

JESÚS DANIEL VILLALBA MORALES

**DETECÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS  
UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS E  
PARÂMETROS DINÂMICOS.**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Jose Elias Laier

São Carlos  
Março de 2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

V696d Villalba Morales, Jesús Daniel  
Detecção de dano em estruturas utilizando algoritmos genéticos e parâmetros dinâmicos / Jesús Daniel Villalba Morales ; orientador Jose Elias Laier. -- São Carlos, 2009.

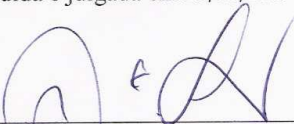
Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

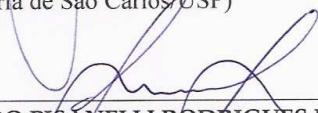
1. Métodos numéricos. 2. Parâmetros dinâmicos. 3. Algoritmos genéticos. 4. Heurísticas. 5. Detecção de dano. 6. Elementos finitos. I. Título.


**FOLHA DE JULGAMENTO**


Candidato: Engenheiro JESUS DANIEL VILLALBA MORALES

Dissertação defendida e julgada em 27/03/2009 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **JOSÉ ELIAS LAIER (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **LEOPOLDO PISANELLI RODRIGUES DE OLIVEIRA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **ANDRÉ CARLOS PONCE DE LEON FERREIRA DE CARVALHO**  
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC) APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

2009/03/27  
Pós-Graduação em Engenharia Civil  
0000



*A mis padres Isaias y Ermidia por todo el amor que me han dado y por haberme apoyado cada vez que quise volar detrás de un sueño.*

*A mis hermanos María Luisa y Sergio Andrés, quienes fueron la motivación que me permitió llegar hasta aquí.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Jesús García e Oscar Begambre, dois grandes amigos, sem sua motivação eu não teria vindo ao Brasil e não teria hoje a honra de ser um mestre formado pela USP. Uma enorme dívida de gratidão, tenho para com eles.

Ao Professor Dr. José Elias Laier por ter-me dado a oportunidade e a confiança para trabalhar sob sua supervisão.

A minha família e amigos na Colômbia por tudo o apoio e carinho brindado desde a distância.

Ao meu grande amigo Dorival Piedade quem foi meu companheiro de turma, república, sala de estudo, área de pesquisa e festas. Também à sua família quem me acolheu como parte dela.

A Carolina Ramirez, Cesar Espezúa, José Luis Narváez, Freddy Garzon e Tatiana Rodriguez pela amizade e apoio durante estes dois anos e por me ajudar a sentir que meu país estava um pouco mais perto.

A Denise e Isis, duas meninas com que compartilhei muitos instantes inesquecíveis e que foram um grande apoio em todo momento.

A Aref, Denis, Erika, Fabio R., Fernanda, Iêda, Igor C., Luis O., Marcela F., Marcela K., Marcus e Olivia, Rodrigo T., Raimundo e Socorro pela valiosa amizade durante estes dois anos de mestrado.

A todos meus amigos, colegas, professores e funcionários do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos.

Ao serviço de Biblioteca da USP, sem cuja ajuda, a fundamentação adquirida para a realização deste trabalho não teria sido possível.

À Capes pela bolsa de estudos.





## RESUMO

VILLALBA MORALES, J. D. (2009). **Deteccão de Dano em Estruturas Utilizando Algoritmos Genéticos e Parâmetros Dinâmicos**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

A avaliação do estado das estruturas é um tema de pesquisa muito importante para diversos campos da engenharia e, por isso, estão sendo desenvolvidas metodologias que permitem detectar dano em uma estrutura. O presente trabalho tem como objetivo verificar a aplicabilidade dos algoritmos genéticos (AG) na detecção de dano a partir das mudanças ocorridas, entre as condições com e sem dano, dos parâmetros dinâmicos da estrutura. Três tipos de AGs (Binário, Real e Redundante Implícita) são implementados com a finalidade de comparação do desempenho. Os parâmetros dinâmicos da estrutura, sadia e danificada, são determinados a partir do modelo de elementos finitos da estrutura. Medições incompletas e ruidosas foram consideradas visando simular as características da informação obtida por meio de um ensaio dinâmico real. Os AGs implementados são aplicados em estruturas de tipo viga, treliça e pórtico sob diferentes cenários de dano. Resultados mostram o bom desempenho dos AGs para detectar dano em uma estrutura.

Palavras-chave: Parâmetros dinâmicos, algoritmos genéticos, heurísticas, detecção de dano, elementos finitos.



## ***ABSTRACT***

VILLALBA MORALES, J. D. (2009). **Structural Damage Detection Using Genetic Algorithms and Dynamic Parameters**. 2009. Master of Science Dissertation – Engineering School of Sao Carlos , University of Sao Paulo.

The assessment of structural health is an important research topic in many engineering fields and, for that reason, damage detection methodologies are being developed. The goal of this dissertation is to verify the applicability of genetic algorithms (GAs) for detecting damage using dynamic parameters changes between undamaged and damaged condition of the structure. Three different GAs are implemented in order to compare the performance of the algorithms. Undamaged and damaged dynamic parameters are computed using the finite element model of the structure. Incomplete and noisy measurements are considered with the objective of simulating the real condition of the information in a real dynamic test. GAs are applied in some different structures: beam, truss and frame. The results indicate the good performance of the GAs for detecting damage in a structure.

Keywords: dynamic parameters, genetic algorithms, heuristics, damage detection, finite elements.



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 Esquema de um algoritmo genético clássico. ....	11
Figura 2.2 Função de duas variáveis a ser otimizada. ....	14
Figura 2.3 Transformação de um número em código binário a código Gray. ....	22
Figura 2.4 Roleta. ....	28
Figura 2.5 Algoritmo do método <i>Stochastic Universal Sampling</i> (Gen e Cheng, 1997)..	30
Figura 2.6 Pais escolhidos para o processo de cruzamento. ....	34
Figura 2.7 Filhos obtidos a partir do cruzamento de um ponto. ....	35
Figura 2.8 Filhos obtidos utilizando cruzamento de dois pontos. ....	35
Figura 2.9 Filhos obtidos a partir do cruzamento uniforme. ....	35
Figura 2.10 Indivíduos escolhidos para cruzamento. ....	36
Figura 2.11 Indivíduo gerado depois de aplicada a mutação <i>Jump</i> . ....	39
Figura 2.12 Indivíduo gerado utilizando Mutação <i>Creep</i> . ....	40
Figura 2.13 Cromossomo típico no AG de codificação redundante implícita. ....	42
Figura 2.14 Exemplos de localizadores e instancias de genes. (a) Modelo com 3 uns em seqüência, (b) Modelo com 4 zeros em seqüência. ....	43
Figura 2.15 Exemplo cromossomo AG de codificação redundante implícita. (a) Cromossomo 1, (b) Cromossomo 2. ....	45
Figura 4.1 Elementos finito para (a) Barra e (b) Viga. ....	86
Figura 4.2 Elemento Finito para (a) Trelça e (b) Pórtico. ....	88
Figura 4.3 Estruturas Tipo Viga. ....	90
Figura 4.4 Trelça de 21 elementos. ....	91
Figura 4.5 Pórtico. ....	91
Figura 4.6 Algoritmo para detecção de dano em duas etapas. ....	97
Figura 4.7 Algoritmo de detecção de dano de uma etapa. ....	100
Figura 4.8 Codificação redundante implícita para detecção de dano (RAICH e LISKAY, 2007). ....	103
Figura 4.9 Algoritmo do programa implementado. ....	105
Figura 4.10 Algoritmo para a leitura de dados. ....	106
Figura 5.1 Comparação entre os resultados da metodologia de localização de dano original e modificada para o cenário de dano VS2-I1-R2: Dano no elemento 10. ...	108
Figura 5.2 Comparação entre os resultados da metodologia de localização de dano original e modificada para o cenário de dano P3A-I1-R2: Dano no elemento 3. ....	108
Figura 5.3 Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização- Cenário VS3: Dano em elementos 5 e 12. ....	110

Figura 5.4 Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário VB3: Dano em elementos 6, 7 e 8.....	111
Figura 5.5 Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário T21A: Dano em elemento 8.....	112
Figura 5.6 Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário P3B: Dano em elementos 9, 10 e 11.....	113
Figura 5.7 Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário P3C: Dano nos elementos 4, 7 e 15.....	113
Figura 5.8 Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Cenário VS3: Dano em elementos 5 e 12.....	115
Figura 5.9 Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso VB3: Dano em elementos 6, 7 e 8. ....	115
Figura 5.10 Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso T21A: Dano no elemento 8. ....	117
Figura 5.11 Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso P3B: Dano em elementos 9, 10 e 11. ....	117
Figura 5.12 Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso P3C: Dano em elementos 4, 7 e 15. ....	118
Figura 5.13 Valores do EEQDR_Mod para o cenário VS1: Dano no elemento 2.....	120
Figura 5.14 Valores do EEQDR_Mod para o cenário VS2: Dano no elemento 10. ....	120
Figura 5.15 Valores do EEQDR_Mod para o cenário de dano VS3: Dano em elementos 5 e 12.....	121
Figura 5.16 Valores do EEQDR_Mod para o cenário de dano VB1: Dano no elemento 3. .....	121
Figura 5.17 Valores do EEQDR_Mod para o cenário de dano VB2: Dano no elemento 18. .....	122
Figura 5.18 Valores do EEQDR_Mod para o cenário de dano VB3: Dano em elementos 6, 7 e 8.....	122
Figura 5.19 Valores do EEQDR_Mod para o cenário de dano T21A : Dano no elemento 8. .....	123
Figura 5.20 Valores do EEQDR_Mod para o cenário de dano P3B: Dano em elementos 9, 10 e 11. ....	124
Figura 5.21 Valores do EEQDR_Mod para o cenário de dano P3C: Dano em elementos 4, 7 e 15. ....	124
Figura 5.22 Influência do número de modos no desempenho da metodologia de localização. Cenário dano VS3: Dano em elementos 5 e 12. ....	125
Figura 5.23 Influência do número de modos no desempenho da metodologia de localização. Cenário dano P3B: Dano em elementos 9, 10, 11. ....	126

Figura 5.24 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. ....	128
Figura 5.25 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB3. ....	128
Figura 5.26 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21D. ....	129
Figura 5.27 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3B. ....	129
Figura 5.28 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C. ....	130
Figura 5.29 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3-I1-R2. ....	131
Figura 5.30 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB3-I1-R2. ....	131
Figura 5.31 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21D-I1-R2. ....	132
Figura 5.32 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3B-I1-R2. ....	133
Figura 5.33 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C-I1-R2. ....	133
Figura 5.34 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído 1% em modos. .....	135
Figura 5.35 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 1% em frequências e 3% modos.....	135
Figura 5.36 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 2% em frequências e 3% modos.....	135
Figura 5.37 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 2% em frequências e 5% em modos. ....	136
Figura 5.38 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 2% em frequências e 10% em modos. ....	136
Figura 5.39 Solução do AG para o cenário de dano VS3-I1-R3 depois de varias execuções do AG de código real. ....	137
Figura 5.40 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C-IX. ....	138
Figura 5.41 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C-IY. ....	139
Figura 5.42 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano PC3-I1. ....	139
Figura 5.43 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano PC3-I2. ....	140
Figura 5.44 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB3-IR2 utilizando 4 modos. ....	141
Figura 5.45 Aplicação dos AG estudados no cenário de dano VB3-I1-R2 utilizando 6 modos. ....	141
Figura 5.46 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS1-I1-R2. ....	142
Figura 5.47 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS2-I1-R2. ....	143
Figura 5.48 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB1-I1-R2. ....	143
Figura 5.49 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB2-I1-R2. ....	144
Figura 5.50 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21A-I1-R2. ....	145
Figura 5.51 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21B-I1-R2. ....	145
Figura 5.52 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21C-I1-R2. ....	146
Figura 5.53 Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3A-I1-R2. ....	147

Figura 5.54 Evolução da aptidão do melhor indivíduo no algoritmo CoBin2.....	147
Figura 5.55 Evolução da aptidão do melhor indivíduo no algoritmo CoRed1.....	148
Figura 5.56 Evolução da aptidão do melhor indivíduo no algoritmo CoRea1.....	149
Figura A.1 Esquema para a aplicação de um algoritmo genético de código binário. ....	170
Figura A.2 Procedimento para realizar cruzamento em um AGCR.....	174
Figura A.3 Evolução na aptidão do melhor indivíduo e do indivíduo médio do AGCR. ...	177
Figura A.4 Esquema para a aplicação de um algoritmo genético de código binário. ....	179
Figura A.5 Cromossomo definitivo. ....	180
Figura A.6 Indivíduo PI-I. ....	181
Figura A.7 Processo para realizar o cruzamento de dois pontos. ....	183
Figura A.8 Representação do Par 2 na forma binária. ....	184
Figura A.9 Indivíduos resultantes depois do processo de cruzamento. ....	184
Figura A.10 Evolução na aptidão do melhor indivíduo e do indivíduo meio da população do AGCB. ....	187
Figura B.1 Treliza de 9 elementos.....	189
Figura B.2 Determinação de elementos provavelmente danificados numa treliza de 9 elementos: Dano no elemento 5. ....	190
Figura B.3 Treliza de 23 Elementos.....	190
Figura B.4 Determinação de elementos provavelmente danificados numa treliza de 12 elementos: Dano nos elementos 3 e 6.....	190
Figura B.5 Treliza de 31 Elementos.....	191



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 População inicial de indivíduos.	14
Tabela 2.2 Aptidões dos indivíduos da população atual.	15
Tabela 2.3 Codificação dos indivíduos da população em forma Binária e Gray.	23
Tabela 2.4 Fenótipo dos indivíduos da população.	24
Tabela 2.5 Probabilidades dos indivíduos e probabilidades acumuladas.	28
Tabela 2.6 Resultados Método <i>Remainder Stochastic Sampling</i> .	29
Tabela 2.7 Resultados Método <i>Stochastic Universal Sampling</i> .	30
Tabela 2.8 Resultados Ranking Linear, $s=2$ .	32
Tabela 2.9 Resultados Ranking Exponencial, $s=0.99$ .	33
Tabela 2.10 Resultados do Método de Torneio.	33
Tabela 4.1 Definição do tipo de material e do tipo de seção utilizados.	91
Tabela 4.2 Conectividade dos elementos das estruturas tipo Viga.	92
Tabela 4.3 Conectividade dos elementos da Treliza de 21 Elementos.	92
Tabela 4.4 Conectividade dos elementos da estrutura Pórtico.	92
Tabela 4.5 Configurações de ruído a serem estudadas.	93
Tabela 4.6 Cenários de dano estudados.	94
Tabela 4.7 Tipos de incompletude nas formas modais experimentais lidas.	94
Tabela 4.8 Operadores genéticos do algoritmo CoBin2.	98
Tabela 4.9 Parâmetros do algoritmo CoBin2.	98
Tabela 4.10 Operadores Genéticos do algoritmo CoRea1.	100
Tabela 4.11 Parâmetros do algoritmo CoRea1.	100
Tabela 4.12 Operadores do algoritmo CoRed1.	102
Tabela 4.13 Parâmetros do algoritmo CoRed1.	102
Tabela 5.1 Variação dos valores do EEQD para o modo 1 devido à presença de ruído.	109
Tabela 5.2 Variação dos valores do EEQD para o modo 1 devido a medições incompletas.	116
Tabela 5.3 Elementos definidos como provavelmente danificados.	127
Tabela 5.4 Efeito da presença de ruído sobre a aptidão do melhor indivíduo.	136
Tabela 5.5 Tempo empregado na execução dos AGs estudados quando aplicados em diferentes tipos estruturais.	150
Tabela A.1 Operadores do AGCR.	170
Tabela A.2 Parâmetros que definem o AGCR.	170
Tabela A.3 Definição da população inicial.	171
Tabela A.4 Dados para a aplicação do método da roleta.	172
Tabela A.5 Indivíduos selecionados para reprodução.	173

Tabela A.6 Definição dos pares de indivíduos para reprodução.	174
Tabela A.7 Dados aplicação do operador BLX- $\alpha$ .	175
Tabela A.8 Indivíduos gerados depois do processo de cruzamento.	176
Tabela A.9 Indivíduos gerados depois do processo de mutação.	176
Tabela A.10 Nova geração de indivíduos.	177
Tabela A.11 Resultados das 10 vezes que foi executado o algoritmo genético de código real.	178
Tabela A.12 Definição dos operadores do AGCB.	179
Tabela A.13 Definição dos parâmetros do AGCB.	179
Tabela A.14 Definição da população inicial.	181
Tabela A.15 Dados para a aplicação do método da roleta.	182
Tabela A.16 Indivíduos selecionados para reprodução.	183
Tabela A.17 Definição dos pares de indivíduos para reprodução.	184
Tabela A.18 Indivíduos gerados depois do processo de cruzamento.	185
Tabela A.19 Bits que sofreram mutação para cada indivíduo.	185
Tabela A.20 Indivíduos gerados depois do processo de mutação.	186
Tabela A.21 Nova geração de indivíduos.	186
Tabela A.22 Resultados das 10 vezes que foi executado o algoritmo genético de código binário.	188

## ***LISTA DE ABREVIATURAS***

<b>AG</b>	Algoritmo Genético
<b>AGCB</b>	Algoritmo Genético de Código Binário
<b>AGCR</b>	Algoritmo Genético de Código Real
<b>CoBin2</b>	Algoritmo Genético de Código Binário para Detecção de Dano em Duas Etapas
<b>CoRea1</b>	Algoritmo Genético de Código Real para Detecção de Dano em Uma Etapa
<b>CoRed1</b>	Algoritmo Genético de Representação Redundante implícita para Detecção de Dano em Uma Etapa
<b>DDND</b>	Técnica de detecção de dano não destrutiva.
<b>EC</b>	Energia Cinética
<b>EEQ</b>	Cociente de energia Elementar
<b>EEQDR</b>	Relação da diferença do cociente de energia Elemental
<b>EEQDR_Mod</b>	Relação da diferença do cociente de energia Elemental modificado
<b>FRF</b>	Função de resposta em frequência
<b>IRS</b>	<i>Improvement Reduction System</i>
<b>MDLAC</b>	Multiple Damage Location Assurance Criterion
<b>MSE</b>	Energia modal de deformação
<b>MSECR</b>	Relação da mudança de energia de deformação modal
<b>MTMAC</b>	<i>Modal Assurance Criterion</i>
<b>Rand(a,b)</b>	Função que gera um número aleatório de distribuição uniforme (0,1) entre os valores a e b
<b>RSS</b>	<i>Remainder Stochastic Sampling</i>
<b>SEREP</b>	<i>System Equivalent Reduction Expansion Process</i>
<b>SHM</b>	Sistema de monitoramento da saúde estrutural
<b>SUS</b>	<i>Stochastic Universal Sampling</i>



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL .....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.3 METODOLOGIA .....	5
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	7
<b>2. ALGORITMOS GENÉTICOS.....</b>	<b>9</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	9
2.1.1 FUNÇÃO OBJETIVO E RESTRIÇÕES .....	14
2.1.2 POPULAÇÃO .....	17
2.1.3 CRITÉRIOS DE PARADA E ANÁLISE DE DESEMPENHO .....	18
2.2 CODIFICAÇÃO .....	18
2.2.1 CÓDIGO BINÁRIO .....	20
2.2.2 CÓDIGO REAL .....	23
2.3 SELEÇÃO .....	24
2.3.1 PROPORCIONAL À APTIDÃO- MÉTODO DA ROLETA .....	25
2.3.2 RANKING.....	31
2.3.3 TORNEIO.....	33
2.4 CRUZAMENTO .....	33
2.4.1 CÓDIGO BINÁRIO .....	34
2.4.2 CÓDIGO REAL .....	36
2.5 MUTAÇÃO .....	38
2.5.1 CÓDIGO BINÁRIO .....	39
2.5.2 CÓDIGO REAL .....	40
2.6 ALGORITMO GENÉTICO DE CODIFICAÇÃO REDUNDANTE IMPLICITA.....	42
<b>3. DETECÇÃO DE DANO .....</b>	<b>47</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	47
3.2 METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO DE DANO.....	53
3.2.1 METODOLOGIAS BASEADAS EM ENERGIA .....	53
3.2.2 METODOLOGIAS BASEADAS EM TÉCNICAS DE CORRELAÇÃO .....	55
3.2.3 METODOLOGIAS BASEADAS NO VETOR DE FORÇA RESIDUAL.....	58
3.2.4 METODOLOGIAS BASEADAS NA MATRIZ DE FLEXIBILIDADE .....	61
3.3 METODOLOGIAS QUE QUANTIFICAM DANO COMO UM PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.....	63
3.3.1 APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO CLÁSSICA EM DETECÇÃO DE DANO.....	64
3.3.2 APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS EM DETECÇÃO DE DANO.....	68
3.4 TÉCNICAS DE EXPANSÃO DE FORMAS MODAIS .....	80
<b>4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>85</b>
4.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	85
4.2 ESTRUTURAS ANALISADAS.....	90
4.3 INCLUSÃO DE RUÍDO EM MEDIÇÕES .....	93

<b>4.4 CENÁRIOS DE DANO.....</b>	<b>93</b>
<b>4.5 ALGORITMOS GENÉTICOS .....</b>	<b>95</b>
4.5.1 ALGORITMO GENÉTICO DE CÓDIGO BINÁRIO COM METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE ELEMENTOS PROVAVELMENTE DANIFICADOS (COBIN2).....	97
4.5.2 ALGORITMO GENÉTICO DE CÓDIGO REAL COM PROCESSO DE RE-INICIALIZAÇÃO DA POPULAÇÃO DE INDIVÍDUOS (COREA1).....	99
4.5.3 ALGORITMO GENÉTICO DE CÓDIGO BINÁRIO COM REPRESENTAÇÃO REDUNDANTE IMPLÍCITA (CoRED1) .....	101
<b>4.6 DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA IMPLEMENTADO.....</b>	<b>104</b>

## **5. RESULTADOS..... 107**

<b>5.1 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DANO (LAW, SHI E ZHANG, 1998). .....</b>	<b>107</b>
5.1.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RUÍDO NO DESEMPENHO DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO.110	
5.1.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MEDIÇÕES INCOMPLETAS NO DESEMPENHO DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO.....	114
5.1.3 ANÁLISE DO EFEITO COMBINADO DE RUÍDO E MEDIÇÕES INCOMPLETAS NO DESEMPENHO DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO.....	119
5.1.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE MODOS UTILIZADOS NO DESEMPENHO DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO.....	125
5.1.5 DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS PROVAVELMENTE DANIFICADOS A SEREM UTILIZADOS NA METODOLOGIA DE DETECÇÃO DE DANO DE DUAS ETAPAS. ....	126
<b>5.2 ALGORITMOS GENÉTICOS. ....</b>	<b>127</b>
5.2.1 DESEMPENHO DOS AGS PERANTE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS IDEAIS: COMPLETAS E SEM PRESENÇA DE RUÍDO. ....	128
5.2.2 DESEMPENHO DOS AGS PERANTE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS REAIS: INCOMPLETAS E COM PRESENÇA DE RUÍDO. ....	130
5.2.3 ANÁLISE DO EFEITO DE RUÍDO NAS MEDIÇÕES NO DESEMPENHO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS. ....	134
5.2.4 ANÁLISE DO EFEITO DAS MEDIÇÕES INCOMPLETAS NO DESEMPENHO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS. ....	138
5.2.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NUMERO DE MODOS NO DESEMPENHO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS. ....	140
5.2.6 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE ELEMENTO DANIFICADO NO DESEMPENHO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	142
5.2.7 ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	146
5.2.8 TEMPO DE EXECUÇÃO DOS DIFERENTES AGS. ....	149

## **6. CONCLUSÕES ..... 151**

<b>6.1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>151</b>
<b>6.2 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE ELEMENTOS DANIFICADOS.....</b>	<b>152</b>
<b>6.3 ALGORITMOS GENÉTICOS .....</b>	<b>153</b>
<b>6.4 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>157</b>

## **7. REFERENCIAS ..... 159**

## **APÊNDICES ..... 167**

<b>APÊNDICE A: APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA A SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO DE UMA FUNÇÃO.....</b>	<b>169</b>
--	------------

<b>APÊNDICE B: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO EM TRELIÇAS MODELADA COM ELEMENTOS DE BARRA.....</b>	<b>189</b>
---	------------





# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Diferentes setores industriais, como o civil, o mecânico e o aeronáutico, encontram-se desenvolvendo técnicas de detecção de dano não destrutivas (DDND) que permitem avaliar dano em suas estruturas - aviões, plataformas marítimas de petróleo, pontes, torres de transmissão. O dano pode ser o resultado decorrente simplesmente do uso, envelhecimento, sobrecargas, fadiga da estrutura ou da ocorrência de um evento extremo.

A importância das metodologias de detecção de dano está no fato que elas ajudam na tomada de decisões sobre a necessidade de reforçar ou reparar as estruturas. Se incluídas em programas de manutenção de estruturas, ajudam que sejam reduzidas ao mínimo as consequências do dano, assim como as perdas econômicas que se produziriam no caso da estrutura deixar de funcionar corretamente ou entrar em regime de colapso.

Um estudo sobre as implicações econômicas de se detectar dano através de um sistema de monitoramento da saúde estrutural (SHM) é apresentado por Shon *et al* (2004). Nesse estudo é comentado que a British Petroleum estabelece

que o benefício econômico de um sistema SHM para uma das suas estruturas *Offshore* foi da ordem de £50 milhões. Igualmente, quando eventos extremos, como sismos de grande intensidade, atingem uma estrutura, precisa-se que seja determinada sua condição atual afim de não representar uma ameaça para seus ocupantes.

Por outro lado, as principais técnicas do tipo DDND consistem em inspeção visual, utilizam acústica, ultra-som, campos magnéticos, raios-X, ou, ainda, princípios térmicos para a determinação do dano. Essas técnicas podem realizar uma detecção de dano local e conseguem funcionar bem se o dano está localizado dentro de uma região da estrutura que seja conhecida a priori e que seja acessível (REN e DE ROECK, 2002; FARAVELLI e CASCIATI, 2004; RAHAI *et al.* 2007).

Outro tipo de técnica DDND, é aquela que utiliza variações dos parâmetros dinâmicos da estrutura entre o estado inicial e atual, na qual, a condição não danificada da estrutura pode ser representada por um modelo de elementos finitos apropriado ou a partir de dados experimentais (DOEBLING,1998). A base física destas técnicas se encontra no fato que o dano introduz mudanças nas propriedades de uma estrutura - rigidez, massa e amortecimento- ocasionando variações nas propriedades dinâmicas da estrutura, sejam frequências naturais, formas modais e/ou amortecimentos modais.

A partir de medições destas propriedades um problema inverso é formulado, no qual se deseja encontrar os parâmetros atuais do sistema que originam essa resposta da estrutura. A principal dificuldade decorre do fato que só alguns conjuntos de dados incompletos estão disponíveis, os quais fazem parte de um domínio em principio infinito. Isto faz com que varias configurações de parâmetros possam satisfazer a formulação do problema inverso.

Ainda, dado que medições experimentais contêm uma determinada quantidade de ruído, a dificuldade na resolução do problema é aumentada. Para lidar com estes tipos de problema os dados experimentais devem ser estendidos e/ou filtrados, para converter o problema inverso mal posto em um domínio bem estruturado que possa ser resolvido utilizando alguma ferramenta analítica.

Algumas das principais vantagens de se utilizar as técnicas DDND são: não se precisa conhecer a priori os locais danificados; a possibilidade de determinar o comportamento global da estrutura; a obtenção, a partir de um número limitado de sensores, da informação suficiente para a localização e quantificação do dano; a utilização, na maioria dos casos, de um número de equipamento não excessivo (HUMAR, 2006); e a capacidade de se realizar medições remotamente, o que rapidamente minimiza o impacto sobre o funcionamento da estrutura (DOEBLING, 1998). Os recentes progressos obtidos no desenvolvimento das técnicas DDND foram o resultado dos grandes avanços obtidos pela comunidade científica nos campos da análise modal, do processamento de informação de dados e do método dos elementos finitos.

Por outro lado, sendo o problema de detecção de dano essencialmente um problema de otimização, a aplicabilidade de metaheurísticas é evidente, já que, dadas as condições do problema, essas poderiam ter um melhor desempenho quando comparadas com algoritmos clássicos de otimização. Entre as principais razões, se encontra o fato que as metaheurísticas permitem encontrar soluções globais, não requerem cálculo de derivadas da função objetivo, não dependem do ponto inicial e pouca sensibilidade a ruídos (BEGAMBRE, 2007).

Uma dessas técnicas é conhecida como algoritmos genéticos (AG), a qual faz uma analogia com o processo evolutivo e a sobrevivência do mais apto para levar uma população inicial de soluções candidatas ao nosso problema a evoluir através de gerações; e encontrar assim a melhor resposta. Algoritmos genéticos são eficientes na resolução de múltiplos tipos de problemas em diversas áreas- otimização de funções numéricas, otimização combinatória, dimensionamento de elementos, aprendizagem de máquinas, entre outras (BEASLEY *et al.*, 1993).

A presente pesquisa realiza uma contribuição nesse sentido, ao estudar a aplicabilidade de metodologias que, a partir das variações nos parâmetros dinâmicos da estrutura e a utilização de AGs para a resolução do problema inverso, conseguem localizar e quantificar dano estrutural.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Principal**

Estudar a aplicabilidade de algoritmos genéticos na localização e quantificação de dano em estruturas planas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Implementar diversos tipos de codificação de indivíduos em AG e analisar os resultados em diversos cenários de dano.
- Utilizar parâmetros dinâmicos da estrutura para a definição da função objetivo.
- Analisar a influencia sobre os resultados de medições incompletas e com presença de ruído.

- Determinar o efeito da quantidade de informação utilizada, nesse caso o número de modos, sobre o desempenho das metodologias implementadas
- Estudar a viabilidade da aplicação de uma metodologia que permita localizar elementos provavelmente danificados.
- Aplicar uma técnica de expansão modal para resolver o problema de medições incompletas.

### **1.3 METODOLOGIA**

A presente dissertação foi desenvolvida seguindo duas linhas de trabalho. A primeira está relacionada com a obtenção do conhecimento necessário para se compreender a fundamentação física das metodologias que utilizam parâmetros dinâmicos para detecção de dano, e a outra trata da implementação computacional das metodologias baseadas em AGs que permitam determinar o dano em estruturas.

Em relação à fundamentação teórica, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as principais metodologias de detecção de dano, propostas mais recentemente, que utilizam parâmetros vibracionais da estrutura. Ênfase foi dada às metodologias que permitem localizar elementos danificados e aquelas que consideram o problema de detecção de dano como um problema de otimização. Dado que a detecção de dano tem a ver com dados incompletos, algumas técnicas de expansão de formas modais foram introduzidas. Em relação à técnica computacional aplicada –AGs– os fundamentos desta são apresentados.

Três tipos de metodologias de detecção de dano que utilizam algoritmos genéticos são implementados. O primeiro é um AG de código binário o qual realiza o processo de detecção de dano, apoiado numa previa redução do espaço

de busca, mediante a determinação de elementos provavelmente danificados. O segundo algoritmo é baseado na codificação real e realiza o processo de localização e quantificação do dano estrutural simultaneamente. O terceiro algoritmo é baseado em codificação redundante. Este tipo de algoritmo permite alterar o número de variáveis durante o processo evolutivo.

As metodologias anteriores serão testadas em estruturas planas (vigas, treliças e pórticos) e, para isso, são levadas em conta as seguintes considerações:

- As propriedades dinâmicas da condição não danificada são obtidas a partir do modelo analítico original de elementos finitos da estrutura.
- A resposta da estrutura, depois de ter sido danificada, se encontra em regime linear
- A estrutura não apresenta amortecimento.
- O dano é definido, como usual na literatura, por meio de uma diminuição da rigidez do elemento danificado.
- Para o estudo da condição danificada, o dano será introduzido dentro do modelo de elementos finitos. Por meio de uma análise direta são calculadas as propriedades modais do estado danificado. Estas propriedades serão utilizadas, então, para realizar o procedimento inverso, ou seja, a partir delas será determinada a condição atual da estrutura.
- Os dados experimentais considerados correspondem unicamente a frequências naturais e formas modais, por isso a função objetivo utilizada deverá estar baseada nesses parâmetros.

A comparação do desempenho dos diferentes algoritmos será realizada com base nos seguintes critérios:

- Dano simples e dano múltiplo. Para o último caso, dano localizado e dano estendido são examinados.
- Presença de ruído nas medições. Valores típicos de níveis de ruído, encontrados durante a determinação experimental de frequências e modos, são incluídos nos parâmetros dinâmicos da condição danificada.
- Medições incompletas. Devido a razões técnicas ou econômicas, geralmente a medição da resposta da estrutura em todos os graus de liberdade do modelo de elementos finitos não é possível.
- Localização dos elementos danificados. Para o caso de dano simples nas estruturas e a posição do dano dentro da estrutura é variada.

Finalmente, os algoritmos genéticos, e os diferentes procedimentos requeridos, serão realizados na linguagem de programação Fortran 90.

#### **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

No Capítulo 1 é apresentada uma descrição geral do trabalho desenvolvido, a qual contém as motivações que levaram à sua realização, os objetivos esperados e a metodologia que será empregada.

O Capítulo 2 contém um resumo das principais características da técnica conhecida como algoritmos genéticos.

No Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica relacionada ao problema de detecção de dano em estruturas.

O capítulo 4 faz uma breve introdução à formulação do método de elementos finitos e descreve as estruturas analisadas, os cenários de dano estudados e os parâmetros que definem os algoritmos genéticos utilizados para detectar dano. Uma breve descrição do programa implementado é apresentada.

No capítulo 5 são mostrados e discutidos os resultados das aplicações das metodologias de detecção de dano estudadas quando aplicadas sobre diferentes estruturas e diferentes cenários de dano.

Por último, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.



## 2. ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### 2.1 INTRODUÇÃO

Algoritmos genéticos (AGs) são de natureza estocástica e permitem encontrar soluções ótimas ou quase ótimas em problemas de otimização, através de uma analogia com as leis de seleção natural e sobrevivência do mais apto. AGs foram desenvolvidos por Holland e seus estudantes na Universidade de Michigan com dois objetivos principais: explicar de forma rigorosa o processo adaptativo de sistemas naturais e criar programas de computadores baseados em mecanismos de sistemas naturais (GOLDBERG, 1989).

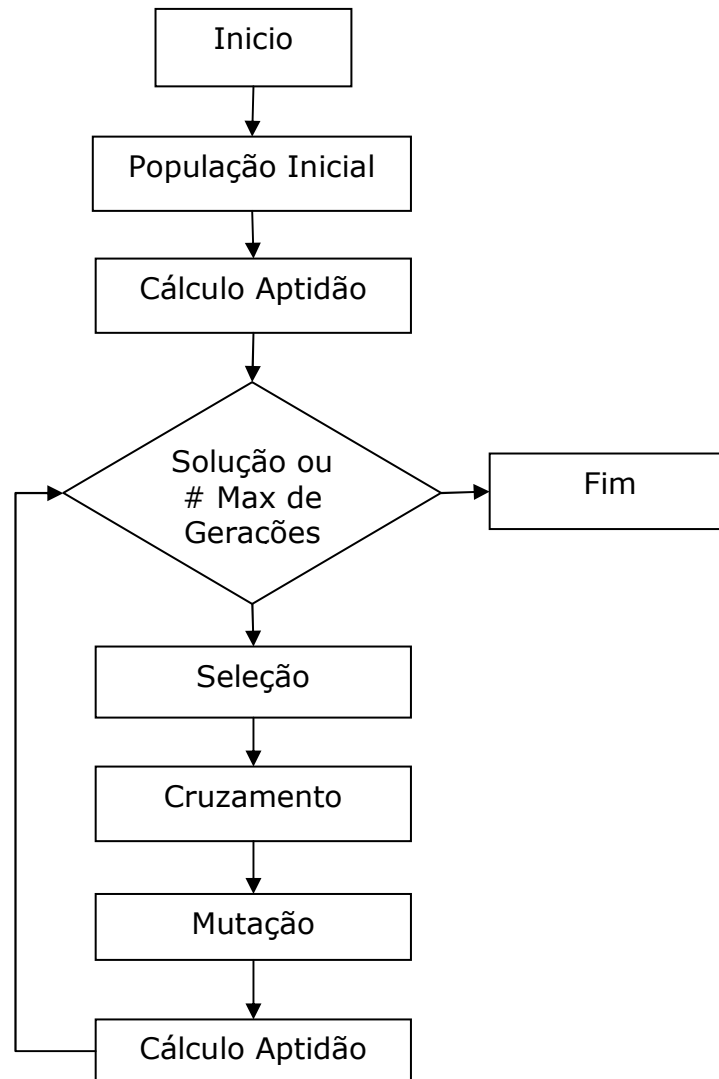
No mundo real, e em diversos ambientes, indivíduos competem por recursos e pela possibilidade de encontrar um par. Assim, indivíduos que apresentem maiores probabilidades para conseguir recursos para a sua sobrevivência e de encontrar um par, terão maiores oportunidades para se reproduzir, transmitindo assim parte das suas características aos novos indivíduos. As características de indivíduos com pouca probabilidade de obter recursos e de encontrar um par serão perdidas com o passar de poucas

gerações. Sendo assim, espera-se que os novos indivíduos apresentarem melhores características que os Pais, levando o problema à convergência para o melhor indivíduo, ou seja, a uma melhor adaptação da população ao seu ambiente.

A analogia que um AG clássico – algoritmo originalmente proposto por Holland- segue como base fundamental é descrita a seguir. Primeiro, define-se uma população de indivíduos em forma codificada (código binário ou real), os quais correspondem a possíveis soluções ao problema. Esses indivíduos são avaliados para observar a sua adaptação ao ambiente no qual se encontram, sendo os melhores indivíduos escolhidos e permitidos de se reproduzir. Os novos indivíduos, os quais compartilham algumas características dos pais, podem ou não ser submetidos a um processo de mutação, o qual permite a introdução de novas características ao indivíduo. A nova população tem agora as características dos melhores indivíduos da geração anterior.

O procedimento anterior é repetido até encontrar uma convergência da população ao indivíduo mais apto ou quando é atingido um número predeterminado de gerações. Na Figura 2.1 é mostrado o esquema de um AG clássico. Dado que o AG é um algoritmo estocástico, precisa-se de várias realizações para obter uma boa resposta do problema.

Para se garantir que o melhor indivíduo não seja perdido de uma geração para outra, pelas aplicações dos operadores genéticos: cruzamento e mutação, freqüentemente é utilizada a estratégia elitista, que consiste em que o melhor indivíduo de cada geração passa a ser parte da seguinte.



**Figura 2. 1** Esquema de um algoritmo genético clássico.

Por outro lado, AGs conseguem combinar de forma perfeita dois conceitos importantes para o sucesso de qualquer método de otimiza o: explora o e explota o. A Explora o consiste na procura da soluço ótima através de todo o espaço de busca. Explota o refere-se ao fato de se aproveitar regiões mais aptas do espaço e procurar pela melhor soluço nessas regiões. Se o algoritmo permite que só explora o seja realizada, tem-se muita perda de tempo e a busca poderia ser comparada com aquela de uma busca aleatória. Por outro lado, se o método é completamente explota o o algoritmo poderia convergir

para uma solução sub-ótima. Portanto, precisa-se de um balanço entre essas duas propriedades.

Em AGs prefere-se conferir um valor maior na exploração para as primeiras gerações já que ainda não se tem um bom conhecimento do espaço de busca, e um valor maior para a exploração nas etapas finais da execução do algoritmo, já que se tem uma população com algum grau de convergência. Essa característica está ligada ao conceito de diversidade da população, a qual representa uma medida do grau de semelhança entre os indivíduos que formam a população. Assim, maior diversidade indicaria que os indivíduos são menos semelhantes e vice-versa.

No relacionado às metodologias clássicas de otimização, AGs são diferentes, essencialmente, em quatro aspectos (GOLDBERG, 1989):

- AGs não trabalham com as variáveis a serem otimizadas senão com codificações delas. Em geral, é aceito que uma codificação é mais apropriada para um determinado problema na medida em que representa, de uma forma mais natural, o espaço de solução.
- AGs utilizam uma população de possíveis soluções para tentar encontrar a solução do problema e não uma única solução como em técnicas clássicas de otimização. Uma das grandes vantagens dos AG é o paralelismo implícito que possui, devido ao fato de trabalhar com múltiplas soluções, porém esse paralelismo vai se perdendo na medida em que a população converge já que a população pode apresentar muitos indivíduos iguais. A diversidade da população pode ser aumentada com o aumento do tamanho da população ou pelo aumento da taxa de mutação.
- AGs precisam unicamente da informação da função a ser otimizada e não das suas derivadas ou outras informações auxiliares. Isto é essencialmente

útil quando se trabalha com espaços complexos e que possam apresentar descontinuidades.

- AGs empregam regras de transição probabilísticas e não determinísticas. Essa característica dos AGs permite-nos trabalhar com uma gama maior de problemas, mediante um número mínimo de modificações do algoritmo original.

Igualmente, têm-se algumas dificuldades com a maioria das técnicas diretas e baseadas em gradiente, e que não são apresentadas pelos AGs (DEB, 1999):

- A convergência do método depende fortemente do ponto inicial.
- Apresentam uma tendência a ficar presos em ótimos locais.
- O êxito na resolução de um tipo de problema não garante que possa ser utilizado num problema de otimização diferente.
- Não são eficientes para tratar com otimização de variáveis discretas.
- Não são eficientemente utilizados em computadores paralelos.

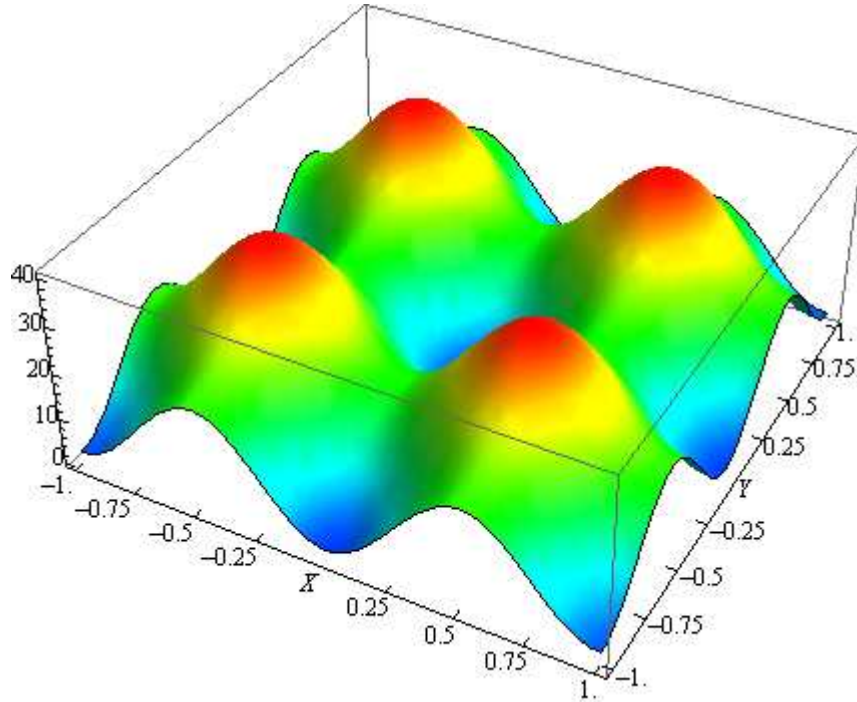
A principal área de atuação de AGs está na abordagem de problemas para os quais não existem técnicas específicas (BEASLEY *et al.*, 1993). Mas, a partir da hibridização com outras técnicas heurísticas dependentes do domínio, poderia se converter numa implementação eficiente (GEN e CHENG, 1997).

Para ilustrar as diferentes operações realizadas na execução de um AG de código binário e real, um exemplo simples é mostrado.

Deseja-se, por exemplo, minimizar a função de Rastrigin com duas variáveis (DIGALAKIS e MARGARITIS, 2002), Figura 2.2:

$$F(x, y) = 20 + (x^2 - 10 \times \text{Cos}(2\pi x)) + (y^2 - 10 \times \text{Cos}(2\pi y)) \quad (2.1)$$

no intervalo de -2,00 a 2,00 e com uma precisão de 2 cifras decimais. O mínimo global desta função encontra-se na origem do sistema de coordenadas (0.00, 0.00). Um total de seis possíveis soluções, como mostrado na Tabela 2.1, é utilizada como população inicial.



**Figura 2.** 2 Função de duas variáveis a ser otimizada.

No apêndice A apresenta-se em maiores detalhes o modo de como proceder e a realização dos cálculos para a obtenção de uma geração inicial.

**Tabela 2.1** População inicial de indivíduos.

<b>Indivíduo</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
I	0,80	0,25
II	-0,94	1,11
III	-0,45	-0,39
IV	1,98	-0,32
V	1,45	-1,08
VI	-0,10	0,12

### 2.1.1 Função Objetivo e restrições

A função objetivo tem uma relação direta com a função que define a aptidão dos indivíduos e é, em essência, a função a ser trabalhada no problema de

otimização, que poderia ser um problema de maximização ou minimização. AGs podem trabalhar com diversos tipos de funções objetivo: convexas ou não convexas, discretas ou contínuas, uni-modais ou multimodais, lineares ou não lineares. Para o exemplo estudado as aptidões dos indivíduos da população são calculadas mediante uma modificação da Equação (2.1), qual seja:

$$g(x, y) = C - f(x, y) \quad (2.2)$$

sendo que a constante C é assumida para o nosso problema como 50, no sentido de ser a função objetivo positiva no domínio de interesse ( $g(x, y) > 0$ ), cuja razão será oportunamente esclarecida.

As aptidões dos indivíduos são, então, apresentadas na Tabela 2.2:

**Tabela 2.2** Aptidões dos indivíduos da população atual.

<b>Indivíduo</b>	<b>F(Xi)</b>
I	32,39
II	44,89
III	12,43
IV	31,64
V	25,98
VI	45,36
<b>Ftotal</b>	<b>192,68</b>

Muitos dos problemas que podemos encontrar no mundo real apresentam restrições sobre os valores das variáveis envolvidas, as quais gerarão zonas do espaço de busca que não constituem regiões viáveis para encontrar uma solução do problema. Levando-se em conta tal fato, os indivíduos podem ser classificados como viáveis quando pertencem a regiões do espaço de busca que cumpre com todas as restrições do problema ou inviáveis quando violam alguma das restrições.

Uma classificação das restrições pode ser considerada e composta do número (métrica) da gravidade e da dificuldade das restrições (SMITH e COIT, 1995).

Um problema com restrições pode ser trabalhado, em forma geral, utilizando-se alguma das seguintes estratégias (GEN e CHENG, 1997):

- **Estratégia de rejeição de indivíduos:** todo indivíduo inviável é rejeitado ao longo do processo evolutivo. Pode ser utilizada principalmente em espaços convexos e quando os indivíduos inviáveis não constituem uma porcentagem muito grande do total da população. Deve ser levado em conta, todavia, que a solução de um problema de otimização poderia, em alguns casos, ser realizada de forma mais fácil desde regiões inviáveis pudessem ser mantidas no processo evolutivo.
- **Estratégia de reparação de indivíduos:** consiste em se tornar um indivíduo inviável em um indivíduo viável utilizando-se um procedimento determinístico de reparação. A principal desvantagem desta estratégia é que um procedimento de reparação específico deve ser proposto para cada problema de otimização a ser resolvido. Em otimização combinatória a reparação de indivíduos pode resultar relativamente fácil de se realizar (MICHAELEWICZ, 1995).
- **Estratégia de modificação dos operadores genéticos:** novos operadores genéticos e sistemas de codificação podem ser propostos para um problema específico tal que os indivíduos gerados sejam sempre viáveis. A principal aplicação desta estratégia encontra-se em problemas nos quais é extremadamente difícil localizar ao menos uma solução viável (COELLO, 1999).
- **Estratégia de inclusão de penalidades na função objetivo:** O problema com restrição é convertido num problema sem restrição fazendo-se com que todos os indivíduos sejam viáveis. Para isso, um termo de penalização, o qual pode ser estático ou dinâmico, é introduzido na função objetivo, tal que



indivíduos inviáveis sejam punidos pela violação de uma ou varias das restrições do problema. A estratégia permite manter uma quantidade determinada de soluções inviáveis na população fazendo que a busca pela solução ótima possa ser realizada tanto em regiões do espaço de busca que sejam viáveis ou inviáveis.

A utilização de penalidades é talvez a estratégia mais utilizada em AGs para se levar em conta as restrições do espaço de busca.

### **2.1.2 População**

Um dos parâmetros que devem ser definidos para a utilização de um AG é o tamanho da população, que, por sua vez, poderia ser mantido constante ou poderia variar ao longo das gerações. A definição deste parâmetro depende em forma direta do número de variáveis a serem otimizadas no problema. Deve ser levado em conta que uma população muito pequena faz com que o espaço de busca seja percorrido numa forma muito pobre; com o que muitas regiões do espaço de busca poderiam não ser exploradas e se apresentar uma possível convergência do algoritmo para um ótimo local. Assim mesmo, quando o tamanho da população é muito grande, o tempo requerido para a avaliação das aptidões dos indivíduos e da aplicação dos outros operadores genéticos poderia chegar a ser proibitivo.

Em relação à definição da população inicial esta é gerada, freqüentemente, por meio de um processo aleatório; porém existem muitos problemas para os quais a população é gerada segundo uma formulação de natureza heurística a ter como objetivo acelerar o processo de busca.

### 2.1.3 Critérios de parada e análise de desempenho

Freqüentemente como critérios de parada são assumidos um número máximo de iterações que o AG pode atingir ou um número de iterações sucessivas nas quais não se tenha mudanças significativas da soma de aptidões de todos os indivíduos da população.

Por outro lado, a análise do desempenho do algoritmo, como proposto por De Jong (COLEY, 1999; HAUPT e HAUPT, 2004) pode ser realizada a partir de dois critérios:

**Desempenho *Off-line*:** serve para medir o desempenho do algoritmo para cada geração e é calculado como o valor médio do melhor indivíduo,  $f_{melhor}$ , na geração atual  $g$ , assim:

$$f_{off}(g) = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^g f_{melhor}(j) \quad (2.3)$$

- **Desempenho *On-line*:** este critério serve para medir a convergência do algoritmo e é dado pelo valor médio de todas as aptidões dos indivíduos gerados pelo AG até a geração atual, assim:

$$f_{on}(g) = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(j) \right] \quad (2.4)$$

onde  $N$  é o tamanho da população.

## 2.2 CODIFICAÇÃO

Um dos fatores de maior importância para que um AG possa ter sucesso é o tipo de codificação utilizado para a representação das possíveis soluções do problema que se deseja estudar. Essa representação condicionará todas as operações posteriores a serem realizadas, sendo que o algoritmo trabalha conjuntamente

entre o espaço de soluções - espaço fenotípico-, através das operações de avaliação da aptidão e seleção, e no espaço codificado – espaço genotípico-, com ajuda dos operadores genéticos de cruzamento e mutação. O tipo de codificação deve garantir que o tempo gasto nos processos de codificação e decodificação não seja demasiado.

A utilização de tipos de codificação diferentes, como a codificação inteira a qual é utilizada em problemas de otimização combinatória, implica na criação de novos operadores que permitam melhorar o desempenho do algoritmo. Essas codificações devem levar em conta três aspectos essenciais: viabilidade e validade do indivíduo, e unicidade do mapeamento entre o espaço de solução e o espaço codificado (GEN e CHENG, 1997). Um indivíduo válido é aquele que representa uma solução para o problema, enquanto que um indivíduo viável é aquele, como comentado anteriormente, que pertencendo ao espaço de soluções e cumpre com as restrições impostas sobre o problema. O mapeamento entre os espaços deve garantir que para cada indivíduo no espaço de busca corresponda um único indivíduo no espaço de soluções e vice-versa.

No presente trabalho são abordadas as características básicas de algoritmos genéticos de código binário, código real e redundante implícita. Portanto, só serão apresentadas as técnicas de como levar a cabo essas codificações. Em geral, os dois primeiros tipos de codificação seguem uma analogia com a natureza: para cada indivíduo cada uma das variáveis corresponde a um gene, sendo a união de todos os genes o que configura o cromossomo. Os valores que estes genes podem assumir são conhecidos como alelos. O último tipo de codificação permite variar o número de genes para cada indivíduo da população durante todo o processo evolutivo.

### 2.2.1 Código Binário

O código binário é tal vez o tipo de representação mais utilizado entre os pesquisadores que utilizam AGs. Cada variável do problema é codificada através de um valor binário para formar uma única cadeia binária correspondente ao cromossomo.

Como mostrado por Debs (1999) a codificação binária apresenta as seguintes características:

- A precisão requerida para representar uma variável qualquer é dada mediante a utilização de um número adequado de bits para cada gene.
- Distintos genes podem ter diferentes comprimentos.
- As variáveis podem assumir tanto valores negativos como positivos.

A utilização de codificação binária para a solução de problemas com variáveis que podem assumir valores contínuos requer a determinação do tamanho do cromossomo que codificará os indivíduos e da definição das regras de transformação, que permitem expressar um número real como um número binário e vice-versa.

Para se determinar o tamanho do cromossomo primeiro deve-se calcular o tamanho de cada um dos genes que codifica cada uma das variáveis do problema. Para isso, procura-se que se cumpra a seguinte desigualdade (GEN e CHENG, 1997):

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times prec_j \leq 2^{m_j} - 1 \quad (2.5)$$

Na qual  $m_j$  é o número de bits para a codificação da variável  $j$ .  $a_j$ ,  $b_j$  são os valores mínimo e máximo que pode assumir a variável  $j$ , respectivamente, e  $prec_j$  a precisão requerida. O tamanho do cromossomo pode ser calculado como:

$$Tam\_Cromo = \sum_{j=1}^n m_j \quad (2.6)$$

Com  $n$  sendo o número de variáveis do problema.

Por outro lado, a transformação de um número binário a um número real é realizada em dois passos. Primeiro, o número binário é transformado num número inteiro, assim:

$$\#int_j = \sum_{i=1}^{m_j} (\text{Valor Bit}_j \times 2^{m_j-i}) \quad (2.7)$$

Depois para se obter o valor no espaço real, utiliza-se a seguinte equação:

$$x_j = a_j + \#int_j \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (2.8)$$

O procedimento anterior deve ser realizado para cada uma das variáveis do problema.

Para o exemplo estudado temos que o número de bits que precisamos para codificar uma solução vem dado da Equação (2.5):

$$2^{9-1} = 256 < (2 - (-2)) * 10^2 = 400 \leq 2^9 - 1 = 511$$

Por tanto, cada uma das variáveis precisa de 9 bits para a codificação, sendo o cromossomo formado, então, por um total de 18 bits.

As equações para transformar um número de binário para inteiro e de inteiro para real são, respectivamente:

$$\#int_j = \sum_{i=1}^9 \text{Valor Bit}_j \times 2^{9-i}$$

$$x = -2 + \#int_j \times \frac{2 - (-2)}{2^9 - 1}$$

Estas expressões podem ser utilizadas para decodificar o gene Y devido ao fato de que foram utilizadas a mesma precisão e intervalo de valores que para o gene X.

Um detalhe importante em codificação binária é que duas soluções que no espaço contínuo podem estar próximas, depois de serem codificadas podem não

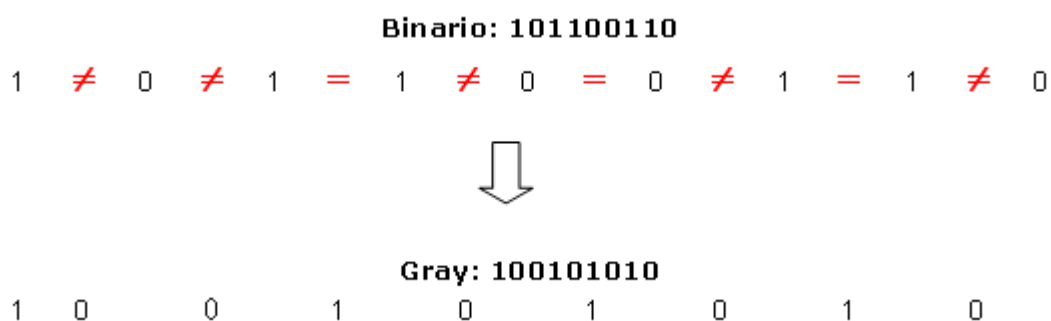
estar mais, ou seja, dois fenótipos contínuos podem apresentar dois genótipos completamente distintos (ROTHLAUF, 2002). Uma forma de medir quão diferentes são dois indivíduos codificados  $x_1$  e  $x_2$  é através da distancia Hamming, a qual denota o número de diferentes alelos entre dois genótipos, e é calculada como:

$$d_{x_1, x_2} = \sum_{i=0}^{l-1} |x_{1,i} - x_{2,i}| \quad (2.9)$$

Com  $l$  o comprimento do cromossomo.

Para solucionar o problema anterior pode-se utilizar a codificação Gray, a qual garante que qualquer dois pontos adjacentes no espaço do problema terão uma distancia Hamming igual a um na representação codificada (COLEY, 1999).

A transformação de um número em código binário para um número em código Gray requer que seja realizado o seguinte procedimento: O primeiro bit do binário é copiado ao primeiro valor do número Gray. As outras posições são calculadas utilizando-se o operador modulo, o qual consiste em atribuir o valor um para a posição  $i$  se as posições  $i$  e  $i-1$  do binário apresentam o mesmo valor, e zero em caso contrario. Para se converter um indivíduo de codificação Gray para codificação binária a operação modulo é executada sobre todos os bits anteriores a  $i$  e incluindo-o. A Figura 2.3 mostra um exemplo de como converter um número binário a Gray.



**Figura 2. 3** Transformação de um número em código binário a código Gray.

Por outro lado, no exemplo estudado a população inicial foi gerada no espaço de busca fenotípico, por tanto, tem-se que transformar o número decimal num número inteiro e depois levar este a sua forma binária. Essa operação pode ser expressa como:

$$\#int_j = \frac{(x_j - a_j) \times (2^{m_j} - 1)}{b_j - a_j} \quad (2.10)$$

Esse número inteiro deve ser agora transformado num número binário. Na Tabela 2.3 pode-se encontrar a codificação binária e Gray para o exemplo estudado.

**Tabela 2.3** Codificação dos indivíduos da população em forma Binária e Gray.

<b>Indivíduo</b>	<b>Código Binário</b>	<b>Código Gray</b>
I	101100110-100011111	100101010-101101111
II	010001000-110001110	000110011-110110110
III	011000110-011001110	001011010-001010110
IV	111111100-011010111	111111101-001000011
V	110111000-001110110	110011011-010110010
VI	011110011-100001111	001110101-101110111

### 2.2.2 Código Real

A codificação real tenta realizar uma aproximação mais natural do espaço de soluções, trabalhando diretamente no espaço fenotípico. Outro motivo que pode levar a se preferir a utilização de codificação real é o tempo gasto por um AG de código binário na realização dos processos de codificação e decodificação de indivíduos. A Tabela 2.4 mostra como é conformado o fenótipo de cada indivíduo segundo a codificação real.

**Tabela 2.4** Fenótipo dos indivíduos da população.

<b>Indivíduo</b>	<b>Fenótipo</b>	
I	0,80	0,25
II	-0,94	1,11
III	-0,45	-0,39
IV	1,98	-0,32
V	1,45	-1,08
VI	-0,10	0,12

## 2.3 SELEÇÃO

O processo de seleção consiste na escolha dos indivíduos de uma geração dada que serão utilizados na reprodução, contribuindo para a formação da geração seguinte. Assim, indivíduos com altas aptidões devem ser favorecidos para poder se reproduzir, enquanto que indivíduos com baixas aptidões devem ter altas probabilidade de ser descartados nessa tarefa. Porém, estes indivíduos não devem ter probabilidade de seleção zero, já que poderiam encontrar-se perto de regiões de maior interesse dentro do espaço de busca, e, com a ajuda dos operadores genéticos, poderiam dar origem a melhores indivíduos.

Na definição de um método de seleção a pressão de seleção, definida como a relação entre a aptidão máxima e a aptidão média da população, joga um papel muito importante. Pressões muito altas levam o algoritmo a uma convergência prematura e pressões muito baixas ocasionam uma busca aleatória no espaço. Para as primeiras gerações a pressão de seleção deve ser baixa para assim facilitar a exploração das diferentes regiões do espaço e nas últimas gerações a pressão de seleção deve ser alta para favorecer a exploração das melhores áreas.

Um resumo dos principais métodos de seleção aplicados em AGs é apresentado na continuação:



### 2.3.1 Proporcional à aptidão- Método da Roleta

O mecanismo de seleção proporcional à aptidão mais simples é aquele conhecido como seleção por roleta (sorteio), que consiste em se fazer uma analogia com o jogo da roleta.

Para uma população de  $n$  indivíduos o indivíduo  $i$ , com aptidão  $f_i$  terá uma probabilidade  $p_i$  de ser escolhido para reprodução definida como:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (2.11)$$

Na qual  $f_i$  corresponde ao valor da aptidão para o indivíduo  $i$ .

A partir dessas probabilidades são calculadas as probabilidades acumuladas, assim:

$$p_{i\_acum} = p_i + p_{i-1\_acum} \quad (2.12)$$

com  $p_{1\_Acum} = p_1$

Em seguida a roleta é mobilizada gerando-se um número aleatório entre zero e um. As probabilidades acumuladas são comparadas e escolhido o indivíduo para o qual a probabilidade acumulada é menor que esse número. A roleta é mobilizada até completar o número total de indivíduos.

Espera-se que em media (valor esperado) o número de vezes que um indivíduo será escolhido para reprodução,  $N_s$ , seja igual à probabilidade de seleção vezes o tamanho da população.

Por outro lado, o método da roleta apresenta uma dificuldade relacionada à geração de super-indivíduos, os quais apresentam aptidões muito maiores que o da média da população. Esses super-indivíduos tem probabilidades altas de gerar muitos filhos e fazer com que a busca no espaço de soluções seja orientada

por eles. Esse procedimento pode resultar numa prematura convergência do AG a uma solução que possivelmente não seja a ótima.

Outro problema associado ao valor que toma a aptidão dos indivíduos é o seguinte. Considere uma população que consta de dois indivíduos, o primeiro com uma aptidão de 1 e o segundo com uma aptidão de 3, assim o segundo indivíduo tem 3 vezes a probabilidade do indivíduo 1 de ser escolhido para reprodução. Se uma constante é adicionada à aptidão, por exemplo 12, resulta que o segundo indivíduo passe a ter só 1.15 vezes a probabilidade do indivíduo 1 de ser escolhido. Para a solução deste problema é freqüentemente utilizado funções de escalamento, dentre as quais cabe destacar (GEN e CHENG, 1997):

- **Escalamento Linear:** O novo valor para a aptidão dos indivíduos vem dado por:

$$g_i = a \times f_i + b \quad (2.13)$$

Sendo as constantes  $a$  e  $b$  calculadas no sentido de permitir que a aptidão para o indivíduo de aptidão média,  $I_m$ , seja conservada, e que para o melhor indivíduo seja atribuído uma aptidão igual a um número de vezes a aptidão de  $I_m$ . Valores negativos podem ser obtidos para os piores indivíduos.

- **Escalamento Sigma:** Este tipo de escalamento tenta levar em conta a dispersão da população. A aptidão do indivíduo será:

$$g_i = f_i + (\bar{f} - c \times \sigma) \quad (2.14)$$

Na qual  $\bar{f}$  corresponde à aptidão média da população,  $c$  é um inteiro pequeno entre 1 e 5 (MICHAELEWICZ, 1994), e  $\sigma$  é o desvio padrão da população. Igualmente ao que ocorre no escalamento linear, pode-se obter valores negativos da aptidão, os quais são assumidos como zero.

- **Escalamento Potencial:** A nova aptidão é tomada como sendo uma potencia da aptidão inicial do indivíduo, assim:

$$g_i = f_i^k \quad (2.15)$$

Tanto maior potencia utilizada maior será a diferença entre indivíduos "bons" e "ruins".

- **Escalamento por Janela:** consiste num mecanismo que a partir de uma translação do eixo de referencia tenta-se manter a pressão de seleção constante. A expressão para a aptidão nesse caso é dada por:

$$g = f_i - f_w \quad (2.16)$$

Na qual  $f_w$  corresponde à pior aptidão nas últimas  $w$  gerações. Valores típicos de  $w$  estão entre 2 e 10 (GEN e CHENG, 1997).

- **Escalamento por normalização:** trata-se de um procedimento que permite escalar os indivíduos de forma dinâmica em função da geração atual. Para o caso do problema de minimização tem-se:

$$g_i = \frac{f_{\max} - f_i + \gamma}{f_{\max} - f_{\min} + \gamma} \quad (2.17)$$

Na qual  $f_{\max}$  e  $f_{\min}$  são a maior e menor aptidão da população atual respectivamente.  $\gamma$  é um número real entre 0 e 1, e que evita a divisão por zero.

- **Escalamento Boltzmann:** consiste num procedimento para o controle da pressão de seleção com o avanço do número de gerações.

$$g_i = \ell^t \quad (2.18)$$

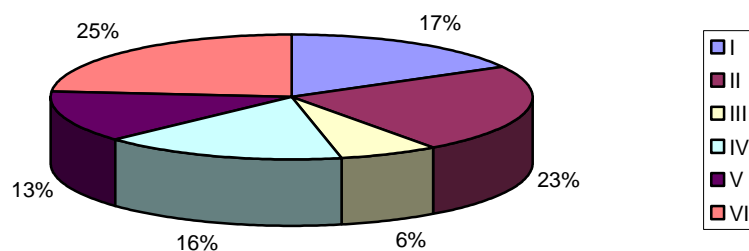
Na qual  $t$  correspondem ao número da geração.

Para o exemplo estudado adota-se a aplicação da seleção por roleta. Assim sendo, sejam as probabilidades dos indivíduos,  $P_i$ , e as probabilidades acumuladas,  $P_{i\_acum}$ , como apresentadas na Tabela 2.5.

**Tabela 2.5** Probabilidades dos indivíduos e probabilidades acumuladas.

Indivíduo	$P_i$	$P_{i\_acum}$
I	0.168	0.168
II	0.232	0.400
III	0.064	0.464
IV	0.166	0.630
V	0.136	0.766
VI	0.234	1.000

A partir das probabilidades do individuo pode-se configurar a roleta como mostrado na Figura 2.4:



**Figura 2. 4** Roleta.

São então gerados os seguintes números aleatórios: 0.315, 0.284, 0.562, 0.829, 0.063, 0.500.; resultados que fazem com que os indivíduos I e VI sejam escolhidos uma vez, o II e o IV duas vezes, ficando os indivíduos III e V sem serem escolhidos. Estes indivíduos são os que apresentam as piores aptidões da população.

Outro método de seleção baseado em aptidão é o *Remainder stochastic sampling* (RSS) com substituição. O método consiste em se utilizar a parte inteira do número esperado de vezes que o indivíduo vai ser escolhido para

reprodução,  $N_s$ , calculado como a probabilidade do indivíduo de ser escolhido multiplicado pelo tamanho da população, para atribuir em forma determinística um número dado de vagas,  $CD$ , na população que tem direito a se reproduzir. Depois as vagas não preenchidas,  $CI$ , são atribuídas utilizando a parte decimal de  $N_E$  e o método da roleta original. Para o exemplo estudado a quantidade de vezes que um indivíduo foi escolhido,  $TS$ , mediante a utilização do RSS pode ser observada na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6** Resultados Método *Remainder Stochastic Sampling*.

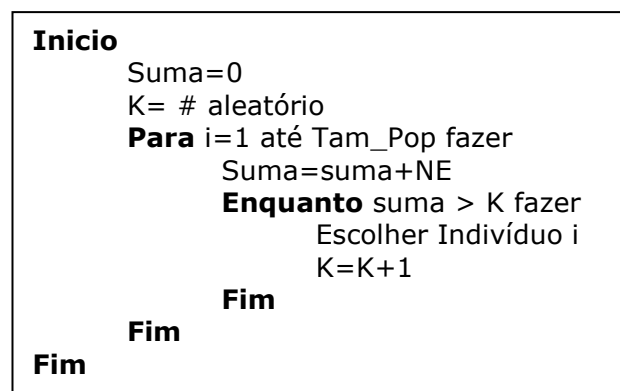
Indivíduo	Número de vezes que o indivíduo pode reproduzir						TS
	NE	CD	Fi_r	Pi_r	Pi_acum_r	CI	
<b>I</b>	1.01	1	0.01	0.00	0.00	0	1
<b>II</b>	1.39	1	0.39	0.13	0.13	0	1
<b>III</b>	0.39	0	0.39	0.13	0.26	1	1
<b>IV</b>	0.99	0	0.99	0.33	0.59	0	0
<b>V</b>	0.82	0	0.82	0.27	0.86	1	1
<b>VI</b>	1.41	1	0.41	0.14	1.00	1	2

Na Tabela 2.6,  $Fi_r$ ,  $Pi_r$  e  $P_{i\_acum\_r}$  corresponde à aptidão, probabilidade de seleção e probabilidade de seleção acumulada, respectivamente.

Para o problema estudado, os indivíduos I, II e VI tem direito a diretamente passar para a etapa de reprodução uma vez. As três vagas de reprodução faltantes são então preenchidas como no método original, sendo gerados os seguintes números aleatórios para isso: 0.90, 0.22 e 0.60. As vagas não preenchidas são ganhas pelos indivíduos III, V e VI. O total é calculado como a soma das duas contribuições. Observa-se que o indivíduo IV não contribuirá na reprodução.

Outra estratégia de seleção é o *Stochastic Universal Sampling* (SUS), proposta por Baker (Apud GEN e CHENG, 1997), e se caracteriza por apresentar dispersão mínima, já que os intervalos da roleta encontram-se igualmente

espaçados. Precisa-se que a roleta seja girada uma única vez e, a partir deste valor, é determinado o número de vezes que um indivíduo será utilizado para reprodução. São duas as razões para se utilizar deste tipo de estratégia (GEN e CHENG, 1997): Não permitir a formação de super-indivíduos e manter a diversidade da população. É importante salientar que neste tipo de seleção a população deve se encontrar distribuída em forma aleatória. Na Figura 2.5 é apresentado o algoritmo para a aplicação desse método de seleção; para o qual  $Tam\_Pop$  é o tamanho da população e  $NE$  é o número de vezes que se espera o indivíduo seja escolhido para reprodução.



**Figura 2. 5** Algoritmo do método *Stochastic Universal Sampling* (Gen e Cheng, 1997).

**Tabela 2.7** Resultados Método *Stochastic Universal Sampling*.

<b>Soma</b>	<b>K</b>	<b>Indivíduo Escolhido</b>
1.01	0.67	I
1.01	1.67	--
2.41	1.67	II
2.41	2.67	--
2.79	2.67	III
2.79	3.67	--
3.78	3.67	IV
3.78	4.67	--
4.59	4.67	--
6.00	4.67	VI
6.00	5.67	VI

Assim, para o nosso problema foi gerado o número aleatório 0.67, e a aplicação do SUS é mostrada na Tabela 2.7. Pode ser observado que o indivíduo V não é escolhido para reprodução.

### 2.3.2 Ranking

São métodos que utilizam o valor da aptidão de cada um dos indivíduos para classificá-los, com o melhor indivíduo assumindo um ranking de zero e para o pior um ranking igual ao tamanho da população. Esse procedimento faz com que os indivíduos localizados nos primeiros lugares da classificação possuam mais possibilidades de ser escolhidos para reprodução.

Métodos de Ranking ajudam a evitar o problema dos super-indivíduos assim como da estagnação da população. Porém, precisam de maior tempo que outros algoritmos, já que primeiro deve realizar o ordenamento dos indivíduos e depois utilizar um método de seleção proporcional à aptidão. Entre os principais métodos baseados em ranking encontram-se (HANCOCK, 1993):

- **Ranking Linear:** Depois dos indivíduos terem sido ordenados o melhor indivíduo é fixado com uma aptidão de  $S$  e o pior com uma aptidão  $2-S$ . As aptidões para os outros indivíduos da população podem ser calculadas como:

$$f_{ir} = s - \frac{2i \times (s-1)}{Tam\_Pop - 1} \quad (2.19)$$

Na qual  $i$  representa o ranking do indivíduo,  $Tam\_Pop$  é o tamanho da população, e  $s$  é um valor entre 1 e 2. Nesse método a pressão de seleção é proporcional a  $S-1$ , assim quanto maior o valor de  $s$  mais rápida será a convergência do algoritmo.

A Tabela 2.8 apresenta os resultados da aplicação do método de seleção por Ranking Linear ao exemplo estudado para um  $s$  de 2, no qual  $F_{ir}$  são as novas

aptidões dos indivíduos calculadas utilizando a Equação 2.19, e  $p_i$  e  $p_{i\_acum}$  são como definidos para o método da roleta, o qual é aplicado a tendo-se em conta os seguintes números aleatórios gerados: 0.686, 0.608, 0.984, 0.312, 0.439 e 0.152.

**Tabela 2.8** Resultados Ranking Linear,  $s=2$ .

<b>Indivíduo</b>	<b>Ranking</b>	<b>Fir</b>	<b>Pi</b>	<b>Pi_acum</b>	<b># Vezes Selecionado</b>
I	2	1.200	0.200	0.200	1
II	1	1.600	0.267	0.467	2
III	5	0.000	0.000	0.467	0
IV	3	0.800	0.133	0.600	0
V	4	0.400	0.067	0.667	1
VI	0	2.000	0.333	1.000	2

Como observado na Tabela 2.8, não foi permitido ao pior indivíduo reproduzir. Quando utilizado um valor de  $s$  igual a dois, o pior indivíduo não tem nenhuma probabilidade de se reproduzir.

- **Ranking Exponencial:** Foi pensado para incrementar a pressão de seleção sobre os indivíduos. No método o indivíduo de Ranking 0 é fixado com uma aptidão de 1, o segundo um valor de  $s$ , o terceiro um valor de  $s^2$ , e assim sucessivamente, Equação 2.20.

$$f_{ir} = s^i \quad (2.20)$$

Na qual  $i$  é o ranking do indivíduo.

Um valor típico de  $s$  é próximo a 0.99, sendo a pressão de seleção proporcional a  $1-s$ . Os resultados da aplicação deste método no exemplo estudado são mostrados na Tabela 2.9. Os números aleatórios gerados foram: 0.228, 0.374, 0.430, 0.137, 0.929, 0.548.



**Tabela 2.9** Resultados Ranking Exponencial,  $s=0.99$ .

<b>Indivíduo</b>	<b>Ranking</b>	<b>Fir</b>	<b>Pi</b>	<b>Pi_acum</b>	<b># Vezes Selecionado</b>
I	2	0.980	0.167	0.167	1
II	1	0.990	0.169	0.337	1
III	5	0.951	0.163	0.499	2
IV	3	0.970	0.166	0.665	1
V	4	0.961	0.164	0.829	0
VI	0	1.000	0.171	1.000	1

### 2.3.3 Torneio

A idéia por trás deste método de seleção é bastante simples. Uma quantidade  $N$  de indivíduos é escolhida de forma aleatória dentre a população, e o melhor individuo é utilizado para reprodução. Isto é repetido até completar o número desejado de Pais. O mais comum é fazer um torneio com dois indivíduos, os quais são escolhidos de forma aleatória. A Tabela 2.9 mostra a aplicação do método de torneio para o exemplo estudado.

**Tabela 2.10** Resultados do Método de Torneio.

<b>Participante 1</b>	<b>Aptidão 1</b>	<b>Participante 2</b>	<b>Aptidão 2</b>	<b>Participante Escolhido</b>
4	31,64	3	12,43	4
3	12,43	5	25,98	5
2	44,89	4	31,64	2
1	32,39	2	44,89	2
6	45,36	4	31,64	6
6	45,36	5	25,98	6

## 2.4 CRUZAMENTO

O operador de cruzamento é o encarregado de gerar, a partir de indivíduos Pais, os novos descendentes. Para isso, deve-se definir uma taxa de cruzamento, que

varia entre 0 e 1. Quando vale 0 toda a população é copiada diretamente para a próxima geração e para o caso de 1 nenhum indivíduo da população atual passaria para a seguinte geração. Valores típicos para essa taxa estão entre 0.6 e 0.9 nos AGs clássicos. A determinação do indivíduo pai e do indivíduo mãe é realizada em forma aleatória dentre os indivíduos escolhidos na fase de seleção.

Em geral, espera-se que o cruzamento de dois indivíduos “bons” produzirá um indivíduo melhor. Isto não será sempre certo, mas será verdadeiro na medida em que avançam as gerações. A geração de indivíduos piores é conhecida como *deception* (WHITLEY, 1991).

#### 2.4.1 Código Binário

Os tipos de cruzamento mais utilizados com código binário são apresentados a seguir. Para ilustrar a aplicação destes operadores foram escolhidos dois indivíduos para se reproduzir como mostrado na Figura 2.6.

Pai	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1
Mãe	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1

**Figura 2. 6** Pais escolhidos para o processo de cruzamento.

- **Cruzamento de 1 Ponto:** Dois novos filhos são gerados tal que o primeiro herda a informação genética à esquerda do ponto de cruzamento do indivíduo pai e a informação genética a direita do ponto de cruzamento do indivíduo mãe. O ponto de cruzamento é escolhido em forma aleatória e não necessariamente deve-se encontrar entre genes. O segundo filho é formado com a informação dos Pais não utilizadas. Os novos indivíduos são apresentados na Figura 2.7, sendo o ponto de cruzamento no bit 6.

Filho 1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
Filho 2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1

**Figura 2. 7** Filhos obtidos a partir do cruzamento de um ponto.

- **Cruzamento de 2 Ponto:** os novos filhos são gerados tal que o primeiro deles contem a parte à esquerda do primeiro ponto de cruzamento e a parte à direita do segundo ponto de cruzamento do individuo pai, e a informação genética entre os pontos de cruzamento do individuo mãe. O outro filho è gerado em forma contraria. Na Figura 2.8 são mostrados os dois novos individuos, sendo os pontos de cruzamento os bits 3 e 14.

Filho 1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Filho 2	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1

**Figura 2. 8** Filhos obtidos utilizando cruzamento de dois pontos.

O cruzamento de dois pontos pode ser generalizado para  $n$  pontos, mas geralmente não apresenta melhores resultados.

- **Cruzamento uniforme:** para cada posição do bit é gerado um número aleatório tal que se este é maior que 0.5 o filho 1 tomará o valor do bit correspondente ao individuo pai em caso contrario tomará o valor do bit do individuo mãe. Para o segundo filho toma-se o caso contrario, como mostrado na Figura 2.9.

Filho 1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Filho 2	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1

**Figura 2. 9** Filhos obtidos a partir do cruzamento uniforme.

### 2.4.2 Código Real

Sejam os indivíduos  $I_1 = [I_{11} \ I_{21} \ \dots \ I_{n1}]$  e  $I_2 = [I_{12} \ I_{22} \ \dots \ I_{n2}]$  os quais foram selecionados para o cruzamento. Alguns operadores de cruzamento que podem ser aplicados para se obter novos indivíduos são apresentados a seguir (HERRERA, LOZANO E VERDEGAY, 1998). Sua aplicação é realizada no exemplo estudado considerando, assim como para a codificação binária, que os indivíduos I e IV foram escolhidos para reprodução, vide Figura 2.10.

$$\begin{aligned} \text{Pai: } & [0.80 \ 0.25] \\ \text{Mãe: } & [1.98 \ -0.32] \end{aligned}$$

**Figura 2. 10** Indivíduos escolhidos para cruzamento.

- **Cruzamento Flat:** na qual a posição  $i$  do filho,  $F = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_i \ \dots \ F_n]$ , vem dada por:

$$F_i = \text{Rand}[I_{i1}, I_{i2}] \quad (2.21)$$

$$F_1 = \text{Rand}[(0.80, 0.25); (1.98, -0.32)] = (0, 91; -0, 20)$$

- **Cruzamento Simples:** dado um ponto de cruzamento aleatório  $i$ , dois novos filhos são gerados, tal que:

$$F_1 = [F_{11} \ F_{21} \ \dots \ F_{i,1} \ F_{i+1,2} \ \dots \ F_{n1}] \quad (2.22a)$$

$$F_2 = [F_{12} \ F_{22} \ \dots \ F_{i,2} \ F_{i+1,1} \ \dots \ F_{n2}] \quad (2.22b)$$

No exemplo temos:

$$F1 = [0.80 \ -0.32]$$

$$F2 = [1.98 \ 0.25]$$

- **Cruzamento Aritmético:** dois filhos são gerados tal que o valor de cada gene vem dado por:

$$F_{i1} = \lambda \times I_{i1} + (1 - \lambda) \times I_{i2} \quad (2.23a)$$

$$F_{i2} = \lambda \times I_{i2} + (1 - \lambda) \times I_{i1} \quad (2.23b)$$

Na qual  $\lambda$  é um valor que varia entre 0 e 1. Se assumido como uma constante temos o denominado cruzamento uniforme, e se é considerado a variar durante o processo evolutivo é dito de não uniforme.

Para os pais escolhidos e com  $\lambda$  de 0.3 os filhos formados são:

$$F1 = [1.63 \quad -0.15]$$

$$F2 = [1.15 \quad 0.08]$$

- **Cruzamento Linear:** A partir dos indivíduos pais são gerados os seguintes indivíduos:

$$S_{i1} = \frac{1}{2} \times I_{i1} + \frac{1}{2} \times I_{i2} \quad (2.24a)$$

$$S_{i2} = \frac{3}{2} \times I_{i1} - \frac{1}{2} \times I_{i2} \quad (2.24b)$$

$$S_{i3} = -\frac{1}{2} \times I_{i1} + \frac{3}{2} \times I_{i2} \quad (2.24c)$$

Os dois melhores indivíduos serão considerados como os novos filhos. Apresenta a desvantagem de ter que avaliar novamente as funções objetivo, o que incrementa o tempo de execução do algoritmo.

No exemplo, obtêm-se:

$$\text{Candidato 1: } [1.39 \quad -0.04]$$

$$\text{Candidato 2: } [0.21 \quad 0.54]$$

$$\text{Candidato 3: } [2.57 \quad -0.61]$$

cujas aptidões são 29.66 22.40 e 6.08 para os candidatos 1, 2 e 3 respectivamente, portanto são considerados como filhos para passar a seguinte etapa do processo os candidatos 1 e 3.

- **Cruzamento BLX- $\alpha$ :** este tipo de cruzamento gera um filho só, tal que a posição  $i$  é determinada como:

$$F^i = Rand[I_{\min} - r \times \alpha, I_{\max} + r \times \alpha] \quad (2.25)$$

Com

$$r = I_{\max} - I_{\min} \quad (2.25a)$$

$$I_{\max} = \max(I_{i1}, I_{i2}) \quad (2.25b)$$

$$I_{\min} = \min(I_{i1}, I_{i2}) \quad (2.25c)$$

Herrera, Lozano e Verdegay (1998) fizeram uma comparação entre os métodos de cruzamento apresentados e encontrou que o BLX- $\alpha$  é o que apresentam melhores resultados.

Aplicando esse operador ao exemplo:

$$I_{\min} = [0.8 \quad -0.32]$$

$$I_{\max} = [1.98 \quad 0.25]$$

$$r = [1.18 \quad 0.57]$$

$$f_i = \left\{ \begin{array}{l} Rand[0.8 - 1.18 \times 0.5, 1.98 + 1.18 \times 0.5] = 0.99 \\ Rand[-0.32 - 0.57 \times 0.5, 0.25 + 0.57 \times 0.5] = -0.4 \end{array} \right\}$$

## 2.5 MUTAÇÃO

O operador mutação é o encarregado de introduzir diversificação na população mediante a alteração do código genético dos indivíduos obtidos a partir do

processo de cruzamento. Para a utilização deste operador deve-se definir uma taxa de mutação que varia geralmente entre 0.5% e 3%. Um valor muito alto da taxa de mutação converterá o algoritmo em um de busca aleatória

A seguir serão definidas as principais propostas reportadas sobre operadores de mutação para algoritmos de código binário e real.

### 2.5.1 Código Binário

Alguns dos principais operadores de mutação são:

- **Mutação *Jump*:** O operador mais simples encontrado é o operador *Jump* o qual opera sobre cada um dos bits de cada indivíduo da população. Se o bit é escolhido para mutação, então o valor do bit é invertido, assim se tinha um valor de zero agora terá valor de um, e vice-versa. Uma população de 20 indivíduos cujo tamanho é de 5 bits terá, com probabilidade de mutação de 0.02, em média 2 bits cujo conteúdo será trocado.

Para o exemplo estudado se tomamos o Filho1 da Figura 2.7, e se foi determinado que a posição 6 sofresse mutação, se gerará um novo indivíduo como mostrado na Figura 2.11.

1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**Figura 2. 11** Indivíduo gerado depois de aplicada a mutação *Jump*.

- **Mutação *Creep*:** Um bit escolhido para mutação troca com seu vizinho de valor. Assim se na posição  $i$  do indivíduo tem-se um valor de 1 e na posição  $i-1$  um valor de zero, o novo indivíduo terá na posição  $i$  um valor de zero e na posição  $i-1$  terá 1. A Figura 2.12 mostra o novo indivíduo gerado a partir do Filho 1 na Figura 2.7 quando este sofre mutação *Creep* no bit 8.

1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**Figura 2. 12** Indivíduo gerado utilizando Mutação *Creep*.

- **Mutação Não Uniforme:** o processo de mutação é realizado de igual forma que para o *Jump*, só que, na medida em que o número de gerações incrementa, o número de bits no indivíduo que podem sofrer mutação diminui. Bits que se encontram na parte esquerda do indivíduo apresentam maiores cardinalidade e, por tanto, uma mutação nestas posições transformar  consideravelmente o indivíduo, o qual não pode ser permitido nas gerações finais devido à convergência da população.

### 2.5.2 Código Real

Seja o indivíduo  $I = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_n]$  e  $I_i \in [a_i, b_i]$  um gene a ser mutado. O novo gene  $I_i^*$  pode ser obtido por meio de um dos seguintes operadores de mutação (HERRERA, LOZANO e VERDEGAY, 1998), os quais são aplicados sobre o Filho 1 obtido do cruzamento aritmético e considerando que o gene dois foi escolhido para sofrer mutação:

- **Mutação *Jump*:** o valor de  $I_i^*$  é um número aleatório no intervalo  $[a_i, b_i]$ .

Para o exemplo, temos:

$$I^* = [1.63 \ -0.5]$$

- **Mutação *Creep*:** pequenas quantidades aleatórias são adicionadas sobre o cromossomo para tentar encontrar pontos no espaço que sejam melhores que



a solução obtida depois do processo de cruzamento. O valor máximo dessas quantidades é definido pelo usuário.

Supondo que a quantidade aleatória máxima corresponde a um 5% do tamanho do intervalo, ou seja,  $0.05 \times (2 - (-2)) = 0.2$ , e que o número aleatório gerado seja  $-0.03$ , depois de ter adicionado esta quantidade ao gene dois temos:

$$I^* = [1.63 \quad -0.18]$$

- **Mutação Não Uniforme:** para uma geração  $n$ , e sendo  $g_{\max}$  o número máximo de gerações o valor de  $I_i^*$  pode ser calculado como:

$$I_i^* = \begin{cases} I_i + \Delta(t, b_i - I_i) & \text{if } \tau = 0 \\ I_i + \Delta(t, I_i - a_i) & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (2.26a,b)$$

Com  $\tau$  um número aleatório que pode tomar um valor de zero ou um, e:

$$\Delta(t, y) = y \times \left( 1 - r \left( \frac{1 - t}{g_{\max}} \right)^b \right) \quad (2.27)$$

Na qual  $r$  é um número aleatório no intervalo  $[0,1]$ , e  $b$  um parâmetro que determina o grau de dependência sobre o número de gerações.

A título de exemplo, se o gene da variável  $y$  foi escolhido para sofrer mutação e considerando que o algoritmo encontra-se na geração 20, sendo que o número máximo de gerações é 200, que  $b$  é igual a 3 e supondo que foram gerados os valores aleatórios 0 para  $\tau$  e 0.6 para  $r$  temos:

$$\Delta(20, 2 - (-0.15)) = 2.15 \times \left( 1 - 0.62 \left( \frac{1 - 20}{200} \right)^3 \right) = 0.63$$

$$I_2 = -0.1 + 0.63 = 0.53$$

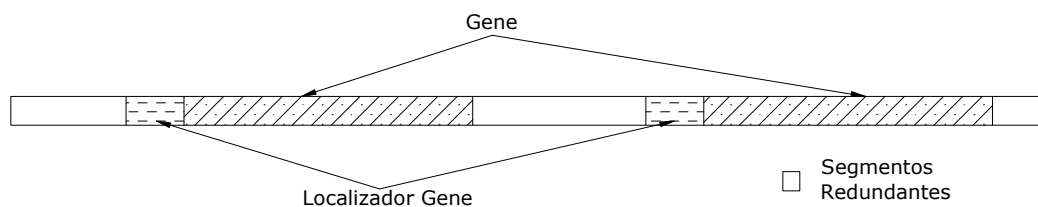
Por tanto o indivíduo depois de ter sofrido mutação fica:

$$I^* = [1.63 \quad 0.53]$$

## 2.6 ALGORITMO GENÉTICO DE CODIFICAÇÃO REDUNDANTE IMPLICITA

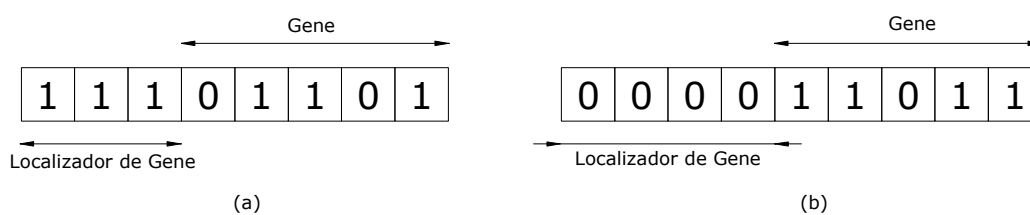
A seguir é mostrada a teoria relacionada com um AG para a resolução de problemas não estruturados, ou seja, àqueles nos quais o número de variáveis a serem otimizadas pode variar durante o processo evolutivo. Este algoritmo foi proposto por Raich e Ghaboussi em 1998 e está baseado numa modificação do AG de código binário.

O cromossomo, como mostrado na Figura 2.13 esta formado por três tipos de segmentos: Localizador de gene, gene e segmento redundante.



**Figura 2. 13** Cromossomo típico no AG de codificação redundante implícita.

O localizador do gene é o encarregado de definir a presença de um gene dentro do cromossomo e corresponde simplesmente a uma seqüência definida de bits. Assim, por exemplo, o localizador poderia estar formado por uma seqüência de 3 bits contínuos alocados com um valor de um ou 4 bits contínuos alocados com um valor de zero, vide Figura 2.14. Não existe uma regra definida para a definição do localizador, mas quanto maior o tamanho do localizador menor o número total de genes que serão encontrados no cromossomo.



**Figura 2. 14** Exemplos de localizadores e instancias de genes. (a) Modelo com 3 uns em seqüência, (b) Modelo com 4 zeros em seqüência.

Logo depois de ter-se encontrado o localizador de gene, um gene é definido, o qual corresponde ao valor de uma variável no problema, vide Figura 2.14. Já Segmentos redundantes ocorrem entre instancias de genes.

As operações de seleção, cruzamento e mutação são realizadas como no AG de código binário clássico; sendo diferente a forma de avaliar a aptidão dos indivíduos. O cromossomo é percorrido de esquerda à direita e onde é encontrado um localizador de gene é seguidamente definido um gene. A aptidão é avaliada depois de ter encontrado todos os genes presentes no cromossomo.

Um dos fatores chaves para um bom desenvolvimento do AG de código redundante é o índice de redundância inicial o qual é uma medida do número de genes prováveis que serão formados num indivíduo da população inicial. Na medida em que o tamanho do cromossomo aumenta o número provável de genes também aumenta.

Algumas vantagens de se utilizar o algoritmo de codificação redundante implícita em relação a outros AGs são (RAICH e GHABOUSSI, 1998):

- A utilização dos segmentos redundantes ajuda a manter uma maior diversidade na população, mesmo depois de obtida a convergência para a melhor aptidão.
- A mutação de bits pertencentes aos segmentos redundantes aumenta o espaço de busca permitindo que novos blocos de bits sejam formados ou recuperados.

- A possibilidade de os pontos de cruzamento estarem nos segmentos redundantes ajuda a diminuir o fenômeno de perda de blocos de bits que pertençam a uma boa solução para o problema.
- O número de parâmetros não é explicitamente codificado e pode variar entre um indivíduo da população para outro.

Como exemplo da aplicação deste algoritmo, deseja-se avaliar a aptidão de dois cromossomos e cuja aptidão  $F_j$  vem dada por:

$$F_j(X) = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.28)$$

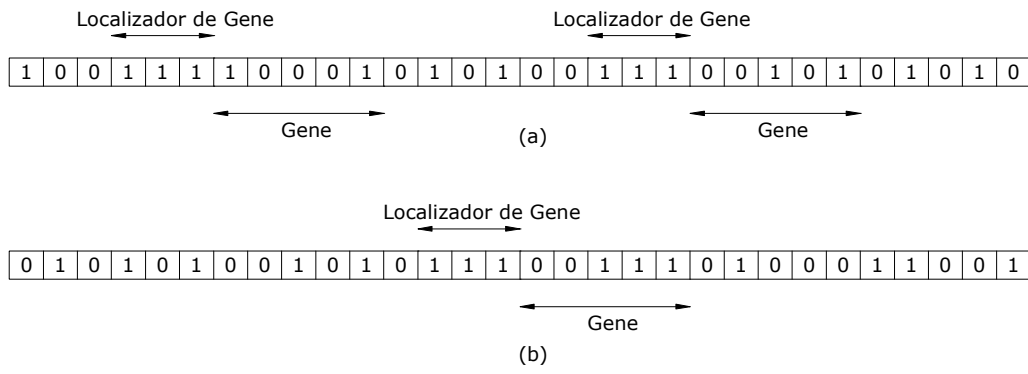
Na qual  $n$  é o número de variáveis (genes) presentes no cromossomo,  $x_i$  o valor do gene  $i$ . Considere-se que o localizador de gene consiste de uma seqüência de três 1 contínuos e que o tamanho do gene seja 5 Bits.

Na Figura 2.15 pode ser observado que ao se percorrer o cromossomo 1 de esquerda para direita quando se chegar nos bits 4-6 encontra-se um localizador de gene e por tanto os seguintes 5 bits, ou sejam os bits 7-11 correspondem a um gene. Depois do bit 11 é encontrado segmento redundante até se chegar aos bits 18-20; no quais é novamente encontrado um localizador de gene e um gene será definido, então entre os bits 21-25. As instancias de gene são decodificadas utilizando a Equação 2.7 para os valores 17 e 5, respectivamente. Da mesma forma para o cromossomo 2 é obtido que um gene é encontrado entre os bits 16-20 e cujo valor decodificado é de 7.

As aptidões dos dois indivíduos são então:

$$F_1 = \sum_{i=1}^2 x_i = 17 + 5 = 22 \quad F_2 = \sum_{i=1}^1 x_i = 7$$

Observa-se então que para este exemplo o indivíduo 2 apresenta, em um problema de minimização, uma melhor aptidão que o indivíduo 1.



**Figura 2. 15** Exemplo cromossomo AG de codificação redundante implícita. (a) Cromossomo 1, (b) Cromossomo 2.



## 3. DETECÇÃO DE DANO

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

O dano é comumente definido como a diminuição da rigidez de um ou vários elementos, sendo esta, como usual na literatura, decorrente de uma redução no módulo de elasticidade do material.

Uma das principais formas para se avaliar dano é através de metodologias baseadas nas mudanças dos parâmetros dinâmicos da estrutura. Essas metodologias partem do princípio de que, depois de ter acontecido o dano, ocorrem variações nas propriedades da estrutura (matrizes de massa, rigidez e amortecimento do modelo de elementos finitos), o que implica em variações nas propriedades dinâmicas da estrutura (frequências naturais, formas modais e amortecimentos modais).

Quando se deseja propor uma metodologia para detecção de dano baseada em vibração os seguintes aspectos devem ser levados em conta:

- Dependência de um modelo de elementos finitos apropriado para representar a estrutura e de dados experimentais da estrutura para a definição da sua real condição. Ao se adotar um modelo de elementos finitos para representar

o estado inicial sem dano da estrutura, que é a prática corrente dos algoritmos tratados na literatura, as propriedades dinâmicas deste modelo poderiam apresentar características um tanto diferentes daquelas da estrutura real, acarretando a introdução de erros nos resultados oferecidos pela metodologia. Possíveis discrepâncias são devidas a (HU *et al*, 2001): aproximações nas condições de contorno, diferenças entre as conectividades dos elementos do modelo e aquela da estrutura real, valores das propriedades dos materiais que não correspondem aos reais, fontes de rigidez ignoradas devido a custos computacionais, malhas pouco refinadas ou tipos de elementos incorretos.

- Comportamento linear ou não linear da estrutura. Uma das principais aproximações encontradas na literatura técnica é que o comportamento global da estrutura, depois de ter sido danificada, encontra-se no regime linear. Deve-se ressaltar que existem exemplos clássicos de não linearidades como é o caso de estruturas de concreto que apresentam fissuras, já que estas podem abrir e fechar sob condições normais de operação.
- Sensibilidade de parâmetros modais ao dano. Espera-se que o parâmetro utilizado seja o mais suscetível possível ao dano, principalmente para níveis baixos de dano. Comumente é aceito que frequências naturais são mais sensíveis ao dano quando comparadas com formas modais. Zhao e DeWolf (1999) derivaram coeficientes de sensibilidade de frequências naturais, formas modais e flexibilidade modal a mudanças na rigidez do sistema. Os resultados mostraram que a flexibilidade modal era o parâmetro mais sensível ao dano.
- Qualidade da informação experimental. Limitações na instrumentação e sensores, ruído aleatório no sitio da tomada de medições, operações manuais



requeridas durante os ensaios e julgamentos do operador durante a análise contribuem para a variabilidade dos dados dos ensaios; e por tanto nos resultados que os utilizam (ALLAMPALI, 2000).

- Variações nas propriedades modais devidas a fatores distintos ao dano, tal como mudanças nas condições de operação e ambientais. Sohn (2007) indicou que estas variações podem ter sua origem em mudanças da temperatura que ocasionam mudanças nas propriedades dos materiais e/ou nas condições de vinculação da estrutura, vibrações devidas ao vento e variações da massa da estrutura.
- Informação sobre o dano requerida. Segundo Rytter (Apud DOEBLING, 1998) uma metodologia de detecção de dano pode nos oferecer quatro níveis de detalhe sobre a condição da estrutura: I) Identificação da presença do dano na estrutura, II) Nível I + Localização de elementos danificados, III) Nível II + quantificação da extensão do dano e IV) Nível III + determinação da vida útil restante da estrutura. Atualmente a maioria das metodologias atinge um Nível III, no caso de se utilizar um modelo para a representação da condição inicial da estrutura.

A seguir é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre metodologias de detecção de dano que foram propostas nos últimos 10 anos:

Cornwell, Doebling e Farrar (1999) empregaram variações na energia de deformação para detectar dano em placas. A principal característica do método é que não precisa de um modelo de elementos finitos correlacionado nem de formas modais normalizadas. As formas modais devem estar definidas para todos os graus de liberdade do modelo de elementos finitos.

Li *et al* (1999) detectaram dano em estruturas tipo balanço com deformação à flexão e ao esforço cortante através de uma técnica baseada na flexibilidade. A principal vantagem desta metodologia é que necessita só de duas formas modais medidas. A metodologia foi avaliada experimentalmente reportando erros menores que 11% em relação aos valores reais dos parâmetros de rigidez.

Lee e Shin (2001) propuseram um método que utiliza a matriz de rigidez dinâmica exata e as funções de resposta em frequência (FRFs) da condição danificada como dado de entrada para localizar e quantificar dano em uma ou múltiplas locações ao mesmo tempo.

Ren e de Roeck (2002) utilizaram variações nas frequências e nas formas modais para estabelecer equações de dano ao nível de elemento. Dois diferentes vetores de resíduos são propostos para aumentar o número de equações disponíveis. O método *Nonnegative Least Square Method* é empregado para a solução do sistema. Resultados mostram uma grande precisão para a localização e quantificação do dano numa viga com dano múltiplo e medições contaminadas por ruído.

Kim e Stubbs (2002) propuseram um método que utiliza umas poucas formas modais medidas, e que não precisa da montagem de um sistema de equações. Três parâmetros foram definidos para medir a precisão obtida com tal metodologia. O primeiro relacionado com o erro médio de localização, outro indicando o número de elementos falsamente identificados como danificados e um terceiro relacionado com o erro sobre os elementos danificados que não foram identificados. No trabalho uma viga contínua de dois vãos foi estudada, para a qual a metodologia não apresentou erros relacionados à localização do dano e muito pouco em relação à quantificação do dano.

Parloo, Guillaume e Van Overmeire (2003) empregaram sensibilidades de formas modais a mudanças na massa em graus de liberdade estrutural ou mudanças em rigidez entre graus adjacentes para detectar dano. A metodologia não requer a elaboração de um modelo de elementos finitos e está limitada à determinação de níveis baixos de dano. Esta técnica foi aplicada sobre dados da Ponte I-40 no México mostrando a aplicabilidade para localizar dano.

Kim e Chun (2004) apresentaram uma metodologia de detecção de dano ao nível de piso que utiliza mudanças nas formas modais e frequências naturais. A principal característica dessa metodologia é que só precisa de um modo para se chegar a bons resultados; a utilização de vários modos melhoraria os resultados se formulado segundo um problema de otimização.

Hwang e Kim (2004) propuseram uma metodologia para localizar e quantificar dano que utiliza só um vetor do subconjunto das FRFs completas para umas poucas frequências. A formulação evita ter que se trabalhar com matrizes mal condicionadas, as quais são comumente obtidas na formulação do problema de detecção de dano.

Brasiliano, Doz e de Brito (2004) definiram uma norma de erro residual para identificar dano em vigas contínuas e pórticos, a qual considera também a deformação por força cortante. Numa primeira etapa o método consegue detectar os elementos danificados estudando o erro presente na equação de movimento, com base na utilização das matrizes de rigidez e massa do sistema inicial. Em seguida um processo iterativo é realizado para encontrar os parâmetros do sistema, buscando-se um mínimo de erro na equação de movimento, quando utilizada a matriz de rigidez danificada.

Tang *et al* (2005) trataram o problema de identificação de dano como um problema de reconhecimento de modelos, e utilizaram redes neurais artificiais

para resolvê-lo. Como dado de entrada para a rede foram utilizados parâmetros combinados na forma de taxas de mudanças das freqüências, relações de mudanças das freqüências e critérios de confiança da flexibilidade modal. Para o caso de dano múltiplo e simples o máximo erro encontrado foi de 2% e não se apresentam elementos falsamente identificados como danificados.

Escobar, Sosa e Gómez (2005) a partir de uma matriz de transformação, utilizada para a condensação dos graus de liberdade primários, e de um processo iterativo conseguem determinar as novas matrizes de rigidez de cada elemento da estrutura. Para se levar em conta erros nas medições e escassez de dados foram utilizadas duas formulações baseadas em freqüências naturais e formas modais.

Li, Yang e James (2006) localizaram dano em estruturas 3D mediante a decomposição da energia de deformação modal para cada elemento como contribuições devidas às coordenadas axiais e transversais. Com esta decomposição os autores procuram fazer com que o método seja menos sensível à posição do dano e ao tipo de modo utilizado.

Xie e Xué (2006) propuseram um método baseado em medições de freqüências e análise de sensibilidade para a localização e quantificação do dano estrutural em edifícios de tipo cortante (*shear building*, aperticados). A localização do dano não parece ser afetada pelo número de locais danificados e uma menor extensão do dano, mas a quantificação é afetada. Encontrou-se que a sensibilidade varia significativamente com relação à localização do dano e que alguns tipos de dano não alteram todas as freqüências de uma estrutura.

Begambre (2007) propôs uma metodologia para a avaliação da integridade estrutural a partir da utilização da metaheurística *Particle swarm optimization*. Os parâmetros desta técnica são auto-configurados utilizando o Nelder- Mead

Simplex. Estruturas de tipo viga e treliça são analisadas sob diferentes cenários de dano e considerando dados com ruído e incompletos mostrando um grande desempenho para a identificação dos elementos danificados.

Uma revisão mais detalhada de diferentes metodologias para detecção de dano que atingem nível II e nível III, segundo a classificação de Rytter é apresentada no que se segue. Por último é apresentada uma breve revisão de técnicas de expansão de modos, as quais permitem solucionar o problema de medições incompletas.

## 3.2 METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO DE DANO

Diversas metodologias para a localização de dano estrutural baseadas nas mudanças de parâmetros modais foram formuladas nas últimas décadas. Neste trabalho foram revisadas metodologias de localização de dano que utilizam como parâmetros de entrada variações da energia de deformação modal, variações de formas modais ou frequências naturais, vetores de força residual e variações na matriz de flexibilidade da estrutura. A seguir apresenta-se a formulação de algumas delas.

### 3.2.1 Metodologias baseadas em energia

A energia de deformação modal (MSE) do  $j$ -ésimo elemento e o  $i$ -ésimo modo, antes e depois da ocorrência do dano, podem ser definidos como (SHI *et al.*, 1998):

$$MSE_{ij} = \{\varphi_i\}^T [K_j] \{\varphi_i\} \quad (3.1a)$$

$$MSE_{ij}^d = \{\varphi_{di}\}^T [K_{dj}] \{\varphi_{di}\} \quad (3.1b)$$

Na qual  $\phi_i$  corresponde à forma modal  $i$ ,  $K_j$  à matriz de rigidez global do elemento  $j$ , e  $d$  se trata do elemento danificado.

A diminuição da rigidez de um dado elemento afetará localmente as formas modais, fato esse que permite obter uma grande variação na MSE do elemento danificado e pequenas variações nos outros elementos. A partir desta suposição Shi, Law e Zhang (1998) propuseram localizar dano mediante a relação da mudança da energia modal (MSECR):

$$MSECR_j^i = \frac{|MSE_{ij}^d - MSE_{ij}|}{MSE_{ij}} \quad (3.2)$$

Se considerarmos o MSE para  $r$  modos, o  $MSECR_j$  do  $j$ -ésimo elemento define-se como:

$$MSECR_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{MSECR_j^i}{MSECR_{\max}^i} \quad (3.3)$$

Law, Shi e Zhang (1998) consideraram que para efeitos de localização de dano, o conteúdo de energia dentro de cada elemento não muda com o dano, ou seja, que a soma da energia de deformação modal com a energia cinética (EC) permanece constante. Um parâmetro mais sensível ao dano, quando comparado com o MSE, pode ser formulado por meio da relação entre a  $MSE$  e a  $EC$ . O quociente de energia elementar  $EEQ_{ij}$ , associado ao elemento  $j$  e o modo  $i$ , para a condição inicial e danificada, é expresso como:

$$EEQ_{ij} = \frac{MSE_{ij}}{CE_{ij}} \quad (3.4)$$

$$EEQ_{dij} = \frac{MSE_{ij}^d}{CE_{ij}^d} \quad (3.5)$$

Considerando-se que não há variação na matriz de massa da estrutura, a energia cinética para a condição inicial e danificada são expressas por (LAW *et al.*, 1998):

$$CE_{ij} = \{\varphi_i\}^T [M_j] \{\varphi_i\} \quad (3.6)$$

$$CE_d^{ij} = \{\varphi_{di}\}^T [M_j] \{\varphi_{di}\} \quad (3.7)$$

Com  $M_j$  sendo a matriz de massa do elemento.

A relação da diferença do cociente de energia elementar  $EEQDR_{ij}$  fica então:

$$EEQDR_{ij} = \frac{|EEQ_{ij} - EEQ_{dij}|}{EEQ_{ij}} \quad (3.8)$$

Quando utilizados um número  $r$  de modos, o  $MSECR_j$  do  $j$ -ésimo elemento, define-se como:

$$EEQDR_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{EEQDR_j^i}{EEQDR_{\max}^i} \quad (3.9)$$

As duas propostas anteriores precisam que sejam fornecidas formas modais completas para a realização da localização do dano.

Os elementos danificados serão aqueles que apresentem maiores valores relativos dos coeficientes  $MSECR_j$  ou  $EEQDR_j$  dados nas Eqs. (3.3) e (3.9), respectivamente. Uns poucos modos de vibração são necessários para se obter uma boa precisão na localização.

### 3.2.2 Metodologias baseadas em técnicas de correlação

Na correlação entre dois vetores se busca determinar se eles são ou não iguais. No caso do problema de detecção de dano, geralmente, têm-se dois vetores, um

experimental e outro analítico, de mudanças de algum parâmetro dinâmico. O vetor de mudanças analítico é mudado até obter a melhor configuração dos parâmetros da estrutura, que permitem ter a maior correlação com o vetor de mudanças constatadas experimentalmente.

A partir da idéia anterior, Messina, Williams e Contursi (1998) propuseram o Multiple Damage Location Assurance Criterion (MDLAC), o qual determina a localização do dano a partir das variações nas freqüências naturais. Se  $\{\Delta f\}$  é o vetor de mudança de freqüências medido,  $\{\delta f\}$  o vetor analítico de mudanças em freqüências, assumindo um vetor de dano arbitrário  $\{\delta D\}$  define-se o MDLAC como:

$$MDLAC(\{\delta D\}) = \frac{|\{\Delta f\}^T \cdot \{\delta f(\{\delta D\})\}|^2}{(\{\Delta f\}^T \cdot \{\Delta f\})(\{\delta f(\{\delta D\})\}^T \cdot \{\delta f(\{\delta D\})\})} \quad (3.10)$$

Com:

$$\{\delta f_j\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial D_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial D_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_p}{\partial D_1} & \dots & \frac{\partial f_p}{\partial D_m} \end{bmatrix} \{\delta D\} \quad (3.11)$$

A sensibilidade da freqüência  $k$  ao dano no elemento  $j$ ,  $\frac{\partial f_k}{\partial D_j}$ , é dada pela

expressão:

$$\frac{\partial f_k}{\partial D_j} = \frac{1}{8 * f_k^a * \pi^2} \frac{\{\phi_k\}^T [K_j] \{\phi_k\}}{\{\phi_k\}^T [M_j] \{\phi_k\}} \quad (3.12)$$

O termo  $f_k^a$  Corresponde à freqüência natural analítica para o modo  $k$

A dimensão do vetor  $\{\delta f\}$  é igual ao número de modos utilizados, enquanto que a dimensão de  $\{\delta D\}$  é igual ao número de locais potencialmente danificados. Para a determinação dos locais danificados, procura-se o vetor  $\{\delta D\}$



que maximiza os valores do MDLAC. Valores do MDLAC encontram-se normalizados entre zero, para nenhum grau de correlação, e um, para correlação total.

Uma versão do MDLAC que utiliza formas modais foi proposta por Shi, Law e Zhang (2000), qual seja:

$$MDLAC(\{\delta D_j\}) = \frac{|\{\Delta\Phi\}^T \cdot \{\delta\Phi\{\delta\{D_j\}\}\}|^2}{(\{\Delta\Phi\}^T \{\Delta\Phi\}) \cdot (\{\delta\Phi\{\delta\{D_j\}\}\}^T \cdot \{\delta\Phi\{\delta\{D_j\}\}\})} \quad (3.13)$$

Na qual  $\{\Delta\Phi\}$  é o vetor de mudança das formas modais com dimensão igual ao produto do número de modos medidos e o número de locações de sensores;  $\{\delta\Phi\}$  indica mudanças das formas modais analíticas para dano de uma magnitude conhecida  $\{\delta D_j\}$  em diferentes elementos  $j$ . Os graus de liberdade dos dois vetores devem-se corresponder.

A sensibilidade da  $k$ -ésima forma modal ao dano,  $\{\phi_k\}$  no elemento  $j$  é dado por (SHI *et al*, 1998):

$$\frac{\partial\{\phi_k\}}{\partial D_j} = \sum_{i=1}^r \frac{-\{\phi_r\}^T [K_j] \{\phi_r\}}{\lambda_r - \lambda_k} \{\phi_r\} \quad \text{com } r \neq k \quad (3.14)$$

Na qual  $\lambda_k$  corresponde ao  $k$ -ésimo valor próprio e  $r$  é o número de modos analíticos utilizado no cálculo. Então, para qualquer combinação de dano em vários locais, o vetor de mudanças de formas modais teórico pode ser expresso como uma combinação linear das sensibilidades. Por tanto, quando  $r$  modos são utilizados para localizar o dano, o vetor de mudanças nas formas modais pode ser escrito como:

$$\{\delta\Phi\} = \begin{Bmatrix} \delta\{\Phi_1\} \\ \dots \\ \delta\{\Phi_r\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\{\Phi_1\}}{\partial D_1} & \dots & \frac{\partial\{\Phi_1\}}{\partial D_L} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial\{\Phi_r\}}{\partial D_1} & \dots & \frac{\partial\{\Phi_r\}}{\partial D_L} \end{bmatrix} \{\delta D\} \quad (3.15)$$

Os valores do MDLAC são calculados supondo-se um elemento danificado, um de cada vez para todos os elementos, sendo os elementos que apresentem os valores mais altos aqueles considerados preliminarmente como danificados. Segundo os autores do método, a efetividade da proposta se deve ao fato de que o MDLAC, para o caso de múltiplos locais danificados, tem contribuição de danos individuais.

Uma das principais vantagens dessa metodologia é que utiliza formas modais incompletas, evitando-se assim os erros introduzidos por técnicas de expansão de modos.

### 3.2.3 Metodologias baseadas no vetor de força residual

Seja a equação de vibração livre dada pela expressão:

$$([K_u] - w_r^2 [M_u]) \{\phi\}_r = 0 \quad (3.16)$$

sendo  $K_u$  a matriz de rigidez do sistema,  $M_u$  a matriz de massa do sistema,  $w_r$  e  $\phi_r$  são a  $r$ -ésima frequência natural e forma modal, respectivamente.

Se no sistema é introduzida uma perturbação nas matrizes de massa,  $\Delta M$ , e rigidez,  $\Delta K$ , tal que:

$$[K_d] = [K_u] + [\Delta K] \quad (3.17a)$$

$$[M_d] = [M_u] + [\Delta M] \quad (3.17b)$$

A condição de ortogonalidade dos modos, válida para a condição danificada, é igualmente expressa como:

$$([K_d] - w_{rd}^2 [M_d]) \{\phi\}_{rd} = 0 \quad (3.18)$$

Substituindo (3.17) em (3.18), têm-se:

$$([K_u] + [\Delta K] - w_{rd}^2 [M_u + \Delta M]) \{\phi\}_{rd} = 0 \quad (3.19)$$

$$([K_U] - w_{rd}^2 [M_U]) \{\varphi\}_{rd} = -([\Delta K] - w_{rd}^2 [\Delta M]) \{\varphi\}_{rd} \quad (3.20)$$

Por outro lado, se denominarmos o termo da direita como o vetor de força residual,  $R_r$ , para o modo  $r$ , obtêm-se:

$$R_r = -([\Delta K] - w_{rd}^2 [\Delta M]) \{\varphi\}_{rd} \quad (3.21)$$

Alem disso, dado que todos os termos da esquerda são conhecidos, o vetor de força residual pode finalmente ser definido como:

$$R_r = ([K_U] - w_{rd}^2 [M_U]) \{\varphi\}_{rd} \quad (3.22)$$

Ge e Lui (2005) propõem que o dano numa estrutura seja localizado a partir dos elementos do vetor de força residual que sejam diferentes de zero, já que estes correspondem aos graus de liberdade que são influenciados pelo dano. As formas modais utilizadas na Equação (3.22) contem ruído devido a erros no modelamento numérico e erros nas medições, isto levará a que alguns dos elementos do vetor de força residual sejam corrompidos, e por tanto a possíveis erros no modelo de localização de dano. Para solucionar esse problema os autores propuseram utilizar um pseudo-vetor de força residual definido como:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_n\}^T \quad (3.23)$$

Com:

$$b_j = \left[ \prod_{i=1}^r (|b_{j_i}|) \right]^{1/b} \quad (3.24)$$

na qual  $|b_{j_i}|$  é o valor absoluto do  $j$ -ésimo elemento de  $R_i$  calculada da Equação (3.22). A equação (3.24) foi elaborada em base no fato de que em forma geral o ruído não afeta a todos os modos de vibração e, portanto, valores zero de  $|b_{j_i}|$  são esperados para alguns valores de  $i$ , eliminando-se portanto o ruído.

Yang e Liu (2007) definiram um vetor de força residual nodal para localizar dano reescrevendo-se a Equação (3.22) como

$$\begin{bmatrix} \Delta k_1^T \\ \Delta k_2^T \\ \vdots \\ \Delta k_n^T \end{bmatrix} \phi_{dj} = \begin{Bmatrix} R_{j1} \\ R_{j2} \\ \vdots \\ R_{jn} \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

Sendo  $\Delta k_i$  o vetor de mudança de rigidez do  $i$ -ésimo grau de liberdade.  $\Delta k_i$  assume um valor diferente de zero se o  $i$ -ésimo grau de liberdade está danificado. Para dados vibracionais com medições de ruído, os graus de liberdade danificados podem ser determinados por meio dos elementos maiores absolutos em  $R_j$ .

O vetor de força residual nodal  $nb_j$  para a  $j$ -ésima forma modal é definido como:

$$nb_j = \begin{Bmatrix} nb_{j1} \\ nb_{j2} \\ \vdots \\ nb_{jq} \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

na qual,  $q$  é o número de nós no modelo estrutural de elementos finitos. Cada elemento em  $nb_j$  é definido como a soma dos valores absolutos correspondentes dos elementos em  $R_j$ , associados aos graus de liberdade desse nó. Aqueles nós com os valores maiores de  $nb_j$  são os nós mais suspeitos, sendo os elementos danificados determinados em relação ao número do nó e o número do elemento.

### 3.2.4 Metodologias baseadas na matriz de flexibilidade

A partir da Equação 3.16 a matriz de rigidez pode ser trabalhada por meio da expressão:

$$[K_U][\Phi] = [M_U][\Phi][\Omega] \quad (3.27)$$

Pós-multiplicando por  $[M][\Phi]^T$  tem-se:

$$[K_U][\Phi][M_U][\Phi]^T = [M_U][\Phi][\Omega][M_U][\Phi]^T \quad (3.28a)$$

ou, ainda

$$[K_U][\Phi][M_U][\Phi]^T = [M_U][\Phi][\Omega][\Phi]^T [M_U] \quad (3.28b)$$

E considerando que os modos estão normalizados em relação à massa a seguinte frase matricial pode ser redigida:

$$[K_U] = [M_U][\Phi][\Omega][\Phi]^T [M_U] \quad (3.29)$$

A Equação (3.29) pode ser expressa em forma de somatório como:

$$[K_U] = [M_U] \left( \sum_{i=1}^n w_i^2 \phi_i \phi_i^T \right) [M_U] \quad (3.30)$$

Agora, dado que a matriz de flexibilidade  $F$  é o inverso da matriz de rigidez, obtêm-se então:

$$F = [\Phi][\Omega^{-1}][\Phi]^T \quad (3.31)$$

Ou em forma de somatória:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{1}{w_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (3.32)$$

A Equação 3.32 representa a matriz de flexibilidade de uma estrutura medida dinamicamente. A grande vantagem desta expressão é que depende inversamente da frequência dos modos, portanto precisa de uns poucos modos de baixa frequência para construir a matriz com uma boa precisão.

A base para se utilizar a matriz de flexibilidade como indicador do dano reside no fato de que, igualmente ao caso do vetor de força residual, o dano afeta mais os graus de liberdade associados ao elemento danificado e, portanto, apareceram variações da flexibilidade segundo esses graus de liberdades.

Pandey e Biswas (1994) definiram a matriz de variação da flexibilidade,  $\Delta F$ , como:

$$\Delta F = F_U - F_D \quad (3.33)$$

Com  $F_U$  e  $F_D$  representando as matrizes de flexibilidade dinâmica da condição inicial e danificada, respectivamente.

Para cada grau de liberdade  $j$ , seja  $\delta_j$  o valor absoluto máximo dos elementos na coluna correspondente de  $\Delta F$ , e assim pode-se definir:

$$\overline{\delta_j} = \text{Max}_i |\delta_{ij}| \quad (3.34)$$

sendo  $\delta_{ij}$  os elementos da matriz de variação da flexibilidade. Para a localização do dano a quantidade  $\overline{\delta_j}$  é utilizada para cada lugar medido.

Lu, Ren e Zhao (2002) utilizaram a curvatura da flexibilidade como indicador da localização do dano em vigas segundo a expressão de diferenças finitas:

$$f_i^{(c)} = \frac{f_{i-1,i-1} - 2f_{i,i} + f_{i+1,i+1}}{\Delta l^2} \quad (3.35)$$

Com  $f_{i,i}$  e  $f_i^{(c)}$  o elemento  $i$ -ésimo da diagonal da matriz de flexibilidade e o  $i$ -ésimo item do vetor de curvatura da flexibilidade, respectivamente, e  $\Delta l$  o comprimento do elemento. Para a identificação do dano o método observa os picos ao longo da deformada, já que para estruturas contínuas este deve ser suave. Este método tem uma grande vantagem que é o fato de não precisar dos parâmetros da estrutura não danificada.

Resultados da aplicação de metodologias de localização de dano baseadas na mudança da flexibilidade e da curvatura da flexibilidade foram apresentados nos trabalhos de Begambre (2003) e Alvandi e Cremona (2006). Foi encontrado que essas técnicas conseguem detectar e localizar elementos danificados, mas no caso de dano múltiplo mostram menos eficiência.

### **3.3 METODOLOGIAS QUE QUANTIFICAM DANO COMO UM PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO**

O problema de detecção de dano pode ser tratado como um problema de otimização dado que todos os algoritmos buscam zerar as diferenças entre o comportamento descrito pelo modelo e os dados experimentais. As características próprias do problema de detecção de dano, medições incompletas e presença de ruídos, fazem dele um problema mal posto, e, portanto, requerer que o método seja robusto no sentido de permitir com sucesso a abordagem de uma variada gama de problemas.

Na implementação de um processo de otimização podem ser utilizadas técnicas convencionais de otimização ou metaheurísticas. As primeiras apresentam uma alta dependência do ponto de partida e poderiam ser ineficientes em espaços de busca altamente complexos. Por outro lado, as técnicas metaheurísticas se converteram em ferramentas importantes para a solução de problemas altamente não lineares com múltiplos ótimos locais. Entre as principais metaheurísticas já utilizadas em detecção de dano encontram-se Redes Neurais Artificiais, *Simulated Annealing*, *Particle Swarm Optimization* e Algoritmos Genéticos.

A seguir é apresentada uma revisão da aplicação de técnicas clássicas de otimização e de algoritmos genéticos para a detecção de dano.

### 3.3.1 Aplicação de técnicas de otimização clássica em detecção de dano

Jaishi e Ren (2006) mostraram que a matriz de flexibilidade modal pode ser particionada como:

$$[F] = [F_n] + [F_r] \quad (3.36)$$

na qual

$$[F_n] = [\varphi_n][\Omega_n]^{-1}[\varphi_n]^T \quad (3.37a)$$

$$[F_r] = [\varphi_r][\Omega_r]^{-1}[\varphi_r]^T \quad (3.37b)$$

sendo  $[F_n]$  a matriz de flexibilidade modal formada a partir dos graus de liberdade medidos e  $[F_r]$  a matriz de flexibilidade residual formada a partir dos graus de liberdade não medidos. A contribuição do último termo é pequena, e, por tanto, pode ser desprezada.

A partir de (3.36) a seguinte função objetivo pode ser formulada:

$$\text{Min}_{\beta} \Pi(\beta) = \frac{\|F(\beta)\|_F^2}{\|F(\beta_o)\|_F^2} \quad (3.38)$$

Com:

$$F(\beta) = F_{\text{exp}} - [\Phi][\Omega^{-1}][\Phi^T] \quad (3.39)$$

sendo  $\beta$  o parâmetro de atualização normalizado.  $\Phi$  indica a matriz de forma modal analítica correspondente aos graus de liberdade experimental e  $\Omega$  a matriz de frequências naturais ao quadrado.



O método de otimização utilizado foi o *Trust Region Newton*. Para o qual os autores tiveram que encontrar o gradiente da função objetivo.

Chen e Bicanic (2006) utilizaram uma teoria de perturbação não linear e a técnica de mínimos quadrados de Newton-Gauss para resolver o problema de detecção de dano. O emprego de uma técnica de perturbação não linear esta baseado no fato que essas podem ser mais apropriadas, quando comparadas com as, comumente utilizadas, perturbações lineares, devido aos níveis de mudanças nos parâmetros que o dano pode introduzir. A função objetivo é então definida como:

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^{NElem} \sum_{l=1}^{GLD} a_{jl}^{Ku} C_{il} \alpha_j + \sum_{j=1}^{NElem} a_{jl}^{Ka} C_{il} \alpha_j + \sum_{l=1}^{GLD} a_l^{Mu} C_{il} + a_{il}^{Ma} \quad (3.40)$$

na qual  $\alpha_j$  é um coeficiente de redução de rigidez no elemento  $j$ ,  $NElem$  é o número de elementos,  $GLD$  é o número de graus de liberdade não medidos.

Os vetores de sensibilidade modal  $a_{jl}^{Ku}$ ,  $a_{jl}^{Ka}$ ,  $a_l^{Mu}$  e  $a_{il}^{Ma}$  são definidos como:

$$a_{jl}^{Ku} = K_j \phi_l^u \quad (3.41a)$$

$$a_{jl}^{Ka} = K_j \phi_i^a \quad (3.41b)$$

$$a_l^{Mu} = \left[ [K] - \lambda_i^* [M] \right] \{ \phi_l^u \} \quad (3.41c)$$

$$a_{il}^{Ma} = \left[ [K] - \lambda_i^* [M] \right] \{ \phi_l^a \} \quad (3.41d)$$

com  $\lambda_i^*$  representando o autovalor danificado da forma modal  $i$ ,  $\phi_i^u$  as formas modais analíticas nos graus de liberdade desconhecidos e  $\phi_i^a$  é um vetor desconhecido calculado a partir das formas modais experimentais nos graus de liberdade desconhecidos.

Os  $C_{ik}$  são os coeficientes de participação modal e são dados por:

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{NElem} a_{kji} \alpha_j + \sum_{j=1}^{NElem} \sum_{l=1, l \neq i, k}^{NC} a_{kjl} \alpha_j C_{il}}{\lambda_i^* - \lambda_k - \sum_{j=1}^{NElem} a_{kjk} \alpha_j} \quad (3.42)$$

Os coeficientes de sensibilidade modal  $a_{kjk}$ ,  $a_{kji}$  e  $a_{kjl}$ , são definidos numa forma geral, como:

$$a_{kjl} = \{\varphi_k\}^T [K_j] \{\varphi_l\} \quad (3.43)$$

com  $K_j$  representando a matriz de rigidez do elemento  $j$ .

Para a resolução do problema de otimização é utilizado o método de mínimos quadrados de Newton - Gauss e uma metodologia de iteração direta. Os autores ressaltam varias vantagens da formulação proposta como: desenvolvimento teórico baseado em análise de sensibilidade não linear, utilização de formas modais incompletas, convergência e comportamento efetivo para vários tipos de modelos de elemento finitos e oferecimento de informação sobre formas modais danificadas expandidas. Por outro lado, ambas as técnicas são prejudicadas pelos níveis de ruído presentes nos dados modais.

Rahai, Nejad e Esfandiari (2007), utilizaram perturbações das frequências naturais e das formas modais na equação de vibração livre de um sistema não amortecido para estabelecer o problema de detecção de dano expressa em termos da minimização:

$$\text{Min}_{\delta_p} F = \left( \sum_{i=1}^r \left\| \left[ [K] - w_i^2 [M] \right] \{\delta\varphi_i\} + \left[ [\delta K] - \delta w_i^2 [M] \right] (\{\varphi_i\} + \{\delta\varphi_i\}) \right\|^2 \right) + \delta P^T \delta P \quad (3.44)$$

sendo  $\delta P^T \delta P$  a norma do vetor de mudanças de parâmetros, a qual depende do tipo estrutural estudado.  $\delta\varphi_i$  é a mudança da forma modal  $i$ ,  $\delta w_i^2$  é a mudança da  $i$ -ésima frequência natural ao quadrado,  $\delta K$  é a variação da matriz de rigidez, e  $r$  é o número de modos utilizados.

Duas restrições são impostas sobre (3.44). A primeira está baseada no vetor de força residual e utiliza só informação modal dos graus de liberdade medidos. A segunda considera que a mudança nos parâmetros de rigidez será sempre negativa. Para a resolução do problema de otimização é utilizado o algoritmo *Sequential Quadratic Programming*. A principal vantagem desta metodologia é que precisa de umas poucas formas modais incompletas.

Di e Law (2007) utilizaram o método de gradiente conjugado Fletcher-Reeves para minimizar uma função baseada em mudanças na matriz de flexibilidade modal, qual seja:

$$\text{Min } \Pi = \frac{1}{2} \sum_{k=l}^n \sum_{l=1}^k \left[ [f_{kj}(\{p\}) - \bar{f}_{kl}]^2 + \frac{\beta}{2} \|K(\{p\}) - K(\{p_0\})\|^2 \right] \quad (3.45)$$

Com:

$$f_{kl} = \sum_{j=1}^r \frac{\phi_{ij} \phi_{kj}}{w_j^2} \quad (3.46)$$

$\{p_0\}$  é o conjunto de parâmetros próprios iniciais do sistema e depende do sistema estrutural estudado,  $K$  é a matriz de rigidez global,  $\bar{f}_{kl}$  o coeficiente de flexibilidade modal medido da estrutura,  $\beta$  é um parâmetro de regularização e  $r$  é o número de formas modais truncadas utilizadas.

Um dos aspectos mais importantes desta metodologia é que o dano não é modelado só como uma redução uniforme na rigidez. No seu lugar são utilizados diversos parâmetros os quais oferecem uma idéia do tipo de dano na estrutura.

Shafiri *et al.* (2008) propuseram detectar dano mediante o estabelecimento de um problema de otimização cuja função objetivo está baseada em mudanças da energia de deformação de cada elemento antes e depois do dano:

$$\text{Min } f = \|S\delta_e - R\| \quad (3.47)$$

Com:

$$S_{ie} = \{\phi_{ie}\}^T [K_e] \{\phi_{ie}\} \quad (3.48a)$$

$$R_i = [\phi_i^T] [K] [\phi_i] - w_i^2 \quad (3.48b)$$

$S_{ie}$  é a energia de deformação modal do elemento  $e$  devida á  $i$ -ésima forma modal  $\phi_{ie}$ ,  $R_i$  é a diferença entre a energia de deformação total das condições com e sem dano devida à forma modal  $i$ . O valor  $\delta_e$  indica a variação da energia no elemento, sendo zero quando este não se encontra danificado e um quando foi totalmente danificado.  $\phi_i$  é a  $i$ -ésima forma modal normalizada em relação a massa.

A matriz  $S$  geralmente não é uma matriz quadrada devido ao fato de que não é possível na prática medir todas as formas modais, com o qual o número de equações será menor que o número de variáveis desconhecidas. O método de mínimos quadrados não negativos é, então, proposto para solucionar o problema de otimização, utilizando umas poucas formas modais medidas.

A metodologia foi testada em uma estrutura benchmark consistente de um pórtico simétrico de aço de 4 níveis e dois vãos em cada sentido. Os erros encontrados na quantificação do dano foram menores a 7.5%, tanto para a condição de dano simples como para dano múltiplo.

### 3.3.2 Aplicação de Algoritmos Genéticos em detecção de dano

A seguir são apresentadas algumas das principais propostas reportadas na literatura que utilizam algoritmos genéticos para detectar dano em estruturas utilizando parâmetros dinâmicos.

Uma das primeiras aplicações de AGs em detecção de dano de estruturas foi apresentada por Mares e Surace em 1996. Neste trabalho, é utilizado um AG clássico com uma função objetivo obtida a partir de uma modificação do vetor de força residual:

$$Max F = \frac{C_1}{C_2 + \sum_{j=1}^r R_j^* (\beta_1, \beta_2, \beta_n)^T R_j^* (\beta_1, \beta_2, \beta_n)} \quad (3.49)$$

Na qual  $c_1$  representa uma constante utilizada para o controle do valor da função,  $c_2$  é uma constante que garante uma função bem definida para o caso no qual não se tem erros experimentais,  $\beta_i$  são os coeficientes de dano para cada um dos elementos com um indicando um elemento não danificado e zero perda total do elemento,  $r$  o número de modos disponíveis, e  $R_j^*$  é o vetor de força generalizado dado por:

$$R_j^* = K^* \Phi_{dj} - \lambda_{dj} M \Phi_{dj} \quad (3.50)$$

A matriz  $K^*$  é distinta da matriz de rigidez original do elemento e é calculada a partir dos parâmetros  $\beta_i$ . A utilização de uma forma modificada do vetor residual é devida ao fato de que a definição clássica está limitada a localização de dano e não a quantificação.

Uma treliça com 21 graus de liberdade e uma viga em balanço de 0.8m, dividida em 10 elementos finitos, foram estudadas. Os resultados da metodologia parecem satisfatórios quando o ruído nas medições não são maiores a 2% nas frequências naturais e 5% nas formas modais, com diferenças entre o dano simulado e o dano calculado menores a um 12% no caso da treliça e 20% para a viga. O pior desempenho no caso da viga pode ser devido à técnica de condensação do modelo de elementos finitos utilizada.

A respeito da quantidade de informação utilizada, encontrou-se que quanto maior o número de modos utilizados, mais confiável era a localização dos elementos danificados, sendo os melhores resultados aqueles obtidos com dez modos de vibração. A extensão do dano não foi, necessariamente, mais precisa com o aumento do número de modos utilizados. Aproximadamente 70 gerações foram necessárias para garantir a convergência do algoritmo.

Friswell, Penny e Garvey (1998) estudaram um AG clássico de duas etapas. Primeiro, os locais danificados, máximo dois, são determinados e depois é utilizado um método de sensibilidade de valores próprios para a determinação da extensão do dano. Como operadores do algoritmo, foram empregados cruzamento em um ponto, mutação *Jump* e elitismo. A função objetivo foi definida como uma combinação linear das mudanças nas freqüências naturais e das mudanças nas formas modais:

$$\text{Min } f = \sum_{j=1}^r W_{w_j} \left( \frac{\delta w_{m_j} - \delta w_{a_j}}{w_{m_j}} \right)^2 + \sum_{j=1}^r W_{\phi_j} [1 - \text{MAC}(\phi_{m_j}, \phi_{a_j})] + W_{ns} \delta_{ns} \quad (3.51)$$

na qual o subscrito  $m$  é referido para os dados que foram medidos e o subscrito  $a$  para aqueles obtidos a partir do modelo analítico.  $\delta w$  são mudanças nas freqüências naturais,  $w_j$  e  $\phi_j$  correspondem à  $j$ -ésima freqüência natural e formal modal, respectivamente. Os termos  $W$  são fatores de peso para cada uma das características dinâmicas.  $\delta_{ns}$  assume um valor de zero se tem um local danificado e valor de um se tem mais de um local danificado.

O termo correspondente a mudanças nas freqüências foi pensado para reduzir o efeito de erros de modelamento, enquanto que o segundo termo ajuda a eliminar a necessidade de formas modais escaladas. Para evitar problemas de escalamento a Equação (3.51) foi subtraída de 1.

Para determinar os pesos relativos o autor apresenta uma análise da sensibilidade destes parâmetros ao dano, encontrando que as formas modais contribuem pouco; por isso, só o termo relacionado às frequências naturais foi incluído nos exemplos apresentados. Simulações numéricas sobre uma viga em balanço mostram que para o caso de se ter um único local danificado, a metodologia consegue determinar de forma confiável o local danificado, mas para dois locais não é tão exata.

Uma placa de aço de 3 mm foi utilizada para realizar uma validação experimental da metodologia. A estrutura constava de 12 elementos e 48 graus de liberdade, sendo utilizados os primeiros 13 modos de vibração. Um corte produzido no elemento 4 é efetivamente encontrado numa média de 10 gerações, mostrando assim a robustez do método a erros de modelamento e de medições.

Nenhuma informação é apresentada sobre o desempenho da metodologia para quantificar dano.

Moslem e Nafaspour (2002) apresentaram um método de duas etapas para localização e quantificação de dano. Possíveis áreas danificadas, as quais ajudam a diminuir o tamanho do espaço de busca, são determinadas a partir do cálculo do vetor de força residual e a compatibilização entre os graus de liberdade analíticos e experimentais. Para a determinação da extensão do dano utilizou-se um AG de estado permanente, com cruzamento de dois pontos e mutação *Jump*.

Para a resolução do problema o dano é considerado como uma redução do módulo de elasticidade e uma função objetivo, baseada em mudanças das frequências naturais e formas modais, definida como:

$$F = \sum_{j=1}^r W_{wj} \left[ 1 - \left( \frac{W_{mj}}{W_{aj}} \right) \right]^2 + \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^s W_{\phi_{ji}} (\phi_{mji} - \phi_{aj}) \quad (3.52)$$

O problema de escalamento foi diminuído a partir da definição da seguinte função objetivo:

$$\text{Min } g_i = \left[ 1 - \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\min}} \right]^3 \quad (3.53)$$

Para a avaliação da metodologia são analisadas duas treliças de 15 e 40 elementos respectivamente e é considerada a presença de ruído nas medições, com valores de 5% em frequências e 9% em formas modais respectivamente. Como máximo foram utilizadas 9 formas modais no cálculo.

Diversos casos de dano múltiplo são estudados, encontrando-se erros menores a 5% na determinação do dano na estrutura para dados sem ruído e 16% para a condição com ruído. Para a condição mais severa de ruído o algoritmo não consegue detectar o elemento danificado. Isto inclui a presença de vários elementos falsamente identificados como danificados. Resultados são comparados contra um método de programação matemática mostrando piores resultados para o último, em especial para os casos com ruído.

Um AG de código real e valores experimentais dos parâmetros modais dos estados danificado e inicial foram utilizados por Hao e Xia (2002) para detecção de dano. Três funções objetivo são estudadas. A primeira delas baseada só em frequências naturais, a segunda em formas modais e a terceira como uma combinação das duas anteriores:

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^r W_j^2 \left( \frac{w_{aj}^2(\{\alpha\}) - w_{aj0}^2}{w_{aj0}^2} - \frac{w_{mj}^2(\{\alpha\}) - w_{mj0}^2}{w_{mj0}^2} \right) + \sum_{j=1}^r W_{\phi_i}^2 \sum_{i=1}^{np} \left( [\phi_{aji}(\{\alpha\}) - \phi_{aji}^0] - [\phi_{mji}(\{\alpha\}) - \phi_{mji}^0] \right) \quad (3.54)$$



Testes de laboratório são realizados sobre uma viga de alumínio de 495.33mm, a qual é dividida em 20 elementos finitos, e um pórtico de aço de 1000 mm de altura por 1000 mm de comprimento dividido em 30 elementos finitos. O algoritmo detecta corretamente a posição do dano na viga usando os seis primeiros modos de vibração, mas apresenta-se a incorreta detecção de um elemento danificado por causa do nível de ruído nos dados. No caso do pórtico, para 12 modos de vibração medidos, os resultados mostraram que a utilização só de mudança nas freqüências não é suficiente para uma bem-sucedida detecção de dano, embora tivesse dado resultados aceitáveis para o caso da viga.

Quando utilizado só formas modais os resultados não foram aceitáveis; ao que parece ser devido à dificuldade na precisão da medição. No caso de se utilizar parâmetros combinados, os melhores resultados foram obtidos quando o fator de peso das freqüências naturais era de 1 e o fator para as formas modais era de 0.1, não sendo realizadas falsas identificações. O algoritmo é sensível à grandeza do dano: quanto menor é o nível de dano menor é a precisão do algoritmo.

Ananda, Srinivas e Murthy (2004) propuseram um AG simples, com seleção por torneio, cruzamento de dois pontos, e mutação *Jump* para detecção de dano em estruturas. Para a inclusão do dano é considerada uma diminuição do módulo de elasticidade o qual é representado por um parâmetro de redução de rigidez  $\beta$ . A função objetivo utilizada foi determinada a partir da soma das diagonais da matriz de força residual com a utilização de todos os modos de vibração da estrutura, sendo necessária a utilização de modos expandidos:

$$Max F = \frac{C_1}{C_2 + f(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)} \quad (3.55)$$

Com

$$f(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \sqrt{R_{11}^2 + R_{22}^2 + \dots + R_{nn}^2} \quad (3.56)$$

E  $R$  definido como na Equação (3.50).

No trabalho foi realizada uma simulação numérica do dano em uma viga em balanço de 0.8m dividida em 10 elementos, uma treliça de 11 elementos e um pórtico simétrico de altura 1m e comprimento 1m dividido em 6 elementos, considerando-se para todas as estruturas a presença de dano múltiplo. Em geral, erros na determinação de  $\beta$  foram menores a 6% e não presença de falsos elementos danificados é apresentada. Entretanto, resultados do desempenho da metodologia quando os dados contêm ruído não são comentados. A convergência do algoritmo varia entre 40 e 1600 gerações dependendo do tipo de estrutura.

Au et al (2004) propuseram um método de detecção de dano de duas etapas, na qual é utilizado um método que permite localizar em forma preliminar os elementos danificados e um micro-AG para a determinação da extensão do dano e dos elementos danificados reais. O método SEREP (O'CALLAHAN, AVITABILE, RIEMER, 1989) foi utilizado para a determinação dos modos completos, tanto para a condição atual da estrutura como para a condição inicial. O AG está composto por um operador de cruzamento uniforme, operadores de mutação *Jump* e *Creep*. Estratégia de nicho e elitismo foram implementadas.

O AG por sua vez pode ser implementado igualmente em um ou dois níveis. Para o caso de um nível, a função objetivo é dada por:

$$\text{Min}_{\beta} F = \sum \left( \frac{w_i^U - w_i^D}{w_i^U} \right)^2 \quad (3.57a)$$

ou

$$\text{Min}_{\beta} F = \sum \left( \frac{w_i^U - w_i^D}{w_i^U} \right)^2 + \sum \frac{(\varphi_{ij}^D - \varphi_{ij}^U)}{\varphi_{ij}^U} \quad (3.57b)$$

Dado que o conjunto de elementos preliminarmente dito danificados ainda poderia ser grande, se propõe implementar um segundo tipo de minimização na qual se procura pelos elementos realmente danificados dentro daquele conjunto, assim:

$$\underset{I_d}{\text{Min}} \underset{\beta}{\text{Min}} F \quad (3.58)$$

na qual  $I_d$  corresponde ao número de identificação do conjunto de elementos preliminarmente ditos danificados.

Para testar o algoritmo foi utilizada uma viga simplesmente apoiada de 20m de comprimento e dividida em 16 elementos finitos, assim como uma viga continua de três vãos. Diferentes cenários de dano e porcentagem de ruído nas medições foram estudados. O algoritmo consegue detectar os elementos danificados, mas erros na quantificação estão na ordem de 16% para o caso da função objetivo baseada só em frequências e de 14% para a função de objetivo que utiliza a combinação entre frequências naturais e formas modais.

Os resultados mostram que tanto o ruído como as medições incompletas prejudicam a precisão na detecção do dano devido ao aumento do número de elementos preliminarmente identificados como danificados.

A estratégia de dois níveis apresentou melhores resultados para a quantificação do dano quando comparada com a estratégia de um nível.

Perera e Torres (2006) utilizaram mudanças nas frequências naturais e formas modais junto com um AG simples para determinar a localização e quantificação do dano estrutural em vigas. Para a representação do dano é introduzido um fator de redução de rigidez  $\beta$  para cada elemento. Como funções objetivo são estudadas, o vetor de força residual e uma modificação do Modal Assurance Criterion (MTMAC) a qual leva em conta as mudanças nas frequências naturais:

$$\text{Min } F = \|R_d^j\|_{L1} \quad (3.59)$$

E R definido como na Equação (3.50):

$$\text{MTMAC} = \prod_{j=1}^m \frac{\text{MAC}(\phi_{mj}, \phi_{aj})}{1 + \left| \frac{w_{aj}^2 - w_{mj}^2}{w_{aj}^2 + w_{mj}^2} \right|} \quad (3.60)$$

A função objetivo é então:

$$\text{Min } F = 1 - \text{MTMAC} \quad (3.61)$$

No estudo são realizadas simulações numéricas e testes experimentais considerando-se medições incompletas nos casos de dano simples, dano múltiplo e dano uniforme. O método apresenta resultados precisos quando utilizados 7 modos de vibração e ruído menor a 5% , apresentando sempre melhores resultados para o MTMAC. Para mitigar os efeitos do ruído, a metodologia é aplicada sobre 5 conjuntos de dados e a media dos 5 resultados é tomada como resultado final, simulando assim o procedimento comumente realizado em laboratório.

A respeito da validação experimental, o algoritmo consegue localizar o dano, mas a quantificação não foi muito boa. Os autores acreditam seja devido a problemas com a vinculação da estrutura, ao fato de que o modelo numérico não foi correlacionado com os resultados experimentais, e a ruído nas medições dos modos de vibração. Em geral, encontrou-se que na medida em que os modos medidos eram aumentados a convergência dos dois métodos aumentava.

Borges, Barbosa e Lemonge (2007) introduziram algumas modificações no AG clássico com o fim de atingir bons níveis de confiança. Uma codificação discreta é utilizada, na qual uma tabela de valores disponíveis representa a extensão do dano. A população inicial foi gerada a partir de uma heurística, a qual reduz o espaço de busca e procura orientar a busca a regiões com poucos

elementos danificados. Como operadores foram utilizados a seleção de ranking linear e um cruzamento de dois pontos e um operador de mutação específico para o problema.

A formulação da função objetivo utiliza mudanças nas formas modais e frequências naturais a qual evita processos de expansão de modos, sendo definida para o membro  $i$  da população como:

$$f_{(ev+em)_i} = \frac{f_{ev_i} - f_{ev_{\min}}}{f_{ev_{\max}} - f_{ev_{\min}}} + \frac{f_{em_i} - f_{em_{\min}}}{f_{em_{\max}} - f_{em_{\min}}} \quad (3.62)$$

Com

$$f_{ev_g} = \sum_{i=1}^{n_{mf}} \left| (\lambda_i^{dm} - \lambda_i^u) (1 + \phi_i^{uT} M \Delta \phi_i) - \phi_i^{uT} \left( \bigcup_{j=1}^{n_{el}} (\beta_j - 1) \right) (\phi_i^u + \Delta \phi_i) \right| \quad (3.63a)$$

$$f_{em}(\beta) = \sum_{i=1}^{n_{em}} \sum_{j=1}^{n_{endof}} \left( |\phi_{ij}^{dm}| - |\phi_{ij}^d(\beta)| \right) \quad (3.63b)$$

Elas apresentam duas variações para levar em conta a introdução gradual de informação, no primeiro caso, e uma normalização da contribuição dos modos de vibração, no segundo caso:

$$f_{ev_g} = \sum_{i=1}^{n_{mf}(g)} \left| (\lambda_i^{dm} - \lambda_i^u) (1 + \phi_i^{uT} M \Delta \phi_i) - \phi_i^{uT} \left( \bigcup_{j=1}^{n_{el}} (\beta_j - 1) \right) (\phi_i^u + \Delta \phi_i) \right| \quad (3.64a)$$

$$f_{ev_a} = \sum_{i=1}^{n_{mf}} \left[ f_{ev_i} * \frac{n_{pop}}{\left( \sum_{j=1}^{n_{pop}} f_{ev_i}^j \right)} \right] \quad (3.64b)$$

Raich e Liskai (2007) implementaram um método para detecção de dano através de AGs e mudanças nas funções de resposta em frequência (FRFs). Para a codificação dos indivíduos foram utilizadas duas representações: a representação binária clássica e a codificação redundante implícita. O algoritmo Hill Climbing local é empregado para levar a solução dada pelo AG a melhores soluções. A função objetivo foi definida como:

$$\text{Min } f = \sum_{k=k_1}^{k_n} \left( \int_{w_0}^{w_1} \left| \overline{H}_{jk}(w) - H_{jk}(w) \right| \right)^2 dw \quad (3.65)$$

Na qual  $j$  é o grau de liberdade sobre o qual é aplicado a força,  $k$  é o grau de liberdade no qual é medida a resposta da estrutura,  $H_{jk}$  e  $\overline{H}_{jk}$  são as funções de resposta em frequência do sistema para as condições inicial e danificada, respectivamente.

Uma viga em balanço dividida em 10 elementos, uma viga bi-apoiada de 20 elementos e um pórtico plano com 81 elementos foram estudados, sendo o tempo requerido para obter os resultados de 2-3 horas para as vigas e de 8-12 para o pórtico sob um computador de escritório. A extensão simulada do dano foi de até um 10%, sendo os resultados para vigas bastante precisos, com erros menores a 2%, ainda para o caso no qual o ruído nas FRFs era 10%. Elementos falsamente identificados como não danificados têm valores de dano menores a 1%.

Neste trabalho é mostrado como o desempenho da metodologia é afetado pela posição da excitação e do número de sensores de medição e sua localização. Os autores utilizaram uma técnica de localização quase ótima de sensores, conseguindo obter resultados exatos até com níveis de ruído de 20% para a viga em balanço, 10% para a viga de dois vãos e 5% para o pórtico. Assim mesmo, a utilização do método Hill Climbing ajudou a melhorar a exatidão do algoritmo.

Gomes e Silva (2008) propuseram um AG de código real para a solução do problema de detecção de dano em uma estrutura cuja condição inicial é definida por um modelo de elementos finitos. Os autores utilizaram como operadores do algoritmo: seleção por roleta, cruzamento BLX- $\alpha$  e mutação uniforme. Como critério de parada foi utilizado a diversidade na população avaliada pelo desvio padrão das aptidões dos indivíduos e a definição dos parâmetros do algoritmo foi

realizada através de testes preliminares. A função objetivo foi definida como uma modificação do MDLAC proposto por Messina, Williams e Contursi (1998), a qual faz uso de umas poucas freqüências para detectar dano:

$$Max f(\delta D) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \left( \frac{\delta w_i(\delta D)}{\max(\delta w_i)} - \frac{\Delta w_i}{\max(\Delta w_i)} \right)^2} \quad (3.66)$$

na qual N é o número de freqüências utilizadas,  $\delta w$  é a variação teórica dos auto-valores do modelo da estrutura,  $\Delta w$  são as variações experimentais e  $\delta D$  é o vetor de múltiplos danos do modelo paramétrico. A função objetivo consegue filtrar os efeitos não lineares de grandes quantidades de dano devido ao uso do modelo de elementos finitos real.

Simulações numéricas foram realizadas sobre um pórtico de 2.4m de vão e 1.6m de altura dividido em 56 elementos finitos. Para introdução do dano foi considerado que o momento de inércia da seção era reduzido a diferentes extensões de dano. Para o cálculo da função objetivo foram utilizadas as 5 primeiras freqüências. Resultados para 8 diferentes cenários de dano mostraram que a metodologia é robusta para a localização de um elemento danificado, mas o elemento localizado em forma simétrica é falsamente identificado como danificado. A quantificação não é realizada de forma exata.

Dano em vários elementos não foi exitosamente determinado. Os autores acreditam que, dada a precisão numérica o algoritmo não consegue convergir para a verdadeira extensão do dano.

### **3.4 TÉCNICAS DE EXPANSÃO DE FORMAS MODAIS**

O problema de detecção de dano é considerado como incompleto já que em geral não é possível ter medições de todos os graus de liberdades que são contemplados no modelo de elementos finitos da estrutura. Portanto, é requerido realizar um ajuste para que as dimensões do modelo analítico e o modelo experimental coincidam. Essencialmente, isto pode ser solucionado de duas formas. O modelo analítico, com maior número de graus de liberdade, é reduzido ao número de graus de liberdade do modelo experimental, ou, as formas modais do modelo experimental são expandidas para se correlacionarem com as formas modais do modelo analítico.

Computacionalmente as técnicas de redução são preferidas, devido a que a quantidade de dados experimentais pode ser significativamente menor que a quantidade de dados analíticos, por tanto se diminui o tempo de cálculo nas operações que envolvem as matrizes obtidas. Entre as principais desvantagens das técnicas de redução estão que as matrizes resultantes podem não ter significado físico e perde-se assim a conectividade dos elementos.

Por outro lado, as técnicas de expansão introduzem erros nas formas modais devido aos procedimentos numéricos empregados. Porém, em detecção de dano pode ser necessário medições das formas modais em todos os graus de liberdade, como no caso das metodologias de localização de elementos danificados apresentadas anteriormente.

Entre as principais técnicas de expansão de modo encontramos as seguintes:



- **Expansão SEREP- *System Equivalent Reduction Expansion Process* (O'CALLAHAN, AVITABILE, RIEMER, 1989):** O método utiliza as formas modais analíticas para produzir a relação entre os graus de liberdade nos quais são realizadas medições – ditos primários,  $p$  - e aqueles nos quais não foi possível realizar medições- ditos secundários,  $s$  :

$$[\Phi_m]_{GLT \times r} = [\Phi_a] [\Phi_{pa}]^+ [\Phi_{pm}]_{GLP \times r} \quad (3.67)$$

Onde o sinal '+' indica a inversa generalizada, a qual é utilizada no caso em que o número de coordenadas principais seja muito maior que o número de modos a utilizar. Os subscritos  $a$  e  $m$  representam dados analíticos e experimentais, respectivamente.  $GLT$  é o número total de graus de liberdade,  $GLP$  o número de graus de liberdade primários por modo, e  $r$  o número de modos a serem utilizados.

Um aspecto importante a comentar é que o SEREP modifica as coordenadas principais devido à utilização da inversa generalizada. Se formas modais não estão bem correlacionadas em relação às formas modais analíticas, as formas modais expandidas podem ser imprecisas (FADEL *et al.*, 2006).

- **Expansão Guyan:** Considerando o problema como um problema estático tem-se:

$$[K_n] \{u\} = \{F\} \quad (3.68)$$

No qual  $K_n$  é a matriz de rigidez do sistema,  $u$  é o vetor de deslocamento e  $F$  o vetor de forças.

Reorganizando o sistema segundo os graus de liberdade primários e secundários, obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} K_{pp} & K_{ps} \\ K_{sp} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_p \\ u_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_p \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.69a, b)$$

Da Equação (3.69b) e considerando que nos graus de liberdade secundário não se tem forças aplicadas, os deslocamentos não medidos podem ser determinados como:

$$\{u_s\} = [K_{ss}]^{-1} [K_{sp}] \{u_p\} \quad (3.70)$$

A mesma matriz de transformação pode ser utilizada para relacionar os graus de liberdade primários e secundários da matriz de formas modais

$$\{\Phi_{ms}\} = [K_{ss}]^{-1} [K_{sp}] \{\Phi_{mp}\} \quad (3.71)$$

- **Expansão IRS- *Improvement Reduction System* (O`CALLAHAN, 1989):** Para vencer simplificações da metodologia de expansão Guyan como a não contribuição da matriz de massa e a suposição de forças zero nos graus de liberdade secundários, utiliza-se a formulação do problema dinâmico para se estabelecer a seguinte relação entre graus de liberdade secundários e primários:

$$\{\phi_{msi}\} \approx \left( -[T_s] + \left( -[K_{ss}]^{-1} [M_n] [T_s] [\overline{M}]^{-1} [\overline{K}] \right) \right) \{\phi_{mpi}\} \quad (3.72)$$

Com  $T_s$  a matriz de transformação como definida para a expansão Guyan,  $M_n$  a matriz de massa original do sistema,  $\overline{K}$  e  $\overline{M}$  as matrizes de rigidez e massa condensadas na forma:

$$[\overline{K}] = [T_s]^T [K_n] [T_s] \quad (3.73a)$$

$$[\overline{M}] = [T_s]^T [M_n] [T_s] \quad (3.73b)$$

- **Expansão Exata:** Seja a formulação do problema dinâmico de vibração livre não amortecida dada como em (3.16), e reproduzida aqui por comodidade:

$$([K_n] - w_i^2 [M_n]) \{\phi\}_i = 0 \quad (3.16)$$

O sistema anterior pode ser dividido com base nos graus de liberdades primários e secundários, no qual as matrizes de rigidez e massa correspondem as matrizes do modelo de elementos finitos e as freqüências naturais às freqüências medidas experimentalmente:

$$\left( \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{ps} \\ K_{sp} & K_{ss} \end{bmatrix}_a - w_{mi}^2 \begin{bmatrix} M_{pp} & M_{ps} \\ M_{sp} & M_{ss} \end{bmatrix}_a \right) \begin{Bmatrix} \phi_{mpi} \\ \phi_{msi} \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (3.74a, b)$$

Na qual  $i$  corresponde à  $i$ -ésima forma modal.

Da Equação (3.74b) se obtém a formulação exata do problema de expansão de modos como:

$$\{\phi_{msi}\} = -([K_{ss}] - w_{mi}^2 [M_{ss}])^{-1} ([K_{sp}] - w_{mi}^2 [M_{sp}]) \{\phi_{mpi}\} \quad (3.75)$$

A transformação dada em (3.75) mostra que a expansão dos modos deve ser realizada para cada modo por vez, e que precisa do conhecimento da freqüência natural correspondente ao modo a ser expandido.

- **Expansão Exata Modificada (GYSIN, 1990):** consiste na inclusão de todos os termos das matrizes de massa e rigidez através de uma modificação da Equação (3.75).

$$\{\phi_{msi}\} = -[A_2]^+ [A_1] \{\phi_{mpi}\} \quad (3.76)$$

Com

$$A_1 = \begin{bmatrix} K_{pp} - w_{mi}^2 M_{pp} \\ K_{sp} - w_{mi}^2 M_{sp} \end{bmatrix} \quad (3.77a)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} K_{ps} - w_{mi}^2 M_{pe} \\ K_{sp} - w_{mi}^2 M_{sp} \end{bmatrix} \quad (3.77b)$$

Com o anterior é encerrado a revisão da literatura especializada.

## 4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

---

### 4.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é amplamente utilizado para a descrição do comportamento de sistemas estruturais, cujo conceito base encontra-se na divisão do sistema contínuo em elementos de tamanho finito que fazem com que o sistema seja agora discreto (ASSAN, 2003). No âmbito da detecção de dano o método dos elementos finitos é utilizado para a representação das condições iniciais e atuais da estrutura, e também utilizado no processo de atualização quando da consideração do dano.

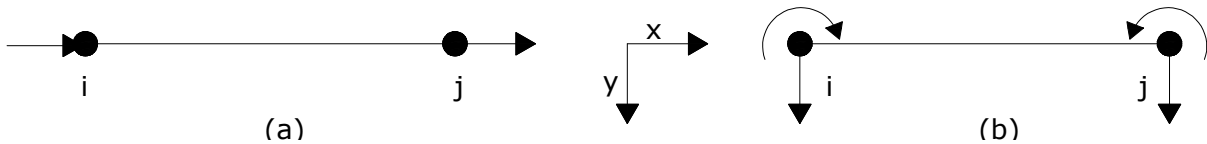
No caso do problema de vibração axial e de vibração transversal de uma estrutura não amortecida, as equações diferenciais de equilíbrio dinâmico são dadas, respectivamente, por:

$$EAu'' - m\ddot{u} = -P(x, t) \quad (4.1)$$

$$EIv^{IV} + m\ddot{v} = P(x, t) \quad (4.2)$$

sendo  $E$  o módulo de elasticidade do material, e  $A$  e  $I$  a área e a inércia da seção transversal, respectivamente.

Um elemento barra e um elemento viga apresentam os graus de liberdade mostrados na Figura 4.1. No caso do elemento barra tem-se um único grau de liberdade por nó, o qual corresponde a um grau de liberdade axial; enquanto que a viga apresenta um grau de liberdade transversal e um de rotação.



**Figura 4. 1** Elementos finito para (a) Barra e (b) Viga.

No método dos elementos finitos o campo de deslocamento no domínio do elemento é expresso em função dos valores dos deslocamentos nos nós. Para o caso da barra, considerando um polinômio de primeiro grau como função aproximadora, tem-se:

$$u_k(x,t) = \{\varphi_1(x) \quad \varphi_2(x)\} \{u_i(t) \quad u_j(t)\}^T \quad (4.3)$$

no qual  $u_k(x,t)$  refere-se ao campo de deslocamento no elemento  $k$  para o tempo  $t$ ,  $u_i$  e  $u_j$  são os deslocamentos axiais nos nós  $i$  e  $j$ , respectivamente, e:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= 1 - \frac{x}{L_i} \\ \varphi_2(x) &= \frac{x}{L_i} \end{aligned} \quad (4.4)$$

são as funções de forma.

Para o caso de vibração transversal a função aproximadora correspondente trata-se de um polinômio de terceiro grau, qual seja:

$$v_k(x,t) = \{\varphi_1(x) \quad \varphi_2(x) \quad \varphi_3(x) \quad \varphi_4(x)\} \{v_i(t) \quad \theta_i(t) \quad v_j(t) \quad \theta_j(t)\}^T \quad (4.5)$$

sendo  $v_k(x,t)$  o campo de deslocamentos para o elemento  $k$  no tempo  $t$ ,  $v_i$  e  $\theta_i$ , e,  $v_j$  e  $\theta_j$  são os deslocamentos verticais e rotações nos nós  $i$  e  $j$ , respectivamente. As funções de forma são dadas por:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1(x) &= 1 - 3\left(\frac{x}{L_i}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L_i}\right)^3 \\
 \varphi_2(x) &= L_i \times \left[ x - 2\left(\frac{x}{L_i}\right)^2 + \left(\frac{x}{L_i}\right)^3 \right] \\
 \varphi_3(x) &= 3\left(\frac{x}{L_i}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L_i}\right)^3 \\
 \varphi_4(x) &= L_i \times \left[ -\left(\frac{x}{L_i}\right)^2 + \left(\frac{x}{L_i}\right)^3 \right]
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

A partir das Eqs. 4.3 e 4.5 a aplicação do método de Galerkin conduz a um sistema de equações lineares nas coordenadas deslocamento adotadas, cuja solução consiste numa solução aproximada do problema estrutural.

Sendo assim, as matrizes de massa consistente e de rigidez do elemento barra são respectivamente:

$$[m_k] = \frac{\rho_k A_k L_k}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

$$K_k = \frac{E_k A_k}{L_k} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

onde  $A_k$   $L_k$  são a área da seção transversal e o comprimento do elemento  $k$ , respectivamente.  $\rho_k$  e  $E_k$  são, respectivamente, a densidade e o modulo de elasticidade do material do elemento  $k$ .

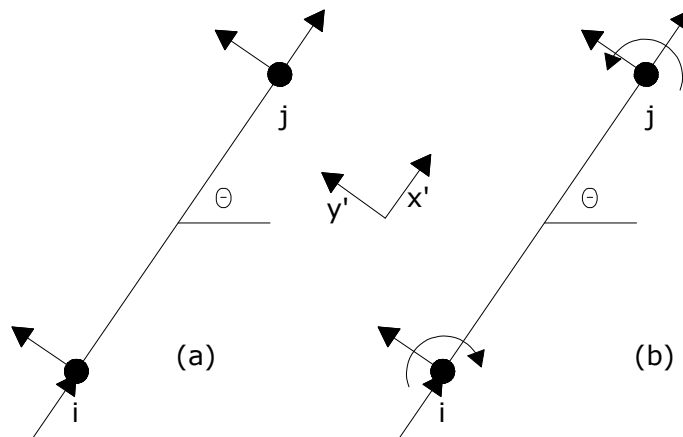
Igualmente para o elemento viga, e considerando o modelo de Euler-Bernoulli, tem-se respectivamente as matrizes de massa e de rigidez:

$$[m_k] = \frac{\rho_k A_k L_k}{6} \begin{bmatrix} 156 & 22L_k & 54 & -13L_k \\ 22L_k & 4L_k^2 & 13L_k & -3L_k^2 \\ 54 & 13L_k & 156 & -22L_k \\ -13L_k & -3L_k^2 & -22L_k & 4L_k^2 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$[K_k] = \frac{E_k I_k}{L_k^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_k & -12 & 6L_k \\ 6L_k & 4L_k^2 & -6L_k & 2L_k^2 \\ -12 & -6L_k & 12 & -6L_k \\ 6L_k & 2L_k^2 & -6L_k & 4L_k^2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

sendo  $I_k$  o momento de inércia da seção transversal do elemento  $k$ .

Os dois tipos de elementos anteriores são utilizados para formar os elementos correspondentes para as estruturas treliça e pórtico, cujos graus de liberdade podem ser observados na Figura 4.2. Esses graus de liberdade são definidos em coordenadas locais e devem ser transformados a coordenadas globais.



**Figura 4. 2** Elemento Finito para (a) Treliça e (b) Pórtico.

As matrizes de massa consistente e rigidez para uma estrutura tipo treliça no sistema local de coordenadas pode ser dadas como:

$$[m_k] = \frac{\rho_k A_k L_k}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$



$$K_k = \frac{E_k A_k}{L_k} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

No caso da estrutura pórtico têm-se as matrizes de massa consistente e rigidez em coordenadas locais fornecidas respectivamente por:

$$M_k = \frac{\rho_k A_k L_k}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L_k & 0 & 54 & -13L_k \\ 0 & 22L_k & 4L_k^2 & 0 & 13L_k & -3L_k^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L_k & 0 & 156 & -22L_k \\ 0 & -13L_k & -3L_k^2 & 0 & -22L_k & 4L_k^2 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$K_k = \begin{bmatrix} \frac{E_k A_k}{L_k} & 0 & 0 & -\frac{E_k A_k}{L_k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12E_k I_k}{L_k^3} & \frac{6E_k I_k}{L_k^2} & 0 & -\frac{12E_k I_k}{L_k^3} & \frac{6E_k I_k}{L_k^2} \\ 0 & \frac{6E_k I_k}{L_k^2} & \frac{4E_k I_k}{L_k} & 0 & -\frac{6E_k I_k}{L_k^2} & \frac{2E_k I_k}{L_k} \\ -\frac{E_k A_k}{L_k} & 0 & 0 & \frac{E_k A_k}{L_k} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12E_k I_k}{L_k^3} & -\frac{6E_k I_k}{L_k^2} & 0 & \frac{12E_k I_k}{L_k^3} & -\frac{6E_k I_k}{L_k^2} \\ 0 & \frac{6E_k I_k}{L_k^2} & \frac{2E_k I_k}{L_k} & 0 & -\frac{6E_k I_k}{L_k^2} & \frac{4E_k I_k}{L_k} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Para se levar as matrizes referentes às coordenadas locais para as correspondentes em coordenadas globais, utiliza-se a seguinte operação matricial de transformação (vide Figura 4.2):

$$[M_G] = [T]^T [M_L] [T] \quad (4.15)$$

$$[K_G] = [T]^T [K_L] [T] \quad (4.16)$$

Sendo a matriz de transformação  $T$  no caso de treliça e de pórtico são dadas, respectivamente, por:

$$T_{Trel} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & \text{sen}(\theta_k) & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_k) & \cos(\theta_k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\theta_k) & \text{sen}(\theta_k) \\ 0 & 0 & -\text{sen}(\theta_k) & \cos(\theta_k) \end{bmatrix} \quad (4.17a)$$

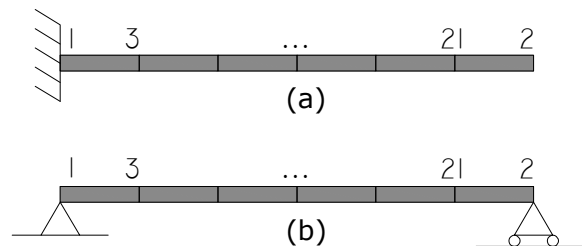
$$T_{Port} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k) & \text{sen}(\theta_k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_k) & \cos(\theta_k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\theta_k) & \text{sen}(\theta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\theta_k) & \cos(\theta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17b)$$

na qual  $\theta_k$  é ângulo dextrorso entre os sistemas de coordenadas global e o sistema local do elemento  $k$ .

Finalmente, a matriz de rigidez e massa da estrutura como um todo será formada a partir da contribuição de todos os elementos que a compõe.

## 4.2 ESTRUTURAS ANALISADAS

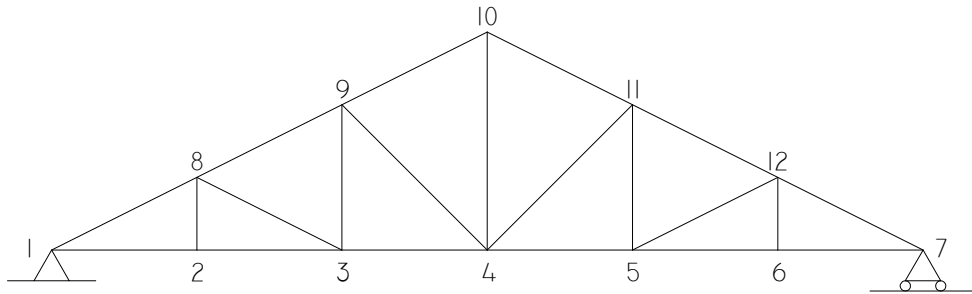
As metodologias de detecção de dano a serem estudadas serão aplicadas sobre três tipos de sistemas estruturais no plano: viga, treliça e pórtico. As estruturas tomadas como exemplos são mostrados nas Figuras 4.3, 4.4, e 4.5.



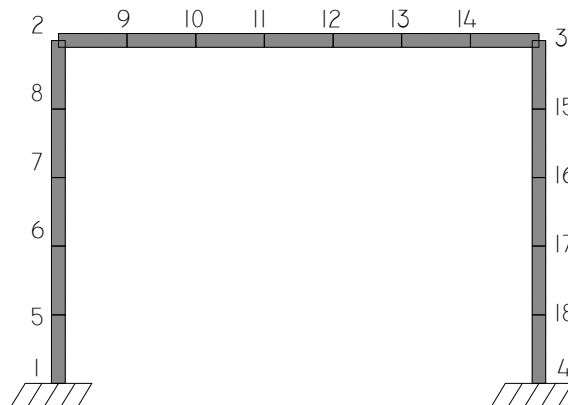
**Figura 4. 3** Estruturas Tipo Viga: (a) simplesmente apoiada, (b) em balanço.

As vigas, simplesmente apoiada e em balanço, têm um comprimento de 2m e estão divididas em 20 elementos finitos cada. A treliça é modelada

considerando um elemento finito por barra, com um total de 21 elementos, na qual os elementos horizontais têm um comprimento de 1.0 m e os montantes maior, médio e menor têm uma altura de 1.5, 1.0 e 0.5m, respectivamente. O pórtico apresenta um vão de 7m e altura de 5m, com comprimento dos elementos finitos de 1m.



**Figura 4. 4** Treliça de 21 elementos.



**Figura 4. 5** Pórtico

Todas as estruturas anteriores encontram-se constituídas por um único tipo de material, e com seção constante, como mostrado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** Definição do tipo de material e do tipo de seção utilizados.

<b>Tipo</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Material	Modulo de elasticidade	200 GPa
	Densidade	7800 Kg/m <sup>3</sup>
Seção	Área	4E-3 m <sup>2</sup>
	Momento de Inércia	5E-5 m <sup>4</sup>

A conectividade entre os distintos elementos que pertencem a cada uma das estruturas é apresentada nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

**Tabela 4.2** Conectividade dos elementos das estruturas tipo Viga.

<b>Elemento</b>	<b>No inicial</b>	<b>No Final</b>	<b>Elemento</b>	<b>No inicial</b>	<b>No Final</b>
I	1	3	XI	12	13
II	3	4	XII	13	14
III	4	5	XIII	14	15
IV	5	6	XIV	15	16
V	6	7	XV	16	17
VI	7	8	XVI	17	18
VII	8	9	XVII	18	19
VIII	9	10	XVIII	19	20
IX	10	11	XIX	20	21
X	11	12	XX	21	2

**Tabela 4.3** Conectividade dos elementos da Trelça de 21 Elementos.

<b>Elemento</b>	<b>No inicial</b>	<b>No Final</b>	<b>Elemento</b>	<b>No inicial</b>	<b>No Final</b>
I	1	2	XII	3	8
II	2	3	XIII	4	9
III	3	4	XIV	4	11
IV	4	5	XV	5	12
V	5	6	XVI	1	8
VI	6	7	XVII	8	9
VII	2	8	XVIII	9	10
VIII	3	9	XIX	10	11
IX	4	10	XX	11	12
X	5	11	XXI	12	7
XI	6	12			

**Tabela 4.4** Conectividade dos elementos da estrutura Pórtico.

<b>Elemento</b>	<b>No inicial</b>	<b>No Final</b>	<b>Elemento</b>	<b>No inicial</b>	<b>No Final</b>
I	1	5	X	12	13
II	5	6	XI	13	14
III	6	7	XII	14	3
IV	7	8	XIII	3	15
V	8	2	XIV	15	16
VI	2	9	XV	16	17
VII	9	10	XVI	17	18
VIII	10	11	XVII	18	4
IX	11	12			

### 4.3 INCLUSÃO DE RUÍDO EM MEDIÇÕES

No presente trabalho a presença de ruído nas medições foi modelada mediante a introdução de pequenas perturbações em frequências naturais e formas modais, da seguinte forma:

$$f_{nr} = f_n \times (1 + \text{Rand}(-1,1) * \text{Ruido}_f) \quad (4.18)$$

$$\Phi_{nr} = \Phi_n \times (1 + \text{Rand}(-1,1) * \text{Ruido}_\Phi) \quad (4.19)$$

onde  $f_n$  e  $\Phi_n$  correspondem às frequências naturais e formas modais originais, respectivamente,  $f_{nr}$  e  $\Phi_{nr}$  os valores dos mesmos parâmetros agora contaminados com ruído.  $\text{Ruido}_f$  e  $\text{Ruido}_\Phi$  são as porcentagem de ruído introduzidas. Farrar e Cone (APUD, CHEN e NAGARAJIAH, 2007) comentam que usualmente as frequências naturais e formas modais são contaminadas por ruído com um erro de padrão de  $\pm 0.15\%$  e  $\pm 3\%$ , respectivamente.

Para a análise da influencia do ruído nos resultados serão utilizadas as combinações apresentadas na Tabela 4.5. A configuração de ruído R2 foi considerada a representar as condições experimentais reais.

**Tabela 4.5** Configurações de ruído a serem estudadas.

<b>Identificador</b>	<b>Ruído Frequência</b>	<b>Ruído Modos</b>
R1	0	1
R2	1	3
R3	2	3
R4	2	5
R5	2	10

### 4.4 CENÁRIOS DE DANO

No presente trabalho o dano no elemento  $i$  será considerado como uma diminuição do modulo de elasticidade do material desse elemento, e

representado pelo coeficiente de redução  $\beta_i$ . Esse coeficiente assume o valor 0 quando o elemento não se encontra danificado, e o valor 1 indicaria a perda total do elemento. A matriz de rigidez danificada do elemento  $i$  é calculada multiplicando-se a matriz de rigidez original pelo fator  $(1 - \beta_i)$ .

Diversos cenários de dano são considerados para a avaliação do desempenho das metodologias estudadas, como apresentado na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** Cenários de dano estudados.

<b>Estrutura</b>	<b>Código</b>	<b>Elem.</b>	<b>Dano <math>\beta</math></b>
Viga simplesmente apoiada	VS1	2	0.20
	VS2	10	0.20
	VS3	5	0.20
		12	0.20
Viga em balanço	VB1	3	0.15
	VB2	8	0.25
		6	0.15
	VB3	7	0.15
		8	0.15
Trelça 21 elementos	T21A	8	0.15
	T21B	14	0.15
	T21C	3	0.15
	T21D	4	0.20
		13	0.20
Pórtico	P3A	3	0.20
	P3B	9	0.15
		10	0.15
		11	0.15
	P3C	4	0.20
		7	0.20
		15	0.20

**Tabela 4.7** Tipos de incompletude nas formas modais experimentais lidas.

<b>Identificador</b>	<b>Configuração</b>
IX	Só Graus de liberdade horizontais lidos.
IY	Só Graus de liberdade verticais lidos.
IXY	Graus de liberdade verticais e horizontais lidos.
I1	Viga: Medições verticais nos nós 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21.
	Trelça 21 Elem.: Medições verticais e horizontais nos nós 3, 5, 8, 10, 12.
	Pórtico: Medições verticais e horizontais nos nós 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17.
I2	Viga: Medições verticais nos nós 3, 4, 8, 9, 10, 13, 15, 17, 19, 20.
	Trelça 21 Elem.: Medições verticais e horizontais nos nós 2, 6, 8, 10, 12.
	Pórtico: Medições verticais e horizontais nos nós 5, 6, 9, 10, 13, 16, 17.

De igual forma, são estudados diversos tipos de incompletude dos dados experimentais (vide Tabela 4.7), sendo a configuração de medições I1 a utilizada para representar as medições experimentais reais. Devido ao fato de que experimentalmente só uns poucos modos podem ser medidos, no presente trabalho foi considerado que unicamente se dispõe dos primeiros oito modos de vibração.

Como notação para os diversos casos de dano será utilizada o código formado pelo identificador do cenário de dano, pelo tipo de incompletude e o tipo de ruído. Por exemplo, o caso VS3-I1-R2 representa o cenário de dano múltiplo para a viga simplesmente apoiada com incompletude nos dados tipo I1 e ruído de 1% em frequências naturais e 3 % em formas modais.

#### 4.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

A detecção do dano por algoritmos genéticos foi abordada a partir de três tipos de algoritmos: binário, real e de codificação redundante. Os três têm características especiais que visam redução do espaço de busca como será exposto a seguir.

A função objetivo utilizada foi baseada nos valores de frequência e formas modais normalizadas à massa quando ela se encontra danificada, ou seja:

$$f_{obj} = \sum_{i=1}^{nm} \left( \left| \frac{W_{AG} - W_{exp}}{W_{exp}} \right| \right) + W_{\phi_w} \sum_{i=1}^{nm} \sum_{j=1}^{ngll} \left( \left| \frac{\phi_{ijAG} - \phi_{ijEXP}}{\phi_{ijEXP}} \right| \right) \quad (4.20)$$

onde  $nm$  é o número de modos disponíveis,  $ngll$  o número de graus de liberdade lidos por cada modo,  $AG$  e  $EXP$  representam os valores dos parâmetros dados pelo AG e em forma experimental, respectivamente.  $W_{\phi_w}$  é um termo de ponderação definido pelo usuário, e que depois de alguns testes encontrou-se que o valor que permitia encontrar as melhores soluções era 0.05.

O problema a ser resolvido pelos AG considerados deve ser formulado como um problema de maximização, sendo a Equação 4.20 agora expressa na forma:

$$g_{obj} = \frac{a_1}{a_2 + f_{obj}} \quad (4.21)$$

onde  $a_1$  e  $a_2$  são parâmetros definidos pelo usuário e que são dados neste trabalho como 20000 e 1 respectivamente. Estes parâmetros devem ser definidos tal que possa ser garantido que soluções muito diferentes não apresentassem valores da função objetivo similares.

Como variáveis do problema a serem otimizadas encontram-se os coeficientes de redução de rigidez para cada um dos elementos da estrutura em estudo, os quais serão codificados para formar cada indivíduo da população do AG. A definição dos parâmetros e dos operadores a serem utilizados pelos diferentes algoritmos genéticos foi realizada em base na bibliografia apresentada e em alguns testes feitos.

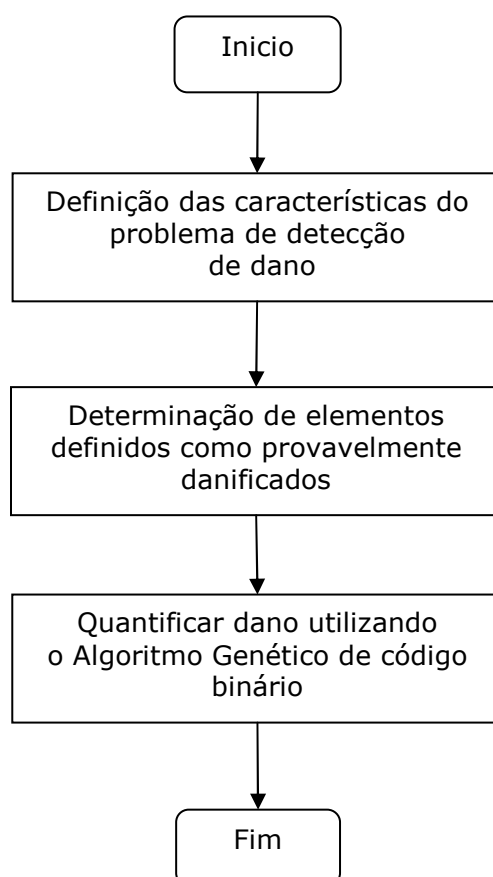
Como critério de parada do AG é utilizado um número máximo de iterações, sendo a solução encontrada pelo AG a que fornece o indivíduo da população final que tiver a melhor aptidão. A precisão na resposta foi definida como de 3 cifras decimais.

Devido à natureza estocástica dos AGs, cinco vezes o Algoritmo será executado e o melhor indivíduo entre essas cinco rodadas será o cenário de dano encontrado pelo AG.



#### 4.5.1 Algoritmo genético de código binário com metodologia de localização de elementos provavelmente danificados (CoBin2)

O algoritmo CoBin2, seguindo a linha do trabalho de Au *et al.* (2004), realiza o procedimento de localização e quantificação de elementos danificados em forma separada. Inicialmente, é utilizada uma metodologia determinística para a localização de elementos provavelmente danificados; para, em seguida utilizar o AG de código binário na determinação da extensão do dano nesses elementos (vide Figura 4.6).



**Figura 4. 6** Algoritmo para detecção de dano em duas etapas.

Para a determinação dos elementos provavelmente danificados foi utilizada a metodologia da relação da diferença do quociente de energia elementar (LAW, *et al.*, 1998) mostrada em maiores detalhes no capítulo 3. A seguinte

modificação foi proposta com o objetivo de propiciar a identificação dos elementos provavelmente danificados de maneira mais evidente em relação à identificação realizada pela metodologia original, qual seja:

$$EEQDR_{j\text{mod}} = \left( \frac{EEQDR_j}{\text{Max}(EEQDR)} \right)^{1.5} \quad (4.22)$$

No qual  $EEQDR_j$  é como definido na Equação (3.9).

Devido ao fato dessa metodologia requerer formas modais completas, será utilizada uma técnica de expansão de modos para os casos que apresentem medições incompletas. Neste trabalho foi escolhida a técnica exata modificada, vide seção 3.4, a qual contempla na sua formulação contribuições de todos os termos das matrizes de massa e rigidez. Esse procedimento poderia ser muito benéfico para o caso de detecção de dano dado que não se conhece *a priori* os locais danificados.

Por outro lado, o AG utilizado para a quantificação do nível de dano é aquele de código binário com os parâmetros e os operadores como definidos nas Tabelas 4.8 e 4.9.

**Tabela 4.8** Operadores genéticos do algoritmo CoBin2.

<b>Operador</b>	<b>Tipo</b>
Seleção	Torneio
Cruzamento	2 pontos
Mutação	<i>Jump</i>
Outros	Elitismo

**Tabela 4.9** Parâmetros do algoritmo CoBin2.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tamanho População	100
Taxa de Cruzamento	0,85
Taxa de Mutação	0,01
No máximo de Iterações	300

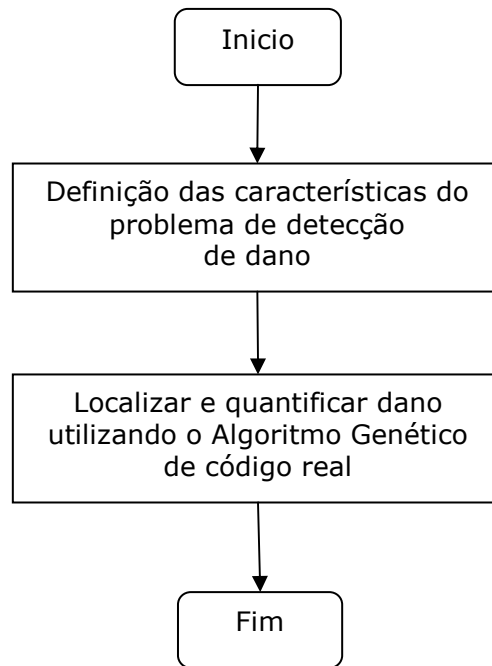
A codificação dos indivíduos é realizada considerando-se como valor mínimo zero e como valor máximo de 1. A precisão requerida é de 3 algarismos depois da vírgula. Assim, aplicando-se a Equação 2.5, o coeficiente de redução de rigidez para cada elemento é codificado com um tamanho de gene,  $Tam\_Gene$ , igual a 10 bits. O tamanho do cromossomo,  $Tam\_Cromo$ , variará dependendo do número de elementos provavelmente danificados,  $ElemDan$ , encontrados na primeira etapa, sendo definido como:

$$Tam\_Cromo = ElemDan \times Tam\_Gene \quad (4.23)$$

A população inicial é gerada para o AG binário em forma aleatória, mas introduzindo um valor fixo de zero para o primeiro bit de cada gene. Com isto, garantimos que o número gerado esteja entre 0 e 0.5, orientando assim a busca para condições no qual o dano não é severo.

#### **4.5.2 Algoritmo genético de código real com processo de re-inicialização da população de indivíduos (CoRea1)**

O processo de detecção de dano pode ser realizado numa etapa quando a localização dos elementos danificados e a quantificação da extensão do dano são realizadas simultaneamente, Figura 4.7. Metodologias que utilizam esta orientação podem apresentar dificuldades do tipo computacional devido ao amplo tamanho do espaço de busca, produzido quando é definido para cada elemento um parâmetro de diminuição da rigidez. Por isso, é proposta a utilização de um AG de código real, que utiliza um bit para codificar cada variável do problema, sendo neste trabalho o valor da extensão do dano. Um tamanho muito menor do cromossomo é obtido quando comparado com o AG de código binário tradicional.



**Figura 4. 7** Algoritmo de detecção de dano de uma etapa.

Os operadores genéticos e os parâmetros que definem o AG são apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11, respectivamente. Da mesma forma que para o AG de código binário, foram determinados depois de alguns testes.

**Tabela 4.10** Operadores Genéticos do algoritmo CoRea1.

<b>Operador</b>	<b>Tipos</b>
Seleção	Torneio
Cruzamento	BLX- $\alpha$
Mutação	<i>Jump</i>
Outros	Elitismo

**Tabela 4.11** Parâmetros do algoritmo CoRea1.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tamanho População	100
Taxa de Cruzamento	0,90
Taxa de Mutação	0,05
No máximo de Iterações	300

Para a geração da população inicial uma heurística é proposta tendo-se em vista o fato de que na prática o número de elementos danificados é em geral pequeno. Para a definição do valor de cada gene em cada indivíduo da

população é gerado um número aleatório tal que se esse número for maior a 0.4, o gene assumirá um valor de zero, senão o gene receberá um valor aleatório entre 0 e 0.6.

Outra característica importante do AG de código real implementado consiste na re-inicialização da população. Depois de uma primeira execução do algoritmo, aqueles elementos que apresentarem valores de dano menores que 0,05 são descartados e uma nova rodada do algoritmo é realizada só com aqueles elementos não descartados. A configuração entre a duas rodadas que apresentar o melhor indivíduo será a resposta do algoritmo.

Finalmente, o tamanho do cromossomo na rodada inicial corresponderá ao número de elementos na estrutura e para a etapa de re-inicialização terá o tamanho do total de elementos que apresentarem valores de dano maiores a 0,05.

#### **4.5.3 Algoritmo genético de código binário com representação redundante implícita (CoRed1)**

O terceiro algoritmo implementado consiste na aplicação do AG de representação implícita redundante como proposto em Raich e Liskay (2007), que realiza o processo de localização e quantificação de dano em uma única etapa. Nesse algoritmo o gene é constituído por um segmento que codifica o identificador do elemento danificado e outro segmento codificando a extensão do dano. Cada indivíduo deste algoritmo representa uma solução do problema, mas contendo só um pequeno número de elementos considerados como danificados (RAICH e LISZKAY, 2007).

Os operadores de seleção, cruzamento e mutação são aplicados como no AG Binário tradicional, nos termos da Tabela 4.12, sendo os parâmetros para a execução deste algoritmo aqueles da Tabela 4.13. A população inicial é gerada de forma aleatória.

**Tabela 4.12** Operadores do algoritmo CoRed1.

<b>Operador</b>	<b>Tipos</b>
Seleção	Roleta
Cruzamento	Dois Pontos
Mutação	<i>Jump</i>
Outros	Elitismo

**Tabela 4.13** Parâmetros do algoritmo CoRed1.

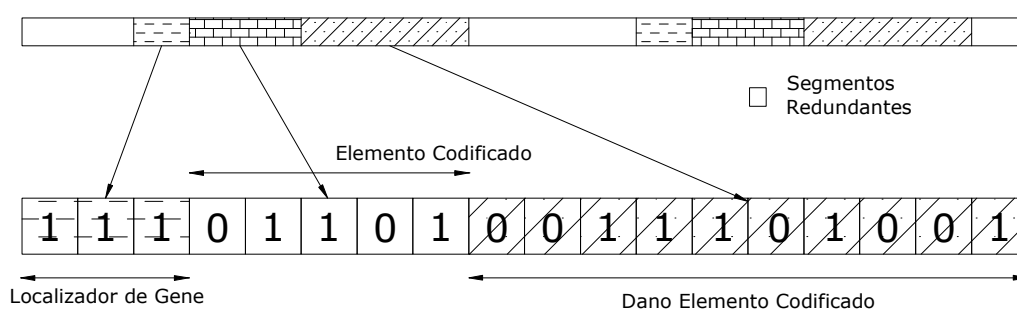
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tamanho População	200
Taxa de Cruzamento	0,85
Taxa de Mutação	0,005
No máximo de Iterações	300

Em relação ao localizador do gene cabe assinalar que foi utilizado aquele proposto em Raich e Gaboussi (1998), que consiste numa seqüência de três bits com valor de 1. Deseja-se salientar que não é permitida a sobreposição de genes, ou seja, quando for encontrado um gene, o localizador só começará a procurar pelo seguinte gene no bit que segue o gene previamente localizado.

Como comentado anteriormente, o gene é formado por um segmento que codifica a posição do elemento e mais outro segmento codificando a extensão do dano. O tamanho do gene é determinado por:

$$Tam\_gene = Bits\_Loc + Bits\_Elem + Bits\_Ext \quad (4.24)$$

onde  $Tam\_gene$  é o tamanho do gene,  $Bits\_Loc$  é o tamanho do localizador de genes,  $Bits\_Elem$  é o número de bits necessário para codificar todos os elementos da estrutura e  $Bits\_Ext$  é o número necessário de bits para codificar a variável de dano. Na Figura 4.8 é mostrado um cromossomo típico para este algoritmo.



**Figura 4. 8** Codificação redundante implícita para detecção de dano (RAICH e LISKAY, 2007).

Assim por exemplo, para o caso da viga simplesmente apoiada com 20 elementos finitos o tamanho de bits necessário para poder identificar os elementos seria 5 bits e para a quantificação do dano seria de 10, calculados utilizando a Equação 2.5. Por tanto, o tamanho do gene será:

$$Tam\_Gene = 3 + 5 + 10 = 18$$

Agora, o tamanho do cromossomo é calculado mediante a heurística:

$$Tam\_Cromo = 0,4 \times Tam\_Gene \times NElem \quad (4.25)$$

Para a viga simplesmente apoiada o tamanho do cromossomo aplicando a Equação 4.25 é:

$$Tam\_Cromo = 0,4 \times 18 \times 20 = 144$$

No processo de decodificação do identificador do elemento danificado, este poderia ser maior que o número de elementos máximo da estrutura, devido a que a totalidade de elementos que podem ser gerados é superior ao número verdadeiro de elementos na estrutura. Para se resolver esse problema, quando gerado um número de elemento inválido, o programa escolhe em forma aleatória um elemento da estrutura e realiza o processo inverso, ou seja, determina qual o número binário que representa esse elemento, e os bits correspondentes no cromossomo original são substituídos. Observou-se que nas gerações iniciais

este número é grande mais na medida em que a população evolui a quantidade diminui para zero.

Outro problema relacionado ao identificador de elemento decodificado pelo AG esta ligada ao fato de que para um cromossomo determinado podem ser gerados varias vezes a mesma posição para o dano, então para se determinar o valor do dano para esse elemento é utilizada a media dos valores encontrados.

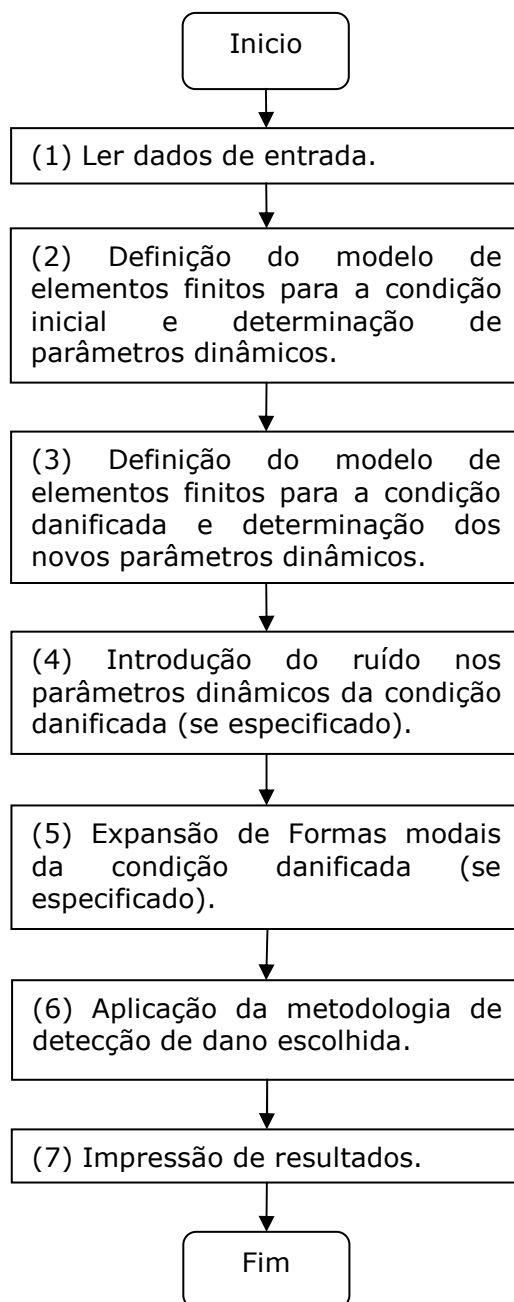
#### **4.6 DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA IMPLEMENTADO**

As metodologias, descritas anteriormente, foram implementadas na linguagem de programação Fortran 90. Um aspecto muito importante do programa é que ele permite realizar diversos tipos de análise: análise dinâmica, expansão de formas modais, localização de elementos danificados e detecção de dano nível III. Porém, no seguinte será mostrada a descrição da sub-rotina para detecção de dano nível III, vide Figura 4.9.

O primeiro passo do algoritmo que permite detectar dano nível III, vide Figura 4.10, consiste em pedir ao usuário dois arquivos de entradas de dados, como descrito a seguir:

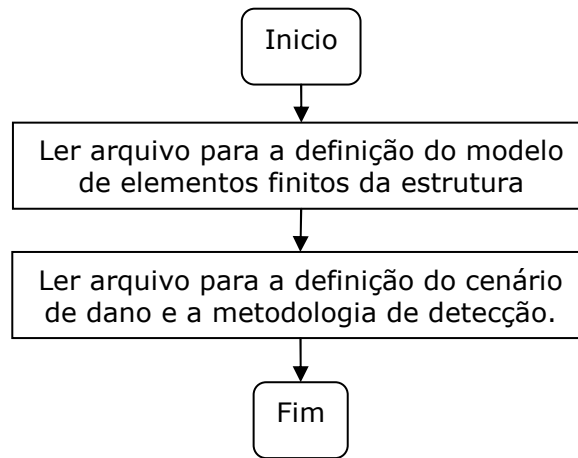
- Arquivo "\*.dat": contem a informação para a definição do modelo de elementos finitos da estrutura.
- Arquivo "\*.met": contem a definição do cenário de dano que vai ser determinado e a metodologia de detecção de dano que vai ser utilizada.





**Figura 4. 9** Algoritmo do programa implementado.

O segundo e terceiro passos implementam o modelo de elementos finitos da estrutura tanto para a condição inicial como para a condição danificada. O cálculo dos parâmetros dinâmicos, frequências naturais e formas modais, é realizado mediante a utilização da sub-rotina **DGVCSP** da biblioteca matemática do Fortran 90, a qual fornece os auto-valores e auto- vetores de uma matriz.



**Figura 4. 10** Algoritmo para a leitura de dados.

No passo 4 é permitido que sejam introduzidas porcentagens de ruído sobre as frequências naturais e formas modais, como explicado na seção 4.2.

Já no passo 5, é realizada a correspondência entre os graus de liberdade analíticos e experimentais através da expansão de formas modais. Para isso, o usuário deverá fornecer como dado de entrada uma lista com os graus de liberdade disponíveis.

No passo 6 define-se o tipo de metodologia de detecção de dano a ser utilizada: CoBin2, CoRea1 ou CoRed1. Se a metodologia CoBin2 é escolhida deve-se fornecer os elementos preliminarmente definidos como danificados.

Por último é realizada a impressão de resultados. O programa fornece dois tipos de arquivo. O primeiro de extensão "\*.Out" o qual contem a informação da estrutura original e o segundo, de extensão "\*.Out2", contem os resultados encontrados pelos distintas análise que podem ser realizadas pelo programa. No caso da utilização de um dos algoritmos genéticos são produzidos 6 destes arquivos, 5 deles contendo o cenário de dano para 5 rodadas diferentes do AG.

## 5. RESULTADOS

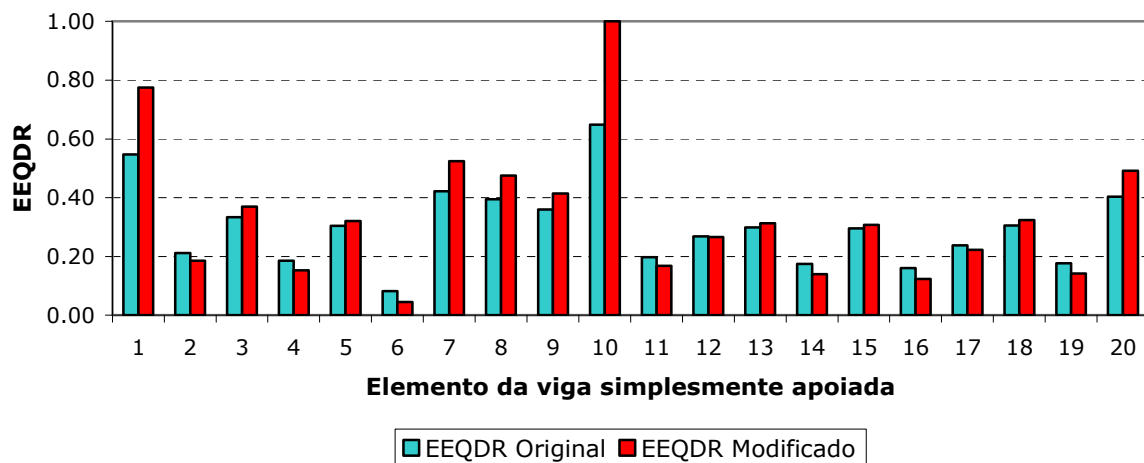
---

### 5.1 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DANO (LAW, SHI e ZHANG, 1998)

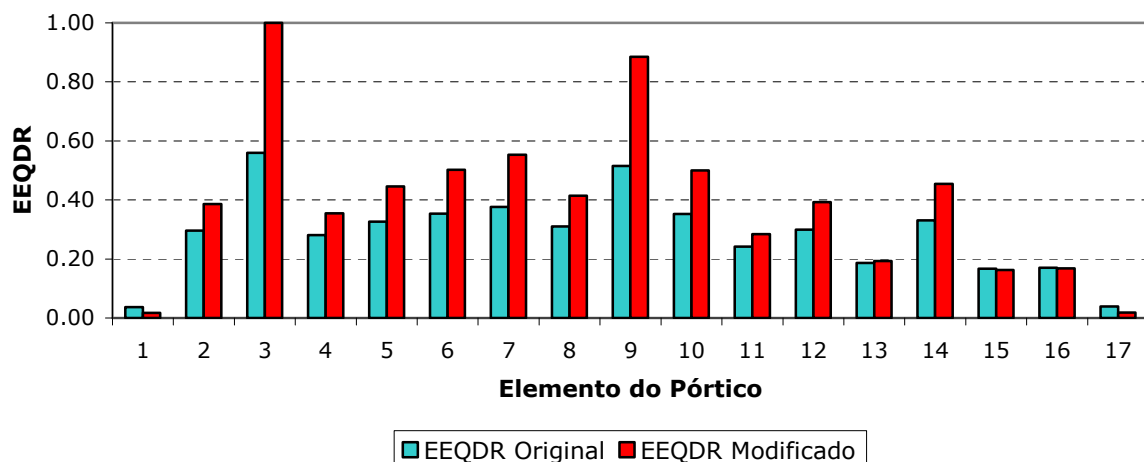
Devido ao caráter um tanto subjetivo envolvido na determinação do que representa para a metodologia um elemento provavelmente danificado, busca-se no que se segue apresentar os critérios assumidos para a definição desses elementos nos diferentes casos de dano estudados:

- Elementos que apresentarem alta diferença entre os valores do EEQDR\_Mod em relação a uma quantidade significativa de elementos.
- Elementos em zonas da estrutura que apresentarem valores do EEQDR\_Mod relativamente maiores que aqueles que se encontram perto deles.

Primeiro será mostrado como a modificação realizada sobre a metodologia original de localização de dano ajuda na obtenção de melhores resultados. Na Figura 5.1 pode ser observado que, para o caso da viga simplesmente apoiada (vide Figura 4.3 e Tabela 4.2), a modificação proposta permite identificar mais facilmente quais são os elementos provavelmente danificados (neste caso os elementos 1,7, 8, 9, 10, 20), esse fato se deve ao aumento da diferença nos valores do EEQDR entre os elementos provavelmente danificados e aqueles não danificados.



**Figura 5. 1** Comparação entre os resultados da metodologia de localização de dano original e modificada para o cenário de dano VS2-I1-R2: Dano no elemento 10.



**Figura 5. 2** Comparação entre os resultados da metodologia de localização de dano original e modificada para o cenário de dano P3A-I1-R2: Dano no elemento 3.

Os resultados apresentados na Figura 5.2 para o cenário de dano P3A-I1-R2, mostram o incremento na diferença entre os valores do EEQDR para os elementos 3 e 9 mantendo similares valores para os outros elementos. Com isto, é conseguida uma melhor identificação do elemento verdadeiramente danificado.

Por outro lado, o autor da metodologia original comenta que, para o caso de elementos perto de pontos nodais, valores excepcionais do EEQDR podem ser encontrados. Isso se deve ao fato de que para esses elementos o valor do EEQ pode ser muito baixo, e assim, embora o EEQD apresente uma variação pequena, o valor do EEQDR é grande.

**Tabela 5.1** Variação dos valores do EEQD para o modo 1 devido à presença de ruído.

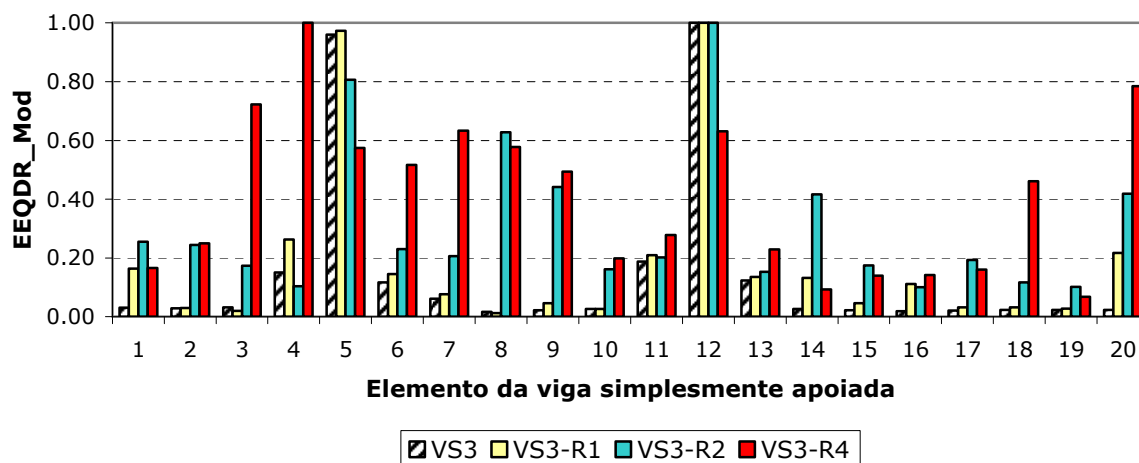
<b>Elemento</b>	<b>EEQD Com ruído</b>	<b>EEQD Sem ruído</b>	<b>Erro (%)</b>
1	831294914	832817061	0
2	9231123.86	12525699.1	26
3	836840.956	642169.408	30
4	137114.132	215549.043	36
5	541502.584	490839.416	10
6	587847.063	465792.607	26
7	249975.454	205555.711	22
8	52629.5002	54028.4158	3
9	25363.5526	3888.0903	552
10	58903.3583	53671.2202	10
11	214048.559	204493.64	5
12	635309.462	463523.444	37
13	440099.688	485511.968	9
14	116646.861	208699.778	44
15	373607.311	418081.21	11
16	8968049.39	12591326.8	29
17	833639697	834690904	0

Elementos com valores baixos de EEQ são muito susceptíveis a serem determinados como danificados quando se tem presença de ruído nas medições, devido à possível perturbação introduzida nos valores das energias do elemento. Na Tabela 5.1 são apresentados os valores do EEQD, do primeiro modo no caso de dano P3A-I1-R2, para medições com e sem ruído. Pode ser observado que o

valor mais afetado foi o do elemento 9; com isso a metodologia identifica esse elemento como provavelmente danificado, vide Figura 5.2.

### 5.1.1 Análise da influência do ruído no desempenho da metodologia de localização

As Figuras 5.3 a 5.7 servem para mostrar o desempenho da metodologia de localização de elementos danificados quando as medições estão contaminadas por diferentes níveis de ruído.

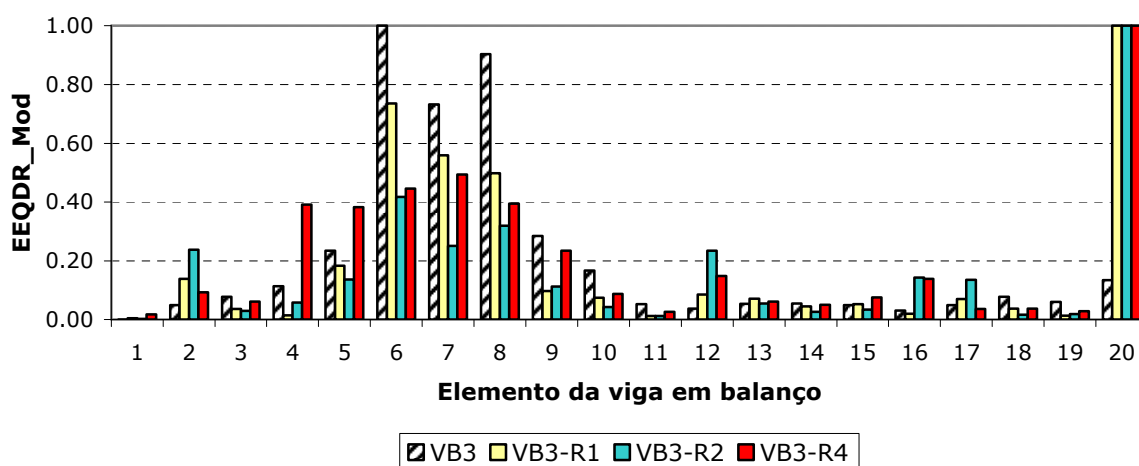


**Figura 5. 3** Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização- Cenário VS3: Dano em elementos 5 e 12.

No caso da viga simplesmente apoiada, vide Figura 5.3, nota-se que, para o caso no qual as formas modais estão contaminadas com 1% de ruído, a metodologia consegue detectar de forma exata quais os dois elementos danificados. Quando as medições contêm ruído num valor de 3%, são detectados 6 elementos como provavelmente danificados: 5, 8, 9, 12, 14 e 20. Porém, a metodologia em questão acaba por obter uma quantidade pequena de elementos provavelmente

danificados. Já para um valor de ruído de 5% esses indivíduos são 3-9, 12, 18 e 20, mostrando um aumento de 6 a 10 elementos provavelmente danificados.

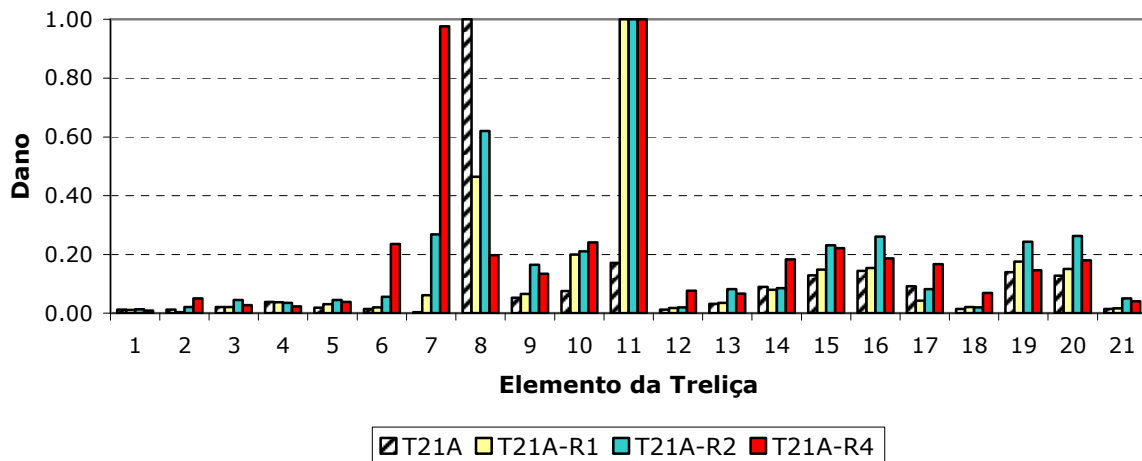
Um caso especial do desempenho da metodologia é apresentado para a viga em balanço, na qual os elementos que se encontram perto da borda apresentam valores muito baixos do EEQ para os primeiros modos de vibração. Isso traz como consequência uma variação muito grande nos valores do EEQD quando os dados contem ruído. Por causa desse fato a implementação da metodologia de localização de elementos provavelmente danificados na estrutura em balanço se fez com a utilização dos modos mais altos disponíveis.



**Figura 5. 4** Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário VB3: Dano em elementos 6, 7 e 8.

A Figura 5.4 mostra como o elemento da borda controla o resultado da metodologia para os diferentes níveis de ruído. A região contendo os elementos danificados é corretamente localizada para os diferentes níveis de ruído, mas na medida em que o nível de ruído aumenta o número de elementos provavelmente danificados também aumenta. Para 1% de ruído são identificados os elementos 6, 7, 8 e 20, para 3% os elementos 2, 6, 7, 8, 12 e 20, e para 5% de ruído os elementos 4-9 e 20.

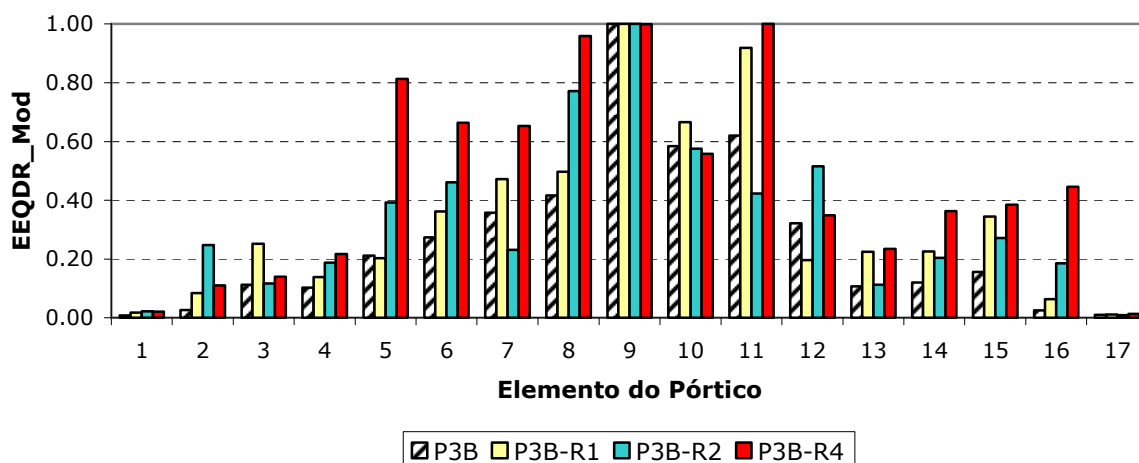
No caso da treliça, vide Figura 5.5, a metodologia consegue detectar o elemento danificado até um valor de ruído de 3%, porém indicando que o elemento 11 encontra-se danificado. Entende-se que isso se deve ao fato de o elemento 11 apresentar um valor pequeno de EEQD; quando introduzido ruído nos dados a esse valor tem-se uma variação muito grande. Para ruído de 5% a metodologia não consegue detectar o elemento danificado, e falsamente identifica os elementos 7 e 11 como danificados.



**Figura 5. 5** Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário T21A: Dano em elemento 8.

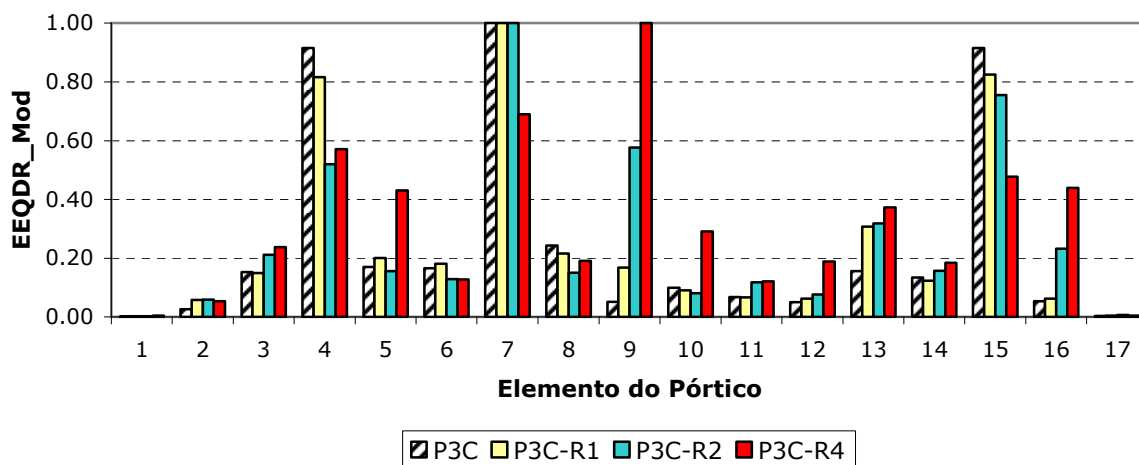
No caso de dano múltiplo uniforme no pórtico, vide Figura 5.6, não é tão clara a determinação dos verdadeiros elementos danificados. Para 1% de ruído o algoritmo identifica corretamente os elementos 9, 10 e 11. No caso de se ter 2% de ruído os elementos danificados aumentam e duas regiões danificadas são observadas. A primeira poderia estar formada pelos elementos 5 e 6 e a segunda pelos elementos 8 e 12. No caso de 5% de ruído uma zona só é determinada contemplando os elementos 5 - 11.





**Figura 5. 6** Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário P3B: Dano em elementos 9, 10 e 11.

Quando se tem dano não uniforme no pórtico, vide Figura 5.7, a metodologia parece se comportar melhor, já que consegue detectar dano, mesmo para altos valores de ruído. Para 1% de ruído a metodologia determina os mesmos locais danificados que para as condições sem ruído. Quando se tem 3% de ruído o valor do EEQDR\_Mod do elemento 4 diminui e o elemento 9 é considerado como danificado. No caso de 5% de ruído o valor do EEQDR\_Mod do elemento 7 diminui e agora são encontrados como danificados também os elementos 5, 15 e 16.



**Figura 5. 7** Efeito da presença de ruído no desempenho da metodologia de localização - Cenário P3C: Dano nos elementos 4, 7 e 15.

Como mostrado nas Figuras de 5.3 a 5.7, independente do tipo de estrutura, o ruído afeta na capacidade da metodologia de identificar os elementos danificados. Para valores de ruído de 10% nas formas modais a metodologia não consegue uma redução importante do número de elementos danificados.

As Figuras 5.4 e 5.6 indicam que a identificação de um cenário de dano uniforme poderia ser de difícil determinação para a metodologia de localização de elementos provavelmente danificados utilizada.

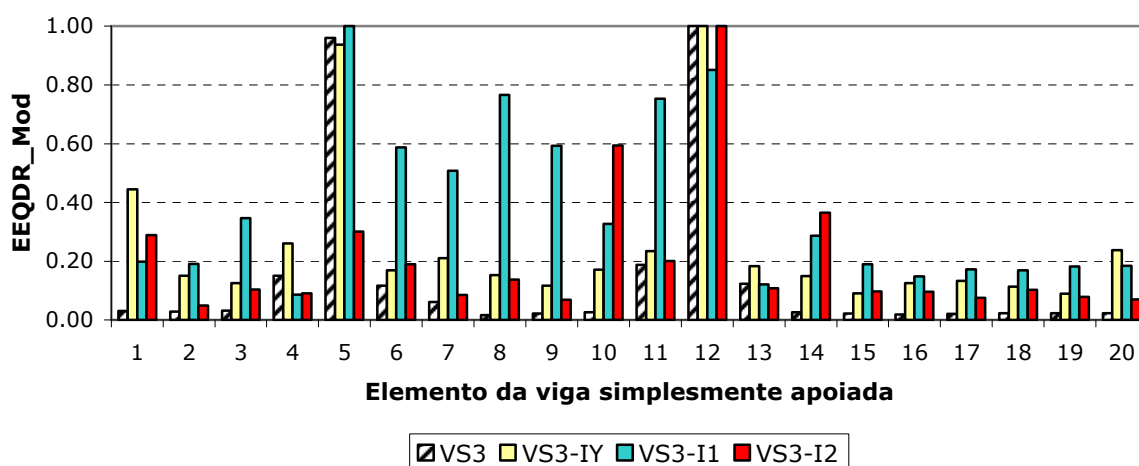
Outra observação importante é que no caso das medições sem ruído, a metodologia consegue detectar corretamente o cenário de dano, sem presença de outros elementos falsamente identificados como danificados.

### **5.1.2 Análise da influência de medições incompletas no desempenho da metodologia de localização**

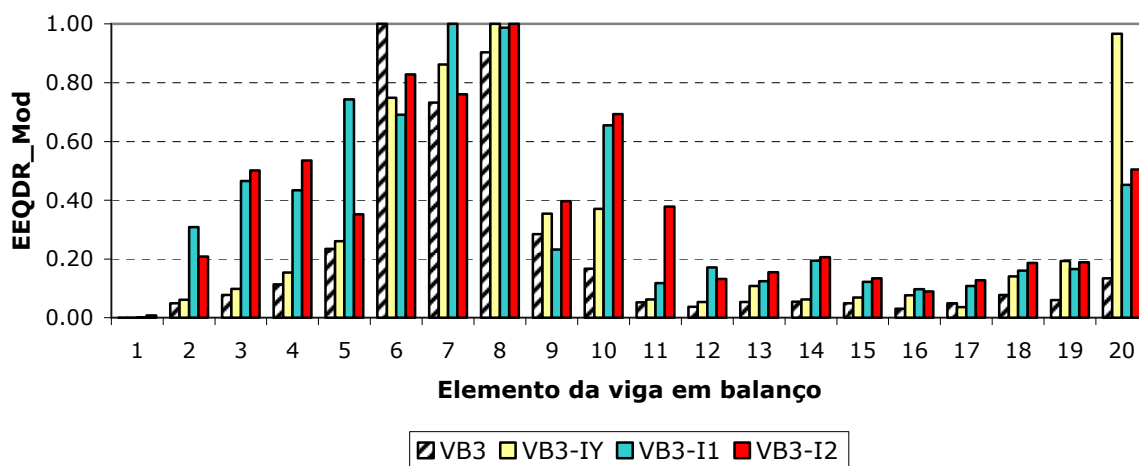
Nesta seção é avaliada a influência das medições incompletas sobre os resultados da metodologia de localização.

Na Figura 5.8 pode ser observado que, quando todos os graus de liberdade verticais são medidos, a metodologia oferece resultados similares àqueles obtidos com dados completos, mas apresenta os elementos perto dos apoios igualmente como danificados. Uma diferença apreciável é observada entre os resultados encontrados utilizando as configurações de dados incompletos I1 e I2. Na primeira os elementos danificados 5 e 12 apresentam os valores maiores do EEQDR\_mod mas apresenta os elementos 6, 7, 8, 9, 11 como danificados. Por sua vez, quando utilizados a configuração I2, um número menor de elementos

falsamente é identificado. O elemento 5 apresenta um valor do EEQDR\_Mod baixo devido possivelmente ao fato de que medições não foram realizadas em nenhum dos graus de liberdade desse elemento. Isso indica uma dependência da metodologia em relação aos graus de liberdade medidos.



**Figura 5. 8** Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Cenário VS3: Dano em elementos 5 e 12.



**Figura 5. 9** Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso VB3: Dano em elementos 6, 7 e 8.

Na Figura 5.9 é apresentado o caso de dano uniforme na viga em balanço. Como na situação com ruído, é mostrado que o elemento da borda tem um alto valor de EEQDR\_Mod devido ao fato de que apresenta um valor de EEQ muito

baixo como mostrado na Tabela 5.2. Pode ser observado que, apesar da diferença entre os valores dos EEQD do elemento da borda ser pequena, o erro introduzido é grande, ocasionando ser o elemento considerado como danificado.

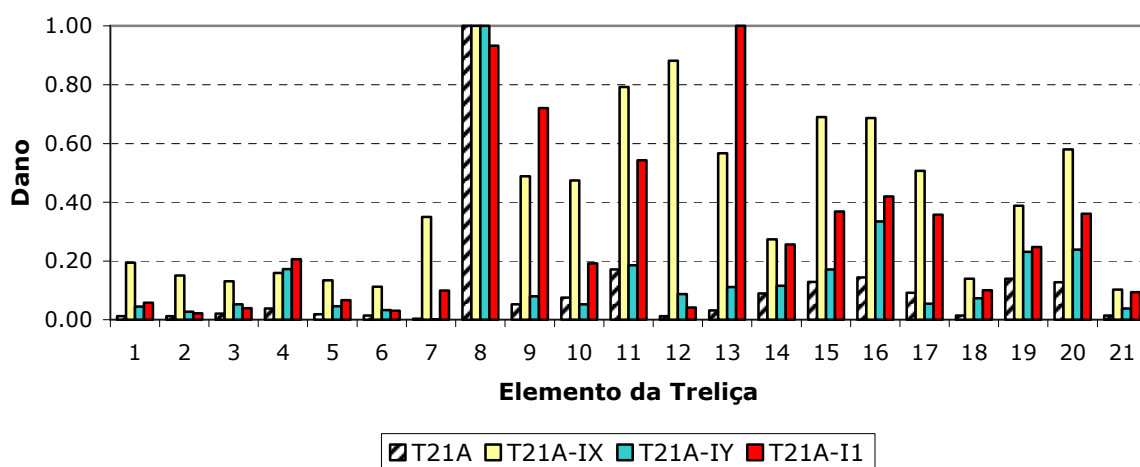
Em relação aos outros elementos observa-se que a utilização de medições em todos os graus de liberdade verticais ajuda na correta identificação dos elementos provavelmente danificados, como sendo os elementos 9, 10, 11 e 20. As outras duas configurações apresentaram um resultado similar, no qual definem basicamente os elementos 3, 4, 6, 7, 8, 10, 20. A configuração I1 ainda define o elemento 5 como danificado.

**Tabela 5.2** Variação dos valores do EEQD para o modo 1 devido a medições incompletas.

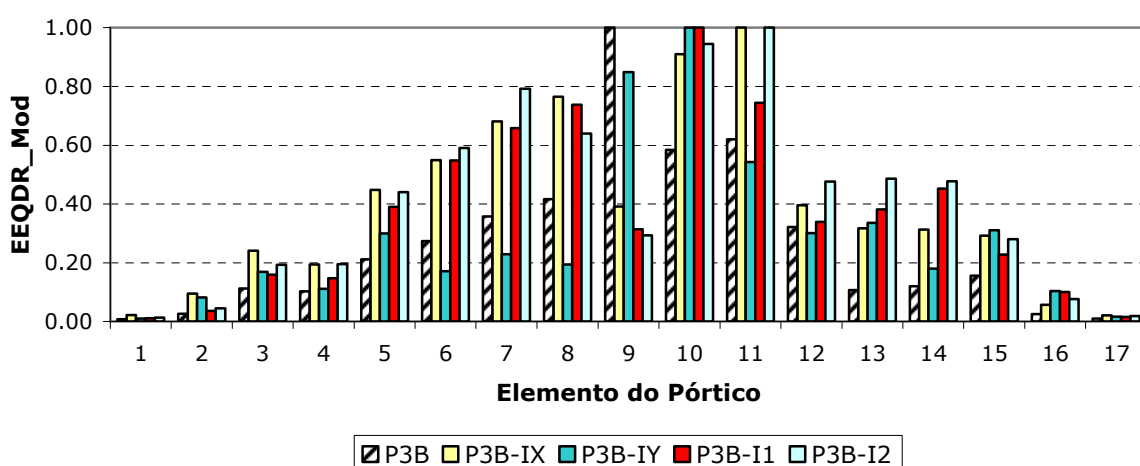
<b>Elemento</b>	<b>EEQD Com ruído</b>	<b>EEQD Sem ruído</b>	<b>Erro (%)</b>
1	6.2145E+10	6.2391E+10	0
2	1800960581	1794194626	0
3	236006373	237100372	0
4	56277295.5	56030612.1	0
5	18222265.8	18344793	1
6	7058820.37	9744094.21	38
7	3060867.53	4181957.12	37
8	1427314.26	1919891.8	35
9	696598.572	664403.945	5
10	348640.94	334818.022	4
11	175903.937	164959.353	6
12	88038.2324	84051.0995	5
13	42966.9138	39852.897	7
14	20035.9033	19178.5875	4
15	8688.01541	7947.90569	9
16	3365.48948	3269.94428	3
17	1089.70825	962.354645	12
18	259.827978	269.449414	4
19	34.0260013	23.9615726	30
20	0.96028083	2.42982294	153

Para o caso da treliça mostrada na Figura 5.10, quando utilizados todos os graus de liberdade verticais, a metodologia identifica claramente como danificado

o elemento 8, e erroneamente identifica o elemento 16. No caso das medições horizontais foi observado um bom comportamento da metodologia, que indicou como danificados unicamente os elementos 8, 9, 11, 13. Já quando utilizado a configuração de medições I1, embora o elemento 8 seja detectado corretamente, alguns outros elementos são considerados como danificados: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17 e 20.



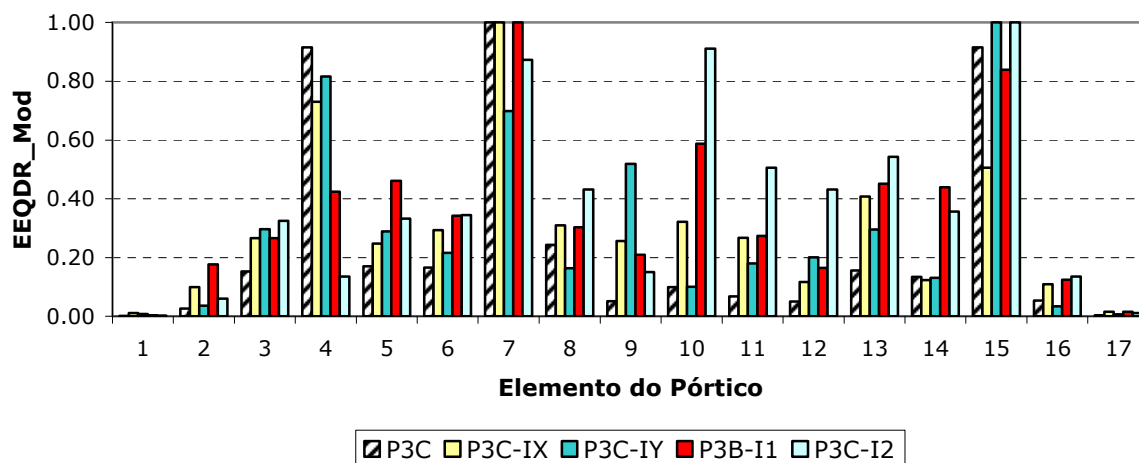
**Figura 5. 10** Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso T21A: Dano no elemento 8.



**Figura 5. 11** Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso P3B: Dano em elementos 9, 10 e 11.

Na Figura 5.11 é apreciado que a metodologia falha em definir o cenário de dano uniforme para as configurações de dados incompletos I1, I2 e de só graus de liberdade horizontais medidos, não definindo o elemento 9 como provavelmente danificado. Isso pode ter sua origem no fato de que o elemento 9 apresenta o menor valor do EEQDR da estrutura para os primeiros modos. Por outro lado, a utilização dos graus de liberdade verticais levou a uma correta identificação dos elementos danificados: 9, 10, 11.

Na Figura 5.12 a utilização de todos os graus de liberdade verticais leva a uma boa determinação do cenário de dano, no qual só o elemento 9 é falsamente identificado como danificado. De igual forma, a utilização de só os graus de liberdade horizontais leva a uma configuração correta dos elementos danificados, sendo falsamente identificado o elemento 13; indicando-se que, dependendo do tipo de dano, a utilização desta configuração de dados incompletos poderia ou não funcionar. A configuração de medições I1 leva a uma errada interpretação do cenário de dano no qual o elemento 4 poderia não ser considerado como danificado. Para a configuração I2 a metodologia não consegue detectar o elemento 4 como danificado.



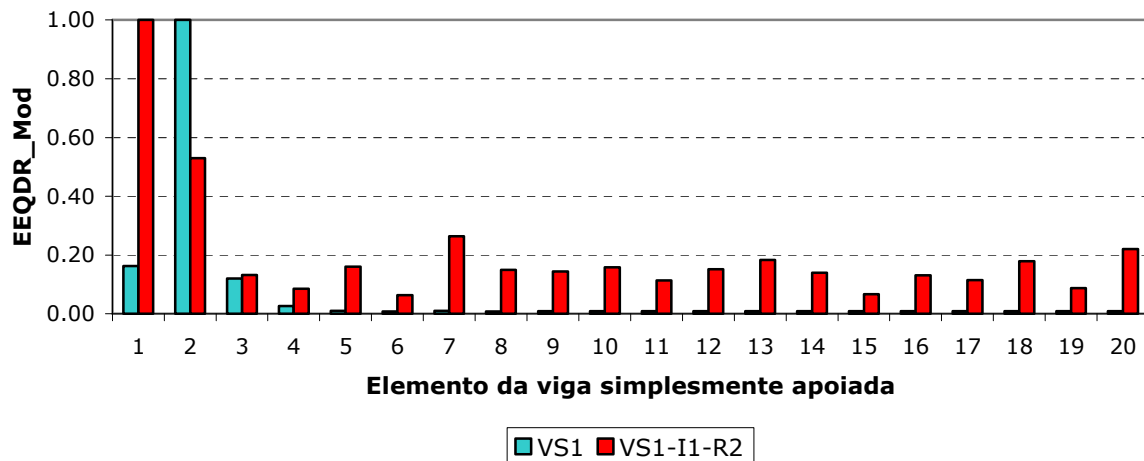
**Figura 5. 12** Efeito de se ter medições incompletas no desempenho da metodologia de localização - Caso P3C: Dano em elementos 4, 7 e 15.

Finalmente, como pode ser observado nas Figuras 5.8 a 5.12, dependendo de quais os graus de liberdade escolhidos os resultados da metodologia de localização poderão variar. Em forma geral é observado que a leitura de pelo menos algum dos graus de liberdade translacionais em cada um dos nós da estrutura oferece melhores resultados, o que na prática poderia não ser viável tanto técnica como economicamente. Portanto, a escolha dos graus de liberdade a serem medidos joga um papel importante na correta detecção de um cenário de dano determinado.

### **5.1.3 Análise do efeito combinado de ruído e medições incompletas no desempenho da metodologia de localização**

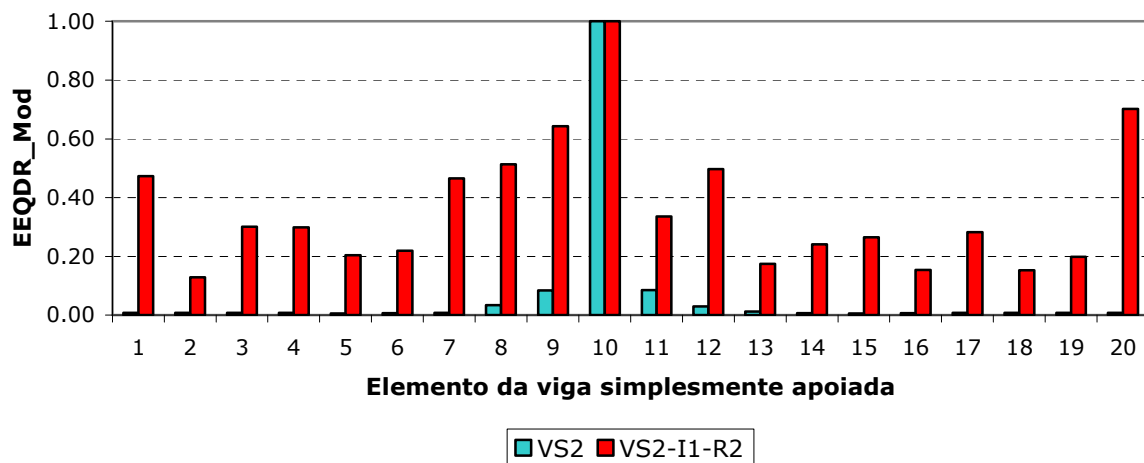
A seguir será apresentado o desempenho da metodologia de localização de elementos prováveis quando as medições apresentam ruído e não são completas. Os valores de ruído correspondem a 1% nas frequências naturais e 3% nas formas modais (Tipo R2) e é considerada uma configuração de medições na qual nem todos os graus de liberdade apresentam medições (Tipo I1). Os resultados são comparados contra a aplicação da metodologia em condições ideais, ou seja, medições completas e sem ruído.

Para o cenário de dano no qual um elemento perto do apoio na viga simplesmente apoiada é danificado, vide Figura 5.13, a metodologia consegue encontrar claramente o elemento danificado, mas também define o elemento que se encontra no apoio como danificado. No caso das medições completas e sem ruído o elemento 2 é definido como o único danificado.



**Figura 5. 13** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário VS1: Dano no elemento 2.

Já para quando o elemento encontra-se no meio do vão, vide Figura 5.14, o algoritmo identifica uma região danificada entre os elementos 7 e 12. Também é observado que os elementos dos apoios aparecem como danificados, mas isto tem sua origem no erro total introduzido no valor do EEQD por causa do ruído e as medições incompletas.

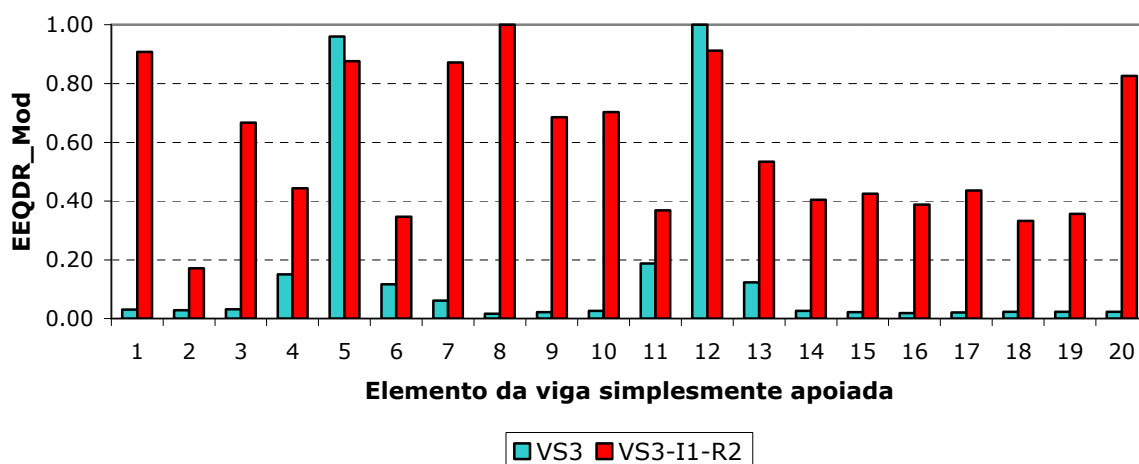


**Figura 5. 14** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário VS2: Dano no elemento 10.

No caso do dano múltiplo na viga simplesmente apoiada, vide Figura 5.15, observa-se uma uniformização dos valores do EEQDR\_Mod para a maioria dos

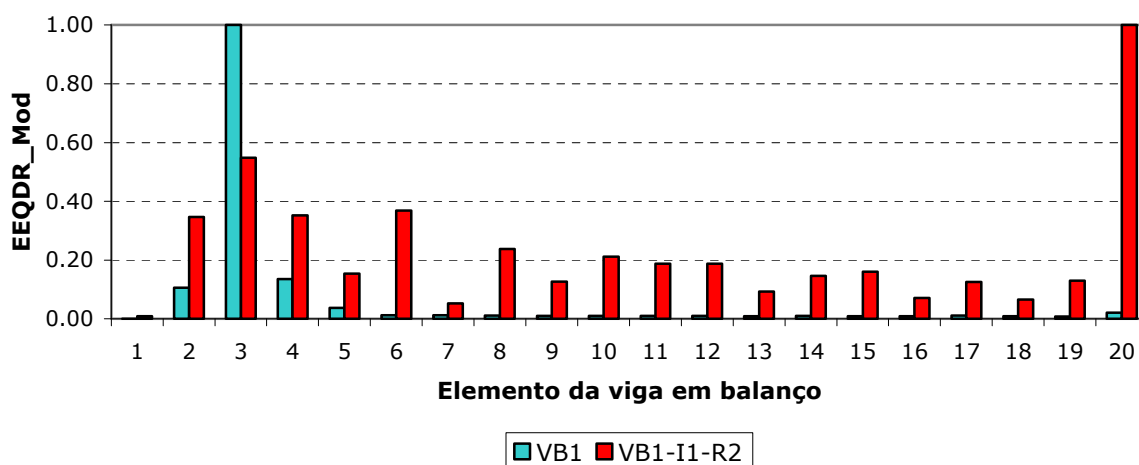


elementos, porém os indivíduos provavelmente danificados são identificáveis, sendo eles os elementos 1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 20.

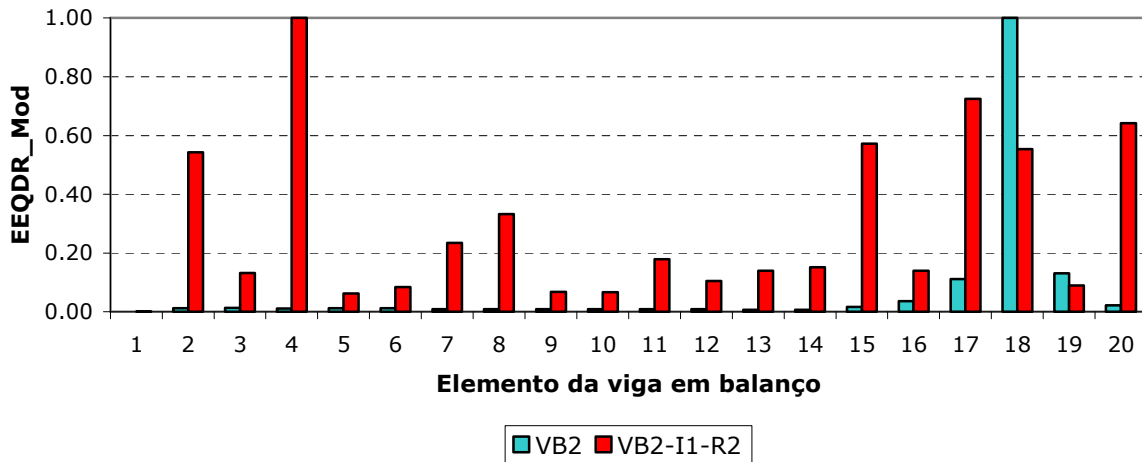


**Figura 5. 15** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário de dano VS3: Dano em elementos 5 e 12.

A configuração do cenário de dano VB1, Figura 5.16, apresenta problemas para sua identificação devido à influência das mudanças no EEQD do elemento da borda, como foi mostrado nas análises anteriores. Porém, o elemento 3 pode ser considerado como danificado. Para as condições sem ruído o algoritmo consegue detectar o elemento 3 como o único elemento danificado.



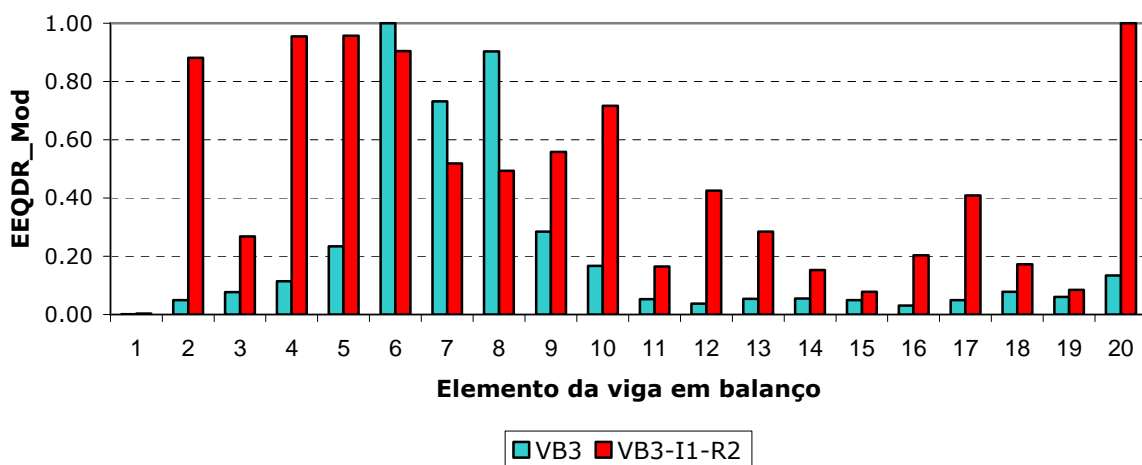
**Figura 5. 16** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário de dano VB1: Dano no elemento 3.



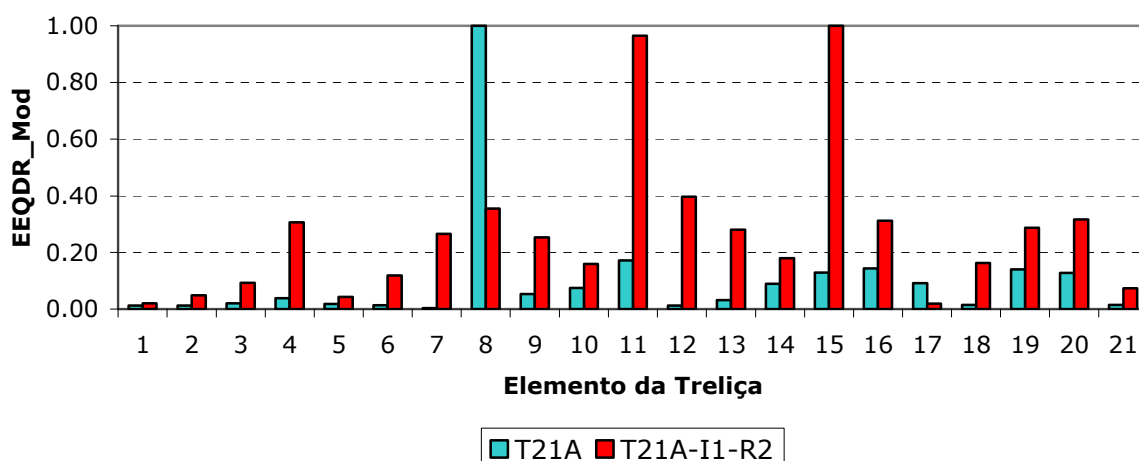
**Figura 5. 17** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário de dano VB2: Dano no elemento 18.

Para a viga em balanço, Figura 5.17, quando o elemento se encontra perto do apoio a metodologia consegue detectar ele como danificado, mas igualmente os elementos 2, 4, 15, 17, 18 e 20. No caso das condições sem ruído o único elemento detectado como danificado é o elemento 18.

Na Figura 5.18 é observado que a presença de ruído e medições incompletas aumenta o número de elementos provavelmente danificados quando comparados aos efeitos por separado, uma grande zona entre os elementos 4-10 podem ser considerados como danificados, assim como os elementos 2 e 20.



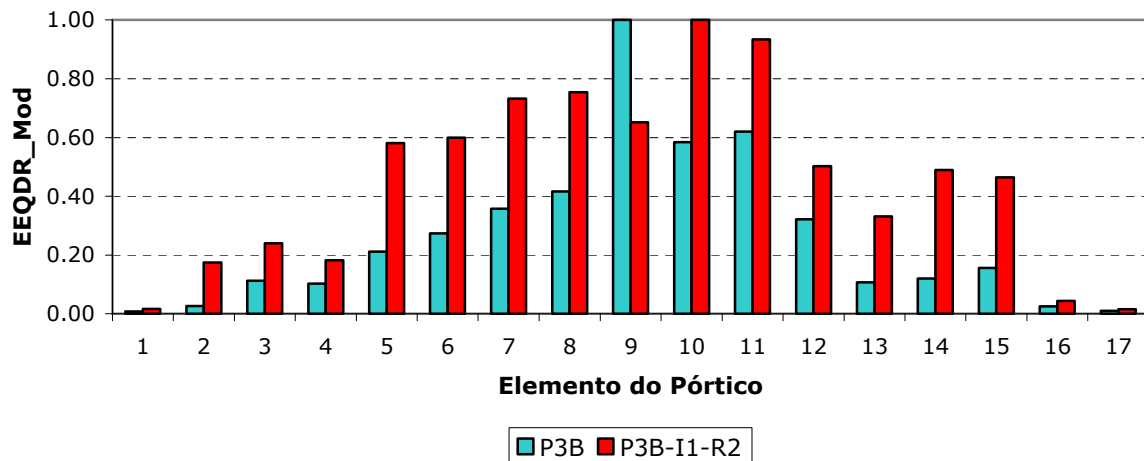
**Figura 5. 18** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário de dano VB3: Dano em elementos 6, 7 8.



**Figura 5. 19** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário de dano T21A : Dano no elemento 8.

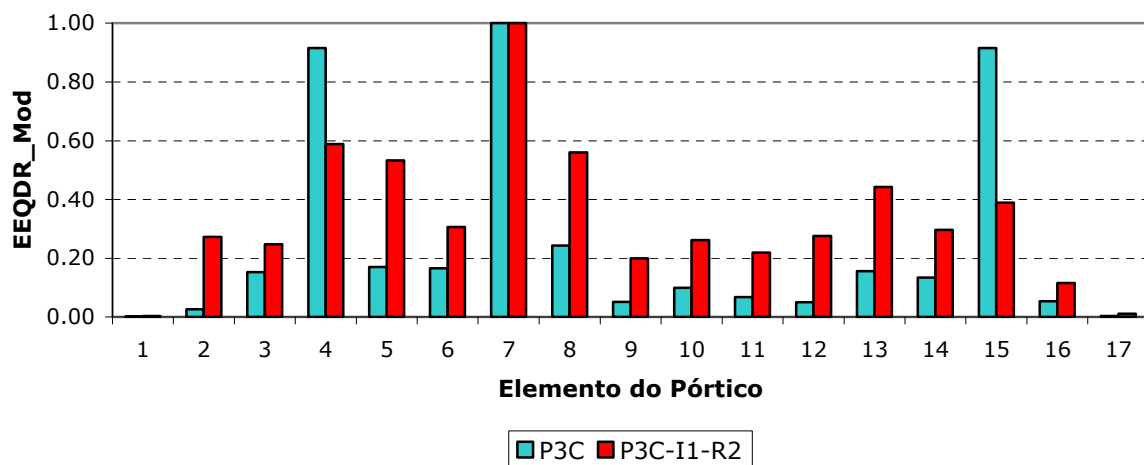
Para a treliça indicada na Fig. 4.4 e com dados arrolados na Tab. 4.3, cujos resultados estão na Figura 5.19, observa-se que a metodologia não consegue encontrar o elemento realmente danificado, isto devido a que este elemento apresenta uma baixa contribuição na energia modal. Resultados similares foram obtidos com outros tipos de treliça, mostrados no apêndice B, razão pela qual esta técnica não será aplicada para detectar elementos provavelmente danificados em estruturas deste tipo.

Para o caso da identificação do dano uniforme no pórtico mostrado na Fig. 4.5 e dados contidos na Tab. 4.4, os resultados estão arrolados na Figura 5.20, é observado que o método define uma zona danificada entre os elementos 5-12 e outra com os elementos 14 e 15. Um exame do resultado mostrado na Figura 5.11, na qual a incompletude dos dados não permitiu encontrar que o elemento 9 não estava danificado, mostra que a combinação dos dois problemas poderia ou não permitir uma correta identificação de cenário de dano procurado.



**Figura 5. 20** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário de dano P3B: Dano em elementos 9, 10 e 11.

Na Figura 5.21 é mostrado que os valores do EEQDR\_Mod dos elementos danificados apresentam uma diminuição quando comparado com os valores para as condições de medições incompletas e sem ruído. Um efeito que pode ser notado é que o número de elementos provavelmente danificados foi menor em comparação ao número obtido para medições incompletas sem ruído.



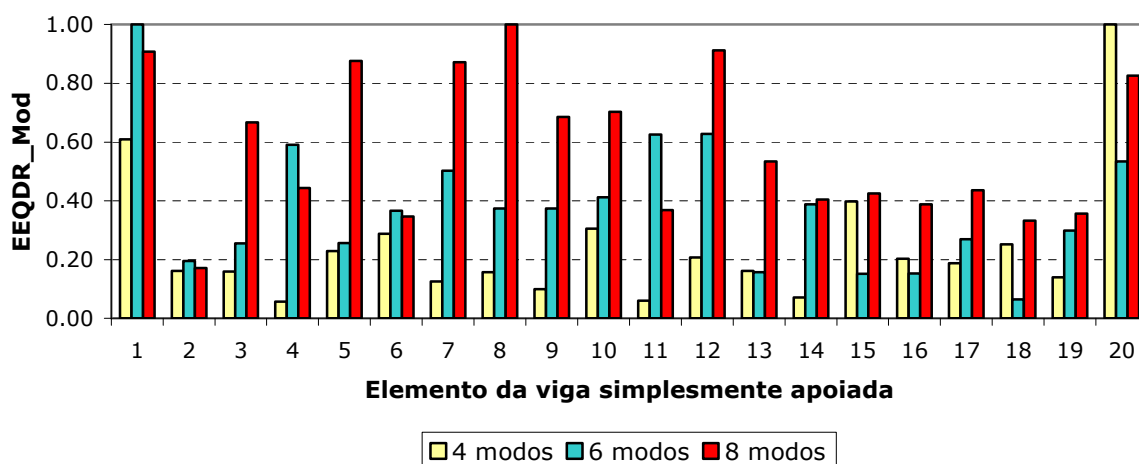
**Figura 5. 21** Valores do EEQDR\_Mod para o cenário de dano P3C: Dano em elementos 4, 7 e 15.

As Figuras 5.13 a 5.21 indicariam que a influencia do efeito conjunto de ruído e medições incompletas consiste em um aumento do número de elementos identificados como provavelmente danificados, quando comparado com as

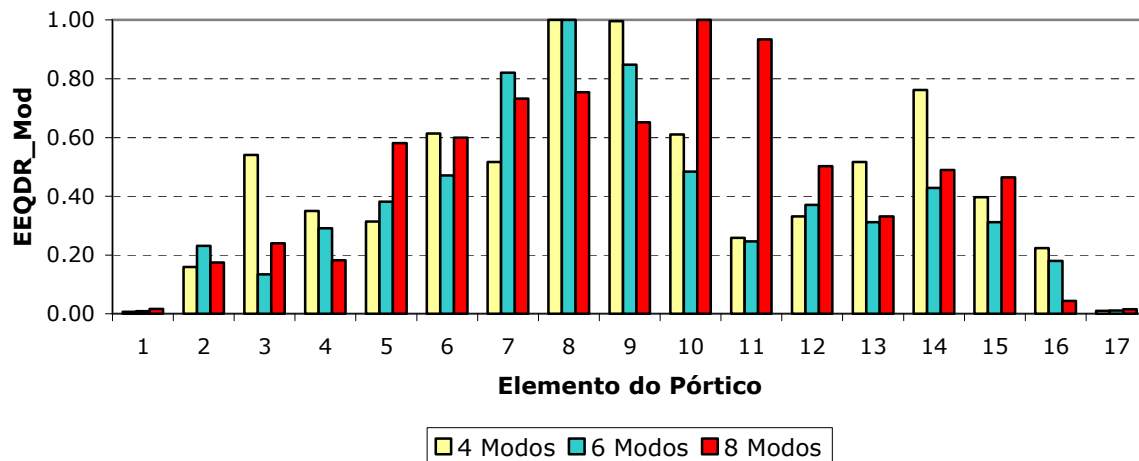
condições experimentais ideais. O grau do efeito parece variar segundo o tipo de estrutura e o tipo de cenário de dano. A detecção de dano uniforme parece ser mais difícil de ser obtida quando comparada aos resultados obtidos para um cenário de dano com múltiplos elementos danificados, mas dispersos na estrutura.

#### 5.1.4 Análise da influência do número de modos utilizados no desempenho da metodologia de localização

A seguir é avaliado o desempenho da metodologia de localização de elementos provavelmente danificados quando é utilizado diferente número de modos. A Figura 5.22 e 5.23 mostram que, para 4 e 6 modos, a metodologia não consegue definir o cenário de dano real, e que só quando utilizados 8 modos os elementos 10 e 11, para o caso do pórtico, e 5, para o caso da viga, são identificados como provavelmente danificados.



**Figura 5. 22** Influência do número de modos no desempenho da metodologia de localização. Cenário dano VS3: Dano em elementos 5 e 12.



**Figura 5. 23** Influência do número de modos no desempenho da metodologia de localização. Cenário dano P3B: Dano em elementos 9, 10, 11.

Cabe salientar que não existe uma regra determinística para a determinação de quantos modos devem ser utilizados para se obter resultados aceitáveis, sendo só limitada pelo número de modos experimentais disponíveis. Assim mesmo, como observado anteriormente, o ruído pode afetar consideravelmente alguns modos, os quais acabaram influenciando na resposta da metodologia e não deveriam ser utilizados, como no caso dos primeiros modos para a viga em balanço.

### 5.1.5 Definição dos elementos provavelmente danificados a serem utilizados na metodologia de detecção de dano de duas etapas

O algoritmo CoBin2 precisa como dado de entrada o fornecimento de elementos provavelmente danificados com o objetivo de reduzir o espaço de busca. Na Tabela 5.3 são mostrados os elementos encontrados como danificados pela metodologia de localização para cada um dos cenários de dano que serão analisados a seguir.

**Tabela 5.3** Elementos definidos como provavelmente danificados.

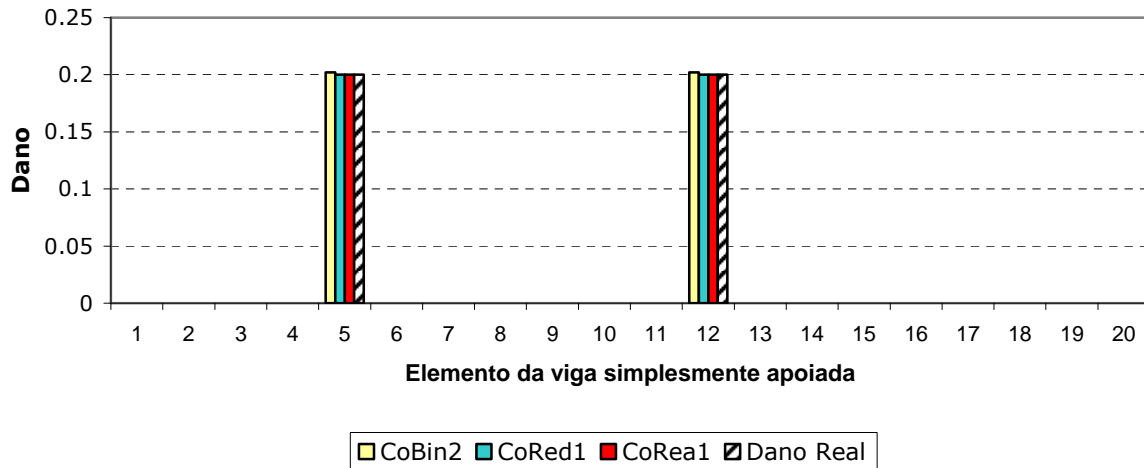
<b>Cenário Dano</b>	<b>Elementos provavelmente danificados.</b>	<b>Total</b>	<b>% do Total de Elem.</b>
VS3	5,12	2	10
VB3	5, 6, 7, 8, 9	5	25
P3B	7, 8, 9, 10, 11, 12	6	35
P3C	4, 7, 15	3	17
VS1-I1-R2	1, 2, 7, 20	4	20
VS2-I1-R2	1, 7, 8, 9, 10,12, 20	6	35
VS3-I1-R2	1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 20	10	50
VB1-I1-R2	2, 3, 4, 6, 20	5	25
VB2-I1-R2	2, 4, 7, 8, 15, 17, 18, 20	8	40
VB3-I1-R2	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 17, 20	11	55
P3A-I1-R2	3, 7, 8, 9, 10	5	29
P3B-I1-R2	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15	10	58
P3C-I1-R2	4, 5, 7, 8, 13, 15	6	35
P3C-IX	4, 7, 13, 15	4	23
P3C-IY	4, 7, 9, 13, 15	5	29
VS3-R1	5, 12	2	10
VS3-R2 e VS3-R3	5,8,9,12,14,20	6	30
VS3-R4	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 18, 20	10	50

## 5.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

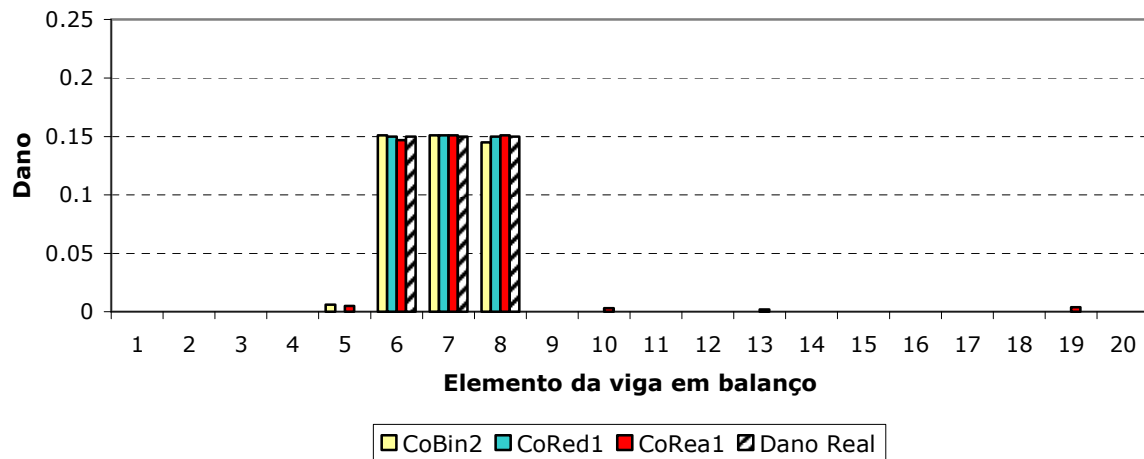
A seguir serão apresentados os resultados da aplicação dos distintos algoritmos genéticos estudados na detecção de dano. Diferentes tipos de análises são realizados, tal como o desempenho dos algoritmos para condições de medições de dados experimentais e reais, uma análise do efeito de ruído, das medições incompletas, do número de modos e do tipo de elemento. Finalmente, uma análise da convergência e tempo gasto na execução dos distintos algoritmos será apresentada.

É importante salientar que o cenário de dano final encontrado pelos diferentes algoritmos para os diversos casos estudados é representado pelo indivíduo com a melhor aptidão ao final de 5 execuções.

### 5.2.1 Desempenho dos AGs perante medições experimentais ideais: completas e sem presença de ruído



**Figura 5. 24** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3.

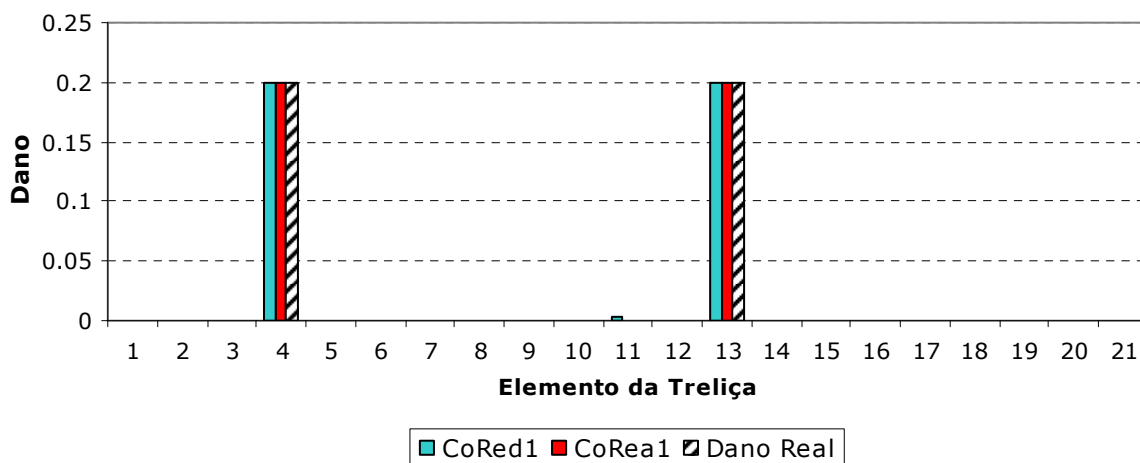


**Figura 5. 25** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB3.

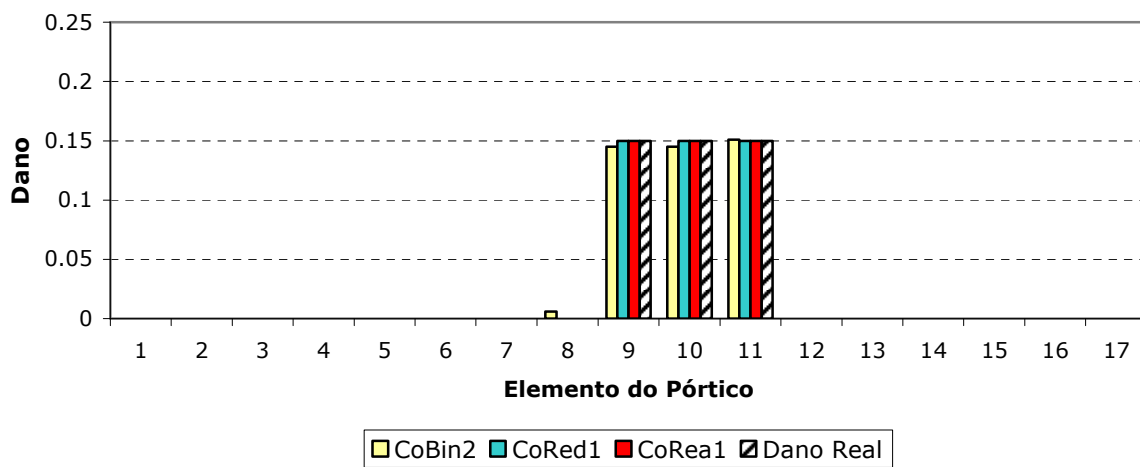
As Figuras 5.24 a 5.28 mostram o desempenho dos algoritmos para quando se tem medições sem ruído e completas. Como conclusão geral encontra-se que os três AGs conseguem encontrar o cenário de dano exato quando as medições não contem ruído e são completas. Diferenças no valor



encontrado pelos AGs para a extensão do dano nos elementos verdadeiramente danificados encontram-se abaixo de 0.008.

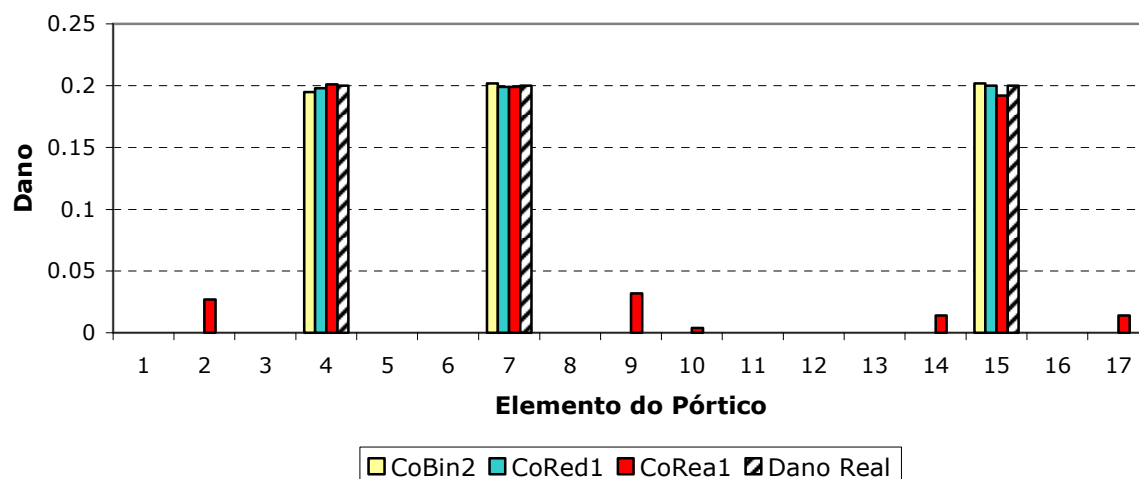


**Figura 5. 26** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21D.



**Figura 5. 27** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3B.

No cenário de dano P3C, vide Figura 5.28 o algoritmo CoRea1 encontra que os elementos 2,9,14 e 17 apresentam dano , porém nenhum deles tem um dano maior a 0.015.



**Figura 5. 28** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C.

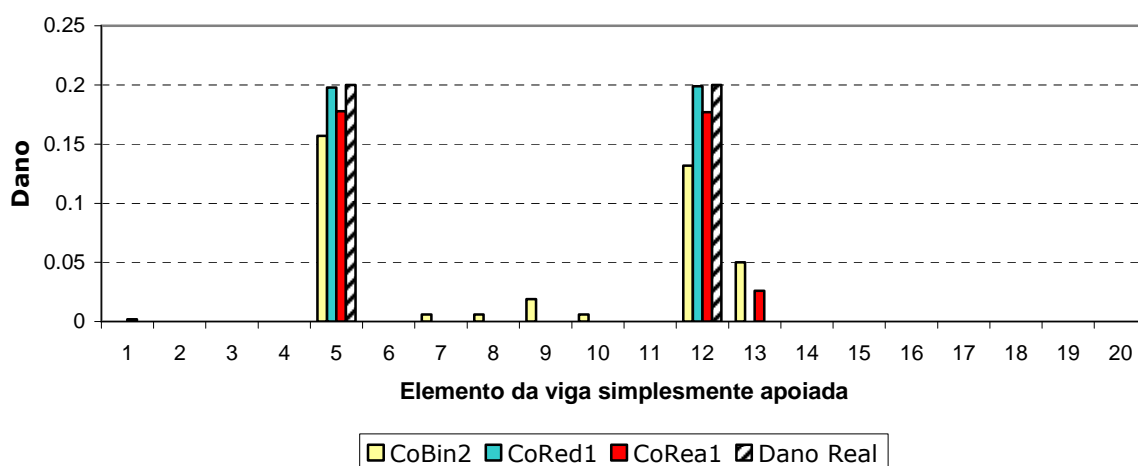
O melhor desempenho observado foi do algoritmo CoRed1 o qual só para o cenário de dano T21D identificou em forma errada um elemento como danificado mas com um valor de dano de 0.003.

### 5.2.2 Desempenho dos AGs perante medições experimentais reais: incompletas e com presença de ruído

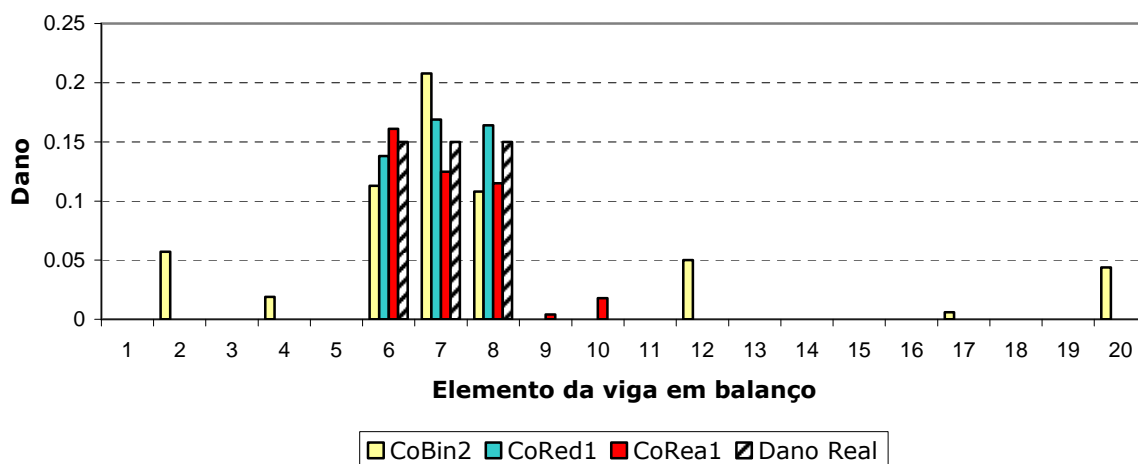
As Figuras 5.29 a 5.33 mostram o desempenho dos algoritmos para quando se tem medições com ruído de 1% nas frequências naturais e 3% nas formas modais e com incompletude de dados do tipo I1. Essas características simulam o encontrado num ensaio experimental real.

Para o cenário de dano múltiplo disperso na viga simplesmente apoiada (vide Figura 5.29) é mostrado que o algoritmo CoRed1 apresenta os melhores resultados, chegando a obter os valores exatos para a extensão do dano. CoRea1 consegue igualmente detectar os dois elementos danificados mas apresenta um erro de 0.02 na determinação da extensão do dano, assim como definir em

forma errada que o elemento 13 encontra-se danificado, porém o valor do dano é muito baixo. O pior desempenho é apresentado pelo CoBin2, que apresenta um erro de 0.07 na extensão do dano do elemento 12, e ainda identifica o elemento 13 como danificado com um valor de dano de 0.05



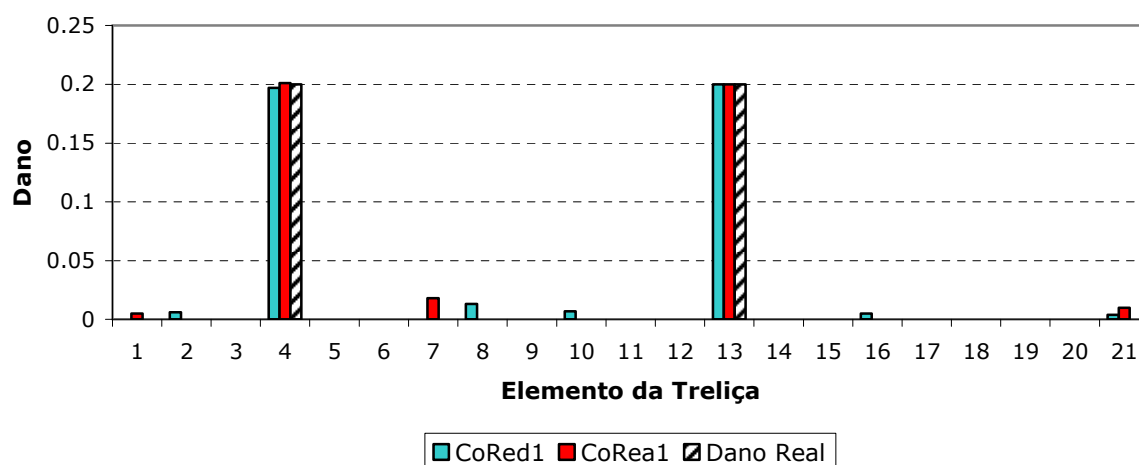
**Figura 5. 29** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3-I1-R2.



**Figura 5. 30** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB3-I1-R2.

Na viga em balanço, vide Figura 5.30, observa-se que os três algoritmos, embora tenham reconhecido os elementos danificados, apresentam um erro apreciável na determinação da extensão do dano sendo os melhores resultados

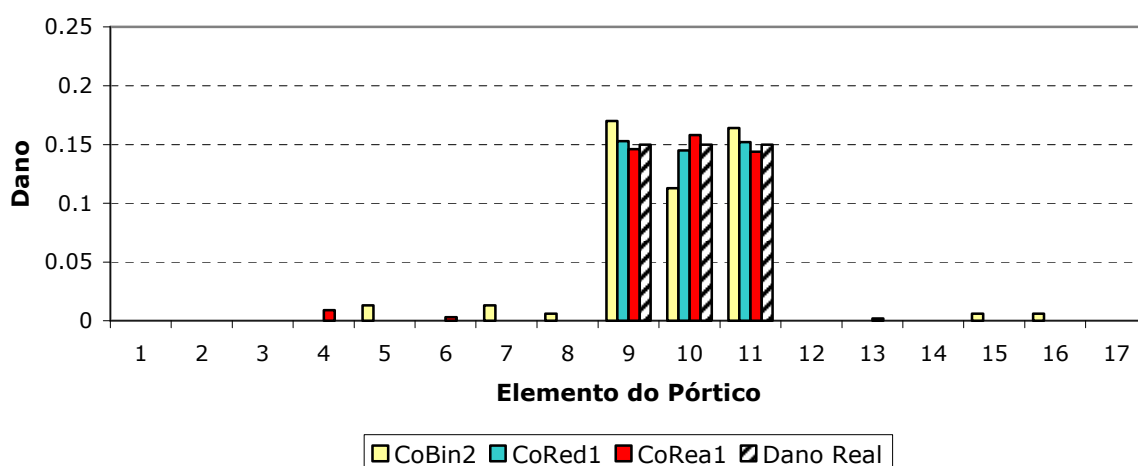
os obtidos com o algoritmo CoRed1, seguido pelo algoritmo CoRea1 e os piores resultados forma obtidos com o CoBin2. Tal algoritmo apresenta erros na determinação do dano da ordem de 0.05 e define como danificados os elementos 2, 12 e 20 com valores de dano próximos a 0.05.



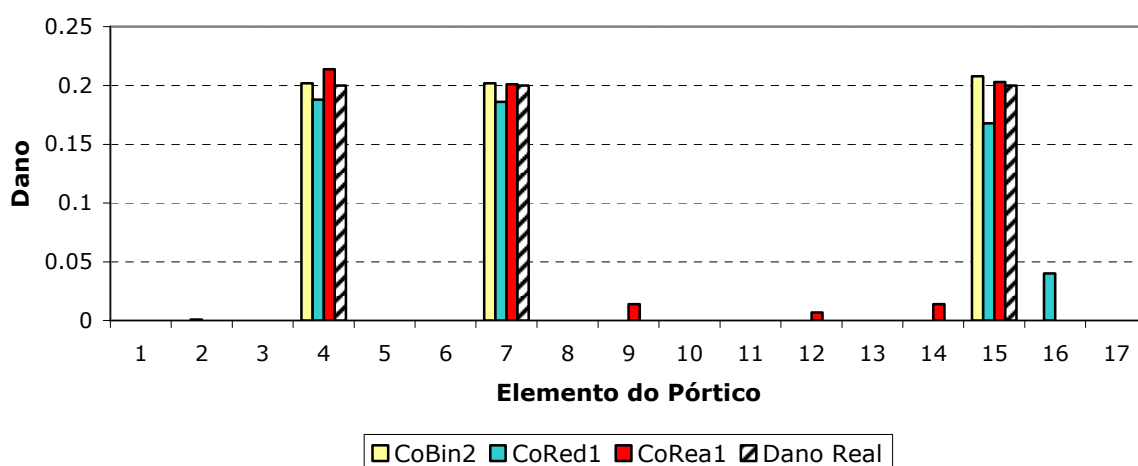
**Figura 5. 31** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21D-I1-R2.

A Figura 5.31 apresenta só os resultados dos algoritmos CoRed1 e CoRea1 os quais mostram que ainda para o caso de medições ruidosas e incompletas estes algoritmos conseguem detectar corretamente o nível de dano com erro menor a 0.03 na determinação da extensão do dano. O algoritmo CoBin2 não foi aplicado devido a que a metodologia de localização de elementos provavelmente danificados não conseguiu identificar alguns cenários de dano no caso da treliça.

A diferença do caso de dano uniforme para a viga, no caso do pórtico, os algoritmos CoRea1 e CoRed1 determinam em forma muito aproximada a extensão dos elementos danificados com erros menores a 0.02, vide Figura 5.32. Porém, o algoritmo CoBin2 apresenta um erro de 0.04 na determinação do valor do dano do elemento 10.



**Figura 5. 32** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3B-I1-R2.



**Figura 5. 33** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C-I1-R2.

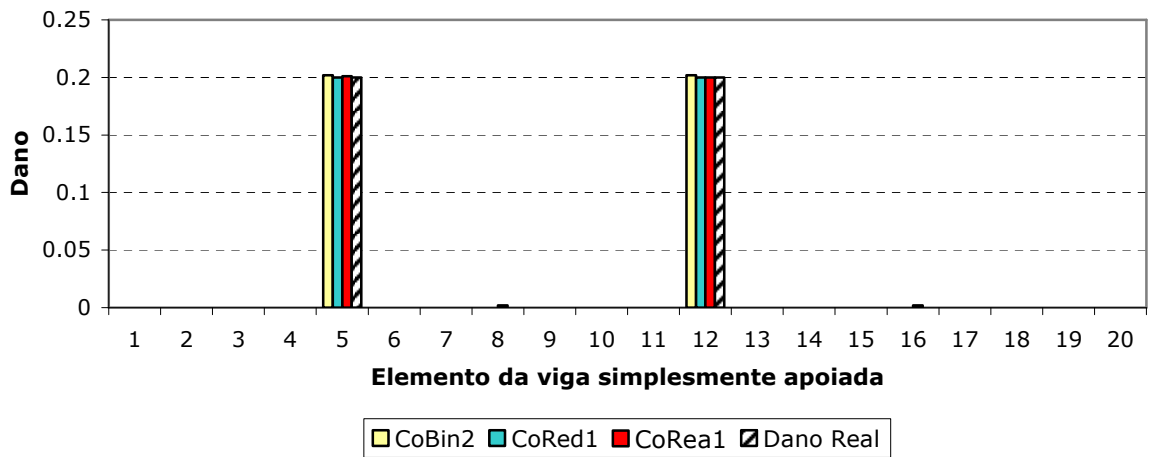
A Figura 5.33 mostra que os três algoritmos encontram o cenário de dano correto. O algoritmo CoBin2 apresenta os melhores resultados na determinação da extensão do dano, isto pode dever-se ao fato de que o número de elementos provavelmente danificados foi altamente reduzido. O algoritmo CoRed1 apresenta um elemento falsamente identificado como danificado com um valor de dano de 0.04.

Os resultados mostrados nas Figuras 5.29 a 5.33 indicam um excelente desempenho dos três AGs implementados quando as medições são incompletas e ruidosas. O algoritmo CoRed 1 mostrou o melhor comportamento para quase todos os exemplos mostrados no tocante à determinação da extensão do dano naqueles elementos que se encontram danificados. O algoritmo CoRea1 em geral tende a apresentar elementos falsamente identificados como danificados, porém com extensão de dano muito pequenas. O algoritmo CoBin2 apresenta em geral os piores resultados, mostrando em alguns casos diferenças significativas nos valores da extensão do dano dos elementos verdadeiramente danificados.

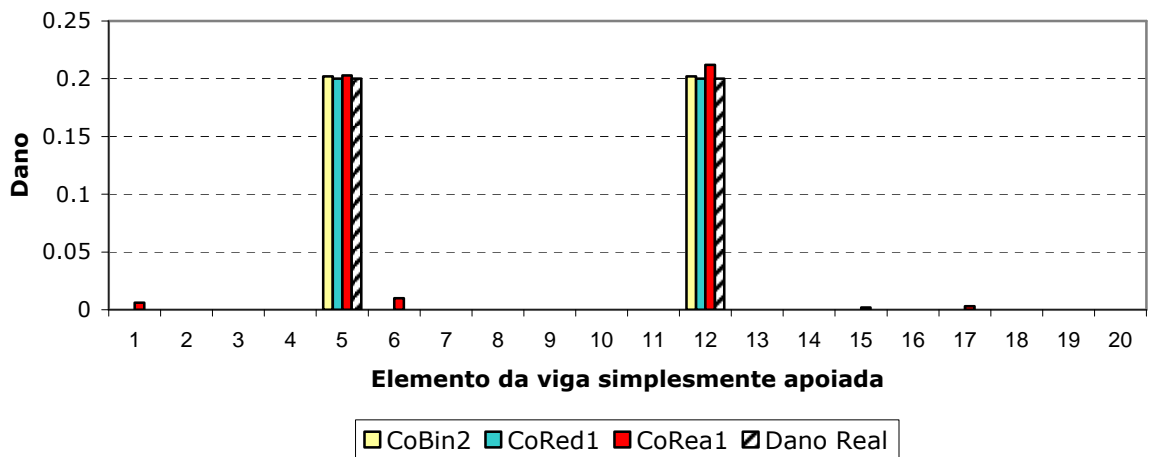
### **5.2.3 Análise do efeito de ruído nas medições no desempenho dos Algoritmos Genéticos**

A seguir é apresentada a análise do efeito que tem sobre o desempenho das metodologias o nível de ruído introduzido nos dados. Para isso, são comparados diferentes cenários de dano e a resposta dos algoritmos estudados quando as medições que se utilizam para realizar o processo de otimização são contaminadas por vários níveis de ruído.

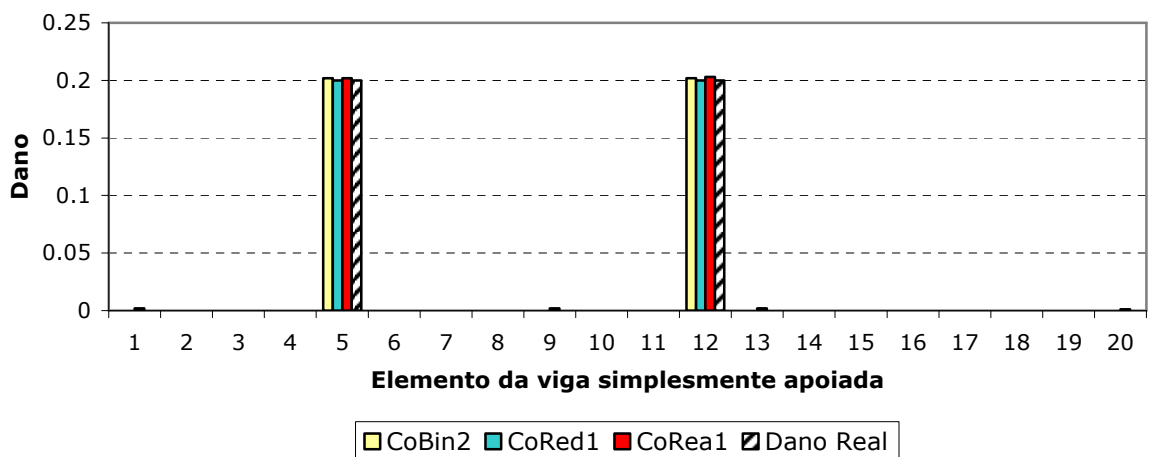
A partir das Figuras 5.34 a 5.38 observou-se que os algoritmos estudados apresentam alta tolerância ao ruído, e que só para valores de ruído tão altos como 2% em frequências e 10% em modos o algoritmo CoRea1 apresenta elementos erroneamente determinados como danificados. O algoritmo CoBin2 não foi aplicado para as condições de ruído em formas modais maiores a 5% devido ao fato de que a metodologia de localização não consegue dar uma boa estimativa dos elementos provavelmente danificados a esses níveis de ruído.



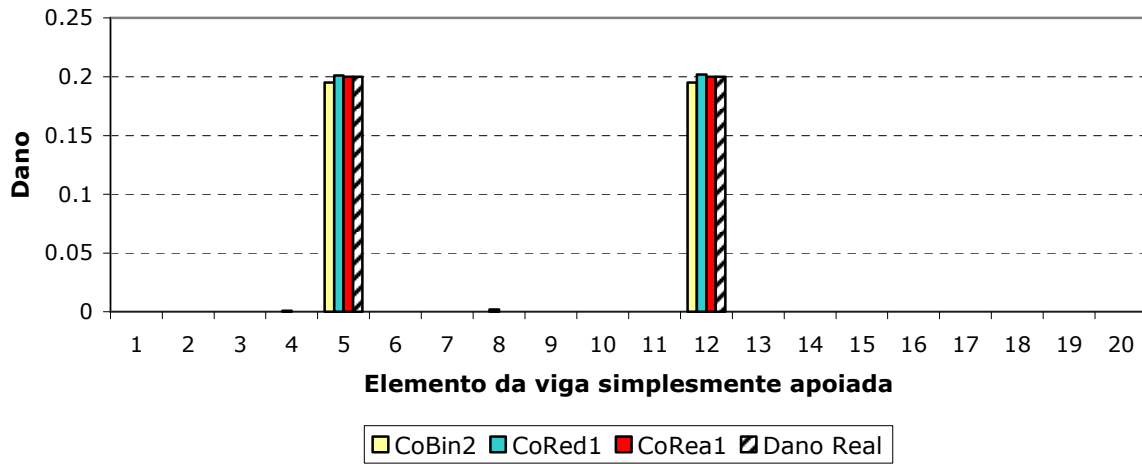
**Figura 5. 34** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído 1% em modos.



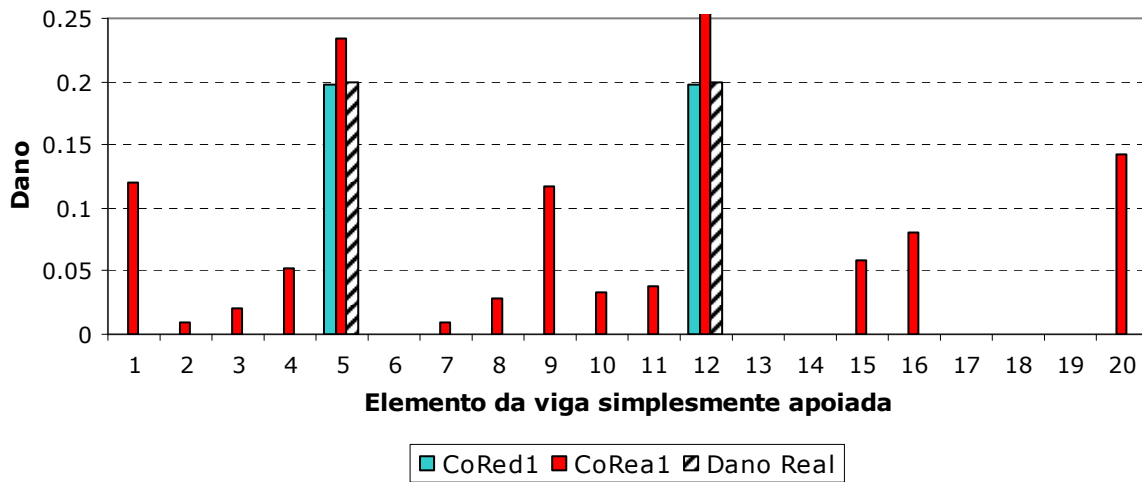
**Figura 5. 35** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 1% em frequências e 3% modos.



**Figura 5. 36** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 2% em frequências e 3% modos.



**Figura 5. 37** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 2% em frequências e 5% em modos.



**Figura 5. 38** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS3. Ruído: 2% em frequências e 10% em modos.

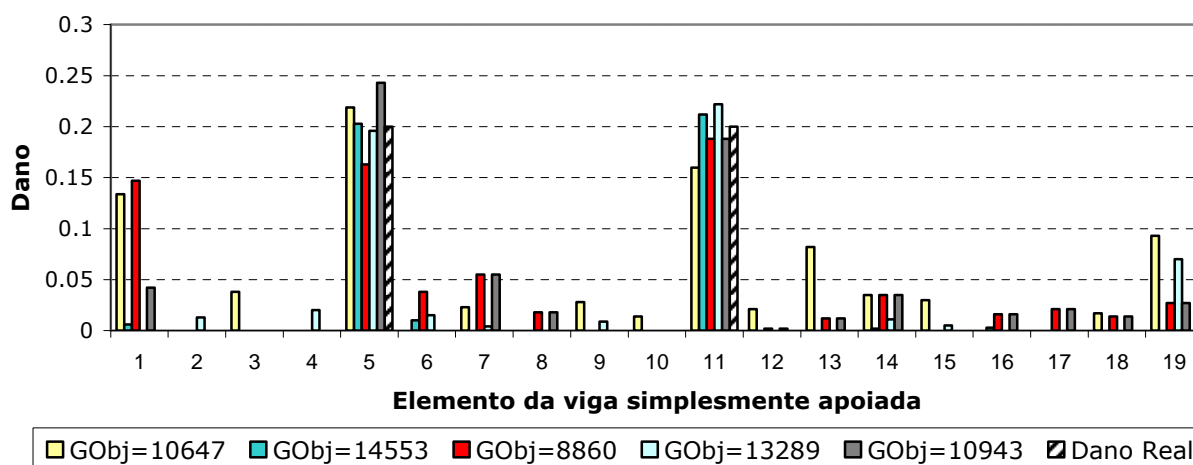
**Tabela 5.4** Efeito da presença de ruído sobre a aptidão do melhor indivíduo.

Combinação Ruído	Aptidão Melhor indivíduo
Sem ruído	19972
R1	18532
R2	15586
R3	14888
R4	13549
R5	10830



O maior efeito do ruído no desempenho dos algoritmos é observado sobre o valor da aptidão do melhor indivíduo, o qual diminui na medida em que o ruído aumenta, como mostrado na Tabela 5.4 para o Algoritmo CoRed1.

Tendo-se em vista que a maior aptidão que um indivíduo poderia assumir é igual a 20000, portanto se observa que nas condições sem ruído o Algoritmo CoRed1 chegou a uma excelente resposta. O cenário encontrado é um que faz com que os valores das freqüências naturais e das formas modais, calculados a partir do modelo de elementos finitos empregado pelo AG, sejam iguais a aqueles obtidos experimentalmente. No caso da configuração de ruído R5 observa-se que o valor da aptidão do melhor indivíduo é reduzido à metade do valor máximo possível, o qual faz sentido, pois não existem parâmetros físicos do sistema que consigam gerar os parâmetros dinâmicos obtidos experimentalmente.



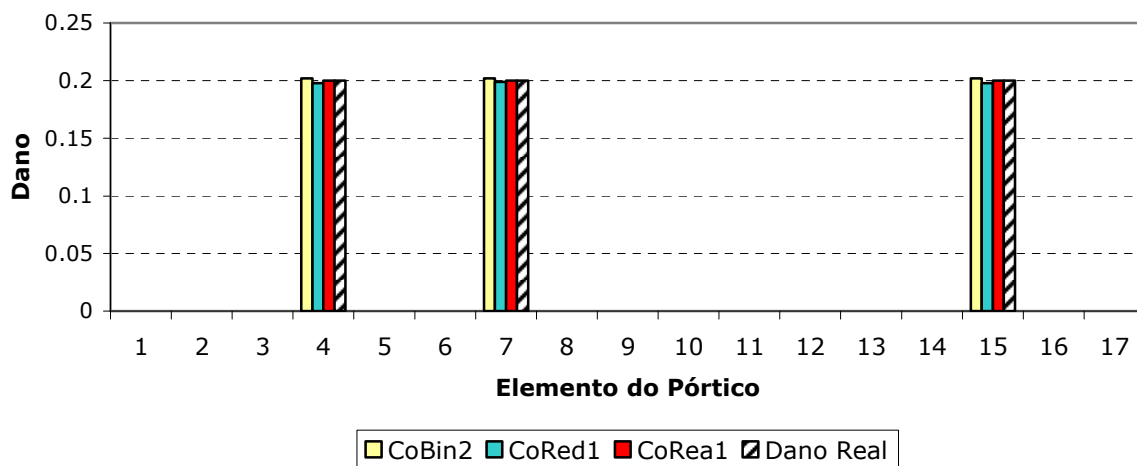
**Figura 5. 39** Solução do AG para o cenário de dano VS3-I1-R2 depois de varias execuções do AG de código real.

O problema de dano com medições ruidosas converte-se num problema multimodal, no qual muitas configurações poderiam ter valores similares da aptidão e corresponder a cenários de dano diferentes. Portanto a função objetivo

utilizada deve garantir que se tenha uma boa diferença entre uma solução boa e uma não tão boa. Assim mesmo, um número adequado de rodadas do algoritmo deve ser empregado com a finalidade de garantir que a solução dada pelo AG é a correta. Na Figura 5.39 observa-se que apesar das soluções encontradas apresentarem valores de aptidão diferentes o cenários de dano que elas conseguem é similar, o que dá confiança na resposta do método.

Finalmente, a principal observação é que apesar da presença de ruído e de não se ter atingido a aptidão máxima, o melhor indivíduo ainda corresponde a uma solução aproximada do problema.

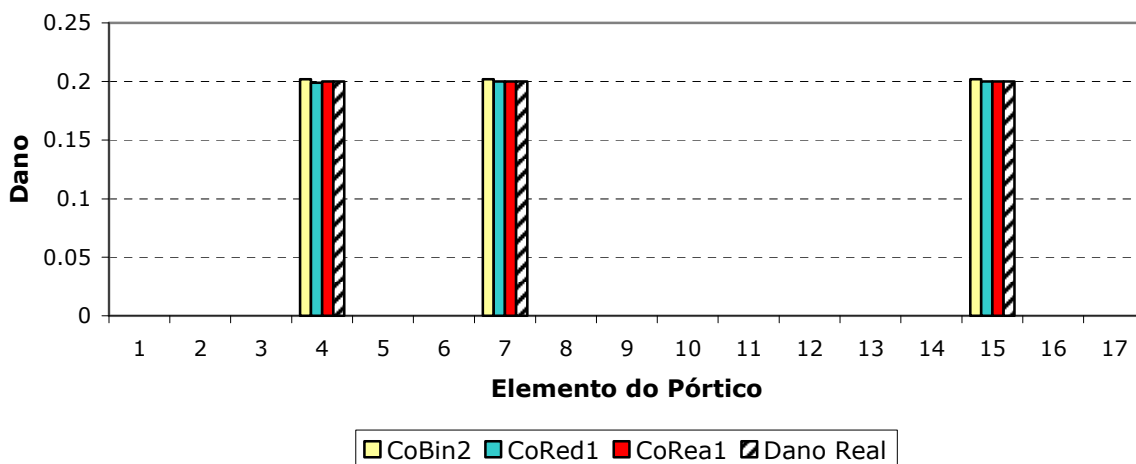
#### 5.2.4 Análise do efeito das medições incompletas no desempenho dos Algoritmos Genéticos



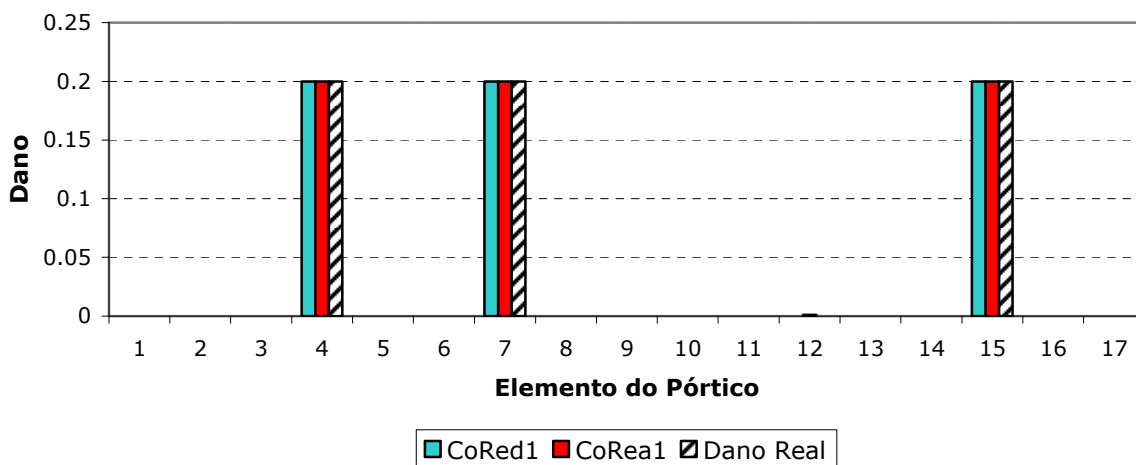
**Figura 5. 40** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C-IX.

As Figuras 5.40 a 5.43 indicam um alto desempenho dos AG estudados para encontrar o cenário de dano, quando não se conta com medições em todos os graus de liberdade do modelo de elementos finitos. A explicação pode estar no

fato de a função objetivo só precisar de medições lidas. Porém, uma diminuição nos graus de liberdade medidos poderia levar a um mau desempenho dos AGs.

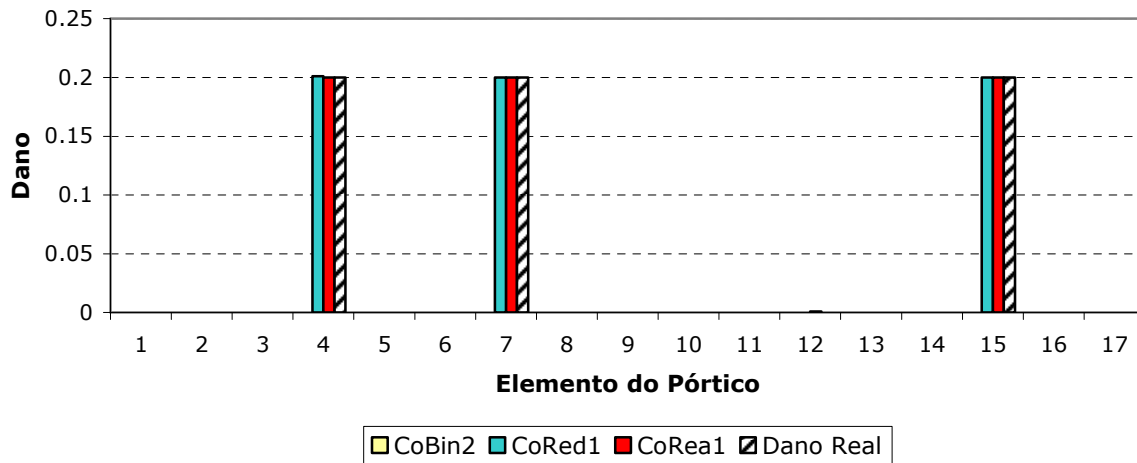


**Figura 5. 41** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3C-IY.



**Figura 5. 42** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano PC3-I1.

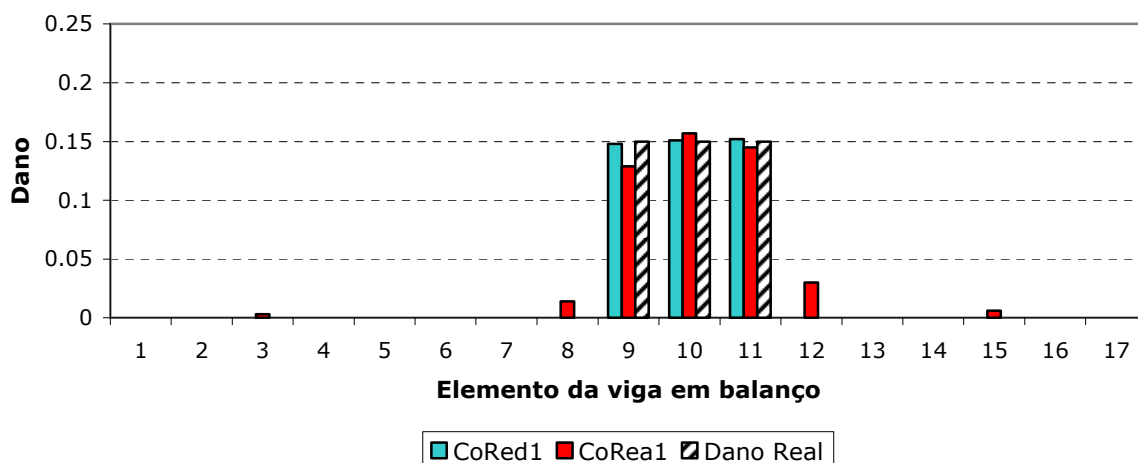
Quando estudados os casos P3C-I1 e P3C-I2 não foi possível utilizar o algoritmo CoBin2 devido ao fato de que a metodologia de localização não encontrou, entre os elementos provavelmente danificados, aqueles que pertenciam ao cenário de dano procurado.



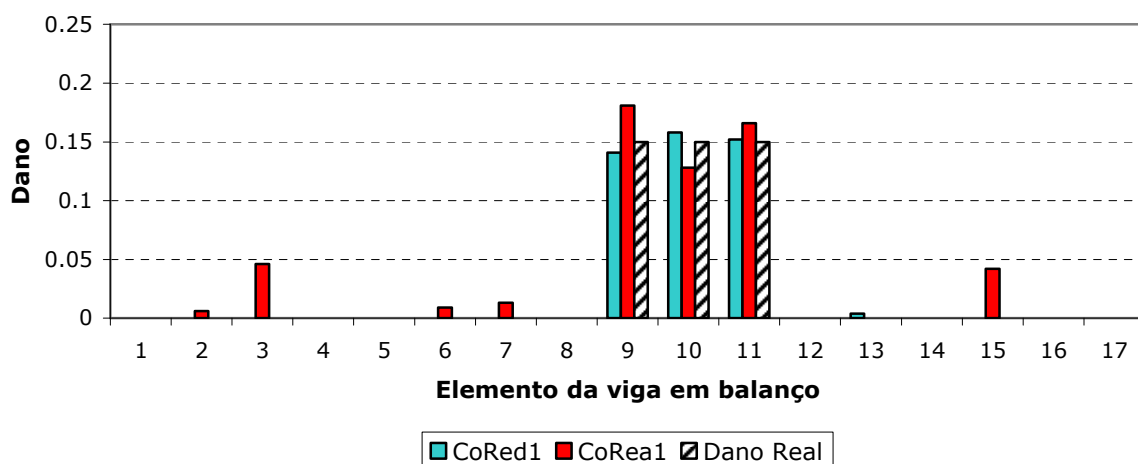
**Figura 5. 43** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano PC3-I2.

### 5.2.5 Análise da influência do número de modos no desempenho dos Algoritmos Genéticos

Nas Figuras 5.44 e 5.45 observa-se que o número de modos utilizados influi nos resultados do AG principalmente para o CoRea1. A localização dos elementos é realizada corretamente, mas a extensão do dano não é tão exata, mostrando melhores resultados quando utilizados 4 modos. Isso indica que não necessariamente um aumento no número de modos utilizados implica em um aumento da qualidade da resposta. Para o caso de se dispor de 8 modos, vide Figura 5.28, os AGs possuem a informação suficiente e dão como resultado uma resposta aproximada do problema. O algoritmo Cobin2 não foi aplicado devido a que a metodologia não conseguiu encontrar entre os elementos provavelmente danificados os que conformam o cenário de dano real, vide Figura 5.44.



**Figura 5. 44** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB3-IR2 utilizando 4 modos.



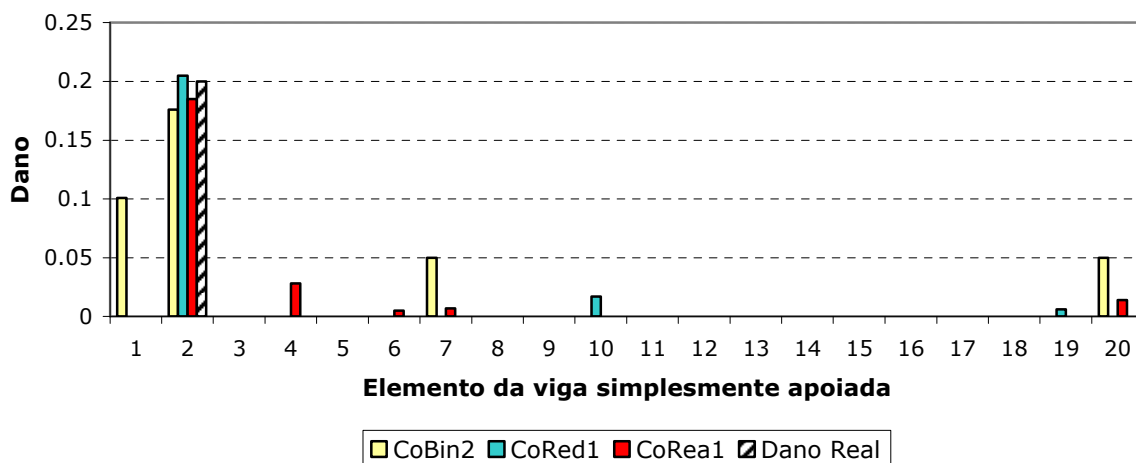
**Figura 5. 45** Aplicação dos AG estudados no cenário de dano VB3-I1-R2 utilizando 6 modos.

Como comentado para a metodologia de localização a quantidade de informação fornecida ao AG pode ser um fator decisivo para seu bom desempenho, e não se tem uma regra definida sobre quantos modos devem ser utilizados. Cabe salientar que essa quantidade encontra-se limitada pelo número de modos que podem ser medidos experimentalmente.

### 5.2.6 Análise da influência do tipo de elemento danificado no desempenho dos Algoritmos Genéticos

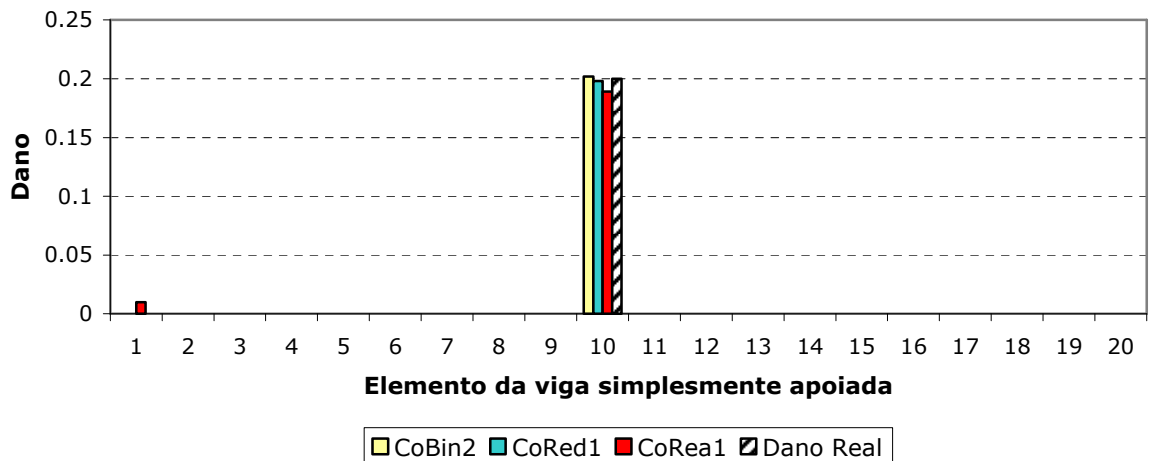
A seguir é estudada a influência no desempenho dos AGs do tipo de elemento. Para o caso da viga simplesmente apoiada, são danificados elementos que se encontram perto do apoio e na metade do vão, para a viga em balanço um elemento perto do engaste e outro perto da borda. No caso da treliça são estudados um elemento horizontal, um vertical e um diagonal.

A Figura 5.46 mostra que, para um elemento de uma viga simplesmente apoiada que se encontra perto de um dos apoios, os AGs identificam corretamente este elemento. A quantificação do dano apresenta erros menores a 0.03 e o algoritmo CoBin2 identificou erroneamente os elementos 1, 7 e 20 como danificados.



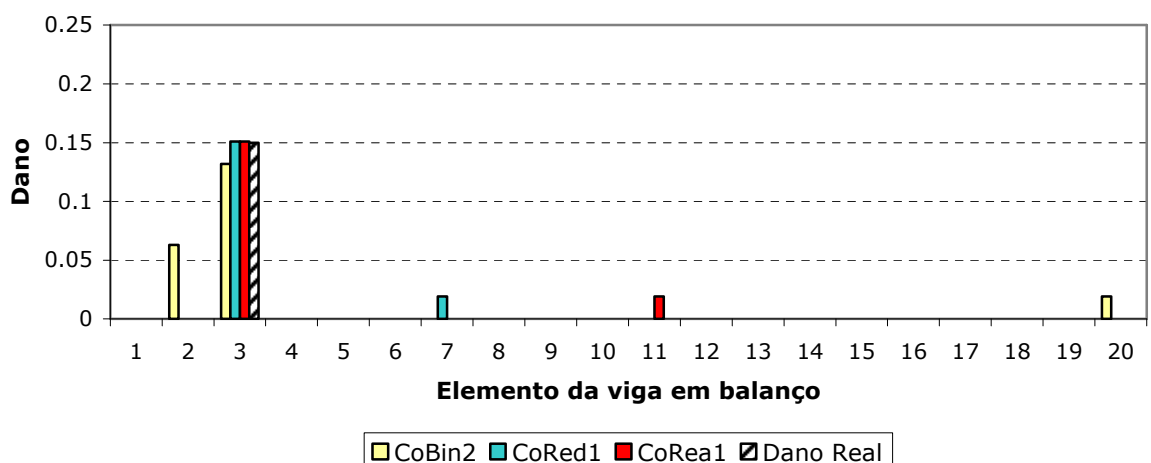
**Figura 5. 46** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS1-I1-R2.

No caso do elemento danificado no centro da viga simplesmente apoiada, os diferentes AGs encontram o cenário de dano certo, vide Figura 5.47. Erros na extensão do dano são menores que 0.01.



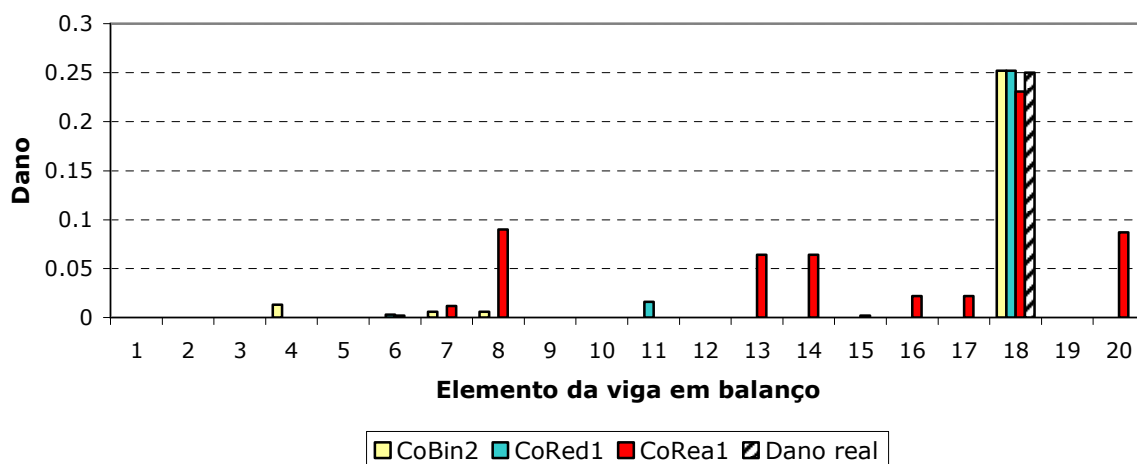
**Figura 5. 47** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VS2-I1-R2.

Na Figura 5.48 são mostrados os resultados da aplicação dos algoritmos estudados. O cenário de dano procurado é encontrado exatamente pelos algoritmos CoRea1 e CoRed1. O algoritmo CoBin2 apresenta uma pequena diferença no valor da extensão do dano do elemento 2, mas pode ser devido a que erroneamente considerou-se como danificado o elemento 1 com uma extensão de dano de 0.05.



**Figura 5. 48** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB1-I1-R2.

Na Figura 5.49 são apresentados os resultados relacionados a um elemento da viga em balanço que se encontra perto da borda. Resultados mostram que devido a presença de ruído e de medições incompletas o algoritmo CoRea1 apresenta como danificados os elementos 8, 13, 14 e 20 com valores de dano de 0.09, 0.06, 0.06 e 0.09 , respectivamente. Os algoritmos CoBin2 e CoRed1 detectam com alta exatidão o elemento 18 como danificado. Resultados anteriores indicam que quando o elemento se encontra perto da borda os algoritmo propostos poderiam não encontrar o cenário de dano exato, mas um cenário aproximado.

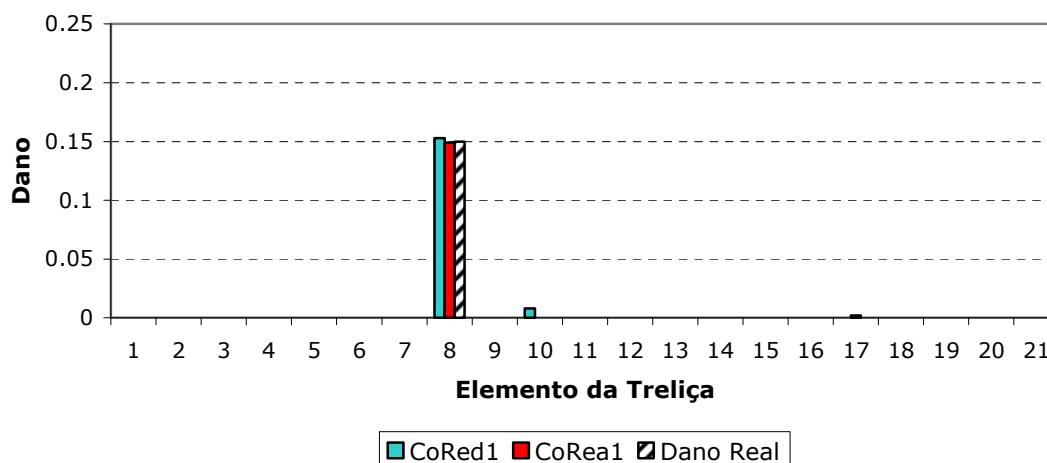


**Figura 5. 49** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano VB2-I1-R2.

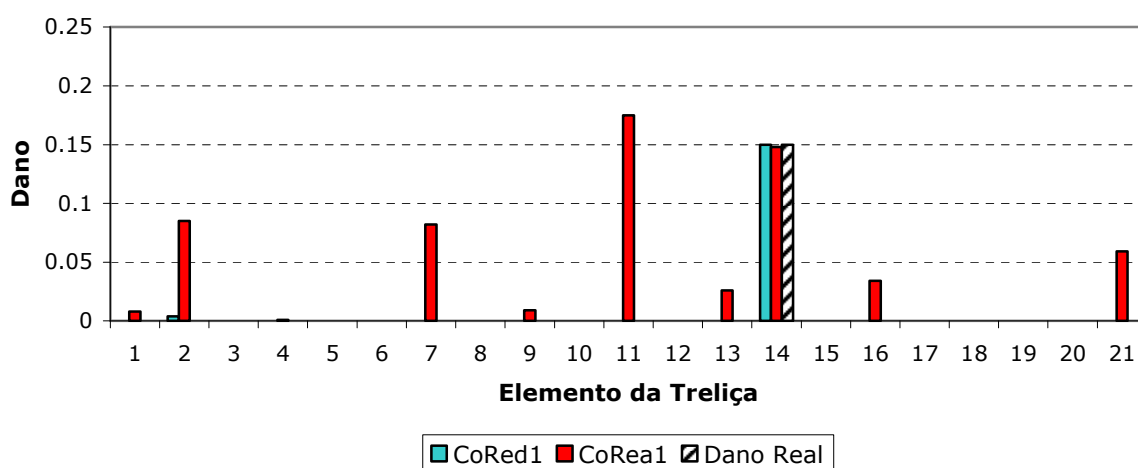
Para o caso de dano num elemento vertical da treliça estudada observa-se que tanto o algoritmo CoRed1 como o Corea1 conseguem detectar com um erro mínimo a presença de dano no elemento 8, Figura 5.50.

Na Figura 5.51 são apresentados os resultados da metodologia para a localização de dano num elemento diagonal. Foi observado que o algoritmo CoRea1, embora consiga detectar corretamente o elemento danificado, apresenta outros elementos com altos valores de dano. Já o algoritmo CoRed1 apresenta melhores resultados identificando só o elemento 2 com dano de 0.004.



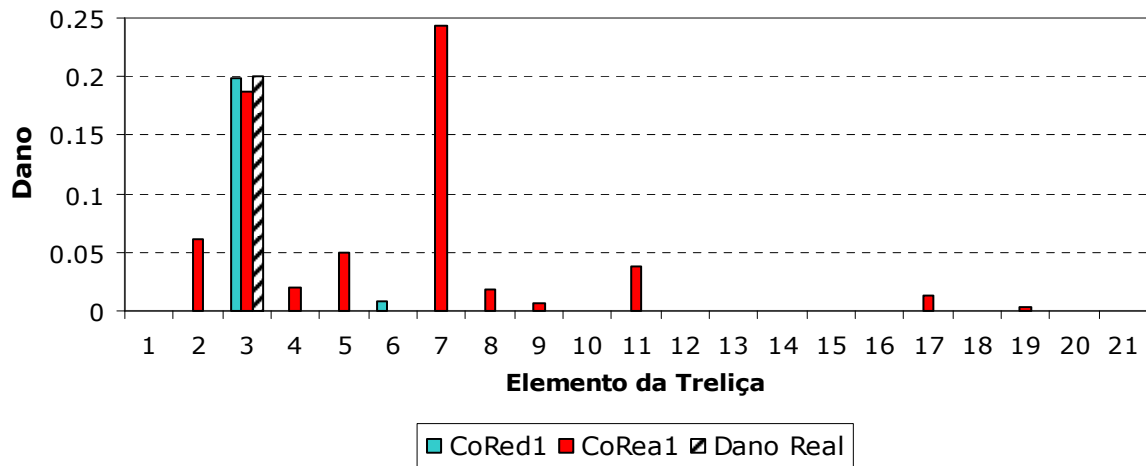


**Figura 5. 50** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21A-I1-R2.



**Figura 5. 51** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21B-I1-R2.

Igualmente ao caso do elemento diagonal, no elemento horizontal é encontrado que os algoritmos CoRed1 e CoRea1 conseguem detectar corretamente o elemento danificado, vide Figura 5.52. Porém alguns elementos falsamente identificados como danificados encontram-se na resposta do algoritmo. Para o CoRed1 é encontrado que o elemento 6 encontra-se danificado com um valor de 0.01 e para o CoRea1 o elemento 7 com um valor de dano de 0.19. Esses resultados indicam que o dano em elementos horizontais poderia ser de difícil solução para o algoritmo CoRea1.

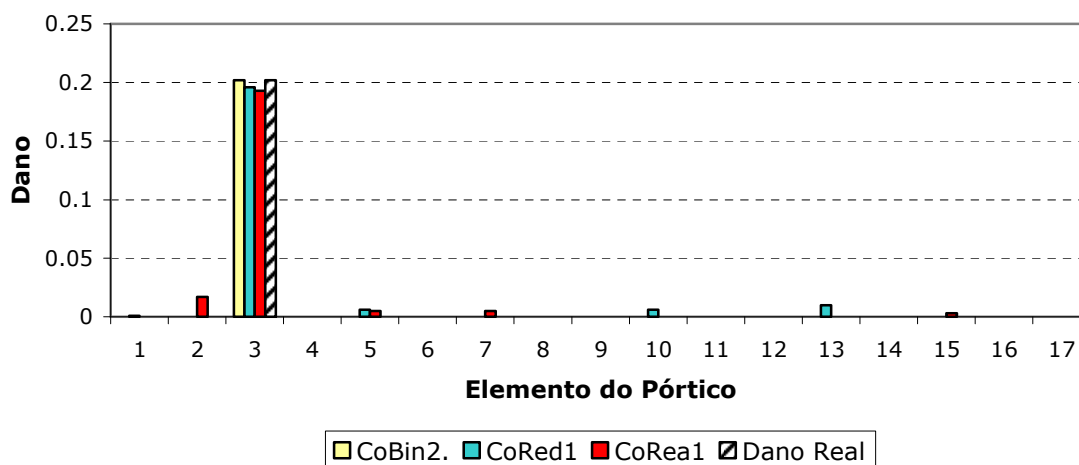


**Figura 5. 52** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano T21C-I1-R2.

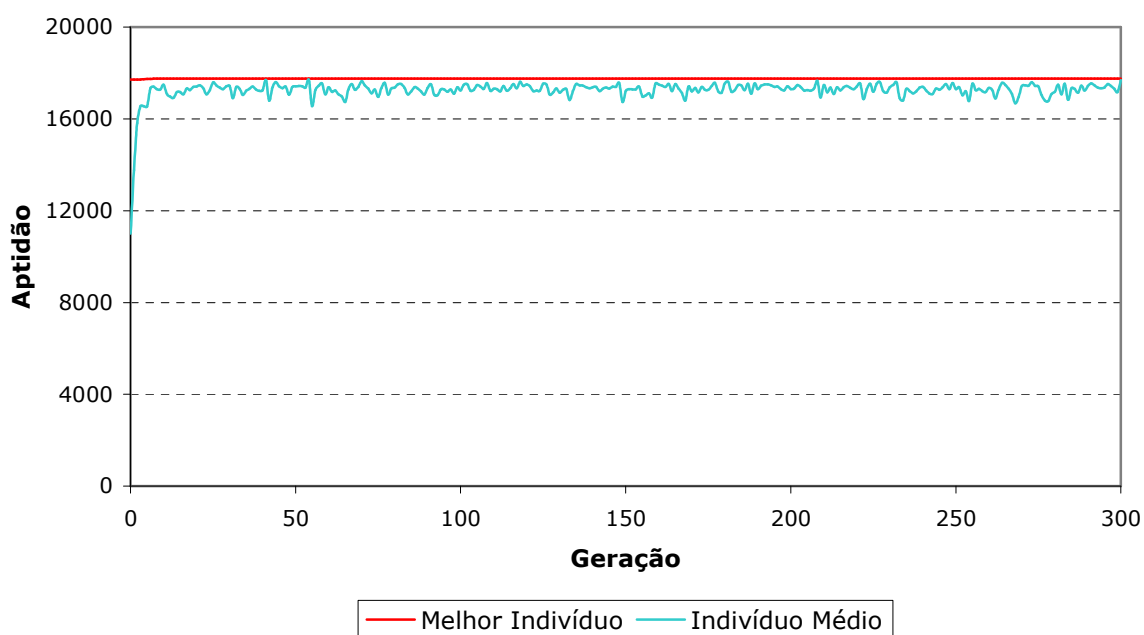
Os resultados observados indicam que o algoritmo CoRed1 conseguiria detectar dano com alta exatidão independente do localização ou tipo de elemento. Os algoritmos CoRea1 e CoBin2 encontram também os elementos verdadeiramente danificados para todos os cenários, mas identificam alguns outros elementos de forma errada como danificados. Cabe salientar que o desempenho do algoritmo CoBin2 depende também se o tipo de elemento é de difícil detecção para a metodologia de localização.

### 5.2.7 Análise da convergência dos algoritmos genéticos

Para analisar a convergência dos distintos AGs estudados, utiliza-se o caso P3A-I1-R2 e cujos resultados são apresentados na Figura 5.53. Para esse cenário de dano é observado que os três tipos de AGs conseguem detectar o elemento danificado com uma boa exatidão no valor da extensão do dano.



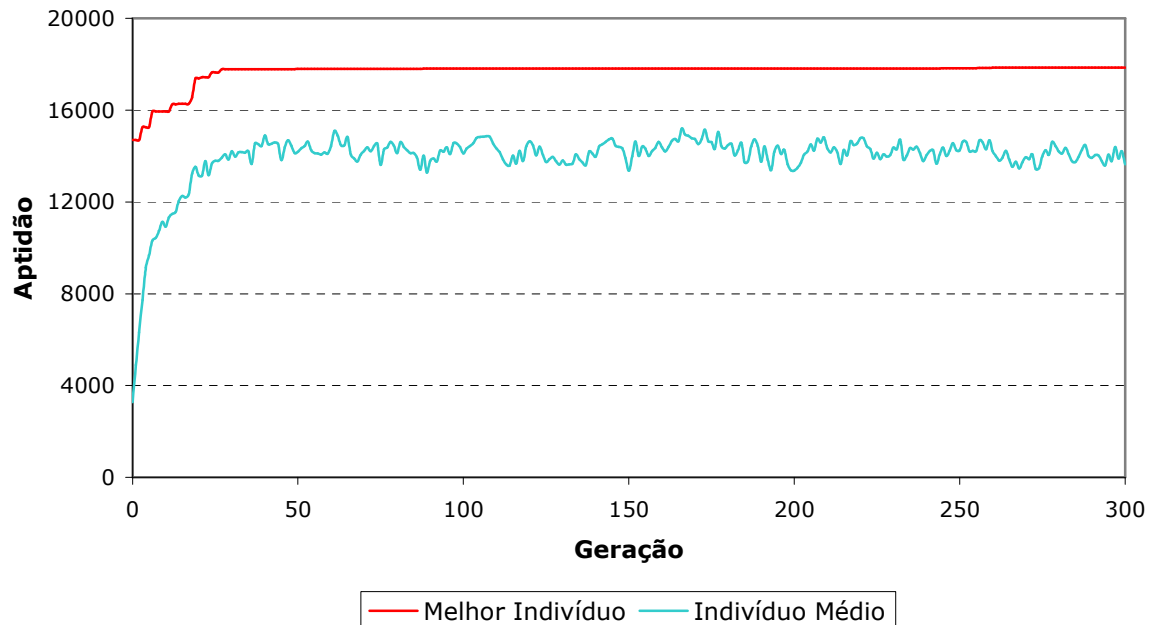
**Figura 5. 53** Aplicação dos AGs estudados no cenário de dano P3A-I1-R2.



**Figura 5. 54** Evolução da aptidão do melhor indivíduo no algoritmo CoBin2.

Figura 5.54 mostra a convergência do algoritmo CoBin2. Nesse caso vemos como depois da redução do espaço de busca o melhor indivíduo é encontrado na primeira geração com uma aptidão de 17755. Essa característica pode não ser muito benéfica já que o algoritmo poderia convergir para uma

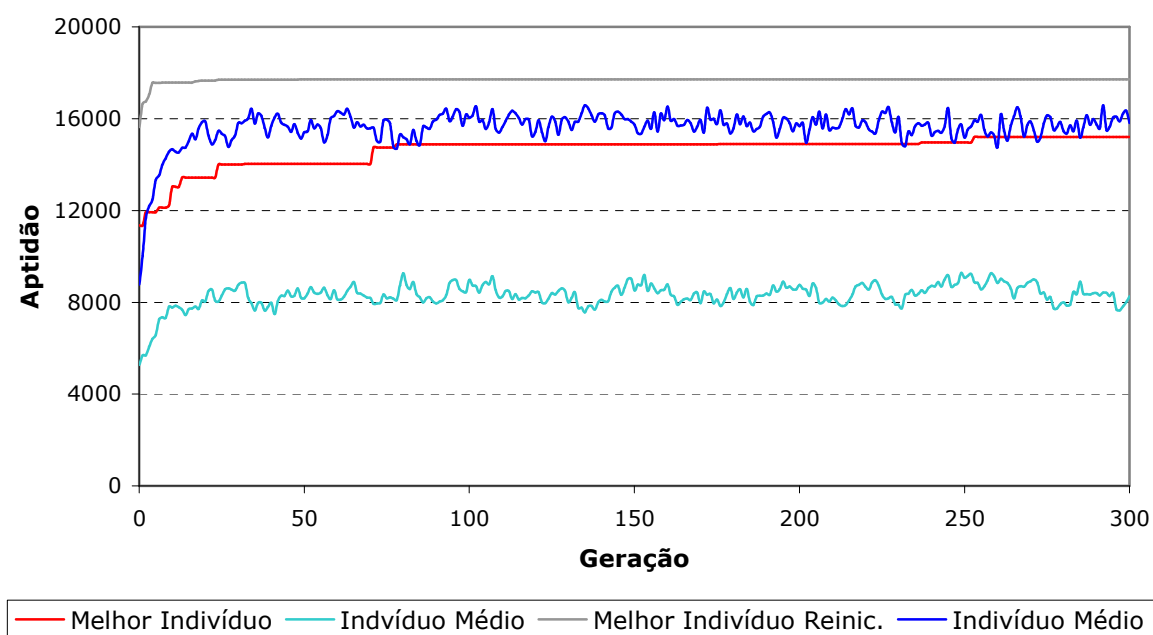
solução sub-ótima. Numas poucas gerações a população converge para o indivíduo que representa a aptidão máxima.



**Figura 5. 55** Evolução da aptidão do melhor indivíduo no algoritmo CoRed1.

Na Figura 5.55 é apresentada a evolução do melhor indivíduo em uma execução do algoritmo CoRed1. Pode ser observado que a aptidão tem um aumento significativo para as primeiras gerações até que se obtém um valor estável de 17579. Uma grande diferença entre os valores da aptidão do melhor indivíduo e a aptidão média da população é notada, o qual seria uma indicativa do grau de diversidade da população, mesmo depois de ter convergido o melhor indivíduo.

A Figura 5.56 mostra a evolução do melhor indivíduo, com aptidão de 17720, para o algoritmo CoRea1, e mostra como o processo de re-inicialização é essencial para que possa ser obtido o cenário de dano correto. A convergência para o melhor indivíduo é obtida em muito poucas gerações para a segunda execução, e isso poderia levar ao AG a encontrar uma solução sub-ótima.



**Figura 5. 56** Evolução da aptidão do melhor indivíduo no algoritmo CoRea1.

Finalmente, o fato de que para os três algoritmos foram similares o cenário de dano encontrado bem como a aptidão final do indivíduo que representa esse cenário indica que a função objetivo utilizada é adequada para a correta detecção do dano na estrutura.

### 5.2.8 Tempo de execução dos diferentes AGs

Um aspecto importante está relacionado ao tempo que os diversos AGs gastam para realizar uma corrida. A Tabela 5.5 mostra que ainda que as estruturas não possuam um número relativamente grande de elementos, os tempos computacionais são consideráveis, o que poderia chegar a ser proibitivo para estruturas de grande porte. Afortunadamente os AGs são uma técnica que permite sua fácil implementação em paralelo, o que diminuiria consideravelmente esses tempos. Além disso, heurísticas podem ser pensadas com o objetivo de diminuir o tempo gasto para se realizar a avaliação da aptidão

dos indivíduos da população, que é a rotina que gasta maior quantidade de tempo na execução dos AGs.

**Tabela 5.5** Tempo empregado na execução dos AGs estudados quando aplicados em diferentes tipos estruturais.

<b>Cenário Dano</b>	<b>Tempo de execução (min.)</b>		
	<b>CoBin2</b>	<b>CoRed1</b>	<b>CoRea1</b>
T21D	---	2.12	2.12
VS3	4.75	9.54	9.57
P3A	18.48	16.17	36.81

## 6. CONCLUSÕES

---

### 6.1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho foram estudados três tipos de Algoritmos Genéticos baseados em diferentes tipos de codificação, e sua aplicação na resolução do problema de detecção de dano. Igualmente, foi estudada uma metodologia baseada em energia, que permite detectar elementos provavelmente danificados. Essa metodologia foi alcançada a partir de uma ampla revisão bibliográfica, que incluiu diversos tópicos relacionados à resolução do problema de detecção de dano: metodologias de detecção de dano que utilizam parâmetros dinâmicos, aplicação de técnicas de otimização clássicas e algoritmos genéticos na localização e quantificação de dano em estruturas, bem como técnicas de expansão de formas modais para solucionar o problema de medições incompletas.

Vários tipos de sistemas estruturais, sob diversos cenários de dano, foram estudados mostrando a robustez das metodologias estudadas. A seguir são descritos as conclusões relacionadas à metodologia de localização e os

algoritmos genéticos implementados, assim como sugestões de trabalhos futuros.

## **6.2 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE ELEMENTOS DANIFICADOS**

No presente trabalho foi estudada uma metodologia de localização de elementos provavelmente danificados, que esta baseada em variações das energias de deformação modal e cinética. Uma variante da metodologia original é proposta, mostrando ser mais indicada para a determinação se um elemento encontra-se ou não danificado. Resultados mostram que, com medições experimentais ideais, a metodologia consegue detectar quais os elementos danificados na estrutura. Quando as medições são incompletas e ruidosas o desempenho da metodologia é pior, resultado que é apreciado pelo aumento no número de elementos definidos como danificados quando a qualidade da informação subministrada diminui. Devido ao fato de que a finalidade da metodologia de localização é a redução do espaço de busca, concluiu-se que sua aplicação é muito viável, já que são obtidas reduções que podem variar entre 40 e 90% do número de elementos da estrutura em função do tipo de estrutura, e também da qualidade das medições e do tipo de dano. A principal vantagem desta metodologia é sua simplicidade conceitual, permitindo-se a determinação dos elementos provavelmente danificados sem cálculos avançados. O tempo gasto no processamento é mínimo. Como observado, apesar do dano não ter uma extensão considerável a metodologia conseguiu detectar os elementos. Espera-se que para grandes estruturas sua efetividade seja ainda maior devido ao fato do dano se concentrar de forma mais localizada em algumas regiões do espaço da estrutura.



As principais desvantagens da utilização desta metodologia podem ser:

- O caráter subjetivo da definição de quando um elemento se encontra danificado.
- A detecção de dano uniforme é de difícil consecução para a metodologia.
- Não é definido qual é a quantidade de modos que deveria ser utilizada para a obtenção em forma confiável do cenário de dano procurado.
- Deve ser utilizada uma técnica de expansão de formas modais quando as medições são incompletas, a qual afeta negativamente o desempenho da metodologia como observado nos exemplos estudados.
- Se o valor do EEQ é muito baixo para um determinado elemento da estrutura em algum ou em vários dos modos utilizados para o cálculo do valor do EEQDR, e têm-se medições incompletas e/ou ruído, pode haver grandes variações no valor do EEQD para esse elemento, o qual poderia resultar uma interpretação errada de quais os elementos danificados.
- Para os exemplos de treliça estudados a metodologia não conseguiu ter um bom desempenho.

### **6.3 ALGORITMOS GENÉTICOS**

Como conclusão geral encontra-se que os três AGs aplicados (CoBin2, CoRea1 e CoRed1), apresentaram um bom comportamento na detecção de dano dos diversos casos estudados, sendo os resultados praticamente exatos quando as medições eram completas e encontravam-se livres de ruído.

Para os exemplos estudados, mostra-se a capacidade que eles têm para encontrar cenários de dano em condições de medições reais: incompletas e com

ruído. Diversos tipos estruturais e diferentes tipos de dano (simples e múltiplo, uniforme e disperso) foram estudados mostrando a capacidade dos AGs para avaliar dano. Uma descrição dos resultados de cada um dos AGs implementados é mostrada a seguir.

O algoritmo CoBin2, consiste de um AG de código binário que realiza o processo de detecção de dano em duas etapas. Na primeira etapa é utilizada uma técnica de localização de elementos provavelmente danificados com o objetivo de reduzir o espaço de busca. Na segunda etapa o AG determina a extensão do dano naqueles elementos preliminarmente determinados como danificados. Resultados mostram o bom desempenho deste algoritmo, principalmente quando a metodologia de localização de dano reduz em forma notória o número de elementos na estrutura considerados como danificados; porém, foi o algoritmo que apresentou os piores resultados no tocante à quantificação da extensão do dano. A principal desvantagem é que na presença de ruído e de medições incompletas não é completamente garantido que entre aqueles elementos encontrados na primeira etapa como danificados encontrem-se os elementos realmente danificados, o que faria com que o algoritmo procure a solução ao problema com as variáveis erradas. Caso o anterior conseguisse ser garantido, este algoritmo seria, quiçá, o de melhor desempenho em estruturas de grande porte. Assim mesmo, para o caso de medições completas e sem ruído é, tal vez, a melhor metodologia a ser aplicada já que depois da aplicação da metodologia de localização as variáveis foram reduzidas, praticamente, àquelas representando os elementos verdadeiramente danificados.

Por outro lado, um segundo AG estudado foi o de código real, dito de CoRea1, o qual apresenta uma representação mais natural do problema. Este algoritmo tem a vantagem de apresentar um cromossomo de menor tamanho,

quando comparado ao AG de código binário, o que cobra importância na medida em que se aumenta o número de elementos na estrutura. Duas heurísticas importantes foram propostas, uma para a geração da população inicial e outra de re-inicialização do algoritmo, as quais ajudam a melhorar a convergência e a encontrar uma melhor resposta por parte do algoritmo. É observado que o AG de código real comporta-se bem, mesmo a níveis altos de ruído, mas apresenta alguns elementos considerados em forma errônea como danificados com pequenos valores de dano. Os resultados mostraram que as pequenas quantidades de dano em alguns indivíduos afetam a extensão dos elementos realmente danificados.

O último tipo de algoritmo estudado foi o AG com codificação redundante implícita, dito de CoRed1, o qual permite uma variação em forma dinâmica das variáveis do problema durante a execução do algoritmo. Em detecção de dano isto é uma característica essencial já que a localização dos elementos danificados não é conhecida a priori, e comumente o dano está limitado a uns poucos elementos. Em geral os resultados mostram que o algoritmo realiza uma boa determinação da extensão do dano dos elementos danificados e que são muito poucos elementos os considerados em forma errada como danificados. O algoritmo CoRed1, em comparação com os outros dois AGs, apresenta os melhores resultados, porém precisa de uma população maior para um correto funcionamento.

A seguir são mencionadas algumas conclusões sobre as diversas análises realizadas:

- A presença de ruído e de medições incompletas tem um efeito direto sobre a aptidão do melhor indivíduo, o que poderia trazer problemas em identificar se o algoritmo chegou ou não a uma boa resposta,

quando se quiser utilizar medições experimentais e o grau de ruído nas medições não seja conhecido.

- A função objetivo proposta permite a utilização de formas modais incompletas já que só leva em conta os graus de liberdade medidos, evitando-se assim ter que se utilizar formas modais expandidas. Um fator de peso é utilizado, cujo valor mostra que a contribuição das frequências naturais é maior que a contribuição por parte dos modos. Isto é originado no fato de o termo das formas modais apresentarem valores relativamente maiores que o termo das frequências, que traz maior erro devido ao maior ruído nos modos de vibração. Resultados mostram que a função objetivo adotada é adequada para detectar dano.
- Como comentado, para a metodologia de localização, a quantidade de informação subministrada ao algoritmo pode ser um fator decisivo para seu bom desempenho e não se tem uma regra definida sobre quantos modos devem ser utilizados. Cabe salientar, que essa quantidade encontra-se limitada pelo número de modos que podem ser medidos experimentalmente. Assim mesmo, o número e a posição dos graus de liberdade medidos podem influir no desempenho dos AGs.
- A definição dos parâmetros do AG: Taxa de mutação, Taxa de cruzamento, Tamanho da População, Número máximo de gerações, foi realizada com base na revisão bibliográfica e em alguns testes. A magnitude de tais parâmetros é uma desvantagem já que a configuração desses parâmetros poderia não funcionar quando testados em outros tipos de estruturas. Por tanto, a utilização de algoritmos auto-configurados é algo desejável.

- Os tempos de processamento variaram entre 2 e 36 minutos dependendo do tipo de estrutura analisada e do tipo de AG. Na medida em que o número de elementos aumenta o tempo consumido pelas metodologias pode se tornar proibitivo. Este problema pode ser solucionado se os AG são implementados utilizando programação paralela e utilizando heurísticas que permitam diminuir o tempo na avaliação da função objetivo.

#### **6.4 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

A partir da realização desta dissertação, sugerem-se os seguintes temas para seu desenvolvimento em trabalhos futuros:

- Análise de funções objetivo baseada em diferentes parâmetros dinâmicos (energia de deformação modal, flexibilidade, vetor de força residual, funções de resposta em frequência), permitindo-se uma determinação mais adequada da detecção de dano.
- Definição de uma metodologia de localização de dano que permita encontrar de uma forma confiável quais os elementos provavelmente danificados na estrutura.
- Estudo do problema de localização ótima de sensores.
- Utilização da técnica de redes neurais para a solução do problema de detecção de dano.
- Aplicação de técnicas de auto- adaptação para a definição dos parâmetros do AG.
- Implementação de técnicas clássicas de otimização para observar seu desempenho na resolução do problema de detecção de dano.

- Avaliação experimental do desempenho dos AGs estudados.

## 7. REFERENCIAS

---

ALAMPALLI, S. (2000). *Effects of testing, analysis, damage and environment on modal parameters*. Mechanical Systems and Signal Processing , 14(1), p. 63-74.

ALVANDI, A., CREMONA, C. (2006). *Assessment of vibration-based damage identification techniques*. Journal of Sound and Vibration 292, p. 179–202.

ANANDA M., SRINIVAS J., MURTHY B. (2004). *Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms*. Computers and Structures 82, p. 963–968.

ASSAN, A. (2003). *Método dos elementos finitos: primeiros passos*. Ed. Unicamp. Campinas. 2da Edição. p. 302.

AU F., CHENG Y. S., THAM L. G., BAI, Z. Z. (2004). *Structural damage detection based on a micro-genetic algorithm using incomplete and noisy modal test data*. International journal for numerical methods in engineering 69, p. 1085–1107.

BEASLEY, D., BULL, D., MARTIN, R. (1993). *An overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals*. University Computing 15(2), p. 58-69.

BEGAMBRE, O. (2003). *Detecção de dano a partir da resposta dinâmica da estrutura: estudo analítico com aplicação a estruturas do tipo viga*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

BEGAMBRE, O (2007). *Algoritmo Híbrido para Avaliação da Integridade Estrutural: uma Abordagem Heurística*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

BORGES C., BARBOSA H., LERNONGE A.(2007). *A structural damage identification method based on genetic algorithm and vibrational data*. International journal for numerical methods in engineering 69, p. 2663–2686.

BRASILIANO, A., DOZ, G. DE BRITO, J. (2004). *Damage identification in continuous beams and frame structures using the Residual Error Method in the Movement Equation*. Nuclear Engineering and Design 227, p. 1–17.

CHEN, H., BICANIC, N. (2006). *Inverse damage prediction in structures using nonlinear dynamic perturbation theory*. Computational Mechanics 37, p. 455–467.

CHEN, B., NAGARAJIAH, S. (2007). *Flexibility-based structural damage identification using Gauss-Newton method*. Proceedings of SPIE -- Volume 6529 Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007, 65291L.

COELLO, C. (1999). *A survey of Constraint Handling Techniques with Evolutionary Algorithms*. Technical Report Lania-RI-9904 Laboratório Nacional de Informática Avanzada.

CORNWELL, P., DOEBLING, S.W., FARRAR, C.R. (1999). *Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures*. Journal of Sound and Vibration 224(2), 359-374.

DEB, K. (1999). *An introduction to Genetic Algorithms*. Shadana Vol. 24, Parts 4&5, p. 293-315.

DI, W. LAW, S.S. (2007). *Eigen-parameter decomposition of element matrices for structural damage detection*. Engineering Structures 29, p. 519–528.

DIGALAKIS, J., MARGARITIS, K. (2002). Experimental study of benchmarking functions for genetic algorithms. International Journal Computer Math., 2002, 79(4), p. 403–416.

DOEBLING, S.; FARRAR, C.; PRIME, M. (1998) *A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods*. The Shock and Vibration Digest, 30(2), p. 91-105.



ESCOBAR, J., SOSA, J., GOMEZ, R. (2005). *Structural damage detection using the transformation matrix*. Computers and Structures 83, p. 357–368.

FADEL, L., DE MENEZES, R., FADEL, L. (2006). *Mode shape expansion from data-based system identification procedures*. Mecánica Computacional Vol XXV, p. 1593-1602.

FARAVELLI, L.; CASCIATI, S. (2004). *Structural damage detection and localization by response change diagnosis*. Prog. Struct. Engng Mater., n. 6, p. 104–115.

FRISWELL M., PENNY J., GARVEY S. (1998). *A combined genetic eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures*. Computers and Structures 69, p. 547-556.

GE, M., LUI, E. (2005). *Structural damage identification using system dynamic properties*. Computers and Structures 83, p. 2185–2196.

GEN, M., CHEN, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*. New York, John Wiley & Sons.

GOLDBERG, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company. United States. Reading, MA.

GOMES, H. M. , SILVA, N.R.S. (2008). *Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method*. Applied Mathematical Modelling 32, p. 2216–2232.

GYSIN, H. (1990). *Comparison of Expansion Methods for FE Modeling Error Localization*. VIII International Modal Analysis Conference. Kissimmee, p. 195-204.

HANCOCK, P.(1993). *Selection Methods for Evolutionary Algorithms*. In: Chapter 3, Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers Ed.

HAO H., XIA Y. (2002). *Vibration-based Damage detection of structures by genetic algorithms*. Journal of Computing in Civil Engineering 16(3), p. 222-229.

HAUPT, R., HAUPT, S. (2004). *Practical Genetic Algorithms*. New Jersey. John Wiley & Sons. 2da Ed.

HERRERA, F.; LOZANO, M.; VERDERGAY, J.L. (1998). *Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for behavioral Analysis*. Artificial Intelligence Review No 12, p. 265-319.

HU, N., WANG, X., FUKUNAGA, H., YAO, Z. H., ZHANG H.X. WU, Z.S. (2001). *Damage Assessment of structures using modal test data*. International Journal of Solids and Structures 38, p. 3111-3126.

LI, H.; YANG, H.; JAMES S. (2006). *Modal Strain Energy Decomposition Method for Damage Localization in 3D Frame Structures*. Journal of Engineering Mechanics 132(4) , p. 429-437.

HUMAR, J.; BAGCHI , A.; XU, H. (2006). *Performance of Vibration-based Techniques for the Identification of Structural Damage*. Structural Health Monitoring 5(3), p. 0215-0227.

HWANG, H.Y., KIM, C. (2004). *Damage detection in structures using a few frequency response measurements*. Journal of Sound and Vibration 270, p. 1-14.

JAISHI, B., REN, W. (2006). *Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual*. Journal of Sound and Vibration 290, p. 369-387

KIM, J.T., STUBBS, N. (2002). *Improved damage identification method based on modal information*. Journal of Sound and Vibration 252(2), p. 223-238.

KIM, H.S., CHUN, Y. S. (2004). *Structural damage assessment of building structures using dynamic experimental data*. The structural design of tall and special buildings 13, p. 1-8.

LAW, S.S.; SHI,Z.Y.; ZHANG, L.M. (1998). *Structural Damage Detection From Incomplete and Noisy Modal Test Data*. Journal of Engineering Mechanics 124(11), p. 1280-1288.

LEE, U., SHEEN, J. (2001). *A frequency-domain method of structural damage identification formulated from the dynamic stiffness equation of motion*. Journal of Sound and Vibration 257(4), p. 615-634

LI,G., HAO, K., LU, Y., CHEN, S. (1999). *A flexibility approach for damage identification of cantilever-type structures with bending and shear deformation*. Computers and Structures 73, p. 565-572.

LU, Q., REN, G., ZHAO, Y. (2002). *Multiple damage location with flexibility curvature and relative frequency change for beam structures*. Journal of Sound and Vibration 253(5), p. 1101-1114.

MARES C., SURACE C. (1996). *An application of genetic algorithm to identify damage in elastic structures*. Journal of Sound and Vibration, 195(2), p. 195-215.

MESSINA, A.; WILLIAMS, E.J., CONTURSI, T. (1998). *Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method*. Journal of Sound and Vibration, 216(5) p. 791-808.

MICHALEWICZ, Z. (1994). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin. Springer-Verlag. 2da Ed.

MICHALEWICZ, Z. (1995). *A survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods*. In: McDonell et al. Evolutionary Programming IV. MIT Press. Cambridge, p. 135-155.

MOSLEM, K., NAFASPOUR R.(2002) *Structural Damage detection by genetic algorithms*. AIAA Journal 40 (7), p. 1395-1401.

O'CALLAHAN, J. (1989). *A procedure for an improved reduced system (IRS) model*. VII International Modal Analysis Conference. Las Vegas. p. 17-21.

O'CALLAHAN, J., AVITABILE, P., RIEMER, R. (1989). *System Equivalent Reduction Expansion Process (SEREP)*. VII International Modal Analysis Conference. Las Vegas. p. 29-37.

PANDEY, A. K., BISWAS, M. (1994). *Damage detection in structures using changes in flexibility*. Journal of Sound and Vibration 169(1), p. 3-17.

PARLOO, E., GUILLAUME, P., VAN OVERMEIRE, M. (2003). *Damage Assessment using mode shape sensitivities*. Mechanical Systems and Signal Processing 17 (3), p. 499-518.

PERERA R., TORRES R. (2006). *An evolutionary multiobjective framework for structural damage localization and quantification*. Engineering Structures vol 132(9), p. 1491-1501.

RAHAI, A.; BAKHTIARI-NEJAD, F.; ESFANDIARI, A. (2007). *Damage assessment of structure using incomplete measured mode shapes*. Structural Control and Health Monitoring, n. 14, p. 808-829.

RAICH, A.; GHABOUSSI, J. (1998). Implicit Representation in Genetic Algorithms using redundancy. Evolutionary Computation 5(3), p.277-302.

RAICH A., LISKAI, T. (2007). *Improving the Performance of Structural Damage Detection Methods Using Advanced Genetic Algorithms*. Journal of Structural Engineering, Vol. 133(3), p. 449-461.

REN, W. X.; DE ROECK, G. (2002). *Structural Damage Identification using Modal Data.I: Simulation Verification*. Journal of Structural Engineering 128(1), p. 87-95.

ROTHLAUF, F. (2002). *Binary representations of integers and the performance of Selectorecombinative Genetic Algorithm*. Parallel Problem Solving from Nature PPNS VII, Lectures Notes in Computer Science Vol. 2439, p. 99-108.

SHARIFI, A., REZA, M. (2008). *Energy Index Method: Technique for Identification of Structural Damages*. Journal of Structural Engineering 134(6), p. 1061-1064.

SHI, Z. Y.; LAW, S. S.; ZHANG, L. M. (1998). *Structural damage localization from modal strain energy change*. Journal of Sound and Vibration, 218(5), p. 825-844.

SHI, Z. Y.; LAW, S. S.; ZHANG, L. M. (2000). *Damage localization by directly using incomplete mode shapes*. Journal of Engineering Mechanics 124(11), p. 1280-1288.

SMITH, A., COIT, D. (1995). *Penalty Functions*. In: Handbook of Evolutionary Computation Section 5.2. Baeck et al. Ed. Oxford University Press and Institute of Physics Publishing.

SOHN, H; ET AL. (2004). A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS. Disponível em: [http://www.lanl.gov/damage\\_id/reports/LA\\_13976\\_MS\\_Final.pdf](http://www.lanl.gov/damage_id/reports/LA_13976_MS_Final.pdf). Acesso em: 26 de março de 2008.

SOHN, H. (2007). *Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring*. Philosophical Transactions of The Royal Society A. No. 365, p. 539-560.

TANG, H.S., XUE, S.T., CHENG, R. (2005). *Analyses on structural damage identification based on combined parameters*. Applied Mathematics and Mechanics 26(1), p. 44 -51.

XIE, Q., XUE, S. (2006). *Detection of damage to frame structures from changes in eigenfrequencies*. Journal of Asian Architecture and Building Engineering p. 137-143.

YANG, Q.W., LIU, J.K. (2007). *Structural damage identification based on residual force vector*. Journal of Sound and Vibration 305, p. 298-307.

ZHAO, J., DE WOLF, J. (1999). *Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection*. Journal of structural engineering 125(4), p. 410-416.

## **BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR**

AVITABILE, P. (1998). *Overview of analytical and experimental modal model correlation techniques*. Disponível em: <[http://faculty.uml.edu/pavitabile/downloads/Peter\\_Avitabile\\_Thesis\\_theory\\_sections.pdf](http://faculty.uml.edu/pavitabile/downloads/Peter_Avitabile_Thesis_theory_sections.pdf)>. Acesso em: Junho, 2008.

FRISWELL, M.I., MOTTERSHEAD, J.E. (1995). *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Ed. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 286p.

HE, J., FU, Z. (2001). *Modal Analysis*. Ed. Butterworth-Heinemann. Oxford. 291p.

HUMAR, J. (1990). *Dynamic of Structures*. Ed. Prentice-Hall. New Jersey. 780p.

QU, Z. (2004). *Model order reduction techniques: with applications in finite element analysis*. Ed. Springer. London. 369p

WEAVER, W., JOHNSTON, P. (1987). *Structural Dynamics by Finite Elements*. Ed Prentice-Hall. New Jersey. 591p.



## APÊNDICES

---





## **APÊNDICE A: APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA A SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO DE UMA FUNÇÃO.**

Neste apêndice será mostrado como aplicar algoritmos genéticos (AGs) de código binário e código real na resolução de um problema de otimização.

Deseja-se realizar a minimização da função de Rastrigin (DIGALAKIS e MARGARITIS, 2002) :

$$F(x, y) = 20 + (x^2 - 10 \times \cos(2\pi x)) + (y^2 - 10 \times \cos(2\pi y)) \quad (2.1)$$

no intervalo, para as variáveis X e Y, de -2,00 a 2,00 e com uma precisão de 2 cifras decimais .

Devido ao tipo de operador que será utilizado para realizar o processo de seleção de indivíduos, o problema deve ser transformado num problema de maximização como mostrado na Equação 2.2.

$$g(x, y) = C - f(x, y) \quad (2.2)$$

Na qual C é uma constante que depende dos valores admissíveis pela função e que para nosso caso foi assumido como 50.

Por outro lado, as iniciais de cada etapa do processo são utilizadas para identificar os indivíduos que pertencem a essa etapa, assim, os indivíduos cujas iniciais sejam PI correspondem à população inicial, C ao cruzamento, M à mutação e G à nova geração.

O critério de parada escolhido corresponde à definição de um número máximo de iterações que o AG pode realizar; o anterior com o objetivo de ilustrar como é a convergência para a solução do problema dos dois tipos algoritmos.

## A.1 ALGORITMO GENÉTICO DE CÓDIGO REAL (AGCR)

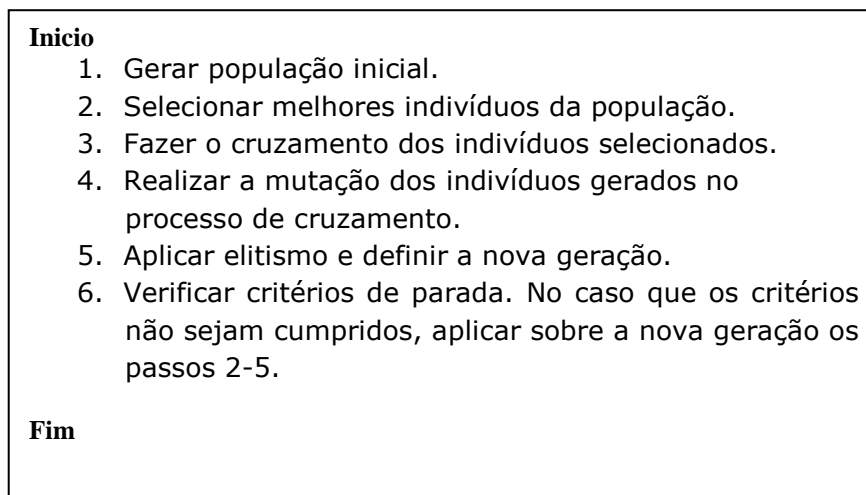
Para ilustrar o processo de execução de um AGCR são utilizados os operadores e os parâmetros mostrados nas Tabelas A.1 e A.2, respectivamente.

**Tabela A.1** Operadores do AGCR.

<b>Operador</b>	<b>Tipo</b>
Seleção	Roleta
Cruzamento	BLX- $\alpha$
Mutação	<i>Creep</i>

**Tabela A.2** Parâmetros que definem o AGCR.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tamanho da população	10
Taxa de Cruzamento	0.85
Taxa de Mutação	0.10
Valor mínimo para as variáveis X e Y	-2,00
Valor máximo para as variáveis X e Y	2,00



**Figura A. 1** Esquema para a aplicação de um algoritmo genético de código binário.

A seguir são ilustrados os passos que devem ser seguidos para a aplicação do AGCR, vide Figura A.1:

## 1. Definição da população inicial.

Para a definição da população inicial são gerados mediante um processo aleatório números entre os valores limite de cada uma das variáveis. Para o primeiro indivíduo, temos:

$$I_{x_1} = \text{Rand}[-2,00; 2,00] = 0,203$$

$$I_{y_1} = \text{Rand}[-2,00; 2,00] = -0,587 \Rightarrow I_1 = \{0,203 \quad -0,587\}$$

Os indivíduos gerados são mostrados na Tabela A.3.

**Tabela A.3** Definição da população inicial.

Indivíduo	Gene 1: X	Gene 2: Y	Indivíduo	Gene 1: X	Gene 2: Y
PI-I	0,203	-0,587	PI-VI	-0,742	1,760
PI-II	-0,914	-1,808	PI-VII	-1,265	-0,970
PI-III	1,404	0,481	PI-VIII	1,053	-1,106
PI-IV	-0,233	0,938	PI-IX	0,547	0,042
PI-V	1,952	1,922	PI-X	-1,004	-0,221

## 2. Seleção dos melhores indivíduos.

A seleção dos melhores indivíduos da população será realizada mediante a aplicação do método da roleta, no qual a probabilidade de um indivíduo de ser escolhido para se reproduzir é proporcional a sua aptidão em relação à aptidão da população. Assim, a aptidão de um indivíduo é determinada com ajuda da Equação 2.2, como mostrado para o indivíduo PI-I:

$$g(x, y) = 50 - \left[ 20 + (0,203^2 - 10 \times \text{Cos}(2\pi \times 0,203)) + ((-0,587)^2 - 10 \times \text{Cos}(2\pi \times (-0,587))) \right]$$

$$g(x, y) = 23,998$$

O seguinte passo consiste em determinar a aptidão da população, ou seja, o somatório das aptidões de todos os indivíduos:

$$Apt_{pop} = 23,998 + 38,030 + 9,636 + 39,405 + 40,872 + 26,440 \\ + 36,311 + 44,981 + 29,782 + 40,752 = 330,208$$

sendo a probabilidade do indivíduo PI, então:

$$P_I = \frac{23,998}{330,208} = 0,073$$

Os valores das aptidões e probabilidades de seleção dos indivíduos da população inicial são apresentados na Tabela A.4.

**Tabela A.4** Dados para a aplicação do método da roleta.

<b>Indivíduo</b>	<b>Fx</b>	<b>Pi</b>	<b>Piacum</b>	<b>Indivíduo</b>	<b>Fx</b>	<b>Pi</b>	<b>Piacum</b>
I	23,998	0,0727	0,0727	VI	26,440	0,0801	0,5402
II	38,030	0,1152	0,1878	VII	36,311	0,1100	0,6502
III	9,636	0,0292	0,2170	VIII	44,981	0,1362	0,7864
IV	39,405	0,1193	0,3364	IX	29,782	0,0902	0,8766
V	40,872	0,1238	0,4601	X	40,752	0,1234	1,0000

Depois de terem-se determinados as probabilidades para cada indivíduo deve-se calcular sua probabilidade acumulada, Equação 2.10. Como exemplo é mostrado o cálculo para os indivíduos PI-III e PI-IV, vide Tabela A.4:

$$P_{III\_acum} = P_I + P_{II} + P_{III} = 0,0727 + 0,1152 + 0,0292 = 0,2170$$

$$P_{IV\_acum} = P_I + P_{II} + P_{III} + P_{IV} = 0,0727 + 0,1152 + 0,0292 + 0,1193 = 0,3364$$

A determinação dos indivíduos que passaram para a seguinte etapa do processo requer da geração de números aleatórios num total igual ao tamanho da população. Um indivíduo será escolhido quando o número aleatório gerado seja menor ou igual à sua probabilidade acumulada e maior que a probabilidade acumulada do indivíduo anterior. Assim por exemplo, o indivíduo IV será escolhido quando se cumpra a seguinte relação:

$$0,217 < \#Aleatorio \leq 0,336$$

Na Tabela A.5 são mostrados os números aleatórios gerados e os indivíduos escolhidos.

**Tabela A.5** Indivíduos selecionados para reprodução.

# do Giro da Roleta	Número aleatório	Indivíduo Escolhido	# do Giro da Roleta	Número aleatório	Indivíduo Escolhido
1	0,254	IV	6	0,197	III
2	0,947	X	7	0,726	VIII
3	0,837	IX	8	0,156	II
4	0,655	VII	9	0,432	V
5	0,922	X	10	0,708	VIII

Para escolher um indivíduo, quando um número aleatório é gerado, deve-se começar a partir do primeiro indivíduo da população. O processo de seleção, no caso do giro número 1, seria:

$\# Aleat. = 0,254 > Prob_{acum} I = 0,0727 \Rightarrow$  Não escolher indivíduo I

$\# Aleat. = 0,254 > Prob_{acum} II = 0,1878 \Rightarrow$  Não escolher indivíduo II

$\# Aleat. = 0,254 > Prob_{acum} III = 0,2170 \Rightarrow$  Não escolher indivíduo III

$\# Aleat. = 0,254 < Prob_{acum} IV = 0,33364 \Rightarrow$  Escolher indivíduo IV

### 3. Cruzamento

O primeiro passo para se realizar o cruzamento consiste em definir os pares de indivíduos que terão a função de ser pais. Para isso, no presente trabalho utilizou-se a ordem no qual os diversos indivíduos foram escolhidos, tal que o primeiro indivíduo escolhido formará um par com o segundo, o terceiro com o quarto, e assim sucessivamente.

A seguir, deve-se definir uma probabilidade de cruzamento para cada um dos pares formados, assim:

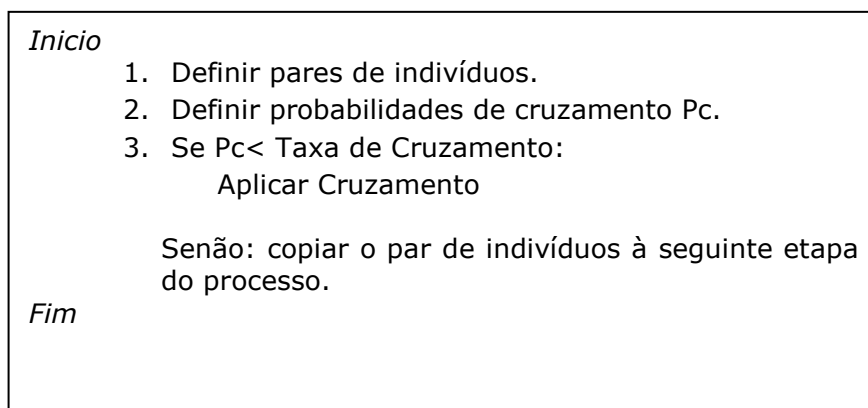
$$Prob\_Cruz_{par\ i} = Rand[0,1]$$

Os pares formados e as suas probabilidades de cruzamento são mostradas na Tabela A.6

**Tabela A.6** Definição dos pares de indivíduos para reprodução.

<b>Par</b>	<b>Pai</b>	<b>Mãe</b>	<b>Probabilidade Cruzamento</b>
1	IV	X	0,24
2	IX	VII	0,68
3	X	III	0,83
4	VIII	II	0,31
5	V	VIII	0,53

Agora, se a probabilidade de cruzamento do par é menor que a taxa de cruzamento o par terá direito a se reproduzir, senão será copiado diretamente à seguinte etapa do AG. O processo anterior encontra-se resumido na Figura A.2:



**Figura A. 2** Procedimento para realizar cruzamento em um AGCR.

A seguir se mostrará a aplicação sobre o primeiro par de indivíduos do operador de cruzamento escolhido (BLX- $\alpha$ , com  $\alpha=0.2$ ). Aplicando as Equações. (2.23) para o gene X temos:

$$I_{\min} = \min(-0,23; -1,00) = -1,00$$

$$I_{\max} = \max(-0,23; -1,00) = -0,23$$

$$r = -0,23 - (-1,00) = 0,77$$

$$F_{x1} = \text{Rand}[-1,00 - 0,77 \times 0,2, -0,23 + 0,77 * 0,2] = -1,04$$

Para o gene Y, temos

$$I_{\min} = \min(0,94; -0,22) = -0,22$$

$$I_{\max} = \max(0,94; -0,22) = 0,94$$

$$r = 0,94 - (-0,22) = 1,16$$

$$F_{y1} = \text{Rand}[-0,22 - 1,16 \times 0,2, 0,94 + 1,16 * 0,2] = 0,74$$

Por tanto, o Filho gerado ao aplicar o operador fica:

$$F_1 = \{-1,04 \quad 0,74\}$$

Na Tabela A.7 é resumido a aplicação das Equações (2.23) para cada par de indivíduos.

**Tabela A.7** Dados aplicação do operador BLX- $\alpha$ .

Par	Gene X		Gene Y		Rx	Ry
	Imin	Imax	Imin	Imax		
1	-1,00	-0,23	-0,22	0,94	0,77	1,16
2	-1,27	0,55	-0,97	0,04	1,82	1,01
3	-1,00	1,40	-0,22	0,48	2,40	0,70
4	-0,91	1,05	-1,81	-1,11	1,96	0,70
5	1,05	1,95	-1,11	1,92	0,90	3,03

O operador será aplicado duas vezes sobre cada par de indivíduos, sendo a população gerada depois do processo de cruzamento aquela mostrada na Tabela A.8.

**Tabela A.8** Indivíduos gerados depois do processo de cruzamento.

Par	Indivíduo	Filho 1		Indivíduo	Filho 2	
		X	Y		X	Y
1	C-I	-1,04	0,74	C-II	-1,26	-0,09
2	C-III	-0,61	-0,15	C-IV	0,08	0,07
3	C-V	0,12	-0,35	C-VI	1,67	-0,26
4	C-VII	1,43	-1,66	C-VIII	-0,64	-1,74
5	C-IX	1,70	-0,79	C-X	1,78	-0,93

#### 4. Mutação

Para cada gene que conforma o cromossomo de cada um dos indivíduos da população deve-se definir uma probabilidade de sofrer mutação, assim:

$$Prob\_mut_{i,j} = Rand[0,1]$$

Sendo  $i$  o número do indivíduo e  $j$  o gene. Esse gene será mutado se a probabilidade gerada é menor que a taxa de mutação, vide Tabela A.2.

No exemplo um total de 20 probabilidades de mutação foram geradas e quando comparadas contra a taxa de mutação encontrou-se que só o gene Y do indivíduo C-I será submetido a mutação. Por tanto:

$$Fy_i = Rand[-2,00; 2,00] = -1,06$$

A população depois de aplicado o operador mutação é mostrada na Tabela A.9.

**Tabela A.9** Indivíduos gerados depois do processo de mutação.

Indivíduo	X	Y	Fx	Indivíduo	X	Y	Fx
M-I	-1,04	-1,06	46,86	M-VI	1,67	-0,26	21,72
M-II	-1,26	-0,09	36,46	M-VII	1,43	-1,66	10,95
M-III	-0,61	-0,15	28,05	M-VIII	-0,64	-1,74	19,96
M-IV	0,08	0,07	47,74	M-IX	1,70	-0,79	25,86
M-V	0,12	-0,35	31,20	M-X	1,78	-0,93	36,67



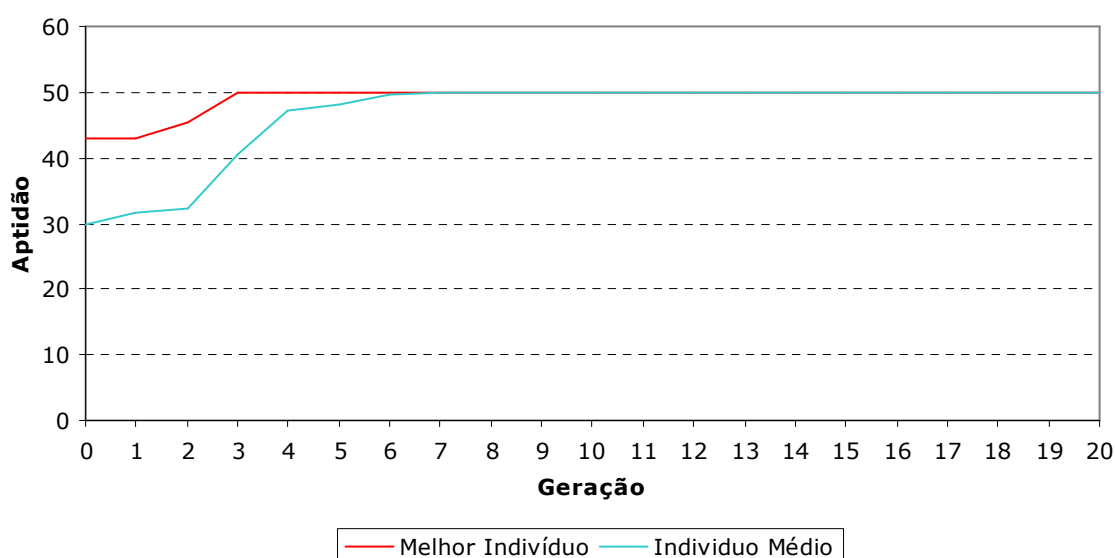
## 5. Aplicação de elitismo.

Para garantir que o melhor indivíduo da população atual não seja perdido devido aos processos de cruzamento e mutação, esse indivíduo passará a ser parte da seguinte geração mediante a substituição do pior indivíduo obtido depois da aplicação do operador mutação.

O melhor indivíduo da população inicial é o PI-VIII, com uma aptidão de 44,981, e o pior indivíduo da população obtida depois do processo de mutação é o M-VII, com uma aptidão de 10,95. O elitismo será, então, aplicado e a nova geração ficará conformada pelos indivíduos mostrados na Tabela A.10.

**Tabela A.10** Nova geração de indivíduos.

Indivíduo	X	Y	Indivíduo	X	Y
G-I	-1,04	-1,06	G-VI	1,67	-0,26
G-II	-1,26	-0,09	G-VII	1,053	-1,106
G-III	-0,61	-0,15	G-VIII	-0,64	-1,74
G-IV	0,08	0,07	G-IX	1,70	-0,79
G-V	0,12	-0,35	G-X	1,78	-0,93



**Figura A. 3** Evolução na aptidão do melhor indivíduo e do indivíduo médio do AGCR.

## 6. Verificar se os critérios de parada não foram atingidos.

O algoritmo deverá seguir realizando novas iterações já que só a primeira iteração foi calculada. Na figura A.3 mostra-se a evolução da aptidão do melhor indivíduo e do indivíduo médio. Pode ser observado que para a solução deste problema o melhor indivíduo convergiu para a solução do problema com muito poucas gerações. O indivíduo médio num principio apresentava um valor inferior em relação ao melhor indivíduo mostrando a diversidade da população, más a partir da geração convergiu para a aptidão máxima, ou seja, a população convergiu para indivíduos de características muito similares.

## 7. Executar um número dado de vezes o algoritmo para se analisar a resposta.

No exemplo, 10 iterações foram realizadas e os resultados são apresentados na Tabela A.11. Como pode ser observado, em 8 das 10 corridas o algoritmo consegue encontrar o mínimo global, mostrando assim sua capacidade para encontrar o ponto mínimo da função estudada.

**Tabela A.11** Resultados das 10 vezes que foi executado o algoritmo genético de código real.

<b>Corrida</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Fx</b>	<b>Corrida</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Fx</b>
1	0,04	-0,01	49,69	6	0,00	0,00	50,00
2	-1,95	-0,08	44,42	7	0,97	1,00	47,90
3	-0,01	0,00	49,98	8	-0,07	-0,02	49,10
4	0,02	0,00	49,90	9	1,00	-1,00	48,01
5	0,00	0,00	50,00	10	0,99	0,01	48,99

## A.2 ALGORITMO GENÉTICO DE CÓDIGO BINÁRIO (AGCB)

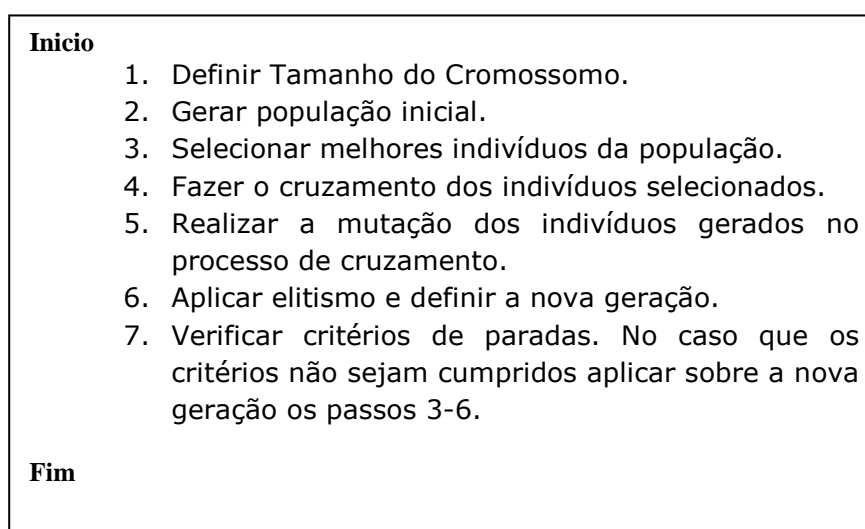
Para ilustrar o processo de execução de um AGCB são utilizados os operadores e os parâmetros mostrados nas Tabelas A.12 e A13, respectivamente.

**Tabela A.12** Definição dos operadores do AGCB.

<b>Operador</b>	<b>Tipo</b>
Seleção	Roleta
Cruzamento	2 pontos
Mutação	<i>Jump</i>

**Tabela A.13** Definição dos parâmetros do AGCB.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tamanho da população	10
Taxa de Cruzamento	0.85
Taxa de Mutação	0.10
# Máximo de iterações	200
Precisão requerida (Prec) para as variáveis: # de algarismos depois da vírgula	2
Valor mínimo da variável (aj)	-2.00
Valor máximo da variável (bj)	2.00



**Figura A. 4** Esquema para a aplicação de um algoritmo genético de código binário.

A seguir são ilustrados os passos que devem ser realizados para a aplicação do AGCB, vide Figura A.4:

### 1. Definição do tamanho do cromossomo.

O cromossomo está conformado por cada uma das variáveis (genes) a serem otimizadas, por tanto, precisa-se determinar o número de bits,  $m_j$ , que são requeridos para codificar cada uma delas.

O tamanho de cada gene é calculado mediante um processo iterativo, no qual se procura pelo valor de  $m_j$  que faz cumprir a desigualdade em (2.3).

Para a variável X e começando com  $m_X = 3$ , temos:

$$2^{3-1} = 4 < (2 - (-2)) \times 10^2 = 400 < 2^3 - 1 = 7$$

Como não é cumprido (2.3), tentamos com  $m_X = 4$

$$2^{4-1} = 7 < (2 - (-2)) \times 10^2 = 400 < 2^4 - 1 = 15$$

O valor de  $m_X$  foi incrementado até encontrar que (2.3) é cumprido com  $m_X = 9$ , assim:

$$2^{9-1} = 256 < (2 - (-2)) \times 10^2 = 400 < 2^9 - 1 = 511$$

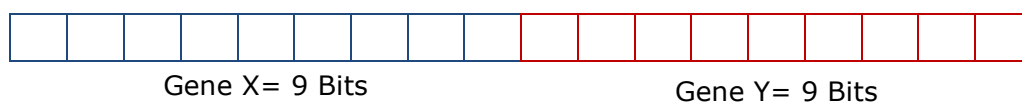
Por tanto, para codificar a variável X são necessários 9 bits.

Para codificar a variável Y deve-se realizar o mesmo procedimento que para a variável X, porém, dado que a precisão e intervalo de valores admissíveis são iguais, então, o número necessário de bits será o mesmo.

O tamanho total do cromossomo é calculado a partir da Equação (2.4):

$$Tam_{cromo} = \sum_{j=1}^2 m_j = 9 + 9 = 18$$

Por tanto, cada indivíduo precisa de um total de 18 bits para ser codificado, como mostrado na Figura A.5.



**Figura A. 5** Cromossomo definitivo.

## 2. Definição da população inicial.

A população inicial é gerada na sua forma binária mediante um processo aleatório que define um valor de 1 ou 0 para cada bit do cromossomo. Os indivíduos gerados são mostrados na segunda coluna da Tabela A.14.

**Tabela A.14** Definição da população inicial.

Indivíduo	BINARIO	INTEIRO		DECIMAL	
		X	Y	X	Y
PI-I	101001101-000111011	333	59	0,61	-1,54
PI-II	101111000-110101110	376	430	0,94	1,37
PI-III	011100100-110011100	228	412	-0,22	1,23
PI-IV	110011100-000010011	412	19	1,23	-1,85
PI-V	101011100-110111001	348	441	0,72	1,45
PI-VI	110101100-010010011	428	147	1,35	-0,85
PI-VII	010101000-101110001	168	369	-0,68	0,89
PI-VIII	011110111-111011001	247	473	-0,07	1,70
PI-IX	011000100-110011011	196	411	-0,47	1,22
PI-X	011111011-101110100	251	372	-0,04	0,91

Para se obter o indivíduo na sua forma decodificada devem-se utilizar as Eqs. 2.5 e 2.6, as quais permitem-nos transformar o binário a inteiro e o inteiro a real, respectivamente.

Como exemplo é apresentado a decodificação do Indivíduo PI-I, vide Figura A.6.

1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**Figura A. 6** Indivíduo PI-I.

Primeiro, decodifiquemos o gene correspondente à variável X:

$$\#int_x = \sum_{i=1}^9 Bit_i \times 2^{9-i} = 1 \times 2^8 + 0 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 333$$

$$x_j = -2,00 + 333 \times \frac{2,00 - (-2,00)}{2^9 - 1} = 0,61$$

De igual forma é realizado para a variável Y:

$$\#int_y = \sum_{i=1}^9 Bit_i \times 2^{9-i} = 0 \times 2^8 + 0 \times 2^7 + 0 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 59$$

$$x_j = -2,00 + 59 \times \frac{2,00 - (-2,00)}{2^9 - 1} = -1,54$$

A forma decodifica dos indivíduos pertencentes à população inicial encontram-se nas colunas 5 e 6 da Tabela A.14.

### 3. Seleção dos melhores indivíduos.

Este procedimento é realizado da mesma forma que para o AGCR, sendo que para o AGCB a avaliação do indivíduo deve ser realizada depois que este é transformado ao seu equivalente real. As aptidões, probabilidades de seleção e probabilidades acumuladas de cada um dos indivíduos é mostrada na Tabela A.15. A aptidão da população inicial é:

$$Apt_{pop} = 9,715 + 29,958 + 32,179 + 32,576 + 16,196 + 27,406 + 32,409 + 33,298 + 20,577 + 47,431 = 281,745$$

**Tabela A.15** Dados para a aplicação do método da roleta.

Individuo	Fx	Pi	Piacum	Individuo	Fx	Pi	Piacum
PI-I	9,715	0,0333	0,0333	PI-VI	27,406	0,0939	0,5074
PI-II	29,958	0,1027	0,1360	PI-VII	32,409	0,1111	0,6185
PI-III	32,179	0,1103	0,2463	PI-VIII	33,298	0,1141	0,7326
PI-IV	32,576	0,1117	0,3580	PI-IX	20,577	0,0705	0,8031
PI-V	16,196	0,0555	0,4135	PI-X	47,431	0,1969	1,0000

Os números aleatórios gerados e os indivíduos escolhidos são mostrados na Tabela A.16.

**Tabela A.16** Indivíduos selecionados para reprodução.

# do Giro da Roleta	Número aleatório	Indivíduo Escolhido	# do Giro da Roleta	Número aleatório	Indivíduo Escolhido
1	0,470	VI	6	0,571	VII
2	0,562	VII	7	0,255	IV
3	0,050	II	8	0,806	X
4	0,523	VII	9	0,447	VI
5	0,223	III	10	0,877	X

#### 4. Cruzamento

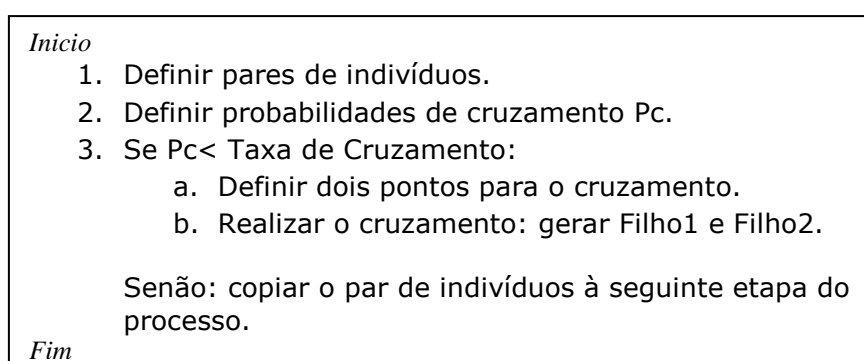
O processo de cruzamento para um AGCB é realizado inicialmente da mesma forma que para o AGCR modificando só a forma de gerar os filhos.

No AGCB são definidos dois pontos de cruzamento dentro do cromossomo, assim:

$$Pto\_Cruz = Rand[2; Tam\_cromo]$$

O operador utilizado gera dois filhos, tal que, os bits do Filho1 que se encontram à esquerda e à direita dos pontos de cruzamento 1 e 2, respectivamente, serão preenchidos com a informação genética do pai. Os bits que se encontram entre os pontos de cruzamento terão a informação genética da mãe. Para gerar o Filho 2 utiliza-se a informação genética restante do pai e da mãe.

O processo anterior encontra-se resumido na Figura A.7:



**Figura A. 7** Processo para realizar o cruzamento de dois pontos.

Os pares formados, suas probabilidades de cruzamento e os pontos de cruzamento podem ser encontrados na Tabela A.17.

**Tabela A.17** Definição dos pares de indivíduos para reprodução.

Par	Pai	Mãe	Probabilidade Cruzamento	Ponto Cruz. 1	Ponto Cruz. 2
1	VI	VII	0,898	---	---
2	II	VII	0,266	3	13
3	III	VII	0,641	5	12
4	IV	X	0,566	2	6
5	VI	X	0,496	7	16

<b>Pai</b>	1	0		1	1	1	1	0	0	0	1	1	0		1	0	1	1	1	0
<b>Mãe</b>	0	1		0	1	0	1	0	0	0	1	0	1		1	1	0	0	0	1

**Figura A. 8** Representação do Par 2 na forma binária.

O par 2, vide Figura A. 8, é utilizado para mostrar como deve ser realizado o cruzamento de dois pontos. Primeiro, deve-se verificar se o par terá direito a realizar cruzamento:

$$Prob\_Cruz_{par\ 2} = 0,266 < Taxa\ de\ cruzamento \Rightarrow Tem\ direito\ ao\ cruzamento$$

Define-se, então, os pontos de cruzamento:

$$Pto\_Cruz1 = Rand[2;18] = 3$$

$$Pto\_Cruz2 = Rand[2;18] = 13$$

Os filhos gerados depois do cruzamento são mostrados na Figura A.9.

Filho 1	1	0		0	1	0	1	0	0	0	1	0	1		1	0	1	1	1	0
Filho 2	0	1		1	1	1	1	0	0	0	1	1	0		1	1	0	0	0	1

**Figura A. 9** Indivíduos resultantes depois do processo de cruzamento.

Os novos indivíduos obtidos depois do processo de cruzamento são mostrados na Tabela A.18. Os indivíduos I e II escolhidos no processo de seleção foram copiados diretamente a esta geração por ter uma probabilidade de cruzamento maior que a taxa de cruzamento.



**Tabela A.18** Indivíduos gerados depois do processo de cruzamento.

<b>Indivíduo</b>	<b>Forma Binária</b>	<b>Indivíduo</b>	<b>Forma Binária</b>
C-I	110101100-010101110	C-VI	010100100-111110001
C-II	010101000-101110001	C-VII	111111100-000010011
C-III	100101000-101101110	C-VIII	010011011-101110100
C-IV	011111000-110110001	C-IX	110101011-101110011
C-V	011101000-100011100	C-X	011111100-010010100

## 5. Mutação

No processo de mutação é gerada uma probabilidade de mutação para cada bit do cromossomo e se essa probabilidade é menor que a taxa de mutação o bit correspondente deverá ser mutado. A mutação consiste na troca do valor do bit, assim, se o valor do bit é 1 o novo valor será 0 e se 0, então, será 1. No exemplo um total de 180 probabilidades foram geradas, resultando os bits a serem mutados aqueles na Tabela A.19.

**Tabela A.19** Bits que sofreram mutação para cada indivíduo.

<b>Indivíduo</b>	<b>Bits</b>	<b>Indivíduo</b>	<b>Bits</b>
I	-----	VI	2,7,9,13
II	-----	VII	-----
III	2,18	VIII	8,9,11
IV	7,15	IX	16
V	1	X	-----

Com ajuda da Tabela A.19 é mostrado como foi realizada a mutação do indivíduo C-VIII :

010011011-101110100  $\Rightarrow$  010011000-111110100

Os indivíduos gerados neste processo são mostrados na Tabela A.20. Como podem ser observados os indivíduos I, II, VII e X serão copiados diretamente à seguinte etapa do algoritmo.

**Tabela A.20** Indivíduos gerados depois do processo de mutação.

<b>Indiv.</b>	<b>Forma Binária</b>	<b>Fx</b>	<b>Indiv.</b>	<b>Forma Binária</b>	<b>Fx</b>
M-I	110101100-010101110	15,405	M-VI	000100001-111010001	17,377
M-II	010101000-101110001	32,409	M-VII	111111100-000010011	38,500
M-III	110101000-101101111	30,271	M-VIII	010011000-111110100	37,944
M-IV	011111100-110111001	28,193	M-IX	110101011-101110111	31,022
M-V	111101000-100011100	32,576	M-X	011111100-010010100	44,580

## 6. Aplicação de elitismo.

Será realizado da mesma maneira que para o AGCR. Na Tabela A.20, vemos que o pior indivíduo corresponde ao M-I, o qual será substituído pelo indivíduo PI-X da população atual, vide Tabela A.14. A seguinte geração é mostrada na Tabela A.21.

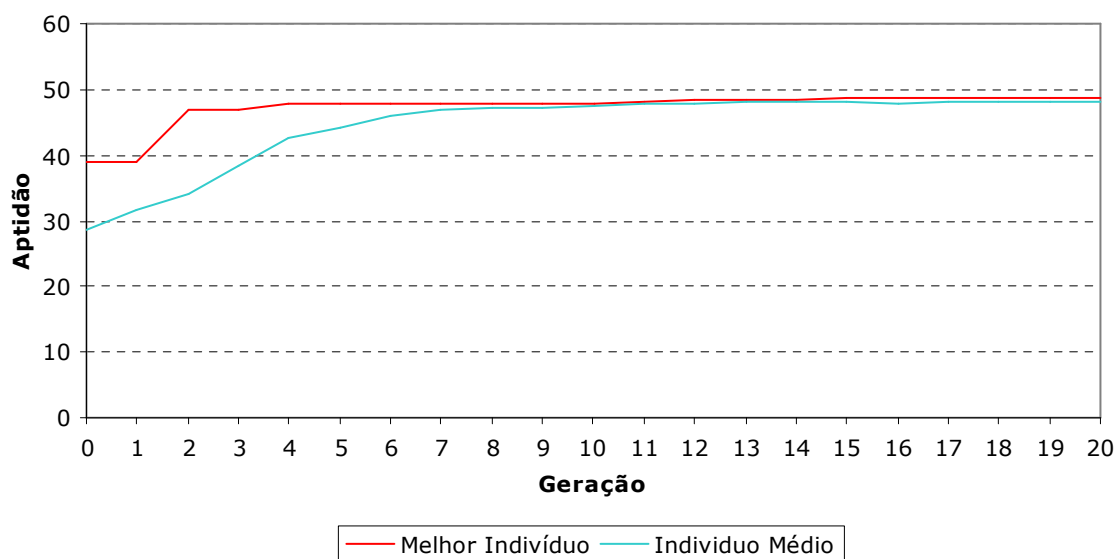
**Tabela A 21** Nova geração de indivíduos.

<b>Indivíduo</b>	<b>Forma Binária</b>	<b>Indivíduo</b>	<b>Forma Binária</b>
G2-I	011111011-101110100	G2-VI	000100001-111010001
G2-II	010101000-101110001	G2-VII	111111100-000010011
G2-III	110101000-101101111	G2-VIII	010011000-111110100
G2-IV	011111100-110111001	G2-IX	110101011-101110111
G2-V	111101000-100011100	G2-X	011111100-010010100

A aptidão total da nova população é 340,304 a qual é maior que a aptidão da população anterior, mostrando assim uma melhoria nos indivíduos que fazem parte da população.

## 7. Verificar se os critérios de parada foram atingidos.

Assim como para o AGCR é utilizado como critério de parada um número máximo de iterações. Na Figura A.10 é mostrada a aptidão do melhor indivíduo e do indivíduo médio. Foi observado que com poucas gerações o algoritmo converge para o indivíduo que representa a solução. O indivíduo médio indica que a população completa converge para o melhor indivíduo.



**Figura A.10** Evolução na aptidão do melhor indivíduo e do indivíduo meio da população do AGCB.

## 8. Executar um número dado de vezes o algoritmo para se analisar a resposta.

O melhor indivíduo da última geração corresponderá à solução do problema. Este indivíduo pode variar entre uma corrida e outra devido à natureza própria do método, por tanto, o algoritmo foi executado 10 vezes e os resultados apresentados na Tabela A.22. Como pode ser observado, em 6 das corridas o algoritmo encontrou o mínimo global da função e nas outras 4 encontrou um mínimo local, mostrando assim sua capacidade para encontrar mínimos. O fato de que o método tivesse encontrado várias soluções pode ser devido a que as soluções quase-ótimas apresentam uma aptidão similar à aptidão da melhor solução, e o operador de seleção utilizado apresenta algumas dificuldades quando se observa esta característica. Como mencionado no capítulo 2 uma forma de se solucionar esta dificuldade pode ser a partir do uso de funções de escalamento.

**Tabela A.22** Resultados das 10 vezes que foi executado o algoritmo genético de código binário.

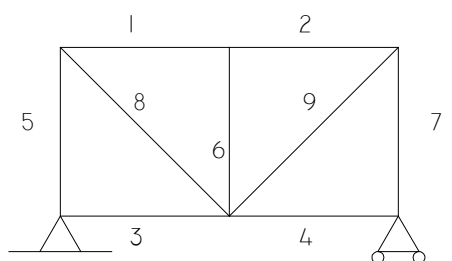
<b>Corrida</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>fx</b>	<b>Corrida</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>fx</b>
1	0,02	-0,07	48,96	6	-0,02	-0,02	49,84
2	-0,01	-0,01	49,96	7	0,08	0,00	48,76
3	1,00	0,00	49,00	8	0,97	-0,01	48,87
4	2,00	0,94	44,41	9	-0,01	0,04	49,65
5	-1,00	-0,25	38,69	10	0,04	0,00	49,68

## APÊNDICE B: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO EM TRELIÇAS MODELADA COM ELEMENTOS DE BARRA.

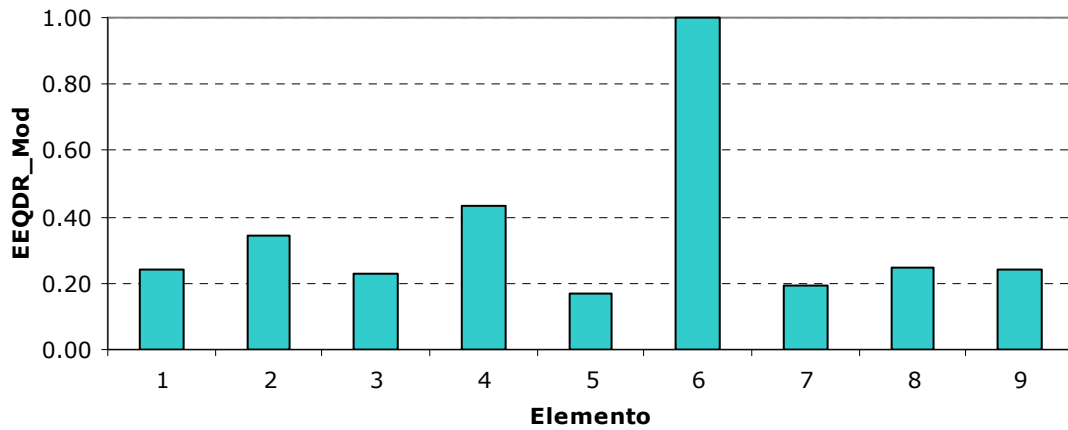
A seguir são mostrados vários exemplos nos quais a metodologia de localização não conseguiu detectar o elemento danificado. As propriedades do material e do tipo de seção dos elementos foram apresentadas na Tabela 4.1. Ruído de 3% nas formas modais é introduzido. Os vãos que forma as treliças são iguais a 1m.

- **Treliça de 9 Elementos: Dano de 0.20 no elemento 5**

Para a treliça mostrada na Figura B.1, foi estudada a presença de dano no elemento 5. Como mostrado na Figura B.2 a metodologia de localização não consegue detectar o elemento 5 como danificado e, ainda, define que o elemento 6 se encontra danificado.



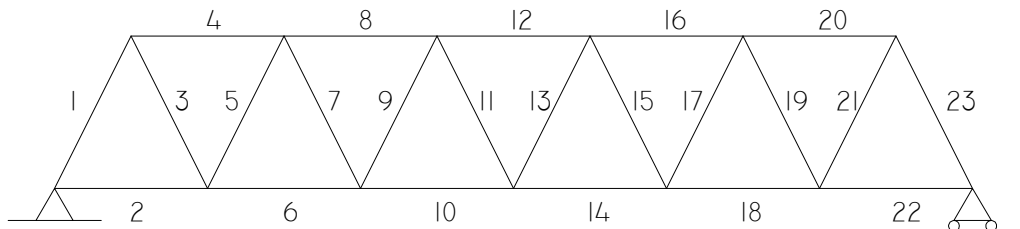
**Figura B. 1** Treliça de 9 elementos.



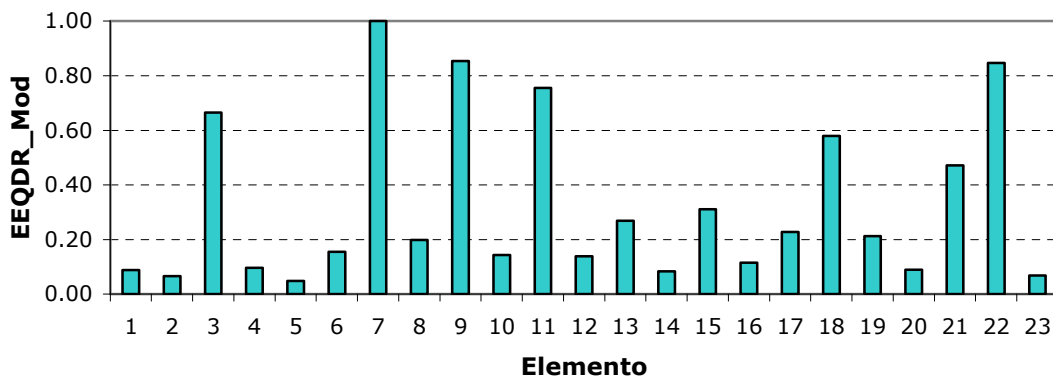
**Figura B. 2** Determinação de elementos provavelmente danificados numa treliça de 9 elementos: Dano no elemento 5.

• **Treliça de 23 Elementos: Dano de 0.2 nos elemento 3 e 6**

Na Figura B.3 é mostrada uma treliça de 23 elementos a qual apresenta dano nos elementos 3 e 6.



**Figura B. 3** Treliça de 23 elementos.

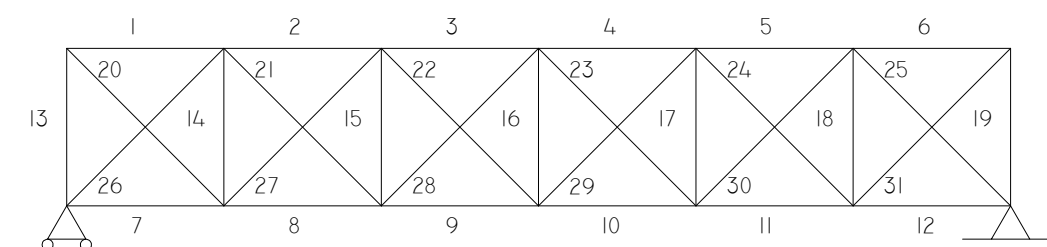


**Figura B. 4** Determinação de elementos provavelmente danificados numa treliça de 12 elementos: Dano nos elementos 3 e 6.

A aplicação da metodologia de localização de dano resulta numa incorreta identificação do cenário de dano, na qual o elemento 6 não é identificado como danificado.

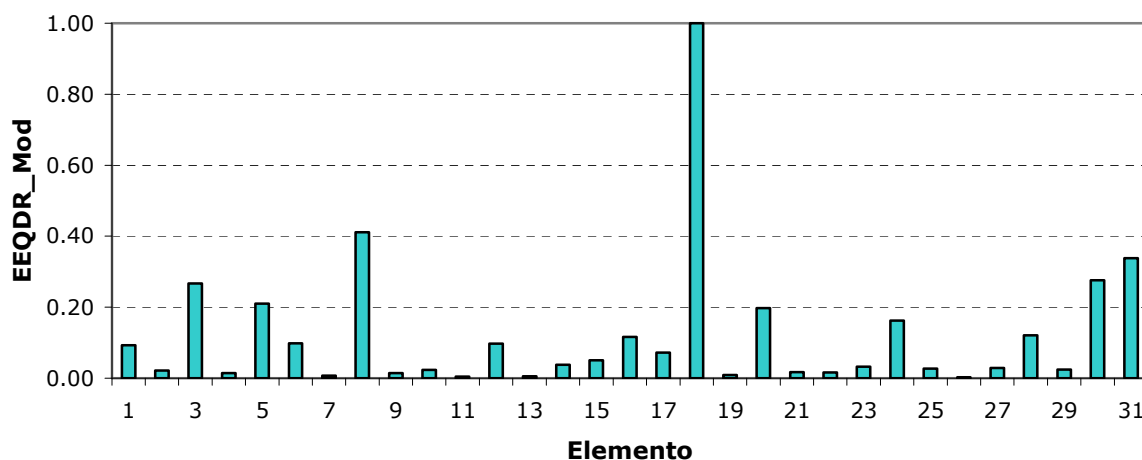
- **Treliza de 31 Elementos: Dano de 0.2 no elemento 5**

A metodologia de localização de dano foi utilizada para detectar dano no elemento 5 da treliza de 31 elementos mostrada na Figura B.5.



**Figura B. 5** Treliza de 31 elementos.

Resultados indicam que a metodologia não determina em forma certa o elemento danificado e de forma errônea identifica o elemento 18 como danificado, vide Figura B.6.



**Figura B. 6** Determinação de elementos provavelmente danificados numa treliza de 31 elementos: Dano no elemento 24.