	70	0,685

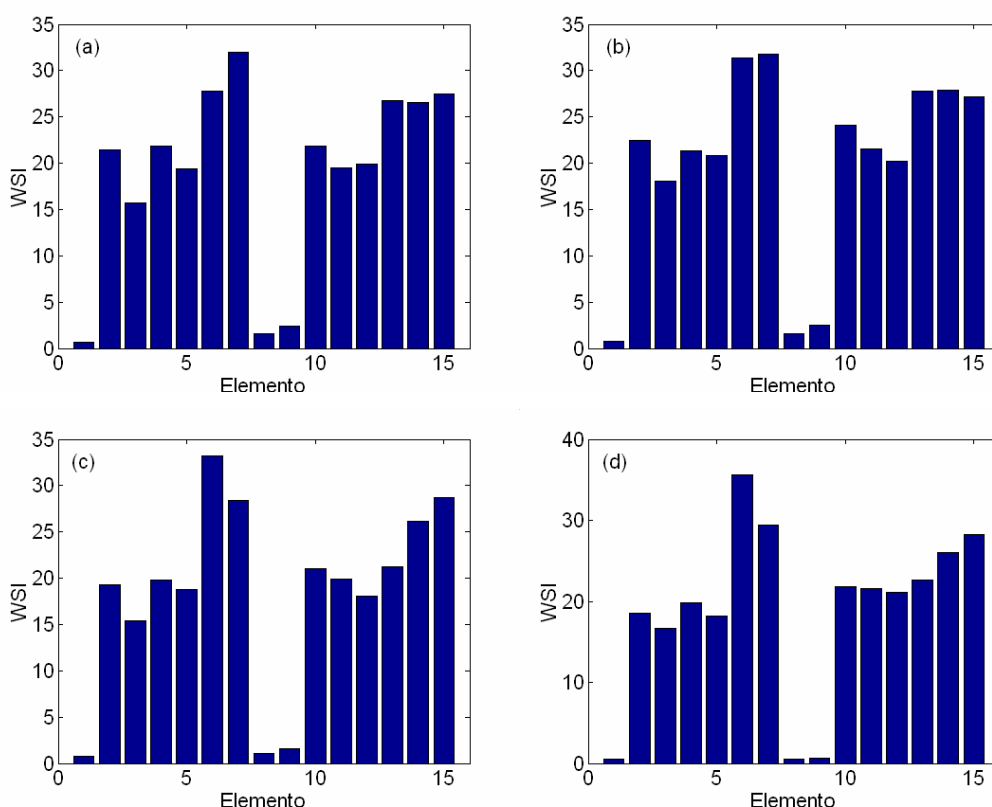


Figura 4.28 - Valores WSI quando os elementos 1, 8 e 9 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

Pode-se observar que os valores de WSI para os elementos 8 e 9 considerando 15, 30 e 50%, apresentam-se maiores do que a unidade que é o limite proposto por Bernal (2002). Visualmente, na Figura 4.28, os valores do referido parâmetro para todos os elementos danificados são comparativamente muito menores que os valores apresentados em

correspondência com os elementos não danificados. A partir deste fato, pode-se inferir que estes elementos estão danificados.

METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	1	1	17	$4,85 \times 10^{-4}$
	8	8	18	$1,90 \times 10^{-5}$
	9	9	15	$7,72 \times 10^{-5}$
	-	6	1	$1,48 \times 10^{-5}$
30	1	1	30	$4,27 \times 10^{-4}$
	8	8	26	$1,93 \times 10^{-5}$
	9	9	29	$7,16 \times 10^{-5}$
40	1	1	46	$3,57 \times 10^{-4}$
	8	8	36	$1,64 \times 10^{-5}$
	9	9	37	$6,12 \times 10^{-5}$
50	1	1	46	$2,83 \times 10^{-4}$
	8	8	47	$1,50 \times 10^{-5}$
	9	9	51	$5,12 \times 10^{-5}$
	-	4	5	$5,28 \times 10^{-4}$
70	1	1	72	$7,28 \times 10^{-5}$
	8	8	76	$4,96 \times 10^{-6}$
	9	9	91	$3,07 \times 10^{-5}$
	-	3	51	$1,74 \times 10^{-4}$
	-	4	51	$3,42 \times 10^{-4}$
	-	7	57	$2,31 \times 10^{-5}$
	-	6	17	$4,96 \times 10^{-6}$
	-	2	63	$4,39 \times 10^{-4}$
	-	15	13	$1,21 \times 10^{-5}$

Observa-se na Tabela 4.14 que para as cinco análises (15, 30, 40, 50 e 70%) nos elementos 1, 8 e 9, o método identifica corretamente os locais de dano. As porcentagens de dano calculadas pelo método para estes elementos que estão realmente danificados encontram-se próximas dos que foram introduzidos. Na análise considerando 15% de dano o método indicou além dos elementos realmente danificados, o elemento 6 com 1% de dano. Na

análise considerando 50% de dano o método assinalou, além dos elementos realmente danificados, o elemento 4 com 1% de dano. Nestes últimos dois casos, a porcentagem de dano é muito baixa pelo que o elemento não é considerado como realmente danificado como já foi mencionado anteriormente. Já na análise introduzindo 70% de dano, o método, além dos elementos realmente danificados, indicou mais seis elementos como danificados com porcentagens de dano consideráveis, como o elemento 2 com 63% de dano, o elemento 3 com 51% de dano e o elemento 7 com 57% de dano. Por esses motivos, o método não foi satisfatório para 70% de dano com a combinação de elementos em questão.

ANÁLISE DE T1 NO CASO DOS ELEMENTOS 6, 7 E 12 DANIFICADOS

Na Figura 4.29 apresenta-se a treliça T1 com os elementos 6, 7 e 12 danificados.

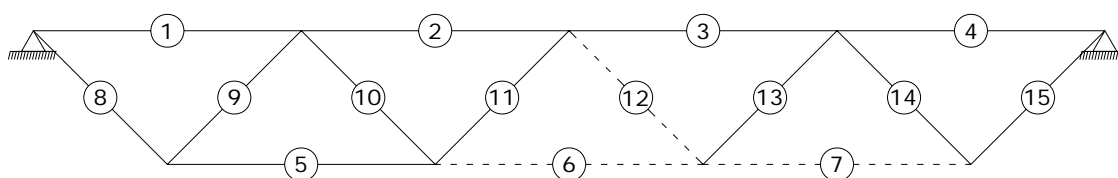


Figura 4.29 - Elementos 6, 7 e 12 danificados na treliça T1.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.15 e o resultado gráfico do parâmetro WSI é apresentado na Figura 4.30, para os diferentes níveis de dano supostos (os valores do parâmetro WSI para todos os elementos são apresentados nos anexos, na Tabela A.1.17, Tabela A.1.18, Tabela A.1.19 e na Tabela A.1.20).

Como já observado nos casos anteriores, o valor do parâmetro WSI é maior do que a unidade para os elementos danificados com uma única exceção do elemento 6 no caso de 70% de dano. Também de forma visual, os elementos danificados apresentam valores do referido parâmetro comparativamente menores que aqueles apresentados pelos elementos não danificados, podendo-se inferir que estão realmente danificados.

Tabela 4.15 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	6	6	15	2,458
	7	7	15	3,161
	12	12	15	4,954
30	6	6	30	2,317
	7	7	30	2,961
	12	12	30	4,630
50	6	6	50	1,689
	7	7	50	2,147
	12	12	50	3,412
70	6	6	70	0,981
	7	7	70	1,234
	12	12	70	2,002

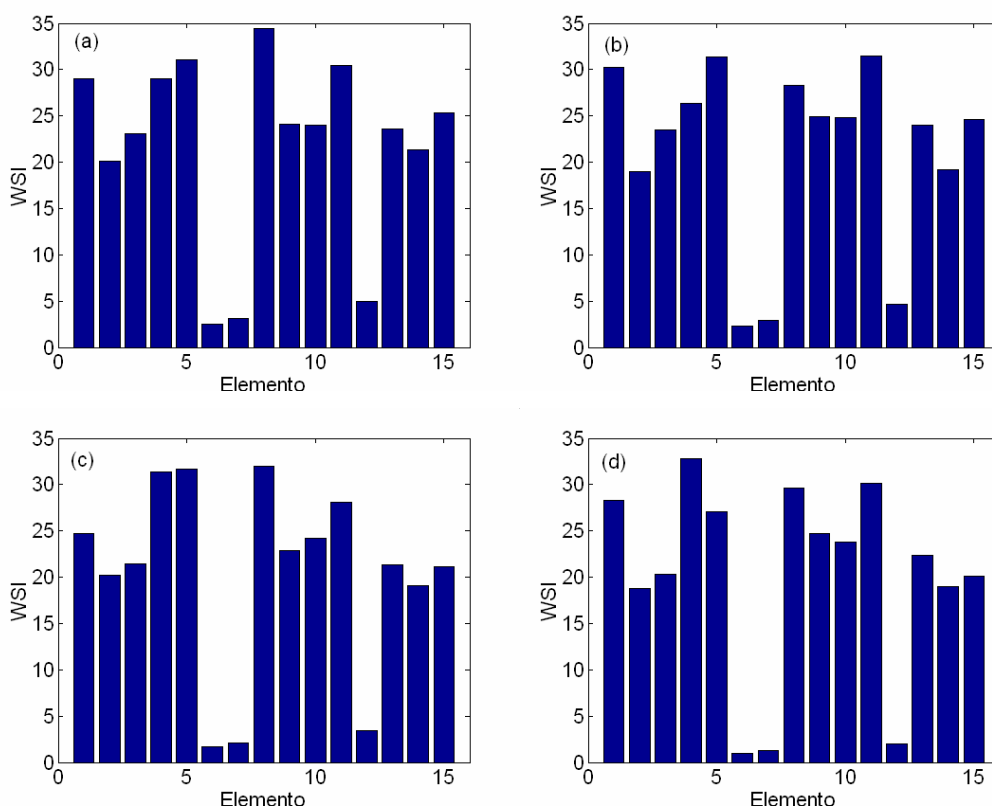


Figura 4.30 – Valores WSI quando os elementos 6, 7 e 12 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.16.

Pode-se observar que quando o dano considerado é 15%, os elementos são identificados corretamente com porcentagens coincidentes com as introduzidas. No caso da análise considerando 30% de dano o método não identifica dois dos três elementos danificados (6 e 7), identifica corretamente o elemento doze com a respectiva porcentagem de dano mas também indica dois elementos não danificados (1 e 2) com porcentagens de dano pequenas. Situação similar acontece quando o dano é de 40%. Já nos casos considerando níveis mais altos de dano, 50 e 70%, o método apresenta resultados coerentes em relação aos elementos danificados e às porcentagens de dano.

Tabela 4.16 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	6	6	15	$1,24 \times 10^{-5}$
	7	7	14	$2,12 \times 10^{-5}$
	12	12	15	$6,70 \times 10^{-5}$
30	6	-	-	-
	7	-	-	-
	12	12	26	$5,43 \times 10^{-5}$
	-	1	1	$6,77 \times 10^{-4}$
	-	2	9	$1,20 \times 10^{-3}$
40	6	-	-	-
	7	-	-	-
	12	12	27	$4,59 \times 10^{-5}$
	-	14	4	$1,07 \times 10^{-4}$
50	6	6	52	$7,95 \times 10^{-6}$
	7	7	39	$1,26 \times 10^{-5}$
	12	12	42	$3,78 \times 10^{-5}$
70	6	6	61	$5,10 \times 10^{-6}$
	7	7	56	$7,15 \times 10^{-6}$
	12	12	63	$2,27 \times 10^{-5}$

Como já foi comentado ao longo do desenvolvimento desta parte do trabalho, a metodologia de Gao e Spencer (2002) em alguns casos indica alguns elementos

danificados quando não estão e em outros casos deixa de indicar os elementos danificados. Também pode-se observar que é factível que se apresentem as duas possibilidades para um mesmo caso.

Na Tabela 4.17 é apresentado um resumo dos elementos que a referida metodologia indicou como danificados quando realmente não estavam danificados ao ser aplicada para avaliar danos na treliça T1.

Na referida tabela encontram-se os elementos organizados por cenário de dano, apresentando-se a percentagem de dano introduzida para o cenário correspondente e a percentagem de dano calculada pelo programa para o respectivo elemento.

Tabela 4.17 – Elementos adicionais identificados como danificados na treliça T1, quando aplicado o método dos DLVs segundo Gao e Spencer (2002).

Cenário de dano (Elementos danificados em) T1	Porcentagem de dano introduzida	Elemento adicional identificado	Porcentagem de dano no elemento	$\bar{\sigma}_j$
12	15	6	1	$1,22 \times 10^{-5}$
1 e 8	15	6	1	$1,23 \times 10^{-5}$
1, 8 e 9	15	6	1	$1,48 \times 10^{-5}$
	50	4	5	$5,28 \times 10^{-4}$
	70	2	63	$4,39 \times 10^{-4}$
		3	51	$1,74 \times 10^{-4}$
		4	51	$3,42 \times 10^{-4}$
		6	17	$4,96 \times 10^{-6}$
		7	57	$2,31 \times 10^{-5}$
15	13	$1,21 \times 10^{-5}$		
6, 7 e 12	30	1	1	$6,77 \times 10^{-4}$
		2	9	$1,20 \times 10^{-3}$
	40	14	4	$1,07 \times 10^{-4}$

4.2.2 Treliça plana T2.

A segunda treliça plana, denominada T2, apresenta grau de hiperstaticidade total igual a quatro, devido aos quatro elementos diagonais superabundantes que ela tem, pois a treliça é isostática externamente. A treliça tem dez nós e 21 elementos, conforme mostra a Figura 4.31.

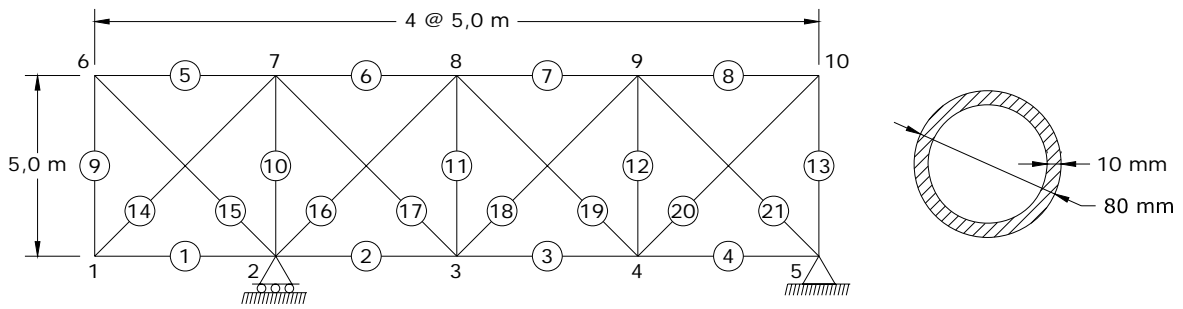


Figura 4.31 - Treliça plana T2 e seção transversal dos elementos componentes.

As características da treliça T2 são apresentas na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Características da treliça plana T2 da segunda aplicação.

Propriedades	Valor
Seção uniforme dos elementos	Circular oca
Área da seção transversal (A) [m ²]	0,0022
Módulo de elasticidade (E) [N/m ²]	2,0 x 10 ¹¹
Massa específica (ρ) [kg/m ³]	7827

Os seis primeiros modos de vibração para a treliça T2 são apresentados na Figura 4.32 e as dez primeiras frequências obtidas para a mesma treliça encontram-se na Tabela 4.19.

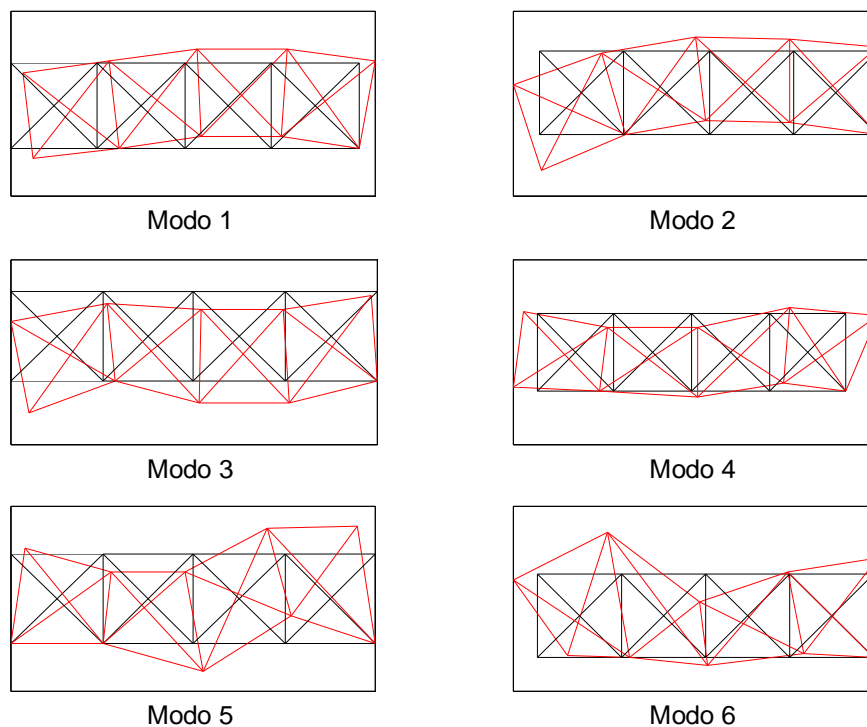


Figura 4.32 - Primeiros 6 modos de vibração da treliça T2.

Tabela 4.19 - Freqüências da treliça T2 (sem dano).

Modo	Freqüências (Hz)
1	4,032
2	5,665
3	7,665
4	13,892
5	15,421
6	21,941
7	22,539
8	25,072
9	25,695
10	28,147

Como na treliça anterior, nos casos em que é usada a metodologia segundo Bernal (2000), os danos introduzidos serão de 15, 30, 50 e 70% para todos os cenários e nos casos em que é usada a metodologia segundo Gao e Spencer (2002), os danos introduzidos serão de 15, 30, 40, 50 e 70% para todos os cenários.

Na análise desta treliça foram simulados três cenários de dano, sempre com grupos de barras danificadas. Os dois primeiros cenários são aqueles nos quais os elementos que chegam aos apoios são danificados, e o terceiro apresenta dano nos elementos que chegam ao nó 1, isto devido a que este nó seria onde, pela configuração da treliça, provavelmente se colocaria uma carga concentrada alta na treliça.

ANÁLISE DE T2 NO CASO DOS ELEMENTOS DO APOIO ESQUERDO DANIFICADOS

Na Figura 4.33 apresenta-se a treliça T2 com os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 danificados.

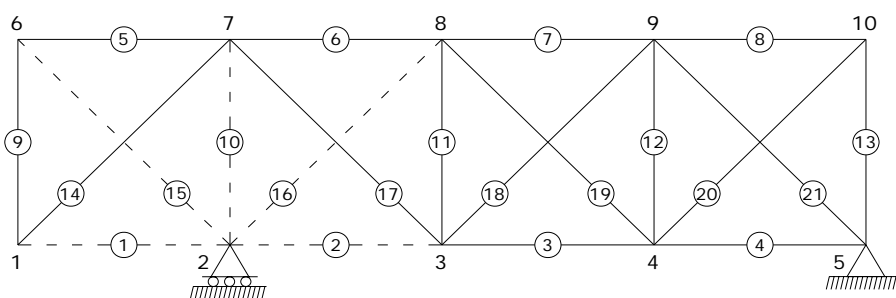


Figura 4.33 - Elementos 1, 2, 10, 15 e 16 danificados na treliça T2.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.20.

Observando a Tabela 4.20, pode-se ver que só quando o dano é de 15%, os valores do parâmetro WSI são maiores que a unidade. Com todo, na Figura 4.34 pode-se ver que os elementos danificados apresentam valores do referido parâmetro, relativamente menores aos apresentados pelos elementos não danificados. A diferença é maior a medida que a porcentagem de dano aumenta como mostrado na Figura 4.34 (d). Portanto, pode-se dizer que o método conseguiu identificar e quantificar corretamente o dano em todos os casos.

Tabela 4.20 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 12, 15 e 16 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	1	1	15	2,313
	2	2	15	1,079
	10	10	15	1,255
	15	15	15	1,348
	16	16	15	1,047
30	1	1	30	1,713
	2	2	30	0,822
	10	10	30	0,986
	15	15	30	0,965
	16	16	30	0,756
50	1	1	50	0,913
	2	2	50	0,661
	10	10	50	0,718
	15	15	50	0,857
	16	16	50	0,562
70	1	1	70	0,386
	2	2	70	0,349
	10	10	70	0,519
	15	15	70	0,551
	16	16	70	0,394

Os resultados do valor do parâmetro WSI de todos os elementos para cada uma das porcentagens de dano são apresentados na Figura 4.34.

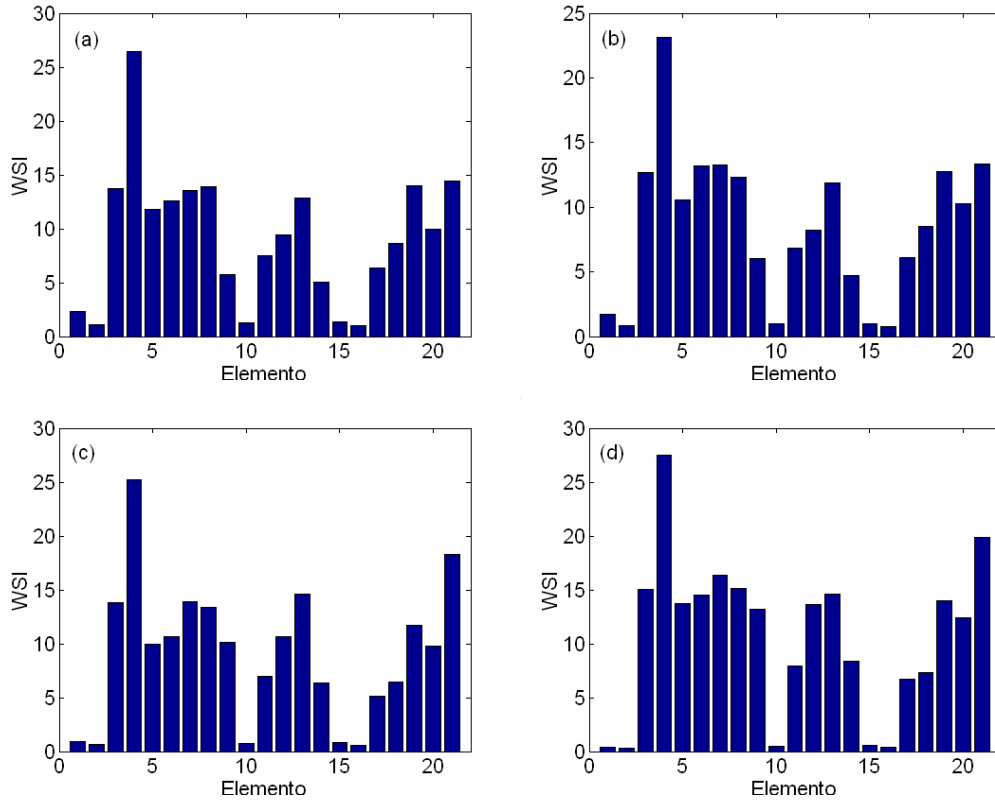


Figura 4.34 - Valores WSI quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.21 e na Tabela 4.22.

Tabela 4.21 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 são danificados (15 e 30% de dano).

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	1	-	-	-
	2	2	25	$1,30 \times 10^{-3}$
	10	10	4	$1,50 \times 10^{-3}$
	15	-	-	-
	16	16	7	$1,80 \times 10^{-3}$
	-	14	6	$6,50 \times 10^{-3}$
30	1	1	20	$2,00 \times 10^{-3}$
	2	2	32	$1,10 \times 10^{-3}$
	10	10	25	$1,20 \times 10^{-3}$
	15	15	11	$2,40 \times 10^{-3}$
	16	-	-	-

Tabela 4.22 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 são danificados (40, 50 e 70% de dano).

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
40	1	1	12	$1,90 \times 10^{-3}$
	2	2	30	$8,84 \times 10^{-4}$
	10	10	13	$7,76 \times 10^{-4}$
	15	15	8	$1,10 \times 10^{-3}$
	16	16	14	$1,40 \times 10^{-3}$
	-	5	10	$3,20 \times 10^{-3}$
	-	14	45	$7,40 \times 10^{-3}$
	-	19	8	$2,80 \times 10^{-3}$
50	1	1	63	$1,90 \times 10^{-3}$
	2	2	30	$3,86 \times 10^{-4}$
	10	10	37	$3,55 \times 10^{-4}$
	15	15	35	$3,10 \times 10^{-3}$
	16	16	33	$9,48 \times 10^{-4}$
	-	17	46	$5,40 \times 10^{-3}$
	1	1	48	$8,31 \times 10^{-5}$
70	2	-	-	-
	10	10	95	$3,22 \times 10^{-4}$
	15	15	48	$1,87 \times 10^{-4}$
	16	16	44	$1,99 \times 10^{-5}$
	-	3	99	$3,59 \times 10^{-4}$
	-	14	18	$1,00 \times 10^{-3}$
	-	19	24	$2,74 \times 10^{-5}$
	-	20	40	$3,26 \times 10^{-4}$

Neste caso, possivelmente devido à grande quantidade de elementos danificados, os resultados apresentados por este método não parecem aceitáveis tanto em relação aos elementos indicados como danificados quanto às porcentagens de dano calculadas para cada um deles. Mesmo quando se analisa um cenário de dano elevado o método não apresenta resultados corretos.

ANÁLISE DE T2 NO CASO DOS ELEMENTOS QUE CONCORREM AO APOIO DIREITO DANIFICADOS

Na Figura 4.35 apresenta-se a treliça T2 com os elementos 4, 13 e 21 danificados.

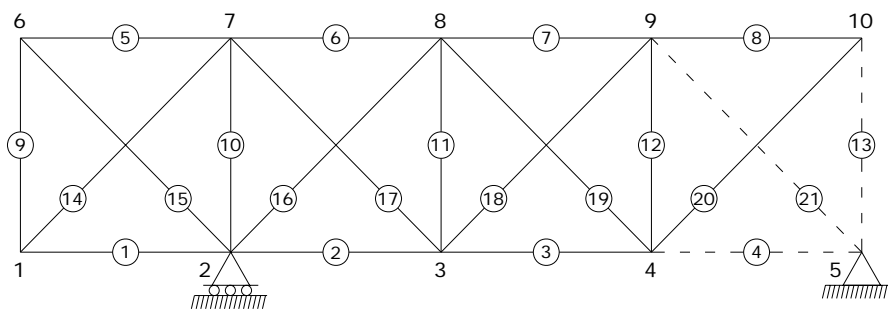


Figura 4.35 – Elementos 4, 13 e 21 danificados na treliça T2.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	4	4	15	0,751
	13	13	15	2,990
	21	21	15	1,431
30	4	4	30	0,641
	13	13	30	2,213
	21	21	30	1,135
50	4	4	50	0,449
	13	13	50	1,201
	21	21	50	0,749
70	4	4	70	0,272
	13	13	70	0,535
	21	21	70	0,423

Os resultados do valor do parâmetro WSI de todos os elementos para cada uma das porcentagens de dano são apresentados na Figura 4.36.

Também neste caso, apresentam-se valores do parâmetro WSI maior que a unidade em alguns dos elementos danificados, principalmente quando a porcentagem de dano é de 15 e 30%. Observando a Figura 4.36 nota-se que a diferença entre os resultados para os elementos danificados e os não danificados acentua-se a medida que a porcentagem de dano aumenta.

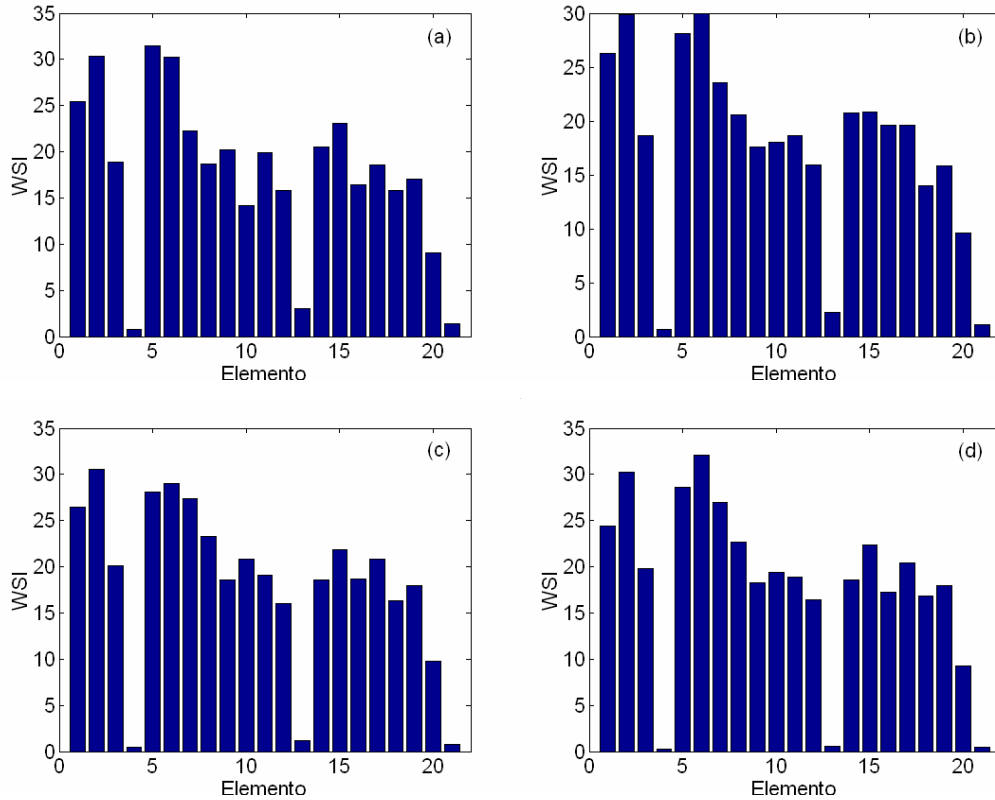


Figura 4.36 – Valores WSI quando os elementos 4, 13 e 21 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados nas Tabela 4.24 e Tabela 4.25.

Tabela 4.24 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 são danificados (15 e 30% de dano).

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	4	4	7	$4,99 \times 10^{-3}$
	13	13	20	$2,4 \times 10^{-3}$
	21	21	7	$1,10 \times 10^{-3}$
	-	3	4	$3,80 \times 10^{-4}$
30	4	4	19	$4,72 \times 10^{-4}$
	13	13	36	$1,90 \times 10^{-3}$
	21	21	9	$9,15 \times 10^{-4}$

Tabela 4.25 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 são danificados (40, 50 e 70% de dano).

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
40	4	4	9	$4,15 \times 10^{-4}$
	13	13	45	$1,60 \times 10^{-3}$
	21	21	11	$7,71 \times 10^{-4}$
50	4	4	48	$2,61 \times 10^{-4}$
	13	13	53	$1,40 \times 10^{-3}$
	21	21	42	$5,59 \times 10^{-4}$
	-	7	8	$1,30 \times 10^{-3}$
70	4	4	62	$1,67 \times 10^{-4}$
	13	13	76	$8,14 \times 10^{-4}$
	21	21	70	$1,92 \times 10^{-4}$

A diferença do caso anterior com cinco elementos danificados, neste caso só com três elementos danificados, o método apresenta melhor comportamento. No caso de 15% de dano o método identifica o elemento 3 e no caso de 50% de dano identifica o elemento 7 como danificados quando realmente não encontravam-se danificados. O programa calculou danos de 4 e 8% respectivamente. Considerando que estas porcentagens de dano pela sua magnitude podem ser desconsideradas, é possível dizer que o método identificou corretamente os locais de dano. No referente às porcentagens de dano, os resultados apresentam diferenças significativas com as porcentagens introduzidas nos elementos, portanto conclui-se que o método não apresenta resultados corretos.

ANÁLISE DE T2 NO CASO DOS ELEMENTOS QUE CHEGAM AO NÓ 1, DANIFICADOS

Na Figura 4.37 apresenta-se a treliça T2 com os elementos 1, 9 e 14 danificados.

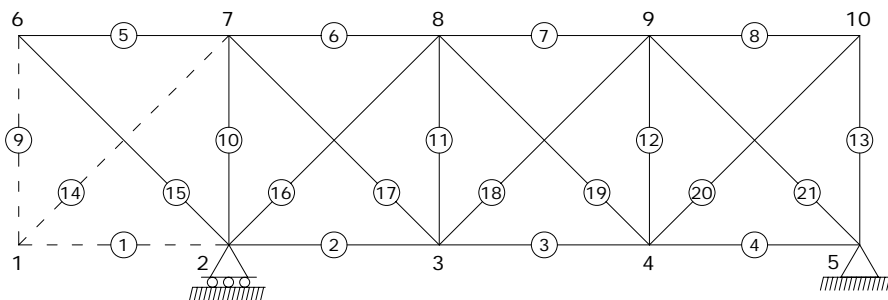


Figura 4.37 - Elementos 1, 9 e 14 danificados na treliça T2.

METODOLOGIA DE BERNAL (2000)

Aplicando a metodologia de Bernal (2000) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	1	1	15	0,388
	9	9	15	1,368
	14	14	15	0,272
30	1	1	30	0,243
	9	9	30	0,788
	14	14	30	0,176
50	1	1	50	0,146
	9	9	50	0,447
	14	14	50	0,119
70	1	1	70	0,072
	9	9	70	0,166
	14	14	70	0,087

Os resultados do valor do parâmetro WSI de todos os elementos para cada uma das porcentagens de dano são apresentados nas Figura 4.38 e Figura 4.39.

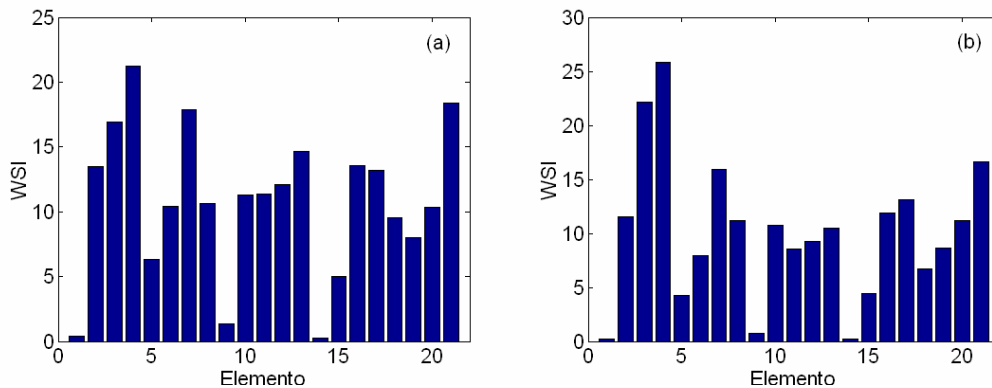


Figura 4.38 – Valores WSI quando os elementos 1, 9 e 14 estão danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano.

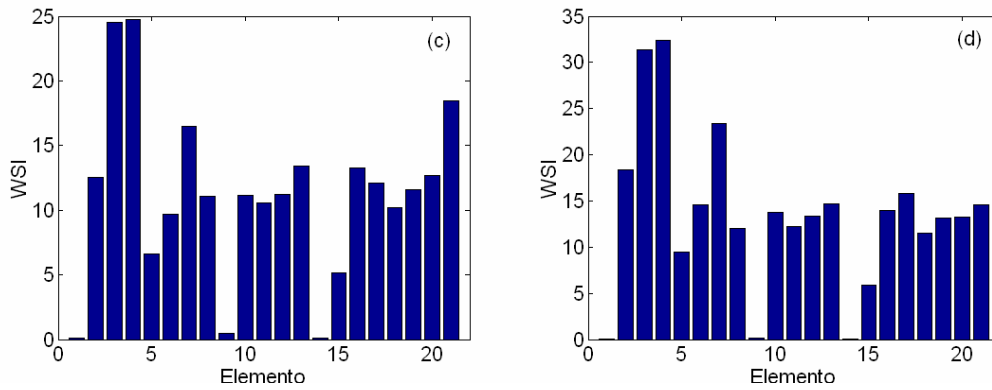


Figura 4.39 – Valores WSI quando os elementos 1, 9 e 14 estão danificados. (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

Para este cenário, só no caso de 15% de dano, o valor do parâmetro WSI do elemento 9 encontra-se acima da unidade, mas comparativamente com os valores dos outros elementos (Figura 4.38) pode-se concluir que está danificado. Nos outros casos o método consegue identificar corretamente o elemento e a porcentagem de dano correspondente.

METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Aplicando a metodologia de Gao e Spencer (2002) os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados nas Tabela 4.27 e Tabela 4.29. Os resultados intermediários obtidos com a referida metodologia para este cenário de dano são apresentados no Apêndice A.4.

Tabela 4.27 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 são danificados (15 e 30% de dano).

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
15	1	1	13	$3,00 \times 10^{-3}$
	9	9	12	$4,70 \times 10^{-3}$
	14	14	11	$6,90 \times 10^{-3}$
	-	2	3	$1,60 \times 10^{-3}$
	-	7	2	$1,40 \times 10^{-3}$
	-	20	1	$2,80 \times 10^{-3}$
30	1	1	53	$2,40 \times 10^{-3}$
	9	-	-	-
	14	-	-	-
	-	7	8	$1,50 \times 10^{-3}$

Tabela 4.28 - Valores de $\bar{\sigma}_j$ para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 são danificados (40, 50 e 70% de dano).

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	$\bar{\sigma}_j$
40	1	1	54	$2,10 \times 10^{-3}$
	9	9	42	$2,00 \times 10^{-3}$
	14	14	35	$2,00 \times 10^{-3}$
	-	2	9	$1,10 \times 10^{-3}$
	-	4	6	$6,75 \times 10^{-4}$
	-	5	20	$3,60 \times 10^{-3}$
	-	15	6	$5,10 \times 10^{-3}$
	-	21	6	$1,70 \times 10^{-3}$
50	1	1	38	$1,70 \times 10^{-3}$
	9	9	56	$8,43 \times 10^{-4}$
	14	14	42	$3,10 \times 10^{-3}$
	-	13	9	$2,90 \times 10^{-3}$
70	1	1	42	$1,10 \times 10^{-3}$
	9	9	58	$5,06 \times 10^{-3}$
	14	14	59	$1,90 \times 10^{-3}$

Claramente pode-se observar que a metodologia em questão não apresenta resultados aceitáveis. Em alguns dos casos o método deixa de indicar elementos danificados e em outros o método indica elementos que não foram danificados.

Analogamente ao resumo apresentado para a treliça T1, a Tabela 4.29 contém o resumo da treliça T2 com os elementos que a metodologia de Gao e Spencer (2002) indicou como danificados quando realmente não estavam danificados.

Na referida tabela encontram-se os elementos organizados por cenário de dano, apresentando-se a porcentagem de dano introduzida para o cenário correspondente e aquela calculada pelo programa para o respectivo elemento.

Tabela 4.29 – Elementos adicionais identificados como danificados na treliça T2, quando aplicado o método dos DLVs segundo Gao e Spencer (2002).

Cenário de dano (Elementos danificados em) T2	Porcentagem de dano introduzido	Elemento adicional identificado	Porcentagem de dano no elemento	$\bar{\sigma}_j$
1, 2, 10, 15, 16	15	14	6	$6,50 \times 10^{-3}$
	40	5	10	$3,20 \times 10^{-3}$
		14	45	$7,40 \times 10^{-3}$
	50	19	8	$2,80 \times 10^{-3}$
		17	46	$5,40 \times 10^{-3}$
	70	3	99	$3,59 \times 10^{-4}$
		14	18	$1,00 \times 10^{-3}$
		19	24	$2,74 \times 10^{-5}$
20		40	$3,26 \times 10^{-4}$	
4, 13, 21	15	3	4	$3,80 \times 10^{-4}$
	50	7	8	$1,30 \times 10^{-3}$
1, 9, 14	15	2	3	$1,60 \times 10^{-3}$
		7	2	$1,40 \times 10^{-3}$
		20	1	$2,80 \times 10^{-3}$
	30	7	8	$1,50 \times 10^{-3}$
		2	9	$1,10 \times 10^{-3}$
	40	4	6	$6,75 \times 10^{-4}$
		5	20	$3,60 \times 10^{-3}$
		15	6	$5,10 \times 10^{-3}$
		21	6	$1,70 \times 10^{-3}$
	50	13	9	$2,90 \times 10^{-3}$

4.3 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIO EXPERIMENTAL DE TRELIÇA PLANA

“Simular um ensaio experimental” significa que num modelo numérico de uma estrutura, é aplicada uma excitação como a que se teria num ensaio real e são obtidos os registros em pontos predeterminados da estrutura onde foi simulado um aparelho para registrar uma variável de interesse como por exemplo, deslocamentos ou acelerações.

A finalidade da simulação de um ensaio experimental é a obtenção de um grupo de dados como o obtido num ensaio real, com o qual podem ser obtidas as frequências e modos de vibração da estrutura. Para isso foram utilizadas sub-rotinas desenvolvidas por Brasiliano (2005).

Esta simulação experimental foi realizada para avaliar o comportamento do método ao trabalhar com dados provenientes de simulações experimentais.

A treliça com a qual foi feita a simulação do ensaio experimental é a treliça T1 (Figura 4.18). Na Figura 4.40 mostram-se os nós onde foram simulados os acelerômetros e o nó onde foi aplicada a excitação na estrutura. A treliça deste exemplo vai ser denominada como T1SE.

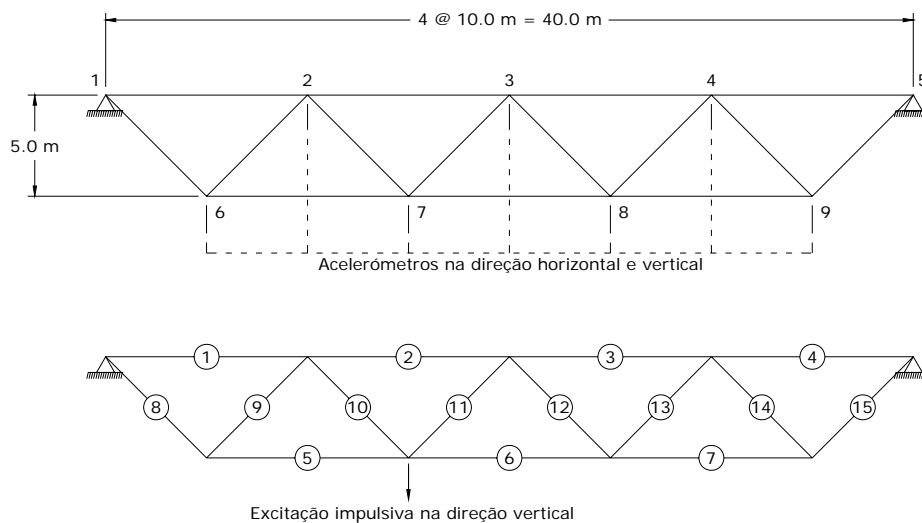


Figura 4.40 - Nó onde foi aplicada a excitação e nós onde foram simulados acelerômetros na treliça T1SE.

Na simulação de um ensaio dinâmico obtiveram-se as respostas de aceleração da estrutura em todos os nós livres da mesma, por meio da integração numérica da equação de movimento definida pela Eq. (3.3) pelo método de *Newmark*. Para isto, a estrutura analisada foi excitada num ponto, com um carregamento impulsivo. Foram simulados acelerômetros localizados nos nós da estrutura medindo as acelerações nas direções vertical e horizontal, aplicando o carregamento no nó 7 da estrutura em questão. O mesmo procedimento foi adotado para obter as respostas da estrutura danificada. Em nenhuma das simulações foi considerada a presença de ruído nos históricos (sinais). Neste exemplo foram avaliados os mesmos casos de dano apresentados no exemplo do item 4.2.1 com a finalidade de comparar os resultados analíticos com os resultados obtidos na simulação experimental.

Uma vez obtidos os “registros” de acelerações, foi aplicado o método SSI-COV/ref (Peeters, 2000; Brasiliano, 2005) permitindo identificar as propriedades dinâmicas, freqüências e modos de vibração da estrutura intacta e danificada.

O diagrama de fluxo básico do programa utilizado para identificar o dano na treliça da simulação experimental usando a metodologia de Bernal (2000) encontra-se na Figura 4.41.

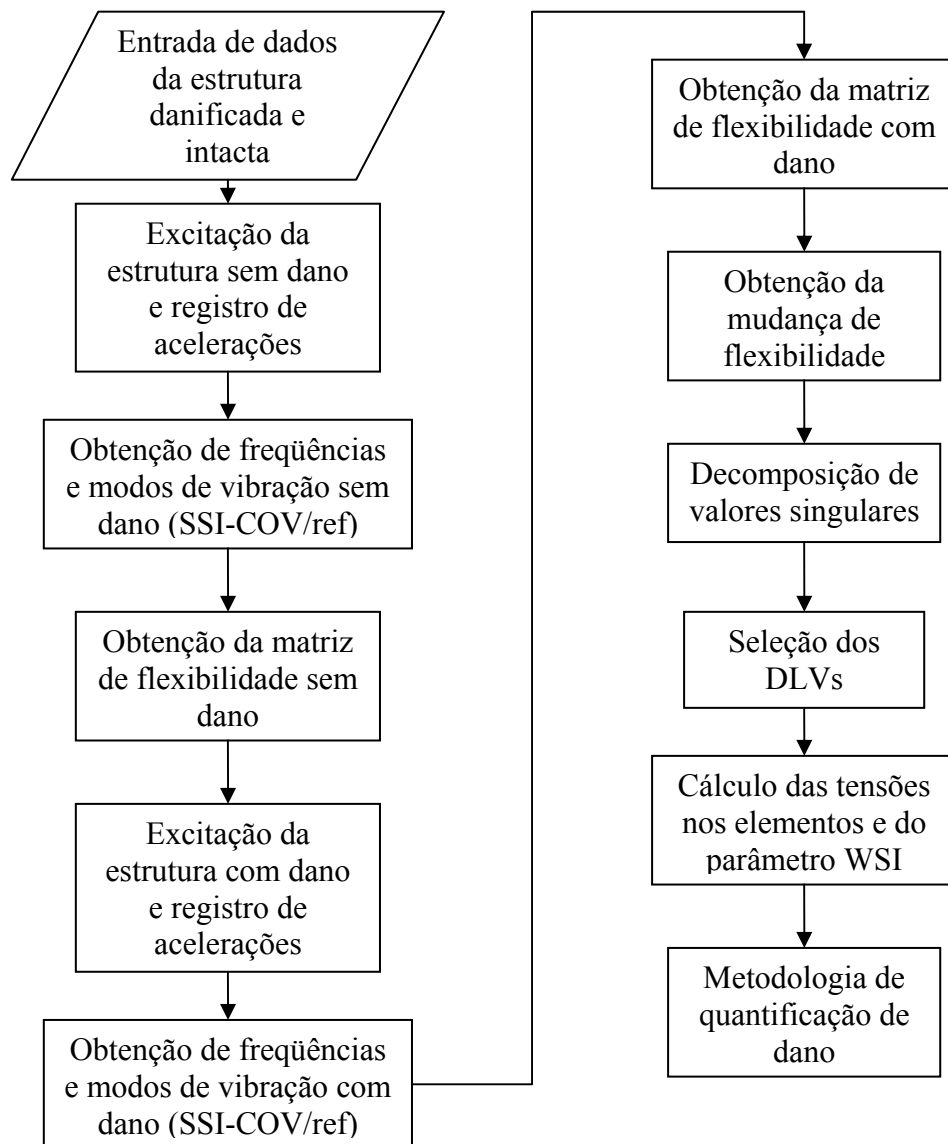


Figura 4.41 - Fluxograma esquemático do programa utilizado para avaliação da integridade estrutural no caso da treliça da simulação numérica segundo o método de Bernal (2000).

A diferença da análise feita anteriormente nesta treliça, com este caso de simulação de ensaio experimental, é que com o ensaio experimental são obtidos os históricos de aceleração nos nós da estrutura. Com as acelerações, são obtidas as freqüências e os modos

de vibração da treliça com dano e sem dano, para depois aplicar o método dos vetores de localização de dano segundo a metodologia de Bernal (2000).

Os cenários de dano simulados foram os mesmos da treliça T1, com o intuito de poder comparar os resultados obtidos em ambos os casos.

ANÁLISE DE TISE NO CASO DO ELEMENTO 6 DANIFICADO

Na Figura 4.42 apresenta-se a treliça T1SE com o elemento 6 danificado.

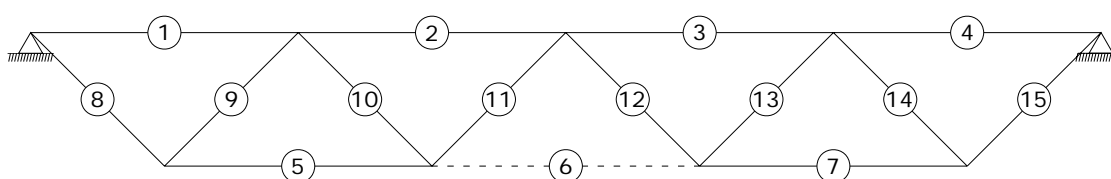


Figura 4.42 - Elemento 6 danificado na treliça T1SE.

Aplicando o método de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 é danificado.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	6	6	15	0,407
30	6	6	30	0,505
50	6	6	50	0,616
70	6	6	70	0,804

Os valores do parâmetro WSI para os elementos estão representados graficamente na Figura 4.43.

Observando os resultados do parâmetro WSI, pode-se dizer que a partir desta metodologia foi possível identificar corretamente tanto as regiões danificadas quanto as porcentagens de dano presentes em cada um dos elementos. Os valores do parâmetro WSI para as quatro análises encontram-se nas tabelas Tabela A.3.1, Tabela A.3.2, Tabela A.3.3 e Tabela A.3.4, em anexo.

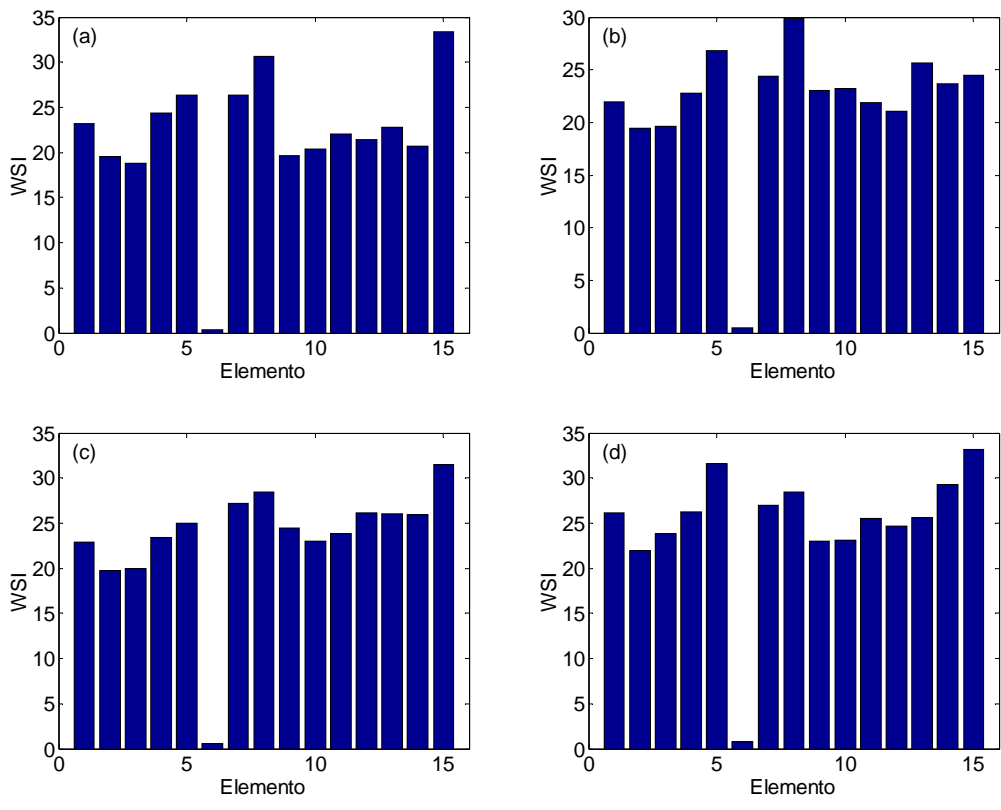


Figura 4.43 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com o elemento 6 danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

ANÁLISE DE TISE NO CASO DO ELEMENTO 12 DANIFICADO

Na Figura 4.44 apresenta-se a treliça T1SE com o elemento 12 danificado.

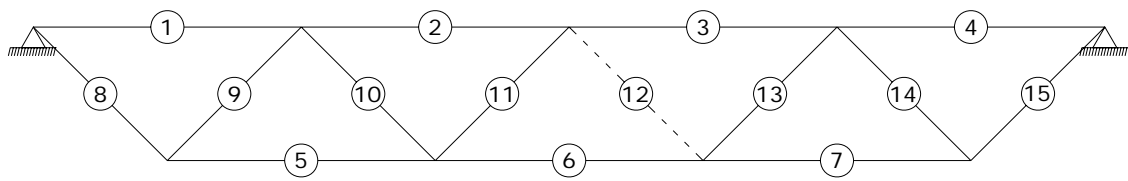


Figura 4.44 - Elemento 12 danificado na treliça T1SE.

Aplicando o método de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.31 e os valores do parâmetro WSI para todos os elementos estão representados graficamente na Figura 4.45.

Tabela 4.31 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 é danificado.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	12	12	15	2,327
30	12	12	30	0,089
50	12	12	50	0,252
70	12	12	70	0,167

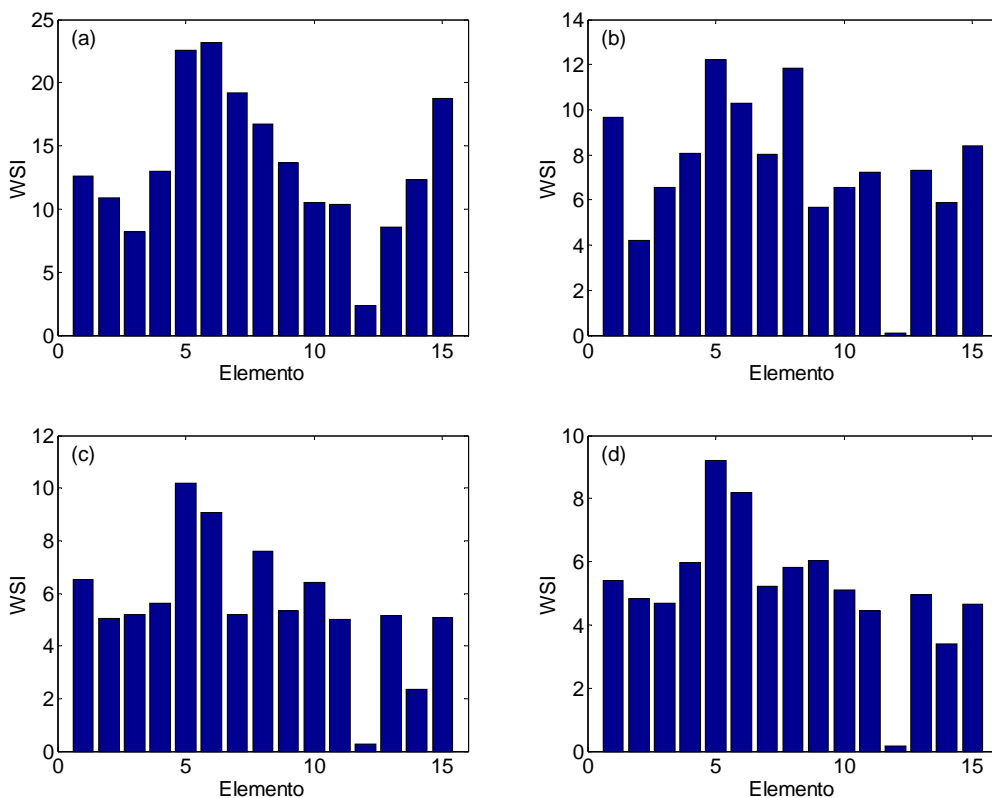


Figura 4.45 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com o elemento 12 danificado. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

Na análise considerando 15% de dano, o valor do parâmetro WSI foi maior do que a unidade para o elemento danificado (elemento 12), mas em correspondência com os elementos não danificados, apresentou um valor menor com o que se infere que o elemento está danificado e portanto, pode-se concluir que o método permitiu localizar corretamente os elementos danificados.

Nas tabelas Tabela A.3.5, Tabela A.3.6, Tabela A.3.7 e Tabela A.3.8, em anexo, encontram-se os valores do parâmetro WSI de todos os elementos para as quatro análises.

ANÁLISE DE TISE NO CASO DOS ELEMENTOS 1 E 8 DANIFICADOS

Na Figura 4.46 apresenta-se a treliça T1SE com os elementos 1 e 8 danificados.

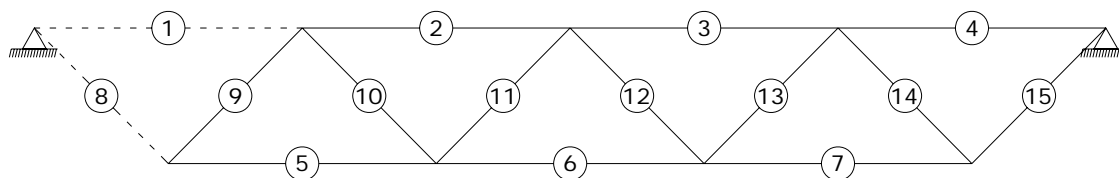


Figura 4.46 - Elementos 1 e 8 danificados na treliça T1SE.

Aplicando o método de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.32.

Tabela 4.32 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	1	1	15	0,470
	8	8	15	0,906
30	1	1	30	0,404
	8	8	30	0,665
50	1	1	50	0,451
	8	8	50	0,403
70	1	1	70	0,511
	8	8	70	0,218

O método permitiu identificar corretamente os elementos e as suas porcentagens de dano correspondentes nas quatro análises, como pode ser visto na Tabela 4.31 e na Figura 4.47. Os valores de WSI de todos os elementos para estas quatro análises, encontram-se nos anexos (tabelas Tabela A.3.9, Tabela A.3.10, Tabela A.3.11 e Tabela A.3.12).

Os valores do parâmetro WSI para os elementos estão representados graficamente na Figura 4.47.

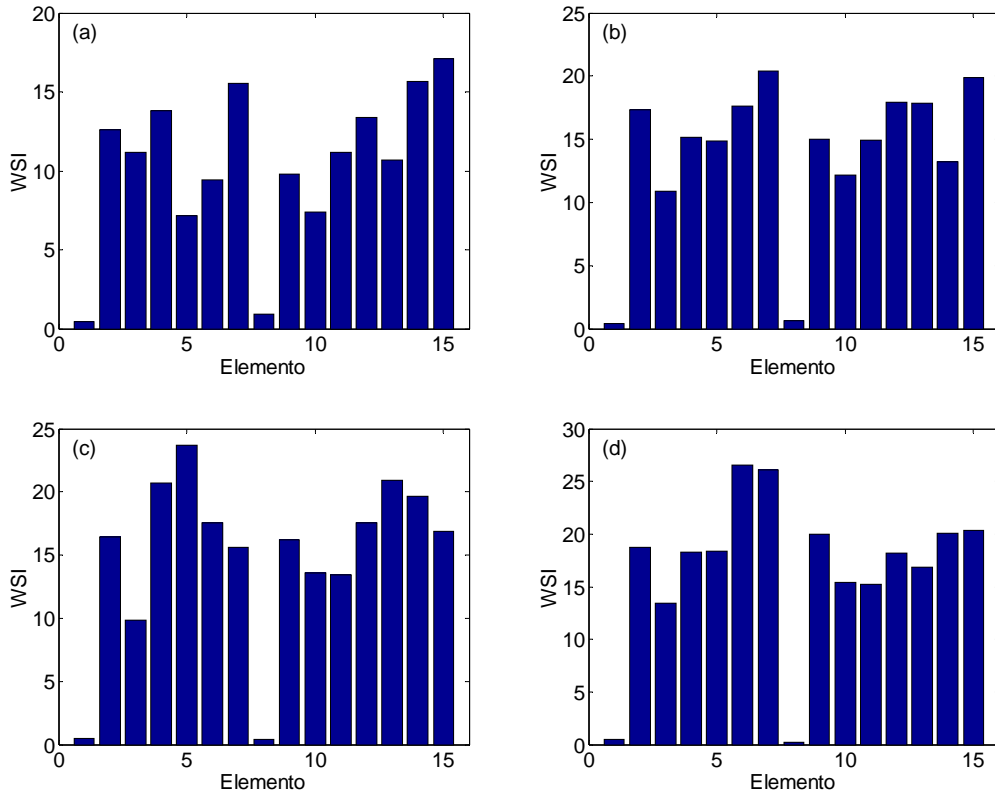


Figura 4.47 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com os elementos 1 e 8 danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

ANÁLISE DE TISE NO CASO DOS ELEMENTOS 1, 8 E 9 DANIFICADOS

Na Figura 4.48 apresenta-se a treliça T1SE com os elementos 1, 8 e 9 danificados.

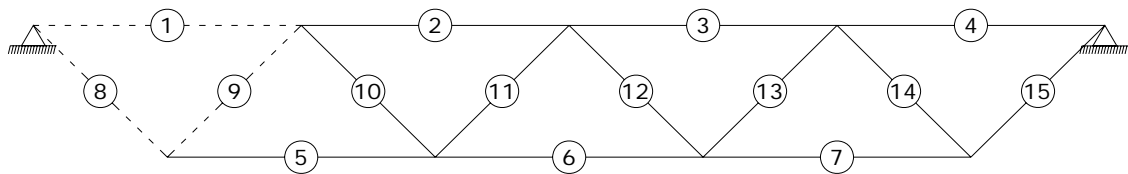


Figura 4.48 - Elementos 1, 8 e 9 danificados na treliça T1SE.

Aplicando o método de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.33 e os valores do parâmetro WSI para os elementos estão representados graficamente na Figura 4.49.

Tabela 4.33 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1, 8 e 9 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	1	1	15	1,348
	8	8	15	2,928
	9	9	15	3,918
30	1	1	30	2,304
	8	8	30	3,226
	9	9	30	5,148
50	1	1	50	1,665
	8	8	50	1,947
	9	9	50	3,003
70	1	1	70	2,246
	8	8	70	2,284
	9	9	70	3,241

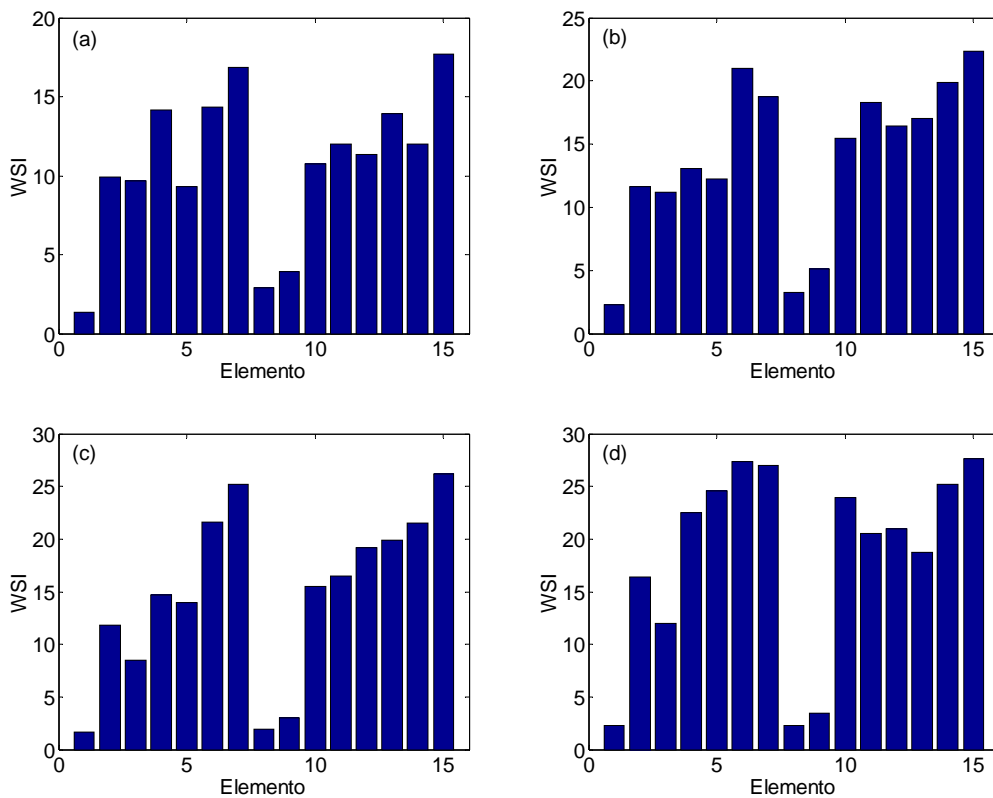


Figura 4.49 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com os elementos 1, 8 e 9 danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

Diferentemente do caso anterior, para nenhum dos elementos danificados WSI é menor do que a unidade. Só visualmente poder-se-ia inferir que os elementos encontram-se

danificados, pois apresentam valores do referido parâmetro, menores que os elementos não danificados.

ANÁLISE DE TISE NO CASO DOS ELEMENTOS 6, 7 E 12 DANIFICADOS

Na Figura 4.50 apresenta-se a treliça T1SE com os elementos 6, 7 e 12 danificados.

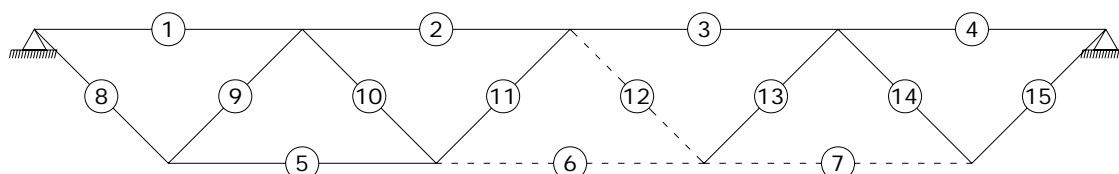


Figura 4.50 - Elementos 6, 7 e 12 danificados na treliça T1SE.

Aplicando o método de Bernal (2000), os resultados obtidos na identificação e quantificação de dano são apresentados na Tabela 4.34.

Tabela 4.34 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 são danificados.

Dados de entrada		Dados de saída		
% de dano	Elemento danificado	Elemento identificado	% de dano	WSI
15	6	6	15	4,831
	7	7	15	5,659
	12	12	15	9,629
30	6	6	30	7,575
	7	7	30	9,214
	12	12	30	12,646
50	6	6	50	5,458
	7	7	50	6,475
	12	12	50	8,785
70	6	6	70	3,825
	7	7	70	4,625
	12	12	70	8,135

Os valores do parâmetro WSI para os elementos estão representados graficamente na Figura 4.51.

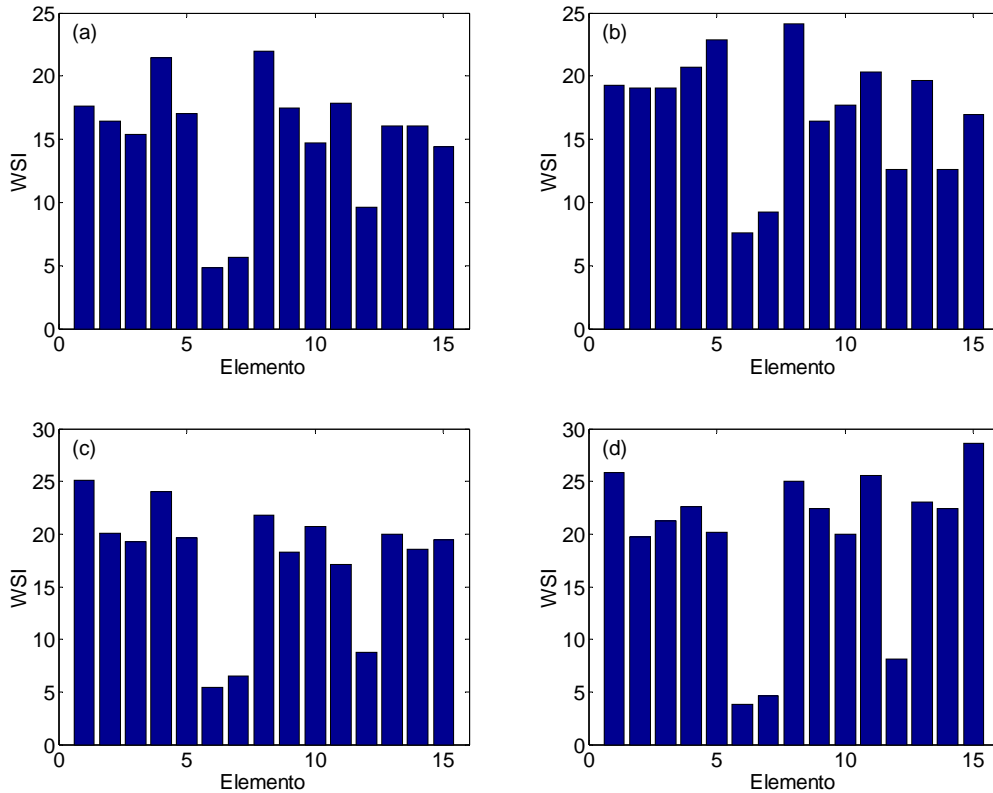


Figura 4.51 – Valores do parâmetro WSI na treliça T1SE com os elementos 6, 7 e 12 danificados. (a) 15% de dano, (b) 30% de dano, (c) 50% de dano, (d) 70% de dano.

De forma similar aos resultados obtidos no cenário anterior, neste cenário, todos os elementos possuem valores de WSI maiores do que 1. É importante notar que na análise para 15 e 30% de dano a identificação visual das regiões danificadas se dificulta pela proximidade entres os valores do parâmetro mencionado. Para as outras duas análises, a identificação visual poderia ser feita e portanto o método não se mostrou muito satisfatório para este caso.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 - MÉTODO DA MUDANÇA NA FLEXIBILIDADE

O método da mudança na flexibilidade foi aplicado em vigas simples com diferentes condições de apoio (simplesmente apoiada, engastada e bi-apoiada com balanço).

Nos três cenários de dano estudados, as regiões danificadas foram localizadas corretamente. Os resultados obtidos com este método podem ser considerados satisfatórios.

Verificou-se que é possível obter uma boa estimativa da matriz de flexibilidade só com algumas das frequências mais baixas da estrutura como foi visto na Figura 4.7 e na Figura 4.11. Este fato possibilita a utilização dos métodos baseados na flexibilidade em ensaios experimentais onde geralmente obtêm-se poucas das frequências mais baixas.

Embora o método mostrou-se confiável para as condições avaliadas, precisam ser estudados outros tipos de vigas variando as condições de apoio e cenários de dano múltiplo.

5.2 - MÉTODO DOS VETORES DE LOCALIZAÇÃO DE DANO SEGUNDO BERNAL (2000)

Este método foi aplicado a treliças planas com diferentes configurações e condições de apoio.

Para as treliças T1 e T2 este método de identificação de dano apresentou resultados satisfatórios, que permitiram identificar os elementos danificados. Mesmo assim, deve-se ter muito cuidado com os resultados dos valores do parâmetro WSI em relação ao limite sugerido na literatura para o mesmo. Não devem só ser levados em conta os resultados dos elementos danificados. Os resultados devem ser analisados globalmente e de forma comparativa entre eles para concluir se algum dos elementos tomar-se-á como danificado ou não.

Para as treliças estudadas, em alguns dos casos, especialmente quando a treliça tem três ou mais elementos danificados e as porcentagens de dano nos elementos são baixas, apresentam-se valores do parâmetro WSI maiores do que o limite fixado na literatura ($WSI \leq 1$, Bernal, 2002).

O limite para o parâmetro WSI não deve ser tomado como um valor fixo. Se um elemento apresenta um valor de WSI maior que a unidade, mas se este valor é comparativamente menor que os valores apresentados pelos outros elementos, o referido elemento pode ser considerado como danificado. Por exemplo, como apresentado na Tabela A.1.17 (dos anexos), o valor do parâmetro WSI na treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 15% de dano cada um, o elemento 12 tem $WSI = 4,954$. Este valor está muito acima do limite proposto. Mesmo apresentando-se este resultado, quando comparados os valores do parâmetro WSI (ver Figura 4.30), o elemento 12 encontra-se muito abaixo dos outros elementos, que neste caso, sabe-se que não estão danificados, permitindo inferir que o referido elemento encontra-se danificado.

No tocante ao procedimento de quantificação, pode-se concluir que a metodologia proposta nesta dissertação apresenta bons resultados quando aplicada em diferentes cenários de dano nas treliças estudadas. Estes cenários contêm uma ampla faixa de porcentagens de dano que vão desde 15%, que é um dano relativamente baixo, até 70%.

5.3 - MÉTODO DOS VETORES DE LOCALIZAÇÃO DE DANO SEGUNDO GAO E SPENCER (2002)

Este método também foi aplicado às treliças planas T1 e T2 nas quais foi aplicada a metodologia de Bernal (2000).

Pode-se dizer que esta metodologia de identificação de danos mostrou-se eficiente nos cenários de dano simples. Para os cenários de dano múltiplo aparecerem dificuldades em relação tanto à detecção das regiões danificadas quanto ao cálculo da magnitude dos danos.

Em alguns casos o método indicou como elementos danificados, elementos que realmente não se encontravam danificados e em outros casos deixou de assinalar os elementos com dano.

Não é possível concluir, a partir dos resultados obtidos, que a deficiência deve-se ao aumento do número de elementos danificados na estrutura nem ao fato da porcentagem de dano ser baixa. Por exemplo, no caso da treliça T2 com os elementos 1, 9 e 14 danificados (Tabela 4.27), a análise para 50 e 70% de dano conseguiu identificar corretamente as regiões danificadas em quanto que na análise para 15 e 40% de dano, o método indicou outros elementos danificados quando estavam intactos e para a análise de 30% de dano deixou de identificar elementos danificados (elementos 9 e 14).

Uma das possíveis dificuldades para que esta metodologia apresente melhores resultados é a geometria da estrutura pelo fato de possuir elementos compridos em relação ao comprimento total da estrutura. Isto porque o modelo danificado é obtido através do índice MAC que resulta afetado quando os danos estão próximos aos apoios da estrutura. Quando o elemento encontra-se próximo a um ponto onde um dos modos apresenta um nó, o modo não contribui muito para a detecção do dano pelo índice *MAC* e por conseguinte é possível que o método esteja falhando por esta causa.

Uma das possíveis dificuldades para o método de Gao e Spencer (2002) convergir no caso de múltiplos elementos danificados, pode-se encontrar no fato de que esta metodologia só identifica um elemento de cada vez e os modos da estrutura possuindo só um elemento danificado apresentam uma diferença muito grande com os modos da estrutura possuindo múltiplos elementos danificados. Por causa disto, a bem possível indicar um elemento como danificado de forma errada.

5.4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIO EXPERIMENTAL

Na simulação numérica do ensaio experimental foi utilizada a treliça T1 com as mesmas propriedades e os mesmos cenários de dano estudados no item 4.2.1. As características dinâmicas foram identificadas utilizando o método SSI-COV/ref (Peeters, 2000; Brasiliano, 2005) e para a identificação do dano foi empregada a metodologia de Bernal (2000).

Em geral, o método conseguiu identificar corretamente as regiões danificadas na estrutura quando foram utilizados “dados experimentais”.

Como já foi mencionado, apesar de alguns dos elementos apresentarem valores de WSI acima do limite proposto na literatura, em alguns dos casos os elementos danificados apresentam valores mais baixos que aqueles intactos. Devido a isto, poderia se pensar que para a escolha dos elementos danificados também seria possível utilizar uma relação entre valores WSI, e não somente o limite de WSI proposto por Bernal (2002) cujo valor é igual à unidade.

5.5 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos realizados, podem-se sugerir como trabalhos futuros:

- Testar o método de flexibilidade em vigas contínuas e estruturas aporticadas.
- Estudar o método DLV para sua aplicação em estruturas tipo viga e pórticos e comparar os resultados com resultados obtidos experimentalmente para este tipo de estruturas.
- Procurar, para o método de Bernal (2000), algum tipo de relação existente entre os valores de WSI dos elementos danificados e dos elementos intactos que seja critério de escolha. Para isto é necessário testar um maior número de treliças com diversas configurações e uma grande quantidade de cenários possíveis nelas.
- Testar uma maior quantidade de estruturas, aplicando o método dos vetores de localização de dano seguindo a metodologia de Gao e Spencer para obter um melhor conhecimento do método, devido à variabilidade observada nos resultados apresentados por este nos exemplos apresentados nesta dissertação.
- Realizar análises em estruturas treliçadas com discretizações mais finas e com um maior número de nós para eliminar problemas com o número de nós “instrumentados” na estrutura e possíveis problemas com a identificação de danos quando utilizada a metodologia de Gao e Spencer (2002).
- Realizar um ensaio experimental numa estrutura com a finalidade de avaliar a aplicabilidade dos métodos estudados.

- Otimizar a rotina de quantificação proposta nesta dissertação para casos com cenário de dano múltiplo onde o tempo de cálculo cresce potencialmente com o número de elementos danificados na estrutura.
- Realizar uma avaliação do comportamento do método de Bernal (2000) quando considerada a presença de ruído nos registros de deslocamentos ou acelerações.
- Realizar análises considerando nível de dano de 100% para os elementos. Este caso pode se apresentar na realidade quando ocorre vandalismo com furto de elementos estruturais como já tem acontecido em vários casos com torres de transmissão elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R.D., Cawley P., Pye C.J. and Stone B.J. (1978). “A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures”, In: *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20, pp. 93–100.
- Aimin Y., Golinval, J. C. (2005). “Structural Damage Localization by Constructing Flexibility and Stiffness Matrix”, *Engineering Structures*, Vol. 27, No. , pp. 1752-1761.
- Bernal, D. (2000). “Damage Localization Using Load Vectors.” In: European COST F3 Conference, pp. 223-231, Madrid, Spain.
- Bernal, D. (2002). “Load Vectors for Damage Localization.” In: *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 1, pp. 7–14.
- Brasiliano, A. (2001). “Caracterização de Danos em Estruturas Aperticadas.” Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.
- Brasiliano, A. (2005). *Identificação de Sistemas e Atualização de Modelos Numéricos com Vistas à Avaliação da Integridade Estrutural*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação PECC.TD-06A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 222p.
- D’Ambra, R. Barrios, Iturrioz, I. e Doz, G. N. (1997). “Determinación de la Magnitud y Localización del Daño en Estructuras a través del Cambio de sus Propiedades dinámicas”, XVIII Cilamce, 3(1), pp. 1161-1168.
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., and Shevitz, D. W. (1996). “Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review”, Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS.
- Doebling, S.W., Farrar, C.R. e Prime, M.B. (1998). “A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods”, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 30, No. 2, pp. 91-105.
- Duan, Z., Yan, G., Ou, J. and Spencer, B. F. (2005). “Damage Localization in Ambient Vibration by Constructing Proportional Flexibility Matrix”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 284, No. X, pp. 455-466.
- Gao, Y. and Spencer B. F. Jr. (2002). “Damage Localization Under Ambient Vibration Using Changes in Flexibility”. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 1, No. 1, pp. 136-144.

- Genovese, M. (2000). “Localização e Quantificação de Danos em Estruturas por meio de suas Características Dinâmicas”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.
- Genovese, M. (2005). *Avaliação Estrutural: Influência do Ruído nos Métodos de Detecção de Dano Baseados na Análise das Propriedades Dinâmicas*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-003/2005, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140p.
- Gere, J. M. and Weaver, W. (1965). *Analysis of Framed Structures*. D. Van Nostrand Company, Inc. 475p.
- Hearn, G. and Testa, R. B. (1991). “Modal Analysis for Damage Detection in Structures”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 10, pp. 3042-3063.
- McGuire, W., Gallagher, R. H. (1979). “Matrix Structural Analysis”, John Wiley and Sons, 460p.
- Pandey, A. K. e Biswas, M. (1994). " Damage Detection in Structures Using changes in Flexibility", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 169, No. 1, pp. 3-17.
- Pandey, A. K. e Biswas, M. (1995). "Experimental Verification of Flexibility Difference Method for Locating Damage in Structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 184, No. 2, pp. 311-328.
- Pandey, A.K., M. Biswas, e M.M. Samman. (1991). “Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145, No. 2, pp. 321–332.
- Peeters, B. (2000). “System Identification and Damage Detection in Civil Engineering”, PhD thesis, Department Burgerlijke Bouwkunde, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Przemieniecki, J. S. (1968). “Theory of Matrix Structural Analysis”, *McGraw-Hill, New York*.
- Zou, Y., Tong L. & Steven G. P. (2000). “Vibration-based Model-dependent Damage (delamination) Identification and Health Monitoring for Composite Structures - A review”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 230, No. 2, pp. 357-378.

APÊNDICES

APÊNDICE A1 – TABELAS DE RESULTADOS COM O PARÂMETRO WSI NO CASO DA TRELIÇA T1

Caso do elemento 6 danificado (o mais solicitado).

Tabela A.1.1 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 15% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	27,925	6*	0,028	11	31,811
2	26,081	7	32,853	12	30,066
3	28,873	8	42,100	13	27,875
4	29,295	9	23,981	14	25,453
5	34,900	10	33,684	15	39,666

Tabela A.1.2 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 30% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	35,167	6*	0,020	11	33,771
2	27,896	7	36,428	12	32,335
3	26,323	8	42,727	13	31,269
4	30,586	9	30,983	14	32,775
5	34,286	10	27,904	15	35,263

Tabela A.1.3 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 50% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	28,354	6*	0,011	11	30,950
2	24,565	7	30,410	12	29,549
3	24,485	8	41,858	13	21,479
4	24,737	9	28,324	14	28,463
5	35,882	10	32,416	15	37,803

Tabela A.1.4 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 6 tem 70% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	30,553	6*	0,004	11	29,140
2	25,032	7	32,887	12	28,395
3	26,296	8	39,978	13	29,033
4	29,434	9	31,382	14	31,747
5	30,445	10	25,713	15	35,235

Caso do elemento 12 danificado (um dos menos solicitado).

Tabela A.1.5 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 15% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	21,997	6	24,254	11	15,859
2	13,601	7	24,441	12*	0,048
3	15,938	8	31,908	13	18,579
4	26,699	9	22,445	14	21,988
5	36,100	10	16,146	15	26,326

Tabela A.1.6 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 30% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	16,117	6	25,563	11	16,639
2	14,068	7	25,082	12*	0,035
3	16,018	8	34,795	13	20,849
4	27,914	9	20,487	14	23,090
5	36,929	10	16,729	15	29,245

Tabela A.1.7 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 50% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	19,618	6	26,586	11	18,084
2	15,302	7	26,581	12*	0,020
3	14,342	8	34,925	13	22,222
4	28,220	9	22,363	14	24,528
5	37,080	10	17,259	15	29,150

Tabela A.1.8 - Valores de WSI para a treliça T1 quando o elemento 12 tem 70% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	20,603	6	28,451	11	18,898
2	16,195	7	27,173	12*	0,009
3	14,801	8	35,224	13	20,633
4	24,473	9	21,683	14	24,073
5	36,397	10	17,573	15	31,288

Caso dos elementos 1 e 8 danificados (perto de um dos apoios).

Tabela A.1.9 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,149	6	31,950	11	26,029
2	20,865	7	27,854	12	25,263
3	15,314	8*	0,161	13	24,534
4	22,084	9	20,535	14	23,399
5	11,665	10	25,456	15	29,302

Tabela A.1.10 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,108	6	32,620	11	25,973
2	21,228	7	30,098	12	26,172
3	13,484	8*	0,115	13	27,613
4	22,804	9	21,620	14	22,529
5	12,979	10	22,545	15	32,367

Tabela A.1.11 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,060	6	33,943	11	26,449
2	23,538	7	30,672	12	25,762
3	14,521	8*	0,058	13	25,738
4	22,590	9	21,268	14	22,478
5	14,847	10	24,603	15	29,589

Tabela A.1.12 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1 e 8 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,025	6	36,643	11	27,795
2	22,911	7	27,951	12	24,783
3	14,478	8*	0,020	13	28,410
4	21,340	9	21,762	14	24,843
5	16,867	10	25,638	15	27,218

Caso dos elementos 1, 8 e 9 danificados (perto de um dos apoios).

Tabela A.1.13 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,649	6	27,754	11	19,479
2	21,406	7	31,987	12	19,907
3	15,692	8*	1,566	13	26,808
4	21,822	9*	2,404	14	26,576
5	19,373	10	21,826	15	27,444

Tabela A.1.14 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,745	6	31,323	11	21,513
2	22,480	7	31,822	12	20,217
3	18,086	8*	1,553	13	27,797
4	21,349	9*	2,475	14	27,840
5	20,808	10	24,087	15	27,138

Tabela A.1.15 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,815	6	33,165	11	19,953
2	19,286	7	28,357	12	18,038
3	15,389	8*	1,100	13	21,283
4	19,837	9*	1,543	14	26,193
5	18,768	10	21,035	15	28,755

Tabela A.1.16 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,528	6	35,644	11	21,628
2	18,594	7	29,414	12	21,083
3	16,649	8*	0,496	13	22,657
4	19,776	9*	0,685	14	26,071
5	18,242	10	21,835	15	28,203

Caso dos elementos 6, 7 e 12 danificados.

Tabela A.1.17 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	29,059	6*	2,458	11	30,438
2	20,150	7*	3,161	12*	4,954
3	23,120	8	34,459	13	23,575
4	28,969	9	24,098	14	21,373
5	31,022	10	23,998	15	25,376

Tabela A.1.18 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	30,226	6*	2,317	11	31,439
2	18,976	7*	2,961	12*	4,630
3	23,450	8	28,326	13	23,974
4	26,401	9	24,926	14	19,205
5	31,391	10	24,798	15	24,565

Tabela A.1.19 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	24,689	6*	1,689	11	28,088
2	20,251	7*	2,147	12*	3,412
3	21,454	8	31,954	13	21,360
4	31,350	9	22,885	14	19,074
5	31,709	10	24,191	15	21,167

Tabela A.1.20 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 6, 7 e 12 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	28,326	6*	0,981	11	30,174
2	18,775	7*	1,234	12*	2,002
3	20,336	8	29,583	13	22,364
4	32,801	9	24,735	14	18,983
5	27,053	10	23,803	15	20,157

APÊNDICE A2 – TABELAS DE RESULTADOS COM O PARÂMETRO WSI NO CASO DA TRELIÇA T2

Caso dos elementos do apoio esquerdo danificados.

Tabela A.2.1 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	2,313	8	13,928	15*	1,348
2*	1,079	9	5,718	16*	1,047
3	13,756	10*	1,255	17	6,317
4	26,433	11	7,524	18	8,658
5	11,782	12	9,427	19	13,961
6	12,557	13	12,888	20	9,956
7	13,573	14	5,007	21	14,435

Tabela A.2.2 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	1,713	8	12,305	15*	0,965
2*	0,822	9	6,044	16*	0,756
3	12,653	10*	0,986	17	6,126
4	23,145	11	6,834	18	8,531
5	10,574	12	8,205	19	12,727
6	13,229	13	11,865	20	10,244
7	13,274	14	4,710	21	13,374

Tabela A.2.3 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,913	8	13,346	15*	0,857
2*	0,661	9	10,125	16*	0,562
3	13,853	10*	0,718	17	5,159
4	25,224	11	7,007	18	6,425
5	9,956	12	10,672	19	11,673
6	10,699	13	14,616	20	9,821
7	13,890	14	6,362	21	18,264

Tabela A.2.4 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 2, 10, 15 e 16 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,386	8	15,105	15*	0,551
2*	0,349	9	13,181	16*	0,394
3	15,027	10*	0,519	17	6,677
4	27,475	11	7,936	18	7,354
5	13,704	12	13,638	19	14,001
6	14,530	13	14,637	20	12,395
7	16,324	14	8,364	21	19,841

Caso dos elementos do apoio direito danificados.

Tabela A.2.5 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	25,481	8	18,663	15	23,039
2	30,293	9	20,221	16	16,417
3	18,873	10	14,160	17	18,566
4*	0,751	11	19,937	18	15,822
5	31,460	12	15,834	19	17,047
6	30,261	13*	2,990	20	9,063
7	22,213	14	20,500	21*	1,431

Tabela A.2.6 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	26,284	8	20,610	15	20,856
2	29,862	9	17,568	16	19,582
3	18,612	10	18,035	17	19,626
4*	0,641	11	18,612	18	14,000
5	28,148	12	15,943	19	15,874
6	29,996	13*	2,213	20	9,639
7	23,538	14	20,766	21*	1,135

Tabela A.2.7 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	26,490	8	23,250	15	21,821
2	30,552	9	18,526	16	18,712
3	20,112	10	20,841	17	20,776
4*	0,449	11	19,102	18	16,369
5	28,120	12	15,993	19	17,959
6	29,002	13*	1,201	20	9,784
7	27,390	14	18,625	21*	0,749

Tabela A.2.8 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 4, 13 e 21 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	24,453	8	22,662	15	22,377
2	30,248	9	18,223	16	17,256
3	19,849	10	19,415	17	20,464
4*	0,272	11	18,897	18	16,837
5	28,624	12	16,403	19	17,952
6	32,073	13*	0,535	20	9,224
7	27,013	14	18,547	21*	0,423

Caso dos elementos que chegam ao nó 1 danificados.

Tabela A.2.9 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,388	8	10,618	15	5,019
2	13,462	9*	1,368	16	13,524
3	16,907	10	11,263	17	13,197
4	21,204	11	11,380	18	9,532
5	6,302	12	12,095	19	8,003
6	10,411	13	14,678	20	10,343
7	17,908	14*	0,272	21	18,404

Tabela A.2.10 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,243	8	11,188	15	4,459
2	11,552	9*	0,788	16	11,852
3	22,151	10	10,719	17	13,085
4	25,877	11	8,541	18	6,682
5	4,264	12	9,250	19	8,683
6	7,910	13	10,442	20	11,195
7	15,933	14*	0,176	21	16,599

Tabela A.2.11 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,146	8	11,068	15	5,155
2	12,555	9*	0,447	16	13,245
3	24,510	10	11,166	17	12,091
4	24,723	11	10,580	18	10,188
5	6,621	12	11,243	19	11,601
6	9,689	13	13,382	20	12,649
7	16,451	14*	0,119	21	18,441

Tabela A.2.12 - Valores de WSI para a treliça T2 quando os elementos 1, 9 e 14 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,072	8	12,062	15	5,929
2	18,341	9*	0,166	16	13,981
3	31,323	10	13,761	17	15,847
4	32,431	11	12,225	18	11,477
5	9,417	12	13,392	19	13,101
6	14,632	13	14,712	20	13,217
7	23,415	14*	0,087	21	14,623

APÊNDICE A3 – TABELAS DE RESULTADOS COM O PARÂMETRO WSI NO CASO DA TRELIÇA T1SE (SIMULAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL)

Caso do elemento 6 danificado (o mais solicitado).

Tabela A.3.1 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 15% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	23,234	6*	0,407	11	22,016
2	19,589	7	26,389	12	21,433
3	18,824	8	30,678	13	22,816
4	24,316	9	19,633	14	20,685
5	26,335	10	20,358	15	33,378

Tabela A.3.2 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 30% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	21,963	6*	0,505	11	21,895
2	19,428	7	24,425	12	21,069
3	19,637	8	29,897	13	25,661
4	22,756	9	23,034	14	23,686
5	26,802	10	23,244	15	24,493

Tabela A.3.3 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 50% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	22,862	6*	0,616	11	23,791
2	19,785	7	27,165	12	26,183
3	20,007	8	28,406	13	26,058
4	23,440	9	24,422	14	25,941
5	24,978	10	22,971	15	31,439

Tabela A.3.4 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 6 tem 70% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	26,136	6*	0,804	11	25,508
2	21,961	7	26,943	12	24,721
3	23,792	8	28,424	13	25,625
4	26,274	9	22,991	14	29,251
5	31,587	10	23,081	15	33,180

Caso do elemento 12 danificado (um dos menos solicitado).

Tabela A.3.5 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 15% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	12,583	6	23,170	11	10,404
2	10,905	7	19,176	12*	2,327
3	8,227	8	16,750	13	8,565
4	13,001	9	13,638	14	12,326
5	22,533	10	10,528	15	18,768

Tabela A.3.6 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 30% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	9,654	6	10,301	11	7,235
2	4,197	7	8,015	12*	0,089
3	6,544	8	11,858	13	7,304
4	8,085	9	5,699	14	5,900
5	12,221	10	6,581	15	8,405

Tabela A.3.7 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 50% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	6,504	6	9,054	11	5,010
2	5,030	7	5,176	12*	0,252
3	5,207	8	7,605	13	5,166
4	5,616	9	5,341	14	2,345
5	10,203	10	6,412	15	5,066

Tabela A.3.8 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando o elemento 12 tem 70% de dano.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	5,403	6	8,196	11	4,458
2	4,833	7	5,219	12*	0,167
3	4,686	8	5,833	13	4,945
4	5,959	9	6,027	14	3,392
5	9,197	10	5,109	15	4,666

Caso dos elementos 1 e 8 danificados (perto de um dos apoios).

Tabela A.3.9 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,470	6	9,426	11	11,154
2	12,580	7	15,529	12	13,403
3	11,181	8*	0,906	13	10,695
4	13,784	9	9,802	14	15,630
5	7,182	10	7,388	15	17,093

Tabela A.3.10 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,404	6	17,648	11	14,931
2	17,339	7	20,404	12	17,921
3	10,894	8*	0,665	13	17,847
4	15,159	9	15,013	14	13,182
5	14,856	10	12,178	15	19,889

Tabela A.3.11 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,451	6	17,575	11	13,462
2	16,457	7	15,604	12	17,530
3	9,814	8*	0,403	13	20,899
4	20,663	9	16,168	14	19,666
5	23,718	10	13,564	15	16,913

Tabela A.3.12 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1 e 8 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	0,511	6	26,573	11	15,218
2	18,766	7	26,134	12	18,151
3	13,446	8*	0,218	13	16,858
4	18,263	9	20,023	14	20,053
5	18,386	10	15,383	15	20,369

Caso dos elementos 1, 8 e 9 danificados (perto de um dos apoios).

Tabela A.3.13 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1, 8 e 9 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	1,348	6	14,339	11	12,002
2	9,903	7	16,837	12	11,319
3	9,697	8*	2,928	13	13,899
4	14,149	9*	3,918	14	12,002
5	9,300	10	10,752	15	17,708

Tabela A.3.14 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 1, 8 e 9 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	2,304	6	21,004	11	18,284
2	11,623	7	18,770	12	16,400
3	11,214	8*	3,226	13	17,027
4	13,034	9*	5,148	14	19,907
5	12,273	10	15,424	15	22,312

Tabela A.3.15 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	1,665	6	21,558	11	16,500
2	11,796	7	25,238	12	19,142
3	8,489	8*	1,974	13	19,937
4	14,668	9*	3,003	14	21,510
5	13,985	10	15,455	15	26,146

Tabela A.3.16 - Valores de WSI para a treliça T1 quando os elementos 1, 8 e 9 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1*	2,246	6	27,383	11	20,525
2	16,428	7	26,990	12	20,977
3	12,005	8*	2,284	13	18,755
4	22,462	9*	3,421	14	25,203
5	24,602	10	23,956	15	27,606

Caso dos elementos 6, 7 e 12 danificados.

Tabela A.3.17 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 15% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	17,626	6*	4,831	11	17,875
2	16,426	7*	5,659	12*	9,629
3	15,388	8	21,973	13	16,051
4	21,444	9	17,464	14	16,032
5	17,028	10	14,702	15	14,416

Tabela A.3.18 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 30% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	19,251	6*	7,575	11	20,328
2	19,078	7*	9,214	12*	12,646
3	19,033	8	24,111	13	19,630
4	20,701	9	16,455	14	12,640
5	22,887	10	17,669	15	16,952

Tabela A.3.19 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 50% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	25,133	6*	5,458	11	17,076
2	20,119	7*	6,475	12*	8,785
3	19,306	8	21,739	13	20,007
4	24,007	9	18,290	14	18,503
5	19,619	10	20,730	15	19,429

Tabela A.3.20 - Valores de WSI para a treliça T1SE quando os elementos 6, 7 e 12 têm 70% de dano cada um.

Elemento	WSI	Elemento	WSI	Elemento	WSI
1	25,781	6*	3,825	11	25,573
2	19,701	7*	4,625	12*	8,135
3	21,279	8	25,022	13	23,040
4	22,613	9	22,385	14	22,381
5	20,193	10	19,983	15	28,587

APÊNDICE A4 – RESULTADOS INTERMEDIARIOS PARA O CASO DA TRELIÇA T2 COM OS ELEMENTOS 1, 9 E 14 DANIFICADOS QUANDO USADA A METODOLOGIA DE GAO E SPENCER (2002)

Para a seleção do primeiro elemento danificado os 10 valores mais altos do parâmetro TMAC são apresentados na Tabela A.4.1 com a respectiva percentagem de dano.

Tabela A.4.1. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do primeiro elemento danificado.

Elemento	Porcentagem de dano	TMAC
1	10	0,9408
1	20	0,9188
8	10	0,9075
18	20	0,9031
2	20	0,9019
18	10	0,8963
19	10	0,8958
19	20	0,8956
10	10	0,8927
2	30	0,8871

Observa-se que um mesmo elemento pode aparecer varias vezes devido a que este é danificado com diferentes níveis de dano segundo o processo iterativo.

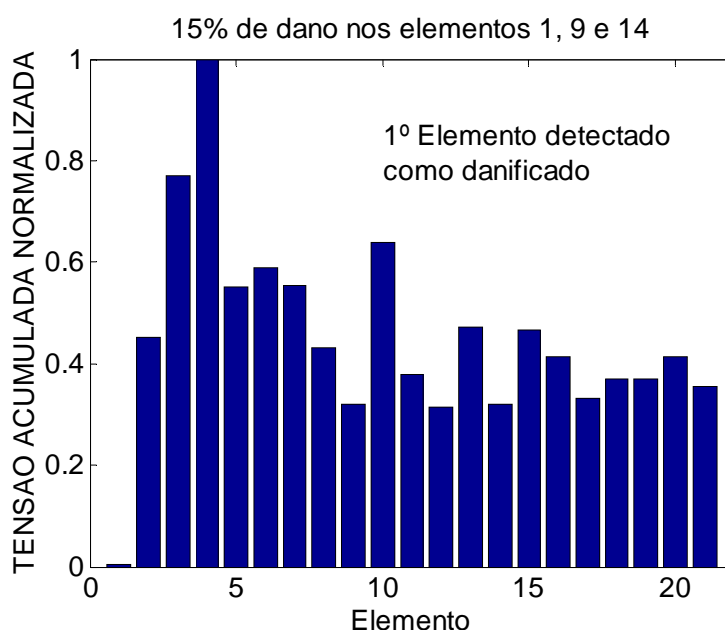


Figura A.4.1. Primeiro elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.

Os 10 valores mais altos do parâmetro TMAC na seleção do segundo elemento danificado são apresentados na Tabela A.4.2 com sua respectiva porcentagem de dano.

Tabela A.4.2. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do segundo elemento danificado.

Elemento	Porcentagem de dano	TMAC
14	10	0,9832
14	20	0,9564
15	10	0,9526
7	10	0,9491
9	10	0,9482
10	10	0,9466
19	10	0,9394
2	10	0,9396
6	10	0,9355
4	10	0,9314

O elemento identificado como danificado foi o elemento 14 e os valores da tensão acumulada normalizada nos elementos da treliça quando identificado o segundo elemento danificado encontram-se na Figura A.4.2.

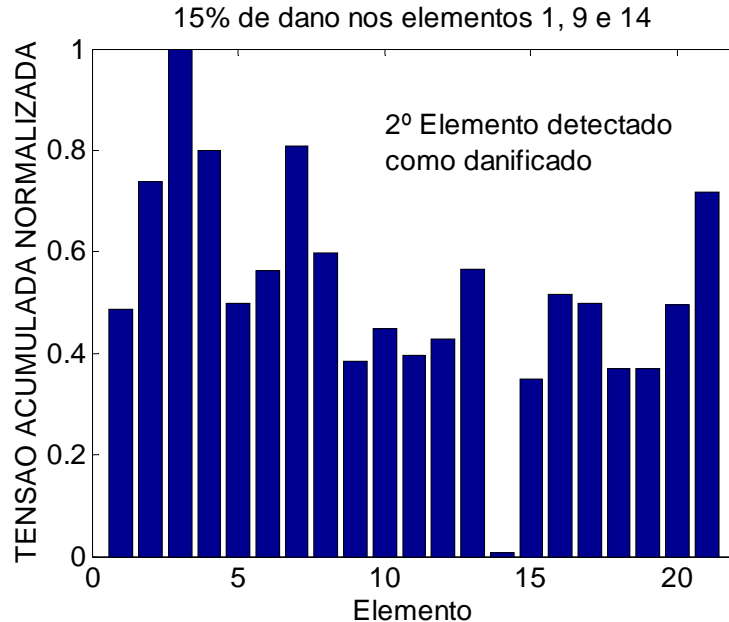


Figura A.4.2. Segundo elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.

Na Tabela A.4.3 encontram-se os 10 valores mais altos do parâmetro TMAC com a sua respectiva porcentagem de dano para a seleção do terceiro elemento danificado.

Tabela A.4.3. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do terceiro elemento danificado.

Elemento	Porcentagem de dano	TMAC
9	10	0,9947
7	10	0,9784
20	10	0,9753
3	10	0,9752
9	20	0,9748
5	10	0,9739
21	10	0,9721
10	10	0,9708
2	10	0,9702
6	10	0,9672

O elemento identificado como danificado foi o elemento 9 e os valores da tensão acumulada normalizada nos elementos da treliça quando identificado o quarto elemento danificado encontram-se na Figura A.4.3.

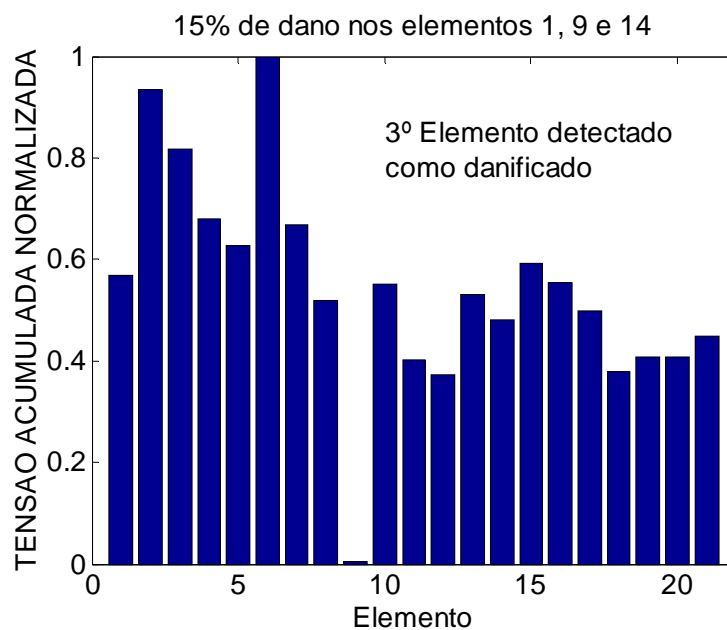


Figura A.4.3. Terceiro elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.

Mesmo tendo identificado os elementos realmente danificados na treliça, o processo iterativo não se deteve neste ponto, pois continuou a procurar elementos danificados. Na Tabela A.4.4 encontram-se os 10 valores mais altos do parâmetro TMAC com a sua respectiva porcentagem de dano para a seleção do quarto elemento danificado.

Tabela A.4.4. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do quarto elemento danificado.

Elemento	Porcentagem de dano	TMAC
2	10	0,9914
7	10	0,9889
20	10	0,9877
14	10	0,9848
3	10	0,9845
21	10	0,9842
12	10	0,9830
10	10	0,9824
16	10	0,9789
6	10	0,9787

O elemento identificado como danificado foi o elemento 2 e os valores da tensão acumulada normalizada nos elementos da treliça quando identificado o quarto elemento danificado encontram-se na Figura A.4.4.

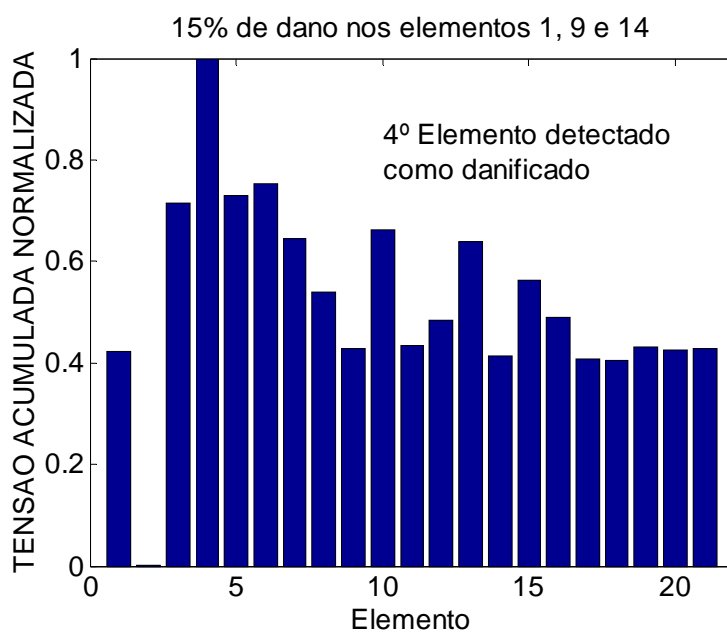


Figura A.4.4. Quarto elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.

O processo iterativo continuou e na Tabela A.4.5 encontram-se os 10 valores mais altos do parâmetro TMAC com a sua respectiva porcentagem de dano para a seleção do quinto elemento danificado.

Tabela A.4.5. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do quinto elemento danificado.

Elemento	Porcentagem de dano	TMAC
20	10	0,9891
7	10	0,9887
21	10	0,9873
2	10	0,9862
3	10	0,9855
14	10	0,9834
10	10	0,9821
12	10	0,9818
6	10	0,9808
16	10	0,9805

O elemento identificado como danificado foi o elemento 20 e os valores da tensão acumulada normalizada nos elementos da treliça quando identificado o quinto elemento danificado encontram-se na Figura A.4.5.

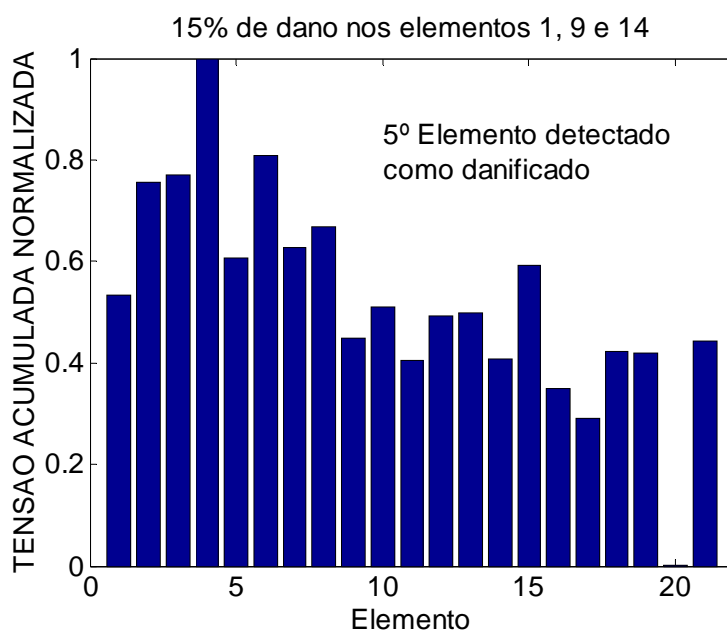


Figura A.4.5. Quinto elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.

Os resultados dos 10 valores mais altos do parâmetro TMAC para o último elemento detectado como danificado pelo processo iterativo de Gao e Spencer (2002) para este cenário de dano encontram-se na Tabela A.4.6.

Tabela A.4.6. - Valores do parâmetro TMAC para seleção do sexto elemento danificado.

Elemento	Porcentagem de dano	TMAC
7	10	0,9884
20	10	0,9879
21	10	0,9862
2	10	0,9859
3	10	0,9848
14	10	0,9836
10	10	0,9822
12	10	0,9813
6	10	0,9805
16	10	0,9798

O elemento identificado como danificado foi o elemento 7 e os valores da tensão acumulada normalizada nos elementos da treliça quando identificado o sexto elemento danificado encontram-se na Figura A.4.6.

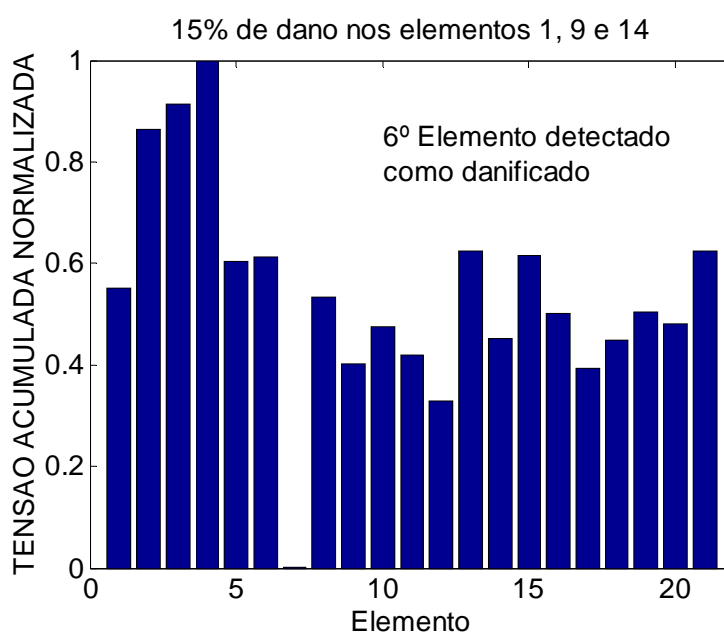


Figura A.4.6. Sexto elemento detectado como danificado com a metodologia de Gao e Spencer (2002) na treliça T2 quando introduzido 15% de dano nos elementos 1, 9 e 14.