



Bruno Ricardo Fonseca Saraiva

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Deteção, Localização e Quantificação de Dano em Estruturas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor João M. Burguete Botelho
Cardoso, FCT/UNL

Co-orientador: Prof. Doutora Raquel Albuquerque Soares
Brás de Almeida, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Paulo Urgueira
Arguente: Prof. Doutor Pedro Samuel Gonçalves Coelho
Vogal: Prof. Doutor João M. Burguete Botelho Cardoso
Vogal: Prof. Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2012

Copyright

Deteção, Localização e Quantificação de Dano em Estruturas

Copyright © 2012 Bruno Ricardo Fonseca Saraiva

Faculdade de Ciências e Tecnologia,

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Aos meus pais, que tornaram possível o meu percurso académico e porque são responsáveis pela minha educação e pela pessoa que sou.

À Inês, por toda a sua ajuda, apoio e incentivo e por acreditar sempre em mim e nas minhas capacidades.

Aos meus orientadores, Prof. Doutor João Cardoso e Prof.^a Doutora Raquel Almeida, por todos os seus conhecimentos e conselhos transmitidos e pela enorme disponibilidade demonstrada.

À minha família, em especial à Deolinda, por todo o apoio demonstrado.

Aos meus amigos e colegas, pelos bons momentos e alegrias partilhadas ao longo do percurso académico.

Resumo

A grande maioria das estruturas está sujeita a degradação provocada por diversos fatores como, por exemplo, a má utilização das mesmas, clima adverso e envelhecimento. Uma vez que existe uma relação negativa entre o dano e os custos de manutenção das estruturas assim como a nível de segurança, urge a necessidade de indicadores que detetem dano em estruturas o mais precocemente possível. É nesse sentido que, nos últimos anos, têm surgido várias propostas de indicadores de dano criados por diversos autores. Muitos destes indicadores são baseados nas respostas modais das estruturas, tais como as frequências naturais e modos de vibração, pois são dados relativamente fáceis de obter. Associando os indicadores de dano a métodos computacionais, é possível não só detetar como localizar e quantificar esse dano.

Entre os métodos computacionais existentes destacam-se os algoritmos genéticos, muito investigados nas últimas décadas, inclusive no problema de avaliação de dano. Baseados na teoria da evolução de Darwin, estes algoritmos criam uma população inicial de indivíduos, em que cada um destes representa uma solução para um dado problema e, através de operadores genéticos (reprodução, cruzamento e mutação), vão criando gerações sucessivas de indivíduos até que seja encontrada uma solução bastante próxima da correta.

No presente estudo, foram testadas as capacidades do algoritmo genético na deteção, localização e quantificação de dano em estruturas, quando utilizado em conjunto com o indicador de dano apresentado por Villalba e Laier (2012). Foram simulados vários níveis e combinações de dano em duas estruturas distintas: uma viga encastrada dividida em diferentes números de elementos finitos e uma estrutura em treliça composta por 15 barras. Para implementar os algoritmos genéticos foi utilizado o *software* de cálculo matemático *Matlab*® que possui uma *toolbox* dedicada a este tipo de algoritmos.

Palavras-chave: dano em estruturas, algoritmos genéticos, redes neuronais artificiais, *Matlab*®

Abstract

The great majority of structures are subject to damage caused by several factors such as misuse, adverse environmental conditions and aging. Since there is a negative relation between damage and maintenance costs of structures, as well as safety issues, there is an urgent need for indicators that detect damage as soon as possible. That is why, in recent years, there have been several proposals for indicators of damage created by various authors. Many of these indicators are based in the modal responses of the structures, like the natural frequencies and vibration modes, because these are easy to acquire. Combining the damage indicators with computational methods, it is possible not only to detect, but also to locate and quantify damage.

Among the existing computational methods there are genetic algorithms, which have been highly investigated in recent decades, including in the damage evaluation problem. Based on Darwin's theory of evolution, these algorithms create an initial population of individuals, which each one of them representing a possible solution of the problem and, through genetic operations (reproduction, crossover and mutation), evolving in successive generations of individuals until a solution very close to the correct one is found.

In the present study, the capacities of the genetic algorithm were tested in the detection, location and quantification of damage in structures, together with the damage indicator presented by Villalba and Laier (2012). Several levels and combinations of damage were tested in two different structures: a cantilever beam divided in different numbers of finite elements and a truss structure composed by 15 bars. To implement the genetic algorithms, the computational software *Matlab*®, a mathematical calculation software which as a dedicated genetic algorithm toolbox, was used.

Keywords: damage in structures, genetic algorithms, artificial neural networks, *Matlab*®

Índice

Copyright	I
Agradecimentos.....	III
Resumo.....	V
Abstract	VII
Simbologia e Notações.....	XIX
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	7
1.2 Organização da Dissertação	8
Capítulo 2 – Detecção de dano	9
2.1 Indicadores de Dano.....	10
2.2 Algoritmos Genéticos	15
2.2.1 População Inicial.....	15
2.2.2 Seleção.....	15
2.2.3 Cruzamento	18
2.2.4 Mutação.....	20
2.2.5 Elitismo	20
2.2.6 Modificações do Algoritmo Genético	21
2.3 Redes Neurais Artificiais.....	22
Capítulo 3 – Testes de Localização de Dano.....	27
3.1 Procedimento de Teste	30
3.2 Viga Encastrada	32
3.3 Estrutura em Treliça	42
Capítulo 4 – Testes de Quantificação de Dano na Viga Encastrada.....	47
4.1 Divisão em 75 EF com 1 Dano de 50%.....	49
4.1.1 Cromossomas Binários	51
4.1.2 Cromossomas Reais	53
4.2 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 50%.....	55
4.2.1 Cromossomas Binários.....	56
4.2.2 Cromossomas Reais	58
4.3 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 25%.....	61
4.3.1 Cromossomas Binários.....	61
4.3.2 Cromossomas Reais	64
4.4 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 15%.....	66
4.4.1 Cromossomas Binários.....	66
4.4.2 Cromossomas Reais	69
4.5 Resumo dos Testes da Divisão em 75 EF	71
4.6 Divisão em 100 EF com 1 Dano de 50%.....	72

4.7 Divisão em 100 EF com 3 Danos de 50%.....	75
4.8 Divisão em 100 EF com 3 Danos de 25%.....	77
4.9 Divisão em 100 EF com 3 Danos de 15%.....	80
4.10 Resumo dos Testes da Divisão em 100 EF.....	83
4.11 Influência do Número de Frequências Naturais e Modos de Vibração	84
4.11.1 Testes com 1 Dano de 50% Utilizando as Primeiras 10 Frequências Naturais e Modos de Vibração.....	84
4.11.2 Testes com 3 Danos de 15% Utilizando as Primeiras 10 Frequências Naturais e Modos de Vibração.....	85
4.11.3 Testes com 3 Danos de 15% Utilizando as Primeiras 3 Frequências Naturais e Modos de Vibração.....	86
4.11.4 Testes com 3 Danos de 15% Utilizando as Primeiras 7 Frequências Naturais e Modos de Vibração.....	88
4.11.5 Resumo dos Testes da Divisão em 75 EF, com Diferente Número de Respostas Dinâmicas	89
4.12 Simulação de Ruído nas Respostas Dinâmicas	90
4.12.1 Divisão em 75 EF com 1 Dano de 50%	91
4.12.2 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 50%	94
4.12.3 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 25%	96
4.12.4 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 15%	99
4.12.5 Resumo dos Testes com Ruído	101
Capítulo 5 – Testes de Quantificação de Dano na Treliça	103
5.1 Testes com 1 Dano de 50%	104
5.2 Testes com 3 Danos de 50%	110
5.3 Testes com 3 Danos de 25%	114
5.4 Testes com 3 Danos de 15%	117
5.5 Resumo dos Teste da Treliça	120
5.6 Simulação de Ruído nas Respostas Dinâmicas	122
Capítulo 6 – Conclusões.....	127
6.1 Localização de Dano	127
6.2 Quantificação de Dano.....	129
6.2.1 Tipo de Cromossoma.....	129
6.2.2 Tamanho da População Inicial	131
6.2.3 Divisão da Estrutura em EF	134
6.2.4 Número de Frequências Naturais e Modos de Vibração.....	134
6.2.5 Efeito do Ruído nas Medições	135
6.3 Estudos Futuros	136
Referencias Bibliográficas	137

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 – Funcionamento do algoritmo genético simples (Cardoso & Coelho, 2011)	5
Figura 1.2 - Representação esquemática de parte de uma RNB (Roseiro, 2004)	6
Figura 1.3 – Exemplo de uma RNA (Roseiro, 2004)	6

Capítulo 2

Figura 2.1 – Exemplo de uma roleta para a seleção de indivíduos de uma população	16
Figura 2.2 – Exemplo do método de seleção por torneio, com 3 participantes	18
Figura 2.3 – Funcionamento do operador de simulação (Nobahari & Seyedpoor, 2011)	22
Figura 2.4 – Representação de um neurónio de uma camada interna (Masters, 1993)	23
Figura 2.5 – Gráfico da função logística (equação 2.24)	24

Capítulo 3

Figura 3.1 – Representação dos graus de liberdade em cada nó do EF (adaptado de Cardoso & Coelho, 2011)	27
Figura 3.2 – Viga encastrada de 15 EF	32
Figura 3.3 – Resultados gráficos dos 5 testes realizados à viga encastrada com 15 EF, onde o elemento 7 foi considerado danificado	35
Figura 3.4 – Resultado gráfico da convergência do algoritmo genético, para os 5 testes realizados à viga encastrada com 15 EF, onde o elemento 7 foi considerado danificado	36
Figura 3.5 – Estrutura em treliça testada	42

Capítulo 4

Figura 4.1 – Representação da viga encastrada	50
Figura 4.2 – Gráfico referente aos resultados do teste b1.1.50	52
Figura 4.3 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.1.50	52
Figura 4.4 – Gráfico da convergência do AG no teste b1.1.50	53
Figura 4.5 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.1.50	53
Figura 4.6 – Gráfico referente aos resultados do teste r1.1.50	54
Figura 4.7 – Gráfico referente aos resultados do teste r4.1.50	55
Figura 4.8 – Gráfico da convergência do AG no teste r1.1.50	55
Figura 4.9 – Gráfico da convergência do AG no teste r4.1.50	55
Figura 4.10 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.50	57

Figura 4.11 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.3.50	58
Figura 4.12 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.50	58
Figura 4.13 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.50	58
Figura 4.14 – Gráfico referente aos resultados do teste r3.3.50	59
Figura 4.15 – Gráfico referente aos resultados do teste r4.3.50	60
Figura 4.16 – Gráfico da convergência do AG no teste r3.3.50	60
Figura 4.17 – Gráfico da convergência do AG no teste r4.3.50	60
Figura 4.18 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.25	62
Figura 4.19 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.25	63
Figura 4.20 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.25	63
Figura 4.21 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.3.25	63
Figura 4.22 – Gráfico referente aos resultados do teste r2.3.25	64
Figura 4.23 – Gráfico referente aos resultados do teste r4.3.25	65
Figura 4.24 – Gráfico da convergência do AG no teste r2.3.25	65
Figura 4.25 – Gráfico da convergência do AG no teste r4.3.25	65
Figura 4.26 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.15	67
Figura 4.27 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.15	68
Figura 4.28 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.15	68
Figura 4.29 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.3.15	68
Figura 4.30 – Gráfico referente aos resultados do teste r1.3.15	69
Figura 4.31 – Gráfico referente aos resultados do teste r5.3.15	70
Figura 4.32 – Gráfico da convergência do AG no teste r1.3.15	70
Figura 4.33 – Gráfico da convergência do AG no teste r5.3.15	70
Figura 4.34 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.1.50.c	74
Figura 4.35 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.1.50.c	74
Figura 4.36 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.1.50.c	75
Figura 4.37 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.1.50.c	75
Figura 4.38 – Gráfico referente aos resultados do teste b1.3.50.c	76
Figura 4.39 – Gráfico referente aos resultados do teste b4.3.50.c	77
Figura 4.40 – Gráfico da convergência do AG no teste b1.3.50.c	77
Figura 4.41 – Gráfico da convergência do AG no teste b4.3.50.c	77
Figura 4.42 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.25.c	79
Figura 4.43 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.25.c	79
Figura 4.44 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.25.c	79
Figura 4.45 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.3.25.c	80
Figura 4.46 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.15.c	81
Figura 4.47 – Gráfico referente aos resultados do teste 5.3.15.c	82
Figura 4.48 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.c	82
Figura 4.49 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.15.c	82
Figura 4.50 – Gráfico referente aos resultados do teste b1.1.50.10	85
Figura 4.51 – Gráfico da convergência do AG no teste b1.1.50.10	85

Figura 4.52 – Gráfico da convergência de um dos testes realizados com 10 respostas dinâmicas.....	86
Figura 4.53 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.15.3.....	87
Figura 4.54 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.3.....	88
Figura 4.55 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.15.7.....	89
Figura 4.56 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.7.....	89
Figura 4.57 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.1.50.r.....	92
Figura 4.58 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.1.50.r.....	93
Figura 4.59 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.1.50.r.....	93
Figura 4.60 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.1.50.r.....	93
Figura 4.61 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.50.r.....	95
Figura 4.62 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.50.r.....	95
Figura 4.63 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.50.r.....	96
Figura 4.64 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.50.r.....	96
Figura 4.65 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.25.r.....	97
Figura 4.66 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.3.25.r.....	98
Figura 4.67 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.25.r.....	98
Figura 4.68 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.25.r.....	98
Figura 4.69 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.15.r.....	100
Figura 4.70 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.3.15.r.....	100
Figura 4.71 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.r.....	101
Figura 4.72 - Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.15.r.....	101

Capítulo 5

Figura 5.1 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.1.1.50.....	105
Figura 5.2 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.1.1.50.....	106
Figura 5.3 – Gráfico da convergência do AG no teste T6.1.1.50.....	106
Figura 5.4 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.1.7.50.....	107
Figura 5.5 – Gráfico referente aos resultados do teste T8.1.7.50.....	107
Figura 5.6 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.1.7.50.....	108
Figura 5.7 – Gráfico da convergência do AG no teste T8.1.7.50.....	108
Figura 5.8 – Gráfico referente aos resultados do teste T3.1.13.50.....	109
Figura 5.9 – Gráfico referente aos resultados do teste T10.1.13.50.....	109
Figura 5.10 – Gráfico da convergência do AG no teste T3.1.13.50.....	110
Figura 5.11 – Gráfico da convergência do AG no teste T10.1.13.50.....	110
Figura 5.12 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.1.7.13.50.....	112
Figura 5.13 – Gráfico da convergência do AG no teste T4.3.1.7.13.50.....	112
Figura 5.14 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.3.2.6.11.50.....	113
Figura 5.15 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.2.6.11.50.....	113
Figura 5.16 – Gráfico referente aos resultados do teste T2.3.1.7.13.25.....	115
Figura 5.17 – Gráfico da convergência do AG no teste T2.3.1.7.13.25.....	115

Figura 5.18 – Gráfico referente aos resultados do teste T3.3.2.6.11.25.....	117
Figura 5.19 – Gráfico da convergência do AG no teste T3.3.2.6.11.25	117
Figura 5.20 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.1.7.13.15.....	119
Figura 5.21 – Gráfico da convergência do AG no teste T4.3.1.7.13.15.....	119
Figura 5.22 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.2.6.11.15.....	120
Figura 5.23 – Gráfico da convergência do AG no teste T4.3.2.6.11.15	120
Figura 5.24 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.1.13.50.r.....	123
Figura 5.25 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.2.6.11.50.r	123
Figura 5.26 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.3.2.6.11.25.r	124
Figura 5.27 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.3.2.6.11.15.r	124
Figura 5.28 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.3.2.6.11.15.r.....	125

Índice de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3.1: comparação dos valores das primeiras 5 frequências naturais obtidas através do programa <i>freq</i> (Matlab®) e do software ANSYS®.....	29
Tabela 3.2: operadores e parâmetros do algoritmo genético para os testes ao AG para localização de dano.....	31
Tabela 3.3: erro relativo entre as frequências naturais da viga de 15 EF, com e sem dano.....	32
Tabela 3.4: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 20 EF.....	37
Tabela 3.5: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 25 EF.....	37
Tabela 3.6: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 50 EF.....	38
Tabela 3.7: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 60 EF.....	38
Tabela 3.8: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 75 EF.....	39
Tabela 3.9: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 100 EF.....	39
Tabela 3.10: erro relativo dos valores das 5 primeiras frequências naturais, quando existe um dano singular em EF sucessivos, para 15 e 100 EF.....	40
Tabela 3.11: erro relativo dos valores das 5 primeiras frequências naturais da viga sem dano e com dano, para 20, 25, 50, 60, 75 e 100 EF, em que os elementos danificados foram os elementos 10, 12, 25, 30, 36 e 50, respetivamente.....	41
Tabela 3.12: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 100 EF, sem o critério de paragem por não existir variação significativa no resultado da função objetivo.....	42
Tabela 3.13: frequências naturais da estrutura em treliça intacta, estrutura de teste S1, S2 e S3.....	43
Tabela 3.14: erros relativos das primeiras 5 frequências naturais das estruturas de teste S1, S2 e S3.....	43
Tabela 3.15: resultado dos testes de dano singular, para a estrutura em treliça.....	44
Tabela 3.16: frequências naturais da estrutura de teste M1 e M2.....	45
Tabela 3.17: erros relativos das primeiras 5 frequências naturais das estruturas de teste M1 e M2.....	45
Tabela 3.18: resultado dos testes de dano múltiplo, para a estrutura em treliça.....	45

Capítulo 4

Tabela 4.1: codificação do dano com 3 genes, quando são usados cromossomas binários.....	48
Tabela 4.2: codificação do dano com 4 genes, quando são usados cromossomas binários.....	49
Tabela 4.3: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 1 dano de 50%, e respetivos erros relativos.....	51
Tabela 4.4: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50%.....	51

Tabela 4.5: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50%	53
Tabela 4.6: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 50%, e respetivos erros relativos.....	56
Tabela 4.7: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 50%.....	56
Tabela 4.8: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 50%	59
Tabela 4.9: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 25%, e respetivos erros relativos.....	61
Tabela 4.10: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 25%.	62
Tabela 4.11: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 25%.	64
Tabela 4.12: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 15%, e respetivos erros relativos.....	66
Tabela 4.13: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.	67
Tabela 4.14: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.	69
Tabela 4.15: tabela resumo dos resultados obtidos ao utilizar cromossomas binários.....	71
Tabela 4.16: tabela resumo dos resultados obtidos ao utilizar cromossomas reais.	71
Tabela 4.17: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 100 EF, intacta e danificada com 1 dano de 50%, e respetivos erros relativos.....	73
Tabela 4.18: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 100 EF com 1 dano de 50%.....	73
Tabela 4.19: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 50%, e respetivos erros relativos.....	75
Tabela 4.20: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 100 EF com 3 danos de 50%.	76
Tabela 4.21: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 100 EF, intacta e danificada com 3 danos de 25%, e respetivos erros relativos.....	78
Tabela 4.22: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 100 EF com 3 danos de 25%.	78
Tabela 4.23: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 100 EF, intacta e danificada com 3 danos de 15%, e respetivos erros relativos.....	80
Tabela 4.24: resultados dos testes realizados com o AG para a viga encastrada de 100 EF com 3 danos de 15%.	81
Tabela 4.25: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados na viga encastrada de 100 EF.....	83
Tabela 4.26: resultados dos testes realizados com as 10 primeiras frequências naturais e modos de vibração da viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50%.	84
Tabela 4.27: resultados dos testes realizados com as 3 primeiras frequências naturais e modos de vibração da viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.	86
Tabela 4.28: primeiras 3 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta, com o EF 17 danificado em 15% e com o EF 75 danificado em 15%, e respetivos erros relativos	87
Tabela 4.29: resultados dos testes realizados com as 7 primeiras frequências naturais e modos de vibração da viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.	88

Tabela 4.30: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados com diferente número de respostas dinâmicas da viga encastrada	90
Tabela 4.31: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 1 dano de 50% na viga encastrada de 75 EF.	91
Tabela 4.32: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50% e ruído nas medições.....	92
Tabela 4.33: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 3 danos de 50% na viga encastrada de 75 EF.	94
Tabela 4.34: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 50% e ruído nas medições.....	94
Tabela 4.35: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 3 danos de 25% na viga encastrada de 75 EF.	96
Tabela 4.36: resultados dos testes realizados com o AG para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 25% e ruído nas medições.....	97
Tabela 4.37: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 3 danos de 15% na viga encastrada de 75 EF.	99
Tabela 4.38: resultados dos testes realizados, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15% e ruído nas medições.	99
Tabela 4.39: tabela resumo dos resultados obtidos para os testes com ruído.....	102

Capítulo 5

Tabela 5.1: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça intacta e para 3 casos de dano distintos, com 1 EF danificado em 50%	104
Tabela 5.2: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com o EF nº1 danificado em 50%	105
Tabela 5.3: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com o EF nº7 danificado em 50%	106
Tabela 5.4: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com o EF nº13 danificado em 50%	108
Tabela 5.5: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça para 2 casos de dano distintos, com 3 EF danificados em 50%	111
Tabela 5.6: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº1, 7 e 13 danificados em 50%	111
Tabela 5.7: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº2, 6 e 11 danificados em 50%	113
Tabela 5.8: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça para 2 casos de dano distintos, com 3 EF danificados em 25%	114
Tabela 5.9: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº1, 7 e 13 danificados em 25%	115
Tabela 5.10: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº2, 6 e 11 danificados em 25%	116
Tabela 5.11: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça para 2 casos de dano distintos, com 3 EF danificados em 15%	118
Tabela 5.12: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº1, 7 e 13 danificados em 15%	118

Tabela 5.13: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº2, 6 e 11 danificados em 15%	119
Tabela 5.14: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça, com os casos de dano singular e múltiplo, considerando os EF nº 1, 7 e 13 danificados.	121
Tabela 5.15: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça, com o caso de dano múltiplo, considerando os EF nº 2, 6 e 11 danificados.	121
Tabela 5.16: tabela de resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça, com ruído nos valores das frequências e modos de vibração natural.	122

Capítulo 6

Tabela 6.1: resultados da quantificação de dano para os testes realizados à viga encastrada de 75 EF.	130
Tabela 6.2: número aproximado de iterações necessárias ao AG para convergir para a solução final apresentada, para o caso da viga encastrada dividida em 75 EF.	131
Tabela 6.3: resultados da quantificação de dano para os testes realizados à viga encastrada de 100 EF.	132
Tabela 6.4: número aproximado de iterações necessárias ao AG para convergir para a solução final apresentada, para o caso da viga encastrada dividida em 100 EF.	132
Tabela 6.5: resultados da quantificação de dano para os testes realizados à treliça.	133
Tabela 6.6: número aproximado de iterações necessárias ao AG para convergir para a solução final apresentada, para o caso da treliça.	133

Simbologia e Notações

Latim

A	Área de secção do EF
c_1	Constante de controlo do incremento; constante que limita o valor do indicador G
c_2	Constante de controlo do decremento; constante que evita divisão por zero
d	Porcentagem de dano
dr	Índice referente a valores com ruído
E	Função de erro; módulo de elasticidade
ex	Expoente referente a valores obtidos experimentalmente
f_d	Vetor das frequências naturais da estrutura com dano
f_{di}	i -ésimo componente do vetores f_d
f_{Di}	i -ésimo componente do vetor $f(\{\delta D\})$
f_{dj}	Vetor das frequências naturais teóricas para um dano com extensão conhecida, na localização j
f_i	Valor do mérito do i -ésimo indivíduo
f_h	Vetor das frequências naturais da estrutura sem dano
F_j	Soma do módulo da diferença entre as frequências naturais obtidas pelo algoritmo genético e experimentalmente e a ponderação da raiz quadrada do somatório do quadrado da diferença entre os modos de vibração obtidos pelo algoritmo genético e experimentalmente
$f(Sum)$	Soma das ponderações dos valores de entrada
$f(x)$	Função sigmoide
$f(\{\delta D\})$	Vetor das frequências naturais teóricas para dada combinação de dano com extensão conhecida
G	Indicador de dano baseado em frequências naturais e modos de vibração
ga	Expoente referente a resultados obtidos pelo algoritmo genético

i	Índice da frequência natural; índice do grau de liberdade; índice do modo de vibração; índice do neurónio; número do indivíduo; número do intervalo
in_i	Vetor de neurónios de entrada
I	Momento de segunda ordem
j	Coordenada de aplicação de uma força; índice da frequência natural; índice do modo de vibração; localização
J	Função objetivo
k	Número inteiro; iteração
K	Matriz de rigidez do EF
l	Número de genes do cromossoma
L	Comprimento do EF
M	Matriz de massa do EF; número de posições de aplicação de uma força
n	Número de elementos da estrutura; número de indivíduos da população
n_i	Número de intervalo
N	Número de coordenadas de medição
ndf	Número de graus de liberdade na informação disponível
n_j	Número de genes diferentes
nm	Número de modos de vibração considerados
N_ω	Número de frequências naturais consideradas
$obj(\{\delta D\})$	Função sensível a EF não danificados
p	Número de padrões de treino
p_c	Probabilidade de cruzamento
p_i	Probabilidade de um indivíduo ser escolhido para reprodução
p_m	Probabilidade de mutação
r	Índice de coordenadas relacionadas

s	Índice de coordenadas sucessivas
sum_i	Somatório dos valores de $MRVAC$
t	Vetor de saída
t_1	Valor do ruído para as frequências naturais
t_2	Valor do ruído para os modos de vibração
v	Vetor do cruzamento uniforme
w_1	Coefficiente de ruído
w_2	Coefficiente de ruído
w_i	Vetor de ponderações
W	Fator de ponderação
$W(k)$	Vetor dos fatores de ponderação

Grego

$\{\delta D\}$	Vetor de representação da combinação de dano
$\{\delta f_j\}$	Vetor das diferenças das frequências naturais teóricas para um dano com extensão conhecida
$\delta f(\{\delta D\})$	Vetor das diferenças das frequências naturais teóricas para dada combinação de dano com extensão conhecida
$\{\delta \Phi\}$	Vetor das diferenças dos modos de vibração teóricos para um dano com extensão conhecida
$\{\Delta f\}$	Vetor das diferenças das frequências naturais experimentais para a estrutura com um dano singular de extensão ou localização desconhecida
$\{\Delta \Phi\}$	Vetor das diferenças dos modos de vibração experimentais para a estrutura com um dano singular de extensão ou localização desconhecida
η_k	Taxa de aprendizagem da rede neuronal
ρ	Massa volúmica
$\tau_{rs}^{(j)}$	Vetor de transmissibilidades sem dano
$d_{\tau_{rs}}^{(j)}$	Vetor de transmissibilidades com dano

ϕ_{ai}	<i>i</i> -ésimo modo de vibração analítico
ϕ_{ei}	<i>i</i> -ésimo modo de vibração experimental
Φ_{ij}	Magnitude do <i>j</i> -ésimo modo de vibração para o <i>i</i> -ésimo grau de liberdade
$\bar{\phi}$	Amplitude da vibração sinusoidal no grau de liberdade ϕ
ω_j	<i>j</i> -ésima frequência natural;

Abreviaturas

AG	Algoritmos Genéticos
DLAC	<i>Damage Location Assurance Criterion</i>
DSD	<i>Dynamic Steepest Descend Algorithm</i>
ECBI	<i>Efficient Correlation-Based Index</i>
EF	Elementos Finitos
FRF	Funções de Resposta à Frequência
FSD	<i>Fuzzy Steepest Descend Algorithm</i>
IFM	Indicador Frequências e Modos
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i>
MDLAC	<i>Multiple Damage Location Assurance Criterion</i>
MEF	Modelo de Elementos Finitos
MLP	<i>Mltilayer Perceptron</i>
MRVAC	<i>Multiple Response Vector Assurance Criterion</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RNB	Redes Neurais Biológicas
RVAC	<i>Response Vector Assurance Criterion</i>
SSD	<i>Standard Steepest Descend Algorithm</i>
TDI	<i>Transmissibility Damage Indicator</i>
TSD	<i>Tunable Steepest Descend Algorithm</i>
WDI	<i>Weighted Damage Indicator</i>

Capítulo 1

Introdução

A deteção de dano em sistemas estruturais tem sido alvo de grande interesse nas últimas décadas, uma vez que o dano pode ter uma influência negativa no seu funcionamento, quer a nível de segurança, quer a nível de desempenho. O dano pode ainda aumentar os custos de manutenção e reparação das estruturas (He & Hwang, 2007, Lee *et al*, 2005). No seu estudo, Sahoo e Maity (2005) afirmam que o processo de deteção de dano pode ser dividido em três estágios: deteção, localização e quantificação de dano.

Assim, é importante não só detetar, mas também localizar e quantificar o dano presente nos sistemas estruturais o mais precocemente possível, de modo a evitar danos maiores e/ou irrecuperáveis. Um dos métodos convencionais de deteção de dano mais utilizados é a inspeção visual. Esta técnica tem como principais desvantagens o facto de ser dispendiosa, morosa, subjetiva e ineficaz (Koh & Dyke, 2005), falhando muitas vezes na deteção do dano numa fase inicial (Meruane & Heylen, 2011). Outro método de deteção de dano é a inspeção a partir de testes não destrutivos, embora Na *et al* (2011) afirmem que estes pecam por não poderem ser usados em zonas demasiado sensíveis e que só podem ser usados em áreas propícias a dano, previamente identificadas, ou em áreas onde se detete claramente a existência de dano. O mesmo acontece com métodos de deteção de dano ultrassónicos, acústicos, radiográficos, térmicos, entre outros (Debling *et al*, 1996).

Desta forma, é evidenciada a necessidade de encontrar uma alternativa aos métodos convencionais até aqui utilizados de modo a detetar a existência de dano o mais prematuramente possível, assim como encontrar um método global de deteção de dano que possa ser usado nas estruturas mais complexas (Debling *et al*, 1996).

Medindo os parâmetros dinâmicos e estáticos que caracterizam o comportamento de uma estrutura, é possível verificar variações nesses parâmetros que ocorrem devido ao dano e assim criar indicadores que revelem a existência desse dano.

A maioria dos indicadores de dano desenvolvidos e mencionados em estudos recentes baseia-se nas alterações provocadas pelo dano nas características dinâmicas das estruturas, tais como as frequências naturais e modos de vibração. Messina *et al* (1998) criaram um indicador denominado *MDLAC (Multiple Damage Location Assurance Criterion)*, que correlaciona as frequências naturais e modos de vibração de uma estrutura antes e após ter sido danificada. Villalba e Laier (2012) desenvolveram um outro indicador, *G*, que utiliza as diferenças entre frequências e modos de vibração natural de estruturas consideradas intactas e danificadas. Por outro lado, Almeida *et al* (2011) desenvolveram o indicador *WDI (Weighted Damage Indicator)* que usa as transmissibilidades para detetar o dano.

No entanto, o uso de dados modais pode apresentar algumas desvantagens. Uma vez que os dados modais medidos são muitas vezes incompletos e pouco precisos (devido a erros de modelação, ruído nas medições, entre outros), é necessário um grande número de medições para avaliar corretamente o dano. Porém, muitas vezes estes não são possíveis de obter através de testes, não só devido ao limitado número de sensores de recolha de dados, mas também pela impossibilidade de chegar a todos os graus de liberdade (Koh & Dyke, 2005; Na *et al*, 2011).

Em alternativa ao uso de dados modais, He e Hwang (2007) fazem uso de respostas estáticas na tentativa de detetar dano numa viga bi-encastrada e numa estrutura em treliça, alegando que, para além do equipamento usado nos testes estáticos ser menos dispendioso do que o utilizado nos testes dinâmicos e de mais rapidamente se obterem valores precisos de deslocamento das estruturas, as respostas estáticas são mais sensíveis ao dano do que as frequências naturais. É por esta razão, e também pelas desvantagens dos dados modais referidas anteriormente, que Chou e Ghaboussi (2001) utilizam respostas estáticas.

Numa tentativa de ultrapassar os problemas apresentados pelo uso de respostas dinâmicas, são frequentemente utilizados modelos analíticos das estruturas que são modelos matemáticos que representam o comportamento da estrutura por equações analíticas. Essas equações visam minimizar as diferenças entre as respostas dinâmicas obtidas analiticamente e aquelas obtidas pelas medições (Na *et al*, 2011). A grande desvantagem dos modelos analíticos é o facto de estes serem difíceis de aplicar, ou mesmo impossíveis, para sistemas cujas equações diferenciais e integrais estão definidas em domínios de geometria complexa. Isto faz com que muitas vezes os modelos analíticos tenham de ser demasiado simplificados, de modo a ser possível obter soluções por esta via (Cardoso & Coelho, 2011).

Com o desenvolvimento computacional das últimas décadas, surgiu um outro tipo de modelo matemático, que permite realizar a simulação numérica. Estes modelos, ao serem adequados a

problemas de engenharia e aliados às capacidades dos computadores, permitem resolver diversos problemas de engenharia, como é o caso da detecção de dano. Dentro das metodologias computacionais mais utilizadas, destaca-se o método dos elementos finitos (MEF) que consiste em dividir o domínio do problema em vários subdomínios. As equações que regem um dado fenómeno físico nesse subdomínio são então aproximadas utilizando um método variacional, baseado em princípios variacionais, tais como o princípio dos trabalhos virtuais ou o princípio da energia potencial total estacionária (Cardoso & Coelho, 2011).

Conjugando o MEF com os indicadores mencionados anteriormente, estão reunidas as condições para formular um problema de otimização que visa detetar elementos danificados numa estrutura, bem como a localização e extensão do dano. Assim, a principal função dos indicadores será informar se se está perto ou longe da solução ótima, ou seja, se o dano considerado está ou não próximo da sua real localização e quantificação.

O presente problema será resolvido através de uma estrutura de teste conhecida (onde se simulam várias combinações de dano) que se vai procurar fazer coincidir com a estrutura alvo que se sabe que está danificada, mas onde se desconhece a localização e extensão desse dano. Trata-se por isso de um problema de otimização, neste caso de minimização da diferença entre o comportamento da estrutura de teste e da estrutura alvo. A solução do problema será a estrutura de teste que mais se aproxima da estrutura alvo. Essa aproximação será avaliada por um dos indicadores de dano mencionados anteriormente que será a função objetivo do problema de minimização a resolver. No caso ideal, isto é, quando o valor do indicador é precisamente zero, as estruturas de teste e alvo têm comportamento idêntico e a localização e extensão do dano é perfeitamente conhecida.

Os dados que caracterizam a estrutura alvo são muitas vezes obtidos experimentalmente. Contudo, para evitar a realização de ensaios experimentais demorados e dispendiosos, optou-se neste estudo por utilizar estruturas alvo criadas a partir de modificações de modelos numéricos de estruturas inicialmente perfeitas. Os valores das frequências naturais e modos de vibração de cada modelo numérico modificado são neste caso fáceis de obter e constituem a informação alvo a partir da qual se calculam os indicadores e se faz a detecção do dano. O problema de detecção do dano é formulado como um problema de minimização do erro entre a resposta dinâmica da estrutura alvo e da estrutura de teste, cujo comportamento é função das variáveis de projeto.

Trata-se de um problema de otimização sem constrangimentos, ao contrário do que pode acontecer noutros problemas de otimização como por exemplo, a otimização do peso de uma estrutura, através da redução do volume, onde existe o constrangimento da integridade da estrutura ter de ser mantida. O valor da função objetivo, isto é, dos indicadores, resulta da diferença entre o comportamento dinâmico padrão e o comportamento do modelo numérico da estrutura de teste que se está a otimizar.

As variáveis de projeto estão relacionadas com a ocorrência de danos em várias zonas do modelo numérico e podem estar associadas a parâmetros do MEF como os valores do módulo de elasticidade ou as suas dimensões transversais.

Para resolver o problema de otimização associado à deteção, localização e quantificação de dano, vários autores utilizam algoritmos genéticos (AG). Estes algoritmos já foram utilizados em diversos problemas de otimização, tais como a otimização de linhas de canalização, projeto de estruturas e atualização de MEF (Friswell *et al*, 1998). Estes algoritmos distinguem-se dos métodos matemáticos pois, em vez de começarem a busca da solução ótima do problema a partir de um ponto ou solução e percorrer todos os pontos ou soluções do intervalo, utilizam várias soluções, isto é, uma população de vetores codificados, para iniciar a sua busca e encontrarem a melhor solução possível (Chou & Ghaboussi, 2001).

Os AG apresentam ainda muitas outras vantagens relativamente aos métodos tradicionais de otimização, já que podem otimizar tanto variáveis contínuas como discretas e podem tratar dados experimentais e dados provenientes de funções analíticas ou de simulações numéricas, mesmo com um número muito elevado de variáveis (Corriveau *et al*, 2010). O tempo que os AG frequentemente requerem para encontrar uma solução poderá ser longo (mediante a complexidade do problema) e, embora encontrem uma solução muito boa, esta poderá não ser a melhor (Liu *et al*, 2011).

Estes algoritmos baseiam-se na teoria da evolução de *Darwin* que diz que, dentro de uma certa população de indivíduos, os mais fortes sobrevivem e reproduzem-se, enquanto os mais fracos morrem e desaparecem. O seu funcionamento básico pode ser visualizado na figura 1.1.

Inicialmente existe uma população definida por diferentes indivíduos (cromossomas) compostos por genes. Cada cromossoma, isto é, cada combinação de genes, representa uma solução para um certo problema. A partir da população inicial, são selecionados vários cromossomas de acordo com a sua aptidão (mérito). Essa aptidão é avaliada através de uma função objetivo. Os cromossomas com melhor aptidão são selecionados para reprodução, enquanto os restantes são descartados. Os cromossomas selecionados entram então na fase de reprodução, onde cada membro de um par de cromossomas escolhido aleatoriamente é cruzado, formando um novo par de cromossomas. Estes novos indivíduos poderão então sofrer uma mutação. Esta mutação é feita através da alteração do valor de um dos genes constituintes do cromossoma. Depois desta fase, os novos indivíduos constituem uma nova população, ou nova geração. O processo é repetido, sendo que, em cada geração, o mérito dos seus indivíduos tem tendência a ser maior que o mérito da geração anterior. O AG cessa a sua busca quando é atingido um número máximo de gerações (definido primariamente) ou até que seja encontrada uma solução satisfatória do problema.

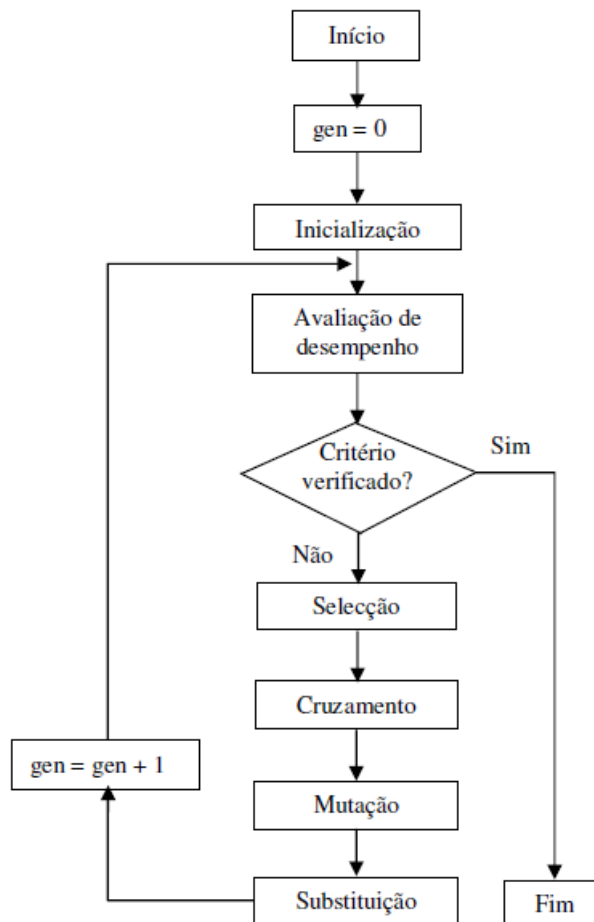


Figura 1.1 – Funcionamento do algoritmo genético simples (Cardoso & Coelho, 2011)

Um método alternativo aos AG é o método das redes neuronais artificiais (RNA). Estas redes são sistemas computacionais que simulam o comportamento de seres inteligentes, ou seja, são baseados nas redes neuronais biológicas (RNB) presentes no cérebro dos seres vivos animais. Estas redes neuronais são compostas por um elevado número de neurónios biológicos que comunicam entre si através de sinais elétricos. Na figura 1.2 está representado esquematicamente um neurónio biológico.

A RNB funciona através da partilha de informação (sinais elétricos) por parte nos neurónios. Cada neurónio capta os sinais elétricos dos restantes neurónios através das dendrites, que sofrem depois uma transformação (ativação do sinal). Durante a transformação, quando é atingido um certo valor do potencial eléctrico, gera-se um potencial de ação transmitido pelo axon para uma dendrite de outro neurónio. A ligação entre o axon e a dendrite realiza-se pela sinapse, que é também responsável pela aprendizagem da rede, ou seja, relaciona coerentemente a informação recebida de diferentes neurónios (Roseiro, 2004).

Com a utilização de RNA, pretende-se simular o funcionamento das RNB, ou seja, pretende-se que estas recebam informação de um dado acontecimento e, através do processamento dessa informação, prevejam o seu resultado. Fazendo a analogia ao presente estudo, espera-se que

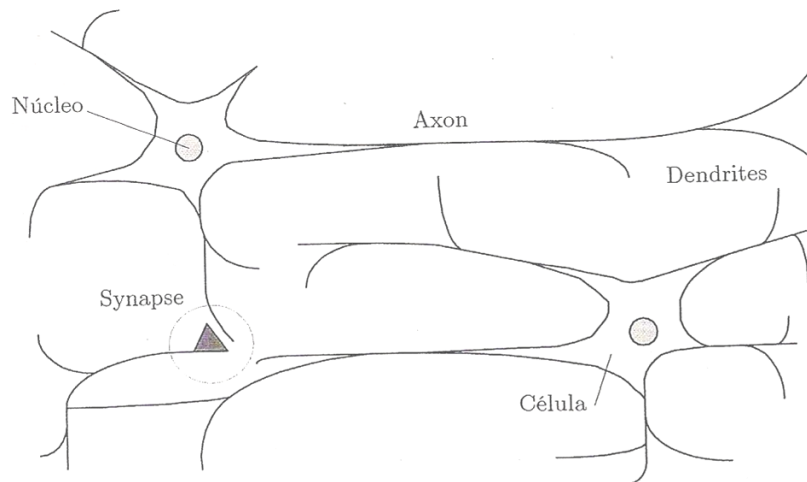


Figura 1.2 - Representação esquemática de parte de uma RNB (Roseiro, 2004)

a RNA recebe informação de uma certa estrutura danificada (frequências naturais, modos de vibração, entre outros) e devolve o estado da estrutura, isto é, quais os elementos danificados e qual a extensão do dano em cada um desses elementos.

A figura 1.3 mostra um exemplo de uma RNA e relaciona também cada zona da rede com a equivalente na RNB.

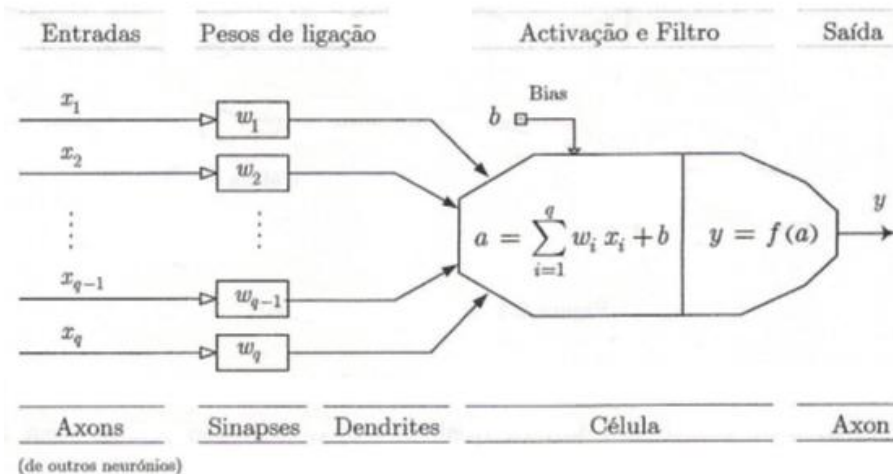


Figura 1.3 – Exemplo de uma RNA (Roseiro, 2004)

Portanto, a informação sobre a estrutura (por exemplo, frequências e modos de vibração natural) dá entrada na RNA através da camada de entradas (axons à esquerda na figura 1.3) e espera-se que a rede informe se essa estrutura está danificada, onde está danificada e qual a extensão desse dano, através da camada de saída (axons à direita na figura 1.3). A relação entre os neurónios de entrada e saída é feita por intermédio de uma rede de ligações entre estes (dendrites). Cada neurónio recebe uma soma ponderada de cada um dos neurónios da camada anterior (sinapses) e serve como entrada de cada neurónio da próxima camada.

Para que a resolução do problema seja possível, a rede é treinada de modo a reconhecer as respostas dinâmicas da estrutura intacta bem como as respostas dessa mesma estrutura com vários níveis de dano, com a vantagem de não ser necessário conhecer previamente a estrutura (Fang *et al*, 2005).

O treino da rede é efetuado por algoritmos próprios para o efeito, que podem ser classificados como algoritmos de treino supervisionado e não supervisionado. No primeiro, existe um certo número de exemplos de entradas e respetivas saídas. São depois inseridos na rede várias entradas escolhidos aleatoriamente, um de cada vez. As saídas obtidas para cada uma dessas entradas são depois comparados com aqueles que se deveria obter. Seguidamente, as ponderações das camadas internas da rede são ajustadas na tentativa de diminuir o erro entre saídas. No método de treino não controlado apenas são fornecidos à rede as entradas dos exemplos conhecidos, sendo depois classificada cada tipo de estrutura conforme as saídas obtidas. Depois, quando a rede é submetida a um teste, esta irá responder conforme a classificação do tipo de entradas da estrutura usada para teste (Masters, 1993).

Um dos algoritmos de treino mais famosos é o algoritmo da retro-propagação, que consiste na propagação do erro obtido na camada de saída (diferença entre o saída obtido pela rede e a saída esperado) pelas camadas de neurónios anteriores para ajustar as ponderações (ou variáveis de ponderação), de maneira a reduzir esse erro (Mehrojoo *et al*, 2008). Este algoritmo insere-se, portanto, no tipo de treino controlado.

1.1 Objetivos

Um dos objetivos do presente estudo passa por testar o AG e o indicador G na deteção, localização e quantificação de dano em estruturas. Na primeira fase do estudo será apenas tratada a deteção e localização do dano em duas estruturas distintas: uma viga encastrada com 1 m de comprimento; uma estrutura em treliça composta por 15 barras. Posteriormente o estudo será expandido para a quantificação de dano nessas mesmas estruturas.

Outro dos objetivos é perceber qual o comportamento do AG na resolução do presente problema, quando os dados recolhidos (frequências naturais e modos de vibração) estão contaminados com ruído, que no mundo real está praticamente sempre presente, devido a erros de medição ou outros fatores. Neste estudo, o ruído é simulado através da multiplicação dos valores alvo por um valor aleatório, muito pequeno.

Os AG encontram-se implementados no *software Matlab*®, através de uma *toolbox* específica. O *Matlab*® (cujo nome tem origem na junção das palavras "*MATrix LABoratory*") é um ambiente de computação e desenvolvimento de aplicações orientado para a realização de projetos que impliquem cálculos matemáticos complexos, integrando análise numérica, cálculo matricial, processamento de sinais e visualização gráfica (Ortigueira, 2002).

1.2 Organização da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está estruturada em 6 capítulos distintos.

O primeiro capítulo é o capítulo introdutório, onde é apresentado o tema e motivo da dissertação. São ainda descritos os principais objetivos a cumprir, assim como uma breve explicação da estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica de vários artigos científicos e livros sobre detecção, localização e quantificação de dano, AG e também Redes Neurais Artificiais (RNA), que se trata de outro método possível na detecção, localização e quantificação de dano. É também dada uma breve explicação acerca do funcionamento e parâmetros dos AG, tais como o tipo de seleção e cruzamento. O funcionamento das RNA é também mencionado neste capítulo. São apresentadas ainda algumas alterações e variantes introduzidas por diversos autores aos AG e RNA.

O capítulo 3 é apresentado o estudo realizado com o objetivo de detetar e localizar o dano em duas estruturas: uma viga encastrada e uma estrutura em treliça, utilizando o indicador *IFM* (que se trata de uma transformação do indicador *G*). Serão analisados vários cenários de dano, ou seja, diferentes elementos finitos (EF) danificados e/ou diferentes percentagens de dano.

No quarto capítulo será abordada a quantificação do dano. O número de respostas dinâmicas ideais para a detecção, localização e quantificação de dano é também testada neste capítulo, bem como a explicação de alguns acontecimentos relacionados com AG. Vários cenários de dano serão usados nos testes, semelhantes aos testes do capítulo anterior. No final deste capítulo será implementado e acrescentado ruído nos valores das respostas dinâmicas, de modo a analisar a sua influência nos resultados.

O penúltimo capítulo mostra os resultados de testes realizados à treliça formada por 15 barras, quando é utilizado o AG na avaliação de dano. Tal como nos capítulos anteriores, serão testados vários cenários de dano e será também introduzido também ruído nos valores das frequências e modos de vibração natural.

No último capítulo serão comparados os resultados obtidos nos capítulos 3, 4 e 5 e tiradas as devidas conclusões. Serão ainda feitas referências a estudos futuros que poderiam melhorar o presente estudo de detecção, localização e quantificação de dano em estruturas.

Capítulo 2

Detecção de Dano

Para resolver o problema da detecção, localização e quantificação de dano em estruturas, muitos autores recorrem às capacidades demonstradas pelos AG para a resolução de problemas de otimização. Os AG têm a capacidade de resolver qualquer tipo de problema em diversas áreas científicas, pois estes apenas trabalham com números, independentemente da sua origem ou do seu significado, e não com objetos quantificáveis ou qualificáveis (distância, massa, velocidade, etc.). O único requisito necessário para se conseguirem soluções através destes algoritmos é uma adequada função objetivo. Esta função é de extrema importância, uma vez que, se esta equação for mal definida, poderão ser encontradas soluções afastadas da solução ótima ou até não serem encontradas de todas as soluções para o problema em questão. É então evidente que cada problema necessitará de uma função objetivo própria, não podendo ser usada a mesma função para diferentes tipos de problemas.

Para o problema de otimização que diz respeito a este estudo, existem alguns indicadores de dano (criados por vários autores) que, ao receber informação sobre uma dada estrutura (tais como as respostas estáticas ou dinâmicas), indicam se existe dano presente na estrutura. Ao aliar esses indicadores a modelos de elementos finitos (EF) e aos AG, poderá ser também possível localizar e quantificar o dano. Portanto, os indicadores serão usados pelos AG como função objetivo.

2.1 Indicadores de Dano

Como foi referido anteriormente, existem várias funções objetivo possíveis de utilizar, criadas por diferentes autores. Neste capítulo, serão mencionadas alguns desses indicadores, nos quais se baseiam várias funções objetivo.

Um dos indicadores foi criado por Villalba e Laier (2012), baseado nos valores das frequências naturais e modos de vibração da estrutura, comparando os dados da estrutura danificada com aqueles obtidos através das iterações do AG. Esta função, denominada por G é definida da seguinte forma:

$$G = \sum_{j=1}^{nm} \frac{c_1}{c_2 + F_j} \quad (2.1)$$

$$F_j = \left| \frac{\omega_j^{ga} - \omega_j^{ex}}{\omega_j^{ex}} \right| + W \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{ndf} (\phi_{ij}^{ga} - \phi_{ij}^{ex})^2}{\sum_{i=1}^{ndf} (\phi_{ij}^{ex})^2}} \quad (2.2)$$

Onde:

- nm representa o número de modos de vibração considerados;
- ndf é o número de graus de liberdade na informação disponível;
- ga refere-se aos resultados obtidos pelo algoritmo genético;
- ex representa valores obtidos experimentalmente;
- ω_j é a j -ésima frequência natural;
- ϕ_{ij} é a magnitude do j -ésimo modo de vibração para o i -ésimo grau de liberdade.

A equação 2.1 torna o presente problema num problema de maximização, onde c_1 e c_2 representam constantes que tomam valores de 200 e 1, respectivamente. c_1 limita o valor do indicador, de modo a que cada membro do somatório não ultrapasse o seu valor, e c_2 evita a divisão por zero. O fator de ponderação W (que controla a influencia dos modos de vibração neste indicador) foi obtido depois de várias experiências feitas por Villalba e Laier (2012), que determinaram que este seja igual a 2.

Uma vez que o efeito do ruído nas medições experimentais é impossível de evitar, o seu efeito foi simulado pelos autores deste estudo através das seguintes equações:

$$\omega_{dr} = \omega_d \times (1 + random(-1,1) \times Noise_f) \quad (2.3)$$

$$\phi_{ijdr} = \phi_{ijd} \times (1 + random(-1,1) \times Noise_\phi) \quad (2.4)$$

Onde o índice dr retracta um valor com ruído. $Noise_f = 1\%$ e $Noise_\phi = 3\%$ são perturbações introduzidas nas frequências naturais e modos de vibração, respetivamente.

Friswell *et al* (1998) e Liu *et al* (2011) utilizam também, nos seus indicadores, diferenças entre as frequências naturais e os modos de vibração das estruturas inicial e danificada. Para os modos de vibração, estes autores utilizam uma função que recorre a um fator de correlação dos modos de vibração denominado *Modal Assurance Criterion* (MAC):

$$MAC_i = \frac{(\phi_{ai}^T \cdot \phi_{ei})^2}{(\phi_{ai}^T \cdot \phi_{ai}) \cdot (\phi_{ei}^T \cdot \phi_{ei})} \quad (2.5)$$

Este fator expressa a correlação entre o i -ésimo modo de vibração experimental, ϕ_{ei} , e o i -ésimo modo de vibração da estrutura inicial obtido analiticamente, ϕ_{ai} . Ou seja, quando $MAC = 0$ não existe correlação e quando $MAC = 1$, existe correlação total dos modos de vibração.

É vantajoso usar um indicador que compare tanto as frequências naturais como os modos de vibração, já que as frequências são mais sensíveis quando existe dano em apenas alguns elementos e os modos de vibração são mais sensíveis para casos em que o dano é generalizado (Liu *et al*, 2011).

Existe uma equação semelhante à equação (2.5) mas que utiliza valores de frequências naturais, denominada *Damage Location Assurance Criterion* (DLAC), apresentada por Messina *et al* (1998).

$$DLAC(j) = \frac{|\{\Delta f\}^T \cdot \{\delta f_j\}|^2}{(\{\Delta f\}^T \cdot \{\Delta f\}) \cdot (\{\delta f_j\}^T \cdot \{\delta f_j\})} \quad (2.6)$$

Onde $\{\Delta f\}$ é o vetor das diferenças das frequências naturais experimentais para a estrutura com um dano singular de extensão ou localização desconhecida e $\{\delta f_j\}$ é o vetor das diferenças das frequências naturais teóricas para um dano com extensão conhecida, na localização j . Portanto:

$$\{\Delta f\} = \frac{f_h - f_d}{f_h} \quad (2.7)$$

$$\{\delta f_j\} = \frac{f_h - f_{dj}}{f_h} \quad (2.8)$$

Em que f_h e f_d representam os vetores das frequências naturais da estrutura sem dano e com dano, respetivamente, e f_{dj} representa o vetor das frequências naturais teóricas para um dano

com extensão conhecida, na localização j . De notar que a divisão por f_h tem como objetivo a normalização dos valores.

A formulação da equação (2.6) aplica-se a casos em que existe apenas um dano singular. No estudo realizado por Messina *et al* (1998), os autores conseguiram adaptar esta função a casos onde existe dano em mais que um elemento da estrutura em estudo. A nova função denomina-se *Multiple Damage Location Assurance Criterion (MDLAC)* e está definida da seguinte forma:

$$MDLAC_f(\{\delta D\}) = \frac{|\{\Delta f\}^T \cdot \{\delta f(\{\delta D\})\}|^2}{(\{\Delta f\}^T \cdot \{\Delta f\}) \cdot (\{\delta f(\{\delta D\})\}^T \cdot \{\delta f(\{\delta D\})\})} \quad (2.9)$$

Em que $\{\delta D\}^T = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ é um vetor onde todos os n elementos da estrutura estão representados com uma certa percentagem de dano, que varia entre 0 e 100%.

Desta forma, o vetor das diferenças das frequências naturais teóricas para uma dada combinação de dano com extensão conhecida define-se por:

$$\delta f(\{\delta D\}) = \frac{f_h - f(\{\delta D\})}{f_h} \quad (2.10)$$

Alguns autores (Guo & Li, 2009, Koh & Dyke, 2005, Nobahari & Seyedpoor, 2011) utilizam esta equação como função objetivo e através da sua combinação com AG, tentam procurar a combinação do vetor $\{\delta D\}$ que mais se aproxima do caso que estão a estudar. Koh e Dyke (2005) chegam mesmo a comparar a função *MDLAC* com outras funções, provando que esta é a melhor dentro das funções testadas.

Guo e Li (2009) combinam ainda a equação (2.9) com uma outra função *MDLAC* que utiliza modos de vibração, obtendo a seguinte função objetivo:

$$J = 2 - MDLAC_f(\{\delta D\}) - MDLAC_m(\{\delta D\}) \quad (2.11)$$

Em que:

$$MDLAC_m(\{\delta D\}) = \frac{|\{\Delta \Phi\}^T \cdot \{\delta \Phi(\{\delta D\})\}|^2}{(\{\Delta \Phi\}^T \cdot \{\Delta \Phi\}) \cdot (\{\delta \Phi(\{\delta D\})\}^T \cdot \{\delta \Phi(\{\delta D\})\})} \quad (2.12)$$

Onde $\{\Delta \Phi\}$ é o vetor das diferenças entre os modos de vibração da estrutura intacta e os modos de vibração experimentais para a estrutura com um dano singular de extensão e/ou localização desconhecida e $\{\delta \Phi\}$ é o vetor das diferenças entre os modos de vibração da estrutura intacta e os modos de vibração teóricos para um dano com extensão conhecida, na localização j .

Considerando a existência de ruído nas medições, e que esse ruído é conhecido e é igual a t_1 para as frequências naturais e t_2 para os modos de vibração, podem definir-se dois coeficientes:

$$w_1 = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (2.13)$$

$$w_2 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (2.14)$$

E assim, a função objetivo define-se por:

$$J = 2 - 2 \cdot w_1 \cdot MDLAC_f(\{\delta D\}) - 2 \cdot w_2 \cdot MDLAC_m(\{\delta D\}) \quad (2.15)$$

Por outro lado, Nobahari e Seyedpoor (2011) afirmam que, enquanto função objetivo, a função *MDLAC* é sensível a elementos danificados mas não a elementos não danificados, o que poderia causar detecções de dano em alguns elementos intactos. Assim, estes autores desenvolveram uma outra função que deve combinar com a função *MDLAC*. Essa função define-se da seguinte forma:

$$obj(\{\delta D\}) = \frac{1}{n_j} \cdot \sum_{i=1}^{n_f} \frac{\min(f_{Di}, f_{ai})}{\max(f_{Di}, f_{ai})} \quad (2.16)$$

Onde f_{Di} e f_{ai} são os i -ésimos componentes dos vetores $f(\{\delta D\})$ e f_a , respetivamente.

Para este caso, o ruído das medições foi simulado através da variação das frequências naturais experimentais em $\pm 0,15\%$.

Combinando a equação (2.9) e a equação (2.16), Nobahari e Seyedpoor (2011) chegaram ao seguinte indicador de dano, denominado *Efficient Correlation-Based Index (ECBI)*:

$$ECBI(\{\delta D\}) = \frac{1}{2} \left(MDLAC_f(\{\delta D\}) + obj(\{\delta D\}) \right) \quad (2.17)$$

No seu estudo, Maia *et al* (2011) utilizam as diferenças nas transmissibilidades da estrutura causadas pelo dano para criar um indicador, denominado *TDI (Transmissibility Damage Indicator)* e definido por:

$$TDI = \frac{1}{N_\omega} \cdot MRVAC(\omega) \quad (2.18)$$

$$MRVAC(\omega) = \sum_{\omega} \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M a_{\tau_{rs}}^{(j)} \cdot \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left(a_{\tau_{rs}}^{(j)} \cdot \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right) \cdot \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left(\tau_{rs}^{(j)} \cdot \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right)}, s = r + 1 \quad (2.19)$$

Em que N_ω , é o número de frequências naturais consideradas, j é a coordenada onde está aplicada uma certa força (necessária para o cálculo das transmissibilidades), M é o número de posições de aplicação dessa força, N é o número de coordenadas de medição, r e s representam coordenadas relacionadas e sucessivas e $\tau_{rs}^{(j)}$ e $d\tau_{rs}^{(j)}$ representam as transmissibilidades sem e com dano, respetivamente. Quando existem valores afetados pelo símbolo $\bar{}$ significa que se trata do seu complexo conjugado.

Este indicador utiliza a função denominada *Multiple Response Vector Assurance Criterion (MRVAC)*, que é baseada numa outra função, denominada *Response Vector Assurance Criterion (RVAC)*:

$$RVAC = \sum_{\omega} \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} d\tau_{rs}^{(j)} \cdot \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} \left(d\tau_{rs}^{(j)} \cdot \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right) \cdot \sum_{r=1}^{N-1} \left(\tau_{rs}^{(j)} \cdot \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right)} \quad (2.20)$$

Onde é somente considerada a aplicação de uma força de excitação à estrutura.

Apesar do indicador *TDI* ter revelado ser sensível à presença de danos nas estruturas, verificou-se que para situações em que o dano é muito pequeno a sua sensibilidade é reduzida. Uma vez que existe interesse em detetar o dano o mais precocemente possível (e portanto, quando a extensão é ainda muito pequena), Almeida *et al* (2011) tentaram aperfeiçoar o indicador *TDI* e criaram um outro indicador ao qual deram o nome de *Weighted Damage Indicator (WDI)*.

$$WDI = \sum_{i=1}^{10} \left(n_i \cdot \frac{sum_i^m}{N^{m+1}} \right) \quad (2.21)$$

Onde:

$$sum_i = \left(\sum_{j=1}^{n_i} MRVAC \right)_i \quad (2.22)$$

E i é o número do intervalo e n_i é o número de intervalos considerados (neste caso consideraram-se 10 intervalos).

Este indicador (*WDI*) baseia-se numa ponderação por intervalos dos valores obtidos com o indicador *MRVAC*, e tem como objetivo aumentar sensibilidade do indicador *WDI* para as situações de dano reduzido.

Denotar que os indicadores *WDI*, *TDI* e *MRVAC* são indicadores que se desconhece terem sido usados (até à data em que este estudo foi efetuado) em conjunto com AG.

2.2 Algoritmos Genéticos

Como já foi referido no capítulo introdutório, os operadores básicos de um algoritmo genético são a reprodução, cruzamento e mutação. Estes operadores, baseados na teoria da evolução de Darwin, são normalmente suficientes para resolver qualquer tipo de problema desde que os parâmetros de cada um destes operadores estejam corretamente definidos.

Para cada operador existem diferentes parâmetros. Não existe uma metodologia de escolha de parâmetros, embora uma má escolha destes possa originar más soluções ou até fazer com que o AG não convirja para uma solução. Cada parâmetro deve então ser testado de modo a que se possa observar o seu efeito na solução final do problema.

A rapidez com que o AG converge para uma solução é afetada também pelos operadores e parâmetros escolhidos, como foi comprovado por Meruane e Heylen (2011).

2.2.1 População Inicial

Os problemas de otimização resolvidos através de AG começam pela geração de uma população inicial com n membros ou indivíduos. É comum o número n manter-se constante para as várias populações geradas pelo algoritmo. Os indivíduos da população inicial são normalmente gerados aleatoriamente e cada um representa uma solução do problema.

O número de indivíduos da população inicial varia de problema para problema, podendo ser um número aleatório ou definido através de heurísticas. Ainda assim, a escolha dos indivíduos deve ser a mais diversificada possível, dentro da totalidade de soluções possíveis, de modo a expandir o intervalo de procura, numa tentativa de encontrar o ótimo global e não um ótimo local. No entanto, se a população for demasiado grande, poderá implicar um grande esforço computacional devido ao elevado número de avaliações de mérito necessários. Por outro lado, se esta for muito pequena, a diversificação de soluções avaliadas pelo AG será menor, o que pode comprometer o desempenho do algoritmo (Cardoso & Coelho, 2011).

2.2.2 Seleção

Depois de definida a população inicial, cada indivíduo é avaliado quanto ao seu mérito, através do cálculo da função objetivo. Os indivíduos com melhor mérito são selecionados, para que sejam posteriormente sujeitos aos operadores de reprodução, cruzamento e mutação, originando uma nova geração.

Existem vários métodos de seleção que realizam a mesma operação, mas de formas diferentes que podem influenciar a solução final. Dos vários métodos de seleção destacam-se a roleta e o torneio.

2.2.2.1 Roleta

Quando se utiliza a roleta como método de seleção, é atribuído a cada indivíduo de uma geração uma percentagem da roleta. Essa percentagem é proporcional ao valor de mérito (avaliado pela função objetivo) de cada indivíduo (Chou & Ghaboussi, 2001). Isto significa que um indivíduo com maior mérito terá uma maior percentagem da roleta do que um outro indivíduo com menor mérito, portanto terá maior probabilidade de ser selecionado e reproduzido.

Por exemplo, tendo uma população de 4 indivíduos supõe-se que o mérito de cada um desses indivíduos é:

- Indivíduo A – 50;
- Indivíduo B – 15;
- Indivíduo C – 30;
- Indivíduo D – 5.

A soma dos méritos destes 4 indivíduos é igual a 100. Isto significa que 50% da roleta irá pertencer ao indivíduo A, 30% irá pertencer ao indivíduo C e 15% e 5% aos indivíduos B e D, respetivamente, tal como se mostra na figura 2.1.

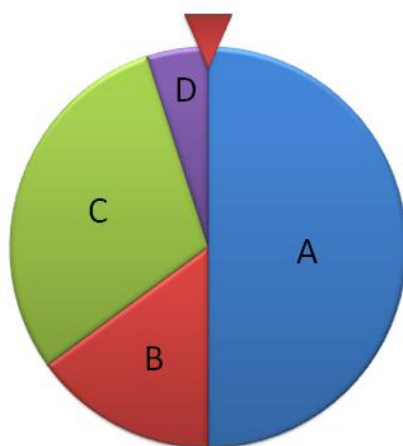


Figura 2.1 – Exemplo de uma roleta para a seleção de indivíduos de uma população

Depois de ser atribuída uma parte da roleta a cada indivíduo, esta é girada um certo número de vezes de modo a escolher os indivíduos para a reprodução. Torna-se então óbvio que qualquer um dos indivíduos da população pode ser selecionado, mas com uma probabilidade proporcional ao seu mérito.

A probabilidade p_i de um indivíduo ser escolhido para reprodução pode ser estimada da seguinte forma (Cardoso & Coelho, 2011):

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (2.23)$$

Em que n é o número de indivíduos da população e f_i o valor do mérito do i -ésimo indivíduo.

O número de vezes que a roleta é posta a girar deverá ser igual ao tamanho da população (n) e deverá ser também um número par, de forma a que no final se tenham vários pares de indivíduos para que os membros de cada par se cruzem entre si.

O método da roleta apresenta duas grandes desvantagens. Uma vez que os indivíduos com grande mérito são favorecidos com um maior número de descendentes nas gerações futuras, a diversidade irá diminuir e o AG poderá convergir prematuramente para um ótimo local. A outra desvantagem é que, mesmo que em gerações futuras ainda exista alguma diversidade, a média dos valores de mérito poderá estar próxima do valor da solução ótima, o que pode provocar a estagnação da procura do algoritmo, uma vez que as probabilidades com que os indivíduos são selecionados são muito parecidas (Cardoso & Coelho, 2011).

Estas desvantagens podem ser contornadas utilizando, por exemplo, uma técnica de ordenação (*ranking*) onde os indivíduos da população são ordenados, do pior para o melhor, mediante o seu valor de mérito. Depois de ordenados, o valor de mérito de cada indivíduo passará a ser o número da posição que ocupa na lista ordenada (Cardoso & Coelho, 2011).

2.2.2.2 Torneio

O método de seleção por torneio faz com que os indivíduos da população compitam diretamente entre si. A partir da população atual, é escolhido um número de indivíduos participantes (definido previamente) que entram num torneio e vence aquele cujo mérito é superior ao dos restantes. O vencedor é então selecionado para reprodução e consequentes fases seguintes.

A título de exemplo, supõe-se que existe uma população composta por um dado número de indivíduos. A partir desta população, são criados grupos de participantes de um torneio. Decidiu-se que o número de participantes de cada torneio é, para este exemplo, de 3 indivíduos. Estes 3 indivíduos irão competir entre si, vencendo aquele que tem maior mérito (avaliado pela função objetivo), tal como se mostra na figura 2.2

Caso se considere que o tamanho dos círculos corresponde ao mérito (maior ou menor) de cada indivíduo, pode-se observar na figura 2.2 que os indivíduos B e D vencem ambos os seus respetivos torneios devido ao seu melhor mérito quando comparados com os restantes, sendo assim reproduzidos.

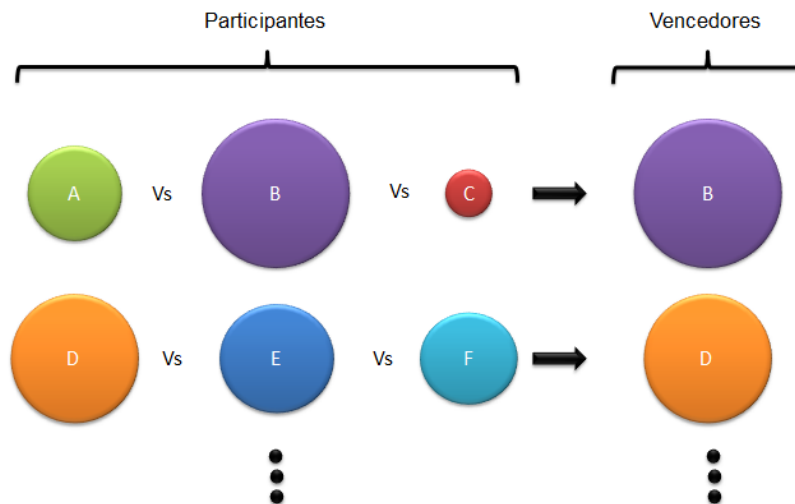


Figura 2.2 – Exemplo do método de seleção por torneio, com 3 participantes

Este método de seleção permite ajustar a diversidade da população variando o número de participantes do torneio. Um maior número de participantes aumenta a hipótese de se focar nos indivíduos com melhor mérito. Por outro lado, um reduzido número de participantes torna o processo menos seletivo, aumentando as hipóteses de um certo indivíduo com um reduzido mérito ser selecionado para reprodução (Corriveau *et al*, 2009).

O método de torneio é vantajoso relativamente ao método da roleta pois não traz problemas de convergência prematura (se o número de participantes não for elevado) nem de estagnação do algoritmo, nem requer um esforço computacional adicional devido a técnicas de ordenação ou outras.

2.2.3 Cruzamento

Após a conclusão da fase de seleção dos indivíduos é iniciada a fase de reprodução. Nesta fase, os indivíduos selecionados são emparelhados e os elementos de cada par são cruzados entre si, trocando a sua informação genética, formando um novo par de indivíduos. Aos indivíduos originais poderá ser atribuída a designação de “pais” ou “progenitores”. Os indivíduos provenientes do cruzamento dos “pais” podem ser denominados por “filhos” ou “descendentes”.

O cruzamento é um operador fundamental dos AG, na medida em que permite a criação de novos indivíduos que poderão ter um mérito maior, visto que foram gerados a partir dos melhores indivíduos da geração anterior, e assim garante-se a convergência para a melhor solução.

Contudo, nem todos os cromossomas selecionados estão sujeitos ao cruzamento. Existe uma probabilidade p_c associada a este operador sendo esta probabilidade um dos parâmetros do AG a “afinar” para aumentar o desempenho deste. Se a probabilidade de cruzamento for muito

elevada, existirá uma maior diversidade de indivíduos nas gerações futuras, o que pode ajudar na convergência do algoritmo, mas também pode prejudicá-la, pois pode destruir cromossomas que só por si tinham um mérito elevado. Se a probabilidade de cruzamento for baixa, a convergência do algoritmo tende a ser mais lenta (Cardoso & Coelho, 2011).

Tal como no operador de seleção, existem diferentes métodos de cruzamento, destacando-se o método de cruzamento simples, multiponto e uniforme, embora o tipo de cruzamento escolhido não tenha uma influência considerável no desempenho do AG, não existindo justificação para o uso de um método em vez de outro (Cardoso & Coelho, 2011).

2.2.3.1 Cruzamento Simples

Neste método de cruzamento, é escolhido aleatoriamente um número inteiro k entre 1 e $l - 1$, em que l é o número de genes do cromossoma. Serão então criados dois novos cromossomas trocando os genes entre $k + 1$ e l do primeiro cromossoma com os do segundo (Goldberg, 1989). Para melhor compreensão deste método aconselha-se a visualização do seguinte exemplo. Supondo que temos o seguinte par de cromossomas “pais”, compostos por genes de notação binária: $[0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1]$ e $[1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1]$. Considerando que se escolhe aleatoriamente um número k inteiro entre 1 e $l - 1 = 5$ e se obtém $k = 3$, então os novos indivíduos, ou “descendentes”, serão definidos por: $[0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1]$ e $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1]$.

2.2.3.2 Cruzamento Multiponto

Este método de cruzamento é semelhante ao cruzamento simples, com a diferença que, neste caso, os cromossomas são divididos por mais que um ponto. É então necessário gerar dois números inteiros aleatórios k_1 e k_2 , onde $k_1 \in [1, l - 2]$ e $k_2 \in [k_1, l - 1]$. Utilizando os mesmos cromossomas do exemplo para o cruzamento simples, $[0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1]$ e $[1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1]$, se $k_1 = 2$ e $k_2 = 4$, os cromossomas descendentes serão: $[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]$ e $[1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1]$.

2.2.3.3 Cruzamento Uniforme

Neste tipo de cruzamento, os genes de cada cromossoma são trocados mediante a geração de um vetor v de comprimento igual ao dos cromossomas e composto por números binários. O primeiro cromossoma “filho” receberá os genes do primeiro ou segundo progenitor quando o valor do membro correspondente do vetor v for igual a 0 ou 1, respetivamente, sendo o segundo cromossoma “filho” gerado da mesma forma, mas usando o inverso de v . Utilizando uma vez mais os cromossomas dos exemplos anteriores, se $v = [1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1]$, então os cromossomas descendentes serão $[0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1]$ e $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1]$.

Este tipo de cruzamento denomina-se uniforme pois a probabilidade de cada membro do vetor v ser 0 ou 1 é idêntica e igual a 50%. Existe um outro tipo de cruzamento muito semelhante ao cruzamento uniforme, denominado cruzamento ponderado, em que as probabilidades de cada membro do vetor v ser 0 ou 1 não é sempre 50% (Corriveau *et al*, 2010). Neste caso é dada

maior importância ao cromossoma “pai” com melhor mérito, estando a probabilidade de ser escolhido um gene proveniente deste cromossoma entre 50% e 100%. Assim garante-se que um dos cromossomas gerados tenha uma maior contribuição do melhor progenitor, tendo à partida um melhor mérito que o outro cromossoma gerado.

2.2.4 Mutação

A seleção e cruzamento garantem o funcionamento do AG, permitindo a geração de indivíduos cada vez melhores, de geração em geração. No entanto, estes dois operadores podem, ao longo do seu processo, perder alguma informação genética importante, tal como um 0 ou 1 numa certa localização. A mutação tem como objetivo a proteção contra tais perdas que de outra forma seriam irrecuperáveis (Goldberg, 1989).

Este operador garante assim que a probabilidade de se atingir qualquer uma certa solução do problema nunca seja zero, auxiliando a busca pelo ótimo global (Cardoso & Coelho, 2011).

A mutação consiste em alterar o valor do gene de uma posição aleatória, com uma probabilidade p_m muito baixa (de modo a permitir que o AG convirja pois se a probabilidade fosse elevada, a diversidade dos indivíduos seria mantida). Por exemplo, no caso de um cromossoma binário, se o gene escolhido para sofrer mutação tivesse o valor 0, este seria trocado para 1, e vice-versa. Para cromossomas reais, a mutação não é tão simples mas muitas vezes escolhe-se um valor que será somado ou subtraído ao valor do gene.

2.2.5 Elitismo

Este operador garante que os melhores indivíduos da geração atual sejam copiados para a próxima geração, sem que sofram cruzamento ou mutação. O elitismo tem apenas como objetivo aumentar a velocidade de convergência do algoritmo, não sendo fundamental para o seu funcionamento.

Através deste operador garante-se que o melhor indivíduo encontrado durante o processo iterativo nunca é perdido, contribuindo para uma monótona diminuição decrescente dos valores da função objetivo, de geração em geração (Cardoso & Coelho, 2011).

No entanto, se o melhor indivíduo se repetir ao longo de várias iterações, a diversidade da população diminui pois poderão existir várias cópias deste cromossoma, podendo o algoritmo ser levado a convergir para um ótimo local. Para contrariar este efeito, o elitismo poderá ser utilizado apenas uma vez dentro de um certo número de iterações do algoritmo (Cardoso & Coelho, 2011).

2.2.6 Modificações do Algoritmo Genético

A seleção, cruzamento e mutação constituem o grupo de operadores fundamentais para o funcionamento do AG, enquanto o elitismo tem apenas a função de ajudar a convergência do algoritmo, tornando-a mais rápida. Não estando satisfeitos com o desempenho do algoritmo genético simples, alguns autores propõem algoritmos genéticos modificados, numa tentativa de obter melhores resultados e/ou uma convergência mais rápida. Algumas das modificações feitas ao AG simples são aqui mencionadas.

Villalba e Laier (2012) propõem, no seu método de detecção e avaliação de dano em estruturas, um cromossoma múltiplo, isto é, cada indivíduo da população é representado por 3 cromossomas, o primeiro cromossoma toma valores reais entre 0 e 1 e representa a extensão do dano em cada elemento, o segundo é um cromossoma binário que mostra a existência de dano (1 representa um elemento danificado e 0 um elemento são). O terceiro cromossoma, de valores reais, define os parâmetros do algoritmo genético (probabilidade de cruzamento e de mutação) para os dois primeiros cromossomas, uma vez que neste método apresentado, os parâmetros são também considerados variáveis a otimizar e não são introduzidos pelo utilizador do método.

Neste estudo, destaca-se a modificação introduzida por Nobahari e Seyedpoor (2011), que criaram dois novos operadores ao algoritmo genético simples, o operador de “saúde” e o operador de “simulação”.

O operador de “saúde” (*health operator*) pode ser explicado da seguinte forma: numa estrutura, o número de elementos danificados é normalmente muito inferior ao número de elementos sem dano; este operador é aplicado, com uma dada probabilidade, a cada geração do algoritmo genético, e considera que alguns elementos são elementos não danificados. O objetivo deste operador é acelerar a convergência do algoritmo. Por exemplo, tendo uma população inicial de 30 cromossomas para identificar dano numa estrutura de 20 elementos, existem $20 \times 30 = 600$ genes. Se a probabilidade de aplicar o operador de “saúde” for de 0,08, então um número total de $0,08 \times 600 = 48$ genes deve assumir-se como não danificado.

Por outro lado, através do operador de “simulação”, os melhores cromossomas das duas gerações anteriores são comparadas e é criado um novo cromossoma a partir destes. Os autores explicam o funcionamento deste operador através do seguinte exemplo: assume-se que cada cromossoma tem 12 genes e que estes podem ter valores reais entre 0 e 0,5, de 0,05 em 0,05; considera-se que os melhores cromossomas das duas últimas gerações são os cromossomas mostrados na figura 2.3; considera-se também que o cromossoma 1 corresponde a uma solução melhor que o cromossoma 2.

Gene number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chrom 1	0.25	0.50	0.20	0.25	0.30	0.25	0.15	0.10	0.0	0.5	0.25	0.05
					+							
Chrom 2	0.35	0.50	0.20	0.20	0.30	0.25	0.15	0.15	0.1	0.4	0.25	0.10
New Crom	0.25	0.50	0.20	0.30	0.30	0.25	0.15	0.10	0.0	0.5	0.25	0.0

Figura 2.3 – Funcionamento do operador de simulação (Nobahari & Seyedpoor, 2011)

O novo cromossoma, que se pode observar na figura 2.3, é formado da seguinte forma:

- Os genes cujos valores são idênticos em ambos os cromossomas mantêm-se no novo cromossoma. São os casos dos genes 2, 3, 5, 6, 7 e 11;
- Se o valor do gene do cromossoma 1 é menor que o valor do gene correspondente do cromossoma 2, então esse valor é reduzido em 0,05, com uma probabilidade de $1/n_j$, em que n_j é o número de genes diferentes nos cromossomas 1 e 2 e portanto, neste caso, $n_j = 6$ (os genes 1, 4, 8, 9, 10 e 12 são diferentes). Se o gene for igual a zero, então o seu valor não se altera;
- Se o valor do gene do cromossoma 1 é maior que o valor do gene correspondente do cromossoma 2, então esse valor é aumentado em 0,05 (para este caso), com uma probabilidade de $1/n_j = 1/6$. Neste caso, se o valor do gene for igual a 0,5, então o seu valor mantém-se.

Depois de testado, se o novo cromossoma for mais adequado do que o cromossoma 1, então o cromossoma 2 é substituído pelo cromossoma 1 e por sua vez, o cromossoma 1 é substituído pelo novo cromossoma. Esta operação é executada até que o novo cromossoma não seja melhor que o cromossoma 1. Quando isto acontece, um cromossoma aleatório da geração é substituído pelo cromossoma 1 e o procedimento normal é posto em prática, sendo criada uma nova geração. Se na nova geração os cromossomas são melhores que os da geração anterior, então o operador de simulação é ativado, caso contrário o pior cromossoma da nova geração é substituído pelo melhor cromossoma das gerações anteriores.

2.3 Redes Neurais Artificiais

Uma alternativa aos AG são as redes neurais, já mencionadas no capítulo introdutório desta dissertação. Estas redes simulam as redes neurais biológicas do cérebro humano, possuindo neurónios artificiais ligados entre si de modo a receber uma dada informação de um problema e devolver a sua resposta.

O tipo de rede mais utilizado é a rede multicamadas (*Multilayer Perceptron – MLP*) (Doebbling *et al*, 1996, Mehrjoo *et al*, 2008) que, tal como o nome indica, é composta por várias camadas de

neurónios. Normalmente, as redes neuronais usadas para detetar, localizar e quantificar dano em estruturas têm 3 camadas de neurónios (camadas de entrada, saída e intermédia).

A camada de entradas é a responsável por receber os dados referentes ao problema, isto é, no presente estudo (deteção, localização e quantificação do dano) poderão ser as características dinâmicas de uma estrutura. No seu estudo, Mehrjoo *et al*, 2008 utilizam frequências naturais e modos de vibração como dados de entrada da rede, enumerando várias vantagens tais como as frequências naturais representarem o comportamento global da estrutura, enquanto os modos de vibração representam características locais, e estes dados podem ser obtidos tanto por via experimental como por via analítica. Bakhary *et al* (2007) usam também as frequências e modos de vibração natural da estrutura enquanto Lee *et al* (2005) usam apenas os modos de vibração ou o rácio entre os modos da estrutura antes e após ter sido danificada. Por seu turno, Fang *et al* em 2005 usa funções de resposta à frequência (FRF) para avaliar dano numa estrutura pois estas são fáceis de obter em tempo real e requer um número pequeno de sensores de medição, quando se objetiva a monitorização do estado da estrutura.

Ao receber os dados de entrada, espera-se que a rede neuronal devolva a resposta do problema através da camada de saída, que no presente problema poderão ser os EF danificados e a percentagem de dano ou até o estado de todos os EF da estrutura (esperando obter 0% de dano nos elementos intactos).

A relação entre a camada de neurónios de entrada e saída será feita através de uma ou mais camadas intermédias ou escondidas, compostas por um certo número de neurónios cuja quantidade deve ser descoberta por tentativa e erro (Mehrjoo *et al*, 2008). A figura 2.4 exemplifica um destes neurónios.

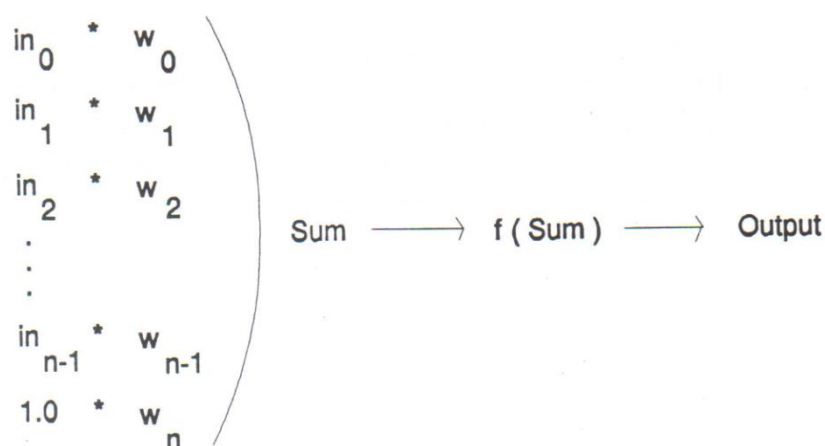


Figura 2.4 – Representação de um neurónio de uma camada interna (Masters, 1993)

Nestas camadas, os dados recebidos por cada neurónio (que na figura correspondem ao vetor $in_i = \{in_0, in_1, \dots, in_{n-1}\}$) sujeitos a ponderações (representadas na figura pelo vetor $w_i = \{w_0, w_1, \dots, w_{n-1}, w_n\}$) e o resultado de cada manipulação destes dados é então somado. De

notar que o vetor dos fatores de ponderação tem mais um valor que o vetor de entradas. O fator de ponderação “a mais” vai estar relacionado com um valor de entrada assumido que terá sempre um valor unitário e é denominado por desvio ou *bias* (Masters, 1993).

Esta soma é depois introduzida numa função de ativação, denominada por $f(\text{Sum})$ na figura 2.4. A saída de cada neurónio das camadas intermédias e da própria camada de saída é determinado através destas funções. A maioria dos estudos recentes utiliza uma função sigmoide (um exemplo de uma função sigmoide é a função logística representada na equação 2.24), mas outras poderão ser usadas (Masters, 1993).

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.24)$$

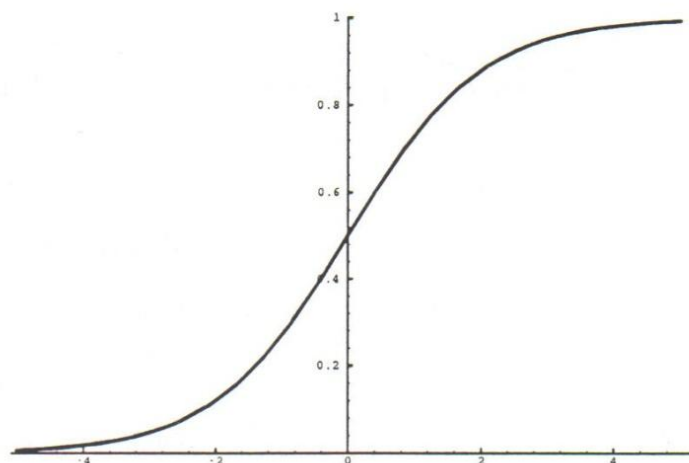


Figura 2.5 – Gráfico da função logística (equação 2.24)

As RNA permitem resolver problemas de deteção, localização e quantificação de dano em estruturas (ou outros problemas) pois estas têm a capacidade de serem treinadas para o fazer, fazendo previsões do resultado baseadas em casos conhecidos previamente e apresentados à rede.

O treino da rede é efetuado através do ajuste dos fatores de ponderação presentes nos neurónios das camadas intermédias e de saída. Este ajuste é efetuado utilizando um conjunto de entradas e correspondentes saída previamente conhecidos e através da diminuição do erro da seguinte função (Fang *et al.*, 2005):

$$E = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n (o_i^{(p)} - t_i^{(p)})^2 \quad (2.25)$$

Em que t é o vetor de saída previamente conhecido (ao qual se pretende chegar), o representa o vetor de saída obtido pela rede, p é o número de padrões de treino (entrada e respetivas

saídas previamente conhecidos) utilizados e n representa o tamanho dos vetores. Por outras palavras, o treino da rede efetua-se dando a esta um conjunto de entrada e , por sua vez, a rede devolve os resultados das saídas. Estes resultados são depois comparados com as saídas previamente conhecidos (e que correspondem às soluções das entradas dados à rede) através da equação 2.25. Depois, com base no valor do erro obtido nesta equação, os valores das ponderações são ajustados na tentativa de diminuir esse erro e portanto, de aproximar a rede aos resultados pretendidos e também de generalizar a rede para qualquer caso (estrutura danificada, no presente estudo) que se queira estudar (Mehrjoo *et al.*, 2008). É importante salientar que não se deve reduzir demasiado o erro pois, na situação limite do erro ser igual a zero, a RNA iria funcionar como uma função de interpolação e perderia a sua capacidade de generalização (Fang *et al.*, 2005). Este processo é repetido várias vezes, até que o valor do erro seja inferior a um certo valor estipulado previamente.

O ajuste das ponderações dos neurónios é efetuado por um algoritmo de treino. Devido à sua simplicidade, o tipo de algoritmo de treino mais utilizado é o algoritmo de propagação inversa do erro (Kao & Hung, 2003). Este tipo de algoritmo engloba o método do gradiente, que se pode explicar através da busca do maior passo descendente do gradiente do erro, em direção ao mínimo (Fang *et al.*, 2005). No entanto, Fang *et al.* (2005) afirmam que este método (ao qual dá a denominação de *Standard Steepest Descend Algorithm – SSD*) tem as desvantagens de poder ficar “preso” em mínimos locais, ser sensível às condições iniciais, ter uma convergência lenta e poder tornar-se instável se η_k (que representa a taxa de aprendizagem da rede neuronal) for demasiado elevado. Na tentativa de tornar estas desvantagens menos evidentes, os autores apresentam algumas alternativas baseadas neste método: o método dinâmico do gradiente (*Dynamic Steepest Descend Algorithm – DSD*), o método difuso do gradiente (*Fuzzy Steepest Descend Algorithm – FSD*) e o método ajustável do gradiente (*Tunable Steepest Descend Algorithm – TSD*).

No *SSD*, os fatores de ponderação são atualizados da seguinte forma:

$$W(k) = W(k - 1) - \eta_k \cdot \frac{\partial E(k)}{\partial W(k - 1)} \quad (2.26)$$

Em que k representa a iteração.

Enquanto no *SSD* a taxa de aprendizagem η_k é constante, no *DSD* a taxa de erro entre duas iterações consecutivas é considerado importante na busca pela solução correta e a taxa de aprendizagem η_k varia conforme esta taxa de erro da seguinte forma:

- Se o treino teve sucesso e o erro diminuiu e se a taxa de erro é menor que um certo valor ε (definido previamente), então:

$$\eta_k = \eta_{k-1} \times c_1 \quad (2.27)$$

Em que $c_1 > 1$ é a constante de controlo do incremento definida previamente;

- Se o treino não teve sucesso e o erro aumentou, então:

$$\eta_k = \eta_{k-1} \times c_2 \quad (2.28)$$

Em que $0 < c_2 < 1$ é a constante de controlo do decremento definida previamente;

- Se não se verificar qualquer diferente no erro, então:

$$\eta_k = \eta_{k-1} \quad (2.29)$$

O *FSD* funciona de maneira semelhante ao *DSD* com a diferença de que tanto o erro como a taxa de erro não têm um valor certo mas sim um valor difuso (que deve cumprir certas regras definidas previamente). Este método pode ser complexo se não se tiver um conhecimento prévio da teoria da lógica difusa.

O *TSD* utiliza heurísticas para restringir a taxa de aprendizagem e funciona da seguinte forma:

- Se o treino teve sucesso então:

$$\eta_k = \eta_{k-1} \times c_1^* \quad (2.30)$$

Em que $c_1^* > 1$ é a constante de controlo do incremento definida previamente;

- Se o treino não teve sucesso e o erro aumentou, então:

$$\eta_k = \eta_{k-1} \times c_2^* \quad (2.31)$$

Em que $0 < c_2^* < 1$ é a constante de controlo do decremento definida previamente;

- As ponderações só serão atualizadas se o erro decrescer, ou seja, se o novo erro for superior ao anterior, as novas ponderações são descartadas e a taxa de aprendizagem decresce ao ser multiplicada por c_2^* .

Desta forma, o *TSD* permite aumentar a velocidade de aprendizagem, mantendo a taxa de aprendizagem o maior possível e a aprendizagem estável.

Neste estudo não serão testadas as capacidades das RNA para detetar e avaliar o dano em estruturas. No entanto, em estudos futuros, este será certamente um método a ter em conta, tal como as suas possíveis modificações e adaptações.

Capítulo 3

Testes de Localização do Dano

Numa tentativa de provar o bom desempenho dos algoritmos genéticos na detecção de dano em estruturas, foram realizados vários testes. Os primeiros testes foram feitos simulando uma viga encastrada através do MEF, variando o número de EF considerados. Seguidamente foram efetuados testes numa estrutura em treliça com 15 EF.

Neste estudo, assumiu-se que cada EF terá 6 graus de liberdade, tal como se mostra na figura 3.1.

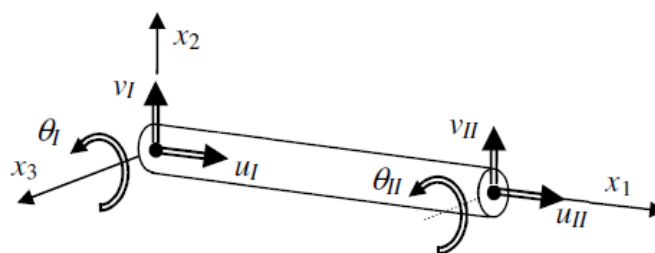


Figura 3.1 – Representação dos graus de liberdade em cada nó do EF (adaptado de Cardoso & Coelho, 2011)

Através do cálculo dos valores e vetores próprios da seguinte equação, é possível determinar as frequências naturais e os modos de vibração, respetivamente.

$$(K - \omega^2 \cdot M) \cdot \bar{\Phi} = 0 \quad (3.1)$$

Onde $\bar{\phi}$ representa a amplitude da vibração sinusoidal no grau de liberdade ϕ , ω representa as frequências naturais e K e M representam, respetivamente, as matrizes de rigidez e de massa do EF. A definição destas matrizes pode ser verificada nas equações 3.2 e 3.3.

$$K = \begin{bmatrix} \frac{A \cdot E}{L} & 0 & 0 & -\frac{A \cdot E}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \\ -\frac{A \cdot E}{L} & 0 & 0 & \frac{A \cdot E}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$M = \rho \cdot A \cdot L \times \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & \frac{11 \cdot L}{210} & 0 & \frac{9}{70} & -\frac{13 \cdot L}{420} \\ 0 & \frac{11 \cdot L}{210} & \frac{L^2}{105} & 0 & \frac{13 \cdot L}{420} & -\frac{L^2}{140} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} & \frac{13 \cdot L}{420} & 0 & \frac{13}{35} & -\frac{11 \cdot L}{210} \\ 0 & -\frac{13 \cdot L}{420} & -\frac{L^2}{140} & 0 & -\frac{11 \cdot L}{210} & \frac{L^2}{105} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Nas equações anteriores, L representa o comprimento do EF, A representa a sua área de secção, I é o momento de segunda ordem do EF, E o módulo de Young e ρ a massa volúmica.

É importante referir que as equações 3.2 e 3.3 são genéricas para qualquer EF, estando o valor de cada posição da matriz dependente das características do EF. Para obter as matrizes de rigidez e massa para toda a estrutura, é necessário efetuar a assemblagem das matrizes de cada EF que constitui essa estrutura.

A simulação do dano será feita através da diminuição do módulo de *Young* dos elementos escolhidos como danificados, sendo que para os primeiros testes, a redução foi de 50%. De notar que, neste capítulo, será testada apenas a capacidade de localização do dano na estrutura enquanto a quantificação será estudada nos capítulos seguintes.

A função objetivo escolhida para utilizar em conjunto com o AG para todos os testes realizados ao longo deste estudo foi a função G , desenvolvida por Villalba e Laier (2012), definida pelas equações (2.1) e (2.2). O ruído das medições não foi considerado nesta fase.

Ao utilizar a equação 2.1 como é apresentada, o presente problema será um problema de maximização. Como a *toolbox* do *Matlab*® dedicada aos AG trata apenas de problemas de

minimização, a função G foi transformada de modo a tornar-se uma função que torne o presente problema num problema de minimização. A essa transformação decidiu-se chamar IFM (Indicador Freqüências Modos) e é representada da seguinte forma:

$$IFM = \left(1 - \frac{G}{c1 \cdot nm}\right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

A função IFM compara os dados modais da estrutura alvo (com dano) com os dados modais obtidos para cada cromossoma das sucessivas gerações do AG, pelo que será necessário calcular previamente as frequências naturais e modos de vibração da estrutura alvo. Para isso, foi desenvolvido um programa através do *Matlab*® denominado *freq* (adaptado do programa *matef* criado por Cardoso e Coelho, em 2011), que recebe os dados da estrutura danificada em estudo, ou seja, o número de EF e os dados referentes a estes elementos (material, área de secção e momento de inércia) e, assim, calcula as frequências naturais e modos de vibração da estrutura.

Para confirmar que os valores determinados pelo programa *freq* são os corretos, foram calculadas as frequências naturais para uma viga encastrada de 15 EF utilizando este programa e também o *software* de EF *ANSYS*®. Ao analisar os resultados de ambos os métodos, concluiu-se que se obtêm resultados muito aproximados para as primeiras 5 frequências naturais, como se pode observar na tabela 3.1.

Tabela 3.1: comparação dos valores das primeiras 5 frequências naturais obtidas através do programa *freq* (*Matlab*®) e do *software* *ANSYS*®.

	1ª Freq. (Hz)	2ª Freq. (Hz)	3ª Freq. (Hz)	4ª Freq. (Hz)	5ª Freq. (Hz)
<i>freq</i> (<i>Matlab</i>®)	41,8	261,8	733,1	1293,6	1436,8
<i>ANSYS</i>®	41,8	260,9	727,3	1293,6	1415,9
Erro relativo	0	≅0,34%	≅0,79%	0	≅1,45%

Estas diferenças foram também verificadas quando se testaram ambos os métodos com estruturas em treliça. A sua existência pode dever-se ao facto de o *ANSYS*® utilizar um método de cálculo de EF diferente daquele implementado no programa *freq*.

Uma vez que a diferença dos valores das frequências naturais calculadas por ambos os métodos é reduzida (tendo em conta a proporcionalidade dos valores das frequências naturais), concluiu-se que os valores obtidos pelo programa *freq* são válidos e poderão ser utilizados no problema da deteção de dano, desde que todos os dados modais utilizados para comparação sejam provenientes deste programa.

Os dados modais calculados pelo programa *freq* são escritos num ficheiro de dados, que será posteriormente utilizado como ficheiro de dados de entrada da função *damage_loc* (desenvolvida também no programa *Matlab*®). Esta função *damage_loc* foi desenvolvida para ser utilizada como função objetivo (*fitness function*) para a *toolbox* do *Matlab*®.

Na *toolbox* de otimização do *Matlab*®, mais propriamente na componente de AG, são definidos todos os operadores e parâmetros do algoritmo, tais como o tamanho da população inicial, os métodos de seleção e cruzamento, probabilidades de cruzamento e mutação e o critério de paragem do algoritmo.

3.1 Procedimento de Teste

O procedimento de testes é o seguinte:

1. O programa *freq* recebe um ficheiro de dados (escrito previamente) que contém todos os dados referentes à estrutura danificada em estudo (estrutura alvo) e calcula as frequências naturais e modos de vibração referentes a essa estrutura;
2. Os dados modais calculados pelo programa *freq* são então escritos num novo ficheiro de dados que será lido pela função *damage_loc*, utilizada pela *toolbox* do *Matlab*® como *fitness function*. Este ficheiro contém também os dados referentes à estrutura alvo, tal como o ficheiro de dados anterior;
3. A *toolbox* do *Matlab*® gera várias combinações de dano a aplicar nas estruturas de teste e através da função *damage_loc* calcula as frequências e modos de vibração natural para cada uma dessas estruturas, através do programa *freq* que foi adaptado e implementado nesta função; o dano é simulado através da variação (entre 0 e 100%) do módulo de elasticidade de cada EF;
4. Os novos dados modais das estruturas de teste são introduzidos na função de mérito e comparados com as frequências naturais e modos de vibração da estrutura alvo recebidos previamente pela função, sendo o mérito da combinação de dano avaliado pelo indicador *IFM*;
5. O processo repete-se a partir do passo 3, até ser atingido o critério de paragem do algoritmo.

Note-se que estamos perante um problema de otimização sem constrangimentos, em que a variável a otimizar será o módulo de elasticidade de cada EF, onde o indicador *IFM* será utilizado como função objetivo, como foi referido anteriormente. Matematicamente, o presente problema formula-se da seguinte forma:

\min_E	$IFM(E)$
Sujeito a	$0 < E_{EF} \leq 100\%$

Uma vez que o objetivo desta fase do estudo é apenas localizar o elemento danificado, optou-se por utilizar cromossomas do tipo binário devido à facilidade de criar uma codificação do dano na estrutura. A combinação de dano não é mais que um cromossoma binário composto por genes, e cada um dos genes codifica um EF da estrutura. Se um gene apresentar um valor igual a 1, significa que o seu EF correspondente está danificado. Consequentemente, um gene com valor igual a 0 representa um elemento são.

Na localização de dano, quando um gene gerado pelo AG tem um valor igual a 1 (danificado), o módulo de elasticidade do elemento correspondente será alterado automaticamente para metade, sendo assim simulado o dano de 50% nesse elemento.

Os parâmetros e operadores do AG utilizado foram idênticos em todos os testes deste capítulo, foram definidos na *toolbox* de otimização do *Matlab®* e são mostrados na tabela 3.2.

O número máximo de iterações e o número de iterações sem alterações significativas dizem respeito ao critério de paragem do algoritmo, isto é, o AG para a sua busca pela melhor solução quando são atingidas 400 iterações ou quando não se regista uma diferença significativa nos valores da função objetivo nas últimas 50 iterações.

Tabela 3.2: operadores e parâmetros do algoritmo genético para os testes ao AG para localização de dano.

Método de Seleção	Torneio (3 participantes)
<i>Fitness Scaling</i>	<i>Rank</i>
Nº de Indivíduos Escolhidos por Elitismo	2
Método de Cruzamento	Multiponto (2 pontos)
Probabilidade de Cruzamento	90%
Probabilidade de Mutação	2%
População Inicial	200
Nº Máximo de Iterações	400
Nº de Iterações s/ Alterações Significativas nos Valores da Função Objetivo	50

3.2 Viga Encastrada

Os primeiros testes ao AG utilizando a função objetivo e valores já mencionados foram efetuados numa viga encastrada com 15 EF (de tamanho idêntico), semelhante à que está representada na figura 3.2.

A viga considerada tem 1 m de comprimento, uma área de secção de $0,00125 \text{ m}^2$, momento de segunda ordem de $2,60417 \times 10^{-7} \text{ m}^4$, módulo de *Young* de 210 GPa e massa volúmica de 7850 kg/m^3 .

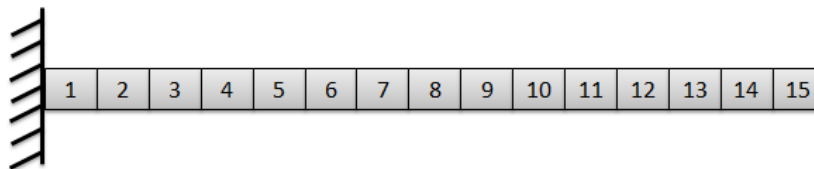


Figura 3.2 – Viga encastada de 15 EF

Foram realizados 5 testes idênticos, utilizando a metodologia anteriormente descrita, de modo a testar a eficácia do AG. Em todos os casos, o elemento 7 foi o único elemento escolhido como elemento danificado.

Em todos os testes realizados, foram utilizadas as primeiras 5 frequências naturais e modos de vibração. As frequências naturais da viga sem dano podem ser comparadas com as frequências naturais dessa mesma viga mas com dano (tabela 3.3).

Tabela 3.3: erro relativo entre as frequências naturais da viga de 15 EF, com e sem dano.

15 EF			
	Sem Dano	Com Dano	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	41,775864	40,818640	≅2,29
2ª Freq. Natural (Hz)	261,806556	248,771381	≅4,98
3ª Freq. Natural (Hz)	733,098831	723,324415	≅1,33
4ª Freq. Natural (Hz)	1293,639535	1243,787671	≅3,85
5ª Freq. Natural (Hz)	1436,788534	1391,875361	≅3,13

Verificou-se que, para os testes realizados a esta viga, o algoritmo identificou com êxito o elemento danificado, tal como se mostra na figura 3.3.

Relativamente à convergência do algoritmo, foram obtidos os resultados mostrados na figura 3.4. Nesta figura, observa-se o andamento do mérito do melhor indivíduo ao longo das sucessivas gerações (pontos pretos em cada gráfico da figura) e a média do mérito de todos os indivíduos das sucessivas gerações (pontos azuis em cada gráfico da figura).

A figura 3.4 revela que a convergência do algoritmo foi bastante rápida em todos os 5 testes, encontrando a solução ótima nas primeiras iterações, como se pode constatar pela localização dos pontos pretos em cada gráfico. O critério de paragem que foi ativado foi o da inexistência de diferenças significativas do resultado da função objetivo nas últimas 50 iterações.

Posteriormente foram realizados outros testes para a mesma viga encastrada em tudo idênticos aos testes anteriores exceto no número de EF (que foi aumentado para 20, 25, 50, 60, 75 e 100 EF) e, obviamente, no EF escolhido como danificado. Com o aumento do número de EF da viga, mantendo o seu comprimento inicial, simula-se um dano cada vez menor que provocará diferenças menores nos dados modais da estrutura, dificultando a tarefa do AG. O resultado desses testes é mostrado nas tabelas 3.4 a 3.9.

Analisando os resultados, pode concluir-se que quando o número de EF em que a viga foi dividida é pequeno (20 e 25 EF) o AG demonstra um excelente desempenho, convergindo rapidamente para a solução ótima, como se pode observar pelas tabelas 3.4 e 3.5.

Quando o número de EF aumenta para 50, o AG apresenta um desempenho muito bom, pois em 9 dos 10 testes efetuados, este consegue convergir rapidamente para a solução ótima (tabela 3.6). No teste nº 7, o AG identifica erradamente dois elementos como estando danificados, não identificando o elemento 25 como danificado (como seria de esperar).

Observando a tabela 3.7, confirma-se o bom desempenho do AG, agora para 60 EF, embora tenha sido ligeiramente pior do que para o caso de 50 EF. Em 8 dos 10 testes realizados, foi encontrada a solução certa, no teste nº 5 o algoritmo identificou como danificado o elemento imediatamente antes ao elemento danificado. Embora não seja o ideal, o facto de o AG identificar como danificado um elemento numa vizinhança muito próxima do ponto correto apesar do número elevado de elementos revela um grande potencial do uso deste algoritmo na deteção e localização de dano. No entanto, no 8º teste, o AG identificou erradamente dois elementos como danificados, um dos quais bastante longe do elemento realmente danificado.

Nos casos de 75 e 100 EF, apenas uma pequena minoria dos testes teve sucesso na correta identificação do elemento considerado danificado (tabelas 3.8 e 3.9). No entanto, na maioria dos testes em que o algoritmo não encontrou a solução correta, este identificou como danificados elementos da vizinhança do elemento danificado, o que demonstra, uma vez mais, a potencialidade do uso do AG na deteção e localização de dano.

Em alguns destes testes, o AG detetou dano em elementos intactos localizados na extremidade da viga. Isto explica-se pois qualquer dano localizado na extremidade de uma viga encastrada tem uma influência muito pequena nos valores das frequências naturais e modos de vibração da viga e portanto, influencia muito pouco o valor final da função objetivo. Deste modo é muito difícil para o AG quantificar corretamente o dano nesta zona.

O facto de o AG não conseguir detetar corretamente o dano quando o número de EF é elevado pode estar relacionado com o facto de os valores das frequências naturais e modos de vibração serem muito parecidos, quando estão danificados elementos de uma vizinhança. Observe-se a tabela 3.10, que mostra as frequências naturais da viga de 15 elementos, quando os elementos 6, 7 e 8 estão danificados, individualmente, assim como as frequências naturais

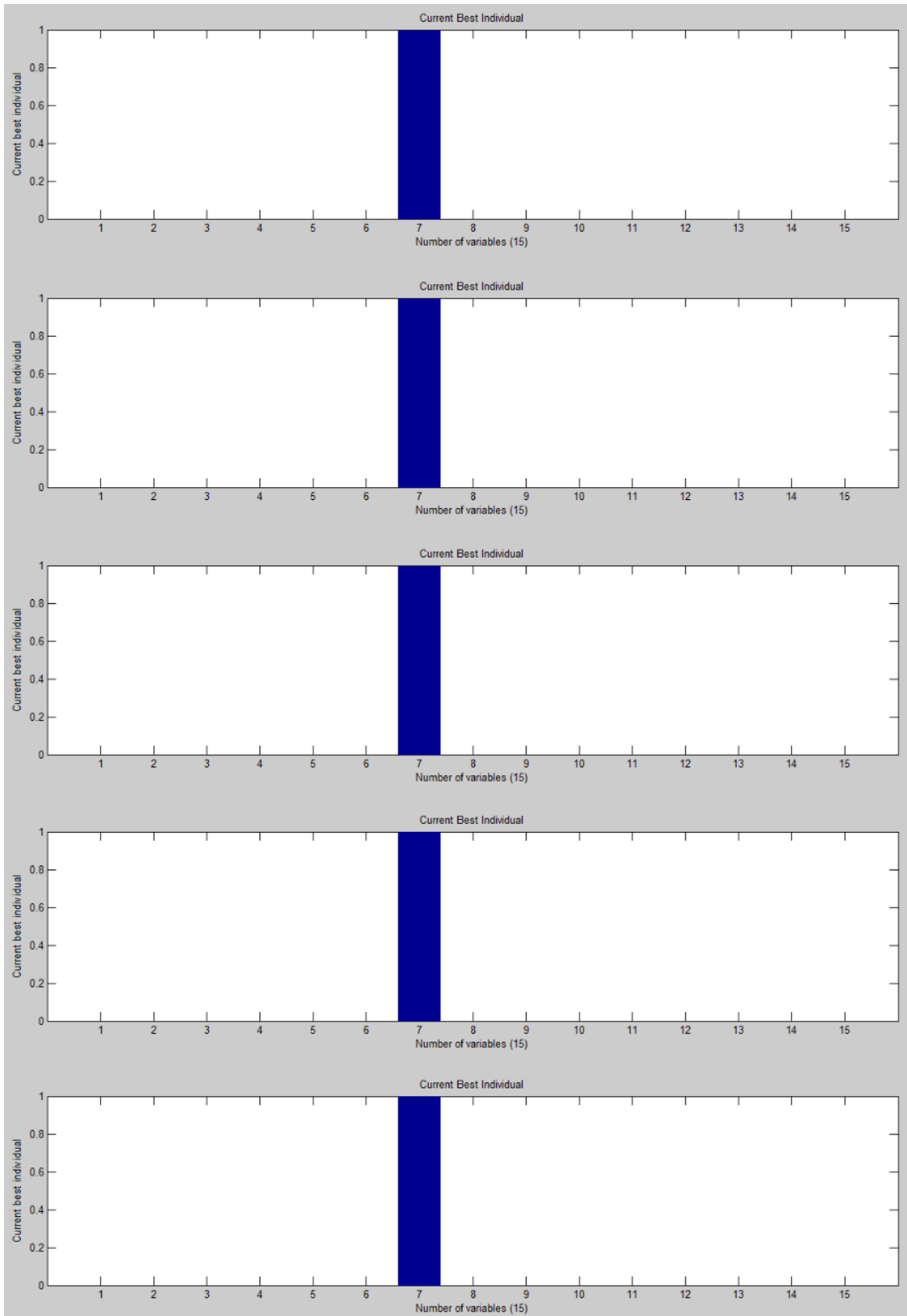


Figura 3.3 – Resultados gráficos dos 5 testes realizados à viga encastrada com 15 EF, onde o elemento 7 foi considerado danificado

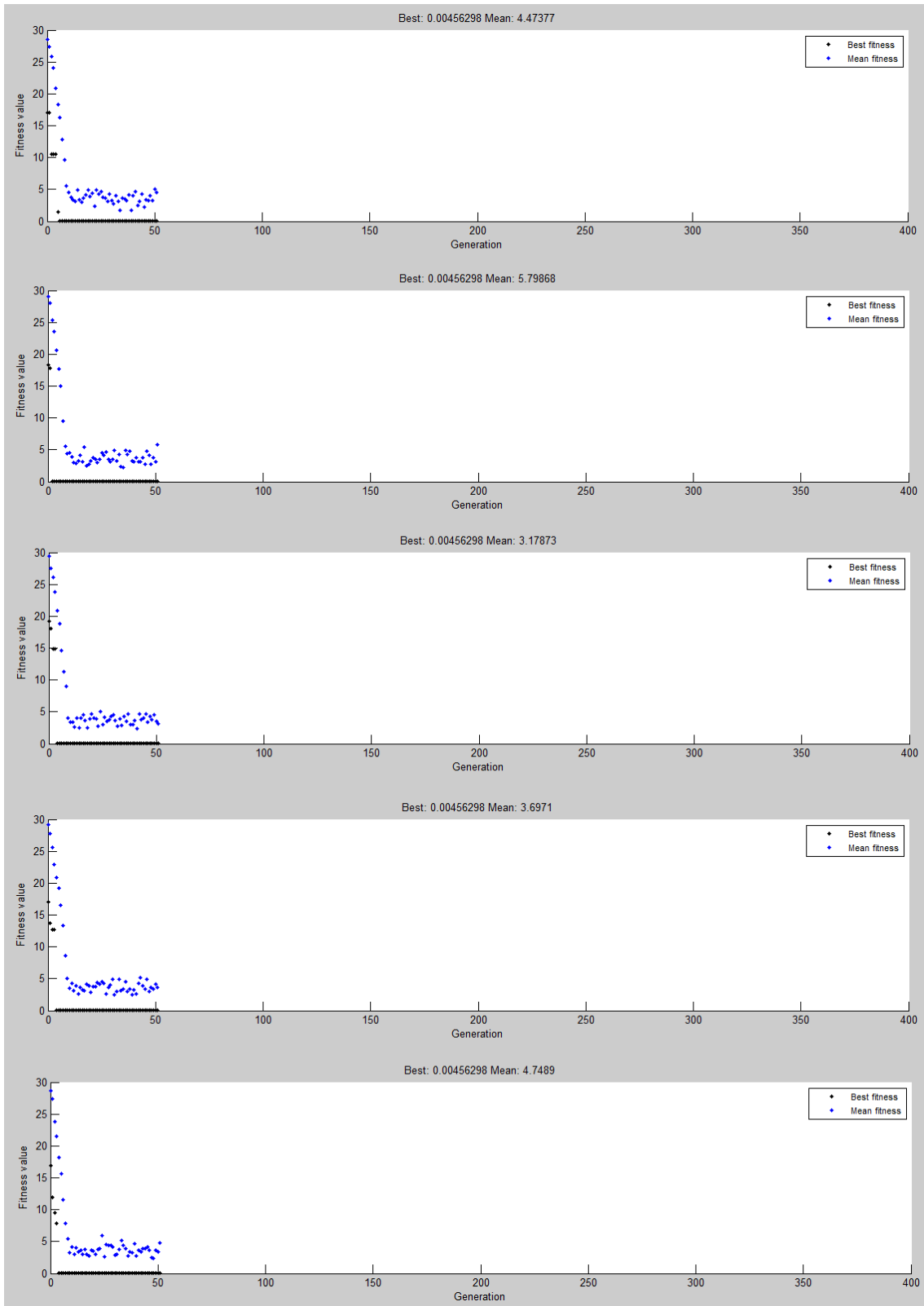


Figura 3.4 – Resultado gráfico da convergência do algoritmo genético, para os 5 testes realizados à viga encastrada com 15 EF, onde o elemento 7 foi considerado danificado

Tabela 3.4: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 20 EF.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
20 EF	1	10	10	51
	2	10	10	51
	3	10	10	51
	4	10	10	51
	5	10	10	51
	6	10	10	51
	7	10	10	51
	8	10	10	51
	9	10	10	51
	10	10	10	51

Tabela 3.5: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 25 EF.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
25 EF	1	12	12	51
	2	12	12	51
	3	12	12	51
	4	12	12	51
	5	12	12	51
	6	12	12	51
	7	12	12	51
	8	12	12	51
	9	12	12	51
	10	12	12	51

da viga de 100 elementos, quando os elementos 49, 50 e 51 estão danificados, individualmente.

Foram mostrados apenas os valores das frequências naturais porque os valores dos modos de vibração não podem ser comparados diretamente, uma vez que a dimensão das matrizes para 15 e 100 EF não coincide (a matriz dos modos de vibração correspondente às estruturas de 15 e 100 EF são, respetivamente, 15x5 e 100x5).

Como se observa na tabela 3.10, quando o número de elementos é elevado, a diferença entre os valores das frequências naturais obtidos quando estão danificados elementos sucessivos de uma vizinhança é muito menos evidente do que quando o número de elementos é reduzido. Isto poderá causar dificuldade de convergência ao AG, levando-o a apontar como danificados

Tabela 3.6: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 50 EF.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
50 EF	1	25	25	51
	2	25	25	51
	3	25	25	51
	4	25	25	51
	5	25	25	51
	6	25	25	51
	7	25	26, 50	51
	8	25	25	51
	9	25	25	51
	10	25	25	51

Tabela 3.7: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 60 EF.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
60 EF	1	30	30	64
	2	30	30	51
	3	30	30	51
	4	30	30	51
	5	30	29	51
	6	30	30	51
	7	30	30	51
	8	30	31, 59	51
	9	30	30	51
	10	30	30	51

elementos intactos, uma vez que o AG se baseia nestes valores.

Os valores das diferenças das frequências naturais explicam-se porque, ao aumentar o número de elementos, o dano será menor, apesar da redução em 50% do módulo de elasticidade em ambos os casos. Isto é, se se dividir uma viga de 1 m em 15 EF idênticos, estes terão um comprimento de 66,67 mm, e se se dividir a mesma viga em 100 EF idênticos, cada um terá 10 mm de comprimento (considera-se igual a área de secção em ambos os casos). Assim é evidente que o dano será maior se se reduzir 50% do módulo de elasticidade de uma porção de 66,67 mm de comprimento do que se reduzir a mesma percentagem do módulo de elasticidade numa porção de 10 mm de comprimento.

Tabela 3.8: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 75 EF.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
75 EF	1	36	36, 73	54
	2	36	33, 74	51
	3	36	36	63
	4	36	35, 75	51
	5	36	35	64
	6	36	37, 75	60
	7	36	36	56
	8	36	35, 75	53
	9	36	37	60
	10	36	37	51

Tabela 3.9: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 100 EF.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
100 EF	1	50	50	78
	2	50	48, 99	72
	3	50	50, 93, 99	58
	4	50	50	74
	5	50	49, 99	96
	6	50	51, 67, 96	54
	7	50	50, 100	92
	8	50	51	75
	9	50	36, 50, 86, 100	76
	10	50	50	76

A diminuição do dano com o aumento do número de EF confirma-se se se observar o erro relativo entre as frequências naturais da viga com e sem dano, para os diferentes casos estudados. O erro relativo entre as frequências naturais tendem a diminuir à medida que o número de EF aumenta, como se observa na tabela 3.11.

Para os testes realizados até agora, consideraram-se como critério de paragem do algoritmo os seguintes critérios:

- Número máximo de iterações sucessivas (400);
- Número máximo de iterações sucessivas (50) sem alterações significativas no valor da função objetivo.

Tabela 3.10: erro relativo dos valores das 5 primeiras frequências naturais, quando existe um dano singular em EF sucessivos, para 15 e 100 EF.

		Nº dos EF Danificados			Erro Relativo (%)	
		6	7	8	7-6	7-8
15 Elementos	1 ^a Freq. (Hz)	40,416879	41,775864	41,148836	≅3,25	≅1,50
	2 ^a Freq. (Hz)	253,465491	261,806556	246,292902	≅3,19	≅5,93
	3 ^a Freq. (Hz)	705,904751	733,098831	731,997035	≅3,71	≅0,15
	4 ^a Freq. (Hz)	1236,216412	1293,639535	1252,411141	≅4,44	≅3,19
	5 ^a Freq. (Hz)	1431,642028	1436,788534	1363,290112	≅0,36	≅5,12
100 Elementos		49	50	51	50-49	50-51
	1 ^a Freq. (Hz)	41,669647	41,676494	41,683051	≅0,02	≅0,02
	2 ^a Freq. (Hz)	259,251341	259,206737	259,173154	≅0,02	≅0,01
	3 ^a Freq. (Hz)	732,999927	733,056426	733,024961	≅0,01	≅0,0
	4 ^a Freq. (Hz)	1286,329203	1286,529056	1286,729132	≅0,02	≅0,02
5 ^a Freq. (Hz)	1422,983063	1422,674959	1422,693335	≅0,02	≅0,0	

No entanto, este último poderá causar a paragem prematura da busca pela solução ótima do problema e, portanto, o AG pode não ter tempo de identificar essa solução. De modo a perceber a que respostas poderia o algoritmo chegar se não fosse obrigado a parar tão rapidamente decidiu-se eliminar o segundo critério de paragem. Como se pode observar pela tabela 3.12, o AG conseguiu melhores resultados do que aqueles obtidos em testes anteriores, em tudo idênticos exceto no critério de paragem, como já foi explicado.

Tabela 3.11: erro relativo dos valores das 5 primeiras frequências naturais da viga sem dano e com dano, para 20, 25, 50, 60, 75 e 100 EF, em que os elementos danificados foram os elementos 10, 12, 25, 30, 36 e 50, respectivamente.

20 EF					
	1ª Freq. (Hz)	2ª Freq. (Hz)	3ª Freq. (Hz)	4ª Freq. (Hz)	5ª Freq. (Hz)
Sem Dano	41,775859	261,805373	733,073086	1293,380904	1436,596890
Com Dano	41,215581	250,239659	731,722708	1259,535802	1380,905405
E. Relativo (%)	≅1,34	≅4,42	≅0,18	≅2,62	≅3,88
25 EF					
	1ª Freq. (Hz)	2ª Freq. (Hz)	3ª Freq. (Hz)	4ª Freq. (Hz)	5ª Freq. (Hz)
Sem Dano	41,775857	261,805049	733,066018	1293,261247	1436,544117
Com Dano	41,282485	252,756386	730,761749	1264,888944	1395,179473
E. Relativo (%)	≅1,18	≅3,46	≅0,31	≅2,19	≅2,88
50 EF					
	1ª Freq. (Hz)	2ª Freq. (Hz)	3ª Freq. (Hz)	4ª Freq. (Hz)	5ª Freq. (Hz)
Sem Dano	41,775857	261,804838	733,061396	1293,101713	1436,509482
Com Dano	41,570930	256,748724	732,995798	1279,907894	1410,051782
E. Relativo (%)	≅0,49	≅1,93	≅0,01	≅1,02	≅1,84
60 EF					
	1ª Freq. (Hz)	2ª Freq. (Hz)	3ª Freq. (Hz)	4ª Freq. (Hz)	5ª Freq. (Hz)
Sem Dano	41,775856	261,804830	733,061236	1293,085465	1436,508278
Com Dano	41,606816	257,552291	733,027394	1282,125616	1414,113350
E. Relativo (%)	≅0,40	≅1,62	≅0,0	≅0,85	≅1,56
75 EF					
	1ª Freq. (Hz)	2ª Freq. (Hz)	3ª Freq. (Hz)	4ª Freq. (Hz)	5ª Freq. (Hz)
Sem Dano	41,775857	261,804826	733,061148	1293,072151	1436,507614
Com Dano	41,623411	258,505443	732,752502	1283,804810	1419,641399
E. Relativo (%)	≅0,36	≅1,26	≅0,04	≅0,72	≅1,17
100 EF					
	1ª Freq. (Hz)	2ª Freq. (Hz)	3ª Freq. (Hz)	4ª Freq. (Hz)	5ª Freq. (Hz)
Sem Dano	41,775857	261,804824	733,061106	1293,061832	1436,507301
Com Dano	41,676494	259,206737	733,056426	1286,529056	1422,674959
E. Relativo (%)	≅0,24	≅0,99	≅0,0	≅0,50	≅0,96

Tabela 3.12: resultado dos testes para a viga encastrada dividida em 100 EF, sem o critério de paragem por não existir variação significativa no resultado da função objetivo.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
100 EF	1	50	49	400
	2	50	50	400
	3	50	50	400
	4	50	49	400
	5	50	50	400
	6	50	50	400
	7	50	49	400
	8	50	50	400
	9	50	50	400
	10	50	50	400

3.3 Estrutura em Treliça

Finalizados os testes referentes à localização do elemento danificado na viga encastrada, decidiu-se testar o AG e a função *damage_loc* para uma estrutura em treliça (figura 3.6).

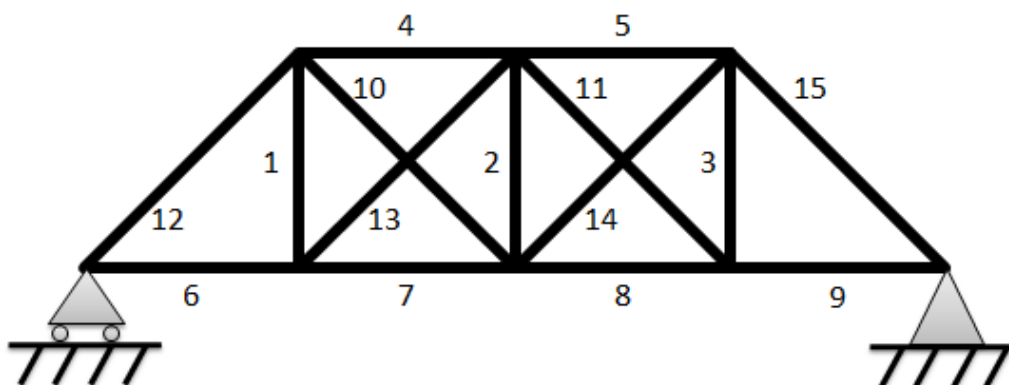


Figura 3.5 – Estrutura em treliça testada

Cada barra constituinte da estrutura tem um módulo de elasticidade igual a 200 Gpa (metade para os elementos considerados danificados), uma área de secção de $0,001 \text{ m}^2$, momento de segunda ordem de $8,33 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ e 7800 kg/m^3 de massa volúmica.

Todos os testes efetuados a esta estrutura utilizaram as 5 primeiras frequências naturais e modos de vibração.

Inicialmente foram testados vários casos de dano singular, denominados por teste S1 (EF nº1 considerado danificado), teste S2 (EF nº7 considerado danificado) e teste S3 (EF nº13 considerado danificado). Foi considerado mais uma vez um dano de 50%. As frequências

naturais da estrutura em treliça intacta pode ser vista na tabela 3.13, assim como as frequências naturais para cada caso de dano.

Tabela 3.13: frequências naturais da estrutura em treliça intacta, estrutura de teste S1, S2 e S3.

	Estrutura intacta	Estrutura de teste S1	Estrutura de teste S2	Estrutura de teste S3
1ª Freq. Natural (Hz)	69,668105	66,476540	68,920333	69,388046
2ª Freq. Natural (Hz)	78,190017	76,792757	78,056383	78,129780
3ª Freq. Natural (Hz)	84,873590	84,074744	81,876102	83,799459
4ª Freq. Natural (Hz)	100,242604	97,541342	95,477263	97,683163
5ª Freq. Natural (Hz)	103,006044	102,721426	100,148126	102,206695

Os erros relativos das frequências naturais podem ser observados na tabela 3.14.

Tabela 3.14: erros relativos das primeiras 5 frequências naturais das estruturas de teste S1, S2 e S3.

	Estrutura de teste S1	Estrutura de teste S2	Estrutura de teste S3
Erro relativo da 1ª Freq. Natural	≅4,58 %	≅1,07 %	≅0,40 %
Erro relativo da 2ª Freq. Natural	≅1,79 %	≅0,17 %	≅0,08 %
Erro relativo da 3ª Freq. Natural	≅0,94 %	≅3,53 %	≅1,27 %
Erro relativo da 4ª Freq. Natural	≅2,69 %	≅4,75 %	≅2,55 %
Erro relativo da 5ª Freq. Natural	≅0,28 %	≅2,77 %	≅0,78 %

Pela observação da tabela 3.14 e pelo que se verificou anteriormente pode acreditar-se que o AG terá maiores dificuldades no teste S3 comparativamente aos testes S1 e S3, uma vez que os erros relativos são menores. Lembra-se que o indicador *IFM* usado está relacionado com as diferenças dos valores das frequências naturais e modos de vibração e quanto menor forem essas diferenças, mais difícil será a tarefa do algoritmo.

Os resultados obtidos para os casos de dano singular, são apresentados na tabela 3.15. Ao analisar esta tabela, observa-se que o AG detetou erradamente dano nos elementos 1 e 3 da estrutura, na 2ª e 4ª tentativas do teste S3. Estes erros não surpreendem pois, tal como se concluiu anteriormente ao observar a tabela 3.14, este seria o teste mais difícil e mais suscetível a falsa deteção de dano. Ainda assim, o algoritmo detetou corretamente o dano em

todos os testes, tanto no teste S3, como nos testes S1 e S2. Este facto permite supor que, com a alteração dos operadores e/ou parâmetros do AG (método de cruzamento, probabilidades de mutação e cruzamento, etc.), este deverá detetar corretamente a localização do dano.

Tabela 3.15: resultado dos testes de dano singular, para a estrutura em treliça.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
S1	1	1	1	51
	2	1	1	51
	3	1	1	51
	4	1	1	51
	5	1	1	51
	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
S2	1	7	7	51
	2	7	7	51
	3	7	7	51
	4	7	7	51
	5	7	7	51
	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
S3	1	13	13	51
	2	13	1, 3, 13	51
	3	13	13	51
	4	13	1, 3, 13	51
	5	13	13	51

Ainda para esta estrutura, foram testados mais dois casos de dano, desta vez simulando dano em mais que um elemento simultaneamente. Esses testes foram denominados M1 e M2.

No teste M1 foi simulado um dano de 50% nos elementos 1, 7 e 13 da estrutura e no teste M2 foi simulada a mesma percentagem de dano mas desta vez nos elementos 2, 6 e 11. As primeiras 5 frequências naturais referentes a estas estruturas de teste podem ser observadas na tabela 3.16 e os erros relativos na tabela 3.17.

Apesar de, no geral, o valor dos erros relativos serem maiores do que para os casos de dano singular, isto não significa que os testes sejam mais fáceis para o AG, uma vez que este tem de detetar dano não em apenas 1 EF (como acontecia anteriormente) mas sim em 3.

Uma vez mais, e tal como se pode ver na tabela 3.18, o AG provou ser um bom método para localizar dano em estruturas localizando corretamente os elementos danificados em todos os testes realizados para M1 e M2.

Tabela 3.16: frequências naturais da estrutura de teste M1 e M2.

	Estrutura de teste M1	Estrutura de teste M2
1ª Freq. Natural (Hz)	65,203373	64,535945
2ª Freq. Natural (Hz)	76,466699	74,022777
3ª Freq. Natural (Hz)	78,880034	81,131694
4ª Freq. Natural (Hz)	90,330837	94,771381
5ª Freq. Natural (Hz)	98,123006	96,444761

Tabela 3.17: erros relativos das primeiras 5 frequências naturais das estruturas de teste M1 e M2.

	Estrutura de teste M1	Estrutura de teste M2
Erro relativo da 1ª Freq. Natural	≅6,41 %	≅7,37 %
Erro relativo da 2ª Freq. Natural	≅2,20 %	≅5,33 %
Erro relativo da 3ª Freq. Natural	≅7,06 %	≅4,41 %
Erro relativo da 4ª Freq. Natural	≅9,89 %	≅5,46 %
Erro relativo da 5ª Freq. Natural	≅4,74 %	≅6,37 %

Tabela 3.18: resultado dos testes de dano múltiplo, para a estrutura em treliça.

	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
M1	1	1, 7, 13	1, 7, 13	51
	2	1, 7, 13	1, 7, 13	51
	3	1, 7, 13	1, 7, 13	51
	4	1, 7, 13	1, 7, 13	51
	5	1, 7, 13	1, 7, 13	51
M2	Nº do Teste	Nº dos EF Danificados	Nº dos EF Identificados	Nº de Iterações
	1	2, 6, 11	2, 6, 11	51
	2	2, 6, 11	2, 6, 11	51
	3	2, 6, 11	2, 6, 11	51
	4	2, 6, 11	2, 6, 11	68
	5	2, 6, 11	2, 6, 11	57

Como os resultados obtidos para a localização de dano na viga encastrada e na estrutura em treliça foram, na sua grande maioria, positivos, conclui-se que existe um grande potencial nas capacidades do indicador *IFM* e do AG para solucionar o presente problema. Por isso, decidiu-se continuar o estudo passando para o passo seguinte, a quantificação do dano, que se espera ser mais difícil, pois o algoritmo não terá de “acertar” apenas nos elementos danificados mas também na percentagem de dano.

Capítulo 4

Testes de Quantificação de Dano na Viga Encastrada

No capítulo anterior foi testada a capacidade do AG em localizar elementos danificados numa estrutura dividida em EF. O algoritmo demonstrou um desempenho muito bom para os dois modelos numéricos testados (viga encastrada e estrutura em treliça) e tanto em casos de dano singular como casos de dano múltiplo.

Para testar a capacidade do algoritmo genético quantificar a extensão do dano em cada EF de uma dada estrutura foi utilizado uma vez mais o indicador *IFM*.

Numa fase primária do estudo foram realizados vários testes ao AG utilizando este indicador, de modo a perceber que parâmetros do AG existentes no *Matlab*® permitem obter os resultados mais próximos do esperado. Os testes foram efetuados danificando o modelo numérico de uma viga encastrada com 15, 25, 50, 75 e finalmente 100 EF e permitiram concluir que os parâmetros do AG existentes no *Matlab*® mais adequados para este problema foram os seguintes:

- População inicial: 400;
- *Fitness Scaling*: Rank;
- Seleção: roleta;
- Nº de elites: 2;
- Probabilidade de cruzamento: 0,8;
- Probabilidade de mutação: 0,05;
- Tipo de cruzamento: uniforme.

Sabe-se que existe uma tendência para obter melhores resultados quanto maior for a população inicial, à custa de um maior esforço computacional e tempo de cálculo. Tendo este facto em conta, o AG foi também testado utilizando os parâmetros referidos anteriormente, mas com uma população inicial com metade dos indivíduos (200), com o intuito de verificar se é possível obter bons resultados sem ter um esforço computacional tão elevado.

Todos os testes foram realizados utilizando as primeiras 5 frequências naturais e modos de vibração da estrutura em estudo. Posteriormente, serão testados diferentes números de frequências naturais e modos de vibração, de modo a constatar a influência destes no resultado dos testes. Pretende-se ainda, com estes testes, perceber qual o tipo de cromossoma (binário ou real) que apresenta melhores resultados na resolução do problema em estudo.

No caso dos cromossomas do tipo binário, para que a quantificação do dano seja possível, será necessário codificar primariamente a percentagem de dano. Esta codificação será feita atribuindo uma percentagem de dano a um cromossoma, ou seja, uma combinação de genes. Quanto mais genes constituírem cada cromossoma, maior será a precisão na quantificação do dano mas maior será a dimensão do cromossoma. Por sua vez, a dimensão do cromossoma pode afetar o esforço computacional necessário para resolver o problema em questão.

Veja-se o seguinte exemplo, de modo a melhor compreender como a codificação e precisão afeta o número de genes; se se considerar uma estrutura com 15 EF e que cada EF da estrutura em estudo é representado por 3 genes, então existe uma totalidade de $2^{15 \times 3} \cong 3,52 \times 10^{13}$ combinações (soluções) possíveis. O problema de otimização terá $15 \times 3 = 45$ genes. Utilizando 3 genes para codificar a percentagem de dano em cada elemento, poderão ser obtidos, por exemplo, os valores mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: codificação do dano com 3 genes, quando são usados cromossomas binários.

Combinação	Quantidade de Dano (%)
0 0 0	0
0 0 1	12,50
0 1 0	25,0
0 1 1	37,50
1 0 0	50,0
1 0 1	62,50
1 1 0	75,0
1 1 1	87,5

No entanto, se se desejar uma maior precisão nos resultados, isto é, se se quiser diminuir a diferença de percentagem entre duas combinações sucessivas, será necessário aumentar o número de genes, como se verifica na tabela 4.2.

Tabela 4.2: codificação do dano com 4 genes, quando são usados cromossomas binários.

Combinação	Quantidade de Dano (%)
0 0 0 0	0
0 0 0 1	6,25
0 0 1 0	12,5
0 0 1 1	18,75
0 1 0 0	25,0
0 1 0 1	31,25
0 1 1 0	37,5
0 1 1 1	43,75
1 0 0 0	50,0
1 0 0 1	56,25
1 0 1 0	62,50
1 0 1 1	68,75
1 1 0 0	75,0
1 1 0 1	81,25
1 1 1 0	87,5
1 1 1 1	93,75

Nos testes realizados com o indicador *IFM*, a codificação de dano escolhida para a utilização de cromossomas binários é a que se mostra na tabela 4.2. Para os testes realizados com cromossomas reais, uma vez que cada gene destes cromossomas corresponde a 1 EF, o problema da codificação de dano não se coloca (o valor do gene será a percentagem de dano do elemento).

4.1 Divisão em 75 EF com 1 Dano de 50%

Os primeiros testes realizados ao AG utilizando o indicador *IFM* utilizaram um modelo numérico de uma viga encastrada com as seguintes características:

- $E = 210 \text{ Gpa}$;
- $\rho = 7250 \text{ kg/m}^3$;
- $b = 0,006 \text{ m}$;
- $h = 0,036 \text{ m}$;
- $l = 1 \text{ m}$;
- $I = 2,3328 \times 10^{-8} \text{ m}^4$;

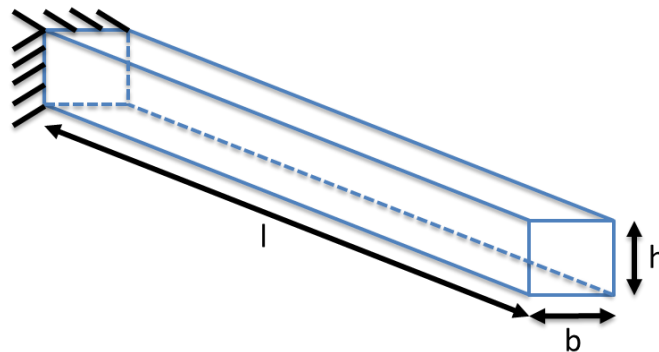


Figura 4.1 – Representação da viga encasturada

No primeiro teste, o modelo numérico da viga é constituído por 75 EF, onde se considerou como danificado o elemento 36 (sendo o elemento 1 o elemento do encastramento). O dano foi simulado, neste teste, através da redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento considerado danificado. Este é considerado o teste mais simples a efetuar na viga de 75 EF. A dificuldade dos testes será aumentada sucessivamente.

Devido à aleatoriedade característica dos AG, foram realizados vários testes com os mesmos parâmetros e características, sendo considerado no final apenas o melhor teste como aquele que será válido. Foram então realizados 6 testes utilizando cromossomas binários (o tamanho da população inicial foi de 400 para os 3 primeiros testes e 200 para os restantes) e 6 testes utilizando cromossomas reais (o tamanho da população é idêntico ao caso dos cromossomas binários).

Na tabela 4.3, são mostradas as primeiras 5 frequências naturais desta estrutura, intacta e danificada, assim como o erro relativo entre estas. Uma vez mais relembra-se que os modos de vibração não são aqui mostrados devido às dimensões da matriz.

Tabela 4.3: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 1 dano de 50%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298492	31,184165	≅0,37
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144300	193,675138	≅1,26
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209760	548,974024	≅0,04
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,232187	1063,621337	≅1,17
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,515146	1335,870419	≅0,72

4.1.1 Cromossomas Binários

Os resultados da função objetivo utilizando cromossomas do tipo binário são mostrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,333085
b2.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,362450
b3.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,333085
b4.1.50 (Pop. Inicial: 200)	0,656798
b5.1.50 (Pop. Inicial: 200)	0,692130
b6.1.50 (Pop. Inicial: 200)	0,328429

Analisando esta tabela, verifica-se que, para uma população inicial com 400 indivíduos, o melhor teste realizado foi o teste b1.1.50 (idêntico ao teste b3.1.50), pois foi o que obteve uma melhor aproximação da função objetivo (relembra-se que quando mais próximo o valor da função objetivo estiver de zero, mais próxima está a solução da correta). Para uma população inicial com 200 indivíduos verifica-se que o melhor teste realizado foi o teste b6.1.50 que, inclusive, obteve uma maior aproximação da solução correta do que o teste b1.1.50, o qual se esperava uma maior aproximação devido à maior população inicial.

Veja-se agora os resultados gráficos para ambos os testes (b1.1.50 – figura 4.2, b6.1.50 – figura 4.3). Tanto no teste b1.1.50 como no teste b6.1.50, o AG não conseguiu atingir a solução esperada mas em ambos os casos esteve bastante próximo. Observa-se que a extensão do

dano no elemento danificado não é a mesma que a esperada e que o algoritmo identificou erradamente dano em elementos vizinhos.

Foi detetado também erradamente dano num elemento da extremidade livre da viga no caso do teste b6.1.50. Tal como foi explicado no capítulo anterior, o facto de o dano na extremidade da viga ter pouca influência nos valores das frequências naturais e modos de vibração faz com que o AG tenha mais dificuldade em despistar falso dano nesta zona.

No total, o AG detetou erradamente dano em 2 EF no teste b1.1.50 e 3 no teste b6.1.50.

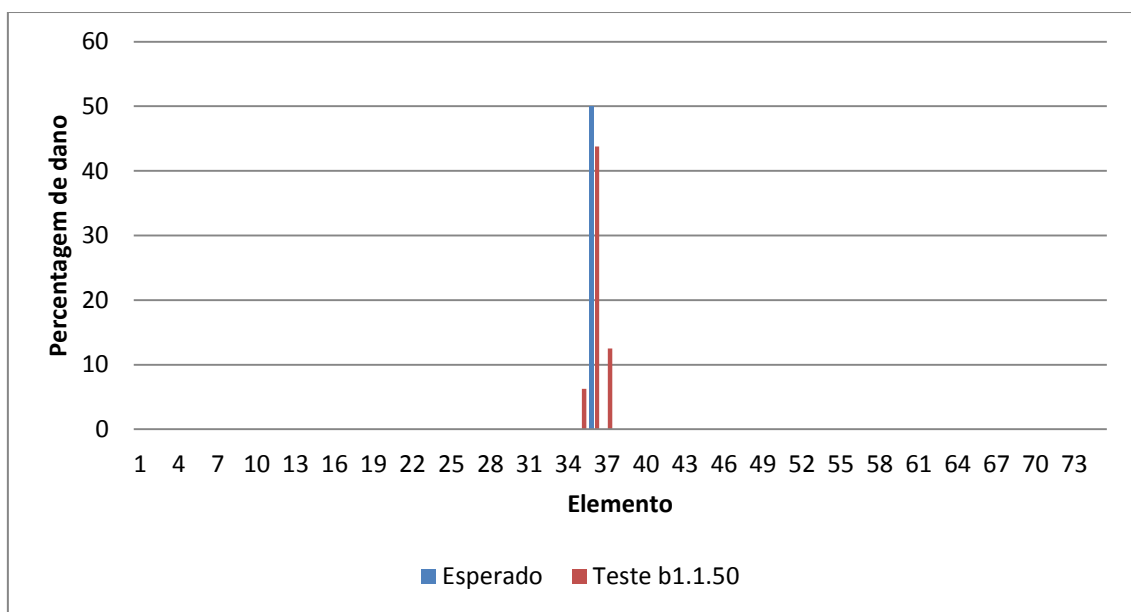


Figura 4.2 – Gráfico referente aos resultados do teste b1.1.50

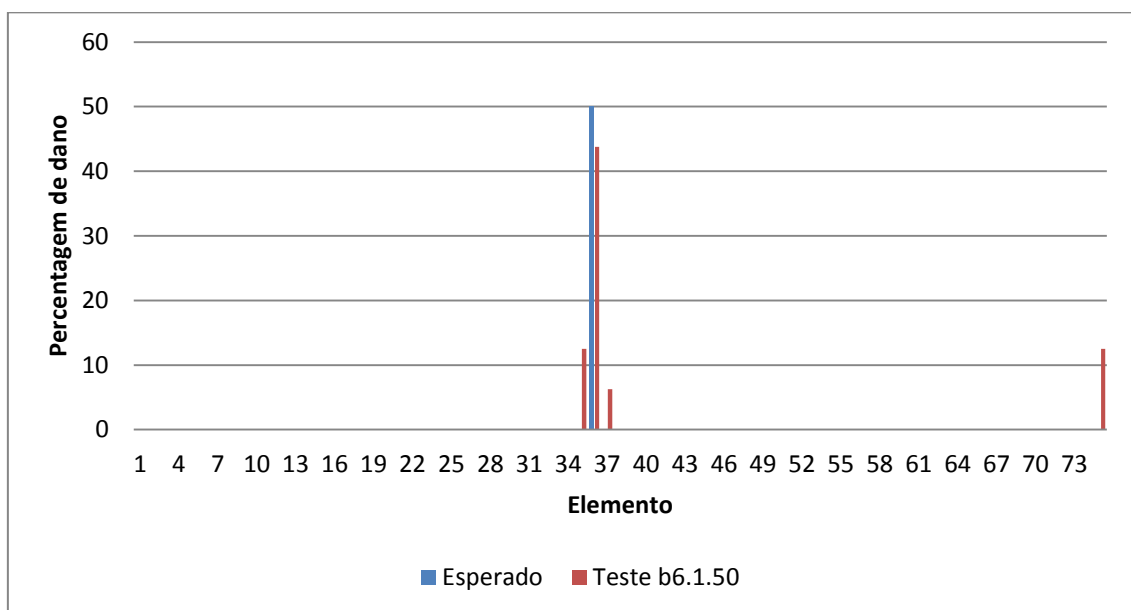


Figura 4.3 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.1.50

As figuras 4.4 e 4.5 mostram a convergência do algoritmo nos testes b1.1.50 e b6.1.50, respectivamente. Pode verificar-se que o AG chegou ao resultado final muito mais rapidamente no primeiro teste (cerca de 145 iterações) do que no último (aproximadamente 325 iterações).

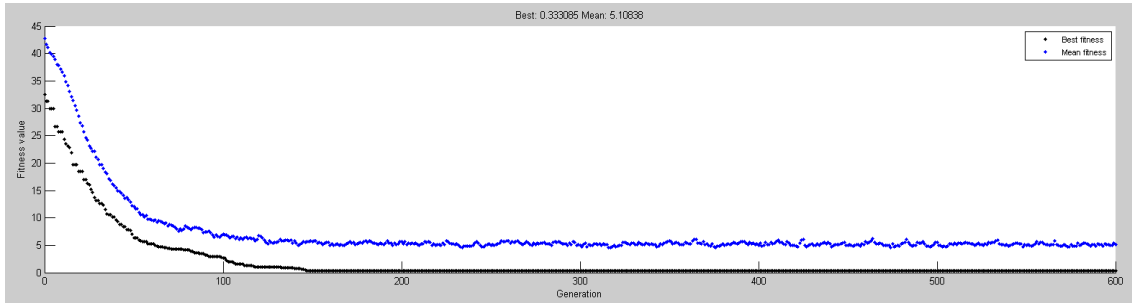


Figura 4.4 – Gráfico da convergência do AG no teste b1.1.50

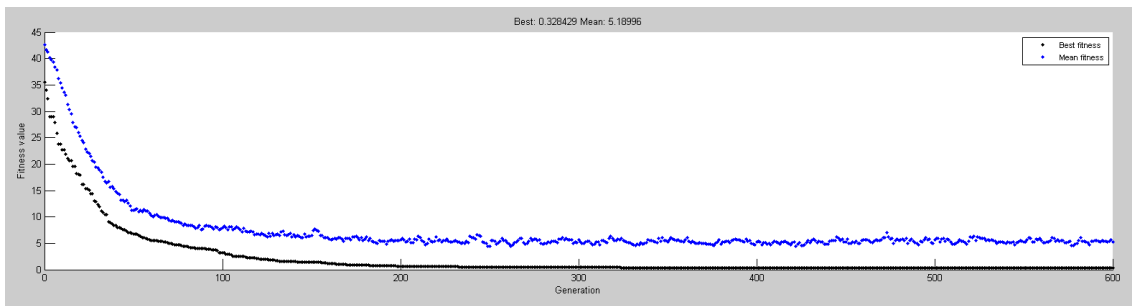


Figura 4.5 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.1.50

4.1.2 Cromossomas Reais

Utilizando cromossomas reais, foram obtidos os seguintes resultados para a função objetivo, presentes na tabela 4.5.

Tabela 4.5: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
r1.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,653942
r2.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,696091
r3.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,726859
r4.1.50 (Pop. Inicial: 200)	1,033379
r5.1.50 (Pop. Inicial: 200)	1,302636
r6.1.50 (Pop. Inicial: 200)	1,131184

Observando os resultados admite-se que os testes com melhores resultados são o teste r1.1.50 e o teste r4.1.50, devido ao menor valor da função objetivo, quando comparados com os restantes.

Conclui-se também que os resultados obtidos têm valores superiores aos obtidos com recurso a cromossomas binários. Este facto pode justificar-se porque no caso dos cromossomas reais o número de soluções é infinita (ao contrário do que acontece usando cromossomas binários), a probabilidade do AG encontrar corretamente a extensão do dano nos EF que definem a viga é muito reduzida (mas nunca igual a zero). Mesmo que o resultado seja muito próximo do esperado, vão existir sempre pequenos erros que, quando considerados num todo, irão ter uma influência considerável no resultado da função objetivo.

É também devido a estes pequenos desvios da solução esperada que se aplicou um “filtro” nos resultados obtidos com este tipo de cromossoma, tal como é possível observar nos resultados gráficos. Este “filtro” não é mais do que uma linha presente nos 3% de dano. Serão considerados como danificados apenas os elementos cuja extensão de dano seja superior a 3%, ou seja, cuja coluna do gráfico ultrapasse a linha do “filtro”.

No teste r1.1.50 o AG identificou falso dano em 1 EF e no teste r4.1.50 foram identificados danos em 13 elementos são.

Quanto à convergência, observando as figuras 4.8 e 4.9, conclui-se que o teste com a população menor convergiu mais rapidamente para a solução final, necessitando de menos de 500 iterações, enquanto no caso do teste r1.1.50 foram necessárias aproximadamente 515 iterações.

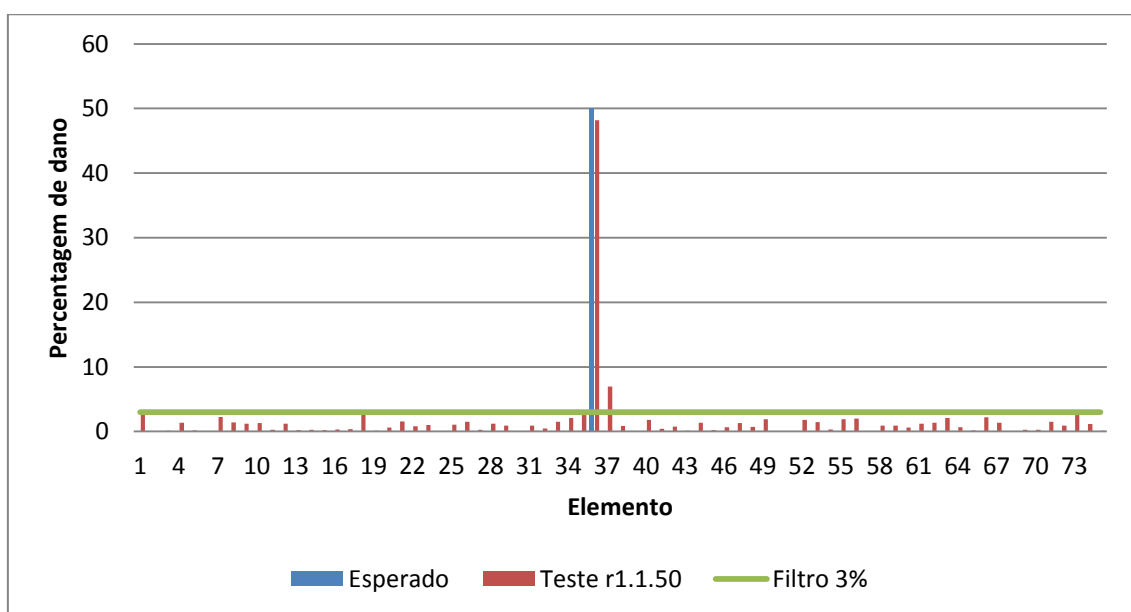


Figura 4.6 – Gráfico referente aos resultados do teste r1.1.50

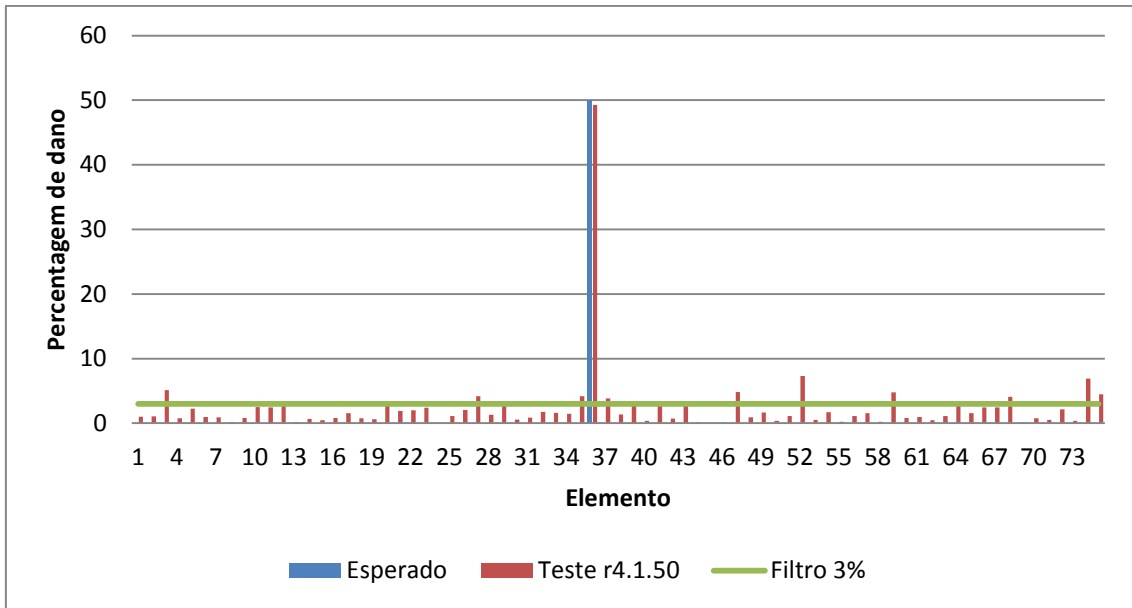


Figura 4.7 – Gráfico referente aos resultados do teste r4.1.50

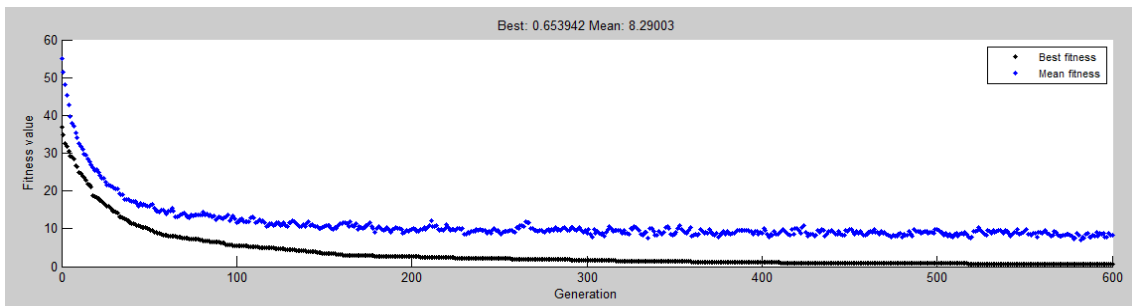


Figura 4.8 – Gráfico da convergência do AG no teste r1.1.50

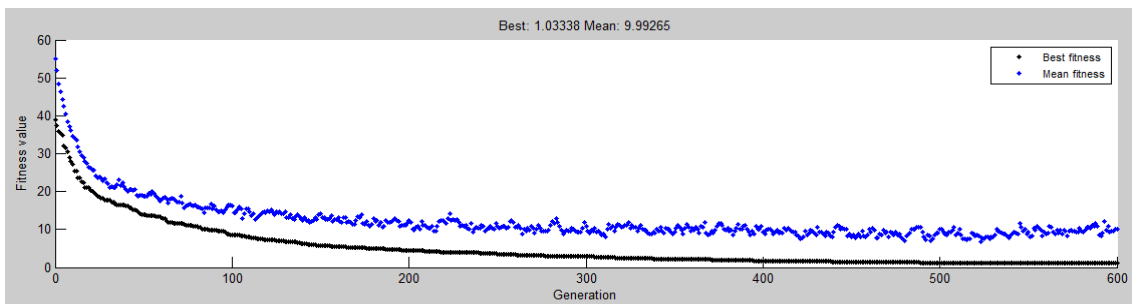


Figura 4.9 – Gráfico da convergência do AG no teste r4.1.50

4.2 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 50%

Após os testes mencionados anteriormente terem sido realizados, foram feitos novos testes em tudo idênticos aos anteriores, exceto no número de elementos danificados. Nestes testes foi considerada uma redução do módulo de elasticidade em 50% nos elementos 20, 36 e 60.

Pretende-se assim testar se o AG é capaz de resolver problemas de localização e quantificação de dano nos casos em que existe mais que um elemento danificado.

Uma vez mais são mostrados (na tabela 4.6) os valores das frequências naturais da viga com e sem dano, bem como os erros relativos respetivos.

Tabela 4.6: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 50%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298492	30,843193	≅1,45
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144300	193,045072	≅1,58
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209760	538,295279	≅1,99
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,232187	1038,694869	≅3,49
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,515146	1319,588342	≅1,93

Em comparação com a tabela 4.3, os valores dos erros relativos mostrados na tabela 4.6 são maiores. A justificação passa pelo facto de existirem mais elementos danificados nesta estrutura, logo, os valores das frequências naturais estarão mais afastadas das mesmas para a estrutura intacta. Uma vez que os erros relativos são maiores para este caso, isso não pressupõe que o AG encontre mais facilmente a solução ótima do problema, uma vez que neste caso o algoritmo terá de identificar e avaliar dano em 3 EF e não em apenas 1.

4.2.1 Cromossomas Binários

Utilizando cromossomas binários para o caso de 3 EF considerados danificados, os resultados são mostrados na tabela 4.7.

Tabela 4.7: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (IFM)
b1.3.50 (Pop. Inicial: 400)	0,506075
b2.3.50 (Pop. Inicial: 400)	1,504160
b3.3.50 (Pop. Inicial: 400)	0,373168
b4.3.50 (Pop. Inicial: 200)	1,220617
b5.3.50 (Pop. Inicial: 200)	0,828896
b6.3.50 (Pop. Inicial: 200)	0,957216

Analisando a generalidade dos valores da função objetivo e comparando os valores da tabela anterior com os valores da tabela 4.4, constata-se que a convergência para a solução correta decresceu. Estes resultados eram esperados pois ao aumentar o número de elementos danificados, aumenta também a dificuldade do AG encontrar a solução, uma vez que são mais os elementos que contribuem para alterações no valor da função objetivo e que contribuem para a dificuldade de convergência do AG.

Observando agora os resultados dos testes apenas para este caso, o teste b3.3.50 foi o melhor teste entre aqueles cujo tamanho da população inicial é igual a 400, enquanto para uma população inicial de 200 indivíduos, o melhor teste foi o teste b5.3.50. Os resultados gráficos destes testes, bem como as figuras que revelam a convergência do AG para cada teste são mostrados seguidamente (figura 4.10 a 4.13).

Analisando as figuras 4.10 e 4.11, verifica-se que quando a população inicial é menor, o número de EF intactos considerados danificados pelo AG aumenta. No teste b3.3.50 existem 2 EF cujo dano está mal quantificado, enquanto no caso do teste b3.5.50 o número aumenta para 7. Salienta-se ainda que o AG conseguiu quantificar corretamente o dano em 2 dos 3 elementos considerados danificados, isto para o teste b3.3.50. Para o teste b3.5.50, apenas foi quantificado corretamente o dano num dos EF considerados danificados.

A convergência do algoritmo para a solução foi mais rápida no teste b3.3.50, necessitando de aproximadamente 165 iterações, contra quase 200 do teste b5.3.50.

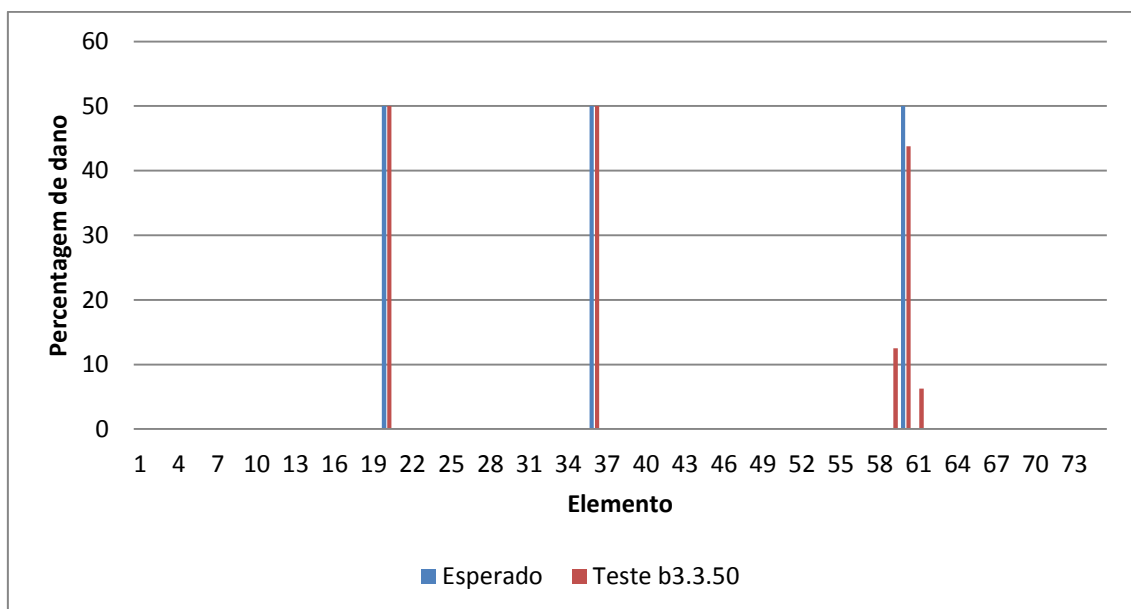


Figura 4.10 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.50

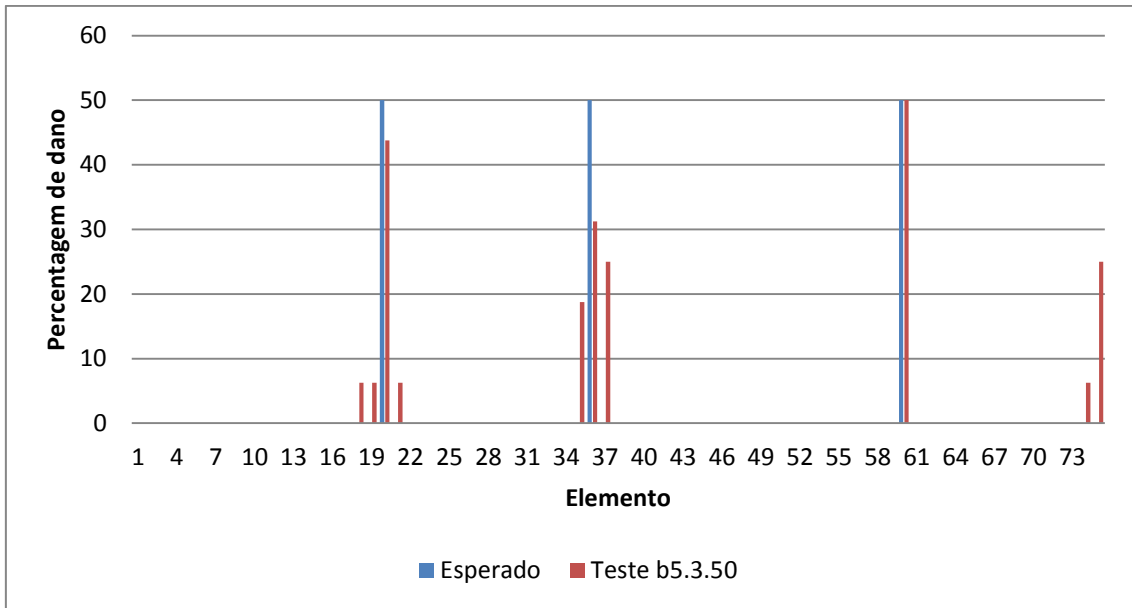


Figura 4.11 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.3.50

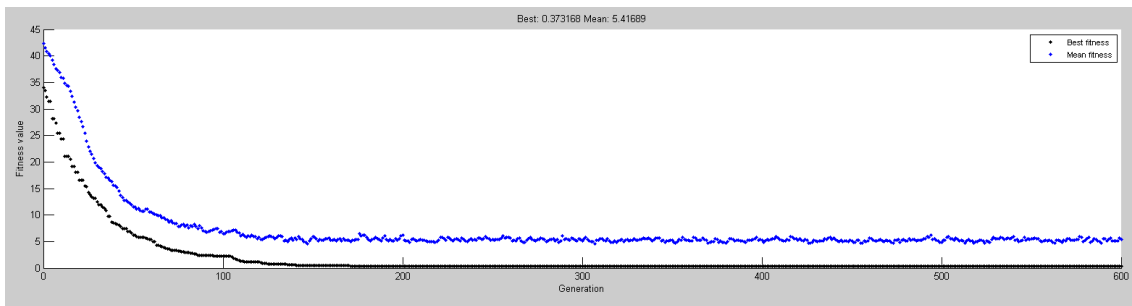


Figura 4.12 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.50

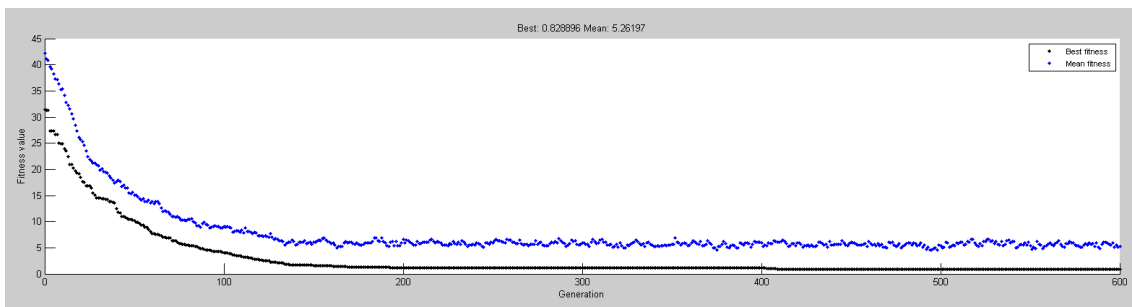


Figura 4.13 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.50

4.2.2 Cromossomas Reais

Neste caso, os resultados da função objetivo obtidos são mostrados na tabela 4.8. Ao contrário do que aconteceu ao usar cromossomas binários, observando globalmente os valores da função objetivo, pode ver-se que os resultados melhoraram neste caso, já que estes valores são menores (globalmente) do que aqueles descritos na tabela 4.5. A explicação deste acontecimento pode ser devido ao dano “residual” verificado em todos os elementos (uma vez

Tabela 4.8: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
r1.3.50 (Pop. Inicial: 400)	0,618472
r2.3.50 (Pop. Inicial: 400)	0,609663
r3.3.50 (Pop. Inicial: 400)	0,588166
r4.3.50 (Pop. Inicial: 200)	1,029676
r5.3.50 (Pop. Inicial: 200)	1,151663
r6.3.50 (Pop. Inicial: 200)	1,165220

que é muito pouco provável o algoritmo atribuir um dano igual a 0 aos elementos, dada a vastidão de resultados possíveis) que faz os valores da função objetivo aproximarem-se de zero.

Os melhores testes para este caso são os testes r3.3.50 e r4.3.50 e os seus resultados gráficos podem observar-se na tabela 4.14.

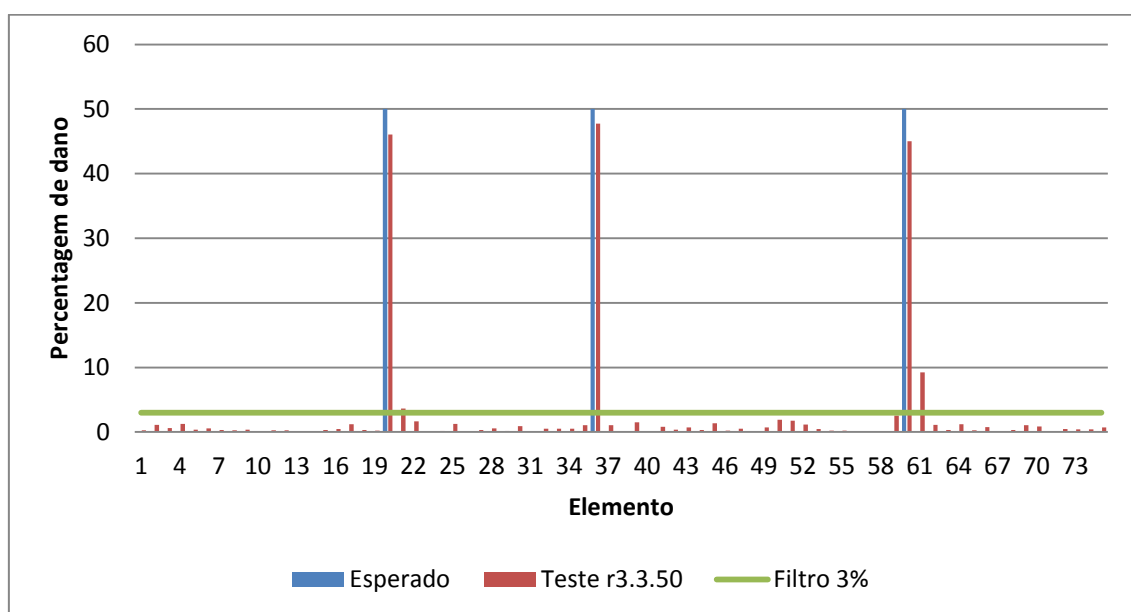


Figura 4.14 – Gráfico referente aos resultados do teste r3.3.50

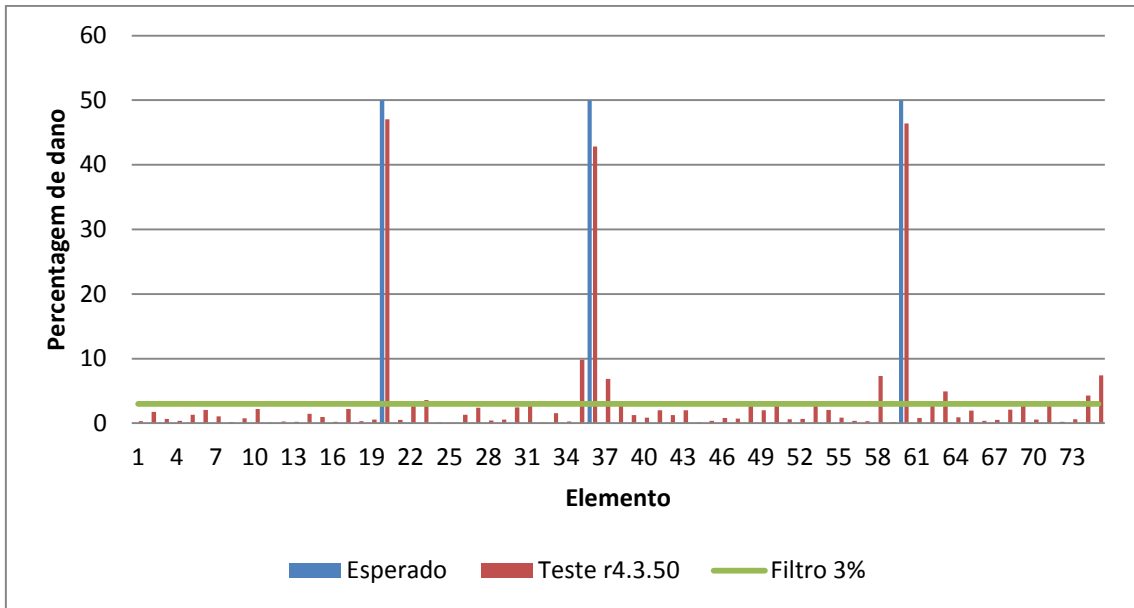


Figura 4.15 – Gráfico referente aos resultados do teste r4.3.50

Neste caso, o número de elementos danificados errados são 2 para o teste r3.3.50 e 9 para o teste r4.3.50. Como se pode observar nas figuras 4.16 e 4.17, o AG necessitou de cerca de 500 iterações para chegar ao resultado final da função objetivo com uma população inicial de 400 indivíduos e de cerca de 560 com uma população inicial de 200 indivíduos.

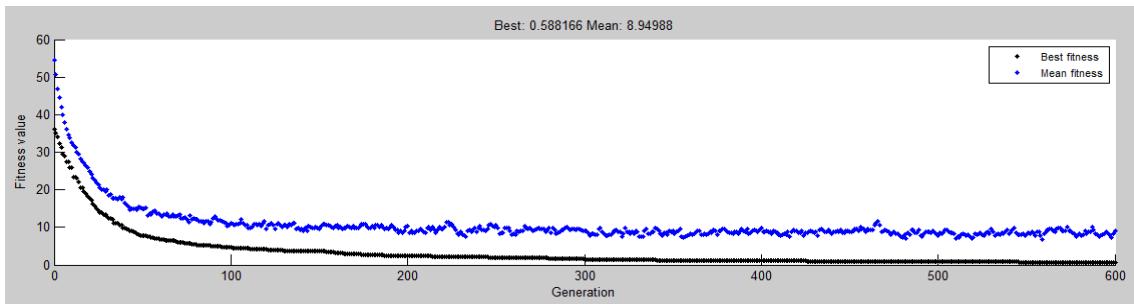


Figura 4.16 – Gráfico da convergência do AG no teste r3.3.50

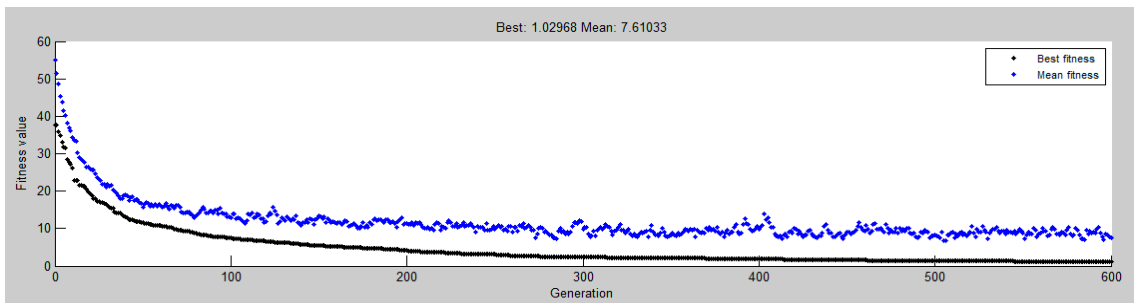


Figura 4.17 – Gráfico da convergência do AG no teste r4.3.50

4.3 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 25%

Uma vez mais, os seguintes testes foram realizados com os mesmos parâmetros e características dos anteriores, exceto a percentagem de dano, que é agora de 25%. Ao diminuir a percentagem de dano, mantendo-se o número de elementos danificados, está a aumentar-se a dificuldade do problema, que pode ser comprovado através da tabela 4.9, que mostra as primeiras 5 frequências naturais para esta estrutura e respetivos erros relativos.

Analisando estes valores repara-se que as percentagens dos erros relativos diminuem quando comparados com os valores da tabela 4.6 pois, apesar de os EF danificados serem os mesmos, têm uma percentagem de dano inferior, logo, os valores das frequências estarão mais próximas das frequências da estrutura intacta, fazendo prever o aumento da dificuldade do AG para encontrar a solução.

Tabela 4.9: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 25%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298492	31,144535	≅0,49
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144300	195,085742	≅0,54
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209760	545,481073	≅0,68
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,232187	1063,275503	≅1,20
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,515146	1336,712291	≅0,65

4.3.1 Cromossomas Binários

Os testes efetuados com recurso a cromossomas binários permitiram chegar aos resultados mostrados na tabela 4.10.

Os melhores testes realizados foram os testes b2.3.25 e b6.3.25. Salienta-se que o teste b6.3.25, cuja população inicial é de 200 cromossomas, obteve uma maior aproximação do que o teste b2.3.25, cuja população inicial é o dobro da população do anterior. Isto demonstra que apesar de a população inicial ser menor, a qualidade dos testes pode não ser de todo comprometida.

Tabela 4.10: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 25%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.25 (Pop. Inicial: 400)	0,369619
b2.3.25 (Pop. Inicial: 400)	0,358894
b3.3.25 (Pop. Inicial: 400)	0,363683
b4.3.25 (Pop. Inicial: 200)	0,386301
b5.3.25 (Pop. Inicial: 200)	0,741353
b6.3.25 (Pop. Inicial: 200)	0,304269

Quando se analisam os resultados na sua globalidade verifica-se que os valores da função objetivo são menores do que aqueles realizados no teste anterior (teste dos 3 danos a 50%, ver tabela 4.7), embora se espere que este teste seja mais difícil para o AG. A razão para os valores da função objetivo serem globalmente menores pode dever-se ao facto da menor influência do dano nas respostas dinâmicas da estrutura e, portanto, as diferenças entre as respostas dinâmicas da estrutura conhecida (estrutura considerada danificada) e da estrutura ensaiada pelo AG estarão mais próximas, sendo o erro entre elas menor.

Através das figura 4.18 e 4.19 podem-se visualizar os resultados gráficos dos melhores testes.

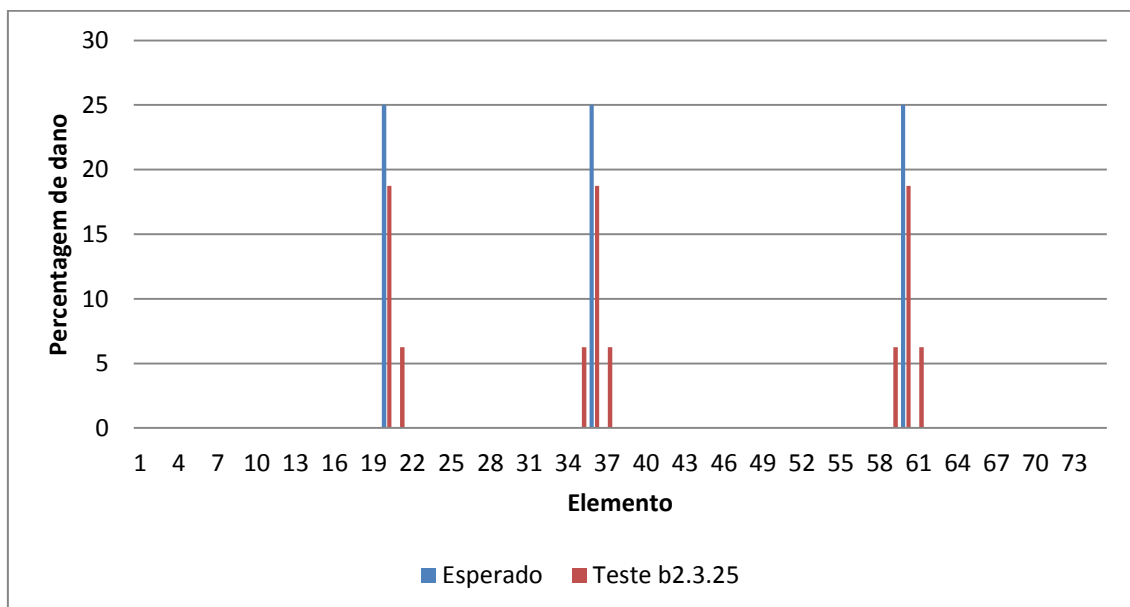


Figura 4.18 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.25

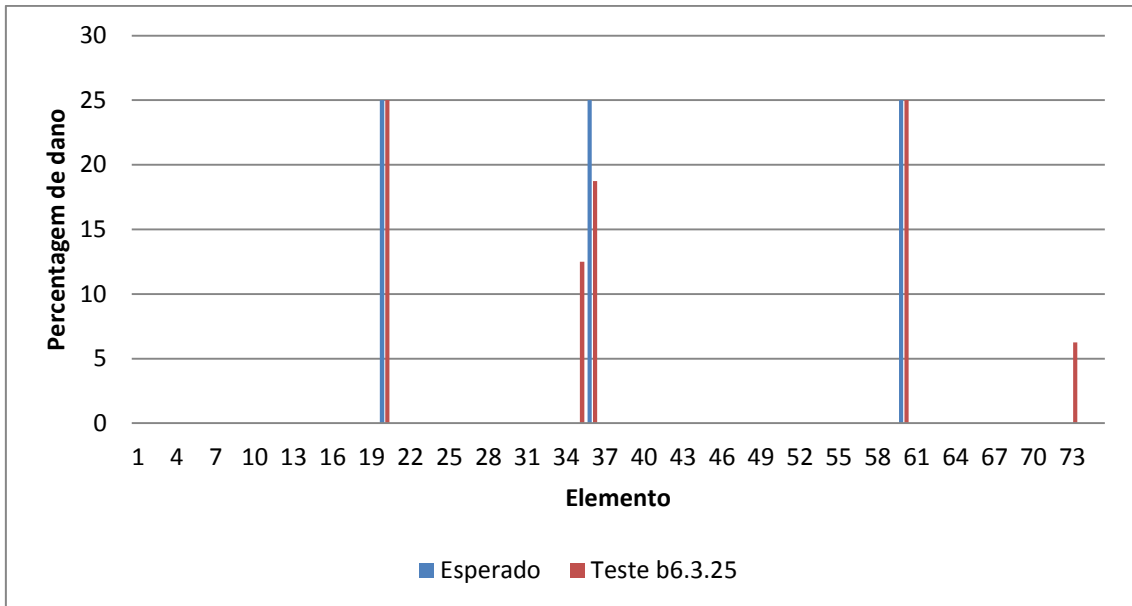


Figura 4.19 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.25

Verifica-se assim que foram dados como danificados 5 elementos intactos no teste b2.3.25 e apenas 2 no teste b6.3.25, levando a acreditar que, para este problema, uma população inicial com 200 cromossomas poderá ser suficiente para obter bons resultados (caso o rigor considerado seja ligeiramente menor).

O desempenho do AG relativamente à convergência para a solução final, nos melhores testes realizados para este caso podem ser verificados nas figuras 4.20 e 4.21.

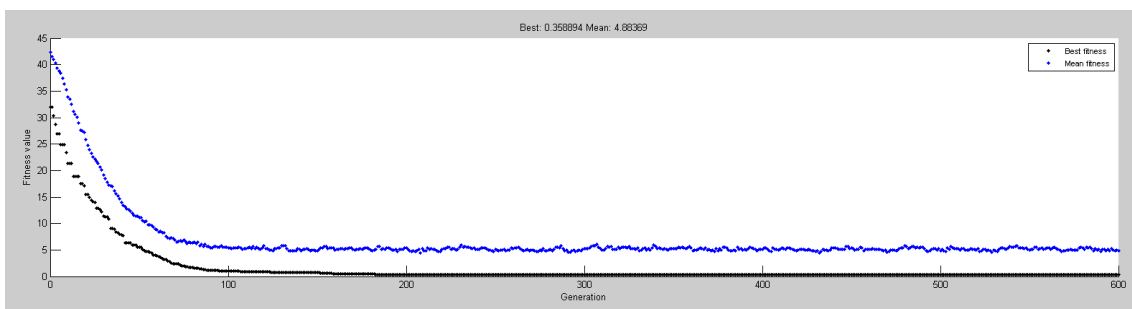


Figura 4.20 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.25

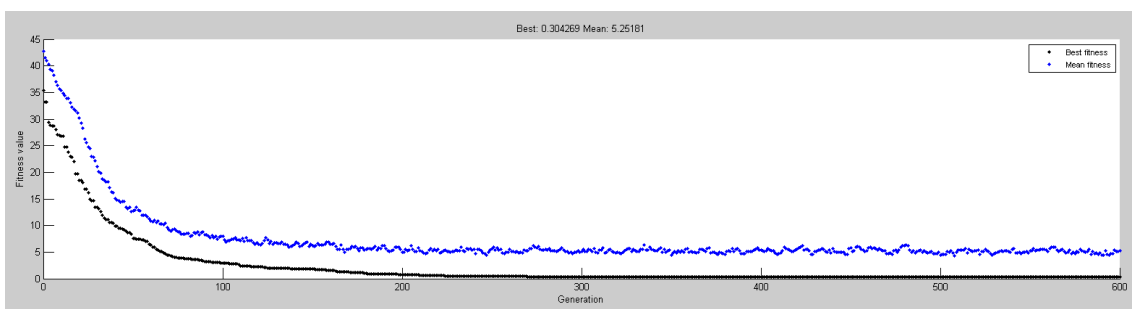


Figura 4.21 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.3.25

O AG chegou ao resultado final em aproximadamente 180 e 265 iterações, para os testes b2.3.25 e b6.3.25, respetivamente.

4.3.2 Cromossomas Reais

Os testes efetuados com recurso a cromossomas binários permitiram chegar aos resultados mostrados na tabela 4.11.

Tabela 4.11: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 25%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
r1.3.25 (Pop. Inicial: 400)	0,647571
r2.3.25 (Pop. Inicial: 400)	0,612028
r3.3.25 (Pop. Inicial: 400)	0,690839
r4.3.25 (Pop. Inicial: 200)	0,965368
r5.3.25 (Pop. Inicial: 200)	1,134758
r6.3.25 (Pop. Inicial: 200)	0,967127

Face aos resultados mostrado na tabela anterior, conclui-se que os testes a considerar são os testes r2.3.25 e r4.3.25. Os resultados gráficos relativos a estes testes são mostrados nas figuras 4.22 e 4.23.

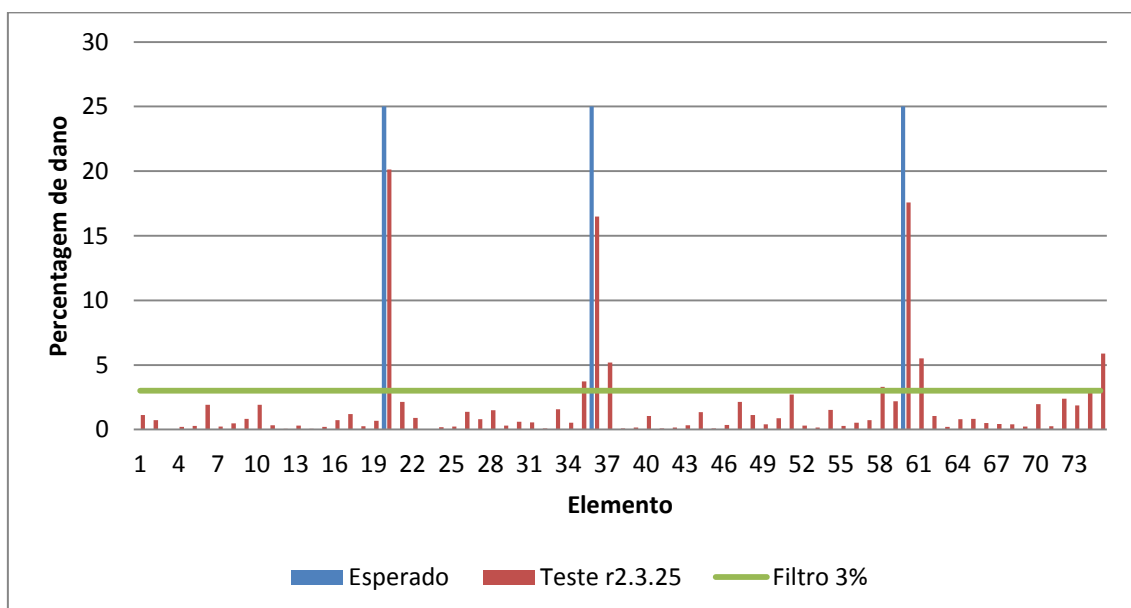


Figura 4.22 – Gráfico referente aos resultados do teste r2.3.25

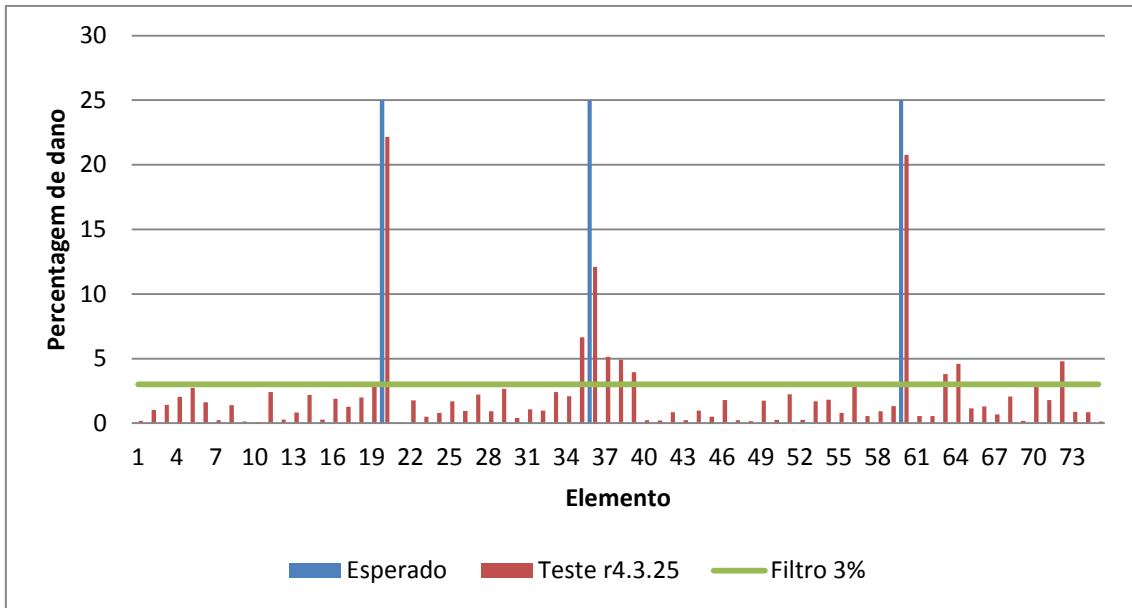


Figura 4.23 – Gráfico referente aos resultados do teste r4.3.25

Nos testes r2.3.25 e r4.3.25 foi detetado falso dano em 6 e 7 EF, respetivamente.

A dificuldade do algoritmo convergir para a solução final torna-se evidente ao observar as figuras 4.24 e 4.25. Repara-se que foram necessárias cerca de 515 iterações para o teste r2.3.25 e cerca de 560 para o teste r4.3.25. Estes valores são muito superiores àqueles apresentados pelo algoritmo quando este faz uso dos cromossomas binários.

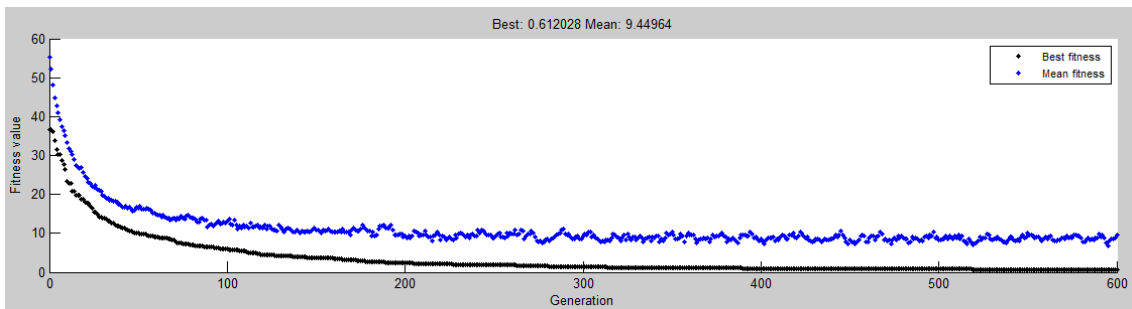


Figura 4.24 – Gráfico da convergência do AG no teste r2.3.25

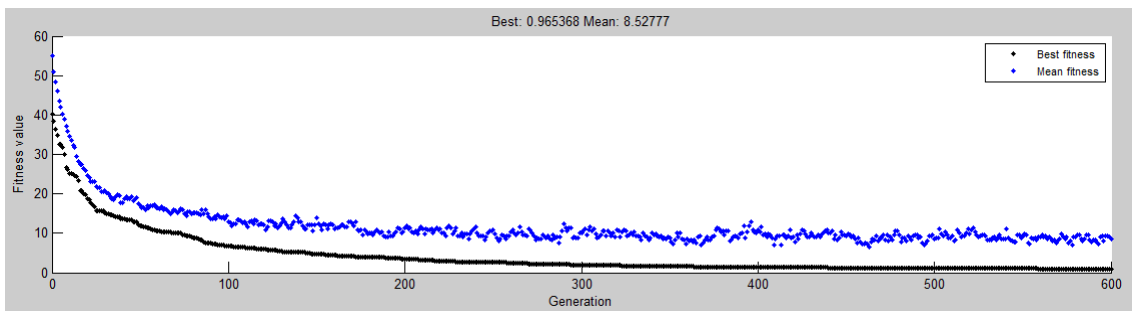


Figura 4.25 – Gráfico da convergência do AG no teste r4.3.25

4.4 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 15%

Ao diminuir ainda mais a percentagem de dano (mantendo as restantes características dos testes anteriores), dificulta-se ainda mais a resolução do problema por parte do AG, uma vez que a influência de dano com esta percentagem na resposta dinâmica da estrutura é muito reduzida, como se pode observar na tabela 4.12.

Tabela 4.12: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 15%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298492	31,216707	≅0,26
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144300	195,580595	≅0,29
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209760	547,224063	≅0,36
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,232187	1069,315052	≅0,64
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,515146	1340,834324	≅0,35

Uma vez mais, por comparação com a tabela 4.9, nota-se uma diminuição generalizada dos erros relativos que demonstra a dificuldade aumentada desta combinação de dano face às anteriores.

4.4.1 Cromossomas Binários

Ao simular esta percentagem dano na estrutura, utilizando cromossomas do tipo binário e tendo em conta o tipo de codificação de dano escolhida (e explicada anteriormente), é impossível para o AG quantificar corretamente a percentagem de dano nos elementos realmente danificados. Por esta razão é possível que o algoritmo identifique dano não só no elemento danificado mas também na sua vizinhança. No entanto, espera-se que a percentagem de dano dos elementos realmente danificados esteja próxima de 15% e que a percentagem de falso dano identificado na vizinhança esteja o mais próximo possível de zero.

Os testes efetuados com recurso a cromossomas binários permitiram chegar aos resultados mostrados na tabela 4.13. Com 15% de dano em 3 EF, os melhores testes foram o teste b2.3.15 e o teste b6.3.15.

Analisando a globalidade dos resultados é possível reparar que estes estão mais homogêneos, isto é, a diferença entre os resultados obtidos com uma população inicial maior e com uma população inicial menor não é tão grande como aquela verificada noutros testes (veja-se, por exemplo, a tabela 4.7, onde as diferenças são mais evidentes). Este facto permite concluir que,

Tabela 4.13: resultados dos testes realizados com cromossomas binários, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.15 (Pop. Inicial: 400)	0,354281
b2.3.15 (Pop. Inicial: 400)	0,289217
b3.3.15 (Pop. Inicial: 400)	0,350687
b4.3.15 (Pop. Inicial: 200)	0,325745
b5.3.15 (Pop. Inicial: 200)	0,344927
b6.3.15 (Pop. Inicial: 200)	0,318628

independentemente da maior ou menor variedade de indivíduos na população inicial, será mais fácil encontrar cromossomas cuja constituição tenha uma influência parecida ao cromossoma correspondente à solução ótima. A justificação passa pelo facto de a percentagem de dano ser pequena e, conseqüentemente, a sua influência nas frequências e modos de vibração natural ser pouco evidente.

Graficamente, os melhores testes têm o aspeto demonstrado nas figuras 4.26 e 4.27.

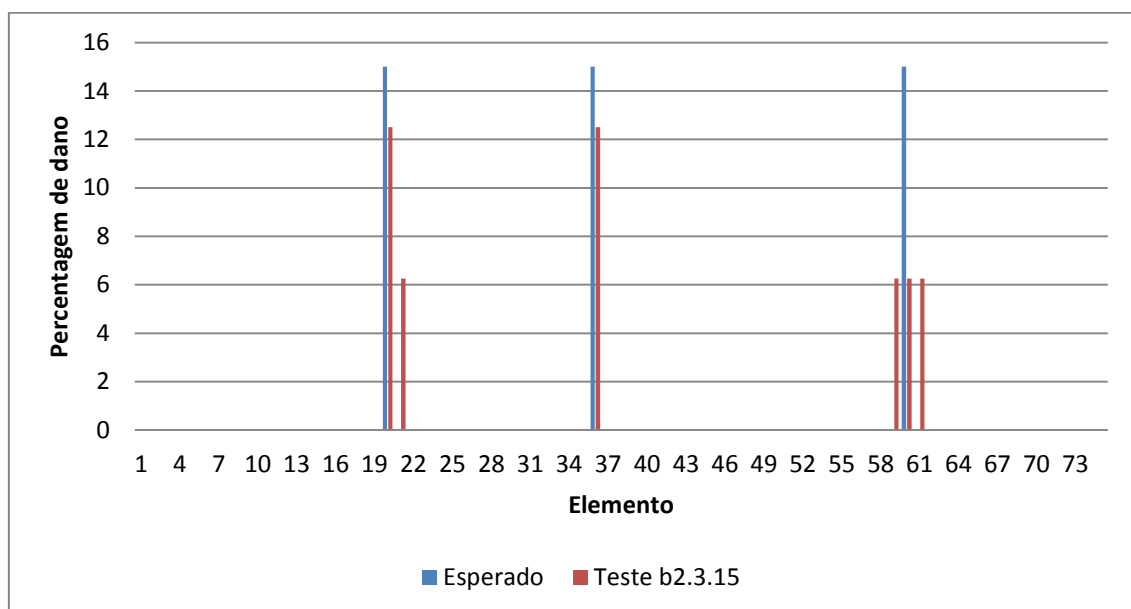


Figura 4.26 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.15

Apesar de não se ter quantificado corretamente o dano, pode considerar-se que os resultados obtidos são bons, uma vez que o algoritmo apenas atribuiu dano aos elementos realmente danificados e/ou a elementos nas suas vizinhanças.

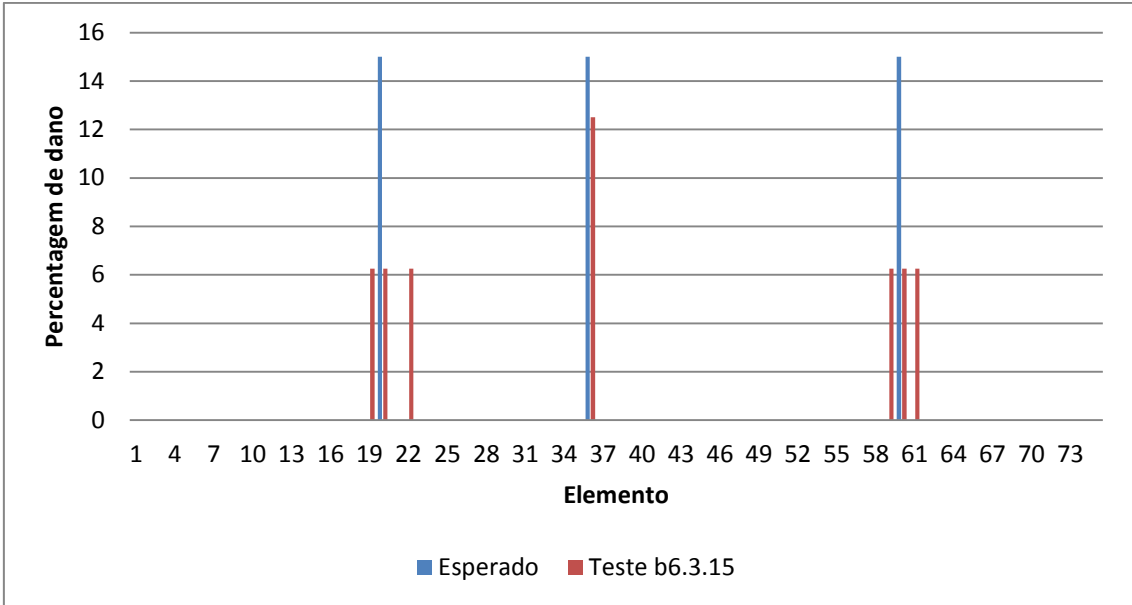


Figura 4.27 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.15

Quanto à convergência do AG para a solução final, com uma população inicial de 400 indivíduos foram necessárias aproximadamente 140 iterações, enquanto com uma população inicial igual a 200 indivíduos, o algoritmo precisou de aproximadamente 240 iterações.

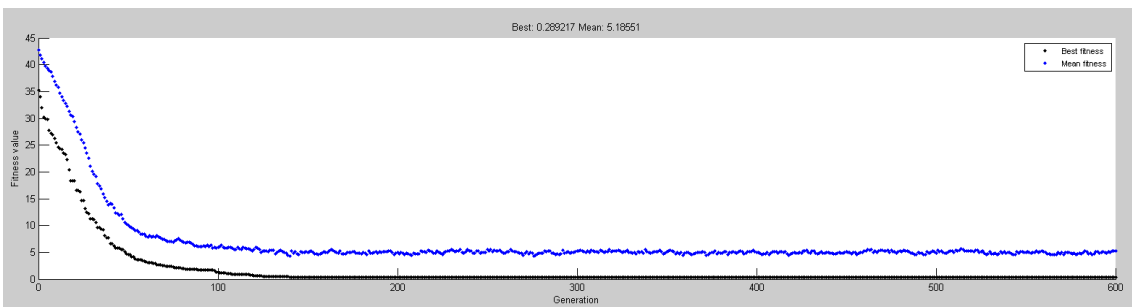


Figura 4.28 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.15

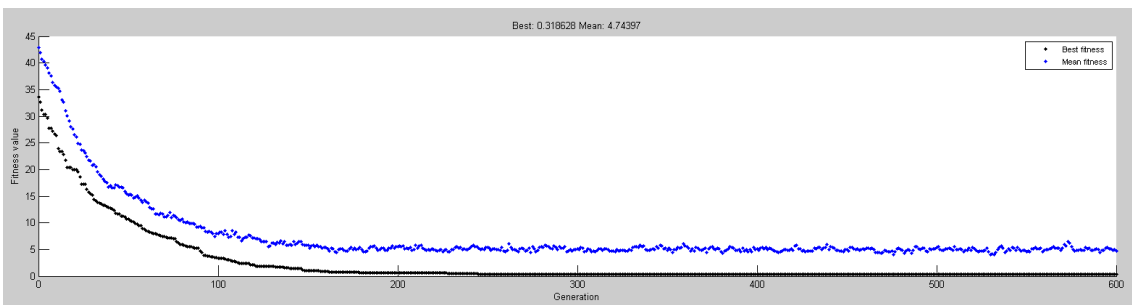


Figura 4.29 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.3.15

4.4.2 Cromossomas Reais

Utilizando agora cromossomas reais para localizar e quantificar o dano neste caso, obtiveram-se os resultados da tabela 4.14.

Tabela 4.14: resultados dos testes realizados com cromossomas reais, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
r1.3.15 (Pop. Inicial: 400)	0,557233
r2.3.15 (Pop. Inicial: 400)	0,654809
r3.3.15 (Pop. Inicial: 400)	0,557997
r4.3.15 (Pop. Inicial: 200)	1,282611
r5.3.15 (Pop. Inicial: 200)	0,956229
r6.3.15 (Pop. Inicial: 200)	1,114274

Os testes onde se obtiveram os melhores resultados foram os testes r1.3.15 e r5.3.15. Os seus resultados gráficos e convergência são mostrados nas figuras 4.30 e 4.31.

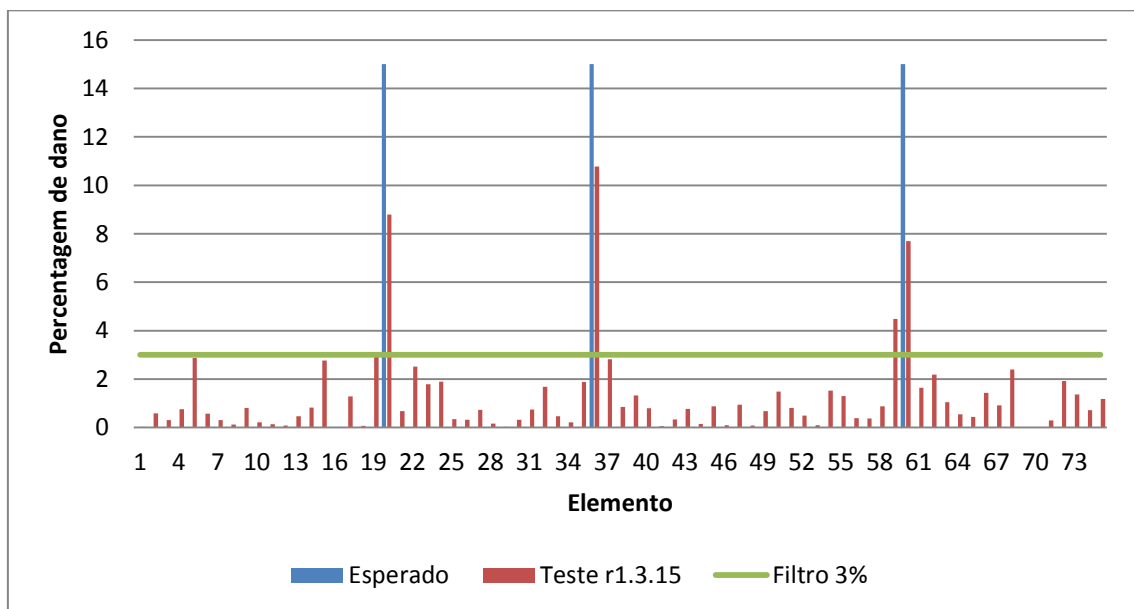


Figura 4.30 – Gráfico referente aos resultados do teste r1.3.15

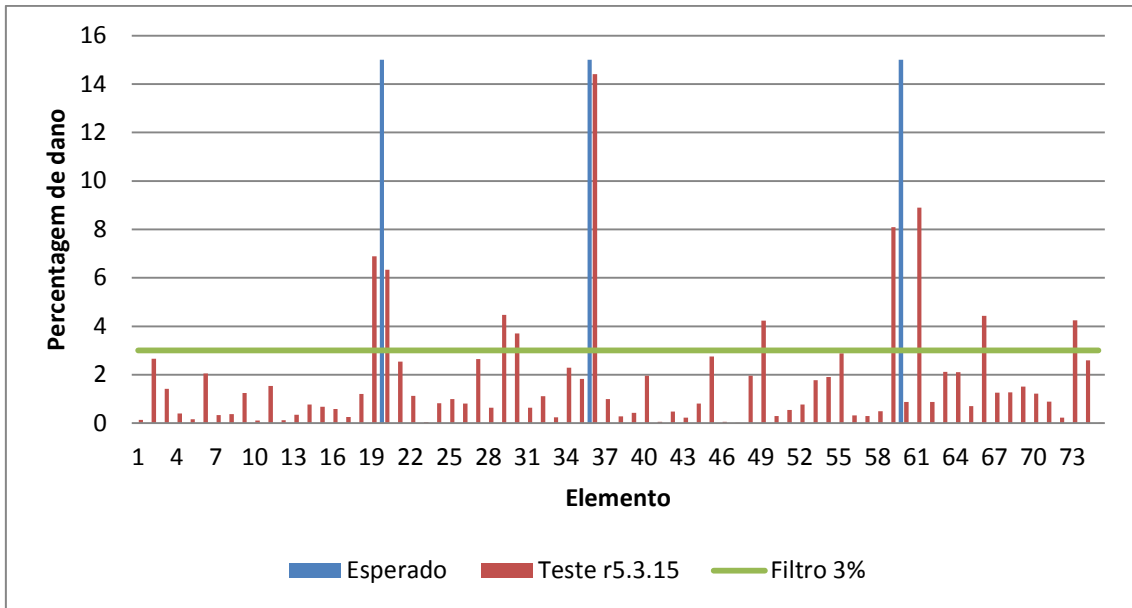


Figura 4.31 – Gráfico referente aos resultados do teste r5.3.15

As figuras 4.30 e 4.31 mostram que o AG detetou falso dano em 2 e 7 EF, respetivamente. A figura 4.29 mostra ainda que no teste r5.3.15 o algoritmo não identificou o elemento 60 como danificado (as percentagem de dano atribuída foi de 0,87%). As figuras 4.32 e 4.33 revelam que no teste r1.3.15 o algoritmo convergiu para a solução final mais rapidamente que no teste r5.3.15, necessitando de cerca de 480 iterações, enquanto no segundo foram necessárias aproximadamente 575 iterações.

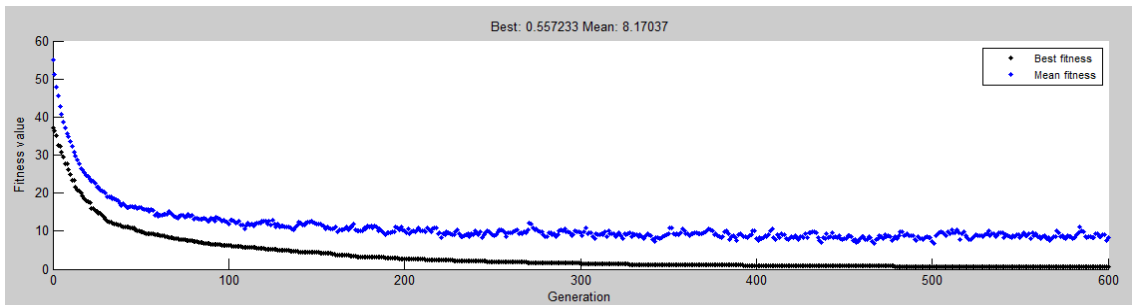


Figura 4.32 – Gráfico da convergência do AG no teste r1.3.15

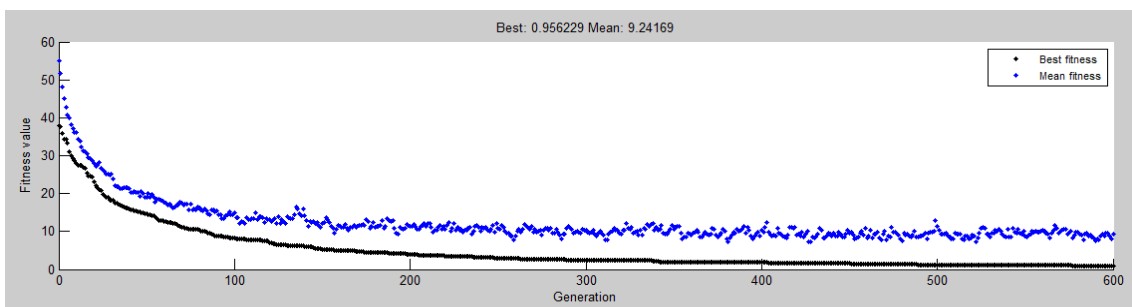


Figura 4.33 – Gráfico da convergência do AG no teste r5.3.15

4.5 Resumo dos Testes da Divisão em 75 EF

Depois de efetuados todos os testes, foi possível preencher a tabela 4.15, que resume os resultados obtidos com cromossomas binários.

Tabela 4.15: tabela resumo dos resultados obtidos ao utilizar cromossomas binários.

Teste	Pop. Inicial	Nº dos EF Danificados	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
b1.1.50	400	36	50	Sim	43,75	2	0,333085	145
b6.1.50	200	36	50	Sim	43,75	3	0,328429	325
b3.3.50	400	20/36/60	50/50/50	Sim	50/50/43,75	2	0,373168	165
b5.3.50	200	20/36/60	50/50/50	Sim	43,75/31,25/50	7	0,828896	195
b2.3.25	400	20/36/60	25/25/25	Sim	18,75/18,75/18,75	5	0,358894	180
b6.3.25	200	20/36/60	25/25/25	Sim	25/18,75/25	2	0,304269	265
b2.3.15	400	20/36/60	15/15/15	Sim	12,5/12,5/12,5	3	0,289217	140
b6.3.15	200	20/36/60	15/15/15	Sim	6,25/12,5/6,25	4	0,318628	240

É possível ainda preencher a tabela referente aos resultados obtidos com cromossomas do tipo real (tabela 4.16).

Tabela 4.16: tabela resumo dos resultados obtidos ao utilizar cromossomas reais.

Teste	Pop. Inicial	Nº dos EF Danificados	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
r1.1.50	400	36	50	Sim	48,20	1	0,653942	500
r4.1.50	200	36	50	Sim	49,30	13	1,033379	515
r3.3.50	400	20/36/60	50/50/50	Sim	46,04/47,75/45,0	2	0,588166	500
r4.3.50	200	20/36/60	50/50/50	Sim	47,04/42,84/46,42	9	1,029676	560
r2.3.25	400	20/36/60	25/25/25	Sim	20,14/16,49/17,58	6	0,612028	515
r4.3.25	200	20/36/60	25/25/25	Sim	22,15/12,09/20,78	7	0,965368	560
r1.3.15	400	20/36/60	15/15/15	Sim	8,80/10,78/7,70	2	0,557233	480
r5.3.15	200	20/36/60	15/15/15	Não	6,34/14,41/0,87	7	0,956229	575

Observando todos os resultados e comparando as tabelas anteriores é possível tirar algumas conclusões.

É possível observar que, ao utilizar cromossomas binários, o AG conseguiu identificar sempre os elementos danificados, conseguindo quantificar corretamente o dano em alguns casos e estando muito perto da solução certa nos restantes. Contudo, no caso dos cromossomas reais, o algoritmo falhou na deteção de dano num dos elementos, no teste r5.3.15. Relativamente à quantificação, este conseguiu chegar a resultados muito bons nos casos mais simples (testes com 50% de dano), ficando, no entanto, um pouco afastado da solução correta nos restantes testes.

A influência do tamanho da população é mais evidente no caso dos cromossomas reais, onde foram obtidos piores resultados quando a população tinha um menor número inicial de indivíduos, na medida em que o número de EF com falso dano detetado nestes testes foi sempre maior. Com cromossomas binários, o número de EF com percentagem de dano errada é mais homogêneo e, no geral, em menor quantidade.

Os resultados obtidos com cromossomas binários são superiores aos obtidos com cromossomas reais também na convergência para a solução final, onde a convergência foi bastante mais rápida, chegando ao resultado em menos de metade das iterações na grande maioria dos testes.

4.6 Divisão em 100 EF com 1 Dano de 50%

Anteriormente, foi verificada a capacidade do AG detetar, localizar e quantificar dano numa viga encastrada com 75 EF. Concluiu-se que o algoritmo conseguiu obter bons resultados, estando quase sempre próximo da solução certa. Agora, o AG será posto à prova utilizando a mesma viga encastrada, mas desta vez com um número de EF superior.

Nestes testes, serão usados apenas cromossomas binários, porque o AG provou ser mais eficaz ao usar este tipo de cromossomas. Os parâmetros do AG serão idênticos aos já utilizados nos testes anteriores, assim como as percentagens de dano usadas (50%, 25% e 15%).

Apesar de as percentagens de dano serem as mesmas usadas anteriormente, na verdade o dano na estrutura será menor pois cada EF será menor também. Quando a viga testada é dividida em 75 EF, cada um destes elementos tem um comprimento de 13,33 mm e representa cerca de 1,3% da totalidade da viga. Quando a mesma viga é dividida em 100 EF, cada um terá um comprimento de 10,0 mm e representa 1% da totalidade da viga. É portanto evidente que o dano será, neste último caso, menor e portanto a tarefa do AG será mais difícil. Observe-se a tabela 4.17 que confirma o aumento da dificuldade deste teste (ao ser comparada com a tabela 4.3 que corresponde à mesma percentagem de dano mas num EF ligeiramente maior).

Tabela 4.17: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 100 EF, intacta e danificada com 1 dano de 50%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298491	31,224049	≅0,24
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144299	194,197810	≅0,99
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209728	549,206222	≅0,0
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,231951	1065,868754	≅0,96
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,504386	1338,706661	≅0,51

Os primeiros testes à viga encastrada com 100 EF realizaram-se simulando um dano de 50% no elemento 50 da viga (os valores da tabela 4.17 são referentes a este dano). Tal como anteriormente, foram efetuados 3 testes idênticos com uma população inicial de 400 cromossomas e 3 testes idênticos com uma população inicial de 200 cromossomas. Os resultados são revelados na tabela 4.18.

Tabela 4.18: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 100 EF com 1 dano de 50%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.1.50.c (Pop. Inicial: 400)	0,840228
b2.1.50.c (Pop. Inicial: 400)	0,220412
b3.1.50.c (Pop. Inicial: 400)	0,001824
b4.1.50.c (Pop. Inicial: 200)	0,253448
b5.1.50.c (Pop. Inicial: 200)	0,001824
b6.1.50.c (Pop. Inicial: 200)	0,241098

Os melhores testes tanto para o caso da população inicial de 400 (teste b3.1.50.c) como para o caso da população inicial de 200 indivíduos (teste b5.1.50.c) chegaram à solução certa, como se observa nas figuras 4.34 e 4.35, que correspondem à solução gráfica destes testes. Uma vez que os valores das frequências naturais e modos de vibração da estrutura alvo são guardados num ficheiro (de modo a aumentar a eficiência do algoritmo), o número de algarismos significativos desses valores é diferente do utilizado internamente pelo *Matlab*®, quando este é utilizado para calcular as frequências naturais e modos de vibração das estruturas de teste, logo, o resultado final do indicador *IFM* não é exatamente igual a zero, como deveria acontecer.

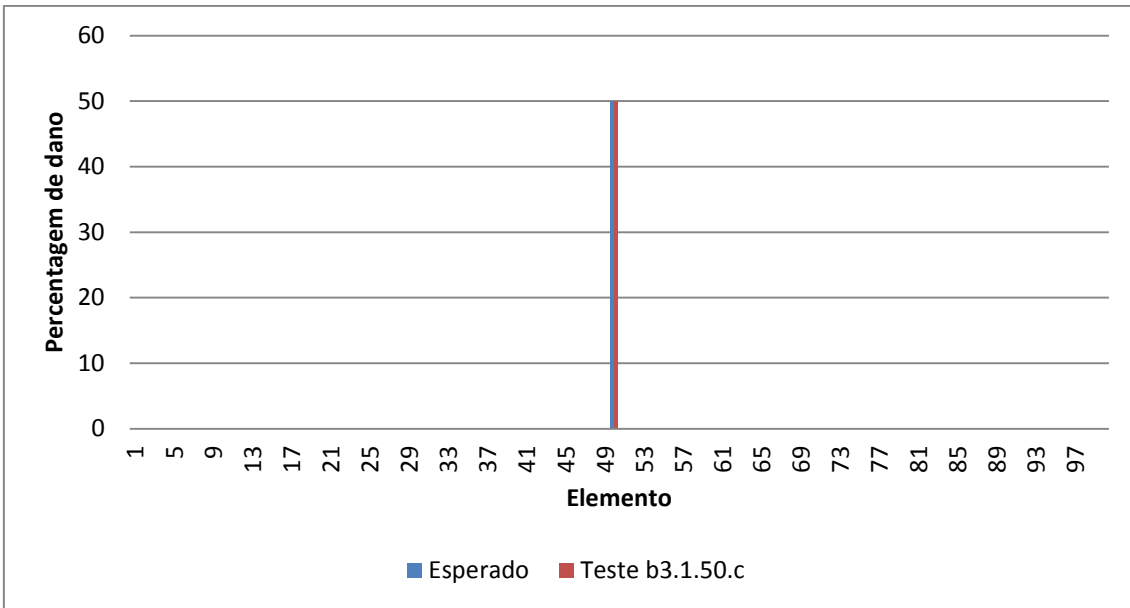


Figura 4.34 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.1.50.c

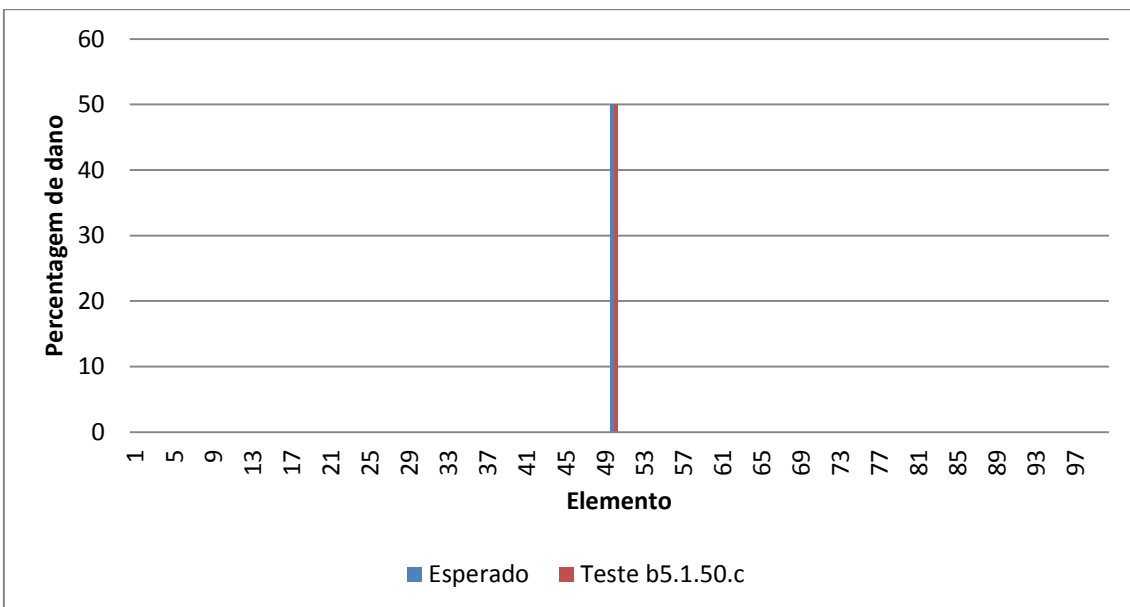


Figura 4.35 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.1.50.c

A convergência do algoritmo para estes testes é verificada nas figuras 4.36 e 4.37. Para o teste b3.1.50.c, o AG necessitou de 210 iterações e de 420 iterações para o teste b5.1.50.c, aproximadamente. É notória a maior dificuldade do algoritmo em convergir para a solução final quando a população inicial é mais reduzida.

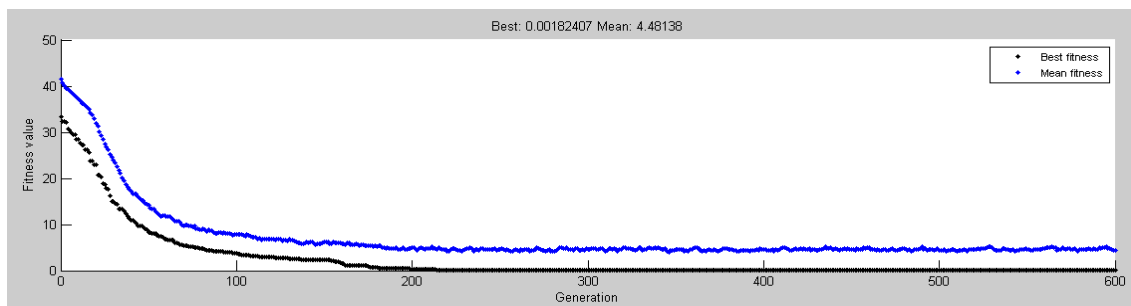


Figura 4.36 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.1.50.c

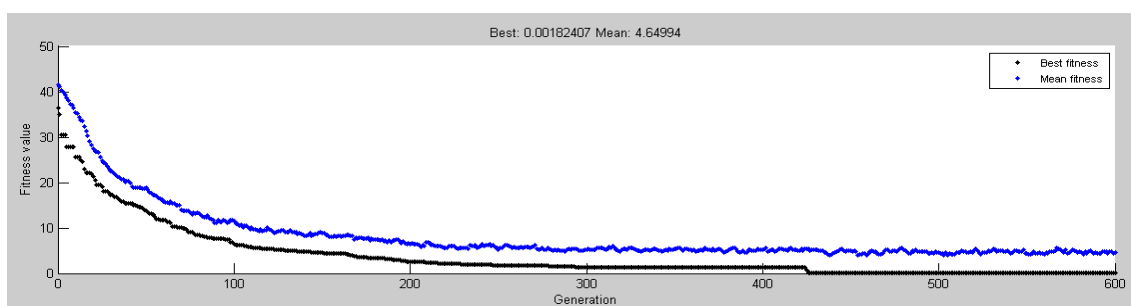


Figura 4.37 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.1.50.c

4.7 Divisão em 100 EF com 3 Danos de 50%

Tal como foi feito quando se dividiu a viga em 75 EF, é agora simulado dano em 3 elementos da viga. Os elementos danificados serão os elementos 25, 50 e 75. Na tabela 4.19 podem ser avaliados os erros relativos referentes à diferença entre as frequências naturais da estrutura intacta e danificada. Os resultados dos testes feitos são apresentados na tabela 4.20.

Tabela 4.19: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta e danificada com 3 danos de 50%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298491	30,946954	≅1,12
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144299	193,461994	≅1,37
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209728	540,072806	≅1,66
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,231951	1048,362004	≅2,59
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,504386	1325,500105	≅1,49

Tabela 4.20: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 100 EF com 3 danos de 50%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.50.c (Pop. Inicial: 400)	0,253618
b2.3.50.c (Pop. Inicial: 400)	1,486541
b3.3.50.c (Pop. Inicial: 400)	0,47780
b4.3.50.c (Pop. Inicial: 200)	0,361907
b5.3.50.c (Pop. Inicial: 200)	1,560489
b6.3.50.c (Pop. Inicial: 200)	1,283623

Para este caso, o melhor resultado foi obtido no teste b1.3.50.c para uma população inicial de 400 indivíduos e no teste b4.3.50.c para uma população inicial de 200 indivíduos. Os resultados gráficos destes testes podem ser observados seguidamente, nas figuras 4.38 e 4.39. Analisando os resultados, constata-se que nos testes b1.3.50.c e b4.3.50.c o AG identificou erradamente dano em 3 e 5 EF, respetivamente. Contudo, este dano errado tem uma percentagem pequena. O AG necessitou de aproximadamente 240 iterações no teste b1.3.50.c e de aproximadamente 505 iterações no teste b4.3.50.c para chegar à solução final, tal como se pode observar nas figuras 4.40 e 4.41.

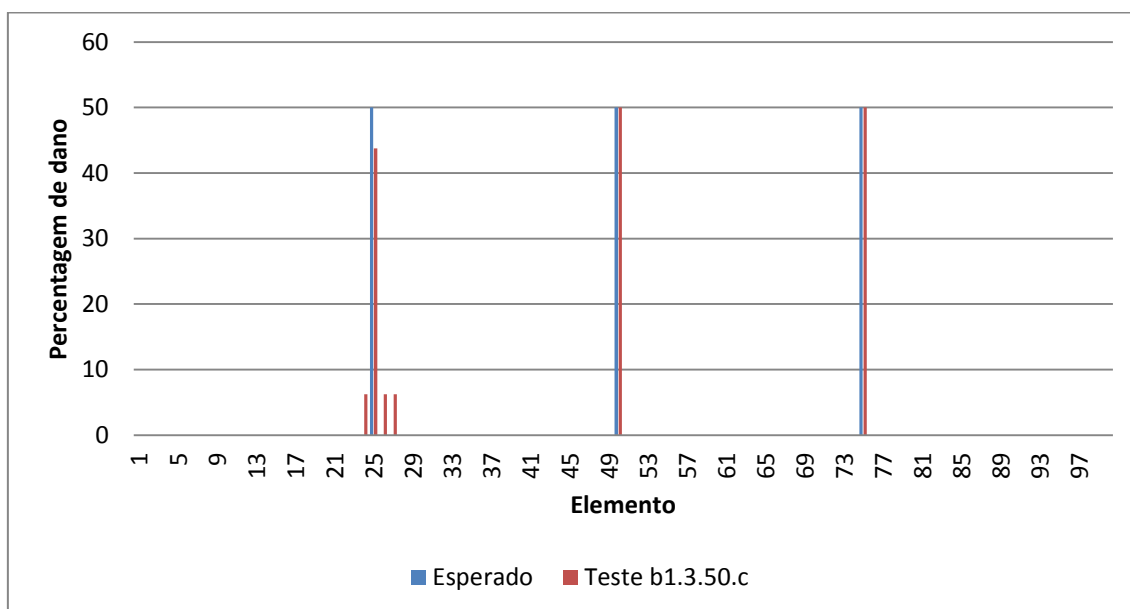


Figura 4.38 – Gráfico referente aos resultados do teste b1.3.50.c

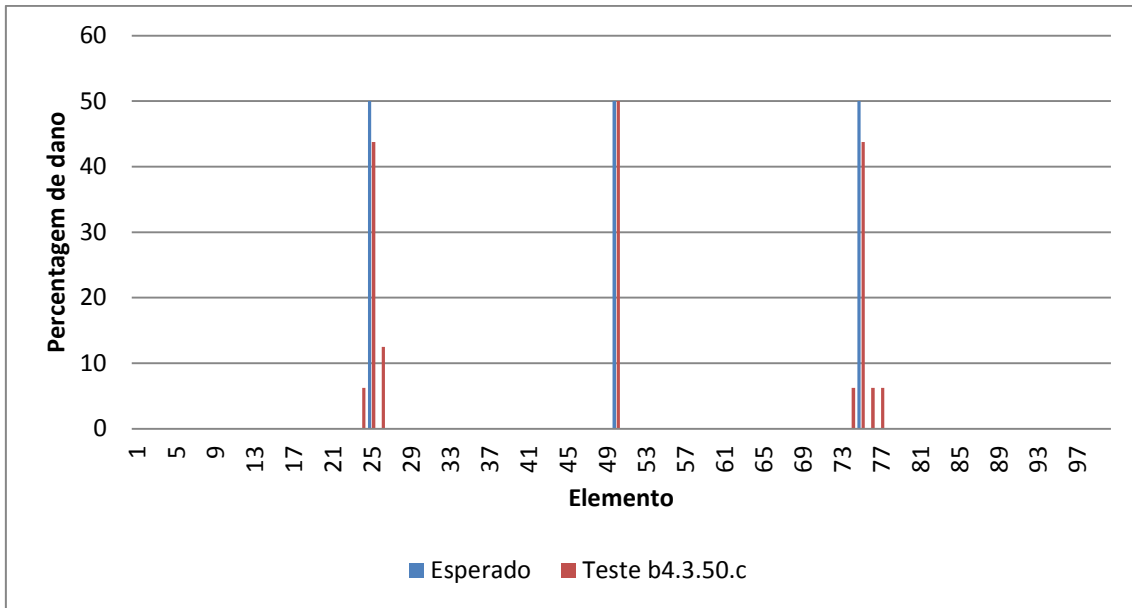


Figura 4.39 – Gráfico referente aos resultados do teste b4.3.50.c

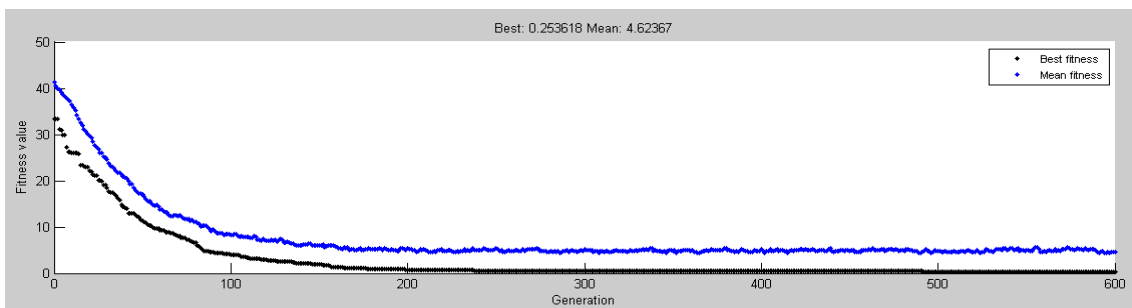


Figura 4.40 – Gráfico da convergência do AG no teste b1.3.50.c

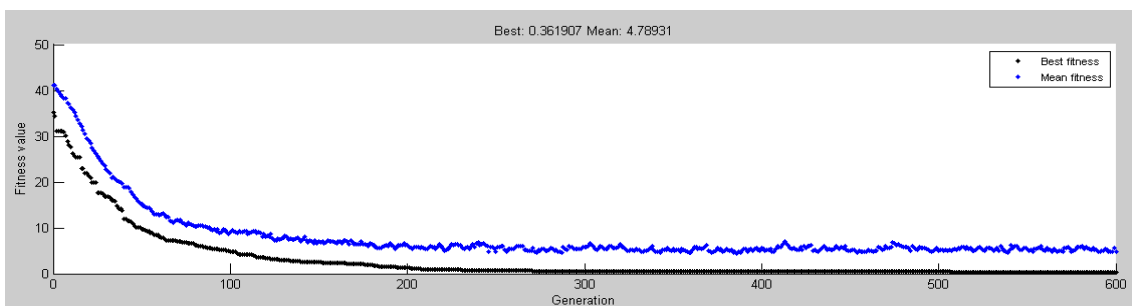


Figura 4.41 – Gráfico da convergência do AG no teste b4.3.50.c

4.8 Divisão em 100 EF com 3 Danos de 25%

Uma vez mais, a dificuldade da tarefa imposta ao AG é aumentada, reduzindo o dano simulado nos 3 elementos escolhidos para 25%. Justifica-se o aumento da dificuldade pelos valores apresentados na tabela 4.21 (ao ser comparada com as tabelas semelhantes anteriores).

Tabela 4.21: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 100 EF, intacta e danificada com 3 danos de 25%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298491	31,180005	≅0,38
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144299	195,233671	≅0,46
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209728	546,101143	≅0,57
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,231951	1066,706478	≅0,89
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,504386	1338,740707	≅0,50

Dos testes realizados, os melhores foram os testes b3.3.25.c e b6.3.25.c, tal como se verifica pela tabela 4.22. A solução gráfica destes testes é mostrada pelas figuras 4.42 e 4.43.

Tabela 4.22: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 100 EF com 3 danos de 25%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (IFM)
b1.3.25.c (Pop. Inicial: 400)	0,320930
b2.3.25.c (Pop. Inicial: 400)	0,500103
b3.3.25.c (Pop. Inicial: 400)	0,141262
b4.3.25.c (Pop. Inicial: 200)	0,575123
b5.3.25.c (Pop. Inicial: 200)	0,612921
b6.3.25.c (Pop. Inicial: 200)	0,411508

Na figura 4.43 é possível visualizar que o AG não identificou corretamente o dano no elemento 75. No entanto, este atribuiu a percentagem correta de dano ao EF imediatamente a seguir. Isto demonstra que, dado o tamanho reduzido dos EF e à percentagem relativamente baixa do dano, as diferenças nas respostas dinâmicas (provocadas por dano) em EF sucessivos são muito pequenas, provocando dificuldade de convergência ao algoritmo.

Quanto à convergência, uma vez mais, para o teste com menor população inicial foram necessárias mais iterações (cerca de 270 iterações) do que para o teste b3.3.25.c (aproximadamente 260 iterações), embora neste caso a diferença não seja muito significativa.

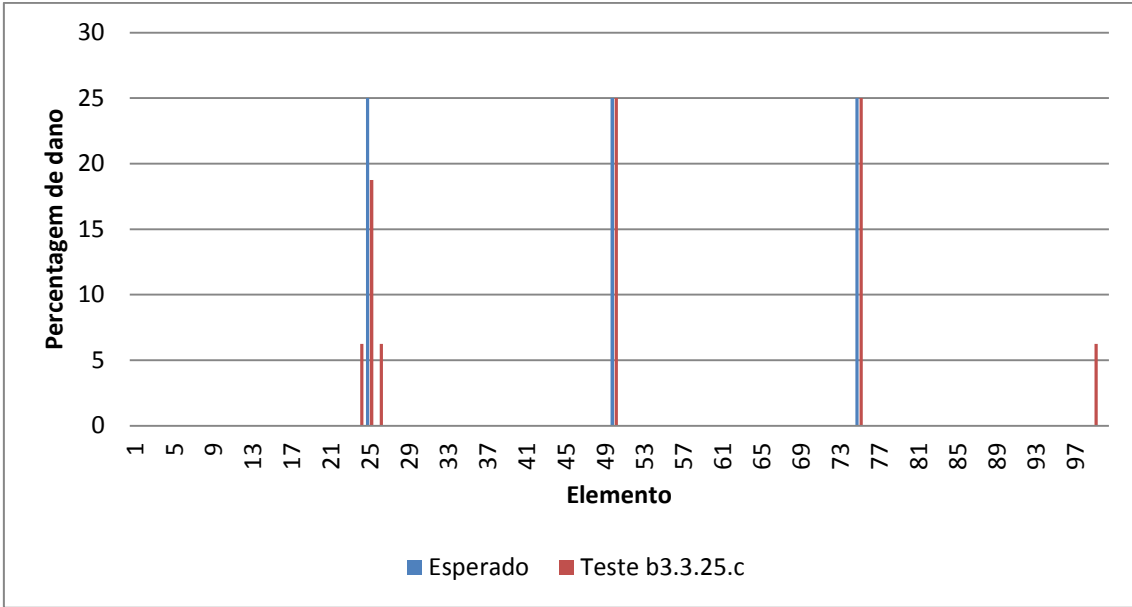


Figura 4.42 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.25.c

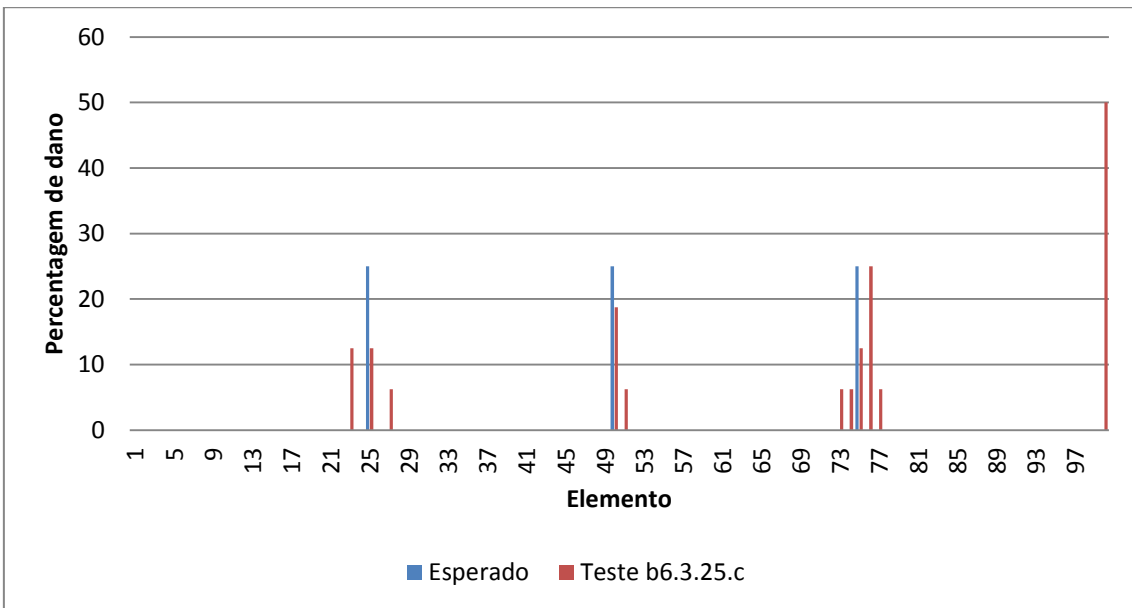


Figura 4.43 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.25.c

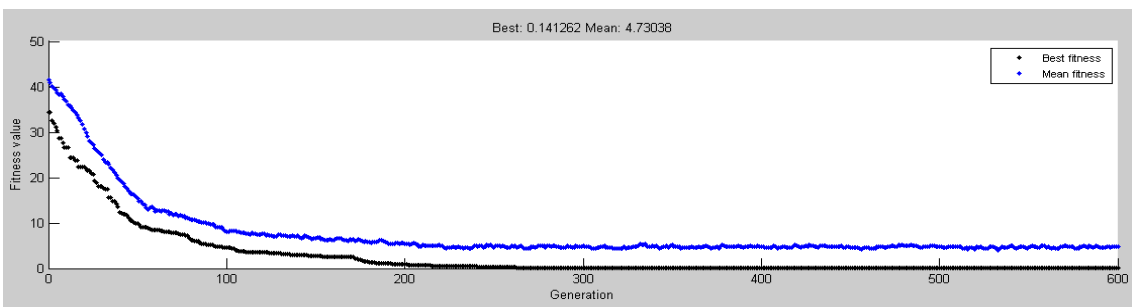


Figura 4.44 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.25.c

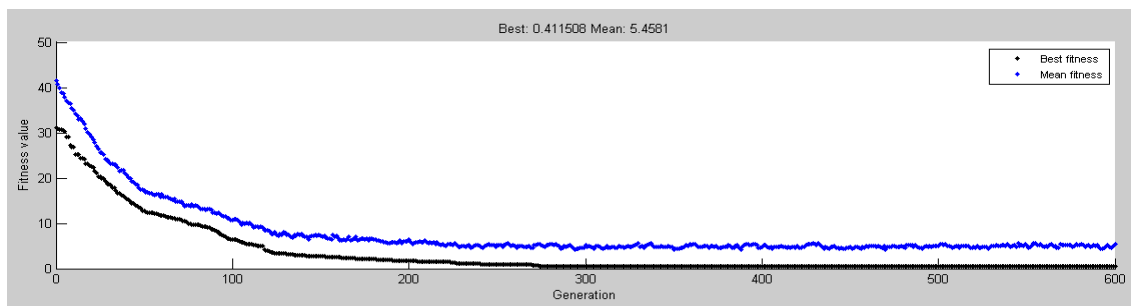


Figura 4.45 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.3.25.c

4.9 Divisão em 100 EF com 3 Danos de 15%

Tal como para a viga encastrada de 75 EF, o teste considerado mais difícil é aquele em que se simula dano de 15% em 3 EF, como se comprova pela tabela 4.23.

Tabela 4.23: primeiras 5 frequências naturais da viga encastrada de 100 EF, intacta e danificada com 3 danos de 15%, e respetivos erros relativos.

	Estrutura Intacta	Estrutura Danificada	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298491	31,235598	≅0,20
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144299	195,660085	≅0,25
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209728	547,555955	≅0,30
4ª Freq. Natural (Hz)	1076,231951	1071,158879	≅0,47
5ª Freq. Natural (Hz)	1345,504386	1341,911485	≅0,27

Se se comparar a tabela anterior com as tabelas 4.17, 4.19 e 4.21, é notável que este é o teste mais difícil realizado para a viga encastrada de 100 EF, pois os valores dos erros relativos de cada frequência natural são globalmente menores. Ao comparar ainda esta tabela com a tabela 4.12 referente ao mesmo teste mas para a viga de 75 EF, constata-se que o presente teste é mais difícil.

Neste caso (viga encastrada com 100 EF), os elementos considerados danificados são novamente os elementos 25, 50 e 75 e os resultados são mostrados na tabela 4.24.

Tabela 4.24: resultados dos testes realizados com o AG para a viga encastrada de 100 EF com 3 danos de 15%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.15.c (Pop. Inicial: 400)	0,311172
b2.3.15.c (Pop. Inicial: 400)	0,229610
b3.3.15.c (Pop. Inicial: 400)	0,273384
b4.3.15.c (Pop. Inicial: 200)	0,299392
b5.3.15.c (Pop. Inicial: 200)	0,245962
b6.3.15.c (Pop. Inicial: 200)	0,345169

Verifica-se pela tabela anterior que os melhores testes foram os testes b2.3.15.c e b5.3.15.c e as suas respostas gráficas podem ser visualizadas nas figuras 4.46 e 4.47, respetivamente.

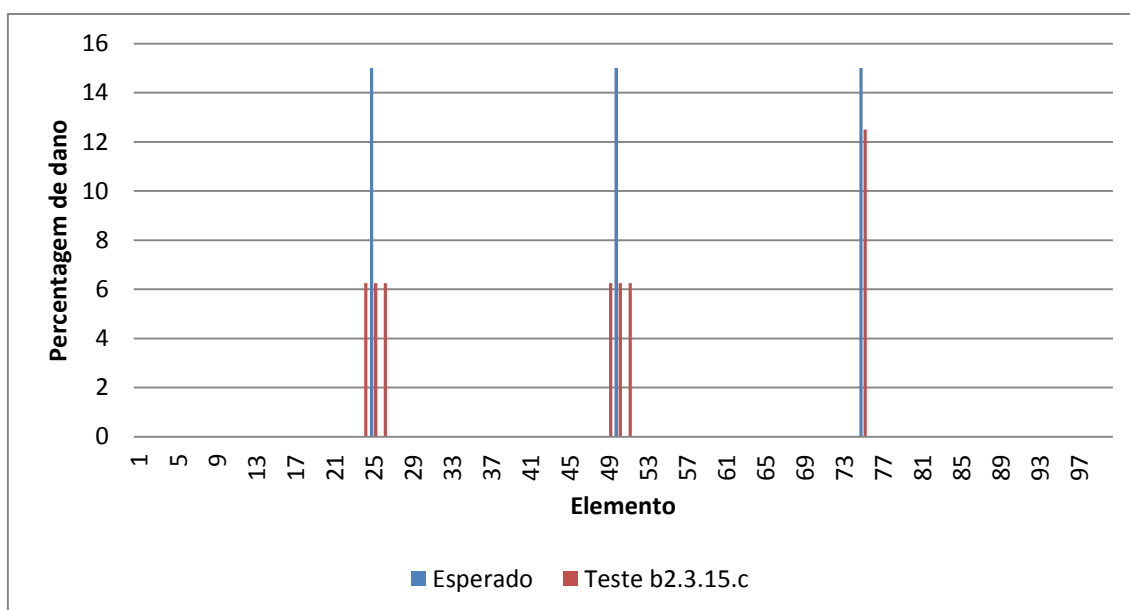


Figura 4.46 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.15.c

É importante relembrar que, tendo em conta a codificação do dano escolhida para o uso de cromossomas binários, é impossível para o AG quantificar corretamente a percentagem de dano nos elementos realmente danificados esperando-se que este encontre dano nos elementos realmente danificados e possivelmente na sua vizinhança mais próxima (embora não seja o desejado). Portanto, não surpreende que tenham sido identificados incorretamente 4 EF danificados no teste b2.3.15.c e 5 no teste b5.3.15.c.

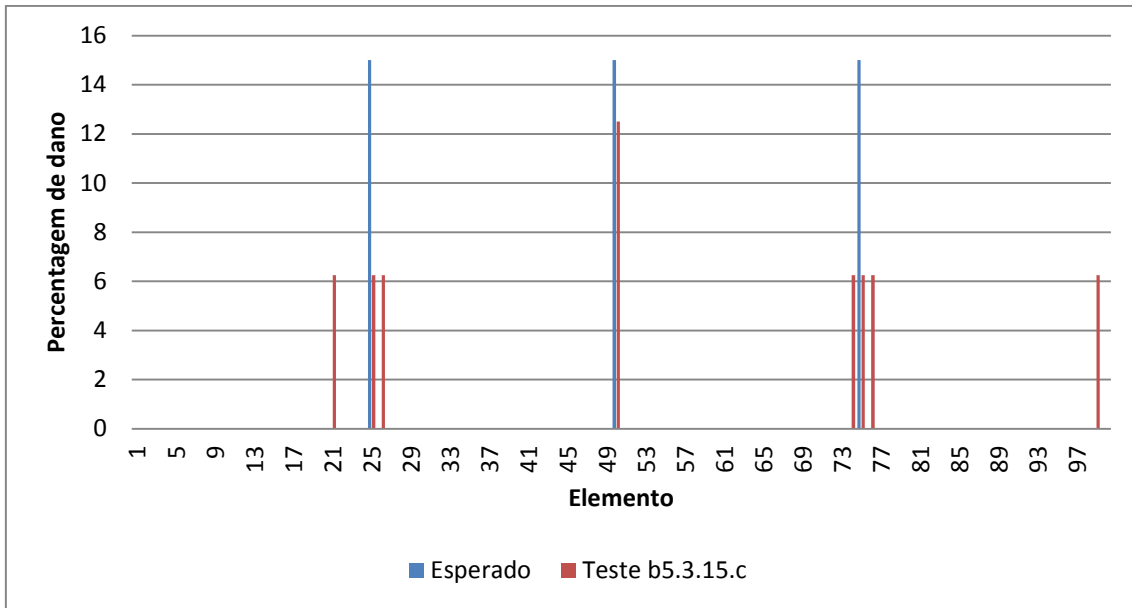


Figura 4.47 – Gráfico referente aos resultados do teste 5.3.15.c

A convergência para a solução final relativa a estes testes é apresentada nas figuras 4.48 e 4.49.

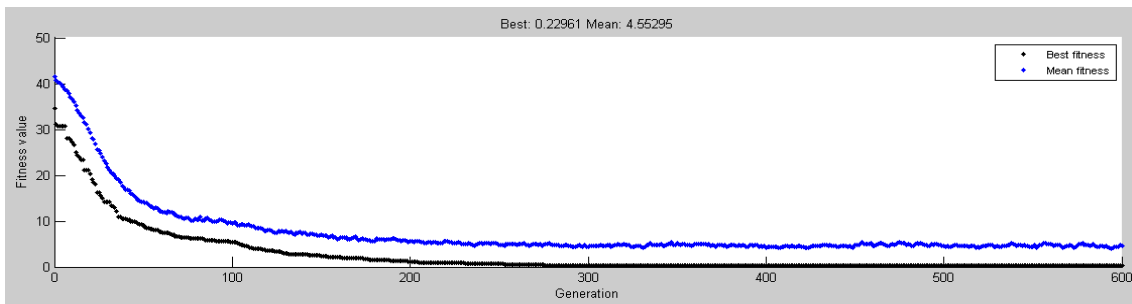


Figura 4.48 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.c

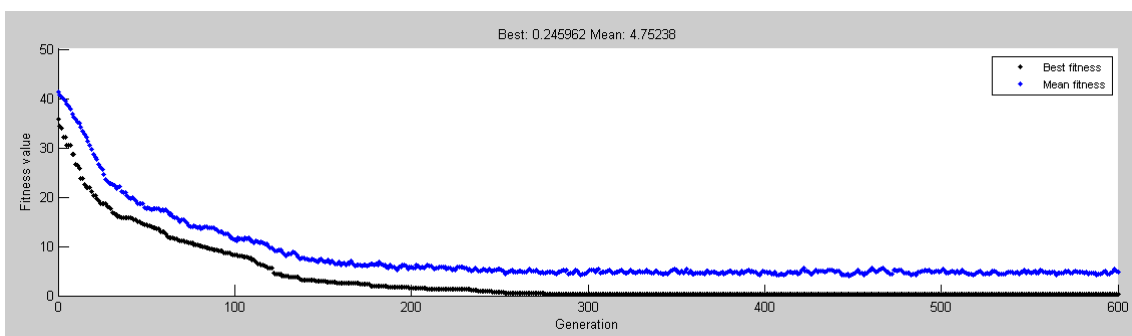


Figura 4.49 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.15.c

Neste caso, a diferença no número de iterações necessárias em ambos os testes é muito parecida, estando ambos os testes perto das 270 iterações.

4.10 Resumo dos Testes da Divisão em 100 EF

Após a realização dos testes de deteção, localização e quantificação de dano realizados à viga encastrada de 100 EF, foi elaborada a tabela 4.25, que resume os resultados obtidos com cromossomas binários. É notório que, esta tabela, o menor número de indivíduos na população inicial tem uma influência negativa no resultado do AG, na medida em que, na grande maioria dos testes, o valor da função objetivo é superior (logo o resultado está mais longe da solução correta), é requerido um número maior de iterações para chegar a esse valor e existem mais EF com dano incorreto.

A única exceção é a do caso mais simples (1 elemento com 50% de dano), em que em ambos os casos foi encontrada a solução certa, embora ainda assim, o número de iterações necessárias foi maior para o caso da população inicial menor.

No entanto, caso não se justifique um grande rigor nos resultados ou se o esforço computacional se mostrar problemático, os resultados obtidos com uma população inicial de 200 cromossomas poderão ser suficientes.

A tabela 4.25 permite concluir ainda que, embora a dificuldade da tarefa do AG seja maior no caso da viga encastrada dividida em 100 EF comparativamente ao caso da viga encastrada de

Tabela 4.25: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados na viga encastrada de 100 EF.

Teste	Pop. Inicial	Nº dos EF Danificados	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
b3.1.50.c	400	50	50	Sim	50	0	0,001824	210
b5.1.50.c	200	50	50	Sim	50	0	0,001824	420
b1.3.50.c	400	25/50/75	50/50/50	Sim	43,75/50/50	3	0,253618	240
b4.3.50.c	200	25/50/75	50/50/50	Sim	43,75/50/43,75	5	0,361907	505
b3.3.25.c	400	25/50/75	25/25/25	Sim	18,75/25/25	3	0,141262	260
b6.3.25.c	200	25/50/75	25/25/25	Sim	12,5/18,75/12,5	7	0,411508	270
b2.3.15.c	400	25/50/75	15/15/15	Sim	6,25/6,25/12,5	4	0,229510	270
b5.3.15.c	200	25/50/75	15/15/15	Sim	6,25/12,5/6,25	5	0,245962	270

75 EF, este consegue ainda assim obter resultados que se podem considerar bons, na medida em que foram encontradas as soluções corretas ou soluções próximas da correta, estando a maioria dos EF incorretamente identificados como danificados na vizinhança próxima dos EF realmente danificados.

4.11 Influência do Número de Frequências Naturais e Modos de Vibração

Todos os testes realizados até esta fase do estudo foram realizados recorrendo às primeiras 5 frequências naturais e modos de vibração da estrutura. Este número foi escolhido com o cuidado de fornecer ao AG informação suficiente para este detetar, localizar e quantificar corretamente o dano na estrutura, mas não excessiva, que poderia provocar a não convergência para a solução correta ou até para qualquer solução devido à dificuldade de convergência gerada pelo excesso de valores.

De modo a perceber a influência do número de frequências naturais e modos de vibração na solução dada pelo algoritmo, foram realizados diferentes testes com diferentes números de frequências e respetivos modos de vibração natural.

Os testes foram realizados tendo em conta as conclusões retiradas dos testes anteriores (e descritas no subcapítulo 4.5) e portanto, foram realizados utilizando apenas cromossomas binários, utilizando uma população inicial de 200 indivíduos. Considerou-se a viga modelada com 75 EF.

4.11.1 Testes com 1 Dano de 50% Utilizando as Primeiras 10 Frequências Naturais e Modos de Vibração

Tal como nos testes anteriores, foram efetuados vários testes idênticos e selecionado para análise aquele cujo valor final da função objetivo é menor que os restantes. O dano simulado foi de 50% no EF nº36, sendo o EF nº1 o elemento do encastramento. Assim, os resultados para este teste estão na tabela 4.26.

Tabela 4.26: resultados dos testes realizados com as 10 primeiras frequências naturais e modos de vibração da viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.1.50.10	0,001290
b2.1.50.10	0,550382
b3.1.50.10	0,619550

O melhor teste realizado foi o teste b1.1.50.10 onde o valor final da função objetivo é praticamente zero e portanto foi encontrada a solução correta do problema, tal como se pode confirmar analisando a figura 4.50.

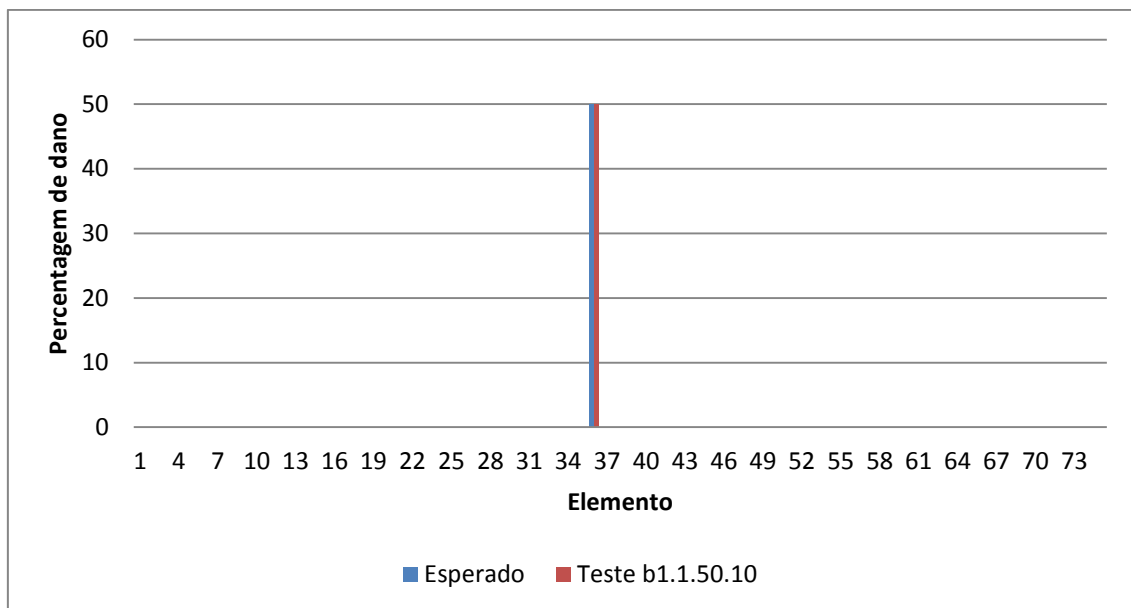


Figura 4.50 – Gráfico referente aos resultados do teste b1.1.50.10

A convergência do algoritmo neste teste pode ser verificada na figura 4.51.

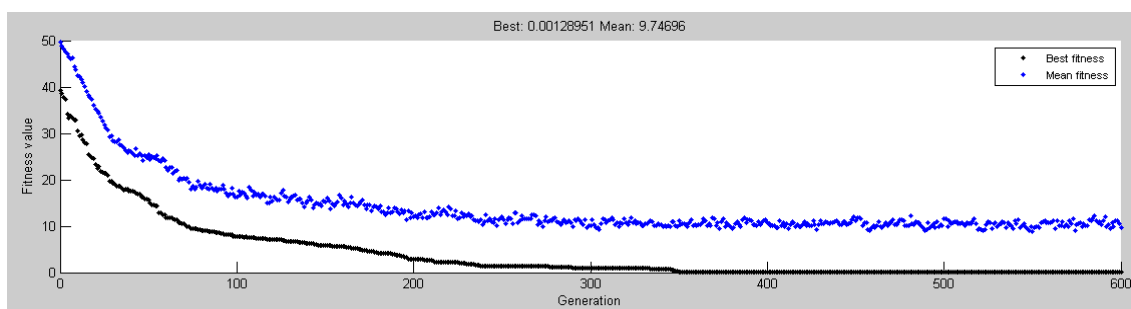


Figura 4.51 – Gráfico da convergência do AG no teste b1.1.50.10

Observa-se que foram necessárias cerca de 350 iterações para que o AG atingisse a solução final.

4.11.2 Testes com 3 Danos de 15% Utilizando as Primeiras 10 Frequências Naturais e Modos de Vibração

No subcapítulo anterior, foi testada a capacidade do AG para caracterizar corretamente o dano utilizando as primeiras 10 respostas dinâmicas, naquela que se considera a estrutura mais fácil de analisar (1 EF com 50% de dano).

Porém, neste teste, pretende-se testar essa mesma capacidade mas agora utilizando aquela que se provou ser a estrutura mais difícil de estudar, onde existem 3 EF (elementos 20, 36 e 60) com 15% de dano.

Neste caso, o AG revelou-se incapaz de convergir para uma solução concreta (como se pode ver na figura 4.52, referente a um dos testes realizados) e portanto, os resultados obtidos não se podem considerar válidos, dada a sua instabilidade.

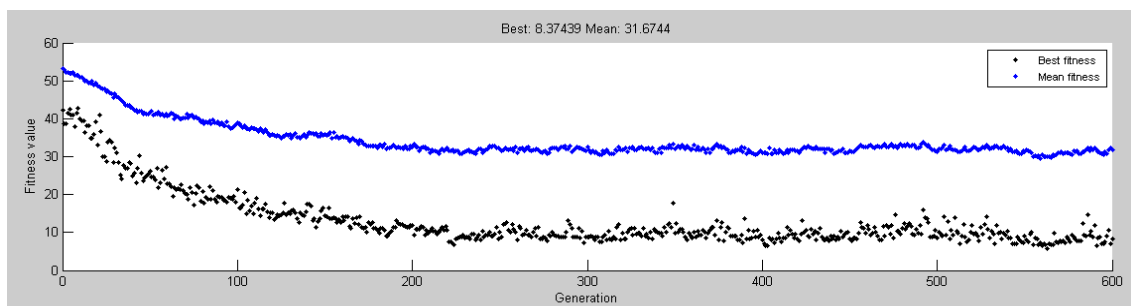


Figura 4.52 – Gráfico da convergência de um dos testes realizados com 10 respostas dinâmicas

A não convergência do algoritmo pode dever-se ao excesso de informação, fazendo com que este tenha dificuldade em arranjar uma solução cuja maioria dos valores das respostas dinâmicas se aproximem da maioria dos valores de tomados como dados do problema (ou seja, da solução correta).

4.11.3 Testes com 3 Danos de 15% Utilizando as Primeiras 3 Frequências Naturais e Modos de Vibração

Depois de testado um número relativamente elevado de dados, testa-se agora o desempenho do algoritmo quando o número de respostas dinâmicas é mais reduzido (apenas se consideram as primeiras 3 frequências naturais e modos de vibração), mantendo-se idênticas as restantes características do teste.

Os resultados do valor final da função objetivo para os 3 testes realizados podem ser consultados na tabela 4.27, assim como o resultado gráfico para o melhor teste (figura 4.53).

Tabela 4.27: resultados dos testes realizados com as 3 primeiras frequências naturais e modos de vibração da viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.15.3	0,279782
b2.3.15.3	0,236804
b3.3.15.3	0,227285

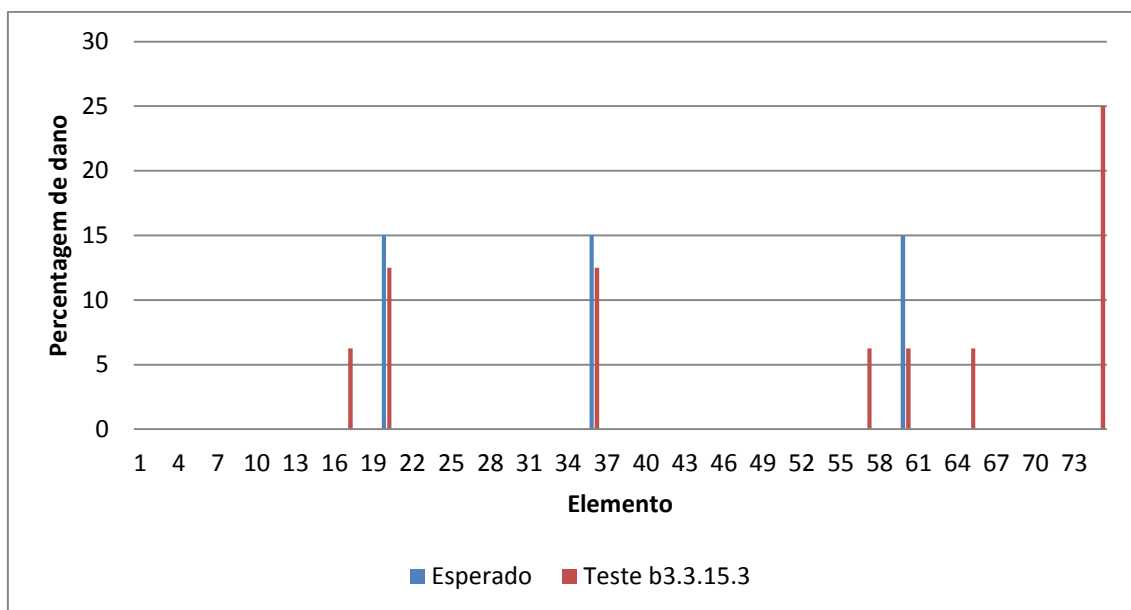


Figura 4.53 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.15.3

Analisando a figura acima, que corresponde ao gráfico do melhor teste (teste b3.3.15.3), verifica-se que o algoritmo conseguiu uma boa aproximação do dano em 2 dos 3 elementos danificados, conseguindo ainda identificar dano no 3º elemento (embora esteja mais longe da quantificação correta). No entanto, este detetou dano noutros elementos intactos mais afastados da vizinhança (elementos 17, 57, 65 e 75). O falso dano nestes elementos reflete que a informação dada ao AG não é suficiente, uma vez que dano nestes elementos, principalmente no elemento 17, têm uma influência visível na resposta dinâmica da estrutura, contrariamente ao que acontece se o dano for num elemento da extremidade da viga, que é o caso do elemento 75 (tabela 4.28).

Tabela 4.28: primeiras 3 frequências naturais da viga encastrada de 75 EF, intacta, com o EF 17 danificado em 15% e com o EF 75 danificado em 15%, e respetivos erros relativos

	Estrutura Intacta	EF 17 Danificado	Erro Relativo (%)	EF 75 Danificado	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,298492	31,226912	≅0,23	31,298492	≅0,0
2ª Freq. Natural (Hz)	196,144300	196,143879	≅0,0	196,144299	≅0,0
3ª Freq. Natural (Hz)	549,209760	548,612479	≅0,11	549,209745	≅0,0

O número de iterações necessárias para atingir a solução final neste teste foi aproximadamente 150 iterações, como é visível na figura 4.54.

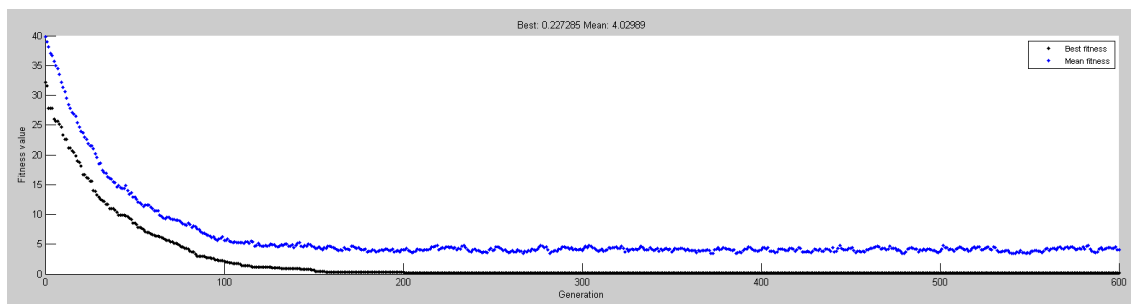


Figura 4.54 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.3

4.11.4 Testes com 3 Danos de 15% Utilizando as Primeiras 7 Frequências Naturais e Modos de Vibração

Quando são utilizadas as 5 primeiras respostas dinâmicas da estrutura, são obtidos bons resultados para a localização e detecção de dano. Quando se aumenta o número de respostas dinâmicas para 10, os resultados variam entre o muito bom (caso de dano mais simples) e entre o muito mau (caso de dano mais complicado), uma vez que o algoritmo é incapaz de convergir para uma solução. Assim sendo, foi testada a utilização de um número de frequências naturais e modos de vibração entre 5 e 10, de modo a ter um número de dados mais elevado mas não tão elevado que impeça a convergência do algoritmo.

Assim sendo, os resultados obtidos quando são usadas as primeiras 7 respostas dinâmicas da estrutura podem ser consultados na tabela 4.29.

Tabela 4.29: resultados dos testes realizados com as 7 primeiras frequências naturais e modos de vibração da viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15%.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.15.7	0,488739
b2.3.15.7	0,406853
b3.3.15.7	0,266747

O melhor teste realizado foi o último (b3.3.15.7), onde o valor da função objetivo é menor que nos testes restantes. Comparando este valor com aquele obtido com as mesmas condições mas com 5 frequências e modos de vibração natural, conclui-se que esta é uma melhor solução, pois o valor da função objetivo é menor. O resultado gráfico deste teste é mostrado na figura 4.55.

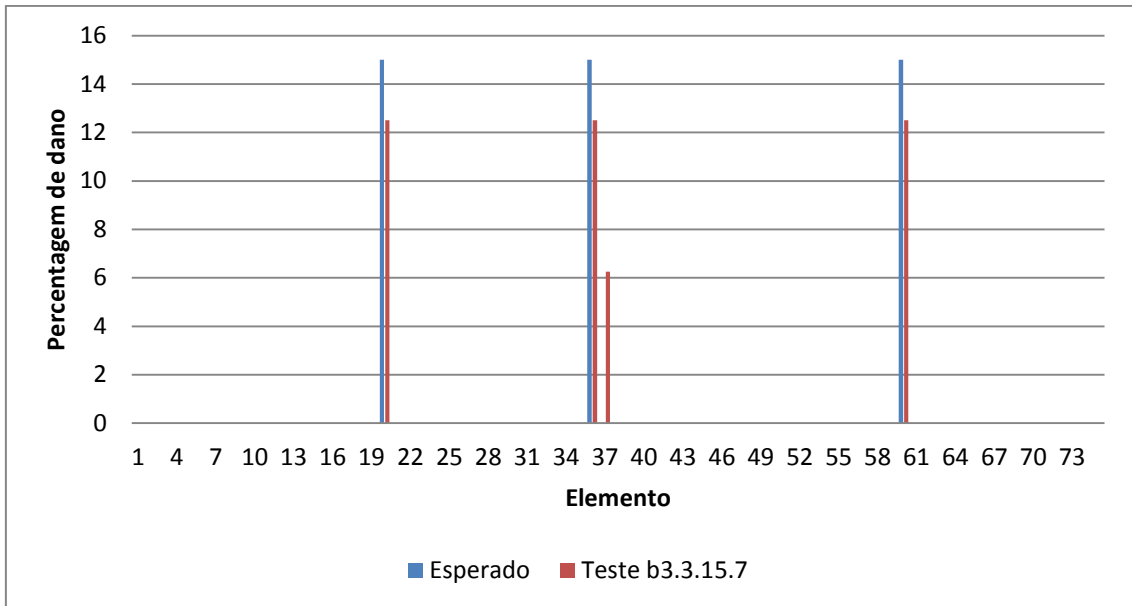


Figura 4.55 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.15.7

Analisando os resultados e comparando-os com aqueles mostrados na figura 4.26, constata-se que esta é realmente uma solução mais aproximada da solução certa (apesar de ser identificado um elemento são como danificado). Comparando a figura 4.28 com a figura abaixo, nota-se que com mais dados, o AG tem uma dificuldade superior em convergir para a solução final, necessitando de cerca de 455 iterações.

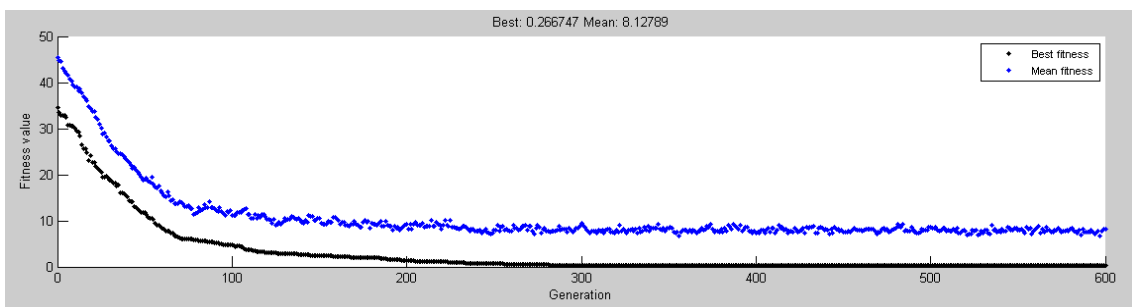


Figura 4.56 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.7

4.11.5 Resumo dos Testes da Divisão em 75 EF, com Diferente Número de Respostas Dinâmicas

De modo a melhor perceber as vantagens e desvantagens da utilização de um maior ou menor número de frequências naturais e respetivos modos de vibração usado, foi efetuada a tabela 4.30, que mostra os resultados obtidos nos testes realizados para 3 EF com 15% de dano com a utilização da informação das 3, 5, 7 e 10 primeiras frequências naturais e respetivos modos de vibração para uma população inicial de 200 indivíduos.

Tabela 4.30: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados com diferente número de respostas dinâmicas da viga encastrada

Teste	Nº Respostas Dinâmicas	Nº dos EF Danificados	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
b3.3.15.3	3	20/36/60	15/15/15	Sim	12,5/12,5/12,5	4	0,227285	150
b6.3.15	5	20/36/60	15/15/15	Sim	6,25/12,5/6,25	4	0,318628	240
b3.3.15.7	7	20/36/60	15/15/15	Sim	12,5/12,5/12,5	1	0,266747	455
b1.3.15.10	10	20/36/60	15/15/15	Não converge	-	-	-	-

Se se tivesse em conta apenas o valor final da função objetivo, poderia concluir-se que o número de frequências e modos de vibração natural ideal seria 3, uma vez que o valor da função objetivo para este teste é melhor do que aqueles obtidos para os restantes.

Todavia, se se considerarem também as respostas gráficas destes testes, juntamente com a tabela, verifica-se que se obtêm os melhores resultados quando se usam as 7 primeiras frequências naturais e modos de vibração, pois foi o teste onde se obteve melhor aproximação à solução certa (a percentagem de dano está mais próxima da real e é detetado incorretamente dano em apenas um EF).

Assim se conclui que não é ideal usar poucas frequências e modos de vibração natural, uma vez que a informação disposta ao algoritmo não é suficiente para que este encontre uma boa solução.

Analisando a convergência do algoritmo, nota-se que quanto mais informação se usa, mais iterações são requeridas pelo AG para chegar à solução final, tanto que no teste b1.3.15.10 este é incapaz de convergir para uma solução devido ao excesso de informação.

Apesar de se comprovar que com 7 frequências naturais e respetivos modos de vibração se obtém um melhor resultado, quando comparado com o teste de que usa 5 frequências naturais e respetivos modos de vibração admite-se que essa melhoria não é tão significativa que torne os testes feitos com 5 frequências e modos de vibração natural inválidos e, portanto, este será o número utilizado nos testes ao AG com o indicador *IFM* realizados posteriormente neste estudo.

4.12 Simulação de Ruído nas Respostas Dinâmicas

Tal como foi referenciado no capítulo introdutório desta dissertação de mestrado, nos casos reais de medição das respostas dinâmicas de qualquer estrutura existe sempre algum ruído nos valores. É por isso importante a criação de um método que ultrapasse o problema do ruído e consiga identificar e avaliar corretamente o dano em estruturas.

É com este intuito que o ruído nas medições é aqui simulado, fazendo variar os valores das frequências e modos de vibração no máximo até 3% (multiplicando cada valor das frequências e modos de vibração natural por um valor aleatório pertencente ao intervalo $[-0,03;0,03]$).

Os testes realizados são semelhantes aos realizados anteriormente para a viga encastrada de 75 EF, ou seja, foram realizados testes com 1 EF danificado em 50%, 3 EF (elementos 20, 36 e 60) danificados em 50%, 25% e 15%. Os parâmetros do AG são também idênticos aos anteriores e foram usados apenas cromossomas binários.

Foi escolhida esta estrutura pois está dividida num número razoável de EF e permitiu chegar a bons resultados de deteção, localização e quantificação de dano sem a existência de ruído (vejam-se os subcapítulos 4.1 a 4.5), o que permite uma boa comparação face aos testes realizados com ruído.

4.12.1 Divisão em 75 EF com 1 Dano de 50%

A tabela 4.31 mostra o erro relativo entre as frequências naturais sem e com ruído da viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50%. Os valores mostrados na tabela para as frequências naturais com ruído foram usados para todos os 6 testes realizados (os primeiros 3 testes foram feitos com uma população inicial de 400 cromossomas e os restantes com 200, tal como foi efetuado nos testes sem ruído). É evidente que, uma vez que os valores reais das frequências e modos de vibração natural são multiplicados por um número aleatório, cada vez que é efetuada uma medição, serão obtidos sempre valores ligeiramente diferentes.

Tabela 4.31: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 1 dano de 50% na viga encastrada de 75 EF.

	Valores Sem Ruído	Valores Com Ruído	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,184165	30,947299	$\cong 0,76$
2ª Freq. Natural (Hz)	193,675138	194,441294	$\cong 0,40$
3ª Freq. Natural (Hz)	548,974024	550,738188	$\cong 0,32$
4ª Freq. Natural (Hz)	1063,621337	1060,282530	$\cong 0,31$
5ª Freq. Natural (Hz)	1335,870419	1339,982450	$\cong 0,31$

Neste caso, em que existe ruído, quanto maior forem os valores dos erros relativos, maior será a dificuldade do AG encontrar a resposta correta do problema.

Os resultados dos testes realizados ao AG para este caso são mostrados na tabela 4.32. Observando esta tabela, verifica-se que os melhores testes foram o teste b3.1.50.r para o caso da população inicial de 400 cromossomas e o teste b6.1.50.r para o caso da população inicial menor. Os resultados gráficos destes testes são mostrados seguidamente (figuras 4.57 e 4.58).

Tabela 4.32: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 75 EF com 1 dano de 50% e ruído nas medições.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (IFM)
b1.1.50.r (Pop. Inicial: 400)	3,736359
b2.1.50.r (Pop. Inicial: 400)	3,900521
b3.1.50.r (Pop. Inicial: 400)	3,735284
b4.1.50.r (Pop. Inicial: 200)	3,904934
b5.1.50.r (Pop. Inicial: 200)	3,825617
b6.1.50.r (Pop. Inicial: 200)	3,782621

Analisando os resultados gráficos repara-se que apenas no teste b6.1.50.r é corretamente quantificado o dano no elemento 36. No teste b3.1.50.r e no teste b6.1.50.r são dados como danificados 5 e 3 EF, elementos intactos da estrutura, respetivamente. Por comparação com os mesmos testes mas sem ruído (tabela 4.4 e figuras 4.2 e 4.3) nota-se que estes resultados são piores, como seria de esperar. Ainda assim podem ser considerados bons resultados, pois o EF danificado é sempre identificado como tal, e o dano incorreto noutros elementos é muito baixo, exceto nos elementos da extremidade da viga, mas este problema é comum em todos os testes, como foi explicado anteriormente.

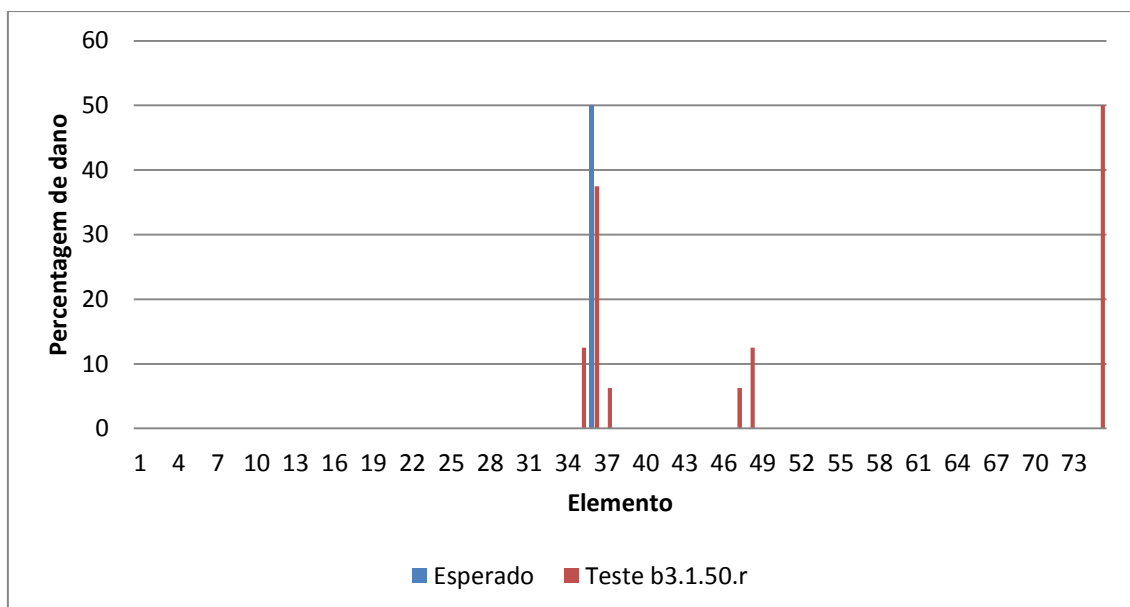


Figura 4.57 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.1.50.r

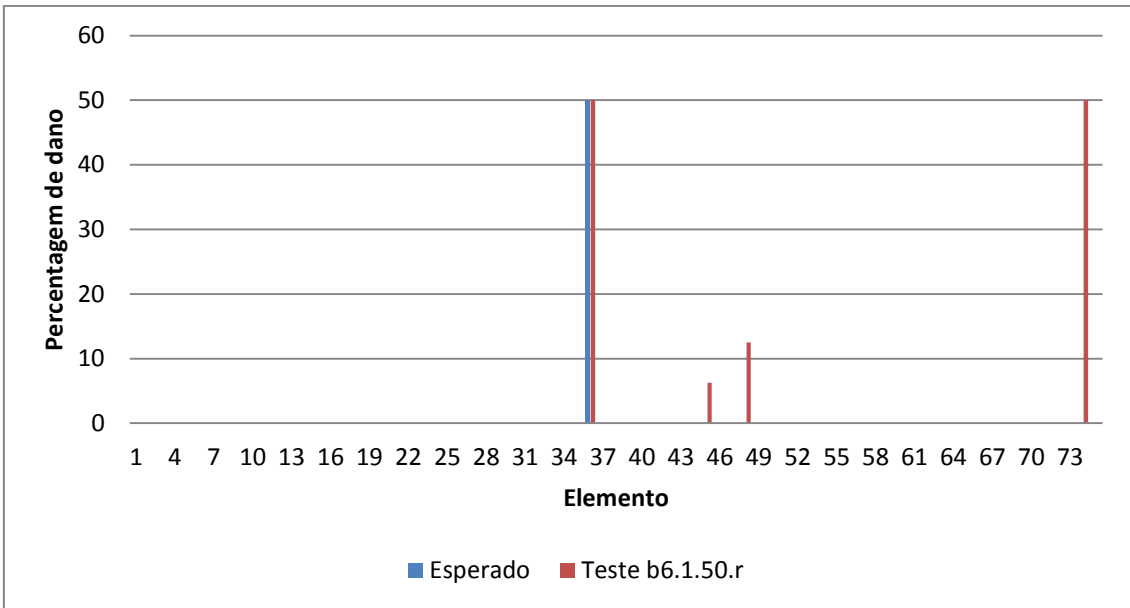


Figura 4.58 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.1.50.r

Relativamente à convergência do algoritmo para a resposta final, no teste b3.1.50.r foram necessárias cerca de 110 iterações e no teste b6.1.50.r aproximadamente 200 iterações, como é visível nas figuras 4.59 e 4.60.

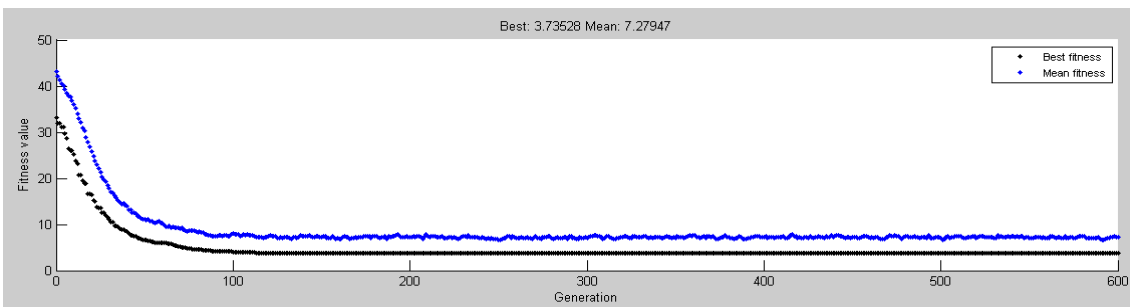


Figura 4.59 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.1.50.r

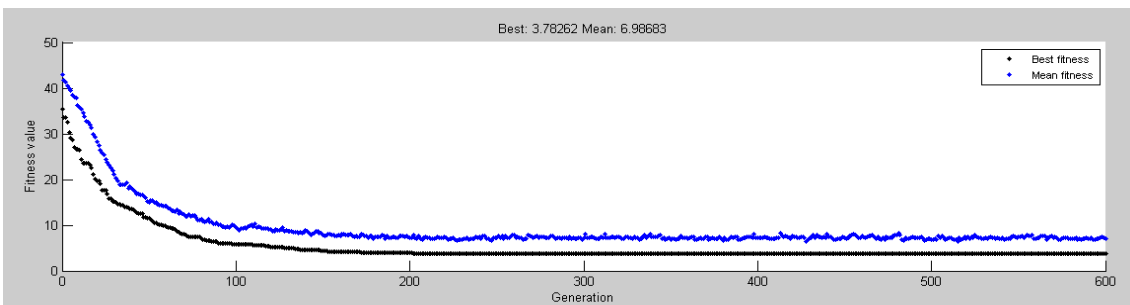


Figura 4.60 – Gráfico da convergência do AG no teste b6.1.50.r

4.12.2 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 50%

Depois de efetuados os testes para 1 dano de 50%, expandiu-se, uma vez mais, a dificuldade do problema, sendo aumentado o número de EF danificados para 3, mantendo a percentagem de erro. As frequências naturais para este caso bem como os erros relativos são indicados na tabela 4.33.

Tabela 4.33: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 3 danos de 50% na viga encastrada de 75 EF.

	Valores Sem Ruído	Valores Com Ruído	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,184165	30,583160	≅1.93
2ª Freq. Natural (Hz)	193,675138	189,270969	≅2.27
3ª Freq. Natural (Hz)	548,974024	535,371997	≅2.48
4ª Freq. Natural (Hz)	1063,621337	1024,754662	≅3.65
5ª Freq. Natural (Hz)	1335,870419	1318,368613	≅1.31

Os resultados dos testes efetuados são mostrados na tabela 4.34 e os resultados gráficos dos melhores testes nas figuras 4.61 e 4.62.

Tabela 4.34: resultados dos testes realizados para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 50% e ruído nas medições.

Teste	Resultado da Função Objetivo
b1.3.50.r (Pop. Inicial: 400)	3,108024
b2.3.50.r (Pop. Inicial: 400)	2,433423
b3.3.50.r (Pop. Inicial: 400)	2,820121
b4.3.50.r (Pop. Inicial: 200)	2,762355
b5.3.50.r (Pop. Inicial: 200)	2,738938
b6.3.50.r (Pop. Inicial: 200)	2,612590

As figuras 4.61 e 4.62 revelam que, em ambos os testes, o algoritmo atribuiu alguma percentagem de dano a vários elementos intactos da estrutura. Todavia este quantifica corretamente o dano nos 3 elementos realmente danificados, no caso do teste b2.3.50.r e, no teste b6.3.50.r obteve bons resultados, estando perto da quantificação correta nos 3 EF com dano.

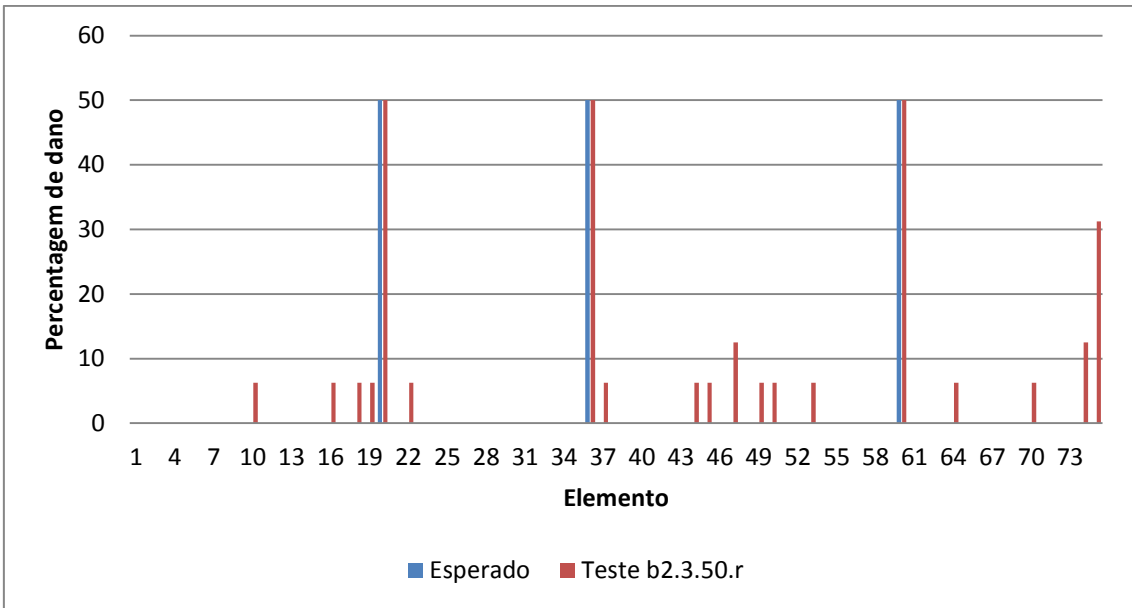


Figura 4.61 – Gráfico referente aos resultados do teste b2.3.50.r

Mais uma vez é evidente o efeito negativo do ruído, quando se comparam estes resultados com os resultados dos mesmos testes mas sem ruído (tabela 4.7, figuras 4.10 e 4.11).

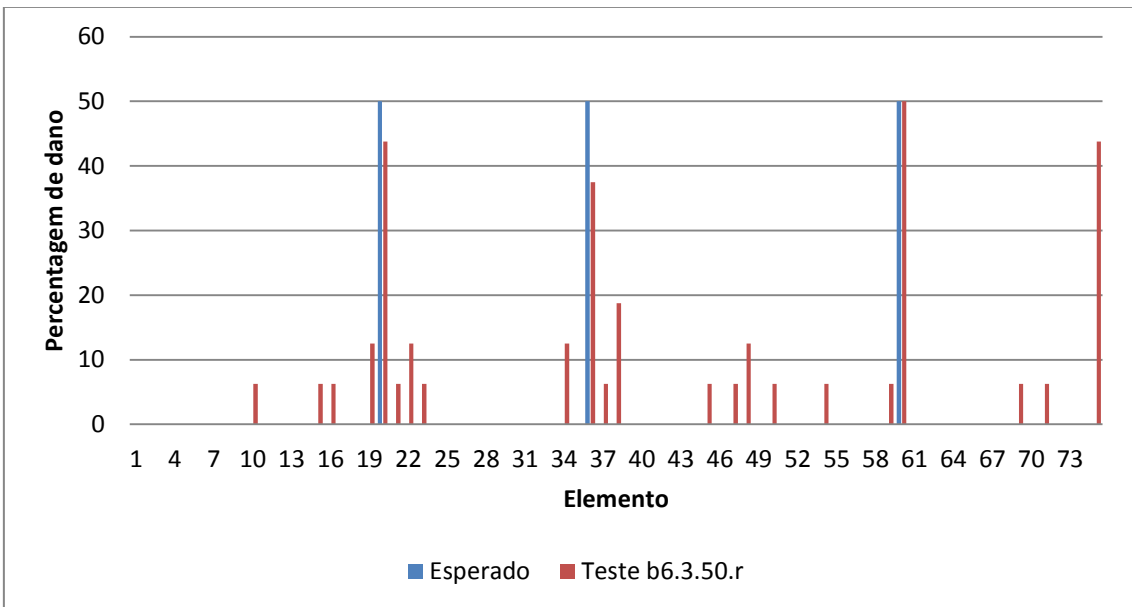


Figura 4.62 – Gráfico referente aos resultados do teste b6.3.50.r

As figuras 4.63 e 4.64 mostram a convergência do AG para estes testes. As figuras permitem observar que o AG necessitou de aproximadamente 285 e 200 iterações, para convergir para a solução final nos testes b2.3.50.r e b6.3.50.r, respectivamente.

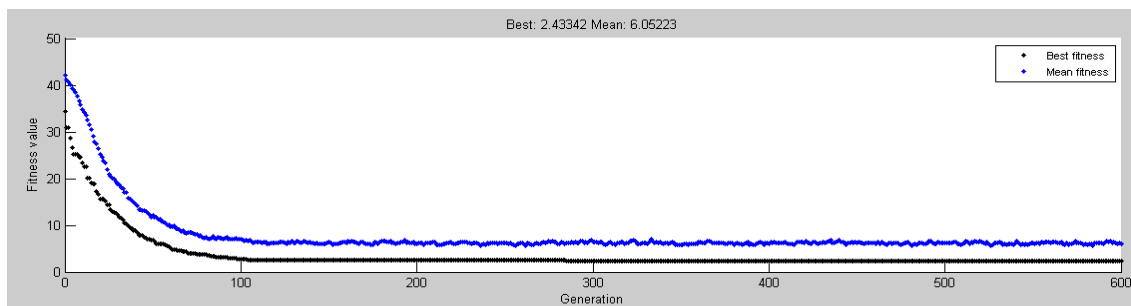


Figura 4.63 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.50.r

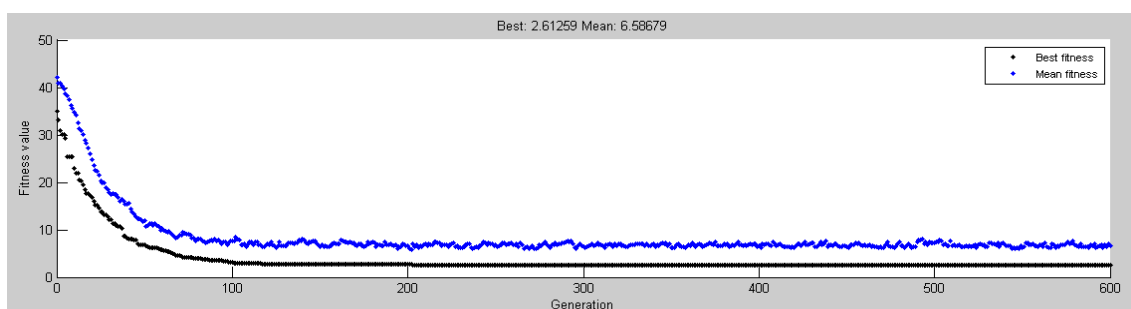


Figura 4.64 – Gráfico da convergência do AG no teste b2.3.50.r

4.12.3 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 25%

Foram novamente repetidos os testes realizados anteriormente, mas desta vez contaminando os valores com ruído. Os erros relativos entre as frequências naturais referentes a esta estrutura com esta combinação de dano, sem e com ruído, podem ser verificados na tabela 4.35.

Tabela 4.35: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 3 danos de 25% na viga encastrada de 75 EF.

	Valores Sem Ruído	Valores Com Ruído	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,184165	30,764142	≅1.35
2ª Freq. Natural (Hz)	193,675138	194,980838	≅0.67
3ª Freq. Natural (Hz)	548,974024	547,037860	≅0.35
4ª Freq. Natural (Hz)	1063,621337	1076,549714	≅1.22
5ª Freq. Natural (Hz)	1335,870419	1341,325086	≅0.41

Através da tabela 4.36 pode-se observar que os testes cujo valor da função objetivo é menor foram os testes b3.3.25.r e b5.3.25.r.

Tabela 4.36: resultados dos testes realizados com o AG para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 25% e ruído nas medições.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.25.r (Pop. Inicial: 400)	1,666057
b2.3.25.r (Pop. Inicial: 400)	1,662936
b3.3.25.r (Pop. Inicial: 400)	1,642476
b4.3.25.r (Pop. Inicial: 200)	1,666989
b5.3.25.r (Pop. Inicial: 200)	1,665313
b6.3.25.r (Pop. Inicial: 200)	1,703495

Graficamente, os resultados dos melhores testes podem ser observados nas figuras 4.65 e 4.66. Estes resultados gráficos provam que o algoritmo consegue detetar e localizar corretamente o dano na estrutura (apesar de em ambos os testes ter sido identificado 1 EF intacto com dano). Contudo, a percentagem de dano que este atribui a cada um dos elementos danificados não se encontra próxima da correta, sendo atribuído apenas a percentagem de dano mínima possível (6,25%), tendo em conta a codificação de dano escolhida.

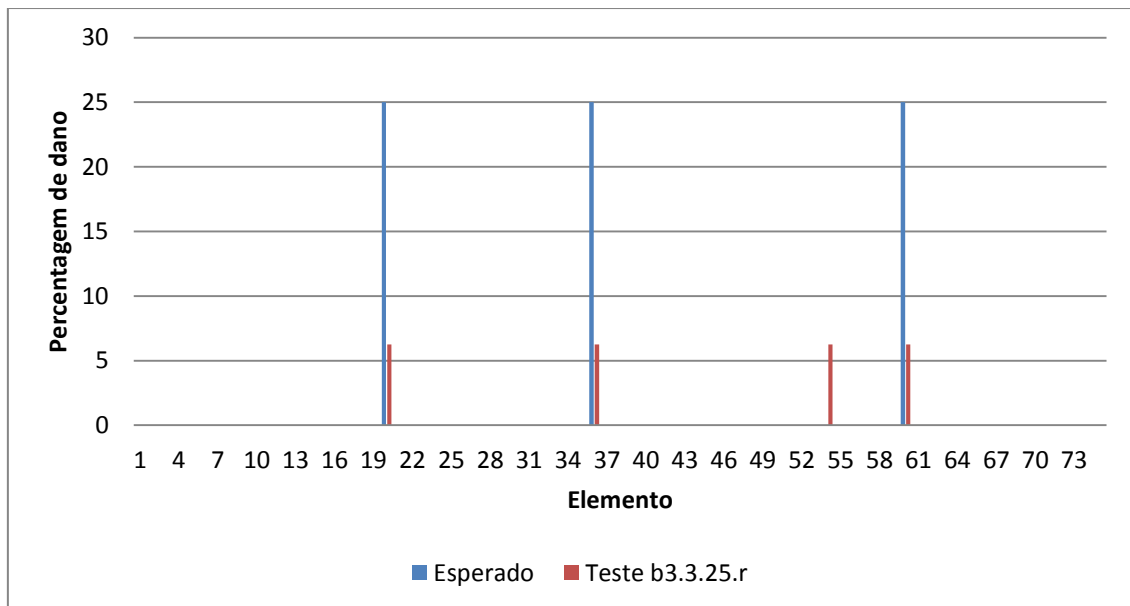


Figura 4.65 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.25.r

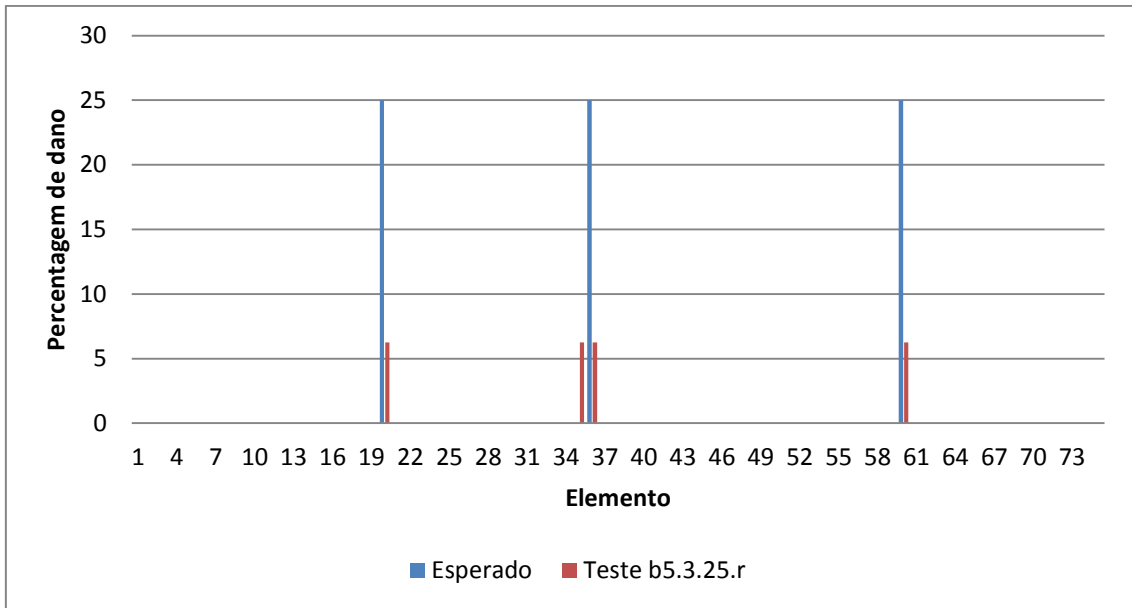


Figura 4.66 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.3.25.r

A convergência do algoritmo referente a estas soluções pode ser observada nas figuras 4.67 e 4.68. Estas figuras revelam que o AG necessitou de 130 e 200 iterações nos testes b3.3.25.r e b5.3.25.r, respetivamente.

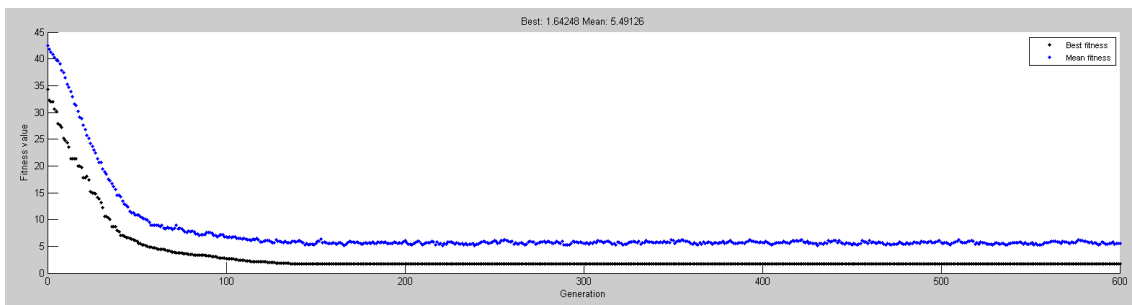


Figura 4.67 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.25.r

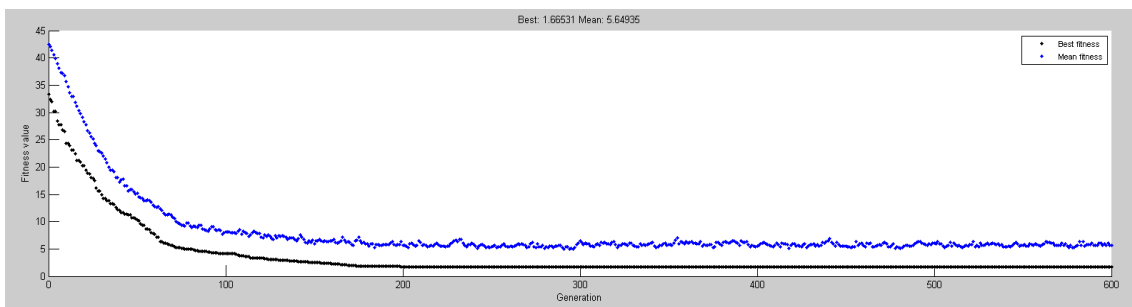


Figura 4.68 – Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.25.r

4.12.4 Divisão em 75 EF com 3 Danos de 15%

Finalmente, a influência do ruído nos dados modais da estrutura é testada no caso de maior dificuldade para o AG. Os valores das frequências naturais usados nestes testes são mostrados na tabela 4.37, bem como a sua comparação com os respectivos valores mas sem a influência do ruído.

Tabela 4.37: erro relativo entre os valores das frequências naturais sem e com ruído, para 3 danos de 15% na viga encastrada de 75 EF.

	Valores Sem Ruído	Valores Com Ruído	Erro Relativo (%)
1ª Freq. Natural (Hz)	31,216707	30,764142	≅1,45
2ª Freq. Natural (Hz)	195,580595	194,980838	≅0,31
3ª Freq. Natural (Hz)	547,224063	547,037860	≅0,03
4ª Freq. Natural (Hz)	1069,315052	1076,549714	≅0,68
5ª Freq. Natural (Hz)	1340,834324	1341,325086	≅0,04

Relembra-se que os valores com ruído mostrados na tabela provêm da multiplicação dos valores sem ruído multiplicados por um valor aleatório pertencente ao intervalo $[-0,03;0,03]$ e dada a aleatoriedade desse valor, cada vez que é simulada uma medição, os valores das frequências naturais e modos de vibração serão sempre diferentes.

No caso sem ruído, o algoritmo chegou a resultados considerados razoáveis, analisando a tabela 4.13 e as figuras 4.26 e 4.27. No presente caso onde os dados modais estão poluídos com ruído, os resultados dos 6 testes realizados são mostrados na tabela 4.38.

Tabela 4.38: resultados dos testes realizados, para a viga encastrada de 75 EF com 3 danos de 15% e ruído nas medições.

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
b1.3.15.r (Pop. Inicial: 400)	1,711474
b2.3.15.r (Pop. Inicial: 400)	1,647714
b3.3.15.r (Pop. Inicial: 400)	1,644317
b4.3.15.r (Pop. Inicial: 200)	1,659632
b5.3.15.r (Pop. Inicial: 200)	1,648085
b6.3.15.r (Pop. Inicial: 200)	1,705752

Para uma população inicial de 400 indivíduos, o melhor teste realizado foi o teste b3.3.15.r e, para uma população inicial de 200 indivíduos, foi o teste b5.3.15.r que obteve uma melhor aproximação.

Nas figuras 4.69 e 4.70 são mostradas as respostas gráficas referentes aos melhores testes.

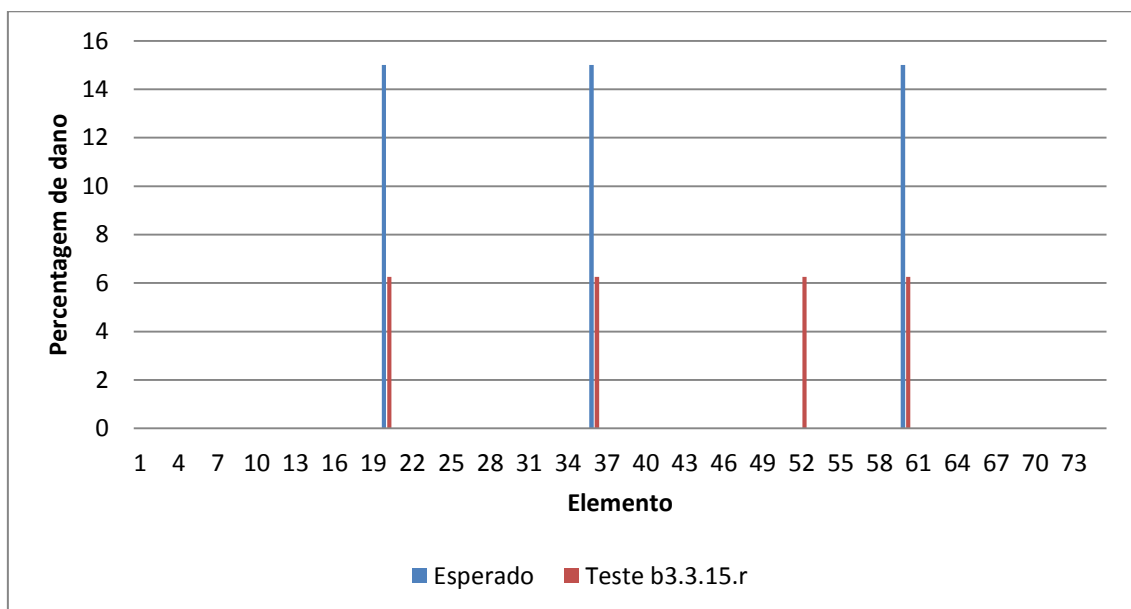


Figura 4.69 – Gráfico referente aos resultados do teste b3.3.15.r

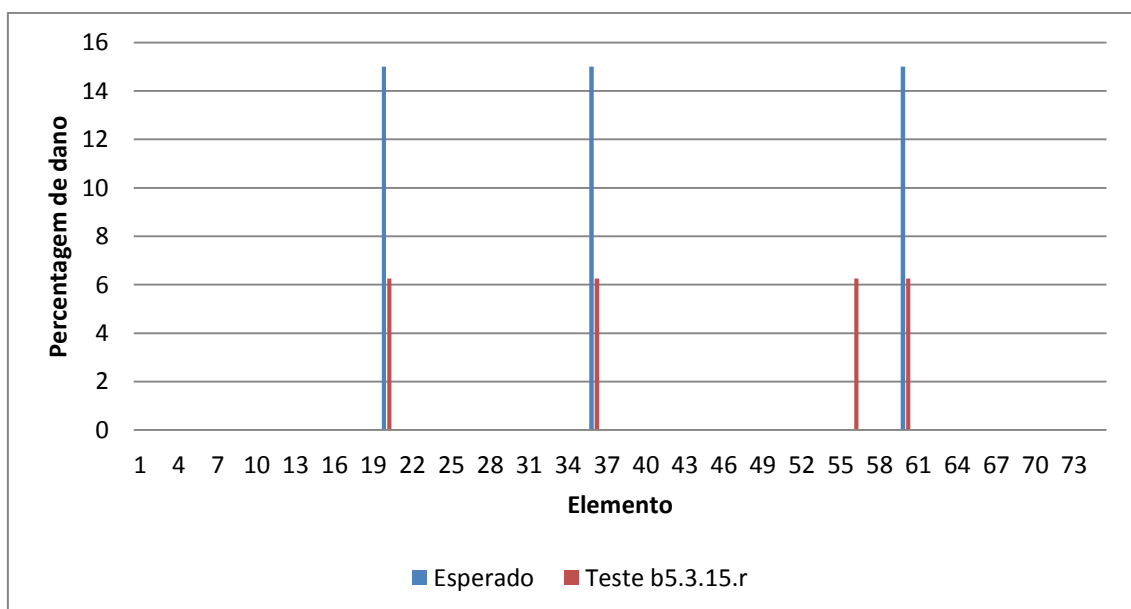


Figura 4.70 – Gráfico referente aos resultados do teste b5.3.15.r

Ao analisar as figuras anteriores conclui-se que o resultado destes testes é muito semelhante aos resultados obtidos para o caso do dano de 25%.

Devido à codificação do dano escolhida, o algoritmo nunca poderia quantificar corretamente o dano. No entanto, era esperado que este apresentasse resultados cuja percentagem de dano estivesse próxima da real (ou seja, esperava-se que o algoritmo apresenta-se uma percentagem de 12,5% ou de 18,75% que seria a percentagem possível mais próxima da exata, 15%). Tal não aconteceu em nenhum dos testes, sendo até detetado dano num EF intacto em cada teste.

A convergência do teste b3.3.15.r é mostrada na figura 4.71.

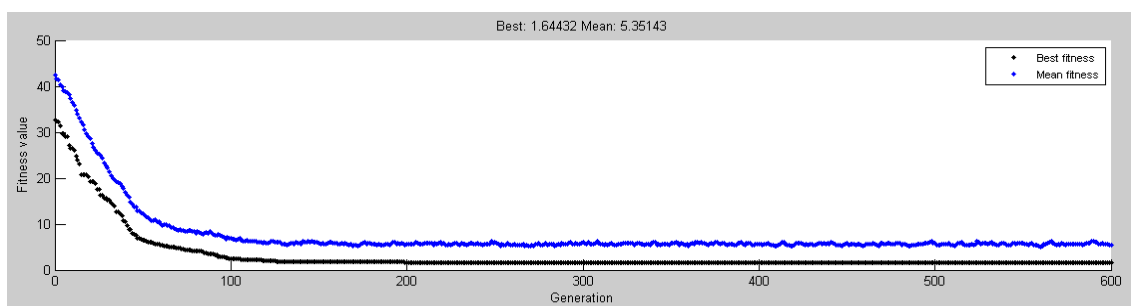


Figura 4.71 – Gráfico da convergência do AG no teste b3.3.15.r

Por sua vez, a figura 4.72 mostra a convergência do AG para a solução final do teste b5.3.15.r.

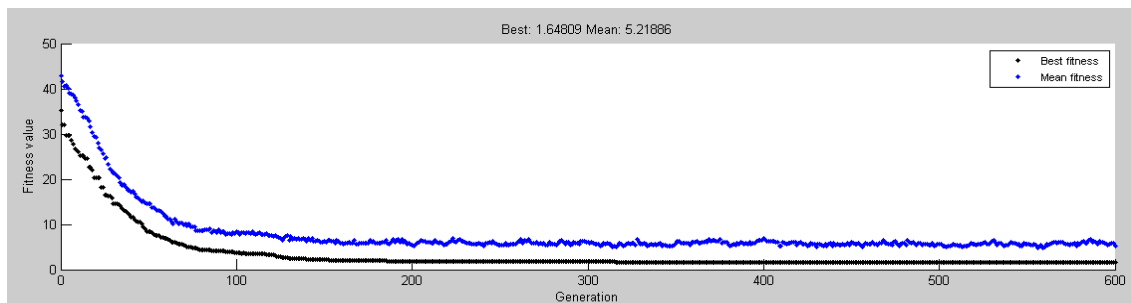


Figura 4.72 - Gráfico da convergência do AG no teste b5.3.15.r

Estas figuras permitem verificar que o algoritmo necessitou de aproximadamente 200 indivíduos para o teste b3.3.15.r e cerca de 315 para o teste b5.3.15.r.

4.12.5 Resumo dos Testes com Ruído

Os resultados da totalidade dos testes em que se simulou a presença de ruído nos valores das frequências e modos de vibração natural encontram-se na tabela 4.39. A análise desta tabela permitirá retirar algumas conclusões importantes acerca da influência do ruído, principalmente quando comparada com a tabela 4.15, que diz respeito aos testes semelhantes mas sem a presença de ruído nos valores.

Tabela 4.39: tabela resumo dos resultados obtidos para os testes com ruído

Teste	Pop. Inicial	Nº dos EF. Danificados.	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
b3.1.50.r	400	36	50	Sim	37,5	5	3,735284	110
b6.1.50.r	200	36	50	Sim	50	3	3,782621	200
b2.3.50.r	400	20/36/60	50/50/50	Sim	50/50/50	16	2,433423	285
b6.3.50.r	200	20/36/60	50/50/50	Sim	43,75/43,75/50	19	2,612590	200
b3.3.25.r	400	20/36/60	25/25/25	Sim	6,25/6,25/6,25	1	1,642476	130
b5.3.25.r	200	20/36/60	25/25/25	Sim	6,25/6,25/6,25	1	1,665313	200
b3.3.15.r	400	20/36/60	15/15/15	Sim	6,25/6,25/6,25	1	1,644317	200
b5.3.15.r	200	20/36/60	15/15/15	Sim	6,25/6,25/6,25	1	1,648085	315

Em todos os testes, o dano foi corretamente localizado, embora em apenas 2 dos testes a quantificação foi a certa (teste b6.1.50.r e teste b2.3.50.r), estando as restantes percentagens afastadas daquelas que seriam esperadas. Pode-se verificar que, em todos os casos de dano múltiplo com percentagens de dano iguais a 25% e 15%, as percentagens de dano atribuídas aos EF danificados foram muito pequenas (as mínimas possíveis). Nos casos sem ruído, embora em nenhum teste tenha tido uma quantificação dos elementos danificados totalmente correta, as percentagens de dano, analisando a globalidade dos valores, estão mais próximas das corretas.

Quanto ao número de EF intactos aos quais o AG atribuiu dano, nota-se que o número é bem mais elevado nos casos supostamente mais simples, isto é, nos casos em que o dano é maior e igual a 50%. Nos casos de 25% e 15% de dano, apenas 1 EF em cada teste foi mal identificado como danificado.

Em relação aos valores finais da função objetivo, que ditam se o resultado final está ou não próximo da solução ótima (relativa aos dados fornecidos ao AG), estes são mais elevados que aqueles obtidos para os testes sem a presença de ruído.

Tendo em conta todos os fatores descritos, conclui-se que a presença de ruído nas medições é negativa para o desempenho do AG, no que diz respeito ao presente problema em estudo. No entanto, o AG conseguiu ainda assim detetar e localizar corretamente os EF danificados, e dar uma resposta correta ou próxima da correta nos casos de maior percentagem de dano.

A convergência do algoritmo não é, aparentemente, afetada pelo ruído.

Capítulo 5

Testes de Quantificação de Dano na Treliça

Anteriormente, no capítulo 4, a habilidade do AG detetar, localizar e quantificar dano numa viga encastrada foi testada. O algoritmo provou ser capaz de encontrar boas soluções, quando usado em conjunto com o indicador de dano *IFM*, para os testes realizados sem a presença de ruído nos dados modais da estrutura.

Ao poluir os valores das frequências e modos de vibração natural da viga, o AG não encontrou soluções tão adequadas como anteriormente. Contudo, conseguiu identificar corretamente a maioria dos EF danificados, com poucos EF intactos a serem considerados danificados, falhando apenas na quantificação.

No presente capítulo, as capacidades de quantificação de dano do AG serão novamente testadas mas desta vez para a estrutura em treliça definida anteriormente (figura 3.5). Neste caso, o número de EF será reduzido (apenas 15) e o seu tamanho será maior, pois assume-se que cada barra constituinte da estrutura é um EF.

Tanto o método utilizado como os parâmetros do AG serão idênticos aos do 3º capítulo desta dissertação. O número de frequências e respetivos modos de vibração utilizados será igualmente 5. Serão usados apenas cromossomas binários, pois ficou provado no capítulo precedente que são obtidas melhores soluções (isto é, soluções mais próximas das esperadas) quando este tipo de cromossoma é utilizado. Os EF considerados danificados serão os mesmos que no subcapítulo 3.5.

5.1 Testes com 1 Dano de 50%

Primariamente foram danificados 3 EF distintos, um de cada vez, para perceber se o algoritmo tem capacidade de detetar dano em cada um, com a percentagem certa (50%). A influência do dano nas frequências naturais da estrutura é mostrada na tabela 5.1.

Tabela 5.1: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça intacta e para 3 casos de dano distintos, com 1 EF danificado em 50%

	Estrutura Intacta	EF 1 Danificado		EF 7 Danificado		EF 13 Danificado	
	Freq. Natural (Hz)	Freq. Natural (Hz)	Erro Relativo (%)	Freq. Natural (Hz)	Erro Relativo (%)	Freq. Natural (Hz)	Erro Relativo (%)
1^a	69,668105	66,476540	≅4,58	68,920333	≅1,07	69,388046	≅0,40
2^a	78,190017	76,792757	≅1,79	78,056383	≅0,17	78,129780	≅0,08
3^a	84,873590	84,074744	≅0,94	81,876102	≅3,53	83,799459	≅1,27
4^a	100,242604	97,541342	≅2,69	95,477263	≅4,75	97,683163	≅2,55
5^a	103,006044	102,721426	≅0,28	100,148126	≅2,77	102,206695	≅0,78

Analisando, de um modo global, as colunas correspondentes aos erros relativos das frequências naturais, nota-se que os menores valores de erro são aqueles pertencentes ao 3º caso de dano (EF nº 13 danificado) e portanto espera-se que seja neste caso que o algoritmo tenha mais dificuldades em encontrar a solução esperada.

Nesta fase do estudo, foram realizados 10 testes para cada caso de dano, 5 dos quais com uma população inicial de cromossomas igual a 400 e os restantes com uma população inicial de 200 indivíduos.

Os resultados dos testes para o primeiro caso de dano podem ser observados na tabela 5.2. Ao analisar estes valores repara-se que o algoritmo encontrou a solução certa em 7 dos 10 testes realizados, 4 no caso dos testes com a população de 400 indivíduos e 3 no caso dos testes com uma menor população inicial.

Nos casos em que o algoritmo não convergiu para a solução correta, os valores da função objetivo são altos, quando comparados com os valores obtidos ao longo deste estudo. Isto demonstra a influência significativa do dano no comportamento da estrutura, nomeadamente nas suas respostas dinâmicas, facto que poderá ajudar a guiar o AG.

O gráfico da melhor solução encontrada pelo AG é idêntica no caso da população inicial de 400 e 200 cromossomas e é revelado na figura 5.1 (será mostrado apenas a figura relativa ao teste T5.1.1.50).

Tabela 5.2: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com o EF nº1 danificado em 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
T1.1.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,019577
T2.1.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,019577
T3.1.1.50 (Pop. Inicial: 400)	3,797307
T4.1.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,019577
T5.1.1.50 (Pop. Inicial: 400)	0,019577
T6.1.1.50 (Pop. Inicial: 200)	0,019577
T7.1.1.50 (Pop. Inicial: 200)	5,664295
T8.1.1.50 (Pop. Inicial: 200)	14,689689
T9.1.1.50 (Pop. Inicial: 200)	0,019577
T10.1.1.50 (Pop. Inicial: 200)	0,019577

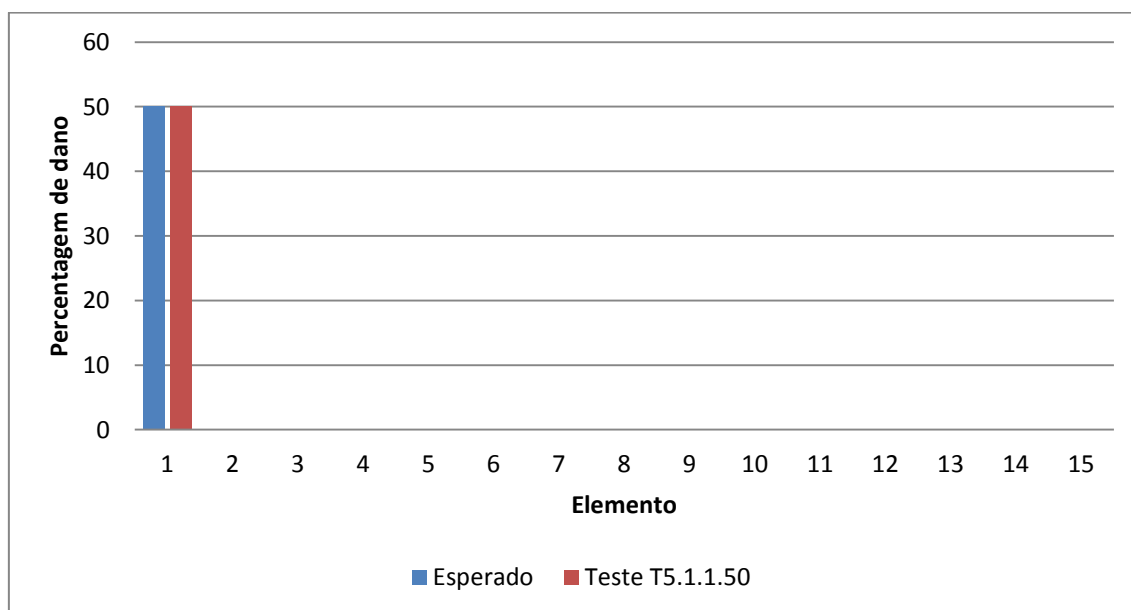


Figura 5.1 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.1.1.50

Quanto à convergência do algoritmo, os testes que convergiram mais rapidamente para a solução final, dentro daqueles que chegaram à solução esperada, foram os testes T5.1.1.50 (população inicial de 400 indivíduos) e T6.1.1.50 (população inicial de 200 indivíduos), com menos de 50 iterações e cerca de 75 iterações, respectivamente. Pode-se dizer que o AG convergiu muito rapidamente para a solução final nestes casos. Isto é uma consequência do reduzido número de EF, que faz com que existam poucas variáveis no problema (60), logo, mais facilmente o AG converge para uma solução (mesmo que não seja a solução esperada).

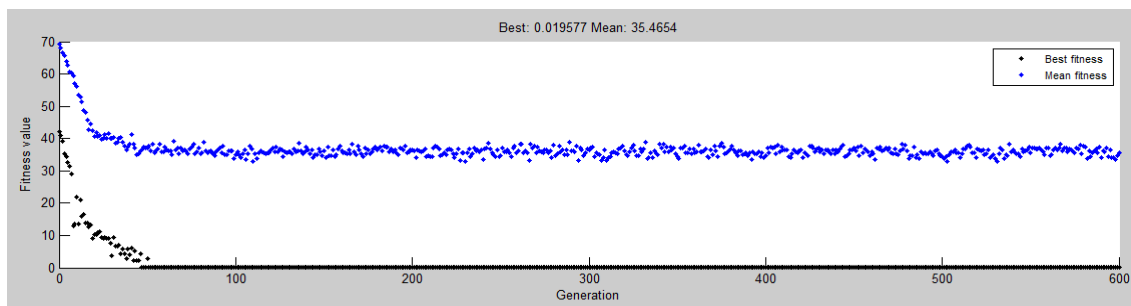


Figura 5.2 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.1.1.50

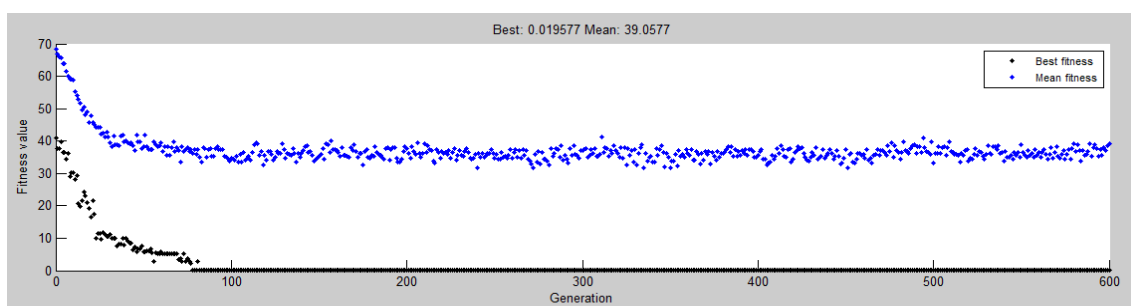


Figura 5.3 – Gráfico da convergência do AG no teste T6.1.1.50

Observe-se agora, na tabela 5.3, os resultados para o segundo caso de dano (EF n^o7 danificado).

Tabela 5.3: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com o EF n^o7 danificado em 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
T1.1.7.50 (Pop. Inicial: 400)	0,022289
T2.1.7.50 (Pop. Inicial: 400)	0,022289
T3.1.7.50 (Pop. Inicial: 400)	0,022289
T4.1.7.50 (Pop. Inicial: 400)	0,022289
T5.1.7.50 (Pop. Inicial: 400)	0,022289
T6.1.7.50 (Pop. Inicial: 200)	11,049218
T7.1.7.50 (Pop. Inicial: 200)	13,814372
T8.1.7.50 (Pop. Inicial: 200)	7,617587
T9.1.7.50 (Pop. Inicial: 200)	12,453454
T10.1.7.50 (Pop. Inicial: 200)	14,946460

A tabela anterior demonstra claramente que, neste caso, o AG é bastante penalizado quando a população inicial é menor pois em nenhum dos testes este conseguiu encontrar a solução

correta, a contrastar com os 5 testes bem sucedidos para uma população inicial de 400 cromossomas. Este facto é confirmado pelas figuras 5.4 e 5.5, que mostram o resultado gráfico dos melhores testes para cada tamanho de população inicial.

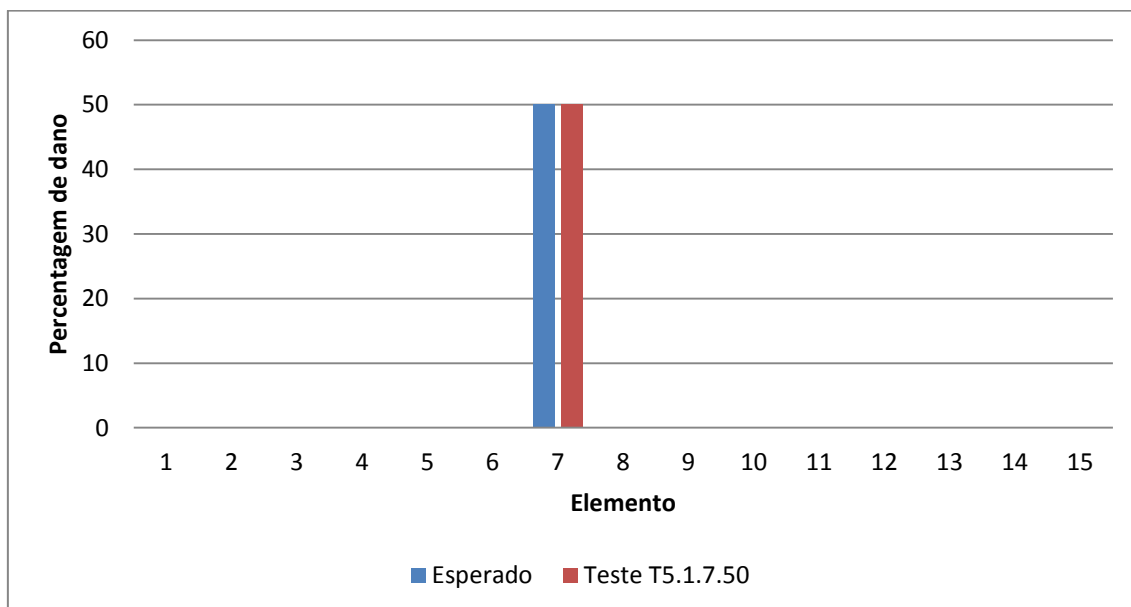


Figura 5.4 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.1.7.50

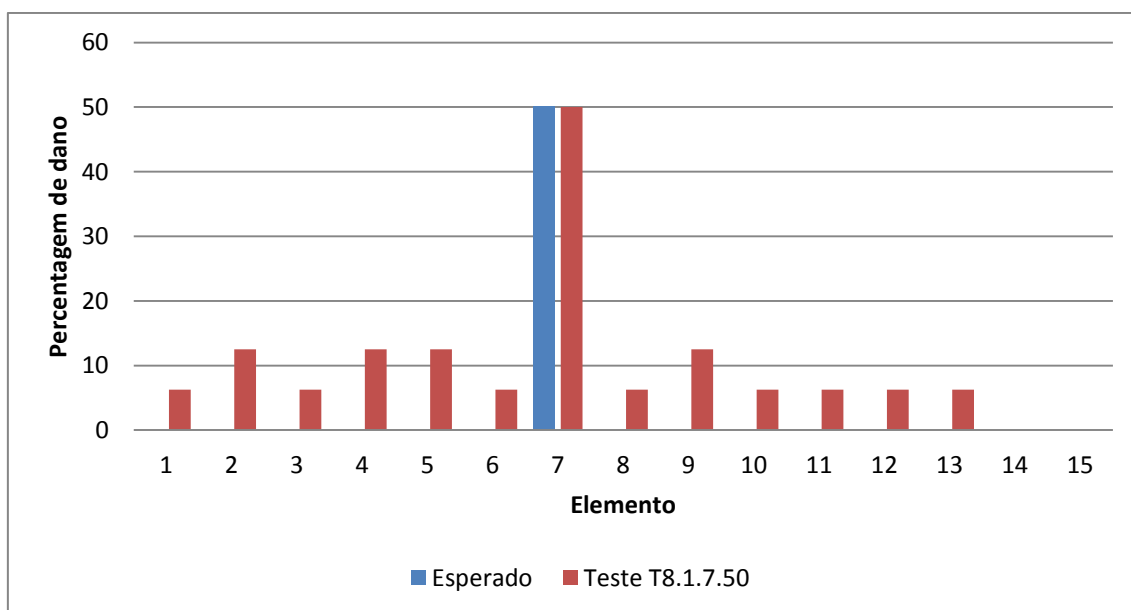


Figura 5.5 – Gráfico referente aos resultados do teste T8.1.7.50

Enquanto no teste T5.1.7.50 o AG foi bem sucedido, sem errar nenhum EF, no teste T8.1.7.50 o AG atribuiu dano a 12 elementos intactos, que formam quase a totalidade da estrutura em estudo.

A convergência para os melhores testes neste caso de dano é mostrada na figura 5.6 e 5.7.

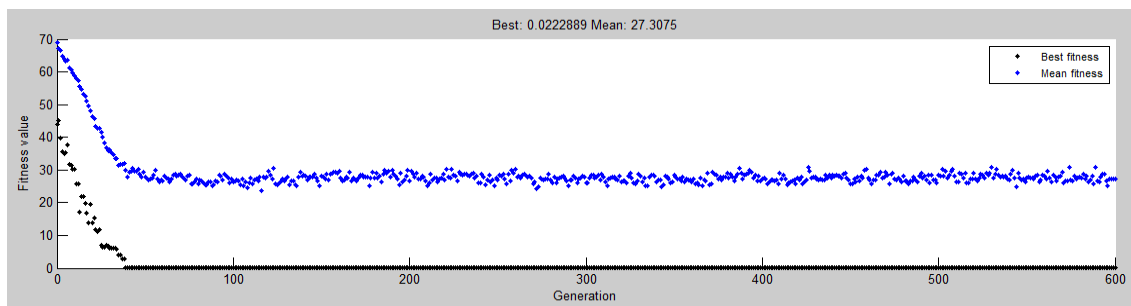


Figura 5.6 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.1.7.50

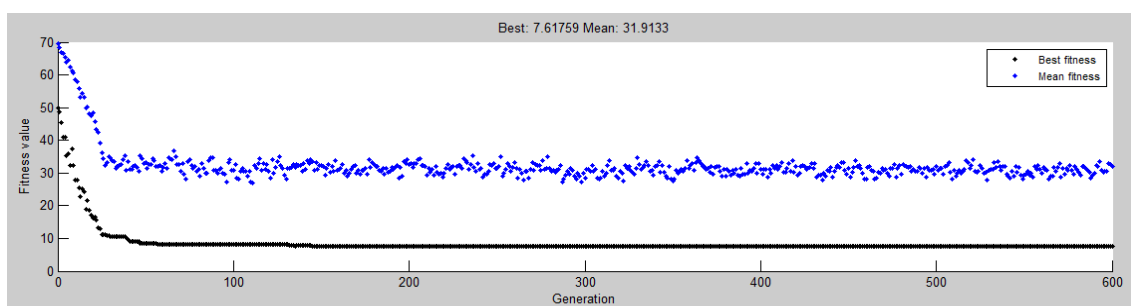


Figura 5.7 – Gráfico da convergência do AG no teste T8.1.7.50

O algoritmo necessitou de aproximadamente 40 iterações para convergir para a solução final no teste T5.1.7.50 e de perto de 145 iterações no teste T8.1.7.50.

Por último a tabela 5.4 mostra os valores finais da função objetivo para o caso em que o EF nº13 é o elemento danificado.

Tabela 5.4: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com o EF nº13 danificado em 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
T1.1.13.50 (Pop. Inicial: 400)	2,719773
T2.1.13.50 (Pop. Inicial: 400)	0,020830
T3.1.13.50 (Pop. Inicial: 400)	0,020830
T4.1.13.50 (Pop. Inicial: 400)	15,796213
T5.1.13.50 (Pop. Inicial: 400)	2,719773
T6.1.13.50 (Pop. Inicial: 200)	14,143728
T7.1.13.50 (Pop. Inicial: 200)	14,915281
T8.1.13.50 (Pop. Inicial: 200)	10,306982
T9.1.13.50 (Pop. Inicial: 200)	5,824362
T10.1.13.50 (Pop. Inicial: 200)	2,719773

Tal como se previa, este último teste revelou ser o mais difícil para o algoritmo. Dos 10 testes realizados, apenas em 2 se chegou à resposta certa e ambos em testes cuja população inicial é de 400 indivíduos.

Os resultados gráficos dos melhores testes para a 3ª combinação de dano são mostrados nas figuras 5.8 e 5.9.

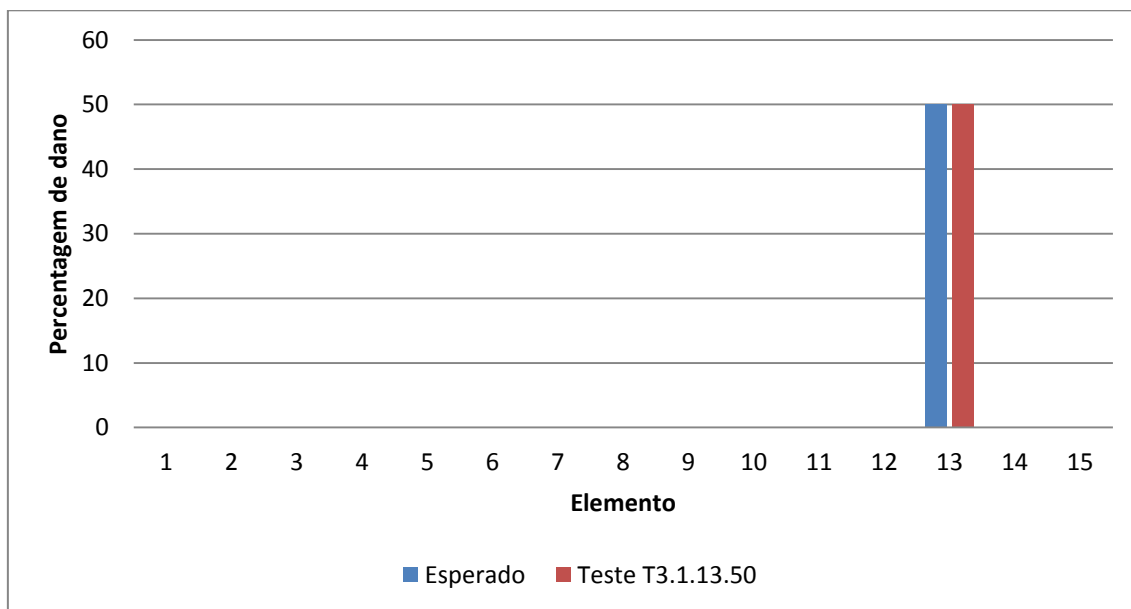


Figura 5.8 – Gráfico referente aos resultados do teste T3.1.13.50

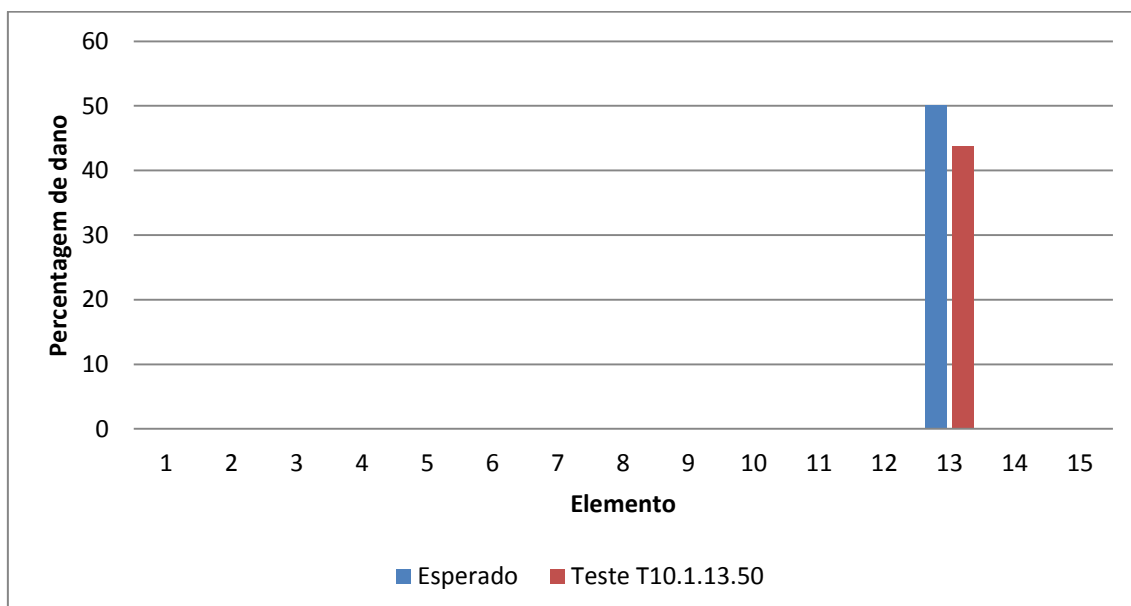


Figura 5.9 – Gráfico referente aos resultados do teste T10.1.13.50

Analisando as figuras repara-se que o AG esteve muito próximo da solução certa no teste T10.1.13.50 apesar de, no geral, os resultados dos testes referentes à população mais

reduzida terem sido piores quando comparados com os resultados obtidos com a população com maior número de indivíduos.

Analisando as figuras 5.10 e 5.11 volta a verificar-se uma rápida convergência do algoritmo para a solução final. Este necessitou de aproximadamente 55 iterações no teste T3.1.13.50 e de cerca de 70 iterações no teste T10.1.13.50.

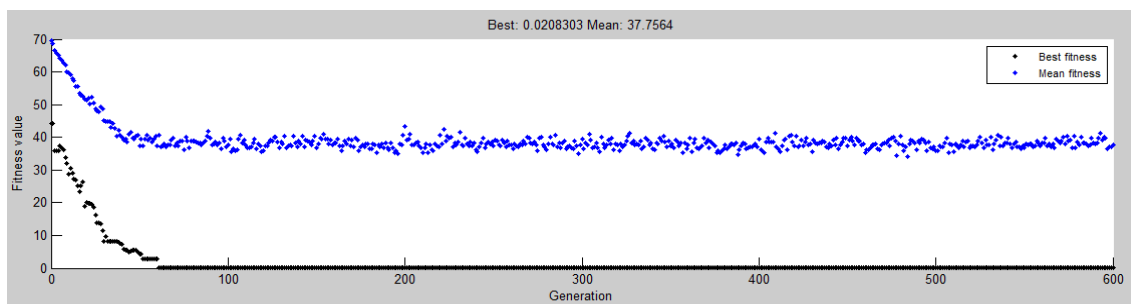


Figura 5.10 – Gráfico da convergência do AG no teste T3.1.13.50

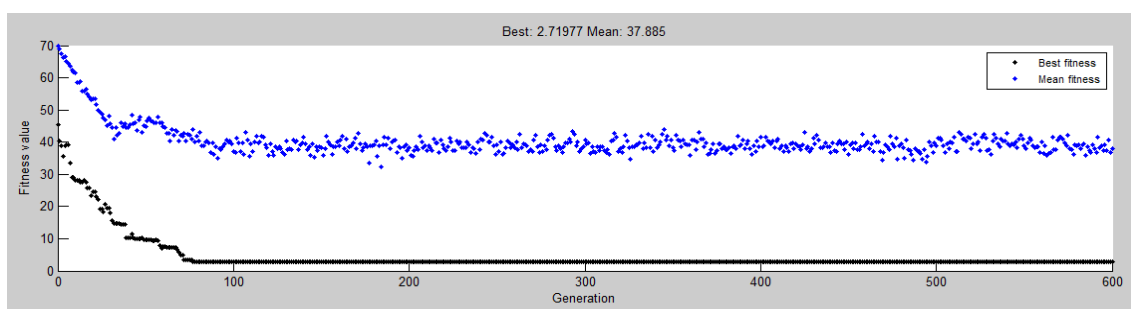


Figura 5.11 – Gráfico da convergência do AG no teste T10.1.13.50

Estes casos de dano singular permitiram concluir que uma população inicial de 200 cromossomas não é adequada para este problema uma vez que, na globalidade dos resultados, nunca os testes feitos com este tamanho de população inicial foram superiores àqueles cuja população inicial é de 400 indivíduos.

Se se aglomerarem todos os testes para cada tamanho de população inicial, os testes da população maior foram bem sucedidos em 11 dos 15 testes efetuados, contra apenas 3 testes bem sucedidos em 15 possíveis dos testes com uma população inicial mais pequena.

Por isso, os testes realizados nos próximos tópicos serão realizados com uma população inicial de 400 cromossomas.

5.2 Testes com 3 Danos de 50%

Efetuada os testes para danos singulares, passou-se então para o caso de danos múltiplos. Mantendo a percentagem de dano anterior (50%), foram consideradas duas combinações de

dano distintas: na primeira é simulado dano nos EF 1, 7 e 13 e na segunda é simulado dano nos EF 2, 6 e 11.

As frequências naturais da estrutura sujeita a estas combinações de dano é mostrada na tabela 5.5, onde também é possível verificar os erros relativos a essas frequências, face à estrutura intacta.

Tabela 5.5: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça para 2 casos de dano distintos, com 3 EF danificados em 50%

	1ª Freq. Natural (Hz)	2ª Freq. Natural (Hz)	3ª Freq. Natural (Hz)	4ª Freq. Natural (Hz)	5ª Freq. Natural (Hz)
EF 1, 7 e 13 Danificados	65,203373	76,466699	78,880034	90,330837	98,123006
Erro Relativo (%)	≅6,41	≅2,20	≅7,06	≅9,89	≅4,74
EF 2, 6 e 11 Danificados	64,535945	74,022777	81,131694	94,771381	96,444761
Erro Relativo (%)	≅7,37	≅5,33	≅4,41	≅5,46	≅6,37

A tabela 5.6 mostra os resultados dos testes efetuados para a primeira combinação de dano.

Tabela 5.6: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº1, 7 e 13 danificados em 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
T1.3.1.7.13.50	4,043833
T2.3.1.7.13.50	6,852814
T3.3.1.7.13.50	5,537825
T4.3.1.7.13.50	4,043833
T5.3.1.7.13.50	4,043833

Como se pode ver pela tabela anterior, em nenhum dos testes o valor final da função objetivo está próximo de zero, o que significa que o algoritmo não encontrou a solução certa. Contudo, o resultado gráfico (figura 5.12) do melhor teste demonstra que o AG esteve próximo da solução esperada. A figura mostra que o algoritmo detetou falso dano em apenas um EF e quantificou mal o dano em 2 dos 3 elementos onde foi simulado o dano, não estando porem longe da quantificação acertada.

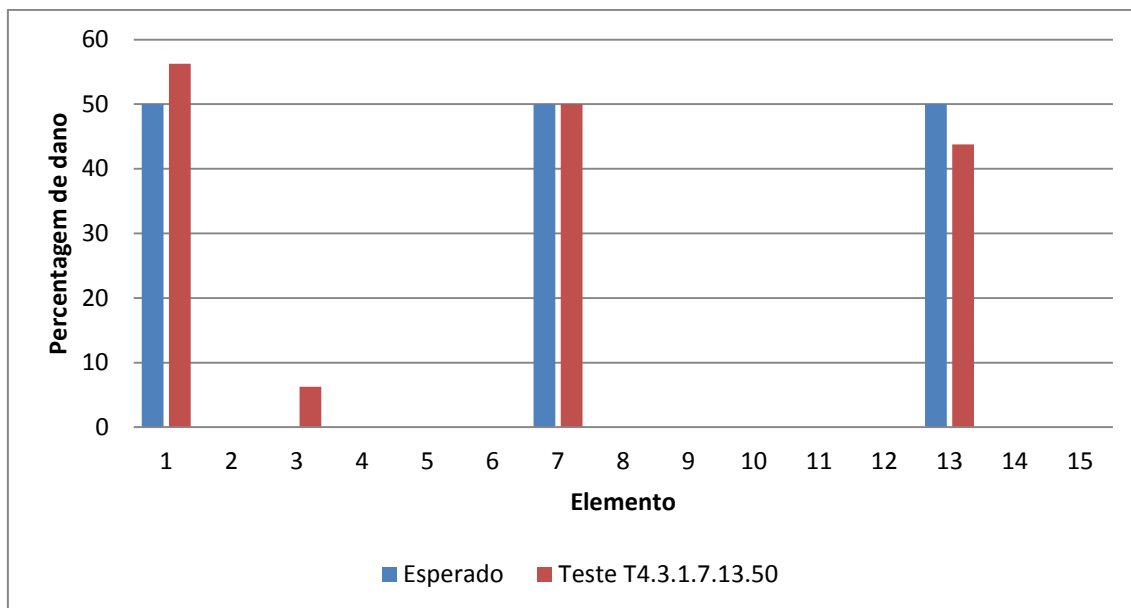


Figura 5.12 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.1.7.13.50

A figura 5.13, referente à convergência do algoritmo para o teste T4.3.1.7.13.50, mostra uma vez mais que o algoritmo foi muito rápido a chegar à solução final, tendo a quantidade de EF danificados pouca influência neste campo.

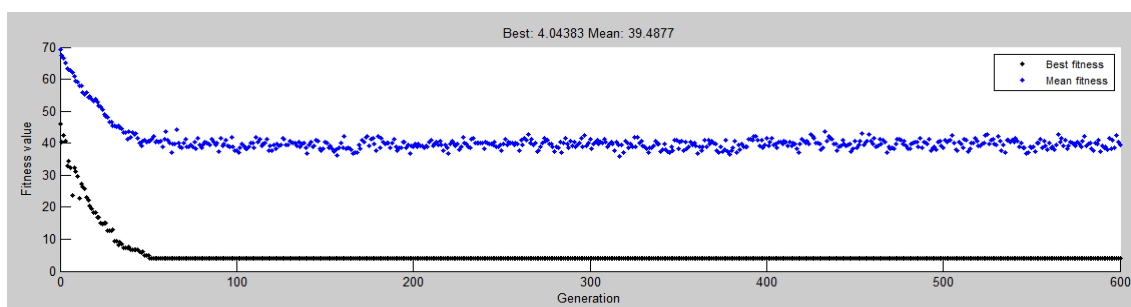


Figura 5.13 – Gráfico da convergência do AG no teste T4.3.1.7.13.50

Pode-se verificar que foram requeridas apenas cerca de 50 iterações para atingir a solução final.

Quanto ao segundo caso de dano múltiplo na estrutura, os resultados dos vários testes realizados podem ser avaliados na tabela 5.7. Neste caso, o melhor teste foi o teste T5.3.2.6.11.50, onde a função objetivo tem um menor valor final. O resultado gráfico correspondente a este teste encontra-se na figura 5.14. Observando esta figura verifica-se que o AG esteve muito perto da resposta correta, pois quantificou corretamente o dano em 2 EF danificados e esteve muito próximo da percentagem certa no terceiro. O algoritmo atribuiu dano a apenas 1 EF intacto.

Tabela 5.7: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº2, 6 e 11 danificados em 50%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
T1.3.2.6.11.50	5,178333
T2.3.2.6.11.50	6,241588
T3.3.2.6.11.50	8,256335
T4.3.2.6.11.50	10,358648
T5.3.2.6.11.50	3,993396

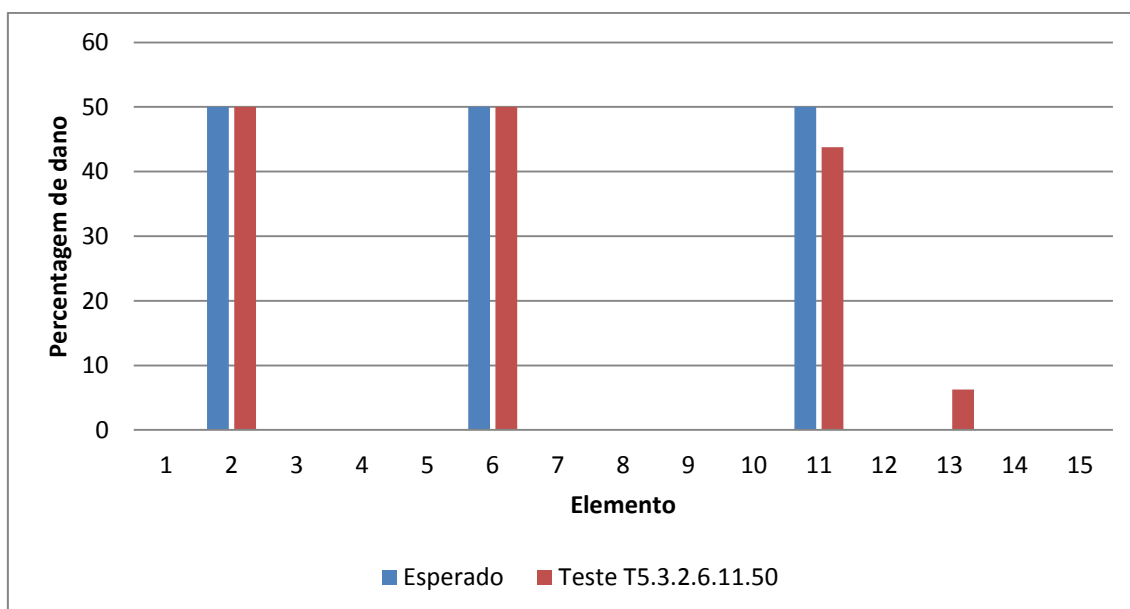


Figura 5.14 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.3.2.6.11.50

A tendência para o algoritmo convergir rapidamente para a solução manteve-se também neste caso, tendo sido necessárias apenas 50 iterações, aproximadamente, para atingir o valor final da função objetivo, como se verifica na figura 5.15.

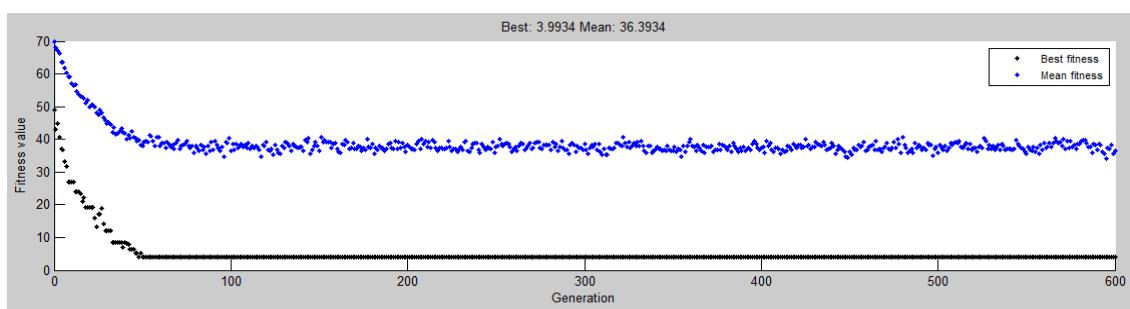


Figura 5.15 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.2.6.11.50

Os resultados dos testes de dano múltiplo, assim como os resultados para dano singular obtidos anteriormente, revelam um grande potencial do AG para detetar, localizar e quantificar dano também neste caso.

5.3 Testes com 3 Danos de 25%

Semelhante ao efetuado para a viga encastrada, também para o caso da estrutura em treliça se testou a capacidade do AG em avaliar acertadamente o dano para uma percentagem de 25% deste.

Ao diminuir o dano, está-se também a diminuir as diferenças das frequências naturais e modos de vibração das estruturas danificadas face à estrutura intacta (tabela 5.8), tornando a busca pela solução ótima mais difícil.

Tabela 5.8: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça para 2 casos de dano distintos, com 3 EF danificados em 25%

	1ª Freq. Natural (Hz)	2ª Freq. Natural (Hz)	3ª Freq. Natural (Hz)	4ª Freq. Natural (Hz)	5ª Freq. Natural (Hz)
EF 1, 7 e 13 Danificados	67,813189	77,342907	82,595624	95,664961	100,825553
Erro Relativo (%)	≅2,66	≅1,08	≅2,68	≅4,57	≅2,12
EF 2, 6 e 11 Danificados	67,508903	76,404332	83,096201	97,947851	100,154673
Erro Relativo (%)	≅3,10	≅2,28	≅2,09	≅2,29	≅2,77

Comparando a tabela anterior com a tabela 5.5 comprova-se que as diferenças entre as frequências naturais da estrutura danificada e intacta são menores, pois o erro relativo de cada frequência natural é menor, o que faz prever o aumento da dificuldade para o algoritmo, como já foi referido.

Observem-se agora os resultados dos testes para o caso em que foi simulado dano de 25% nos EF nº1, 7 e 13 da estrutura (tabela 5.9). Apesar de no geral os resultados terem sido piores que aqueles obtidos anteriormente (tabela 5.6), como seria de esperar, o algoritmo conseguiu encontrar a solução correta no teste T2.3.1.7.13.25, como se pode verificar pelo resultado gráfico deste teste, revelado pela figura 5.16.

A figura 5.17 mostra a convergência do algoritmo neste teste e revela um caso em que houve uma clara melhoria no resultado final da função objetivo devido aos operadores genéticos característicos dos AG, nomeadamente a mutação. Analisando a figura 5.17 constata-se que o algoritmo convergiu rapidamente para uma solução, em menos de 50 iterações. Essa solução manteve-se como sendo a melhor durante aproximadamente 150 iterações, o que leva a querer que os operadores genéticos não estavam a contribuir para uma outra solução, mais adequada, estando a população de cromossomas a perder a sua diversidade. No entanto,

Tabela 5.9: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº1, 7 e 13 danificados em 25%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
T1.3.1.7.13.25	10,850985
T2.3.1.7.13.25	0,018714
T3.3.1.7.13.25	9,878333
T4.3.1.7.13.25	10,966036
T5.3.1.7.13.25	10,949866

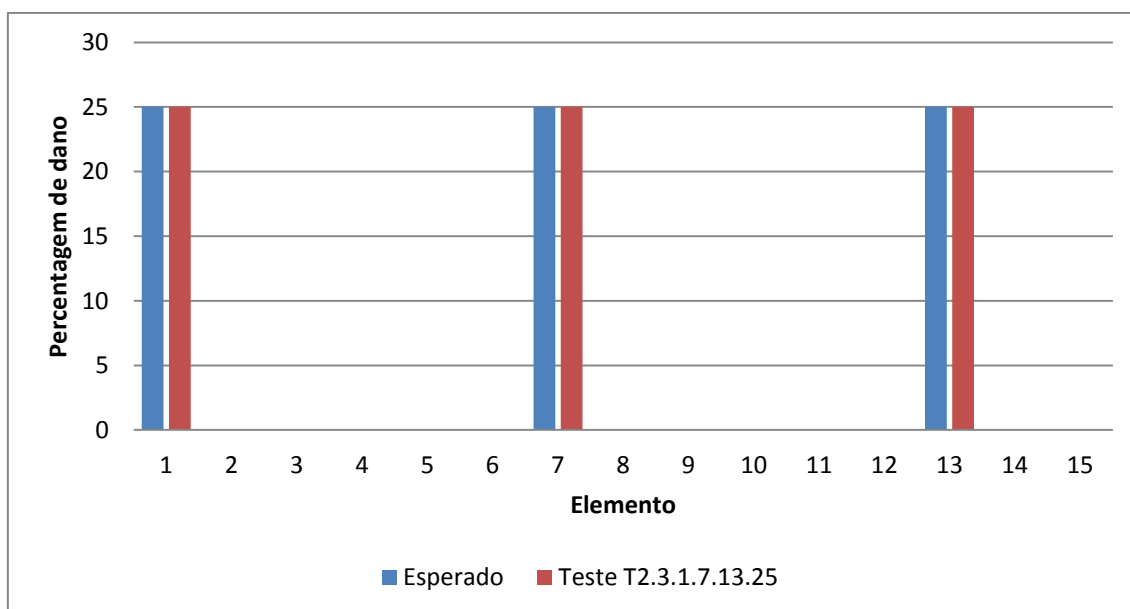


Figura 5.16 – Gráfico referente aos resultados do teste T2.3.1.7.13.25

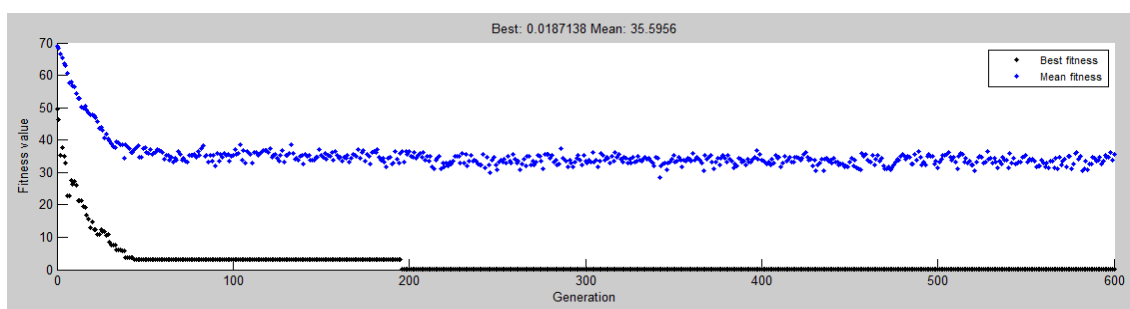


Figura 5.17 – Gráfico da convergência do AG no teste T2.3.1.7.13.25

pouco antes de o algoritmo atingir as 200 iterações, o resultado da função objetivo alterou-se e manteve-se até ao final do teste na melhor solução possível, a solução correta do problema. Esta alteração do resultado deveu-se muito provavelmente à mutação de um dos indivíduos que tornou o seu mérito maior que os restantes membros da população, levando a que este se

reproduzisse e que, em consequência disso, a solução certa se mantivesse (quanto maior for o número de cromossomas correspondentes à melhor solução do problema, menor será a probabilidade desta solução se perder devido à destruição dos cromossomas causada pelo cruzamento e/ou da mutação).

Na tabela 5.10 são agora mostrados os resultados dos testes referentes ao segundo caso de dano múltiplo, cuja extensão do dano é de 25%.

Tabela 5.10: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº2, 6 e 11 danificados em 25%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (IFM)
T1.3.2.6.11.25	11,125185
T2.3.2.6.11.25	8,501615
T3.3.2.6.11.25	5,742606
T4.3.2.6.11.25	21,587866
T5.3.2.6.11.25	6,156676

Tal como aconteceu no caso anterior, e como seria de esperar, os resultados dos testes são piores que para o mesmo caso mas com uma percentagem de dano maior (tabela 5.7).

O melhor teste para este caso foi o teste T3.3.2.6.11.25 e o seu aspeto gráfico é visível na figura 5.18. Esta figura mostra que o número de EF com falso dano aumentou face ao melhor teste do caso anterior (figura 5.14), sendo agora igual a 6. Quanto à quantificação do dano nos EF realmente danificados, o algoritmo quantificou corretamente 1 dos 3 elementos, estando próximo da percentagem de dano certa nos restantes 2.

No que concerne à convergência do algoritmo, esta foi mais longa neste caso, pois foram necessárias aproximadamente 185 iterações para que o algoritmo convergisse para a solução final. Observando a figura 5.19 é possível visualizar alguns “degraus” nos pontos correspondentes à melhor solução, provocados pelos operadores genéticos do AG (cruzamento e mutação).

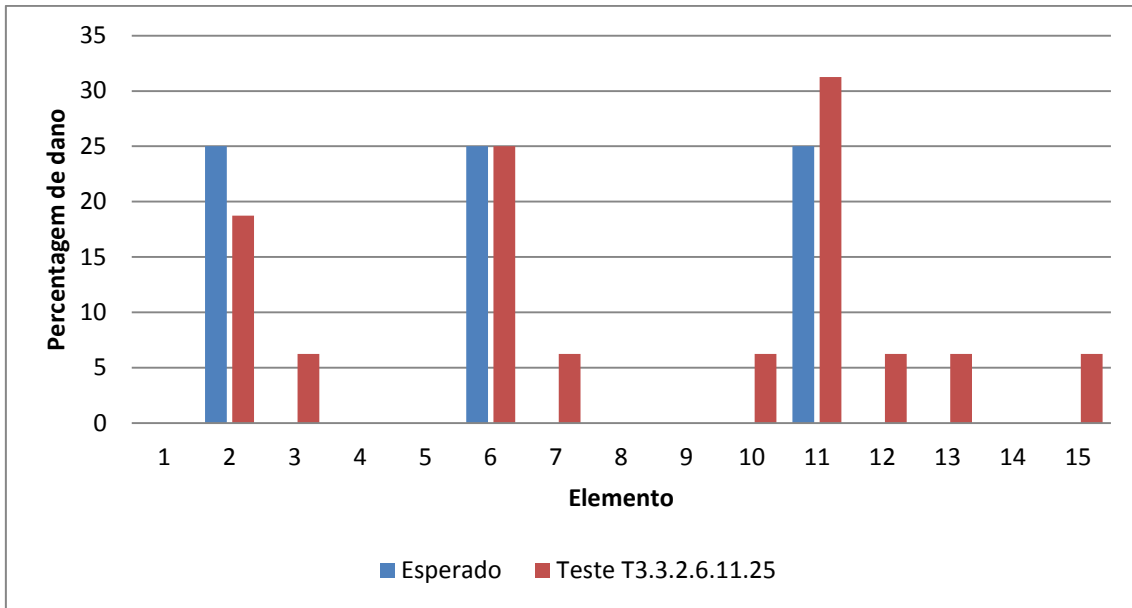


Figura 5.18 – Gráfico referente aos resultados do teste T3.3.2.6.11.25

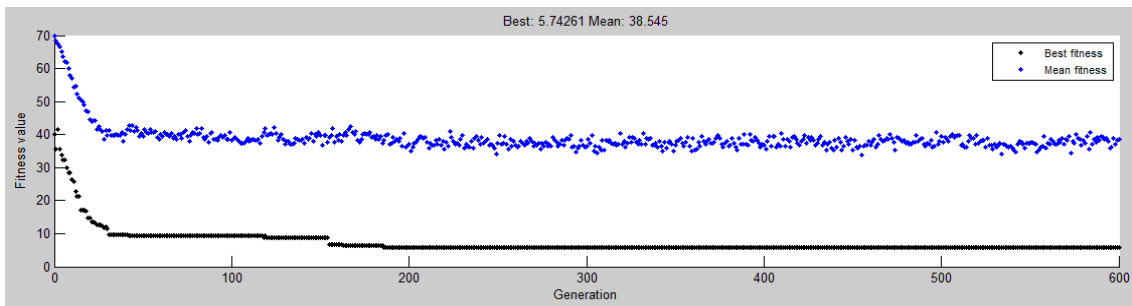


Figura 5.19 – Gráfico da convergência do AG no teste T3.3.2.6.11.25

5.4 Testes com 3 Danos de 15%

Depois dos resultados dos testes anteriores, que mostraram que o AG é capaz de efetuar uma boa avaliação do dano em ambos os casos de combinação de dano, a porcentagem de dano foi decrescida para 15%, tal como efetuado para a viga encastrada testada anteriormente.

As frequências naturais correspondentes a esta combinação de dano são mostradas na tabela 5.11. Tal como seria de esperar, os erros relativos entre as frequências naturais da estrutura intacta e das estruturas danificadas é menor (analisando a globalidade dos valores) que os verificados anteriormente, em que a porcentagem de dano era maior.

Os resultados referentes aos testes para a combinação de dano em que é simulado o dano nos EF 1, 7 e 13 podem ser consultados na tabela 5.12.

Tabela 5.11: primeiras 5 frequências naturais da estrutura em treliça para 2 casos de dano distintos, com 3 EF danificados em 15%

	1ª Freq. Natural (Hz)	2ª Freq. Natural (Hz)	3ª Freq. Natural (Hz)	4ª Freq. Natural (Hz)	5ª Freq. Natural (Hz)
EF 1, 7 e 13 Danificados	68,624056	77,67673951	83,625817	97,635788	101,756793
Erro Relativo (%)	≅1.46	≅1,29	≅1.20	≅1.02	≅0.98
EF 2, 6 e 11 Danificados	68,455553	77,169399	83,825663	98,906185	101,63563
Erro Relativo (%)	≅1.46	≅1.30	≅1.19	≅1.01	≅0.98

Tabela 5.12: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº1, 7 e 13 danificados em 15%

Teste	Resultado da Função Objetivo
T1.3.1.7.13.15	5,035627
T2.3.1.7.13.15	3,362298
T3.3.1.7.13.15	9,306602
T4.3.1.7.13.15	2,858395
T5.3.1.7.13.15	4,450909

O resultado gráfico do melhor teste (T4.3.1.7.13.15) realizado com esta combinação de dano é mostrado na figura 5.20.

A figura revela que, apesar da baixa percentagem de dano, o AG conseguiu um resultado muito bom, detetando e localizando o dano em todos os 3 EF danificados, ficando a quantificação próxima da correta. É de destacar o facto de o AG não atribuir qualquer dano aos elementos intactos da estrutura.

Relativamente à convergência do algoritmo para este teste, este necessitou de perto de 300 iterações, como é visível na figura 5.21.

Para o caso em que são considerados danificados os EF 2, 6 e 11, os resultados dos testes são mostrados na tabela 5.13. Estes resultados revelam-se piores que para o caso anterior, em que os EF danificados foram os elementos nº 1, 7 e 13, pois o resultado da função objetivo é maior na grande maioria dos testes.

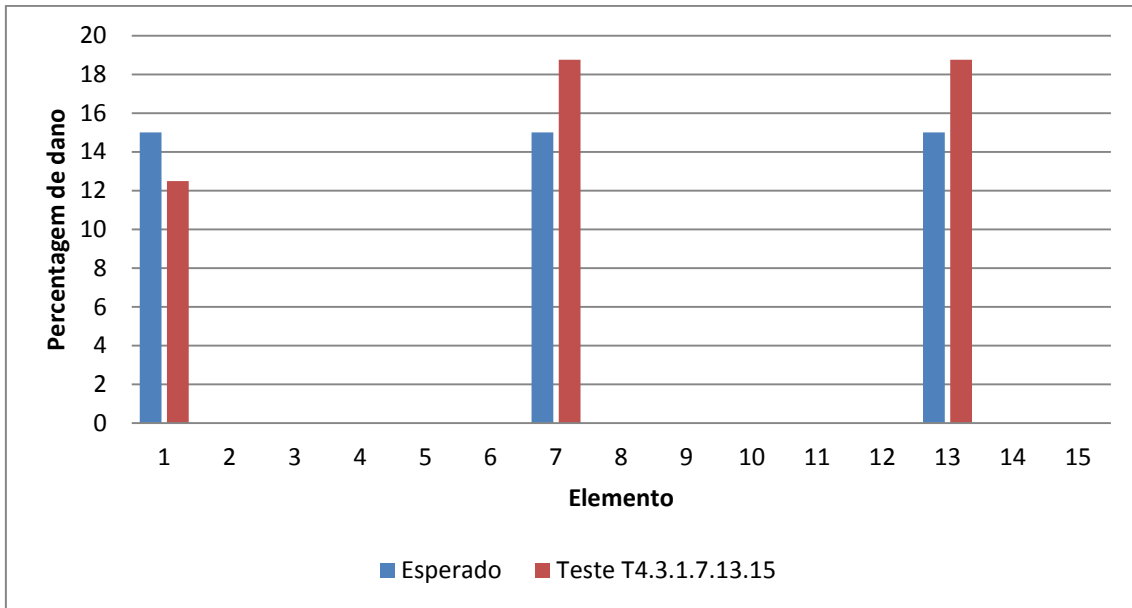


Figura 5.20 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.1.7.13.15

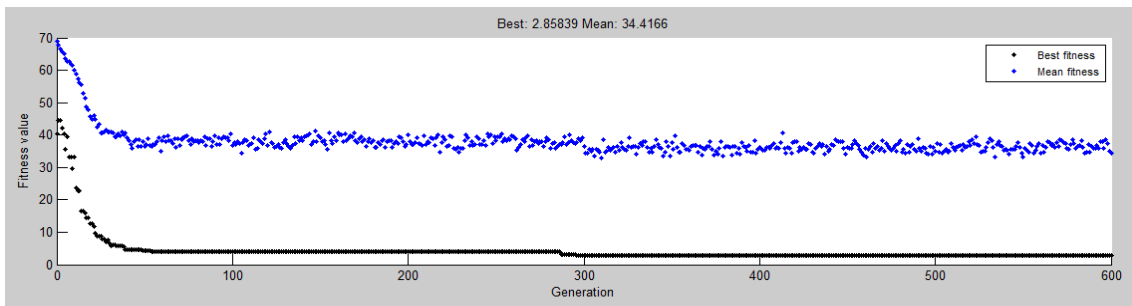


Figura 5.21 – Gráfico da convergência do AG no teste T4.3.1.7.13.15

Tabela 5.13: resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça com os EF nº2, 6 e 11 danificados em 15%

Teste	Resultado Final da Função Objetivo (<i>IFM</i>)
T1.3.2.6.11.15	11,898079
T2.3.2.6.11.15	5,046651
T3.3.2.6.11.15	7,495176
T4.3.2.6.11.15	5,046651
T5.3.2.6.11.15	5,046651

Apesar de alguma consistência na convergência para um resultado específico (3 testes com resultados da função objetivo precisamente iguais) e apesar de corresponder ao melhor resultado, este não é a solução esperada, tal como se comprova pela figura 5.22, referente ao melhor teste (T4.3.2.6.11.15).

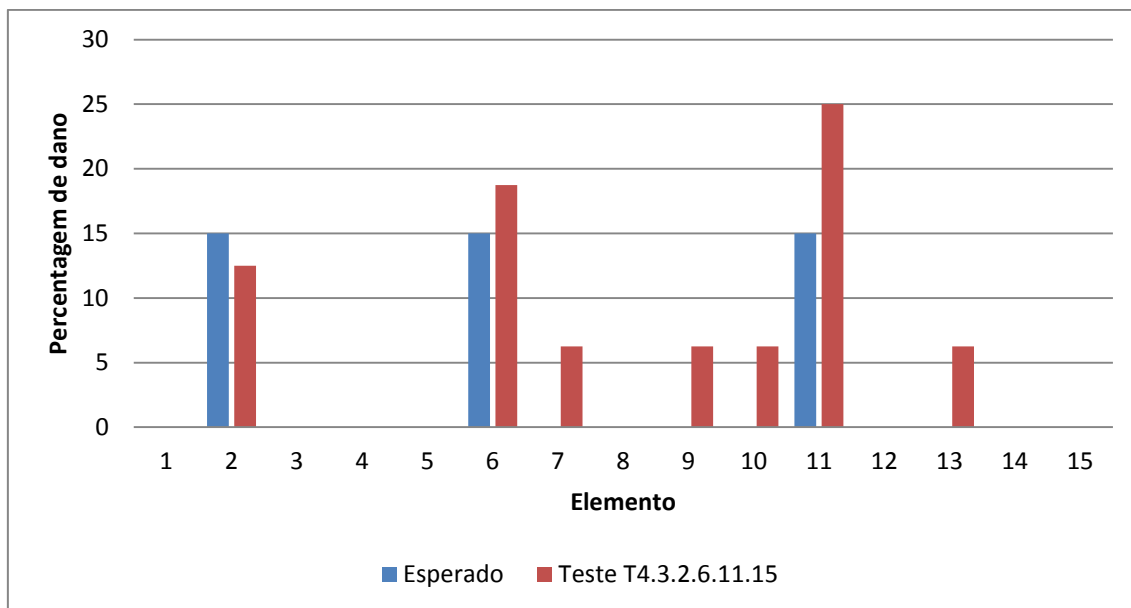


Figura 5.22 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.2.6.11.15

O teste T4.3.2.6.11.15 foi considerado o melhor pois foi aquele que atingiu a solução final mais rapidamente, tendo necessitado de aproximadamente 140 iterações (figura 5.23).

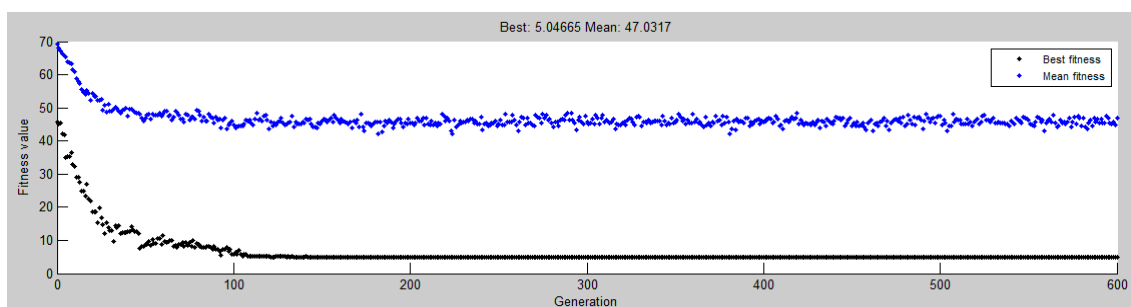


Figura 5.23 – Gráfico da convergência do AG no teste T4.3.2.6.11.15

5.5 Resumo dos Teste da Treliça

Para ter uma noção geral do desempenho do AG quando usado para detetar, localizar e quantificar dano na estrutura em treliça, foram preenchidas duas tabelas, cada uma referente a uma combinação de dano, que combinam os resultados dos melhores testes efetuados.

Relativamente aos casos de dano singular referentes aos EF 1, 7 e 13 danificados, os testes em que se usou uma população inicial de 200 indivíduos não são aqui mencionados já que se concluiu que os resultados obtidos desta maneira são de muito pior qualidade quando comparados com os casos em que a população inicial é maior, tendo sido, portanto, descartada a hipótese de continuar a usar este tamanho de população.

Analisando a tabela 5.14, nota-se que o AG obteve boas convergências para a solução ótima, já que os valores da função objetivo de cada teste estão maioritariamente próximos de zero, o

que indica uma boa aproximação da solução ótima, isto é, da solução correta do problema. Em 4 dos 6 testes realizados, o AG encontrou a solução esperada. Os únicos casos em que o algoritmo ficou mais longe da resposta esperada foram os casos de 3 EF danificados em 50% e 15%. Porém, neste último caso relembra-se que é impossível o algoritmo encontrar exatamente a resposta certa do problema devido à codificação de dano escolhida e explicada anteriormente.

Tabela 5.14: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça, com os casos de dano singular e múltiplo, considerando os EF nº 1, 7 e 13 danificados.

Teste	Nº dos EF Danificados	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
T5.1.1.50	1	50	Sim	50	0	0,019577	50
T5.1.7.50	7	50	Sim	50	0	0,022289	40
T3.1.13.50	13	50	Sim	50	0	0,020830	55
T4.3.1.7.13.50	1, 7, 13	50/50/50	Sim	56,25/50/43,75	1	0,229510	50
T2.3.1.7.13.25	1, 7, 13	25/25/25	Sim	25/25/25	0	0,018714	200
T4.3.1.7.13.15	1, 7, 13	15/15/15	Sim	12,5/18,75/18,75	0	2,858395	300

Relativamente aos EF intactos dados como danificados, apenas 1 EF foi mal identificado (no teste T4.3.1.7.13.50).

A convergência do algoritmo também foi muito rápida nos casos mais simples (casos de danos de 50%).

A tabela 5.15 resume os resultados dos melhores testes referentes à segunda combinação de dano, em que se simulou dano nos EF nº 2, 6 e 11.

Tabela 5.15: tabela comparativa dos resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça, com o caso de dano múltiplo, considerando os EF nº 2, 6 e 11 danificados.

Teste	Nº dos EF Danificados	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
T4.3.2.6.11.50	2, 6, 11	50/50/50	Sim	50/50/43,75	1	3,993396	50
T2.3.2.6.11.25	2, 6, 11	25/25/25	Sim	18,75/25/31,25	6	5,742606	185
T4.3.2.6.11.15	2, 6, 11	15/15/15	Sim	12,5/18,75/25	4	5,046651	140

Apesar de os resultados terem sido piores para estes testes (comparados com os testes que dizem respeito ao primeiro caso de dano), estes podem-se considerar bons, pois os EF danificados foram identificados e a sua quantificação esteve próxima da esperada.

O número de EF com falso dano aumentou neste caso, repetindo-se o número para o caso de 3 danos de 50% (teste T2.3.2.6.11.25), mas aumentando para 6 e 4 para os testes de 25% (teste T4.3.2.6.11.15) e 15%, respetivamente.

A convergência foi, na sua globalidade, mais rápida para este segundo caso de dano, necessitando o AG de menos iterações para atingir os resultados finais.

5.6 Simulação de Ruído nas Respostas Dinâmicas

O efeito do ruído simulado nas frequências naturais e modos de vibração mostrou-se negativo (como seria de esperar) nos resultados dos testes da viga encastrada de 75 EF. Porém, uma vez que a estrutura em treliça tem uma quantidade de EF bastante menor e que esses EF têm um tamanho superior, o efeito do ruído pode não ser tão notório, uma vez que o efeito do dano é maior.

Os testes com ruído foram efetuados apenas nos casos que se revelaram mais difíceis para o AG, ou seja, para um dano singular no EF 13 e para a simulação de dano nos elementos 2, 6 e 11. O intuito de terem sido escolhidas estas combinações de dano deve-se ao facto de, se o AG conseguir bons resultados para estes casos, então este conseguirá obter bons resultados também para os restantes, que se preveem mais fáceis.

Tal como anteriormente, foram realizados 5 testes idênticos para cada caso e selecionado apenas o melhor, sendo os restantes descartados. A tabela 5.16 resume os resultados dos testes. Nas figuras 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27 são também mostrados os resultados gráficos correspondentes a estes testes.

Tabela 5.16: tabela de resultados dos testes realizados para a estrutura em treliça, com ruído nos valores das frequências e modos de vibração natural.

Teste	Nº dos EF Danificados	% Dano	EF Danificados Corretamente Identificados	% Dano	Nº de EF Identificados com Falso Dano	Função Objetivo	Nº Aprox. Iterações
T4.1.13.50.r	13	50	Sim	50	0	2,745683	35
T4.3.2.6.11.50.r	2, 6, 11	50/50/50	Sim	43,75/50/43,75	3	7,804808	50
T5.3.2.6.11.25.r	2, 6, 11	25/25/25	Sim	18,75/25/25	0	5,280225	600
T5.3.2.6.11.15.r	2, 6, 11	15/15/15	Sim	18,75/12,5/18,75	1	5,046651	45

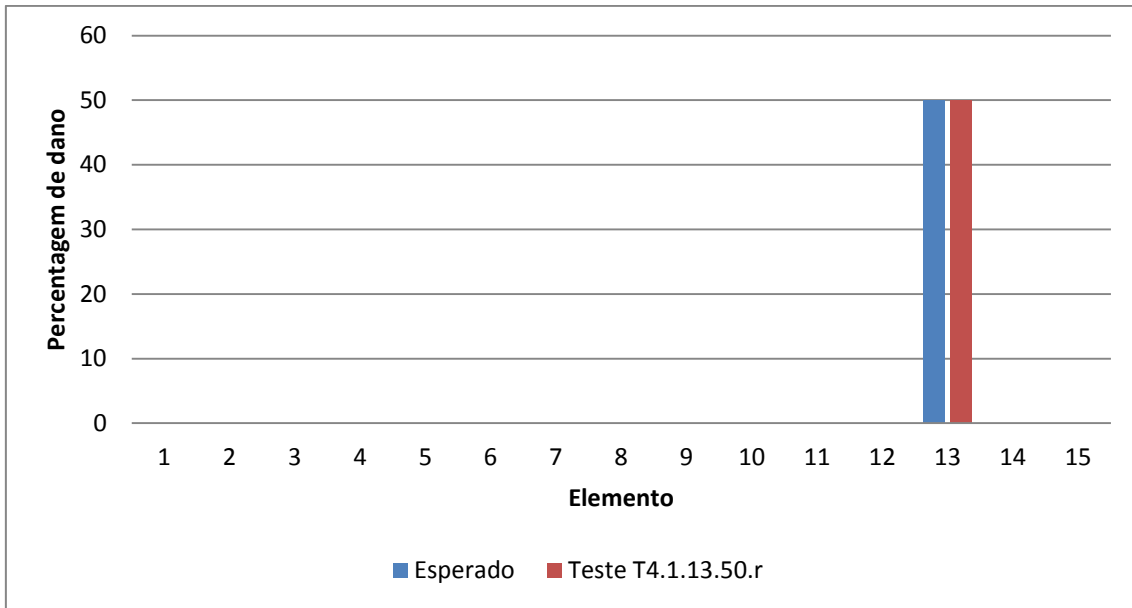


Figura 5.24 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.1.13.50.r

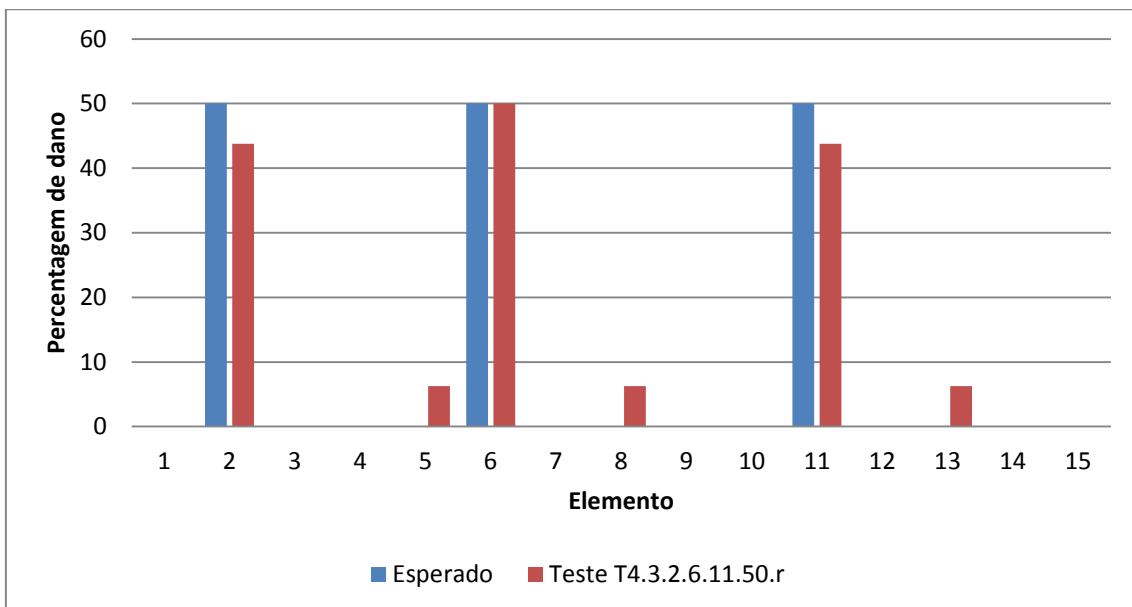


Figura 5.25 – Gráfico referente aos resultados do teste T4.3.2.6.11.50.r

A tabela revela que os resultados dos testes com a presença de ruído nas medições são tão bons ou até mesmo melhores do que nos casos sem ruído. Contudo, nota-se que o resultado da função objetivo do teste T4.1.13.50.r não é aproximadamente igual a 0 mesmo tendo sido encontrada a resposta certa. Isto acontece pois, uma vez que existe ruído nas medições, o algoritmo encaminha a sua busca para a solução que corresponde ao dados que recebeu, ignorando que estes possam estar poluídos com ruído e, caso não encontre uma solução que corresponda a esses dados, apresentará a resposta mais próxima encontrada, que se espera que corresponda à solução real do problema em estudo.

Contrastando com os restantes testes, que convergiram rapidamente para a solução final, o teste T5.3.2.6.11.25.r teve alguma dificuldade a convergir, tendo sido poucos e breves os períodos em que a resposta se manteve constante, como se pode verificar na figura 5.28.

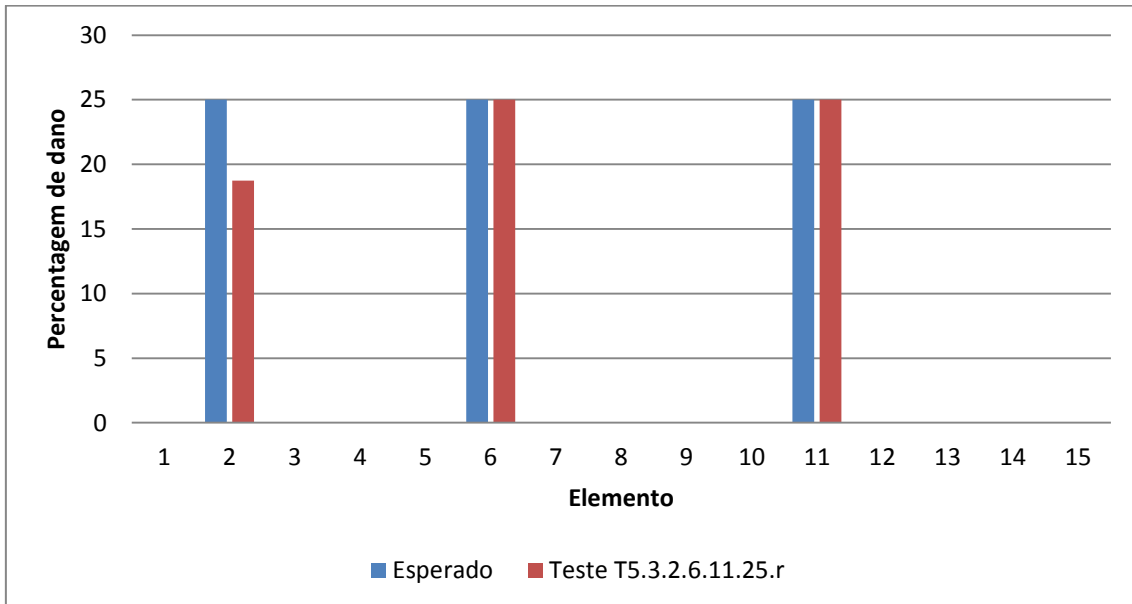


Figura 5.26 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.3.2.6.11.25.r

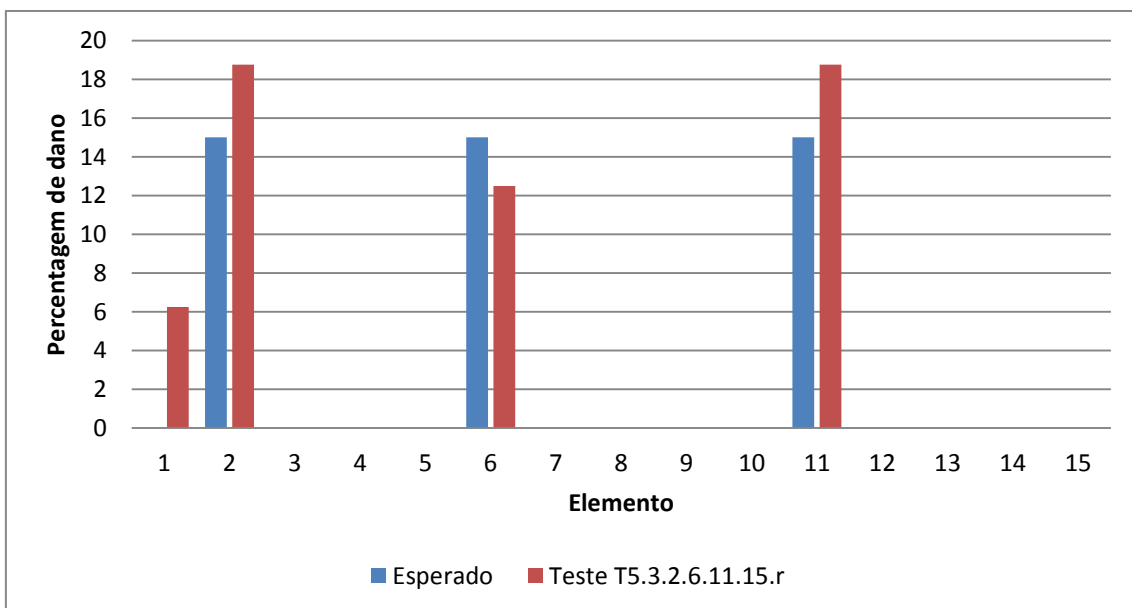


Figura 5.27 – Gráfico referente aos resultados do teste T5.3.2.6.11.15.r

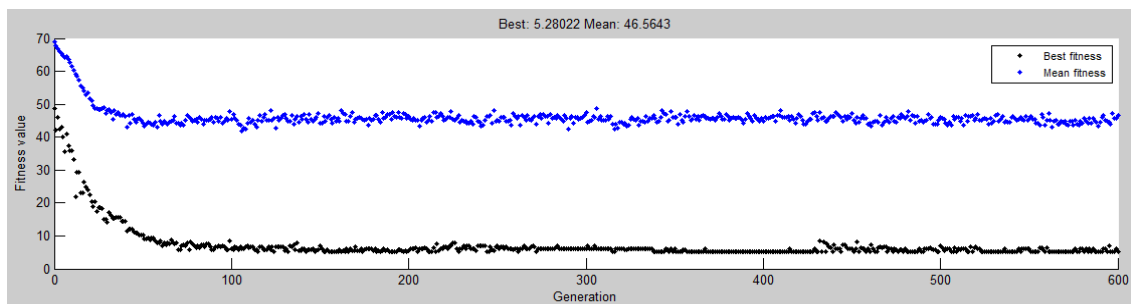


Figura 5.28 – Gráfico da convergência do AG no teste T5.3.2.6.11.15.r

Avaliando estes resultados e aqueles obtidos para a viga encastrada de 75 EF nota-se uma inconsistência. No caso da viga encastrada, o ruído nos valores das medições prejudicou os resultados, principalmente para as percentagens de dano de 25% e 15%. Por outro lado, no caso da estrutura em treliça, os resultados mantiveram-se muito bons e semelhantes aos casos sem ruído.

Uma vez que os parâmetros e operadores do AG foram os mesmos em todos os testes, bem como as percentagens de dano e número de frequências naturais e modos de vibração utilizados, conclui-se que o tipo de estrutura, o tamanho e número de EF são os fatores determinantes na influência do ruído nos resultados finais. Como a treliça tem um número pequeno de EF e estes têm uma maior dimensão, a influência do dano é mais evidente, diminuindo a notoriedade do ruído, contribuindo também para este facto a posição dos EF na estrutura.

Capítulo 6

Conclusões

Na tentativa de detetar e avaliar o dano em estruturas o mais precocemente possível, de modo a evitar problemas de segurança ou elevados custos de manutenção, alguns autores têm desenvolvido indicadores de dano que detetam, localizam e quantificam o dano em estruturas, muitas vezes aliando a estes indicadores métodos computacionais.

É num desses indicadores que se baseia este estudo, mais propriamente o indicador apresentado por Villalba e Laier, em 2012. Utilizando a *toolbox* dedicada aos AG do *software Matlab®* e o método dos EF, este indicador (transformado no indicador *IFM*) foi utilizado para avaliar dano simulado numa viga encastrada e numa estrutura em treliça. A viga encastrada foi dividida em diferentes números de EF, enquanto a treliça é formada por 15 barras e, portanto, considerou-se que cada uma dessas barras correspondia a 1 EF.

A viga encastrada foi dividida desta maneira para perceber o grau de precisão que se consegue alcançar com os recursos descritos anteriormente e a estrutura em treliça foi usada para perceber se o indicador e o AG conseguem avaliar o dano em estruturas distintas. Relativamente à viga encastrada, esta foi usada também para tirar conclusões acerca do número de frequências naturais e respetivos modos de vibração que são necessários utilizar para tornar possível a caracterização do dano.

6.1 Localização de Dano

Na primeira fase deste estudo, testou-se a capacidade do AG para localizar o dano numa viga encastrada, utilizando o indicador *IFM* como função objetivo do algoritmo. A localização seria feita atribuindo um cromossoma binário definido por apenas um gene a cada EF e o AG teria

de encontrar a combinação que correspondesse às frequências naturais e modos de vibração do modelo numérico da estrutura danificada. Um gene cujo valor fosse igual a zero significaria que o EF estaria intacto e um gene de valor unitário iria corresponder a um EF danificado.

O número de EF em que se dividiu a viga foi aumentado sucessivamente, desde 15 EF, até um máximo de 100 EF e o elemento considerado danificado foi escolhido de modo a estar posicionado no centro da viga ou o mais próximo possível deste ponto.

Nos 5 testes realizados para a localização de dano na viga encastrada de 15 EF, o AG encontrou o elemento danificado muito rapidamente em todos os testes, como se pode verificar pelas figuras 3.3 e 3.4. Para os casos de 20 e 25 EF, nos 10 testes realizados para cada um dos casos, o AG conseguiu sempre encontrar o elemento danificado (tabela 3.4 e 3.5). Para a viga dividida em 50 EF, o algoritmo teve uma excelente prestação em 9 dos 10 testes (tabela 3.6) e, para a divisão em 60 EF, em 8 dos 10 testes realizados o AG identificou corretamente o EF danificado (tabela 3.7). O AG teve uma prestação menos satisfatória quando a viga encastrada foi dividida em 75 e 100 EF (tabela 3.8 e 3.9).

Isto demonstra que, quanto mais EF forem usados, pior será o desempenho do AG, já que o aumento do número de EF faz com que estes tenham um tamanho menor (relembra-se que as dimensões da viga permanecem idênticas em todos os casos) o que torna o dano menor e, conseqüentemente, os erros relativos entre as frequências naturais e modos de vibração serão menores (tabela 3.11), o que implica uma menor variação no resultado da função objetivo, necessário para guiar o algoritmo para a resposta correta.

Ao analisar os resultados dos testes para 75 e 100 EF, repara-se que quando o AG não identifica corretamente o EF danificado, este aponta para um elemento na vizinhança próxima desse elemento e também para EF presentes na extremidade livre da viga (exceto raras ocasiões). A justificação passa pelo facto de EF danificados sucessivamente provocam uma diferença muito semelhante nos dados modais da estrutura (tabela 3.10) e a existência de dano na extremidade livre provoca alterações muito pouco perceptíveis e assim o AG tem mais dificuldades em identificar corretamente o EF danificado.

Um dos critérios de paragem utilizados para o AG foi a inexistência de alterações significativas no valor da função objetivo em 50 iterações sucessivas. Este critério de paragem poderá restringir o algoritmo e fazer com que este não identifique corretamente os EF danificados. Ao retirar este critério de paragem e ao efetuar novos testes para a viga de 100 EF, concluiu-se que dando mais “tempo” ao AG, este pode apresentar soluções mais próximas da esperada (tabela 3.12).

Efetuada todos os testes à viga encastrada, foram efetuados novos testes mas para a estrutura em treliça referida anteriormente. Foram realizados testes a 5 casos de dano distinto, 3 dos quais casos de dano singular e os restantes casos de dano múltiplo para avaliar a

capacidade do AG para localizar o dano em pontos distintos da estrutura, e também em vários pontos simultaneamente.

Uma vez mais, o AG obteve resultados muito bons, tendo mais dificuldade apenas no caso de dano singular em que se simulou dano no EF nº 13 (tabela 3.15). O facto dos EF serem maiores e a sua posição na estrutura implica uma maior alteração nos dados modais da estrutura, quando existe dano na mesma, justificando a melhor prestação o AG.

6.2 Quantificação de Dano

Depois de provado o potencial do AG para detetar e localizar dano em estruturas, este foi testado também para quantificar esse dano. Foi utilizada também uma viga encastrada mas com características diferentes daquela utilizada para a localização do dano. Esta viga foi dividida em 75 e 100 EF, sendo que a primeira divisão serviu também para investigar a influência de vários fatores, nomeadamente o tipo ideal de cromossoma a utilizar, o número de frequências e modos de vibração natural a fornecer como dados ao algoritmo e o efeito da simulação de ruído nestes valores.

6.2.1 Tipo de Cromossoma

Para a viga encastrada dividida em 75 EF, foram testados vários casos de dano, alterando o número de EF danificados e a percentagem de dano destes elementos. Para cada cenário de dano, foram efetuados 12 testes, sendo utilizados cromossomas binários nos 6 primeiros testes e reais nos restantes. O objetivo será avaliar qual dos tipos de cromossoma mais se adequa na resolução do presente problema.

Deve ter-se em consideração que 3 dos 6 testes realizados para cada tipo de cromossoma foram concretizados com uma população inicial de cromossomas menor, portanto, devem-se comparar os testes efetuados com ambos os tipos de cromossoma para populações de tamanho idêntico. Note-se ainda que devido ao facto de ser praticamente impossível obter valores iguais a zero nos EF intactos no caso dos cromossomas reais, foi adotado um filtro de 3% e consideram-se intactos todos os EF cuja percentagem de dano atribuída pelo AG é menor que este valor.

Observe-se a tabela 6.1, que mostra os resultados da quantificação do dano para todos os testes realizados, fazendo uso de ambos os tipos de cromossoma. Analisando esta tabela repara-se que, para os casos de dano singular de 50%, os resultados dos testes foram melhores no caso dos cromossomas reais pois apresentam valores mais próximos dos esperados. O mesmo não acontece para os restantes casos, onde prevaleceu o domínio dos cromossomas binários, com respostas mais acertadas. No que diz respeito ao número de EF incorretamente identificados com dano os resultados são mais equilibrados mas na maioria dos

casos de dano testados, houve um maior número de EF intactos identificados com dano nos testes com cromossomas do tipo real.

Tabela 6.1: resultados da quantificação de dano para os testes realizados à viga encastrada de 75 EF.

Teste	População Inicial	Nº dos EF Danificados	Dano (%)	Dano Identificado (%)	Nº de EF Incorretamente Identificados
b1.1.50	400	36	50	43,75	2
r1.1.50	400	36	50	48,20	1
b6.1.50	200	36	50	43,75	3
r4.1.50	200	36	50	49,30	13
b3.3.50	400	20/36/60	50/50/50	50/50/43,75	2
r3.3.50	400	20/36/60	50/50/50	46,04/47,75/45,0	2
b5.3.50	200	20/36/60	50/50/50	43,75/31,25/50	7
r4.3.50	200	20/36/60	50/50/50	47,04/42,84/46,42	9
b2.3.25	400	20/36/60	25/25/25	18,75/18,75/18,75	5
r2.3.25	400	20/36/60	25/25/25	20,14/16,49/17,58	6
b6.3.25	200	20/36/60	25/25/25	25/18,75/25	2
r4.3.25	200	20/36/60	25/25/25	22,15/12,09/20,78	7
b2.3.15	400	20/36/60	15/15/15	12,5/12,5/12,5	3
r1.3.15	400	20/36/60	15/15/15	8,80/10,78/7,70	2
b6.3.15	200	20/36/60	15/15/15	6,25/12,5/6,25	4
r5.3.15	200	20/36/60	15/15/15	6,34/14,41/0,87	7

A comparação da convergência do AG para o resultado final pode ser realizada com a ajuda da tabela 6.2 onde é claramente visível que quando são usados cromossomas binários, o algoritmo converge mais rapidamente do que utilizando cromossomas reais. A convergência do algoritmo quando são usados cromossomas binários é beneficiada pelo reduzido número de percentagens que este pode atribuir a cada EF (apenas 16), contrariamente ao que acontece com o outro tipo de cromossomas, que possui um número infinito de hipóteses para cada EF, havendo mais espaço para a dispersão dos valores, dificultando a convergência.

Tendo em consideração os fatores descritos, conclui-se que, para este caso de avaliação de dano, o uso de cromossomas binários é vantajoso pois permite chegar a melhores resultados requerendo menos iterações.

Tabela 6.2: número aproximado de iterações necessárias ao AG para convergir para a solução final apresentada, para o caso da viga encastrada dividida em 75 EF.

Teste	População Inicial	Nº Aproximado de Iterações
b1.1.50	400	145
r1.1.50	400	500
b6.1.50	200	325
r4.1.50	200	515
b3.3.50	400	165
r3.3.50	400	500
b5.3.50	200	195
r4.3.50	200	560
b2.3.25	400	180
r2.3.25	400	515
b6.3.25	200	165
r4.3.25	200	560
b2.3.15	400	140
r1.3.15	400	480
b6.3.15	200	240
r5.3.15	200	575

6.2.2 Tamanho da População Inicial

Para além de mostrarem os resultados da quantificação de dano e da convergência do algoritmo, as tabelas 6.1 e 6.2 permitem ainda tirar conclusões quanto ao tamanho ideal da população inicial. Existe uma relação indireta entre a redução do tamanho da população inicial e a qualidade dos resultados obtidos, isto é, quando a população é menor, os resultados da quantificação tendem a piorar, assim como o número de EF com dano mal quantificado e o número de iterações necessárias (a única exceção foi o caso da existência de 3 danos de 25% ao usar cromossomas binários).

A influência negativa da diminuição da população volta a confirmar-se analisando os resultados dos testes para a viga encastrada dividida em 100 EF (tabelas 6.3 e 6.4), embora para o caso da quantificação o agravamento dos resultados seja menos evidente, assim como a convergência para os casos de menor percentagem de dano.

Tabela 6.3: resultados da quantificação de dano para os testes realizados à viga encastrada de 100 EF.

Teste	População Inicial	Nº dos EF Danificados	Dano (%)	Dano Identificado (%)	Nº de EF Incorretamente Identificados
b3.1.50.c	400	50	50	50	0
b5.1.50.c	200	50	50	50	0
b1.3.50.c	400	25/50/75	50/50/50	43,75/50/50	3
b4.3.50.c	200	25/50/75	50/50/50	43,75/50/43,75	5
b3.3.25.c	400	25/50/75	25/25/25	18,75/25/25	3
b6.3.25.c	200	25/50/75	25/25/25	12,5/18,75/12,5	7
b2.3.15.c	400	25/50/75	15/15/15	6,25/6,25/12,5	4
b5.3.15.c	200	25/50/75	15/15/15	6,25/12,5/6,25	5

Tabela 6.4: número aproximado de iterações necessárias ao AG para convergir para a solução final apresentada, para o caso da viga encastrada dividida em 100 EF.

Teste	População Inicial	Nº Aproximado de Iterações
b3.1.50.c	400	210
b5.1.50.c	200	420
b1.3.50.c	400	240
b4.3.50.c	200	505
b3.3.25.c	400	260
b6.3.25.c	200	270
b2.3.15.c	400	270
b5.3.15.c	200	270

Seguidamente, mostram-se os resultados da quantificação de dano e da convergência do AG para os testes realizados à estrutura em treliça. Ao avaliar apenas a tabela 6.5, o agravamento dos resultados provocados pela menor dimensão da população inicial de cromossomas é pouco evidente. Por outro lado, o efeito negativo é mais significativo nos resultados da convergência (tabela 6.6) pois o algoritmo necessitou de mais iterações para chegar ao resultado final, não sendo tão grande a diferença como aconteceu nos casos anteriores.

Tabela 6.5: resultados da quantificação de dano para os testes realizados à treliça.

Teste	População Inicial	Nº dos EF Danificados	Dano (%)	Dano Identificado (%)	Nº de EF Incorretamente Identificados
T5.1.1.50	400	1	50	50	0
T6.1.1.50	200	1	50	50	0
T5.1.7.50	400	7	50	50	0
T8.1.7.50	200	7	50	50	12
T3.1.13.50	400	13	50	50	0
T10.1.13.50	200	13	50	43.75	0

Tabela 6.6: número aproximado de iterações necessárias ao AG para convergir para a solução final apresentada, para o caso da treliça.

Teste	População Inicial	Nº Aproximado de Iterações
T5.1.1.50	400	50
T6.1.1.50	200	75
T5.1.7.50	400	40
T8.1.7.50	200	145
T3.1.13.50	400	55
T10.1.13.50	200	70

No entanto, se se considerar a totalidade dos testes realizados e não apenas os melhores testes para cada caso (mostrados nas tabelas 6.1 a 6.6), torna-se bem mais evidente que uma população menor terá efeitos negativos nos resultados, principalmente no caso em que se simulou dano no EF nº 7 em que por um lado, com uma população inicial de 400 indivíduos o AG encontrou a resposta certa em todos os testes, por outro este não conseguiu chegar à solução esperada em nenhum dos testes em que foi usada a população inicial de 200 indivíduos.

Assim pode concluir-se que uma população menor diminui a qualidade das respostas dadas pelo AG. Contudo, uma vez que o efeito negativo é aparentemente menos evidente no caso da viga encastrada, pode-se concluir que diferentes números de população podem ser usados para diferentes tipos de problema, sem comprometer demasiado o resultado final.

No entanto, uma população inicial pequena, neste caso, compromete os resultados quando a percentagem de dano é reduzida, logo deve ser usada uma população inicial o maior possível. Lembra-se que a desvantagem mais notória de utilizar uma população inicial demasiado numerosa é o esforço computacional necessário. Contudo, com o rápido avanço tecnológico notório nos últimos anos, esta situação será cada vez menos problemática, devido à capacidade que os computadores poderão alcançar a curto prazo.

6.2.3 Divisão da Estrutura em EF

Neste estudo, as capacidades do AG e do indicador de dano *IFM* foram testadas utilizando uma estrutura (viga encastrada) dividida em diferentes números de EF. Ao aumentar o número de EF em que se divide uma estrutura, está-se automaticamente a aumentar a precisão com que se localiza o dano, uma vez que os EF serão menores e corresponderão a uma menor porção da estrutura. No entanto, o maior número de EF aumenta também o número de variáveis do problema, aumentando também o número de cromossomas necessários para caracterizar a viga e o seu estado, o que poderá dificultar a resolução do problema por parte do AG. Outro agravamento é o facto de o dano ser menor, pois a sua percentagem está associada a um EF menor.

Os testes efetuados para a viga encastrada de 100 EF revelam que mesmo com este elevado número de elementos, o algoritmo foi capaz de apresentar bons resultados (tabela 4.25). Os resultados menos satisfatórios foram obtidos, como se esperava, para o caso da existência de 3 danos de 15%. Ainda assim foram obtidos resultados razoáveis. Provavelmente, se o número de EF fosse aumentado, o AG não conseguiria quantificar, ou mesmo localizar corretamente o dano nos elementos, uma vez estes teriam um tamanho muito reduzido e, portanto, teriam um dano muito pequeno e de fraca influencia na função objetivo.

Concluindo, se se desejar uma maior precisão da avaliação do dano no que diz respeito à localização, a estrutura deverá ser dividida num maior número de EF. No entanto, este aumento poderá provocar uma maior dificuldade na avaliação de dano, podendo originar respostas menos corretas e menos desejáveis. Por isso, não deverá ser escolhido um número de EF demasiado elevado mas que seja o suficiente para obter uma localização bem perceptível.

6.2.4 Número de Frequências Naturais e Modos de Vibração

Neste estudo, foram testados diferentes números de frequências naturais e respetivos modos de vibração fornecidos ao AG, de modo a perceber a sua influência na prestação deste.

Concluiu-se que, ao utilizar um número pequeno de frequências naturais e respetivos modos de vibração, o algoritmo não tem dados suficientes para atingir uma boa solução, como se

pode verificar pela figura 4.53, onde são visíveis erros inesperados como seja a existência errada de dano no EF 17. Estes erros acontecem porque, uma vez que os dados fornecidos ao algoritmo são poucos, facilmente é encontrada uma solução cujos valores façam com que o resultado da função objetivo esteja próxima de zero, mesmo não sendo essa a solução correta. Assim, essa solução tende a ser reproduzida provocando uma mais rápida homogeneidade dos membros das gerações futuras e, portanto, mais difícil é para o algoritmo encontrar a solução correta.

Por outro lado, ao serem fornecidos dados a mais, o AG terá mais dificuldade em encontrar uma solução que satisfaça a maior parte dos valores e, no caso mais extremo, este pode até não convergir para uma solução, como foi o caso dos testes realizados com as primeiras 10 frequências naturais e respetivos modos de vibração, onde através da figura 4.52 se constata que o algoritmo não conseguiu convergir para qualquer solução.

Assim, concluiu-se que o número ótimo de dados a utilizar estará entre 3 e 10. A maioria dos testes realizados neste estudo foi efetuada recorrendo às primeiras 5 frequências naturais e respetivos e modos de vibração, onde se obtiveram resultados considerados bons. Foram realizados também alguns testes recorrendo às 7 primeiras frequências naturais e respetivos modos de vibração onde se obtiveram os melhores resultados, mas à custa de uma convergência mais difícil, o que poderá não representar um problema, como já foi explicado anteriormente.

Assim, para utilizar AG na resolução de problemas, há que ter cuidado com a quantidade de informação inicial que se utiliza, para que esta seja suficiente para obter uma boa solução, mas não excessiva para que se garanta a convergência do algoritmo.

6.2.5 Efeito do Ruído nas Medições

Uma vez que é praticamente impossível a medição dos valores dos dados modais de uma estrutura sem que estes sejam contaminados com ruído, o seu efeito foi testado, para que se avalie a capacidade do AG para encontrar a resposta certa, apesar da imprecisão dos valores.

Os testes efetuados recorrendo à viga encastrada revelaram que o efeito do ruído é bastante problemático para este caso, tanto pela deficiente quantificação do dano, como pelo número de EF intactos dados como danificados, como se observa pela tabela 4.39.

Para o caso da estrutura em treliça, o efeito do ruído revelou ser menos problemático, como é possível verificar na tabela 5.16. Esta tabela revela que em todos os testes, a solução apresentada está muito próxima ou coincide mesmo com a resposta certa. A justificação passa pelo facto de os EF desta estrutura terem uma dimensão maior, logo o dano será também maior tendo efeitos superiores aos do ruído no valor da função objetivo. Há que ter ainda em conta o tipo de estrutura a analisar e o posicionamento dos EF, pois estes podem ser responsáveis pela maior evidência do dano.

A tabela 5.16 mostra que para o caso mais simples, o AG encontrou a solução certa do problema. Contudo, o valor da função objetivo não está próximo de 0. Isto revela que a análise da qualidade da solução nos casos em que existe ruído não pode ser feita apenas pela aproximação do valor da função objetivo.

6.3 Estudos Futuros

A detecção, localização e quantificação de dano em estruturas não se encontra ainda suficientemente desenvolvida para ser utilizada em casos reais e permitir ter confiança nos seus resultados. Por isso, há que continuar a aperfeiçoar os métodos existentes e criar novos métodos, melhores e mais adequados.

Um dos fatores determinantes que poderá ser desenvolvido é o indicador de dano. O indicador *IFM*, baseado no indicador apresentado por Villalba e Laier (2012), revelou, ao longo da realização desta dissertação, um desempenho muito promissor, permitindo obter resultados muito bons. No entanto existem outros indicadores utilizados por vários autores que, segundo estes, permitem alcançar bons resultados como é o caso do indicador *MDLAC*, apresentado por Messina *et al* (1998). Será portanto interessante desenvolver e aperfeiçoar estes indicadores para que se obtenham melhores resultados e, quiçá, combiná-los com outros indicadores que façam uso de outros dados de entrada, que é o caso do indicador *WDI*, desenvolvido por Almeida *et al* (2011), que não usa as frequências e modos de vibração natural da estrutura, mas sim as transmissibilidades.

O desenvolvimento dos indicadores de dano pode ser ajudado se se perceber a influência do dano com mais precisão. Por isso, poderá ser interessante testar o efeito provocado pelo dano em vários pontos da estrutura, em vez de utilizar pontos fixos de localização do dano.

O método aqui usado para avaliar o dano em estruturas foi o AG, que contribuiu também para bons resultados. Outro método recentemente alvo de investigação é o método das RNA, já aqui referenciado como alternativa aos AG. A par dos AG, esta técnica pode ser bastante eficaz na detecção, localização e deteção do dano e merece também ser desenvolvida com esse fim, uma vez que tem potencial para tal, como foi já demonstrado por vários autores.

O *software* utilizado neste estudo para implementação dos AG foi o *Matlab*®. No entanto, é possível programar estes algoritmos recorrendo a linguagens de programação, tais como a linguagem C. A implementação dos AG utilizando a programação dará ao utilizador todo o controlo sobre o processo, sendo este livre de alterar ou implementar novos operadores, tais como aqueles apresentados por Villalba e Laier (2012) e Nobahari & Seyedpoor (2011). A implementação dos AG em linguagens de programação pode até fazer com que estes tenham um desempenho mais eficiente e eficaz.

Referencias Bibliográficas

Almeida, R. A. B., Urgueira, A. P. V., Maia, N. M. M.. Using transmissibility to detect and quantify structural damage. *Proceeding of International Conference on Engineering Dynamics (ICEDyn 2001)*, Tavira, Algarve, Portugal, 20-22 Julho 2011. ISBN: 978-989-96276-0-4.

Bakhary, N., Hao, H., Deeks, A. J. (2007). Damage detection using artificial neural network with consideration of uncertainties. *Engineering Structures*, vol. 29, 2806-2815.

Cardoso, João Burguete, Coelho, Pedro Gonçalves. (2011). *Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica*. Monte da Caparica: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Chou, J., Ghaboussi, J. (2011). Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers and Structures*, vol. 79, 1335-1353.

Corriveau, G., Guilbault, R., Tahan, A. (2010). Genetic algorithms and finite element coupling for mechanical optimization. *Advances in Engineering Software*, vol. 41, 422-426.

Doebling, Scott W., Farrar, Charles R., Prime, Michael B., Shevitz, Daniel W.. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. New Mexico: Los Alamos National Laboratory.

Fang, X., Luo, H., Tang, J. (2005). Structural damage detection using neural network with learning rate improvement. *Computers and Structures*, vol. 83, 2150-2161.

Friswell, M. I., Penny, J. E. T., Garvey, S. D. (1998). A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures. *Computers and Science*, vol. 69, 547-556.

Goldberg, David E.. (1989). *Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, Inc..

Guo, H. Y., Li, Z. L. (2009). A two-stage method to identify structural damage sites and extents by using evidence theory and micro-search genetic algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, 769-782.

He, R., Hwang, S. (2007). Damage detection by a hybrid real-parameter genetic algorithm under the assistance of grey relation analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, 980-992.

Kao, C. Y., Hung, S. (2003). Detection of structural damage via free vibration responses generated by approximating artificial neural networks. *Computers and Structures*, vol. 81, 2631-2644.

- Koh, B. H., Dyke, S. J. (2007). Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data. *Computers and Structures*, vol. 85, 117–130.
- Lee, J. J., Lee, J. W., Yi, J. H., Yun, C. B., Jung, H. Y. (2005). Neural networks-based damage detection for bridges considering error in baseline finite element models. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 280, 555-578.
- Liu, H., Xin, K., Qi, Q. (2011). Study of structural damage detection with multi-objective function genetic algorithms. *Procedia Engineering*, vol. 12, 80–86.
- Maia, N. M. M., Almeida, R. A. B., Urgueira, A. P. V., Sampaio, R. P. C. (2011). Damage detection and quantification using transmissibility. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, 2475-2483.
- Masters, Timothy. (1993). *Practical Neural Network Recipes in C++*. California: Morgan Kaufmann Publishers, 1993;
- Mehrjoo, M., Khaji, N., Moharrami, H., Bahreininejad, A. (2008). Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, vol. 35, 1122-1131.
- Meruane, V., Heylen, W. (2011). An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, 1559–1573.
- Messina, A., Williams, E. J., Contursi, T. (1998). Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 216(5), 791-808.
- Na, C., Kim, S., Kwak, H. (2011). Structural damage evaluation using genetic algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, 2772–2783.
- Nobahari, M., Seyedpoor, S.M. (2011). Structural damage detection using an efficient correlation-based index and a modified genetic algorithm. *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 53, 1798–1809.
- Ortigueira, Manuel Duarte. (2002). *Manual de Introdução ao MatLab*. Monte da Caparica: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Sahoo, B., Maity, D. (2007). Damage assessment of structures using hybrid neuro-genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, vol. 7, 89-104.
- Villalba, J. D., Laier, J. E. (2012). Localizing and quantifying damage by means of a multi-chromosome genetic algorithm. *Advances in Engineering Software*, vol. 50, 150-157.