



**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE OTIMIZAÇÃO E
IDENTIFICAÇÃO DE DANOS PELO MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

BRUNNO EMIDIO SOBRINHO

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE
OTIMIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE DANOS PELO
MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

BRUNNO EMIDIO SOBRINHO

ORIENTADOR: GILBERTO GOMES

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD-07A/21

**BRASÍLIA, DF
2021**

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

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE OTIMIZAÇÃO E
IDENTIFICAÇÃO DE DANOS PELO MÉTODO DE EVOLUÇÃO
DIFERENCIAL**

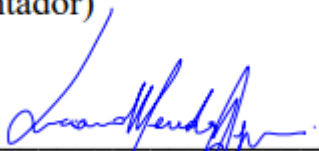
BRUNNO EMIDIO SOBRINHO

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

APROVADA POR:



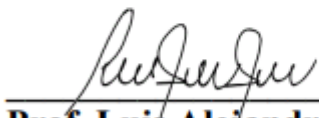
Prof. Gilberto Gomes, DSc (ENC/UnB)
(Orientador)



Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (ENC/UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Pedro Cláudio dos Santos Vieira, DSc (CCET/UFOB)
(Examinador Externo)



Prof. Luis Alejandro Pérez Peña, DSc (FAU/UnB)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA, 23 DE JUNHO DE 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

SOBRINHO, BRUNNO EMIDIO.

Análise Numérica e Experimental de Otimização e Identificação de Danos pelo Método de Evolução Diferencial. [Distrito Federal] 2021.

cdxxxviii, 438p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2021).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Otimização

2. MEF

3. Problemas Inversos

4. Identificação de Danos

5. Evolução Diferencial

6. Equação de Danos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOBRINHO, B. E. (2021). Análise Numérica e Experimental de Otimização e Identificação de Danos pelo Método de Evolução Diferencial. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD-07A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 438p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Brunno Emidio Sobrinho

TÍTULO: Análise Numérica e Experimental de Otimização e Identificação de Danos pelo Método de Evolução Diferencial.

GRAU: Doutor ANO: 2021

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

Brunno Emidio Sobrinho

Rua 30 Norte, Lote 01, Edifício New York, Apt. 1202 – Águas Claras/DF.

71.918-180 Brasília – DF / Brasil

e-mail: brunno.emidio@aluno.unb.br

Dedicatória.

A minha esposa Camila Braz por todo amor, incentivo e compreensão

Aos meus Pais Rosilane Emidio e Joilde de Moraes

Aos meus irmãos Hudson Emidio e Talita Maria Emidio

Aos meus avós, tios, padrinhos, primos, cunhados e sogros

Aos meus familiares em geral

Aos meus mestres de toda a minha jornada acadêmica e profissional

*Aos meus amigos, colegas e pessoas que sempre me apoiaram e estiveram presentes em
minha vida pelo apoio e amor incondicional*

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus por me proporcionar a segurança necessária e saúde para conseguir chegar até aqui.

A minha esposa Camila Braz por me repassar a segurança necessária e incentivo para que conseguisse superar essa etapa da nossa vida, sempre apoiando e me motivando a desenvolver e finalizar essa pesquisa.

Aos meus pais: Rosilane Emidio e Joilde de Moraes, pois sem eles eu nada seria. Tudo que sou e tenho é graças a eles. Aos meus irmãos Hudson Emidio e Talita Maria Emidio por sempre torcerem por mim e a toda minha família (avós, tios, primos, entre outros), amigos, colegas e pessoas iluminadas que Deus colocou nos meus caminhos pelo apoio e orações incondicionais.

Ao meu Professor e Orientador Gilberto Gomes, por acreditar no meu trabalho, pela efetiva orientação, paciência, disponibilidade, incentivo e apoio ao longo da pesquisa.

Ao meu Co-orientador do mestrado e Engenheiro Mecânico Genasil Francisco dos Santos da UERJ, pelas inúmeras dúvidas tiradas sobre meu trabalho, pela paciência de responder meus vários contatos e e-mails, disponibilidade, pelos diversos materiais fornecidos e pela demonstração incondicional de seu amor pela engenharia, que serviram de inspiração ao longo da realização também deste trabalho de doutorado

Aos meus amigos, os doutores Welington Vital, Ramon Saleno e Erwin Ulises, por todo incentivo e ajuda nas horas difíceis da realização dessa pesquisa, pelas inúmeras colaborações e amizade, bem como o orientador deles e professor nosso, Luciano Mendes por todos os ensinamentos.

Agradecer ao pessoal da engenharia mecânica do Laboratório de Vibração e Dinâmica de Sistemas pelo uso do Sistema de Aquisição de Dados - LabView, no caso o professor Marcus Girão e o monitor dele, o Lucas Fernandes Camargos, além também do Welington, Ramon e Erwin novamente pelos auxílios nos ensaios experimentais que trouxeram toda a bagagem

e experiência das atividades laboratoriais deles trazendo muitas contribuições a essa pesquisa.

Aos amigos e colegas de trabalho, principalmente do DNIT e da empresa Exata Engenharia, que sempre me deram o apoio e suporte necessário, incentivando na concretização deste sonho.

Aos amigos e colegas conquistados ao longo de minha vida, que sempre tornaram as minhas jornadas mais prazerosas e brandas, sempre me ajudando a ter um sorriso no rosto.

Aos amigos e colegas do mestrado e doutorado pelas inúmeras ajudas, companheirismo e solidariedade, que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desta tese de doutorado, bem como agradecer ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC) da Universidade de Brasília (UnB) por todo conhecimento repassado ao longo desses anos oriundo do seu capacitado corpo docente.

“A única constante é a mudança.”

Heráclito de Éfeso.

A única coisa imutável é a necessidade de mudança.

Adaptado de Arthur Schopenhauer.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e resolva provar o contrário.”

Albert Einstein.

RESUMO

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE OTIMIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE DANOS PELO MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Autor: Brunno Emidio Sobrinho

Orientador: Gilberto Gomes, DSc

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Junho de 2021

Atualmente, os problemas de otimização, utilizados para resolver problemas de identificação de danos, são recorrentes tanto na área acadêmica quanto na indústria. Aliar a identificação de danos e os processos de otimização na busca contínua por meios mais adequados, com consequente aprimoramento das informações disponíveis que caracterizam os problemas em estudo é essencial, e constitui uma das necessidades da engenharia atual, tendo em vista o estado evolutivo dos elementos estruturais quando em uso, no sentido da própria deterioração natural dos materiais, além de causas excepcionais que possam vir a ocorrer. Muitos pesquisadores vêm buscando aprimorar tanto a simulação do comportamento físico e real quanto a otimização da resposta estrutural, principalmente devido às dificuldades encontradas, como por exemplo, na modelagem da rigidez de conexões, nas condições de apoio ou nos parâmetros relevantes envolvendo danos. Neste contexto, essa pesquisa apresenta um estudo de ajuste de estruturas modeladas pelo Método de Elementos Finitos e baseado em dados numéricos e experimentais, estáticos (deslocamentos) e dinâmicos (modos de vibração e frequências naturais), por meio dos Problemas Inversos, possibilitando, assim, uma melhor compreensão do comportamento físico real das estruturas, bem como da aplicação de técnicas de otimização para simulação e identificação de danos. Análises dinâmicas, experimental e numérica, sobre uma viga metálica foi realizada para identificação de danos pelo Método de Evolução Diferencial. E ainda, a utilização da técnica de massa móvel adicional, para verificação da variação das frequências naturais, em conjunto com uma série de elementos de outras pesquisas com diferentes carregamentos e posições de danos foram simulados para comprovar a eficácia do algoritmo, apresentando resultados consistentes. Por fim, a partir de métodos de análises estáticas, foram apresentados parâmetros para o estabelecimento de etapas e alternativas para localização de danos, bem como a implementação de uma equação de danos simplificada para análises de quantificação de danos, demonstrando boas potencialidades de aprimoramento e visando facilitar aplicações em inspeções rotineiras de campo.

Palavras-chave: Otimização; Método de Elementos Finitos; Problemas Inversos; Identificação de Danos; Evolução Diferencial; Equação de Danos.

ABSTRACT

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF OPTIMIZATION AND DAMAGE IDENTIFICATION BY THE DIFFERENTIAL EVOLUTION METHOD

Author: Bruno Emidio Sobrinho

Supervisor: Gilberto Gomes, DSc

Graduate Program in Structures and Civil Construction

Brasilia, 2021 June

Currently, optimization problems, used to solve damage identification problems, are recurrent both in the academic area and in the industry. Combining the damages identification and the optimization processes in the continuous search for more appropriate means, with the consequent improvement of available information that characterize the problems under study is essential, and constitutes one of engineering current needs, considering the evolutionary state of the structural elements when in use, in the sense of the materials natural deterioration, in addition to exceptional causes that may occur. Many researchers have been seeking to improve both the simulation of physical and real behavior and the structural response optimization, mainly due to the encountered difficulties, for example, in the connections stiffness modeling, in the support conditions or in the relevant parameters involving damages. In this context, this research presents a study of the modeled structures adjustment by the Finite Element Method and based on numerical and experimental, statics (displacement) and dynamics (vibration modes and natural frequencies), through Inverse Problems, thus enabling a better understanding of the real physical behavior of structures, as well as the application of optimization techniques for simulation damage identification. Dynamic analyzes, experimental and numerical, about a steel beam were performed to identify damage by the Differential Evolution Method. Furthermore, the use of the additional rove mass technique to verify the natural frequencies variation, together with a series of elements from other researches with different loads and damage positions were simulated to prove the algorithm effectiveness, presenting consistent results. Finally, using static analysis methods, parameters were presented for the establishment of steps and alternatives for damage location, as well as a simplified damage equation implementation for damage quantification analysis, demonstrating good potential for improvement in order to facilitate applications in routine field inspections.

Keywords: Optimization; Finite Element Method; Inverse Problems; Damage Identification; Differential Evolution; Damage Equation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivos específicos	4
1.2 CONTRIBUIÇÕES PRELIMINARES DA PESQUISA.....	5
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA (RSL).....	8
2.1.1 Conceitos de RSL	8
2.1.2 Aplicação da Metodologia de RSL.....	8
2.1.3 Resultados de RSL	10
2.1.4 Estudos Seleccionados de RSL	10
2.2 OUTRAS ABORDAGENS DA PESQUISA.....	12
2.3 PROBLEMAS ABORDADOS	19
2.3.1 As Meta-Heurísticas	23
2.3.2 Os Algoritmos de Otimização	25
2.3.3 Os Problemas Inversos	27
2.3.4 A Influência dos Danos Numa Estrutura.....	27
2.3.5 O Método de Elementos Finitos (MEF)	29
2.4 FORMULAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS.....	30
2.5 AS RESPOSTAS DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS.....	33
2.5.1 Respostas por Meio de Métodos Estáticos e suas Variações	33
2.5.2 Respostas por Meio de Métodos de Análises Dinâmicas	35
2.6 UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS	40
2.6.1 O método da viga conjugada	41
2.7 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	43
2.8 CLASSIFICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO.....	44
2.9 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO CLÁSSICO: MÉTODO DO GRADIENTE....	45
2.10 MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL (ED)	47
2.10.1 Evolução Diferencial: População	51

2.10.2	Evolução Diferencial: Mutação	52
2.10.3	Evolução Diferencial: Cruzamento (<i>Crossover</i>)	52
2.10.4	Evolução Diferencial: Seleção.....	53
2.10.5	Evolução Diferencial: Critério de Parada.....	54
2.11	COMPORTAMENTO GERAL: MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	54
2.11.1	Comportamento do Método de Evolução Diferencial na busca por um mínimo global de uma função	55
2.12	VARIAÇÕES DE ALGORITMOS DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	60
2.13	MÉTODO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS – AG (<i>GENETIC ALGORITHM</i> , GA)	61
2.14	OS ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO: AS FUNÇÕES OBJETIVOS E FUNÇÕES TESTE OU DE CALIBRAÇÃO.....	64
2.14.1	Funções Objetivos – FO (<i>Objective Functions</i> - OF).....	65
2.14.2	Funções Teste ou Funções de Calibração – FT ou FC (<i>Test Functions</i> – TF)	67
2.14.3	Noções de Erro Absoluto (EA) e Erro Relativo (ER)	79
2.14.4	Função Objetivo – Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).....	80
2.14.4.1	Exemplo de Aplicação do MMQ.....	82
2.15	CÁLCULO ANALÍTICO DAS FREQUÊNCIAS.....	83
2.16	ANÁLISE TEÓRICA PARA DECOMPOSIÇÃO HIERÁRQUICA DOS PROCESSOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS PARA QUANTIFICAÇÃO DE DANO.....	89
3.	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	97
3.1	ANÁLISE NUMÉRICA.....	97
3.1.1	Considerações preliminares referente ao perfil metálico do tipo IPN (<i>European Standard I Beams</i>) padrão Europeu.....	97
3.1.1.1	A Tensão Residual Inicial (TRI) nos perfis tipo W.....	97
3.1.1.2	Parâmetros para a simulação da resistência última de perfil tipo W com o ABAQUS®.....	98
3.1.1.3	Modelo com o uso do ABAQUS®	99
3.1.2	Simulação da resistência última de perfil IPN 500x104 com ABAQUS®	103
3.1.3	Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Intacta	107

4. METODOLOGIA.....	112
4.1 ANÁLISE COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	117
4.2 ANÁLISES EXPERIMENTAIS	117
4.3 EXPERIÊNCIAS PRÉVIAS PARA SE ALCANÇAR A ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DINÂMICA DA VIGA METÁLICA BIAPOIADA INTACTA QUE MELHOR ATENDESSE ÀS NECESSIDADES E APRENDIZADOS LABORATORIAIS ADQUIRIDOS AO LONGO DESSA PESQUISA.....	118
4.3.1 Ensaio Dia 04/12/2020 – Início de Ensaios da Viga Metálica	119
4.3.2 Preparação e Ensaio Dia 11/12/2020 – Continuidade dos Ensaios da Viga Metálica com os Testes para Utilização do Sistema de Massa Móvel	120
4.3.3 Ensaio Dia 18/12/2020 – Ensaio Modal e com o Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica	122
4.3.4 Ensaio Dia 22/12/2020 – Ensaio com uma Nova Organização do Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica.....	124
4.3.5 Ensaio Dia 29/12/2020 – Prosseguimento do Ensaio com uma Nova Organização do Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica e Posicionamentos dos Acelerômetros.....	125
4.3.6 Preparação Dia 12/01/2021 – Verificações Geométricas do Elemento Estrutural, Preparação das Condições de Contorno da Viga e Nivelamentos	126
4.3.7 Ensaio Dia 09/02/2021 – Prosseguimento do Ensaio com Novas Tentativas de Organizações do Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica com o Aprimoramento das Condições de Apoio	129
4.4 ENSAIO DIA 11/02/2021 (EFETIVO DIA DE INÍCIO DO PROGRAMA DE ENSAIOS DA PESQUISA) – ENSAIO COM O SISTEMA DE MASSA MÓVEL DEFINIDO DA VIGA METÁLICA	130
4.4.1 Massas Móveis Definidas Para a Utilização da Técnica na Viga Metálica...	130
4.4.2 Instrumentação: Equipamentos e Ferramentas Para a Utilização da Técnica na Viga Metálica	134
4.4.3 Resumo Geral Temporal dos Ensaios Efetivos Utilizados na Pesquisa	137
4.4.4 Preparações Dias 12 e 13/02/2021 e Ensaios Efetivos Dias 13, 18 e 20/02/2021: Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada.....	139

4.4.4.1	Análises modais prévias com verificações dos modos de vibrações 1 do elemento intacto e danificado	143
4.5	METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DANOS E DE UMA EQUAÇÃO NO CAMPO DE QUANTIFICAÇÃO DE DANOS	144
5.	APLICAÇÃO E RESULTADOS - ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA VIGA METÁLICA PERFIL EUROPEU IPN 500X104 COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	146
5.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL DINÂMICA CASO 1 VIGA METÁLICA BIAPOIADA DANIFICADA (CASO EXPERIMENTAL EM ESCALA MAIOR): EVOLUÇÃO DIFERENCIAL (ED)	150
5.1.1	Considerações dos Resultados Experimentais com o Método de Evolução Diferencial sobre os casos 1.1, 1.2 e 1.3 - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 metros	156
5.1.2	Análise Experimental Dinâmica dos Casos 1.1, 1.2 e 1.3 da Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 Danificada (caso experimental em escala maior): Algoritmos Genéticos (AG).....	158
5.2	ANÁLISE NUMÉRICA DINÂMICA CASO 1 VIGA METÁLICA BIAPOIADA DANIFICADA (ABAQUS [®]): EVOLUÇÃO DIFERENCIAL (ED).....	159
5.2.1	Considerações dos Resultados Numéricos com o Método de Evolução Diferencial sobre os casos 1.1, 1.2 e 1.3 - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 metros	166
5.3	ETAPAS E ALTERNATIVAS PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS E DEFINIÇÃO DE UMA EQUAÇÃO SIMPLIFICADA NAS ANÁLISES DE QUANTIFICAÇÃO DE DANOS.....	168
5.3.1	Parâmetros para definição de meios de localização de danos e de uma equação no campo de quantificação de danos	168
5.3.1.1	Localização do dano - Nível 2: Aplicação para decomposição hierárquica dos processos de identificação de danos estruturais.....	172
5.3.1.2	Quantificação do dano - Nível 3: Aplicação para decomposição hierárquica dos processos de identificação de danos estruturais.....	177
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	190
6.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	193

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195
ANEXOS	209
ANEXO 1. APLICAÇÕES E RESULTADOS PRÉVIOS: SILVA (2011 E 2015), PALECHOR (2013 E 2018)	210
1.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL	210
1.1.1 Análise Estática	211
1.1.1.1 Instrumentação (Análise Estática)	212
1.1.2 Análise Dinâmica	214
1.1.2.1 Instrumentação (Análise Dinâmica)	214
1.2 ANÁLISE NUMÉRICA	215
1.2.1 Características dos elementos utilizados na modelagem com o Programa ANSYS®	216
1.2.1.1 Elemento BEAM3	216
1.2.1.2 Elemento SHELL63	219
1.2.1.3 Processamento no software ARTEMIS®	223
1.3 ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS E TRELIÇAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (DISSERTAÇÃO: SILVA, 2011)	224
1.3.1 Caso 2 - Análise Numérica Estática: Viga em Balanço	225
1.3.1.1 Análise Estática Viga em Balanço: Evolução Diferencial (ED)	226
1.3.1.2 Análise Estática Viga em Balanço: Algoritmos Genéticos (AG).....	230
1.3.2 Caso 3 - Análise Numérica Dinâmica: Viga em Balanço	235
1.3.2.1 Análise Dinâmica Viga em Balanço: Evolução Diferencial (ED)	236
1.3.2.2 Análise Dinâmica Viga em Balanço: Algoritmos Genéticos (AG).....	240
1.3.3 Caso 4 - Análise Numérica Estática: Viga Biengastada.....	245
1.3.3.1 Análise Estática Viga Biengastada: Evolução Diferencial (ED).....	246
1.3.3.2 Análise Estática Viga Biengastada: Algoritmos Genéticos (AG)	250
1.3.4 Caso 5 - Análise Numérica Dinâmica: Viga em Biengastada	255
1.3.4.1 Análise Dinâmica Viga Biengastada: Evolução Diferencial (ED).....	256
1.3.4.2 Análise Dinâmica Viga Biengastada: Algoritmos Genéticos (AG)	260
1.3.5 Caso 6 - Análise Numérica Estática: Treliza Plana	265
1.3.5.1 Análise Estática Treliza Plana: Evolução Diferencial (ED).....	267
1.3.5.2 Análise Estática Treliza Plana: Algoritmos Genéticos (AG)	269

1.4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS METÁLICAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (TESE: SILVA, 2015)	271
1.4.1 Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada Intacta	273
1.4.2 Caso 7 - Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada (VD1-2)	273
1.4.2.1 Análise Estática Caso 7 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-2): Evolução Diferencial (ED)	274
1.4.2.2 Análise Estática Caso 7 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-2): Algoritmos Genéticos (AG)	276
1.4.3 Caso 8 - Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-4).....	277
1.4.3.1 Análise Estática Caso 8 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-4): Evolução Diferencial (ED)	278
1.4.3.2 Análise Estática Caso 8 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-4): Algoritmos Genéticos (AG)	280
1.4.4 Caso 9 - Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2-2).....	281
1.4.4.1 Análise Estática Caso 9 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2-2): Evolução Diferencial (ED)	281
1.4.4.2 Análise Estática Caso 9 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2-2): Algoritmos Genéticos (AG)	283
1.4.5 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 7 (VD1-2), 8 (VD1-4) e 9 (VD2-2) - Análise Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada	285
1.4.6 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 7 (VD1-2), 8 (VD1-4) e 9 (VD2-2) - Análise Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada	286
1.4.7 Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Intacta	287
1.4.8 Caso 10 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1)	287
1.4.8.1 Análise Dinâmica Caso 10 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1): Evolução Diferencial (ED)	288

1.4.8.2 Análise Dinâmica Caso 10 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1): Algoritmos Genéticos (AG)	290
1.4.9 Caso 11 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2)	291
1.4.9.1 Análise Dinâmica Caso 11 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2): Evolução Diferencial (ED)	291
1.4.9.2 Análise Dinâmica Caso 11 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2): Algoritmos Genéticos (AG)	293
1.4.10 Caso 12 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD3)	294
1.4.10.1 Análise Dinâmica Caso 12 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD3): Evolução Diferencial (ED)	294
1.4.10.2 Análise Dinâmica Caso 12 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD3): Algoritmos Genéticos (AG)	296
1.4.11 Caso 13 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD4)	297
1.4.11.1 Análise Dinâmica Caso 13 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD4): Evolução Diferencial (ED)	297
1.4.11.2 Análise Dinâmica Caso 13 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD4): Algoritmos Genéticos (AG)	299
1.4.12 Caso 14 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD5)	300
1.4.12.1 Análise Dinâmica Caso 14 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD5): Evolução Diferencial (ED)	300
1.4.12.2 Análise Dinâmica Caso 14 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD5): Algoritmos Genéticos (AG)	302
1.4.13 Caso 15 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD6)	303
1.4.13.1 Análise Dinâmica Caso 15 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD6): Evolução Diferencial (ED)	303
1.4.13.2 Análise Dinâmica Caso 15 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD6): Algoritmos Genéticos (AG)	305
1.4.14 Caso 16 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD7)	306

1.4.14.1 Análise Dinâmica Caso 16 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD7): Evolução Diferencial (ED)	306
1.4.14.2 Análise Dinâmica Caso 16 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD7): Algoritmos Genéticos (AG)	308
1.4.15 Caso 17 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD8)	309
1.4.15.1 Análise Dinâmica Caso 17 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD8): Evolução Diferencial (ED)	309
1.4.15.2 Análise Dinâmica Caso 17 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD8): Algoritmos Genéticos (AG)	311
1.4.16 Caso 18 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD9)	312
1.4.16.1 Análise Dinâmica Caso 18 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD9): Evolução Diferencial (ED)	312
1.4.16.2 Análise Dinâmica Caso 18 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD9): Algoritmos Genéticos (AG)	314
1.4.17 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 10 a 18 (VD1 a VD9) - Análise Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada	315
1.4.18 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 10 a 18 (VD1 a VD9) - Análise Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada	316
1.5 ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS METÁLICAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (DISSERTAÇÃO: PALECHOR, 2013).....	318
1.5.1 Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Intacta	318
1.5.2 Caso 19 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V2D).....	319
1.5.2.1 Análise Dinâmica Caso 19 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V2D): Evolução Diferencial (ED)	319
1.5.2.2 Análise Dinâmica Caso 19 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V2D): Algoritmos Genéticos (AG)	322
1.5.3 Caso 20 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V3D).....	323

1.5.3.1 Análise Dinâmica Caso 20 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V3D): Evolução Diferencial (ED)	324
1.5.3.2 Análise Dinâmica Caso 20 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V3D): Algoritmos Genéticos (AG)	326
1.5.4 Caso 21 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V4D).....	329
1.5.4.1 Análise Dinâmica Caso 21 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V4D): Evolução Diferencial (ED)	329
1.5.4.2 Análise Dinâmica Caso 21 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V4D): Algoritmos Genéticos (AG)	331
1.5.5 Caso 22 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V5D).....	334
1.5.5.1 Análise Dinâmica Caso 22 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V5D): Evolução Diferencial (ED)	334
1.5.5.2 Análise Dinâmica Caso 22 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V5D): Algoritmos Genéticos (AG)	336
1.5.6 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 19 a 22 (V2D a V5D) - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada	338
1.5.7 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 19 a 22 (V2D a V5D) - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada	340
1.6 ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS METÁLICAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (TESE: PALECHOR, 2018).....	341
1.6.1 Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Intacta	341
1.6.2 Caso 23 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 1)	347
1.6.2.1 Análise Dinâmica Caso 23 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 1): Evolução Diferencial (ED)	347
1.6.2.2 Análise Dinâmica Caso 23 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 1): Algoritmos Genéticos (AG)	349
1.6.3 Caso 24 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 2)	351

1.6.3.1 Análise Dinâmica Caso 24 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 2): Evolução Diferencial (ED)	351
1.6.3.2 Análise Dinâmica Caso 24 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 2): Algoritmos Genéticos (AG)	353
1.6.4 Caso 25 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 3)	354
1.6.4.1 Análise Dinâmica Caso 25 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 3): Evolução Diferencial (ED)	355
1.6.4.2 Análise Dinâmica Caso 25 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 3): Algoritmos Genéticos (AG)	357
1.6.5 Caso 26 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 9)	358
1.6.5.1 Análise Dinâmica Caso 26 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 9): Evolução Diferencial (ED)	358
1.6.5.2 Análise Dinâmica Caso 26 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 9): Algoritmos Genéticos (AG)	360
1.6.6 Caso 27 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 10)	362
1.6.6.1 Análise Dinâmica Caso 27 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 10): Evolução Diferencial (ED)	362
1.6.6.2 Análise Dinâmica Caso 27 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 10): Algoritmos Genéticos (GA)	364
1.6.7 Caso 28 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 12)	366
1.6.7.1 Análise Dinâmica Caso 28 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 12): Evolução Diferencial (ED)	366
1.6.7.2 Análise Dinâmica Caso 28 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 12): Algoritmos Genéticos (AG)	368
1.6.8 Caso 29 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 13)	370
1.6.8.1 Análise Dinâmica Caso 29 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 13): Evolução Diferencial (ED)	370
1.6.8.2 Análise Dinâmica Caso 29 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 13): Algoritmos Genéticos (AG)	372

1.6.9 Caso 30 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 14)	374
1.6.9.1 Análise Dinâmica Caso 30 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 14): Evolução Diferencial (ED)	374
1.6.9.2 Análise Dinâmica Caso 30 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 14): Algoritmos Genéticos (AG)	376
1.6.10 Caso 31 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 15)	378
1.6.10.1 Análise Dinâmica Caso 31 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 15): Evolução Diferencial (ED)	378
1.6.10.2 Análise Dinâmica Caso 31 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 15): Algoritmos Genéticos (AG)	380
1.6.11 Caso 32 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 16)	382
1.6.11.1 Análise Dinâmica Caso 32 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 16): Evolução Diferencial (ED)	382
1.6.11.2 Análise Dinâmica Caso 32 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 16): Algoritmos Genéticos (AG)	384
1.6.12 Caso 33 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 17)	386
1.6.12.1 Análise Dinâmica Caso 33 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 17): Evolução Diferencial (ED)	386
1.6.12.2 Análise Dinâmica Caso 33 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 17): Algoritmos Genéticos (AG)	388
1.6.13 Caso 34 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 18)	390
1.6.13.1 Análise Dinâmica Caso 34 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 18): Evolução Diferencial (ED)	390
1.6.13.2 Análise Dinâmica Caso 34 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 18): Algoritmos Genéticos (AG)	392
1.6.14 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31 e 32 - Análise Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada	394

1.6.15 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31 e 32 - Análise Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada.....	395
1.6.16 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 26, 27, 33 e 34 - Análise Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada	397
1.6.17 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 26, 27, 33 e 34 - Análise Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada	398
ANEXO 2. MÉTODOS ESTOCÁSTICOS	400
2.1 MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO - RS (<i>SIMULATED ANNEALING, SA</i>).....	400
2.2 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO EXTREMA GENERALIZADA - OEG (<i>GENERALIZED EXTREMAL OPTIMIZATION, GEO</i>)	401
2.3 MÉTODO DA COLÔNIA DE FORMIGAS – CF (<i>ANT COLONY OPTIMIZATION, ACO</i>)	402
2.4 MÉTODO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS – RNA (<i>ARTIFICIAL NEURAL NETWORK, ANN</i>).....	404
2.5 MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS – EP (<i>PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, PSO</i>)	405
2.6 MÉTODO DE BUSCA TABU - BT (<i>TABU SEARCH, TS</i>).....	407
2.7 MÉTODO GRASP (<i>GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURES, GRASP</i>).....	408
APÊNDICES	411
APÊNDICE A. OBTENÇÃO DE RESULTADOS DOS DESLOCAMENTOS MEDIDOS - ANÁLISE EXPERIMENTAL ESTÁTICA (VR, VD1-2, VD1-4 E VD2-2)	412
A.1 OBTENÇÃO DE RESULTADOS: VIGAS EXPERIMENTAIS	412
APÊNDICE B. VERIFICAÇÃO DA CARGA MÁXIMA DAS VIGAS METÁLICAS PERFIL I AMERICANO (102.0 X 11.4) E PERFIL I EUROPEU IPN 500X104 (ANÁLISE EXPERIMENTAL DO AUTOR).....	413
B.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESPECIFICAÇÕES DAS VIGAS	413

B.2 ANÁLISE DO LIMITE DE CARGA DA VIGA INTACTA	413
B.3 ANÁLISE DE FLAMBAGEM LOCAL	413
B.4 MEMÓRIA DE CÁLCULO PARA ANÁLISE DE FLAMBAGEM LOCAL.....	422
APÊNDICE C. DADOS DO MODELO NUMÉRICO DA ESTRUTURA	
INTACTA E DANIFICADA DE DESLOCAMENTOS DO PERFIL I EUROPEU	
IPN 500X104	426
APÊNDICE D. PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DESSA PESQUISA	
D.1 ARTIGO PUBLICADO: DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM FOR	
IDENTIFICATION OF STRUCTURAL DAMAGE IN STEEL BEAMS	
(FRATTURA ED INTEGRITÁ STRUTTURALE / FRACTURE AND	
STRUCTURAL INTEGRITY - FIS).....	
	434
D.2 ARTIGO PUBLICADO: OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA INVERSO NA	
IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS (CONGRESS ON	
COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING – XXXVI CILAMCE)	
	436
D.3 ARTIGOS EM DESENVOLVIMENTO E A SEREM SUBMETIDOS	
	438

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Metodologia RSL e sua aplicação na pesquisa	9
Tabela 2.2 - Método da viga conjugada e equações relacionadas	41
Tabela 2.3 – Esquema do comportamento das variáveis envolvidas no Método de Evolução Diferencial	50
Tabela 2.4 – Estruturas e operadores típicos (Holland, 1992).....	63
Tabela 2.5 – Alguns modelos de Equação de Funções Objetivo.....	66
Tabela 2.6 – Exemplos de Funções Teste ou de Calibração para aplicação em MATLAB®	68
Tabela 2.7 – Funções Teste de otimização para um único objetivo	69
Tabela 2.8 – Funções Teste de otimização com restrições.....	74
Tabela 2.9 – Funções Teste de otimização multiobjetivo	75
Tabela 2.10 - Resultados para as frequências analíticas da Viga Intacta sem adição de massa móvel	85
Tabela 2.11 - Resultados para Análises da Viga Intacta sem adição de massa móvel Experimental e demais métodos	85
Tabela 2.12 – Resultados para Análises da Viga Intacta Experimental com adição de massa móvel e demais métodos	88
Tabela 3.1 – Detalhamentos do elemento finito C3D8R.....	100
Tabela 4.1 – Especificações de Catálogo: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas (Viga IPN 500x104)	118
Tabela 4.2 - Especificações Medidas “in loco”: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas (Viga IPN 500x104)	127
Tabela 4.3 – Indicadores de danos baseados em parâmetros estatísticos de alta ordem (Alves, 2016).....	144
Tabela 5.1 - Tabela resumo ED: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 m.....	157
Tabela 5.2 - Tabela resumo ED: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 m.....	167
Tabela 5.3 - Parâmetros técnicos da viga metálica IPN 500x104 biapoiada com 6 metros para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional	169
Tabela 5.4 - Parâmetros técnicos das vigas metálicas biapoiadas com 5 metros para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional	170
Tabela 5.5 - Parâmetros técnicos das vigas metálicas biapoiadas com 6 metros para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional	171

Tabela 5.6 – Análise Resumo 1: Estudos de Casos de Deslocamentos Utilizando as Equações no Ponto de Danos de 10 cm da Viga em $L/2$, $L/4$ e $L/8$	181
Tabela 5.7 – Análise Resumo 2: Estudos de Casos de Deslocamentos Utilizando Somente a Equação do Meio da Viga Com Danos de 10 cm em $L/4$ e $L/8$	182
Tabela 5.8 – Análise Resumo 3: Estudos de Casos de Deslocamentos Utilizando a Equação nos Pontos de Danos e Também Somente no Meio da Viga com Variação de Altura dos Danos de 20 cm, 30 cm e 50 cm em $L/8$	183
Tabela 5.9 – Análise Resumo dos Estudo de Caso de Deslocamentos e Danos da Viga..	184
Tabela 5.10 – Análise Viga IPN 500x104 do Experimento: Estudos dos Deslocamentos Utilizando a Equação nos Pontos de Danos e Também Somente no Meio da Viga com Dimensões dos Danos de 5 cm por 5 cm em $L/2$, $L/4$ e $L/8$	188
Tabela A1.1 – Verificações realizadas na viga.....	213
Tabela A1.2 – Características do elemento BEAM3.....	216
Tabela A1.3 – Constantes reais: modelagem numérica elemento BEAM3	218
Tabela A1.4 – Diminuição da inércia do elemento danificado na modelagem numérica – elemento BEAM3	218
Tabela A1.5 – Características do elemento SHELL63.....	220
Tabela A1.6 – Valores obtidos da diminuição da seção transversal da viga.....	222
Tabela A1.7 – Análise Resumo ED: Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN.....	229
Tabela A1.8 - Mínimos e máximos valores estáticos intacto e danificados.....	230
Tabela A1.9 – Análise Resumo AG: Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN	235
Tabela A1.10 – Análise Resumo ED: Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN.....	240
Tabela A1.11 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados	241
Tabela A1.12 – Análise Resumo AG: Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN	245
Tabela A1.13 – Análise Resumo ED: Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN.....	250
Tabela A1.14 - Mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificados.....	251
Tabela A1.15 – Análise Resumo AG: Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN	255
Tabela A1.16 – Análise Resumo ED: Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN.....	260
Tabela A1.17 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados	261
Tabela A1.18 – Análise Resumo AG: Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN	265
Tabela A1.19 - Análise Resumo ED: Treliça Plana de 25 Barras Caso 6.....	269

Tabela A1.20 - Mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificado	269
Tabela A1.21 – Análise Resumo AG: Treliza Plana de 25 Barras Caso 6.....	271
Tabela A1.22 – Análise Resumo ED: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 7, 8 e 9.....	285
Tabela A1.23 – Análise Resumo AG: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 7, 8 e 9	286
Tabela A1.24 - Mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados.....	287
Tabela A1.25 - Análise Resumo ED: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 10 a 18	315
Tabela A1.26 – Análise Resumo AG: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 10 a 18	317
Tabela A1.27 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados	318
Tabela A1.28 - Análise Resumo ED: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 19, 20, 21 e 22	339
Tabela A1.29 - Análise Resumo AG: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 19, 20, 21 e 22	340
Tabela A1.30 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intactos e danificados.....	341
Tabela A1.31 - Análise Resumo ED: Vigas de 5 m Metálicas Biapoiadas.....	394
Tabela A1.32 - Análise Resumo AG: Vigas de 5 m Metálicas Biapoiadas	396
Tabela A1.33 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados	397
Tabela A1.34 – Análise Resumo ED: Vigas de 6 m Metálicas Biapoiadas	397
Tabela A1.35 - Tabela Resumo AG: Vigas de 6 m Metálicas Biapoiadas.....	398
Tabela A1.36 - Menores e maiores valores dinâmicos intactos e danificados	399
Tabela B2.1 – Analogia entre o sistema físico e o problema de otimização.....	400
Tabela A.1 - Deslocamentos: análise estática – Vigas VR, VD1-2, VD1-4 e VD2-2	412
Tabela B.1 - Viga Perfil I Americano (102.0x11.4): Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas	413
Tabela B.2 - Viga Perfil I Europeu IPN 500x104: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas	413
Tabela B.3 – Resumo de Resultados Finais – Cargas Máximas nas Vigas.....	422
Tabela B.4 - Especificações Técnicas Medidas “in loco”: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas (Viga IPN 500x104)	422
Tabela C.1 – Dados de deslocamentos do modelo numérico da viga metálica intacta perfil I europeu IPN 500x104.....	427
Tabela C.2 - Dados de deslocamentos do modelo numérico da viga metálica danificada perfil I europeu IPN 500x104 (danos em L/2)	428
Tabela C.3 - Dados de deslocamentos do modelo numérico da viga metálica danificada perfil I europeu IPN 500x104 (danos em L/4)	430

Tabela C.4 - Dados de deslocamentos do modelo numérico da viga metálica danificada perfil I europeu IPN 500x104 (danos em L/8)	432
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação temporal das publicações selecionadas	10
Figura 2.2 - Relação da quantidade de referências bibliográficas produzidas por tipo de publicação.....	11
Figura 2.3 - Relação geográfica dos países com mais publicações selecionadas.....	11
Figura 2.4 – Panoramas e comportamentos das técnicas heurísticas	25
Figura 2.5 – Elemento Finito tipo viga.....	33
Figura 2.6 – Análises gráficas 2D e 3D da representação dos valores do coeficiente MAC por cores (Adaptado: Allemang, 2003)	36
Figura 2.7 – Análise gráfica da representação dos valores do COMAC (Rodrigues, 2004).....	37
Figura 2.8 - Análise gráfica da representação dos valores da Diferença de Curvatura Modal (Wahab e De Roeck, 1999).....	39
Figura 2.9 – Análise gráfica do Índice de Dano (Stubbs, Kim e Farrar, 1995).....	40
Figura 2.10 – Viga conjugada: (a) viga fictícia, (b) carga estática P_j que provoca o deslocamento e (c) carga estática unitária no j ésimo elemento que também provoca o deslocamento (Choi, 2002).....	42
Figura 2.11 – Métodos de otimização (sequência da pesquisa)	44
Figura 2.12 – Diminuição de gradiente (verde) e gradiente conjugado (vermelho).....	45
Figura 2.13 - Esquemas de comportamentos de um algoritmo de Evolução Diferencial - ED (Price <i>et al.</i> 2005, p. 31 e 32).....	48
Figura 2.14 – Fluxograma do método de Evolução Diferencial – ED (Suveges, 2014)	54
Figura 2.15 – Superfície 3D da função.....	55
Figura 2.16 - 2ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a verificação da distribuição aleatória dos pontos pelo espaço de projeto definido e redução do espaço amostral	56
Figura 2.17 - 2ª Geração: Representação gráfica do valor mínimo da função objetivo e seu comportamento à cada geração.....	56
Figura 2.18 - 2ª Geração: Representação gráfica da distribuição da diferença vetorial entre os indivíduos no espaço de projeto à cada geração	57
Figura 2.19 - Representação gráfica da evolução das gerações onde os pontos tendem a convergir para a região em que se encontra o mínimo global da função	57
Figura 2.20 - Representação gráfica dos indivíduos quando se iniciam um processo migratório para a região que apresente o menor valor da função objetivo.....	58

Figura 2.21 - 15ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência para a região que possui um ponto de mínimo.....	59
Figura 2.22 - 25ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência final para a região que possui um ponto de mínimo	60
Figura 2.23 – Representação de funções como a “ <i>Simplex with Hills Climbing</i> ”	61
Figura 2.24 – Esquema clássico de um Algoritmo Genético (Morales, 2009).....	62
Figura 2.25 – Análise gráfica da função teste Rosenbrock	69
Figura 2.26 – Representação gráfica do comportamento do MMQ	80
Figura 2.27 – Dados e análise gráfica para aplicação do MMQ.....	82
Figura 2.28 – Representação para definição das variáveis envolvidas nas equações e a consequente obtenção da Frequência Fundamental de uma viga biapoiada (Blevins, 1979)	88
Figura 2.29 – Representação em série de Fourier dos coeficientes a_n e b_n do exemplo...	92
Figura 2.30 – Representação do caso de viga biapoiada	93
Figura 3.1 – Esquema do ensaio na viga em perfil W 250x22,30 (Pereira, 2014).....	99
Figura 3.2 - Detalhe do ensaio de tração do aço usado na modelagem no ABAQUS®	100
Figura 3.3 - Discretização do modelo da viga W 250x22,30 (Pereira, 2014)	102
Figura 3.4 - Resultado da análise com flambagem linear	102
Figura 3.5 - Modelo numérico no ABAQUS® vs. Experimento de Pereira (2014)	103
Figura 3.6 - Detalhes das condições de contorno do perfil IPN 500x104.....	104
Figura 3.7 - Resultado da análise com flambagem linear do perfil IPN 500x104	105
Figura 3.8 - Resultado da análise com o ABAQUS® de FLT	106
Figura 3.9 – Análise gráfica da carga vs. deslocamento para o perfil IPN 500x104	106
Figura 3.10 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Intacta (6 m): Caso Geral 34 (Discretização de 20,0 cm com 30 partes/elementos)	107
Figura 3.11 - Comportamentos dos modos de vibração de uma viga biapoiada.....	108
Figura 3.12 – Modelo Viga IPN 500x104 (ABAQUS®).....	109
Figura 3.13 - Detalhe da distância entre a massa móvel com a malha de elementos finitos	110
Figura 3.14 – Frequências Naturais do Modelo Viga IPN 500x104 (ABAQUS®).....	111
Figura 4.1 – Fluxograma da análise de elementos estruturais utilizando dados numéricos e experimentais.....	112

Figura 4.2 – Fluxograma da análise de elementos estruturais utilizando somente dados numéricos	113
Figura 4.3 - Fluxograma esquemático geral da pesquisa para as técnicas de otimização, localização e quantificação de dano	116
Figura 4.4 - Retorno e ensaio inicial dia 04/12/2020	119
Figura 4.5 - Exemplo da verificação da conformação da curva de frequências naturais dos resultados obtidos no dia 04/12/2021 - ARTeMIS [©]	120
Figura 4.6 - Sequência de preparação do sistema de massa móvel a ser utilizado inicialmente – Ensaio dia 08/12/2020	120
Figura 4.7 - Sistema de massa móvel com mobilidade através da implantação do carrinho - Ensaio dia 08/12/2020	121
Figura 4.8 - Andamento do ensaio do dia 11/12/2020 com a utilização do sistema de acoplagem para possibilitar os deslocamentos e as aplicações da massa móvel.....	122
Figura 4.9 - Repetição do ensaio modal da viga intacta metálica no dia 18/12/2020	122
Figura 4.10 - Ensaio com o sistema de massa móvel com carrinho em que posicionamentos dos acelerômetros foram verificados tanto na parte acima como abaixo da mesa superior da viga – Ensaio dia 18/12/2020	123
Figura 4.11 – (a) Posicionamento dos acelerômetros na própria barra roscada; (b) Excitação com o martelo nas posições anteriores e também na barra roscada com resultados; e por fim com (c) A ligação de porcas nas barras roscadas – Ensaio dia 18/12/2020	123
Figura 4.12 - Viga com nova conformação do sistema de massa móvel – Ensaio dia 22/12/2020.....	124
Figura 4.13 - Testes de conformações do sistema de massa móvel – Ensaio dia 22/12/2020	125
Figura 4.14 - Novas organizações do sistema de massa móvel e dos novos posicionamentos dos acelerômetros – Ensaio dia 29/12/2020	126
Figura 4.15 - Verificações geométricas com paquímetro da seção transversal do elemento – Dia 12/01/2021	127
Figura 4.16 - Preparações dos apoios com inserção das colunas metálicas e fixações para propiciar travamentos na região superior e inferior da viga por meio das mesas – Dia 12/01/2021	128
Figura 4.17 - Verificação do novo nível do elemento estrutural – Dia 12/01/2021	128
Figura 4.18 - Nova tentativa de organização do sistema de massa móvel e das condições de apoio – Ensaio dia 09/02/2021	129

Figura 4.19 - Testes para as definições das massas móveis que pudessem ser as mais adequadas para a técnica aplicada – Ensaio dia 09/02/2021	130
Figura 4.20 - Massa móvel menor utilizada – Peso de Cerca de 6,60 kg (Aproximadamente 0,8% do Peso Total da Viga)	132
Figura 4.21 - Massa móvel média utilizada – Peso de Cerca de 12,00 kg (Aproximadamente 1,5% do Peso Total da Viga)	133
Figura 4.22 - Massa móvel maior utilizada – Peso de Cerca de 27,70 kg (Aproximadamente 3,3% do Peso Total da Viga)	134
Figura 4.23 - Martelo excitador utilizado no ensaio com cabo de madeira e bordas plásticas	135
Figura 4.24 - Acelerômetros de referência e móvel, além do “Sistema de Aquisição de Dados – LabView”	136
Figura 4.25 - Interface gráfica – LabView	137
Figura 4.26 – Esquema dos ensaios efetivos realizados	138
Figura 4.27 – Preparações dias 12 e 13/02/2021 para inserção dos danos induzidos nas quatro pontas das mesas	140
Figura 4.28 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Danificada (6 m) – Ensaio 1 Dia 13/02/2021	141
Figura 4.29 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Danificada (6 m) – Ensaio 2 Dia 18/02/2021	142
Figura 4.30 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Danificada (6 m) – Ensaio Modal Dia 20/02/2021	143
Figura 4.31 – ARTeMIS [®] : Inteface Gráfica	143
Figura 5.1 – Análise Gráfica 1 do Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (30 posições)	146
Figura 5.2 - Análise Gráfica 2 do Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (interpolação em mais pontos)	147
Figura 5.3 – Situação 1: Evolução Diferencial – ED / Identificação de dano - Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (30 posições - caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m)	148
Figura 5.4 – Situação 2: Evolução Diferencial – ED / Identificação de dano - Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (201 posições - caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m)	148

Figura 5.5 – Análise gráfica da 1ª Frequência vs. Posição de Massa dos ensaios experimentais (M = 6,6 kg; 12,0 kg e 27,7 kg)	149
Figura 5.6 – Análise gráfica da 1ª Frequência vs. Posição de Massa dos modelos numéricos (M = 6,6 kg; 12,0 kg e 27,7 kg).....	149
Figura 5.7 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 1ª verificação dos ensaios 7 (09/02/2021) e 14 (13/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.1 (massa de 6,6 kg).....	151
Figura 5.8 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 1ª verificação dos ensaios 8 (09/02/2021) e 154 (13/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.2 (massa de 12,0 kg).....	151
Figura 5.9 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 1ª verificação dos ensaios 9 (09/02/2021) e 16 (13/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.3 (massa de 27,7 kg).....	152
Figura 5.10 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 2ª verificação (repetição) dos ensaios 10 (11/02/2021) e 17 (18/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.1 (massa de 6,6 kg).....	153
Figura 5.11 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 2ª verificação (repetição) dos ensaios 11 (11/02/2021) e 18 (18/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.2 (massa de 12,0 kg).....	153
Figura 5.12 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 2ª verificação (repetição) dos ensaios 12 (11/02/2021) e 19 (18/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.3 (massa de 27,7 kg).....	154
Figura 5.13 – Análise Experimental / Evolução Diferencial – ED (500 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.1 (M=6,6 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga).....	155
Figura 5.14 – Análise Experimental / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.2 (M=12,0 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga).....	155
Figura 5.15 – Análise Experimental / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.3 (M=27,7 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga).....	156

Figura 5.16 – Demonstração de erro na análise com o Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / 500 iterações / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.1 (M=6,6 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)	159
Figura 5.17 – Intacta e Danificada M=6,6 kg (1.1): Análise Numérica com a Técnica da Massa Móvel (ABAQUS®)	160
Figura 5.18 – Intacta e Danificada M=12,0 kg (1.2): Análise Numérica com a Técnica da Massa Móvel (ABAQUS®)	161
Figura 5.19 – Intacta e Danificada M=27,7 kg (1.3): Análise Numérica com a Técnica da Massa Móvel (ABAQUS®)	162
Figura 5.20 – Análises gráficas numéricas intactas e danificadas para a viga IPN 500x104 do caso 1.1 (massa de 6,6 kg).....	163
Figura 5.21 – Análises gráficas numéricas intactas e danificadas para a viga IPN 500x104 do caso 1.2 (massa de 12,0 kg).....	164
Figura 5.22 – Análises gráficas numéricas intactas e danificadas para a viga IPN 500x104 do caso 1.3 (massa de 27,7 kg).....	164
Figura 5.23 – Análise Numérica / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.1 (M=6,6 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga).....	165
Figura 5.24 – Análise Numérica / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.2 (M=12,0 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)...	165
Figura 5.25 – Análise Numérica / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.3 (M=27,7 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)...	166
Figura 5.26 – Demonstração de estruturas e suas caracterizações de curvas em análises de regiões danificadas (Le, 2019).....	172
Figura 5.27 - Exemplos de estruturas e suas caracterizações de curvas de deflexões em análises de regiões danificadas (Le, 2019)	173
Figura 5.28 – Análise gráfica do comportamento do método de Newton-Raphson ou método das tangentes.....	173
Figura 5.29 – Representação no eixo real de origem O um ponto A de abcissa x	174
Figura 5.30 – Análise gráfica e tabela de dados com e sem anomalia da parte danificada para ilustração do exemplo numérico na definição de função para identificação de danos.....	175

Figura 5.31 - Analogias de condições intactas e danificadas de viga biapoiada correlacionando com as aplicações das equações de deflexões	178
Figura 5.32 - Demonstração das limitantes das aplicações de homogeneizações	179
Figura 5.33 – Análise Gráfica Viga IPN 500x104 Intacta: Carga x Deslocamento	185
Figura 5.34 – Viga IPN 500x104 - Localização dos Danos: mudanças das caracterizações das curvas nas análises intactas e danificadas	186
Figura A1.1 – Panorama das vigas: (a) demonstração da viga em 16 elementos e (b) danos induzidos de 2 cm e 4 cm (Palechor, 2013).....	210
Figura A1.2 – Simulações das condições de apoio das vigas (Palechor, 2013).....	211
Figura A1.3 – Detalhe dos LVDTs (a), posicionamento dos LVDTs no lado esquerdo (b) e posicionamento dos LVDTs no lado direito (c). (Palechor, 2013).....	212
Figura A1.4 – Detalhamentos da célula de carga (Palechor, 2013)	213
Figura A1.5 – Sistemas de ensaios dinâmicos completos	215
Figura A1.6 – Elemento BEAM3 (ANSYS [®] , 2007)	216
Figura A1.7 – Análise de convergência da malha do elemento BEAM3.....	217
Figura A1.8 – Malha da viga com o elemento BEAM3 (ANSYS [®] , 2007).....	217
Figura A1.9 – Simulação do dano: elemento BEAM3 (ANSYS [®] , 2007).....	218
Figura A1.10 – Apoios viga-elemento: BEAM3 (ANSYS [®] , 2007).....	219
Figura A1.11 – Elemento SHELL63 (ANSYS [®] , 2007)	219
Figura A1.12 - Convergência da malha do elemento SHELL63.....	220
Figura A1.13 – Malha gerada no ANSYS [®] – Elemento SHELL63 (ANSYS [®] , 2007)	221
Figura A1.14 – Condições de contorno: elemento SHELL63 (ANSYS [®] , 2007).....	221
Figura A1.15 – Simulação do dano: elemento SHELL63 (ANSYS [®] , 2007)	222
Figura A1.16 - Análise nos ensaios dinâmicos com os danos simulados com a realização de entalhes simétricos.....	223
Figura A1.17 - Dados do processamento realizado no <i>software</i> ARTeMIS [®] - Silva (2015) e Palechor (2018)	224
Figura A1.18 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de danos das vigas a serem analisadas	224
Figura A1.19 – Biblioteca do ANSYS [®] : elemento PLANE42.....	225
Figura A1.20 – Análise Numérica de Deslocamento Estático (Deformada): Viga em Balanço (Silva, 2011)	225
Figura A1.21 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 2 (carga 500 kN)	227

Figura A1.22 – Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.1 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)	227
Figura A1.23 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.2 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$).....	228
Figura A1.24 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.3 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste direito – $0,125=L/4$).....	228
Figura A1.25 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.4 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$).....	229
Figura A1.26 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.1 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$).....	231
Figura A1.27 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.2 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$).....	232
Figura A1.28 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.3 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$).....	233
Figura A1.29 – Algoritmo Genético - GA (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.4 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$).....	234
Figura A1.30 - Análise Gráfica e Numérica Dinâmica do Comportamento do Primeiro Modo de Vibração da Viga em Balanço em cada situação de dano (Silva, 2011)	236
Figura A1.31 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes ao primeiro modo de vibração para a viga em balanço do caso 3 (carga 500 kN)	237
Figura A1.32 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.1 (100 iteraões): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$).....	238
Figura A1.33 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.2 (100 iteraões): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$).....	238

Figura A1.34 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.3 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)	239
Figura A1.35 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.4 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)	239
Figura A1.36 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.1 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)	241
Figura A1.37 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.2 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)	242
Figura A1.38 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.3 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)	243
Figura A1.39 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.4 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)	244
Figura A1.40 - Análise Numérica de Deslocamento Estático (Deformada): Viga Biengastada (Silva, 2011)	246
Figura A1.41 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga biengastada do caso 4 (carga 500 kN)	247
Figura A1.42 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.1 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$). 248	
Figura A1.43 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.2 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$). 248	
Figura A1.44 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.3 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$). 249	
Figura A1.45 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.4 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)	249
Figura A1.46 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.1 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)	251

Figura A1.47 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.2 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$).....	252
Figura A1.48 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.3 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste direito – $0,125=L/4$).....	253
Figura A1.49 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.4 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$).....	254
Figura A1.50 - Análise Gráfica e Numérica Dinâmica do Comportamento do Primeiro Modo de Vibração da Viga Biengastada em cada situação de dano (Silva, 2011).....	256
Figura A1.51 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes ao primeiro modo de vibração para a viga biengastada do caso 5 (carga 500 kN).....	257
Figura A1.52 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.1 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$).....	258
Figura A1.53 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.2 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$).....	258
Figura A1.54 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.3 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$).....	259
Figura A1.55 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.4 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$).....	259
Figura A1.56 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.1 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$).....	261
Figura A1.57 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.2 (100 iterações): Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$).....	262
Figura A1.58 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.3 (100 iterações): Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste direito – $0,125=L/4$).....	263

Figura A1.59 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.4 (100 iterações): Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$).....	264
Figura A1.60 – Treliça Plana (Silva, 2011).....	266
Figura A1.61 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de dano da treliça a ser analisada	266
Figura A1.62 – Deslocamentos nodais para a Treliça Plana (Silva, 2011)	267
Figura A1.63 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 6.1 (150 iterações): Treliça Plana Caso 6 cargas nodais 5 kN (caso de dano simulado através da redução de 50% no valor do módulo de elasticidade de um elemento no banzo superior: 22)	268
Figura A1.64 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 6.1 (150 iterações): Treliça Plana Caso 6 cargas nodais 5 kN (caso de dano simulado através da redução de 50% no valor do módulo de elasticidade de um elemento no banzo superior: 22).....	270
Figura A1.65 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de danos das vigas a serem analisadas	272
Figura A1.66 – Viga metálica biapoiada intacta (VR) para análise estática (Silva, 2015).....	273
Figura A1.67 - Viga metálica biapoiada danificada: VD1-2 (Silva, 2015).....	274
Figura A1.68 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 7 (carga de aproximadamente 3 kN).....	275
Figura A1.69 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VR ↔ VD1-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 7 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – $1,5m=L/4$).....	276
Figura A1.70 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VR ↔ VD1-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 7 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – $1,5m=L/4$)	277
Figura A1.71 - Viga metálica biapoiada danificada: VD1-4 (Silva, 2015).....	278
Figura A1.72 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 8 (carga de $\cong 3kN$)	279
Figura A1.73 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VR ↔ VD1-4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 8 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – $1,5m=L/4$).....	279

Figura A1.74 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VR ↔ VD1-4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 8 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m=L/4)	280
Figura A1.75 - Viga metálica biapoiada danificada: VD2-2 (Silva, 2015).....	281
Figura A1.76 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 9 (carga de $\cong 3kN$).....	282
Figura A1.77 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VR ↔ VD2-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 9 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m).....	283
Figura A1.78 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VR ↔ VD2-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 9 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m)	284
Figura A1.79 - Viga metálica biapoiada intacta para análise dinâmica (Silva, 2015)	287
Figura A1.80 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD1 (Silva, 2015)	288
Figura A1.81 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 10 (carga de $\cong 3kN$)	289
Figura A1.82 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD1 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 10 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m).....	289
Figura A1.83 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD1 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 10 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m) ...	290
Figura A1.84 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD2 (Silva, 2015)	291
Figura A1.85 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 11 (carga de $\cong 3kN$)	292
Figura A1.86 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 11 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m).....	292
Figura A1.87 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 11 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m) ...	293
Figura A1.88 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD3 (Silva, 2015)	294
Figura A1.89 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 12 (carga de $\cong 3kN$)	295

Figura A1.90 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD3 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 12 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m).....	295
Figura A1.91 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD3 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 12 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m) ...	296
Figura A1.92 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD4 (Silva, 2015)	297
Figura A1.93 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 13 (carga de $\cong 3kN$)	298
Figura A1.94 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 13 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m).....	298
Figura A1.95 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 13 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m) ...	299
Figura A1.96 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD5 (Silva, 2015)	300
Figura A1.97 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 14 (carga de $\cong 3kN$)	301
Figura A1.98 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD5 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 14 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m).....	301
Figura A1.99 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD5 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 14 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m) ...	302
Figura A1.100 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD6 (Silva, 2015).....	303
Figura A1.101 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 15 (carga de $\cong 3kN$)	304
Figura A1.102 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD6 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 15 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m).....	304
Figura A1.103 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD6 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 15 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m).....	305
Figura A1.104 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD7 (Silva, 2015).....	306
Figura A1.105 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 16 (carga de $\cong 3kN$)	307

Figura A1.106 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD7 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 16 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,875m).....	307
Figura A1.107 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD7 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 16 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,875m)	308
Figura A1.108 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD8 (Silva, 2015).....	309
Figura A1.109 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 17 (carga de $\cong 3kN$)	310
Figura A1.110 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD8 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 17 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m e 4.125m)	310
Figura A1.111 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD8 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 17 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m e 4.125m).....	311
Figura A1.112 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD9 (Silva, 2015).....	312
Figura A1.113 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 18 (carga de $\cong 3kN$)	313
Figura A1.114 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD9 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 18 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m, 3.000m e 4.125m).....	313
Figura A1.115 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD9 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 18 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m, 3.000m e 4.125m).....	314
Figura A1.116 - Viga Metálica Biapoiada Intacta: VID (Palechor, 2013)	318
Figura A1.117 - Caso Geral 19: Viga metálica biapoiada danificada.....	319
Figura A1.118 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 19 (V2D).....	320
Figura A1.119 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V2D (100 iteraões): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)	321

Figura A1.120 – Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)	321
Figura A1.121 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)	322
Figura A1.122 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)	323
Figura A1.123 - Caso Geral 20: Viga metálica biapoiada danificada	324
Figura A1.124 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 20 (V3D).....	325
Figura A1.125 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V3D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)	325
Figura A1.126 – Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)	326
Figura A1.127 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V3D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)	327
Figura A1.128 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V3D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)	328
Figura A1.129 - Caso Geral 21: Viga metálica biapoiada danificada	329
Figura A1.130 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 21 (V4D).....	330
Figura A1.131 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)	330
Figura A1.132 – Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)	331

Figura A1.133 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)	332
Figura A1.134 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)	333
Figura A1.135 - Caso Geral 22: Viga metálica biapoiada danificada	334
Figura A1.136 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 21 (V5D).....	335
Figura A1.137 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)	335
Figura A1.138 - Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)	336
Figura A1.139 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)	337
Figura A1.140 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)	338
Figura A1.141 - Viga Metálica Biapoiada Intacta (6 m): caso 4 (Palechor, 2018).....	341
Figura A1.142 - Viga Metálica Biapoiada Intacta (5 m): caso 11 (Palechor, 2018).....	342
Figura A1.143 – Panoramas da viga testada (Palechor, 2018).....	342
Figura A1.144 – Demonstração da aplicação do método de interpolação <i>Cubic-Spline</i> ..	343
Figura A1.145 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de danos das vigas da tese de Palechor (2018).....	344
Figura A1.146 – Configurações dos sistemas de ensaios experimentais dinâmicos das vigas do trabalho de Palechor (2018).....	345
Figura A1.147 - Ferramentas para instrumentação dos sistemas de ensaios experimentais dinâmicos das vigas do trabalho de Palechor (2018)	346
Figura A1.148 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe): caso 12 (Palechor, 2018).....	347

Figura A1.149 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 23.....	348
Figura A1.150 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 23 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 1: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe).....	349
Figura A1.151 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 23 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 1: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe).....	350
Figura A1.152 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes): caso 2 (Palechor, 2018).....	351
Figura A1.153 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 24.....	352
Figura A1.154 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 24 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 2: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes).....	353
Figura A1.155 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 24 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 2: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes).....	354
Figura A1.156 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes): caso 3 (Palechor, 2018).....	355
Figura A1.157 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 25.....	356
Figura A1.158 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 25 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 3: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes).....	356
Figura A1.159 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 25 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 3: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes).....	357
Figura A1.160 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes): caso 9 (Palechor, 2018).....	358
Figura A1.161 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 26.....	359

Figura A1.162 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 26 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 9: Dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	360
Figura A1.163 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 26 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 9: Dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	361
Figura A1.164 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes): caso 10 (Palechor, 2018)	362
Figura A1.165 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 27	363
Figura A1.166 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 27 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 10: Dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	364
Figura A1.167 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 27 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 10: Dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	365
Figura A1.168 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe): caso 12 (Palechor, 2018)	366
Figura A1.169 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 28.....	367
Figura A1.170 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 28 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 12: Dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe)	368
Figura A1.171 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 28 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 12: Dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe)	369
Figura A1.172 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes): caso 13 (Palechor, 2018)	370
Figura A1.173 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 29.....	371
Figura A1.174 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 29 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 13: Dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes)	372

Figura A1.175 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 29 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 13: Dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes).....	373
Figura A1.176 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes): caso 14 (Palechor, 2018)	374
Figura A1.177 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 30.....	375
Figura A1.178 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 30 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 14: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes)	376
Figura A1.179 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 30 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 14: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes).....	377
Figura A1.180 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes): caso 15 (Palechor, 2018)	378
Figura A1.181 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 31.....	379
Figura A1.182 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 31 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 15: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)	380
Figura A1.183 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 31 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 15: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)	381
Figura A1.184 - Viga Metálica Biapoiada Danificada: caso 16 (Palechor, 2018)	382
Figura A1.185 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 32.....	383
Figura A1.186 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 32 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 16: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)	384
Figura A1.187 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 32 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 16: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)	385
Figura A1.188 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano a 3,0 m com 1 entalhe): caso 17 (Palechor, 2018)	386

Figura A1.189 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 33.....	387
Figura A1.190 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 33 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 17: Dano a 3,0 m com 1 entalhe)	388
Figura A1.191 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 33 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 17: Dano a 3,0 m com 1 entalhe)	389
Figura A1.192 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano a 3,0 m com 3 entalhes): caso 18 (Palechor, 2018)	390
Figura A1.193 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 34.....	391
Figura A1.194 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 34 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 18: Dano a 3,0 m com 3 entalhes)	392
Figura A1.195 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 34 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 18: Dano a 3,0 m com 3 entalhes).....	393
Figura B2.1 - Morfologia de um filme de CdTe depositado pela técnica CSS (Cruz <i>et al.</i> , 1999).....	401
Figura B2.2 – Comportamento das Formigas: Experiência da ponte dupla de tamanhos distintos (Golliat <i>et al.</i> , 2012 – p. 89).....	403
Figura B2.3 – Exemplos de rede <i>feedforward</i> (Haykin, 1998)	405
Figura B2.4 – Um cardume de peixes evitando um predador (Dréo <i>et al.</i> , 2006 – p. 163)	406
Figura B2.5 – Exemplos para realização de uma TS (Glover e Laguna, 1995 – p. 72 e 73)	408
Figura B.1 – Comportamento esquemático de uma viga metálica com suas análises de ocorrências de flambagens e alguns outros danos característicos (Adaptado de NZTA, 2001)	414
Figura B.2 - Comportamento de vigas com seções compacta, semicompacta e esbelta (Adaptado de Pfeil, 2009).....	415
Figura B.3 - Comportamentos de ocorrências de flambagens em vigas metálicas (Autor Desconhecido)	415

Figura C.1 – Análises Numéricas - Viga Danificada IPN 500x104 (L/2, L/4 e L/8)..... 426

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

DP	Prognósticos de Danos (Damage Prognosis)
SHM	Monitoramento da Saúde Estrutural (Structural Health Monitoring)
DDND	Técnicas de Detecção de Danos Não Destrutivas (Non-Destructive Damage Detection)
MEF	Métodos de Elementos Finitos
FEM	Finite Element Method
MEC	Método de Elementos de Contorno
BEM	Boundary Element Method
MDF	Método de Diferenças Finitas
CLM	Coupled Local Minimizers
IA	Inteligência Artificial
AI	Artificial Intelligence
f	Função qualquer
$f(p)$	Função matemática
Ω	Domínio matemático
Γ	Condições de contorno
CEB	Comité Euro-International du Béton
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
IPN	European Standard I Beams
ICA	Algoritmo Competitivo Imperialista
BGA	Algoritmo Genético Binário
AFWA	Algoritmos Adaptativos de Fogos de Artifício
ABC	Colônia Artificial de Abelhas
SI	Identificação de Sistemas
FO	Objective Functions (Funções Objetivos)
FT	Funções Teste (Test Functions)
FC	Funções Calibração
EA	Erro Absoluto
ER	Erro Relativo
V_v	Valor Verdadeiro

V_A	Valor Aproximado
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
OLS	Ordinary Least Squares
LVDT	Transdutores de Variação de Deslocamento Linear
FLA	Flambagem Lateral da Alma
FLM	Flambagem Lateral da Mesa
FLT	Flambagem Lateral à Torção
CEPE	Conselho de Ensino, Pesquisa e Extensão
B	Base da Viga
H	Altura da Viga
A	Área
L	Comprimento da Viga
ρ	Massa Específica
ν	Coefficiente de Poisson
K	Matriz de rigidez
K^{-1}	Inversa da matriz de rigidez
M	Matriz de massa
I	Momento de inércia longitudinal
P	Carga
T	Espessura
q_i	i-ésimo autovetor
$[x]$	Vetor que representa os deslocamentos estáticos
L	Comprimento
E	Módulo de elasticidade longitudinal
G	Módulo de elasticidade transversal
J	Momento de inércia transversal
Y_m^{ij}	Deslocamentos estáticos medidos (estrutura intacta)
Y_a^{ij}	Deslocamentos estáticos obtidos analiticamente (estrutura danificada)
I	Grau de liberdade
J	Condição de carregamento estático em particular
$[D_i]$	Vetor variável de projeto
J	Índice do elemento finito

x	Deslocamentos
K^{-1}	Inversa da matriz de rigidez
Δx	Alteração dos deslocamentos causados pelo dano
N_d	Número de elementos danificados
NP	Classes de problemas na ciência da computação
B_i	Matriz Booleana correspondente ao i - ésimo elemento
Δk_i	Matriz que envolve apenas propriedades geométricas ou termos que contém a relação de gravidade
Δk_i^*	Variação da rigidez no i - ésimo elemento
α_i	Escalar que denota a fração do dano ($-1 \leq \alpha_i \leq 0$)
E_i	Parâmetro que representa a propriedade de rigidez no i - ésimo elemento danificado
β	Razão entre a rigidez efetiva do i - ésimo elemento
D_i^M	Deslocamento medido no i - ésimo nó
D_i^C	Deslocamento calculado no i - ésimo nó
nn	Número de nós do sistema
P_j	Carga estática do j - ésimo elemento
M_j	Momento correspondente a viga conjugada
δ_{ij}	Deslocamento no nó i - ésimo devido à carga unitária
y_{ij}	Deslocamento no nó i - ésimo devido à força P_j
nl	Número de elementos
y_i	Deslocamento da viga real no i - ésimo nó
β_j	Relação entre momento de inércia da viga intacta e a viga danificada no i - ésimo elemento
E_{j0}	Módulo de elasticidade do estado danificado
I_{j0}	Momento de inércia do estado danificado
γ_i	Relação entre o deslocamento e a rigidez à flexão
ns	Número de elemento a ser identificado
Y	Deslocamento
α	Índice de dano do elemento
∇	Gradiente
p	Redução de direção
α	Tamanho do passo

p_{k+1}	Direção mais próxima ao gradiente g_k
MAC	Modal Assurance Criterion
COMAC	Coordinate Modal Assurance Criterion
DCM	Diferença de Curvatura Modal
ID	Índice de Dano
$\{\Phi_i^\alpha\}$	Vetor Modal da Estrutura Intacta Referente ao Modo i
$\{\Phi_j^e\}$	Vetor Modal da Estrutura Danificada Referente ao Modo j
n	Número de Modos de Vibração
i	Ponto de Medição
Φ	Modo de Vibração
h	Distância Entre os Pontos de Medição $i + 1$ e $i - 1$
Φ_{di}''	Curvatura da Estrutura Danificada no Ponto i
Φ_i''	Curvatura da Estrutura Intacta no Ponto i
FDC	Fator de Dano da Curvatura
$\Phi_j''(x)$	Segunda Derivada do Modo de Vibração j da Estrutura Intacta
$\Phi_j^{d''}(x)$	Segunda Derivada do Modo de Vibração j da Estrutura Danificada
$g(x)$	Função de restrição g
z	Função pico de duas variáveis
x	Variável do eixo das abcissas para definição do ponto de mínimo da função pico
y	Variável do eixo das ordenadas para definição do ponto de mínimo da função pico
x'_{off}	Exemplo de equação da primeira variação de ED
x_r	Variável do indivíduo de referência r
x_s	Variável do indivíduo secundário s
x_t	Variável do indivíduo terciário t
p_r	Variável da população de referência r
p_s	Variável da população secundária s
p_t	Variável da população terciária t
L_{NP}	Tamanho da i população, e o número de soluções da concorrência em uma determinada geração G
G	Geração
$L_{itermax}$	Número máximo de iterações ou gerações

I_D	Número de parâmetros da função objetivo, ou mesmo de variáveis envolvidas ou até mesmo de dimensionalidade do problema
F	Constante de fator de escala ou de ponderação
F_CR	Taxa de cruzamento (<i>crossover</i>), especificado no intervalo entre 0 e 1 (ou também denominado de constante de probabilidade de cruzamento)
$h(x)$	Função de restrição h
$U_{[a,b]}$	Amostragem com distribuição uniforme entre a e b
$N_{[\mu,\sigma]}$	Amostragem com distribuição normal com média μ e desvio padrão σ
X_t	População de soluções candidatas
M_NP	Matriz com o número de populações ou tamanho da i população
I	Número de indivíduos da população
J	Número de variáveis de projeto
$v_{i,G+1}$	Vetor de mutação ou vetor mutante
$x_{i,G}$	Vetor alvo ou vetor população escolhido aleatoriamente
$x_{r1,G}$	Vetor 1 aleatoriamente selecionado da população (vetor base)
$x_{r2,G}$	Vetor 2 aleatoriamente selecionado da população
$x_{r3,G}$	Vetor 3 aleatoriamente selecionado da população
F	Fator de mutação
$u_{ji,G+1}$	Vetor candidato, julgamento ou tentativa
$v_{i,G+1}$	Vetor de mutação ou vetor mutante
$x_{i,G}$	Vetor alvo ou vetor escolhido aleatoriamente
$rand_{ji}$	Número aleatório gerado no intervalo $[0,1]$
J	Dimensão do problema ($j = (1, 2, \dots, I_D)$)
F_CR	Taxa de cruzamento (<i>crossover</i>) ou constante de probabilidade de cruzamento
$f(u_{i,G})$	Função vetor candidato
$f(x_{i,G})$	Função vetor alvo
Y_m^{ij}	Deslocamentos estáticos medidos nas estruturas danificadas
Y_a^{ij}	Deslocamentos estáticos obtidos numericamente nas estruturas intactas
w	Frequência
ΔK	Alteração na matriz de rigidez
ED	Evolução Diferencial
GA	Algoritmo Genético

DE	Diferential Evolution
GA	Genetic Algorithm
GEO	Generalized Extremal Optimization (Método de Otimização Extrema Generalizada)
EO	Extrema Optimization (Otimização Extrema)
SOC	Self-Organized Criticality (Criticalidade Auto-Organizada)
ACO	Ant Colony Optimization
RNA	Redes Neurais Artificiais
ANN	Artificial Neural Network
PSO	Particle Swarm Optimization (Enxame de Partículas)
SA	Simulated Annealing (Recozimento Simulado)
ACO	Ant Colony Optimization (Método de Colônia de Formigas)
TS	Tabu Search (Método de Busca Tabu)
GRASP	Greedy Randomized Adaptative Search Procedures
RCL	Recent Candidact List (Lista de Candidatos Restrita)
CG	Gradiente Conjugado
TRI	Tensão Residual Inicial
EUA	Estados Unidos da América
NASA	National Aeronautics and Space Administration
TRL	Technology Readiness Level (Níveis de Preparação da Tecnologia)
ND	Número de elementos danificados
MPa	Mega Pascal
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
W	Wide Flange
EI	Rigidez à flexão
$y(x, t)$	Função de posição
\bar{m}	Massa por unidade de comprimento
λ_i	Parâmetro adimensional que depende do modo que deseja ser calculado e da condição de apoio
M	Massa concentrada adicional
x_0	Posição da massa no domínio da solução $[0, L]$
L_n	Variável da amplitude de diferença dos dados intactos e danificados

$ d_{2;n} $	Variáveis de dados em módulo dos maiores valores recorrentes dos resultados de análises estáticas (deslocamentos) ou dinâmicas (modos de vibração ou frequências naturais) em determinado ponto (posição n)
$ d_{1;n} $	Variáveis de dados em módulo dos menores valores recorrentes dos resultados de análises estáticas (deslocamentos) ou dinâmicas (modos de vibração ou frequências naturais) em determinado ponto (posição n)
n	Posição da variável dos maiores e menores valores
C	Constante
$D_{\% \text{ dan/int}}$	Relaciona a rigidez da estrutura danificada com a rigidez da estrutura intacta em termos percentuais
EI_{intacta}	Rigidez da Estrutura Intacta
$EI_{\text{danificada}}$	Rigidez da Estrutura Danificada
q	Carga distribuída
LABEST	Laboratório de Estruturas da UnB
PECC	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
UnB	Universidade de Brasília
ENC	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB

1. INTRODUÇÃO

Os processos de otimização podem ter dentro do seu escopo por exemplo o intuito de aproximar o comportamento do modelo numérico aos dados experimentais, de modo a torná-lo mais preciso, como é o caso dessa pesquisa. Já os modelos de danos podem indicar variações em parâmetros de rigidez e de massa de uma estrutura. Os métodos de ensaios destrutivos e os não destrutivos são utilizados para identificação/deteção que auxiliam na deteção de falhas ou ainda de mudanças nas propriedades dos materiais que compõe determinadas estruturas. Utilizam-se também métodos numéricos, via Método de Elementos Finitos (MEF) por meio de cálculos de variações de frequências naturais e dos modos de vibração, antes e após o surgimento do dano. Os métodos modais, oriundos de análises dinâmicas, requerem um estudo mais refinado.

A resolução dos problemas de otimização para identificação de danos, após a definição de suas formulações, principalmente pela análise de uma Função Objetivo, que é uma função que associa cada ponto representado pelos indivíduos no espaço de soluções a um número real. Sendo que quanto menor o valor, melhor a resposta, quando tiver retratando, por exemplo, um problema de minimização. O inverso ocorre num problema de maximização. O tratamento matemático de problemas de maximização e minimização é análogo, já que há várias maneiras de converter um problema no outro.

Diz-se que um método de otimização é Determinístico, caso seja possível prever todos os seus passos conhecendo seu ponto de partida, levando sempre à mesma resposta se partir do mesmo ponto inicial. Em oposição a estes métodos, há os métodos Estocásticos ou Aleatórios, onde o caráter aleatório de vários processos é simulado. Nestes métodos, várias escolhas são feitas com base em números aleatórios, sorteados no momento de execução do algoritmo. Como a cada execução do algoritmo, os números sorteados poderão ser diferentes, depreendendo-se disso, que um método aleatório não poderia executar a mesma sequência de operações em duas execuções sucessivas. Partindo de um mesmo ponto inicial, em termos de parâmetros adotados, cada execução do código seguirá o seu próprio caminho, e possivelmente levará a uma resposta final diferente.

Encontra-se uma dificuldade atualmente em se detectar danos em estruturas. Muitas vezes, para se encontrar essas singularidades são necessárias aplicações de métodos, como por exemplo, a utilização do Método de Evolução Diferencial.

Um processo muito utilizado para deteção de danos é a inspeção visual, que ainda é de grande valia, podendo ser um recurso inicial necessário para verificação de indícios de

pontos e de áreas danificadas de determinado elemento, mas que pode perder a sua eficiência em função da complexidade do conjunto de estruturas que vem surgindo.

Essa pesquisa propõe no contexto das áreas de Prognósticos de Danos – PD (*Damage Prognosis* – DP) e do Monitoramento da Saúde Estrutural – MSE (*Structural Health Monitoring* – SHM), aliado por exemplo, com Técnicas de Detecção de Danos Não Destrutivas – TDDND (*Non-Destructive Damage Detection* - DDND) e o uso de métodos de otimização e de inteligência artificial na área da engenharia para identificação de danos com base em análises numéricas e experimentais.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Com o efervescente crescimento do setor da construção civil e do rápido surgimento da necessidade de investimento no Brasil em infraestrutura pelo fato deste país almejar sua inserção no grupo das grandes potências do mundo, faz com que cada vez mais se invista em melhorias nas estruturas existentes e nas que estão sendo construídas, bem como no aprimoramento das tecnologias utilizadas, além do olhar mais atento aos métodos utilizados para os projetos das estruturas a serem utilizadas, de acordo com a sua finalidade específica e em conjunto com o uso de elementos estruturais distintos, podendo citar também a identificação de danos, que são de grande importância para a prevenção de diversos problemas e catástrofes presentes em diversas obras da atualidade (Rus e Gallego,2002).

O interesse em utilizar a otimização como busca de respostas para a pergunta “o que é melhor?”, em termos de problemas em que a qualidade de uma resposta pode ser medida através de um número, motivou de maneira substancial a abordagem dessa pesquisa, bem como a busca no aprofundamento da mesma. Outro ponto é que problemas dessa natureza fazem parte de praticamente todas as áreas do conhecimento, dentre elas: negócios, ciências físicas, químicas e biológicas, arquitetura, economia, administração, computação e por fim da engenharia.

A análise de danos em vigas metálicas se justifica pois são elementos estruturais que têm sua performance estrutural diminuída ao longo de sua vida útil devido a muitos processos de deterioração, tais como: fadiga, corrosão, problemas com emendas e conectores, soldas mal executadas, dentre outros.

Existem diversos métodos de detecção de danos, podendo serem citados: os ensaios destrutivos e os não destrutivos. Tais ensaios permitem determinar danos causados às propriedades dos materiais constituintes de uma estrutura. Existem ainda os métodos numéricos, como o Método de Elementos Finitos (MEF) por exemplo, para auxiliar na

determinação de danos (via cálculo das frequências naturais, modos de vibração e razões de amortecimento). De posse desses parâmetros pode-se detectar um dano em uma estrutura, já que os mesmos indicam alterações nas propriedades de rigidez e de massa da estrutura fazendo com que os parâmetros de vibração também sejam alterados (Silva, 2011).

Métodos que podem detectar dano somente com informações obtidas da condição danificada de uma ponte, por exemplo, seriam os mais apropriados, já que a condição antes do dano é raramente conhecida ou conservada como um dado estrutural.

Portanto, este trabalho tem como justificativa o aprofundamento do conhecimento do comportamento estrutural das vigas sob as condições de mecanismos de deterioração e desta forma possibilitando uma melhor solução para recuperação estrutural. Além disso, enfatiza-se que o uso de programas de otimização para detecção de danos é uma ferramenta alternativa aos métodos modais tradicionais e que já foram usados por vários pesquisadores inclusive no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília/UnB (Honório - 1997, Brito - 2008, Caldeira - 2009, Brasiliano – 2001, além dos utilizados nessa pesquisa, Silva – 2011 / 2015 além de Palechor – 2013 / 2018).

Dando continuidade também à aplicação do método de identificação de danos baseados na análise das propriedades dinâmicas de vigas metálicas em escalas reais, sendo realizado na parte experimental dessa pesquisa, aplicações da técnica da massa móvel adicional em que por meio de uma mudança progressiva das frequências naturais devido a sua mudança de posição ao longo do elemento estudado, verificando-se que a presença de pequenos danos podem não ser tão evidentes além das dificuldades verificadas nas corretas aplicações das condições de apoio adequadas.

Neste intuito, essa pesquisa busca ajustar os modelos numéricos de estruturas de vigas metálicas modeladas pelo Método de Elementos Finitos através de dados experimentais estáticos e dinâmicos, utilizando métodos de otimização, simulando danos nas estruturas e aplicando técnicas de identificação de danos.

Como acontece com qualquer método existente com expansões de aplicabilidade, deve-se efetuar uma quantidade significativa de estudos, de modo a desenvolver o potencial presente no método original.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é enriquecer ainda mais a abordagem teórica existente no âmbito da otimização e da identificação de danos, analisando modelos

numéricos e experimentais em termos de comportamentos de elementos estruturais intactos e danificados, usando problemas inversos e viabilizando a localização e quantificação de danos com o Método de Evolução Diferencial tanto com a utilização de dados estáticos com as análises de deslocamentos e de dados modais de frequências naturais e de modos de vibração, por meio das análises da função objetivo de mínimos quadrados, além de ao final propor uma equação de danos simplificada que melhor desempenhe essas verificações.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentro desses objetivos gerais tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Explorar as potencialidades dos Métodos de Otimização, principalmente o método de Evolução Diferencial (ED), com analogia com o método de Algoritmos Genéticos (AG), aprofundando os estudos nos mesmos e visando obter aplicações no âmbito da identificação de danos mais eficientes e, ao mesmo tempo, preocupando-se em expandir suas aplicabilidades nos avanços nas áreas de Prognósticos de Danos – PD (*Damage Prognosis* – DP) e Monitoramento da Saúde Estrutural – MSE (*Structural Health Monitoring* – SHM);
- Ajustar elementos estruturais modelados pelo Método de Elementos Finitos (MEF) baseado em dados experimentais estáticos (deslocamentos) e dinâmicos (frequências naturais e modos de vibração), por meio de problemas inversos e métodos de otimização;
- A partir dos modelos ajustados serão simulados danos nas estruturas, e em seguida serão aplicadas técnicas de otimização e identificação de danos, por meio de métodos de otimização estocásticos e principalmente do Método de Evolução Diferencial comparando com avaliações com o Método de Algoritmos Genéticos, testando a eficiência dos mesmos para tal finalidade, criando analogias diversas;
- Serão implementadas todas as rotinas de otimização em MATLAB[®] por meio de ferramentas de otimização existentes e as desenvolvidas por Price e Storn (2009) para o Método Evolução Diferencial e por Hashem (2020) para o Método de Algoritmos Genéticos;
- Por meio das melhores características encontradas nas análises desses elementos estruturais realizadas, buscar a implementação ideal para Identificação de Danos Estruturais a partir da Correlação Numérica do MEF e Experimental, de dados estáticos de deslocamentos e dinâmicos por meio de dados modais de frequências naturais e de modos de vibração, principalmente por meio das análises da função objetivo de mínimos

quadrados utilizadas, além também da utilização da técnica da massa móvel adicional e com os métodos de otimização, mas principalmente demonstrando as potencialidades com o uso da Evolução Diferencial;

- Propor também ao final uma Equação de Danos simplificada que melhor se adeque a uma análise de identificação de danos.

1.2 CONTRIBUIÇÕES PRELIMINARES DA PESQUISA

A contribuição principal da pesquisa é seguir produzindo grandes avanços nas áreas de Integridade Estrutural no âmbito dos Prognósticos de Danos – PD (*Damage Prognosis – DP*) e Monitoramento da Saúde Estrutural – MSE (*Structural Health Monitoring – SHM*) na área da engenharia, com processos ótimos visando soluções cada vez melhores para os problemas que se apresentam.

Pode se verificar ao longo de toda a revisão bibliográfica apresentada que apesar de algumas pesquisas ao longo dos últimos 25 anos nessa área de otimização voltada à identificação de danos, não há ainda uma clareza quanto ao modo que um *software* de otimização atua, em termos de aplicação a casos voltados para diferentes elementos estruturais, de parâmetros ideais e da crescente exigência de precisão nos resultados numéricos obtidos pelo Método de Elementos Finitos, que deve ser realizada confrontando resultados analíticos, numéricos e experimentais, levando à diferença mínima entre eles, sendo que essa alta precisão de resultados só pode ser obtida com parâmetros de análise confiáveis e técnicas numéricas robustas. Ou seja, a busca por parâmetros de otimização ideais visando sanar tais necessidades.

Outro ponto determinante nessa área de otimização, depende das especificações das funções custos / objetivos, definida como a relação entre os resultados experimentais e numéricos, geralmente elas devem conduzir eficientemente o processo de otimização, tendo como propriedades principais, por exemplo, os pontos de dados experimentais na curva e todas as curvas experimentais devem ter oportunidades iguais para serem otimizadas e unidades diferentes e/ou o número de curvas em cada sub-objetivo não deve afetar o desempenho geral do acessório. Esses critérios devem ser alcançados sem a escolha manual dos fatores de ponderação. No entanto, para alguns problemas específicos não analíticos, isso é muito difícil na prática. Valores nulos de modelos experimentais ou numéricos também tornam a tarefa difícil.

Essa pesquisa propõe também o uso de dados de pesquisas experimentais dentro do próprio Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) que muitas

vezes acabam sendo aproveitados uma única vez, mas que constituem linhas de pesquisa que podem avançar para diversos ramos e técnicas distintas para se resolver uma infinidade de problemas que a engenharia estrutural apresenta ainda.

Como tratam-se de pesquisas que foram evoluindo ao longo de seus desenvolvimentos, no caso, da dissertação de mestrado de Silva (2011) e da evolução com sua tese em 2015, e da dissertação de mestrado de Palechor (2013) e sua tese em 2018, muitas análises foram aproveitadas e utilizadas para uso de métodos de otimização, e possibilitar a concepção de análises que melhor desempenhem essas verificações de identificação de danos para diferentes situações de elementos estruturais. Para isto, apresenta-se a revisão bibliográfica e uma quantidade considerável de análises para validação de diferentes casos, além das dificuldades na obtenção de resultados adequados para a continuidade dos estudos.

Nesse contexto, a partir das estruturas modeladas pelo Método de Elementos Finitos (MEF) baseado em dados experimentais estáticos (deslocamentos) e dinâmicos (frequências naturais e modos de vibração), por meio de problemas inversos e métodos de otimização os modelos ajustados serão simulados danos nas estruturas, testando a eficiência dos mesmos para tal finalidade e buscando localizar e quantificar os danos por meio do Método de Evolução Diferencial e analogias com o Método de Algoritmos Genéticos.

E como contribuição final tentar encontrar uma equação de danos simplificada envolvendo parâmetros práticos com todas as análises previamente realizadas.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho é constituído de cinco capítulos. O primeiro capítulo é dedicado à introdução do tema proposto, bem como a motivação e os objetivos da pesquisa. No segundo capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica, com dados da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e a formulação de danos estruturais, com o estado da arte sobre o assunto. Inicialmente mostram-se os conceitos e generalidades que envolvem a identificação de danos nas estruturas e, em seguida, são mostrados os diferentes métodos estáticos e dinâmicos utilizados para identificar os danos em uma estrutura. Além disso, são apresentados outras abordagens com alguns trabalhos já desenvolvidos na área de detecção de danos, otimização, problemas inversos e elementos finitos. Contemplando também os conceitos fundamentais relacionados à área da pesquisa e uma descrição geral da história da otimização.

No capítulo três apresenta-se a modelagem computacional com a análise numérica desenvolvida no programa ABAQUS[®] em conjunto das considerações necessárias para as questões de otimização.

O quarto capítulo, por sua vez, apresenta a metodologia utilizada, mostrando a descrição da análise numérica e experimental, as diferentes condições nas quais a viga foi ensaiada, além de apresentar os resultados obtidos com a identificação de danos, bem como as dificuldades e a sequência de passos e ensaios necessários, e também seguindo as análises com a metodologia proposta através do Método de Evolução Diferencial, tanto no âmbito experimental como também numérico, em conjunto com as considerações geradas para o modelo analisado.

Já no quinto capítulo, apresenta-se também a aplicação e os resultados finais obtidos utilizando as análises experimentais realizadas pelo autor com a viga metálica perfil europeu IPN 500x104 e finalizando com a proposição de considerações para localização de danos e com uma Equação de Danos simplificada.

Finalmente, o sexto capítulo reporta as conclusões obtidas nesta pesquisa e as propostas para trabalhos futuros.

Por fim, há ainda as referências bibliográficas, anexos e os apêndices gerados, contendo alguns dados necessários para um melhor entendimento da pesquisa desenvolvida. Nos anexos apresenta-se a aplicação e os resultados prévios obtidos utilizando dados de Silva (2011) em sua dissertação de mestrado, Silva (2015), já em sua tese de doutorado, o trabalho da dissertação de Palechor (2013) e da tese de Palechor (2018), todas com a metodologia proposta através do Método de Evolução Diferencial e demais métodos de otimização, mais especificamente o Método de Algoritmos Genéticos, em conjunto com as considerações geradas para cada modelo analisado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A afirmação de Oliveira Filho *et. al* (2018) sobre a existência de um maior compromisso de pesquisadores em todo o mundo em contribuir significativamente para produzir grandes avanços nas áreas de Prognósticos de Danos – PD (*Damage Prognosis – DP*) e Monitoramento da Saúde Estrutural – MSE (*Structural Health Monitoring – SHM*) nos últimos anos contemplam a infinidade de justificativas para a realização dessa pesquisa. Nesse sentido, será apresentado a seguir algumas abordagens quanto à revisão bibliográfica dessa pesquisa.

2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA (RSL)

2.1.1 Conceitos de RSL

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) consiste num processo que identifica, localiza, seleciona, analisa e interpreta os resultados obtidos de fontes diversas de informação disponíveis, o que segundo Soni e Kodali (2011) propõem-se que esta metodologia possa ser aplicada através da sequência de seis passos:

- **Passo 1:** definição do problema de pesquisa claro, objetivo e conciso;
- **Passo 2:** definição da estratégia de pesquisa, mediante a escolha das bases de dados do período de pesquisa e dos termos de busca;
- **Passo 3:** definição de critérios para inclusão ou exclusão de trabalhos;
- **Passo 4:** seleção dos artigos, conforme a estratégia de pesquisa (Passo 2) e critérios de inclusão e exclusão (Passo 3);
- **Passo 5:** análise dos artigos selecionados, mediante a revisão profunda dos trabalhos selecionados, considerando apenas as obras relacionados ao problema de pesquisa (Passo 1);
- **Passo 6:** apresentação dos resultados - com destaque para as revistas e para os autores que mais contribuem com o tema de pesquisa, apresentando lacunas e pesquisas em futuras oportunidades.

2.1.2 Aplicação da Metodologia de RSL

A metodologia de RSL foi aplicada conforme os seis passos apresentados anteriormente. A Tabela 2.1 apresenta o detalhamento dessa aplicação.

Tabela 2.1 - Metodologia RSL e sua aplicação na pesquisa

PASSO	DESCRIÇÃO
1. Definição do problema de pesquisa	<ul style="list-style-type: none"> Problema de pesquisa <i>Como viabilizar a concepção de um otimizador que melhor desempenhe essas verificações do comportamento de elementos estruturais danificados numa abordagem teórica, numérica e experimental?</i>
2. Definição da estratégia de pesquisa	Horizonte do tempo - De 1943 - 2021
	Bases de Pesquisa - SCI HUB, Ebsco, Google Acadêmico, Science Direct e Scopus
	<ul style="list-style-type: none"> Identificação de estudos Busca de trabalhos publicados com termos clássicos sobre o tema (no título, palavras chave e resumo), por meio de 3 grupos e 12 combinações de termos de busca:
	Grupo a: publicações relacionadas à identificação de danos [termos de busca 1. (" <i>damage identification</i> "); e, 2. (" <i>Structural Health Monitoring</i> ")]
	Grupo b: publicações relacionadas à identificação de danos, voltadas para otimização, problemas inversos, estruturas, elementos finitos, meta-heurísticas [termos de busca 3. (" <i>damage identification</i> " and " <i>optimization</i> "), 4. (" <i>damage identification</i> " and " <i>inverse problem</i> "), 5. (" <i>optimization</i> " and " <i>inverse problems</i> "), 6. (" <i>damage identification</i> " and " <i>structures</i> "), 7. (" <i>optimization</i> " and " <i>Finite Element Method</i> ") e, 8. (" <i>damage identification</i> " and " <i>heuristics</i> ")]
	Grupo c: publicações relacionadas à identificação de danos, otimização e modelos numéricos e experimentais, análise estática, análise dinâmica [termos de busca 9. (" <i>damage identification</i> " and " <i>numerical models</i> "), 10. (" <i>damage identification</i> " and " <i>experimental models</i> "), 11. (" <i>optimization</i> " and " <i>statical analysis</i> ") e, 12. (" <i>optimization</i> " and " <i>dynamical analysis</i> ")]
3. Definição de critérios para inclusão ou exclusão de trabalhos	<ul style="list-style-type: none"> Critérios de exclusão - Trabalhos que não sejam artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado, livros, normas. - Todos os resultados repetidos. - Trabalhos com acesso restrito.
	<ul style="list-style-type: none"> Critérios de inclusão - Todos os artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado, livros, normas e revisões que atendem aos grupos b e c.
4. Seleção dos artigos	<ul style="list-style-type: none"> Critérios de seleção - Trabalhos e pesquisas relacionados com identificação de danos e otimização.
5. Análise dos artigos selecionados	<ul style="list-style-type: none"> Elementos para análise - Relação da literatura publicada; evolução das publicações por ano e fonte; evolução das publicações por país, análise de estudos que tratem de modelos, modelagens, estudos e identificação de danos e otimização.
6. Apresentação dos resultados	<ul style="list-style-type: none"> Resultado Elaboração da RSL da pesquisa

2.1.3 Resultados de RSL

A seguir, são apresentados os resultados concernentes à aplicação de RSL, para tanto, foram realizadas buscas entre 01 de janeiro de 2018 a 30 de abril de 2021.

2.1.4 Estudos Seleccionados de RSL

A relação temporal das publicações seleccionadas podem ser observadas na Figura 2.1 a seguir.

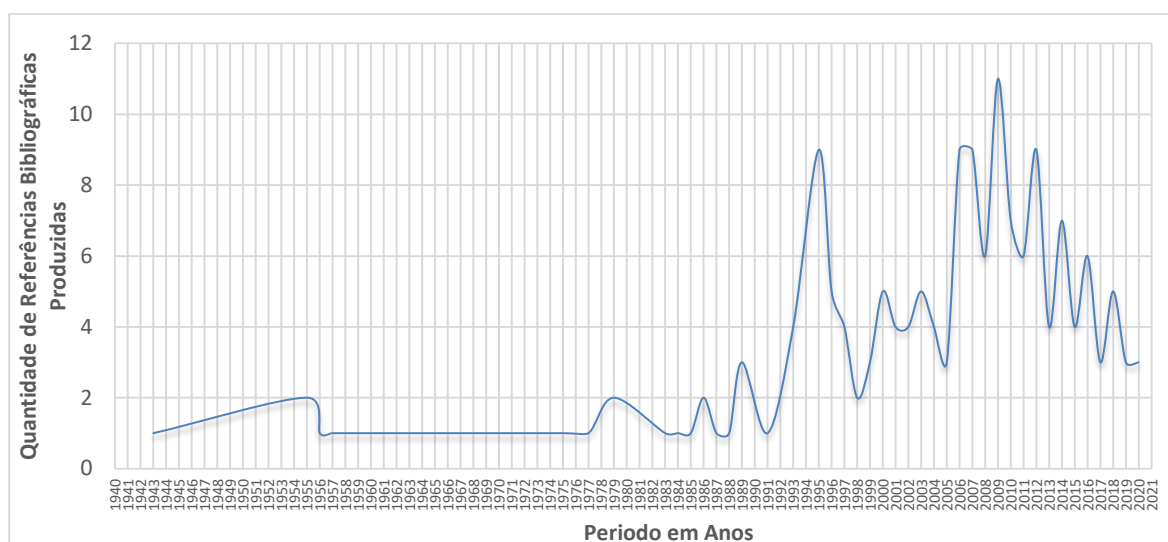


Figura 2.1 - Relação temporal das publicações seleccionadas

A relação da quantidade de referências bibliográficas produzidas por tipo de publicação podem ser verificadas na Figura 2.2 a seguir.

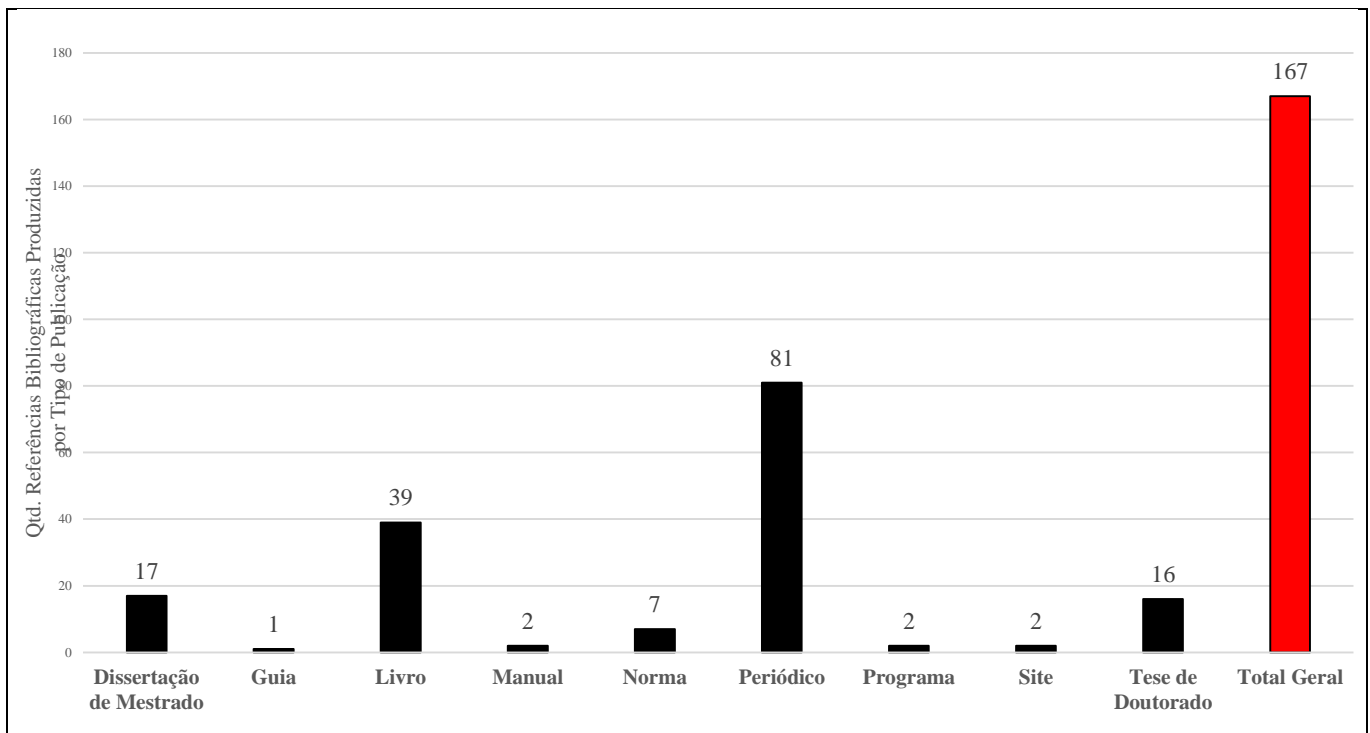


Figura 2.2 - Relação da quantidade de referências bibliográficas produzidas por tipo de publicação

Já a relação geográfica das publicações selecionadas podem ser observadas na Figura 2.3 seguinte.

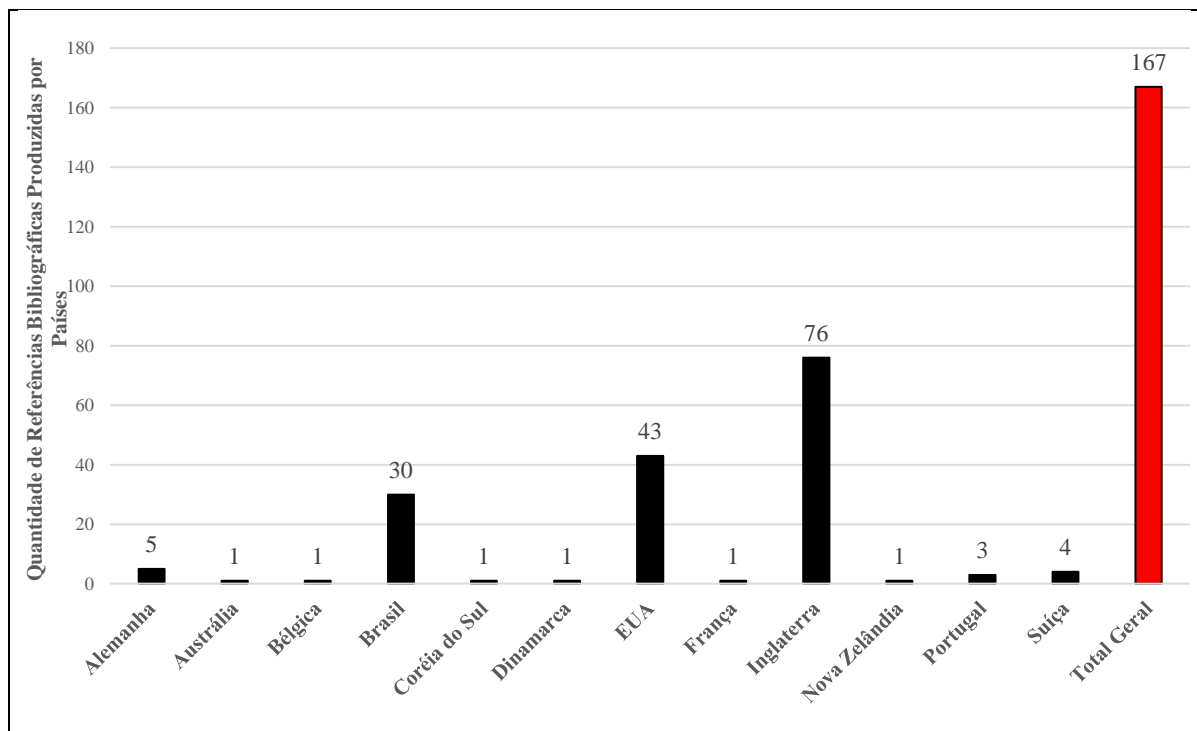


Figura 2.3 - Relação geográfica dos países com mais publicações selecionadas

Os resultados obtidos fazem parte dos insumos básicos para o desenvolvimento da pesquisa.

2.2 OUTRAS ABORDAGENS DA PESQUISA

Em Humar *et. al* (2006) são citadas algumas das principais vantagens da utilização de Técnicas de Detecção de Danos Não Destrutivas – TDDND (*Non-Destructive Damage Detection* - DDND), a saber: não se precisa conhecer *a priori* os locais danificados, possibilidade de determinar o comportamento global da estrutura, obtenção de informações suficientes para a localização e quantificação do dano por meio de um número limitado de sensores e por fim na maioria dos casos de um número não excessivo de equipamentos.

No trabalho de Liu (1995), inicialmente, foi estudada uma treliça em que o problema de identificação de danos foi formulado como um programa de otimização, utilizando as frequências naturais e modos de vibração, sendo que o problema inverso é estudado em profundidade com uma solução única e global mínima. Foi adotado um método de perturbação para investigar a influência dos erros de medição nos resultados da identificação de danos demonstrando eficácia do método proposto.

Ainda em outras pesquisas subsequentes de Liu, com estudos de elementos estruturais distintos, sendo eles: pórticos planos (Liu, 1996), vigas (Liu, 1996), e por último envolvendo treliças (Liu, 1997), com casos de análises estáticas, envolvendo identificação de danos por meio de problemas inversos e formulados como programas de otimização.

Em Ruotolo e Surace (1997) foram trabalhadas avaliações de danos em vigas metálicas com múltiplas trincas utilizando resultados numéricos e validações experimentais, usando parâmetros dinâmicos e empregando o método de Algoritmos Genéticos (AG). Tais análises se aproximam das buscas realizadas nessa pesquisa somente envolvendo verificações com o método de otimização dos AG.

Mahnken (2000) utilizou o problema inverso através de um algoritmo de elementos finitos para identificação de parâmetros de danos termoelásticos. Foi levado em consideração distribuições não uniformes do estado das variáveis, tais como, tensões, deformações, variáveis de dano e temperatura. Para tanto, foi minimizado uma função de mínimos quadrados utilizando dados experimentais e dados simulados numericamente, buscando a eficiência dessa minimização por meio da utilização de um algoritmo de otimização baseado em gradiente. O desempenho do algoritmo foi demonstrado para um problema de cisalhamento não homogêneo com carga térmica.

Springmann e Kuna (2003), desenvolveram uma pesquisa relacionada com a identificação de parâmetros dos materiais para leis de deformações não-elásticas utilizando o modelo de dano dúctil de Rousselier para otimização não-linear com um sistema de

equações diferenciais e algébricas. Por meio de um funcional de mínimos quadrados a solução do problema direto é incorporada a um método baseado em gradiente usando procedimentos de otimização determinística. Na análise experimental com campos de deslocamentos gerados sinteticamente obtendo sucesso quando há a variação de parâmetro de um material mas não tão bem sucedidos em experimentos com dois ou mais parâmetros desconhecidos pois em alguns casos apenas um mínimo local foi encontrado.

Em Kim *et. al* (2004), foi realizada uma abordagem direta e eficaz para o problema inverso de sistemas estruturais dinâmicos danificados, onde o método modal é baseado nas equações de perturbação de um conjunto de graus de liberdade selecionados e na equação de energia associada à variação da frequência. A mudança de forma modal é expressa como a soma da forma modal da linha de base e do vetor complementar, que desempenha um papel muito importante na busca pela solução do problema inverso. A equação de perturbação linear é empregada para obter uma aproximação inicial, que pode ser melhorada através de iterações com a equação de perturbação não-linear, alcançando boas análises em relação aos métodos convencionais que sofrem com o erro residual.

Já na publicação de Lin *et. al* (2004), foram analisados materiais compósitos com matriz metálica. Seu comportamento mecânico das interfaces tem forte influência em suas propriedades mecânicas, como a resistência e a tenacidade desses materiais. Para essa verificação, foi proposto um novo método baseado numa combinação de análise híbrida / inversa de um conjunto de medidas experimentais de microestrutura real, Método de Elementos Finitos (MEF) e um Algoritmo Genético Melhorado (AGM).

Em Gao e He (2005), foi realizada uma abordagem de problema inverso para identificação de propriedades de materiais e geometrias desconhecidas para problemas multirregionalizados usando o Método de Elementos de Contorno (MEC / *Boundary Element Method* - BEM). Dois exemplos numéricos foram utilizados para demonstrar o potencial da abordagem proposta. Os coeficientes de sensibilidade puderam ser determinados com precisão de maneira tão simples quanto o uso do Método de Diferenças Finitas (MDF) e uma análise inversa para uma estrutura composta complexa que pôde ser facilmente executada através de um procedimento semelhante ao de integração direta. Embora equações integrais básicas sejam apresentadas para problemas de condução de calor, a aplicação do algoritmo proposto a outros problemas, como problemas elásticos, foi identificada de forma direta.

Nas pesquisas de Ponthot e Kleinermann (2006), foram utilizadas duas categorias de problemas inversos, a primeira de identificação de parâmetros para os modelos

constitutivos do material, e a segunda de identificação de parâmetros com otimização de forma / processo. Estas duas categorias de problemas inversos foram formuladas como problemas de otimização de maneira semelhante, isto é, usando algoritmos de otimização idênticos. Nesta pesquisa, foram resolvidos dois tipos de problemas de otimização usando diferentes métodos e baseados em gradientes não lineares e, em segundo lugar, comparando a eficiência e robustez em uma variedade de aplicações numéricas.

Vale ressaltar que problemas inversos de otimização de forma / processo, envolvem por exemplo a determinação da geometria inicial de uma amostra e/ou a forma das ferramentas de modelagem, bem como alguns parâmetros do próprio processo, a fim de fornecer a geometria final desejada após o processo de conformação (Ponthot e Kleinermann, 2006).

Em Hu e Shenton (2007), utilizando o Monitoramento da Saúde Estrutural – MSE (*Structural Health Monitoring* – SHM), em um procedimento baseado na redistribuição de tensões quando da atuação de uma carga permanente que ocorre em uma estrutura em diferentes cenários de danos em termos de localização e severidade. Utilizou-se Algoritmo Genético Real Codificado (AGRC). Os resultados demonstraram que o dano é difícil de identificar quando está próximo dos pontos de inflexão da estrutura, onde a tensão em função carga permanente é nula e quando o dano não está localizado entre dois sensores, sendo também verificado o efeito do erro nessas análises.

Lee *et. al* (2007), verificou placas compostas delaminadas para detecção de danos (redução da rigidez) por dados de resposta a impactos e diferentes filtragens de ruídos. Esse procedimento de filtragem é projetado por meio da Transformada de Wavelet juntamente com uma seleção dos pontos de medição e o critério de otimização é construído em uma estimativa da probabilidade de detecção de danos utilizando Algoritmos Genéticos.

Segundo Bakir *et. al* (2008) a técnica de atualização de modelos MEF pertence à classe de problemas inversos da mecânica clássica em que o dano da mecânica do contínuo é representado por um fator de redução da rigidez de um elemento. No estudo realizado por eles, foi utilizado um método de otimização global denominado “*Coupled Local Minimizers* (CLM)”, onde os processos de otimização locais são acoplados para sejam obtidas melhores soluções que a otimização local de várias partes, consistindo em execuções independentes. Foram realizadas análises em uma estrutura complexa e 24 variáveis de projeto usando CLM com dois níveis de ruído moderado e alto em parâmetros modais, também sendo realizada comparação com outros métodos locais de otimização, como os algoritmos Levenberg-Marquardt, *Sequential Quadratic Programming* e Gauss-Newton.

Em Rus *et. al* (2009) foi realizada uma otimização da medição da configuração excitada para caracterização de danos em placas piezoelétricas (PZT-4), utilizando problemas inversos de identificação, Algoritmos Genéticos e métodos baseados em gradiente para minimizar a função objetivo e em termos experimentais buscando níveis de ruídos realistas. A medição da tensão foi buscada de modo a fornecer a mais alta identificabilidade, combinada com uma excitação da amostra por uma tração mecânica transversal à direção da polarização.

Já em Palma *et. al* (2009) também foram verificadas placas piezoelétricas com medições experimentais, combinando elementos finitos, análise de Monte Carlo e otimização de gradientes, além do problema inverso de identificação baseado no modelo numérico das placas. A minimização é realizada com a diferença quadrática entre medições experimentais e experimentais simuladas pelo Método de Elementos Finitos. Foi citado que este trabalho não foi um estudo essencialmente experimental, no entanto, podia ser considerado como um primeiro passo para projetar um dispositivo experimental de identificação racional de danos, controlando as variáveis que aumentam o nível de ruído e diminuem a precisão da solução de problema inverso.

Na pesquisa de Begambre e Laier (2009) estudou-se uma treliça de 10 barras e uma viga livre de fissuras, ambas modeladas em elementos finitos, sendo que os procedimentos de identificação de danos foram baseados em otimizações com Enxame de Partículas – EP (*Particle Swarm Optimization* – PSO), com bases no algoritmo de Nelder-Mead (Método *Simplex*) com convergência independentes das constantes heurísticas e sua estabilidade e confiança aumentadas. O método híbrido formulado apresenta o melhor desempenho em diferentes funções de referência tanto o PSO básico, também com um oscilador não linear (*Duffing*) e o método de Recozimento Simulado – RS (*Simulated Annealing* – SA), apresentando bons resultados.

Foram trabalhados modelos de elementos espectrais para identificação de danos em Arafa e Nassef (2010) baseados em vibração e mudanças nas frequências naturais de estruturas de feixes através de um modelo numérico formulado pelo Método dos Elementos Espectrais e um Algoritmo Genético estocástico foi desenvolvido para facilitar a busca de danos também. O dano foi modelado como uma redução localizada na espessura do feixe.

Em Kim (2010), são testados sistemas estruturais dinâmicos lineares com um método modal acoplado à programação matemática para a avaliação da propagação de erros na detecção de danos. O Método de Elementos Finitos é aplicado a problemas inversos nos quais as modificações estruturais no sistema de linha de base são procuradas para as

mudanças características da estrutura perturbada. A equação de perturbação linear é usada para obter uma aproximação inicial, que pode ser melhorada através de iterações não-lineares.

Segundo Andrade *et. al* (2012), o sucesso da tarefa dos problemas de identificação de parâmetros surgiram devido à crescente exigência de precisão nos resultados numéricos obtidos pelo Método de Elementos Finitos, que deve ser realizada confrontando resultados numéricos e experimentais, levando à diferença mínima entre eles, sendo que essa alta precisão de resultados só pode ser obtida com dados de entrada confiáveis e técnicas numéricas robustas. Outro ponto determinante, depende da especificação da função custo / objetivo, definida como a diferença entre os resultados experimentais e numéricos, elas devem conduzir eficientemente o processo de otimização, sendo que a ideal deve ter as seguintes propriedades:

- Todos os pontos de dados experimentais na curva e todas as curvas experimentais devem ter oportunidades iguais para serem otimizadas; e
- Unidades diferentes e/ou o número de curvas em cada sub-objetivo não deve afetar o desempenho geral do acessório.

Esses dois critérios devem ser alcançados sem a escolha manual dos fatores de ponderação. No entanto, para alguns problemas específicos não analíticos, isso é muito difícil na prática. Valores nulos de modelos experimentais ou numéricos também tornam a tarefa difícil.

Em Ghrib e Wilbur (2012), foram apresentados dois procedimentos computacionais para reconstruir a distribuição da rigidez e detectar danos em vigas de Euler-Bernoulli, através de medidas de deslocamentos estáticos e a solução é obtida pela minimização da função regularizada usando um esquema de variação total de Tikhonov. Foi utilizado um procedimento simples para medir a deflexão de feixes usando uma técnica de fotogrametria de curto alcance.

Na pesquisa de Majumbar *et. al* (2012), foram detectados e avaliados danos estruturais em treliças a partir de mudanças nas frequências naturais usando o algoritmo de otimização do Método de Colônia de Formigas (MCF).

Em Aguir e Bel Hadj Salah (2013), foram realizadas escolhas de um modelo reológico em que sua determinação de parâmetros foi executada a partir de um teste que gerou tais condições, mas sinalizando que a maior dificuldade encontrada foi o fato de não

haver testes experimentais que satisfizessem todos esses critérios, sempre buscando condições de operação correspondentes a aplicações do metal conformado que requer modelos constitutivos precisos descrevendo o comportamento do material e levando em consideração várias condições. A análise com o problema inverso foi realizada e foi proposto um método híbrido de identificação baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) e um Algoritmo Genético (AG) para identificar os parâmetros do material danificado do aço AISI 304 e usando o teste de protuberância.

Nos trabalhos de Ihesiulor *et. al* (2014), também foram analisadas delaminações de estruturas, onde um modelo de Rede Neural Artificial (RNA) com regularização bayesiana é usado como esquema de aproximação subjacente enquanto uma taxa de convergência melhorada é obtida usando um algoritmo memético. No entanto, o autor sinaliza que a construção de modelos substitutos de RNA geralmente requer grandes conjuntos de dados de treinamento, sendo também usado para a solução do problema inverso para determinar a interface, o tamanho e a localização das delaminações usando mudanças nas frequências naturais medidas antes e depois do dano. Em termos de conclusões cita-se que os algoritmos são bastante promissores, bem sucedidos, flexíveis e práticos, com um aumento significativo em termos de eficiência e eficácia para o *Structural Health Monitoring* (SHM).

Stutz *et. al* (2015) utilizou o Método de Evolução Diferencial (ED) comparando com outros métodos de otimização estocástica, ou seja, Enxame de Partículas (EP), Luus-Jaakola e *Simulated Annealing* (SA), considerados para a identificação de um cenário de dano na presença de dados corrompidos por ruído. Sendo realizada por meio de simulações numéricas em um feixe simples de Euler-Bernoulli. Uma breve análise da influência de diferentes posições de danos e severidades nas frequências naturais não amortecidas e na matriz de flexibilidade da estrutura foi apresentada.

Em Masoumi *et. al* (2015), foram analisados um pórtico 2D e uma estrutura de treliça do tipo (*Howe-Truss*) já com o Algoritmo Competitivo Imperialista (ACI) como também em Masoumi e Jamshidi (2015), sendo utilizados três casos numéricos diferentes, incluindo uma viga livre, uma treliça 2D e uma estrutura tipo placa 2D, modelados usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para avaliar o procedimento de identificação de danos, onde a função objetivo proposta para o procedimento de otimização foi formada usando parâmetros modais. Foram utilizadas as otimizações com o Algoritmo Competitivo Imperialista (ACI), o Algoritmo Genético Binário (AGB) e o Método de Enxame de Partículas (EP).

Na pesquisa de Eroglu e Tufekci (2016), foi apresentada uma formulação em elementos finitos, apresentada para vigas retas com uma trinca de borda, incluindo os efeitos

de deformação de cisalhamento e inércia rotacional. O principal objetivo do estudo foi apresentar uma formulação mais precisa para melhorar os modelos de feixes utilizados em problemas de detecção de fissuras incluindo análises modais experimentais.

Em Dou e Kang (2017) foram utilizados os Algoritmos Adaptativos de Fogos de Artifício (AAFA), Enxame de Partículas (PSO) e o Algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas (ACAA) para a identificação de parâmetros de integridade estrutural e identificação de danos para barragens de concreto, sendo estas questões importantes no monitoramento.

Lee e Song (2017), citam que nas últimas décadas para identificar a ideal distribuição espacial dos parâmetros, vários métodos de Identificação de Sistemas (IS), dependendo do elemento estrutural, foram desenvolvidos com base em algoritmos de otimização que empregam várias técnicas de regularização, mas esses métodos de IS baseados em otimização podem sofrer com a má adequação do problema de otimização sob ruídos de medição incertos. Além disso, dependendo das condições de limite e tração, a precisão e a robustez dos métodos IS podem ser diferentes. Foram utilizados então, para superar esses desafios técnicos na identificação da distribuição espacial, um novo método IS através do Método de Monte Carlo e da Cadeia de Markov, com exemplos numéricos de placas de aço e estruturas de pilares, considerando os efeitos de erros aleatórios de medição.

Em Gomes *et. al* (2017), foram também estudadas estruturas compósitas afetadas por degradação (exposição a condições ambientais) e danos (causados por condições de manuseio, impactos e cargas), no caso com placas laminadas compostas, com análises de problemas inversos e técnicas de otimização heurística com modelos de danos do tipo furo circular e de delaminação (redução da rigidez local), além das medições remotas de vibração.

Na pesquisa de Stutz *et. al* (2018), foi considerado o método de otimização de Enxame de Partículas para resolverem problemas inversos resultantes da identificação de danos, onde um feixe da viga simplesmente apoiada de Euler-Bernoulli, oriunda da Teoria do Feixe de Vigas, com três diferentes cenários de danos e as formas do modo experimental sintético corrompido com dois níveis diferentes de ruído, sendo estas as considerações na avaliação numérica da abordagem proposta. Os resultados numéricos mostraram que uma resposta modelo de superfície da matriz de flexibilidade, apresentou resultados comparáveis aos obtidos com a abordagem construída da estrutura com o MEF e também apresentando um desempenho extremamente superior em termos computacionais.

Em Liu e Jiao (2018), foram estudados exemplos numéricos de pontes de lajes simplesmente apoiadas e articuladas, compostas de quatro e sete lajes para explicar a viabilidade e correção do método proposto com o Método da Dobradiça e Algoritmos de

Colônias Artificiais de Abelhas, considerando o efeito das condições articuladas de danos na distribuição da carga lateral da estrutura.

Para Aquino *et. al* (2018), a integridade das estruturas de engenharia é frequentemente comprometida por superfícies incorporadas que resultam de ligações incompletas durante o processo de fabricação ou do início de danos causados por processos de fadiga ou impactos diversos, tendo como exemplos, materiais laminados compostos, ligações de solda incompletas ao unir dois componentes e planos de trincas internas que podem se formar quando uma estrutura é danificada. Sua pesquisa apresentou uma abordagem de otimização limitada por um gradiente parcial para resolver o problema inverso de detecção de danos, no contexto da interface da dinâmica de estado estacionário, definindo uma função objetivo, com exemplos de placas delaminadas (com camadas) apresentadas para uso de algoritmos eficientes de otimização baseados em gradientes.

Em Oliveira Filho *et. al* (2018) foram testados resultados de um problema proposto de otimização para identificação de trincas e resolvido por meio de Algoritmo Genético (AG) demonstrando eficácia e que poderia ser utilizado em questões de MSE.

Em Gomes *et. al* (2019), foram analisadas placas compostas laminadas, onde as ferramentas computacionais com Algoritmos Genéticos (AG) e Redes Neurais Artificiais (RNA) foram aplicados para identificar e prever a localização da delaminação, que segundo os autores é um dos modos de falha mais comuns em compósitos laminados que conduzem à separação ao longo das interfaces das camadas, onde o desempenho estrutural pode ser significativamente afetado por essa degradação. Citando mais uma vez que para garantir o desempenho e a integridade estrutural é crucial a utilização de técnicas do Monitoramento da Saúde Estrutural (MSE).

2.3 PROBLEMAS ABORDADOS

Os profissionais e universitários da engenharia civil, concordam que o avanço tecnológico trouxe inúmeras facilidades, em especial o da computação, para o campo de engenharia de estruturas. Um dos grandes desafios da engenharia moderna é encontrar soluções para os problemas que têm surgido a partir do uso de programas computacionais e das construções com arquitetura mais moderna (Bueno, 2008).

Conforme se afirma em Yang *et al.* (2016), as análises de otimização são crucialmente importantes no processo de projeto para se encontrar um bom equilíbrio entre economia e segurança em todas as áreas da engenharia.

Um processo de otimização, pode por exemplo, ter o intuito de aproximar o comportamento de um modelo numérico aos dados experimentais, de modo a torná-lo mais preciso, sendo que o mesmo pode buscar aproximar esses comportamentos com o modelo/dados experimentais visando aumentar sua precisão.

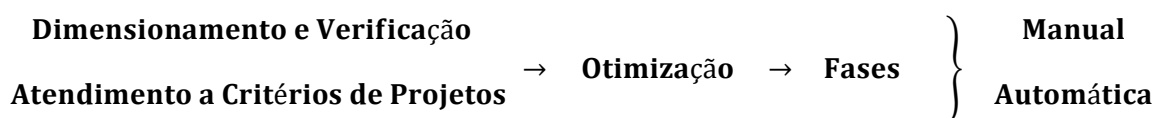
Como há uma infinidade de obras de engenharia que estão em idades avançadas ou mesmo que foram mal projetadas e executadas, passando a manifestar deteriorações diversas oriundas de variadas situações, fatos que demonstram a importância das áreas de previsões de danos, mais especificamente a área de integridade estrutural. Nesse sentido, pesquisas que envolvem identificação de danos de estruturas com a utilização de modelos numéricos e experimentais, por meio de processos que buscam as melhores soluções, como os de otimização, estão sendo cada vez mais realizadas.

Análises que muitas vezes acabam não simulando o comportamento real das estruturas devido à dificuldade na modelagem da rigidez de conexões, condições de apoio e alguns parâmetros da realidade relevantes, distorcem muito os resultados obtidos, principalmente quando são envolvidos danos da utilização das estruturas. Esse processo de busca de uma proximidade maior com o comportamento real das estruturas necessita de uma adequação matemática dos modelos numéricos a partir de medidas experimentais.

Em termos de pesquisas, a área multidisciplinar de problemas inversos vem apresentando grande crescimento, e também com grandes potencialidades na compreensão do comportamento físico real da estrutura, principalmente quando se envolvem danos, surgindo principalmente quando se desconhece parâmetros de entrada necessários para a análise direta de um problema. Parâmetros desconhecidos principalmente das condições iniciais e depois da estrutura danificada, quando se abordam estruturas em uso, surgem de forma recorrente nos problemas de engenharia.

Rus e Gallego (2002) sinalizam que pertencente à classe dos problemas inversos tem-se os métodos computacionais de detecção de danos, que buscam a identificação de parâmetros geométricos de um modelo adotado para o dano, a partir da resposta estrutural às excitações estáticas, dinâmicas, térmicas, elétricas, entre outros.

Esses processos, podem constituir-se, por exemplo, essencialmente de:



Lopes (2010) aborda o uso de métodos de identificação de parâmetros ou de otimização para poder solucionar problemas que buscam “o que é melhor”, onde o problema de minimização pode ser abordado por meio de métodos clássicos de otimização, heurísticas de otimização global ou métodos híbridos.

Com a utilização do processo de otimização, obtém-se essencialmente uma maior precisão na identificação/detecção de danos que requerem muitas vezes análises de estruturas intactas ou em situações não danificadas, ou seja, situações que envolvem aplicações de métodos com uma maior precisão.

Em termos de classificação dos métodos de otimização, encontram-se, tanto os métodos determinísticos, baseados no cálculo de derivadas ou em aproximações destas e no gradiente, quanto os métodos heurísticos, também conhecidos como métodos naturais, que são métodos aleatórios. Este último, fundamenta seu funcionamento em regras probabilísticas, trabalhando apenas com os valores da função e com os parâmetros característicos de cada método.

Entrando agora na questão dos elementos estruturais envolvidos nessa pesquisa, cita-se principalmente as vigas que são de grande importância dentro da composição estrutural de determinada obra. Elas podem ser tanto de concreto armado como também metálicas. As vigas metálicas podem possuir diversos tipos de seção, como em “I”, “W”, “U”, “H”, “L”, “J” e sendo que esta definição de seção está ligada principalmente à função do elemento na composição de determinada obra e com as premissas definidas nos critérios de cada projeto.

As vigas possuem enorme importância, pois são elas que em conjunto com outros elementos estruturais principais que se estabelece a capacidade de suporte necessária para um adequado desempenho ao longo da vida útil das estruturas de um edifício, de uma ponte, de uma barragem, dentre outras obras em termos de funcionalidades e aplicações desses elementos. No uso de elementos estruturais desse tipo, torna-se imprescindível o conhecimento da sua função e das características de cada tipo de viga.

As vigas metálicas são estruturas amplamente utilizadas na engenharia, e podem constituir elementos essenciais no dimensionamento de estruturas simples ou complexas sejam elas somente metálicas ou mesmo mistas. As vigas possuem diferentes formas de seção, denominadas perfis, sendo que os mais utilizados são o perfil em “I” e o perfil em “T”, estas podendo ser laminadas ou mesmo soldadas. Como exemplo, as vigas metálicas produzidas em uma forma cujo a sua seção transversal se assemelhe a uma letra “I”, podendo ser concebidas com duas chapas de aço dispostas a 90 graus de uma chapa principal e

também ao longo de todo o comprimento da mesma, para evitar questões relativas aos efeitos de torção ou de flexão.

Os projetos de estruturas metálicas tem evoluído e muito nos últimos tempos em função dos avanços tecnológicos, que proporcionaram o uso de novos materiais e a criação de ferramentas computacionais capazes de realizar análises estruturais complexas de estruturas ousadas e com um elevado grau de precisão.

A identificação de danos tem como objetivos, segundo Volkmar (2002), detectar da presença do dano, a localização do dano, a quantificação (grau de severidade) e, por último, a predição da segurança que oferece a estrutura.

Quando se considera um elemento estrutural cujo determinadas propriedades estejam alteradas por um dano, por exemplo, podendo se observar irregularidades ou alterações na resposta da estrutura quando comparada com a condição intacta inicial. A identificação de um sistema que descreve a relação entre uma entrada e uma saída conhecida constitui um dos objetivos dos modelos de identificação de danos, por meio por exemplo da solução de um problema inverso, que pode envolver entradas relacionadas com os deslocamentos, frequências naturais e modos de vibração, quando das análises estáticas e dinâmicas, onde as saídas podem envolver questões relativas às quantificações de danos.

De acordo com Stavroulakis e Antes (1998), os métodos de detecção de dano podem considerar danos múltiplos ou únicos e adotar diversos modelos, tais como trincas, furos, elipses, inclusões, etc.

Quando se envolve danos em estruturas metálicas, geralmente se associa ao processo de corrosão, que apesar de não fazer parte dos tipos de danos analisados nessa pesquisa, é um tipo de deterioração que pode ser facilmente encontrada em elementos estruturais de obras com estruturas metálicas. O aço oxida quando em contato com gases nocivos ou umidade, necessitando, por isso, de cuidados para prolongar sua durabilidade.

A corrosão, é um processo de deterioração dos elementos metálicos que produz alterações prejudiciais e indesejáveis nos elementos estruturais. Sendo o produto da corrosão um elemento diferente do material original, a liga acaba perdendo suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade, estética, etc. Alguns dos tipos de danos em vigas metálicas, em condições de utilização, tais como corrosões, ou mesmo exposições prolongadas à intempéries ambientais, aliadas com a falta de reparos e manutenções.

Em termos de comportamentos gerais das obras, muitas vezes, fica nítido que a manutenção, quando ocorre, somente de forma corretiva só vem a ser realizada quando a

obra está no limiar do seu estado limite de utilização ou de colapso. O campo da engenharia que envolve a conservação das estruturas existentes por meio de intervenções preventivas programadas ao longo da vida útil só fica em evidência quando acontece um acidente estrutural com alguma obra relevante, daí a importância de temas correlatos mas que muitas vezes dependem de ações efetivas de gestão com acompanhamento técnico periódico adequado.

Há ainda a otimização de modelos que segundo Peña (2013) é essencialmente um procedimento de ajuste de determinados parâmetros do modelo numérico em elementos finitos mas havendo também possibilidades de aplicação em outros métodos. Por meio das grandes diferenças de valores geralmente encontradas nos dados experimentais em relação aos modelos em elementos finitos, sejam por meio de dados modais, frequências naturais e modos de vibração, encontram na atualidade diferenciadas formas para otimização de modelos, em função dos diferentes tipos de problemas encontrados nessa área.

2.3.1 As Meta-heurísticas

Os problemas de otimização se tornaram recorrentes tanto no meio acadêmico como também no meio profissional, onde dentro desse contexto o estudo das meta-heurísticas se tornam fundamentais. Na medida do possível, a busca por soluções ótimas deve ser realizada com o emprego de um método exato, como problemas por exemplo de otimização combinatória, sendo estes de difícil resolução, envolvendo também problemas de médio e de grande porte que podem não ser solucionados em tempo computacional admissível por um método exato e a inserção de novas restrições podem trazer certa dificuldade para a aplicação de um modelo matemático adequado, bem como para a adoção de métodos exatos para a sua resolução. Todas estas questões demonstram a importância das pesquisas com técnicas heurísticas.

Dentro da ciência da computação, etimologicamente a origem de heurística vem da palavra grega Heuriskein (εὐρίσκειν), que significa descobrir ou encontrar, que é também a origem da expressão “Eureca” (Eureka!, Eureca!, Heureka! ou Heureka!: em grego, ἤρηκα/εὔρηκα – "Encontrei!") que ficou famosa pelo uso do matemático e físico grego Arquimedes. A introdução dos métodos heurísticos se deu por George Polya em 1957 (livro “How to Solve It”), tratando essencialmente de conhecimentos relacionados às buscas heurísticas e gerando um marco entre a Inteligência Artificial (IA / AI – *Artificial Intelligence*) com a pesquisa operacional.

Uma heurística é uma técnica que pesquisa boas soluções (ou seja, próximas do ótimo) com um custo computacional razoável, sem estar apta a garantir a otimalidade, ou a distância à otimalidade de uma dada solução (Reeves e Beasley, 1995).

A palavra “Meta” é um elemento de formação de palavras, de origem grega, que exprime: no vocabulário científico, a ideia de mudança, união, transformação e no vocabulário filosófico, a ideia de nível superior, maior generalidade. Uma meta-heurística é um método heurístico para resolver de forma genérica problemas de otimização (normalmente da área de otimização combinatória).

De acordo com Gigerenzer (2011), heurísticas são processos cognitivos empregados em decisões não racionais, sendo definidas como estratégias que ignoram parte da informação com o objetivo de tornar a escolha mais fácil e rápida.

Para Goldberg *et al.* (2016), espera-se que, em muitos casos, as heurísticas alcancem os valores ótimos da solução de problemas NP-Arduos (classes de problemas) ou mais complexos, especialmente nas ocasiões em que partem de uma solução próxima do valor ótimo.

Conforme Goldberg *et al.* (2016), uma meta-heurística trata-se de uma arquitetura geral de regras que, formada a partir de um tema em comum, pode servir de base para o projeto de uma ampla gama de heurísticas computacionais.

Uma meta-heurística é um algoritmo modular que pode ser aplicado em diferentes problemas de otimização com poucas modificações a serem realizadas na adaptação a um problema específico.

Ainda em Goldberg *et al.* (2016), uma heurística é uma técnica computacional aproximativa, que visa alcançar uma solução avaliada como aceitável para um dado problema que pode ser representado em um computador, utilizando um esforço computacional que pode ser considerado como aceitável. Sendo capaz de garantir, em determinadas condições, a viabilidade ou a otimalidade da solução encontrada.

Em resumo, os métodos heurísticos são técnicas baseadas na experiência e no bom senso, ditos métodos aproximados ou aproximativos (não-exatos).

Para Blum e Roli (2003), uma meta-heurística é um conjunto de conceitos os quais podem ser usados para definir métodos heurísticos que podem ser aplicados a uma ampla gama de diferentes problemas. Alguns panoramas e comportamentos das técnicas heurísticas podem ser observados na Figura 2.4 a seguir.

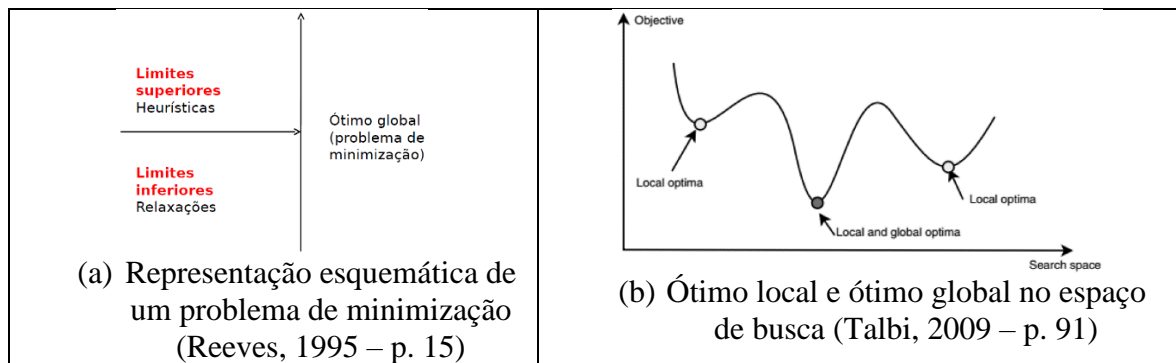


Figura 2.4 – Panoramas e comportamentos das técnicas heurísticas

Alguns conceitos básicos envolvendo técnicas heurísticas são necessárias, como por exemplo o de vizinhança de uma solução, em que a codificação de um problema de otimização deve constar como representar um problema e a cada solução viável, deve ser relacionado um valor de função objetivo.

A solução vizinha deve ser acessível a partir de uma dada solução, por meio de um movimento. A perturbação é uma alteração em uma dada solução para que se visite outra região do espaço de busca. A busca local visa a investigação da vizinhança de uma solução obtida por soluções acessíveis, em geral, por um movimento.

Quando envolver heurísticas em problemas com restrições haverá três principais alternativas: penalização de soluções inviáveis, correção de soluções inviáveis e geração apenas de soluções viáveis.

2.3.2 Os Algoritmos de Otimização

Os algoritmos numéricos para solução de problemas de otimização são essencialmente classificados em métodos de programação matemática e métodos probabilísticos. Uma diferença que pode ser utilizada como exemplo aplicada aos algoritmos de otimização envolvendo os métodos de programação matemática para os métodos probabilísticos é que os últimos procuram encontrar o mínimo global do problema de otimização evitando os mínimos locais. Já os métodos de programação matemática podem fornecer, por exemplo, um mínimo local.

Os métodos probabilísticos, como o próprio nome sugere, se utilizam de um processo de busca randômica guiados por decisões probabilísticas para obter mínimos ou máximos, tanto locais como globais. Além disso, os métodos probabilísticos são também ferramentas que apresentam bons comportamentos para problemas com variáveis discretas.

Os algoritmos de otimização constituem-se como sendo a busca por minimizar ou maximizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou

inteiras dentro de um conjunto viável. Conceitualmente, determina-se um conjunto de parâmetros, que pode estar dentro de uma função $f(p)$, que minimiza a diferença entre por exemplo indivíduos de uma determinada população objeto de estudo para com uma resposta calculada, e com uma resposta experimental, no que tange a uma medida de erro. Obtém-se uma resposta calculada por meio de uma solução de um problema direto obtido pelo Método de Elementos Finitos, onde a resposta experimental pode representar as grandezas medidas no experimento para a resposta calculada.

Em Kleinermann (2000) o problema de otimização (determinação do mínimo ou máximo) compõe-se da seguinte forma:

- Função objetivo: é a função matemática, $f(p)$, cujo mínimo ou máximo deseja-se determinar;
- Variáveis de projeto: são as variáveis independentes que aparecem na função objetivo;
- Restrições: são os limites impostos ao sistema, ou estabelecidos pelas leis naturais que governam o sistema, a que estão sujeitas as variáveis de projeto;
- Região de busca ou região viável: é a região do espaço definida pelas variáveis de projeto e delimitada pelas restrições, onde no interior ou na fronteira se localiza o ótimo da função objetivo.

Diante disso, a eficiência do processo de otimização é alcançada por meio de uma boa escolha da função objetivo e das variáveis de projeto envolvidas na população estudada.

Os algoritmos de otimização, inclusive os que trabalham com meta-heurísticas, devem carregar formulações matemáticas bem definidas, em que um conjunto de variáveis descrevam o sistema, sendo estes denominados variáveis de projeto. Todos os sistemas são projetados para processar um determinado conjunto de restrições impostas pelo problema de otimização. Se um projeto satisfizer todas as restrições, tem-se um possível (factível) sistema. Logo, a análise é um subproblema no processo de projeto que ajuda a avaliar a performance do projeto.

Para aumentar a eficiência do projeto pode ser utilizado algum método de otimização, o qual pode ser definido como o processo de determinação do mínimo ou do máximo de alguma função mérito, também denominada função objetivo. A adequação de um projeto requer também a satisfação de um conjunto de requisitos especificados, os quais são chamados de restrições de projeto. Tanto a função objetivo quanto às restrições de

projeto podem ter características de análise ou de síntese de projeto, por exemplo, minimizar a massa de uma estrutura visando atender um limite de tensão especificado (Silva, 2007).

2.3.3 Os Problemas Inversos

Os Problemas Inversos, também conhecidos como Problemas de Identificação de Sistemas, constituem metodologias que consistem em encontrar certas condições iniciais do problema real, ou mesmo certas variáveis do próprio processo, que permitem alcançar resultados previamente conhecidos ou desejados.

Quando um problema não se apresenta na forma direta, onde por exemplo o domínio matemático Ω , suas condições de contorno Γ ou até mesmo os parâmetros que definem as equações do problema não estão devidamente conhecidos, bem definidos ou mesmo definidos, ou em casos em que estão definidas de forma pontual, incompleta ou mesmo redundante. Em Tikhonov e Arsenin (1977) e Kubo (1988) este tipo de problema pode ser resolvido matematicamente como Problema Inverso. Ao contrário do problema direto, o problema inverso procura pelas causas e condições partindo de características e consequências do fenômeno observado (Brito, 2008). É com base na observação dos efeitos determinados pelas causas é que se pode obter a solução de um problema inverso.

Como exemplo de aplicação, em Bezerra e Saigal (1993), o problema inverso é descrito como um problema de otimização com a função objetivo sendo a soma dos quadrados das diferenças entre os deslocamentos medidos e os deslocamentos computados para a configuração de falha assumida, onde cita-se que técnicas computacionais para a solução de tais problemas pode fornecer uma ferramenta eficaz para os Testes Não Destrutivos (*Non-Destructive Testing* - NDT), exame, monitoramento e diagnóstico de sistemas estruturais.

2.3.4 A Influência dos Danos Numa Estrutura

Segundo o CEB (2010), a diminuição da vida útil (o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada sem necessidade de intervenções não previstas) de uma estrutura pode ser causada pelos danos. A norma ABNT NBR 6118 (2014) define durabilidade como sendo a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

As vigas metálicas estão sujeitas a condições ambientais que alteram suas propriedades físicas e químicas comprometendo a sua durabilidade e favorecendo ao

surgimento de patologias, que são definidas como a redução de desempenho de um produto, componente, ou construção, ao longo do tempo, devido aos erros de: planejamento, projeto, execução, uso e deterioração proveniente de sua interação com o meio ambiente.

Helene e Pereira (2007), definem as ações sobre as estruturas como sendo parâmetros fundamentais considerados no projeto, que incidem diretamente na durabilidade, serviço, estabilidade e/ou na resistência. Neste sentido, quando se depara com uma deficiência, é essencial determinar a causa que a origina, muitas vezes esta causa pode também estar associada a uma ação excessiva sobre a estrutura, como uma sobrecarga, por exemplo.

Os danos podem ainda ser detectados por métodos numéricos com formulações lineares ou não lineares. Grande parte dos estudos realizados adota métodos lineares para a detecção de danos. Tais métodos lineares consideram que a estrutura permanece em regime linear elástico mesmo após o aparecimento do dano, entretanto essa consideração é uma simplificação da realidade, já que na verdade a estrutura apresenta comportamento não linear com bastante frequência devido à presença de fissuras, excesso de cargas, etc. Por outro lado, os métodos não lineares de detecção de danos consideram que o comportamento da estrutura passa a ser não linear após a introdução do dano. Estes métodos representam de forma mais realista o estado da estrutura, porém apresentam grandes dificuldades matemáticas para a resolução de tais problemas (Silva, 2011).

Segundo Kim *et al.* (2003) o uso dos modos de vibração para detecção de danos tem alguns inconvenientes, pois a presença do dano pode não influenciar significativamente nos modos de vibração menores do que são aqueles geralmente medidos. Além disso, o ruído de sinal e a escolha dos sensores utilizados podem afetar consideravelmente a precisão do procedimento de detecção de danos.

Os danos estruturais implicam em mudanças nas propriedades físicas de uma estrutura, não se restringindo somente à análises estáticas, mas também dinâmicas. A ideia básica da detecção de dano é a de que os parâmetros da mesma, são funções das propriedades físicas da estrutura (massa, amortecimento e rigidez), e portanto, qualquer mudança destas propriedades causará mudança em suas respostas.

Em Rytter (1993), onde mais adiante no trabalho será melhor explicado, classificam-se os danos em: métodos nível I que consideram somente a determinação se a estrutura apresenta dano ou não, em métodos nível II que consideram, se a estrutura está danificada e a localização do dano, já no nível III, a detecção e localização devem ser

quantificadas em extensão e severidade e por último, no nível IV, a vida útil remanescente da estrutura deve ser determinada considerando o dano quantificado.

2.3.5 O Método de Elementos Finitos (MEF)

O Método de Elementos Finitos (MEF) teve seu desenvolvimento por volta de 1950, com o advento da computação. Isto permitiu a elaboração e a resolução de sistemas de equações complexas, tornando mais eficiente a simulação de fenômenos físicos através de programas computacionais. Desde então, este método, inicialmente criado para auxiliar na indústria aeroespacial, foi cada vez mais aplicado nas mais diversas áreas, dentre elas a Engenharia Estrutural.

Em Bathe (1996), Zienkiewicz e Taylor (2000), Soriano (2009) e Fish e Belytschko (2009) o método dos elementos finitos é apresentado e desenvolvido através de várias abordagens diferentes, sendo as mais comuns: o método direto, a formulação energética e o método dos resíduos ponderados (método de Galerkin).

A maior parte dos problemas práticos de engenharia envolvem problemas complexos que não apresentam solução analítica. O nível de complexidade está relacionado com a complexidade da geometria envolvida, as equações que descrevem o fenômeno físico (por exemplo, escoamento fluido envolvendo viscosidade, plasticidade em estruturas, propriedades que dependem da temperatura, etc.), ou a variação das grandezas envolvidas, por exemplo, estruturas sujeitas às grandes deformações.

Uma abordagem comum em engenharia para resolver esses problemas, até então, era utilizar fórmulas com coeficientes obtidos de forma empírica. Essa abordagem é mais onerosa, e mais demorada, pois exige a realização de experimentos para obter esses coeficientes. Atualmente, muitos desses problemas são analisados utilizando-se simulação computacional que envolve uma forte combinação de computação gráfica e métodos numéricos. Pelo fato dos computadores terem uma maior capacidade de processamento atualmente, fez com que a simulação computacional estivesse fortemente presente em todos os ramos da engenharia.

O Método de Elementos Finitos, quando bem gerenciado, permite um maior controle das variáveis relativas ao experimento, facilitando a análise dos resultados. Porém, alguns fatores podem produzir imprecisões nestes resultados, como a variabilidade inerente aos processos biomecânicos (tamanho, forma e características mecânicas dos materiais), hipóteses simplificadoras na confecção dos modelos matemáticos e perda de alguns detalhes durante a geração da malha de elementos finitos.

Além disso, a incorreta interpretação do comportamento físico dos materiais, erros inerentes ao programa computacional, utilização de programas inapropriados ou informações incorretas, a obtenção de uma malha muito simplificada e o uso de um elemento inadequado também podem levar a erros durante a execução do programa. O MEF será utilizado na modelagem das vigas metálicas a serem avaliadas nessa pesquisa.

2.4 FORMULAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS

Identificar, localizar e quantificar a perda de rigidez de um sistema a partir da resposta estática ou dinâmica da estrutura são alguns dos pontos que norteiam a detecção de danos estruturais. Sabe-se que as frequências naturais tendem a diminuir na medida em que o nível de dano na estrutura aumenta, e, segundo Cury (2010), os valores das amplitudes modais das regiões afetadas pelo dano também tendem a diminuir.

Em Morales (2012), são demonstrados resultados que mostram a habilidade de técnicas de inteligência computacional para detecção de cenários de danos com uns poucos elementos danificados, porém o autor ressalta que não é possível garantir o sucesso integral em todos os casos, recomendando-se a utilização de técnicas de busca local para melhorar a solução encontrada por algoritmos globais. Segundo o autor, há a requisição da determinação de uma quantidade mínima de informações a serem utilizadas, com uma função objetivo adequada e uma alta qualidade nas medições para garantir uma detecção confiável de danos.

Os efeitos de um dano estrutural podem ser classificados como lineares e não lineares, onde o primeiro caso é uma situação em que a estrutura se encontra inicialmente no domínio elástico linear e permanece neste mesmo domínio após a ocorrência do dano, sendo este o caso de problemas estruturais no estágio inicial. Para o segundo caso, o comportamento da estrutura torna-se não linear após a ocorrência de dano, sendo possível notar que a não linearidade ocorre para danos severos, como por exemplo, na formação de fissuras por fadiga devido aos ciclos de cargas em um ambiente de vibração, à plastificação de certos elementos devido a um choque, entre outros (Alves, 2012).

Em uma análise dinâmica, a matriz de rigidez $[K]$, o coeficiente de amortecimento $[C]$ e a massa $[M]$ são parâmetros importantes na formulação em elementos finitos, sendo que a resposta dinâmica da estrutura é afetada por variações introduzidas nessas matrizes, muitas vezes causadas por um dano.

A Equação (2.1) a seguir (matriz de rigidez e massa) origina um problema de autovalores para um sistema sem amortecimento, por meio de um modelo analítico.

$$([K] - \omega^2_i[M])[q_i] = 0 \quad (2.1)$$

Onde,

[K]: matriz de rigidez;
 ω^2_i : i-ésimo autovalor;
[M]: matriz de massa;
 $[q_i]$: i-ésimo autovetor.

Para se minimizar as diferenças entre os autovetores medidos experimentalmente e os obtidos pelo modelo analítico ajustam-se as matrizes [K] e [M].

No que se refere às análises estáticas, a formulação básica utilizada está apresentada a seguir na Equação (2.2).

$$([K][x]) = [P] \quad (2.2)$$

Onde,

[K]: matriz de rigidez;
[x]: vetor que representa os deslocamentos estáticos;
[P]: carga.

É importante lembrar que são as diferenças com elementos específicos das matrizes que possibilitam a avaliação dos danos. A hipótese de que a matriz de massa seja constante é considerada quando o dano interno não resulta em perda de material.

Podem ser relacionadas ainda, na matriz de rigidez, uma série de variáveis, conforme a seguinte Equação (2.3).

$$K = [K(A, t, l, E, I, G, J)] \quad (2.3)$$

Onde,

A: área;
t: espessura;
l: comprimento;
E: módulo de elasticidade longitudinal;
I: momento de inércia longitudinal;
G: módulo de elasticidade transversal;
J: momento de inércia transversal.

Nesta pesquisa são utilizadas as respostas estáticas (deslocamentos) e dinâmicas (modos de vibração e frequências naturais), sendo assim a uma única variável, onde o dano modifica as mesmas. Essa variável denominada d_i minimiza a função objetivo escalar que representa a diferença entre a resposta analítica (estrutura intacta) e a experimental (estrutura danificada). A Equação (2.4) a seguir contempla:

$$F(Y) = \sum_i \sum_j (Y_m^{ij} - Y_a^{ij})^2 \quad (2.4)$$

Onde,

$F(Y)$: Função Objetivo de mínimos quadrados em função dos dados de Y estáticos e dinâmicos;

Y_m^{ij} : deslocamentos estáticos ou dados dinâmicos obtidos analiticamente (estrutura danificada);

Y_a^{ij} : deslocamentos estáticos ou dados dinâmicos medidos (estrutura intacta);

i : grau de liberdade;

j : condição de carregamento estático e dinâmico em particular.

Com Y_a sendo obtido por meio de um problema de autovalores, ou mesmo a matriz $[K]$, a ser identificada, utilizada da equação de equilíbrio estático e dinâmico. Serão utilizados para o vetor de variáveis de projeto d_i , limites inferiores e superiores de 0 (elemento sem dano) e 1 (elemento danificado em sua totalidade).

A matriz de rigidez de cada elemento de viga será modificada para incorporar a variável de dano, conforme a expressão do elemento de viga. Para um elemento de viga, a Equação (2.5) da seguinte matriz de rigidez estabelece como as propriedades físicas e materiais são armazenadas para incorporar a variável de dano.

$$[K_j] = \frac{E(1-[d_i])}{l^3} \begin{bmatrix} Al^2 & 0 & 0 & -Al^2 & 0 & 0 \\ 0 & 12I & 6Il & 0 & -12I & 6Il \\ 0 & 6Il & 4I^2 & 0 & -6Il & 2I^2 \\ -Al^2 & 0 & 0 & Al^2 & 0 & 0 \\ 0 & -12I & -6Il & 0 & 12I & -6Il \\ 0 & 6Il & 2I^2 & 0 & -6Il & 4I^2 \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (2.5)$$

Onde,

$[K_j]$: matriz de rigidez;

A: área;
I: momento de inércia;
l: comprimento;
E: módulo de elasticidade;
[d_i]: vetor variável de projeto;
i: grau de liberdade;
j: índice do elemento finito.

O elemento utilizado é um elemento básico de viga elástica, com três graus de liberdade em cada nó: um deslocamento vertical, um deslocamento horizontal e um deslocamento rotacional. Cada grau de liberdade $\{u_1 \ v_1 \ \theta_1 \ u_2 \ v_2 \ \theta_2\}$ pode ser verificado na Figura 2.5 a seguir.

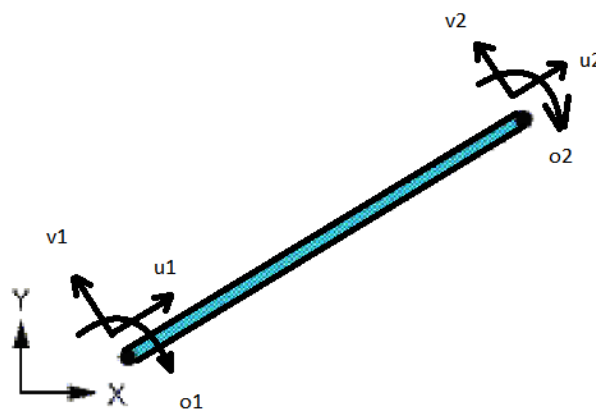


Figura 2.5 – Elemento Finito tipo viga

2.5 AS RESPOSTAS DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS

As respostas das estruturas, sejam elas estáticas ou dinâmicas, norteiam os métodos de identificação de danos a serem utilizados, onde na resposta estática obtém-se os deslocamentos oriundos da ação de uma carga estática, e já a resposta dinâmica é obtida por meio das frequências naturais e dos modos de vibração. Aborda-se aqui então, nessa pesquisa, os métodos de identificação de danos que utilizam as respostas estáticas e dinâmicas.

2.5.1 Respostas por Meio de Métodos Estáticos e suas Variações

A integridade estrutural de diversos elementos componentes de determinadas construções podem ser avaliadas por meio de técnicas de identificação de danos que utilizam a resposta estática da estrutura. Essas técnicas se tornam boas soluções no processo de

identificação de danos, quando por exemplo na resposta dinâmica, se tem dificuldades na obtenção de mudanças significativas nos modos de vibração da estrutura (Choi, 2002).

Nesta técnica, por meio da variação dos deslocamentos estáticos interligada com a redução da rigidez, onde há a atuação do peso próprio da estrutura que provoca as medidas dos deslocamentos a serem avaliados. Baseando a técnica de identificação do dano nas respostas estáticas, utiliza-se a Equação (2.2) que rege o equilíbrio estático apresentada anteriormente. O vetor de deslocamentos x mostrado por meio da Equação (2.6).

$$x = K^{-1}P \quad (2.6)$$

Trabalhando-se a equação de equilíbrio da estrutura numa situação danificada, por meio da inserção por exemplo de uma alteração na matriz de rigidez, por uma quantidade ΔK por exemplo (implícito anteriormente por meio do vetor variável de projeto $[d_i]$), conforme Equação (2.7) seguinte.

$$(K + \Delta K)x^* = P \quad (2.7)$$

Avalia-se o vetor deslocamento x^* por meio da aproximação de primeira ordem em Série de Taylor da Equação (2.8) que segue.

$$x^* = (K + \Delta K)^{-1}P \approx (K^{-1} - K^{-1}\Delta K K^{-1})P \quad (2.8)$$

A partir daí a alteração dos deslocamentos, por causa dos danos já existentes será conforme a Equação (2.9):

$$\Delta x = x - x^* \approx K^{-1}\Delta K K^{-1}P \quad (2.9)$$

O somatório das mudanças nas matrizes de rigidez dos elementos é uma mudança do sistema, obtida por exemplo quando se utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), representado de acordo com a Equação (2.10) a seguir.

$$\Delta K = \sum_{i=1}^{ND} B_i^T \Delta k_i^* B_i \quad (2.10)$$

Em que:

ΔK : variação de quantidade na matriz de rigidez;

ND : número de elementos danificados;

B_i^T : matriz Booleana transposta correspondente ao i -ésimo elemento;

B_i : matriz Booleana correspondente ao i -ésimo elemento;

Δk_i^* : variação da rigidez no i -ésimo elemento;

i : i -ésimo elemento.

A variação da rigidez no i -ésimo elemento é expressa pela Equação (2.11) seguinte.

$$\Delta k_i^* = \alpha_i E_i \Delta k_i \quad (2.11)$$

Em que:

Δk_i^* : variação da matriz que envolve apenas propriedades geométricas ou termos que contém a relação de gravidade;

α_i : escalar que denota a fração do dano ($-1 \leq \alpha_i \leq 0$), pode ser representado também por um fator comum α (Wang *et al.*, 2001);

E_i : parâmetro que representa a propriedade de rigidez no i -ésimo elemento danificado;

Δk_i : matriz que envolve apenas propriedades geométricas ou termos que contém a relação de gravidade.

2.5.2 Respostas por Meio de Métodos de Análises Dinâmicas

Apresenta-se uma descrição geral de alguns dos métodos de detecção de danos baseados na resposta dinâmica de estruturas. Mais uma vez, enfatiza-se que a integridade estrutural de diversos elementos componentes de determinadas construções podem agora ser avaliadas por meio de técnicas de identificação de danos que utilizam a resposta dinâmica da estrutura.

Juliani (2014) sinaliza que usualmente a informação a ser obtida de uma estrutura em uma análise dinâmica experimental é a aceleração, a velocidade ou o deslocamento, tendo em vista que essas grandezas físicas representam seu movimento ao longo do tempo. Sendo que alguns equipamentos como extensômetros são utilizados para medir deformações e enquanto os transdutores podem medir deslocamentos, velocidades e acelerações, podendo citar também relógios comparadores (medem deslocamentos) e os clinômetros (medem deslocamentos angulares).

Em Bendat e Piersol (2010) conceitua-se um transdutor (ou sensor) com um dispositivo que converte uma energia em uma forma para outra, onde no contexto da engenharia, isso muitas vezes significa a leitura de um fenômeno físico sendo medido em um sinal elétrico proporcional. Sendo que Chu (2010) sinaliza que um transdutor capaz de captar uma aceleração é o acelerômetro, onde o sinal de saída é proporcional à aceleração de entrada.

Ainda em Juliani (2014) são citadas algumas técnicas para a identificação e localização de danos, como as técnicas: coeficientes MAC (*Modal Assurance Criterion*) e COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*), Diferença de Curvatura Modal (DCM)

e Índice de Dano (ID). Essas técnicas serão apresentadas a seguir para exemplificar as respostas por meio de métodos de análises dinâmicas.

A Equação (2.12) do coeficiente MAC, conforme conceituado em Allemang (2003) que fornece uma medida de consistência (grau de linearidade) entre estimativas de vetores modais, correlacionando os pares de vetores modais com valores entre 0 e 1.

$$MAC_{(i,j)} = \frac{|\{\Phi_i^\alpha\}^T\{\Phi_j^e\}|^2}{(\{\Phi_i^\alpha\}^T\{\Phi_i^\alpha\})(\{\Phi_j^e\}^T\{\Phi_j^e\})} \quad (2.12)$$

Em que:

$\{\Phi_i^\alpha\}$: vetor modal da estrutura intacta referente ao modo i ;

$\{\Phi_j^e\}$: vetor modal da estrutura danificada referente ao modo j .

Allemang (2003) apresenta alguns exemplos de visualização gráfica do MAC conforme demonstrado na Figura 2.6 seguinte.

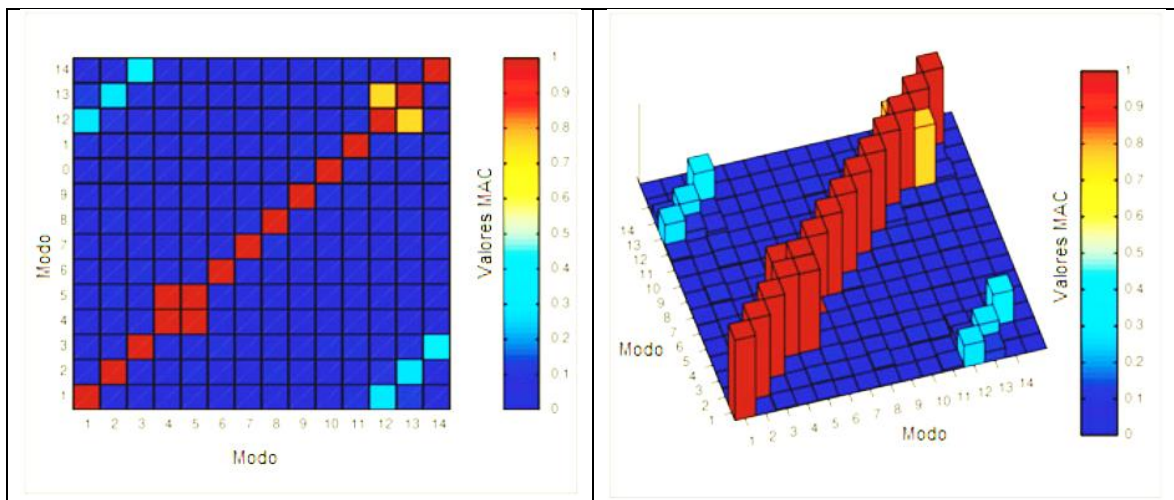


Figura 2.6 – Análises gráficas 2D e 3D da representação dos valores do coeficiente MAC por cores (Adaptado: Allemang, 2003)

Entrando agora numa extensão do coeficiente MAC, tem-se o coeficiente COMAC que correlaciona dois vetores modais para cada grau de liberdade, em que um deles é a condição de referência tentando identificar quais graus de liberdade medidos contribuem negativamente para um baixo valor do MAC, sendo este calculado em cada grau de liberdade j para cada modo conforme a Equação (2.13) a seguir.

$$COMAC_{(j)} = \frac{(\sum_{i=1}^n \{\Phi_i^\alpha\}_j \{\Phi_i^e\}_j)^2}{(\sum_{i=1}^n \{\Phi_i^\alpha\}_j \{\Phi_i^\alpha\}_j)(\sum_{i=1}^n \{\Phi_i^e\}_j \{\Phi_i^e\}_j)} \quad (2.13)$$

Em que:

$\{\Phi_i^\alpha\}$: vetor modal de referência relativa ao modo i ;

$\{\Phi_j^e\}$: vetor modal experimental relativa ao modo j ;

n : número de modos de vibração.

O COMAC também assume valores entre 0 e 1, indicando uma boa correlação entre os vetores modais em um determinado grau de liberdade quando igual a 1 e uma baixa correlação quando igual a 0. A Figura 2.7 seguinte de Rodrigues (2004) demonstra um exemplo de representação do COMAC com análises de 4 graus de liberdade.

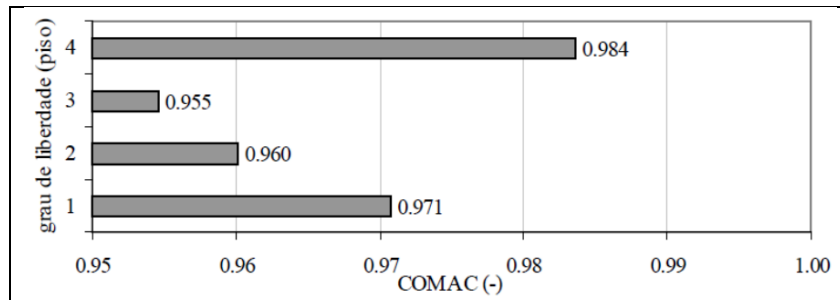


Figura 2.7 – Análise gráfica da representação dos valores do COMAC (Rodrigues, 2004)

Entrando agora na técnica da Diferença de Curvatura Modal (DCM) que segundo Juliani (2014) se baseia no fato de que um dano na estrutura altera suas características dinâmicas, como as frequências naturais e modos de vibração, e que danos localizados também reduzem a rigidez e aumenta o amortecimento da estrutura. Essa redução na rigidez tem consequências na diminuição da frequência natural e modificações nos modos de vibrações da estrutura.

Trazendo para a aplicação no comportamento à flexão de uma viga, que é o elemento estrutural a ser trabalhado nessa pesquisa, em Pandey, Biswas e Samman (1991) se apresenta a Equação (2.14) da curvatura que pode ser calculada utilizando a aproximação das diferenças centrais.

$$\Phi_i'' = \frac{(\Phi_{i+1} - 2\Phi_i + \Phi_{i-1})}{h^2} \quad (2.14)$$

Em que:

i : ponto de medição;

Φ : modo de vibração;
 h : distância entre os pontos de medição $i + 1$ e $i - 1$.

Em termos de cálculos aplicando na Equação (2.14) considerando os extremos (primeiro e último ponto) gerando a Equação (2.15) e (2.16) a seguir.

$$\Phi_1'' = \frac{(\Phi_1 - 2\Phi_2 + \Phi_3)}{h^2} \quad (2.15)$$

$$\Phi_{iu}'' = \frac{(\Phi_{iu-2} - 2\Phi_{iu-1} + \Phi_{iu})}{h^2} \quad (2.16)$$

Na Equação (2.17) seguinte se demonstra a maior diferença absoluta entre as curvaturas da estrutura intacta e danificada para a definição da localização do dano.

$$\Delta\Phi_i'' = |\Phi_{di}'' - \Phi_i''| \quad (2.17)$$

Em que:

Φ_{di}'' : curvatura da estrutura danificada no ponto i ;
 Φ_i'' : curvatura da estrutura intacta no ponto i .

A Equação (2.18) a seguir demonstra outra maneira de apresentar a DCM quando envolver mais de um modo de vibração. Onde, por meio da média das diferenças de curvatura dos modos em análise, Wahab e De Roeck (1999) denominaram essa média como sendo o Fator de Dano da Curvatura (FDC).

$$FDC = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\Phi_{di}'' - \Phi_i''| \quad (2.18)$$

Um exemplo de análise gráfica da Diferença de Curvatura Modal (DCM) é apresentada na Figura 2.8 a seguir.

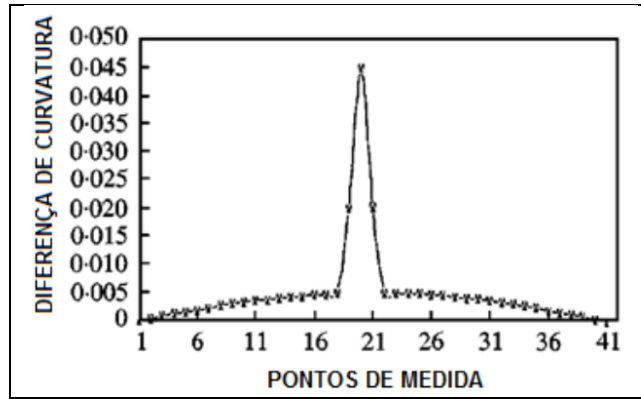


Figura 2.8 - Análise gráfica da representação dos valores da Diferença de Curvatura Modal (Wahab e De Roeck, 1999)

Por fim, a determinação do Índice de Dano (ID) proposto por Stubbs, Kim e Farrar (1995), conforme a Equação (2.28) seguinte, que é baseado nas curvaturas dos modos de vibração apresentadas anteriormente e na energia de deformação modal, que trata da energia de deformação armazenada em uma estrutura com a deformação em determinado modo de vibração.

$$\beta_{ij} = \frac{\left(\int_j^{j+1} [\Phi_j^{d''}(x)]^2 dx + \int_0^l [\Phi_j^{d''}(x)]^2 dx \right) \cdot \int_0^l [\Phi_j''(x)]^2 dx}{\left(\int_j^{j+1} [\Phi_j''(x)]^2 dx + \int_0^l [\Phi_j''(x)]^2 dx \right) \cdot \int_0^l [\Phi_j^{d''}(x)]^2 dx} \quad (2.19)$$

Em que:

$\Phi_j''(x)$: segunda derivada do modo de vibração j da estrutura intacta;

$\Phi_j^{d''}(x)$: segunda derivada do modo de vibração j da estrutura danificada.

Para a determinação de um Índice de Dano (ID) global para mais de um modo utiliza-se a Equação (2.20), que envolve a soma dos índices de dano de cada modo individual.

$$\beta_j = \sum_j \beta_{ij} \quad (2.20)$$

Um exemplo de análise gráfica do Índice de Dano é apresentada na Figura 2.9 a seguir.

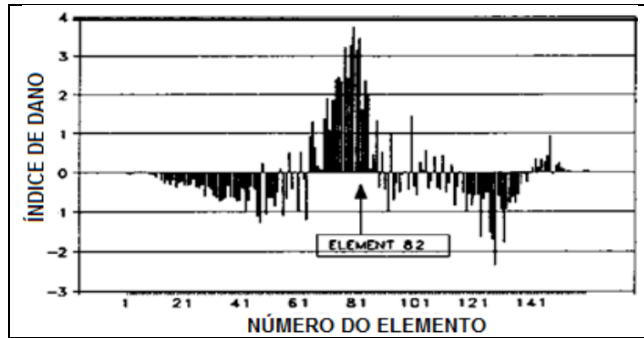


Figura 2.9 – Análise gráfica do Índice de Dano (Stubbs, Kim e Farrar, 1995)

2.6 UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS

As técnicas de otimização usadas para o procedimento de detecção de danos seguem essencialmente a medição do deslocamento a partir da estrutura danificada, o cálculo de deslocamento a partir do modelo não danificado, a verificação da convergência e se esse critério é atingido, a mudança para um novo ponto, o cálculo do deslocamento, no novo ponto e a iteração a partir da análise de convergência. As vantagens são a baixa sensibilidade ao ruído em relação a outras técnicas. Nela se utilizam os deslocamentos estáticos e a rigidez de cada elemento, já que os danos nas estruturas geralmente estão definidos como uma redução da rigidez do elemento (Choi, 2002). Seguindo a Equação (2.21) observa-se:

$$X = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{nl},)$$
 (2.21)

Onde:

X : equação de rigidez do elemento;

β : razão entre a rigidez efetiva do i -ésimo elemento.

Utilizando tanto os deslocamentos estáticos adquiridos da análise dos elementos finitos (MEF) da estrutura intacta e os deslocamentos correspondentes à estrutura danificada obtém-se a função para a otimização, conforme a Equação (2.22) seguinte.

$$F(D) = \sum_{i=1}^{nn} \left| \frac{D_i^M}{D_i^C} - 1 \right|$$
 (2.22)

Em que:

$F(D)$: função de otimização;

D_i^M : deslocamento medido no i -ésimo nó;

D_i^C : deslocamento calculado no i -ésimo nó;

i : i -ésimo nó;

nn : número de nós do sistema.

2.6.1 O método da viga conjugada

O método da viga conjugada consiste em gerar uma viga fictícia, em que as características e o comprimento são os mesmos da viga original. Essa viga fictícia terá o diagrama de momentos da viga original dividido por EI (equivalente à carga). Com o cálculo do momento fletor da viga real, determinado pela força de cisalhamento e pela flecha da viga nova, obtém-se o ângulo da tangente em qualquer ponto da elástica da viga real (ver Tabela 2.2) com as Equações (2.23), (2.24), (2.25) e (2.26).

Tabela 2.2 - Método da viga conjugada e equações relacionadas

Viga: Real	Viga: Fictícia	Equações
Momento: M	Carga (M/EI)	$Pendente = \frac{dy}{dx} \quad (2.23)$
Ângulo	Cortante	$PMomento(M) = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.24)$
		$Cisalhamento = \frac{d^3y}{dx^3} \quad (2.25)$
Flecha	Momento	$Carga(q) = \frac{d^4y}{dx^4} \quad (2.26)$

O momento correspondente na viga conjugada é numericamente igual a carga estática P_j que corresponde a M_j/E_jI_j e y_i o deslocamento de qualquer ponto da viga real. A variável P_j é a carga do $j^{\text{ésimo}}$ elemento e δ_{ij} é o deslocamento no nó i devido à carga unitária. A Figura 2.10 seguinte apresenta o momento correspondente e demais panoramas existentes.

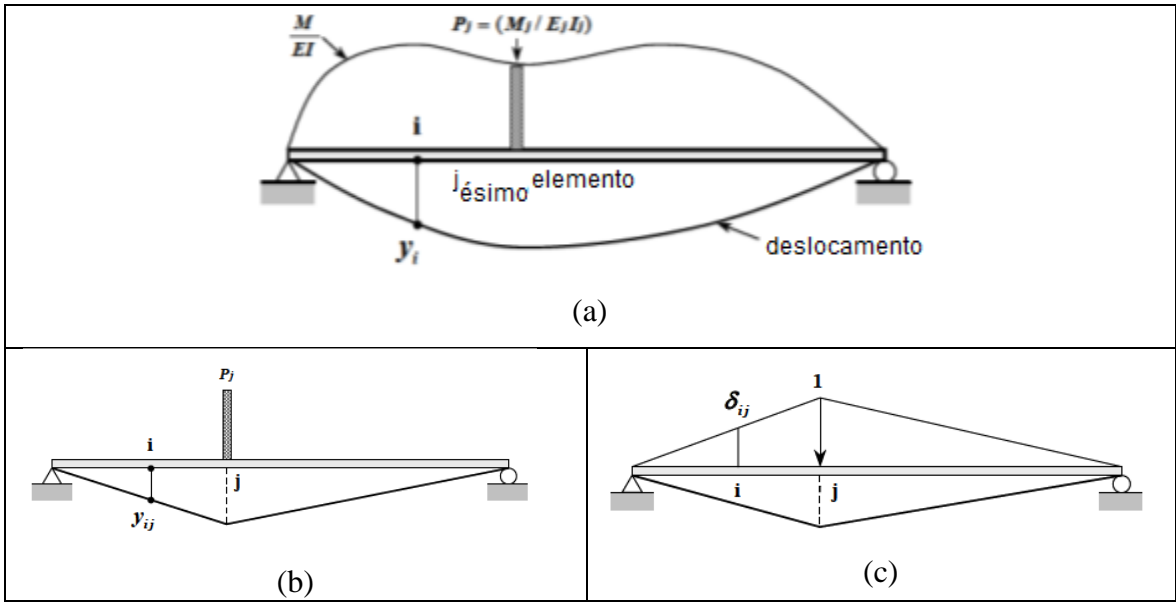


Figura 2.10 – Viga conjugada: (a) viga fictícia, (b) carga estática P_j que provoca o deslocamento e (c) carga estática unitária no $j^{\text{ésimo}}$ elemento que também provoca o deslocamento (Choi, 2002)

O deslocamento, devido à carga estática do elemento $j^{\text{ésimo}}$, pode ser obtido pela Equação (2.27) e com a aplicação do método da superposição, os deslocamentos podem ser obtidos pela Equação (2.28).

$$y_{ij} = \delta_{ij}P_j \quad (2.27)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^{nl} y_{ij} \quad (2.28)$$

Onde:

y_{ij} : deslocamento no nó $i^{\text{ésimo}}$ devido à força P_j ;

nl : número de elementos;

y_i : deslocamento da viga real no $i^{\text{ésimo}}$ nó.

Em termos de uma análise paralela do momento real, o mesmo pode ser facilmente calculado se as cargas aplicadas na viga real forem conhecidas. Observe a análise do deslocamento na Equação (2.29):

$$y_i = \sum_{j=1}^{nl} \delta_{ij}P_j \quad (2.29)$$

Define-se o dano do elemento como a redução da rigidez à flexão, obtido por meio da Equação (2.30).

$$E_j I_j = \beta_j E_{j0} I_{j0} \quad (2.30)$$

Onde,

β_j : relação entre momento de inércia da viga intacta e a viga danificada no i ésimo elemento, referindo-se à mudança da rigidez à flexão e representado como um índice;
 E_{j0} : módulo de elasticidade do estado danificado;
 I_{j0} : momento de inércia do estado danificado.

Tem-se aí a relação entre o deslocamento e a rigidez à flexão por meio da Equação (2.31).

$$y_i = \sum_{j=1}^{nl} \alpha_j \delta_{ij} P_{j0} \quad (2.31)$$

Onde:

$$P_{ij} = \delta_{ij} P_{j0} \quad (2.32)$$

A Equação (2.33) pode ser expressa como forma de matriz, em que Y e α são o vetor deslocamento e o índice de dano do elemento respectivamente. A variável P é a matriz P_{ij} .

$$Y = P \alpha \quad (2.33)$$

Utiliza-se a teoria da viga conjugada para avaliar o dano quando o desvio padrão do ruído é de 10%, sendo que esta técnica pode ser utilizada na área de monitoramento a longo prazo de estruturas.

2.7 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Com a criação de vários algoritmos heurísticos a partir da década de 1950, por meio de analogias com a natureza, na tentativa de simular fenômenos biológicos, onde os mesmos são na verdade algoritmos de otimização, que tem como aspecto mais marcante, o seu caráter aleatório, no intuito de simular o acaso que parece governar processos distintos na natureza, desde a evolução das espécies até o comportamento social dos animais.

Também com o grande avanço da computação, na década de 1980, tornou-se viável, o emprego destes algoritmos para a otimização de funções e processos, principalmente quando métodos mais tradicionais não obtinham sucesso, por exemplo com problemas de otimização combinatória, por meio, por exemplo do problema do caixeiro viajante e problemas de coloração de mapas, ou mesmo por meio de problemas onde a função objetivo não podia ser expressa matematicamente, por exemplo, na identificação de suspeitos ou mesmo com problemas de vários mínimos locais. A Figura 2.11 seguinte mostra o fluxograma com os métodos de otimização utilizados nessa pesquisa.

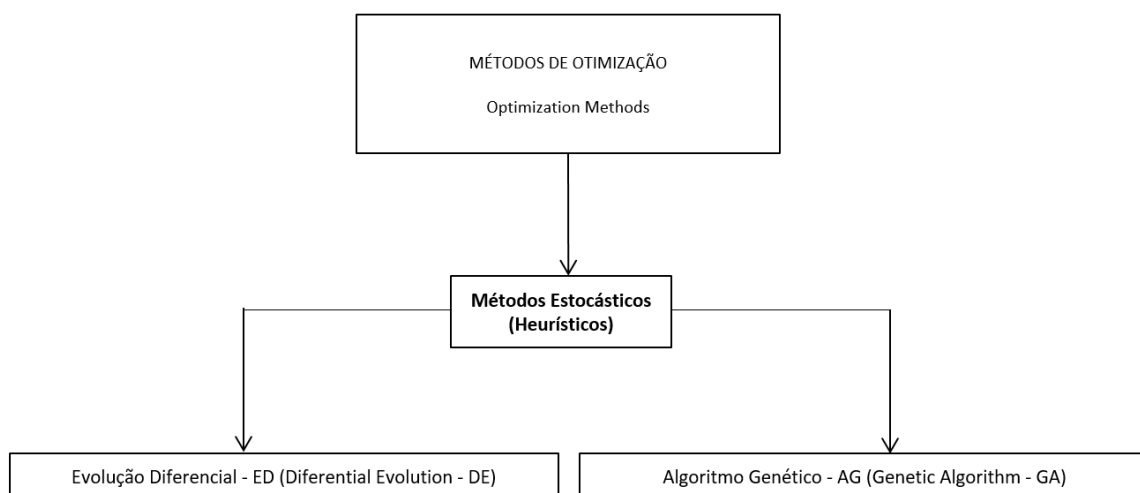


Figura 2.11 – Métodos de otimização (sequência da pesquisa)

Dentro dos Métodos Estocásticos pode-se citar também o Método do Recozimento Simulado, Método de Otimização Extrema Generalizada, Método de Colônia de Formigas, Método de Redes Neurais Artificiais, Método do Enxame de Partículas, Método de Busca Tabu, Método GRASP, dentre outros, cujo alguns deles serão explicados no ANEXO 2, apesar da não aplicação efetiva na pesquisa.

2.8 CLASSIFICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

A classificação dos algoritmos de otimização envolve: os algoritmos evolucionários que trabalham com populações de soluções e, em geral, são bio-inspirados, como exemplos tem-se os Evolução Diferencial, Algoritmos Genéticos e Colônia de Formigas (utilizado como referência principal nessa pesquisa), Enxame de Partículas, Algoritmos Meméticos, dentre outros. Já os algoritmos de busca de vizinhança trabalham com uma única solução e investigam a sua vizinhança por meio de mecanismos de busca local, como por exemplo: *Simulated Annealing*, Busca Tabu, GRASP, ILS, VNS, VND.

Em termos de considerações gerais essas técnicas devem ser capazes de gerar soluções de alta qualidade em tempo computacional admissível. Não existe garantia de otimalidade das soluções, bem como noções de distância da solução obtida em relação ao ótimo global. Existindo um “*trade-off*” diversificação (exploração) e intensificação (exploração).

Os parâmetros devem ser sempre calibrados, pois afetam substancialmente na qualidade das soluções buscadas.

2.9 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO CLÁSSICO: MÉTODO DO GRADIENTE

Segundo Dai *et al.* (1999) o Gradiente Conjugado (CG), compreendem métodos de uma classe de algoritmos de otimização sem restrições, caracterizadas por baixa requisição de memória e propriedades fortes de convergência mundial, o mesmo se tornou popular para engenheiros e matemáticos envolvidos na solução de problemas de grande escala.

O Método do Gradiente Conjugado é um método iterativo para minimizar funções quadráticas convexa com a seguinte Equação (2.34) da forma:

$$f(x) = \frac{1}{2} x^T A x - x^T b \quad (2.34)$$

Em que, $x, b \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ e $a \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é uma matriz simétrica positiva definida. A Figura 2.12 a seguir mostra um exemplo de aplicação do mesmo.

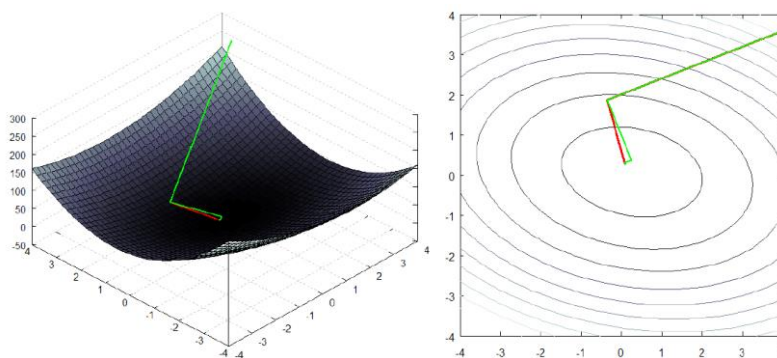


Figura 2.12 – Diminuição de gradiente (verde) e gradiente conjugado (vermelho)

Minimizando $f(x)$ por meio da Equação (2.35) e de seu gradiente:

$$\nabla f(x) = Ax - b \quad (2.35)$$

Busca-se igualar o gradiente a zero, podendo-se identificar o gradiente conjugado como um método iterativo para resolver sistema de equações lineares, conforme a Equação (2.36) seguinte.

$$Ax = b \quad (2.36)$$

A partir de uma matriz A simétrica positiva definida, define-se o produto interno como sendo a Equação (2.37).

$$x^T A y = (x, y)_A \quad (2.37)$$

Se diz então, que um vetor x é conjugado a outro vetor y com relação a uma matriz A , conforme Equação (2.38) se:

$$(x, y)_A = 0, \text{ com } x \neq y \quad (2.38)$$

A ideia do algoritmo é utilizar direções conjugadas para a redução na busca do ponto ótimo x , sendo descrito como a Equação (2.39):

$$x^* = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 + \dots + \alpha_n p_n \quad (2.39)$$

Os coeficientes foram dados a partir da combinação linear, conforme a Equação (2.40) que segue:

$$\begin{aligned} Ax^* &= \alpha_1 A p_1 + \alpha_2 A p_2 + \dots + \alpha_n A p_n = b \\ \alpha_k &= \frac{p_k^T b}{p_k^T A p_k} = \frac{(p_k b)}{(p_k p_k)_A} \end{aligned} \quad (2.40)$$

A partir de uma matriz A de categoria n só se pode definir n vetores A conjugados, portanto o algoritmo de gradiente conjugado garante a obtenção de uma solução em um máximo de n iterações.

Da fórmula de atualização tem-se a Equação (2.41):

$$x_{k+1} = x_k + \alpha p_k \quad (2.41)$$

Onde p é tido como uma redução de direção. Define-se então a Equação (2.42):

$$g_k = \nabla f(x_k) \quad (2.42)$$

O tamanho do passo α que minimiza a função $f(x)$ ao longo da direção $x_k + \alpha p_k$ é dado pela Equação (2.43):

$$\alpha_k = \frac{g_k^T p_k}{p_k^T A p_k} \quad (2.43)$$

Se definirmos p_{k+1} como a direção mais próxima ao gradiente g_k sob a restrição de ser conjugado. Esta direção é dada pela projeção de g_k no espaço ortogonal a p_k com relação ao produto interno induzido por A , assim como a Equação (2.44):

$$p_{k+1} = -g_k + \frac{p_k^T A g_k}{p_k^T A p_k} p_k \quad (2.44)$$

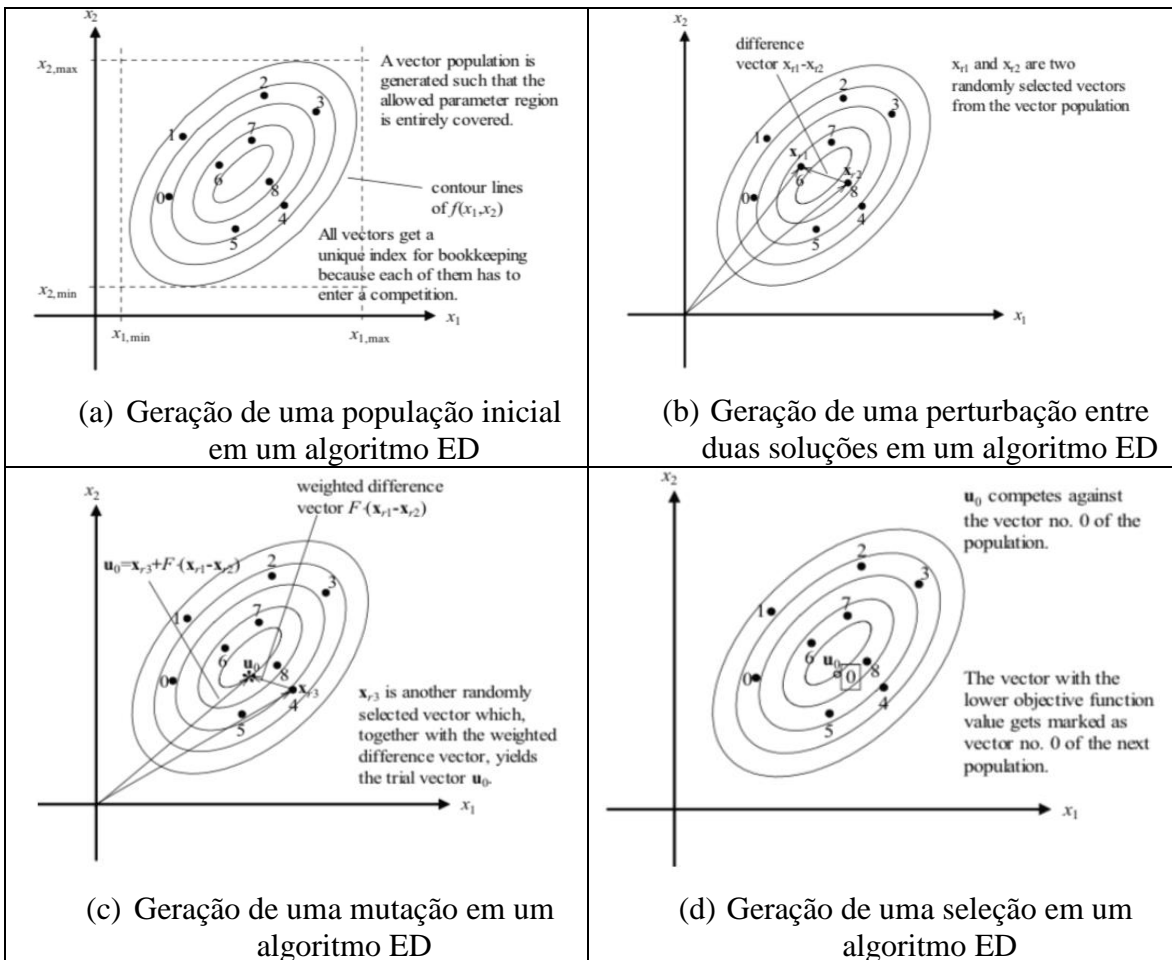
Lembrando que esse método clássico do Gradiente não foi utilizado nessa pesquisa.

2.10 MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL (ED)

Segundo Storn e Price (1995), propositores do método de Evolução Diferencial - ED (DE – *Differential Evolution*) a versão clássica desse algoritmo é bem simples e apresenta algumas vantagens, tais como: possui apenas três parâmetros de controle; trabalha com domínios reais, ou seja, não exige que as variáveis de projeto sejam codificadas em números binários; apresenta boas propriedades de convergência e pode ser facilmente adaptado para o uso em computação paralela.

A Evolução Diferencial é um algoritmo estocástico para a resolução de problemas de otimização global com funções não lineares. É um algoritmo simples, que apresenta bons resultados em problemas de otimização de um único objetivo (Tusar e Filipic, 2007).

Os esquemas de comportamentos de um algoritmo de Evolução Diferencial (ED) podem ser observados a seguir na Figura 2.13.



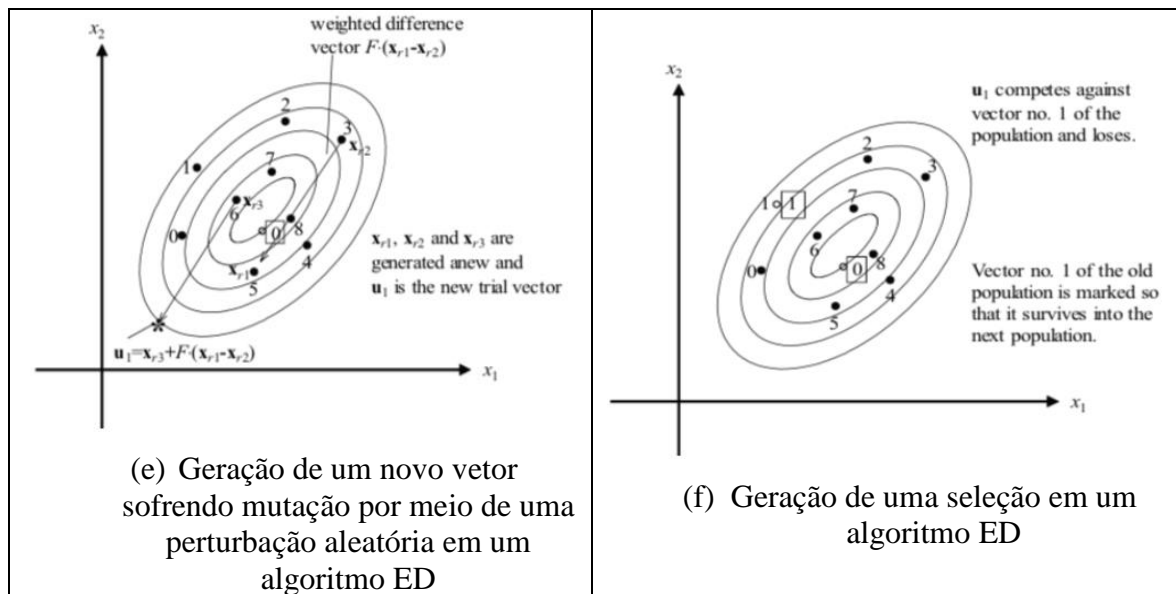


Figura 2.13 - Esquemas de comportamentos de um algoritmo de Evolução Diferencial - ED (Price *et al.* 2005, p. 31 e 32)

O método de Evolução Diferencial (ED) é um algoritmo de meta-heurísticas inspirados na natureza. É um método de otimização multi ponto e derivado livre. Sendo um otimizador de base populacional, que começa resolvendo o problema por amostragem da função objetivo em vários pontos iniciais. Os pontos iniciais podem ser aleatoriamente escolhidos ou não, dependendo de informações disponíveis sobre o espaço de busca. A Evolução Diferencial clássica tem quatro fases principais: a inicialização, mutação baseado na diferença de vetor, cruzamento / recombinação e seleção. O algoritmo é controlado por três parâmetros:

- I_NP é o tamanho da i população, e o número de soluções da concorrência em uma determinada geração G ($I_itermax$ = número máximo de iterações ou gerações). Pode ser também denominado de número de vetores da população. Este tamanho de população é diretamente proporcional a I_D , que é o número de parâmetros da função objetivo, ou mesmo de variáveis envolvidas ou até mesmo de dimensionalidade do problema. Indicando-se para obtenção de I_NP o valor de 10 vezes I_D ;

- F é a constante de fator de escala ou de ponderação, tipicamente, entre 0 e 2 que controla a mutação diferencial do processo (ou também denominado de tamanho de passo da evolução diferencial). É a taxa de passagem, que define a probabilidade de um vetor de teste para sobreviver;

- F_CR é a taxa de cruzamento (*crossover*), especificado no intervalo entre 0 e 1 (ou também denominado de constante de probabilidade de cruzamento). Quanto maior é essa

taxa, maior será a probabilidade dos componentes do vetor candidato serem iguais aos componentes do vetor mutante.

O processo iterativo, a cada iteração deve ser chamado de geração G (I_itermax = número máximo de iterações ou gerações), encerrando quando um usuário define esses critérios e os mesmos forem atendidos.

O ponto chave deste método é a verificação da resposta dos sinais distribuídos espacialmente que podem captar a informação do dano, vale ressaltar também que esta técnica não requer uma análise completa da estrutura em questão.

Alguns resultados em elementos estruturais isotrópicos, mostram que a otimização, por meio da evolução diferencial é uma boa opção para escolher os parâmetros para o método numérico que exige o mínimo de intervenção por parte do utilizador, mesmo para geometrias complexas.

As características gerais do método de Evolução Diferencial são:

- Proposto por Rainer Storn e Kenneth Price em 1995;
- Muito popular na otimização não linear com variáveis contínuas;
- Mecanismo básico de busca: operador de mutação diferencial;
- Considerado um Algoritmo Estocástico, embora não seja inspirado em processo natural;
- Qualidades computacionais interessantes, tais como: simplicidade de implementação, robustez e eficiência, autoadaptação e versatilidade.

Seja o problema de otimização não linear com variáveis reais contínuas, segundo a Equação (2.45):

$$x^* = \underset{x}{\operatorname{arg\,min}} f(x) \quad , \quad \text{Sujeito a restrições das funções: } \begin{cases} g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases} \quad (2.45)$$

Inicialmente considera-se o problema irrestrito, isto é, sem as funções de restrição $g(x)$ e $h(x)$ e arg relacionado aos argumentos da função. Com notações independentes da seguinte forma:

$U_{[a,b]}$: amostragem com distribuição uniforme entre a e b;

$N_{[\mu,\sigma]}$: amostragem com distribuição normal com média μ e desvio padrão σ ;

Seja uma população de soluções candidatas $X_t = \{x_{t,i}; i = 1, \dots, I_NP\}$. Cada indivíduo é representado por um vetor coluna, conforme Equação (2.46):

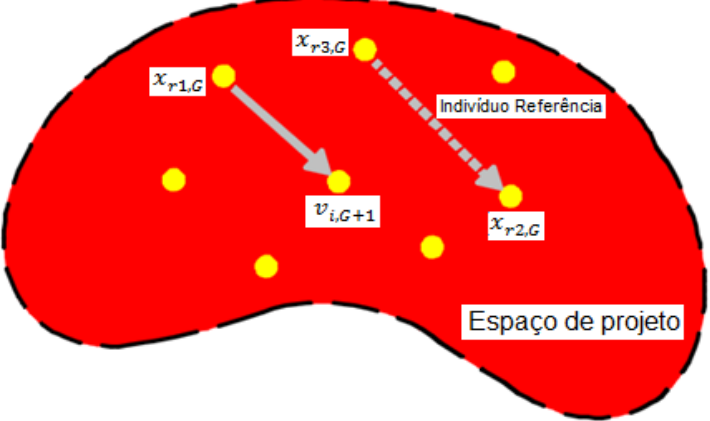
$$x_{t,i} = \begin{bmatrix} x_{t,i,1} \\ x_{t,i,2} \\ \vdots \\ x_{t,i,n} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$


O terceiro índice indica uma entre as n variáveis do problema e t o indivíduo envolvido. O mecanismo de busca do método de Evolução Diferencial que utiliza vetores-diferença, determinado pelos seguintes pontos (ver esquemas da Tabela 2.3):

- Dois indivíduos são selecionados aleatoriamente para se criar um vetor-diferença;
- Este vetor-diferença é somado a um terceiro indivíduo, também selecionado aleatoriamente, produzindo uma solução mutante;
- A solução mutante é portanto o resultado de uma perturbação em algum indivíduo da população;
- Esta perturbação é um vetor-diferença construído aleatoriamente.

O esquema a seguir da Tabela 2.3 mostra o comportamento das variáveis envolvidas no Método de Evolução Diferencial.

Tabela 2.3 – Esquema do comportamento das variáveis envolvidas no Método de Evolução Diferencial

Processo de formação de um vetor mutante no espaço de soluções	Esquemas de mutações geradas
	<p>Mutação:</p> $v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$ <p>Indivíduo Referência: $x_{r1,G}$</p> <p style="text-align: center;">↓</p>

Processo de formação de um vetor mutante no espaço de soluções	Esquemas de mutações geradas
 <p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Mutante (Indivíduo) ● Início (Indivíduo) <p>Espaço de projeto</p>	<p>Mutação:</p> $v_{i,G+1} = x_{mutante} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$ <p>Indivíduo Referência: $x_{mutante}$</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>Mutação:</p> $v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{mutante} - x_{r3,G}) + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$ <p>Indivíduo Referência: $x_{r1,G}$</p>

Em Santos (2009) consta que a principal ideia por trás do método de Evolução Diferencial é criar uma população de soluções (indivíduos) que é sucessivamente atualizada através de possíveis combinações dos seus componentes até a convergência. Este método preserva tópicos, tais como a seleção, recombinação, mutação e cruzamento (*crossover*), que serão explicitados a seguir.

2.10.1 Evolução Diferencial: População

O valor mínimo da função objetivo é localizado dentro de um espaço de projeto por uma população de indivíduos gerados aleatoriamente, considerando a recombinação e a evolução dessa população, por meio de novas gerações e vetores populacionais. A Equação (2.47) seguinte, expressa por meio de uma matriz uma população de indivíduos.

$$M_{NP} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Onde,

M_{NP} : matriz com número de populações ou tamanho da i população;

i : número de indivíduos da população;

j : número de variáveis de projeto.

2.10.2 Evolução Diferencial: Mutação

A mutação, por meio de um vetor de mutação $v_{i,G+1}$ criado e para cada vetor alvo $x_{i,G}$ ($i = 1, 2, \dots, I_NP$), conforme a Equação (2.48):

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (2.48)$$

Onde,

$v_{i,G+1}$: vetor de mutação ou vetor mutante;

$x_{i,G}$: vetor alvo ou vetor população escolhido aleatoriamente;

$x_{r1,G}$: vetor 1 aleatoriamente selecionado da população (vetor base);

$x_{r2,G}$: vetor 2 aleatoriamente selecionado da população;

$x_{r3,G}$: vetor 3 aleatoriamente selecionado da população;

i : população ($i = 1, 2, \dots, I_NP$);

F : fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial).

Os vetores citados anteriormente não devem ser iguais entre si e nem iguais ao vetor alvo, requerendo uma população que possua pelo menos quatro vetores, $I_NP=4$. A constante F (fator de mutação) é o segundo parâmetro de controle do algoritmo, também denominado de tamanho de passo da evolução diferencial, que costuma ser especificado no intervalo $[0,2]$.

Para a criação de um vetor mutante, todos os indivíduos da população terão sido escolhidos uma vez como vetor alvo, ao término de cada geração G .

2.10.3 Evolução Diferencial: Cruzamento (*Crossover*)

A diversidade da população é um dos objetivos do cruzamento (*crossover*), consistindo basicamente, em misturar os componentes do vetor mutante com o vetor alvo, por meio de um novo vetor candidato $u_{i,G+1}$, conforme a Equação (2.49) a seguir.

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & , \text{ se } rand_{ji} \leq F_CR \\ x_{ji,G} & , \text{ se } rand_{ji} > F_CR \end{cases} \quad (2.49)$$

Onde,

$u_{ji,G+1}$: vetor candidato, julgamento ou tentativa;

$v_{i,G+1}$: vetor de mutação ou vetor mutante;

$x_{i,G}$: vetor alvo ou vetor escolhido aleatoriamente;

rand_{j_i} : número aleatório gerado no intervalo $[0,1]$;

i : população ($i = 1, 2, \dots, I_NP$);

j : dimensão do problema ($j = (1, 2, \dots, I_D)$);

F_CR : taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

A taxa de cruzamento (*crossover*) é o terceiro e último parâmetro de controle do algoritmo, especificado no intervalo de $[0,1]$. Essa taxa implica que, quanto maior ela é, maior é a probabilidade dos componentes do vetor candidato serem iguais aos componentes do vetor mutante.

2.10.4 Evolução Diferencial: Seleção

O vetor alvo $x_{i,G}$ (vetor escolhido aleatoriamente) e o vetor candidato $u_{i,G+1}$ (vetor tentativa ou julgamento) são postos para competir entre si, caracterizando a etapa de seleção, onde o vetor candidato, caso gere um valor menor ou igual da função objetivo, o mesmo substituirá o vetor alvo na próxima geração ($x_{i,G+1} = u_{i,G+1}$). Ocorrendo o contrário, descarta-se o vetor candidato e o vetor alvo permanece na população, $x_{i,G+1} = x_{i,G}$. De acordo com a Equação (2.50) a seguir.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G} & , \text{ se } f(u_{i,G}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & , \text{ se } f(u_{i,G}) > f(x_{i,G}) \end{cases} \quad (2.50)$$

Onde,

$x_{i,G+1}$: vetor alvo na próxima geração (até se tornar a função objetivo final);

$u_{i,G}$: vetor candidato, julgamento ou tentativa;

$x_{i,G}$: vetor alvo ou vetor escolhido aleatoriamente;

i : população ($i = 1, 2, \dots, I_NP$);

j : dimensão do problema ($j = (1, 2, \dots, I_D)$);

$f(u_{i,G})$: função vetor candidato;

$f(x_{i,G})$: função vetor alvo.

2.10.5 Evolução Diferencial: Critério de Parada

A repetição por um número determinado de gerações ou até mesmo o critério de parada utilizado caracterizam o fim das três últimas etapas do algoritmo (mutação, cruzamento (*crossover*) e seleção).

Em Santos (2009) são citados outros mecanismos que podem ser utilizados para finalizar o processo evolutivo, são eles: o tempo de processamento, o número de avaliações da função objetivo, valor final da função objetivo e o próprio monitoramento do usuário. Vale ressaltar que procura-se obter sempre uma convergência com um baixo esforço computacional, por meio de um número de avaliações da função objetivo. Suveges (2014) mostra um fluxograma (Figura 2.14) que resume as etapas do método de Evolução Diferencial, caracterizando os critérios de parada.

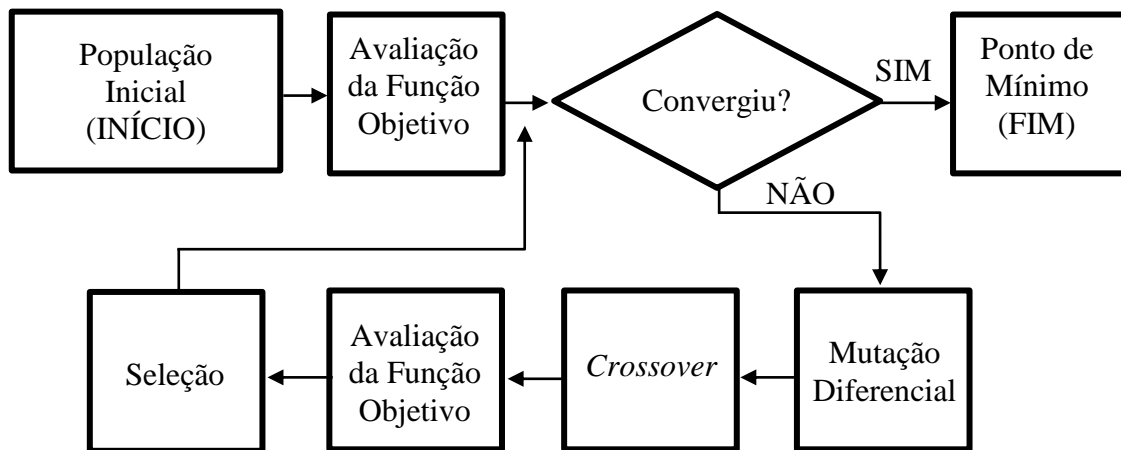


Figura 2.14 – Fluxograma do método de Evolução Diferencial – ED (Suveges, 2014)

2.11 COMPORTAMENTO GERAL: MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Santos (2009) apresenta a Equação (2.51) na forma analítica de uma função de 2 variáveis com alguns pontos de mínimo, onde pode-se obter a análise gráfica 3D da mesma, por meio das Funções Pico (*Peaks Functions* – MATLAB® R2014a). A Figura 2.15 (a) seguinte mostra o panorama das Funções Pico, bem como a Figura 2.15 (b) apresenta o detalhe da percepção dos 3 mínimos da função.

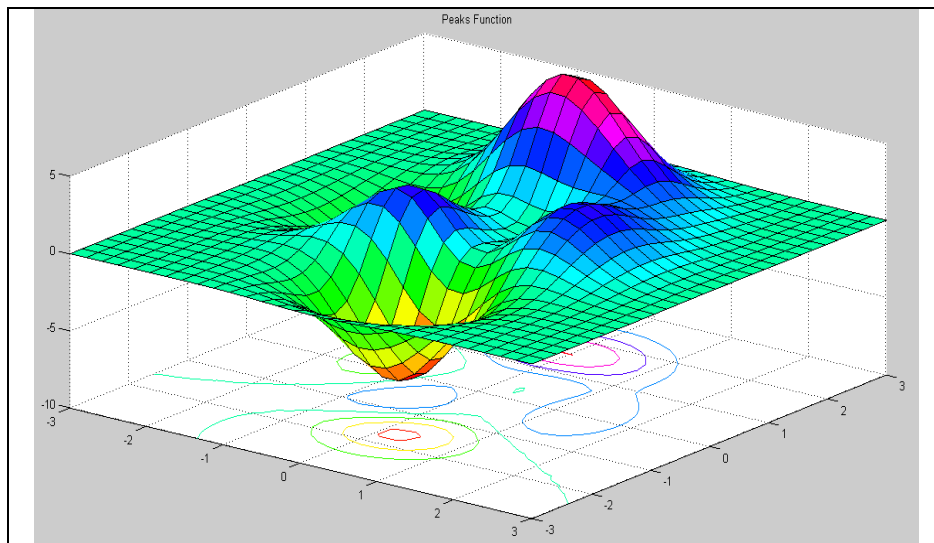
$$z = 3(1 - x)^2 e^{-(x^2)} - (y + 1)^2 - 10 \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5 \right) e^{-(x^2 - y^2)} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2 - y^2} \quad (2.51)$$

Em que,

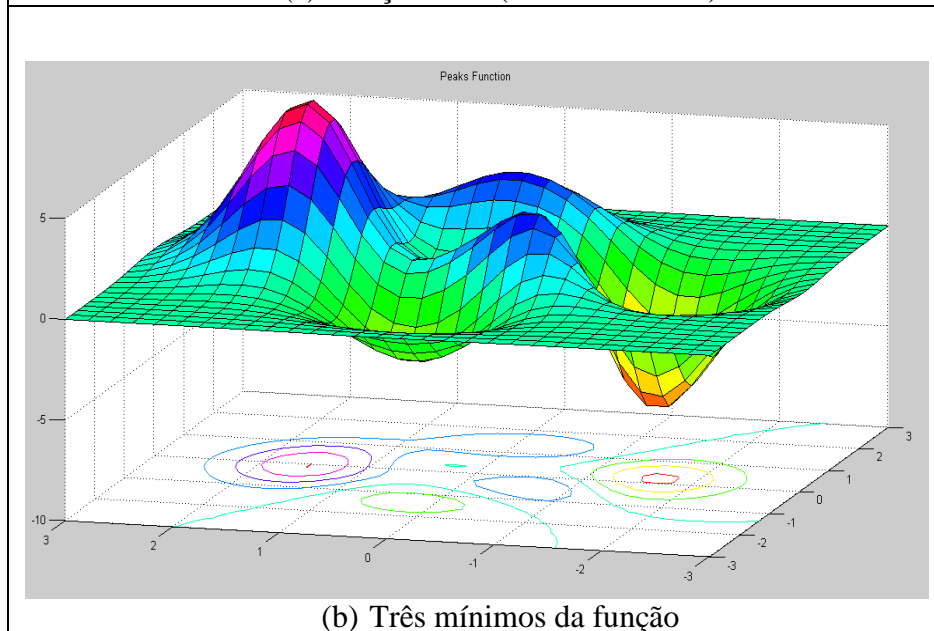
z: função pico de duas variáveis

x: variável do eixo das abcissas para definição do ponto de mínimo da função pico

y: variável do eixo das ordenadas para definição do ponto de mínimo da função pico



(a) Função Pico (*Peaks Function*)



(b) Três mínimos da função

Figura 2.15 – Superfície 3D da função

2.11.1 Comportamento do Método de Evolução Diferencial na busca por um mínimo global de uma função

Primeiramente para se entender o comportamento do Método de Evolução Diferencial na busca por um mínimo global de uma função deve-se observar a geração inicial que dá origem a esse processo, bem como as atualizações feitas a cada nova geração.

Neste sentido a Figura 2.16 seguinte, mostra a verificação de uma distribuição aleatória dos pontos pelo espaço de projeto definido, onde a simulação do mesmo é identificada por meio da redução do espaço amostral da Função Pico até a segunda geração (número máximo de iterações ou gerações: $I_{itermax}=2$). Na análise gráfica de contorno e

de perfil da Função Pico, observa-se que a distribuição dos pontos vermelhos representam as localizações dos indivíduos da população, em a área em vermelho observada nos gráficos é a região de pico máximo da função.

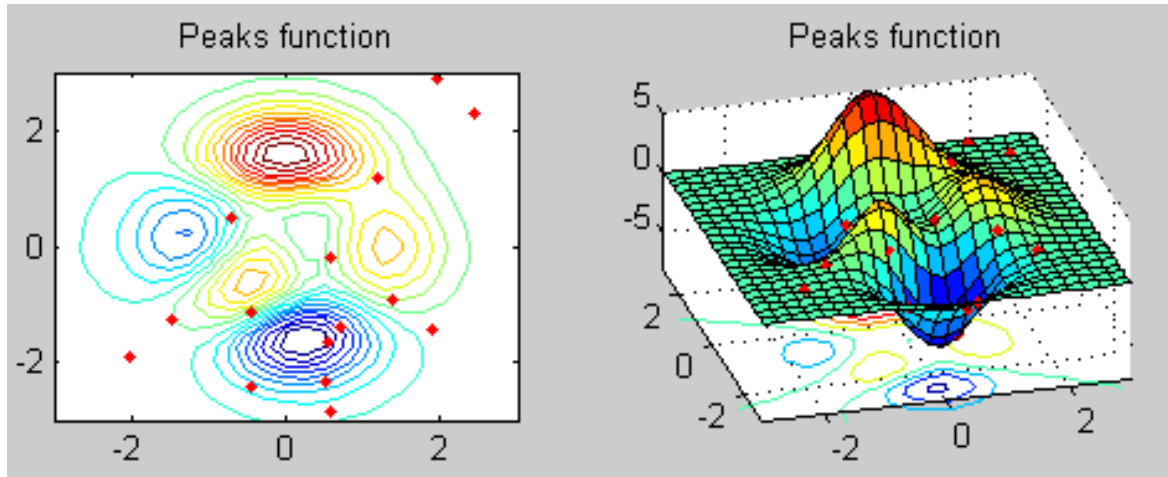


Figura 2.16 - 2ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a verificação da distribuição aleatória dos pontos pelo espaço de projeto definido e redução do espaço amostral

A Figura 2.17, onde se faz a análise gráfica que representa o valor mínimo da função objetivo, por meio da sua atualização a cada nova geração bem como demonstra o valor do melhor indivíduo da Função Pico.

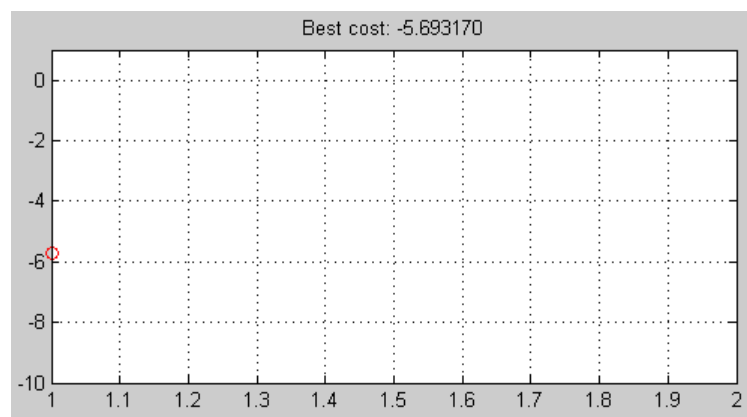


Figura 2.17 - 2ª Geração: Representação gráfica do valor mínimo da função objetivo e seu comportamento à cada geração

A Figura 2.18 já representa a distribuição da diferença vetorial por meio da diferença vetorial entre os indivíduos, implicando na seguinte relação: quanto maior a distância entre os indivíduos, maior será a diferença vetorial e conseqüentemente maior será a distância entre os indivíduos no espaço de projeto.

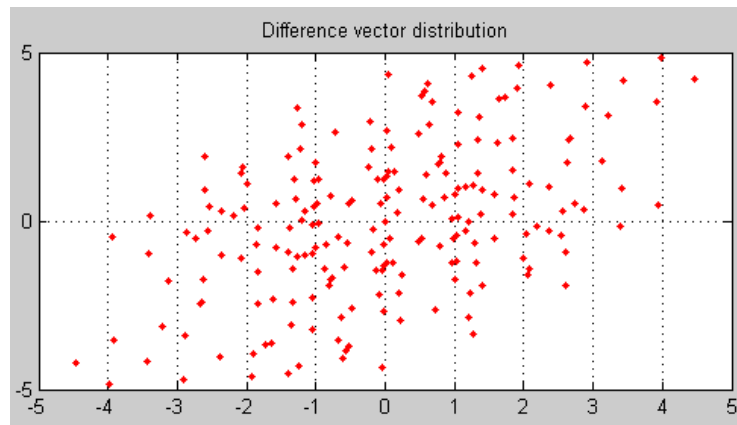


Figura 2.18 - 2ª Geração: Representação gráfica da distribuição da diferença vetorial entre os indivíduos no espaço de projeto à cada geração

Com a diminuição dessa diferença vetorial da distância entre os indivíduos, afirma-se que os mesmos estão convergindo para uma região com um ponto de mínimo em comum. A minimização da diferença vetorial, ou seja, esse tender a zero mostra que o método chegou num ponto de mínimo da função. Há também a distribuição randômica dos indivíduos no espaço de busca no intuito de facilitar a varredura do espaço de projeto para se alcançar regiões com pontos de mínimo, isso também constitui uma das características do Método de Evolução Diferencial.

Na Figura 2.19, na 5ª e 7ª geração, já se observa que nas proximidades da região azul escura surge uma pequena convergência dos indivíduos, bem como alguns outros indivíduos tentam vasculhar outras regiões à procura por um outro ponto melhor em que se localiza o mínimo global da Função Pico.

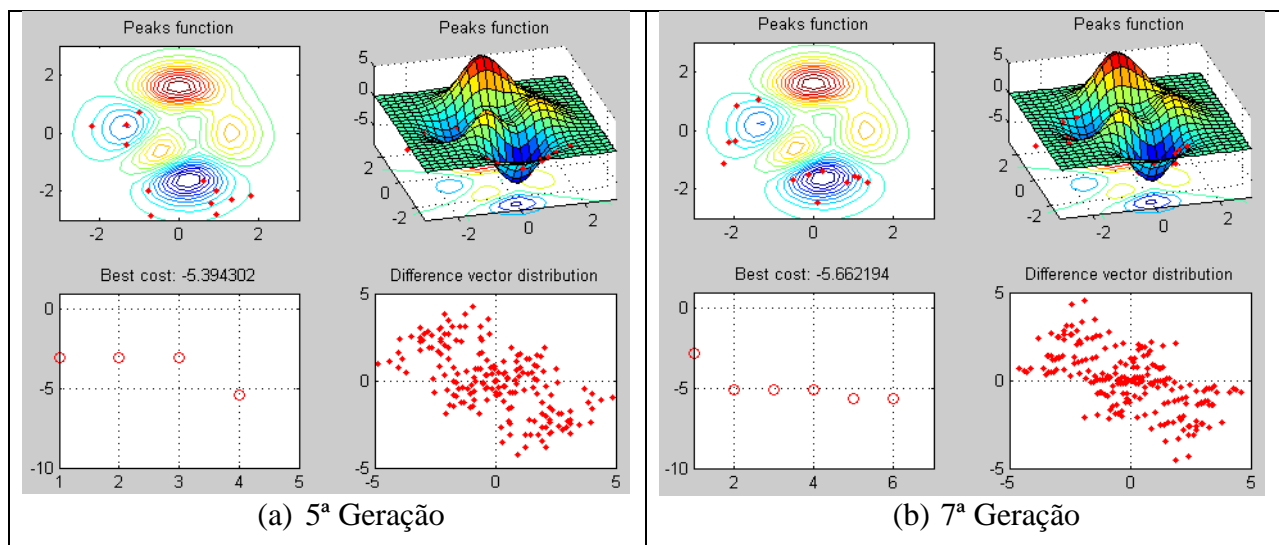


Figura 2.19 - Representação gráfica da evolução das gerações onde os pontos tendem a convergir para a região em que se encontra o mínimo global da função

A partir daí, se passa a encontrar, na Figura 2.20 (a), o caminho para a região onde está localizado o mínimo global, iniciando uma busca local por uma nova posição que gere o valor mínimo da função objetivo, ou seja, os outros indivíduos iniciam um processo migratório para a região que apresente o menor valor da função objetivo até a 10ª Geração mostrada, conforme a Figura 2.20 (b). Verifica-se aí uma conversão para a região próxima de zero, confirmado o processo de convergência, onde os vetores estão cada vez mais juntos uns dos outros, de modo que o ponto de mínimo se aproxima do seu caminho e do início da estabilização.

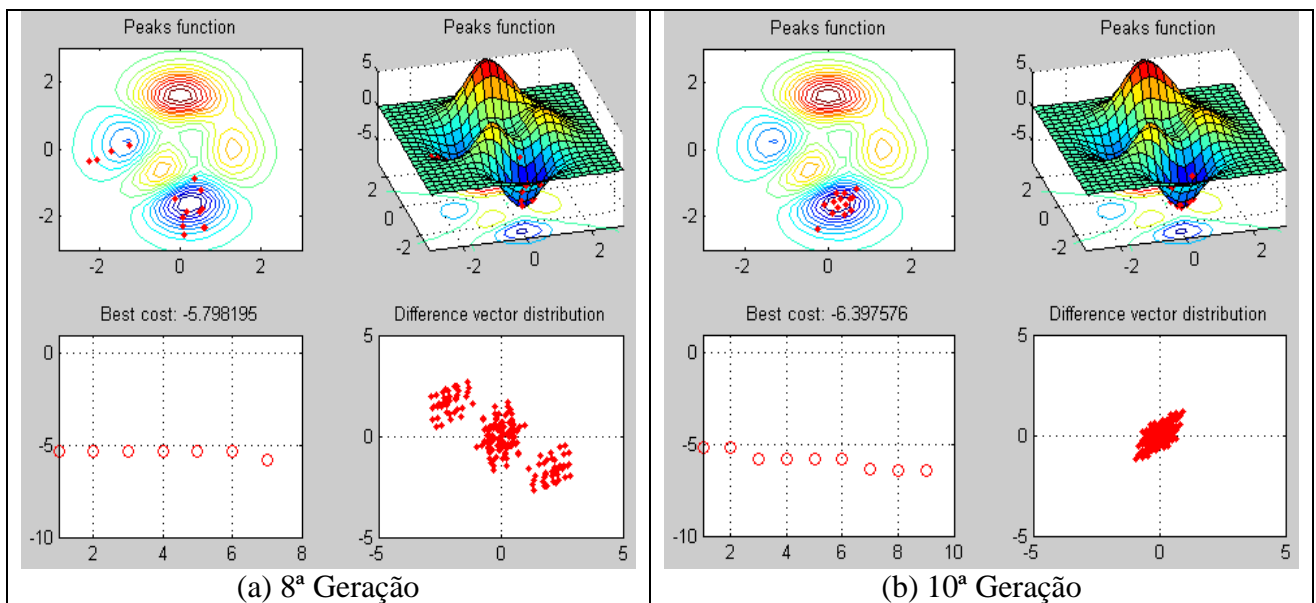


Figura 2.20 - Representação gráfica dos indivíduos quando se iniciam um processo migratório para a região que apresente o menor valor da função objetivo

Na Figura 2.21 se ilustra o posicionamento dos indivíduos no espaço de projeto, onde se verifica um único ponto vermelho ao centro da região azul escura, confirmando o caminho para a convergência da população do otimizador, através do valor mínimo da Função Objetivo.

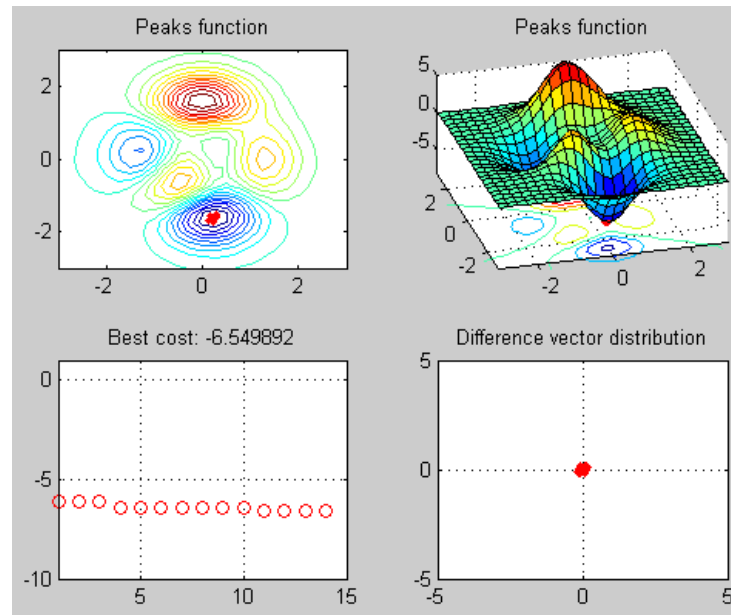


Figura 2.21 - 15ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência para a região que possui um ponto de mínimo

Por fim, a Figura 2.22, ilustra o posicionamento final dos indivíduos no espaço de projeto, onde se verifica um único ponto de aglomerados de indivíduos vermelhos ao centro da região azul escura, confirmando o caminho para a convergência da população do otimizador, através do valor mínimo da Função Objetivo.

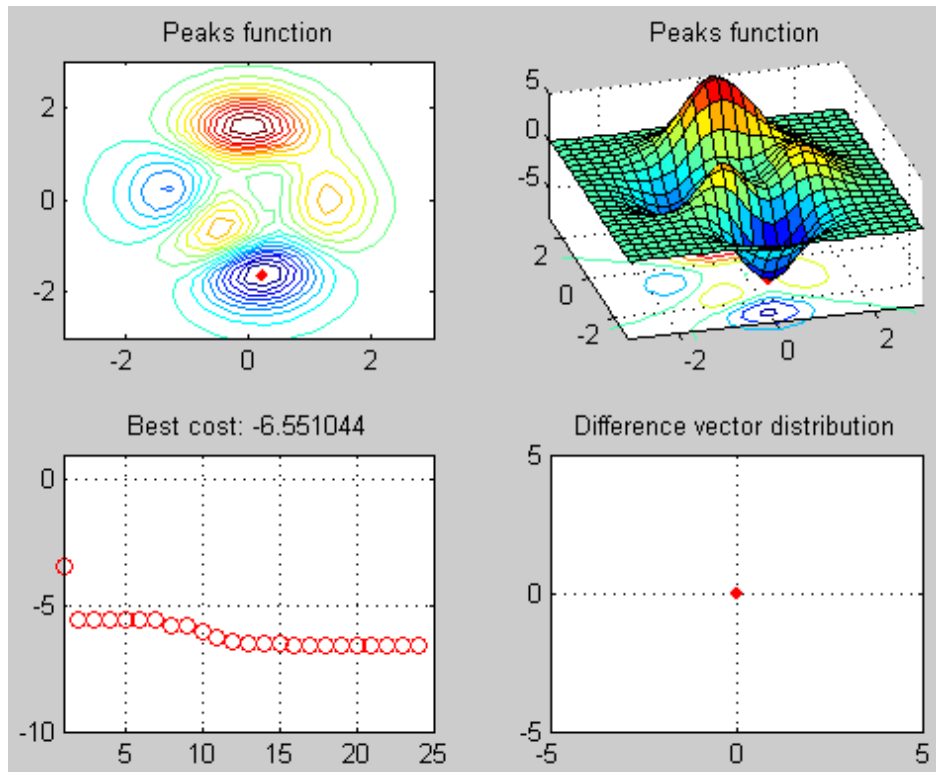


Figura 2.22 - 25ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência final para a região que possui um ponto de mínimo

2.12 VARIAÇÕES DE ALGORITMOS DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Dentre as variações existentes de Algoritmos de Evolução Diferencial estão:

- Evolução Diferencial com Mutação Trigonométrica;
- Evolução Diferencial com Busca Local com *Crossover* Adaptativo;
- Evolução Diferencial com Redução do Tamanho Populacional;
- Evolução Diferencial com Busca Local com Fator de Escala.

Na Evolução Diferencial com Mutação Trigonométrica em um único passo a solução avança na direção mais promissora dentre as disponibilizadas pelos indivíduos selecionados. Esse tipo de mutação tem como principal objetivo tornar a técnica mais “convergente”, assumindo o risco de cair em mínimos locais. A Equação (2.52) a seguir demonstra essa primeira variação de ED.

$$x'_{off} = \frac{x_r + x_s + x_t}{53} + (p_s - p_r)(x_r - x_s) + (p_t - p_s)(x_s - x_t) + (p_r - p_t)(x_t - x_r) \quad (2.52)$$

Em que,

x'_{off} : exemplo de equação da primeira variação de ED

x_r : variável do indivíduo de referência r ;

x_s : variável do indivíduo secundário s ;
 x_t : variável do indivíduo terciário t ;
 p_r : variável da população de referência r ;
 p_s : variável da população secundária s ;
 p_t : variável da população terciária t ;

Já a Evolução Diferencial com Busca Local com *Crossover* Adaptativo busca balancear a capacidade de exploração do método ED com a capacidade de convergência dos algoritmos de busca local. A Figura 2.23 a seguir demonstra a função *Simplex with Hills Climbing* (“subida à encosta”) em relação a esse tipo de variação do algoritmo ED que podem substituir a função de *crossover* padrão e melhorar o desempenho do algoritmo em alguns problemas.

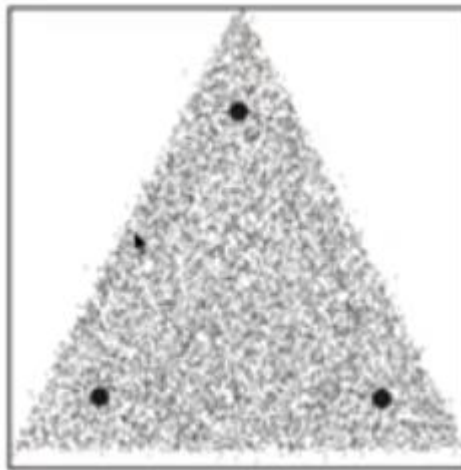


Figura 2.23 – Representação de funções como a “*Simplex with Hills Climbing*”

A variação da Evolução Diferencial com Redução do Tamanho Populacional tem o recurso de redução populacional, onde o número de indivíduos é reduzido a cada geração e a técnica é voltada para a resolução de problemas com grandes espaços de busca. Deve ser aliada a uma política elitista de escolher qual indivíduo que na solução anterior confere bons resultados e se manterão, devendo compor a próxima população tornando-a mais efetiva.

O algoritmo de Evolução Diferencial com Busca Local com Fator de Escala prevê a possibilidade de otimização dentro do processo de *crossover*, onde a ideia é fazer uso de algoritmos que modifiquem a prole de maneira que esta tenha um melhor valor de utilidade.

2.13 MÉTODO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS – AG (*GENETIC ALGORITHM, GA*)

O Método dos Algoritmos Genéticos – AG (*Genetic Algorithm, GA*) advém da Teoria de Darwin (1859), onde o processo de seleção tende a produzir membros mais bem

adaptados e eliminando os menos aptos. Baseia-se numa população de indivíduos (soluções), onde não há necessidade de um ponto de partida.

Em Morales (2009) apresenta-se um esquema de AG clássico conforme demonstrado na Figura 2.24 seguinte.

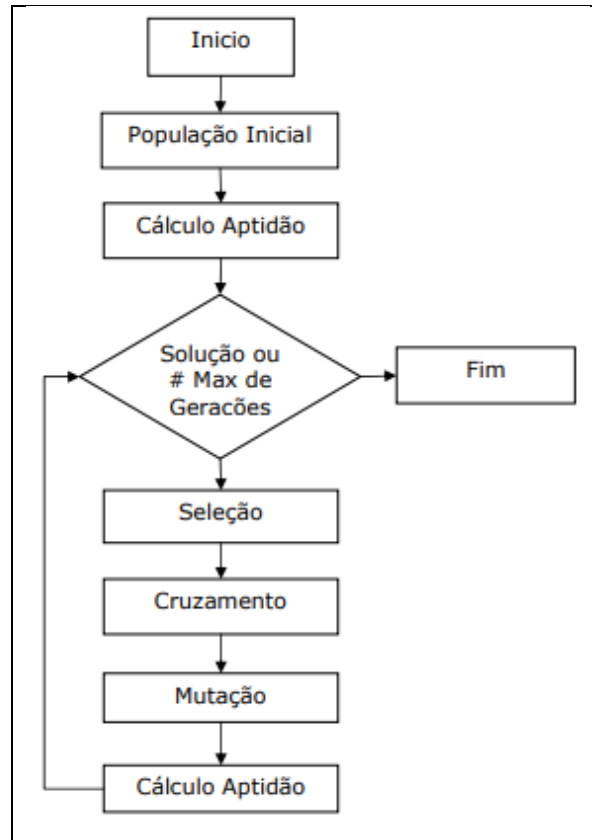


Figura 2.24 – Esquema clássico de um Algoritmo Genético (Morales, 2009)

A adaptação de elementos constituintes em diversos sistemas pode ocorrer de modo a incorrer em benefícios para o funcionamento do mesmo, em que a experiência científica tem mostrado que conjuntos de indivíduos, em um ambiente de incerteza, têm uma probabilidade maior de sobrevivência do que indivíduos vivendo isoladamente. Tendo em vista essa condição, o conceito de adaptação mostra-se essencial, observando que conjuntos de indivíduos, com base na vivência e no compartilhamento de experiência, tendem a se adaptar melhor ao meio ambiente do que indivíduos solitários.

Um sistema em adaptação possui um conjunto de modificadores estruturais, que podem ser chamados de operadores, os quais primam por agir repetidamente, em diversos estágios, sobre a estrutura de um sistema, de modo a adaptar os seus elementos a um dado ambiente. Tendo em vista que uma dada estrutura se comporta diferentemente em distintos ambientes, tal estrutura tem um maior ou menor nível de aptidão.

Assim, segundo Holland (1992) a finalidade de um plano adaptativo é produzir estruturas as quais apresentam um bom desempenho (aptidão) no ambiente em que estão inseridas, conforme pode ser observado na Tabela 2.4 a seguir.

Tabela 2.4 – Estruturas e operadores típicos (Holland, 1992)

Campo	Estruturas	Operadores
Genética	Cromossomos	Mutação, recombinação, etc.
Planejamento Econômico	Mixes de produtos	Atividades de produção
Controle	Políticas	Regra de Bayes, aproximação sucessiva, etc.
Psicologia fisiológica	Grupos de reuniões	Modificação de sinapse
Teoria dos Jogos	Estratégias	Regras para aproximação iterativa da estratégia ótima
Inteligência Artificial	Programas	Regras de aprendizagem

Um Algoritmo Genético busca simular o processo de evolução das espécies, trabalhando com uma população de indivíduos na qual cada um destes representa uma solução para um problema de busca. Em problemas de otimização, a aptidão de cada indivíduo simboliza o valor da função objetivo desta solução.

A estrutura de modificação das soluções consiste na troca de material genético entre os indivíduos, em que um gene armazena um valor numérico que representa parte da solução do problema em análise.

Ainda segundo Morales (2009) o AG consegue combinar de forma perfeita dois conceitos importantes para o sucesso de qualquer método de otimização, que é a exploração e a exploração. A exploração envolve a procura da solução ótima através de todo o espaço de busca. No caso, a exploração, remete ao fato de se aproveitar regiões mais aptas do espaço e procurar pela melhor solução nessas regiões. Permitindo-se somente essa condição da exploração, poderá haver muita perda de tempo e a busca se compara com aquela de uma busca aleatória. Sendo o método completamente exploração, por outro lado, o algoritmo poderia convergir para uma solução sub-ótima. O objetivo é sempre o equilíbrio envolvendo essas duas propriedades.

Em Goldberg (1989) cita-se quatro aspectos relacionados às metodologias clássicas de otimização que diferem os Algoritmos Genéticos:

- Os Algoritmos Genéticos trabalham com codificações das variáveis a serem otimizadas e não com as variáveis em si. De forma geral, é aceito que uma codificação se torna mais apropriada num determinado problema na medida em que representar o espaço de solução de forma mais natural;

- Os Algoritmos Genéticos não buscam somente uma única solução como em técnicas clássicas de otimização mas sim uma população de possíveis soluções para definir os resultados do problema. Esse paralelismo implícito constitui grande vantagem dos AG por trabalhar com múltiplas soluções, apesar de que esse paralelismo vai se perdendo na medida em que a população converge tendo em vista que a mesma pode apresentar muitos indivíduos iguais. O aumento do tamanho da população ou mesmo o aumento da taxa de mutação podem propiciar também o aumento da diversidade da população;

- Os Algoritmos Genéticos não trabalham com as derivadas ou outras informações auxiliares da função objetivo, mas sim unicamente com a informação da função a ser otimizada. Essa condição se torna essencialmente útil quando se trabalha com espaços complexos e que possam apresentar descontinuidades;

- Os Algoritmos Genéticos não empregam regras determinísticas e sim de transição probabilísticas, permitindo trabalhar com uma gama maior de problemas mediante um número mínimo de modificações do algoritmo original.

Os Algoritmos Genéticos são uma técnica robusta para problemas gerais de busca, os mesmos baseiam-se nos conceitos de evolução das espécies, trabalhando com uma população de soluções. Considerado um algoritmo modular que pode ser adaptado para problemas diferentes. Necessita do ajuste de um conjunto de parâmetros. Em linhas gerais, constitui uma abordagem intuitiva para problemas de otimização multi-objetivo. Lembrando que serão utilizadas aplicações do AG com as implementações em MATLAB[®] de Hashem Rizk (2020) para verificação de potencialidades de identificação de danos.

2.14 OS ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO: AS FUNÇÕES OBJETIVOS E FUNÇÕES TESTE OU DE CALIBRAÇÃO

Serão apresentadas algumas considerações gerais dos algoritmos de otimização e das Funções Objetivos – FO (*Objective Functions* – OF) além das Funções Teste ou de Calibração com o objetivo de fornecer as ideias sobre as diferentes situações que esses algoritmos estão sujeitos na busca pela resolução desses tipos de problemas.

2.14.1 Funções Objetivas – FO (*Objective Functions - OF*)

As Funções Objetivas – FO (*Objective Functions – OF*), também podendo ser denominadas de Funções Custo, são essenciais para o desenvolvimento de métodos mais eficazes de otimização, tanto em termos de minimização como também de maximização de determinados problemas. Nesse sentido, também para problemas de identificação de danos tem-se o máximo de cuidado na escolha da função objetivo que melhor se adequa, sendo necessário estudos específicos para guiar essas escolhas.

Cita-se em Izmailov e Solodov (2014), em seu volume 1, que por definição todo minimizador global também é minimizador local, mas não reciprocamente. Complementa também que é fácil observar que qualquer problema de maximização pode ser transformado em um problema de minimização equivalente, o que do ponto de vista matemático, não existe nenhuma diferença relevante entre os problemas de minimização e maximização: todos os resultados obtidos para uma classe de problemas podem ser estendidos para a outra classe sem dificuldade, sendo muito considerado problemas de minimização.

Já em seu trabalho do volume 2, Izmailov e Solodov (2012), citam que uma função pode admitir vários minimizadores globais, mas o valor ótimo (global) do problema, naturalmente, sempre é o mesmo. Cita ainda como exemplo, os métodos Newtonianos como possuidores (sob certas hipóteses, é claro) de convergência local com taxa rápida mas, em geral, não possuem a propriedade de convergência global, ao mesmo tempo preservando eficiência local. A propósito, métodos locais passam a ser verdadeiramente úteis somente quando acrescentados por alguma estratégia global, capaz de fornecer um ponto inicial adequado para um bom funcionamento do esquema local.

Por exemplo, para a Tabela 2.5 a seguir, são apresentadas algumas verificações de funções objetivo, onde na linha do item 1 é um caso em que foi inserido um Fator de Peso (w_i) inverso a cada item do somatório, sendo assim, a primeira diferença quadrática é dividido por 1, enquanto que a última diferença quadrática é dividido por 5. Na linha do item 2 foi utilizado um Fator de Peso (w_i) com característica inversamente linear para diferença quadrática, de maneira que seja proporcional a cinco termos. Na linha do item 3 foi utilizada uma sequência de pesos ponderados (w_i), cuja característica é a soma igual a unidade, e que multiplica cada dado experimental e cada valor analítico pela diferença quadrática. Na linha do item 4 cada diferença quadrática é multiplicada por um peso ponderado (w_i). Na linha do item 5 eleva-se ao quadrado cada diferença dos valores experimentais e analíticos

multiplicados por um peso ponderado (t_i). Na linha do item 6 eleva-se ao quadrado a função objetivo a cada diferença dos valores experimentais e analíticos.

Tabela 2.5 – Alguns modelos de Equação de Funções Objetivo

Item	Função Objetivo para MatLab [®]	Equação da Função Objetivo
1	$F = F + (u(k)*(1/k) - g(k)*(1/k))^2$	$F = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{Y_a^i}{i} - \frac{Y_m^i}{i} \right)^2$
2	$F = f + (u(k)*(60/(137*k)) - g(k)*(60/(137*k)))^2$	$F = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{Y_a^i * 60}{137 * i} - \frac{Y_m^i * 60}{137 * i} \right)^2$
3	$F = F + (u(k)*t(k) - g(k)*t(k))^2$	$F = \sum_{i=1}^5 (Y_a^i * t_i - Y_m^i * t_i)^2$
4	$F = F + t(k)*(u(k) - g(k))^2$	$F = \sum_{i=1}^5 t_i * (Y_a^i - Y_m^i)^2$
5	$F = F + [t(k)*(u(k) - g(k))]^2$	$F = \sum_{i=1}^5 [t_i * (Y_a^i - Y_m^i)]^2$
6	$F = [F + t(k)*(u(k) - g(k))]^2$	$F = \left[\sum_{i=1}^5 t_i * (Y_a^i - Y_m^i) \right]^2$

Comparando-se os valores das Funções Objetivo, além dos danos analisados, chega-se a Função Objetivo para MATLAB[®] do item 4 da Tabela 2.5, como uma melhor Equação para adição de pesos ponderados e a que pode ser utilizada no desenvolvimento de trabalhos que envolvem identificação de danos. Mesmo sem ser o menor valor para a Função Objetivo, houve outras funções que atingiram valores menores, a resposta se manteve coerente à região danificada.

Nesses exemplos, adicionando-se pesos à Função Objetivo Padrão é possível localizar a região danificada numa viga discretizada com dez elementos, por exemplo.

Como análise à parte, os elementos finitos da viga discretizada em dez elementos são menores que a discretização de cinco elementos, ocorrendo a identificação da região danificada, em vez de apenas um elemento aparecer danificado.

As regiões encontradas nessas análises como danificada, engloba o elemento simulado com dano na viga discretizada com cinco elementos, como exemplo dessas verificações.

Segundo Morales (2012), a Função Objetivo definida para o problema estudado deve ser adequada para facilitar o desempenho da meta-heurística, sendo que o problema poderia estar ou não restrito a algumas condições, apresentar um ou múltiplos ótimos locais e ser mono ou multi-objetivo.

A maior diferença da Função Objetivo para MATLAB[®] da Função Objetivo Padrão é a inclusão do termo de Peso. No caso da Função Objetivo Padrão, o peso pode ser igualado à unidade que não haverá alteração na equação, porém o acréscimo do Peso pode diferenciar a importância das informações medidas à Função Objetivo. Diversos outros valores para os pesos podem ser avaliados mas que não foram objetos de estudos dessa pesquisa.

2.14.2 Funções Teste ou Funções de Calibração – FT ou FC (*Test Functions* – TF)

As Funções Teste ou Funções de Calibração – FT ou FC (*Test Functions* – TF), também conhecidas como Paisagens Artificiais (*Artificial Landscapes*), são úteis para avaliar características de algoritmos de otimização, no que tange às questões de: taxa de convergência, precisão, robustez e desempenho geral.

Através dessas funções de testes ou de calibrações que são verificadas como as resoluções numéricas trabalham com suposições a respeito da função que passará pelo processo iterativo, no caso a função objetivo, sempre buscando garantir convergência e em um tempo viável.

No MATLAB[®], por exemplo, havendo algum erro, a busca pode se encerrar sem que nada seja retornado, ou quando retornam dados, os resultados não são os desejados. Nesse sentido, deve-se sempre começar com uma boa aproximação inicial.

Se componentes da solução possuem ordens de magnitude muito diferentes deve se considerar a possibilidade de escaloná-los e se necessário, quebrar o problema em problemas menores.

Um estudo minucioso da função deve ser realizado para ter certeza de que ela não retorna números complexos, evitando funções descontínuas e acrescentando restrições ao intervalo ao qual uma variável dessas funções, por exemplo podendo ser denominada como X conforme exemplos da Tabela 2.6, pertence adicionando alguma penalidade à função iterada. Algumas funções testes são apresentadas a seguir na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Exemplos de Funções Teste ou de Calibração para aplicação em MATLAB®

Item	Função Teste	Min. F(X)
1	FT_1 (Rosenbrock)	$F(X) = 100(X_1^2 - X_2)^2 + (1 - X_1)^2$ $-2,048 \leq X_{i \in (1, \dots, N)} \leq 2,048 \quad N = 2$ $X^* = [1 \ 1] \quad F(X^*) = 0$
2	FT_2 (Rastrigin)	$F(X) = 3N + \sum_{i=1}^N (X_i^2 - 3 \cos(2\pi X_i))$ $-5,12 \leq X_{i \in (1, \dots, N)} \leq 5,12 \quad N = 20$ $X_i^* = 0 \quad F(X^*) = 0$
3	FT_3 (Schwefel)	$F(X) = 418,9829N - \sum_{i=1}^N X_i \sin(\sqrt{ X_i })$ $-500 \leq X_{i \in (1, \dots, N)} \leq 500 \quad N = 10$ $X_i^* = 420,9687 \quad F(X^*) = 0$
4	FT_4 (Griewangk)	$F(X) = 1 + \sum_{i=1}^N \frac{X_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^N \cos\left(\frac{X_i}{\sqrt{i}}\right)$ $-600 \leq X_{i \in (1, \dots, N)} \leq 600 \quad N = 10$ $X_i^* = 0 \quad F(X^*) = 0$
5	FT_5 (Ackley)	$F(X) = 20 + e - 20e^{\left(-0,2\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N X_i^2}\right)} - e^{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N \cos(2\pi X_i)\right)}$ $-30 \leq X_{i \in (1, \dots, N)} \leq 30 \quad N = 30$ $X_i^* = 0 \quad F(X^*) = 0$

Como exemplo, a função de Rosenbrock é uma função de duas variáveis $f(x,y)$ cujo gráfico e algumas curvas de nível podem ser observados na Figura 2.25, a seguir. A função também é conhecida na literatura por "Função Banana ou *Banana Function*". Este nome é devido ao fato de suas curvas de nível lembrarem o formato de bananas. O único minimizador global da função de Rosenbrock definida nas análises gráficas a seguir é o ponto (1, 1) e, neste ponto, $f(x, y)$ é igual a zero.

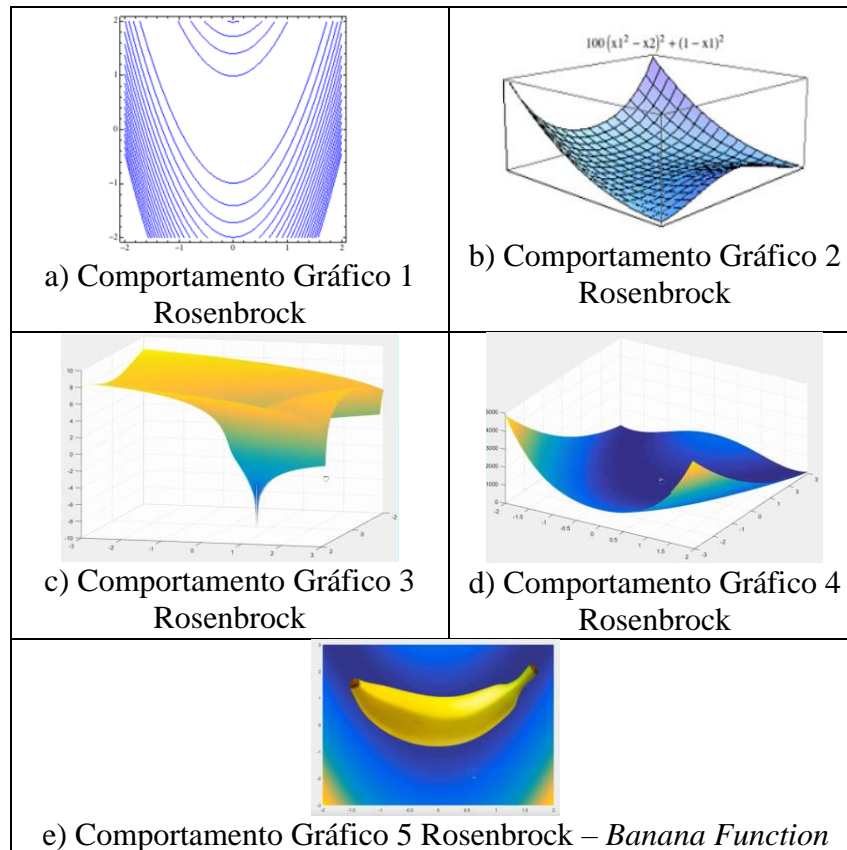
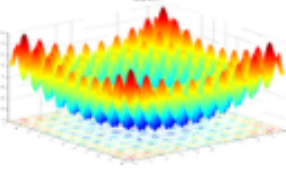
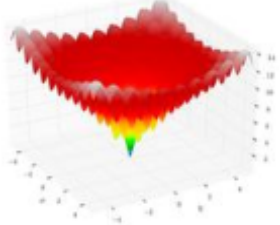
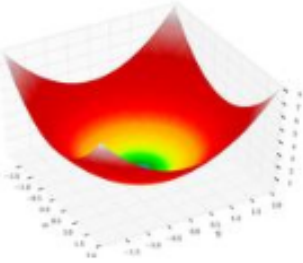
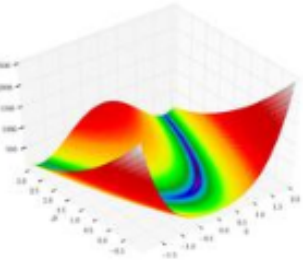
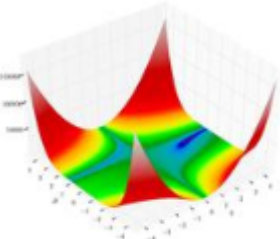


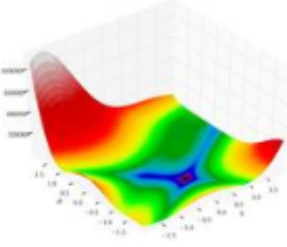
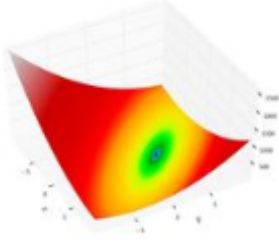
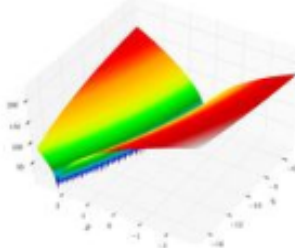
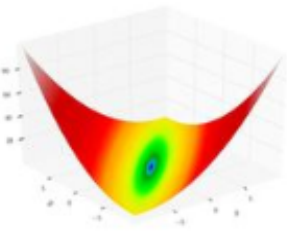
Figura 2.25 – Análise gráfica da função teste Rosenbrock

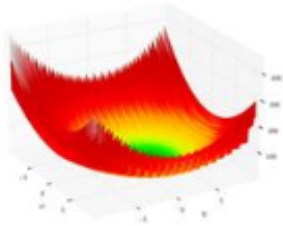
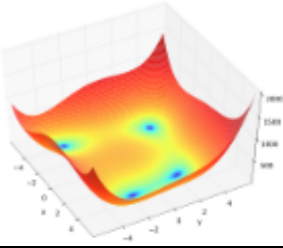

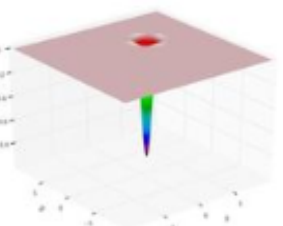
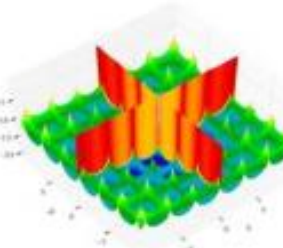
Em termos de comportamentos gerais e diversidade de Funções Teste ou de Calibração são apresentados a seguir na Tabela 2.7, Tabela 2.8 e Tabela 2.9 algumas condições das mesmas em termos de otimização para um único objetivo, otimização com restrições e otimização multiobjetivo (Fonte: Adaptado de “Test functions for optimization”, 2020. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Test_functions_for_optimization> Acesso em: 21 abr. 2020).

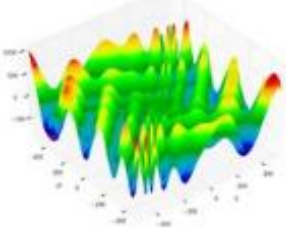
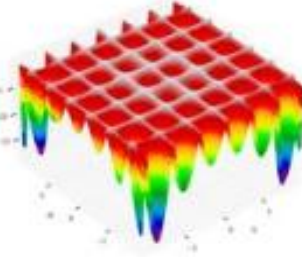
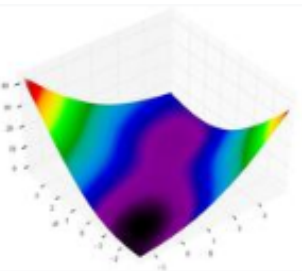
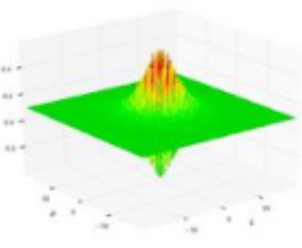
Tabela 2.7 – Funções Teste de otimização para um único objetivo

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
1	<p><i>Rastrigin Function</i></p> 	$f(x) = A_n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - A \cos(2\pi x_i)]$ <p>Onde: $A=10$</p>	$f(0, \dots, 0) = 0$ e $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
2	<p style="text-align: center;"><i>Ackley function</i></p> 	$f(x, y) = -20 \exp \left[-0.2 \sqrt{0.5(x^2 + y^2)} \right] - \exp \left[0.5(\cos 2\pi x + \cos 2\pi y) \right] + e + 20$	$f(0,0) = 0$ <p style="text-align: center;">e</p> $-5 \leq x, y \leq 5$
3	<p style="text-align: center;"><i>Sphere function</i></p> 	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$f(x_1, \dots, x_n) = f(0, \dots, 0) = 0$ <p style="text-align: center;">e</p> $-\infty \leq x_i \leq \infty$ $1 \leq i \leq n$
4	<p style="text-align: center;"><i>Rosenbrock function</i></p> 	$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2 \right]$	$Min = \begin{cases} n=2 \rightarrow f(1,1) = 0, \\ n=3 \rightarrow f(1,1,1) = 0, \\ n>3 \rightarrow f(\underbrace{1, \dots, 1}_{n \text{ vezes}}) = 0 \end{cases}$ <p style="text-align: center;">e</p> $-\infty \leq x_i \leq \infty$ $1 \leq i \leq n$
5	<p style="text-align: center;"><i>Beale function</i></p> 	$f(x, y) = (1.5 - x + xy)^2 + (2.25 - x + xy^2)^2 + (2.625 - x + xy^3)^2$	$f(3, 0.5) = 0$ <p style="text-align: center;">e</p> $-4.5 \leq x, y \leq 4.5$

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
6	<p data-bbox="368 309 576 376"><i>Goldstein–Price function</i></p> 	$f(x, y) = \left[1 + (x + y + 1)^2 (19 - 14x + 3x^2 - 14y + 6xy + 3y^2) \right] \left[30 + (2x - 3y)^2 (18 - 32x + 12x^2 + 48y + 36xy + 27y^2) \right]$	$f(0, -1) = 3$ <p style="text-align: center;">e</p> $-2 \leq x, y \leq 2$
7	<p data-bbox="416 707 528 775"><i>Booth Function</i></p> 	$f(x, y) = (x + 2y - 7)^2 + (2x + y - 5)^2$	$f(1, 3) = 0$ <p style="text-align: center;">e</p> $-10 \leq x, y \leq 10$
8	<p data-bbox="384 1106 552 1173"><i>Bukin function N.6</i></p> 	$f(x, y) = 100\sqrt{ y - 0.01x^2 } + 0.01 x + 10 $	$f(-10, 1) = 0$ <p style="text-align: center;">e</p> $-15 \leq x \leq 5, \\ -3 \leq y \leq 3$
9	<p data-bbox="416 1594 528 1662"><i>Matyas Function</i></p> 	$f(x, y) = 0.26(x^2 + y^2) - 0.48xy$	$f(0, 0) = 0$ <p style="text-align: center;">e</p> $-10 \leq x, y \leq 10$

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
10	<i>Lévi function N.13</i> 	$f(x, y) = \sin^2 3\pi x + (x-1)^2 (1 + \sin^2 3\pi y) + (y-1)^2 (1 + \sin^2 2\pi y)$	$f(1, 1) = 0$ e $-10 \leq x, y \leq 10$
11	<i>Himmelblau's Function</i> 	$f(x, y) = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2$	$\text{Min} = \begin{cases} f(3.0, 2.0) & = 0.0 \\ f(2.805118, 3.131312) & = 0.0 \\ f(-3.779310, -3.283186) & = 0.0 \\ f(3.584428, -1.848126) & = 0.0 \end{cases}$ e $-5 \leq x, y \leq 5$
12	<i>Three-hump camel function</i> 	$f(x, y) = 2x^2 - 1.05x^4 + \frac{x^6}{6} + xy + y^2$	$f(0, 0) = 0$ e $-5 \leq x, y \leq 5$
13	<i>Easom Function</i> 	$f(x, y) = -\cos(x)\cos(y)\exp\left(-\left((x-\pi)^2 + (y-\pi)^2\right)\right)$	$f(\pi, \pi) = -1$ e $-100 \leq x, y \leq 100$
14	<i>Cross-in-tray function</i> 	$f(x, y) = -0.0001 \left[\sin x \sin y \exp \left(\left 100 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\pi} \right \right) + 1 \right]^{0.1}$	$\text{Min} = \begin{cases} f(1.34941, -1.34941) & = -2.06261 \\ f(1.34941, 1.34941) & = -2.06261 \\ f(-1.34941, 1.34941) & = -2.06261 \\ f(-1.34941, -1.34941) & = -2.06261 \end{cases}$ e $-10 \leq x, y \leq 10$

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
15	<p><i>Eggholder function</i></p> 	$f(x, y) = -(y+47) \sin \sqrt{\frac{ x }{2} + (y+47)} - x \sin \sqrt{ x-(y+47) }$	$f(512, 404.2319) = -959.6407$ <p>e</p> $-512 \leq x, y \leq 512$
16	<p><i>Hölder table function</i></p> 	$f(x, y) = - \left \sin x \cos y \exp \left(\left 1 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\pi} \right \right) \right $	$\text{Min} = \begin{cases} f(8.05502, 9.66459) & = -19.2085 \\ f(-8.05502, 9.66459) & = -19.2085 \\ f(8.05502, -9.66459) & = -19.2085 \\ f(-8.05502, -9.66459) & = -19.2085 \end{cases}$ <p>e</p> $-10 \leq x, y \leq 10$
17	<p><i>McCormick function</i></p> 	$f(x, y) = \sin(x+y) + (x-y)^2 - 1.5x + 2.5y + 1$	$f(-0.54719, -1.54719) = -1.9133$ <p>e</p> $-1.5 \leq x \leq 4,$ $-3 \leq y \leq 4$
18	<p><i>Schaffer function N. 2</i></p> 	$f(x, y) = 0.5 + \frac{\sin^2(x^2 - y^2) - 0.5}{\left[1 + 0.001(x^2 + y^2) \right]^2}$	$f(0, 0) = 0$ <p>e</p> $-100 \leq x, y \leq 100$

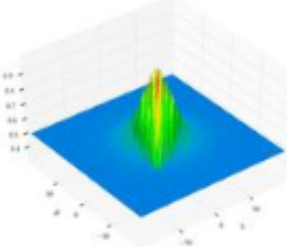
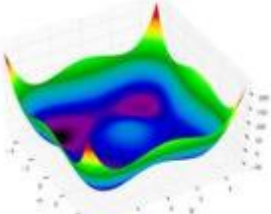
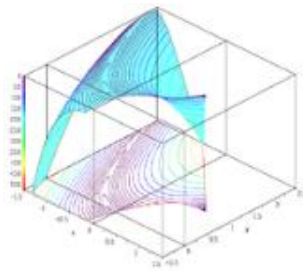
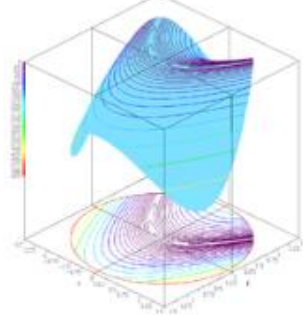
Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
19	<p>Schaffer function N. 4</p> 	$f(x, y) = 0.5 + \frac{\cos^2 \left[\sin(x^2 - y^2) \right] - 0.5}{\left[1 + 0.001(x^2 + y^2) \right]^2}$	$\text{Min} = \begin{cases} f(0, 1.25313) & = 0.292579 \\ f(0, -1.25313) & = 0.292579 \end{cases}$ <p>e</p> $-100 \leq x, y \leq 100$
20	<p>Styblinski–Tang function</p> 	$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^4 - 16x_i^2 + 5x_i}{2}$	$-39.16617n < (-2.903534, \dots, -2.903534) < -39.16616n$ <p>e</p> $-5 \leq x_i \leq 5, \\ 1 \leq i \leq n \dots$

Tabela 2.8 – Funções Teste de otimização com restrições

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
1	<p>Rosenbrock function constrained with a cubic and a line</p> 	$f(x, y) = (1-x)^2 + 100(y-x^2)^2$ <p>Sujeito a:</p> $(x-1)^3 - y + 1 \leq 0 \quad \text{e} \quad x + y - 2 \leq 0$	$f(1.0, 1.0) = 0$ <p>e</p> $-1.5 \leq x \leq 1.5, \\ -0.5 \leq y \leq 2.5$
2	<p>Rosenbrock function constrained to a disk</p> 	$f(x, y) = (1-x)^2 + 100(y-x^2)^2$ <p>Sujeito a:</p> $x^2 + y^2 \leq 2$	$f(1.0, 1.0) = 0$ <p>e</p> $-1.5 \leq x \leq 1.5, \\ -1.5 \leq y \leq 1.5$

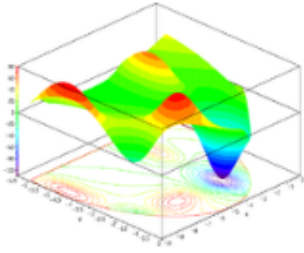
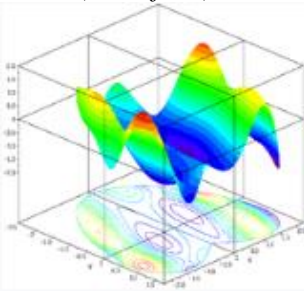
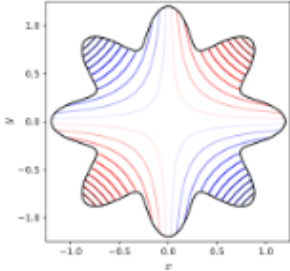
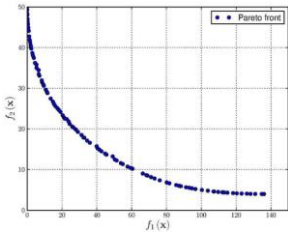
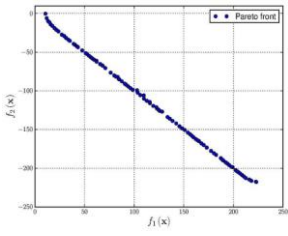
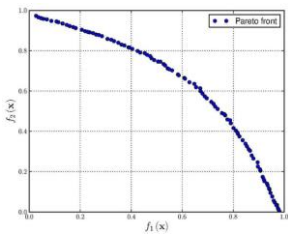
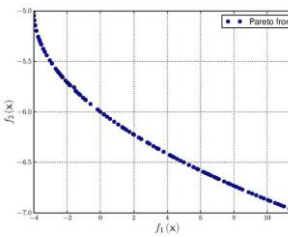
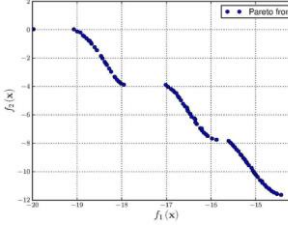
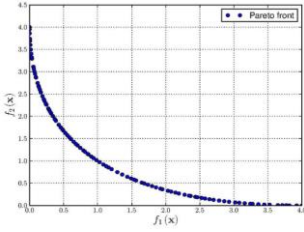
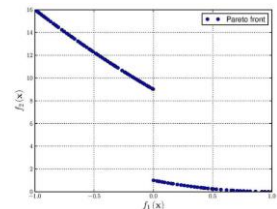
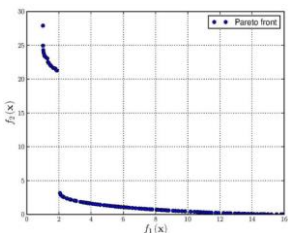
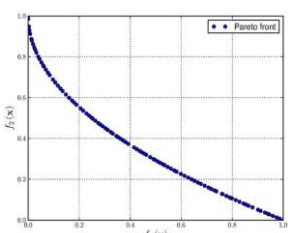
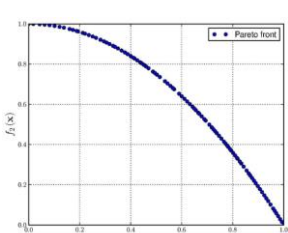
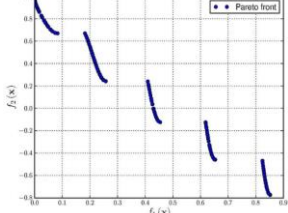
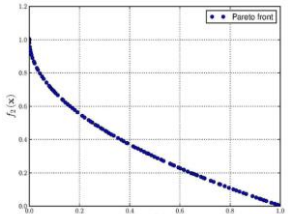
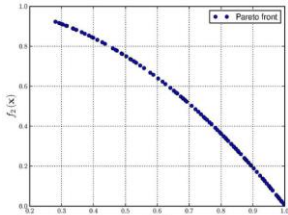
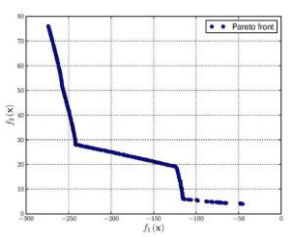
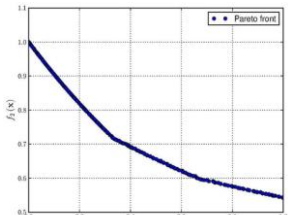
Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Mínimo Global e Domínio de Busca
3	<p><i>Mishra's Bird function - constrained</i></p> 	$f(x, y) = \sin(y)e^{\left[\frac{1-\cos(x)}{2}\right]} + \cos(x)e^{\left[\frac{1-\sin(y)}{2}\right]} + (x-y)^2$ <p>Sujeito a:</p> $(x+5)^2 + (y+5)^2 < 25$	$f(-3.1302468, -1.5821422) = -106.7645367$ e $-10 \leq x \leq 0,$ $-6.5 \leq y \leq 0$
4	<p><i>Townsend function (modified)</i></p> 	$f(x, y) = -\left[\cos\left((x-0.1)y\right)\right]^2 - x \sin(3x + y)$ <p>Sujeito a:</p> $x^2 + y^2 < \left[2 \cos t - \frac{1}{2} \cos 2t - \frac{1}{4} \cos 3t - \frac{1}{8} \cos 4t\right]^2 + [2 \sin t]^2$ <p>Onde: $t = A \tan 2(x, y)$</p>	$f(2.0052938, 1.1944509) = -2.0239884$ e $-2.25 \leq x \leq 2.5,$ $-2.5 \leq y \leq 1.75$
5	<p><i>Simionescu function</i></p> 	$f(x, y) = 0.1xy$ <p>Sujeito a:</p> $x^2 + y^2 \leq \left[r_x + r_y \cos\left(n \arctan \frac{x}{y}\right) \right]^2$ <p>Onde: $r_x = 1, r_y = 0.2$ e $n = 8$</p>	$f(\pm 0.84852813, \mp 0.84852813) = -0.072$ e $-1.25 \leq x, y \leq 1.25$

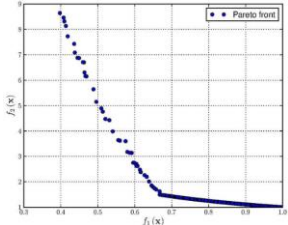
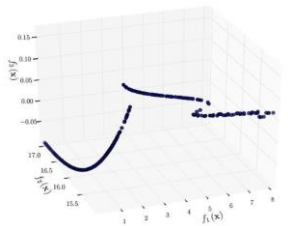
Tabela 2.9 – Funções Teste de otimização multiobjetivo

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Restrições e Domínio de Busca
1	<p><i>Binh and Korn function</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = 4x^2 + 4y^2 \\ f_2(x, y) = (x-5)^2 + (y-5)^2 \end{cases}$	$s.t. = \begin{cases} g_1(x, y) = (x-5)^2 + y^2 \leq 25 \\ g_2(x, y) = (x-8)^2 + (y+3)^2 \geq 7.7 \end{cases}$ e $0 \leq x \leq 5,$ $0 \leq y \leq 3$

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Restrições e Domínio de Busca
2	<p><i>Chankong and Haines function</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = 2 + (x-2)^2 + (y-1)^2 \\ f_2(x, y) = 9x - (y-1)^2 \end{cases}$	$\text{s.t.} = \begin{cases} g_1(x, y) = x^2 + y^2 \leq 225 \\ g_2(x, y) = x - 3y + 10 \leq 0 \end{cases}$ <p>e</p> $-20 \leq x, y \leq 20$
3	<p><i>Fonseca–Fleming function</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right] \\ f_2(x) = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^n \left(x_i + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right] \end{cases}$	<p>-</p> <p>e</p> $-4 \leq x_i \leq 4, \\ 1 \leq i \leq n$
4	<p><i>Test function 4</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = x^2 - y \\ f_2(x, y) = -0.5x - y - 1 \end{cases}$	$\text{s.t.} = \begin{cases} g_1(x, y) = 6.5 - \frac{x}{6} - y \geq 0 \\ g_2(x, y) = 7.5 - 0.5x - y \geq 0 \\ g_3(x, y) = 30 - 5x - y \geq 0 \end{cases}$ <p>e</p> $-7 \leq x, y \leq 4$
5	<p><i>Kursawe function</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = \sum_{i=1}^2 \left[-10 \exp\left(-0.2 \sqrt{x_i^2 + x_{i+1}^2}\right)\right] \\ f_2(x) = \sum_{i=1}^3 \left[x_i ^{0.8} + 5 \sin(x_i^2)\right] \end{cases}$	<p>-</p> <p>e</p> $-5 \leq x_i \leq 5, \\ 1 \leq i \leq 3$

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Restrições e Domínio de Busca
6	<p><i>Schaffer function N. 1</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = x^2 \\ f_2(x) = (x-2)^2 \end{cases}$	<p>- e $-A \leq x \leq A$</p> <p>Os valores de A de 10 a 10^5 foram bem sucedidos. Valores mais altos de A aumentam a dificuldade do problema.</p>
7	<p><i>Schaffer function N. 2</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = \begin{cases} -x, & \text{se } x \leq 1 \\ x-2, & \text{se } 1 < x \leq 3 \\ 4-x, & \text{se } 3 < x \leq 4 \\ x-4, & \text{se } x > 4 \end{cases} \\ f_2(x) = (x-5)^2 \end{cases}$	<p>- e $-5 \leq x \leq 10$</p>
8	<p><i>Poloni's two objective function</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = [1 + (A_1 - B_1(x, y))^2 + (A_2 - B_2(x, y))^2] \\ f_2(x, y) = (x+3)^2 + (y+1)^2 \end{cases}$ $\text{Onde} = \begin{cases} A_1 = 0.5 \sin(1) - 2 \cos(1) + \sin(2) - 1.5 \cos(2) \\ A_2 = 1.5 \sin(1) - \cos(1) + 2 \sin(2) - 0.5 \cos(2) \\ B_1(x, y) = 0.5 \sin(x) - 2 \cos(x) + \sin(y) - 1.5 \cos(y) \\ B_2(x, y) = 1.5 \sin(x) - \cos(x) + 2 \sin(y) - 0.5 \cos(y) \end{cases}$	<p>- e $-\pi \leq x, y \leq \pi$</p>
9	<p><i>Zitzler-Deb-Thiele's function N. 1</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = x_i \\ f_2(x) = g(x) h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 1 + \frac{9}{29} \sum_{i=2}^{30} x_i \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} \end{cases}$	<p>- e $0 \leq x_i \leq 1,$ $1 \leq i \leq 30$</p>
10	<p><i>Zitzler-Deb-Thiele's function N. 2</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = x_i \\ f_2(x) = g(x) h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 1 + \frac{9}{29} \sum_{i=2}^{30} x_i \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)} \right)^2 \end{cases}$	<p>- e $0 \leq x_i \leq 1,$ $1 \leq i \leq 30$</p>

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Restrições e Domínio de Busca
11	<p><i>Zitzler–Deb–Thiele's function N. 3</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = x_1 \\ f_2(x) = g(x)h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 1 + \frac{9}{29} \sum_{i=2}^{30} x_i \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)}\right) \sin(10\pi f_1(x)) \end{cases}$	<p>- e $0 \leq x_i \leq 1,$ $1 \leq i \leq 30$</p>
12	<p><i>Zitzler–Deb–Thiele's function N. 4</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = x_1 \\ f_2(x) = g(x)h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 91 + \sum_{i=2}^{10} (x_i^2 - 10 \cos(4\pi x_i)) \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} \end{cases}$	<p>- e $0 \leq x_1 \leq 1,$ $-5 \leq x_i \leq 5,$ $2 \leq i \leq 10$</p>
13	<p><i>Zitzler–Deb–Thiele's function N. 6</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = 1 - \exp(-4x_1) \sin^6(6\pi x_1) \\ f_2(x) = g(x)h(f_1(x), g(x)) \\ g(x) = 1 + 9 \left[\frac{\sum_{i=2}^{10} x_i}{9} \right]^{10.25} \\ h(f_1(x), g(x)) = 1 - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)} \right)^2 \end{cases}$	<p>- e $0 \leq x_i \leq 1,$ $1 \leq i \leq 10$</p>
14	<p><i>Osyczka and Kundu function</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x) = -25(x_1-2)^2 - (x_2-2)^2 - (x_3-1)^2 - (x_4-4)^2 - (x_5-1)^2 \\ f_2(x) = \sum_{i=1}^5 x_i^2 \end{cases}$	$s.t. = \begin{cases} g_1(x) = x_1 + x_2 - 2 \geq 0 \\ g_2(x) = 6 - x_1 - x_2 \geq 0 \\ g_3(x) = 2 - x_2 + x_1 \geq 0 \\ g_4(x) = 2 - x_1 + 3x_2 \geq 0 \\ g_5(x) = 4 - (x_3 - 3)^2 - x_4 \geq 0 \\ g_6(x) = (x_5 - 3)^2 + x_6 - 4 \geq 0 \end{cases}$ <p>e $0 \leq x_1, x_2, x_6 \leq 10,$ $1 \leq x_3, x_5 \leq 5,$ $0 \leq x_4 \leq 6$</p>
15	<p><i>CTP1 function (2 variables)</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = x \\ f_2(x, y) = (1+y) \exp\left(-\frac{x}{1+y}\right) \end{cases}$	$s.t. = \begin{cases} g_1(x, y) = \frac{f_2(x, y)}{0.858 \exp(-0.541 f_1(x, y))} \geq 1 \\ g_2(x, y) = \frac{f_2(x, y)}{0.728 \exp(-0.295 f_1(x, y))} \geq 1 \end{cases}$ <p>e $0 \leq x, y \leq 1$</p>

Item	Identificação/ Plotagem	Formulações	Restrições e Domínio de Busca
16	<p><i>Constr-Ex problem</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = x \\ f_2(x, y) = \frac{1+y}{x} \end{cases}$	$\text{s.t.} = \begin{cases} g_1(x, y) = y + 9x \geq 6 \\ g_2(x, y) = -y + 9x \geq 1 \end{cases}$ <p>e</p> $0.1 \leq x \leq 1, \\ 0 \leq y \leq 5$
17	<p><i>Viennet function</i></p> 	$\text{Minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = 0.5(x^2 + y^2) + \sin(x^2 + y^2) \\ f_2(x, y) = \frac{(3x - 2y + 4)^2}{8} + \frac{(x - y + 1)^2}{27} + 15 \\ f_3(x, y) = \frac{1}{x^2 + y^2 + 1} - 1.1 \exp(-(x^2 + y^2)) \end{cases}$	<p>-</p> <p>e</p> $-3 \leq x, y \leq 3$

2.14.3 Noções de Erro Absoluto (EA) e Erro Relativo (ER)

Essas noções da quantificação dos erros são uma questão fundamental da solução de um dado problema. Para tanto, é necessário definir medidas de erros (ou de exatidão). As medidas de erro mais utilizadas são as de Erro Absoluto (EA) e de Erro Relativo (ER).

Considerando o “Valor Verdadeiro = Aproximação + Erro Absoluto”, cita-se que o erro numérico é igual à discrepância entre o valor verdadeiro e a aproximação, denominado como Erro Absoluto (EA) e apresentado na Equação (2.53).

$$EA = |V_v - V_A| \quad (2.53)$$

Em que:

V_v : Valor Verdadeiro

V_A : Valor Aproximado

Já o Erro Relativo (ER) trata-se da razão entre o Erro Absoluto (EA) e o Valor Verdadeiro (V_v) conforme Equação (2.54) seguinte.

$$ER = \frac{EA}{V_v} \quad (2.54)$$

Para determinação do Erro Relativo Percentual ($ER\% = \varepsilon_t$) utiliza-se a Equação (2.55) a seguir.

$$\varepsilon_t = \frac{V_v - V_A}{V_A} \cdot 100\% \quad (2.55)$$

2.14.4 Função Objetivo – Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

Trata-se de uma técnica de otimização matemática denominada de Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), ou mesmo Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e em inglês *Ordinary Least Squares* (OLS) que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (tais diferenças são chamadas resíduos), conforme demonstrado na Figura 2.26 a seguir.

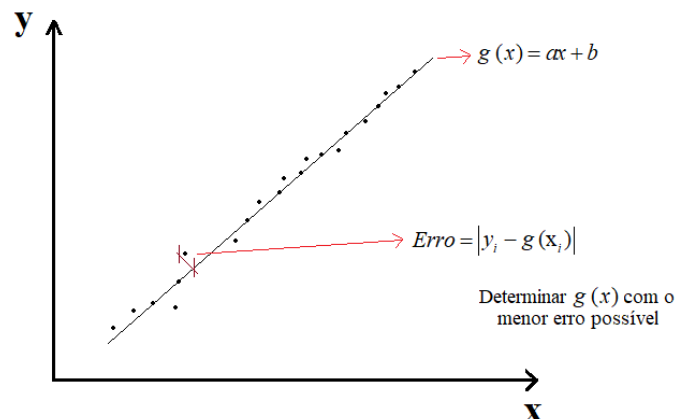


Figura 2.26 – Representação gráfica do comportamento do MMQ

Considerando a Equação (2.56) a seguir para definição da minimização do MMQ para determinar $g(x)$ com o menor erro possível.

$$g(x) = ax + b \quad , \quad \text{se} \quad \text{Erro} = \sum_{i=1}^n |y_i - g(x_i)| \quad (2.56)$$

A determinação do mínimo através do menor erro possível alcança-se a Equação (2.57) seguinte.

$$\text{MinErro} = \sum_{i=1}^n (y_i - g(x_i))^2 \rightarrow \sum_{i=1}^n (y_i - a x_i - b)^2 \quad (2.57)$$

Considerando a Equação (2.58) a seguir.

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad (2.58)$$

Substituindo a Equação (2.57) na Equação (2.58) em relação a “a” obtém-se.

$$\frac{\partial \sum (y_i - a x_i - b)^2}{\partial a} \quad (2.59)$$

Fazendo a derivada parcial da Equação (2.59) alcança-se a Equação (2.60) a seguir.

$$\begin{aligned} 2 \sum (y_i - a x_i - b) x_i = 0 &\rightarrow \sum x_i y_i - a \sum x_i^2 - b \sum x_i = 0 \rightarrow \\ &\rightarrow a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i \end{aligned} \quad (2.60)$$

Agora substituindo a Equação (2.57) na Equação (2.58) em relação a “b” obtém-se.

$$\frac{\partial \sum (y_i - a x_i - b)^2}{\partial b} \quad (2.61)$$

E trabalhando a derivada parcial da Equação (2.61) alcança-se a Equação (2.62) a seguir.

$$\begin{aligned} 2 \sum (y_i - a x_i - b)(-1) = 0 &\rightarrow \sum y_i - a \sum x_i - \sum b = 0 \rightarrow \sum y_i - a \sum x_i - nb = 0 \rightarrow \\ &\rightarrow a \sum x_i + nb = \sum y_i \end{aligned} \quad (2.62)$$

Resolvendo as Equações (2.60) e (2.62) primeiramente isolando “b” em (2.62) resulta na Equação (2.63).

$$\begin{cases} a \sum x^2 + b \sum x = \sum x y \\ a \sum x + nb = \sum y \end{cases} \quad (2.63)$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

Substituindo a Equação (2.63) na Equação (2.60) obtém-se a Equação (2.64) seguinte.

$$\begin{aligned} a \sum x^2 + \left[\frac{\sum y - a \sum x}{n} \right] \sum x = \sum x y &\rightarrow a \sum x^2 + \frac{\sum y - \sum x}{n} - \frac{a(\sum x)^2}{n} = \sum x y \quad (\text{MMC}) \\ \rightarrow n a \sum x^2 + \sum x \sum y - a(\sum x)^2 = n \sum x y &\rightarrow a(n \sum x^2 - (\sum x)^2) = n \sum x y - \sum x \sum y \end{aligned}$$

$$a = \frac{n \sum x y - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.64)$$

Isolando “a” na Equação (2.62) resulta a Equação (2.63).

$$\begin{cases} a \sum x^2 + b \sum x = \sum x y \\ a \sum x + nb = \sum y \end{cases}$$

$$a = \frac{\sum y - nb}{\sum x} \quad (2.65)$$

Substituindo a Equação (2.65) na Equação (2.60) obtém-se a Equação (2.66).

$$\left[\frac{\sum y - nb}{\sum x} \right] \sum x^2 + b \sum x = \sum x y \rightarrow \frac{\sum y \sum x^2}{\sum x} - \frac{nb \sum x^2}{\sum x} + b \sum x = \sum x y \quad (\text{MMC})$$

$$\rightarrow \sum y \sum x^2 - nb \sum x^2 + b(\sum x)^2 = \sum x \sum x y \rightarrow b[(\sum x)^2 - n \sum x^2] = \sum x \sum x y - \sum y \sum x^2$$

$$b = \frac{\sum x \sum x y - \sum y \sum x^2}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \quad (2.66)$$

2.14.4.1 Exemplo de Aplicação do MMQ

No intuito de verificar a aplicabilidade da dedução do MMQ, será demonstrado um exemplo de aplicação no intuito de determinar a reta que melhor se ajusta aos valores estabelecidos para x e y, conforme demonstrado na Figura 2.27 a seguir.

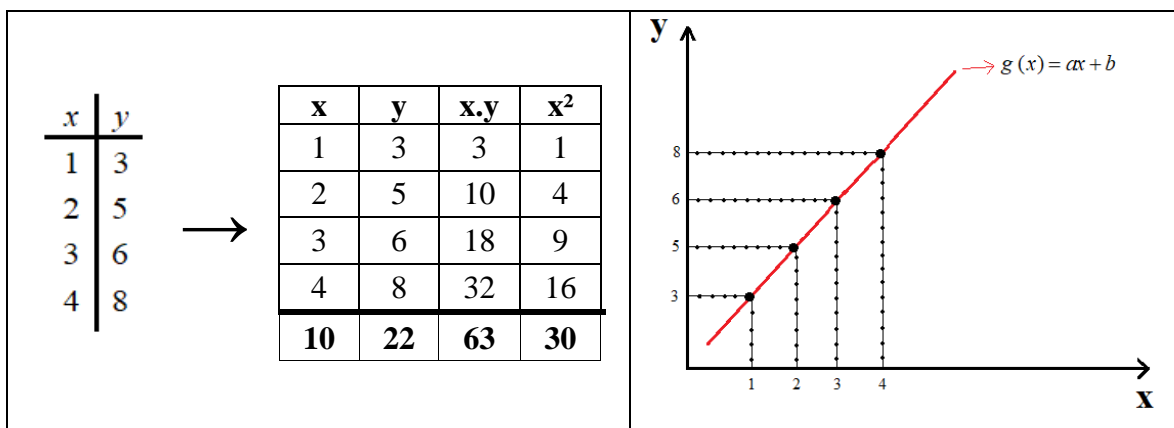


Figura 2.27 – Dados e análise gráfica para aplicação do MMQ

Substituindo os dados da Figura 2.27 na Equação (2.64) encontra-se o valor de “a” seguinte.

$$a = \frac{n \sum x y - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \rightarrow a = \frac{4.63 - 10.22}{4.30 - (10)^2} \rightarrow a = 1,6$$

Agora substituindo os dados da Figura 2.27 na Equação (2.66) encontra-se o valor de “a” seguinte.

$$b = \frac{\sum x \sum x y - \sum y \sum x^2}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \rightarrow b = \frac{10.63 - 22.30}{(10)^2 - 4.30} \rightarrow b = 1,5$$

Aplicando os valores obtidos de “a” e “b” na equação $g(x) = ax + b$ resulta em $g(x) = 1,6x + 1,5$, ou seja, aplicando por exemplo $g(3) = 1,6 \cdot 3 + 1,5$ resulta no valor de 6 que observando os dados de exemplo apresentados na Figura 2.27 mostram a verificação exata das demonstrações realizadas quando x for igual a 3, o y valerá 6.

2.15 CÁLCULO ANALÍTICO DAS FREQUÊNCIAS

Para o desenvolvimento analítico e a correspondente obtenção das frequências foi utilizada a equação da viga de Euler Bernoulli (Equação (2.67)) considerando apenas as parcelas correspondentes à rigidez e à massa, não sendo considerado a parcela do amortecimento nem a força externa, já que o objetivo é determinar a frequência fundamental (vibração livre).

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^4} = 0 \quad (2.67)$$

Onde:

EI : rigidez à flexão;

$y(x, t)$: posição;

\bar{m} : massa por unidade de comprimento.

É uma equação baseada na teoria simples de flexão conhecida como Teoria de Bernoulli-Euler, a qual considera as seguintes características:

- A viga tem uma seção transversal uniforme ao longo do seu eixo longitudinal;
- A viga é composta de material linear, homogêneo, isotrópico e elástico;
- As dimensões da seção transversal da viga são consideravelmente pequenas em relação ao comprimento total da viga;
- Inércia rotacional e deformação por cisalhamento não são consideradas;

- Não existem solicitações axiais;
- O centro de cortante coincide com o centro de massa;
- O plano de vibração (vertical), é simétrico em relação a viga;
- A seção transversal plana da viga permanece plana durante as deformações por flexão.

Considerando a viga intacta (sem a presença da massa móvel), o cálculo das frequências naturais de uma viga biapoiada pode ser obtido pela Equação (2.68) da equação diferencial da viga de Euler Bernoulli.

$$f = \frac{\lambda_i}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad (2.68)$$

Em que:

λ_i : parâmetro adimensional que depende do modo que deseja ser calculado e da condição de apoio;

E: Módulo de Elasticidade;

I: Momento de Inércia;

L: comprimento da viga entre apoios;

\bar{m} : massa por unidade de comprimento.

Utilizando a Equação (2.69).

$$\lambda_i = n\pi \rightarrow \lambda_i^2 = (n\pi)^2 \quad (2.69)$$

E por fim a Equação (2.70).

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.70)$$

As frequências analíticas da viga intacta são demonstradas na Tabela 2.10 seguinte.

Tabela 2.10 - Resultados para as frequências analíticas da Viga Intacta sem adição de massa móvel

i	λ_i	m (kg/mL)	ρ (kg/m³)	E (GPa)	I_x (m⁴)	L (m)	A (m²)	f (Hz)
1	3,1415927	1,396,E+02	7.800,00	200,0000	6,874,E-04	6,00	1,790,E-02	43,298
2	6,2831854	1,396,E+02	7.800,00	200,0000	6,874,E-04	6,00	1,790,E-02	173,190
3	9,4247781	1,396,E+02	7.800,00	200,0000	6,874,E-04	6,00	1,790,E-02	389,678
4	12,5663708	1,396,E+02	7.800,00	200,0000	6,874,E-04	6,00	1,790,E-02	692,761
5	15,7079635	1,396,E+02	7.800,00	200,0000	6,874,E-04	6,00	1,790,E-02	1082,438

Com isso, as frequências obtidas da viga intacta são demonstradas na Tabela 2.11 seguinte.

Tabela 2.11 - Resultados para Análises da Viga Intacta sem adição de massa móvel Experimental e demais métodos

Item	Análises	Métodos / Ferramentas	Frequências Naturais Modo 1 (Hz)
1	Numérica (MEF)	ABAQUS [®]	43,809
2	Analítica	EULER BERNOULLI	43,298
3	Experimental	EXPERIMENTAL	44,389

Já com a presença da massa móvel, foi utilizado o método dos resíduos ponderados de Galerkin para a obtenção de uma solução aproximada, baseando-se também na equação do movimento da viga de Euler Bernoulli (ver Equação (2.71)), só que agora representando o comportamento da viga intacta sob a adição de uma massa móvel. As parcelas consideradas correspondentes à rigidez e massa, o amortecimento e a força externa foram desconsideradas, já que o objetivo foi a análise da vibração livre sem amortecimento identificando a variação das frequências naturais da estrutura.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.71)$$

Em que:

EI: rigidez à flexão;

\bar{m} : massa por unidade de comprimento.

Através da Equação (2.72) do produto de $\varphi(x)$ em função da posição x e de $q(t)$ em função da variável tempo t para encontrar a solução.

$$y(x, t) = \varphi(x)q(t) \quad (2.72)$$

Foi utilizada a função Delta de Dirac ($\delta(x)$) expressando a posição da massa x_0 ao longo de todo o comprimento da viga L considerando uma massa adicional M da seguinte forma:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + (\bar{m} + M\delta(x - x_0)) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.73)$$

Em que:

M : massa concentrada adicional;

x_0 : posição da massa no domínio da solução $[0, L]$.

Através da solução numérica da equação diferencial como o primeiro modo de vibração de uma viga biapoada, utilizando o Método de Galerkin (Resíduos Ponderados) construindo uma função de peso $\varphi(x)$ adequada, onde, a integração em todo o domínio da solução entre a função de peso e o erro residual seja igual a zero, tem-se a Equação (2.74):

$$\varphi(x) = \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (2.74)$$

Esta Equação (2.74) será substituída na Equação $\int_{\Omega} W_i R d\Omega = 0$ do Método de Galerkin, conforme a Equação (2.75) a seguir.

$$\int_0^L \varphi(x) \left[EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + (\bar{m} + M\delta(x - x_0)) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right] dx = 0 \quad (2.75)$$

A função Delta de Dirac é igual a 1 e para valores diferentes é zero conforme a Equação (2.76) seguinte, considerando ainda quando $x=x_0$ o aparecimento da massa adicional M.

$$\int_a^b \delta(x_0 - x) dx = \begin{cases} 1 & \text{se } a < x_0 < b \\ 0 & \text{se } x_0 < a \text{ ou } x_0 > b \end{cases} \quad (a < b) \quad (2.76)$$

Aplicando a consideração anterior na Equação (2.75) obtém-se a Equação (2.77) a seguir correspondente à massa M.

$$\int_0^L \left\{ M\delta(x_0 - x) \right\} \text{sen}^2\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) q''(t) dx = M \text{sen}^2\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) q''(t) \quad (2.77)$$

O resultado a seguir da Equação (2.78) será:

$$EI \left(\frac{\pi^4}{2L^3}\right) q(t) + \left(M \text{sen}^2\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) + \frac{1}{2}L\bar{m}\right) q''(t) = 0 \quad (2.78)$$

Aplicando a consideração de que um sistema contínuo pode ser reduzido para um sistema discreto sem amortecimento e em vibração livre através da Equação (2.79) na forma a seguir.

$$[K]q(t) + [M]q''(t) = 0 \quad (2.79)$$

Em que:

K : Rigidez à Flexão da Viga;

M : Massa do Sistema.

Calculando pelo Método de Galerkin o valor da primeira frequência natural (ω_1) do elemento estrutural analisado sob a presença de uma massa móvel concentrada e localizada na posição x_0 de uma estrutura de comprimento L , \bar{m} de massa por unidade de comprimento, EI de rigidez à flexão e M de uma massa adicional na posição x_0 , inicialmente obtendo-se o autovalor (ω) e utilizando a Equação (2.80) seguinte.

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (2.80)$$

Resolvendo, obtém-se a Equação (2.81).

$$\left| \left[EI \left(\frac{\pi^4}{2L^3}\right) \right] - \omega^2 \left[M \text{sen}^2\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) + \frac{1}{2}L\bar{m} \right] \right| = 0 \quad (2.81)$$

E num trabalho de isolamento da variável ω alcança-se a Equação (2.82).

$$\omega_1 = \frac{\pi \sqrt{EI \left(2M - 2M \cos\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) + L\bar{m} \right)}}{L^2 \left(2M - 2M \cos\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) + L\bar{m} \right)} \quad (2.82)$$

Os valores analíticos da primeira frequência natural da viga também foram encontrados através da teoria da mecânica do contínuo, na qual as frequências naturais em Hertz (Hz), segundo Blevins (1979), são expressas pela Equação (2.83), Equação (2.84) e Equação (2.85).

$$F_1 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{3EI(a+b)}{a^2b^2[M + (\alpha + \beta)M_b]} \right\}^{1/2} \quad (2.83)$$

$$\alpha = \frac{a}{a+b} \left[\frac{(2b+a)^2}{12b^2} + \frac{a^2}{28b^2} - \frac{a(2b+a)}{10b^2} \right] \quad (2.84)$$

$$\beta = \frac{b}{a+b} \left[\frac{(2a+b)^2}{12a^2} + \frac{b^2}{28a^2} - \frac{b(2a+b)}{10a^2} \right] \quad (2.85)$$

A Figura 2.28 a seguir auxilia na definição das variáveis envolvidas nas equações.

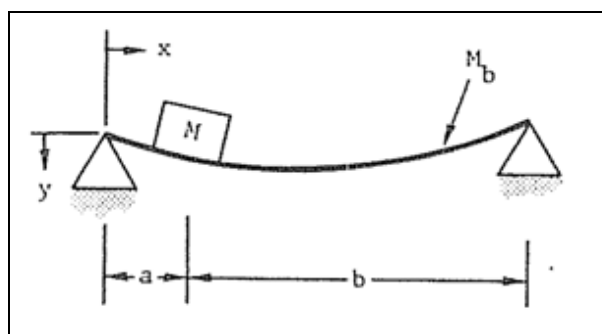


Figura 2.28 – Representação para definição das variáveis envolvidas nas equações e a consequente obtenção da Frequência Fundamental de uma viga biapoiada (Blevins, 1979)

Ainda em Blevins (1979), onde essas equações foram obtidas derivando e usando a técnica da Energia de Rayleigh, onde nas mesmas são desconsiderados o efeito da inércia rotacional causada pela adição da massa móvel.

Os resultados alcançados em termos de comparações podem ser verificados a seguir na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Resultados para Análises da Viga Intacta Experimental com adição de massa móvel e demais métodos

Item	Análises (M=6,6 kg)	Métodos / Ferramentas	Frequências Naturais Modo 1 (Hz)
1	Numérica (MEF)	ABAQUS [®]	42,080
2	Analítica	BLEVINS	42,970
3	Experimental	EXPERIMENTAL	44,389

2.16 ANÁLISE TEÓRICA PARA DECOMPOSIÇÃO HIERÁRQUICA DOS PROCESSOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS PARA QUANTIFICAÇÃO DE DANO

Em Boyce e Diprima (2006) cita que muitos dos princípios, ou leis, que regem o comportamento do mundo físico são proposições, ou relações, que envolvem a taxa segundo as coisas acontecem, expressas em linguagem matemática, as relações são equações e as taxas são derivadas, as equações contendo derivadas são equações diferenciais, e uma equação diferencial que descreve algum processo físico é chamada, muitas vezes, de modelo matemático do processo.

Em Tang (2006), cita-se: “Uma das ferramentas mais úteis da análise matemática é a Série de Fourier, nomeada após o físico matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), a análise de Fourier é onipresente em quase todos os campos das Ciências Físicas”. Trata-se de uma série infinita formada por senos e cossenos, em que foram propostas originalmente para a solução de equações diferenciais com condições de contorno definidas e o estabelecimento das principais propriedades de integrais de funções trigonométricas.

Considerando uma série da forma da Equação (2.86) seguinte:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left(a_m \cos \frac{m\pi x}{L} + b_m \sin \frac{m\pi x}{L} \right) \quad (2.86)$$

Em que a série supracitada é a de Fourier, onde no conjunto de pontos em sua convergência se define uma função f em que os valores de cada ponto x envolve o somatório da série para aquele valor de x . Dentre os objetivos estão a determinação de funções que podem ser representadas como uma soma de uma série de Fourier encontrando meios para calcular numa função dada os coeficientes na série correspondente.

No que tange às Funções Periódicas torna-se necessário desenvolver propriedades das funções trigonométricas de $\sin \frac{m\pi x}{L}$ e $\cos \frac{m\pi x}{L}$, considerando m um inteiro positivo. Tendo como primeira propriedade o seu caráter periódico.

Quanto às propriedades de ortogonalidade considerando um produto interno usual (u, v) dentro de um intervalo $\alpha \leq x \leq \beta$ de duas funções reais u e v por meio da Equação (2.87) seguinte:

$$(u, v) = \int_{\alpha}^{\beta} u(x)v(x) dx \quad (2.87)$$

Onde considera-se um conjunto de funções que é mutuamente ortogonal quando cada um dos distintos pares de funções pertencer ao conjunto e é ortogonal. Em que, serão ditas as funções u e v ortogonais em $\alpha \leq x \leq \beta$ se o produto interno (u, v) da Equação (2.87) for igual a zero.

Já as funções trigonométricas de seno e cosseno, no caso $\sin \frac{m\pi x}{L}$ e $\cos \frac{m\pi x}{L}$, $m=1, 2, \dots$, formam um conjunto mutuamente ortogonal de funções em $-L \leq x \leq L$, onde as Equações (2.88), (2.89) e (2.90), podendo obter estes resultados por integração direta, da seguinte forma:

$$\int_{-L}^L \cos \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \begin{cases} 0, & m \neq n, \\ L, & m = n \end{cases} \quad (2.88)$$

$$\int_{-L}^L \cos \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{m\pi x}{L} dx = 0, \quad \text{all } m, n \quad (2.89)$$

$$\int_{-L}^L \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \begin{cases} 0, & m \neq n, \\ L, & m = n \end{cases} \quad (2.90)$$

Entrando agora numa soma denominada $f(x)$ e supondo que a série convirja obtendo-se a Equação (2.91) a seguir:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left(a_m \cos \frac{m\pi x}{L} + b_m \sin \frac{m\pi x}{L} \right) \quad (2.91)$$

Sendo que podem ser encontrados a_n , $n=1, 2, \dots$, da seguinte forma:

$$\int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{a_0}{2} \int_{-L}^L \cos \frac{n\pi x}{L} dx + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \int_{-L}^L \cos \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x}{L} dx + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \int_{-L}^L \sin \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x}{L} dx$$

E por ortogonalidade fica:

$$\int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx = a_n \int_{-L}^L \cos^2 \frac{n\pi x}{L} dx = La_n$$

Alcançando conforme anteriormente:

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx, \quad n=1, 2, \dots$$

E para definir o coeficiente a_0 , conforme a seguir:

$$\int_{-L}^L f(x) dx = \frac{a_0}{2} \int_{-L}^L dx + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \int_{-L}^L \cos \frac{m\pi x}{L} dx + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \int_{-L}^L \sin \frac{m\pi x}{L} dx = La_0$$

Definindo-se assim os coeficientes por meio da formulação:

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx, \quad n=0, 1, 2, \dots$$

Da mesma forma a obtenção dos coeficientes b_n serão demonstrados conforme a fórmula:

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx, \quad n=1, 2, \dots$$

Encontrando então as Equações (2.92) e (2.93) dos coeficientes, também denominadas como fórmula de **Euler-Fourier**:

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (2.92)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx, \quad n=1, 2, \dots \quad (2.93)$$

Enfim, resumindo que essas formulações tem dependência somente dos valores de $f(x)$ no intervalo $-L \leq x \leq L$. Como cada um dos termos da série de Fourier é periódico com período $2L$, convergindo as séries para todo x sempre que convergir em $-L \leq x \leq L$, e f é alcançada de modo que todo x tenha seus valores nesse intervalo.

Fazendo a aplicação agora em um exemplo considerando a função seguinte:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & -3 < x < -1 \\ 1, & -1 < x < 1, \quad f(x+6) = f(x) \\ 0, & 1 < x < 3 \end{cases}$$

Sendo que a função é periódica com $T = 6$ e o $L = 3$., e representando após assumir f na forma de uma série de Fourier e definindo os coeficientes a_n e b_n conforme a Figura 2.29 a seguir.

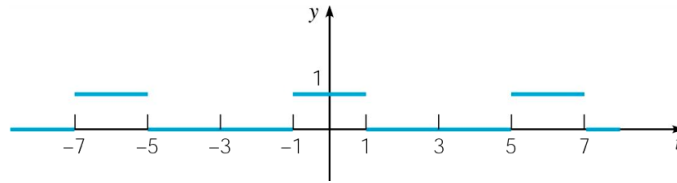


Figura 2.29 – Representação em série de Fourier dos coeficientes a_n e b_n do exemplo

Seguindo inicialmente com a definição de a_0 :

$$a_0 = \frac{1}{3} \int_{-3}^3 f(x) dx = \frac{1}{3} \int_{-1}^1 dx = \frac{2}{3}$$

Aplicando a fórmula de **Euler-Fourier**, resulta:

$$a_n = \frac{1}{3} \int_{-1}^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{1}{n\pi} \sin \frac{n\pi x}{3} \Big|_{-1}^1 = \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3}, \quad n=1, 2, \dots,$$

$$b_n = \frac{1}{3} \int_{-1}^1 \sin \frac{n\pi x}{3} dx = -\frac{1}{n\pi} \cos \frac{n\pi x}{3} \Big|_{-1}^1 = 0, \quad n=1, 2, \dots,$$

Considerando então $b_n = 0$, $n=1, 2, \dots$, e $a_0 = \frac{2}{3}$, $a_n = \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3}$, $n=1, 2, \dots$

Obtendo-se então:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \rightarrow f(x) = \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \cos \frac{n\pi x}{3} \rightarrow$$

$$\rightarrow f(x) = \frac{1}{3} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\cos \left(\frac{\pi x}{3} \right) + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{2\pi x}{3} \right) - \frac{1}{4} \cos \left(\frac{4\pi x}{3} \right) - \frac{1}{5} \cos \left(\frac{5\pi x}{3} \right) + \dots \right]$$

Após a aplicação desse exemplo seguiremos para a utilização da série de Fourier no cálculo de deflexões de vigas. Ao se projetar um elemento estrutural essencialmente submetido à flexão, como é o caso de vigas, verifica-se que é preciso frequentemente estabelecer limites para o valor de deflexão que uma viga ou um eixo podem suportar quando submetidos a carregamentos. Sendo que existem diversos métodos para determinar a deflexão e a inclinação em pontos específicos de vigas e eixos, incluindo por exemplo métodos de integração direta em casos analíticos, dentre outros casos. Será utilizado daqui pra frente considerações presentes do livro de “Mecânica dos materiais” de Ferdinand P. Beer *et al.* (2011).

Para determinar a equação da linha elástica e a deflexão máxima da viga em estudo nessa pesquisa considera-se a equação diferencial (Equação (2.94)) que governa a linha elástica, tratando-se de uma equação diferencial linear de segunda ordem:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.94)$$

Em que M envolve o Momento e o EI trata-se do produto entre o Módulo de Elasticidade e a Inércia da seção transversal do elemento, conhecidos como rigidez à flexão. A variável y representando o deslocamento vertical e a variável x expressando a posição ao longo da viga.

Considerando a Figura 2.30 a seguir por meio do diagrama de corpo livre da parte AD e considerando a Equação (2.95) dos momentos em relação a D.

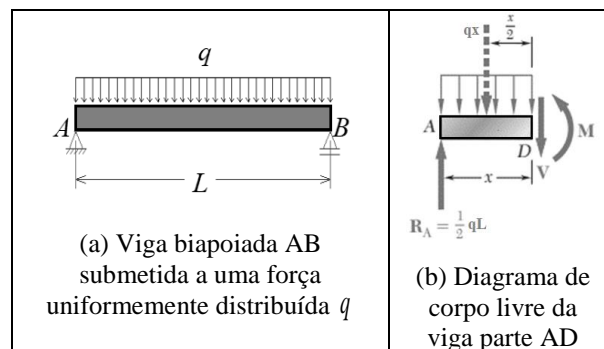


Figura 2.30 – Representação do caso de viga biapoiada

$$M = \frac{1}{2}qLx - \frac{1}{2}qx^2 \quad (2.95)$$

Onde, substituindo M na Equação (2.94) e fazendo o produto de ambos os membros desta equação pela constante EI , alcança-se a Equação (2.96):

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{2}qx^2 + \frac{1}{2}qLx \quad (2.96)$$

Fazendo duas vezes a integração em x será obtido as Equações (2.97) e (2.98).

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{6}qx^3 + \frac{1}{4}qLx^2 + C_1 \quad (2.97)$$

$$EI y = -\frac{1}{24}qx^4 + \frac{1}{12}qLx^3 + C_1x + C_2 \quad (2.98)$$

Considerando que os deslocamentos são nulos nos apoios ($y=0$) calcula-se $x=0$ e $y=0$ substituindo na Equação (2.98), obtendo-se:

$$0 = -\frac{1}{24}qL^4 + \frac{1}{12}qL^4 + C_1L \rightarrow C_1 = -\frac{1}{24}qL^3$$

Aplicando os resultados de C_1 e C_2 na Equação (2.98), alcança-se a Equação (2.99) seguinte com o deslocamento por meio do isolamento de y .

$$EI y = -\frac{1}{24}qx^4 + \frac{1}{12}qLx^3 - \frac{1}{24}qL^3x$$

$$y = \frac{q}{24EI}(-x^4 + 2Lx^3 - L^3x) \quad (2.99)$$

Fazendo a substituição na Equação (2.97) com o valor de C_1 e verificando que a inclinação da viga é nula para $x=L/2$ e utilizando na Equação (2.99) obtendo a Equação (2.100):

$$y_c = \frac{q}{24EI} \left(-\frac{L^4}{16} + 2L\frac{L^3}{8} - L^3\frac{L}{2} \right)$$

$$|y|_{m\acute{a}x} = -\frac{5qL^4}{384EI} \quad (2.100)$$

Lembrando que a linha elástica tem um mínimo no ponto médio da viga e que a Equação (2.100) supracitada remete à deflexão máxima ou mesmo de forma mais específica o valor máximo absoluto da deflexão.

Considerando quando uma viga submetida a uma carga distribuída $q(x)$, tem-se $V = dM/dx$ e $-q = dV/dx$ em qualquer ponto e diferenciando ambos os membros da Equação (2.94) em relação a x e considerando que EI seja constante conforme Equação (2.101).

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{1}{EI} \frac{dM}{dx} = \frac{V(x)}{EI} \quad (2.101)$$

Fazendo a diferenciação novamente obtém-se a Equação (2.102) diferencial linear de quarta ordem a seguir.

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{1}{EI} \frac{dV}{dx} = -\frac{q(x)}{EI} \rightarrow$$

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = -\frac{q(x)}{EI} \quad (2.102)$$

E com o produto de ambos os membros da Equação (2.102) pela constante EI e realizando a integração quatro vezes obtém-se a Equação (2.103):

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = q(x) \rightarrow$$

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} = V(x) = -\int q(x) dx + C_1 \rightarrow$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) = -\int dx \int q(x) dx + C_1 x + C_2 \quad (2.103)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = EI \theta(x) = -\int dx \int dx \int q(x) dx + \frac{1}{2} C_1 x^2 + C_2 x + C_3$$

$$EI y(x) = -\int dx \int dx \int dx \int q(x) dx + \frac{1}{6} C_1 x^3 + \frac{1}{2} C_2 x^2 + C_3 x + C_4$$

Considerando a Equação (2.103) e a variável constante alcança-se a Equação (2.104) seguinte.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -q$$

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} = V(x) = -q(x) + C_1$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) = -\frac{1}{2} qx^2 + C_1 x + C_2 \quad (2.104)$$

Utilizando as condições de contorno requerendo $M=0$ e $x=0$ nos apoios da viga na Equação (2.104) e resultando em $C_2=0$ e considerando $x=L$ e $M=0$ na mesma equação

e alcançando $C_1 = \frac{1}{2}qL$. Aplicando C_1 e C_2 na Equação (2.104) e realizando a integração duas vezes redige-se a Equação (2.105) seguinte.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{2}qx^2 + \frac{1}{2}qLx$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{6}qx^3 + \frac{1}{4}qLx^2 + C_3$$

$$EI y = -\frac{1}{24}qx^4 + \frac{1}{12}qLx^3 + C_3x + C_4 \quad (2.105)$$

Agora aplicando-se $x=0$ e $y=0$ e substituindo na Equação (2.105) e obtendo $C_4=0$ com $x=L$ e $y=0$ também na mesma equação:

$$0 = -\frac{1}{24}qL^4 + \frac{1}{12}qL^4 + C_3L \rightarrow C_3 = -\frac{1}{24}qL^3$$

Dividindo ambos os membros da Equação (2.105) por EI e utilizando C_3 e C_4 resultando na Equação (2.106) da linha elástica a seguir.

$$y = \frac{q}{24EI}(-x^4 + 2Lx^3 - L^3x) \quad (2.106)$$

E aplicando $x=L/2$ alcança-se novamente a Equação (2.100):

$$y = -\frac{5qL^4}{384EI}$$

Sendo esta equação a ser utilizada na quantificação de danos ao final do capítulo 5.

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

Os detalhes das modelagens computacionais realizadas com o ABAQUS[®] da viga metálica com perfis laminados de abas inclinadas IPN 500x104 regidos pelas normas DIN EN 10024 (1995), EN 10163-2 (2004), será demonstrada a atualização do modelo a seguir em conjunto com os detalhamentos no ANEXO 1 da análise numérica com o ANSYS[®] e SAP2000[®] das pesquisas de Silva (2011 e 2015) e Palechor (2013 e 2018).

3.1 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1.1 Considerações preliminares referente ao perfil metálico do tipo IPN (European Standard I Beams) padrão Europeu

Os perfis laminados de abas inclinadas IPN 500x104 regidos pelas normas DIN EN 10024 (1995), EN 10163-2 (2004), com limite de escoamento do aço em $f_y = 345$ MPa foi deixado de ser fabricado nos Estados Unidos e na Europa, devido à alta demanda de construção mista, que exigiu a utilização de conectores soldados na mesa do perfil para absorver o fluxo de tensões de cisalhamento e conseqüentemente, foi necessário aumentar o tamanho da mesa do perfil. Assim, os perfis da série IPN 500x104 foram substituídos pelos perfis de abas paralelas tipo W (*Wide Flange*) com mesas retas e maiores, passando a ser substituído nesse caso específico pelo perfil W 530x101 com inércia equivalente com limite de escoamento do aço em $f_y = 345$ MPa para os aços tipo ASTM-A572, padronizado no Brasil pela norma ABNT NBR 15.980 (2020) que versa sobre “Perfis laminados de aço para uso estrutural - Dimensões e tolerâncias”.

3.1.1.1 A Tensão Residual Inicial (TRI) nos perfis tipo W

As Tensões Residuais Iniciais (TRI) desenvolvidas em perfil laminado a quente, com seção “W”, são formadas pelos processos de fabricação de laminação a quente e subsequentes, devido ao processo de resfriamento. O desenvolvimento de tensões residuais auto equilibradas é influenciado pela espessura da geometria da seção transversal, temperatura de laminação, condições de resfriamento, procedimentos de endireitamento e as propriedades mecânicas do aço (Beedle e Tall, 1960).

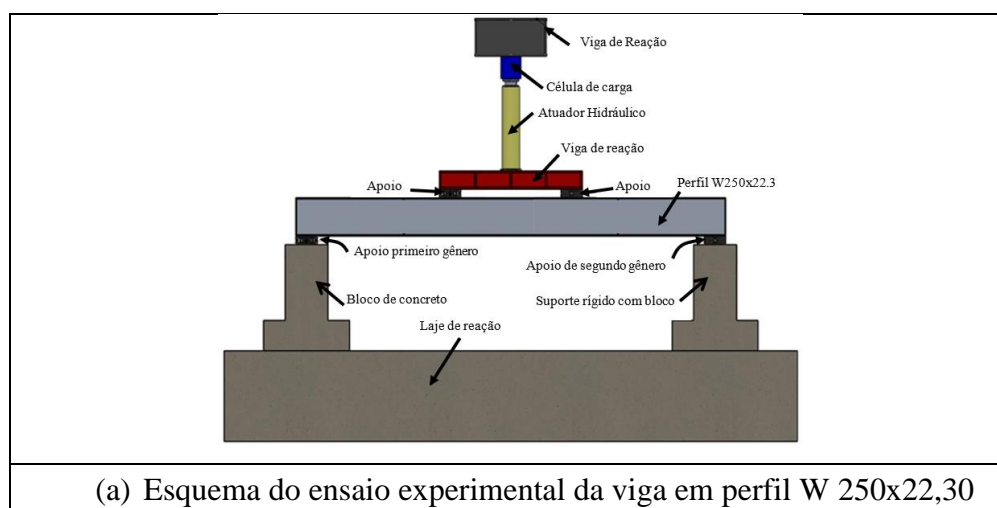
Quando uma seção do perfil possui a forma “W” e sujeito a carregamento, as tensões totais devido a forças externas são sobrepostas aos da TRI e, conseqüentemente, certas partes da seção transversal pode ser tensionada além do ponto de escoamento devido ao acréscimo da TRI (Fujita 1955; Ketter *et al.* 1955; Huber 1956; Ketter 1958).

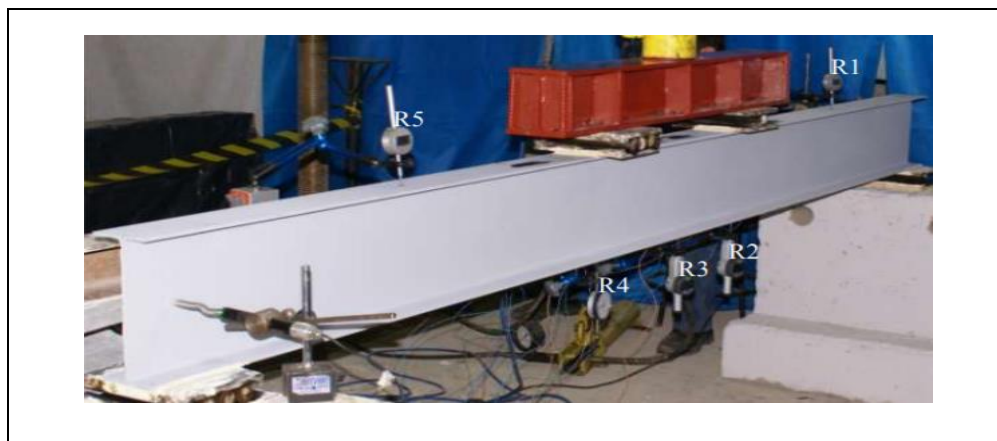
Alguns modelos analíticos, como os propostos por Galambos e Ketter (1959), ECCS (1984) e BSK 99 (BSK 2003), assumem distribuição linear idealizada para obtenção da TRI. O método proposto por Galambos e Ketter (1959) onde o pico de tensão compressiva é definido como $0,3f_y$ e o pico de tensão de tração é calculado a partir do pico da tensão compressiva, com base na geometria da seção.

Entretanto, a norma do Eurocódigo 3 (2004), passou a adotar para o cálculo da tensão residual, uma imperfeição geométrica baseada nas curvas obtida pelos cinco tipos diferentes de fabricação de perfis. A Tabela 5.1 do Eurocódigo 3 (2004) mostra os diferentes valores da amplitude da imperfeição geométrica e_0 , para análise elástica e plástica, para o presente estudo foi adotado o valor de $e_0 = 1/100$ para o regime plástico.

3.1.1.2 Parâmetros para a simulação da resistência última de perfil tipo W com o ABAQUS®

Para determinar a resistência última do perfil IPN 500x104, através da simulação numérica com o ABAQUS®, por meio de uma análise não linear, foi primeiramente simulado o perfil W 250x22,3 com aço ASTM-A572 obtido no trabalho de Pereira (2014) para calibração do modelo numérico conforme os esquemas demonstrados na Figura 3.1 seguinte.





(b) Viga de aço na posição para realização dos ensaios experimentais

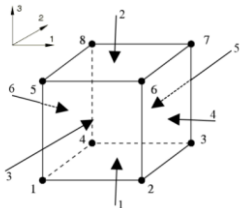
Figura 3.1 – Esquema do ensaio na viga em perfil W 250x22,30 (Pereira, 2014)

3.1.1.3 Modelo com o uso do ABAQUS®

Para a modelagem do perfil optou-se pela criação de um modelo geométrico tridimensional, devido à complexidade na ligação entre alma e mesa do perfil, por isso, adotou-se um elemento 3D que não precisa de ser refinado na zona de transição entre banzo/mesa. Portanto, utilizou-se o elemento finito tipo sólido C3D8R, que é um elemento contínuo (C), tridimensional (3D), com oito nós (8) e com integração reduzida (R). O elemento C3D8R também possui uma formulação com interpolação de primeira ordem ou linear, e tem a opção *hourglass control*, que permite resolver problemas relacionados com a obtenção de soluções oscilatórias, ou seja, quando a matriz se torna singular ou quase singular (quando a matriz de rigidez não admite inversa).

Em relação à descrição do comportamento mecânico do perfil, assumiu-se que o material é isotrópico descrito no regime elástico de deformações pela Lei Generalizada de Hooke através do módulo de elasticidade $E = 200.000$ MPa e do coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$ para obtenção da flambagem elástica, respectivamente. Por outro lado, o regime plástico foi descrito pelo critério de escoamento de *Von Mises* em conjunto com a hipótese de encruamento isotrópico. Na Tabela 3.1 são demonstrados os detalhes do elemento C3D8R.

Tabela 3.1 – Detalhamentos do elemento finito C3D8R

Elemento	Figura	Dados do elemento
Sólido C3D8R		Possui 8 nós com 3 graus de liberdade por nós (translações nas direções x, y e z). Suporta análise plástica com grandes deformações, deslocamentos e também fissuração.

Fonte: (ABAQUS, 2014)

Por outro lado, a força foi aplicada de forma incremental nos dois pontos de referências (RP-1, e RP-2), conforme mostrado na Figura 3.2, em pequenos passos de força axial de compressão, onde o tamanho dos passos foram selecionados automaticamente pelo ABAQUS[®] (ABAQUS[®] 6.14, 2014), com base na condição numérica de convergência. Neste caso, a força foi aplicada usando o algoritmo Riks modificado usando o ABAQUS[®] com modelo implícito com a não linearidade geométrica ativada na biblioteca STATIC RIKS METHOD. Portanto, o algoritmo de Riks modificado no ABAQUS[®], o tamanho do incremento foi limitado movendo-se ao longo da linha tangente à curva no ponto corrente da solução à procura pelo equilíbrio em um plano ortogonal à linha tangente e que passa pelo ponto obtido.

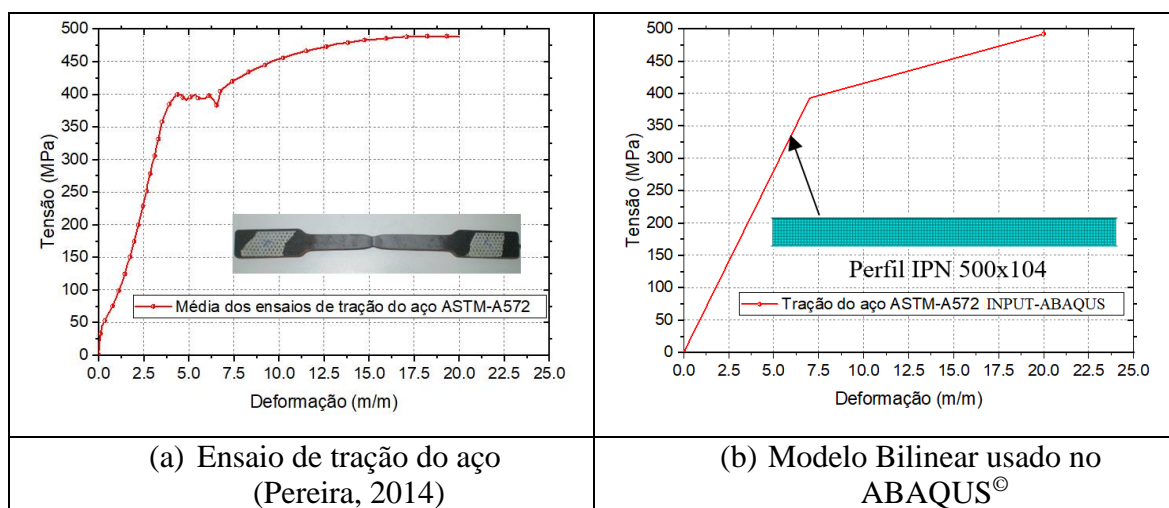


Figura 3.2 - Detalhe do ensaio de tração do aço usado na modelagem no ABAQUS[®]

Para iniciar a análise, foi fornecido um incremento inicial chamado de Step-1, e logo depois, o valor do comprimento de arco (que foi equivalente a uma fração do carregamento, adotando-se o valor de 0.50) e os incrementos seguintes foram ajustados automaticamente,

aumentando ou diminuindo, dependendo do número de iterações realizadas para a convergência do incremento. Três tipos das análises foram realizados: (1) flambagem linear, (2) flambagem não linear e (3) análise do método de Riks modificado. Posteriormente, os resultados da análise com Elementos Finitos foram comparados com os resultados experimentais.

Na primeira análise (flambagem linear) foi inserido duas cargas nodais com valores unitários conforme mostrado na Figura 3.3 a seguir. Então, logo após esta primeira análise foi obtido no ABAQUS[®] a carga para o primeiro módulo de flambagem elástica com valor de 56,890 kN, conforme mostrado na Figura 3.4 seguinte. Já na segunda análise foi considerado a flambagem não linear com correção da carga inicial, sendo aplicado o valor do modo linear (56,890 kN). Por outro lado, a terceira análise foi considerado o valor da carga do modo de flambagem não linear, juntamente com a imperfeição geométrica de 30 mm que apresenta a tensão residual implementada no Algoritmo de RIKS no ABAQUS[®], após essa correção da geometria do modelo, procedeu-se a uma análise plástica incremental, considerando-se teoria de grandes deslocamentos. Os resultados da análise estão apresentados na Figura 3.5.

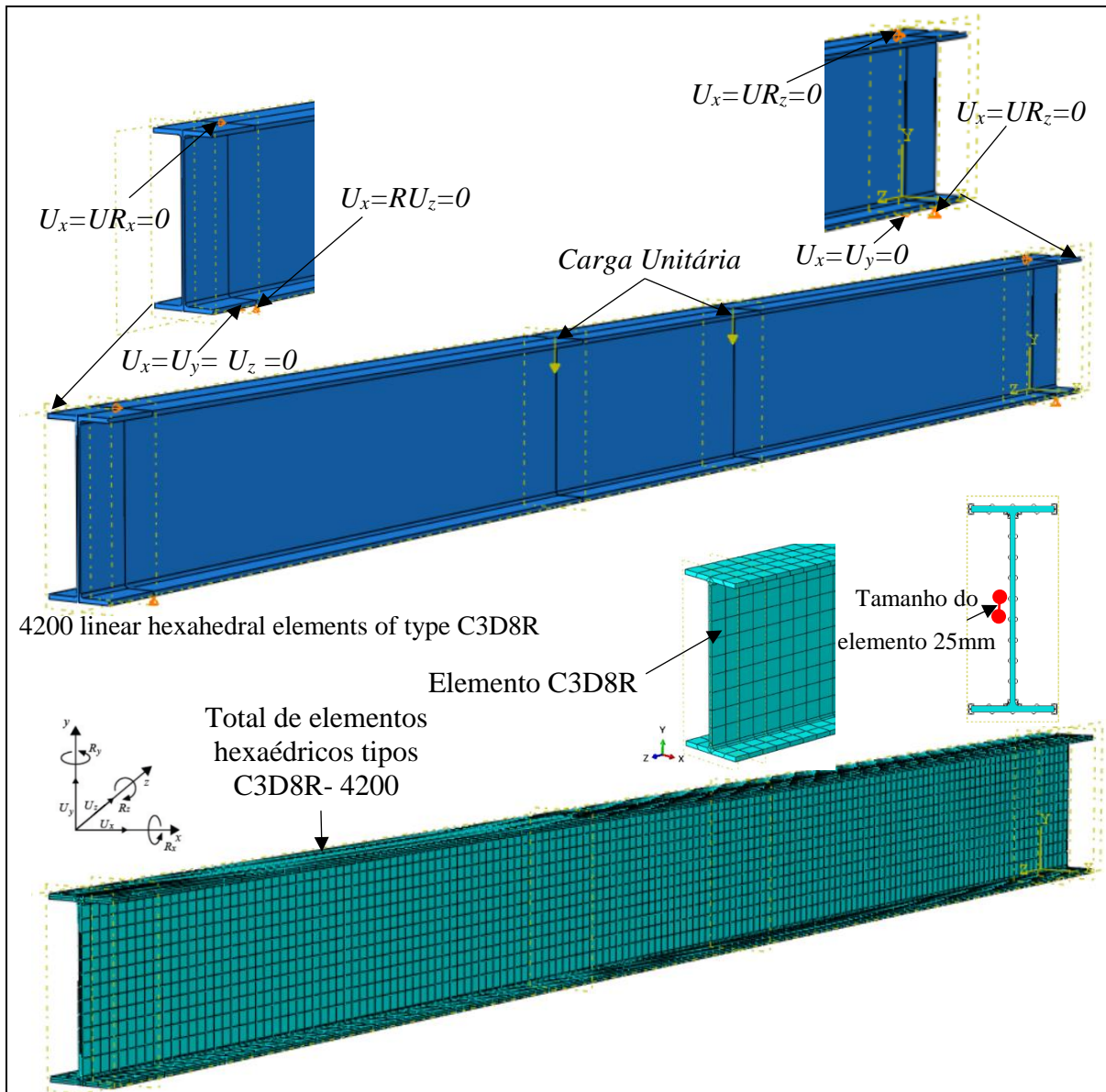


Figura 3.3 - Discretização do modelo da viga W 250x22,30 (Pereira, 2014)

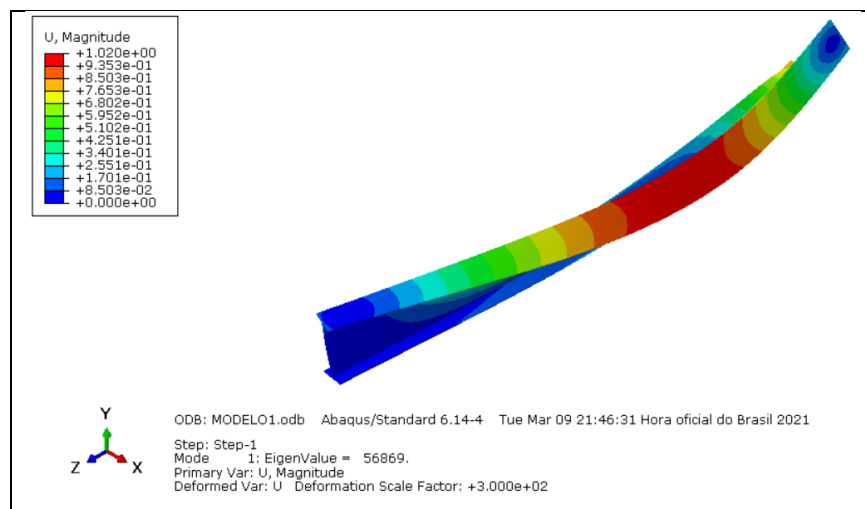
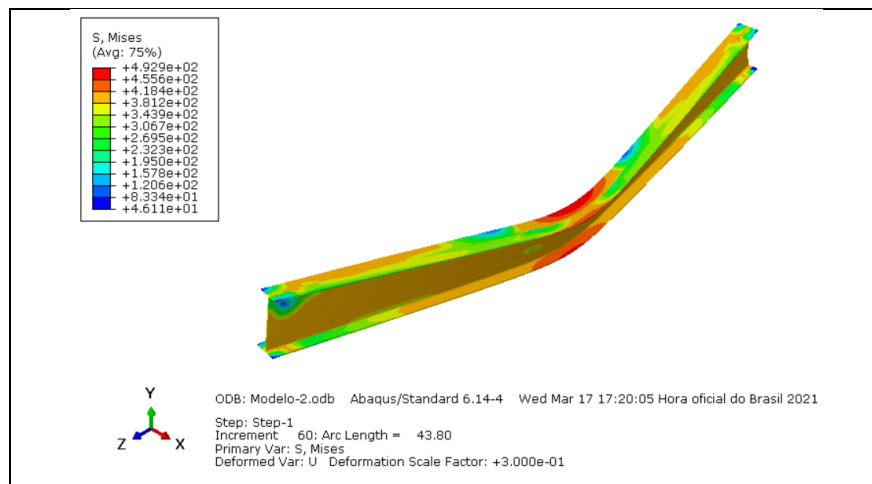
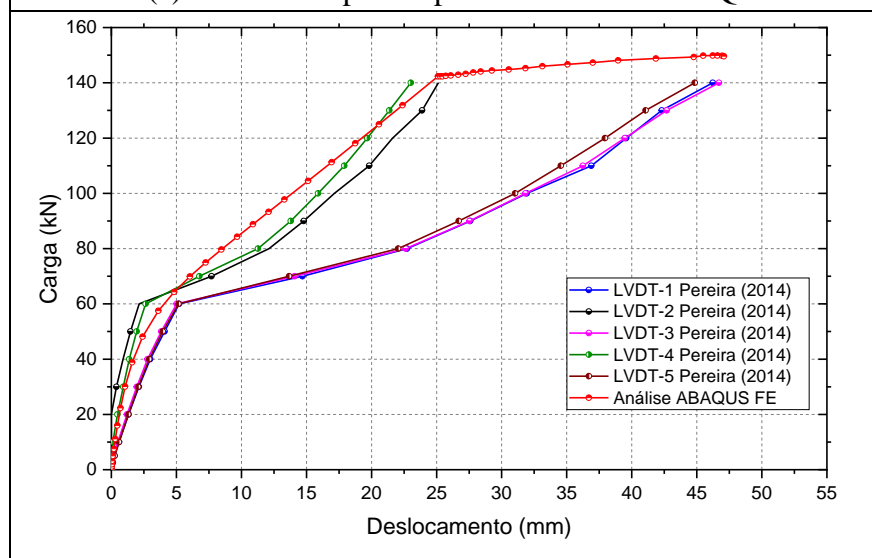


Figura 3.4 - Resultado da análise com flambagem linear



(a) Modelo do perfil após análise com ABAQUS[®]



(b) Resultado da modelagem vs. comparação com resultado com experimental

Figura 3.5 - Modelo numérico no ABAQUS[®] vs. Experimento de Pereira (2014)

3.1.2 Simulação da resistência última de perfil IPN 500x104 com ABAQUS[®]

Após comparação dos resultados experimentais de Pereira (2014) foi possível calibrar o modelo numérico no ABAQUS[®]. Neste contexto, o perfil IPN 500x104 também foi modelado usando as mesmas propriedades do aço ensaiado por Pereira (2014). A Figura 3.6 mostra os detalhes do perfil.

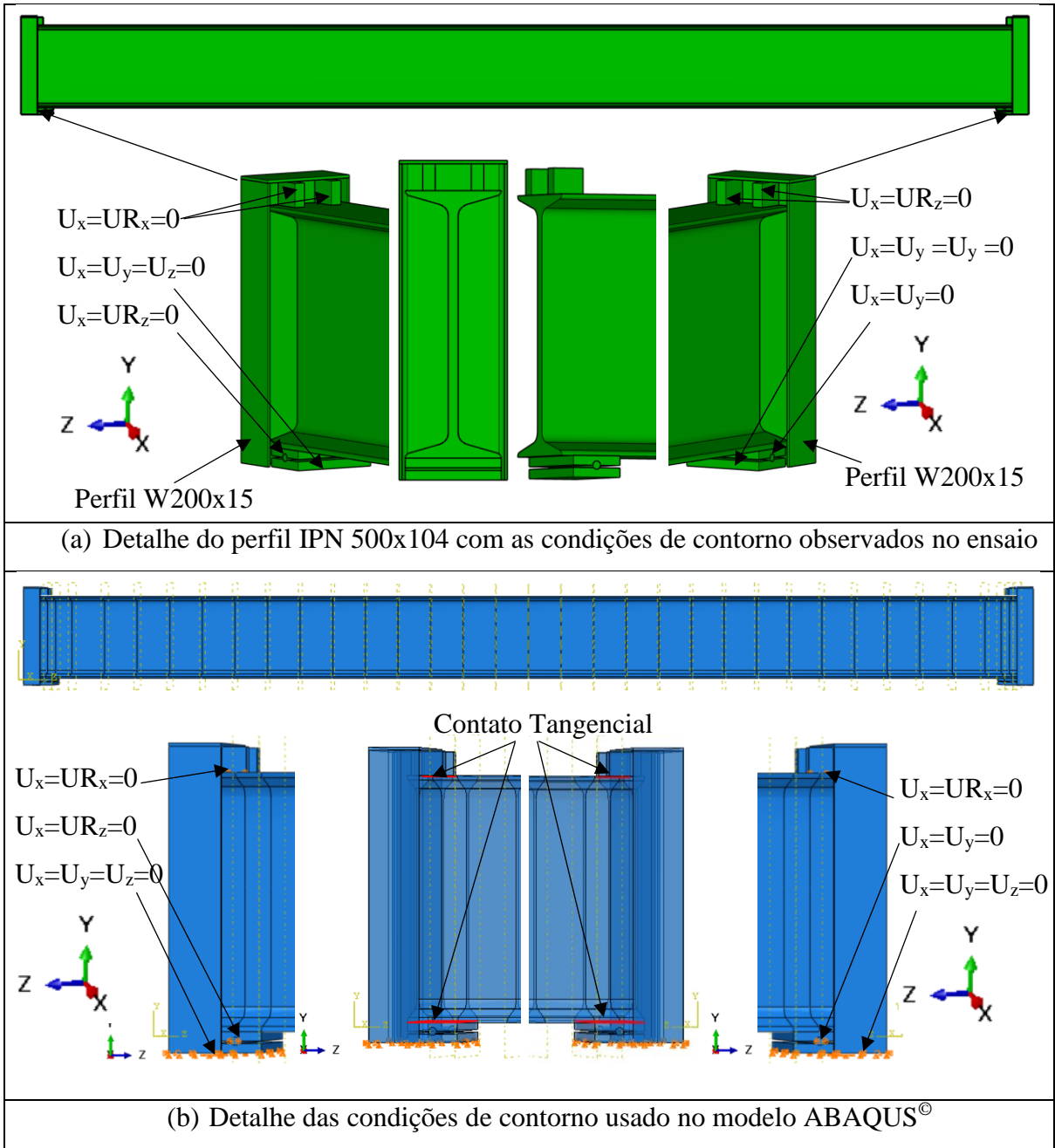


Figura 3.6 - Detalhes das condições de contorno do perfil IPN 500x104

O perfil W 200x15 foi engastado na base por meio da fixação de quatro *parabolts* de 6.3 mm parafusado no piso do Laboratório de Estruturas (LABEST da UnB). Na parte superior do perfil foram inseridas duas cunhas de madeira para evitar o deslocamento transversal do perfil metálico IPN 500x104. Já a simulação do perfil consistiu em uma análise com não linearidade geométrica por meio do uso do Algoritmo de RIKS no ABAQUS[®], a imperfeição geométrica adotada foi de 60 mm, para simular as tensões residuais. A Figura 3.7 seguinte demonstra o resultado para flambagem linear.

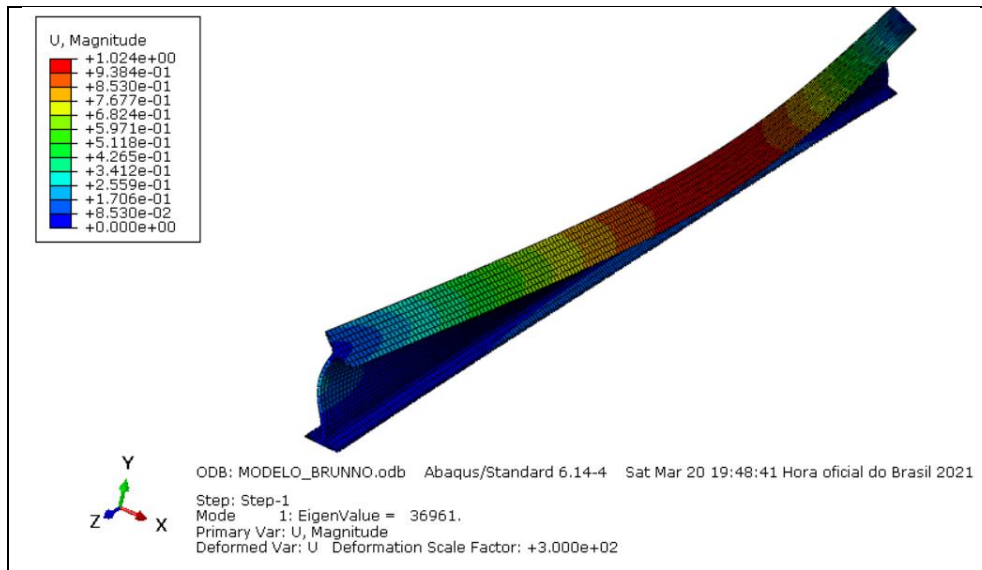
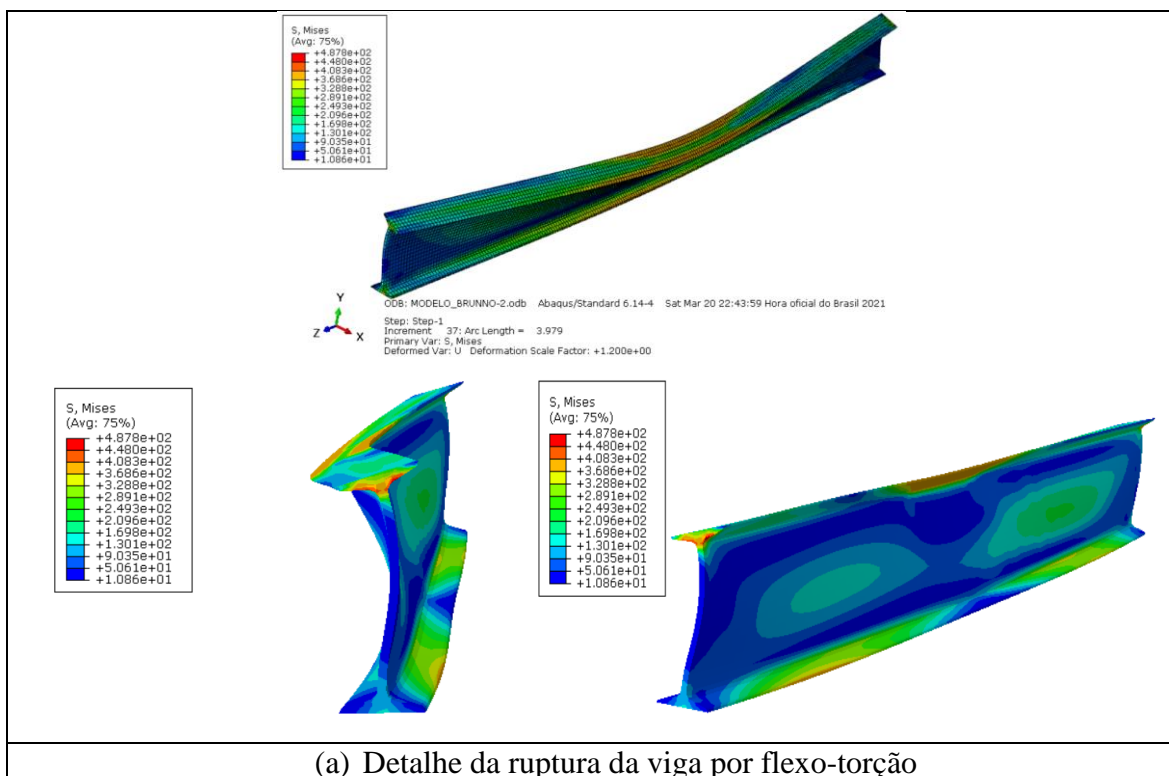


Figura 3.7 - Resultado da análise com flambagem linear do perfil IPN 500x104

Os resultados da análise com flexo-torção do perfil IPN 500x104 estão apresentadas na Figura 3.8.



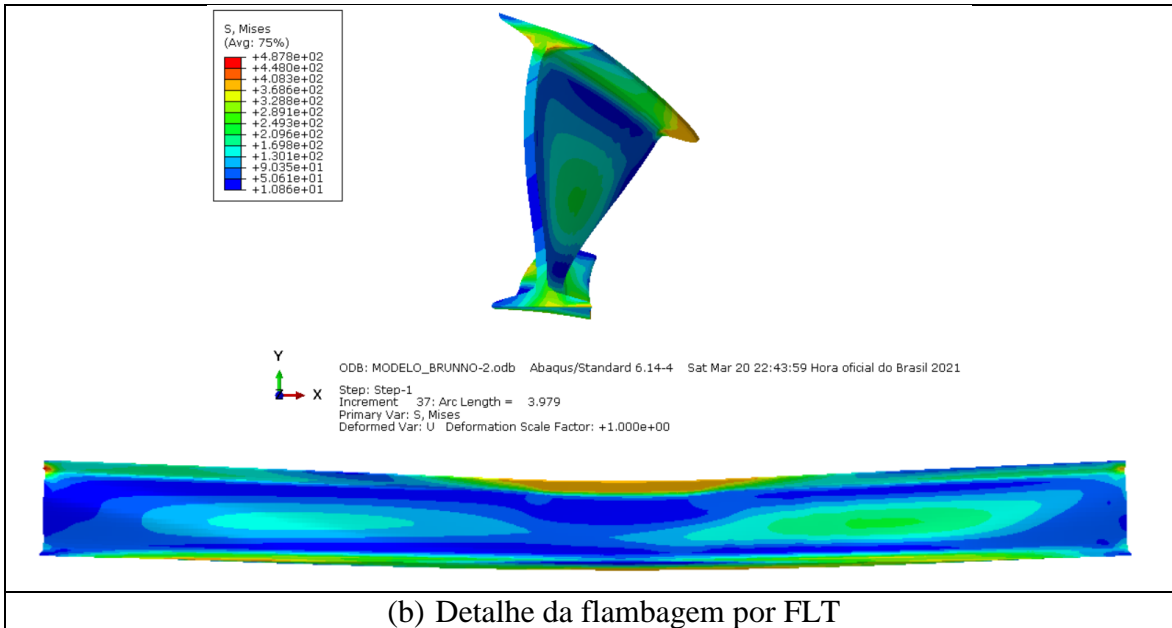


Figura 3.8 - Resultado da análise com o ABAQUS[®] de FLT

Os resultados da análise com ABAQUS[®] estão apresentadas na Figura 3.9. Os valores das cargas de projeto obtidos através da norma ABNT NBR 8800 (2008), estão também apresentadas no respectivo gráfico. Duas cargas foram plotadas: (a) na primeira considerou o valor nominal de resistência sem considerar o coeficiente de segurança; (b) no segundo modelo foi considerado o coeficiente de minoração γ_m para o valor da carga no estado limite de flambagem por flexo-torção do perfil.

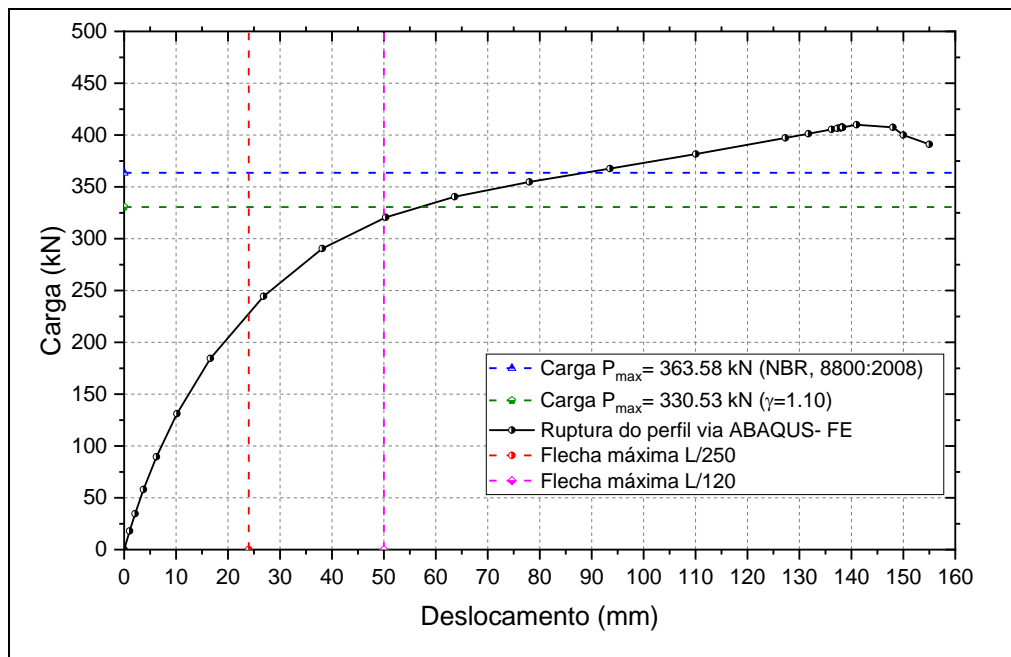


Figura 3.9 – Análise gráfica da carga vs. deslocamento para o perfil IPN 500x104

A memória de cálculo dos resultados demonstrados na análise gráfica da Figura 3.9 são apresentados no APÊNDICE B em seu item 3 e 4.

3.1.3 Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Intacta

Por fim, conforme já sinalizado, esses ensaios se deram com uma discretização da viga de 6 metros com uma divisão em 20 cm (30 partes/elementos), sendo que essa discretização de 20 cm na viga de 6 m, é a que apresentou melhores resultados, devido aos dados obtidos (frequências naturais), para cada posição de massa, tendo em vista que os demais testes não apresentaram perturbações consideráveis pela presença do dano. Verificando-se que o fato do espaçamento ser muito maior em uma discretização gera uma perda de informação entre os nós da estrutura.

A seguir são apresentadas as representações da viga metálica biapoiada intacta para a análise dinâmica do caso na Figura 3.10.

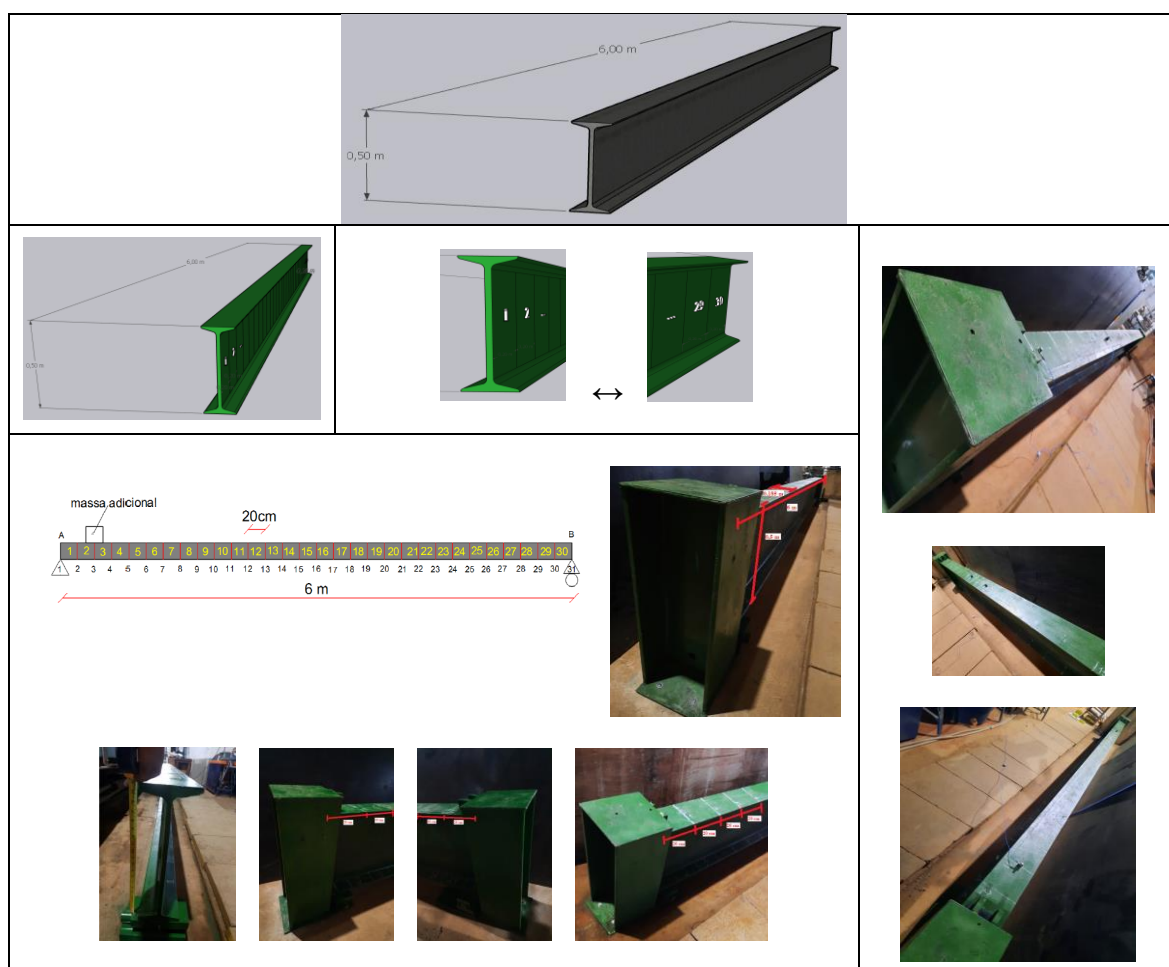


Figura 3.10 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Intacta (6 m): Caso Geral 34 (Discretização de 20,0 cm com 30 partes/elementos)

Aplicou-se três situações de massas móveis de ordens menores que 5% do peso total da viga que é de 141 kg/m, ou seja, a mesma tem 846 kg, que foram de 6,6 kg, 12,0 kg e de 27,7 kg de massa móvel. Ao mesmo tempo, foram realizadas análises numéricas com dados modais de frequências naturais utilizando o software ABAQUS[®] 6.14 (2014), para efeitos de aplicação de analogias e utilizações dos métodos de otimização, mais especificamente do Método de Evolução Diferencial.

Nas análises numéricas foram realizadas análises com o software ABAQUS[®] 6.14 (2014), até para se ter melhores condições de estabelecer os passos dos ensaios, bem como as grandezas de esforços realizadas.

Em termos de comportamentos dos modos de vibração de uma viga biapoiada buscou-se alcançar análises similares ao demonstrado na Figura 3.11 a seguir.

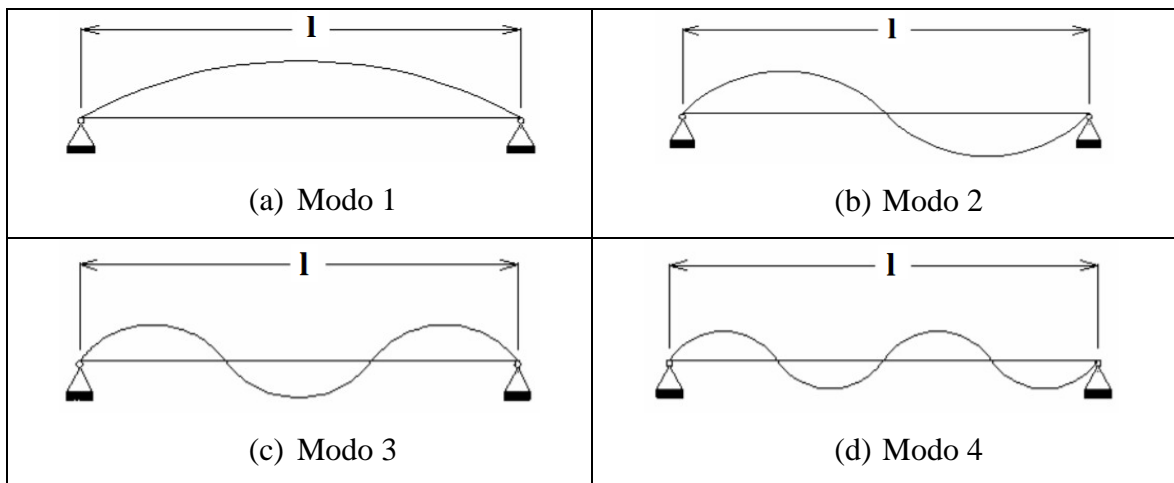


Figura 3.11 - Comportamentos dos modos de vibração de uma viga biapoiada

Na análise com o ABAQUS[®], observa-se na Figura 3.12 a seguinte configuração:

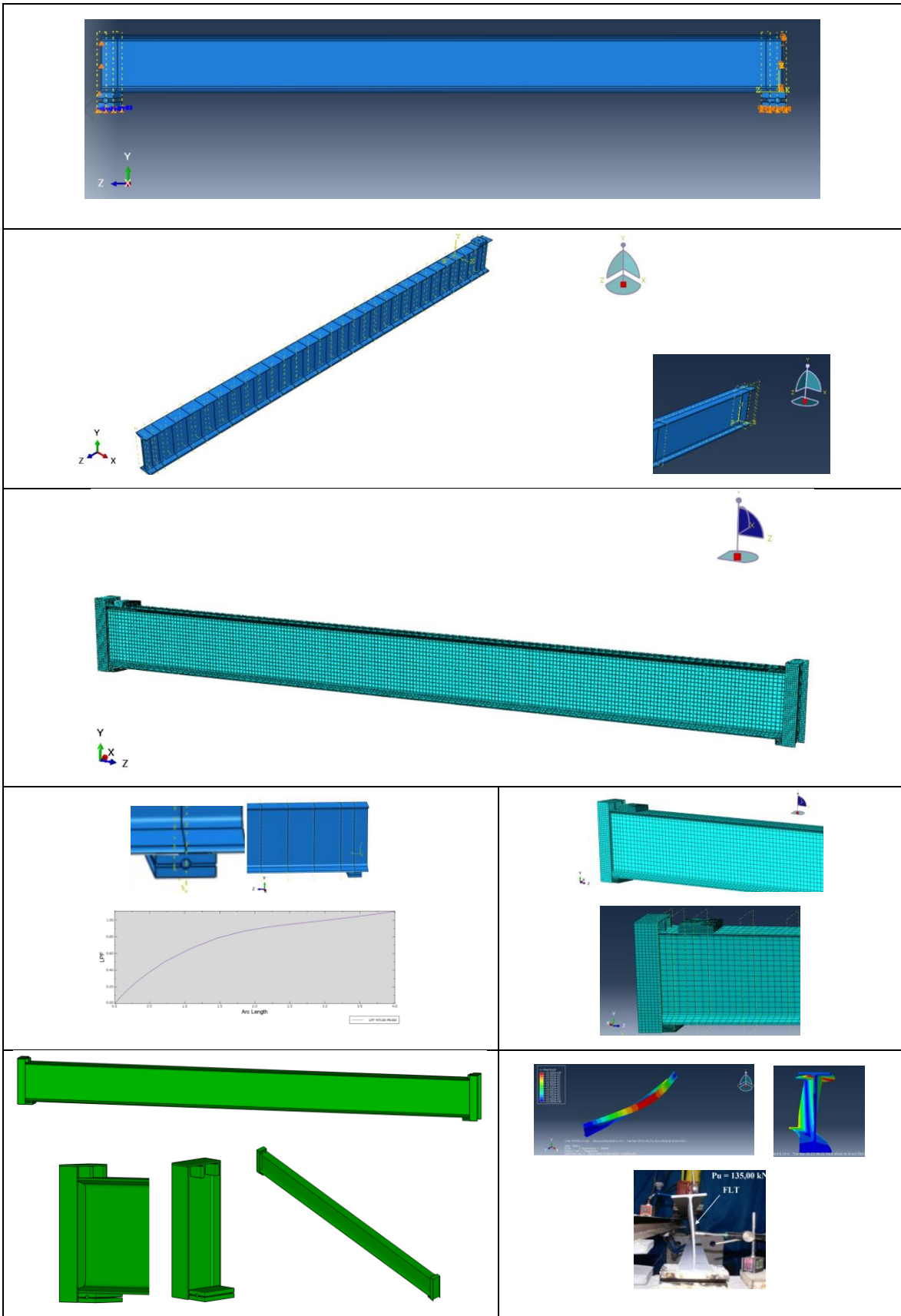


Figura 3.12 – Modelo Viga IPN 500x104 (ABAQUS®)

A análise numérica dinâmica se deu com o uso do algoritmo LINEAR PERTUBATION FREQUENCY com 12 modos de vibração. A Figura 3.13 mostra os detalhes do modelo.

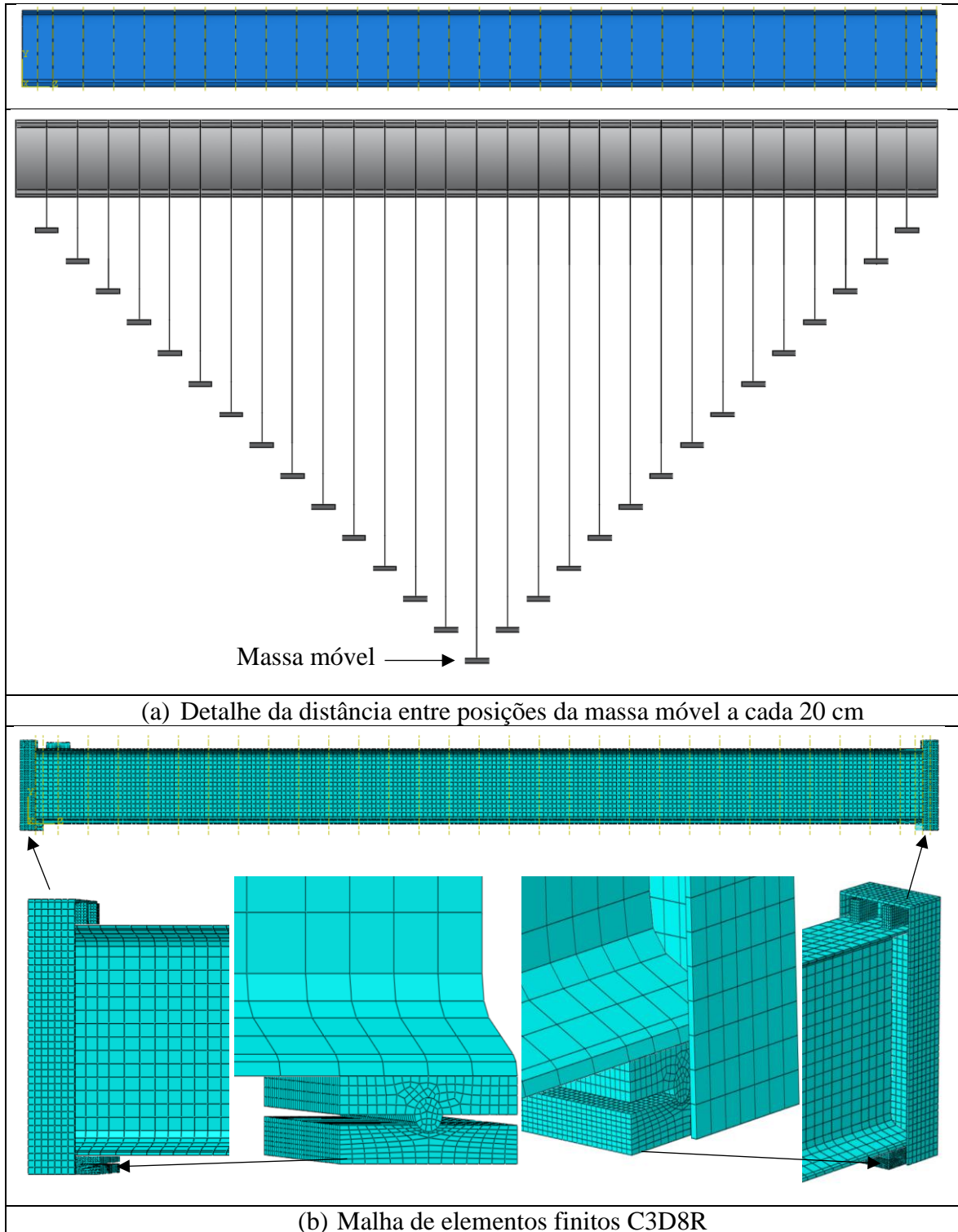


Figura 3.13 - Detalhe da distância entre a massa móvel com a malha de elementos finitos

Em termos de análises modais obteve-se as frequências naturais conforme a Figura 3.14 a seguir.

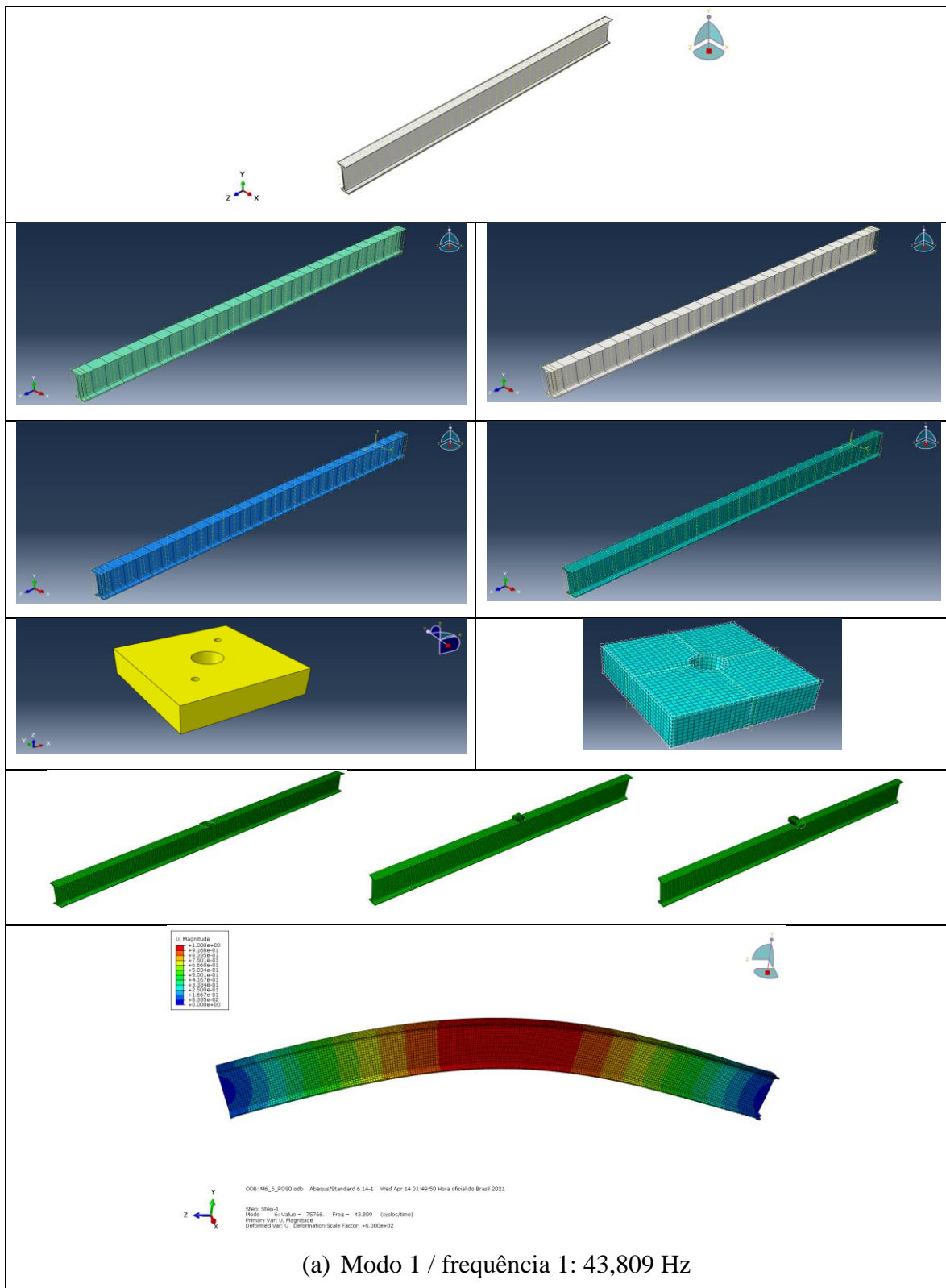


Figura 3.14 – Frequências Naturais do Modelo Viga IPN 500x104 (ABAQUS®)

4. METODOLOGIA

Os problemas de otimização podem ser resultados do método de avaliação de danos. Isto é, um problema onde as restrições são de igualdade e resolvidas implicitamente e são representadas pelas equações de equilíbrio na análise de problemas estáticos, ou pelos problemas de autovalores nos casos dinâmicos. Suas características são automaticamente satisfeitas quando o problema analítico é resolvido. As variáveis de projeto d_i , são definidas no intervalo [0, 1].

Para calibrar as ferramentas de otimização, utilizou-se os dados extraídos dos elementos dos modelos numéricos listados a seguir para se verificar a confiabilidade dos resultados obtidos das análises estáticas e dinâmicas, conforme apresentado no ANEXO 1.

Os resultados obtidos são baseados nas técnicas de Inteligência Artificial – IA (*Artificial Intelligence - AI*) utilizando dados numéricos e experimentais de elementos estruturais intactos e danificados conforme esquemas apresentados na Figura 4.1 e Figura 4.2 que também valem para o capítulo 5.

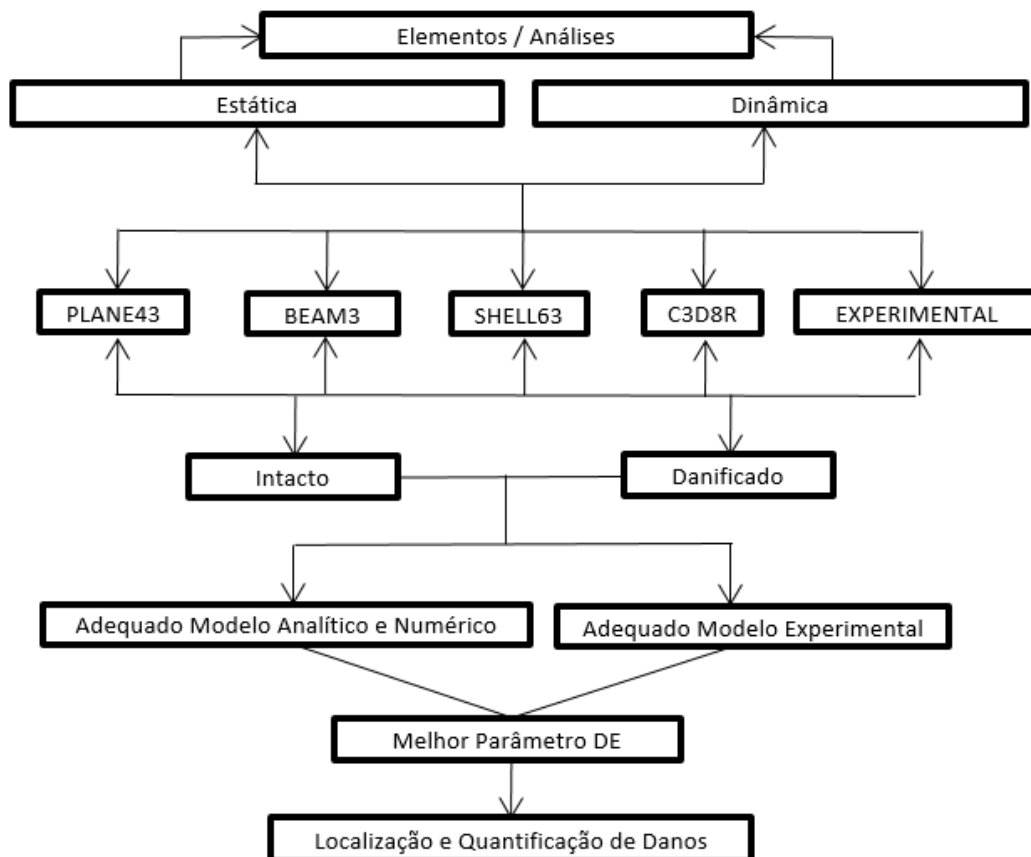


Figura 4.1 – Fluxograma da análise de elementos estruturais utilizando dados numéricos e experimentais

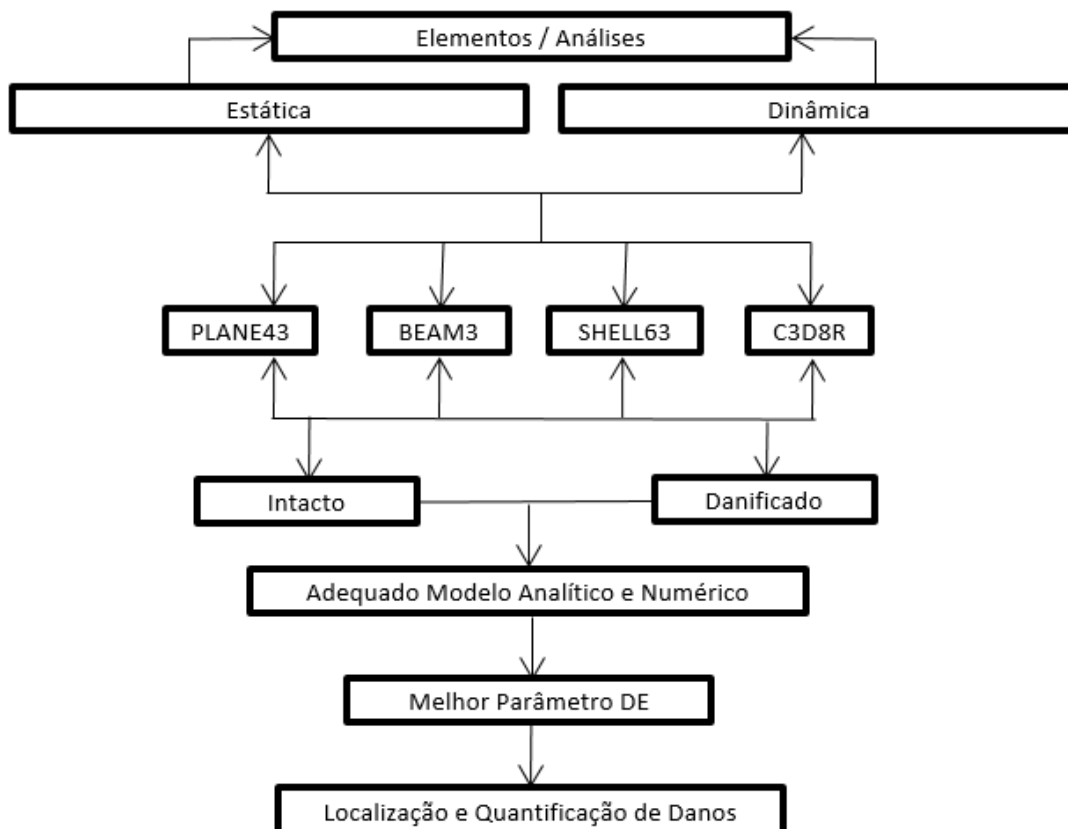


Figura 4.2 – Fluxograma da análise de elementos estruturais utilizando somente dados numéricos

A etapa 1 do capítulo 5 constituirá as análises numéricas e experimentais dinâmicas com a viga IPN 500x104 e no ANEXO 1 as outras 4 etapas complementares de conjuntos de análises de pesquisas já realizadas, totalizando mais de 30 casos, que foram executadas verificações de otimização e identificação de danos tanto no âmbito estático como também dinâmico:

- **1)** Como análise da etapa 1, no capítulo 5, foi realizada uma análise experimental e numérica da viga metálica perfil Europeu IPN 500x104, voltada para análises de variação das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional, incluindo estudos experimentais, com 3 casos de referência intactos e danificados, mais especificamente os casos 1.1, 1.2 e 1.3 da pesquisa, verificando as potencialidades do método ED bem como a busca por etapas e alternativas para localização e quantificação de danos.

- **2)** Seguindo as etapas complementares, adotou-se os modelos numéricos desenvolvidos por Silva (2011) em sua dissertação de mestrado para análises dos elementos

estruturais do tipo de viga em balanço, viga biengastada, e da treliça plana, bem como suas modelagens pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) através do *software* ANSYS[®], quando se tratar das vigas e do *software* SAP2000[®], quando da treliça plana, visando determinar a posição do dano introduzido, pelas respostas estáticas (deslocamentos) e dinâmicas (frequências naturais e modos de vibração) das vigas e da treliça danificada.

- **3)** Após essa análise, que não envolvia análises experimentais, buscou-se estudos com estas verificações encontradas agora em Silva (2015), já em sua tese de doutorado, em que utilizou-se vigas metálicas (perfil-I), de aço MR-250 de comprimentos totais de 6,00 metros, em condição biapoiada, submetida à diferentes estágios de carga aplicadas no meio do vão e também em outros pontos, assim como os danos e suas posições diferenciadas ao longo dos estudos realizados. Em um primeiro momento, numa análise estática, com 1 caso com uma viga intacta e outros 3 casos dessa mesma viga em situações danificadas. Já em um segundo momento, numa análise dinâmica, também com 1 caso com uma viga intacta e outros 9 casos dessa mesma viga em situações danificadas de forma diferenciadas.

- **4)** Nessa terceira análise, buscou-se uma complementação do que foi realizado em minha dissertação de mestrado, saindo das análises estáticas e agora entrando nas análises dinâmicas, do trabalho da dissertação de Palechor (2013), também utilizando vigas metálicas (perfil-I), de aço MR-250 de comprimentos totais de 6,00 metros, em condição biapoiada, com os danos e suas posições diferenciadas ao longo dos estudos realizados. Agora somente restando as análises dinâmicas, também com 1 caso com uma viga intacta e outros 4 casos dessa mesma viga em situações danificadas de forma diferenciadas.

- **5)** Seguindo análises com os estudos realizados agora na tese de Palechor (2018), voltada para análises de variação das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional, incluindo estudos experimentais, com 2 casos de referência intactos (no caso o 6 e 11) e 12 casos danificados, mais especificamente os casos 1, 2, 3, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18, dos 18 casos da pesquisa.

- **6)** Em seguida, a partir das respostas obtidas em geral, pelo ABAQUS[®] no capítulo 5, além do ANSYS[®] e SAP2000[®] no ANEXO 1, nas análises numéricas, bem como nas análises experimentais, ambas para localização e quantificação do dano estrutural, para utilização das ferramentas otimizadoras: do Método de Evolução Diferencial - ED

(*Differential Evolution*, DE / Price *et al.*, 2005) e do Método de Algoritmo Genético – AG (*Genetic Algorithm*, GA / Hashem Rizk, 2020), implementadas em MATLAB®.

- 7) Por fim, pelas análises desses elementos estruturais, buscar a implementação ideal para Identificação de Danos Estruturais a partir da Correlação Numérica do MEF e Experimental, de dados estáticos de deslocamentos e dinâmicos por meio de dados modais de frequências naturais e modos de vibração, principalmente por meio das análises da função objetivo de mínimos quadrados utilizadas e com os métodos de otimização supracitados, mas principalmente com o ED, alcançando uma equação de dano simplificada, além de etapas necessárias para localização de danos.

A partir dos dados obtidos, tanto nos ensaios experimentais e as modelagens realizadas, será utilizado o método de Otimização de Evolução Diferencial em conjunto com o Métodos de Algoritmos Genéticos, para verificar a eficácia dos mesmos na identificação de danos estruturais. A aplicação do Método de Evolução Diferencial e de Algoritmo Genético foi realizada, por meio de uma escolha dos melhores resultados, em que é evidente a localização do dano, muitas vezes realizadas por uma diversidade de iterações para se alcançar uma boa convergência.

O fluxograma da Figura 4.3 seguinte apresenta o esquema de identificação de danos implementado nesta pesquisa, tanto no capítulo 5 com a aplicação dos resultados experimentais da pesquisa como também no ANEXO 1 com a aplicação dos resultados preliminares.

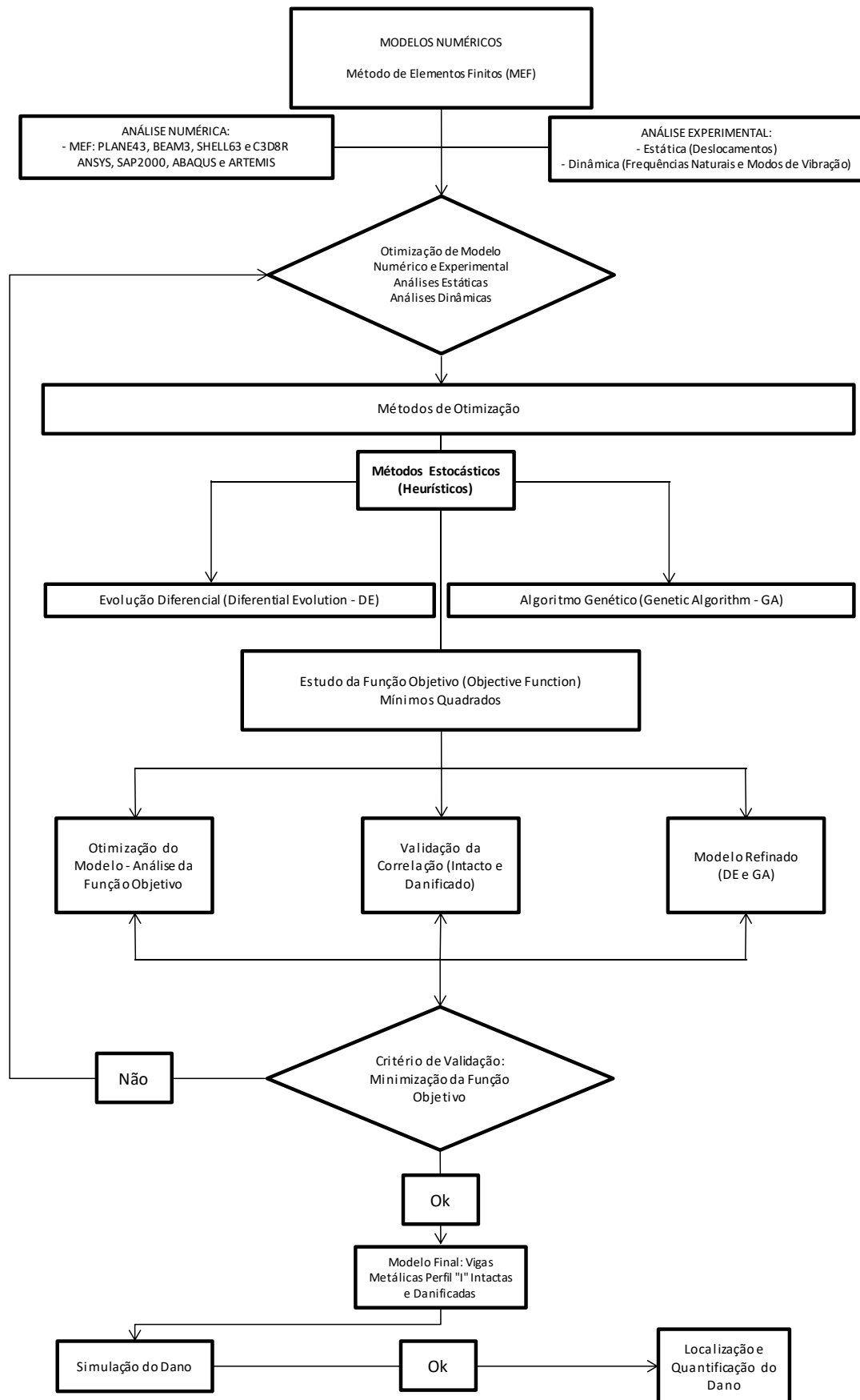


Figura 4.3 - Fluxograma esquemático geral da pesquisa para as técnicas de otimização, localização e quantificação de dano

4.1 ANÁLISE COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

As análises com os Métodos de Otimização se deram por meio da verificação das ferramentas desenvolvidas para MATLAB[®] em geral, utilizando-se várias tentativas para se calibrar o método, com os panoramas numéricos e experimentais já demonstrados anteriormente.

Os métodos possuem bons números de parâmetros de controle de entrada, que vão auxiliar, dependendo das características das populações envolvidas, nesse caso os valores dos deslocamentos estáticos e dos dados dinâmicos de frequências naturais e modos de vibração das estruturas intactas e danificadas de vigas que foram utilizadas, permitindo uma melhor aproximação à situação que se simulou, tendo como finalidade a localização e quantificação do dano em determinados elementos da estrutura.

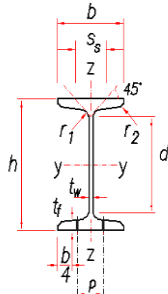
A resolução do problema, foi formulada, de modo que a Função Objetivo, se tornasse uma função que associasse cada ponto (no caso, os deslocamentos obtidos nas análises estáticas e os modos de vibração / frequências naturais nas análises dinâmicas) no espaço de soluções a um número real. Este número permite medir a qualidade dos resultados obtidos, sendo que em um problema de minimização, quanto menor este valor, melhor será a resposta.

4.2 ANÁLISES EXPERIMENTAIS

Nessa análise já em estudos realizados pelo próprio autor, Emidio Sobrinho (2021), também em uma viga metálica biapoiada, de perfil importado laminado do tipo I Europeu IPN 500x104 (European Standard Beams / I-shaped cross-section, Dimensions: DIN 1025-1:1995, NF A 45-209 (1983). Tolerances: EN10024:1995), para verificação das variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional.

Dentre as seções de aço importados de vigas existentes estão os Norte Americanos (Wide Flange Beams, Standard Beams, Bearing Piles, Standard Channels, Angles), Europeus (IPE, IPN, HE, HL, HD, HP, Equal Leg Angles, Unequal Leg Angles, UPE, UPN,U) e do Reino Unido (UB, Joists, UC, UBP, CH e PFC), dentre outros. As propriedades mecânicas e especificações da viga verificada são apresentadas na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1 – Especificações de Catálogo: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas (Viga IPN 500x104)



Catálogo / European I Profile – Steel: IPN 500x104									
	h	b	t_w	t_f	r₁	r₂	Area	G	E
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm ²)	(kg/m)	(MPa)
	500	185	18	27	18	10.8	179	141	200
	Length	d	I_x	I_y	A_L	A_G	Z_x	Z_y	f_y*
	(m)	(mm)	(cm ⁴)	(cm ⁴)	(m ² /m)	(m ² /t)	(cm ³)	(cm ³)	(MPa)
	6.00	404.3	68740	2480	1.63	11.60	3240	456	345

A busca principal com a utilização dessa viga é trazer uma escala maior e com uma aplicação mais real desse elemento metálico muitas vezes inseridos dentro de contextos de obras especiais de grande porte sejam elas em edificações como também em obras de infraestrutura essencialmente para propiciar maiores capacidades de suportes além da busca contínua para vencer grandes vãos e conseqüentemente gerar menos linhas de apoios intermediárias.

4.3 EXPERIÊNCIAS PRÉVIAS PARA SE ALCANÇAR A ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DINÂMICA DA VIGA METÁLICA BIPOIADA INTACTA QUE MELHOR ATENDESSE ÀS NECESSIDADES E APRENDIZADOS LABORATORIAIS ADQUIRIDOS AO LONGO DESSA PESQUISA

Para se alcançar a análise que melhor se adequasse às experiências propostas para se realizar no Laboratório de Estruturas da UnB (LABEST) os ensaios dinâmicos propostos com a viga metálica biapoiada de perfil do tipo I Europeu IPN 500x104 foram necessárias algumas idealizações prévias dado o desconhecimento do comportamento desse elemento estrutural tanto na análise analítica, numérica bem como a experimental dentro de uma verificação dinâmica.

Nessa busca foi iniciado uma estruturação dos ensaios no final do ano de 2019 baseados nos estudos e resultados alcançados anteriormente. Com a definição dessa estruturação iniciou-se a preparação da viga em termos de lixamentos e pinturas bem como definições quanto às condições de apoio / contornos desse elemento no início de março de 2020 e que foi interrompida com o fechamento dos laboratórios e cessamento de suas atividades e da suspensão do calendário acadêmico da UnB em 23/03/2020 por meio de reunião realizada pelo Conselho de Ensino, Pesquisa e Extensão (CEPE) como um todo tendo em vista às ações relativas à emergência de saúde pública de importância internacional decorrente da pandemia do coronavírus (COVID-19).

Com essa interrupção e após autorizações da Administração Superior e o Comitê Gestor do Plano de Contingência em Saúde da COVID-19 da UnB por meio do acompanhamento dos desdobramentos da pandemia do coronavírus ao longo do desenrolar do ano de 2020 e com informações de retorno à comunidade acadêmica foram retomadas as atividades no final do ano.

4.3.1 Ensaio Dia 04/12/2020 – Início de Ensaios da Viga Metálica

Mais especificamente foram realizados agendamentos para uso do "Sistema de Aquisição de Dados - LabView" do "Laboratório de Vibração e Dinâmica de Sistemas" da UnB inicialmente no dia 04/12/2020, conforme Figura 4.4 a seguir, além é claro das preparações prévias exigidas da viga novamente quase 6 meses depois, do ensaio modal e da montagem do sistema de massa móvel a ser testado nos outros dias de experimentos.



Figura 4.4 - Retorno e ensaio inicial dia 04/12/2020

Em função da conformação da curva de frequências naturais dos resultados obtidos no dia 04/12/2021 por meio do processamento realizado com o software ARTeMIS[®], conforme Figura 4.5, já também utilizando a experiência das pesquisas anteriores verificou-se o posicionamento inadequado do acelerômetro de referência quando se busca um número maior de captação de modos de vibração do elemento.



Figura 4.5 - Exemplo da verificação da conformação da curva de frequências naturais dos resultados obtidos no dia 04/12/2021 - ARTeMIS[®]

Sendo necessário após essa análise refazer os ensaios realizados nesse dia apesar dos adequados comportamentos dos espectros de acelerações obtidos principalmente quando se verifica o 1º modo mas com inadequações nas buscas para os demais modos.

4.3.2 Preparação e Ensaio Dia 11/12/2020 – Continuidade dos Ensaios da Viga Metálica com os Testes para Utilização do Sistema de Massa Móvel

Para dar continuidade ao ensaio agora para aplicação da técnica da massa móvel, foi desenvolvido um sistema previamente no dia 08/12/2020 que possibilitasse o deslocamento ao longo da viga de forma mais prática e célere, tendo em vista a tentativa de aplicação de uma massa da ordem de 10% do peso total da viga. A Figura 4.6 a seguir mostra o sistema idealizado inicialmente e a sua evolução.

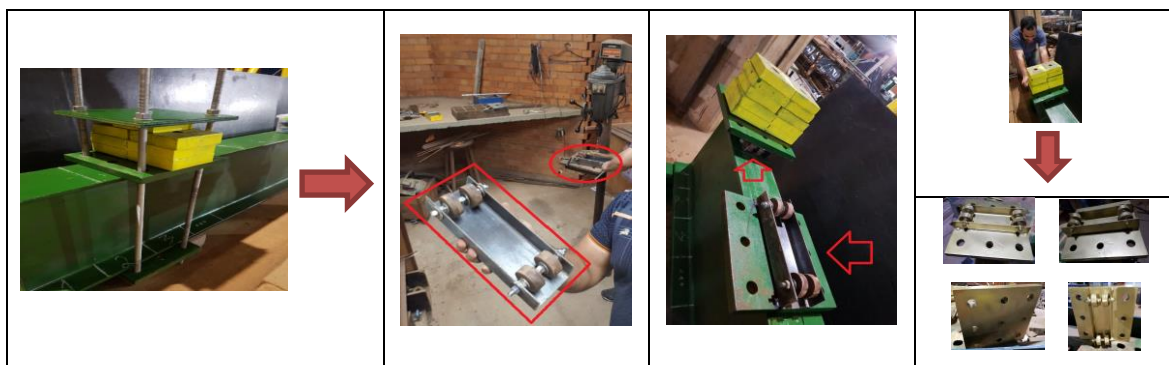


Figura 4.6 - Sequência de preparação do sistema de massa móvel a ser utilizado inicialmente – Ensaio dia 08/12/2020

O resultado do desenvolvimento e da aplicação desse sistema pode ser verificado na Figura 4.7 a seguir.

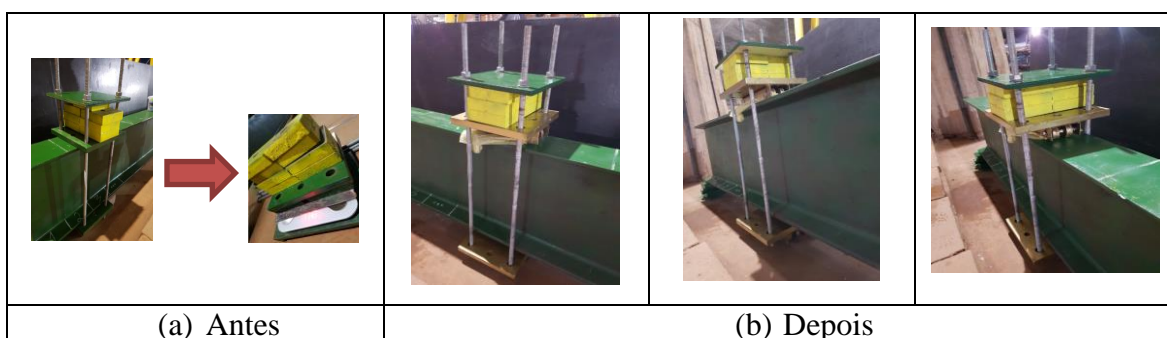


Figura 4.7 - Sistema de massa móvel com mobilidade através da implantação do carrinho - Ensaio dia 08/12/2020

Com esse sistema foi realizado o primeiro ensaio com a massa móvel na viga metálica intacta no dia 11/12/2020. Essa massa móvel composta pelos carrinhos ligados a de 2 chapas de aço com furos que possibilitassem a ligação dessas chapas de aço (sobre e sob as mesas da viga) por barras roscadas de 1 metro de altura com porcas e arroelas, possibilitando o deslocamento do sistema ao longo do comprimento da viga, bem como a aplicação de massas, além das chapas adicionais de massas, todos esses componentes para alcançar 84,10 kg com exatos 10 % do peso total da viga metálica, conforme demonstrado na Figura 4.8 a seguir.

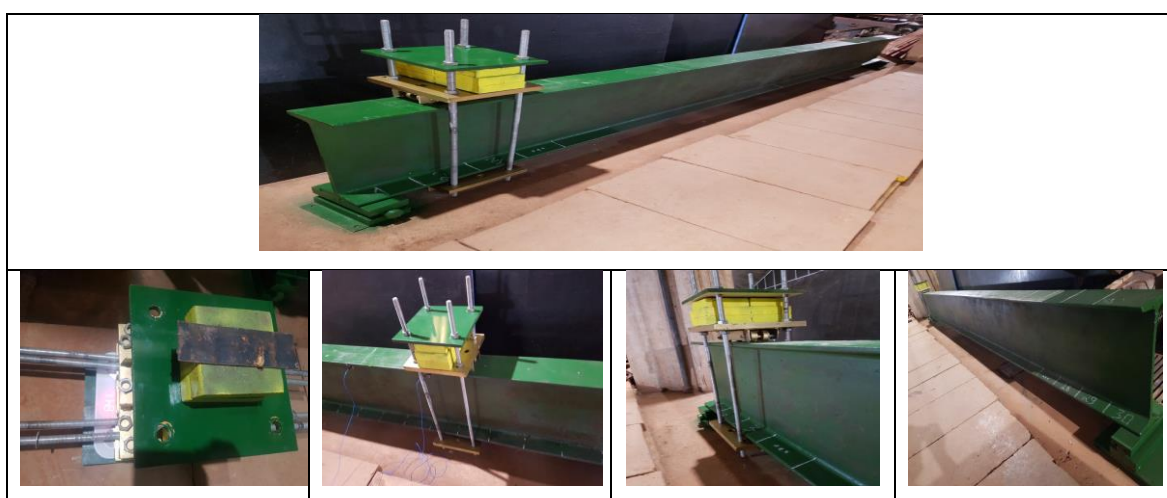




Figura 4.8 - Andamento do ensaio do dia 11/12/2020 com a utilização do sistema de acoplagem para possibilitar os deslocamentos e as aplicações da massa móvel

Dada a sensibilidade dos ensaios dinâmicos em termos de obtenção de frequências naturais fez com que se necessitasse ainda prosseguir com essas calibrações iniciais e as influências do sistema de massa móvel em termos de alturas totais e pesos.

4.3.3 Ensaio Dia 18/12/2020 – Ensaio Modal e com o Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica

Tendo em vista o posicionamento inadequado do acelerômetro de referência no ensaio do dia 04/12/2020 foi feito o ensaio modal no dia 18/12/2020 conforme pode ser verificado na Figura 4.9 a seguir.

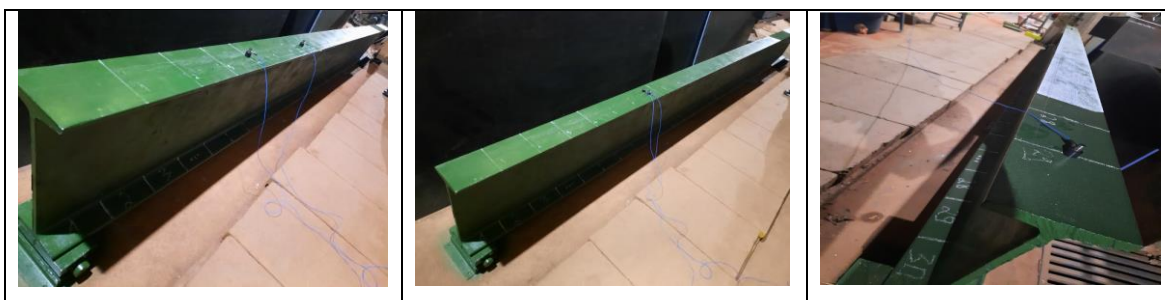


Figura 4.9 - Repetição do ensaio modal da viga intacta metálica no dia 18/12/2020

Nesse mesmo dia também foi realizado um ensaio com o sistema de massa móvel com carrinho em que os posicionamentos dos acelerômetros foram verificados tanto na parte acima como abaixo da mesa superior da viga conforme a Figura 4.10 a seguir.

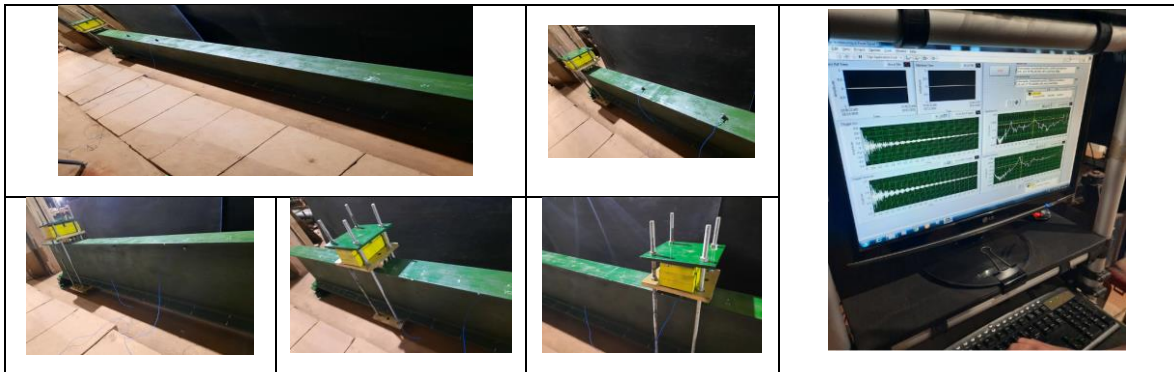


Figura 4.10 - Ensaio com o sistema de massa móvel com carrinho em que posicionamentos dos acelerômetros foram verificados tanto na parte acima como abaixo da mesa superior da viga – Ensaio dia 18/12/2020

Com a persistência de uma acoplagem de frequências (picos duplos num mesmo ponto) verificada nas análises gráficas obtidas de forma direta do sistema de aquisição de dados do LabView foi verificada influências do sistema de massa móvel por meio das barras roscadas de ligação da massa inferior com o carrinho e a parte do conjunto superior. Essa verificação observada na Figura 4.11 seguinte se deu com o posicionamento dos acelerômetros na própria barra roscada, excitação com o martelo nas posições anteriores e também na barra roscada e por fim com a ligação de porcas nas barras roscadas e os comportamentos obtidos.

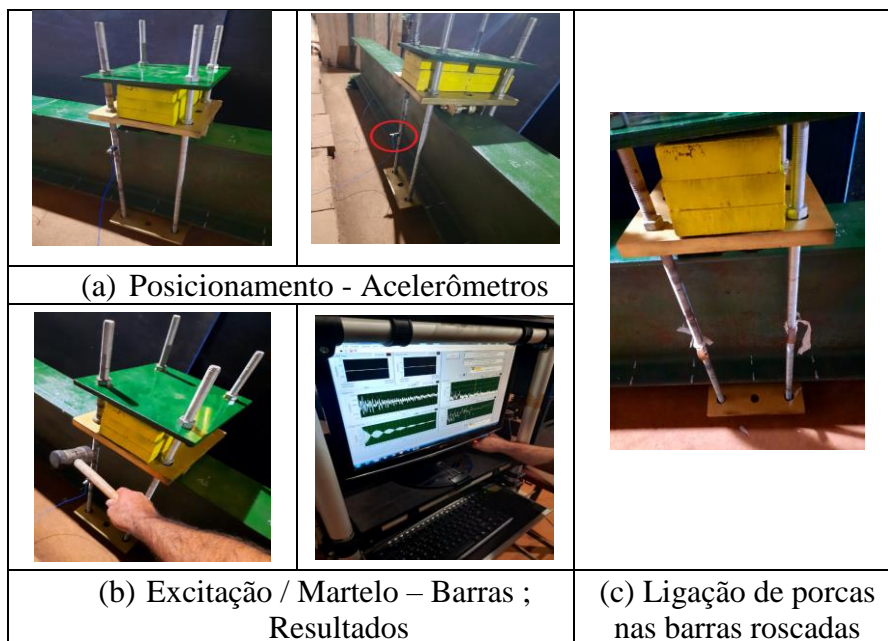


Figura 4.11 – (a) Posicionamento dos acelerômetros na própria barra roscada; (b) Excitação com o martelo nas posições anteriores e também na barra roscada com resultados; e por fim com (c) A ligação de porcas nas barras roscadas – Ensaio dia 18/12/2020

Todas essas análises serviram justamente para se modificar as conformações do sistema de massa móvel nos próximos no intuito de minimizar os resultados e comportamentos anômalos demonstrados no LabView.

4.3.4 Ensaio Dia 22/12/2020 – Ensaio com uma Nova Organização do Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica

Ainda na tentativa de minimizar as acoplagens de frequências naturais observadas nas análises gráficas do sistema de aquisição de dados LabView buscou-se agora no ensaio do dia 22/12/2020 não utilizar as barras roscadas e uma consequente diminuição da massa móvel utilizada, tentando diminuir as alturas totais do sistema para que por exemplo não possibilitasse momentos gerados pelo sistema ou mesmo efeitos diferenciados de esforços como o de torção.

Na Figura 4.12 seguinte utilizou-se massas que giravam em torno de 10% do peso total da viga no intuito de verificar o comportamento dinâmico dessa viga agora com essa massa móvel.

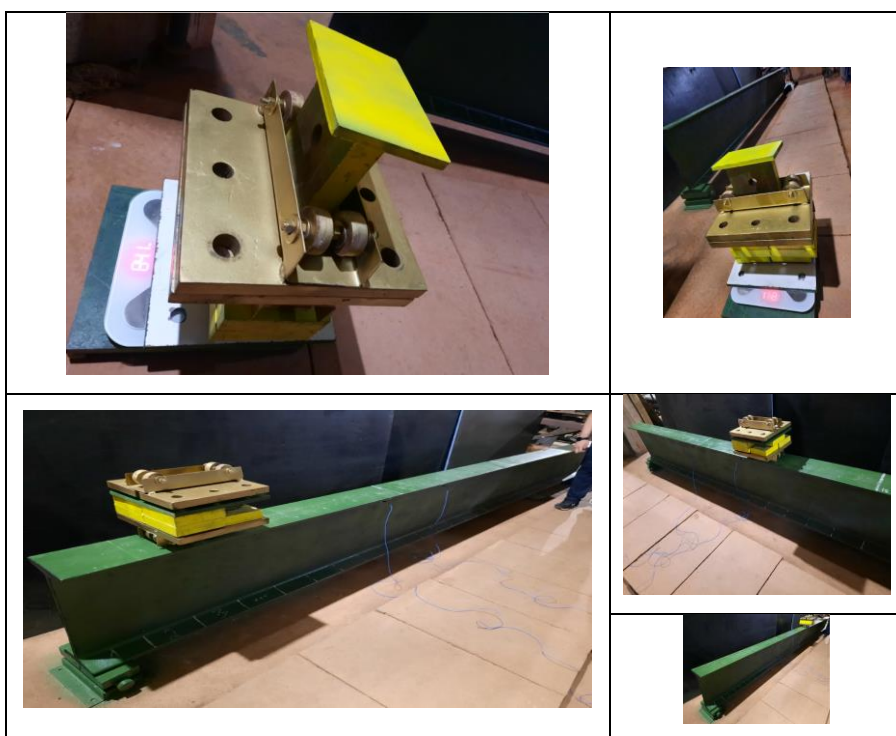


Figura 4.12 - Viga com nova conformação do sistema de massa móvel – Ensaio dia 22/12/2020

Com a insistência da permanência dos duplos picos observados nas análises gráficas fez-se outros testes de conformações do sistema de massa móvel visando minimizar essas

influências até mesmo com o professor Marcus Girão de teste de massa tudo isso demonstrado na Figura 4.13 seguinte.

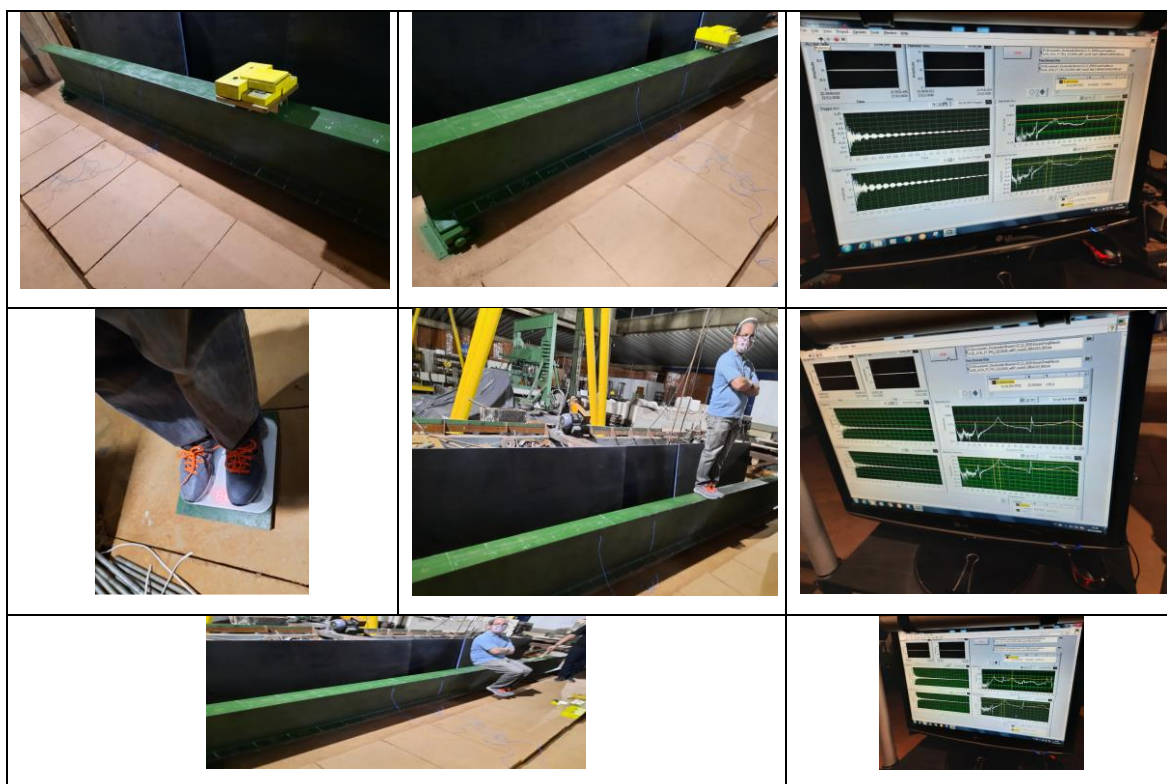


Figura 4.13 - Testes de conformações do sistema de massa móvel – Ensaio dia 22/12/2020

Os testes prosseguiram para que essa calibração quanto ao ideal sistema fosse efetivada.

4.3.5 Ensaio Dia 29/12/2020 – Prosseguimento do Ensaio com uma Nova Organização do Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica e Posicionamentos dos Acelerômetros

Na sequência para verificar o comportamento da viga com as novas organizações do sistema de massa móvel e dos novos posicionamentos dos acelerômetros conforme demonstra a Figura 4.14 essas situações.



Figura 4.14 - Novas organizações do sistema de massa móvel e dos novos posicionamentos dos acelerômetros – Ensaio dia 29/12/2020

Apesar dessas análises verificou-se a necessidade de encerrar as atividades do ano de 2020 na busca por uma melhoria nas condições de apoio da viga com um número maior de travamentos na seção da viga nos apoios.

4.3.6 Preparação Dia 12/01/2021 – Verificações Geométricas do Elemento Estrutural, Preparação das Condições de Contorno da Viga e Nivelamentos

Antes da melhoria desse sistema de apoio da viga foi verificado conforme demonstração na Figura 4.15 da geometria real do elemento por meio da coleta “in loco” das dimensões da seção transversal com o uso de paquímetro no intuito de utilizar essas dimensões no desenvolvimento de uma aproximação maior dos modelos criados.

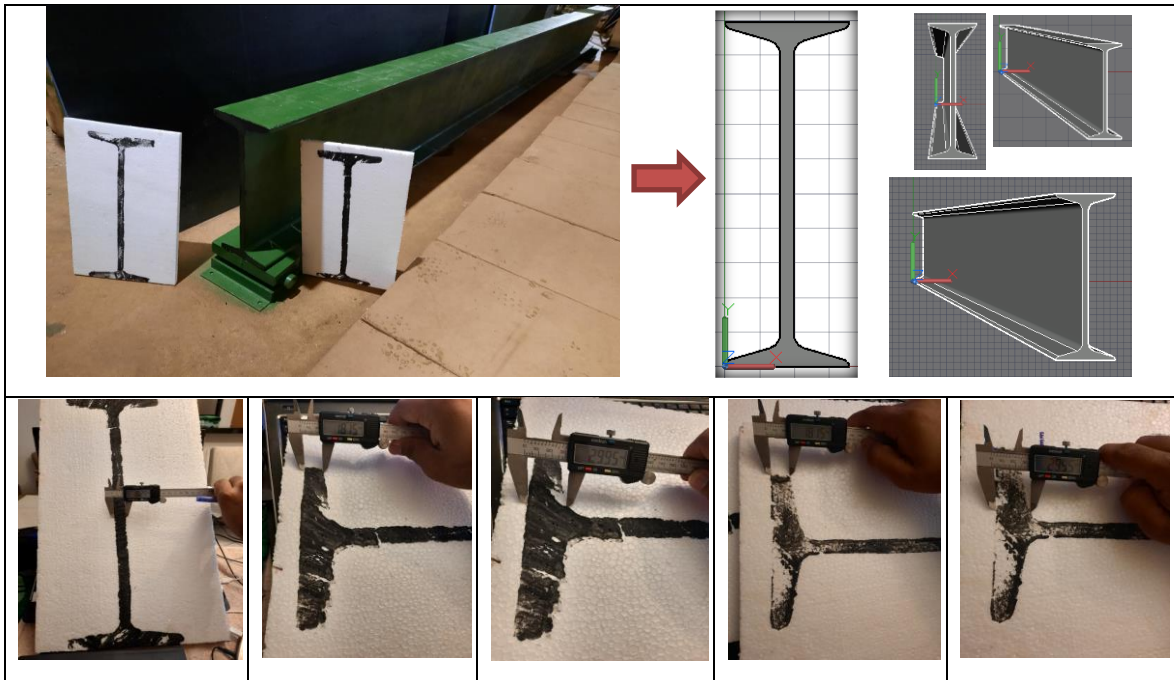
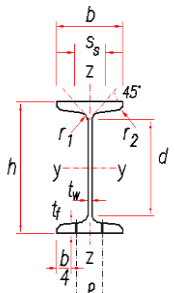


Figura 4.15 - Verificações geométricas com paquímetro da seção transversal do elemento – Dia 12/01/2021

As novas propriedades geométricas obtidas por meio dessas verificações geométricas “in loco” com o uso do paquímetro e demais ferramentas são apresentadas na Tabela 4.2 seguinte.

Tabela 4.2 - Especificações Medidas “in loco”: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas (Viga IPN 500x104)

	Medidas “in loco” / European I Profile – Steel: IPN 500x104								
	h (mm)	b (mm)	tw (mm)	tr (mm)	r1 (mm)	r2 (mm)	Area (cm ²)	G (kg/m)	E (MPa)
	497.8003	177.7968	18.2500	20.0853	21.3516	11.0889	151,7522	141	200
Length (m)	d (mm)	Ix (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)	AL (m ² /m)	AG (m ² /t)	Zx (cm ³)	Zy (cm ³)	fy* (MPa)	
6.00	405.0400	68740	2480	0.2529	1.7936	2435	682	345	

E continuando a preparação da viga agora com o aprimoramento das condições de contorno do elemento estrutural podem ser observadas na Figura 4.16 seguinte.

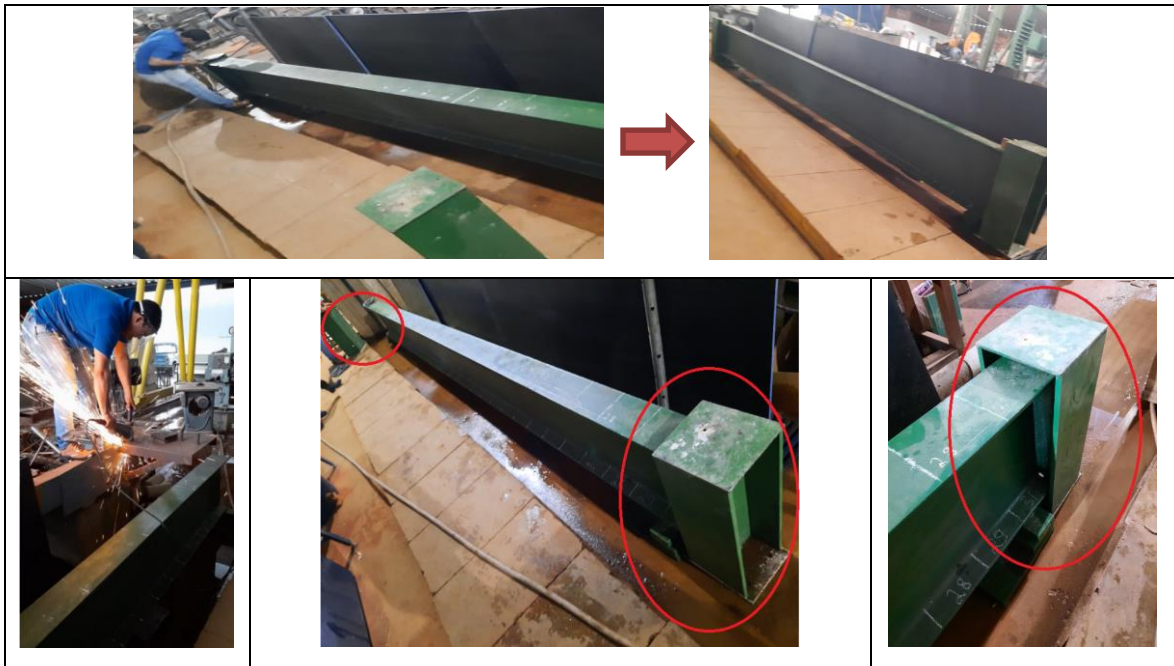


Figura 4.16 - Preparações dos apoios com inserção das colunas metálicas e fixações para propiciar travamentos na região superior e inferior da viga por meio das mesas – Dia 12/01/2021

Com relação ao nivelamento gerado após essas adequações que pode ser verificada na Figura 4.17 a seguir.

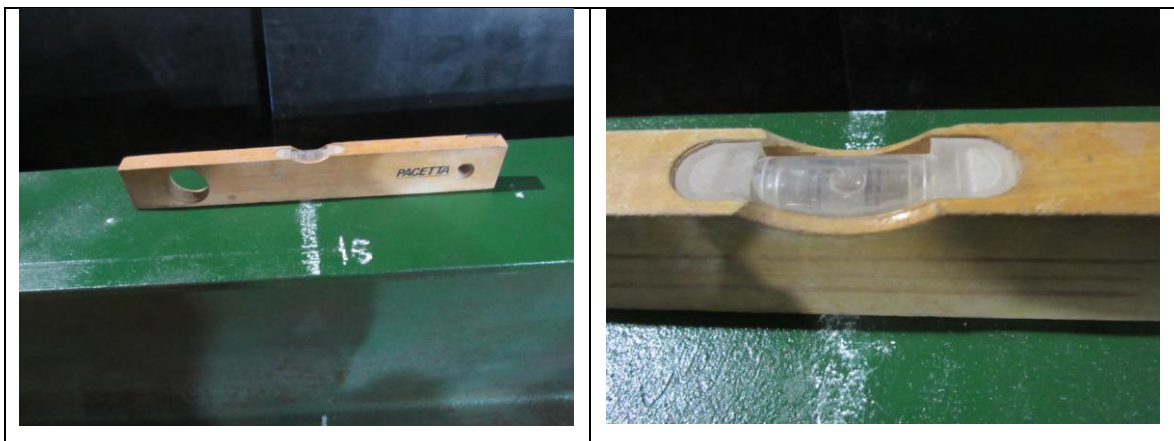


Figura 4.17 - Verificação do novo nível do elemento estrutural – Dia 12/01/2021

Com essas verificações tornou-se possível dar prosseguimento aos experimentos que foram realizados em Fevereiro de 2021. Lembrando que todos esses aprimoramentos se deram em função de verificações dos comportamentos anômalos nos espectros de acelerações e frequências naturais obtidas no LabView sempre em busca de minimizar tendências desconhecidas dessa análise dinâmica da viga metálica com práticas e adoções de estratégias oriundas também das experiências em outras pesquisas.

4.3.7 Ensaio Dia 09/02/2021 – Prosseguimento do Ensaio com Novas Tentativas de Organizações do Sistema de Massa Móvel da Viga Metálica com o Aprimoramento das Condições de Apoio

No prosseguimento dos ensaios para verificar o comportamento da viga ainda com as tentativas das novas organizações do sistema de massa móvel e dos aprimoramentos das condições de apoio acelerômetros observa-se a Figura 4.18 com essas situações.



Figura 4.18 - Nova tentativa de organização do sistema de massa móvel e das condições de apoio – Ensaio dia 09/02/2021

Nessa nova tentativa de organização do sistema de massa móvel que serviu para se certificar que os duplos picos de frequências ainda estavam presentes mesmo com o aprimoramento das condições de apoio verificando as influências do carrinho e da altura do sistema, além da já verificada influência da barra roscada na tentativa inicial dos ensaios, tudo isso com a busca do método da massa móvel que melhor apresentasse bons comportamentos e minimizando tais resíduos de resultados verificados nas análises gráficas oriundas no sistema de aquisição de dados do LabView.

A partir dessa sensibilidade adquirida por meio de todas essas verificações anteriores, iniciou-se efetivamente o programa de ensaios que foram trabalhados os resultados dessa

pesquisa. Para tanto, com esses testes foi possível traçar as definições das massas móveis que pudessem ser as mais adequadas para a técnica aplicada nos experimentos dessa pesquisa conforme demonstrações da Figura 4.19 seguinte.

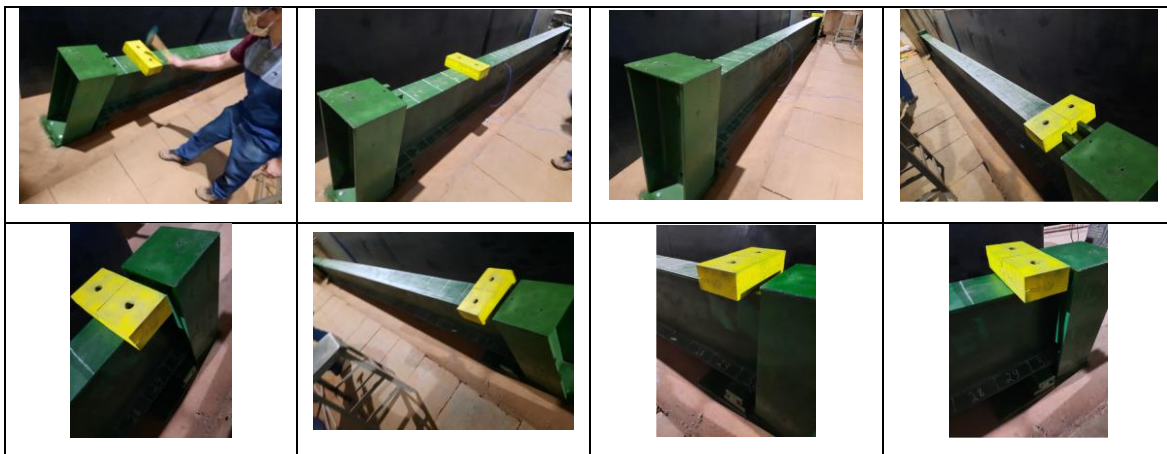


Figura 4.19 - Testes para as definições das massas móveis que pudessem ser as mais adequadas para a técnica aplicada – Ensaio dia 09/02/2021

4.4 ENSAIO DIA 11/02/2021 (EFETIVO DIA DE INÍCIO DO PROGRAMA DE ENSAIOS DA PESQUISA) – ENSAIO COM O SISTEMA DE MASSA MÓVEL DEFINIDO DA VIGA METÁLICA

Iniciou-se nessa data de 11/02/2021 efetivamente o programa de ensaios que foram trabalhados os resultados dessa pesquisa. Para isso, serão elencados alguns parâmetros adotados e premissas que nortearam esses ensaios. Inclusive foi realizada a análise modal da viga para que fossem considerados e explorados inclusive deslocamentos dos modos de vibração da viga intacta.

4.4.1 Massas Móveis Definidas Para a Utilização da Técnica na Viga Metálica

As massas móveis efetivamente definidas para essa sequência de ensaios dinâmicos são demonstradas na Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22 seguintes.

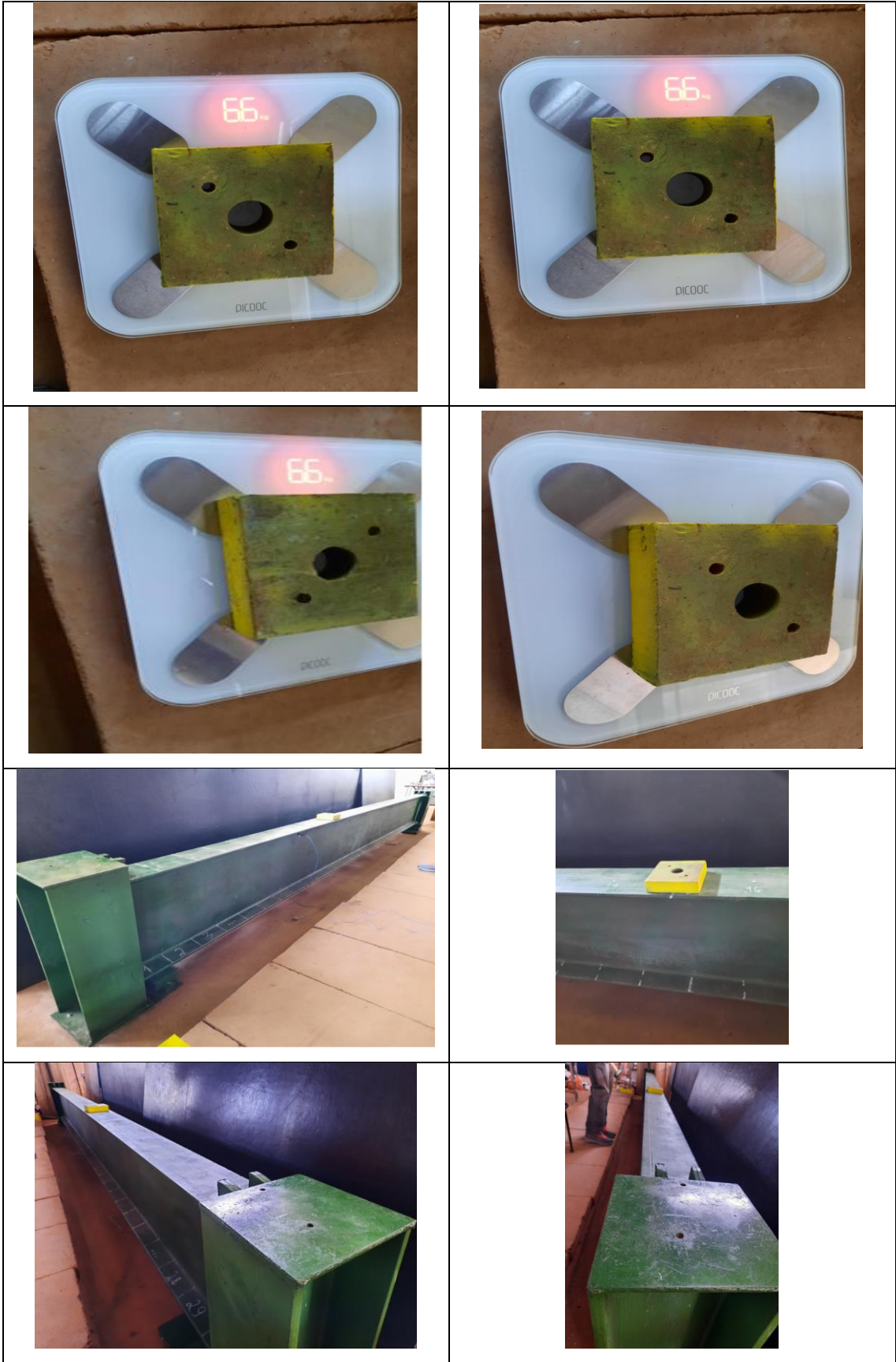




Figura 4.20 - Massa móvel menor utilizada – Peso de Cerca de 6,60 kg (Aproximadamente 0,8% do Peso Total da Viga)





Figura 4.21 - Massa móvel média utilizada – Peso de Cerca de 12,00 kg
(Aproximadamente 1,5% do Peso Total da Viga)





Figura 4.22 - Massa móvel maior utilizada – Peso de Cerca de 27,70 kg
(Aproximadamente 3,3% do Peso Total da Viga)

Essas definições de massas de ordem de grandeza percentual abaixo de 5,0% se valem das análises prévias realizadas que demonstraram sensibilidade maior e ao mesmo tempo melhores conformações tanto nos espectros de acelerações como também nas frequências naturais obtidas inclusive corroborando com resultados e constatações das pesquisas na área quando da utilização de massas móveis menores até mesmo para essa viga em escala maior.

Por meio de todas essas análises anteriores e essa última verificação do dia 09/02/2021 foi analisado se podia haver a interferência de ruídos gerados pela trepidação entre a massa adicional e a superfície da mesa superior da viga como também a questão do aumento da inércia rotacional, cujo efeito foi desconsiderado nesta análise, mas que na análise gráfica dos resultados do LabView se mostraram melhores quando se analisa a suavidade do sinal.

Em termos de definição a massa adicional foi adequadamente posicionada nos nós da discretização com divisões de 20 cm, evitando a movimentação da viga na passagem de um nó para outro. Na verificação da grandeza da massa aplicada e sua correlação com a carga máxima de suporte da viga apresenta-se o dimensionamento no APÊNDICE B, em que se faz uma analogia com a verificação de carga máxima também com a Viga Perfil I Americano (102.0x11.4).

4.4.2 Instrumentação: Equipamentos e Ferramentas Para a Utilização da Técnica na Viga Metálica

Dentre as instrumentações necessárias para o ensaio são listados os equipamentos e ferramentas utilizadas, inicialmente com o martelo excitador com cabo de madeira e bordas

plásticas, conforme a Figura 4.23 seguinte, pois foi a ferramenta que melhor resultados propiciaram no último teste.

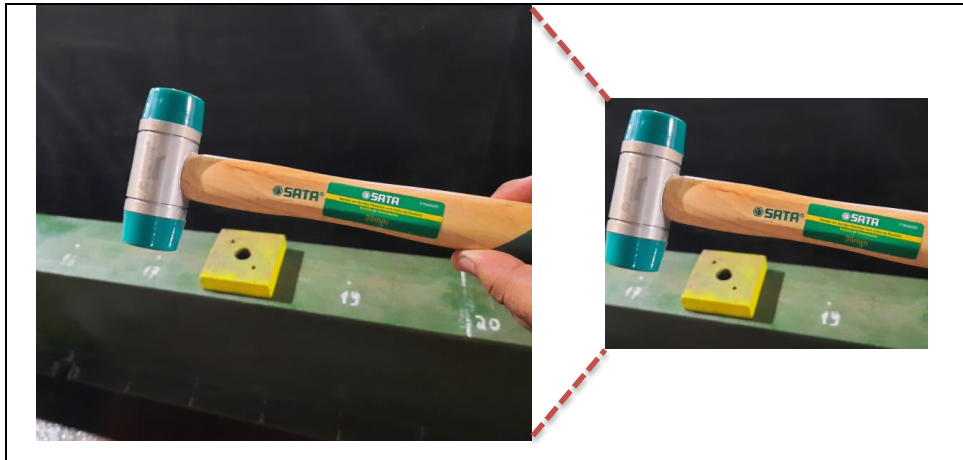


Figura 4.23 - Martelo excitador utilizado no ensaio com cabo de madeira e bordas plásticas

Os acelerômetros de referência e móvel (quando da análise modal), bem como o conjunto de elementos necessários para compor o “Sistema de Aquisição de Dados – LabView” utilizados são demonstrados na Figura 4.24 seguinte.

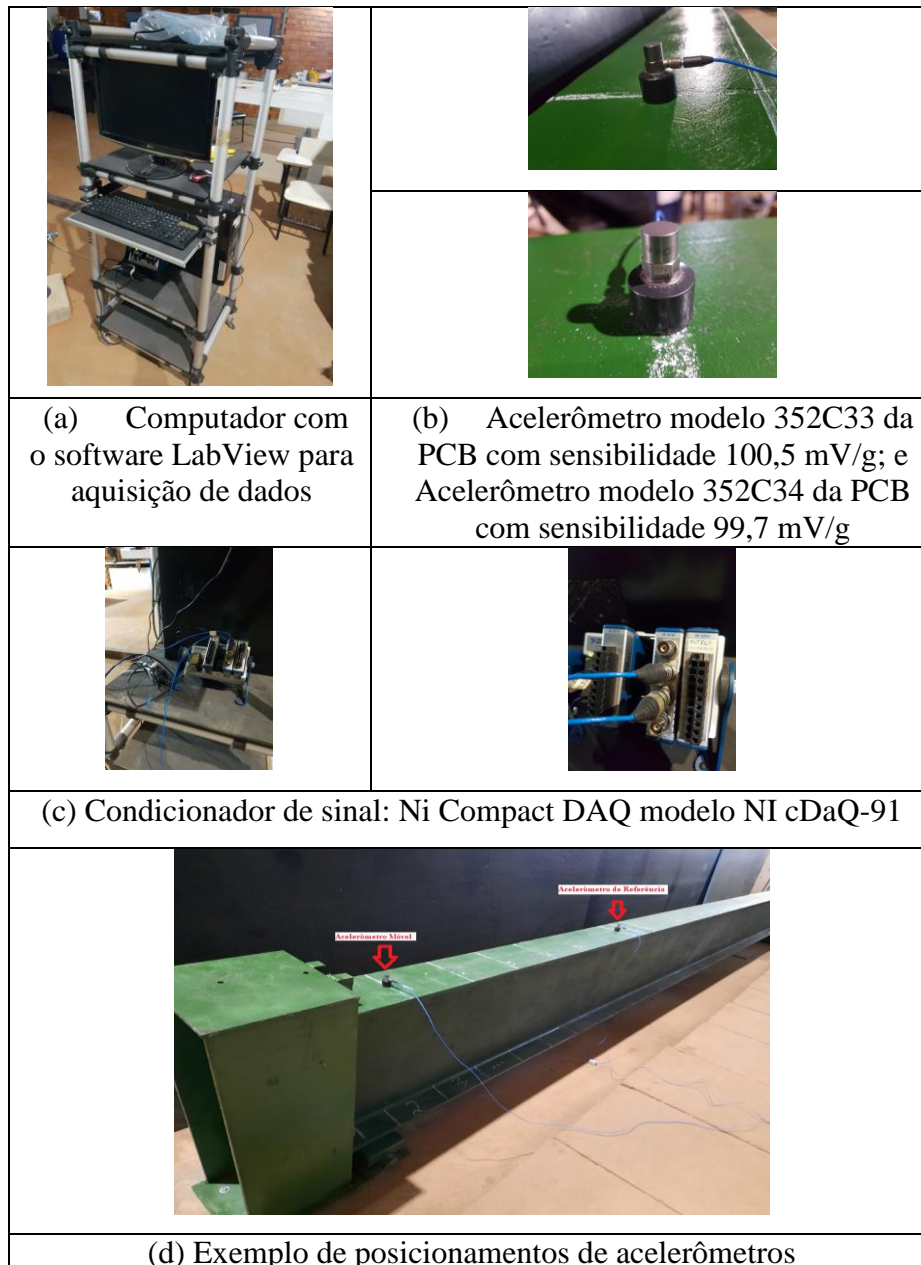


Figura 4.24 - Acelerômetros de referência e móvel, além do “Sistema de Aquisição de Dados – LabView”

Juliani (2014) cita que o posicionamento dos acelerômetros é um dos principais fatores na identificação dos principais modos de vibração em uma monitoração de vibrações, sendo que é necessário o conhecimento prévio da estrutura para se identificar de forma prévia quais são as frequências e modos de vibração esperados na monitoração, sinalizando ainda que a instalação de um acelerômetro em um nó modal pode causar a não identificação de um ou mais modos. Esses critérios foram aplicados nos ensaios experimentais dessa pesquisa.

A interface gráfica do “Sistema de Aquisição de Dados – LabView” com os exemplos de resultados dos espectros de acelerações obtidas pode ser verificada na Figura 4.25 seguinte.

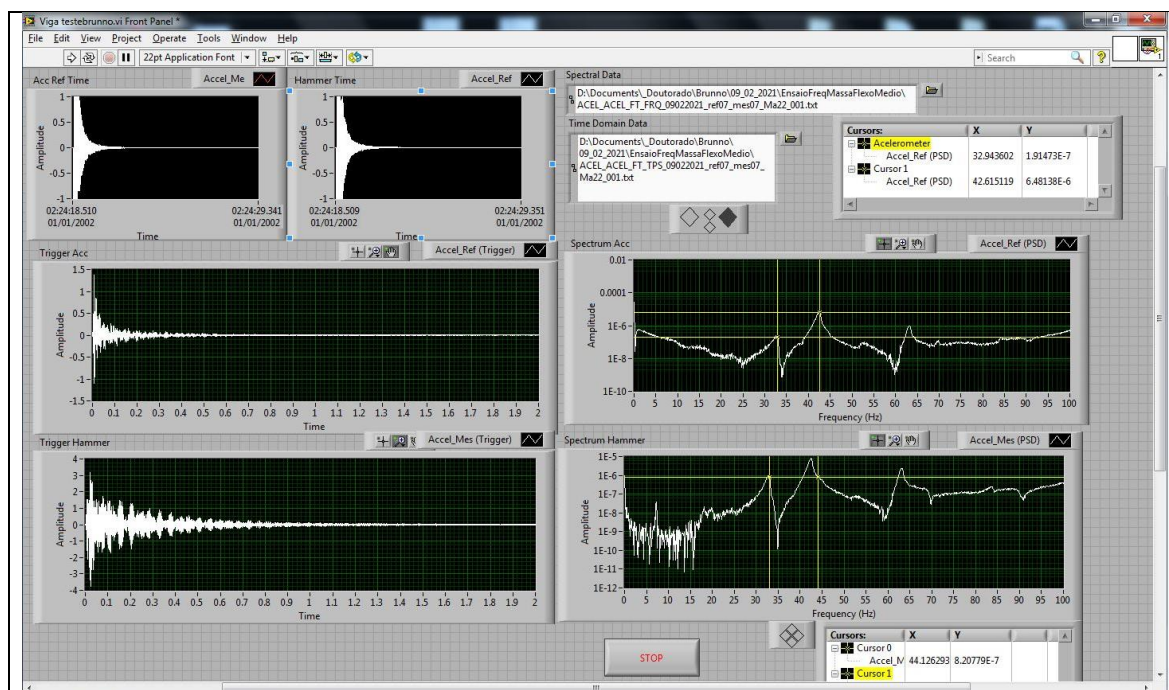


Figura 4.25 - Interface gráfica – LabView

Foram utilizados dois acelerômetros para a realização dos ensaios visando capturar pelo menos as acelerações correspondentes à primeira frequência natural. Os acelerômetros foram localizados na linha do nó 7 correspondente à posição de 1,40 m, aproximadamente em $L/4$, para capturar as acelerações correspondentes. Ou seja, como no comportamento dos modos de vibração há pontos de deslocamentos nulos dependendo do posicionamento do acelerômetro se impossibilita a identificação das frequências naquelas posições. Lembrando que esse comportamento é demonstrado na Figura 3.11 apresentada anteriormente.

4.4.3 Resumo Geral Temporal dos Ensaios Efetivos Utilizados na Pesquisa

Em termos de resumo geral temporal dos ensaios finais efetivos aproveitados na pesquisa sinalizando a utilização de 3 configurações de massas móveis distintas com 29 locais de posicionamento das mesmas e as divisões em 30 partes do elemento estrutural (discretização), se dando o experimento da seguinte forma (ver Figura 4.26):

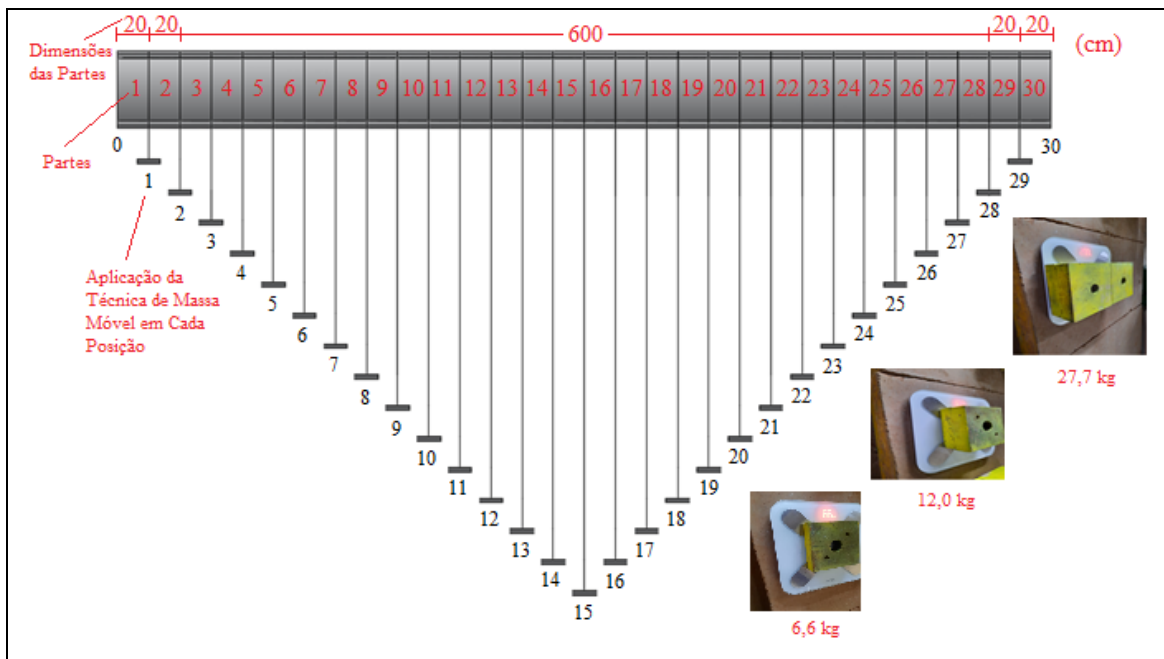


Figura 4.26 – Esquema dos ensaios efetivos realizados

- Ensaios 13 (2º Ensaio Efetivo: Intacta - 11/02/2021) e 20 (6º Ensaio Efetivo: Danificada - 20/02/2021) Modais da Viga.

- 1º Ensaio efetivo em 09/02/2021 (Intacta):
 - ❖ Ensaio 7 viga intacta com uma massa móvel de 6,6 kg;
 - ❖ Ensaio 8 viga intacta com uma massa móvel de 12,0 kg;
 - ❖ Ensaio 9 viga intacta com uma massa móvel de 27,7 kg.

- 3º Ensaio efetivo em 11/02/2021 (Intacta - Repetição):
 - ❖ Ensaio 10 viga intacta com uma massa móvel de 6,6 kg;
 - ❖ Ensaio 11 viga intacta com uma massa móvel de 12,0 kg;
 - ❖ Ensaio 12 viga intacta com uma massa móvel de 27,7 kg.

- 4º Ensaio efetivo em 13/02/2021 (Danificada):
 - ❖ Ensaio 14 viga danificada com uma massa móvel de 6,6 kg;
 - ❖ Ensaio 15 viga danificada com uma massa móvel de 12,0 kg;
 - ❖ Ensaio 16 viga danificada com uma massa móvel de 27,7 kg.

- 5º Ensaio efetivo em 18/02/2021 (Danificada - Repetição):
 - ❖ Ensaio 17 viga danificada com uma massa móvel de 6,6 kg;

- ❖ Ensaio 18 viga danificada com uma massa móvel de 12,0 kg;
- ❖ Ensaio 19 viga danificada com uma massa móvel de 27,7 kg.

4.4.4 Preparações Dias 12 e 13/02/2021 e Ensaio Efetivos Dias 13, 18 e 20/02/2021: Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada

Para a análise dinâmica da viga metálica biapoiada danificada foi necessário realizar todas as verificações possíveis no elemento intacto tendo em vista que após o dano ser induzido as características iniciais do elemento estrutural não poderiam mais ser exploradas.

As preparações para inserção dos danos induzidos nas quatro pontas das mesas, tanto inferior como superior, se deram inicialmente no elemento 15 imediatamente entalhados conforme marcações e sequências demonstradas na Figura 4.27 seguinte.



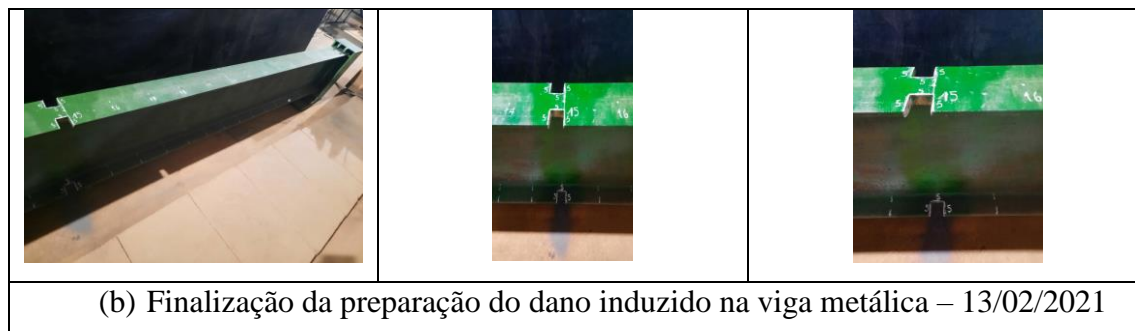


Figura 4.27 – Preparações dias 12 e 13/02/2021 para inserção dos danos induzidos nas quatro pontas das mesas

A dimensão do dano induzido foi de 5 cm por 5 cm, que teve essas dimensões definidas pois devido os ruídos que as situações dos ensaios estavam envoltos, onde as verificações dinâmicas são bem sensíveis, fez com que danos relevantes já evidenciarão a capacidade de identificação dos danos da viga com as metodologias dessa pesquisa. Até porque em situações normais os ruídos diversos sempre estarão presentes. Essa seria uma discussão em que entra numa classificação dos EUA da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) na qual denomina-se de TRL (*Technology Readiness Level*) literalmente traduzido como “Níveis de Preparação da Tecnologia” abordando questões relativas do ambiente de laboratório criado para a realização de experimentos em pesquisas.

Os “Níveis de Preparação da Tecnologia” envolvem um tipo de sistema de medição utilizado para avaliar o nível de maturidade de uma tecnologia específica. Avalia-se cada projeto em relação aos parâmetros de cada nível de tecnologia e, em seguida, é atribuída uma classificação TRL com base no andamento do projeto. Existindo aí nove níveis de preparação da tecnologia, em que o TRL 1 é o mais baixo e o TRL 9 é o mais alto.

Essa pesquisa pode ser encaixada numa tecnologia TRL 3, em que a pesquisa e o projeto ativo dessa tese começaram por meio de estudos analíticos e de laboratório que se tornam necessários neste nível para ver se uma tecnologia é viável e está pronta para prosseguir com o processo de desenvolvimento. Frequentemente, durante o TRL 3, um modelo de prova de conceito é construído, o que é uma das buscas dessa pesquisa.

Prosseguindo com os ensaios da viga já com o dano induzido para a análise dinâmica foram realizados os ensaios no próprio dia 13/02/2021, após a finalização das preparações citadas anteriormente, conforme pode ser verificado na Figura 4.28.

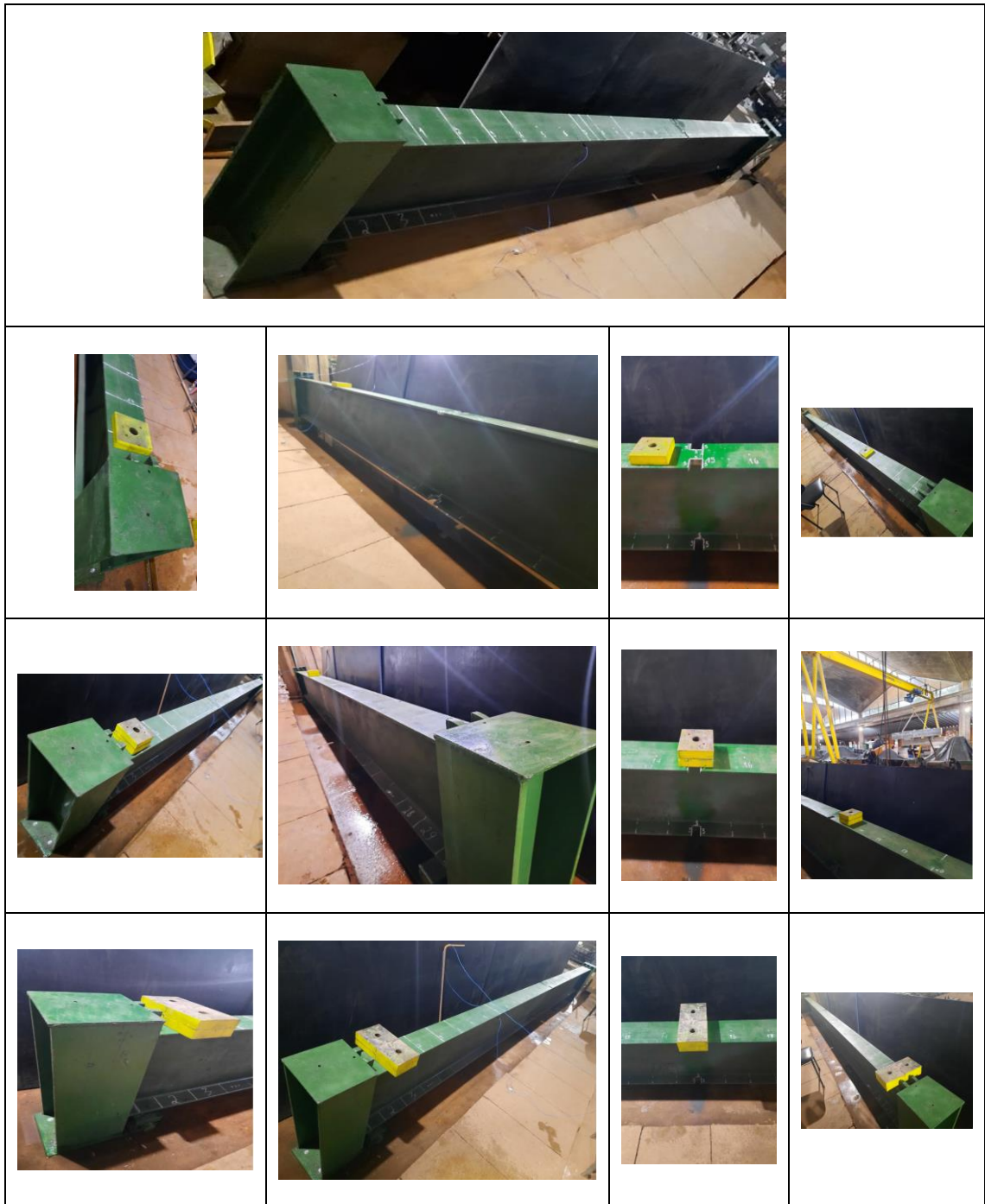


Figura 4.28 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Danificada (6 m) – Ensaio 1 Dia
13/02/2021

No intuito de tentar melhorar os resultados obtidos nos ensaios do dia 13/02/2021 foram refeitas as análises em 18/02/2021, conforme pode ser verificado na Figura 4.29 a seguir.

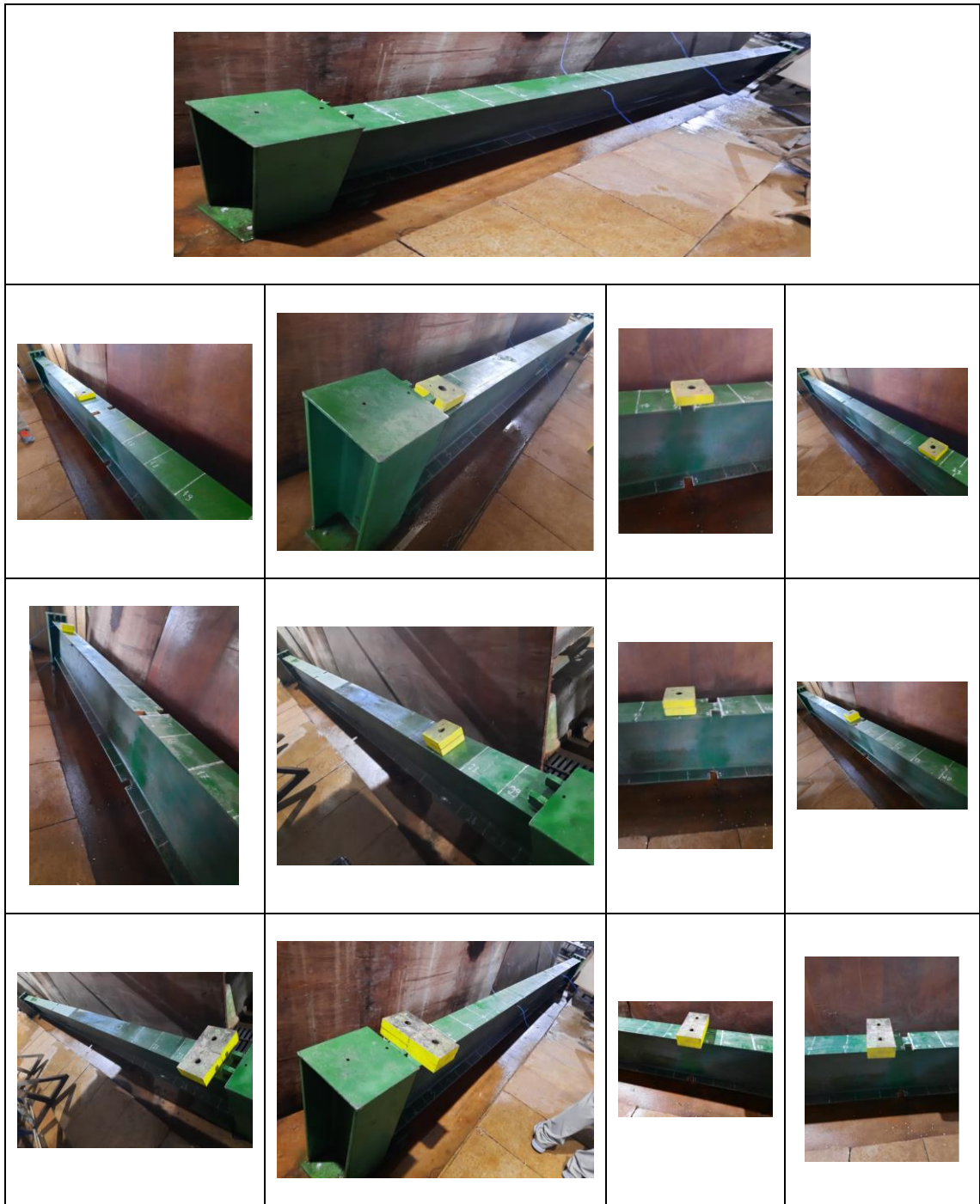


Figura 4.29 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Danificada (6 m) – Ensaio 2 Dia
18/02/2021

E por fim a análise modal da viga danificada realizada em 20/02/2021 demonstrada na Figura 4.30 seguinte.



Figura 4.30 - Viga Metálica IPN 500x104 Biapoiada Danificada (6 m) – Ensaio Modal Dia 20/02/2021

4.4.4.1 Análises modais prévias com verificações dos modos de vibrações 1 do elemento intacto e danificado

Para as verificações das análises modais prévias dos ensaios efetivos com verificações dos modos de vibrações 1 do elemento da viga metálica intacta e danificada onde nos ensaios foram utilizados um acelerômetro fixo e um móvel com o processamento dos dados e identificação modal (frequências e modos de vibração) com a utilização do *software* ARTeMIS[®] (ver Figura 4.31).

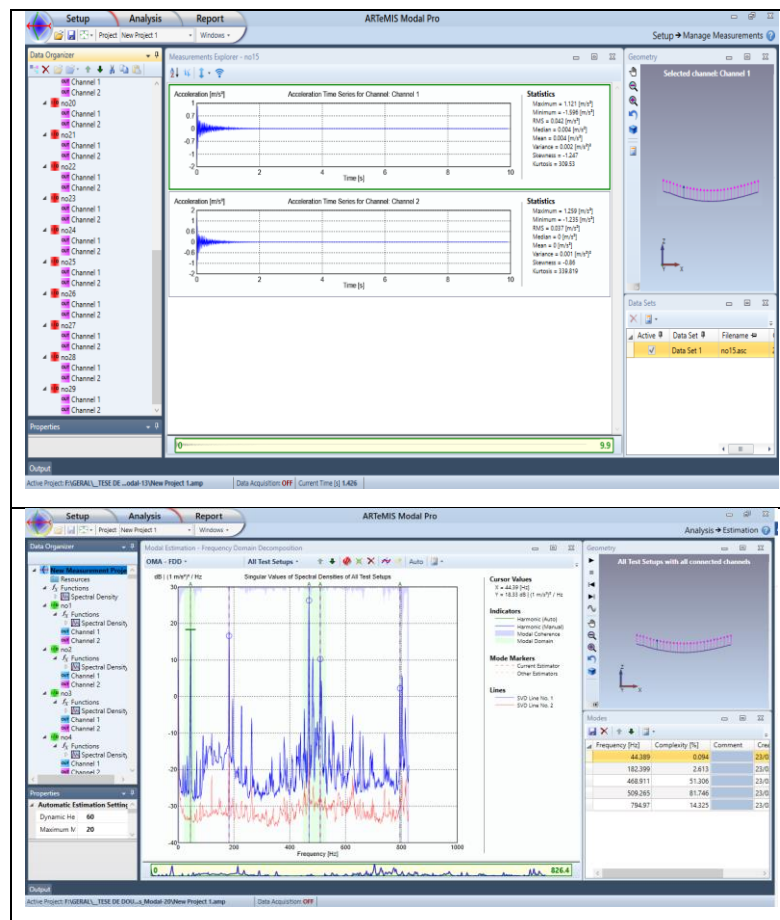


Figura 4.31 – ARTeMIS[®]: Interface Gráfica

4.5 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DANOS E DE UMA EQUAÇÃO NO CAMPO DE QUANTIFICAÇÃO DE DANOS

Assim como apresentado de forma resumida por Alves (2016), já em sua tese de doutorado, na parte de estatística de alta ordem com a proposição de Farrar e Worden (2013) para utilização de 10 indicadores de danos baseados em parâmetros estatísticos para representar um sinal dinâmico, conforme demonstrado o resumo da Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3 – Indicadores de danos baseados em parâmetros estatísticos de alta ordem (Alves, 2016)

Item	Parâmetros Estatísticos	Equações dos indicadores
1	Amplitude Máxima	$X_{\max} = \max[X_i]$
2	Média	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$
3	Média quadrática	$\bar{X}_{sq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i)^2$
4	Raiz quadrada da média	$\bar{X}_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i)^2}$
4	Variância	$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$
5	Desvio-padrão	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$
6	Assimetria	$\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\sigma^3}$
7	Achatamento	$k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{\sigma^4}$
8	Fator de crista	$X_{CF} = \frac{X_{\max}}{\bar{X}_{rms}}$
9	Fator K	$X_k = (X_{\max})(\bar{X}_{rms})$

Sendo que a ideia dos dados e equações demonstradas estatisticamente nesse exemplo é além de conservar suas propriedades principais alcançar uma redução na quantidade de dados a serem tratados.

Nesse sentido, apresenta-se os parâmetros que comporão a função obtida através dos estudos realizados, a saber:

- Quando se analisa o comportamento de dados sejam eles estáticos ou dinâmicos através de parâmetros dos elementos de forma intacta e danificada, aqui demonstrados nessa pesquisa por meio de resultados de deslocamentos e de frequências naturais, bem como de

alguns casos com a utilização de modos de vibração, verifica-se uma tendência de comportamentos onde por meio da análise de suas diferenças, ou seja, um dado em determinada posição menos o outro que gera um valor;

- Esse valor dessas diferenças pode ser analisado como sendo em determinada posição o maior dentre eles ($> x$) ou mesmo o menor dentre eles ($< x$);

- Como foi verificado que em análises de identificação de danos existem perturbações nos resultados em determinada posição e estas em sua maioria, seja numa análise de grandezas que envolvam distâncias maiores ou menores, podem ser necessariamente a posição em que o dano está ocorrendo, entramos aí na parte de identificação de danos que localiza o dano:

- Nas análises de integridade estrutural, cita-se a proposição de Rytter (1993) com uma decomposição hierárquica para processos de identificação de danos estruturais, envolvendo os quatro níveis, a saber:

- ❖ Nível 1: detecção de dano;
- ❖ Nível 2: localização do dano;
- ❖ Nível 3: quantificação do dano;
- ❖ Nível 4: previsão da vida residual da estrutura.

- No que tange à parte de quantificação do dano, ressalva-se que quando se busca não só uma identificação de dano mas sim uma mensuração em termos de quantidades, deve se estar ciente que os dados de referências devem estar claros, no sentido de estar sendo correlacionado, volume com volume, área com área, números de elementos com números de elementos, enfim, comparações envolvendo uma parte da estrutura ou mesmo relacionada com o todo, mas sempre visando uma correlação com por exemplo, volumes de materiais a serem empregados por meio da verificação de áreas danificadas, dentre outras condições;

- Nesse sentido, a quantificação de danos pode ser obtida numa relação básica entre determinados parâmetros da estrutura intacta e a danificada.

5. APLICAÇÃO E RESULTADOS - ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA VIGA METÁLICA PERFIL EUROPEU IPN 500x104 COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

As análises gráficas correspondentes às variações dos modos de vibração com a aplicação da massa móvel dos ensaios modais são apresentadas na análise gráfica 1 da Figura 5.1, com seus respectivos espectros de acelerações, onde foram utilizados os dados das 30 posições com o acelerômetro móvel em relação ao acelerômetro fixo, e na análise gráfica 2 da Figura 5.2 com os dados interpolados em mais pontos para possibilitar testes do algoritmo de otimização com populações maiores visando possíveis melhores resultados.

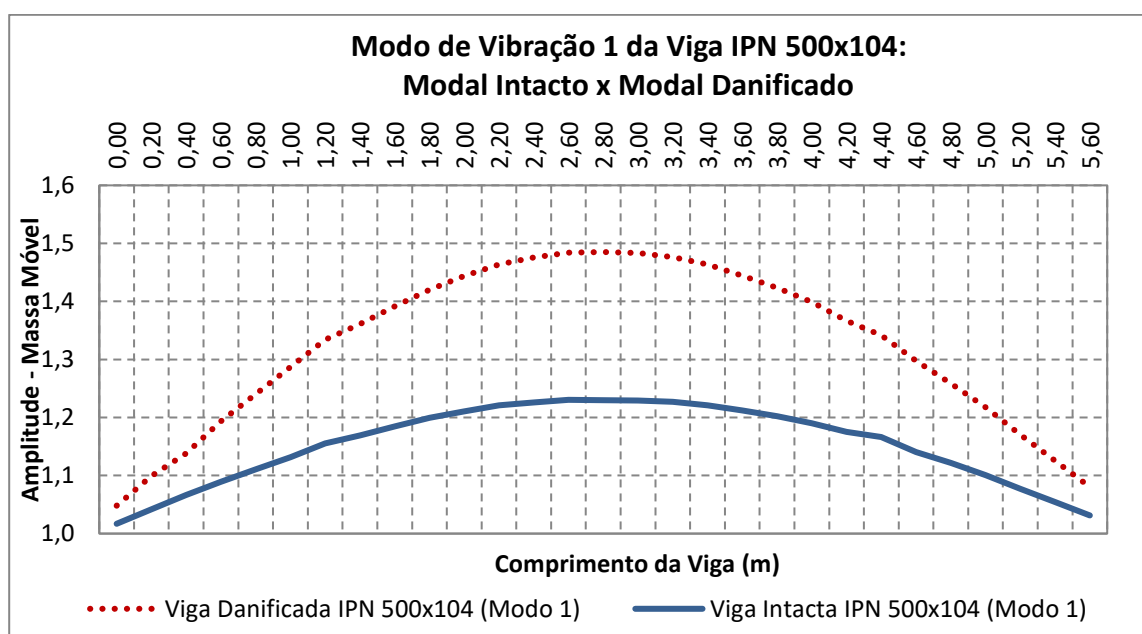


Figura 5.1 – Análise Gráfica 1 do Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (30 posições)

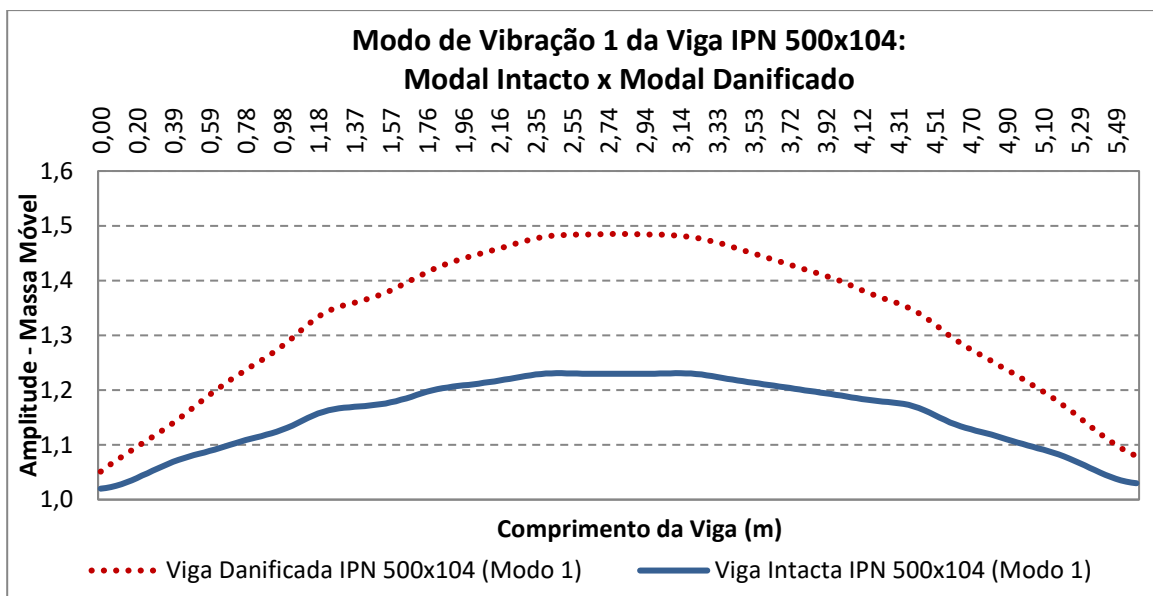


Figura 5.2 - Análise Gráfica 2 do Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (interpolação em mais pontos)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental com os modos de vibração com seus resultados processados por meio do *software* ARTEMIS[®]. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.3 é mostrado o resultado da solução do desse problema para as 30 posições e na Figura 5.4 para as 201 posições.

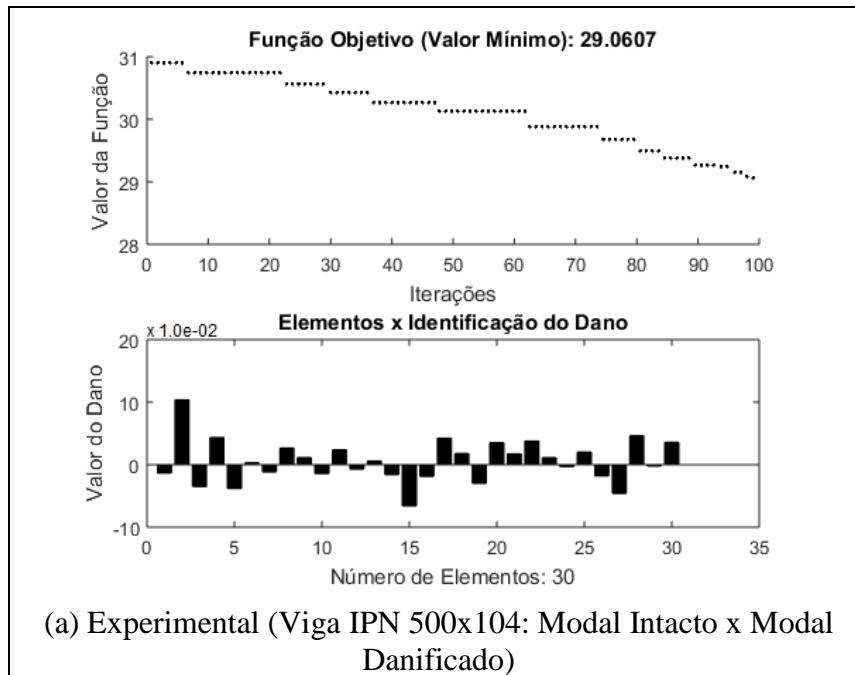


Figura 5.3 – Situação 1: Evolução Diferencial – ED / Identificação de dano - Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (30 posições - caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m)

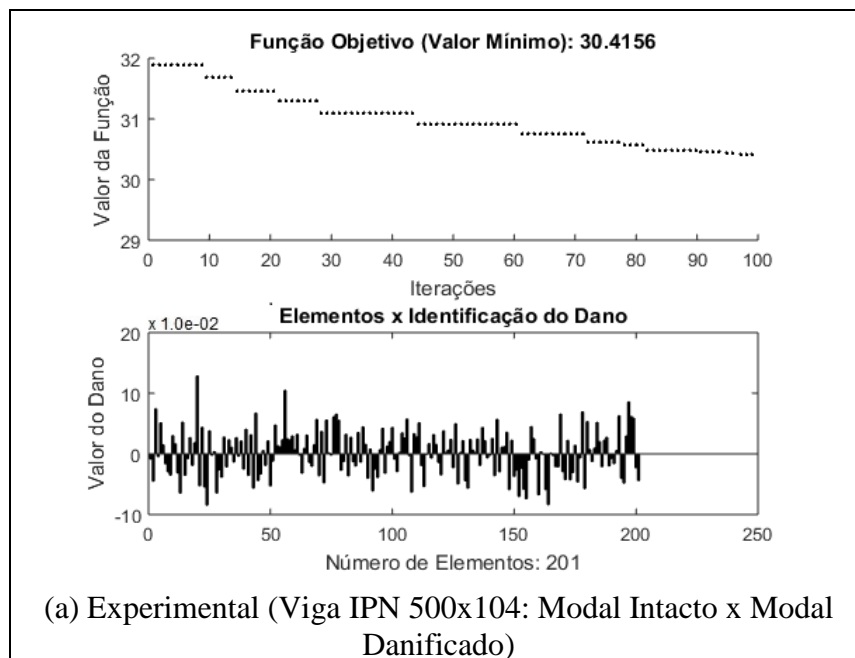


Figura 5.4 – Situação 2: Evolução Diferencial – ED / Identificação de dano - Modo de Vibração 1 da Viga IPN 500x104: Modal Intacto x Modal Danificado (201 posições - caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m)

Verificando-se através desses resultados com os modos de vibração 1, tanto para 30 posições como para 201 posições, perturbações abruptas nas zonas próximas aos apoios além de ao longo do elemento mas ainda também com picos encontrados na zona do dano sendo

necessário agora prosseguir com as análises modais utilizando as variações das frequências naturais pela aplicação de uma massa móvel visando buscar melhores resultados.

Em termos de análises gráficas experimentais tem-se a Figura 5.5 e nas análises gráficas numéricas apresenta-se a Figura 5.6 seguinte.

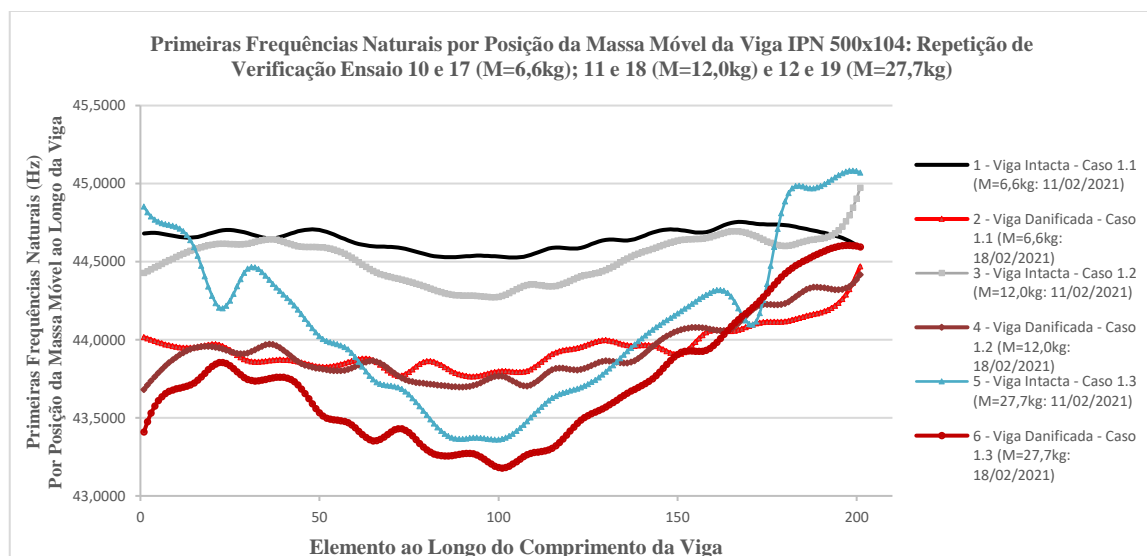


Figura 5.5 – Análise gráfica da 1ª Frequência vs. Posição de Massa dos ensaios experimentais (M = 6,6 kg; 12,0 kg e 27,7 kg)

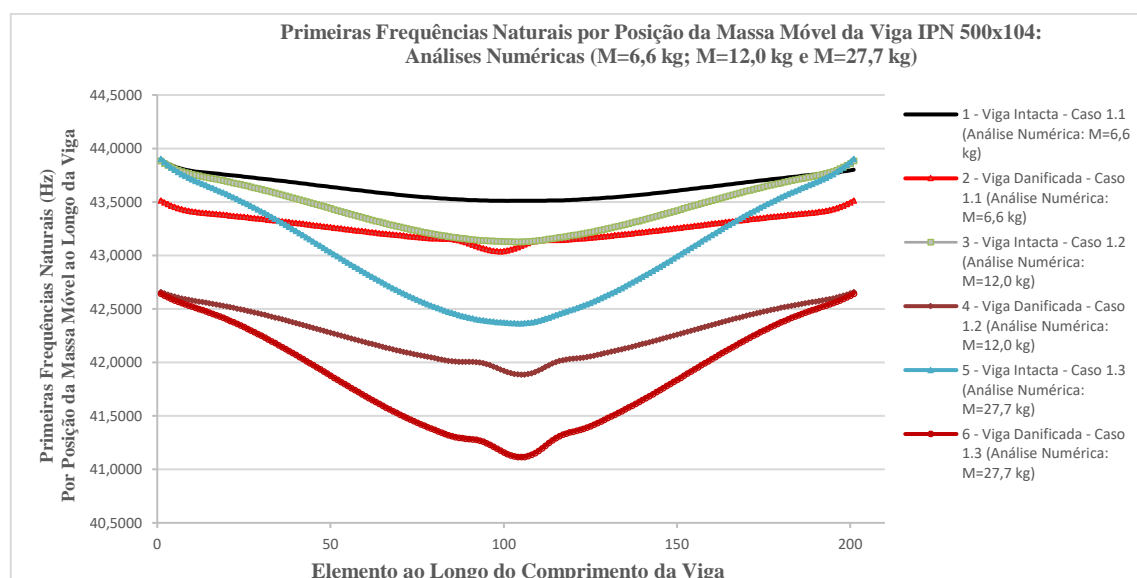


Figura 5.6 – Análise gráfica da 1ª Frequência vs. Posição de Massa dos modelos numéricos (M = 6,6 kg; 12,0 kg e 27,7 kg)

Lembrando que essas análises de forma conjunta foram melhor apresentadas e exploradas a seguir, de modo que fosse demonstrado caso a caso, também com aplicações (ver ANEXO 1) de técnicas de interpolação como o método de *cubic spline*, além de algumas outras técnicas de regularização e janelamento (filtros), mas sem muitas diferenças de resultados.

5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DINÂMICA CASO 1 VIGA METÁLICA BIAPOIADA DANIFICADA (CASO EXPERIMENTAL EM ESCALA MAIOR): EVOLUÇÃO DIFERENCIAL (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 30$: número de elementos da viga em estudo (variáveis);
- $I_{NP} = 10 \cdot I_D \rightarrow I_{NP} = 300$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às variações das frequências naturais para a viga IPN 500x104 por posição da massa móvel dos Casos Gerais 1.1 (M=6,6 kg), 1.2 (M=12,0 kg) e 1.3 (M=27,7 kg), apresentadas respectivamente na Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9, todas da 1ª verificação intacta do dia 09/02/2021 e a correspondente da 1ª verificação danificada do dia 13/02/2021, onde: o eixo x (abscissas) corresponde à posição do elemento ao longo do comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às primeiras frequências naturais por posição da massa móvel da análise dinâmica.

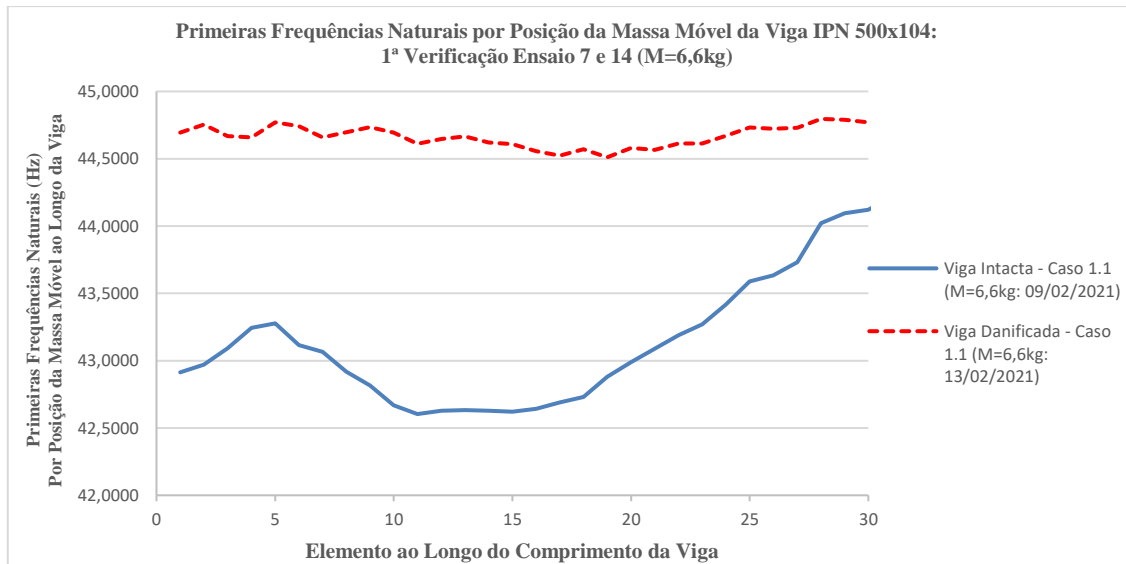


Figura 5.7 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 1ª verificação dos ensaios 7 (09/02/2021) e 14 (13/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.1 (massa de 6,6 kg)

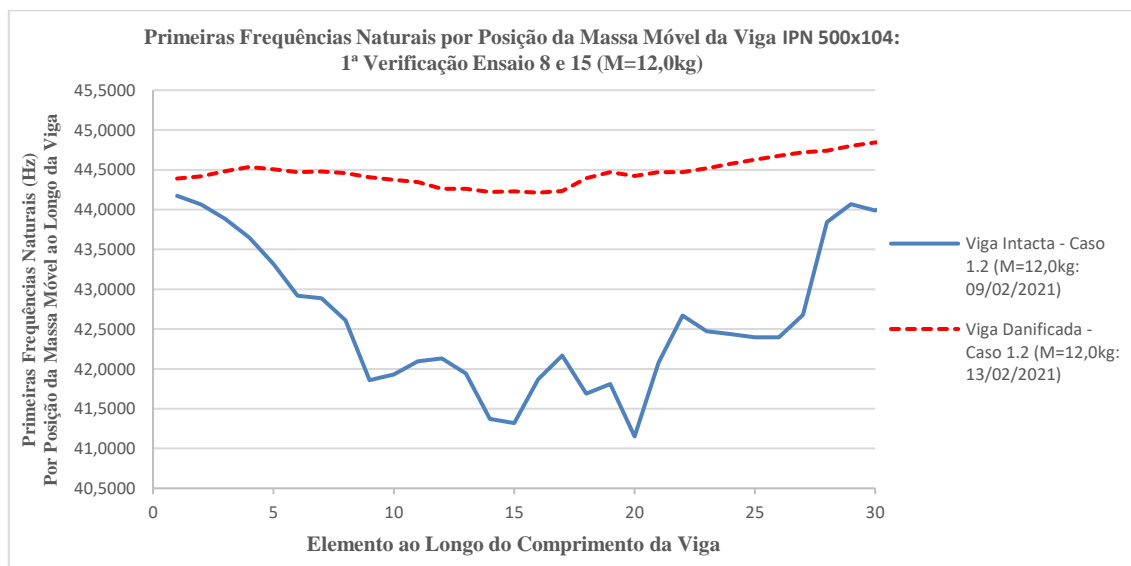


Figura 5.8 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 1ª verificação dos ensaios 8 (09/02/2021) e 154 (13/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.2 (massa de 12,0 kg)

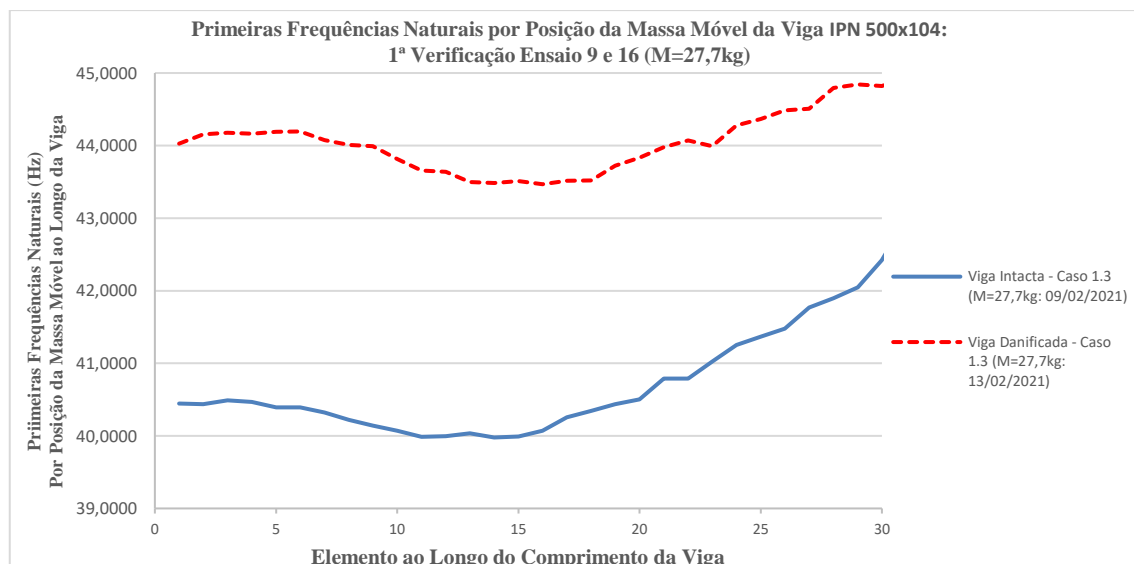


Figura 5.9 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 1ª verificação dos ensaios 9 (09/02/2021) e 16 (13/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.3 (massa de 27,7 kg)

As repetições das análises foram realizadas, tendo em vista os resultados irregulares encontrados dos Casos Gerais 1.1 (M=6,6 kg), 1.2 (M=12,0 kg) e 1.3 (M=27,7 kg), em função da necessidade de se certificar quanto ao comportamento encontrado dos primeiros ensaios e buscar principalmente melhores ajustes nas condições de contorno do elemento, condição extremamente importante dada as esbeltezes e robustezes maiores do elemento estrutural em escala maior ensaiado, onde os resultados são apresentados respectivamente na Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12, sendo agora todas da 2ª verificação (repetição) intacta do dia 11/02/2021 e a correspondente da 1ª verificação danificada do dia 18/02/2021.

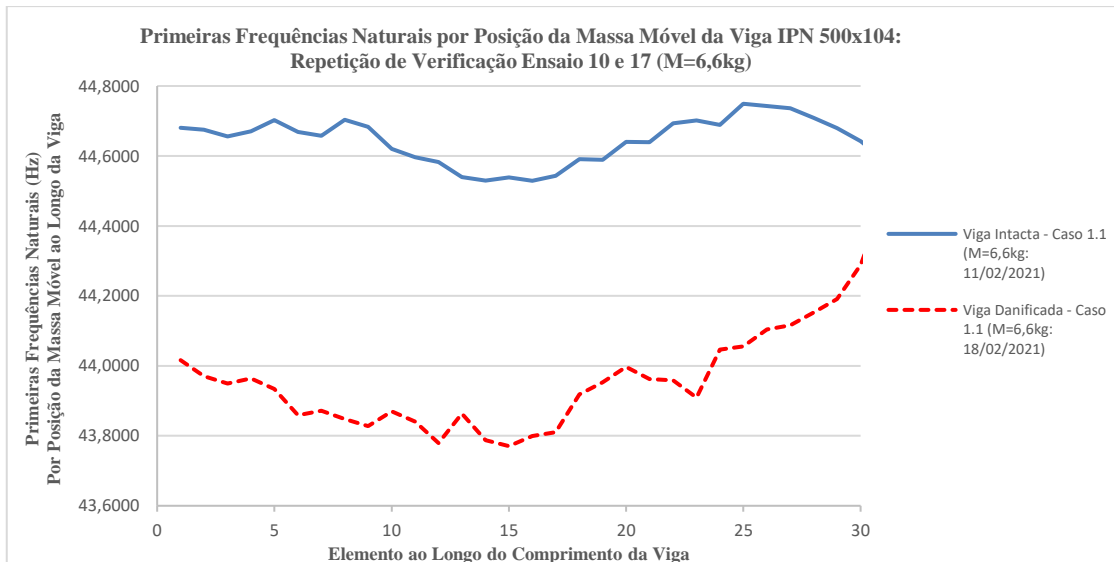


Figura 5.10 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 2ª verificação (repetição) dos ensaios 10 (11/02/2021) e 17 (18/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.1 (massa de 6,6 kg)

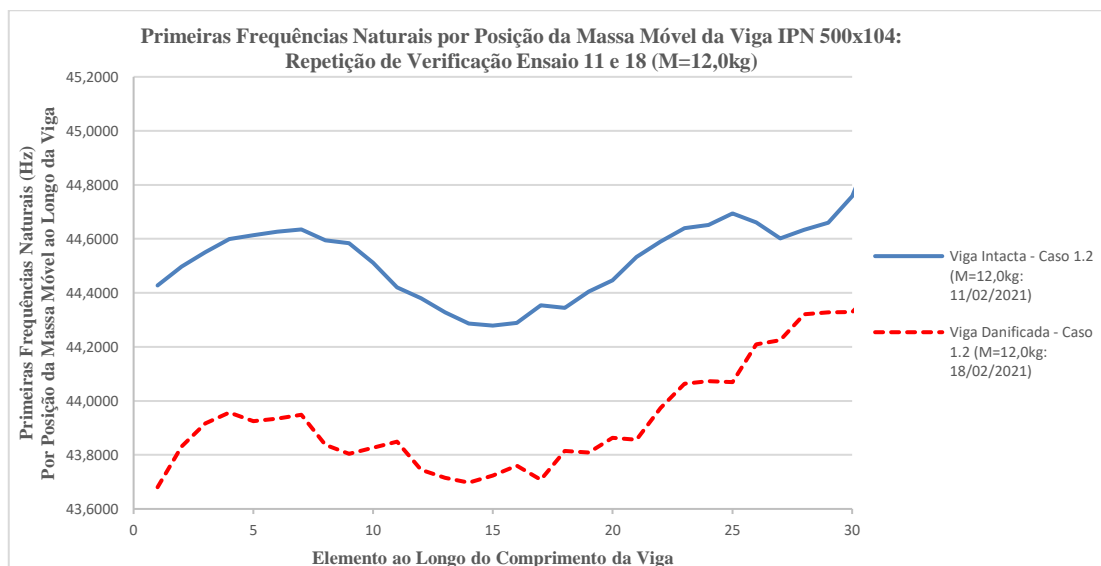


Figura 5.11 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 2ª verificação (repetição) dos ensaios 11 (11/02/2021) e 18 (18/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.2 (massa de 12,0 kg)

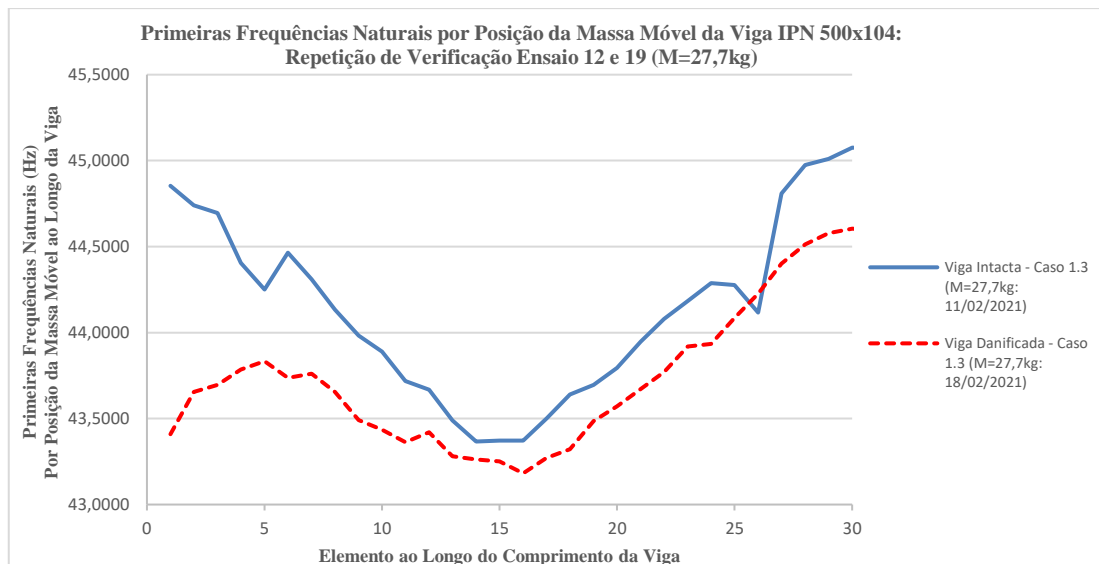


Figura 5.12 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes à 2ª verificação (repetição) dos ensaios 12 (11/02/2021) e 19 (18/02/2021) para a viga IPN 500x104 do caso 1.3 (massa de 27,7 kg)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, além das irregularidades na forma dos resultados da 1ª frequência ao longo da viga também observados na comparação da Figura 5.5, além das anteriores demonstradas individualmente da Figura 5.7 à Figura 5.12, foram definidos um número maior de utilizações de iterações para essa análise experimental, sendo este de 500. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga das primeiras frequências naturais. Na Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15 são mostrados os resultados da solução dos problemas.

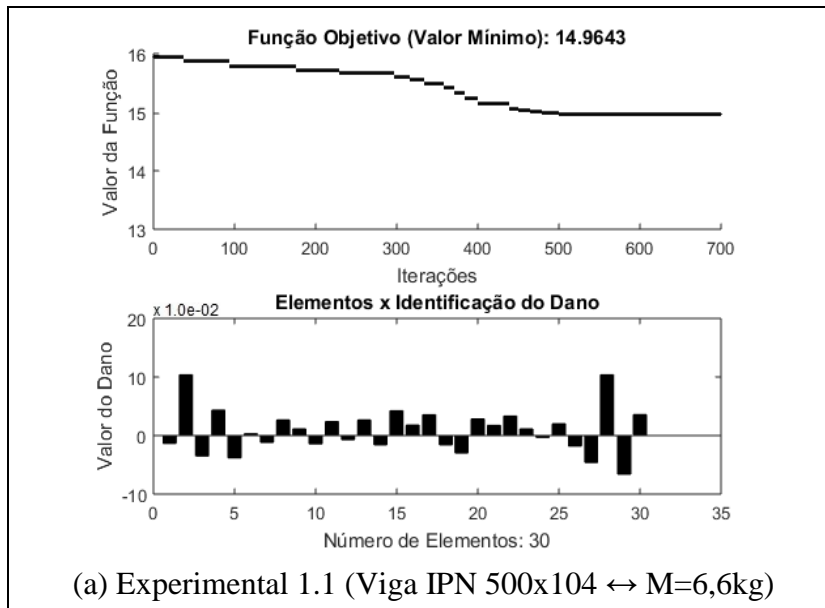


Figura 5.13 – Análise Experimental / Evolução Diferencial – ED (500 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.1 (M=6,6 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)

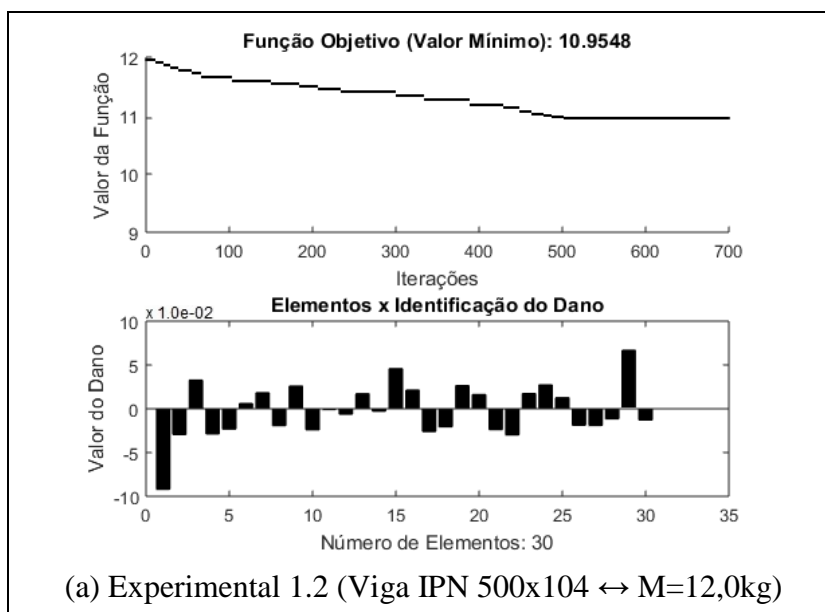
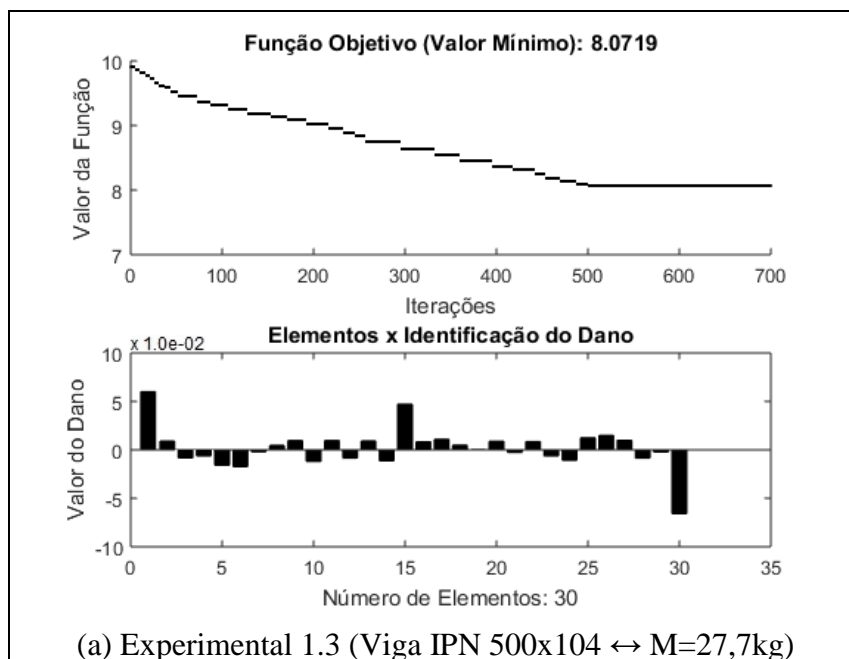


Figura 5.14 – Análise Experimental / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.2 (M=12,0 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)



(a) Experimental 1.3 (Viga IPN 500x104 \leftrightarrow M=27,7kg)
 Figura 5.15 – Análise Experimental / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.3 (M=27,7 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 5.1.1.

5.1.1 Considerações dos Resultados Experimentais com o Método de Evolução Diferencial sobre os casos 1.1, 1.2 e 1.3 - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 metros

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.1 a seguir.

Tabela 5.1 - Tabela resumo ED: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 m
Casos 1.1, 1.2 e 1.3 - Análise Dinâmica Experimental

Item Caso Geral	Freq. Nat.	Viga (Caso Ref.)	Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
1.1		M=6,6 kg	ED / Experim.	a 3,0 m: 1 entalhe / Em cada ponta das abas das mesas	500 ^a	15	\cong 3.805% Correto: \cong 4.678%	14.9643
1.2	1ª Frequência	M=12,0 kg	Dinâmico / Massa Móvel: 6,6 kg; 12,0 kg; 27,7 kg	a 3,0 m: 1 entalhe / Em cada ponta das abas das mesas	500 ^a	15	\cong 4.508% Correto: \cong 4.678%	10.9548
1.3		M=27,7 kg		a 3,0 m: 1 entalhe / Em cada ponta das abas das mesas	500 ^a	15	\cong 4.678%	8.0719

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na quingentésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto principalmente no último caso (1.1 com M=6,6 kg: cerca de 0,78% do peso total da viga), encontrando-se dano de aproximadamente 3,805% no elemento 15 para as análises com a viga do caso 1.1 e já se aproximando do resultado correto do caso 1.2 (M=12,0 kg: cerca de 1,418% do peso total da viga) com dano de cerca de 4,508% e com maior precisão do caso 1.3 (M=27,7 kg: cerca de 3,274% do peso total da viga) com 4,678% de dano, apesar das perturbações para os demais elementos encontrados principalmente próximos aos apoios, sendo considerado principalmente as faixas centrais da viga dada a dificuldade principalmente com à imposição das condições de contorno mais adequadas desse elemento numa escala mais real.

Já os valores mínimos das funções objetivos encontradas na quingentésima iteração, são observados com grandezas sem grandes distâncias de diferenças (condição intacta e danificada), fato provavelmente oriundo das pequenas relevâncias das massas móveis em relação ao peso total da viga e também quando comparada com a capacidade máxima de suporte do elemento (da ordem de 0,1% tanto com relação aos dados de catálogo como os verificados com o paquímetro) com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, além de mais algumas pequenas perturbações para os demais elementos, principalmente nas proximidades dos apoios.

Nas proximidades dos pontos de danos houve muitas distorções principalmente nos casos 1.1 e 1.2, mas também no caso 1.3, demonstrando a importância das condições de apoio dada a sensibilidade das análises dinâmicas, e muito provavelmente por causa da

perturbação causada, onde para uma adequação mais realista ao modelo, poderia se aperfeiçoar o sistema do modelo experimental.

As análises de identificação de dano nesse exemplo, se restringiram às frequências naturais obtidas nas análises experimentais intactas e danificadas, mas como foi relatado anteriormente, utilizou-se já um número maior de iterações, tendo em vista as perturbações encontradas nos resultados dos ensaios, que impossibilitaram uma diminuição nos resíduos gerados, mesmo onde houvesse grandes diferenças de deslocamentos (casos do experimento antes da repetição dos ensaios), onde nas proximidades dos apoios ou mesmo nas proximidades das regiões danificadas são encontrados os vários picos residuais da análise e que mesmo apesar disso os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto. Enfatiza-se aí que já foi utilizado um número maior de iterações que em muitos casos já auxilia na resolução do problema de aproximação de mínimo local.

Com as análises dessa viga, com essas três condições de aplicação da técnica de massa móvel pode-se afirmar que por exemplo um número maior de informações dinâmicas também auxiliariam no trabalho do otimizador, condição já também testada com técnicas de interpolação, onde mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer das estruturas em estudo principalmente nas faixas mais centrais do elemento.

5.1.2 Análise Experimental Dinâmica dos Casos 1.1, 1.2 e 1.3 da Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 Danificada (caso experimental em escala maior): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados do elemento da viga. Verificou-se erros com os parâmetros definidos conforme pode ser verificado na Figura 5.16, além de ser discutido ao final possíveis razões do erro na análise com o AG.

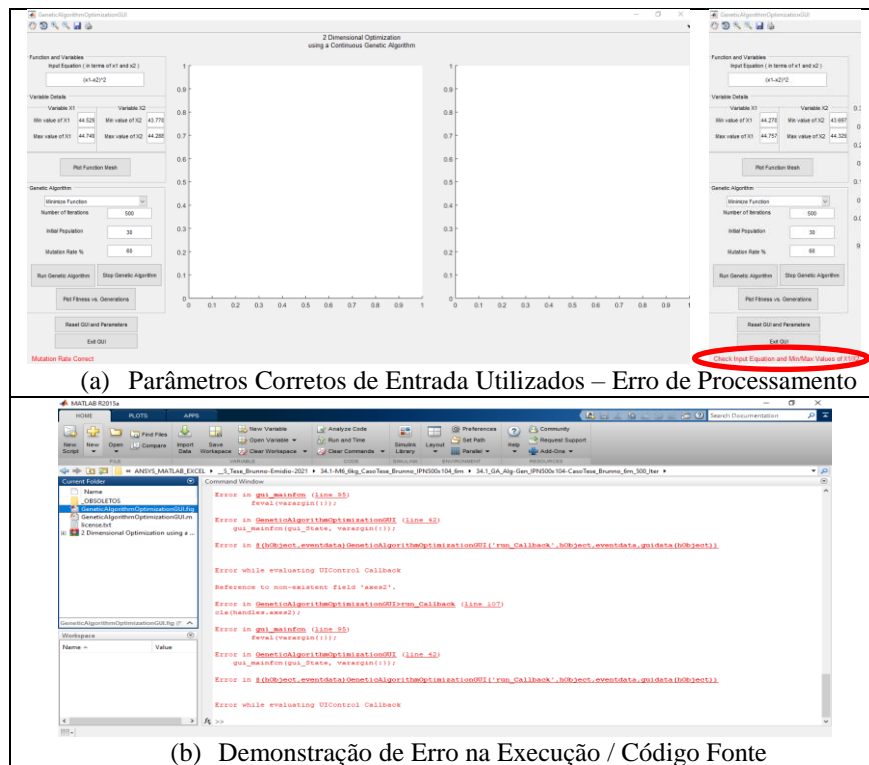


Figura 5.16 – Demonstração de erro na análise com o Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / 500 iterações / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.1 (M=6,6 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)

Nesse sentido as demais análises foram abortadas, sendo que possivelmente a causa do erro se dá em função das grandezas maiores das variáveis de entrada x_1 e/ou x_2 demonstrando uma limitação da ferramenta de Hashem (2020) utilizando os mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificado para essas questões com variáveis de valores maiores. Lembrando que é uma limitação da ferramenta e não do Método de Algoritmos Genéticos que quando explorado pode gerar muito mais informações adequadas no que tange a essa área de identificação de danos.

5.2 ANÁLISE NUMÉRICA DINÂMICA CASO 1 VIGA METÁLICA BIAPOIADA DANIFICADA (ABAQUS®): EVOLUÇÃO DIFERENCIAL (ED)

Em termos de análises numéricas com a técnica da massa móvel utilizando o *software* ABAQUS® obteve-se as frequências naturais conforme a Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 a seguir.

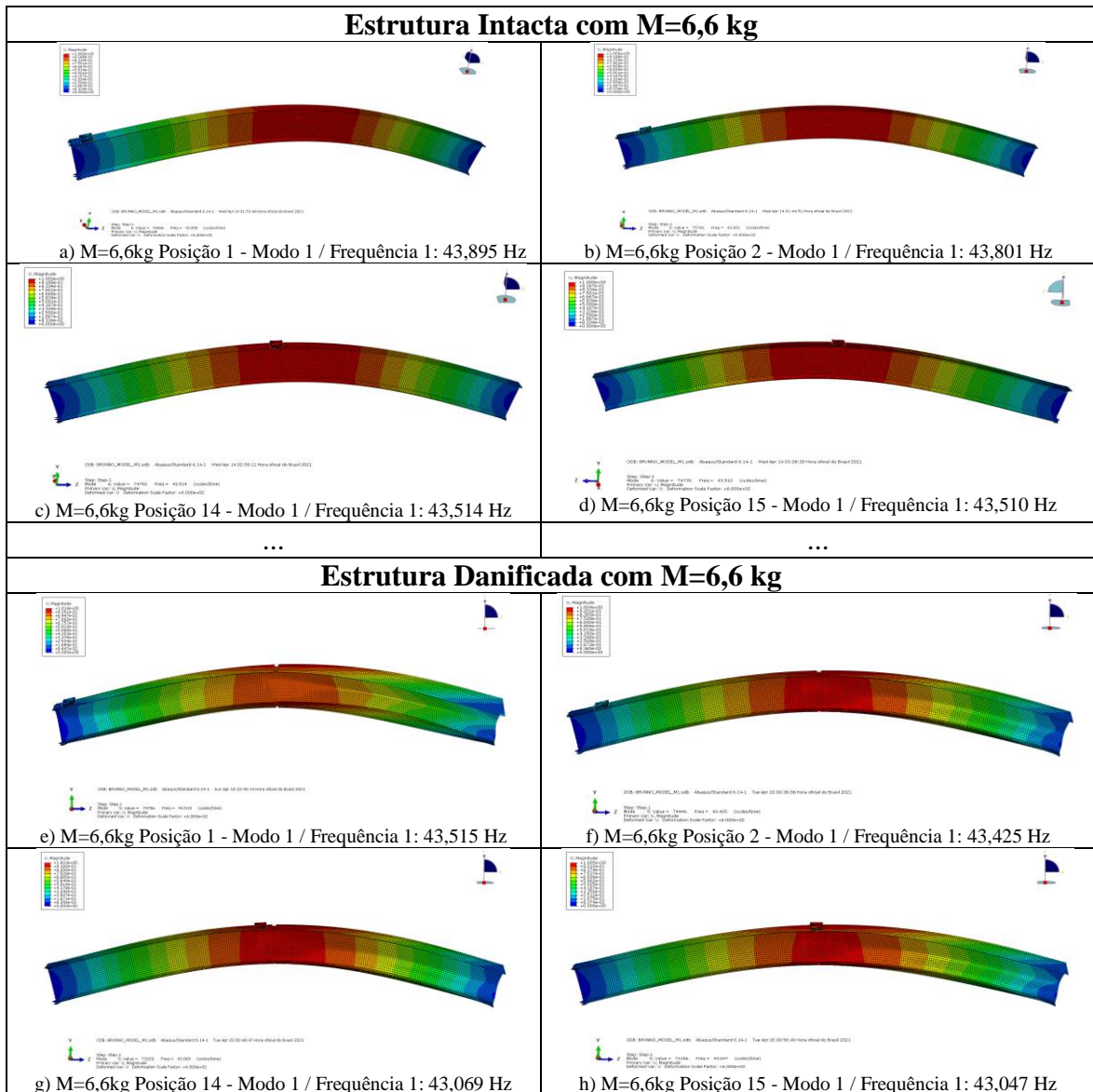


Figura 5.17 – Intacta e Danificada M=6,6 kg (1.1): Análise Numérica com a Técnica da Massa Móvel (ABAQUS®)

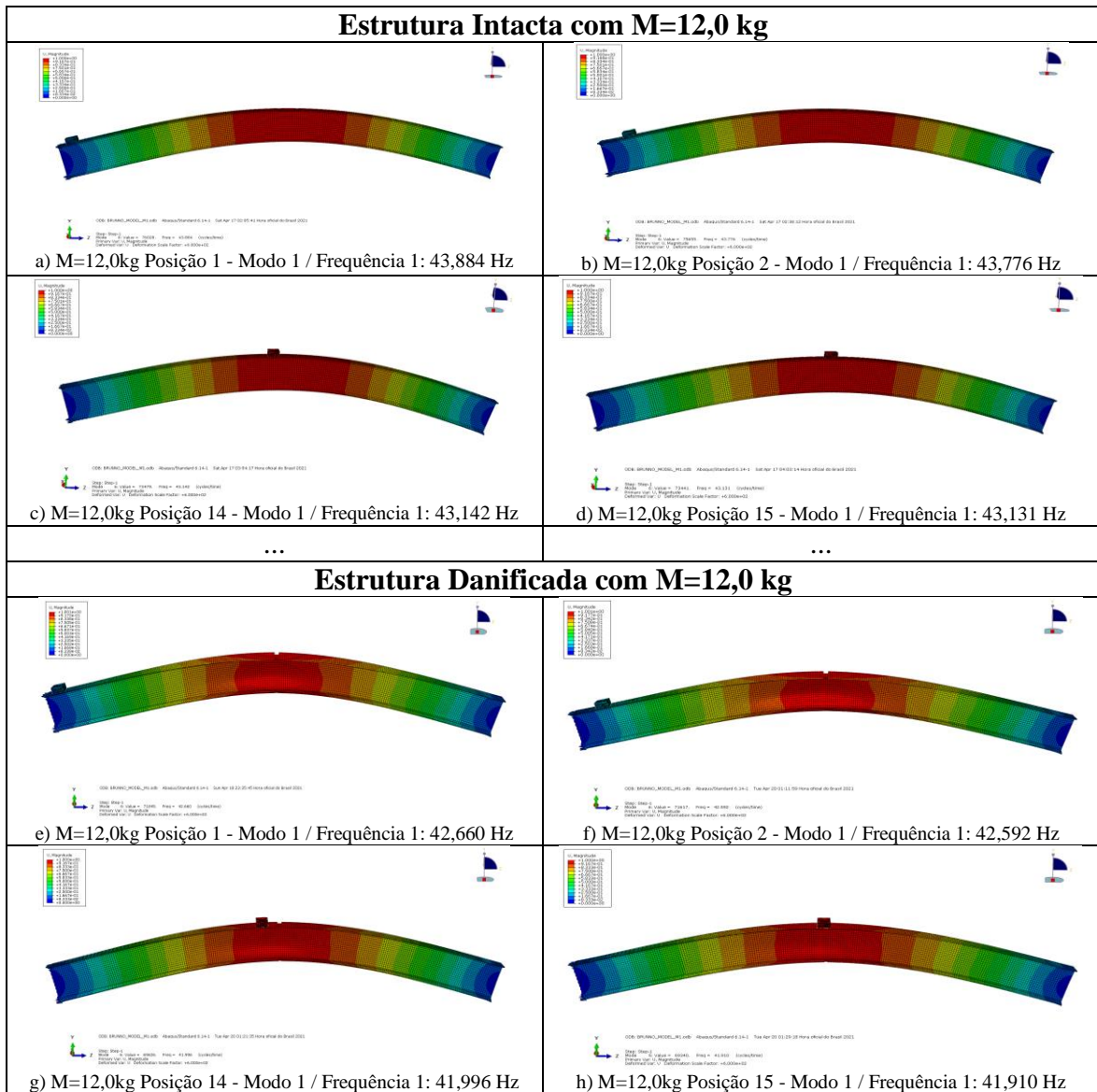


Figura 5.18 – Intacta e Danificada M=12,0 kg (1.2): Análise Numérica com a Técnica da Massa Móvel (ABAQUS®)

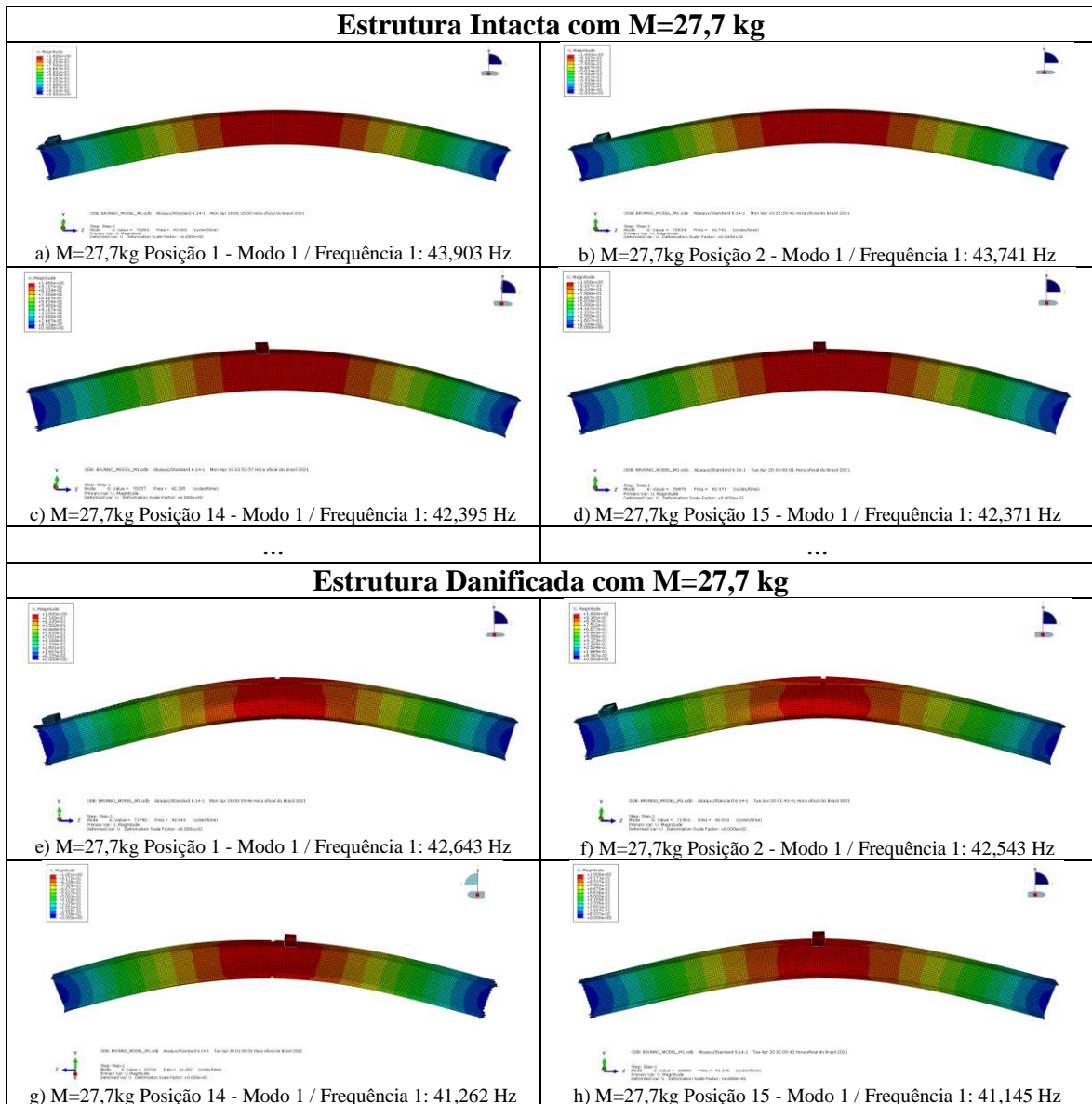


Figura 5.19 – Intacta e Danificada M=27,7 kg (1.3): Análise Numérica com a Técnica da Massa Móvel (ABAQUS®)

Em cada posicionamento das três massas de 6,6 kg (1.1), 12,0 kg (1.2) e 27,7 kg (1.3), cada um verificado em 29 posições, totalizando 87 análises, onde foram reunidas as leituras de frequências naturais em cada posição para prosseguir com as análises de identificações de danos.

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB® do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 30$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 100$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas numéricas intactas e danificadas correspondentes às variações das frequências naturais para a viga IPN 500x104 por posição da massa móvel dos Casos Gerais 1.1 ($M=6,6$ kg), 1.2 ($M=12,0$ kg) e 1.3 ($M=27,7$ kg), apresentadas respectivamente na Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22, onde: o eixo x (abcissas) corresponde à posição do elemento ao longo do comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às primeiras frequências naturais por posição da massa móvel da análise dinâmica.

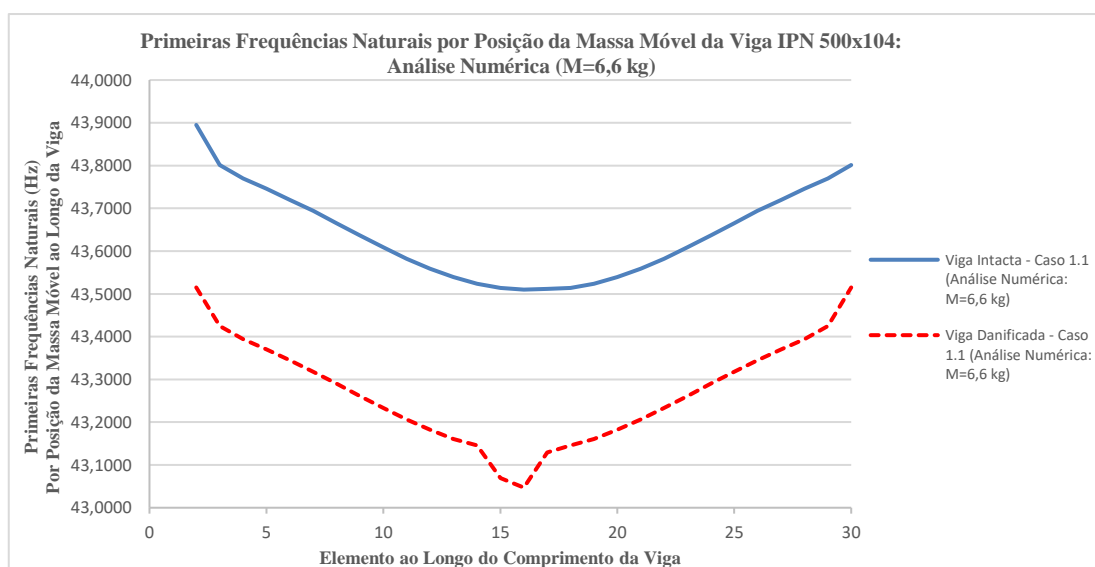


Figura 5.20 – Análises gráficas numéricas intactas e danificadas para a viga IPN 500x104 do caso 1.1 (massa de 6,6 kg)

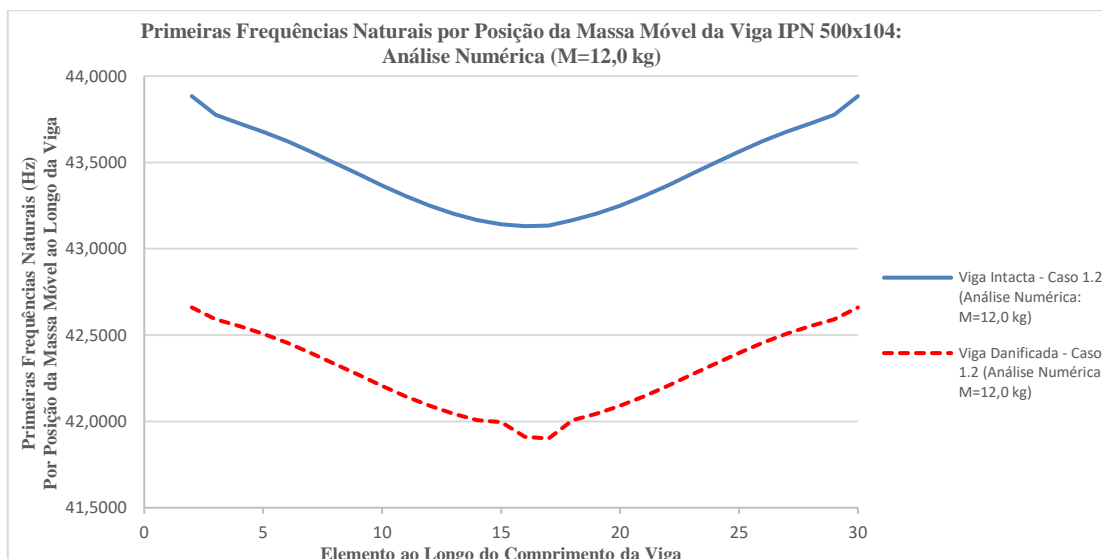


Figura 5.21 – Análises gráficas numéricas intactas e danificadas para a viga IPN 500x104 do caso 1.2 (massa de 12,0 kg)

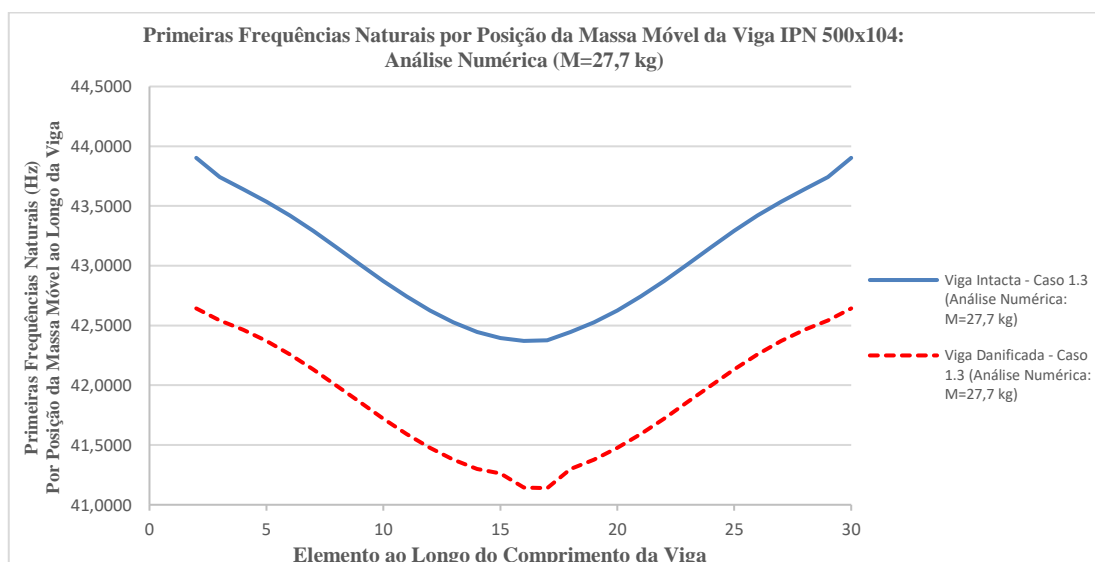


Figura 5.22 – Análises gráficas numéricas intactas e danificadas para a viga IPN 500x104 do caso 1.3 (massa de 27,7 kg)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente numérica utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. O tempo computacional de processamento já foi bem melhor (menor tempo), em função de agora estar com regularidades maiores na forma dos resultados da 1ª frequência ao longo da viga também observados na comparação da Figura 5.6, foram definidos um número menor de utilizações de iterações para essa análise numérica, sendo este de 100. Nesta análise, também apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos

e danificados dos elementos da viga das primeiras frequências naturais. Na Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25 são mostrados os resultados da solução dos problemas.

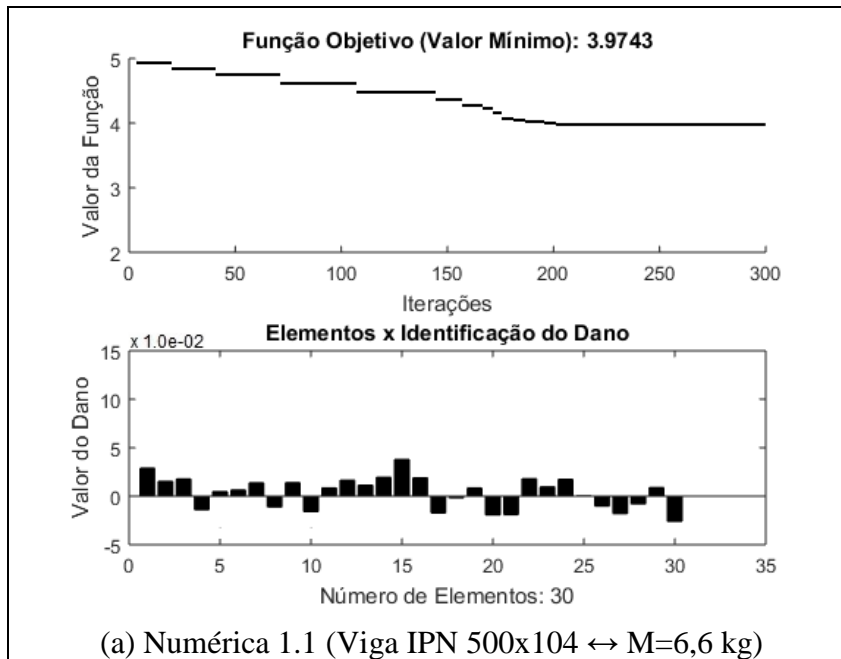


Figura 5.23 – Análise Numérica / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.1 (M=6,6 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)

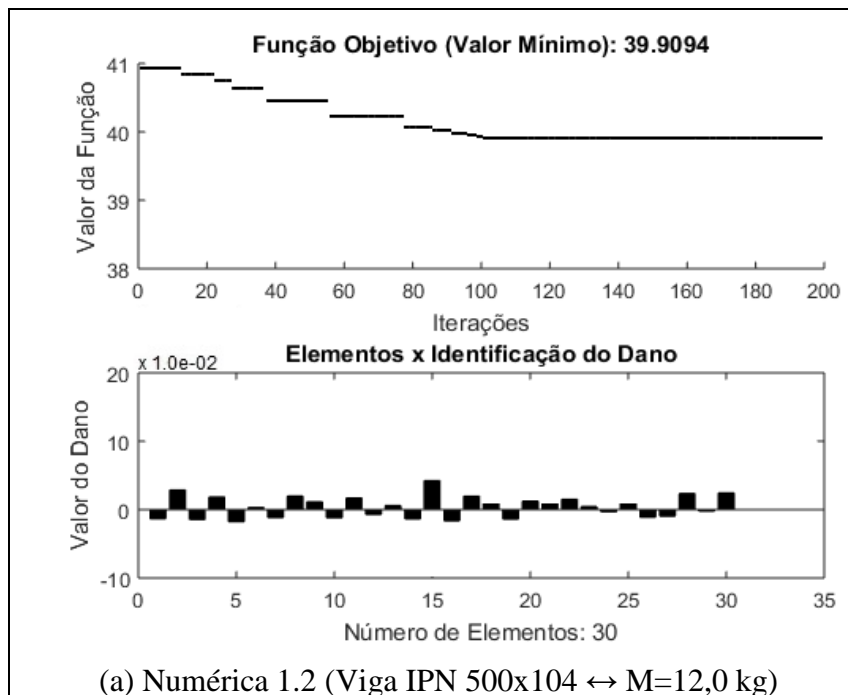
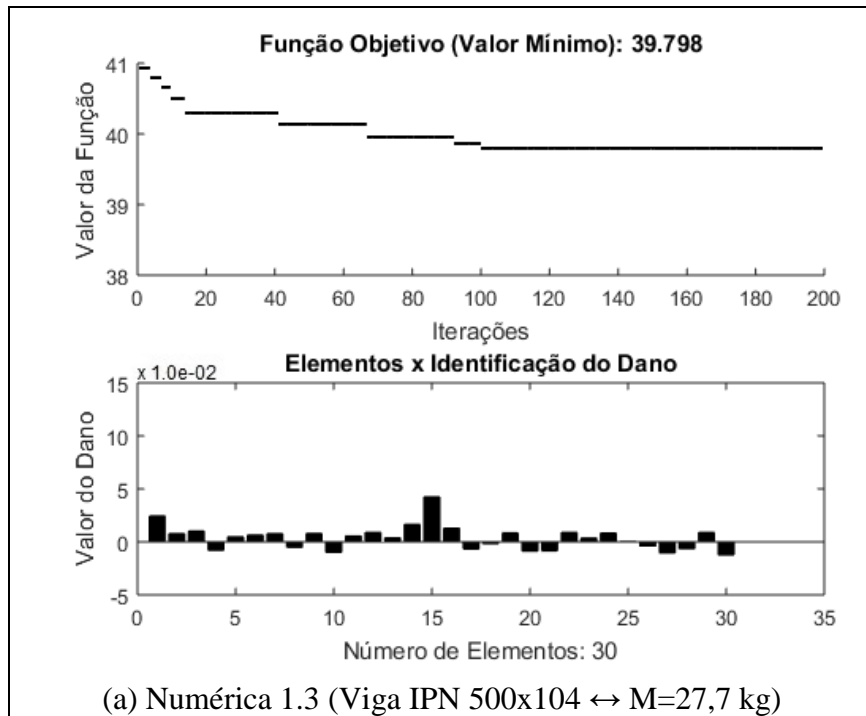


Figura 5.24 – Análise Numérica / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.2 (M=12,0 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)



(a) Numérica 1.3 (Viga IPN 500x104 \leftrightarrow M=27,7 kg)

Figura 5.25 – Análise Numérica / Evolução Diferencial – ED (100 iterações) / Identificação de dano Viga IPN 500x104 Caso 1.3 (M=27,7 kg): Viga Metálica Biapoiada (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3,0 m / elemento danificado 15 da discretização da viga)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 5.2.1.

5.2.1 Considerações dos Resultados Numéricos com o Método de Evolução Diferencial sobre os casos 1.1, 1.2 e 1.3 - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 metros

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2 - Tabela resumo ED: Viga Metálica Biapoiada IPN 500x104 de 6 m
Casos 1.1, 1.2 e 1.3 - Análise Dinâmica Numérica

Item Caso Geral	Freq. Nat.	Viga (Caso Ref.)	Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
1.1		M=6,6 kg	ED / Experim.	a 3,0 m: 1 entalhe / Em cada ponta das abas das mesas	200 ^a	15	≅ 4,678%	3.9743
1.2	1ª Frequência	M=12,0 kg	Dinâmico / Massa Móvel: 6,6 kg; 12,0 kg; 27,7 kg	a 3,0 m: 1 entalhe / Em cada ponta das abas das mesas	100 ^a	15	≅ 4,678%	39.9094
1.3		M=27,7 kg		a 3,0 m: 1 entalhe / Em cada ponta das abas das mesas	100 ^a	15	≅ 4,678%	39.7980

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas, agora utilizando os modelos numéricos do elemento do experimento, na ducentésima iteração para o caso 1.1 com M=6,6 kg sendo este com cerca de 0,78% do peso total da viga, e na centésima iteração para os casos 1.2 de M=12,0 kg e cerca de 1,418% do peso total da viga e o 1.3 de M=27,7 kg e cerca de 3,274% do peso total da viga, e com todos os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, sendo o percentual encontrado de 4,678% de dano, apesar das perturbações para os demais elementos encontrados principalmente próximos aos apoios, e principalmente no caso de menor massa, com perturbações maiores, mas sendo considerado principalmente as faixas centrais da viga e com as evidentes dificuldades principalmente próximas aos apoios.

Com relação aos valores mínimos das funções objetivos encontradas, encontrou-se dificuldades no caso 1.1 sendo necessários iterações maiores, apesar de serem observados grandezas sem grandes distâncias de diferenças (condição intacta e danificada), mesmo com as pequenas relevâncias das massas móveis em relação ao peso total da viga e os demais casos 1.2 e 1.3 também com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, sendo estes dois últimos com pequenas perturbações para os demais elementos, até mesmo nas proximidades dos apoios, principalmente no caso com a massa maior.

Nas proximidades dos pontos de danos houve poucas distorções demonstrando a precisão dos modelos numéricos em análises dinâmicas, sendo esta análise de grande importância para uma melhor precisão nos resultados encontrados.

As análises de identificação de dano nesse exemplo, serve de analogia ao que foi verificado nas análises experimentais, também utilizando as frequências naturais agora das análises numéricas intactas e danificadas, possibilitando uma diminuição evidente nos resíduos gerados, sem muitos picos residuais da análise, principalmente nos casos 1.2 e 1.3, mas em todas as situações os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, remetendo à importância dos modelos numéricos na resolução do problema de aproximação de mínimo local.

Verificou-se que com um modelo numérico bem calibrado pode-se afirmar que mesmo com um número menor de informações dinâmicas e sendo testada com técnicas de interpolação para ampliação dessas informações, a ferramenta atende bem sem um universo maior de dados e com conseqüente aumento de população, alcançando também à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer das estruturas em estudo principalmente nas faixas mais centrais do elemento e com potencialidade para verificações em outras posições, até mesmo com a técnica de massa móvel com massas menores.

5.3 ETAPAS E ALTERNATIVAS PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS E DEFINIÇÃO DE UMA EQUAÇÃO SIMPLIFICADA NAS ANÁLISES DE QUANTIFICAÇÃO DE DANOS

Numa conclusão das análises, já para a consolidação final dos estudos realizados, e principalmente para uma busca de adequação à realidade de projetos em escalas maiores, também em aplicações de inspeções rotineiras de campo ou mesmo em ensaios experimentais, além de se buscar análises diversas e rápidas por meios de modelos numéricos, busca-se uma proposição de etapas e alternativas para localização de danos e definição de uma equação simplificada nessas verificações de quantificação de danos.

5.3.1 Parâmetros para definição de meios de localização de danos e de uma equação no campo de quantificação de danos

Os resumos dos resultados apresentados a seguir dos estudos realizados com a viga IPN 500x104 com as variações das frequências naturais pela aplicação de uma massa móvel da tese de Palechor (2018), visando aplicações finais nos estudos experimentais realizados nessa pesquisa.

Quanto às análises experimentais da viga metálica IPN 500x104 biapoiadas com 6 metros, ensaios próprios dessa pesquisa, conforme Tabela 5.3 seguinte, para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional, onde foram reunidos os parâmetros técnicos existentes e os resultados encontrados visando buscar uma alternativa de equação mais simplificada e direta do que a aplicada em processos de otimização, no caso a função do Método dos Mínimos Quadrados.

Tabela 5.3 - Parâmetros técnicos da viga metálica IPN 500x104 biapoiada com 6 metros para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional

Parâmetros Técnicos da Viga de 6m Metálica IPN 500x104 Biapoiada Perfil I Europeu																				
Viga (6 m)	Condição	Comp. (m)	Área Total (cm ²)	Vol. Tot. (cm ³)	Área Elem. (cm ²)	Volume Elem. (cm ³)	Nº Pos. Danif.	Ix Total (cm ⁴)	Iy Total (cm ⁴)	Ix Elemento (cm ⁴)	Iy Elemento (cm ⁴)	Nº Elem. Danific.	Freq. (Hz) Mín.	Freq. (Hz) Máx.	Freq. (Hz) Intacto / Dano 1	Freq. (Hz) Intacto / Dano 2	FO DE	Result. FO DE	% de Dano 1	% de Dano 2
Caso 1.1	Intacta	6,00	151,7521	9,11	151,7521	30,35	-	68740	2480	68740	2480	-	44,529030	44,749229	44,529030	-	$\frac{\sum(Y_m - Y_a)^2}{2}$	14,96430	-	-
	Danificada	6,00	-	-	123,3571	28,93	15	-	-	-	-	1	43,770480	44,288592	43,770480	-	$\frac{\sum(Y_m - Y_a)^2}{2}$	14,96430	3,805%	-
Caso 1.2	Intacta	6,00	151,7521	9,11	151,7521	30,35	-	68740	2480	68740	2480	-	44,278815	44,757913	44,278815	-	$\frac{\sum(Y_m - Y_a)^2}{2}$	10,95480	-	-
	Danificada	6,00	-	-	123,3571	28,93	15	-	-	-	-	1	43,697815	44,329299	43,697815	-	$\frac{\sum(Y_m - Y_a)^2}{2}$	10,95480	4,508%	-
Caso 1.3	Intacta	6,00	151,7521	9,11	151,7521	30,35	-	68740	2480	68740	2480	-	43,366613	45,075697	43,366613	-	$\frac{\sum(Y_m - Y_a)^2}{2}$	8,07190	-	-
	Danificada	6,00	-	-	123,3571	28,93	15	-	-	-	-	1	43,181760	44,604459	43,181760	-	$\frac{\sum(Y_m - Y_a)^2}{2}$	8,07190	4,678%	-

A Tabela 5.4 a seguir demonstra os parâmetros técnicos das vigas metálicas biapoiadas com 5 metros trabalhadas nos estudos realizados na tese de Palechor (2018), para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional, onde foram reunidos os parâmetros técnicos existentes e os resultados encontrados visando buscar uma alternativa de equação mais simplificada e direta do que a aplicada em processos de otimização, no caso a função do Método dos Mínimos Quadrados.

Tabela 5.4 - Parâmetros técnicos das vigas metálicas biapoiadas com 5 metros para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional

Parâmetros Técnicos das Vigas de 5m Metálicas 102x11.4 Biapoiada Perfil I Americano																				
Viga (5 m)	Condição	Comp. (m)	Área Total (cm ²)	Volume Total (cm ³)	Área Elemento (cm ²)	Volume Elemento (cm ³)	Nº Pos. Danif.	Ix Total (cm4)	Iy Total (cm4)	Ix Elemento (cm4)	Iy Elemento (cm4)	Nº Elementos Danific.	Freq. (Hz) Mín.	Freq. (Hz) Máx.	Freq. (Hz) Intacto / Dano 1	Freq. (Hz) Intacto / Dano 2	FO DE	Resultado FO DE	% de Dano 1	% de Dano 2
Caso 23	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3092432	13,7521387	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,76517	-	-
	Danificada	5,00	-	-	8,2772	1,66	8 e 23	-	-	-	-	2	12,9587547	13,6601525	13,1218352	13,5713969	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,76517	1,837%	3,828%
Caso 24	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3462305	13,7204596	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,54091	-	-
	Danificada	5,00	-	-	6,7972	1,36	8 e 23	-	-	-	-	2	13,0023153	13,7035957	13,2007075	13,5884577	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,54091	1,837%	4,593%
Caso 25	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3462305	13,7204596	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,59052	-	-
	Danificada	5,00	-	-	8,2772	1,66	8 e 23	-	-	-	-	2	12,9819535	13,7048040	13,1815923	13,5739590	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,59052	1,837%	5,359%
Caso 28	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3852308	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,09440	-	-
	Danificada	5,00	-	-	8,2772	1,66	13	-	-	-	-	1	12,9819535	13,7048040	13,2206412	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,09440	1,225%	-
Caso 29	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3852308	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,98290	-	-
	Danificada	5,00	-	-	6,7972	1,36	13	-	-	-	-	1	13,0023153	13,7035957	13,1971989	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,98290	2,450%	-
Caso 30	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3462305	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,46580	-	-
	Danificada	5,00	-	-	6,7972	1,36	14	-	-	-	-	1	12,9587547	13,6601525	13,1584674	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,46580	2,674%	-
Caso 31	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3852308	13,6855373	$\sum(Ym-Ya)^2$	3,19310	-	-
	Danificada	5,00	-	-	8,2772	1,66	7 e 22	-	-	-	-	2	12,7689630	13,4579874	13,0476409	13,3371950	$\sum(Ym-Ya)^2$	3,19310	1,837%	1,531%
Caso 32	Intacta	5,00	14,50	0,73	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	13,1286299	13,8387072	13,3852308	13,6855373	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,73640	-	-
	Danificada	5,00	-	-	8,2772	1,66	7 e 22	-	-	-	-	2	12,8811302	13,5817213	13,0813686	13,4440489	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,73640	1,837%	3,062%

Já a Tabela 5.5 seguinte demonstra os parâmetros técnicos das vigas metálicas biapoiadas com 6 metros também trabalhadas nos estudos realizados na tese de Palechor (2018), para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional, onde foram reunidos os parâmetros técnicos existentes e os resultados encontrados visando buscar uma alternativa de equação mais simplificada e direta do que a aplicada em processos de otimização, no caso a função do Método dos Mínimos Quadrados.

Tabela 5.5 - Parâmetros técnicos das vigas metálicas biapoiadas com 6 metros para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional

Parâmetros Técnicos das Vigas de 6m Metálicas 102x11.4 Biapoiada Perfil I Americano																				
Viga (6 m)	Condição	Comp. (m)	Área Total (cm ²)	Vol. Total (cm ³)	Área Elemento (cm ²)	Volume Elemento (cm ³)	Nº Pos. Danif.	Ix Total (cm4)	Iy Total (cm4)	Ix Elemento (cm4)	Iy Elemento (cm4)	Nº Elementos Danific.	Freq. (Hz) Mín.	Freq. (Hz) Máx.	Freq. (Hz) Intacto / Dano 1	Freq. (Hz) Intacto / Dano 2	FO DE	Resultado FO DE	% de Dano 1	% de Dano 2
Caso 26	Intacta	6,00	14,50	0,87	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	9,2051251	9,6357201	9,5469329	9,6079424	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,12001	-	-
	Danificada	6,00	-	-	6,7972	1,36	25 e 27	-	-	-	-	2	9,1420604	9,5707452	9,4742771	9,5418495	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,12001	1,531%	2,297%
Caso 27	Intacta	6,00	14,50	0,87	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	9,2051251	9,6357201	9,5469329	9,6079424	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,19091	-	-
	Danificada	6,00	-	-	6,7972	1,36	25 e 27	-	-	-	-	2	9,1246803	9,5470500	9,4556790	9,5220620	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,19091	2,297%	2,297%
Caso 33	Intacta	6,00	14,50	0,87	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	9,2051251	9,6357201	9,2051251	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,57724	-	-
	Danificada	6,00	-	-	8,2772	1,66	15	-	-	-	-	1	9,0643336	9,4928465	9,0643336	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	0,57724	0,766%	-
Caso 34	Intacta	6,00	14,50	0,87	14,5000	2,90	-	252,00	31,70	252,00	31,70	-	9,2051251	9,6357201	9,2051251	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,29340	-	-
	Danificada	6,00	-	-	8,2772	1,66	15	-	-	-	-	1	8,9890428	9,4865562	8,9890428	-	$\sum(Ym-Ya)^2$	1,29340	2,297%	-

Nesse sentido será utilizado esses parâmetros para se alcançar uma análise de integridade estrutural simplificada alcançando a aplicação da decomposição hierárquica para processos de identificação de danos estruturais no Nível 2 e 3, onde por meio de parâmetros numéricos genéricos de ordem menor afim de verificar sua eficácia em situações experimentais e de campo, além de numéricas, muitas vezes com influências diversas, além de algumas condições recorrentes em meios não ideais.

5.3.1.1 Localização do dano - Nível 2: Aplicação para decomposição hierárquica dos processos de identificação de danos estruturais

No que tange às aplicações de identificações de danos quanto ao nível 2 de localização, destaca-se o trabalho de Le (2019), onde a localização do dano é definida na maioria dos casos por meio da mudança na caracterização das curvas obtidas em análises intactas e danificadas, algumas das estruturas simples utilizadas na pesquisa são demonstradas na Figura 5.26 seguinte.

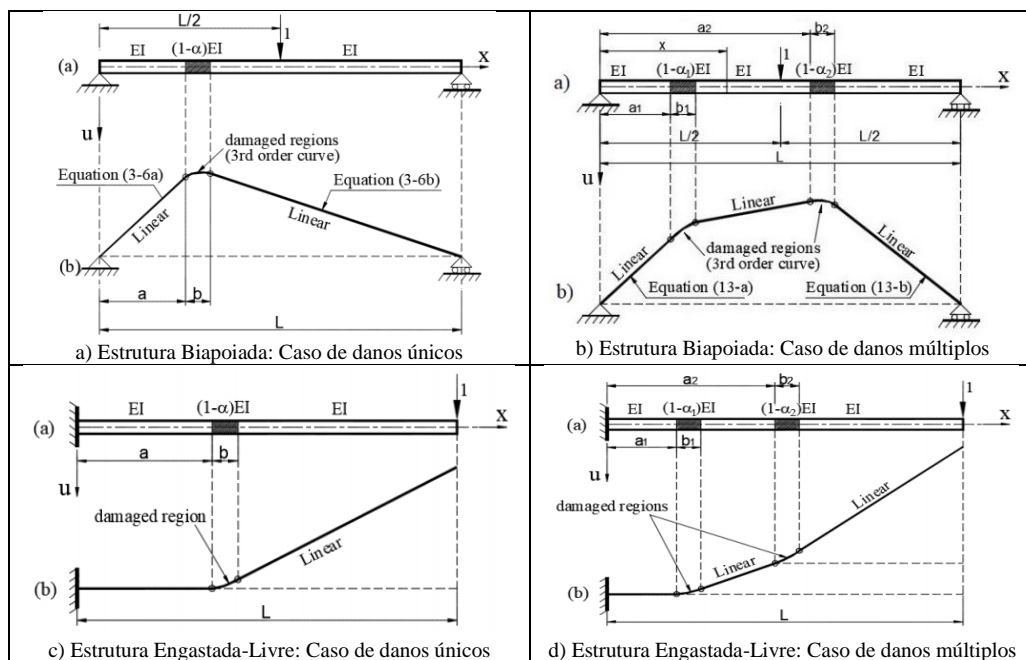


Figura 5.26 – Demonstração de estruturas e suas caracterizações de curvas em análises de regiões danificadas (Le, 2019)

Quanto ao destaque na mudança da caracterização das curvas em análises intactas e danificadas ainda em Le (2019), apresentando alguns exemplos na Figura 5.27 a seguir.

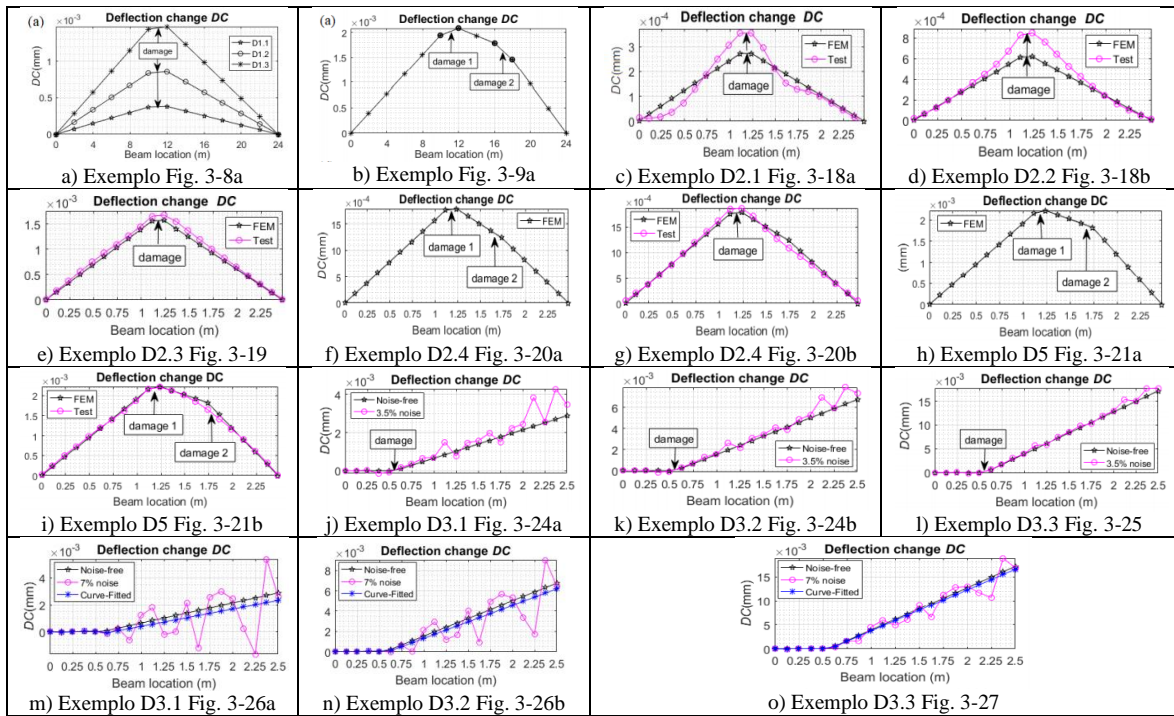


Figura 5.27 - Exemplos de estruturas e suas caracterizações de curvas de deflexões em análises de regiões danificadas (Le, 2019)

Essas mudanças de curvaturas e tangenciamentos também podem ser evidenciadas numa análise com o método de Newton-Raphson, denominado como método das tangentes, onde na Figura 5.28 a seguir demonstra-se um modelo de comportamento desse método.

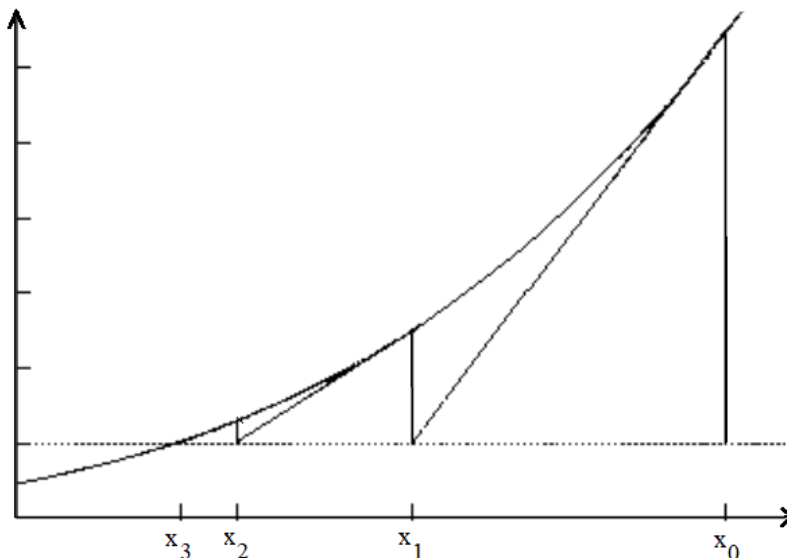


Figura 5.28 – Análise gráfica do comportamento do método de Newton-Raphson ou método das tangentes

Trata-se de um método desenvolvido por Isaac Newton e Joseph Raphson, tendo como escopo principal, buscar e tentar estimar as raízes de uma função. Em linhas gerais, a

sequência desse método se baseia no cálculo da equação da reta tangente (através de derivadas), da função nesse ponto e a intersecção com os eixos das abcissas, sempre almejando aproximações melhores para a raiz.

Partindo agora de uma terceira abordagem, no caso envolvendo uma análise do autor dessa pesquisa, das premissas da teoria de funções modulares, em que ao se considerar em um eixo real por exemplo de origem O um ponto A de abcissa x conforme a representação da Figura 5.29 seguinte.

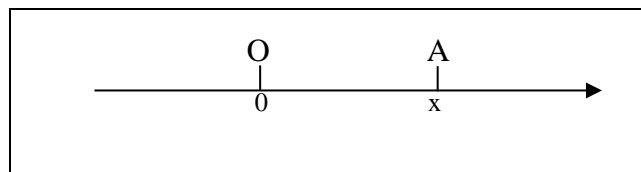


Figura 5.29 – Representação no eixo real de origem O um ponto A de abcissa x

Onde denomina-se módulo de x, e indica-se por $|x|$, a distância entre os pontos A e O, conforme Equação (5.1) a seguir.

$$|x| = d_{AO} \quad (5.1)$$

Onde se mostra que como $|x|$ é a distância entre dois pontos, $|x|$ é um número real positivo ou nulo. Em que, é possível alcançar a definição algébrica para $|x|$ da Equação (5.2) da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} |x| = x &\Leftrightarrow x \geq 0 \text{ e} \\ |x| = -x &\Leftrightarrow x \leq 0, \forall x, \text{ com } x \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (5.2)$$

No intuito de verificar a aplicabilidade de uma função de identificação de danos simplificada, será demonstrado uma linha de aplicação por meio de um exemplo numérico adimensional no intuito de determinar essa equação que melhor se ajuste a essas ideias, conforme demonstrado na Figura 5.30 a seguir.

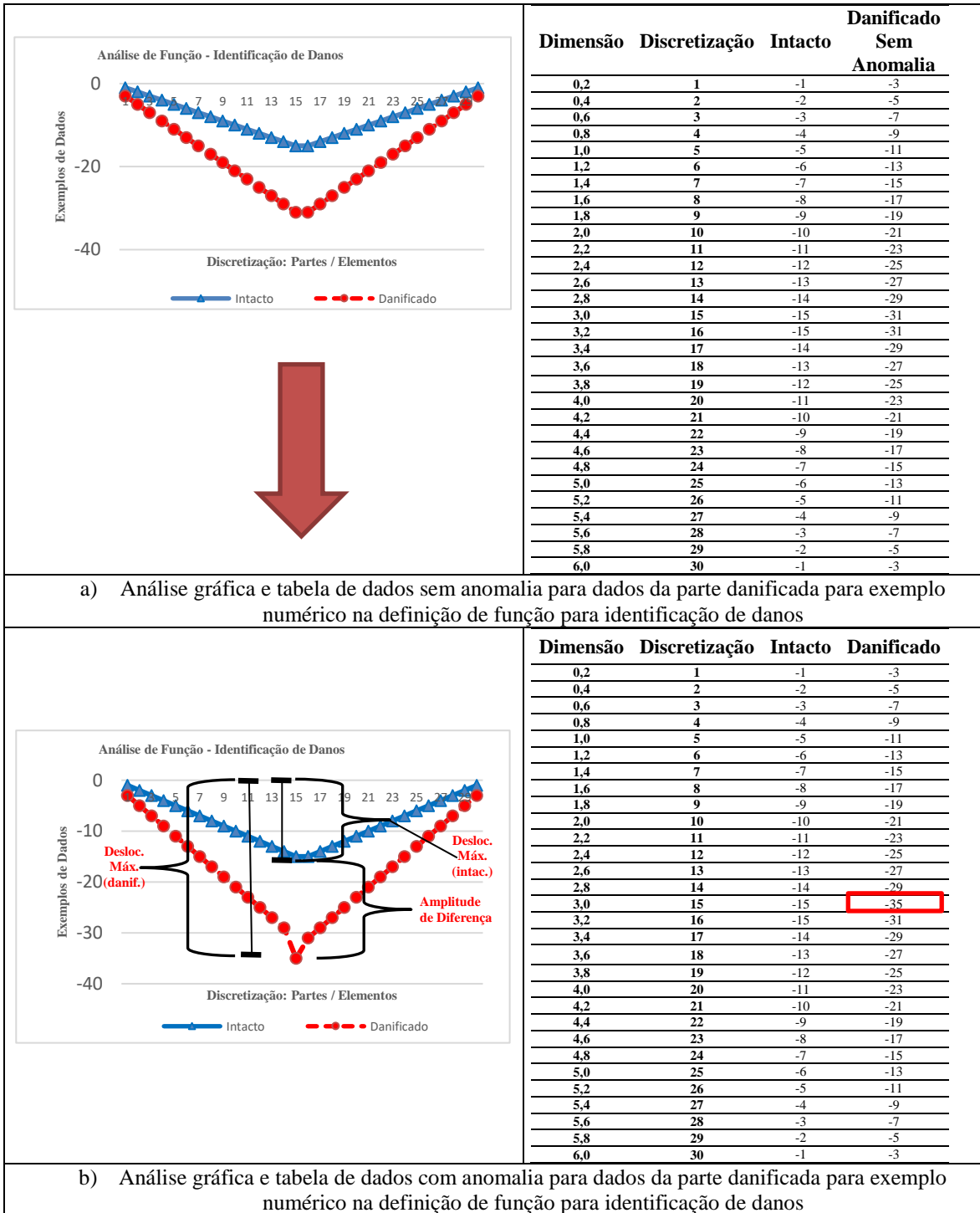


Figura 5.30 – Análise gráfica e tabela de dados com e sem anomalia da parte danificada para ilustração do exemplo numérico na definição de função para identificação de danos

Considerando a Equação (5.3) a seguir para a definição de uma verificação das diferenças entre os dados de entrada do elemento ou de uma estrutura intacta ou danificada para determinar a maior diferença possível.

$$L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \quad (5.3)$$

Onde,

L_n : variável da amplitude de diferença dos dados intactos e danificados;

$|d_{2;n}|$: variáveis de dados em módulo dos maiores valores recorrentes dos resultados de análises estáticas (deslocamentos) ou dinâmicas (modos de vibração ou frequências naturais) em determinado ponto (posição n);

$|d_{1;n}|$: variáveis de dados em módulo dos menores valores recorrentes dos resultados de análises estáticas (deslocamentos) ou dinâmicas (modos de vibração ou frequências naturais) em determinado ponto (posição n);

n : posição da variável dos maiores e menores valores.

Seguindo agora com uma verificação condicional da Equação (5.4), se o resultado de $> L_n$ na posição n for o maior, tem-se:

$>$ entre os L_n na posição n	(5.4)
-----------------------------------	-------

A determinação da maior diferença na posição n dos valores de resultados da estrutura intacta e danificada remete ao ponto onde há uma anomalia que caracteriza o ponto danificado.

Se valendo dos resultados de exemplo presentes nas tabelas da Figura 5.30 em que:

Posição $n = 1$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_1 = |-3_{2,1}| - |-1_{1,1}| \rightarrow L_1 = 3_{2,1} - 1_{1,1} \rightarrow L_1 = 2$

Posição $n = 2$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_2 = |-5_{2,2}| - |-2_{1,2}| \rightarrow L_2 = 5_{2,2} - 2_{1,2} \rightarrow L_2 = 3$

Posição $n = 3$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_3 = |-7_{2,3}| - |-3_{1,3}| \rightarrow L_3 = 7_{2,3} - 3_{1,3} \rightarrow L_3 = 4$

...

Posição $n = 14$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{14} = |-29_{2,14}| - |-14_{1,14}| \rightarrow L_{14} = 29_{2,14} - 14_{1,14} \rightarrow L_{14} = 15$

Posição $n = 15$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{15} = |-35_{2,15}| - |-15_{1,15}| \rightarrow L_{15} = 35_{2,15} - 15_{1,15} \rightarrow L_{15} = 20$

Posição $n = 16$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{16} = |-31_{2,16}| - |-15_{1,16}| \rightarrow L_{16} = 31_{2,16} - 15_{1,16} \rightarrow L_{16} = 16$

...

Posição $n = 28$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{28} = |-7_{2,28}| - |-3_{1,28}| \rightarrow L_{28} = 7_{2,28} - 3_{1,28} \rightarrow L_{28} = 4$

Posição $n = 29$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{29} = |-5_{2,29}| - |-2_{1,29}| \rightarrow L_{29} = 5_{2,29} - 2_{1,29} \rightarrow L_{29} = 3$

Posição $n = 30$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{30} = |-3_{2,30}| - |-1_{1,30}| \rightarrow L_{30} = 3_{2,30} - 1_{1,30} \rightarrow L_{30} = 2$

Fazendo agora a verificação condicional do > valor entre os L_n na posição n , sendo este o $L_{15} = 20$, ou seja, observando os dados de exemplo apresentados na Figura 5.30 mostrando tanto na análise gráfica como na tabela a verificação exata das demonstrações realizadas quando se obteve a amplitude de 20 na posição 15, local definido de dano.

Em resumo a função da Equação (5.5) de identificação (Nível 1: detecção de dano / Rytter, 1993) e posicionamento (Nível 2: localização do dano / Rytter, 1993) do dano dada pela diferença simples modular dos maiores e menores valores fica:

$$se L_n > ; L_n = |d_{2,n}| - |d_{1,n}| \quad (5.5)$$

Nesse sentido, a ideia de utilizar uma função de diferenças modulares é simplificar análises, de forma genérica, para que se aplique a qualquer situação que não adentre em características peculiares do universo trabalhado.

5.3.1.2 Quantificação do dano - Nível 3: Aplicação para decomposição hierárquica dos processos de identificação de danos estruturais

Agora tentando sair do Nível 2 que trata da localização do dano, busca-se alcançar o Nível 3 que contempla a quantificação do dano. Para tanto, será abordado os comportamentos de deflexões que os elementos sofrem por meio de Equações Diferenciais com a utilização de Séries de Fourier, na qual esta solução analítica permite aplicações de uma única expressão ao longo de todo o elemento considerado.

Partindo agora para a análise do estudo de caso da aplicação para a decomposição hierárquica dos processos de identificação de danos estruturais no Nível 3 de quantificação do dano, conforme princípios da Figura 5.31 a seguir.

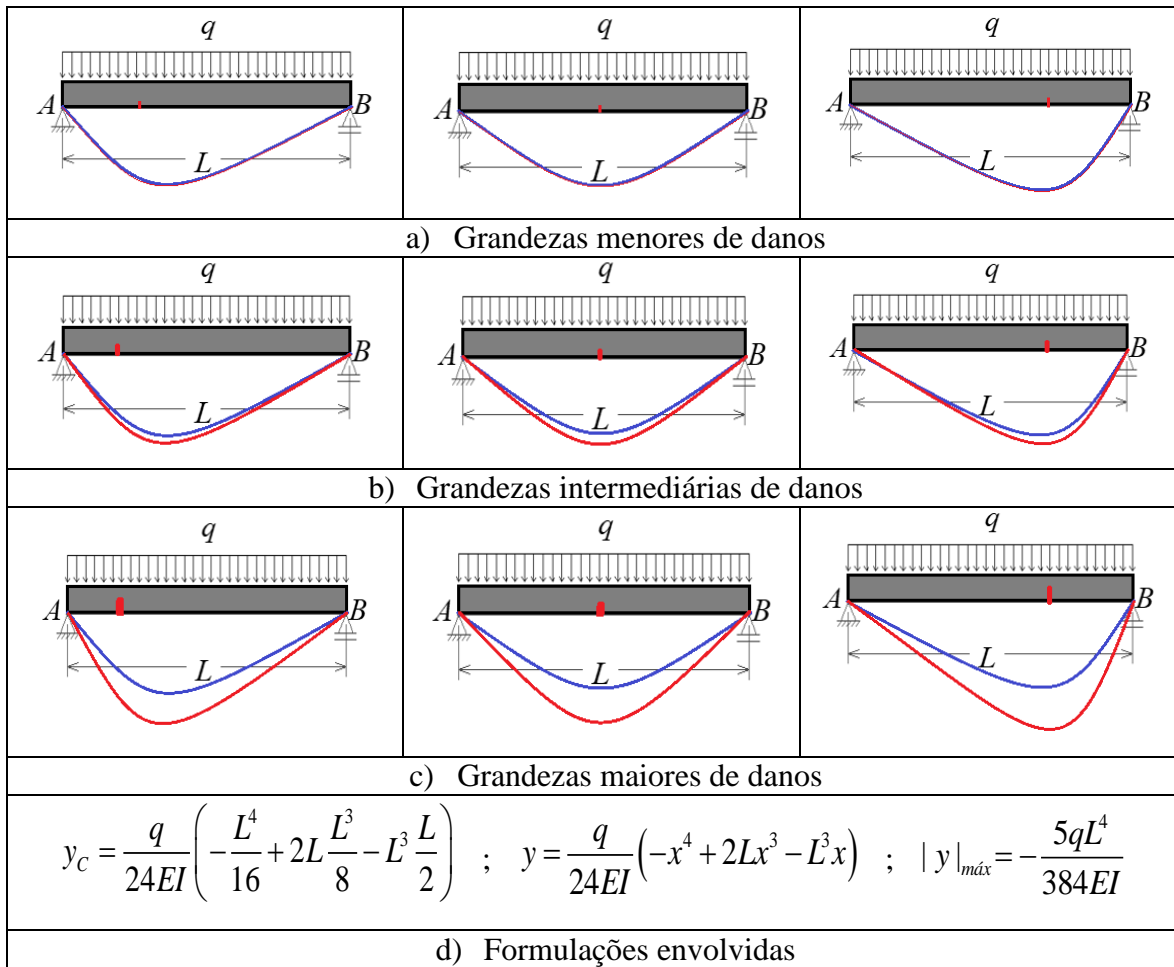


Figura 5.31 - Analogias de condições intactas e danificadas de viga biapoada correlacionando com as aplicações das equações de deflexões

Numa tentativa de aplicações das limitantes de homogeneizações da viga no âmbito da condição danificada apresenta-se a Figura 5.32 seguinte.

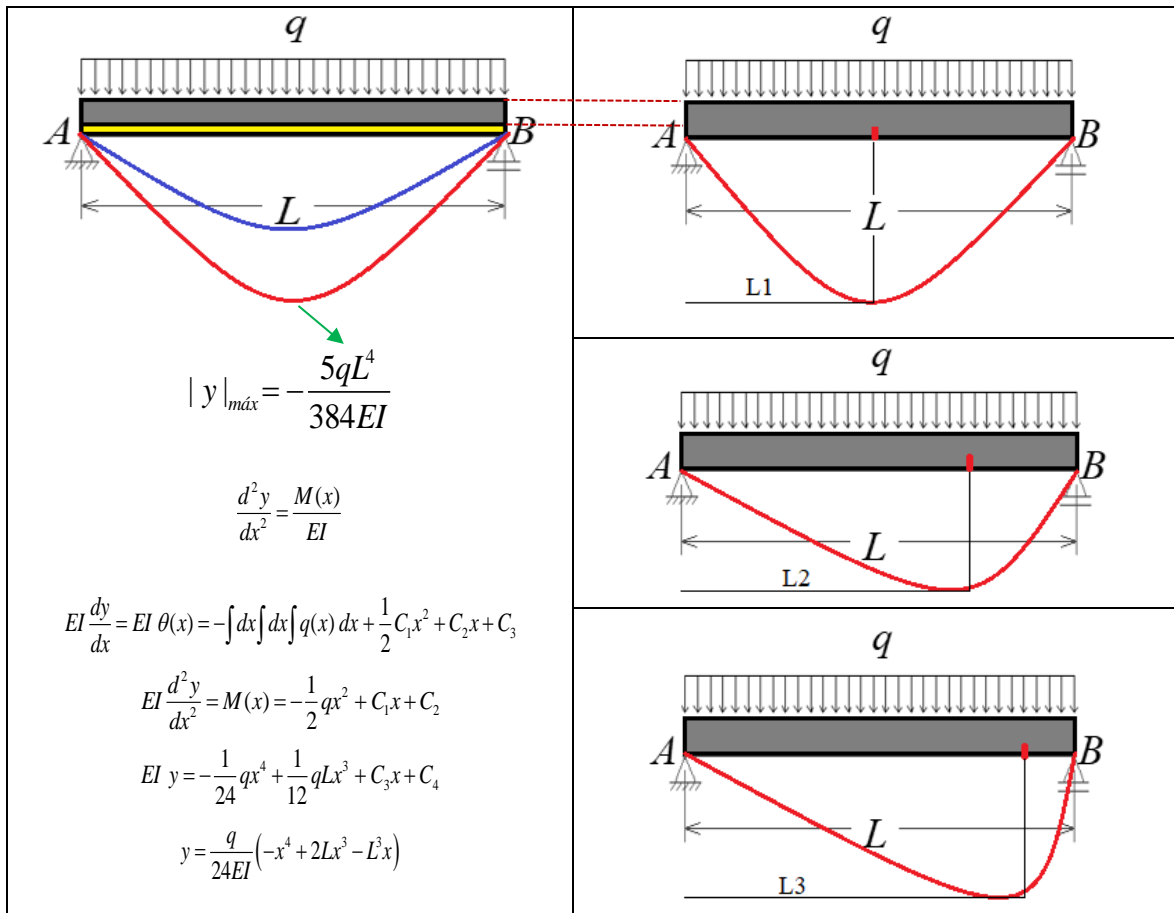


Figura 5.32 - Demonstração das limitantes das aplicações de homogeneizações

Essa limitação de homogeneização se dá em função da impossibilidade de haver uma mudança na inércia ao longo do comprimento da viga quando considerada a condição danificada.

Determinando-se a relação entre a Rigidez Intacta EI_{intacta} e a Rigidez Danificada $EI_{\text{danificada}}$ também para aplicação em análises de deslocamentos máximos em $x=L/2$, trabalhando com a Equação (5.6) do elemento intacto e danificado da Equação (5.7) no meio do vão:

$$|y|_{\max\text{-intacta}} = -\frac{5qL^4}{384EI_{\text{intacta}}} \rightarrow x=L/2 \rightarrow \frac{|y|_{\max\text{-intacta}_{L/2}}}{1} = -\frac{5qL^4}{384EI_{\text{intacta}_{L/2}}} \rightarrow$$

$$\rightarrow (|y|_{\max\text{-intacta}_{L/2}}) \cdot (384EI_{\text{intacta}_{L/2}}) = -(5qL^4) \cdot (1) \rightarrow$$

$$EI_{\text{intacta}_{L/2}} = -\frac{5qL^4}{384|y|_{\max\text{-intacta}_{L/2}}} \quad (5.6)$$

$$EI_{danificada_L/2} = -\frac{5qL^4}{384|y|_{max-danificada_L/2}} \quad (5.7)$$

Alcançando a Equação (5.8) de Dano ($D_{\% \text{ dan/int}}$) a seguir que relaciona a rigidez da estrutura danificada com a rigidez da estrutura intacta demonstrada em termos percentuais.

$$\frac{\frac{5qL^4}{384|y|_{max-danificada_L/2}}}{\frac{5qL^4}{384|y|_{max-intacta_L/2}}} \rightarrow D_{\% \text{ dan/int}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) \cdot 100\% \quad (5.8)$$

Sendo,

$D_{\% \text{ dan/int}}$: variável de dano para percentual que relaciona $EI_{danificada}$ e $EI_{intacta}$.

Há ainda uma fase anterior que também pode ser utilizada e consequentemente aplicada nessas análises de danos, ainda para a determinação da relação entre a Rigidez Intacta $EI_{intacta}$ e a Rigidez Danificada $EI_{danificada}$ agora para aplicação em análises de deslocamentos máximos em mais pontos, no caso em $x=L/4$ e $x=L/8$, um estratégico posicionamento dos danos, alcançando o análise resumo 1 da Tabela 5.6 seguinte com aplicações em cima da Equação (2.99) e (2.106) da linha elástica também com aplicações das Equações (5.6), (5.9) e (5.11) do elemento intacto e danificado das Equações (5.7), (5.10) e (5.12) com essas diferenciações de posicionamentos:

$$y = \frac{q}{24EI}(-x^4 + 2Lx^3 - L^3x) \rightarrow x=L/4 \rightarrow |y|_{max-intacta_L/4} = -\frac{57qL^4}{6144EI_{intacta_L/4}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{|y|_{max-intacta_L/4}}{1} = -\frac{57qL^4}{6144EI_{intacta_L/4}} \rightarrow (|y|_{max-intacta}) \cdot (6144EI_{intacta_L/4}) = -(57qL^4) \cdot (1)$$

$$\rightarrow$$

$$EI_{intacta_L/4} = -\frac{57qL^4}{6144|y|_{max-intacta_L/4}} \quad (5.9)$$

$$EI_{danificada_L/4} = -\frac{57qL^4}{6144|y|_{max-danificada_L/4}} \quad (5.10)$$

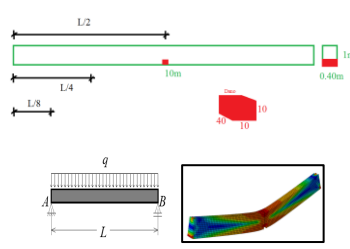
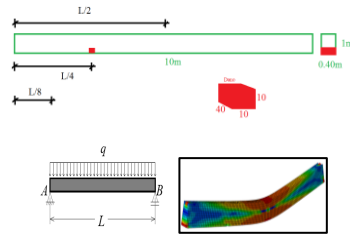
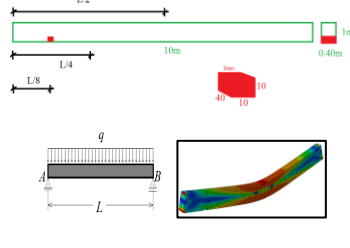
$$y = \frac{q}{24EI}(-x^4 + 2Lx^3 - L^3x) \rightarrow x = L/8 \rightarrow |y|_{\max-intacta_L/8} = \frac{511qL^4}{98304EI_{\text{intacta_L/8}}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{|y|_{\max-intacta_L/8}}{1} = \frac{511qL^4}{98304EI_{\text{intacta_L/8}}} \rightarrow (|y|_{\max-intacta_L/8}) \cdot (98304EI_{\text{intacta_L/8}}) = -(511qL^4) \cdot (1) \rightarrow$$

$$EI_{\text{intacta_L/8}} = -\frac{511qL^4}{98304|y|_{\max-intacta_L/8}} \quad (5.11)$$

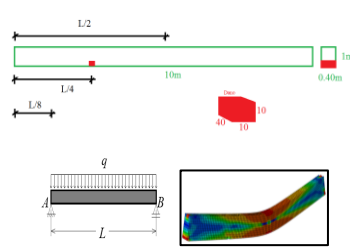
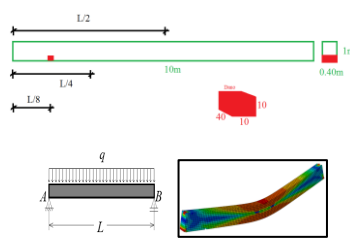
$$EI_{\text{danificada_L/8}} = -\frac{511qL^4}{98304|y|_{\max-danificada_L/8}} \quad (5.12)$$

Tabela 5.6 – Análise Resumo 1: Estudos de Casos de Deslocamentos Utilizando as Equações no Ponto de Danos de 10 cm da Viga em L/2, L/4 e L/8

Análise	Casos	Posição Desloc. Dano	Equação Intacta	Equação Danificada	Relação Danif./Intacta (% EI Danif.)
1.1		L/2	$EI_{\text{intacta_L/2}} = -\frac{5qL^4}{384 y _{\max-intacta_L/2}}$ $= \frac{5.3140 \cdot 10^4}{384 -0.0873932 _{\max-intacta_L/2}}$	$EI_{\text{danificada_L/2}} = -\frac{5qL^4}{384 y _{\max-danificada_L/2}}$ $= \frac{5.3140 \cdot 10^4}{384 -0.116055 _{\max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{\text{danificada}}}{EI_{\text{intacta}}} \right) \cdot 100\%$ $EI_{\text{danificada_L/2}} / EI_{\text{intacta_L/2}}$ $= -3522934.5282 / -4678329.2827$ $= 0,753032614$ $= 75,30\%$
1.2		L/4	$EI_{\text{intacta_L/4}} = -\frac{57qL^4}{6144 y _{\max-intacta_L/4}}$ $= \frac{57.3140 \cdot 10^4}{6144 -0.0635666 _{\max-intacta_L/4}}$	$EI_{\text{danificada_L/4}} = -\frac{57qL^4}{6144 y _{\max-danificada_L/4}}$ $= \frac{57.3140 \cdot 10^4}{6144 -0.0791475 _{\max-danificada_L/4}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{\text{danificada}}}{EI_{\text{intacta}}} \right) \cdot 100\%$ $EI_{\text{danificada_L/4}} / EI_{\text{intacta_L/4}}$ $= -3680578.5874 / -4582730.4551$ $= 0,803140971$ $= 80,31\%$
1.3		L/8	$EI_{\text{intacta_L/8}} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{\max-intacta_L/8}}$ $= \frac{511.3140 \cdot 10^4}{98304 -0.028743 _{\max-intacta_L/8}}$	$EI_{\text{danificada_L/8}} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{\max-danificada_L/8}}$ $= \frac{511.3140 \cdot 10^4}{98304 -0.0320449 _{\max-danificada_L/8}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{\text{danificada}}}{EI_{\text{intacta}}} \right) \cdot 100\%$ $EI_{\text{danificada_L/8}} / EI_{\text{intacta_L/8}}$ $= -509.3548 / -567.8678 =$ $= 0,896960203$ $= 89,70\%$

Fazendo verificações agora na análise resumo 2 somente onde efetivamente ocorrem os deslocamentos máximos, que é no meio do vão, mais especificamente em $L/2$, mas com os danos de 10 cm variando de posição em $L/4$ e $L/8$, trabalhando somente com a Equação (5.6) do elemento intacto e danificado da Equação (5.7) no meio do vão e os resultados apresentados na Tabela 5.7 seguinte.

Tabela 5.7 – Análise Resumo 2: Estudos de Casos de Deslocamentos Utilizando Somente a Equação do Meio da Viga Com Danos de 10 cm em $L/4$ e $L/8$

Item	Casos	Posição Desloc. Máximo	Equação Intacta	Equação Danificada	Relação Danif./Intacta (% EI Danif.)
2.1		$L/4$	$EI_{intact_L/4} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intact_L/2}}$ $= \frac{5.3140.10^4}{384 -0.0873932 _{max-intact_L/2}}$	$EI_{danificada_L/4} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada_L/2}}$ $= \frac{5.3140.10^4}{384 -0.110988 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/4} / EI_{intacta_L/4}$ $= \frac{-230235.569\%}{-292395.5802} =$ $0,787411252$ $= 78,74\%$
2.2		$L/8$	$EI_{intact_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intact_L/2}}$ $= \frac{5.3140.10^4}{384 -0.0873932 _{max-intact_L/2}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada_L/2}}$ $= \frac{5.3140.10^4}{384 -0.0995158 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $= \frac{-256777.1692\%}{-292395.5802}$ $= 0,878184168$ $= 87,82\%$

Agora na análise resumo 3 fazendo verificações também somente onde efetivamente ocorrem os deslocamentos máximos, que é no meio do vão, mais especificamente em $L/2$, mas com os danos variando de altura (20 cm, 30 cm e 50 cm) e na posição fixa de $L/8$, mais próximo ao apoio onde sempre há dificuldades maiores de localização e de quantificação de danos. A Tabela 5.8 gerada pode ser verificada a seguir.

Tabela 5.8 – Análise Resumo 3: Estudos de Casos de Deslocamentos Utilizando a Equação nos Pontos de Danos e Também Somente no Meio da Viga com Variação de Altura dos Danos de 20 cm, 30 cm e 50 cm em $L/8$

Item	Casos	Posição Desloc. Máx. / Dano	Equação Intacta	Equação Danificada	Relação Danif./Intacta (% EI Danif.)
3.1		L/8	$EI_{intacta_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-intacta_L/8}}$ $-\frac{511.3140.10^4}{98304 -0.028743 _{max-intacta_L/8}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-danificada_L/8}}$ $-\frac{511.3140.10^4}{98304 -0.0283444 _{max-danificada_L/8}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-5758536.0547 / -5678678.2642$ $= 1,014062743$ $= \emptyset \%$
3.2		L/8	$EI_{intacta_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-intacta_L/8}}$ $-\frac{511.3140.10^4}{98304 -0.028743 _{max-intacta_L/8}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-danificada_L/8}}$ $-\frac{511.3140.10^4}{98304 -0.0337324 _{max-danificada_L/8}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-4838738.1078 / -5678678.2642$ $= 0,852088793$ $= 85,21 \%$
3.3		L/8	$EI_{intacta_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-intacta_L/8}}$ $-\frac{511.3140.10^4}{98304 -0.028743 _{max-intacta_L/8}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-danificada_L/8}}$ $-\frac{511.3140.10^4}{98304 -0.0415001 _{max-danificada_L/8}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-3933056.7721 / -5678678.2642$ $= 0,692600741$ $= 69,26 \%$
3.4		L/8	$EI_{intacta_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intacta_L/2}}$ $-\frac{5.3140.10^4}{384 -0.0873932 _{max-intacta_L/2}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada_L/2}}$ $-\frac{5.3140.10^4}{384 -0.084147 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-4858808.5929 / -4678329.2827$ $= 1,038577727$ $= \emptyset \%$
3.5		L/8	$EI_{intacta_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intacta_L/2}}$ $-\frac{5.3140.10^4}{384 -0.0873932 _{max-intacta_L/2}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-danificada_L/8}}$ $-\frac{5.3140.10^4}{384 -0.103326 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-3956934.0405 / -4678329.2827$ $= 0,84580067$ $= 84,58 \%$
3.6		L/8	$EI_{intacta_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intacta_L/2}}$ $-\frac{5.3140.10^4}{384 -0.0873932 _{max-intacta_L/2}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada_L/2}}$ $-\frac{5.3140.10^4}{384 -0.11963 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-3417655.8277 / -4678329.2827$ $= 0,730529131$ $= 73,05 \%$

Dentre os resultados obtidos verifica-se que as reduções de rigidez ($EI_{danificada}$) da viga danificada estão na ordem de 10 a 30% em relação à rigidez ($EI_{intacta}$) da estrutura intacta, com melhores resultados aplicando os valores de deslocamentos no meio do vão na respectiva equação. Quando da presença de danos menores em $L/8$, próximo ao apoio, não se alcançou uma relação de redução de rigidez conforme observado na Tabela 5.8 nos itens 3.1 e 3.4.

Aplicando também a Equação (5.6) e a Equação (5.7) no exemplo da Figura 5.30b, utilizando o valor da variável de carregamento $q=10$ e $q=100$, alcança-se também os seguintes resultados apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Análise Resumo dos Estudo de Caso de Deslocamentos e Danos da Viga

Item	Casos	Posição Desloc. Máximo/ Dano	Equação Intacta	Equação Danificada	Relação Danif./Intacta (% EI Danif.)
1		$L/2$	$EI_{intacta} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intacta}}$ $EI_{intacta} = -\frac{5.10.6^4}{384 -15 _{max-intacta}}$	$q = 10$ $EI_{danificada} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada}}$ $EI_{danificada} = -\frac{5.10.6^4}{384 -35 _{max-danificada}}$	$D_{\% danif} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}}$ $\frac{-4,8214}{-11,2500}$ $= 0,42856888889$ $= 42,86\%$
2		$L/2$	$q = 100$ $EI_{intacta} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intacta}}$ $EI_{intacta} = -\frac{5.100.6^4}{384 -15 _{max-intacta}}$	$q = 100$ $EI_{danificada} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada}}$ $EI_{danificada} = -\frac{5.100.6^4}{384 -35 _{max-danificada}}$	$D_{\% danif} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}}$ $\frac{-48,2143}{-112,5000}$ $= 0,428571555556$ $= 42,86\%$

Mesmo com esses dados fictícios da Figura 5.30b e com essa aplicação da Tabela 5.9 os resultados de perda de rigidez do elemento quando se analisando a estrutura danificada com a intacta, e testando essa diferença da variável q , obteve-se reduções de rigidez da ordem de quase 60%, demonstrando também resultados com potenciais dessa análise de integridade e partir agora para a verificação numérica com a viga dos experimentos dessa tese.

Partindo agora para uma análise final dessas equações de danos, analisou-se a viga IPN 500x104 (ver Apêndice C com os dados tabelados dos modelos) visando uma analogia de danos do primeiro estudo de caso também em $L/2$, $L/4$ e $L/8$, além é claro de uma busca pela similaridade da análise dos ensaios experimentais dessa pesquisa, principalmente no que tange à grandeza do dano. A Figura 5.33 a seguir apresenta o comportamento da viga IPN 500x104 intacta em termos de carga *versus* deslocamento para utilização do deslocamento de referência quando da análise com o elemento danificado.

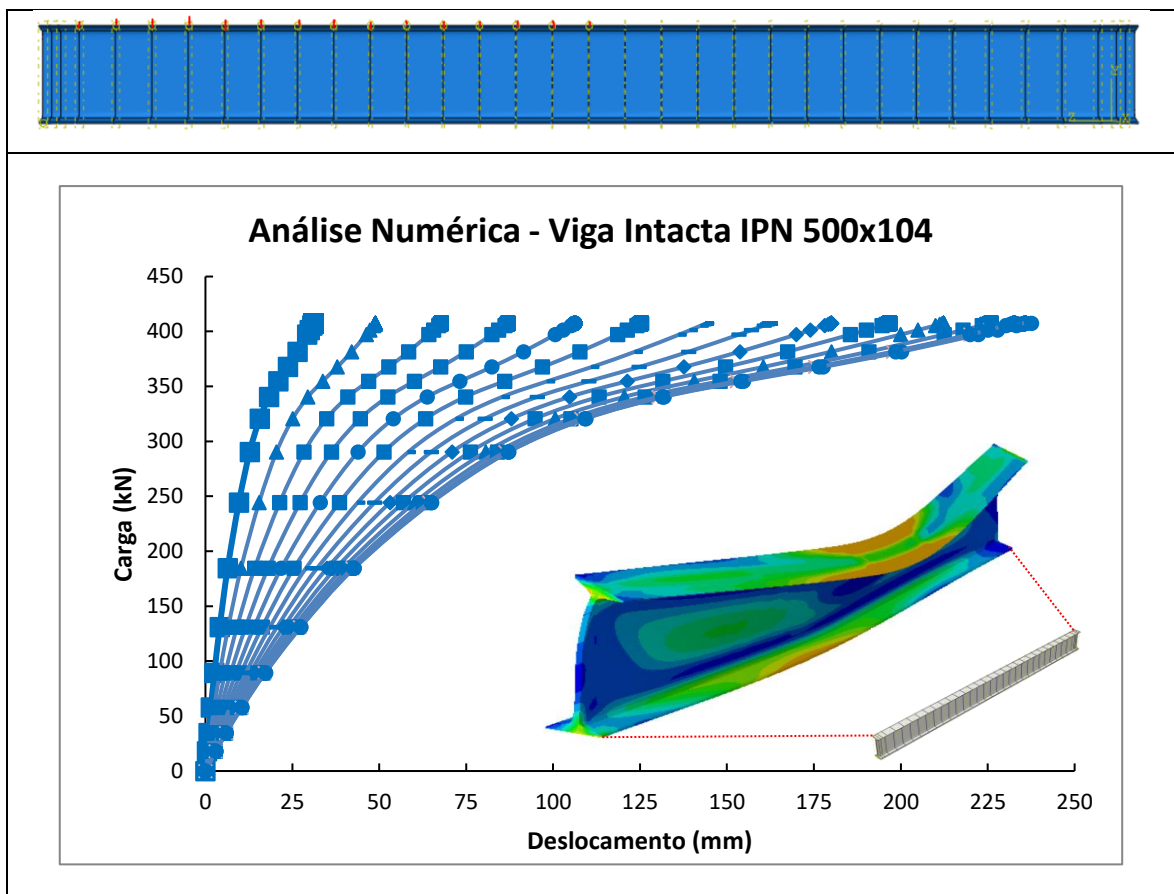


Figura 5.33 – Análise Gráfica Viga IPN 500x104 Intacta: Carga x Deslocamento

No que tange à localização dos danos, partindo das mudanças das caracterizações das curvas nas análises intactas e danificadas, propostas em Le (2019), apresenta-se a Figura 5.34 com as análises obtidas e verificado sensibilidades menores próximo aos apoios.

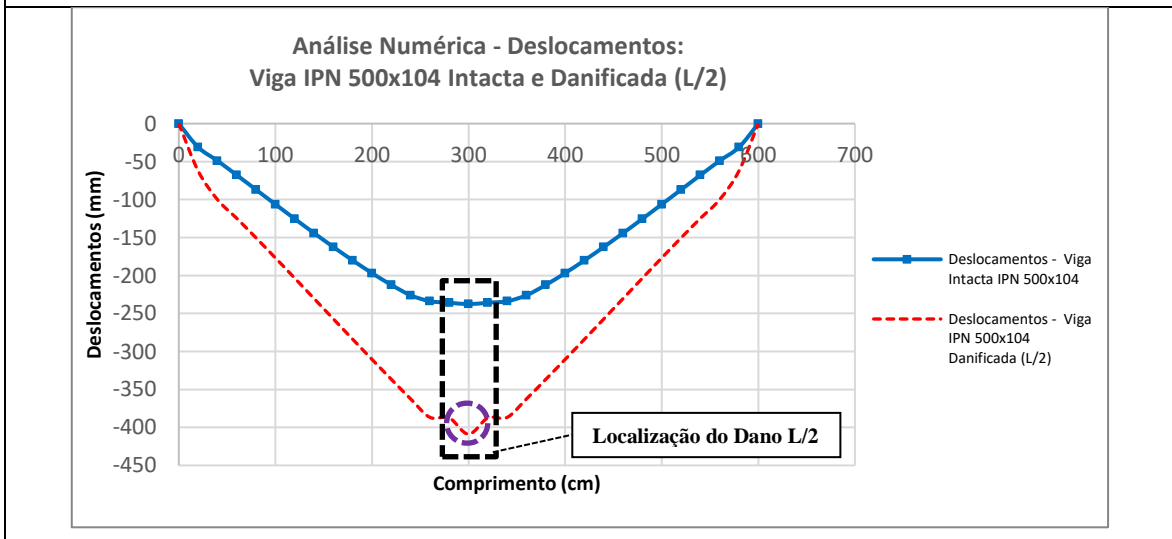
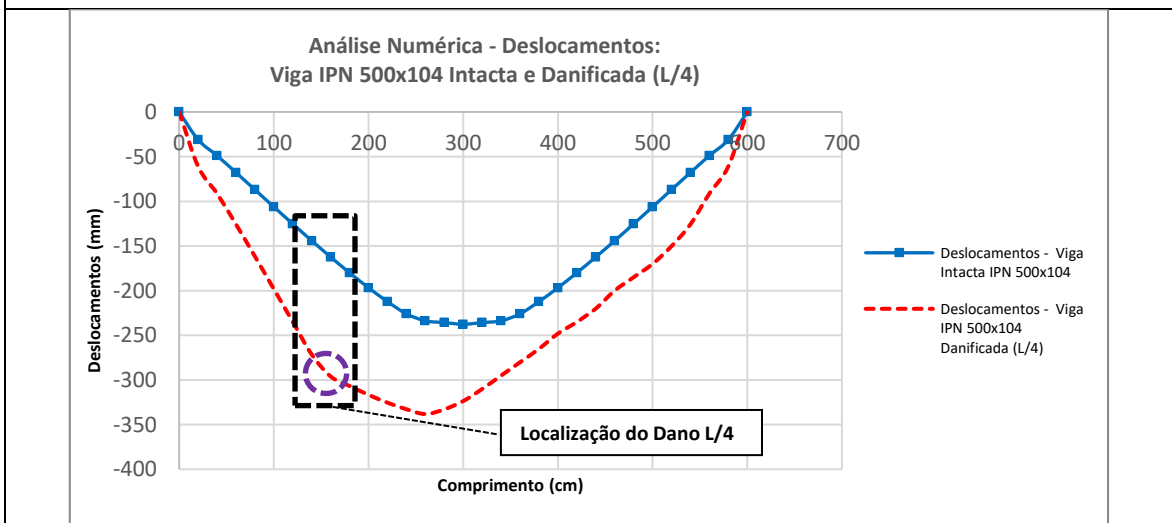
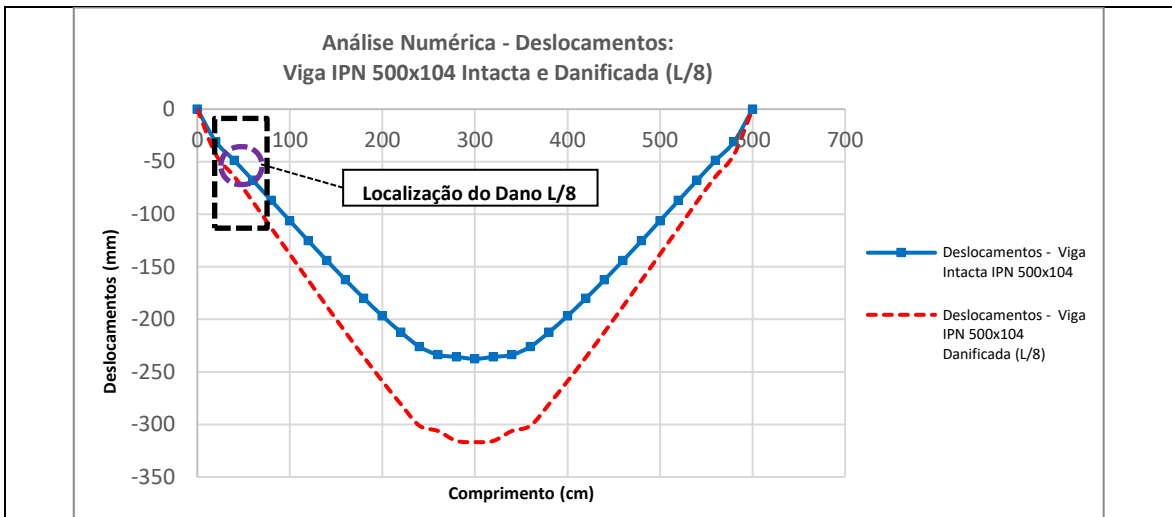


Figura 5.34 – Viga IPN 500x104 - Localização dos Danos: mudanças das caracterizações das curvas nas análises intactas e danificadas

Aplicando a verificação condicional da Equação (5.4) para a localização do dano, se valendo dos resultados presentes na Figura 5.34, considerando se o resultado de $> L_n$ na posição n for o maior, tem-se:

Análise em $L/2$:

Posição $n = L/8 = 0,75\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/8} = |-150,4600_{2;L/8} - 87,0204_{1;L/8}| \rightarrow L_{L/8} = 150,4600_{2;L/8} - 87,0204_{1;L/8} \rightarrow L_{L/8} = 63,4396$

Posição $n = L/4 = 1,50\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/4} = |-257,1420_{2;L/4} - 162,4070_{1;L/4}| \rightarrow L_{L/4} = 257,1420_{2;L/4} - 162,4070_{1;L/4} \rightarrow L_{L/4} = 94,7350$

Posição $n = L/2 = 3,00\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/2} = |-408,8780_{2;L/2} - 237,6200_{1;L/2}| \rightarrow L_{L/2} = 408,8780_{2;L/2} - 237,6200_{1;L/2} \rightarrow L_{L/2} = 171,2580$

Análise em $L/4$:

Posição $n = L/8 = 0,75\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/8} = |-161,7040_{2;L/8} - 87,0204_{1;L/8}| \rightarrow L_{L/8} = 161,7040_{2;L/8} - 87,0204_{1;L/8} \rightarrow L_{L/8} = 74,6836$

Posição $n = L/4 = 1,50\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/4} = |-296,0270_{2;L/4} - 162,4070_{1;L/4}| \rightarrow L_{L/4} = 296,0270_{2;L/4} - 162,4070_{1;L/4} \rightarrow L_{L/4} = 133,6200$

Posição $n = L/2 = 3,00\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/2} = |-323,6490_{2;L/2} - 237,6200_{1;L/2}| \rightarrow L_{L/2} = 323,6490_{2;L/2} - 237,6200_{1;L/2} \rightarrow L_{L/2} = 86,0290$

Análise em $L/8$:

Posição $n = L/8 = 0,75\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/8} = |-113,1840_{2;L/8} - 87,0204_{1;L/8}| \rightarrow L_{L/8} = 113,1840_{2;L/8} - 87,0204_{1;L/8} \rightarrow L_{L/8} = 26,1636$

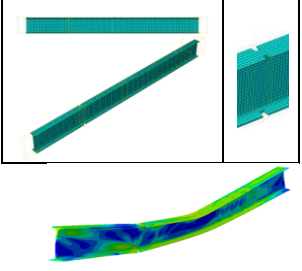
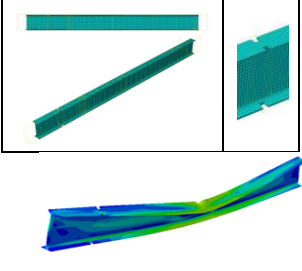
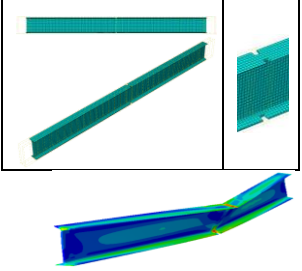
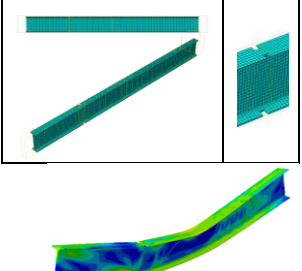
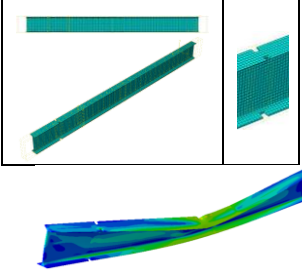
Posição $n = L/4 = 1,50\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/4} = |-212,1080_{2;L/4} - 162,4070_{1;L/4}| \rightarrow L_{L/4} = 212,1080_{2;L/4} - 162,4070_{1;L/4} \rightarrow L_{L/4} = 49,7010$

Posição $n = L/2 = 3,00\text{m}$: $L_n = |d_{2;n}| - |d_{1;n}| \rightarrow L_{L/2} = |-316,8180_{2;L/2} - 237,6200_{1;L/2}| \rightarrow L_{L/2} = 316,8180_{2;L/2} - 237,6200_{1;L/2} \rightarrow L_{L/2} = 79,1980$

A determinação da maior diferença na posição n dos valores de resultados da estrutura intacta e danificada remete ao ponto onde há uma anomalia que caracteriza o ponto danificado, onde enfatiza-se que os melhores resultados de localização de dano são em $L/2$.

Fazendo agora verificações dos deslocamentos máximos, que ocorrem mais especificamente no meio do vão, ou seja em $L/2$, e com os danos conforme demonstrado no experimento (5 cm por 5 cm / ver Figura 4.27), mas também com análises além do que foi verificado nos ensaios agora em $L/4$ e $L/8$, envolvendo as mesmas posições do estudo de caso inicial utilizado como exemplo, onde na Tabela 5.10 gerada pode ser verificado os resultados obtidos da seguinte forma:

Tabela 5.10 – Análise Viga IPN 500x104 do Experimento: Estudos dos Deslocamentos Utilizando a Equação nos Pontos de Danos e Também Somente no Meio da Viga com Dimensões dos Danos de 5 cm por 5 cm em $L/2$, $L/4$ e $L/8$

Item	Casos – Viga IPN 500x104	Posição Desloc. Máximo/Dano	Equação Intacta	Equação Danificada	Relação Danif./Intacta (% EI Danif.)
1.1		L/4	$EI_{intact_L/4} = -\frac{57qL^4}{6144 y _{max-intact_L/4}}$ $-\frac{57.141.6^4}{6144 -0.162407 _{max-intact_L/8}}$	$EI_{danificada_L/4} = -\frac{57qL^4}{6144 y _{max-danificada_L/4}}$ $-\frac{57.141.6^4}{6144 -0.296027 _{max-danificada_L/4}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/4} / EI_{intacta_L/4}$ $-5726.8583 / -10438.6183 =$ $0,548622254$ $= 54,86\%$
1.2		L/8	$EI_{intact_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-intact_L/8}}$ $-\frac{511.141.6^4}{98304 -0.0870204 _{max-intact_L/8}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{511qL^4}{98304 y _{max-danificada_L/8}}$ $-\frac{511.141.6^4}{98304 -0.113184 _{max-danificada_L/8}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-8392.4505 / -10915.7291 =$ $0,768840119$ $= 76,88 \%$
1.3		L/2	$EI_{intact_L/2} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intact_L/2}}$ $-\frac{5.141.6^4}{384 -0.23762 _{max-intact_L/2}}$	$EI_{danificada_L/2} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada_L/2}}$ $-\frac{5.141.10^4}{384 -0.408878 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/2} / EI_{intacta_L/2}$ $-5819.2786 / -10013.3617 =$ $0,581151346$ $= 58,12\%$
1.4		L/4	$EI_{intact_L/4} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intact_L/2}}$ $-\frac{5.141.6^4}{384 -0.23762 _{max-intact_L/2}}$	$EI_{danificada_L/4} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada_L/2}}$ $-\frac{5.141.6^4}{384 -0.323649 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/4} / EI_{intacta_L/4}$ $-7351.7144 / -10013.3617 =$ $0,734190435$ $= 73,42\%$
1.5		L/8	$EI_{intact_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-intact_L/2}}$ $-\frac{5.141.6^4}{384 -0.23762 _{max-intact_L/2}}$	$EI_{danificada_L/8} = -\frac{5qL^4}{384 y _{max-danificada_L/2}}$ $-\frac{5.141.6^4}{384 -0.316818 _{max-danificada_L/2}}$	$D_{\% \text{ danif}} = \left(\frac{EI_{danificada}}{EI_{intacta}} \right) 100\%$ $EI_{danificada_L/8} / EI_{intacta_L/8}$ $-7510.2267 / -10013.3617 =$ $0,750020517$ $= 75,00\%$

Com os resultados obtidos verifica-se que na viga IPN 500x104 as reduções de rigidez ($EI_{danificada}$) da estrutura danificada estão na ordem de 25% em relação à rigidez ($EI_{intacta}$) da estrutura intacta, nas proximidades dos apoios em L/4 e L/8, e com a utilização da equação somente na análise em L/2 já se atinge cerca de 40% também com essa mesma equação. Considerando os resultados aplicando os valores de deslocamentos no ponto de danos se alcança uma relação de redução de rigidez na ordem de cerca de 40% para L/4 e da ordem de 25% para L/8. Dada a magnitude dos danos nas quatro pontas das mesas com dimensões consideráveis, verifica-se que as reduções de rigidezes são coerentes tendo em vista os modos de comportamentos da viga utilizada nos experimentos dessa pesquisa.

Essa análise de rigidez por meio da Equação (5.8) de Dano ($D_{\% \text{ dan/int}}$) pode propiciar alcançar com os avanços dessas pesquisas a busca por exemplo de um catálogo de soluções em função de determinadas ocorrências para elementos e sistemas estruturais diversos, como as vigas metálicas biapoiadas aqui verificadas.

Em termos gerais a análise de deslocamentos máximos de uma viga sob determinado carregamento tem especial importância tendo em vista que as especificações de projeto de uma viga geralmente incluem um valor máximo admissível para seu deslocamento gerando aí a busca do atendimento às proposições de Rytter (1993) envolvendo o Nível 4 para previsão da vida residual da estrutura, sendo que com o deslocamento do elemento dentro desses limites normativos estabelecidos, balizando tomadas de decisões na gestão desses elementos em termos de intervenções imediatas ou não, sejam elas de pequena ou de grande monta.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foram realizadas diversas aplicações do Método de Evolução Diferencial, inicialmente, para possibilitar a detecção da posição e quantificação de danos, entrando nas análises de nível 3 de integridade estrutural proposta por Rytter (1993), em diferentes tipos de condições de contorno e elementos disponíveis nas bibliotecas dos *softwares* de análise estrutural ANSYS[®], SAP2000[®] e ABAQUS[®], em níveis de análises estáticas e dinâmicas.

Foram utilizadas as respostas estruturais de vigas, sob diferentes condições de carregamentos, por meio dos seus deslocamentos estáticos e dados modais dinâmicos de modos de vibração e de frequências naturais, para localização e quantificação de danos. Onde o dano é caracterizado por meio da alteração (diminuição) das propriedades de rigidez destes elementos. Estes constituem estudos oriundos dos Métodos de Problemas Inversos ou Métodos de Identificação de Sistemas.

Os problemas de otimização podem ser resultados do método de avaliação de danos. Isto é, um problema onde as restrições são de igualdade e resolvidas implicitamente e são representadas pelas equações de equilíbrio na análise de problemas estáticos, ou pelos problemas de autovalores nos casos dinâmicos. Suas características são automaticamente satisfeitas quando o problema analítico é resolvido. As variáveis de projeto d_i , foram definidas no intervalo $[0, 1]$, para se obter os resultados necessários nos problemas de minimização da função objetivo resolvido pelas técnicas de otimização. As mesmas foram, continuamente, alteradas de modo a fazer com que a resposta obtida pelo modelo intacto se aproximasse da resposta danificada. Uma série de vigas foram testadas e uma treliça apresentando bons resultados.

O aumento do número de elementos da estrutura resulta em um aumento na dimensão do espaço de projeto, isto gera funções objetivo não convexas cada vez maiores, provavelmente, com muitos mínimos locais. Para a solução do problema de avaliação de danos em estruturas o uso de métodos estocásticos de otimização global parece mais adequado.

Uma consideração feita por Morales (2012), e que é coerente de ser citada aqui também, quando o autor comenta que um elemento danificado não é possível ter uma parte do comprimento com dano e a parte restante sem dano e que por conseguinte, pode-se obter uma melhor descrição da integridade da estrutura na medida em que esta é discretizada em mais elementos finitos e que isto se deve ao fato do dano poder apresentar dimensões

diferentes daquelas dos elementos. No entanto, sob um ponto de vista computacional, a complexidade do problema se incrementa em forma diretamente proporcional ao número de variáveis envolvidas. Além disso, danos leves são difíceis de serem encontrados devido às pequenas mudanças produzidas nos parâmetros, sejam eles estáticos ou dinâmicos, as quais poderiam não ser suficientes para que o verdadeiro cenário de dano possa ser encontrado.

Com relação às análises numéricas realizadas, para os elementos FRAME (SAP2000[®]), PLANE43, BEAM3, SHELL63, todos do ANSYS[®], e o elemento sólido C3D8R do ABAQUS[®], e a teoria de viga de Euler-Bernoulli, foram encontradas algumas diferenças de resultados, principalmente à medida que as cargas eram variadas. Tais divergências estão associadas aos métodos de cálculos de origem das mesmas, bem como aos graus de liberdade associados à cada método. Vale ressaltar também que próximo aos apoios das vigas, muitas vezes, foram encontrados resíduos de identificação de danos, principalmente por causa das descontinuidades geradas, onde melhores refinamentos de malhas poderiam auxiliar na busca por resultados mais consistentes.

O Método de Evolução Diferencial (ED) desenvolvido em linguagem MATLAB[®] mostrou ter bom potencial para solução de problemas de identificação de danos usando Problemas Inversos, conseguindo convergir praticamente em todos os casos para uma solução correta, principalmente com um número maior de iterações, minimizando os resíduos gerados em outros elementos não danificados. Apesar disso, identifica-se que a unicidade da solução e a questão da não convexidade do problema, aumenta à medida que as variáveis aumentam, devendo-se aí, avaliar, por exemplo, a formulação da função objetivo utilizada.

Ficou evidente que com a utilização dos parâmetros do AG com as análises da ED, em termos de números de iterações e com os valores de danos dos elementos na maioria dos casos não ficaram em conformidade ao problema proposto quando observada a grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, encontrando-se em sua maioria dos casos grandes dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global. Verificou-se que a ferramenta disponibilizada por Hashem (2020) necessita ainda de algumas novas implementações para que seja possível identificar danos em posições distintas e com grandezas diferentes, além de outras utilizações como por exemplo possibilitar valores de entrada que não tenham somente finais 5 e 0, bem como valores muito pequenos de tamanhos de populações. Não foi possível a aplicação da análise com o AG nos estudos experimentais realizados na pesquisa sendo verificadas limitações nas variáveis de entrada utilizadas, sabendo das potencialidades do método AG que deu origem à ED.

Outro ponto importante, é a análise do valor da distribuição das diferenças vetoriais, onde conforme essas diferenças vetoriais se aproximam de zero, pode-se afirmar que os indivíduos desta ferramenta estão convergindo para um ponto em comum, e que apesar do problema dos inúmeros mínimos locais, os processos utilizados em cada caso, chegaram a bons números de iterações e atenderam à identificação de danos proposta.

Os métodos estocásticos necessitam de um número elevado de avaliações da função objetivo. Com relação à busca por diminuir o tempo computacional, utilizou-se um padrão de dez vezes o número de elementos de cada viga e da treliça para configurar o número de gerações (iteraões) do método. Atualmente, com as potencialidades dos computadores, cada vez mais robustos, rápidos e com maior capacidade de processamento de dados, é possível o uso de ferramentas estocásticas de otimização global na avaliação de danos em estruturas de grande porte, tendo vista que isso permite serem aumentadas as iterações da função objetivo.

O número pequeno de iterações geralmente dificulta na identificação exata de uma solução ótima, sendo necessário para sanar tais problemas, por exemplo, um número maior de iterações, onde estas soluções apresentam uma melhora com o valor final da função objetivo em relação às respostas obtidas com um número menor de iterações, no sentido da precisão dos mesmos. Apesar disso muitas respostas podem não ser conclusivas porque pode continuar havendo simetria em relação ao dano simulado para os elementos a serem analisados. O número de iterações é determinante para que as respostas possam apresentar boa convergência para o dano simulado. Sendo possível sempre identificar qual elemento está danificado, pois todas as soluções convergem para o mesmo elemento. Fornecendo assim confiabilidade aos valores de danos simulados para diferentes percentuais atribuídos aos elementos por meio da sua diminuição de rigidez, bem como também os demais elementos com dano zero.

Por meio dos ensaios experimentais verificou-se as importantes analogias que podem ser traçadas em análises de integridade estrutural na parte de identificações de danos com clarezas para a utilização da técnica da massa móvel com massas que não ultrapassem cerca de 5% do peso total dos elementos verificados, dado o bom funcionamento da técnica para essas condições, com sistemas cada vez mais simplificados dessas massas (menores alturas, larguras e espessuras) para não acabar gerando outros comportamentos e esforços diferenciados. E principalmente, as verificações dos apoios são de suma importância para os resultados finais a serem obtidos, valendo cuidado no que tange a essa parte. Uma lembrança válida é que principalmente em meios de análises de campo muitos ruídos vão estar presentes

sendo necessário cada vez mais técnicas mais robustas de identificação de danos para propiciar essas diferenciações sendo que o uso de acelerômetros quando adequadamente posicionados ao longo da estrutura, principalmente para obtenção de parâmetros modais de acelerações, modos de vibração e essencialmente de frequências naturais, como verificado nessa pesquisa, são alternativas relevantes no auxílio a essas análises. Os modelos numéricos bem calibrados e adequados constituíram também importantes alternativas nas análises de otimização para verificação de integridade estrutural, servindo de alternativas em análises experimentais em situações muito adversas, principalmente em campo onde realmente há influências diversas na obtenção de resultados mais eficazes.

Por meio dessa pesquisa identificou-se que quando se busca uma identificação de dano e sua quantificação, deve se estar ciente que dados de referências devem estar claros, no sentido de estar sendo correlacionado, volume com volume, área com área, números de elementos com números de elementos, enfim, comparações envolvendo uma parte da estrutura ou mesmo relacionada com o todo, mas sempre visando uma correlação com por exemplo, volumes de materiais a serem empregados por meio da verificação de áreas danificadas, sendo que as verificações de perdas de rigidez constituem uma boa alternativa para análise da estrutura, dentre outras condições.

Cada vez mais, pesquisas que levam em consideração aspectos mais complexos para se realizar análises de integridade estrutural acabam dificultando o alcance de resultados mais objetivos e tangíveis em intervenções que possam ser feitas nesses elementos componentes de obras como um todo. Essa complexidade muitas vezes pode ser observada quando se utilizam derivadas e integrais em questões que poderiam demandar tempos menores, daí a proposição de uma equação de danos simplificada abordada no item 5.3 do trabalho como alternativa para aplicação mais direta do que a aplicada em processos de otimização, no caso a função do Método dos Mínimos Quadrados.

Em linhas gerais buscou-se modelos experimentais e numéricos com o máximo de similaridade com padrões construtivos vigentes para contribuições práticas futuras nos diversos sistemas construídos e formados por elementos estruturais diversos.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as possíveis propostas para trabalhos futuros, têm-se:

- A utilização de outras novas ferramentas otimizadoras tais como: o Método do Recozimento Simulado - RS (*Simulated Annealing*, SA), o Método do Enxame de Partículas

- EP (*Particle Swarm Optimization*, PSO), o Método da Colônia de Formigas - CF (*Ant Colony Optimization*, ACO). Todas elas podem ser aplicadas a diferentes tipos de elementos estruturais;

- A utilização da presente técnica a outros tipos de estrutura, tais como pórticos, placas, ou até mesmo materiais compósitos, dependendo do tipo de aplicação a ser dado aos Métodos de Problemas Inversos;
- O uso de elementos diferenciados, também podem ser considerados, como por exemplo, o BEAM188 ou mesmo o BEAM189;
- A investigação de novas técnicas matemáticas e computacionais que permitam solucionar problemas desse tipo. Por exemplo, por meio do uso de técnicas de regularização que facilitem o trabalho dos otimizadores em casos de espaços de solução de dimensões elevadas e em presença de ruído. O uso de técnicas que possam reduzir a dimensão do espaço de busca de modo a se localizar as regiões de possível dano, antes de aplicar a metodologia apresentada no presente trabalho;
- A aplicação do Método de Evolução Diferencial para detecção de fratura em materiais viscoelásticos, também poderia ser considerada;
- As análises dinâmicas principalmente com modos de vibração desse elemento tipo viga do ensaio experimental, ou mesmo de outros elementos estruturais, poderiam trazer um leque maior de parâmetros de identificação de danos;
- Na parte experimental, implementações de melhorias nos sistemas de apoios da viga metálica podem propiciar os resultados mais adequados sempre buscando aprimoramentos nas minimizações dos ruídos presentes ou mesmo visando aperfeiçoamentos de aplicações em campo com obras em uso;
- Catálogos de soluções de reabilitações das estruturas metálicas biapoiadas ou mesmo para demais elementos ou sistemas estruturais com tipos de materiais diversos;
- Buscas por equações simplificadas para quantificação de danos com parâmetros dinâmicos;
- Por fim a realização de experimentos com diferentes metodologias tanto para localização como para quantificação de danos que comprovem a aplicabilidade da metodologia desenvolvida traria novas perspectivas à presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abambres, M., and Quach, W. M. (2016). “Residual stresses in steel members: A review of available analytical expressions.” ISSN: 1757-9864. *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 7 No. 1, pp. 70-94. <https://doi.org/10.1108/IJSI-12-2014-0070>.
- ABAQUS (2014), User’s Manual, Version 6.14-1. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp. In: ABAQUS.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 15.980 (2020). “Perfis laminados de aço para uso estrutural — Dimensões e tolerâncias”, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 (2008). “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 (2014). “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”, Rio de Janeiro, Brasil.
- Allemang, R. J. (2003), The modal assurance criterion – Twenty years of use and abuse. *Journal of Sound and Vibration*. University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio. p.14-21, ago. 2003.
- Alves, Vinicius Nicchio (2012), Estudo de novas estratégias para identificação de danos estruturais a partir de dados vibracionais / Vinicius Nicchio Alves. vi, 188f.: il. color.; grafs.; tabs. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Alves, Vinicius Nicchio (2016), Técnicas de anormalidade aplicadas à detecção de danos estruturais / Vinicius Nicchio Alves. 151f.: il.: color; grafs; tabs. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Aarst, E. Korst, J, E. (1989), *Simulated Annealing and Boltzmann Machines – a stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing*. Essex: Jonh Wiley & Sons.
- Aguir, H., & Bel Hadj Salah, H. (2013), Damage Material Parameters Identification Using the ANN-GA Method and the Bulge Test. *Key Engineering Materials*, 554-557, 928–935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.554-557.928.

- Andrade-Campos, A., de-Carvalho, R., & Valente, R. A. F. (2012), Novel criteria for determination of material model parameters. *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(1), 294–305. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2011.11.010.
- Ansys (2007), *Structural analysis guide – release 11.0*. In: ANSYS.
- Aquino, W., Bunting, G., Miller, S. T., & Walsh, T. F. (2018), A gradient-based optimization approach for the detection of partially connected surfaces using vibration tests. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. DOI:10.1016/j.cma.2018.11.002.
- Arafa, M. H., & Nassef, A. O. (2010), Damage identification through spectral element model updating. *ASME International Design Engineering Technical Conferences/Computers and Information in Engineering Conference*, AMER SOC Mechanical Engineers, Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990 USA.
- Araújo, Aldecir Alves de (2007), *Ajuste de modelos numéricos de elementos finitos usando métodos de otimização / Aldecir Alves de Araújo*. --Campinas, SP: [s.n.].
- Bak, P. e Sneppen, K. (1993), Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. *Physical Review Letters*, pp. 4083-86.
- Bakir, P. G., Reynders, E., & Roeck, G. D. (2008), An improved finite element model updating method by the global optimization technique “Coupled Local Minimizers.” *Computers & Structures*, 86(11-12), 1339–1352. DOI:10.1016/j.compstruc.2007.08.009.
- Bathe, K.J. (1996), *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 1996.
- Beedle, L. S., and Tall, L. (1960). “Basic column strength.” *J. Struct. Div.*, 86(7), 139–173.
- Beer, Ferdinand P.; Johnston, E. Russel; Wolf, Jr. John T. de; Mazurek, David F. (2011). *Mecânica dos materiais*; ISBN 978-85-8055-008-5 – Tradução técnica de José Benaque Rubert, Walter Libardi. 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH.
- Begambre, O., & Laier, J. E. (2009), A hybrid Particle Swarm Optimization – Simplex algorithm (PSOS) for structural damage identification. *Advances in Engineering Software*, 40(9), 883–891. DOI:10.1016/j.advengsoft.2009.01.004.
- Bendat, J.S.; Piersol, A. G. (2010), *Random data: Analysis and measurement procedures*. 4.ed. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc..
- Bezerra, L. M., & Saigal, S. (1993). A boundary element formulation for the inverse elastostatics problem (iesp) of flaw detection. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 36(13), 2189–2202. doi:10.1002/nme.1620361304.
- Blevins, D. R. (1979), *Formulas For Natural Frequency and Mode Shape*. ISBN-10: 1575241846 e ISBN-13 : 978-1575241845. Editora: Krieger Publishing Company. EUA, New York.

- Blum, C.; Roli, A. (2003), Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, v. 35, p. 268-308.
- Boettcher, S. e Percus, A. (2001), Optimization with Extremal Dynamics. *Physical Review Letters*, pp.5211- 14.
- Boyce, William E.; DiPrima, Richard C. (2006), *Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno*. ISBN 978-85-216-2832-3. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC.
- Brasiliano A. (2001), *Caracterização de Dano em Estruturas Aporticadas*. 2001. 109p., Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- Brito, M. A. N. B. (2008), *Análise de Assinaturas Elastostáticas e Elastodinâmicas na Solução do Problema Inverso de Identificação de Danos em Treliças Via Método dos Elementos Finitos*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- Bueno, Luiz Otávio Silva. *Cálculo e Dimensionamento de Lajes e Comparação com as Ferramentas Disponíveis*. 2008. 52 p. – Trabalho de conclusão de curso – Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2008.
- Caldeira M. M. C. (2009). *Procedimentos Numéricos para a Solução do Problema Inverso de Localização de Danos em Estruturas Aporticadas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- Cawley, P.; Adams, R. D. (1979), The Locations of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 14, n. 2, p. 49-57.
- CEB (2010), *CEB - FIP Model Code for Concrete Structures (MC 2010)*.
- Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of optimization theory and applications*, 45(1), 41-51.
- Choi, Y. II. (2002). “Damage Identification Techniques for Bridges Using Static Response”. Tese de Doutorado, Hanyang University, Seoul, 153p.
- Chu, A. S. (2010), Shock and vibration transducers. In: Piersol, A.G.; Paez, T.L. Harris’ shock and vibration handbook. 6.ed. Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies, Inc., Cap.10, p.10.1-10.38.

- Cruz, L.R.; Kazmerski, L.L.; Moutinho, H.R.; Hasoon, F.; Dhere, R.G.; Avillez, R.R. (1999), Thin Solid Films, International Journal on the Science and Technology of Condensed Matter Films. 350, 44-48.
- Cury, A. (2010), Techniques D'anormalité Appliquées à la surveillance de Santé Structurale, Tese de doutorado, Université Paris-Est, França.
- Cury, A.; Borges, C. e Barbosa, F. (2011). A two-step technique for damage assessment using numerical and experimental vibration data, Structural Health Monitoring, DOI: 10.1177/1475921710379513. v.10, p. 417-428.
- Dai, Y. H., Han, J. Y., Liu, G. H., Sun, D. F., Yin, H. X., & Yuan, Y. X. (1999). Convergence properties of nonlinear conjugate gradient methods. SIAM Journal on Optimization, 10, 348–358.
- DIN EN 10024 (1995) “Hot-rolled taper flange I sections - Tolerances on shape and dimensions” German version.
- Dréo, J.; Pétrowski, A.; Siarry, P.; Taillard, E. (2006), Metaheuristics for hard optimization. Springer: Heidelberg, 2006.
- Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. & Shevitz, D.W. (1996), Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review, Los Alamos National Laboratory report no. LA-13070-MS.
- Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. (1996), The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, v. 26, n. 1, p. 1-13.
- Dorigo, M.; Stützle, T. (2004), Ant colony optimization. Boston: MIT Press.
- Dou, S., Li, J., & Kang, F. (2017), Parameter identification of concrete dams using swarm intelligence algorithm. Engineering Computations, 34(7), 2358–2378. DOI:10.1108/ec-03-2017-0110.
- Dowland, K. A. Simulated Annealing, In Reeves, C.R. (1995), (Ed.) Modern heuristic techniques for combinatorial problems, London: McGraw-Hill.
- ECCS (European Convention for Constructional Steelwork). (1984). “Ultimate limit states calculations of sway frames with rigid joints.” Technical Working Group 8.2, Systems, Publications No. 33, European Convention For Constructional Steelwork, Brussels, Belgium, 20.

- E. F. D'Azevedo, V. L. Eijkhout, C. H. Romine (1993). *Conjugate Gradient Algorithms with Reduced Synchronization Overhead on Distributed Memory Multiprocessors*. Lapack Working, Note 56.
- EN 10163-2 (2004). “Delivery requirements for surface condition of hot-rolled steel plates, wide flats and sections”, German version.
- Eroglu, U., & Tufekci, E. (2016), Exact solution based finite element formulation of cracked beams for crack detection. *International Journal of Solids and Structures*, 96, 240–253. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2016.06.005.
- Farrar, C.R, Worden, K. (2013), *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Chichester, Wiley.
- Fish, J.; Belytschko T. (2009), *Um Primeiro Curso em Elementos Finitos*, Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos Editora.
- Feo, T. A.; Resende, M.G.C. (1989), A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, vol. 8, p.67–71.
- Ferreira, A. J. M. (2008). *MATLAB Codes for Finite Element Analysis: Solids and Structures*. Springer, Berlin.
- Fujita, Y. (1955). “The magnitude and distribution of residual stress.” Rep. No. 220A.20, Lehigh Univ., Bethlehem, PA.
- Galambos, T. V., and Ketter, R. L. (1959). “Columns under combined bending and thrust.” *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, 85(2), 1–30.
- Galski, R. L. (2006), *Desenvolvimento de versões aprimoradas, híbridas, paralela e multiobjetivo do método da otimização extrema generalizada e sua aplicação no projeto de sistemas espaciais / Roberto Luiz Galski*. São José dos Campos: INPE, 2006. 279 p.; (INPE-14795-TDI/1238).
- Gao, X.-W., & He, M.-C. (2005). A new inverse analysis approach for multi-region heat conduction BEM using complex-variable-differentiation method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29(8), 788–795. DOI:10.1016/j.enganabound.2005.03.001.
- Ghrib, F., Li, L., & Wilbur, P. (2012), Damage Identification of Euler–Bernoulli Beams Using Static Responses. *Journal of Engineering Mechanics*, 138(5), 405–415. DOI:10.1061/(asce)em.1943-7889.0000345.
- Gigerenzer, G.W. (2011), Heuristic Decision Making. *Annual Review of Psychology*. v. 62 (1), p. 451-482.
- Glover, F. (1986), Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers & Operations Research*, v. 5, p. 553-549.

- Glover, G, Laguna, M. (1995), Simulated Annealing. In REEVES, C.R. (Ed.) Modern heuristic techniques for combinatorial problems, London: McGraw-Hill, 1995.
- Glover, F., Laguna, M. (1997), Tabu Search, Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- Goldbarg, M. C.; Goldbarg, E. G.; Luna, H. P. L. (2016), Otimização combinatória e meta-heurísticas: algoritmos e aplicações, Rio de Janeiro: Campus, 2016.
- Goldberg, D. (1989), Genetic Algorithms and Engineering Design. New York, John Wiley & Sons.
- Golliat, P.V.Z.; Angelo, J.S. Barbosa, H.J.C. (2012), Colônia de Formigas. In: Gaspar-Cunha, A.; Takahashi, R.; Antunes, C.H. Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística. Imprensa da Universidade de Coimbra: Coimbra.
- Gomes, G. F., Mendéz, Y. A. D., da Cunha, S. S., & Ancelotti, A. C. (2017), A numerical–experimental study for structural damage detection in CFRP plates using remote vibration measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(1), 33–47. DOI:10.1007/s13349-017-0254-3.
- Gomes, G. F., de Almeida, F. A., Junqueira, D. M., da Cunha, S. S., & Ancelotti, A. C. (2019), Optimized damage identification in CFRP plates by reduced mode shapes and GA-ANN methods. *Engineering Structures*, 181, 111–123. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.081.
- Hansen, P. (1986), The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming, Proc. Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization, Capri, Italy, 1986.
- Hart, J.P.; Shogan, A.W. (1987), Semi-greedy heuristics: an empirical study. *Operations Research Letters*, vol. 6, p.107–114, 1987.
- Haykin, S. (1998), *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. Prentice Hall, NJ, USA, 842p. ISBN: 0132733501.
- Haykin, S. (2001), *Redes neurais: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.
- Hashem, R. (2020), 2 Dimensional Optimization using a Continuous Genetic Algorithm. Hashem Rizk (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49128-2-dimensional-optimization-using-a-continuous-genetic-algorithm>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved April 21.
- Helene, P. R. L.; Pereira, F. (2007), *Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto*. São Paulo: Cargraphics, 598p.

- Holland, J. H. (1975), *Adaptation in natural artificial systems*. Michigan: University of Michigan Press.
- Honório, M. C. F. (1997), *Problemas Inversos em Campo Potencial com o Método dos Elementos de Contorno*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 236p.
- Hu, X., & Shenton, H. W. (2007), Dead Load Based Damage Identification Method for Long-term Structural Health Monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(9), 923–938. DOI:10.1177/1045389x06070599.
- Huber, A. W. (1956). “The influence of residual stress on the instability of columns.” Ph.D. thesis, Lehigh Univ., Bethlehem, PA.
- Humar, J.; Bagchi, A.; Xu, H. (2006). Performance of Vibration-based Techniques for the Identification of Structural Damage. *Structural Health Monitoring* 5(3), p. 0215-0227.
- Ihesiulor, O. K., Shankar, K., Zhang, Z., & Ray, T. (2014), Delamination detection with error and noise polluted natural frequencies using computational intelligence concepts. *Composites Part B: Engineering*, 56, 906–925. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.09.032.
- Izmailov, Alexey e Solodov, Mikhail (2014). *Otimização – volume 1. Condições de otimalidade, elementos de análise convexa e de dualidade*. 3ª Edição. 274 p. ISBN 978-85-244-0389-7. Rio de Janeiro: IMPA.
- Izmailov, Alexey e Solodov, Mikhail (2012), *Otimização – volume 2. Métodos Computacionais*. 2ª Edição. 458 p. ISBN 978-85-244-0268-5. Rio de Janeiro: IMPA.
- J. Nocedal, S. J. Wright (2006). *Numerical Optimization*, Springer.
- J. Paulo Davim (2012), *Dynamic Methods and Process Advancements in Mechanical, Manufacturing, and Materials Engineering*. University of Aveiro, Portugal.
- Juliani, T. M. (2014), *Detecção de danos em pontes em escala reduzida pela identificação modal estocástica / Tiago Marrara Juliani; Dissertação (Mestrado)*. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. C. (1995a), Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. C. (1995b), A new optimizer using particle swarm theory. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Micromachine and Human Science*, Nagoya.

- Ketter, R. L., Kaminsky, F. L., and Beedle, L. S. (1955). "Plastic deformation of wide-flange beam columns." *Proc., American Society of Civil Engineers, ASCE, Reston, VA, Vol. 79(11)*, 1019.
- Ketter, R. L. (1958). "The influence of residual stress on the strength of high strength steel." Fritz Laboratory Rep. Paper 1725, Lehigh Univ., Bethlehem, PA.
- Kim, T. J., Ryu, Y. S., Cho, H. M., Stubbs, N. (2003), Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs modeshape - based method. *Engineering Structures 25*, 57–67.
- Kim, K.-O., Cho, J.-Y., & Choi, Y.-J. (2004). Direct Approach in Inverse Problems for Dynamic Systems. *AIAA Journal*, 42(8), 1698–1704. DOI: 10.2514/1.941.
- Kim, K.-O. (2010), Self-equilibration of inverse system in damage detection for dynamic structures. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 18(8), 1023–1042. DOI:10.1080/17415977.2010.500382.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P. (1983), Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 (4598), 671-680.
- Kleinermann, J. P. (2000). Identification Parametrique et Optimization des Procèdes de Mise a Forme par Problemes Inverses. Unpublished doctoral dissertation. University of Liege. Liege, Belgium.
- Kubo S. (1988). "Inverse problems related to the mechanics and fracture of solids and structures. *JSME Int. Journal*. 31: 157-166.
- Kwon, Y. W. e Bang, H.; *The Finite Element Method Using MATLAB*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, Fl., 2000.
- Le, N. T. (2019), Structural Damage Identification Using Static and Modal Flexibility-based Deflections. Doctoral thesis. School of Civil Engineering and Build Environment. Science and Engineering Faculty. Queensland University of Technology. Queensland, Australia.
- Lee, S.-Y., Rus, G., & Park, T. (2007), Detection of stiffness degradation in laminated composite plates by filtered noisy impact testing. *Computational Mechanics*, 41(1), 1–15. DOI: 10.1007/s00466-007-0164-z.
- Lee, S.-H., & Song, J. (2017), System Identification of Spatial Distribution of Structural Parameters Using Modified Transitional Markov Chain Monte Carlo Method. *Journal of Engineering Mechanics*, 143(9), 04017099. DOI:10.1061/(asce)em.1943-7889.0001316.
- Leme, S. P. L., Aliabadi, M. H., Bezerra, L M, Partridge, P. W. (2007), An investigation into active strain transfer analysis in a piezoceramic sensor system for structural health

- monitoring using the dual boundary element method. *Structural durability and health monitoring*, Vol. 3, p. 121-132.
- Lin, X. H., Kang, Y. L., Qin, Q. H., & Fu, D. H. (2005). Identification of interfacial parameters in a particle reinforced metal matrix composite Al6061–10%Al₂O₃ by hybrid method and genetic algorithm. *Computational Materials Science*, 32(1), 47–56. DOI:10.1016/j.commatsci.2004.04.006.
- Liu, P.-L. (1995). Identification and Damage Detection of Trusses Using Modal Data. *Journal of Structural Engineering*, 121(4), 599–608. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:4(599).
- Liu, P.-L. (1996). Parametric Identification of Plane Frames Using Static Strains. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 452(1944), 29–45. DOI:10.1098/rspa.1996.0002.
- Liu, P.-L., & Lin, H.-T. (1996). Direct identification of non-uniform beams using static strains. *International Journal of Solids and Structures*, 33(19), 2775–2787. DOI:10.1016/0020-7683(95)00180-8.
- Liu, P.-L., & Chian, C.-C. (1997). Parametric Identification of Truss Structures Using Static Strains. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 927–933. DOI:10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:7(927).
- Liu, H., He, X., & Jiao, Y. (2018), Damage Identification Algorithm of Hinged Joints for Simply Supported Slab Bridges Based on Modified Hinge Plate Method and Artificial Bee Colony Algorithms. *Algorithms*, 11(12), 198. DOI:10.3390/a11120198.
- Lopes, P. S. (2010), Modelagem de problema inverso de detecção de danos por técnicas de identificação de parâmetros e otimização. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- Mahnken, R. (2000), An inverse finite-element algorithm for parameter identification of thermoelastic damage models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48(7), 1015–1036. DOI: 10.1002/(sici)1097-0207(20000710)48:7<1015::aid-nme912>3.0.co;2-4.
- Majumdar, A., Maiti, D. K., & Maity, D. (2012), Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 218(19), 9759–9772. DOI:10.1016/j.amc.2012.03.031.
- Masoumi, M., Jamshidi, E., & Bamdad, M. (2015), Application of generalized flexibility matrix in damage identification using Imperialist Competitive Algorithm. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4), 994–1001. DOI:10.1007/s12205-015-0224-4.

- Masoumi, M. & Jamshidi, E. (2015), Damage diagnosis in steel structures with different noise levels via optimization algorithms. *International Journal of Steel Structures*, 15(3), 557–565. DOI:10.1007/s13296-015-9004-8.
- MATLAB (2014)[©],1994-2020. R2014a. The MathWorks, Inc. In: MATLAB.
- Mcculloch, W. S., & Pitts, W. (1943), A Logical Calculus of The Ideas Immanent In Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115 - 133.
- Morales, J. D. V. (2009), Detecção de Dano em Estruturas Utilizando Algoritmos Genéticos e Parâmetros Dinâmicos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 167 p..
- Morales, J. D. V. (2012), Detecção de Danos em Estruturas Via Inteligência Computacional e Análise Dinâmica. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 191 p..
- Oliveira Filho, M. V. M., Ipiña, J. E. P., & Bavastri, C. A. (2018). Analysis of sensor placement in beams for crack identification. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(11). DOI:10.1590/1679-78254239.
- Palechor, E. U. L. (2013). Identificação de Danos em Vigas Metálicas Utilizando Wavelets e Dados Numéricos e Experimentais. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-018A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 299p.
- Palechor, E. U. L. (2018). Método de Identificação de danos em Estruturas, Baseado na Variação da Frequência Natural Causada pela Aplicação de uma Massa Móvel Adicional. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD-001A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 456p.
- Palma, R., Rus, G., & Gallego, R. (2009), Probabilistic inverse problem and system uncertainties for damage detection in piezoelectrics. *Mechanics of Materials*, 41(9), 1000–1016. DOI:10.1016/j.mechmat.2009.05.001.
- Pandey, A. K.; Biswas, M.; Samman, M. M. (1991), Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*. v.145, p.321-332, mar. 1991.
- Peña, P. A. N. (2013). Atualização de modelos numéricos em elementos finitos para a análise de arquibancadas temporárias. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-004A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87p.

- Pereira, Ronivon Soares (2014), “Ligações em estruturas de aço utilizando emendas com parafusos de alta resistência solicitadas na flexão simples”. Universidade Federal de Goiás, CMEC, Brasil. Mestrado.
- Pfeil, Walter (2009). Estruturas de aço: dimensionamento prático / Walter Pfeil, Michèle Pfeil. – 8. Ed. – Rio de Janeiro: LTC.
- Polya, G. (1957). How to solve it – A new aspect of mathematical method. Princeton Science Library Edition, 2th edition, ISBN-10: 69116407X; ISBN-13: 978-0-691-11966-3. 288 p., United States of America.
- Ponthot, J.-P., & Kleinermann, J.-P. (2006). A cascade optimization methodology for automatic parameter identification and shape/process optimization in metal forming simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(41-43), 5472–5508. DOI:10.1016/j.cma.2005.11.012.
- Prais, M.; Ribeiro, C.C. (2000), Reactive GRASP: An application to a matrix decomposition problem in TDMA traffic assignment. *INFORMS Journal on Computing*, vol. 12, p. 164–176, 2000.
- Price, K. e Storn, R. (2019), Differential Evolution for Continuous Function Optimization, <<http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>>. Acesso em 20 mar. 2019.
- Price, K., Storn, R. e Lampinen, J. (2005), Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization, Natural Computing Series, Springer.
- Rainer Storn (2008), Advances in differential evolution, chapter Differential Evolution Research - Trends and Open Questions, pages 1–32. Springer Verlag, Berlin.
- Ramos, L. F. (2007). Damage identification on masonry structures based on vibration signatures, PhD dissertation, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- Reeves, C.R. (1995). (Ed.) Modern heuristic techniques for combinatorial problems, London: McGraw-Hill.
- Resende, M. G. C.; Ribeiro, C. C. (2003), Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. In: Glover, F.; Kochenberger, G. A. (Eds.) Handbook of metaheuristics, Kluwer Academic Publishers, p. 219–250.
- Rodrigues, J. (2004), Identificação modal estocástica: métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. 484p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- Ruotolo, R., & Surace, C. (1997). Damage Assessment of Multiple Cracked Beams: Numerical Results and Experimental Validation. *Journal of Sound and Vibration*, 206(4), 567–588. DOI:10.1006/jsvi.1997.1109.

- Rus, G.; Gallego, R. (2002), Optimization algorithms for identification inverse problems with the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, DOI: 10.1016/s0955-7997(02)00008-5. v. 26, p. 315-327.
- Rus, G., Palma, R., & Pérez-Aparicio, J. L. (2009), Optimal measurement setup for damage detection in piezoelectric plates. *International Journal of Engineering Science*, 47(4), 554–572. DOI:10.1016/j.ijengsci.2008.09.006.
- Rytter, A. (1993), *Vibration based inspection of civil engineering structures*, Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Salgado, R., Cruz, P. J. S., Ramos, L.F., Lourenço, P.B. (2006). Comparison between damage detection methods applied to beam structures, In Proc., IABMAS'06 Porto, Portugal.
- Santos, G. F. (2009). Identificação de danos estruturais utilizando técnicas de otimização. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Santos, I. C. (2009). Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 010A/ 09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136 p.
- S. Das and P. N. Suganthan (2011), Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(1):4–31.
- Silva, R. S. Y. C. (2011), Determinação de Patologias Estruturais Usando Modelagem Numérica e Transformadas de Wavelet. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-001A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.
- Silva, R. S. Y. R. C. (2015), Monitoramento e Identificação Numérico e Experimental de Danos em Vigas e Pontes de Aço e Concreto Utilizando Transformadas de Wavelet. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD-001A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 237p.
- Silva, P. S. R. da (2007), Estruturas Termoelásticas sob Otimização Topológica e H-adaptatividade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

- Soni, G., e Kodali, R. (2011), A critical analysis of supply chain management content in empirical research. *Business Process Management Journal*, 17(2), 238–266. DOI:10.1108/14637151111122338.
- Soriano, H. L. (2009), *Elementos Finitos – Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das estruturas*, Rio de Janeiro; Editora Ciência Moderna.
- De Sousa, F. L. (2002), *Otimização Extrema Generalizada: Um Novo Algoritmo Estocástico para o Projeto Ótimo*. Tese de Doutorado. São José dos Campos: INPE.
- Souza, G.; Goldberg, E.; Goldberg, M.; Canuto, A. (2012), A multiagent approach for metaheuristics hybridization applied to the traveling salesman problem. In: *Neural Networks (SBRN), 2012 Brazilian Symposium on*. Washington: IEEE Computer Society, 2012. P. 208-213. ISSN 1522-4899.
- Springmann, M., & Kuna, M. (2003), Identification of material parameters of the Rousselier model by non-linear optimization. *Computational Materials Science*, 26, 202–209. DOI:10.1016/s0927-0256(02)00400-7.
- Stavroulakis, G. E.; Antes, H. (1998), Flaw identification in elastomechanics: BEM simulation with local and genetic optimization. *Structural Optimization*, v. 16, p. 162-175.
- Storn, R.; Price, K. (1995), Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, v. 11, p-341-359.
- Storn, R.; Price, K. (2006), Lampinen, J. A.; *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer, p-31-32.
- Stubbs, N.; Kim, J.-T.; Farrar, C.R. (1995), Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm. In: *International Modal Analysis Conference (IMAC), 13., 1995, Nashville, Estados Unidos*. Proceeding. Nashville, Estados Unidos: Society for Experimental Mechanics, 1995. p. 1520-1529.
- Stutz, L. T., Tenenbaum, R. A., & Corrêa, R. A. P. (2015), The Differential Evolution method applied to continuum damage identification via flexibility matrix. *Journal of Sound and Vibration*, 345, 86–102. DOI:10.1016/j.jsv.2015.01.049.
- Stutz, L. T., Rangel, I. C. S. S., Rangel, L. S., Corrêa, R. A. P., & Knupp, D. C. (2018), Structural damage identification built on a response surface model and the flexibility matrix. *Journal of Sound and Vibration*, 434, 284–297. DOI:10.1016/j.jsv.2018.02.063.

- Suveges, J. M. C. (2014), Estudo Acerca de Detecção de Danos em Estruturas via Método de Otimização, Itajubá, 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- Talbi, E.G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Tang, K. T. (2006), *Mathematical Methods for Engineers and Scientists 3*. Tacoma, Washington: Springer.
- Test functions for optimization, 2020. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Test_functions_for_optimization> Acesso em: 21 abr. 2020).
- Tikhonov A. N., and V. Y. Arsenin. (1977), “Solutions of ill-posed problems”. New York: John Wiley.
- Transit New Zealand (NZTA) (2001), *Bridge Inspection and Maintenance Manual*.
- Tusar, T.; Filipic, B. (2007), Differential Evolution Versus Genetic Algorithms in Multiobjective Optimization. In: OBAYASHI, S., DEB, K., POLONI, C., HIROYASU, T., MURATA, T. (Eds.). *Evolutionary Multi-Criterion Optimization – EMO 2007*. Berlin: Springer, p. 257–271 (Lectures Notes in Computer Science, v. 4403).
- Volkmar, Z. (2002), “Applications of Wavelet Analysis in System Identification”. Doctoral Thesis, Bauhaus-Universität Weimar.
- Wahab, A. M. M.; De Roeck, G. (1999), Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario. *Journal of Sound and Vibration*. v.226, p.217-235, set. 1999.
- Yang, X.-S., G. Bekdas & Nigdeli, S. M. (2016), *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering*. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-26245-1.
- Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. (2000), *The Finite Element Method. Volume 2: Solid Mechanics*, 5th edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.

ANEXOS

ANEXO 1. APLICAÇÕES E RESULTADOS PRÉVIOS: SILVA (2011 E 2015), PALECHOR (2013 E 2018)

As análises estáticas e dinâmicas desenvolvidas por Silva (2011 e 2015) e Palechor (2013 e 2018) que nortearam as aplicações e resultados prévios das análises de otimização e de identificação de danos são apresentadas a seguir.

1.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A análise experimental (estática e dinâmica) desenvolvida por Silva (2011), Silva (2015), Palechor (2013) e Palechor (2018), além da análise experimental do autor no capítulo 6, e cujo os resultados foram usados nessa pesquisa, testando esses elementos estruturais, tendo suas características geométricas e do material analisadas numericamente ou mesmo ensaiadas.

Testou-se vigas em laboratórios, tanto análises estáticas como também dinâmicas. Já os danos induzidos foram realizados com dimensões diversas, ambos produzindo uma igual diminuição na inércia da seção transversal, sempre buscando condições que se assemelhassem à realidade em termos de modelos experimentais construtivos. A Figura A1.1 a seguir mostra alguma dessas condições.

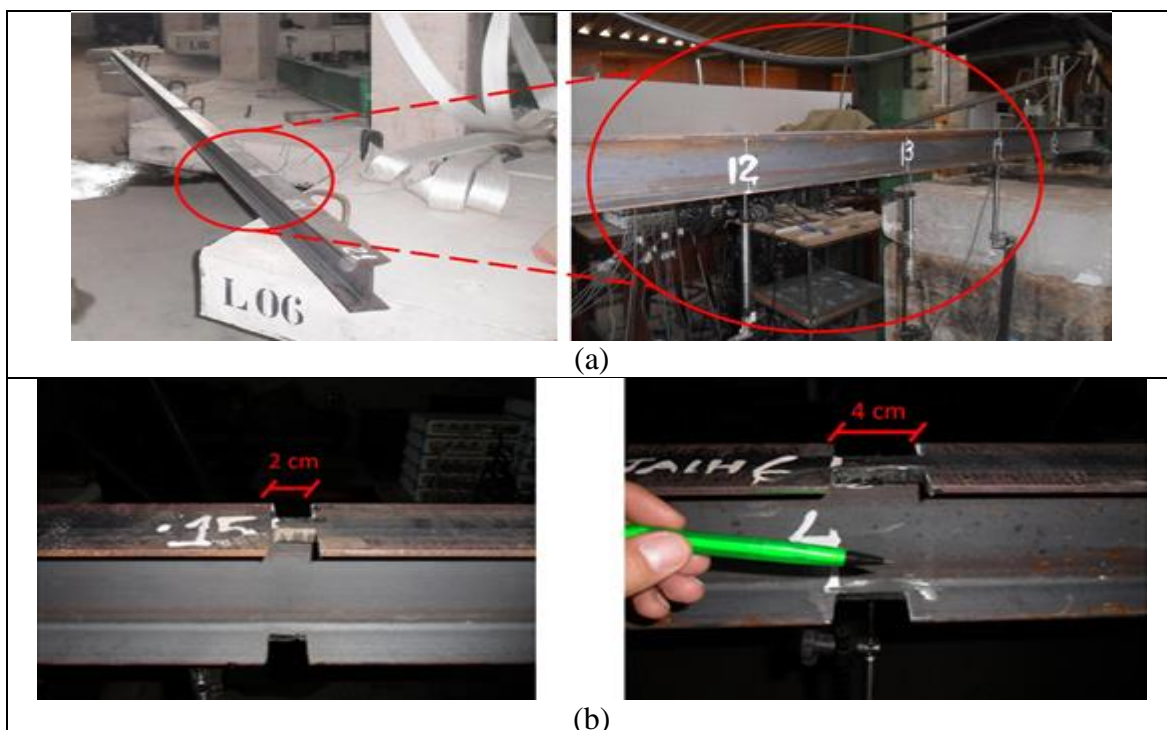


Figura A1.1 – Panorama das vigas: (a) demonstração da viga em 16 elementos e (b) danos induzidos de 2 cm e 4 cm (Palechor, 2013)

Lembrando que foi testado elementos intactos, para se ter de referência, onde os resultados da resposta do elemento intacto foram utilizados posteriormente na metodologia de uso da ferramenta do Método de Evolução Diferencial e outros otimizadores propostos nesta pesquisa, basicamente para se ter alguns parâmetros de ordem de grandeza dos métodos numéricos utilizados.

Com relação às simulações das condições de apoio das vigas, que foram biapoiadas, primeiramente para garantir o apoio de primeiro gênero (ver Figura A1.2 (a)), utilizando duas chapas lisas e um rolete que garante apenas o deslocamento na direção x e depois para o apoio de segundo gênero (ver Figura A1.2 (b)) utilizou-se duas placas dispostas de modo que o rolete não tivesse deslocamento na direção x, y e z (rotação livre).



Figura A1.2 – Simulações das condições de apoio das vigas (Palechor, 2013)

1.1.1 Análise Estática

Com relação à análise estática são aqueles métodos que permitem a identificação de danos pela medição de mudanças na resposta estrutural estática. As quantidades medidas são tipicamente deslocamentos ou deformações obtidos quando a estrutura está submetida a carregamentos aplicados e/ou em condições de uso (Silva, 2015).

Neste método de identificação de dano, ainda em Silva (2015) cita-se que a redução da rigidez está relacionada com a variação dos deslocamentos estáticos. As medidas dos deslocamentos, devido a cargas estáticas, podem ser obtidas com o peso próprio da estrutura, isto é, deslocamentos causados pelo carregamento permanente da estrutura.

1.1.1.1 Instrumentação (Análise Estática)

Com relação à instrumentação, os deslocamentos verticais (no plano de aplicação da carga) dos modelos testados foram obtidos em 15 pontos, correspondentes aos 15 nós centrais da viga, onde os deslocamentos foram medidos utilizando-se quinze transdutores de variação de deslocamento linear (LVDTs), posicionados abaixo da viga, em contato com a superfície inferior, em pontos localizados no eixo central longitudinal, perfazendo ângulos de 90 graus entre a face inferior da viga e cada medidor. Os pontos monitorados foram sempre os mesmos para permitir a comparação dos resultados dos diferentes modelos. Os pontos onde foram monitorados os deslocamentos verticais nos modelos e o posicionamento dos LVDTs são mostrados na Figura A1.3 seguinte com os detalhamentos da instrumentação utilizada.

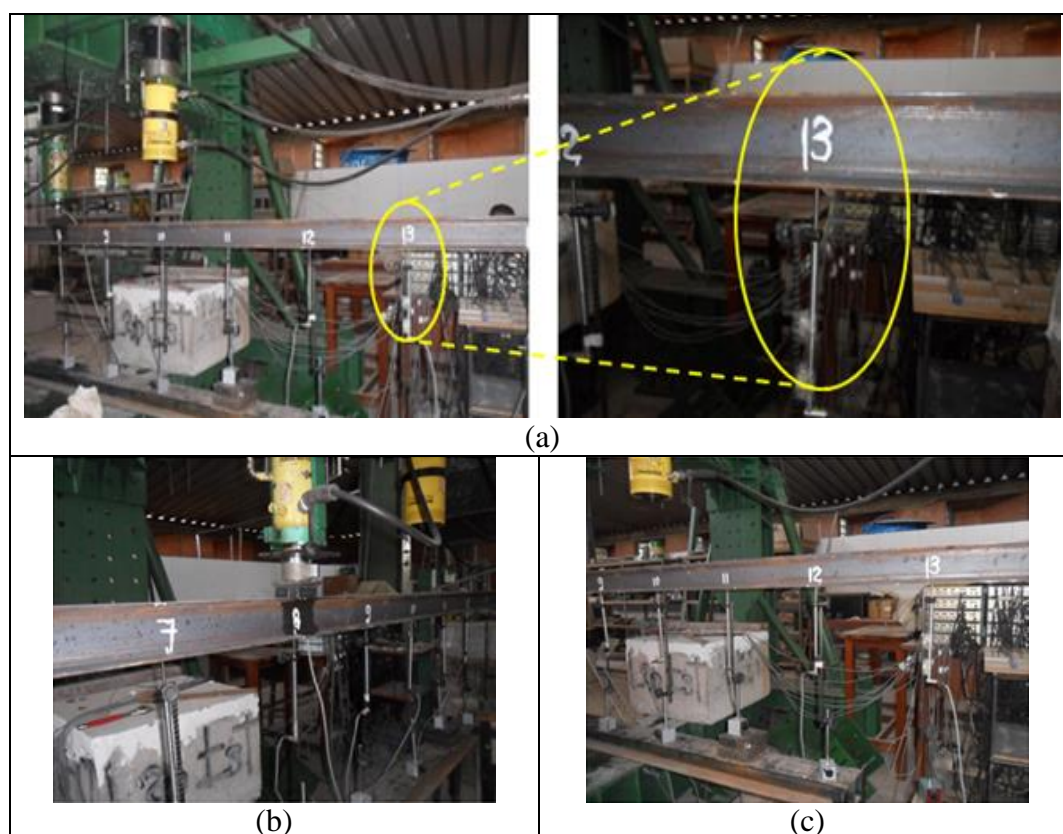


Figura A1.3 – Detalhe dos LVDTs (a), posicionamento dos LVDTs no lado esquerdo (b) e posicionamento dos LVDTs no lado direito (c). (Palechor, 2013)

O carregamento foi aplicado na direção vertical, no sentido de cima para baixo, em passos de carga, tendo em consideração o valor da carga máxima suportada pela viga intacta, para não sofrer flambagem local. Esses valores de carga escolhidos para a aplicação do

método de identificação de dano proposto foram menores do que o valor de carga máxima calculado.

No monitoramento de estruturas, com o objetivo de identificação de danos, o valor da carga máxima suportada pela viga danificada não é conhecido, onde no trabalho desenvolvido por Palechor (2013), adaptou-se o valor de carga máxima da viga intacta, para se ter uma ideia do carregamento suportado pela viga, e conseqüentemente auxiliar na escolha dos estágios de carga a serem analisados. O detalhamento da célula de carga pode ser observado na Figura A1.4 seguinte.

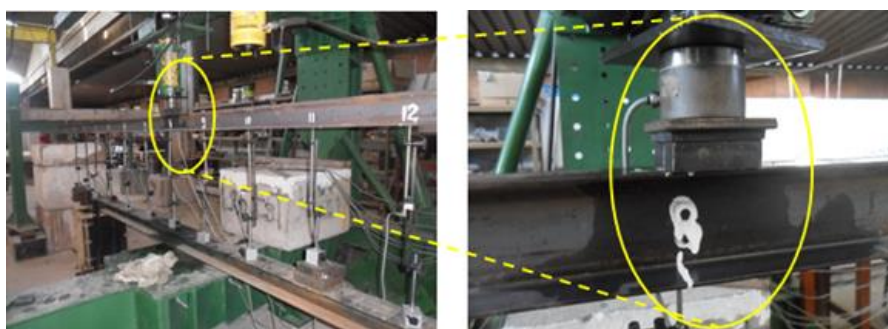


Figura A1.4 – Detalhamentos da célula de carga (Palechor, 2013)

A carga máxima que pode ser aplicada à viga intacta (sem dano) no meio do vão foi de 4373 N, para a viga não sofrer flambagem local, conforme se observa nos resumos da Tabela A1.1 a seguir.

Tabela A1.1 – Verificações realizadas na viga

Verificações	Carregamentos
FLA	$P_{\max} = 903\text{kg}$
FLM	$P_{\max} = 903\text{kg}$
FLT	$P_{\max} = 438\text{kg} = 4373\text{N}$

É importante ressaltar que o cálculo do carregamento máximo, foi realizado com os dados da viga intacta porque na realidade não se conhece nem o tamanho do dano nem a localização do dano.

Levando em consideração que a carga calculada na realidade pode concorrer em uma carga menor devido a alguns fatores, tais como, as imperfeições apresentadas na viga (imperfeições geométricas e do material) que podem levar a peça ao regime plástico, o que

por esta razão foi muito importante aplicar na estrutura incrementos de carga menores do que a carga máxima.

1.1.2 Análise Dinâmica

Com relação à análise dinâmica (análise modal) com o processo de determinação dos parâmetros modais (frequência natural, modo de vibração e fator de amortecimento) que são suficientes para a formulação do modelo dinâmico matemático e pode ser realizada por meio de técnicas analíticas ou experimentais. Tudo isso constitui uma chamada análise modal operacional.

Segundo Silva (2015) a maioria das estruturas vibram em funcionamento, todas as máquinas, veículos e estruturas são submetidos a forças dinâmicas que causam vibrações. Muito frequentemente as vibrações tem que ser investigadas, ou porque elas podem causar um problema imediato, ou ao longo do tempo. Seja qual for a razão, é preciso quantificar a resposta estrutural, de alguma forma, de modo que seu desempenho seja avaliado.

Usando técnicas de análise de sinal, pode-se medir a vibração sobre a estrutura em funcionamento e fazer uma análise de frequência. Este tipo de técnica vai dar resultados que só são relevantes para as condições de medição. O resultado será um produto de resposta estrutural e o espectro de uma força de excitação desconhecida irá proporcionar pouca ou nenhuma informação sobre as características da própria estrutura (Silva, 2015).

1.1.2.1 Instrumentação (Análise Dinâmica)

Com relação à instrumentação da análise dinâmica, foram utilizados dois acelerômetros: um fixo posicionado em um nó específico e um móvel que percorreu cada nó da viga e um martelo instrumentado para excitação.

Os sistemas de ensaios completo, desenvolvidos por Silva (2011), Silva (2015), Palechor (2013) e Palechor (2018), para as análises experimentais dinâmicas conforme Figura A1.5 a seguir.

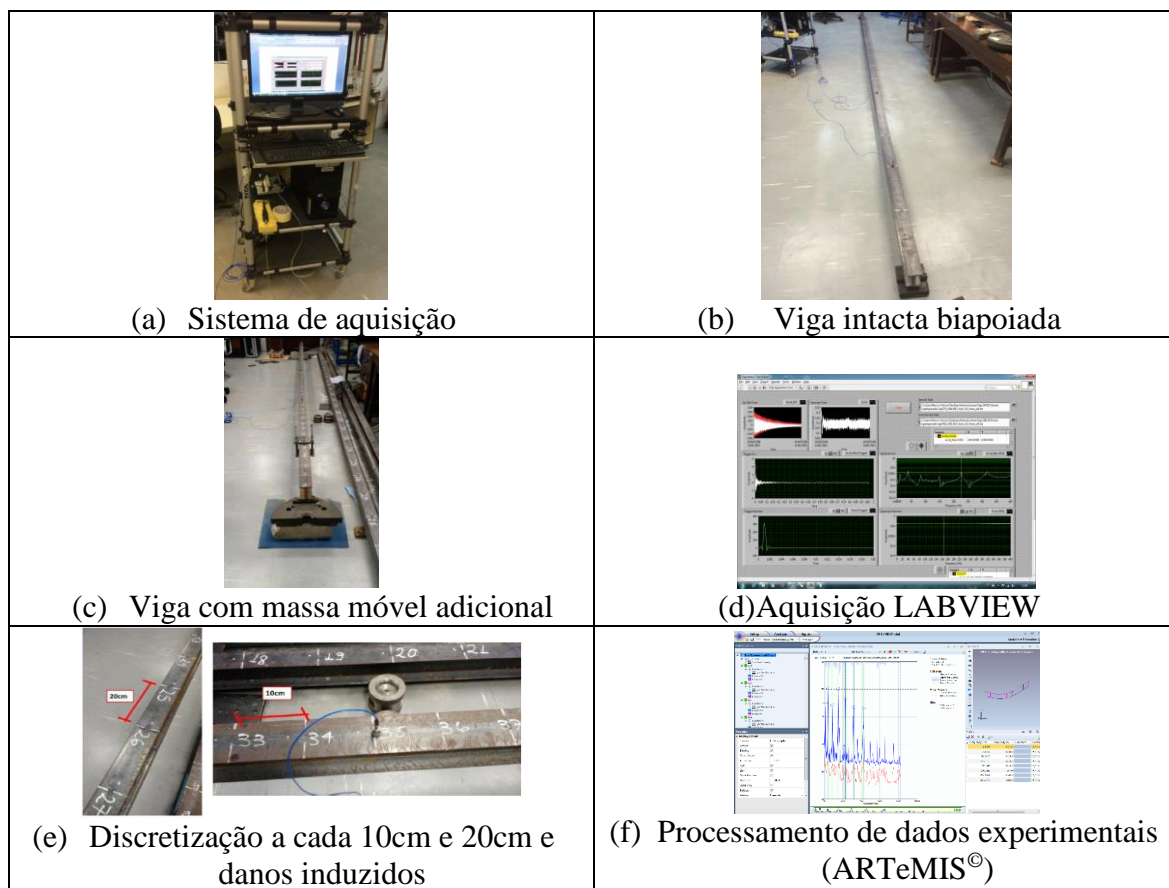


Figura A1.5 – Sistemas de ensaios dinâmicos completos

Para o processamento dos dados e identificação modal (frequências e modos de vibração) foi utilizado o programa ARTEMIS[®] além de algumas necessidades de filtragem e organização dos dados no MATLAB[®].

1.2 ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica (estática e dinâmica) realizada pelos autores supracitados, no que tange às estruturas danificadas e intactas, testadas em programas como ANSYS[®] e SAP2000[®], além de análises com o ABAQUS[®] no capítulo 5, para elementos estruturais diversos, na tentativa de reproduzir as condições da análise experimental estática, bem como foi realizada análise numérica das estruturas intactas, auxiliando nas comparações posteriores.

Os elementos foram submetidos a diferentes condições de carga e diferentes localizações de posição do dano. Alguns dos elementos utilizados para a modelagem numérica foram: o elemento FRAME, PLANE43, BEAM3 e SHELL63, além de análises com o elemento sólido C3D8R do ABAQUS[®] no capítulo 5. Na discretização das estruturas, buscou-se utilizar tamanhos de elementos que facilitassem posteriormente na simulação de

danos propostas. As características e os resultados obtidos na identificação do dano serão apresentados posteriormente.

1.2.1 Características dos elementos utilizados na modelagem com o Programa ANSYS®

A seguir é apresentada a modelagem numérica da viga em estudo, utilizando cada um dos elementos escolhidos. São apresentadas características comuns para a análise desenvolvida (análise estática e dinâmica).

1.2.1.1 Elemento BEAM3

O elemento BEAM3 é um elemento uniaxial com tração, compressão e capacidade de flexão. O elemento tem três graus de liberdade por nó; translação nos eixos X e Y e rotação ao redor do eixo Z, conforme pode ser observado na Figura A1.6 seguinte, onde mostra-se a geometria do elemento, a localização dos nós e o sistema de coordenadas deste elemento.

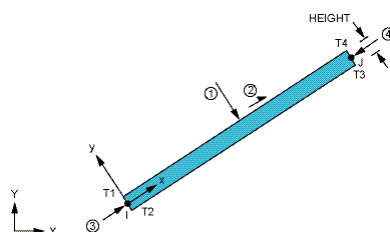


Figura A1.6 – Elemento BEAM3 (ANSYS®, 2007)

O elemento é definido por dois nós, a área da seção transversal, a altura (h), o momento de inércia e as propriedades do material. As características do elemento BEAM3 estão resumidas na Tabela A1.2.

Tabela A1.2 – Características do elemento BEAM3

CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO BEAM3	
Nós	I, J
Graus de liberdade	UX, UY, ROTZ
Constantes Reais	AREA – Área da seção transversal IZZ – Momento de inércia HEIGHT – altura do elemento ADDMAS – massa por unidade de comprimento
Propriedades do Material	EX, ALPX (ou CTEX ou THSX), DENS, GXY, DAMP

Para a escolha do número de elementos ótimos para a modelagem da viga, foi feita uma convergência dos elementos, testando os deslocamentos num só ponto localizado no meio do vão, gerado por uma carga de 4 kN e variando a quantidade de elementos (refinamento da malha em sentido longitudinal). Os resultados apresentados por Palechor (2013), podem ser observados na Figura A1.7 a seguir.

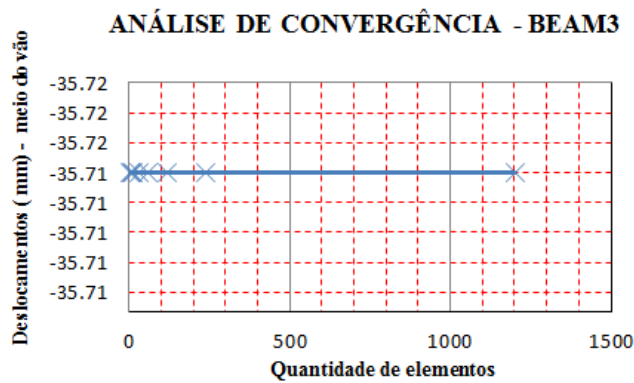


Figura A1.7 – Análise de convergência da malha do elemento BEAM3

Para o caso em estudo escolheu-se a malha com 1200 elementos, com 0,50 cm de comprimento cada um deles, o que segundo Palechor (2013) apresentava facilidade na simulação do dano. A malha da viga com o elemento BEAM3 pode ser observada na Figura A1.8.

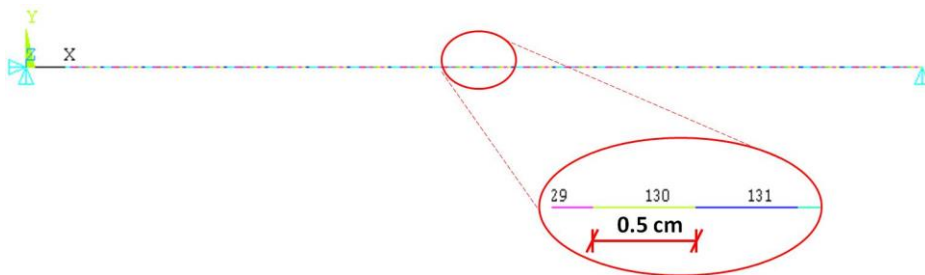


Figura A1.8 – Malha da viga com o elemento BEAM3 (ANSYS®, 2007)

As propriedades da viga introduzidas na modelagem, como o elemento BEAM3, foram as seguintes, conforme a Tabela A1.3.

Tabela A1.3 – Constantes reais: modelagem numérica elemento BEAM3

PROPRIEDADES E CONSTANTES REAIS INTRODUZIDAS NA MODELAGEM NUMÉRICA	
Módulo de Elasticidade: E ($2 \cdot 10^{11}$ N/m ²)	2,00. 10 ¹¹
Coefficiente de Poisson: ν	0,3000
Densidade do Aço (kg/m ³)	7,8000
Área da Seção (m ²)	1,45. 10 ⁻³
Inércia da Seção (m ⁴)	2,52. 10 ⁻⁶
Altura da Seção (m)	0,1016

Para simular o local danificado, Palechor (2013) fez uma diminuição da área e do momento de inércia dos elementos danificados, onde quatro elementos foram danificados no dano de 2,00 cm e oito elementos para o dano de 4,00 cm. A área da seção danificada e a inércia são correspondentes com o dano feito na viga no ensaio experimental, esses dados são mostrados na Tabela A1.4 e na Figura A1.9, onde mostra-se o elemento danificado no ANSYS®.

Tabela A1.4 – Diminuição da inércia do elemento danificado na modelagem numérica – elemento BEAM3

Diminuição da Área e do Momento de Inércia do Elemento Danificado	
Área do Elemento Intacto (cm ²)	14,5000
Área do Elemento Danificado (cm ²)	7,8300
Inércia do Elemento Danificado (cm ⁴)	130,7141
Inércia I _x (cm ⁴)	252,0000

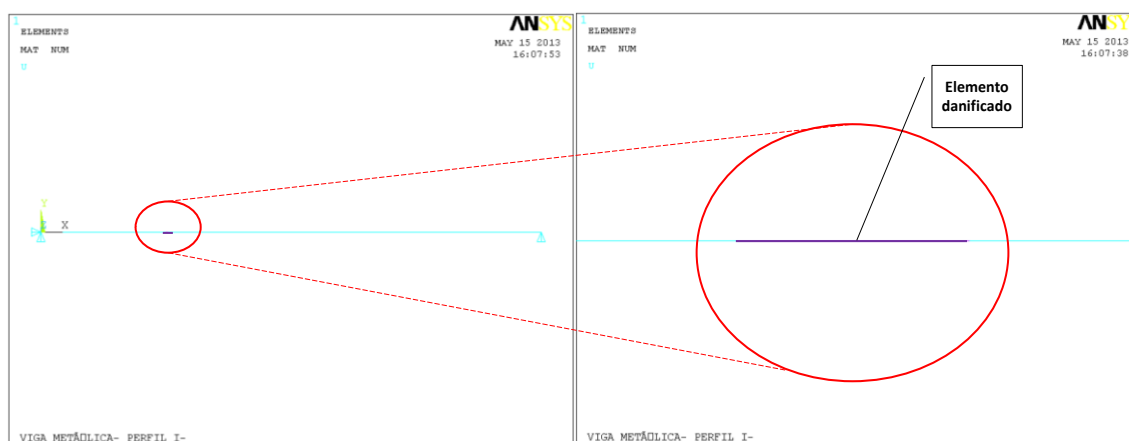


Figura A1.9 – Simulação do dano: elemento BEAM3 (ANSYS®, 2007)

As condições de contorno, que Palechor (2013) optou, foram feitas tentando simulá-las o mais próximo possível da realidade. As condições dos apoios são mostradas na Figura A1.10, em que o apoio do lado esquerdo é um apoio de segundo gênero e o apoio do lado direito é um apoio de primeiro gênero.

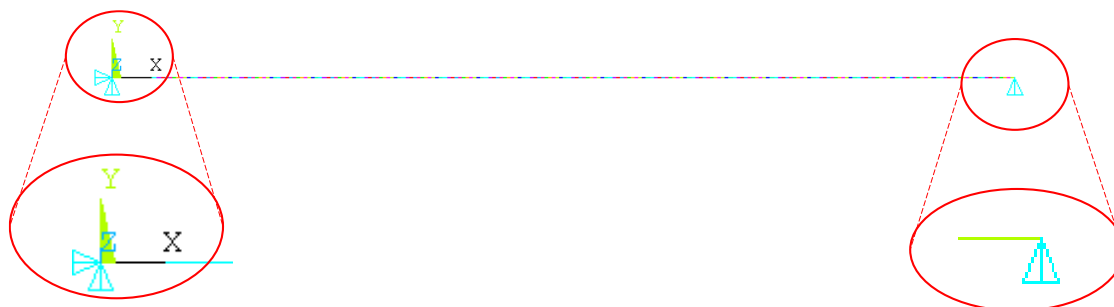


Figura A1.10 – Apoios viga-elemento: BEAM3 (ANSYS®, 2007)

1.2.1.2 Elemento SHELL63

O elemento SHELL63 tem aplicações na modelagem de estruturas feitas a partir de lâminas ou em elementos de parede delgada. Este elemento é definido por quatro nós, cada um dos quais tem seis graus de liberdade: três de translação e três de rotação. Os eixos de coordenadas X e Y do elemento são definidos no mesmo plano do elemento. O elemento tem uma espessura que é definida em suas constantes reais e que pode variar dentro do elemento. O sistema de coordenadas do elemento define uma face superior e uma face inferior.

A geometria das localizações dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostrados na Figura A1.11. A propriedade dos materiais é ortotrópica e corresponde à orientação do sistema de coordenadas do elemento.

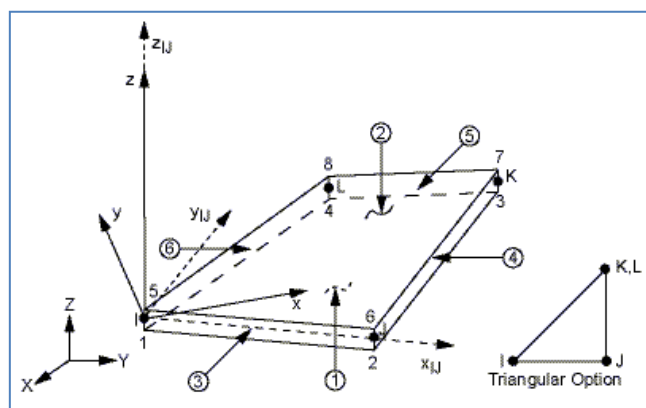


Figura A1.11 – Elemento SHELL63 (ANSYS®, 2007)

A espessura pode ser variável ou constante sobre toda a área do elemento, com a espessura de entrada para os quatro nós. Se o elemento tiver espessura constante, apenas necessita de ser introduzida uma só espessura. As cargas aplicadas ao elemento podem ser divididas em: cargas aplicadas aos nós e cargas aplicadas ao elemento. As pressões podem ser introduzidas como cargas de superfície sobre as áreas, como mostrado pelos números ao redor do elemento na Figura A1.11. A Tabela A1.5 seguinte mostra as características do elemento SHELL63.

Tabela A1.5 – Características do elemento SHELL63

Características do Elemento SHELL63	
Nós	I, J, K, L
Graus de liberdade	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
Propriedades do Material	EX, EY, EZ, (PRXY, PRYZ, PRXZ ou NUXY, NUYZ, NUXZ), ALPX, ALPY, ALPZ (ou CTEX, CTEY, CTEZ ou THSX, THSY, THSZ), DENS, GXY, DAMP
Cargas Superficiais - pressão	Face 1 (I-J-K-L) (bottom, in +Z direction), face 2 (I-J-K-L) (top, in -Z direction), face 3 (J-I), face 4 (K-J), face 5 (L-K), face 6 (I-L)

A Figura A1.12 seguinte apresenta os resultados obtidos por Palechor (2013) para o valor do deslocamento da viga no meio do vão devido à ação da carga aplicada no mesmo lugar.

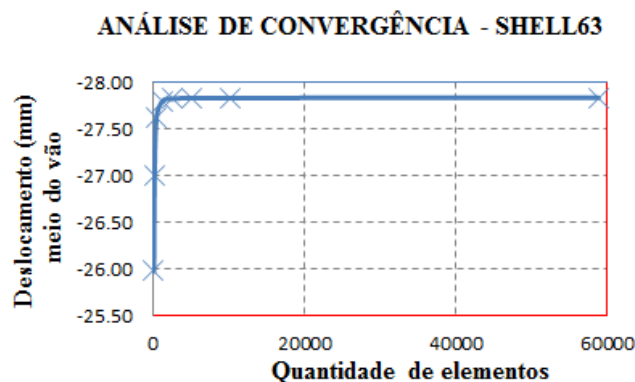


Figura A1.12 - Convergência da malha do elemento SHELL63

A convergência do elemento SHELL63 é estável para o número de elementos maior a 2.500 aproximadamente. Para o caso apresentado por Palechor (2013), foi escolhida a

malha com 58.800 elementos, que gera elementos de 0,50 cm de comprimento, a fim de facilitar a simulação do dano.

Na Figura A1.13 mostra-se a malha gerada pelo programa ANSYS[®]. A malha foi feita de forma regular para se manter o mesmo comprimento em todos os elementos.

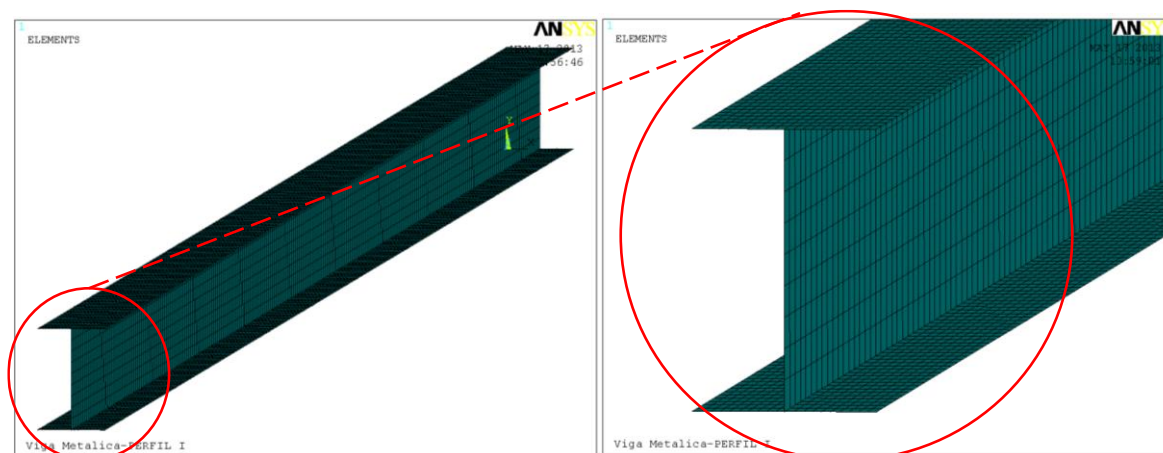


Figura A1.13 – Malha gerada no ANSYS[®] – Elemento SHELL63 (ANSYS[®], 2007)

As características das condições de contorno para nossa viga são: o apoio de primeiro gênero (Figura A1.14 (b)), e o apoio de segundo gênero (Figura A1.14 (a)). Para simular o apoio do segundo gênero, foram restringidos os deslocamentos na direção x, y e z para a fila de nós localizada a 7,50 cm do extremo, na parte inferior da viga, e para o apoio de primeiro gênero foi restrito o deslocamento na direção z e x para a fila de nós localizado na parte inferior da viga localizado a 7,50 cm do extremo oposto ao anterior (Figura A1.15).

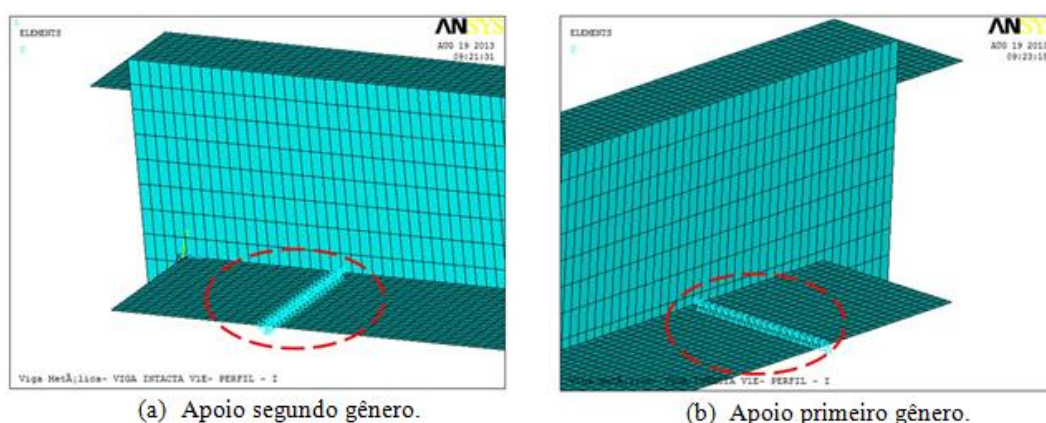


Figura A1.14 – Condições de contorno: elemento SHELL63 (ANSYS[®], 2007)

Foi realizada simulação do dano eliminando elementos da malha (Figura A1.15). O número total de elementos eliminados na seção transversal foi de 80 (20 elementos em cada

asa das mesas). A diminuição da área transversal da viga foi de 65,50%, e os valores são mostrados na Tabela A1.6 a seguir.

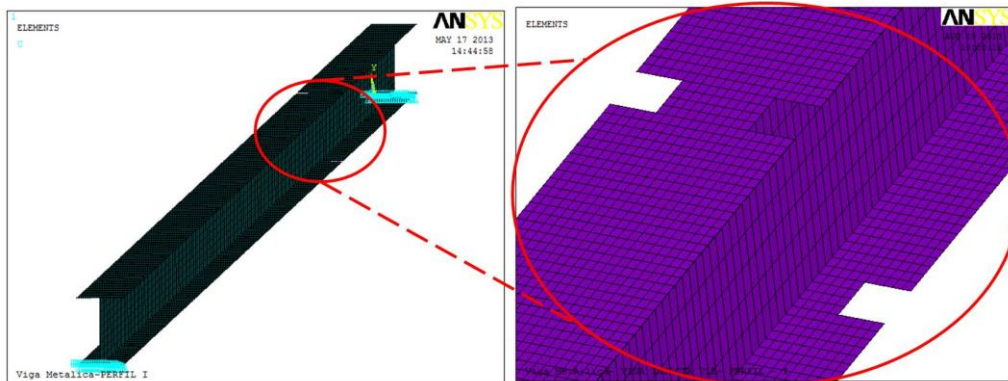


Figura A1.15 – Simulação do dano: elemento SHELL63 (ANSYS®, 2007)

Tabela A1.6 – Valores obtidos da diminuição da seção transversal da viga

Diminuição da Seção Transversal
Área inicial da seção = 14,50 cm ²
Área danificada = 5,00 cm ²
Área final da seção = 9,50 cm ²

Quando da análise nos ensaios dinâmicas com os danos simulados com a realização de entalhes simétricos nas mesas superior e inferior, e a simulação do dano deletando elementos da malha de acordo com a geometria dos casos de danos, desenvolvidos por Silva (2011), Silva (2015), Palechor (2013) e Palechor (2018), conforme Figura A1.16 a seguir.

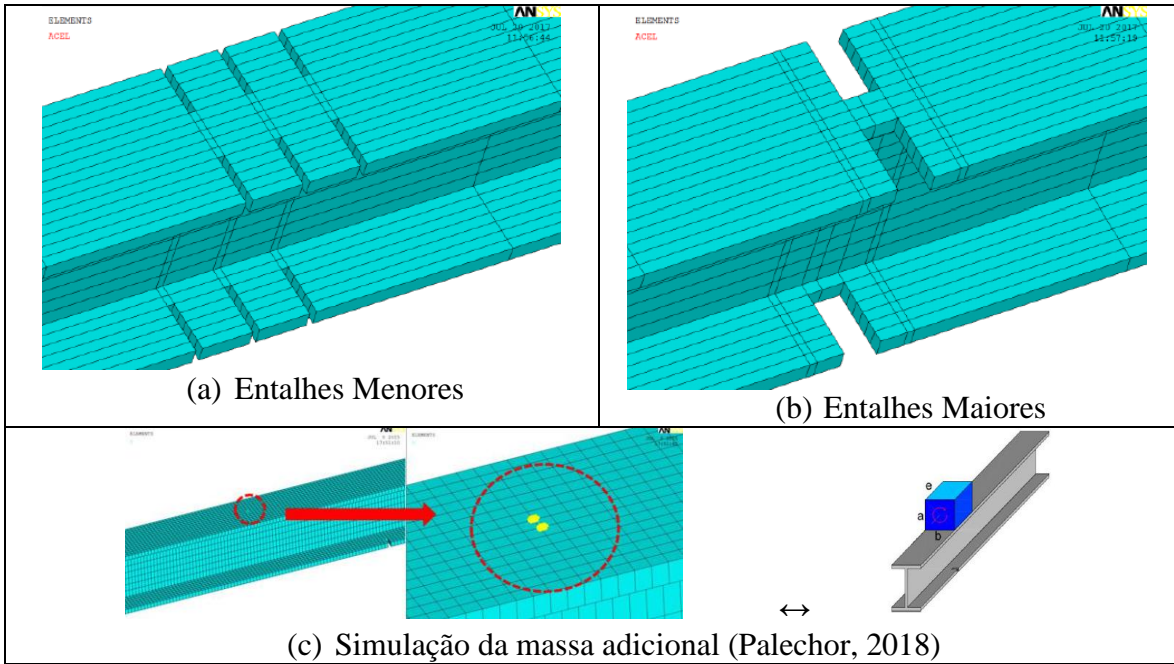
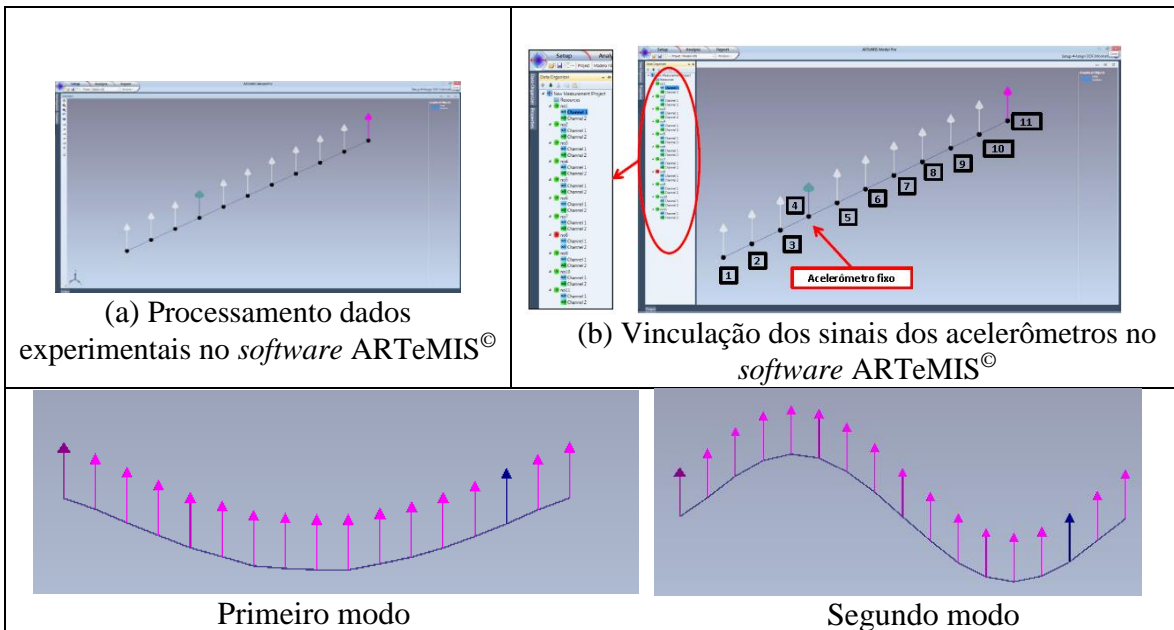


Figura A1.16 - Análise nos ensaios dinâmicos com os danos simulados com a realização de entalhes simétricos

1.2.1.3 Processamento no *software* ARTeMIS[®]

Como foram utilizados dados do processamento realizado no *software* ARTeMIS[®], segue na Figura A1.17 a seguir algumas demonstrações realizadas pelo *software*, desenvolvidos nas pesquisas de Silva (2015) e Palechor (2018).



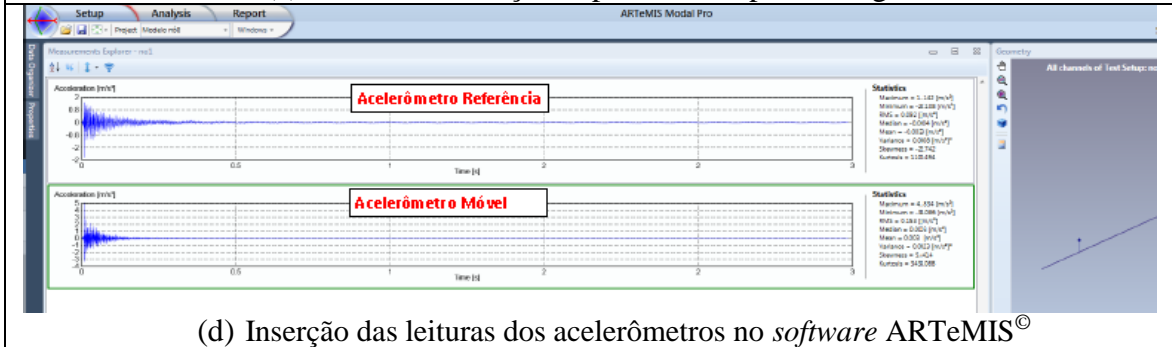
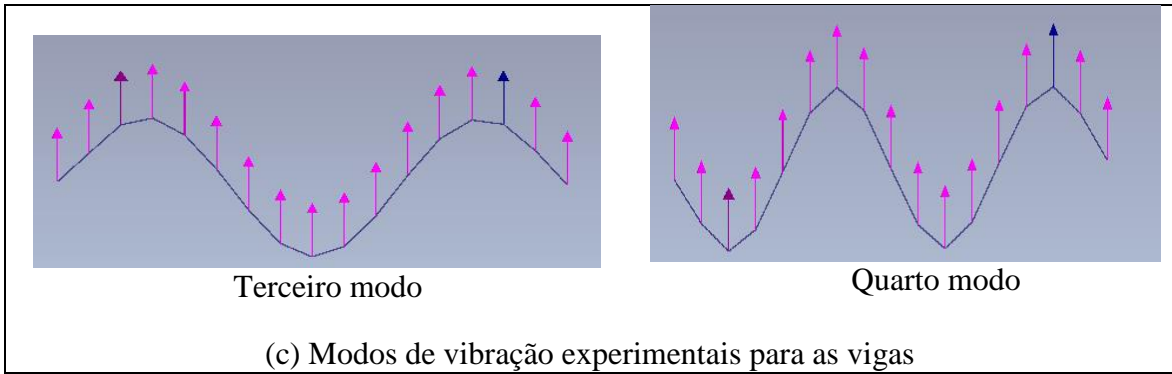


Figura A1.17 - Dados do processamento realizado no *software* ARTeMIS[®] - Silva (2015) e Palechor (2018)

1.3 ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS E TRELIÇAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (DISSERTAÇÃO: SILVA, 2011)

Conforme sinalizado adotou-se os modelos numéricos desenvolvidos por Silva (2011) em sua dissertação de mestrado para análises dos elementos estruturais do tipo de viga em balanço, viga biengastada e da treliça plana.

As propriedades geométricas e dos materiais das vigas nas análises numéricas, bem como as condições de danos a serem verificadas podem ser observadas a seguir na Figura A1.18.

Propriedades	Símbolo	Valor	Und.																
Base da Viga	B	0,10	m	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Situação (Caso 1)</th> <th style="width: 15%;">Tamanho da fissura em metros (a')</th> <th style="width: 70%;">Localização da fissura a partir do engaste (d)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.1</td> <td>0,025</td> <td>0,125m = (L/4)</td> </tr> <tr> <td>1.2</td> <td>0,025</td> <td>0,25m = (L/2)</td> </tr> <tr> <td>1.3</td> <td>0,0375</td> <td>0,125m = (L/4)</td> </tr> <tr> <td>1.4</td> <td>0,0375</td> <td>0,25m = (L/2)</td> </tr> </tbody> </table> <p>(b) Condições de danos a serem verificadas</p>	Situação (Caso 1)	Tamanho da fissura em metros (a')	Localização da fissura a partir do engaste (d)	1.1	0,025	0,125m = (L/4)	1.2	0,025	0,25m = (L/2)	1.3	0,0375	0,125m = (L/4)	1.4	0,0375	0,25m = (L/2)
Situação (Caso 1)	Tamanho da fissura em metros (a')	Localização da fissura a partir do engaste (d)																	
1.1	0,025	0,125m = (L/4)																	
1.2	0,025	0,25m = (L/2)																	
1.3	0,0375	0,125m = (L/4)																	
1.4	0,0375	0,25m = (L/2)																	
Altura da Viga	H	0,10	m																
Área	S	0,01	m ²																
Momento de Inércia	I	8,333x10 ⁻⁶	m ⁴																
Comprimento da Viga	L	0,50	m																
Módulo de Elasticidade	E	200,00	GPa																
Massa Específica	ρ	7850,00	kg/m ³																
Coefficiente de Poisson	ν	0,30	-																

(a) Propriedades geométricas e dos materiais

Figura A1.18 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de danos das vigas a serem analisadas

Na simulação das vigas no programa ANSYS® 11.0, utilizou-se o elemento PLANE42 da sua biblioteca. A Figura A1.19 a seguir mostra que o elemento é definido por quatro nós e dois graus de liberdade por nó: translação nas direções x e y. Esse elemento é utilizado para modelar estruturas sólidas 2D.

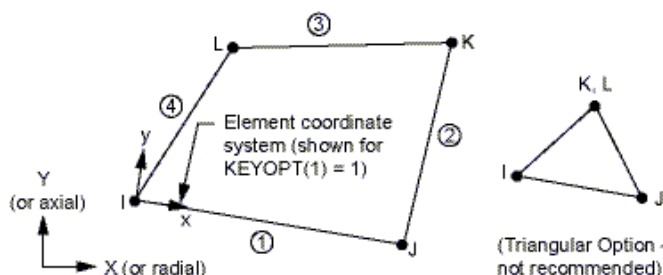


Figura A1.19 – Biblioteca do ANSYS®: elemento PLANE42

O modelo em elementos finitos da viga Engastada-Livre foi discretizado em 4.509 nós e 4.000 elementos. As fissuras foram simuladas, eliminando os elementos do modelo e as condições de contorno foram aplicadas em todos os nós da extremidade das vigas, restringindo os graus de liberdade em x, y e z.

1.3.1 Caso 2 - Análise Numérica Estática: Viga em Balanço

Inicialmente com a análise de uma viga em concreto armado em balanço, engastada livre, com carregamento pontual na extremidade do balanço, conforme representado na Figura A1.20, bem como a representação do seu comportamento no modelo numérico com uma carga concentrada $F=500$ kN que foi aplicada na extremidade direita, do trabalho de Silva (2011).

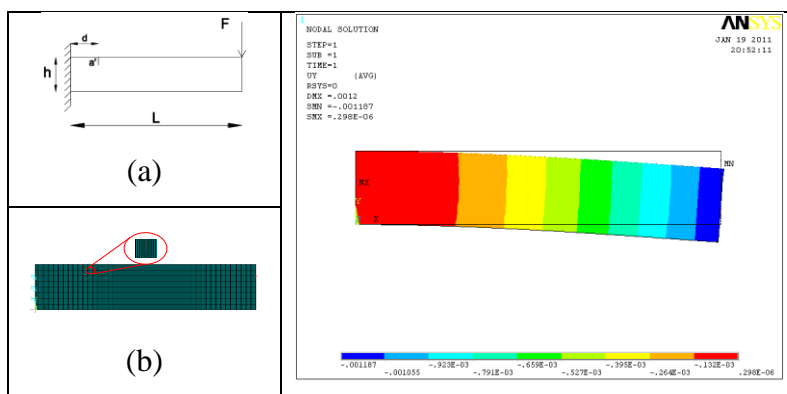


Figura A1.20 – Análise Numérica de Deslocamento Estático (Deformada): Viga em Balanço (Silva, 2011)

A resposta estática dos deslocamentos nodais na linha inferior da viga intacta e danificada serão utilizados para as análises de otimização de cada método para o caso 2 demonstrados a seguir.

1.3.1.1 Análise Estática Viga em Balanço: Evolução Diferencial (ED)

Serão apresentados os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial com números constantes de elementos (denominado dentro do método de número de parâmetros da função objetivo, ou mesmo de variáveis envolvidas ou até mesmo de dimensionalidade).

As funções objetivos produzidas pelos acúmulos das diferenças quadráticas das respostas intactas e danificadas utilizadas podem ser observadas na Equação (A1.1) a seguir, que contempla:

$$F = \sum_{i=1}^{500} (Y_m^{ij} - Y_a^{ij})^2 \quad (\text{A1.1})$$

Onde,

Y_m^{ij} : deslocamentos estáticos medidos nas estruturas danificadas;

Y_a^{ij} : deslocamentos estáticos obtidos numericamente nas estruturas intactas;

i: grau de liberdade;

j: condição de carregamento estático em particular.

Os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nessa viga em balanço em estudo foram:

- I_D = 500: número de elementos na linha inferior da viga em estudo (variáveis);
- I_NP = 10.I_D → I_NP =5000: número de populações ou tamanho da i população;
- F = 0,5: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- F_CR = 0,9: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 2, apresentada na Figura A1.21, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao número de nós da viga (500) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 500 kN.

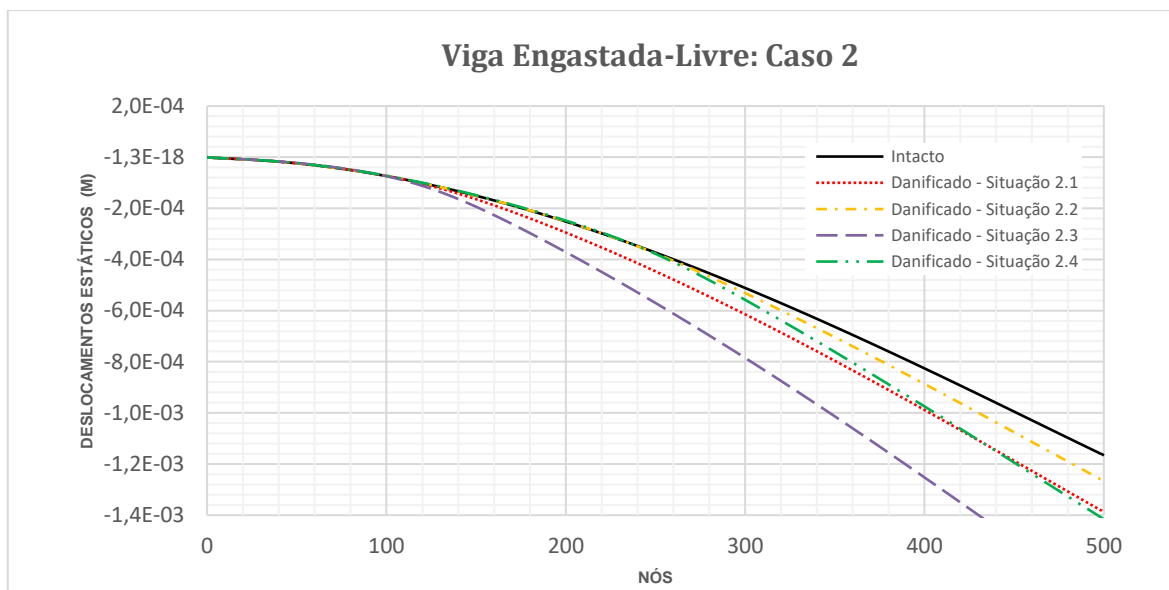


Figura A1.21 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 2 (carga 500 kN)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS[®] por meio do elemento PLANE42 utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 50 iterações, ou seja, dez vezes menor que o número de elementos na base da linha da viga. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.22, Figura A1.23, Figura A1.24 e Figura A1.25 são mostrados os resultados da solução do problema.

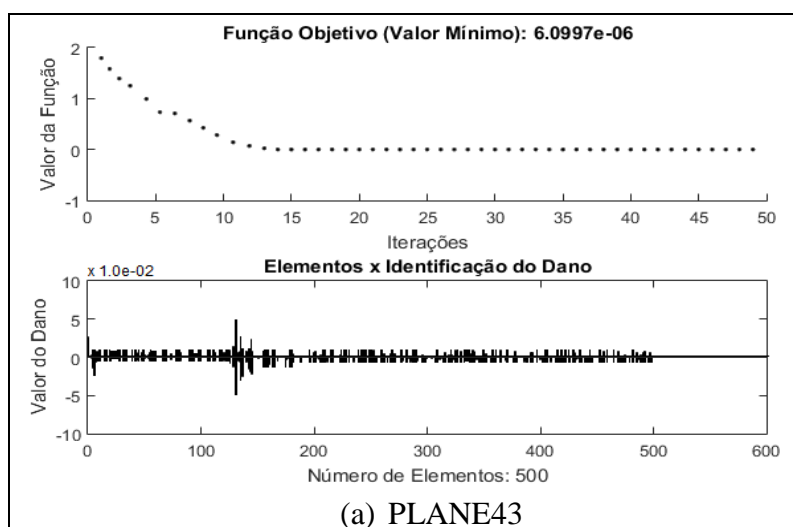


Figura A1.22 – Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.1 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)

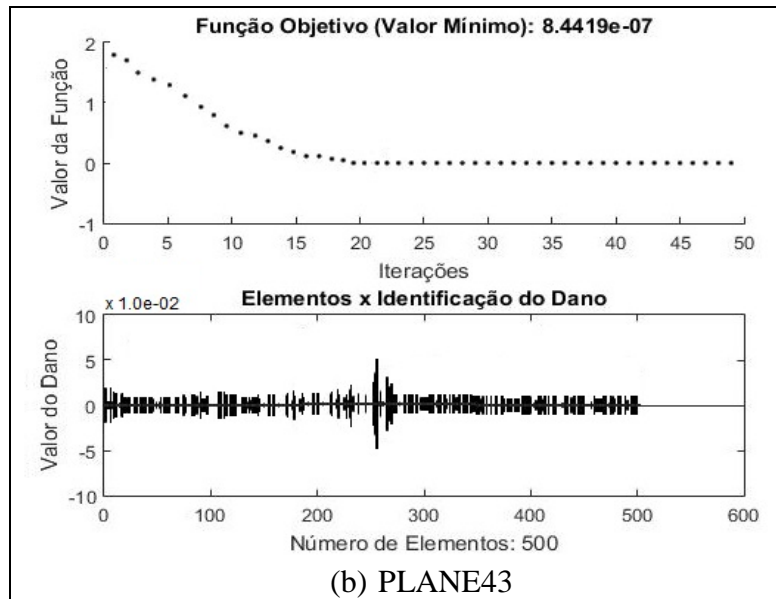


Figura A1.23 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.2 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)

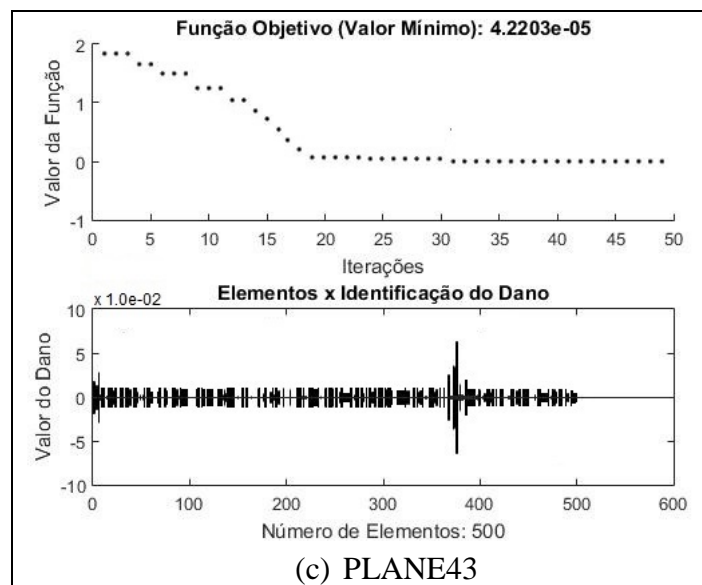


Figura A1.24 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.3 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste direito – $0,125=L/4$)

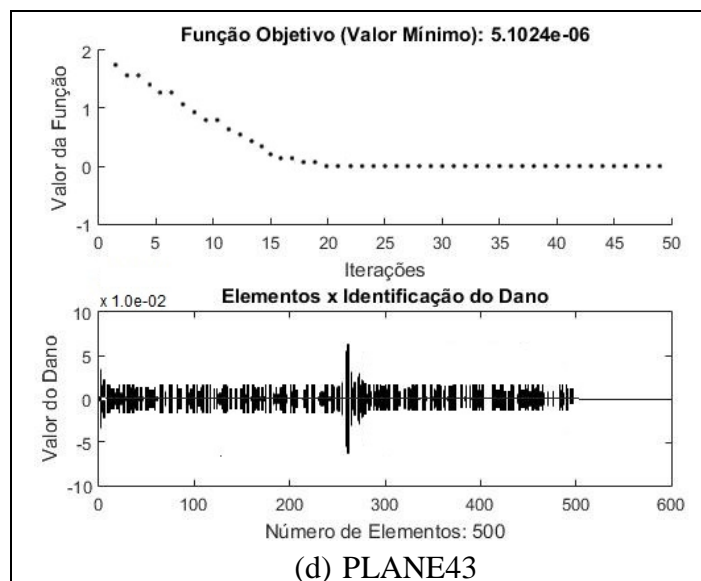


Figura A1.25 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 2.4 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.7 a seguir.

Tabela A1.7 – Análise Resumo ED: Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Carga (kN)	Método/ Elemento / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
2.1	Viga Engastada Livre (Casos 2.1 ao 2.4)	$\cong 500$ kN	ED	$0.125 = (L/4)$	50 ^a	125	$\cong 0.05\%$	0.0000060997
2.2			/	$0.250 = (L/2)$	50 ^a	250	$\cong 0.05\%$	0.00000084419
2.3			/	$0.125 = (L/4)$	50 ^a	375	$\cong 0.075\%$	0.000042203
2.4			Estática	$0.250 = (L/2)$	50 ^a	250	$\cong 0.075\%$	0.0000051024

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na quinquagésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de aproximadamente 0.05% no elemento 125 e 250 para as situações 2.1 e 2.2, sendo que algumas pequenas perturbações podem ser observadas para os demais elementos, principalmente na situação 2.1, mas na situação 2.2 com escalas um pouco maiores além de ambos com picos maiores próximos ao engaste.

Devido à presença de danos maiores para as situações 2.3 e 2.4, encontrou-se um percentual de dano aproximado de 0.075% no elemento 375 e 250, com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, além de mais algumas pequenas perturbações para os demais elementos e os valores mínimos das funções objetivos encontradas também na quinquagésima iteração.

Estas distorções iniciais podem ser dirimidas com a utilização de um número menor de elementos e um maior número de iterações apesar de que nesses casos a identificação de danos teve bons resultados já na quinquagésima iteração mesmo sendo verificado na aproximação ao ponto danificado ainda resíduos de picos na análise gráfica mas que não alcançam a grandeza do ponto real de dano.

1.3.1.2 Análise Estática Viga em Balanço: Algoritmos Genéticos (AG)

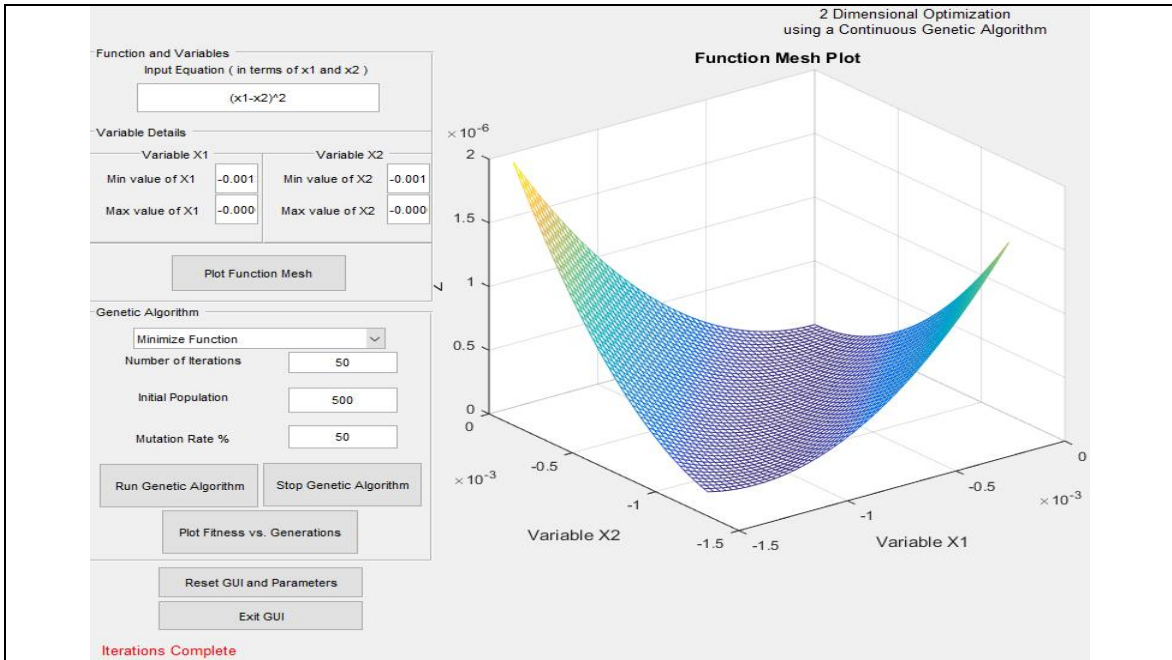
A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.8 resumo a seguir.

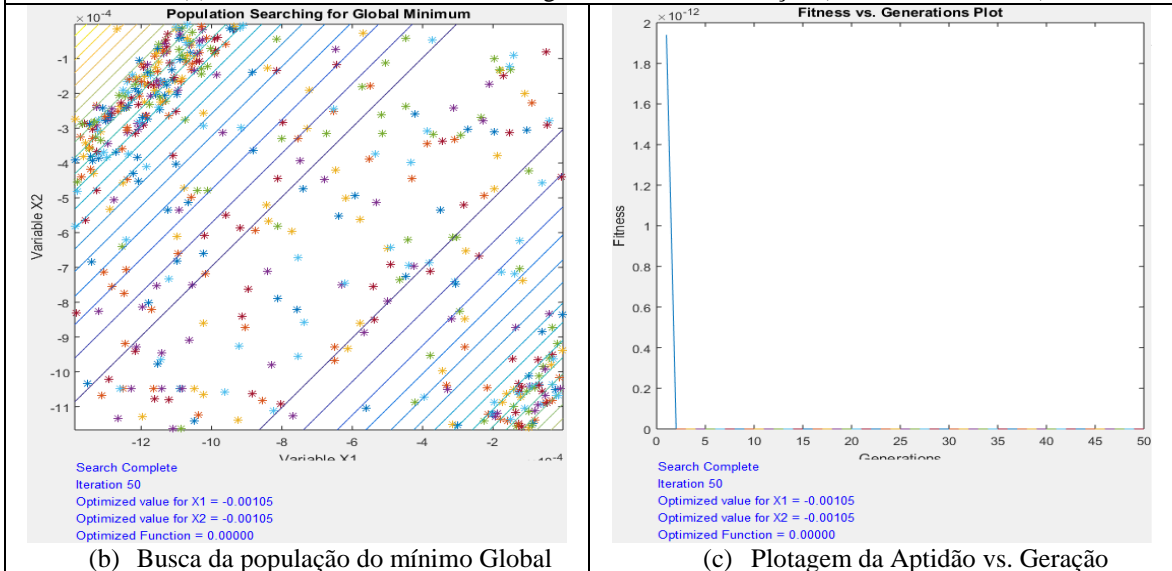
Tabela A1.8 - Mínimos e máximos valores estáticos intacto e danificados

Valores das Variáveis	Intacto	Situação 2.1 ($a'=0,025$; $0,125m = L/4$)	Situação 2.2 ($a'=0,025$; $0,250m = L/2$)	Situação 2.3 ($a'=0,0375$; $0,125m = L/4$)	Situação 2.4 ($a'=0,0375$; $0,250m = L/2$)
max/>	-0,000001188300000	-0,000001179900000	-0,000001188400000	-0,000001168000000	-0,000001188400000
min/<	-0,001167000000000	-0,001388800000000	-0,001267700000000	-0,001746200000000	-0,001414500000000

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.26, Figura A1.27, Figura A1.28 e Figura A1.29 bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



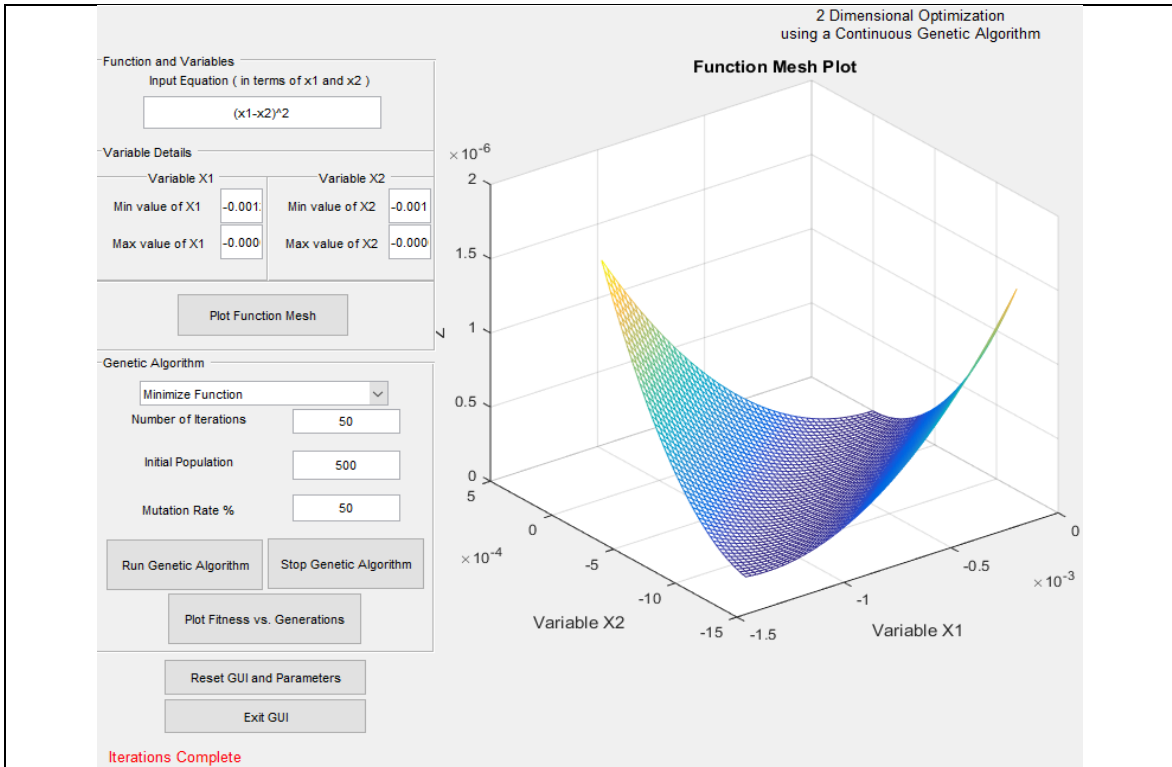
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



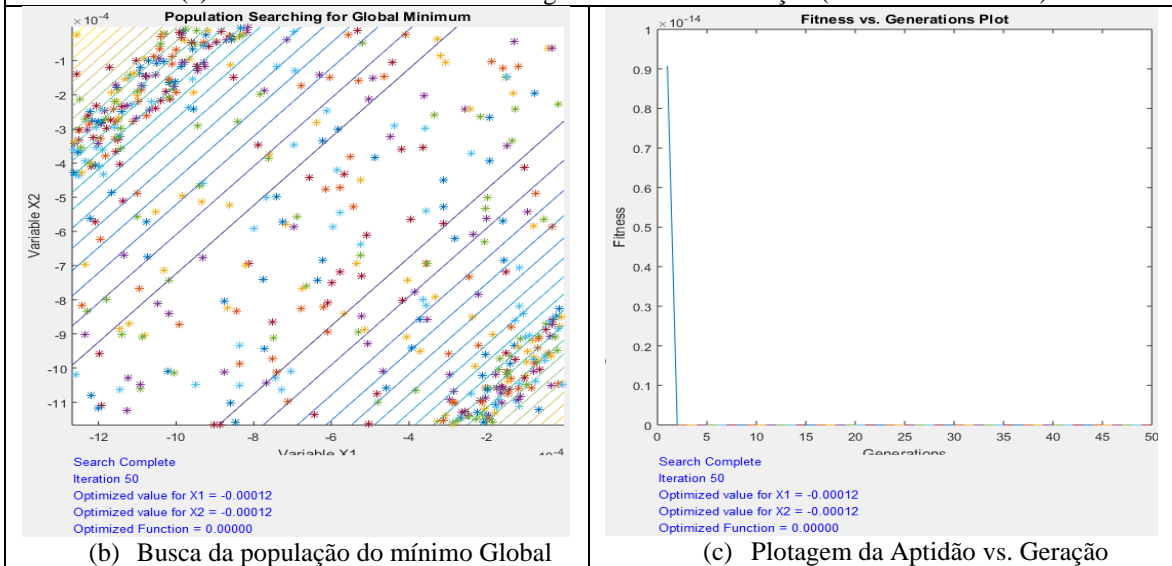
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.26 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.1 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)



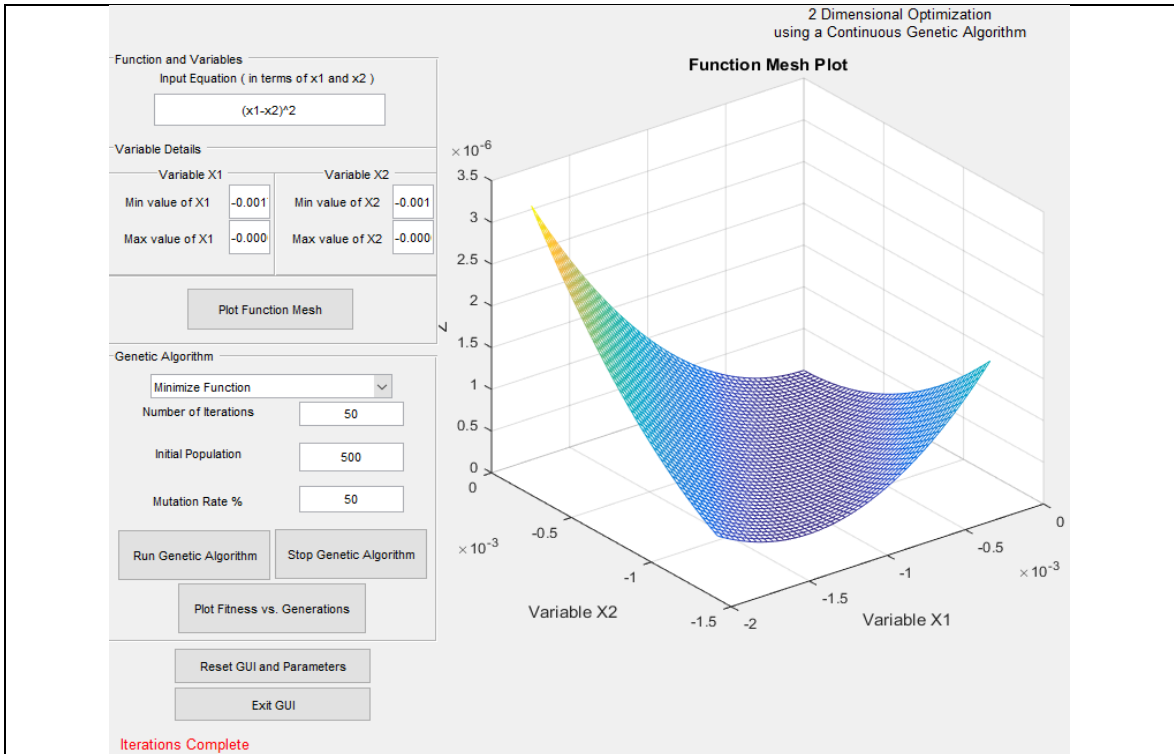
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



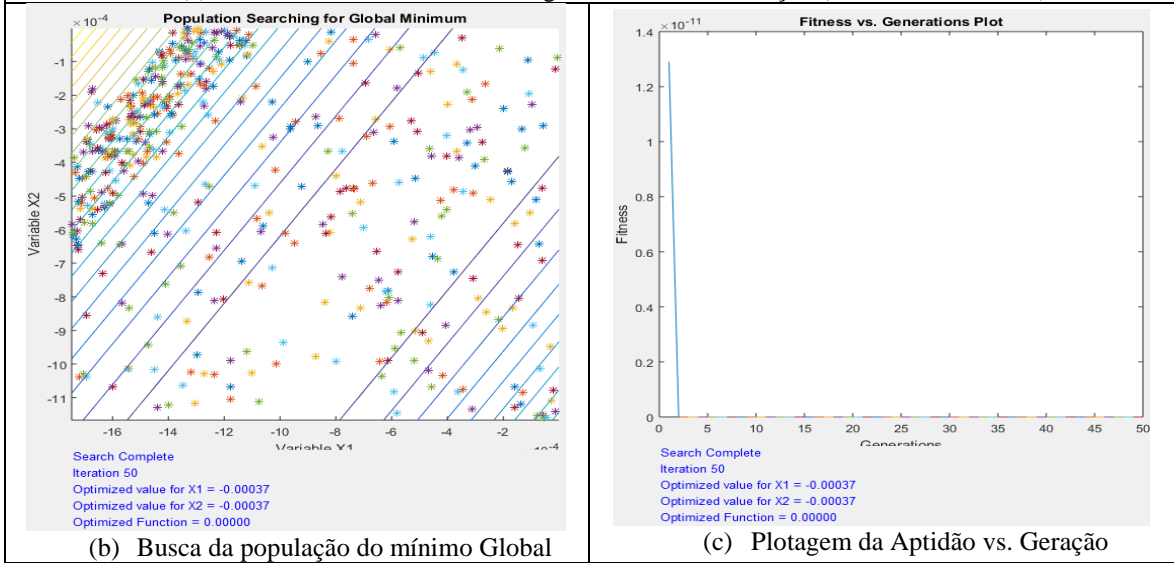
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.27 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.2 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)



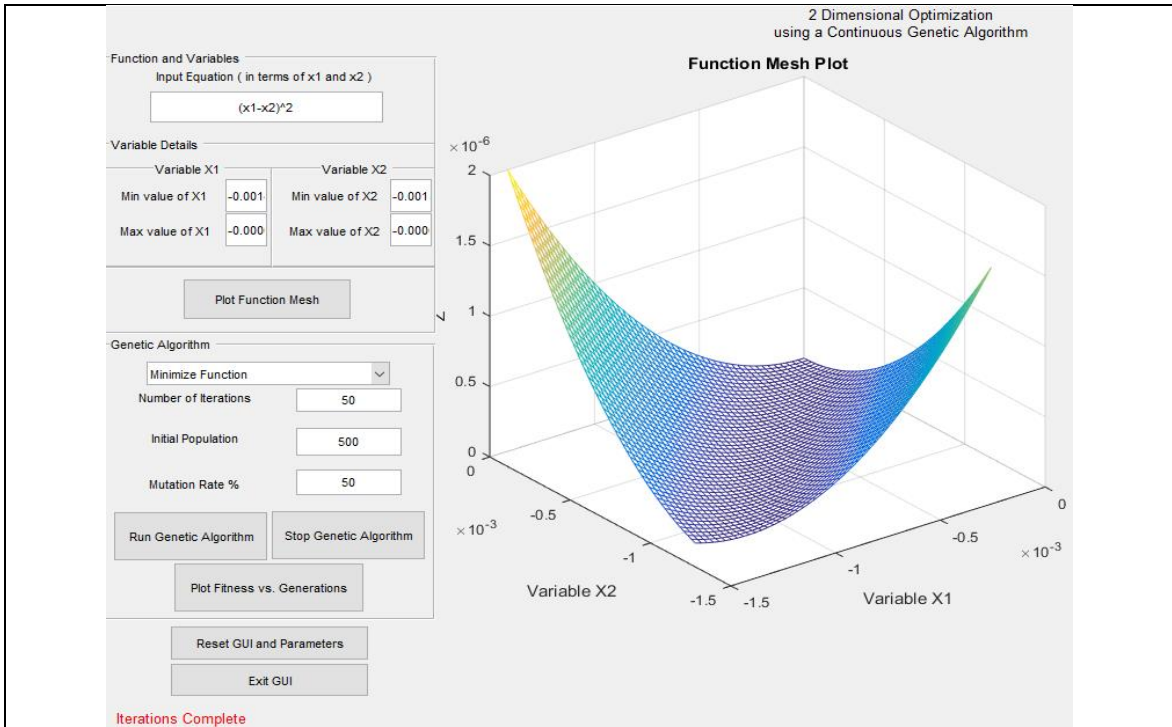
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



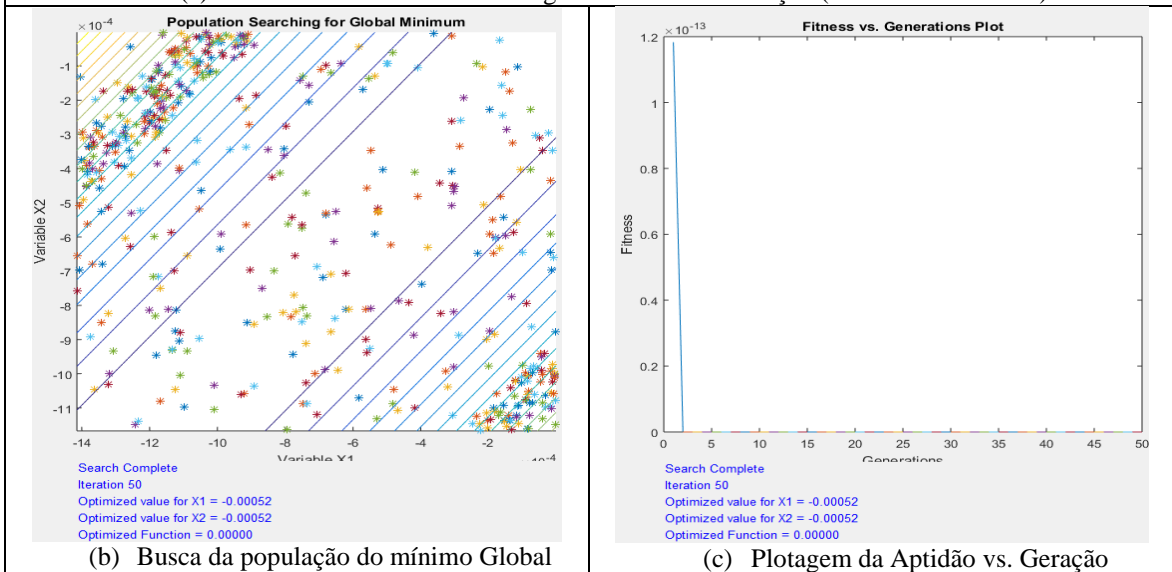
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.28 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.3 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste $-0,125=L/4$)



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.29 – Algoritmo Genético - GA (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 2.4 (50 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.9 a seguir.

Tabela A1.9 – Análise Resumo AG: Viga Engastada-Livre Caso 2 carga 500 kN

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Carga (kN)	Método/ Elemento / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Itera ções	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
2.1				0.125 = (L/4)	50 ^a	125	$\cong 1.95e-10\%$ Correto $\cong 0.05\%$	-0.00105
2.2	Viga Engastada Livre (Casos 2.1 ao 2.4)	$\cong 500\text{ kN}$	AG / PLANE43	0.250 = (L/2)	50 ^a	250	$\cong 0.91e-12\%$ Correto $\cong 0.05\%$	-0.00012
2.3			/ Estática	0.125 = (L/4)	50 ^a	375	$\cong 1.3e-09\%$ Correto $\cong 0.075\%$	-0.00037
2.4				0.250 = (L/2)	50 ^a	250	$\cong 1.19e-11\%$ Correto $\cong 0.075\%$	-0.00052

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do DE, com análises na quinquagésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, encontrando-se algumas perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global conforme se observa no item (b) das figuras demonstradas dos casos 2.1 ao 2.4.

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG.

1.3.2 Caso 3 - Análise Numérica Dinâmica: Viga em Balanço

Na análise seguinte, verificou-se o comportamento dinâmico da mesma estrutura, onde são apresentados seus comportamentos no modelo numérico através dos seus três primeiros modos de vibração e as frequências naturais foram determinados no trabalho de referência de Silva (2011), apesar de que nessa pesquisa utilizou-se os valores mais coerentes em termos de análises intactas e danificadas dos primeiros modos de vibração e por último a análise gráfica desses resultados obtidos na Figura A1.30.

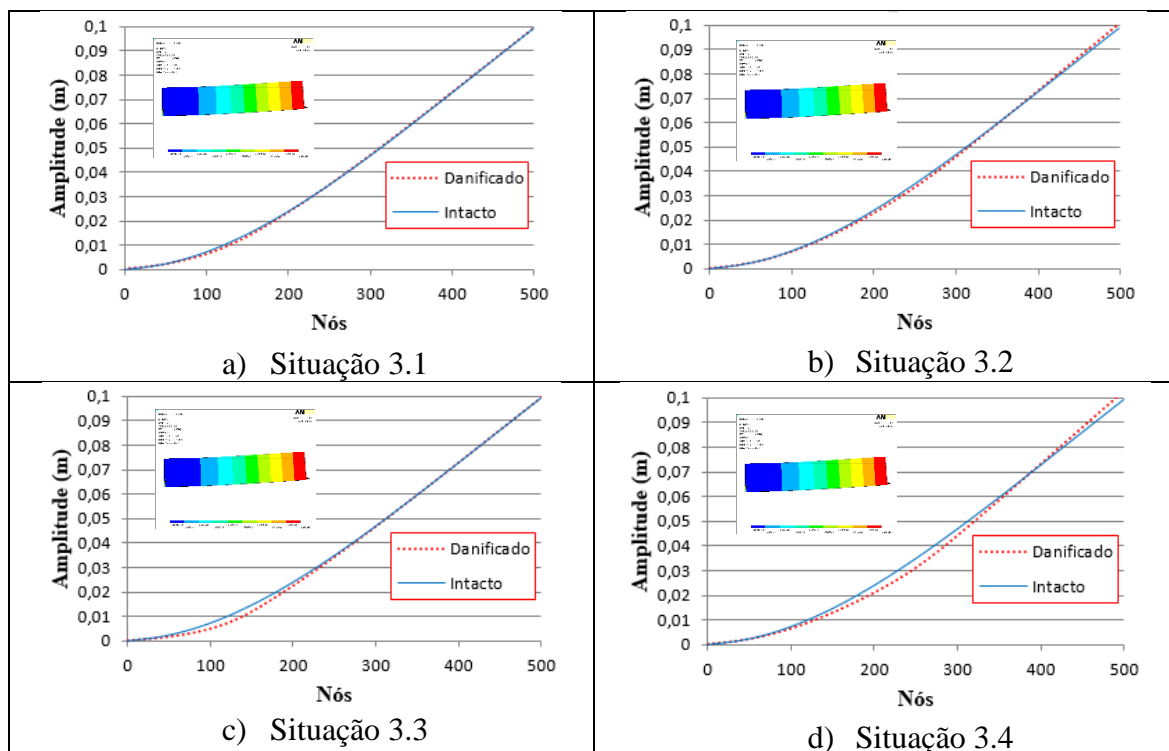


Figura A1.30 - Análise Gráfica e Numérica Dinâmica do Comportamento do Primeiro Modo de Vibração da Viga em Balanço em cada situação de dano (Silva, 2011)

As análises de otimização de cada método para o caso 3 são apresentadas a seguir.

1.3.2.1 Análise Dinâmica Viga em Balanço: Evolução Diferencial (ED)

Serão apresentados os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial com números constantes de elementos, onde foram utilizados como resultados numéricos os primeiros modos de vibração e as funções objetivos produzidas pelos acúmulos das diferenças quadráticas das respostas intactas e danificadas utilizadas podem ser observadas na Equação (A1.2) a seguir, que contempla:

$$F = \sum_{i=1}^{500} (Y_m^{ij} - Y_a^{ij})^2 \quad (A1.2)$$

Onde,

Y_m^{ij} : modos de vibração medidos nas estruturas danificadas;

Y_a^{ij} : modos de vibração obtidos numericamente nas estruturas intactas;

i: grau de liberdade;

j: condição de carregamento dinâmico em particular.

Os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nessa viga em balanço em estudo foram:

- $I_D = 500$: número de elementos na linha inferior da viga em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 5000$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos primeiros modos de vibração para a viga do caso 3, apresentada na Figura A1.31, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao número de nós da viga (500) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação da carga de 500 kN.

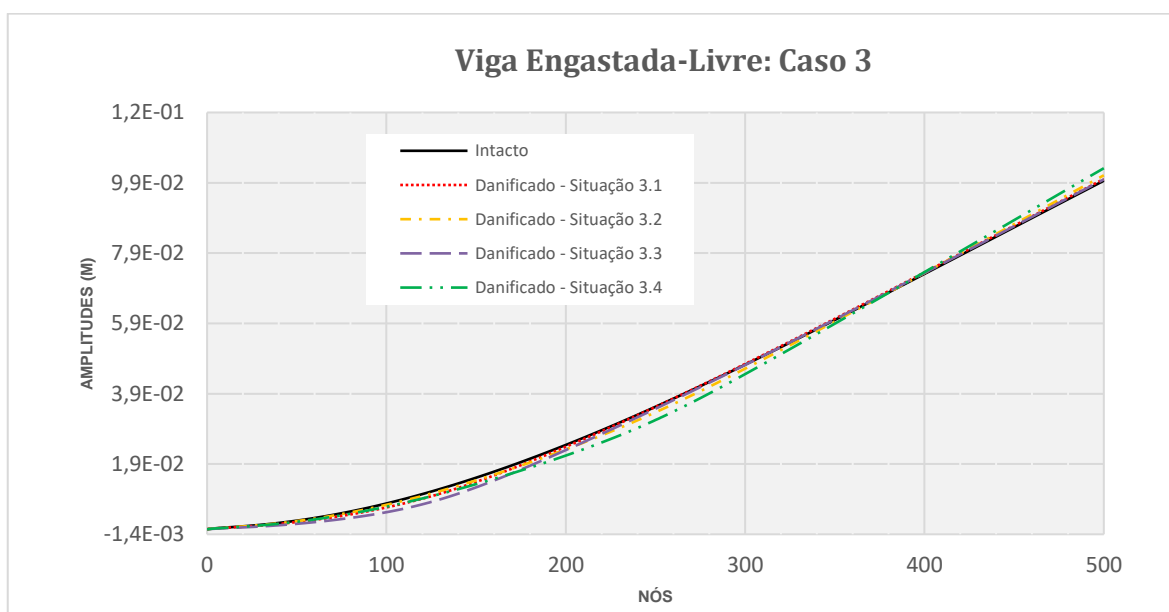


Figura A1.31 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes ao primeiro modo de vibração para a viga em balanço do caso 3 (carga 500 kN)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS[®] por meio do elemento PLANE42 utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, e por se tratar agora da análise dinâmica, foram definidas utilizações de 100 iterações, ou seja, correspondente a um quinto do número de elementos na base da linha da viga. Nesta análise, já foram considerados os valores dos primeiros modos de vibração dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.32, Figura A1.33, Figura A1.34 e Figura A1.35 são mostrados os resultados da solução do problema.

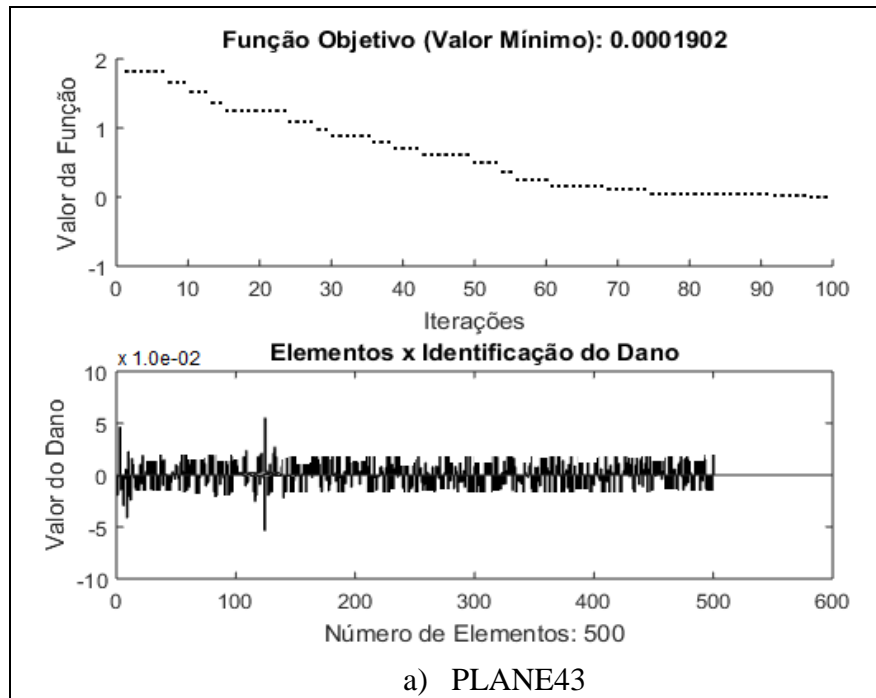


Figura A1.32 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.1 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)

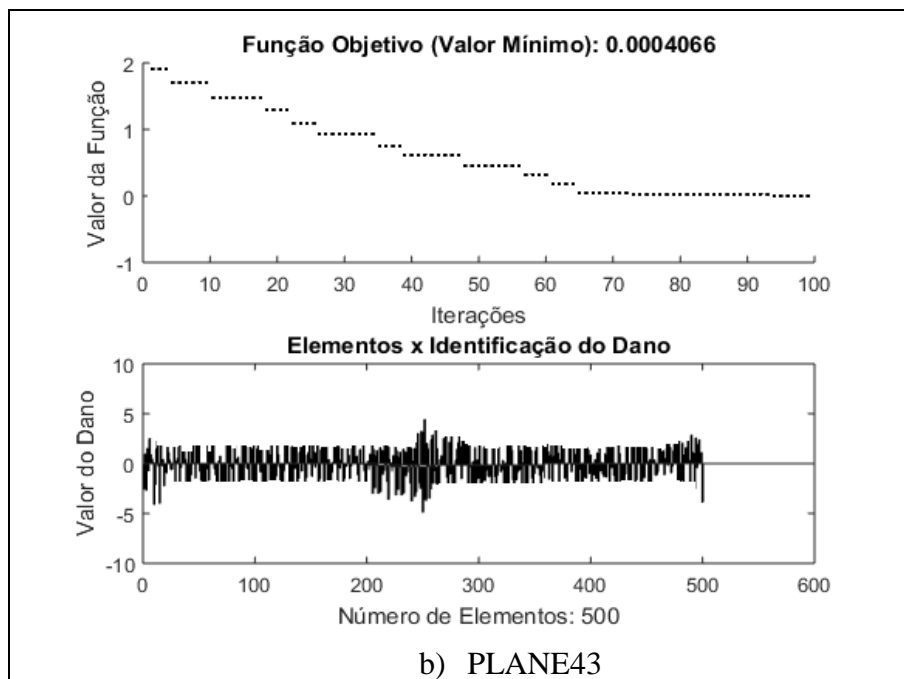
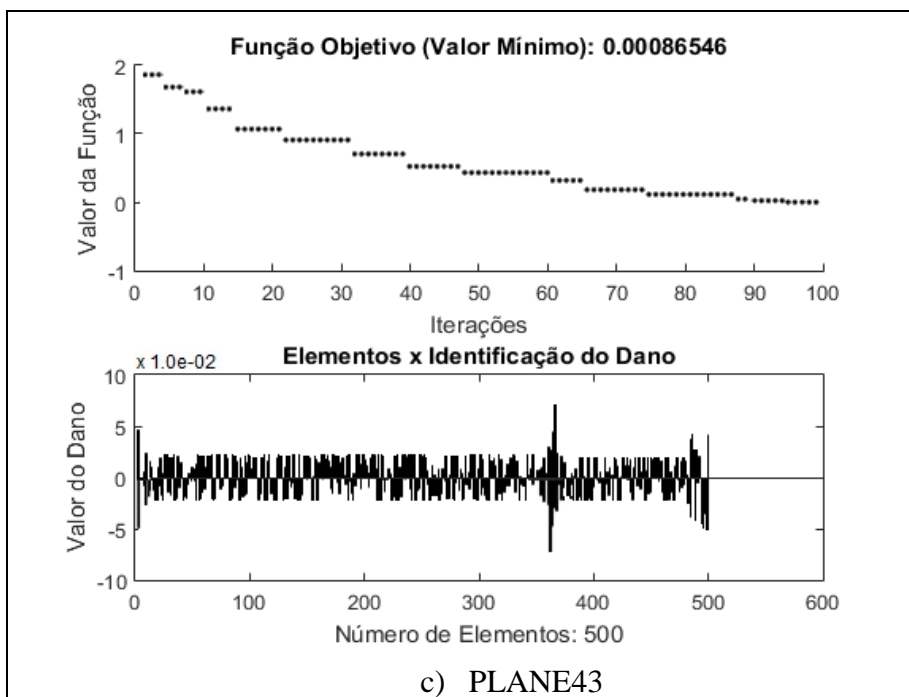
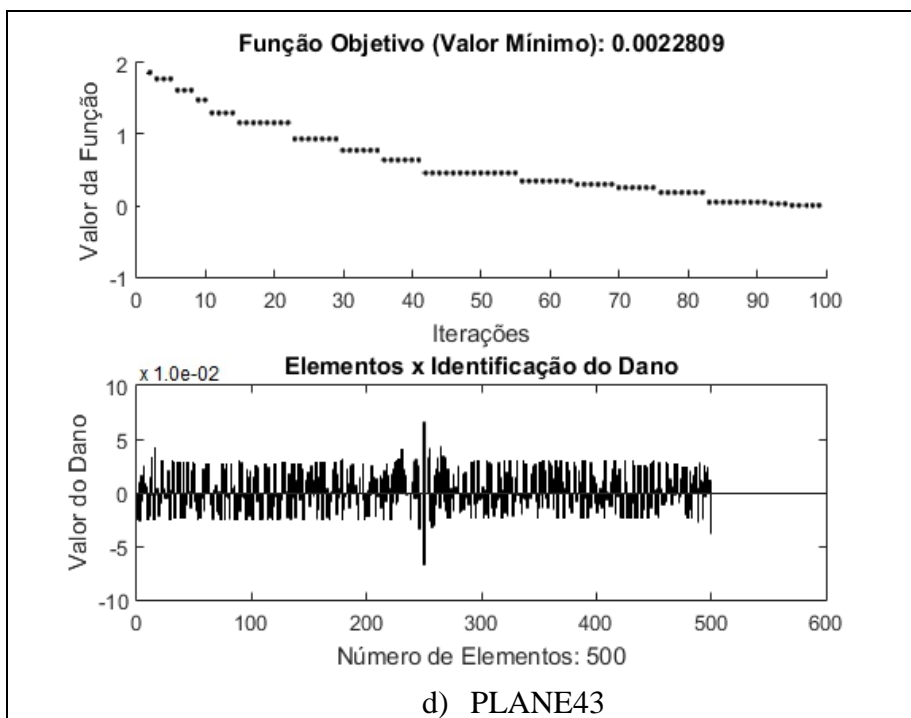


Figura A1.33 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.2 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)



c) PLANE43
 Figura A1.34 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.3 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)



d) PLANE43
 Figura A1.35 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano dinâmica situação 3.4 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.10 a seguir.

Tabela A1.10 – Análise Resumo ED: Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Carga (kN)	Método/ Elementos / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Itera ções	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
3.1			ED /	0.125 = (L/4)	100 ^a	125	≅ 0.05%	0.0001902
3.2	Viga Engastada	≅ 500 kN	PLANE43 /	0.250 = (L/2)	100 ^a	250	≅ 0.05%	0.0004066
3.3	Livre (Caso 3)		Dinâmica	0.125 = (L/4)	100 ^a	375	≅ 0.075%	0.00086546
3.4			Modo de Vibração 1	0.250 = (L/2)	100 ^a	250	≅ 0.075%	0.0022809

Com esses valores mínimos das funções objetivos nessas análises dinâmicas encontradas na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se também dano de aproximadamente 0.05% no elemento 125 e 250 para as situações 3.1 e 3.2, além das perturbações para os demais elementos com variações verificadas devido às sensibilidades envolvidas em análises dinâmicas, com grandezas maiores principalmente na situação 3.2.

Nessa segunda análise de caso de danos os valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração e um número de iterações iguais, mas com a presença de danos maiores da ordem de 0.075% no elemento 375 e 250 para as situações 3.3 e 3.4, com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, também com algumas grandezas maiores de perturbações para os demais elementos, principalmente na situação 3.4 com dano no meio do vão em balanço.

Na análise com o elemento PLANE43, verifica-se tanto no início como ao final da análise de danos algumas distorções com picos anômalos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos ao apoio engastado, para adequação mais realista ao modelo, sugere-se uma análise com um número maior de iterações.

As pequenas dimensões dos danos podem ser a causa das distorções com picos maiores, o que podia acarretar numa distinção insuficiente para a identificação da presença da fissura nas variações nos modos de vibração da viga em balanço, tanto intacta como também danificada, mas que mesmo assim o método apresentou bons resultados e picos evidenciados para o dano.

1.3.2.2 Análise Dinâmica Viga em Balanço: Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas

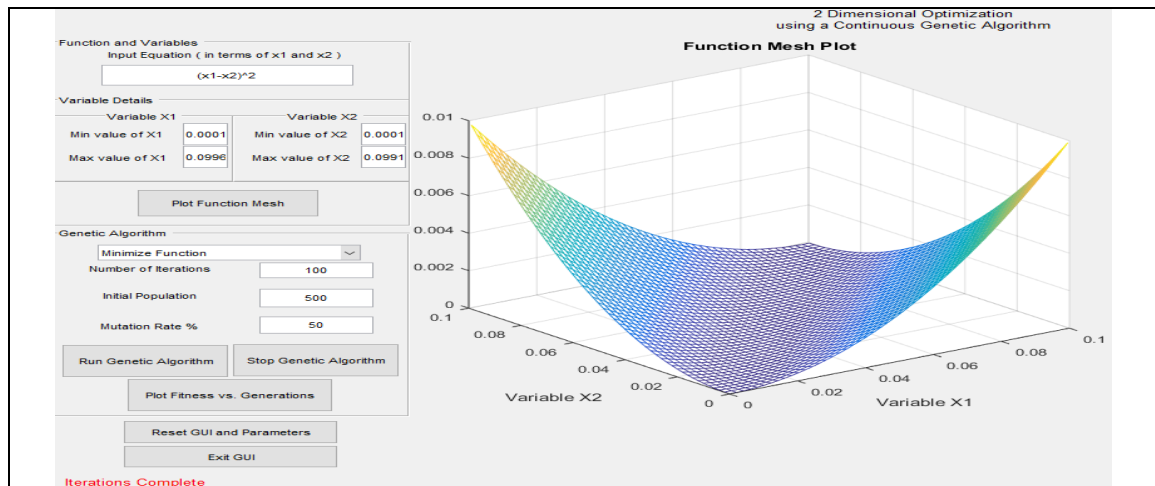
foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dos modos de vibração intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.11 resumo a seguir.

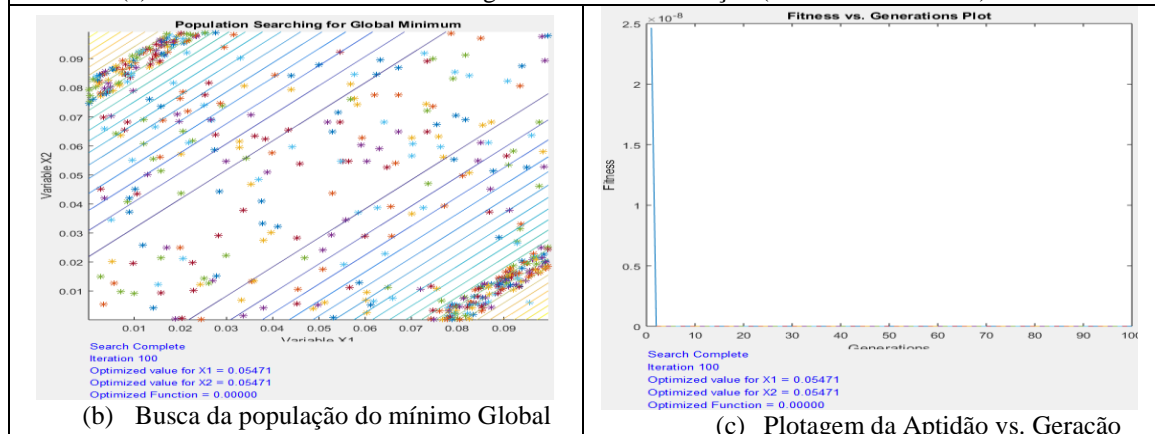
Tabela A1.11 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados

Valores das Variáveis	Intacto 1º Modo	Situação 3.1 ($a'=0,025$; $0,125m = L/4$) 1º Modo	Situação 3.2 ($a'=0,025$; $0,250m = L/2$) 1º Modo	Situação 3.3 ($a'=0,0375$; $0,125m = L/4$) 1º Modo	Situação 3.4 ($a'=0,0375$; $0,250m = L/2$) 1º Modo
max/>	0,099197000000000	0,099628000000000	0,100730000000000	0,099560000000000	0,102750000000000
min/<	0,000119910000000	0,000144740000000	0,000113620000000	0,000078852000000	0,000104810000000

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.36, Figura A1.37, Figura A1.38 e Figura A1.39 bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



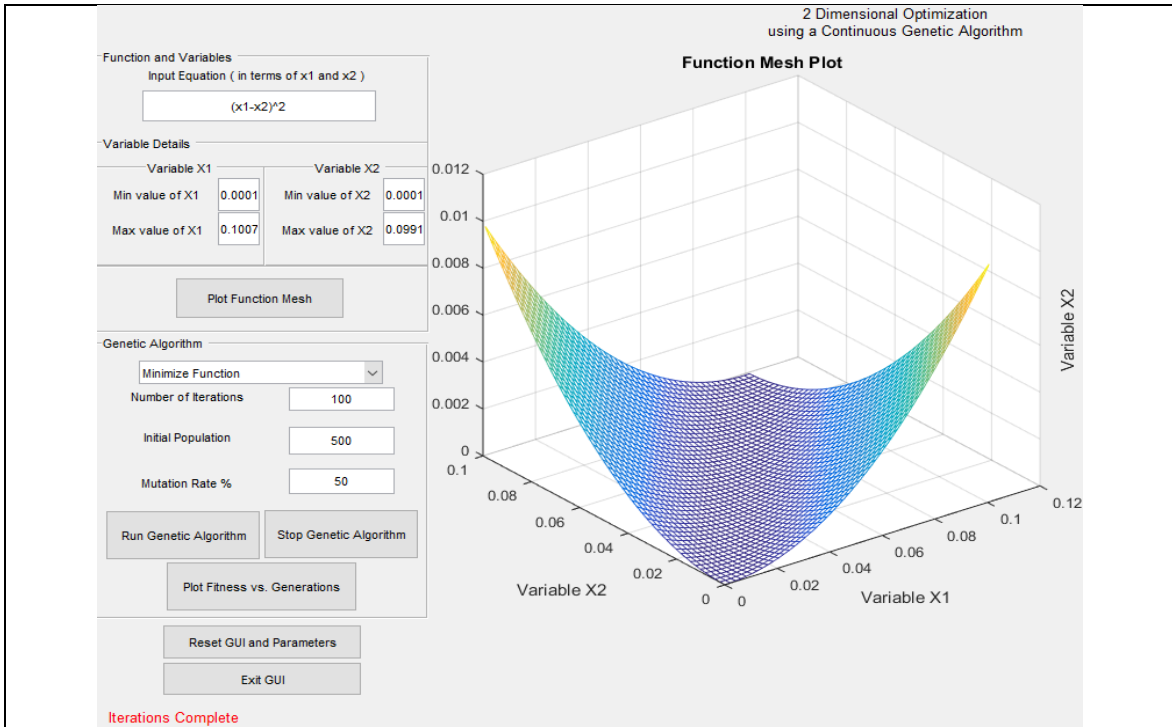
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



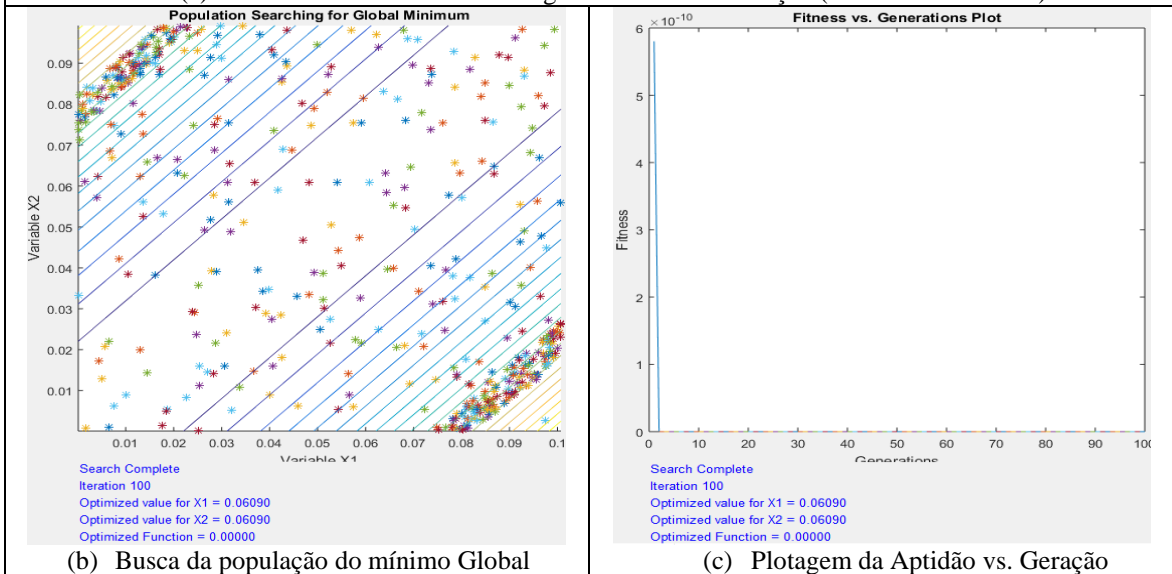
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.36 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.1 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)



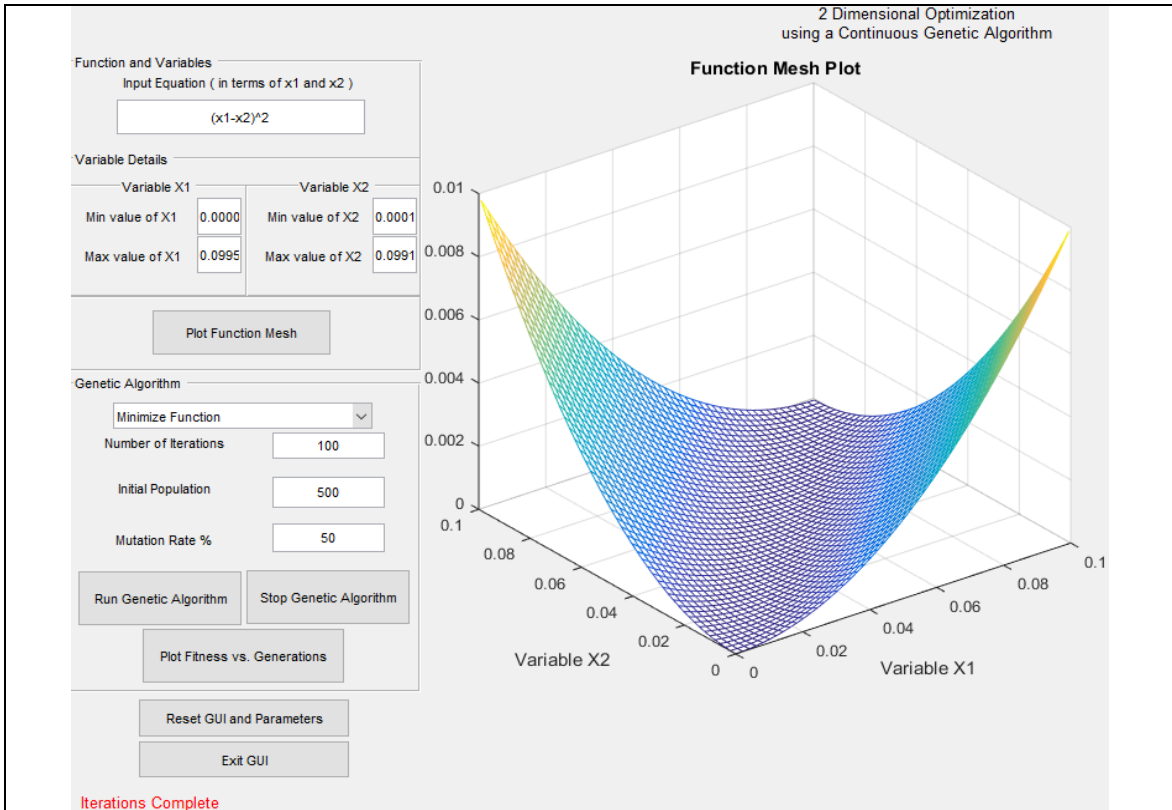
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



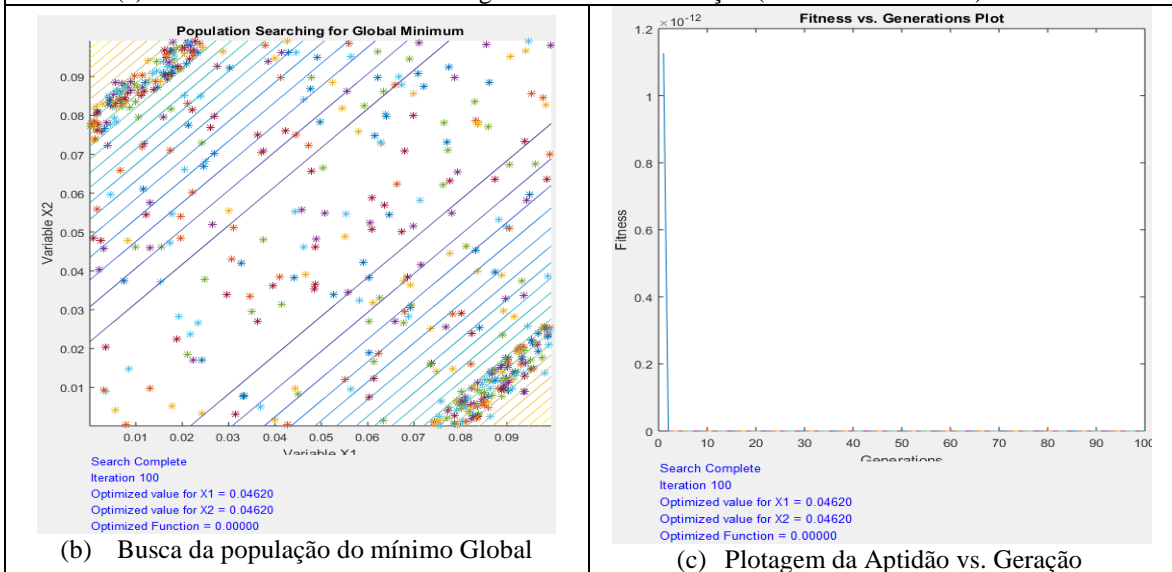
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.37 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.2 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)



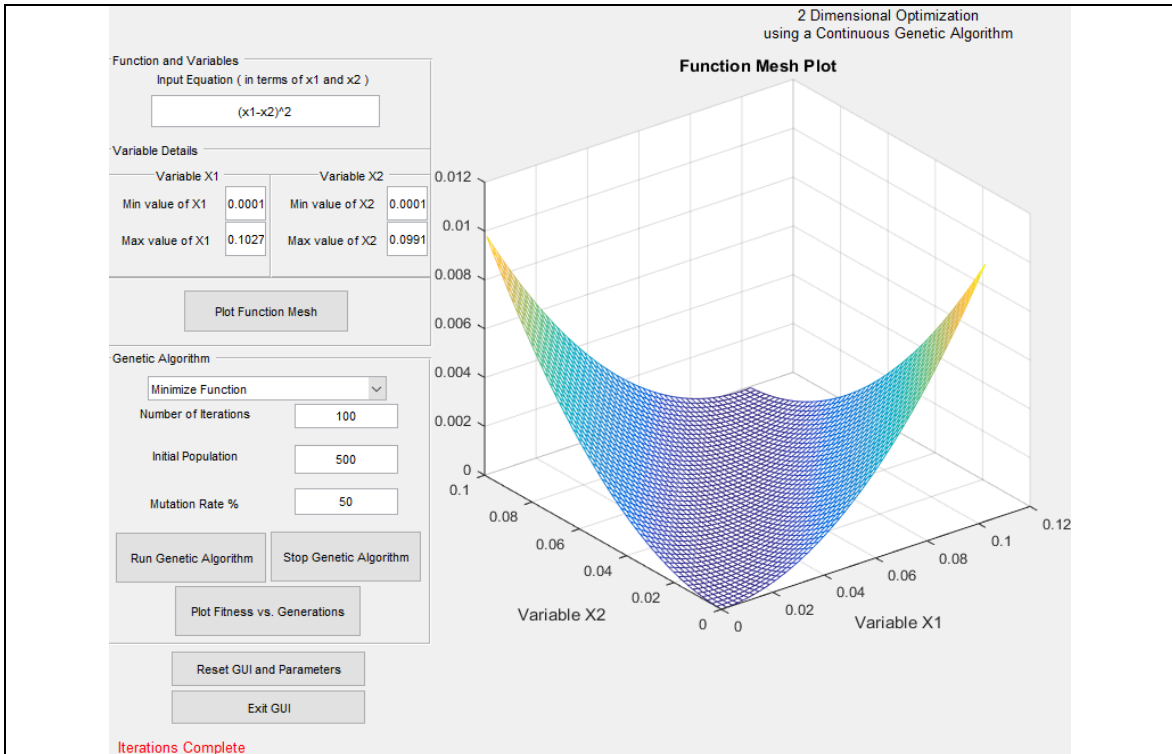
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



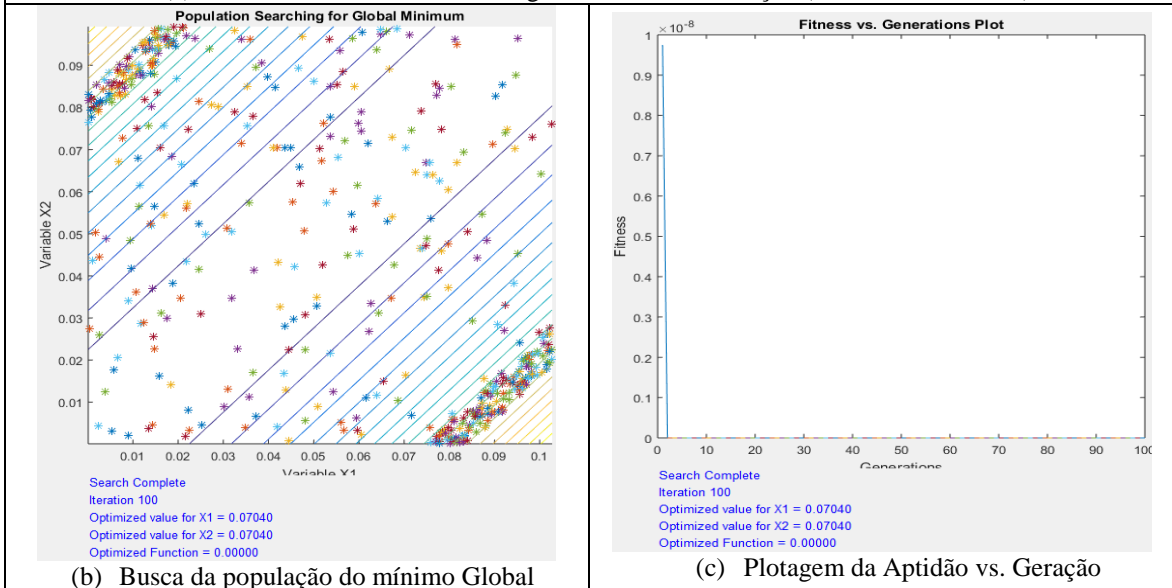
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.38 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.3 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.39 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 3.4 (100 iterações): Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.12 a seguir.

Tabela A1.12 – Análise Resumo AG: Viga Engastada-Livre Caso 3 carga 500 kN

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Carga (kN)	Método/ Elementos / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Itera ções	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
3.1				0.125 = (L/4)	100 ^a	125	$\cong 2.4e-06\%$ Correto $\cong 0.05\%$	0.05471
3.2			AG / PLANE43	0.250 = (L/2)	100 ^a	250	$\cong 5.8e-08\%$ Correto $\cong 0.05\%$	0.06090
3.3	Viga Engastada Livre (Caso 3)	$\cong 500\text{ kN}$	/ Dinâmica Modo de Vibração 1	0.125 = (L/4)	100 ^a	375	$\cong 1.16e-10\%$ Correto $\cong 0.075\%$	0.04620
3.4				0.250 = (L/2)	100 ^a	250	$\cong 0.98e-06\%$ Correto $\cong 0.075\%$	0.07040

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do ED, com análises na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, encontrando-se algumas perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global devido principalmente às sensibilidades maiores envolvidas em análises dinâmicas.

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG e com essa sensibilidade maior advinda de análises dinâmicas e com grandezas maiores de danos poderiam contribuir os resultados ficassem melhores em relação ao problema proposto.

1.3.3 Caso 4 - Análise Numérica Estática: Viga Biengastada

Já numa terceira análise, agora de uma viga em concreto armado biengastada, com carregamento pontual no meio do vão, bem como a representação do seu comportamento no modelo numérico conforme representado na Figura A1.40, do trabalho de Silva (2011).

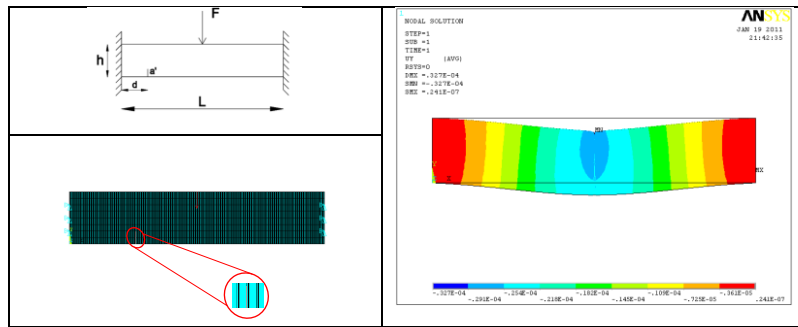


Figura A1.40 - Análise Numérica de Deslocamento Estático (Deformada): Viga Biengastada (Silva, 2011)

As análises de otimização de cada método para o caso 4 estático são apresentadas a seguir.

1.3.3.1 Análise Estática Viga Biengastada: Evolução Diferencial (ED)

Serão apresentados agora para a viga biengastada os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial com números constantes de elementos (denominado dentro do método de número de parâmetros da função objetivo, ou mesmo de variáveis envolvidas ou até mesmo de dimensionalidade), onde foram utilizados como resultados numéricos os deslocamentos estáticos. Os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos na viga biengastada em estudo foram:

- $I_D = 500$: número de elementos na linha inferior da viga em estudo (variáveis);
- $I_{NP} = 10.I_D \rightarrow I_{NP} = 5000$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 4, apresentada na Figura A1.41, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao número de nós da viga (500) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 500 kN.

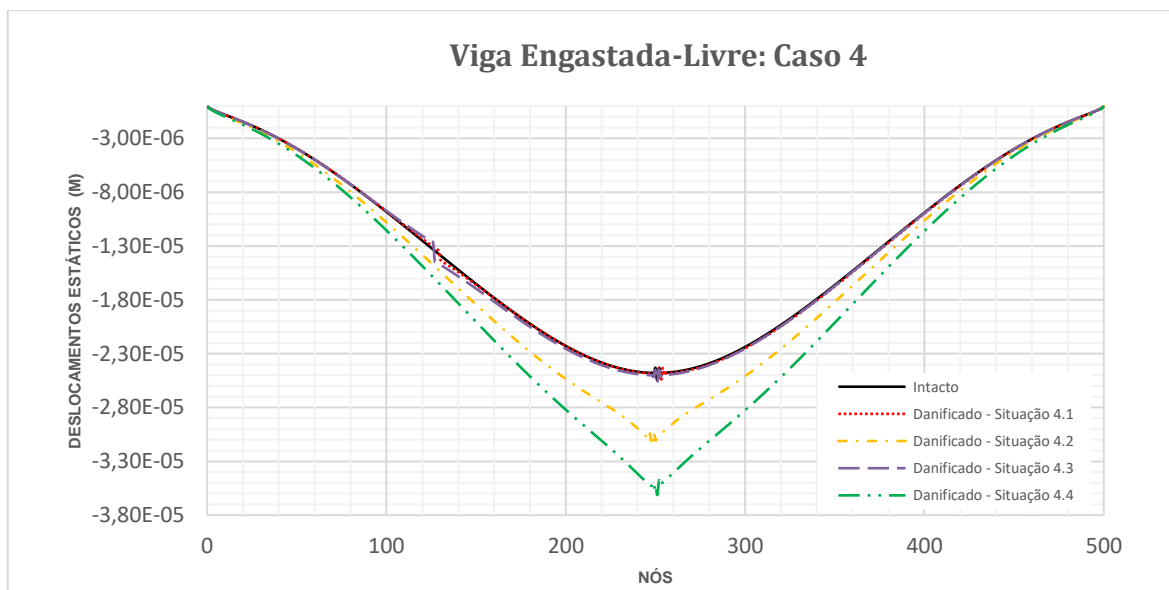
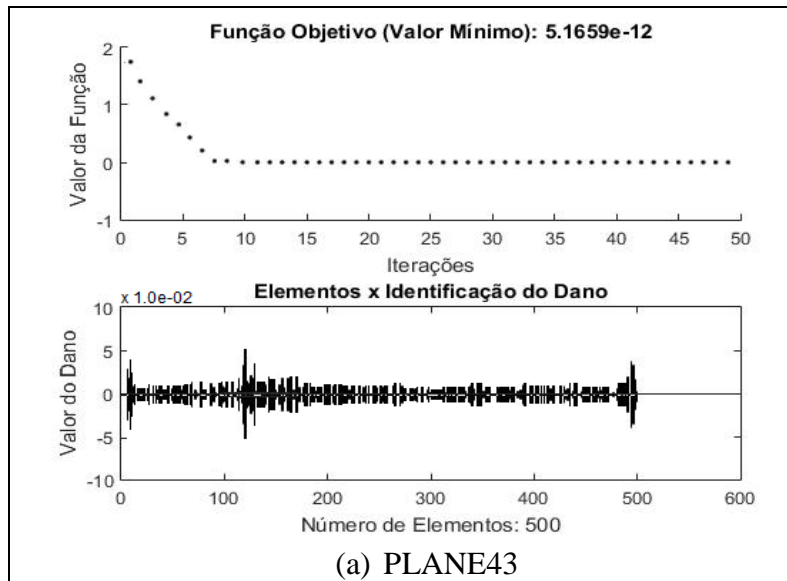
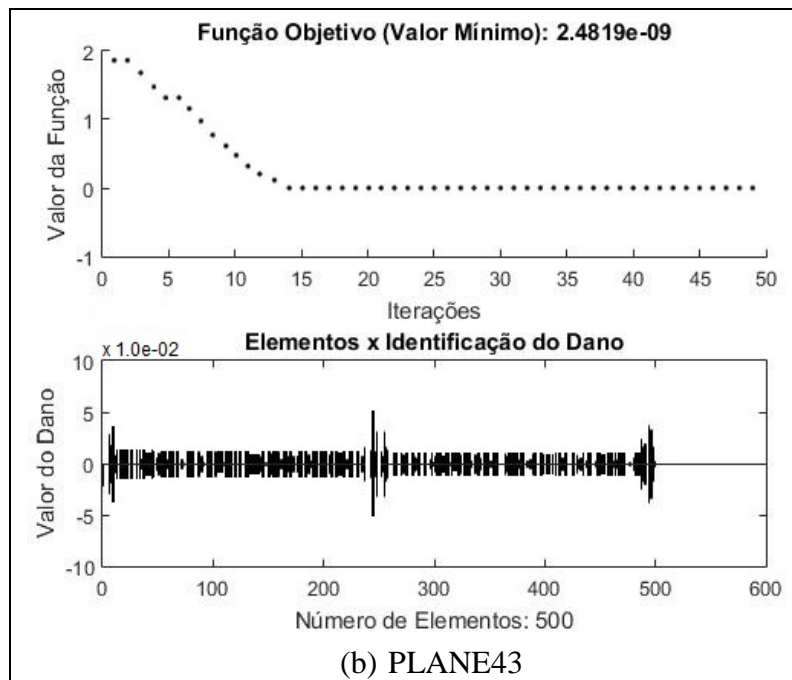


Figura A1.41 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga biengastada do caso 4 (carga 500 kN)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS[®] por meio do elemento PLANE42 utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 50 iterações, ou seja, dez vezes menor que o número de elementos na base da linha da viga. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.42, Figura A1.43, Figura A1.44 e Figura A1.45 são mostrados os resultados da solução do problema.



(a) PLANE43
 Figura A1.42 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.1 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)



(b) PLANE43
 Figura A1.43 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.2 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)

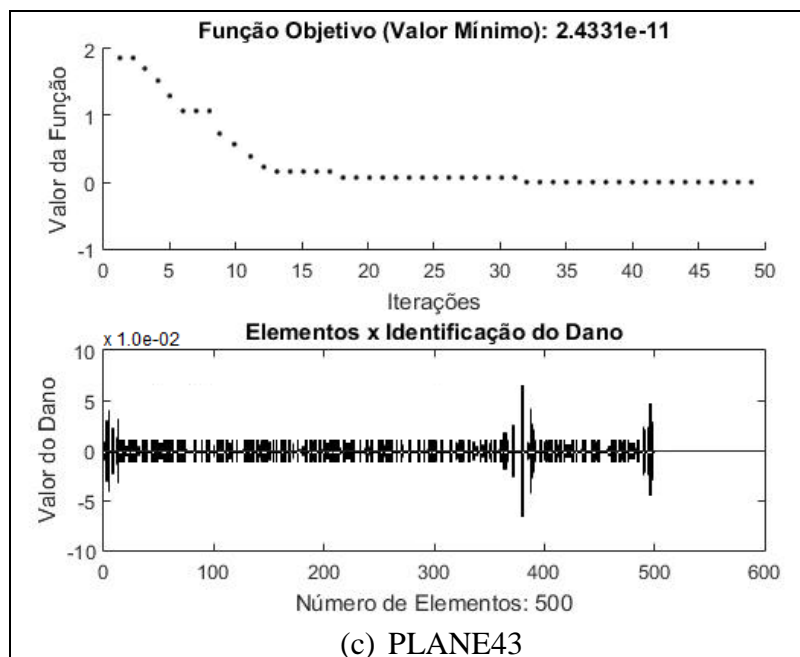


Figura A1.44 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.3 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)

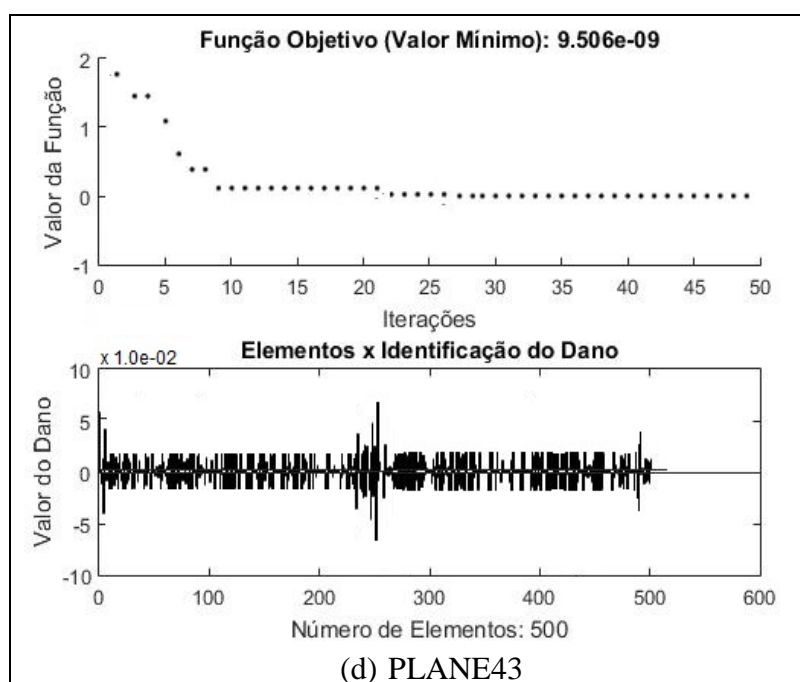


Figura A1.45 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 4.4 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.13 a seguir.

Tabela A1.13 – Análise Resumo ED: Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Car ga (kN)	Método/ Elementos / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
4.1	Viga Biengastada (Caso 4)	≅500kN	ED	0.125 = (L/4)	50 ^a	125	≅0.05%	5.1659e-12
4.2			/	0.250 = (L/2)	50 ^a	250	≅0.05%	2.4819e-09
4.3			PLANE43	0.125 = (L/4)	50 ^a	375	≅0.075%	2.4331e-11
4.4			Estática	0.250 = (L/2)	50 ^a	250	≅0.075%	9.506e-09

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na quinquagésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de aproximadamente 0.05% no elemento 125 e 250 para as situações 4.1 e 4.2, e algumas perturbações para os demais elementos, principalmente quando se aproxima do local danificado mas ainda assim com os picos do local do dano bem definidos.

Já os valores mínimos das funções objetivos encontradas na quinquagésima iteração, com percentual de danos de 0.075% no elemento 375 e 250 para as situações 4.3 e 4.4, com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, além de mais algumas pequenas perturbações para os demais elementos, principalmente nas proximidades dos engastes mas com escalas menores em termos de picos do que a verificação da viga em balanço.

Na análise com o elemento PLANE43, no início e fim, próximos aos apoios, na análise de danos verifica-se picos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios engastados, para adequação mais realista ao modelo, sugerindo diminuir a mesma com a utilização de um número maior de iterações.

1.3.3.2 Análise Estática Viga Biengastada: Algoritmos Genéticos (AG)

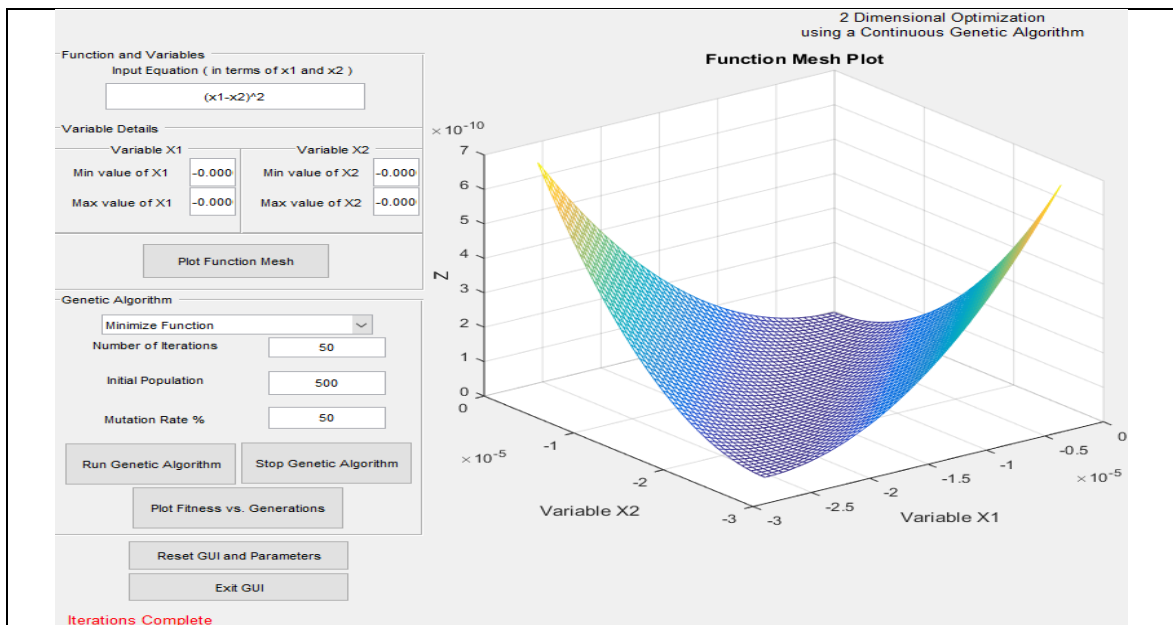
A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.14 resumo a seguir.

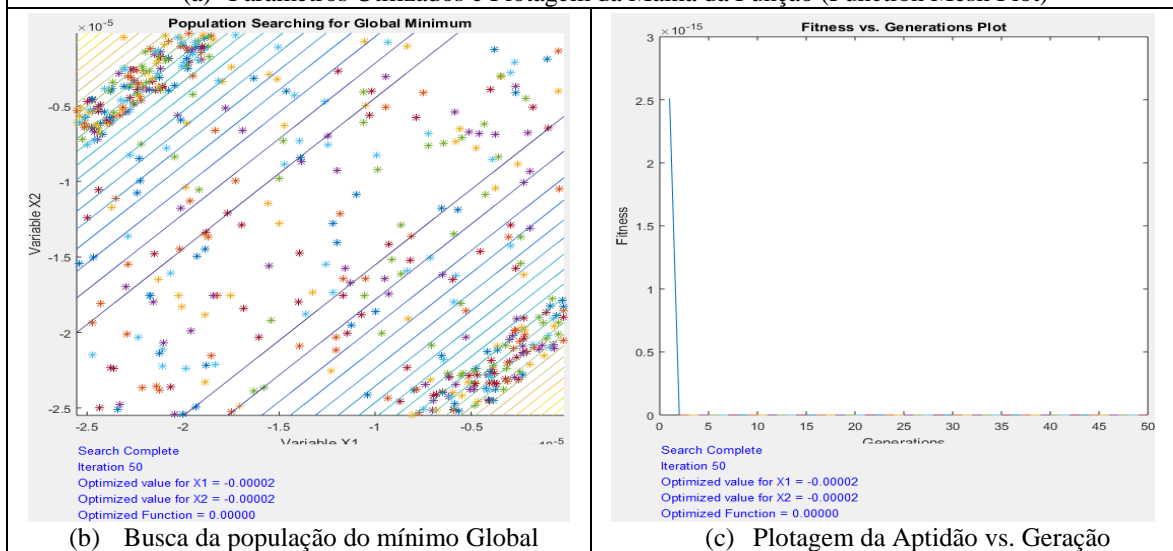
Tabela A1.14 - Mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificados

Valores das Variáveis	Intacto	Situação 4.1 ($a'=0,025$; $0,125m = L/4$)	Situação 4.2 ($a'=0,025$; $0,250m = L/2$)	Situação 4.3 ($a'=0,025$; $0,250m = L/2$)	Situação 4.4 ($a'=0,0375$; $0,250m = L/2$)
max/>	-0,000000172760000	-0,000000172240000	-0,000000191070000	-0,000000191070000	-0,000000213000000
min/<	-0,000025494000000	-0,000025541000000	-0,000031549000000	-0,000031549000000	-0,000036127000000

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.46, Figura A1.47, Figura A1.48 e Figura A1.49 bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



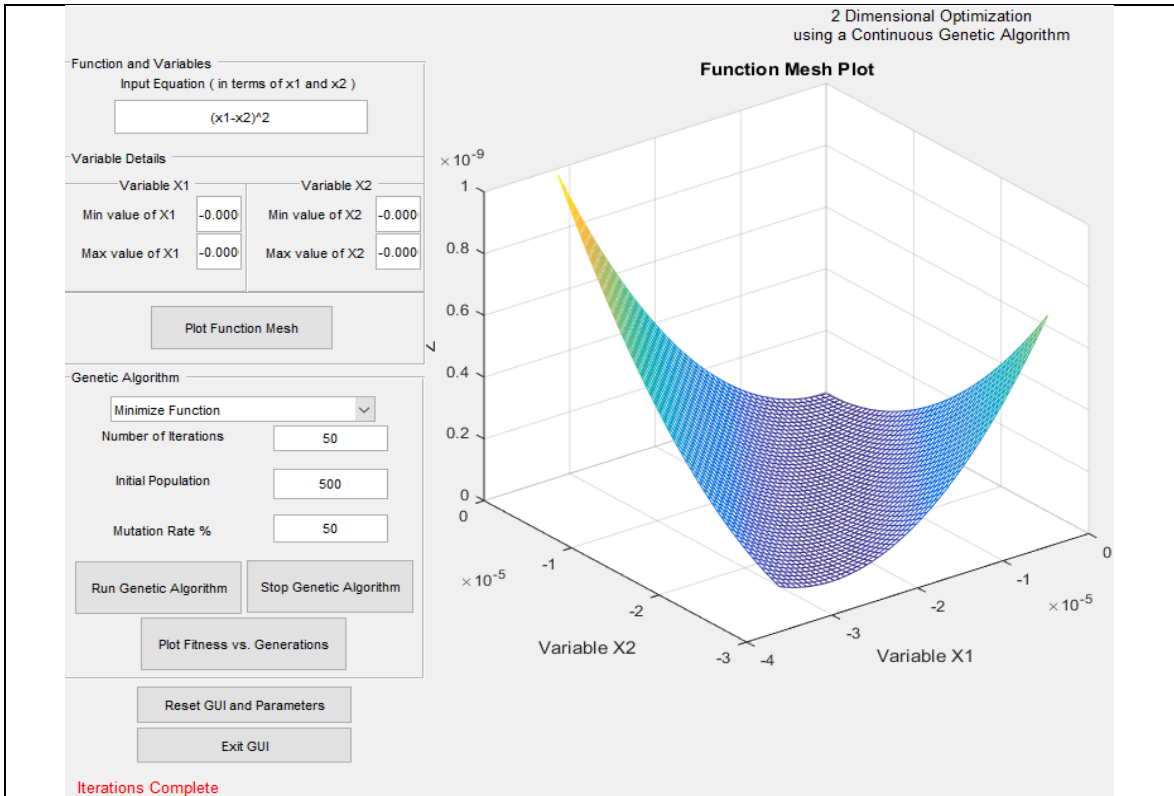
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



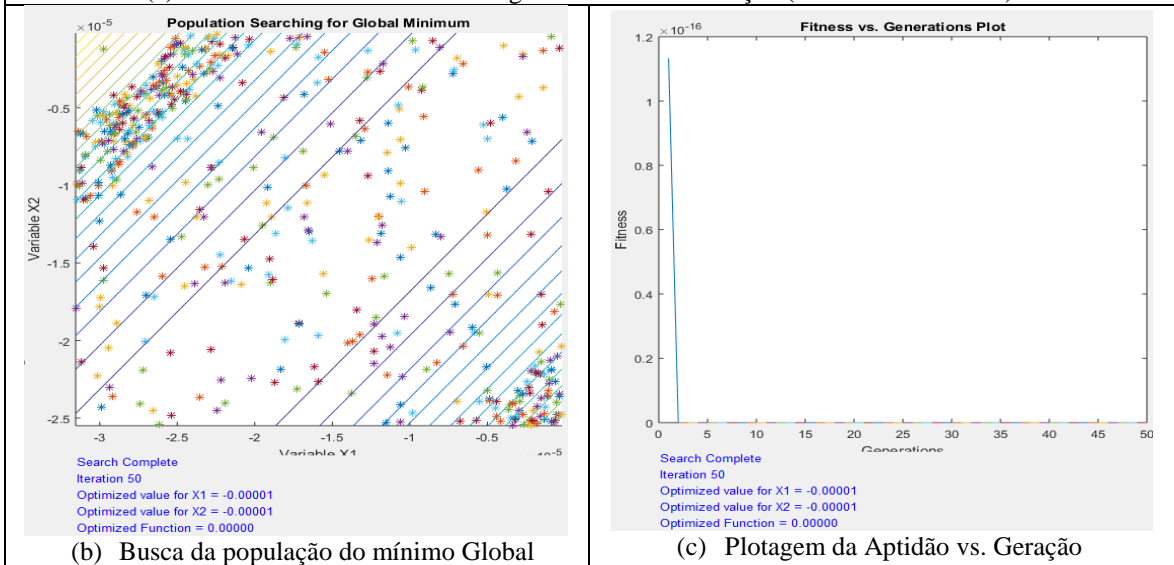
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.46 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.1 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)



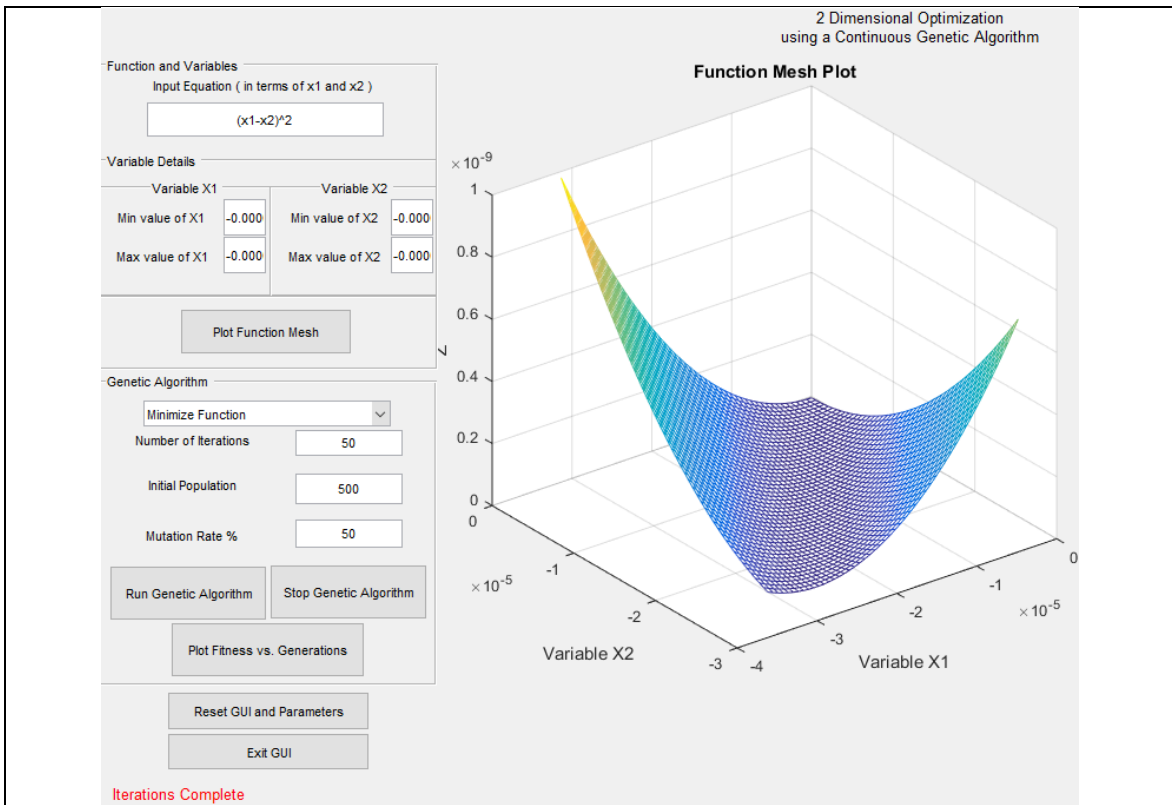
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



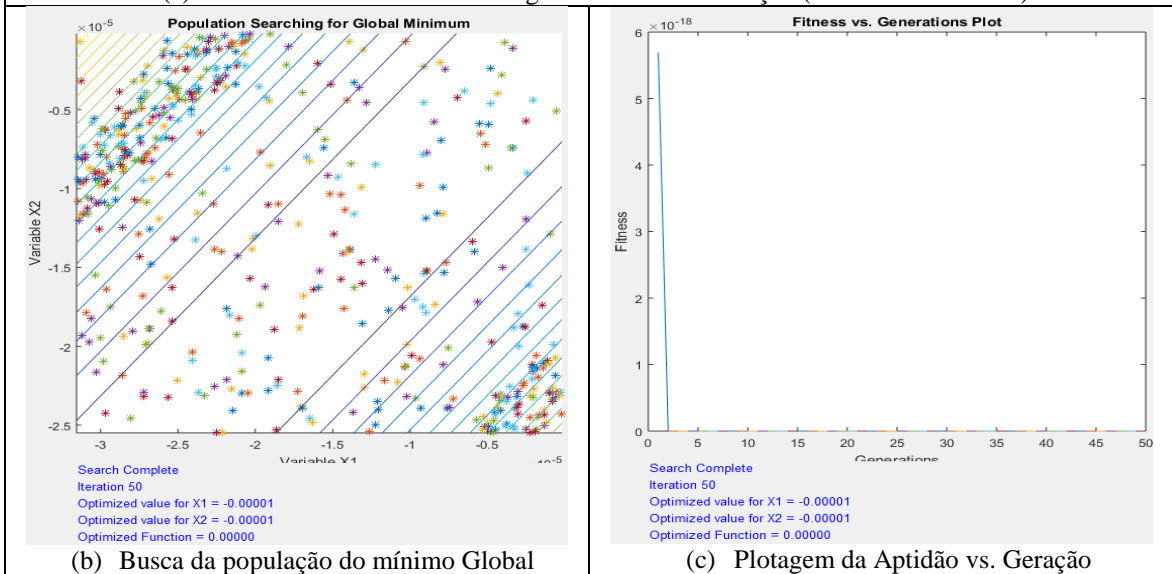
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.47 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.2 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)



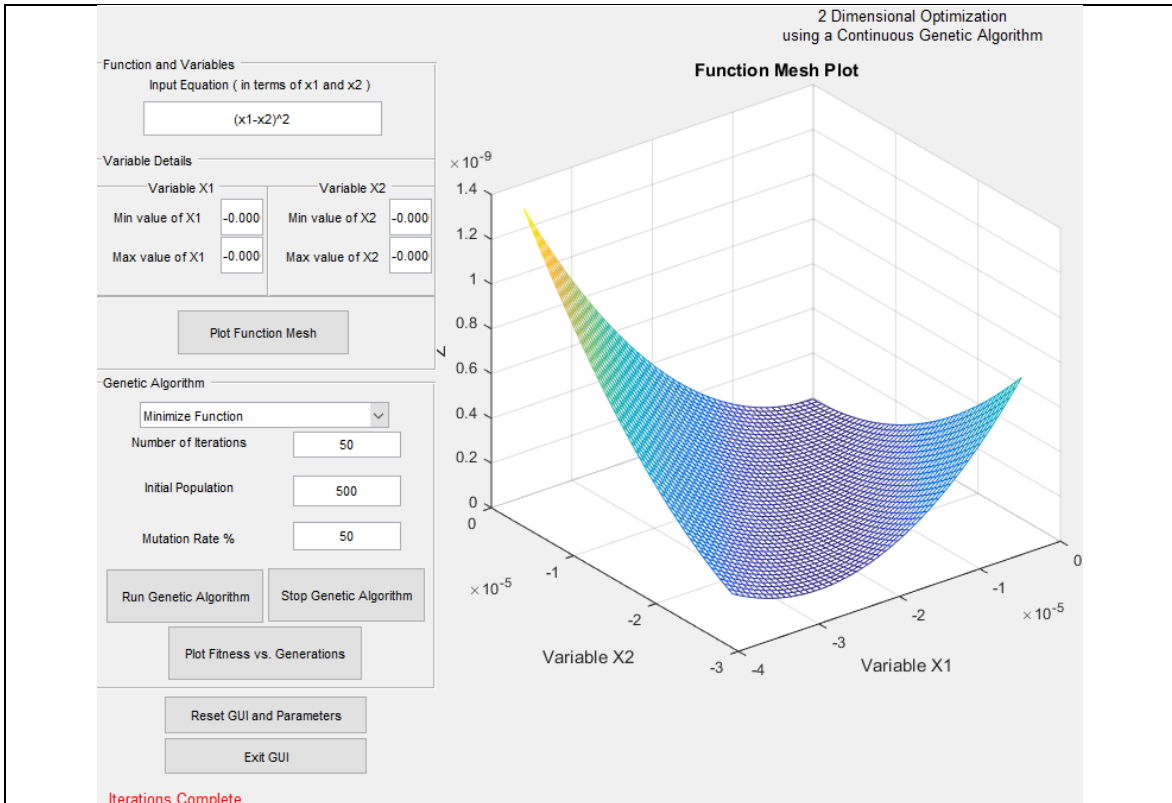
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



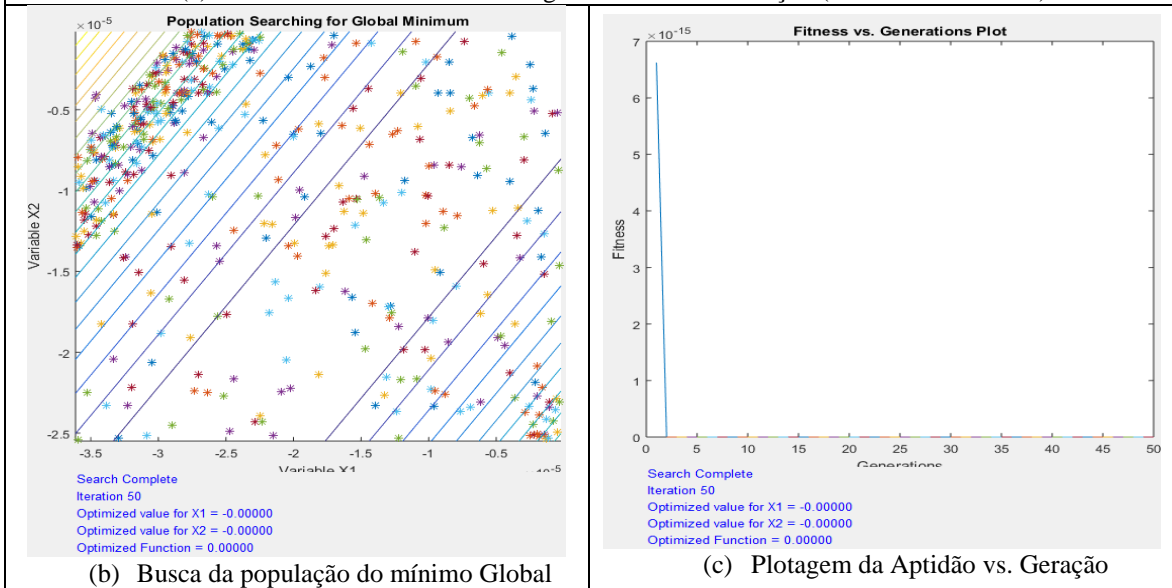
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.48 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.3 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste direito – $0,125=L/4$)



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.49 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 4.4 (50 iterações): Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.15 a seguir.

Tabela A1.15 – Análise Resumo AG: Viga Biengastada Caso 4 carga 500 kN

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Car ga (kN)	Método/ Elemento / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Itera ções	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
4.1				0.125 = (L/4)	50 ^a	125	$\cong 2.5e-13\%$ Correto $\cong 0.05\%$	-0.00002
4.2	Viga Biengastada (Casos 4.1 ao 4.4)	$\cong 500 \text{ kN}$	AG / PLANE43	0.250 = (L/2)	50 ^a	250	$\cong 1.16e-14\%$ Correto $\cong 0.05\%$	-0.00001
4.3			/ Estática	0.125 = (L/4)	50 ^a	375	$\cong 5.7e-16\%$ Correto $\cong 0.075\%$	-0.00001
4.4				0.250 = (L/2)	50 ^a	250	$\cong 6.6e-13\%$ Correto $\cong 0.075\%$	-0.00000

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do ED, com análises na quinquagésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, encontrando-se algumas perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global concentradas geralmente no espaço de busca dos valores da variável x2 principalmente do caso 4.4.

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG.

1.3.4 Caso 5 - Análise Numérica Dinâmica: Viga em Biengastada

Na análise do caso 5, verificou-se o comportamento dinâmico da viga biengastada, onde são apresentados os seus comportamentos no modelo numérico através dos seus modos de vibração e também a análise gráfica desses resultados obtidos na Figura A1.50.

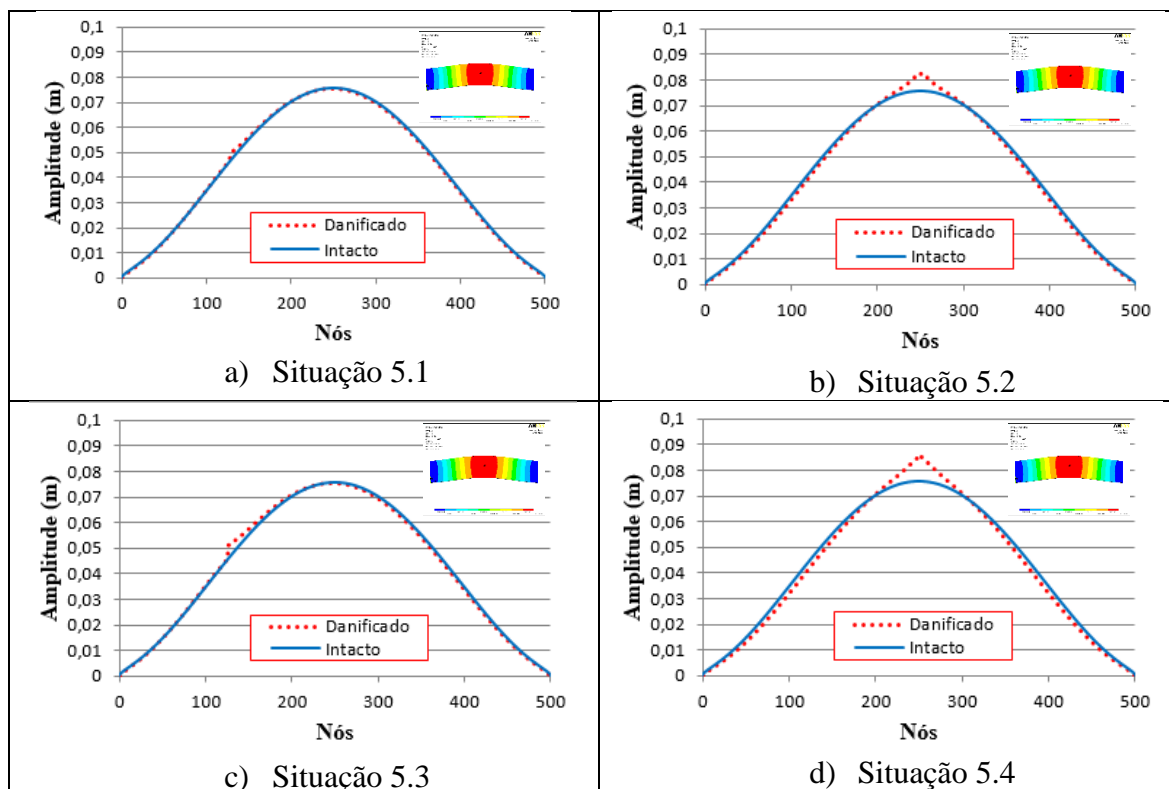


Figura A1.50 - Análise Gráfica e Numérica Dinâmica do Comportamento do Primeiro Modo de Vibração da Viga Biengastada em cada situação de dano (Silva, 2011)

As análises de otimização de cada método para o caso 5 são apresentadas a seguir.

1.3.4.1 Análise Dinâmica Viga Biengastada: Evolução Diferencial (ED)

Serão apresentados agora para a viga biengastada os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial com números constantes de elementos (denominado dentro do método de número de parâmetros da função objetivo, ou mesmo de variáveis envolvidas ou até mesmo de dimensionalidade), onde foram utilizados como resultados numéricos os primeiros modos de vibração. Os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos na viga biengastada em estudo foram:

- $I_D = 500$: número de elementos na linha inferior da viga em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10.I_D \rightarrow I_NP = 5000$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 5, apresentada na Figura A1.51, onde: o eixo x (abscissas) corresponde

ao número de nós da viga (500) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 500 kN.

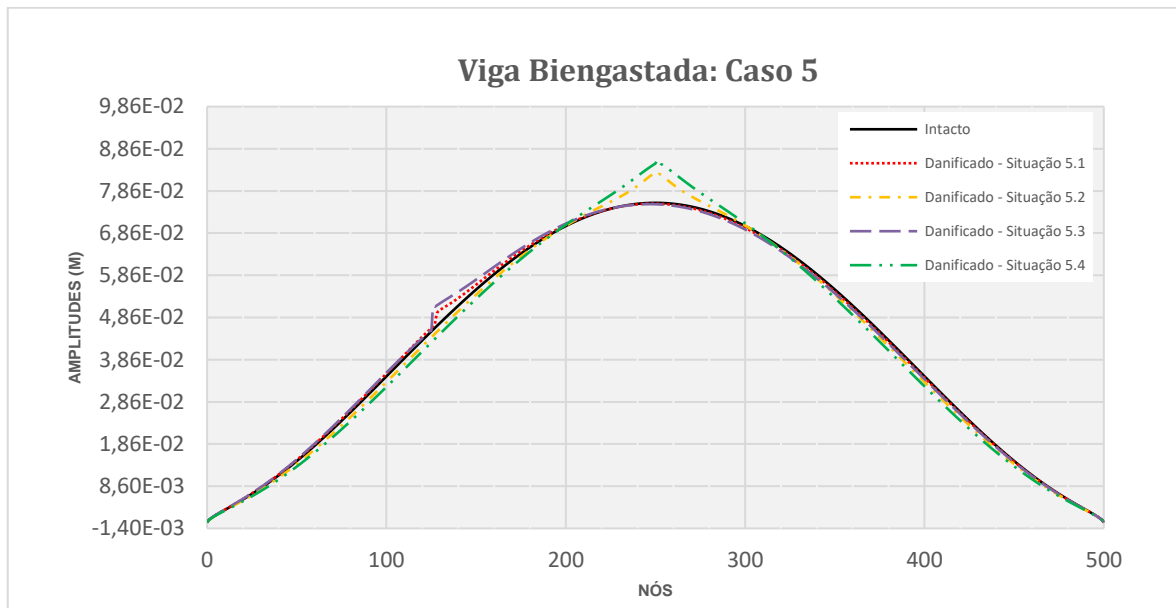


Figura A1.51 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes ao primeiro modo de vibração para a viga biengastada do caso 5 (carga 500 kN)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS[®] por meio do elemento PLANE42 utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações, ou seja, um quinto do número de elementos na base da linha da viga. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos modos de vibração dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.52, Figura A1.53, Figura A1.54 e Figura A1.55 são mostrados os resultados da solução do problema.

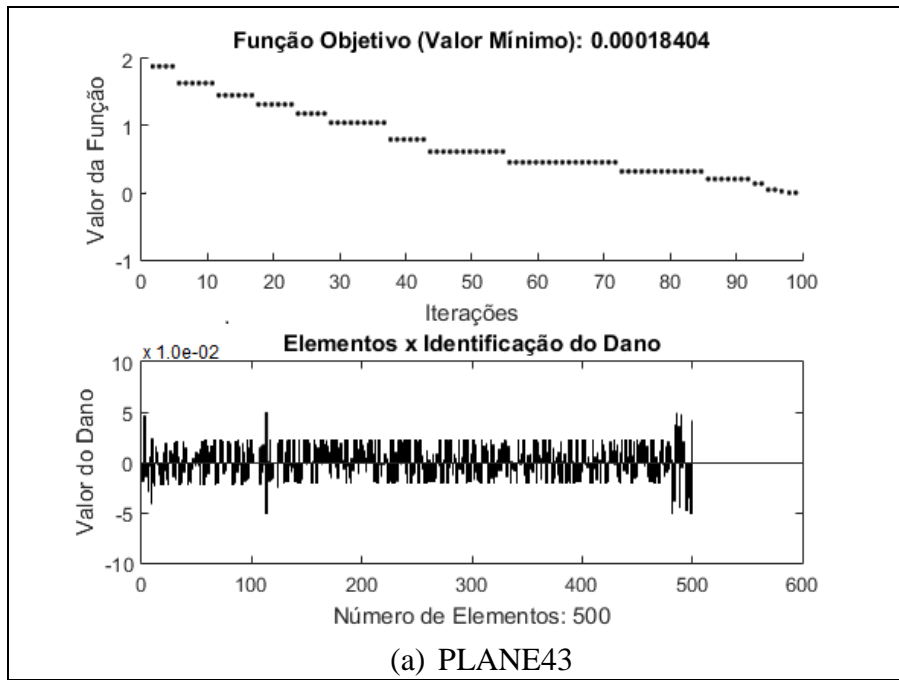


Figura A1.52 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.1 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)

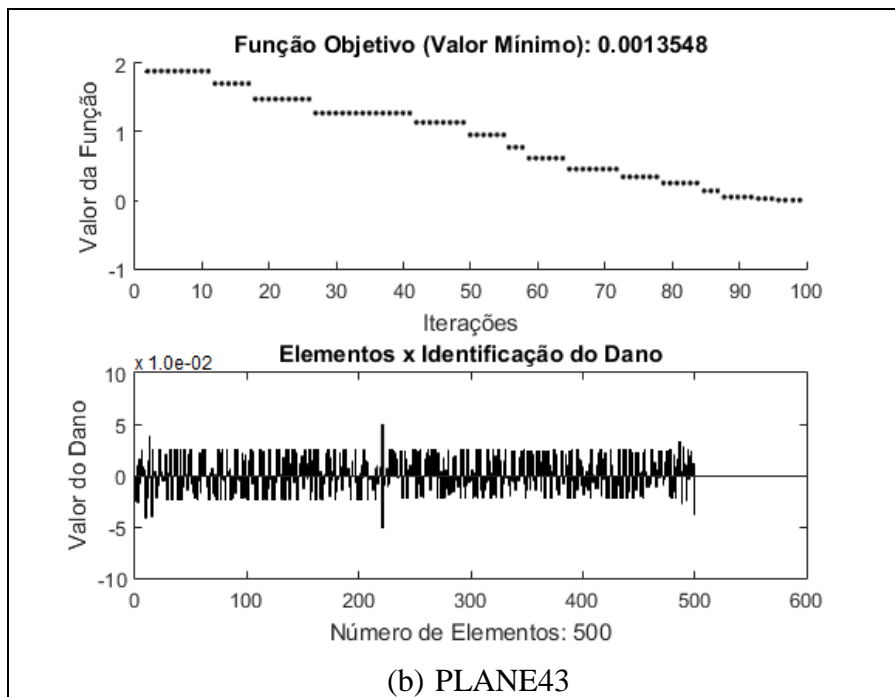


Figura A1.53 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.2 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)

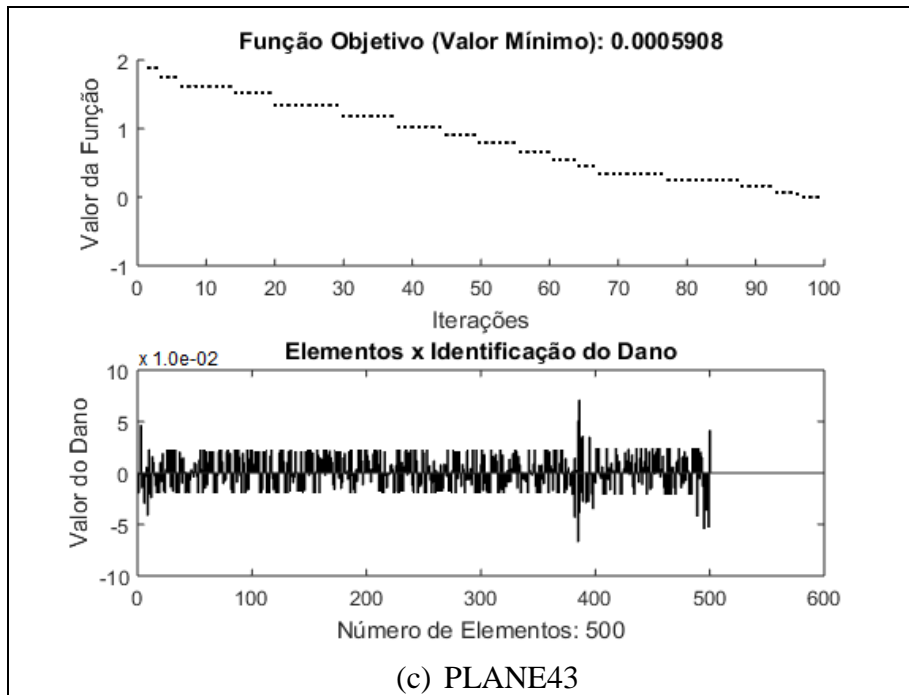


Figura A1.54 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.3 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)

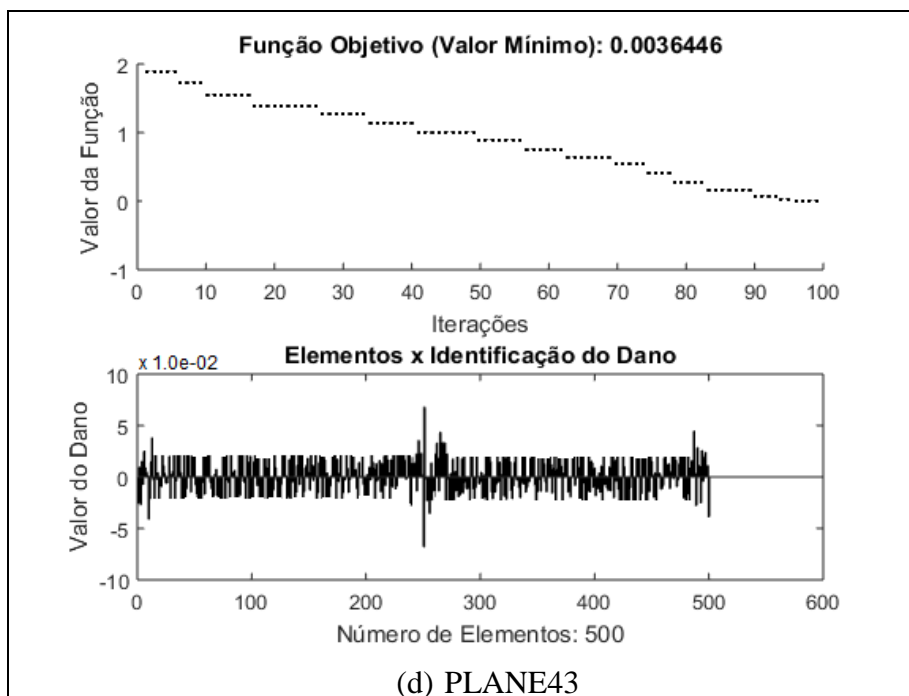


Figura A1.55 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 5.4 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.16 a seguir.

Tabela A1.16 – Análise Resumo ED: Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Car ga (kN)	Elementos / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
5.1			PLANE43	0.125 = (L/4)	100 ^a	125	≅ 0.05%	0.00018404
5.2	Viga Biengastada (Caso 5)	≅ 500 kN	/	0.250 = (L/2)	100 ^a	250	≅ 0.05%	0.0013548
5.3			Dinâmico	0.125 = (L/4)	100 ^a	375	≅ 0.075%	0.0005908
5.4			Modo de Vibração 1	0.250 = (L/2)	100 ^a	250	≅ 0.075%	0.0036446

Observa-se nas situações 5.2, 5.3 e 5.4 uma dificuldade maior para a convergência até alcançar a centésima iteração, o que não ocorreu na situação 5.1, tudo isso atesta as sensibilidades envolvidas em análises dinâmicas.

Encontrou-se na centésima iteração os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, com a identificação de dano de aproximadamente 0.05% no elemento 125 e 250 para as situações 5.1 e 5.2, e algumas perturbações para os demais elementos, além dos valores mínimos das funções objetivos com grandezas coerentes.

Já os valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração, com danos identificados e quantificados de 0.075% no elemento 375 e 250 para as situações 5.3 e 5.4, com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, além de mais algumas pequenas perturbações para os demais elementos, principalmente nas proximidades dos engastes.

Distorções foram geradas provavelmente dada a sensibilidade das análises dinâmicas por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios engastados e ao longo do comprimento do elemento, com grandezas relevantes, onde para uma adequação mais realista ao modelo, com a utilização de um número maior de iterações ou mesmo de um número menor de elementos poderia se minimizar esses resíduos na análise com o elemento PLANE43.

1.3.4.2 Análise Dinâmica Viga Biengastada: Algoritmos Genéticos (AG)

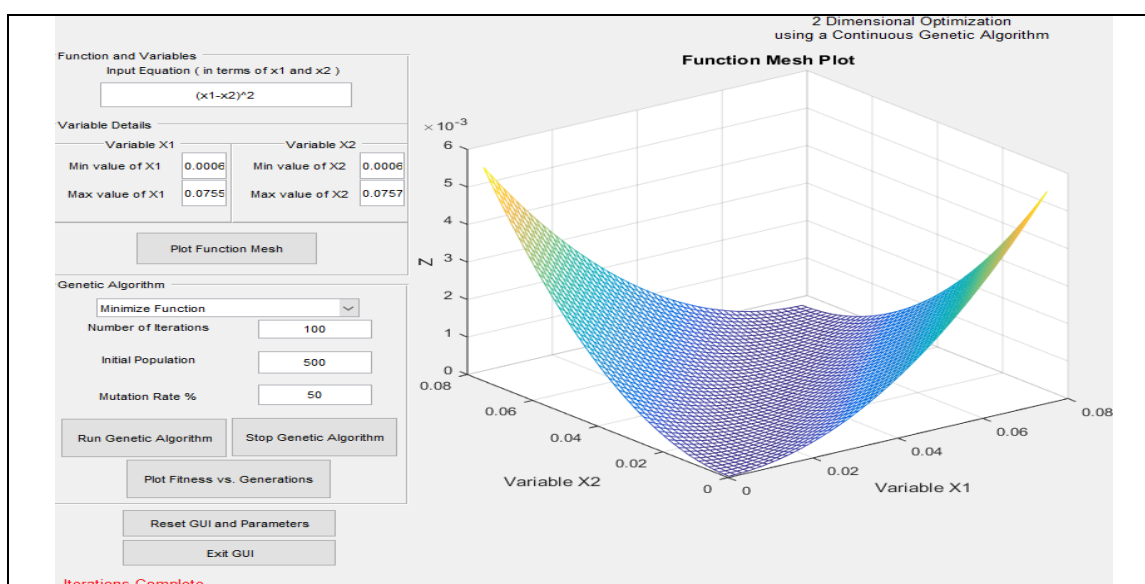
A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dos modos de vibração intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.17 resumo a seguir.

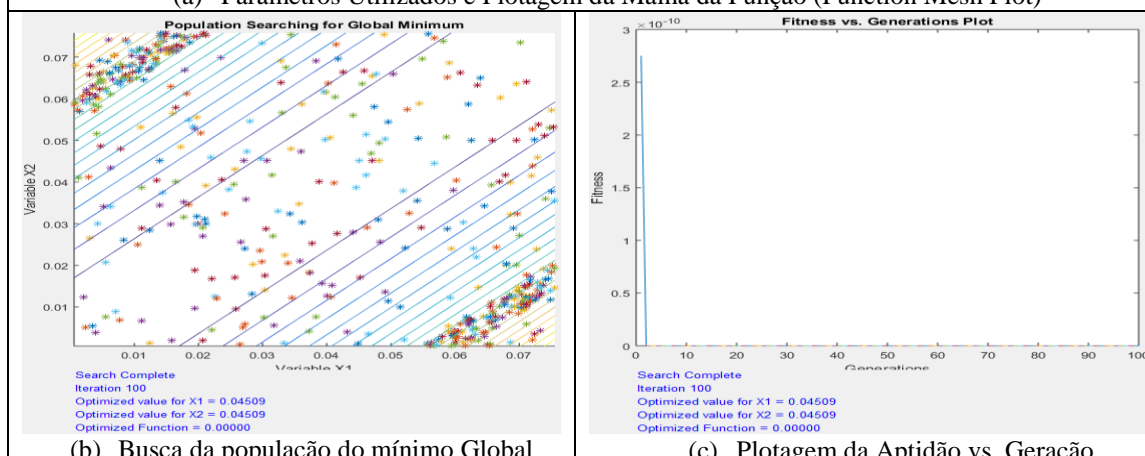
Tabela A1.17 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados

Valores das Variáveis	Intacto 1º Modo	Situação 5.1 ($a'=0,025$; $0,125m = L/4$) 1º Modo	Situação 5.2 ($a'=0,025$; $0,250m = L/2$) 1º Modo	Situação 5.3 ($a'=0,0375$; $0,125m = L/4$) 1º Modo	Situação 5.4 ($a'=0,0375$; $0,250m = L/2$) 1º Modo
max/>	0,075776000000000	0,075585000000000	0,082626000000000	0,075478000000000	0,085985000000000
min/<	0,000620340000000	0,000616700000000	0,000604710000000	0,000613390000000	0,000594760000000

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.56, Figura A1.57, Figura A1.58 e Figura A1.59 bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



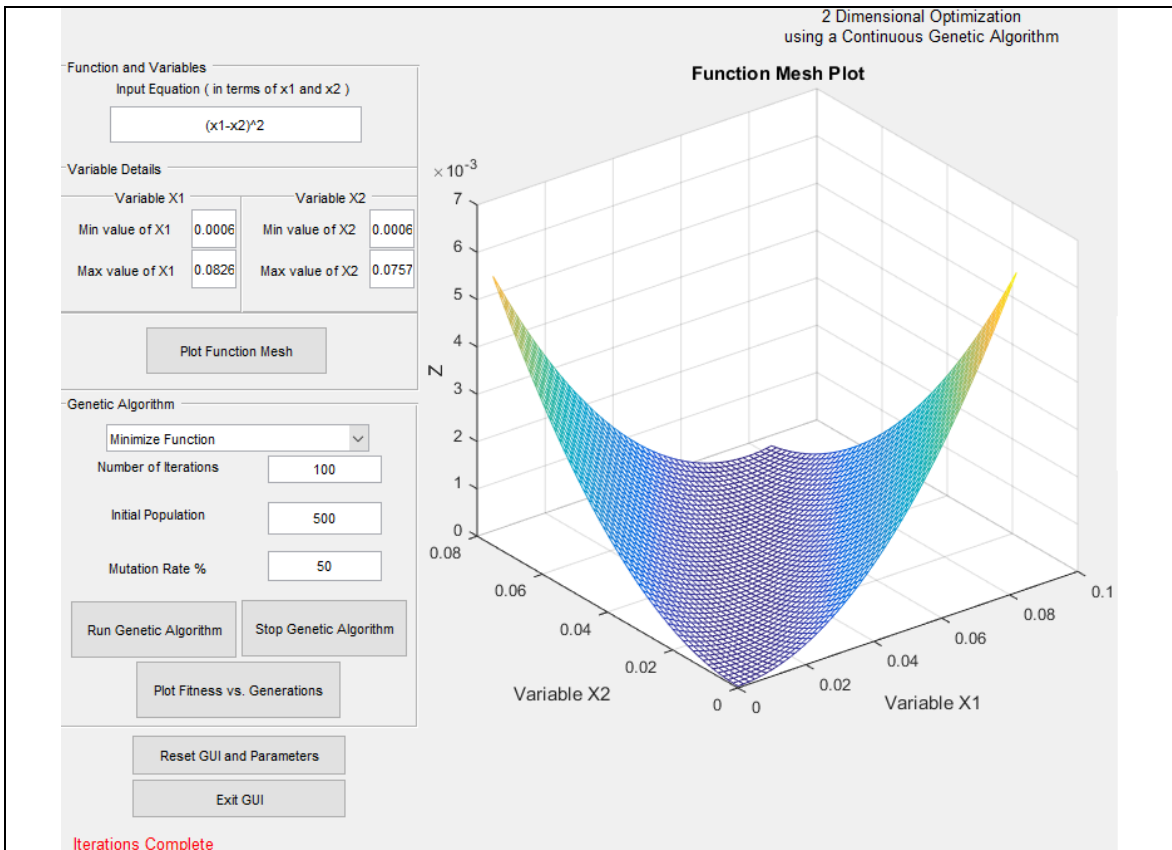
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



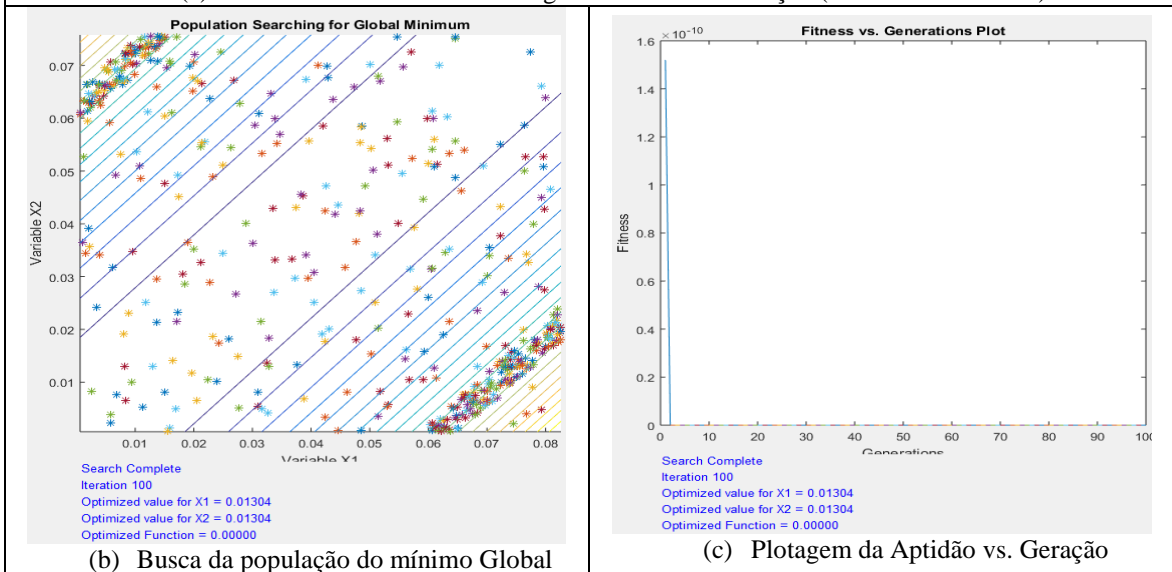
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.56 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.1 (100 iterações): Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste – $0,125=L/4$)



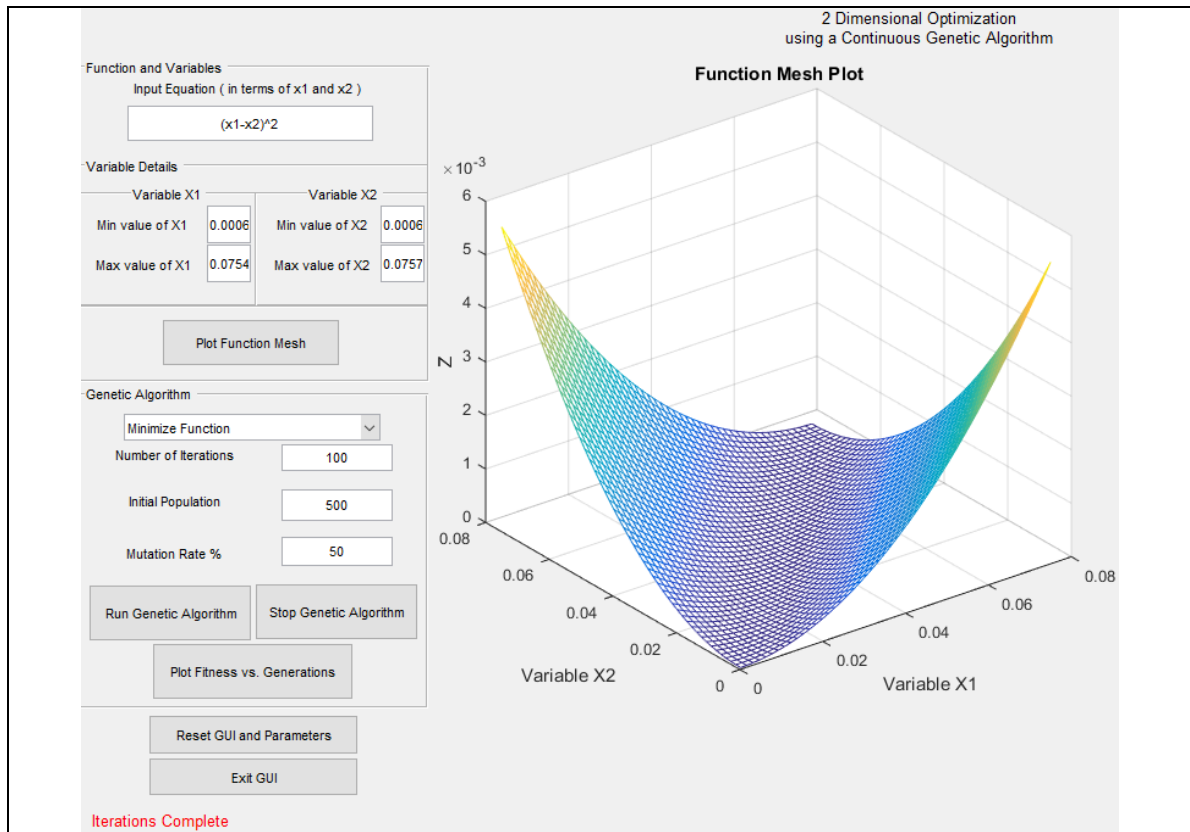
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



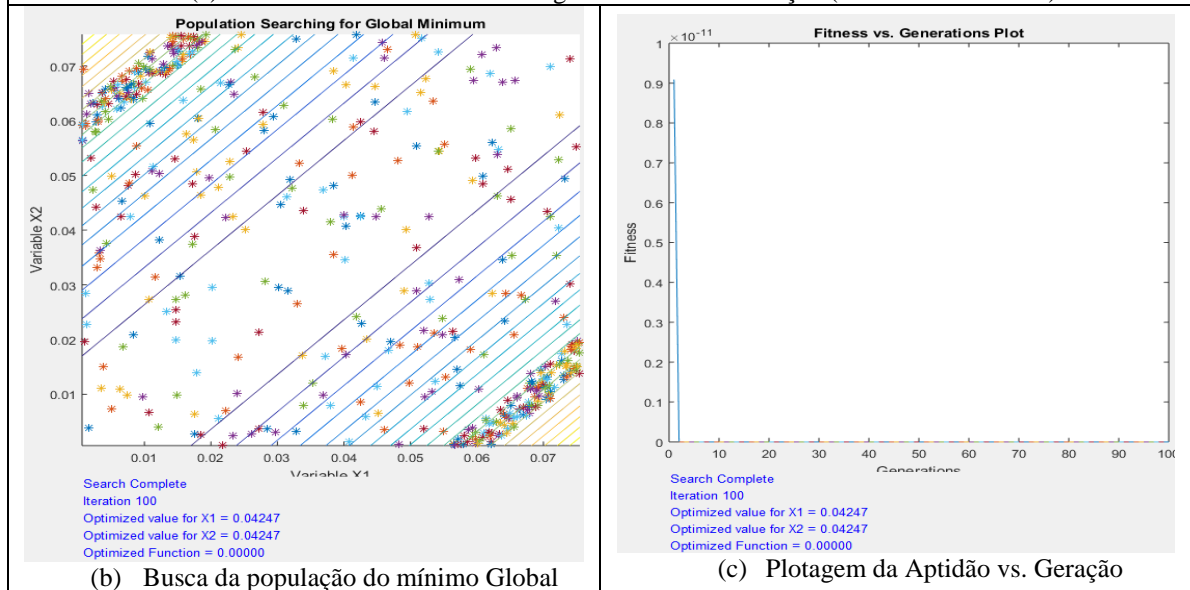
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.57 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.2 (100 iterações): Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)



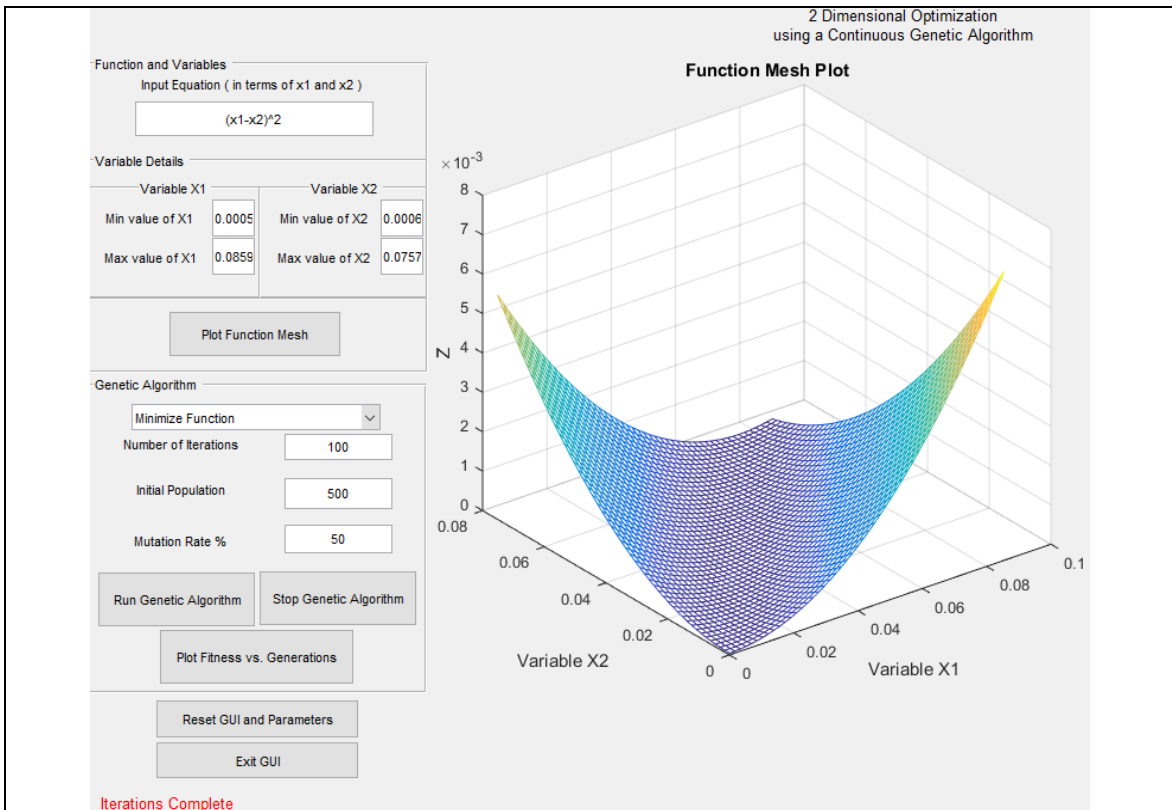
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



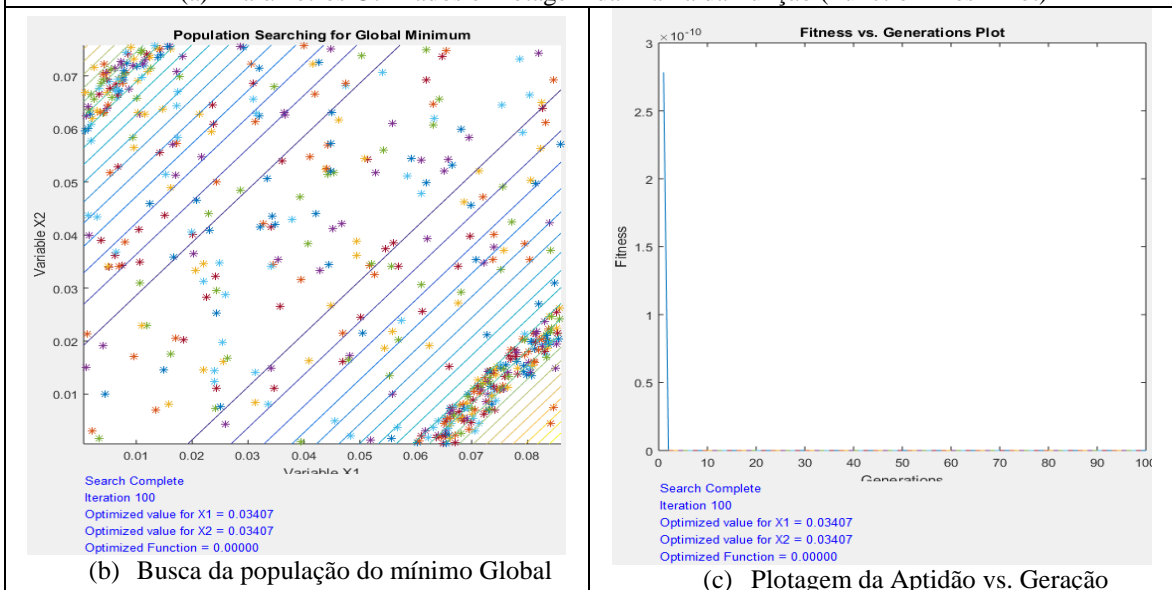
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.58 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.3 (100 iterações): Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste direito – $0,125=L/4$)



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.59 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 5.4 (100 iterações): Biengastada Caso 5 carga 500 kN (caso de dano a partir do engaste esquerdo – $0,250=L/2$)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.18 a seguir.

Tabela A1.18 – Análise Resumo AG: Viga Biengastada Caso 5 carga 500 kN

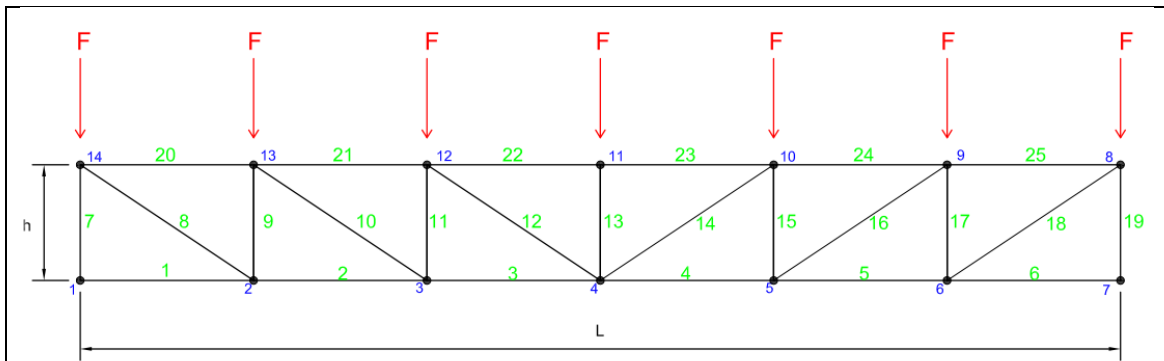
Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Car ga (kN)	Método/ Elemento / Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Itera ções	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
5.1				0.125 = (L/4)	100 ^a	125	$\cong 2.75e-08\%$ Correto $\cong 0.05\%$	0.04509
5.2	Viga Biengastada (Casos 5.1 ao 5.4)	$\cong 500\text{ kN}$	AG / PLANE43	0.250 = (L/2)	100 ^a	250	$\cong 1.52e-08\%$ Correto $\cong 0.05\%$	0.01304
5.3			Dinâmico / Modo de Vibração 1	0.125 = (L/4)	100 ^a	375	$\cong 0.91e-09\%$ Correto $\cong 0.075\%$	0.04247
5.4				0.250 = (L/2)	100 ^a	250	$\cong 2.75e-08\%$ Correto $\cong 0.075\%$	0.03407

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do ED, com análises na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, encontrando-se algumas perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global. Verifica-se concentrações dos indivíduos nos valores maiores tanto das variáveis x_1 como também x_2 , demonstrando dificuldades de convergência para um mínimo local.

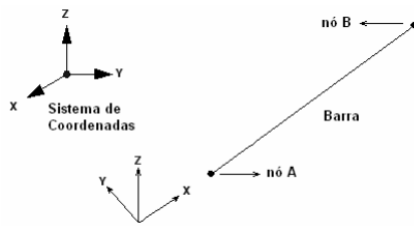
Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG tendo em vista a sensibilidade envolvida nos resultados que contemplam análises dinâmicas.

1.3.5 Caso 6 - Análise Numérica Estática: Treliça Plana

Na análise da estrutura da treliça plana, com carregamentos pontuais nodais, conforme representado na Figura A1.60, bem como a representação do seu comportamento na análise gráfica estática apresentada na Figura A1.62, do trabalho de Silva (2011).



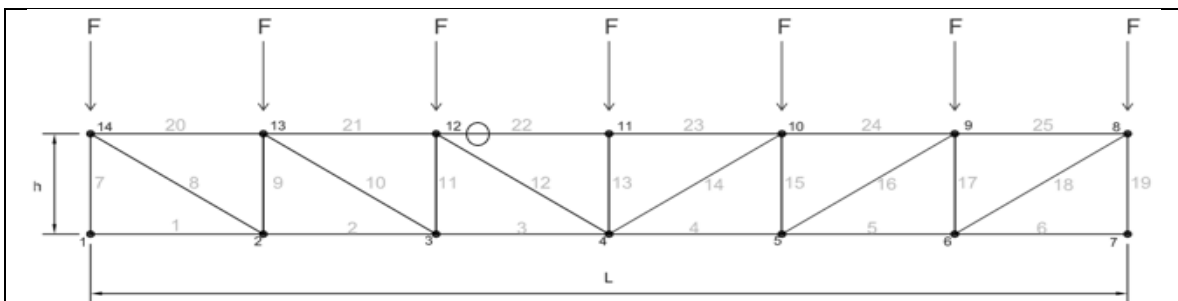
(a) Treliça de 25 barras a ser analisada



(b) Elemento FRAME utilizado do programa SAP2000[®] da treliça a ser analisada

Figura A1.60 – Treliça Plana (Silva, 2011)

As propriedades geométricas e dos materiais da treliça nas análises numéricas, bem como as condições de danos a serem verificadas podem ser observadas a seguir na Figura A1.61.



(a) Dano na treliça simulado através da redução de 50% no valor do módulo de elasticidade de um elemento no banzo superior (22)

Propriedades	Símbolo	Valor	Unidade
Comprimento Total	L	9,00	m
Altura da Treliça	h	1,00	m
Área das barras	A	0,0048	m ²
Módulo de Elasticidade	E	200,00	GPa
Massa Específica	ρ	7850,00	kg/m ³
Coefficiente de Poisson	ν	0,30	-

(b) Propriedades geométricas e dos materiais

Figura A1.61 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de dano da treliça a ser analisada

A treliça foi submetida a um carregamento estático de 5 kN nos nós do banzo superior e para a análise dos deslocamentos nodais U_x da treliça, a mesma foi linearizada, dispondo os deslocamentos nodais das barras em sequência. Após a linearização, o dano ficou localizado entre os nós 237 e 238.

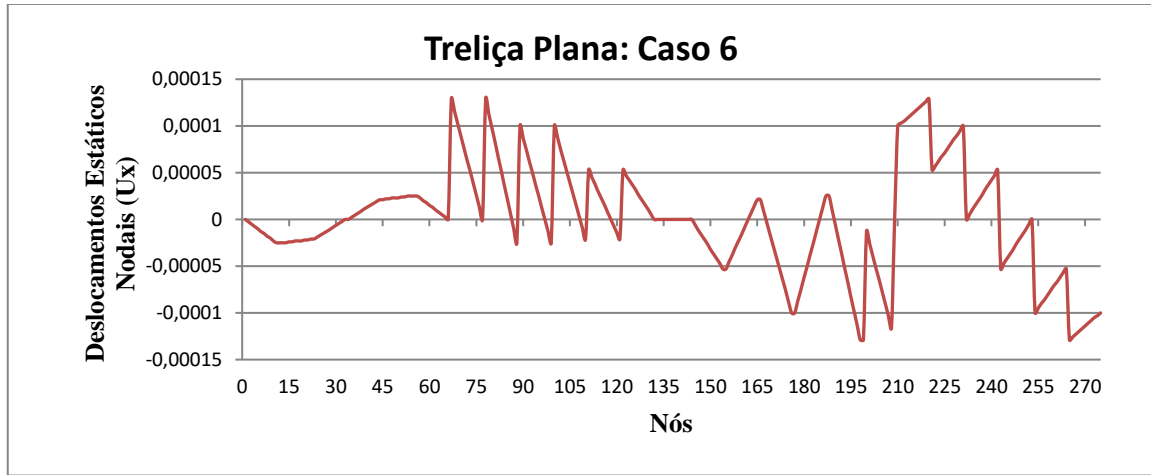


Figura A1.62 – Deslocamentos nodais para a Treliça Plana (Silva, 2011)

As análises de otimização de cada método para o caso 6 são apresentadas a seguir.

1.3.5.1 Análise Estática Treliça Plana: Evolução Diferencial (ED)

Serão apresentados agora para a estrutura da treliça plana os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial com números constantes de elementos e foram utilizados como resultados numéricos os deslocamentos estáticos.

As funções objetivos produzidas pelos acúmulos das diferenças quadráticas das respostas intactas e danificadas utilizadas podem ser observadas na Equação (A1.3) a seguir, que contempla:

$$F = \sum_{i=1}^{275} (Y_m^{ij} - Y_a^{ij})^2 \quad (\text{A1.3})$$

Onde,

Y_m^{ij} : deslocamentos estáticos medidos nas estruturas danificadas;

Y_a^{ij} : deslocamentos estáticos obtidos numericamente nas estruturas intactas;

i: grau de liberdade;

j: condição de carregamento estático em particular.

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias

tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos na treliça plana em estudo foram:

- $I_D = 275$: número de elementos da treliça em estudo (variáveis);
- $I_{NP} = 10 \cdot I_D \rightarrow I_{NP} = 2750$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,8$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a treliça do caso 6, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao número de elementos da treliça (275) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação das cargas de 5 kN.

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o SAP2000[®] por meio do elemento FRAME utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 150 iterações. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos das barras da treliça. Na Figura A1.63 é mostrado o resultado da solução do problema.

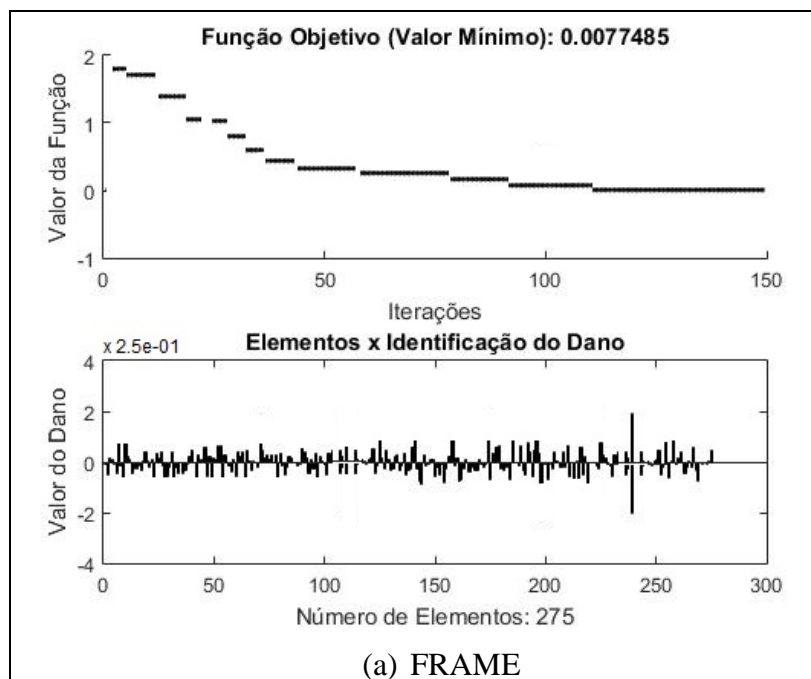


Figura A1.63 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano situação 6.1 (150 iterações): Treliça Plana Caso 6 cargas nodais 5 kN (caso de dano simulado através da redução de 50% no valor do módulo de elasticidade de um elemento no banzo superior:

22)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.19 a seguir.

Tabela A1.19 - Análise Resumo ED: Treliça Plana de 25 Barras Caso 6

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Carga Nodal (kN)	Elementos / Análises	Caso de Dano	Itera ções	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
6	Treliça Plana de 25 Barras (Caso 6.1)	$\cong 5 \text{ kN}$	FRAME SAP2000 [©]	Elemento no banzo superior: 22	150 ^a	238	50.00%	0.0077485

Com esses valores mínimos da função objetivo encontrada na centésima quinquagésima iteração e com os valores de danos do elemento seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 50.00% no elemento 238 para a situação 6.1, além de algumas perturbações para os demais elementos.

Na análise com o elemento FRAME, as descontinuidades dificultaram o processo de detecção de danos, principalmente nos nós em que ocorre a mudança de uma barra para outra, havendo algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos de muitos elementos das barras, dado o seu comportamento estrutural mediante às aplicações de cargas nodais nos banzos superiores, para adequação mais realista ao modelo, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações.

1.3.5.2 Análise Estática Treliça Plana: Algoritmos Genéticos (AG)

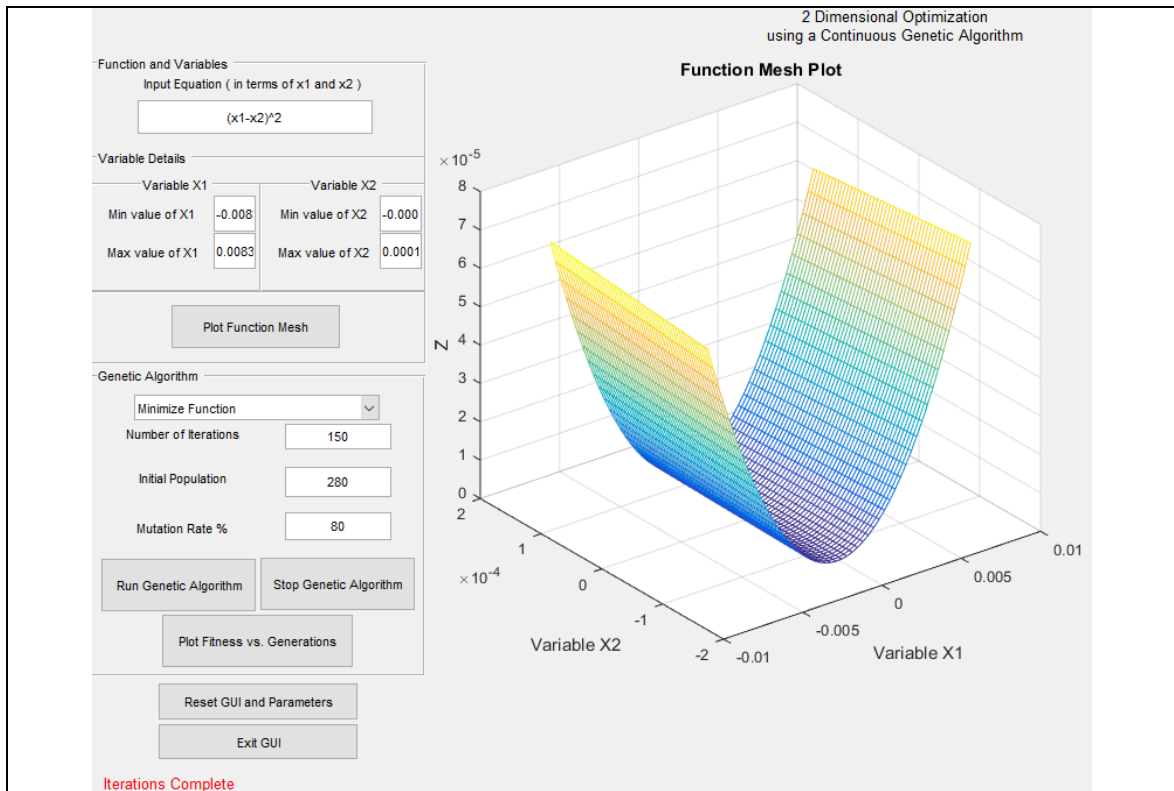
A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da treliça.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.20 resumo a seguir.

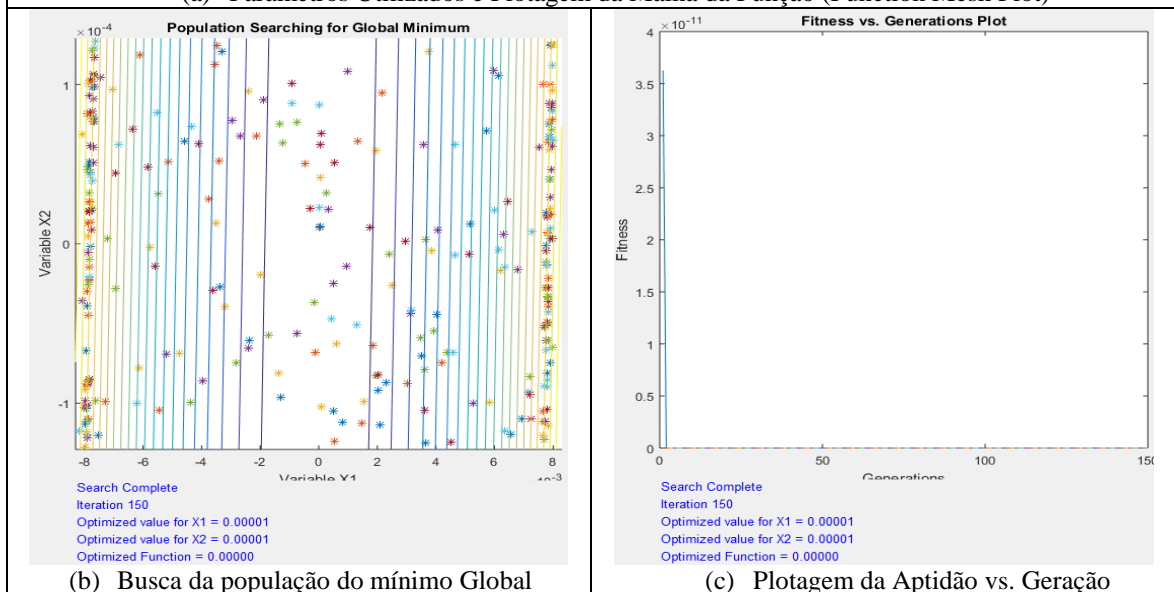
Tabela A1.20 - Mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificado

Valores das Variáveis	Intacto	Treliça Plana de 25 Barras (Caso Geral 6)
max/>	0,0001290000000000	0,0083000000000000
min/<	-0,0001290000000000	-0,0083000000000000

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.64 bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.64 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano situação 6.1 (150 iterações): Treliza Plana Caso 6 cargas nodais 5 kN (caso de dano simulado através da redução de 50% no valor do módulo de elasticidade de um elemento no banzo superior: 22)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.21 a seguir.

Tabela A1.21 – Análise Resumo AG: Treliça Plana de 25 Barras Caso 6

Item Caso Geral	Viga (Caso Ref.)	Carga Nodal (kN)	Método/ Elementos / Análises	Caso de Dano	Itera ções	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo da Função Objetivo
6	Treliça Plana de 25 Barras (Caso 6.1)	$\cong 5 \text{ kN}$	AG / FRAME SAP2000 [©] / Estática	Elemento no banzo superior: 22	150 ^a	238	3.6e-09% Correto 50.00%	0.00001

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do ED, com análises na centésima quinquagésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, encontrando-se perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global, tendo em vista que não se consegue aplicar o número de população inicial de 275 com a limitação do Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020), adotando-se 280, dada a limitação de valores de entrada do “*Initial Population*” que devem terminar em zero.

Mais uma vez as descontinuidades dificultaram o processo de detecção de danos, principalmente nos nós em que ocorre a mudança de uma barra para outra, havendo algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos de muitos elementos das barras, dado o seu comportamento estrutural mediante às aplicações de cargas nodais nos banzos superiores, para adequação mais realista ao modelo, provavelmente um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG.

1.4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS METÁLICAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (TESE: SILVA, 2015)

Conforme foi sinalizado, após essa última análise, que não envolvia análises experimentais, buscou-se estudos com verificações essencialmente oriundas dos experimentos em vigas metálicas (perfil-I), de aço MR-250 de comprimentos totais de 6,00 metros, em condição biapoçada, submetida a diferentes estágios de carga aplicadas no meio do vão e também em outros pontos, assim como os danos e suas posições diferenciadas ao longo dos estudos realizados. Esses casos, constam em Silva (2015), já em sua tese de doutorado.

As propriedades geométricas e dos materiais das vigas nas análises experimentais, bem como as condições de danos a serem verificadas podem ser observadas a seguir na Figura A1.65.

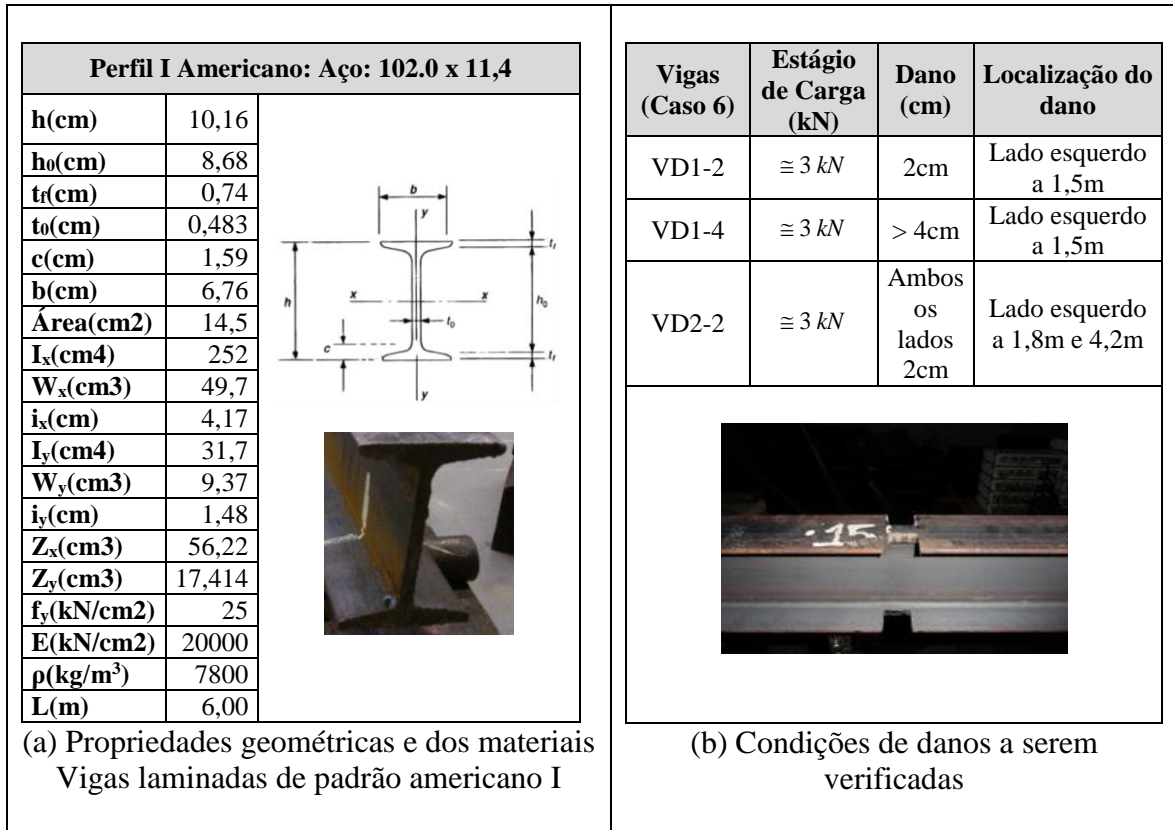


Figura A1.65 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de danos das vigas a serem analisadas

Os estágios de cargas utilizados para avaliação com os métodos de otimização referem-se àquelas aplicados somente no carregamento imediatamente anterior ao da carga máxima (conforme Silva, 2015: 4373 N). Os danos foram induzidos através de entalhes transversais ao eixo longitudinal das vigas, sendo que a adoção dessas fissuras verticais abertas são causadas por solicitações diversas, como por exemplo, comportamentos encontrados em edificações com elementos estruturais metálicos e Obras de Arte Especiais. Em linhas gerais buscou-se modelos experimentais com o máximo de similaridade com padrões construtivos vigentes para contribuições práticas futuras nos diversos sistemas construídos e formados por elementos estruturais diversos.

As vigas dos ensaios experimentais foram divididas em 16 elementos de 37,50 cm de comprimento cada um, com 17 nós igualmente espaçados ao longo da viga.

1.4.1 Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada Intacta

Nesse caso, agora de uma viga metálica biapoiada intacta (VR), com carregamento pontual no meio do vão, conforme representado na Figura A1.66, do trabalho de Silva (2015).

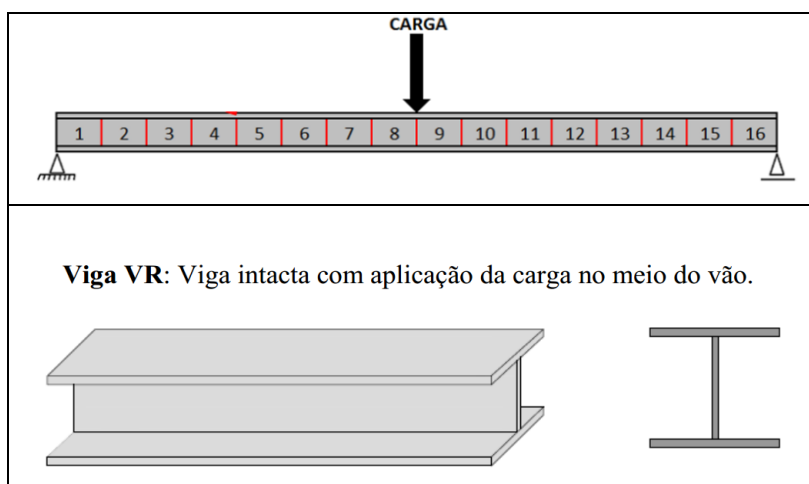


Figura A1.66 – Viga metálica biapoiada intacta (VR) para análise estática (Silva, 2015)

A condição intacta será utilizada como parâmetro para verificação das condições danificadas estáticas das vigas do caso 7 (VD1-2), caso 8 (VD1-4) e caso 9 (VD2-2), todos com uma ordem de carregamento em torno de 3 kN.

1.4.2 Caso 7 - Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada (VD1-2)

A viga metálica biapoiada danificada (VD1-2), com carregamento pontual no meio do vão, pode ser observada na Figura A1.67 a seguir.

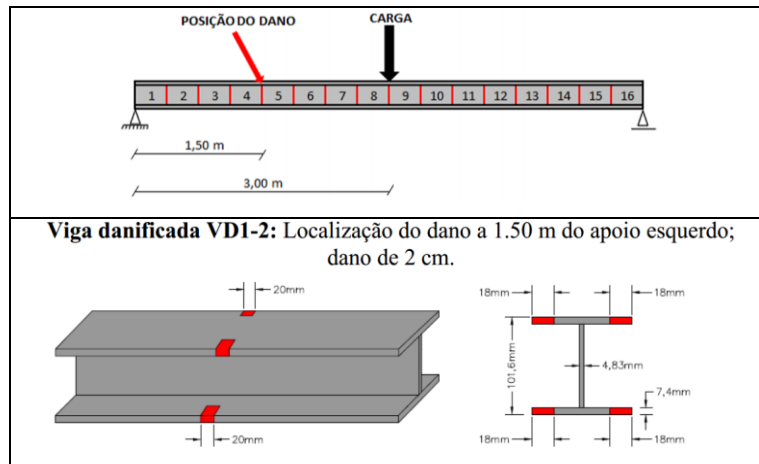


Figura A1.67 - Viga metálica biapoiada danificada: VD1-2 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 7 são apresentadas a seguir.

1.4.2.1 Análise Estática Caso 7 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-2): Evolução Diferencial (ED)

Serão apresentados os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial a diferentes situações de vigas com números constantes de elementos (denominado dentro do método de número de parâmetros da função objetivo, ou mesmo de variáveis envolvidas ou até mesmo de dimensionalidade) onde foram utilizados como resultados numéricos e experimentais, os deslocamentos estáticos.

As funções objetivos produzidas pelos acúmulos das diferenças quadráticas das respostas intactas e danificadas utilizadas podem ser observadas na Equação (A1.4) a seguir, que contempla:

$$F = \sum_{i=1}^{16} (Y_m^{ij} - Y_a^{ij})^2 \quad (\text{A1.4})$$

Onde,

Y_m^{ij} : deslocamentos estáticos medidos nas estruturas danificadas;

Y_a^{ij} : deslocamentos estáticos obtidos numericamente nas estruturas intactas;

i: grau de liberdade;

j: condição de carregamento estático em particular.

Os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- I_D = 16: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- I_NP = 10.I_D → I_NP = 160: número de populações ou tamanho da i população;

- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 7, apresentada na Figura A1.68, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente 3 kN e pouco.

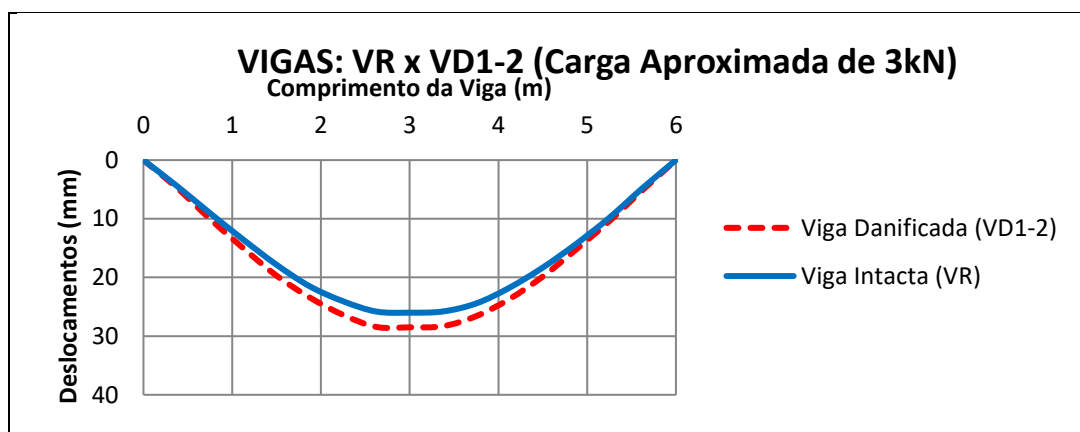


Figura A1.68 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 7 (carga de aproximadamente 3 kN)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.69 é mostrado o resultado da solução do problema.

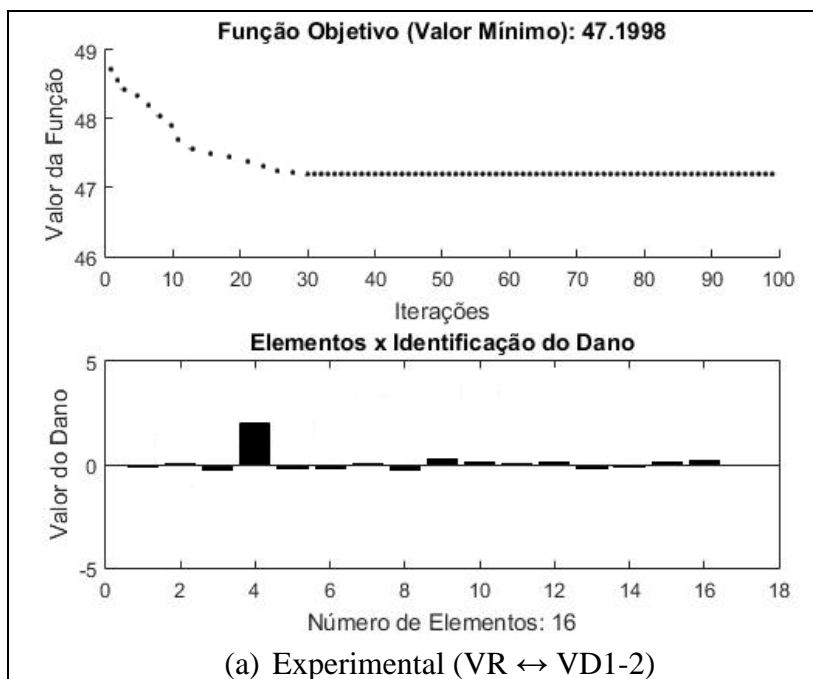


Figura A1.69 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VR ↔ VD1-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 7 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – $1,5m=L/4$)

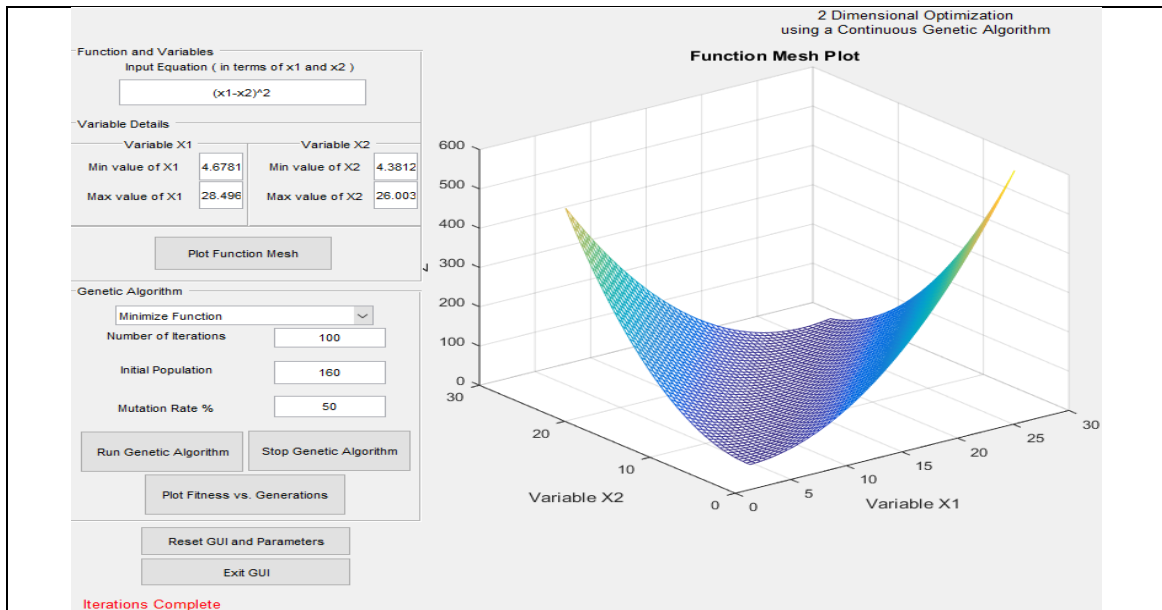
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.5.

1.4.2.2 Análise Estática Caso 7 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-2):

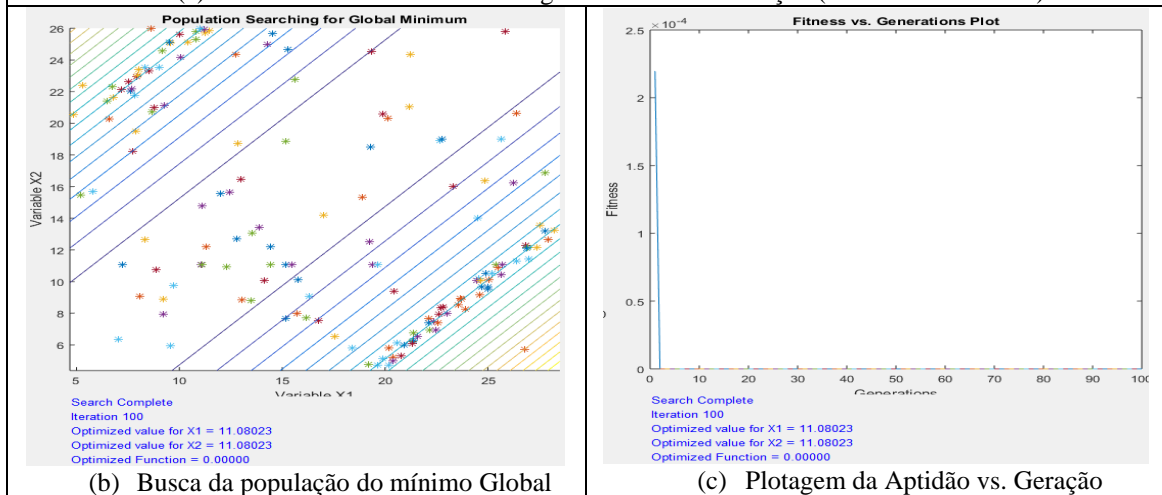
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.70 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.70 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VR ↔ VD1-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 7 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – $1,5m=L/4$)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.6.

1.4.3 Caso 8 - Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-4)

Já a viga metálica biapoiada danificada (VD1-4), com carregamento pontual no meio do vão, e configuração de dano conforme representado na Figura A1.71, do trabalho de Silva (2015).

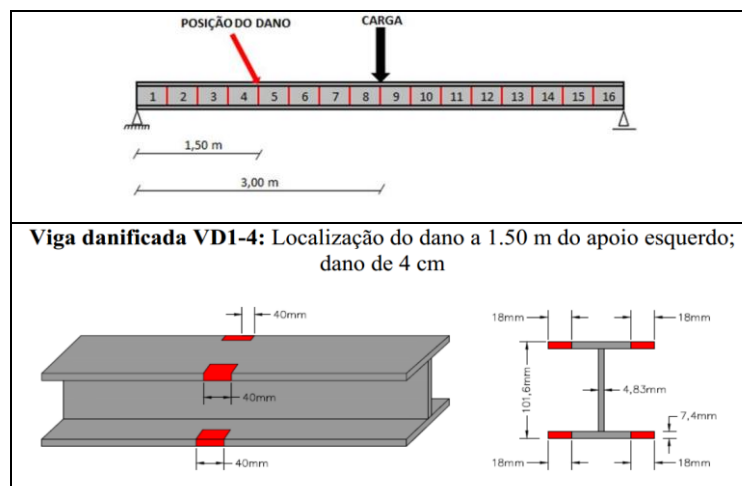


Figura A1.71 - Viga metálica biapoiada danificada: VD1-4 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 7 são apresentadas a seguir.

1.4.3.1 Análise Estática Caso 8 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-4):

Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 8, apresentada na Figura A1.72, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente 3 kN e pouco.

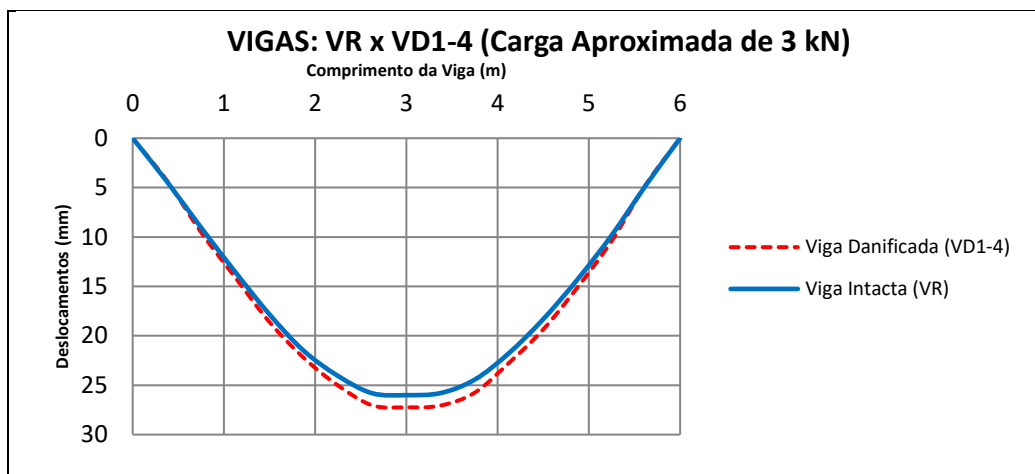


Figura A1.72 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 8 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.73 é mostrado o resultado da solução do problema.

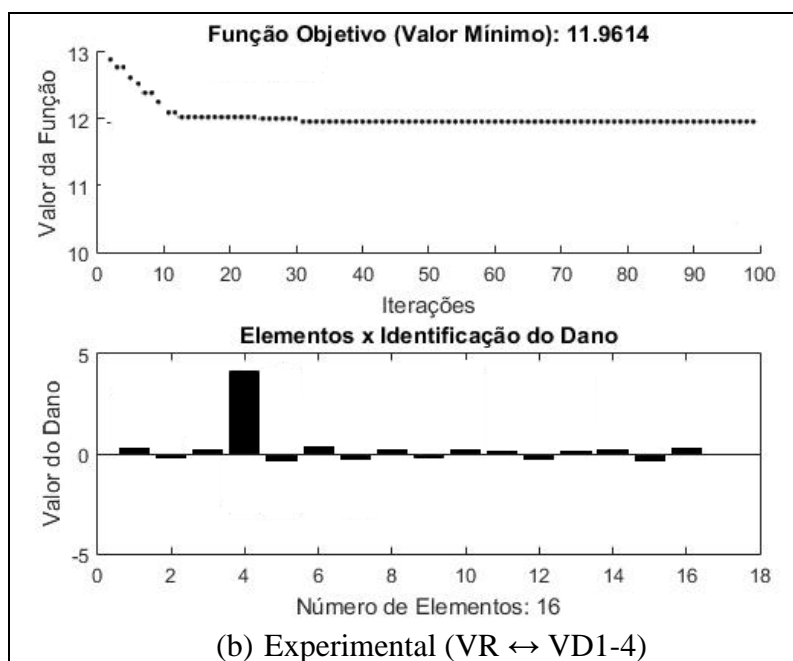


Figura A1.73 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VR ↔ VD1-4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 8 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – $1,5m=L/4$)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.5.

1.4.3.2 Análise Estática Caso 8 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1-4):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.74 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

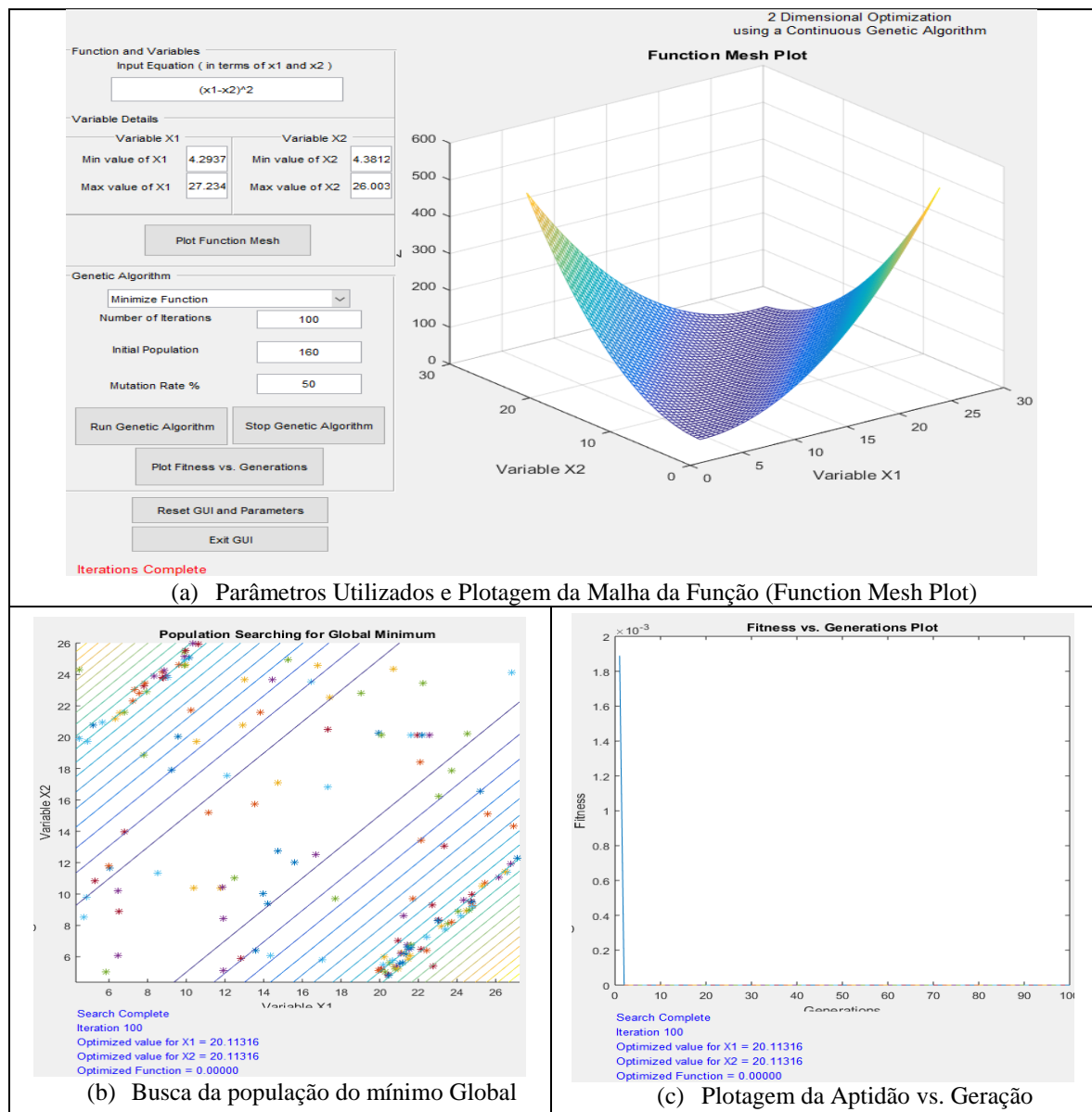


Figura A1.74 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VR ↔ VD1-4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 8 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – $1,5m=L/4$)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.6.

1.4.4 Caso 9 - Análise Numérica e Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2-2)

A viga metálica biapoiada danificada (VD2-2), do trabalho de Silva (2015), com configuração de dano e carregamento pontual no meio do vão, pode ser observada na Figura A1.75 seguinte.

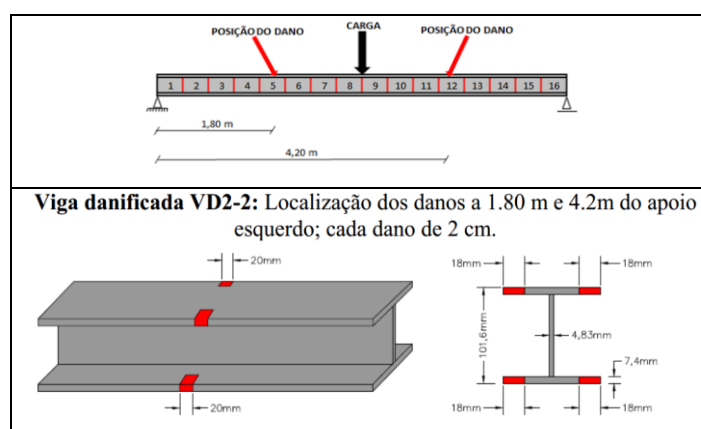


Figura A1.75 - Viga metálica biapoiada danificada: VD2-2 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 9 são apresentadas a seguir.

1.4.4.1 Análise Estática Caso 9 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2-2): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 9, apresentada na Figura A1.76, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao

comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

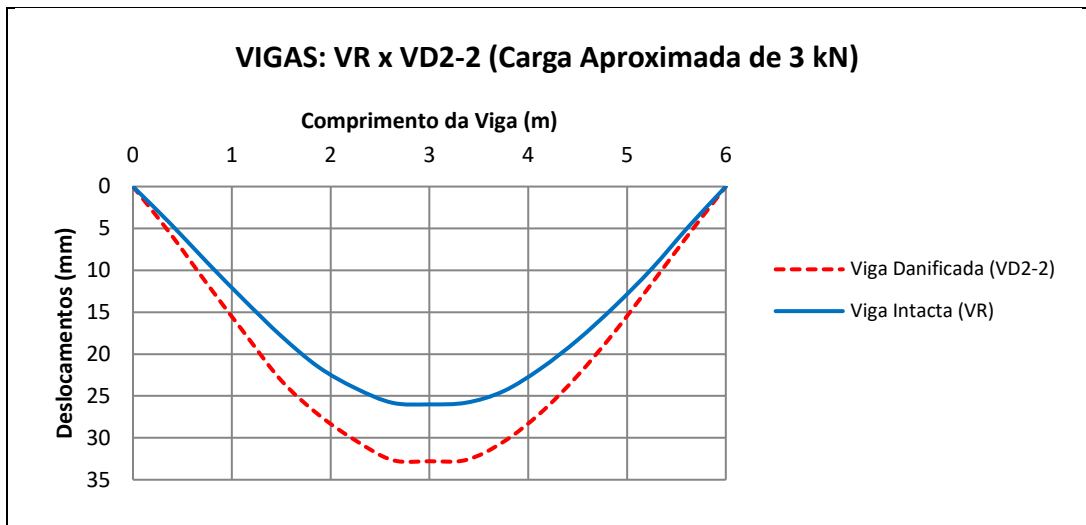


Figura A1.76 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga do caso 9 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.77 é mostrado o resultado da solução do problema.

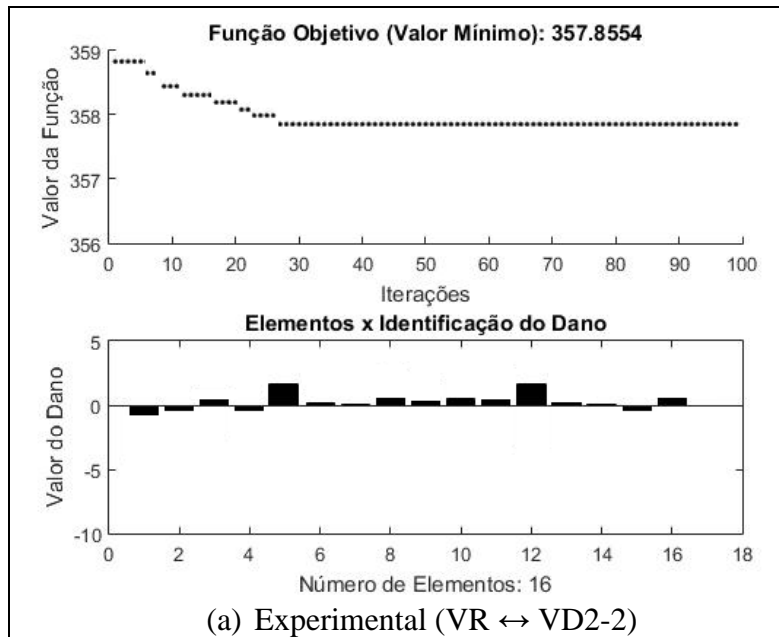


Figura A1.77 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VR ↔ VD2-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 9 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m)

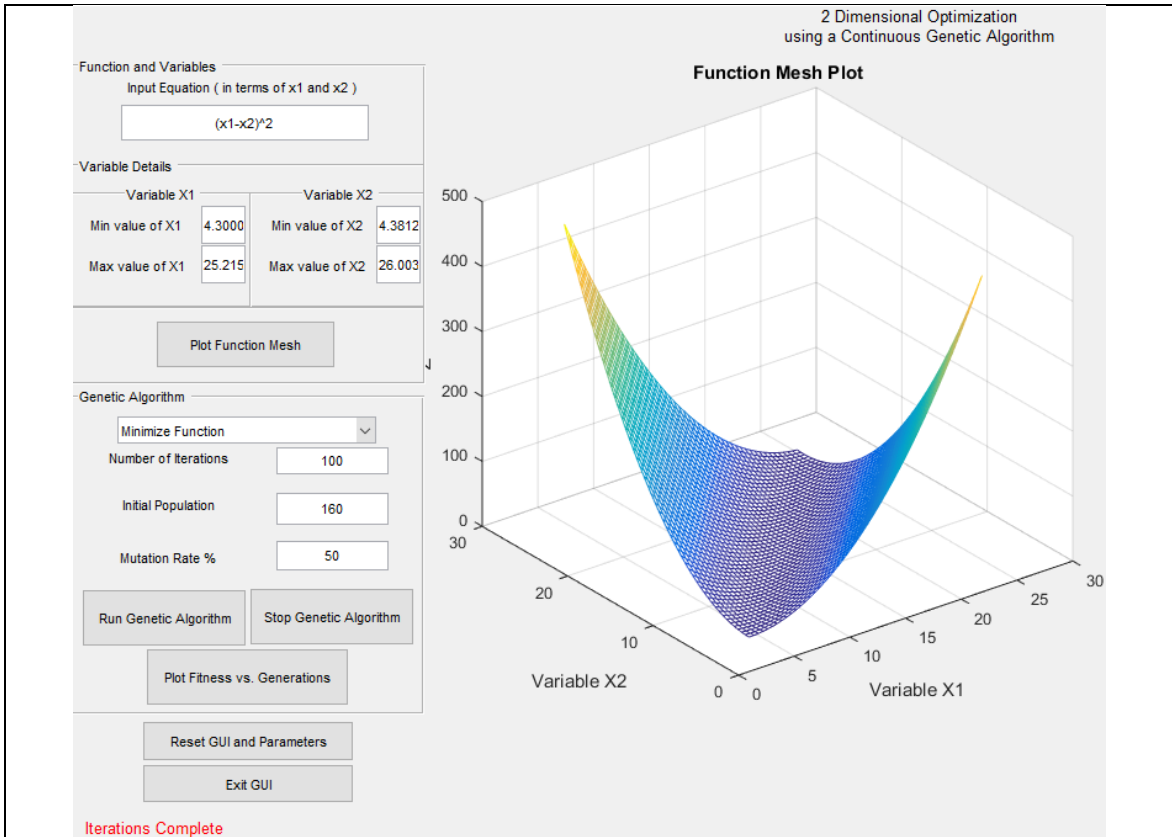
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.5.

1.4.4.2 Análise Estática Caso 9 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2-2):

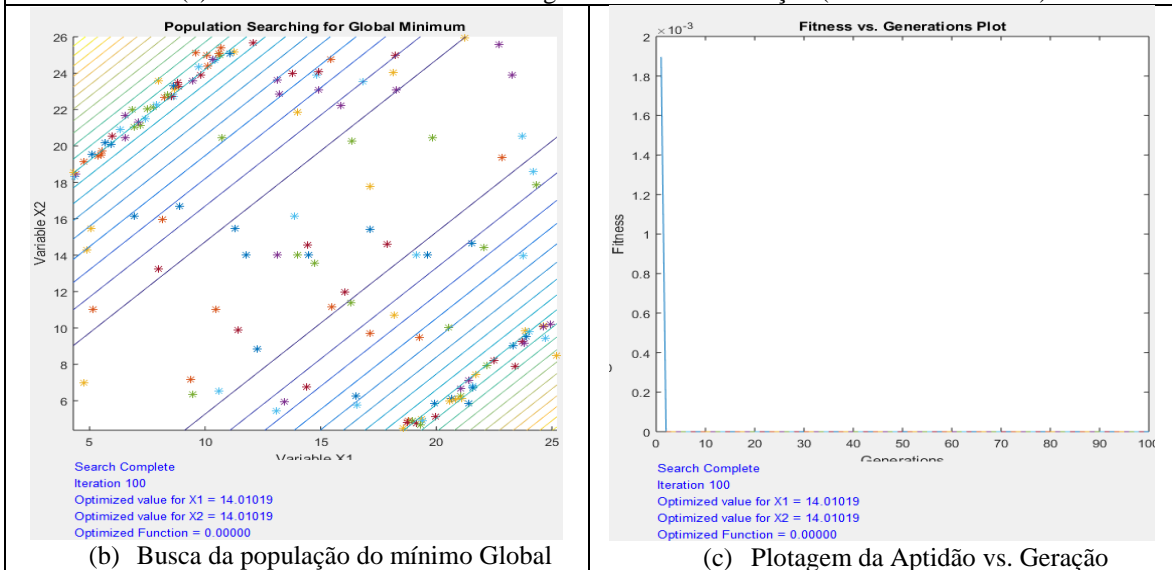
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.78 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.78 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VR ↔ VD2-2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 9 carga $\cong 3kN$ (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.6.

1.4.5 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 7 (VD1-2), 8 (VD1-4) e 9 (VD2-2) - Análise Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.22 a seguir.

Tabela A1.22 – Análise Resumo ED: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 7, 8 e 9

Item Caso Geral	Cargas (kN)	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste Esquerdo	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
7		VD1-2	ED	a 1,5m = (L/4)	100 ^a	4	≅ 2%	47.1998
8	≅ 3 kN	VD1-4	Experim.	a 1,5m = (L/4)	100 ^a	4	≅ 4%	11.9614
9		VD2-2	Estática	a 1.8m e 4.2 m	100 ^a	5 e 12	≅ 2%	357.8554

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de aproximadamente 2% no elemento 4 para as análises com a viga VD1-2 e 4% no elemento 4 para as análises com a viga VD1-4, e algumas perturbações para os demais elementos. Ambos apresentaram facilidades quanto à convergência rápida com esse número de iterações utilizados.

Já os valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração com um percentual de danos de 2% nos elementos 5 e 12 para a viga VD2-2, com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, além de mais algumas pequenas perturbações para os demais elementos, principalmente nas proximidades dos apoios.

Nas proximidades dos pontos de danos houve algumas distorções mas com grandezas não tão relevantes e que provavelmente ocorreram por causa da perturbação causada, onde para uma adequação mais realista ao modelo, poderia se utilizar de um número maior de iterações.

As análises de identificação de dano nesse exemplo, se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises experimentais intactas e danificadas, mas como foi relatado anteriormente, utilizou-se novamente um número maior de iterações que possibilitaram uma diminuição nos resíduos gerados, mesmo onde houvesse grandes diferenças de deslocamentos, presença de cargas pontuais, proximidades dos apoios ou mesmo nas proximidades das regiões danificadas, apesar disso os valores de danos dos

elementos seguem em conformidade ao problema proposto. Enfatiza-se aí que o aumento do número de iterações, em alguns casos, auxilia na resolução do problema de aproximação de mínimo local.

Com as análises dessas vigas, pode-se afirmar também que um número maior de informações de deslocamentos também auxiliariam no trabalho do otimizador. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer das estruturas em estudo.

1.4.6 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 7 (VD1-2), 8 (VD1-4) e 9 (VD2-2) - Análise Experimental Estática: Viga Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.23 a seguir.

Tabela A1.23 – Análise Resumo AG: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 7, 8 e 9

Item Caso Geral	Cargas (kN)	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste Esquerdo	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
7		VD1-2	AG	a 1,5m = (L/4)	100 ^a	4	$\cong 2.2e-02\%$ Correto $\cong 2\%$	11.08023
8	$\cong 3\text{ kN}$	VD1-4	Experim. / Estática	a 1,5m = (L/4)	100 ^a	4	$\cong 1.9e-01\%$ Correto $\cong 4\%$	20.11316
9		VD2-2		a 1.8m e 4.2 m	100 ^a	5 e 12	$\cong 1.9e-01\%$ Correto $\cong 2\%$	14.01019

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do ED, com análises na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos próximos à conformidade ao problema proposto de acordo com o observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, principalmente nos casos VD1-2 e VD2-2 com o dano por volta de 2%, o que já não ocorreu com o caso VD1-4, encontrando-se ainda assim dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global para ambos os casos.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.24 resumo a seguir.

Tabela A1.24 - Mínimos e máximos valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados

Valores das Variáveis	VD1-2	VD1-4	VD2-2	Intacto
max/>	28,4968750	27,2343750	25,2156250	26,0031250
min/<	4,6781250	4,2937500	4,3000000	4,3812500

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG, principalmente no caso VD1-4, e os demais para uma aproximação maior do percentual de dano.

1.4.7 Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Intacta

Já na viga metálica biapoiada intacta para a análise dinâmica, conforme representação na Figura A1.79, do trabalho de Silva (2015).

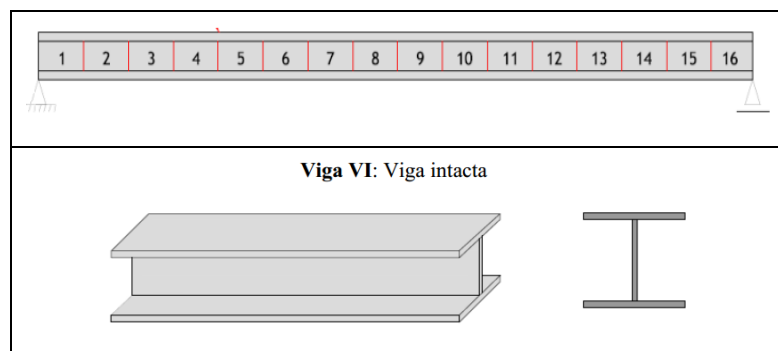


Figura A1.79 - Viga metálica biapoiada intacta para análise dinâmica (Silva, 2015)

A condição intacta será utilizada como parâmetro para verificação das condições danificadas dinâmicas das vigas do caso 10 (VD1) ao caso 18 (VD9).

1.4.8 Caso 10 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD1), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.80 a seguir.

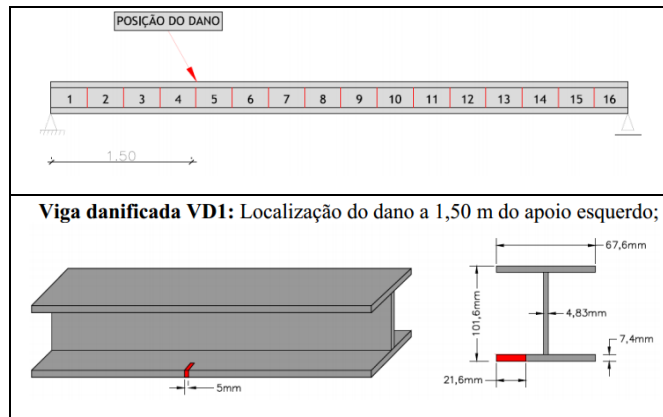


Figura A1.80 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD1 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 10 são apresentadas a seguir.

1.4.8.1 Análise Dinâmica Caso 10 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1):

Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 10, apresentada na Figura A1.81, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

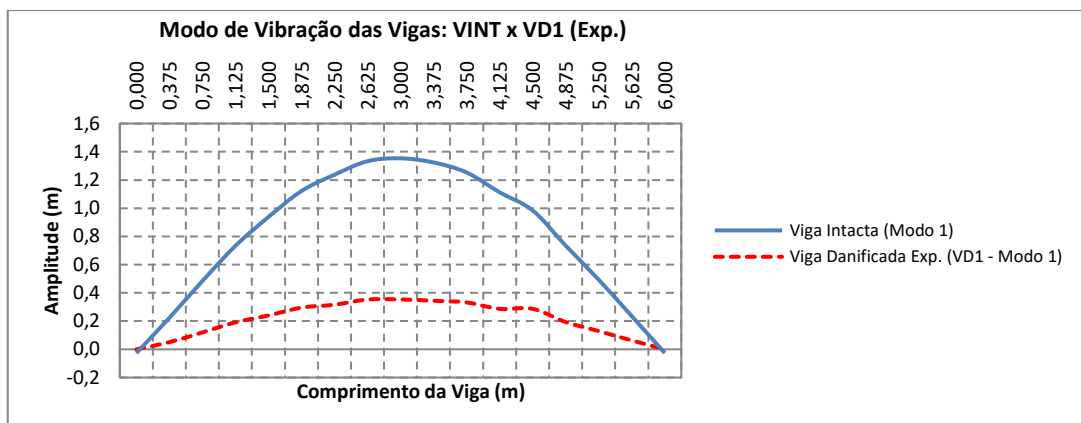


Figura A1.81 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 10 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.82 é mostrado o resultado da solução do problema.

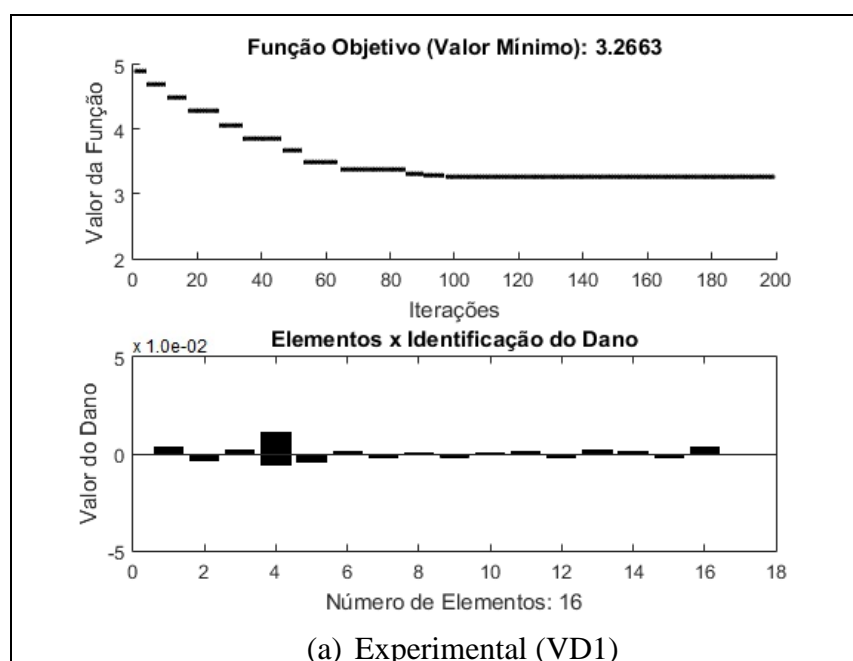


Figura A1.82 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD1 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 10 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.8.2 Análise Dinâmica Caso 10 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD1):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.83 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

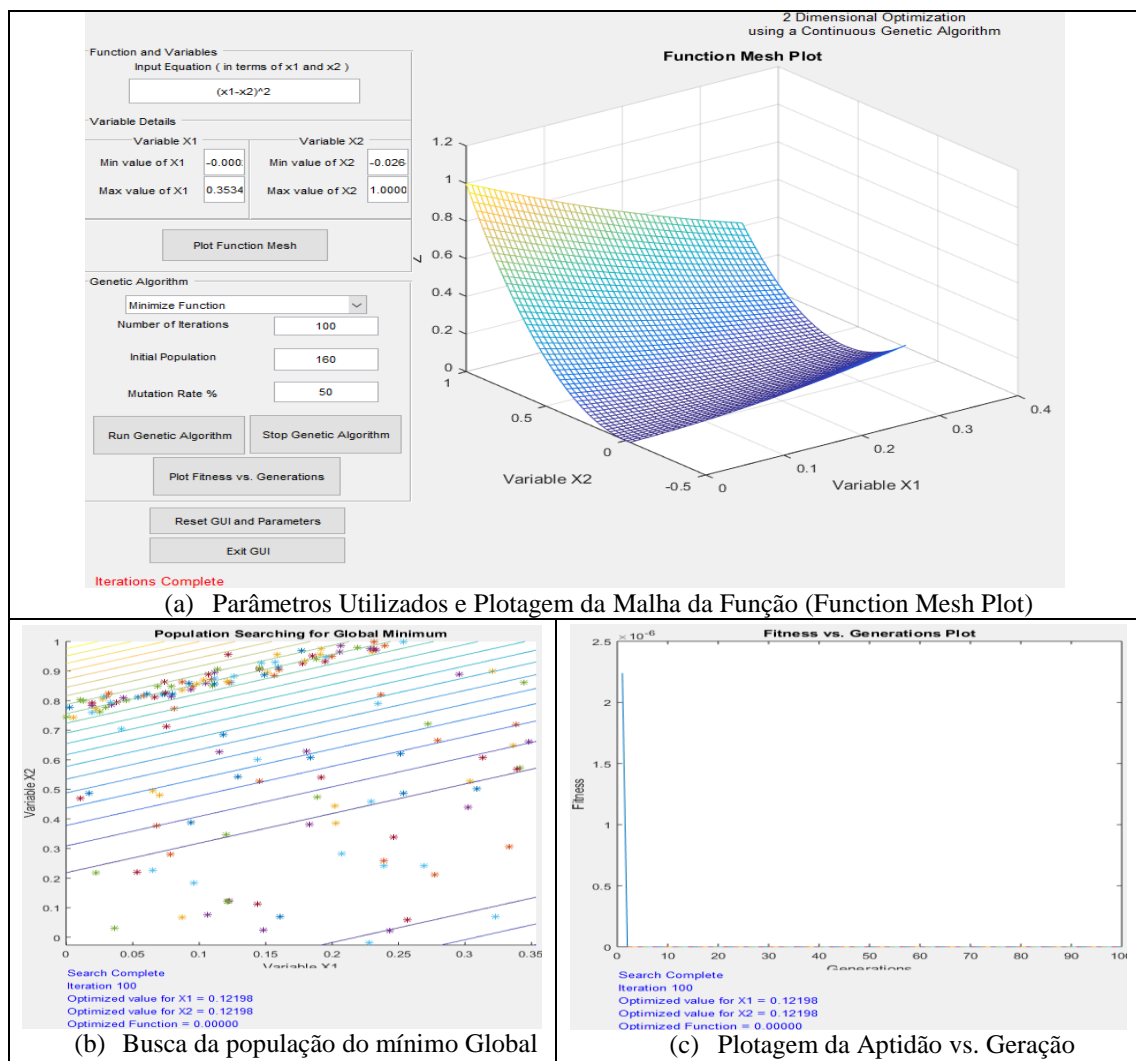


Figura A1.83 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD1 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 10 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.9 Caso 11 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD2), com configuração de dano conforme representado na Figura A1.84 (Silva, 2015).

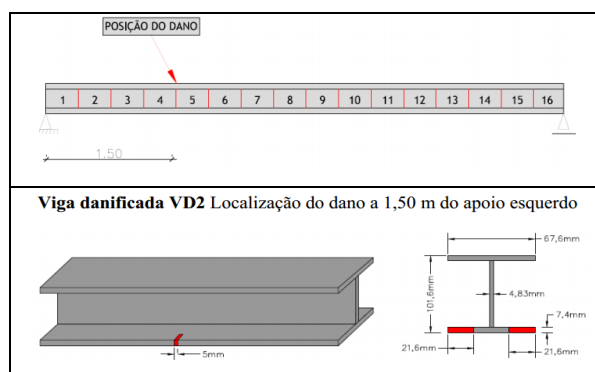


Figura A1.84 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD2 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 11 são apresentadas a seguir.

1.4.9.1 Análise Dinâmica Caso 11 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,8$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 11, apresentada na Figura A1.85, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

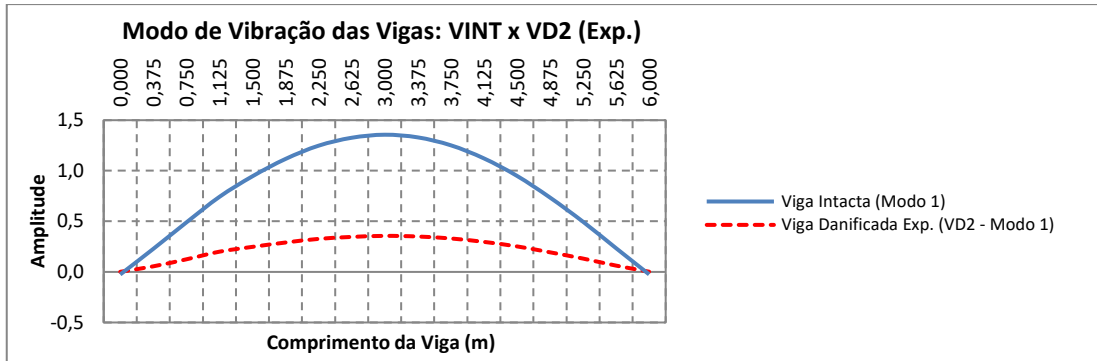


Figura A1.85 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 11 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.86 é mostrado o resultado da solução do problema.

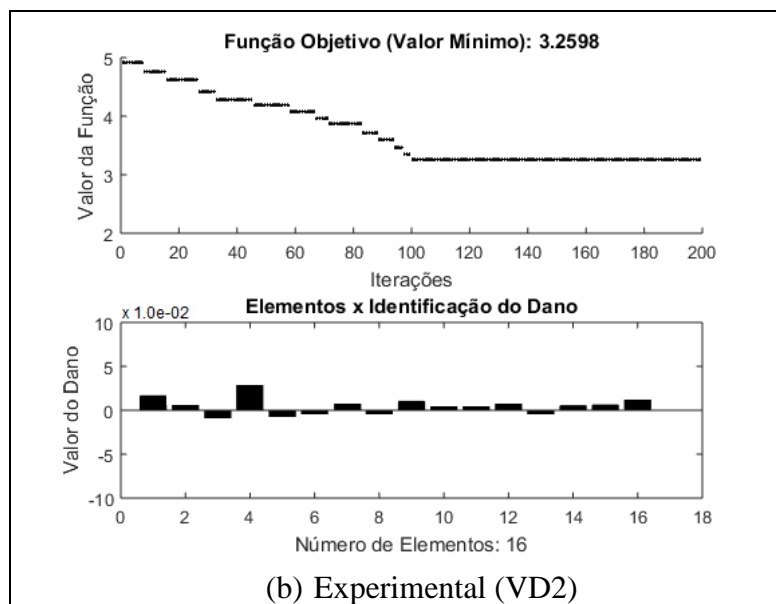


Figura A1.86 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 11 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.9.2 Análise Dinâmica Caso 11 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD2):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.87 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

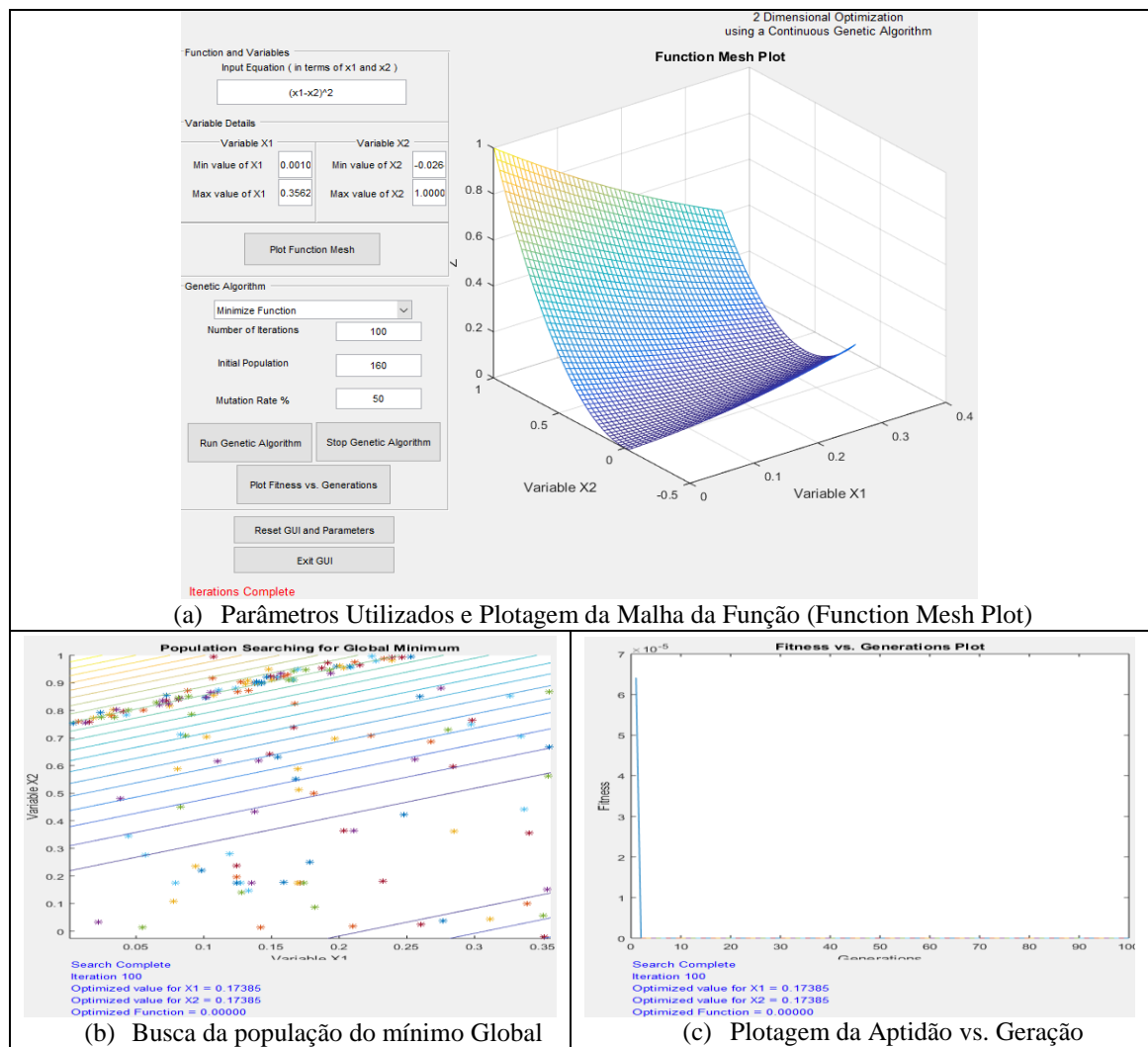


Figura A1.87 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD2 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 11 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.10 Caso 12 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD3)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD3), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.88 a seguir.

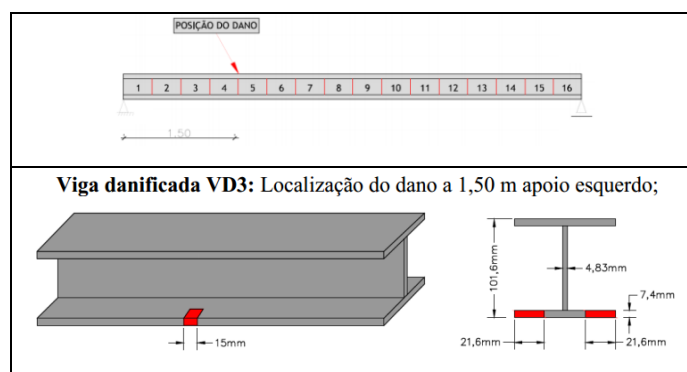


Figura A1.88 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD3 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 12 são apresentadas a seguir.

1.4.10.1 Análise Dinâmica Caso 12 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD3): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 12, apresentada na Figura A1.89, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

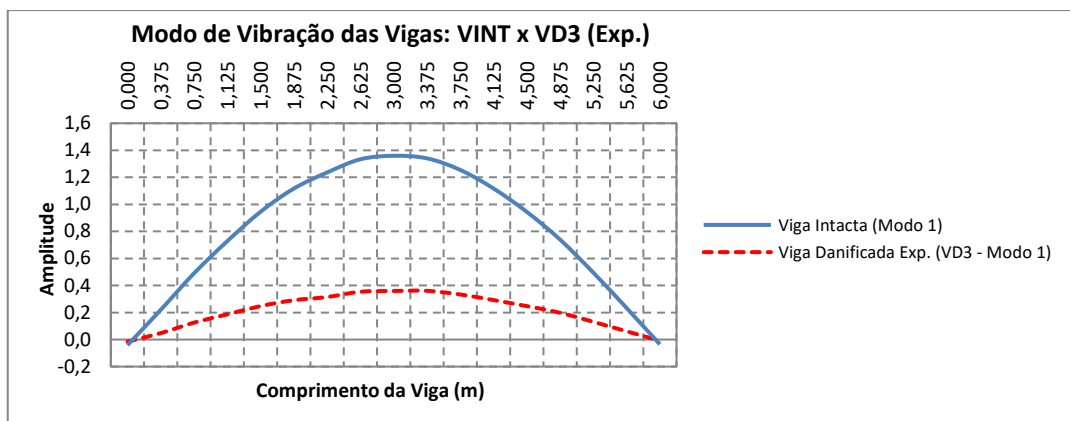


Figura A1.89 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 12 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.90 é mostrado o resultado da solução do problema.

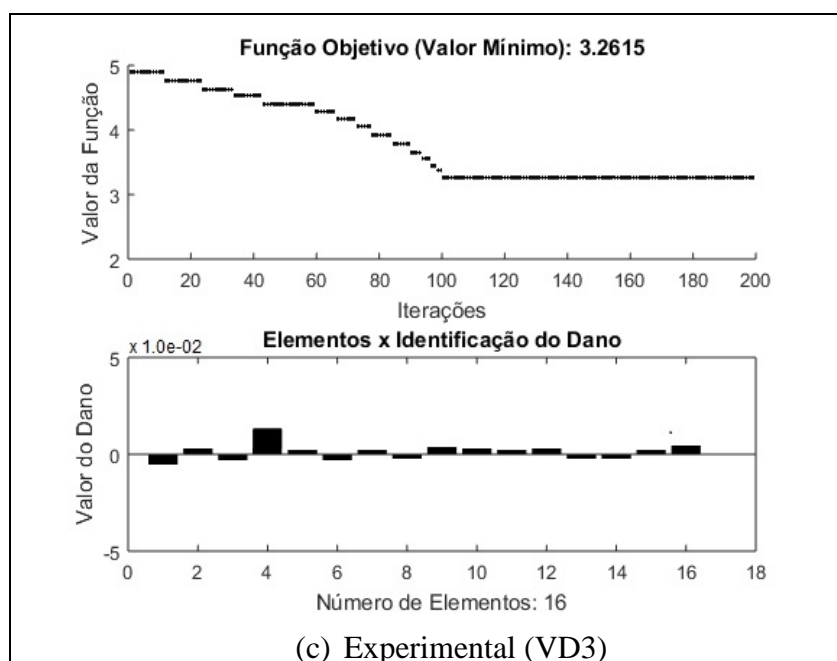


Figura A1.90 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD3 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 12 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.10.2 Análise Dinâmica Caso 12 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD3):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.91 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

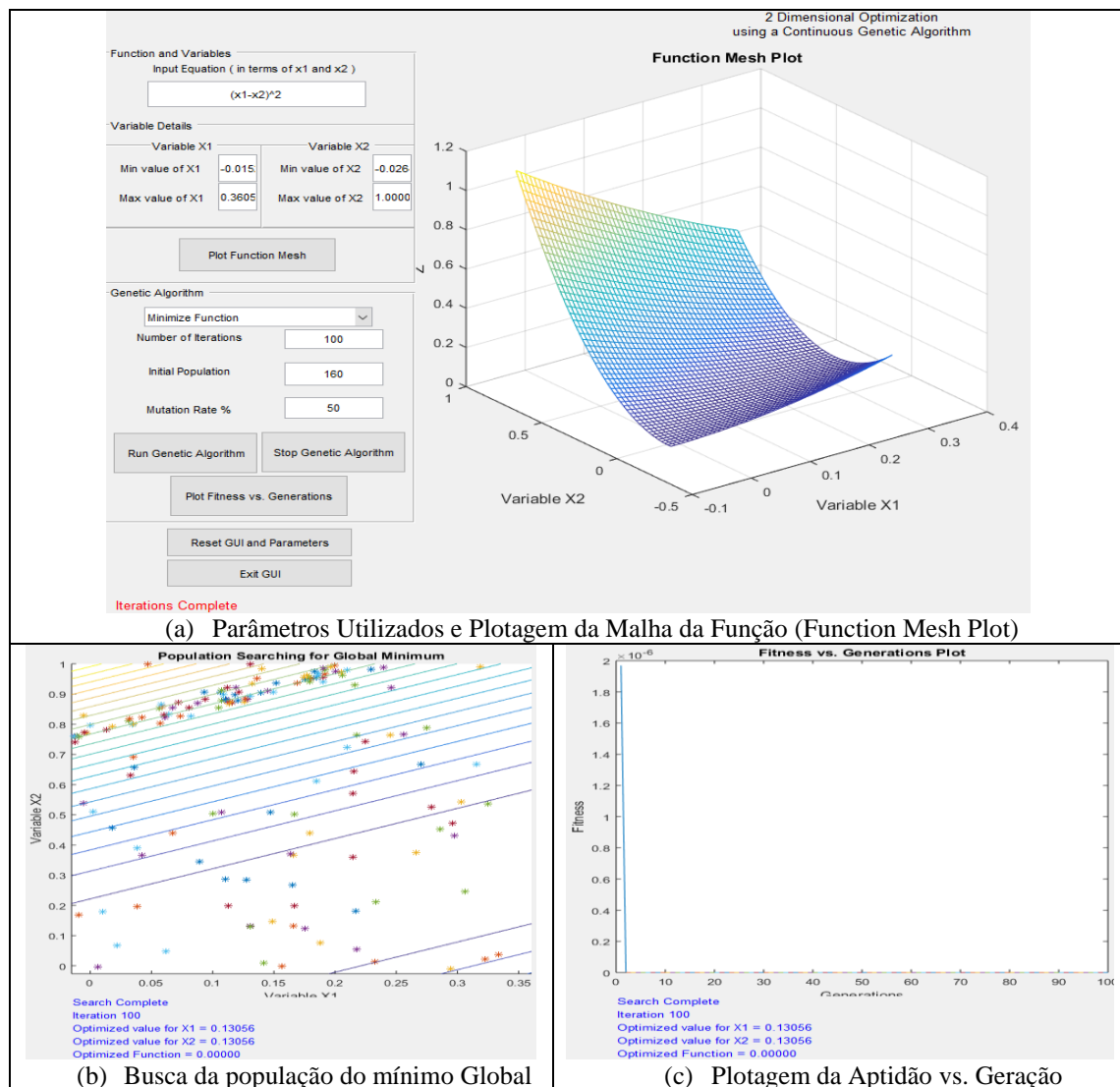


Figura A1.91 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD3 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 12 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.11 Caso 13 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD4)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD4), com configuração de dano conforme representado na Figura A1.92 (Silva, 2015).

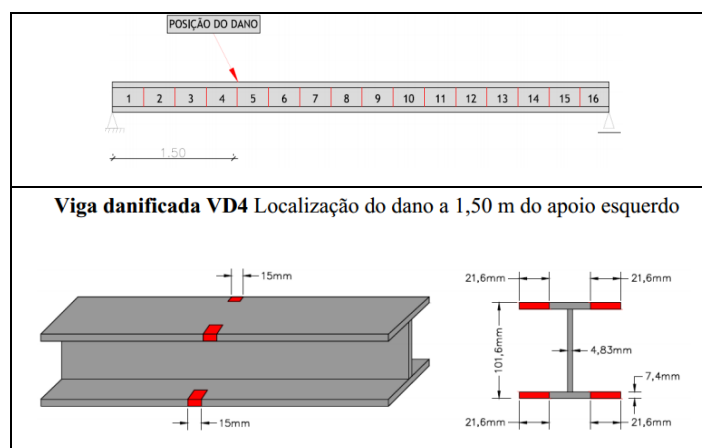


Figura A1.92 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD4 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 13 são apresentadas a seguir.

1.4.11.1 Análise Dinâmica Caso 13 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD4): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 13, apresentada na Figura A1.93, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

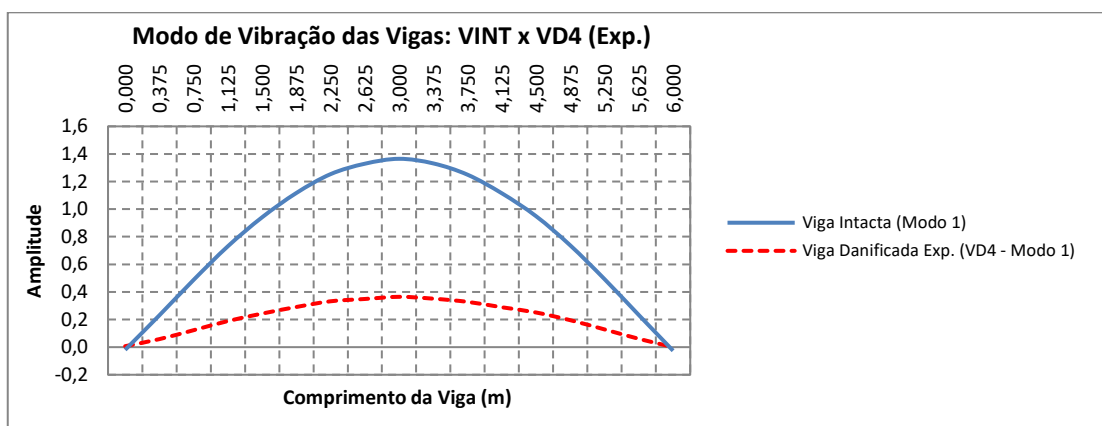


Figura A1.93 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 13 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.94 é mostrado o resultado da solução do problema.

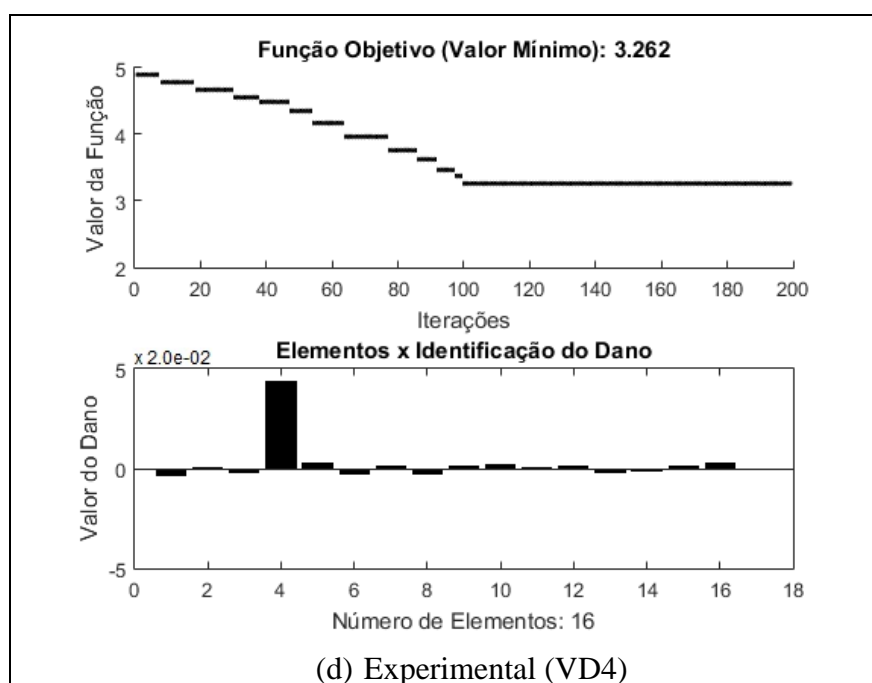


Figura A1.94 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 13 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.11.2 Análise Dinâmica Caso 13 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD4):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.95 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

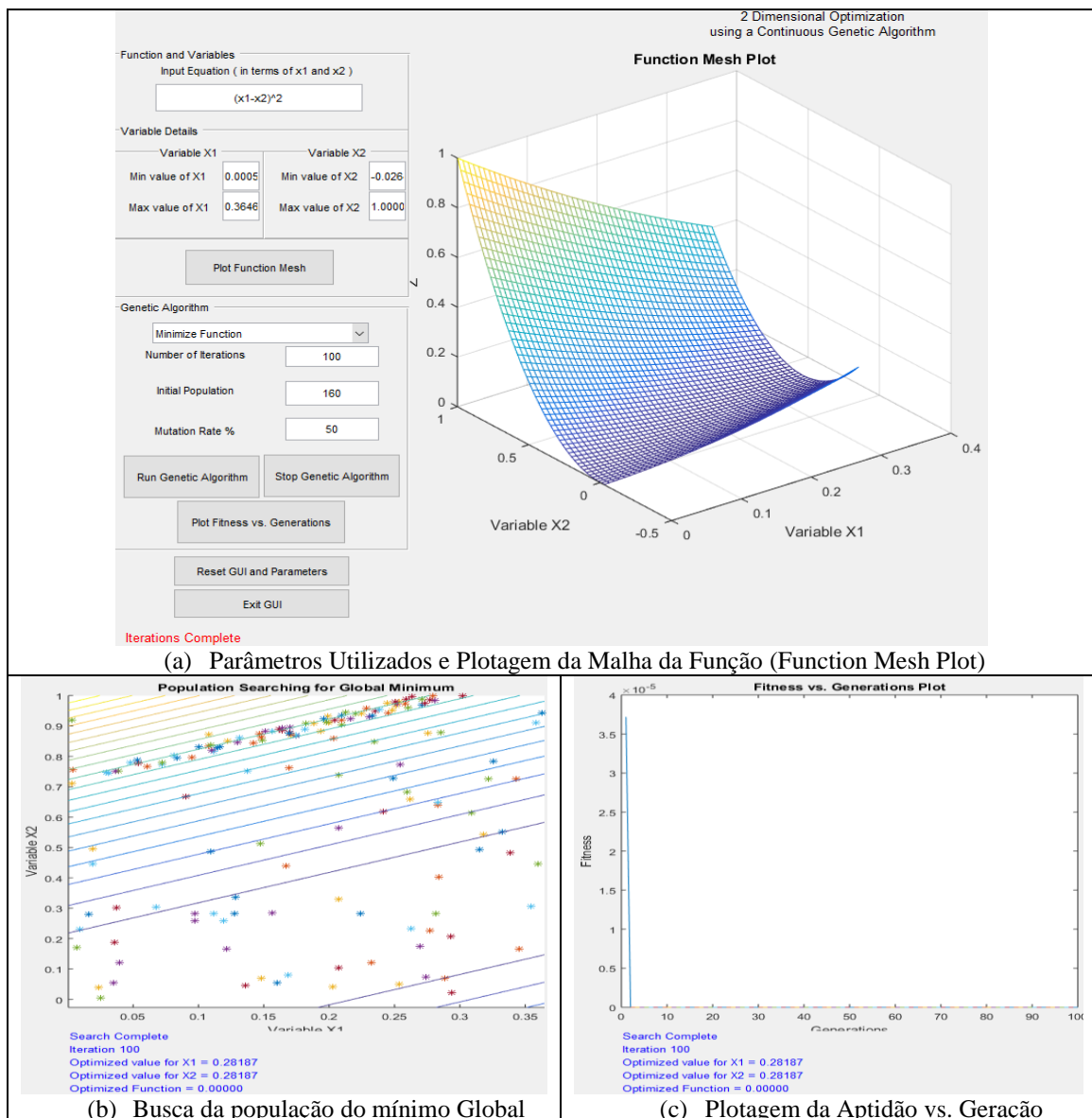


Figura A1.95 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD4 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 13 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.12 Caso 14 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD5)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD5), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.96 a seguir.

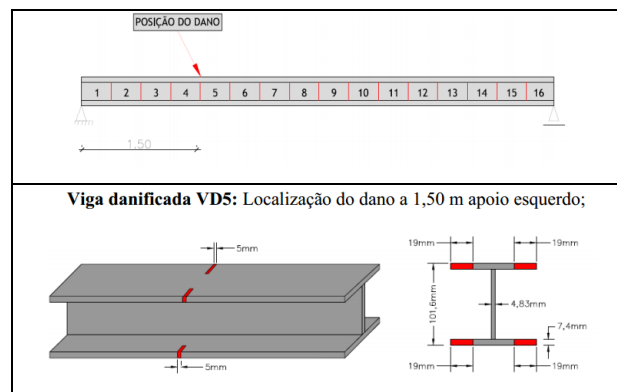


Figura A1.96 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD5 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 14 são apresentadas a seguir.

1.4.12.1 Análise Dinâmica Caso 14 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD5): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 14, apresentada na Figura A1.97, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

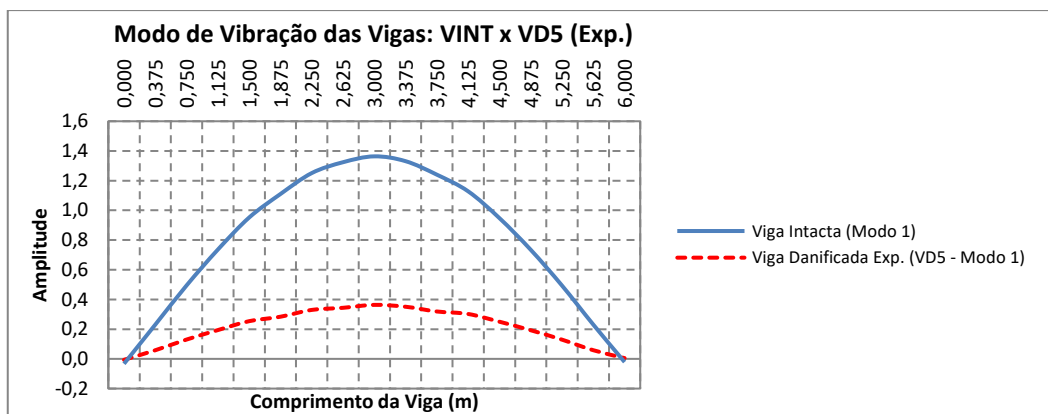


Figura A1.97 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 14 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.98 é mostrado o resultado da solução do problema.

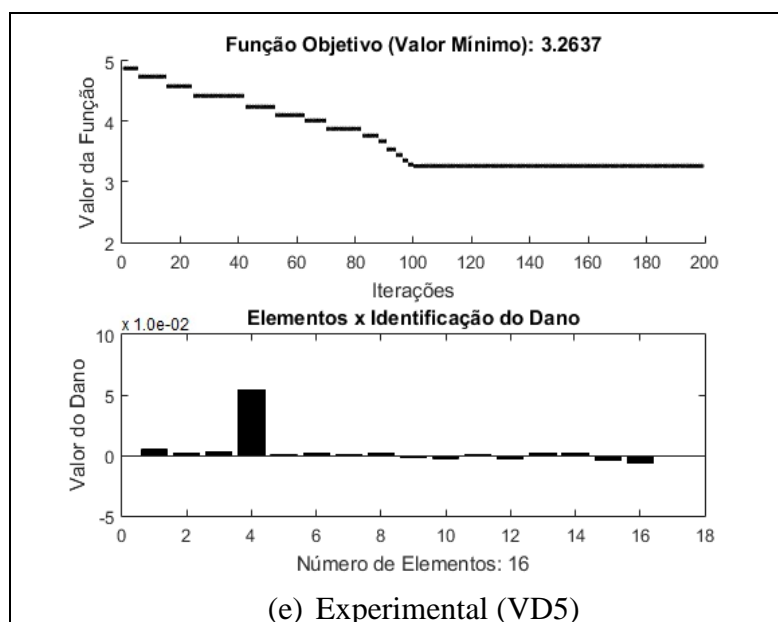


Figura A1.98 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD5 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 14 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.12.2 Análise Dinâmica Caso 14 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD5):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.99 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

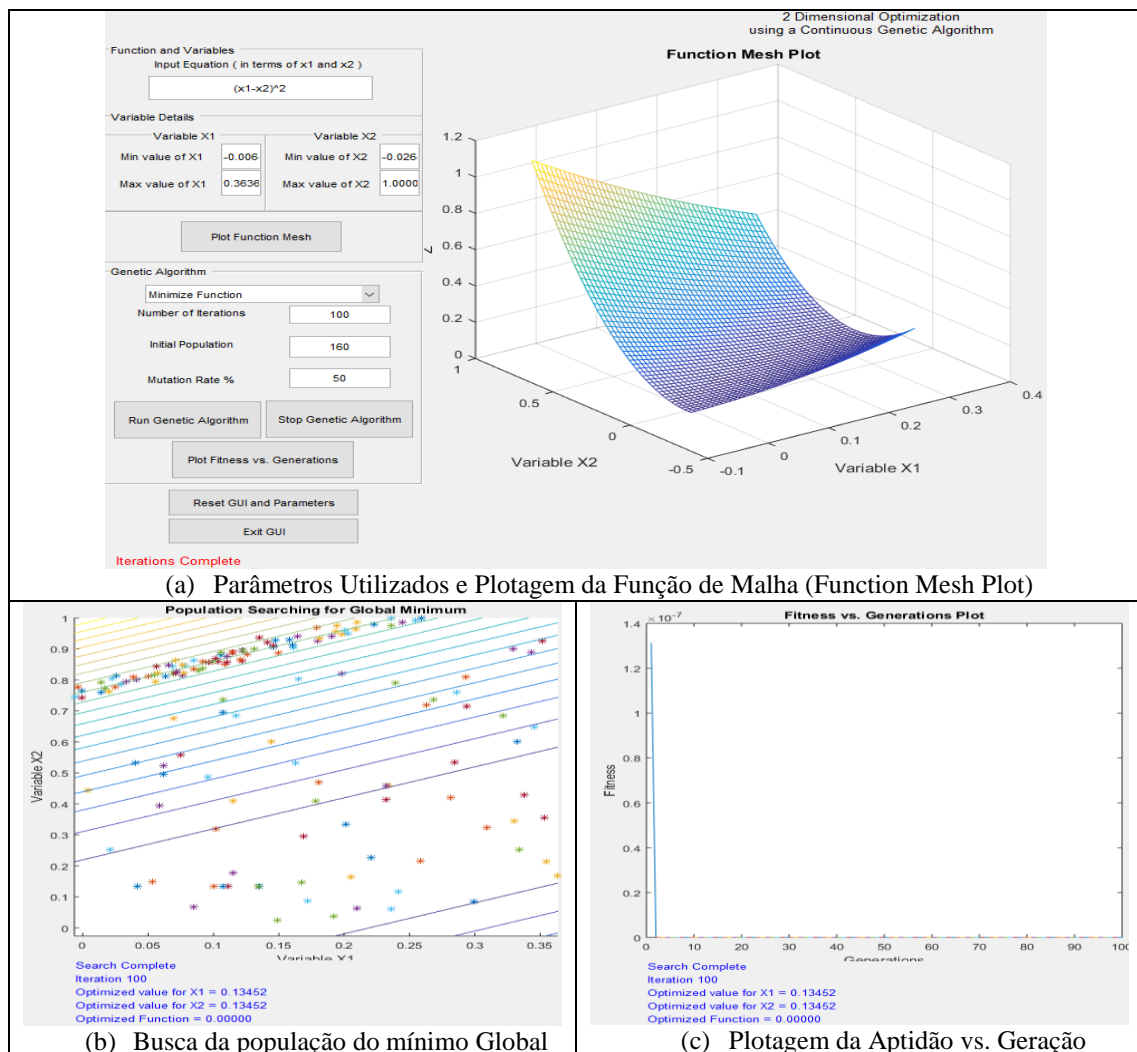


Figura A1.99 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD5 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 14 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.13 Caso 15 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD6)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD6), com configuração de dano conforme representado na Figura A1.100 (Silva, 2015).

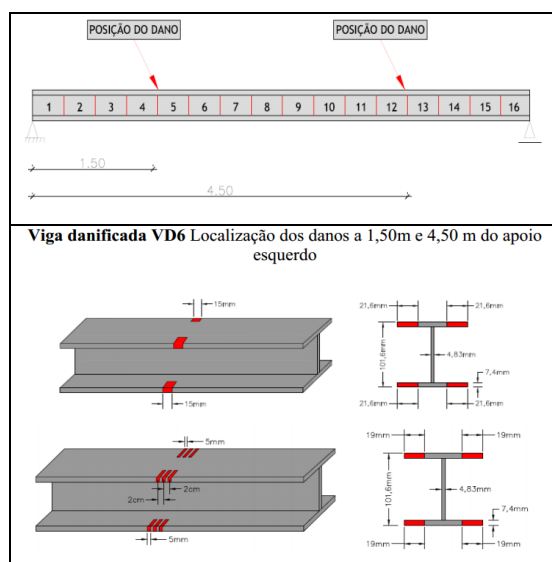


Figura A1.100 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD6 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 15 são apresentadas a seguir.

1.4.13.1 Análise Dinâmica Caso 15 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD6): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 15, apresentada na Figura A1.101, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração

gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

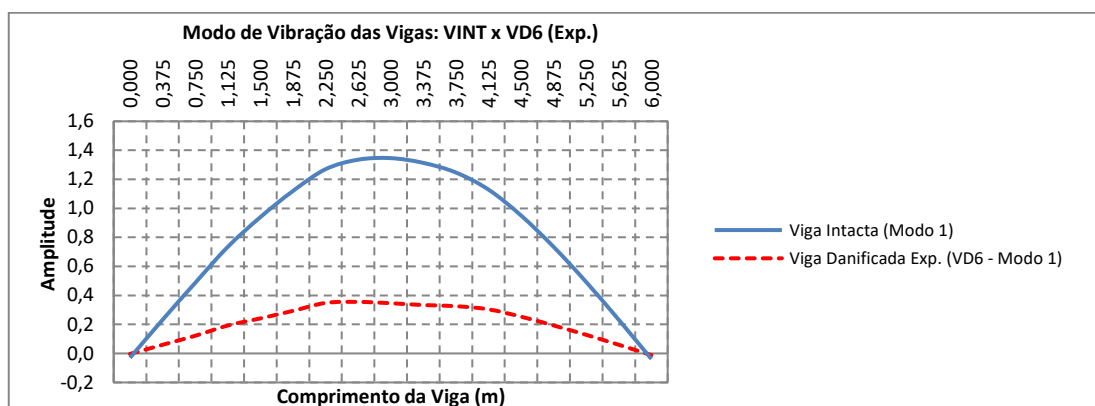


Figura A1.101 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 15 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.102 é mostrado o resultado da solução do problema.

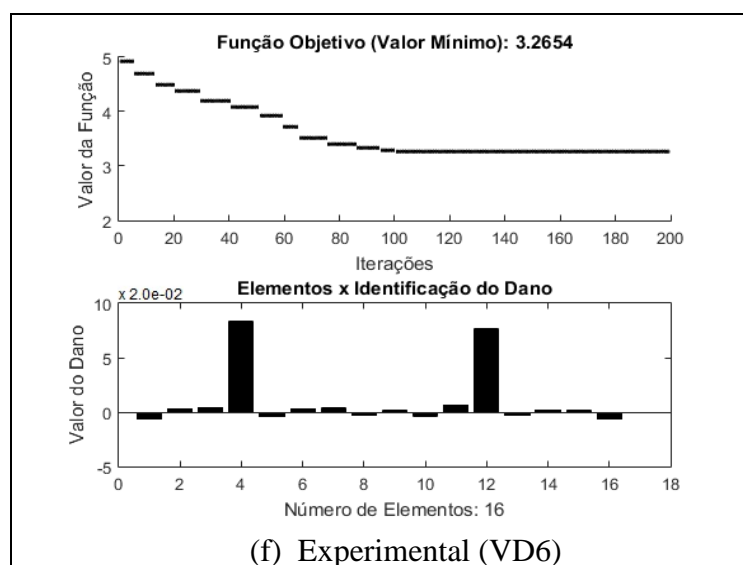


Figura A1.102 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD6 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 15 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.13.2 Análise Dinâmica Caso 15 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD6):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.103 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

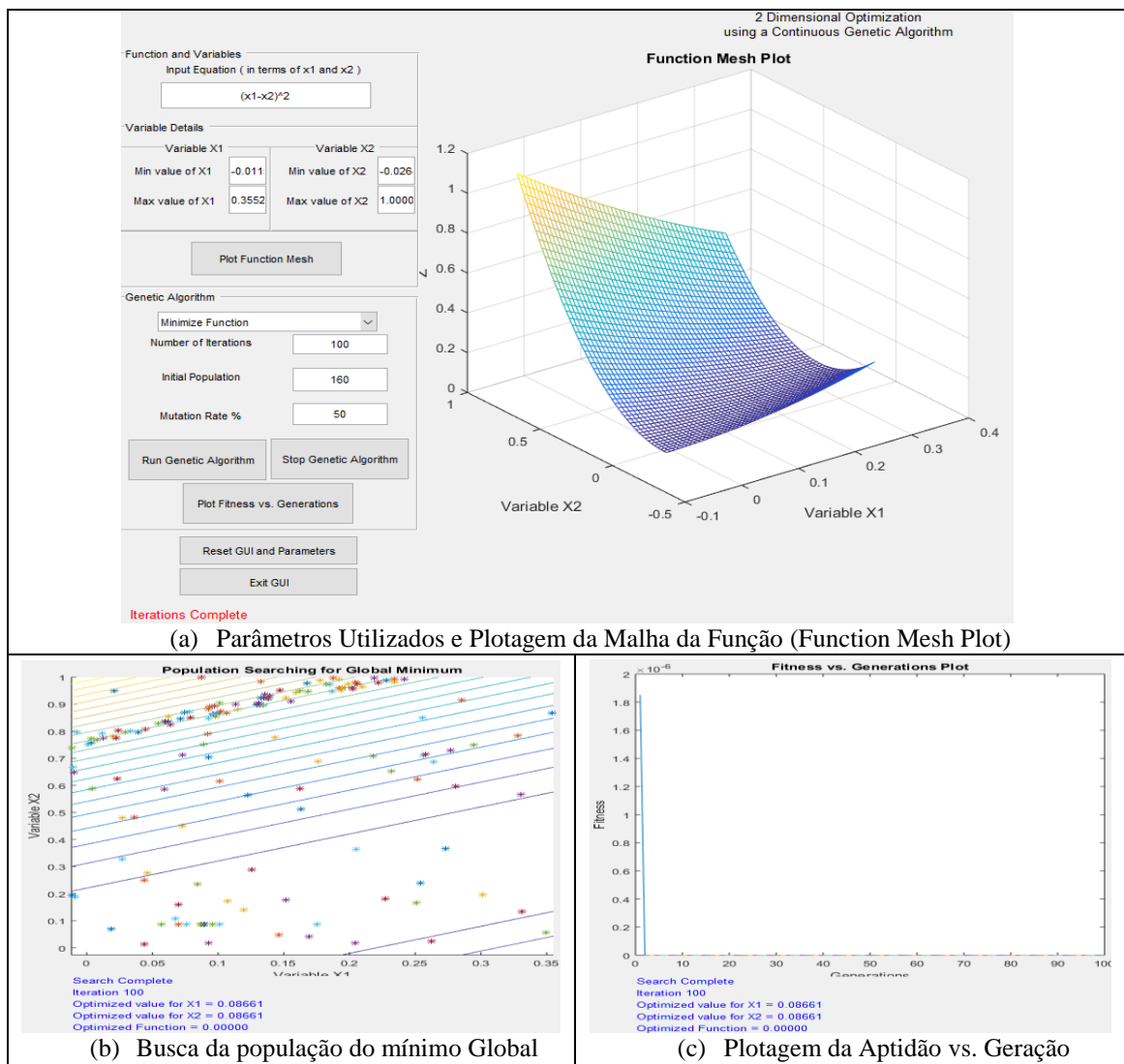


Figura A1.103 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD6 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 15 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8m e 4,2m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.14 Caso 16 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD7)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD7), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.104 a seguir.

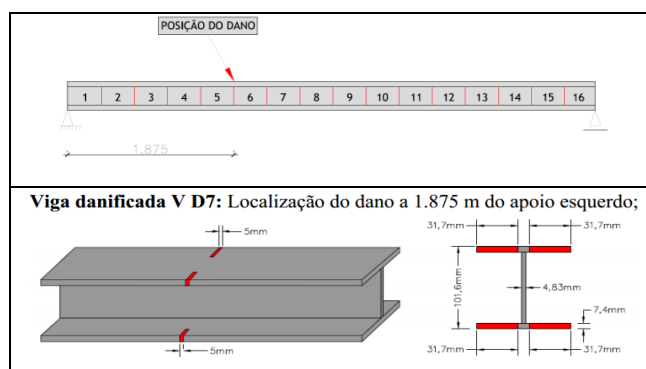


Figura A1.104 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD7 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 16 são apresentadas a seguir.

1.4.14.1 Análise Dinâmica Caso 16 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD7): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,8$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 16, apresentada na Figura A1.105, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

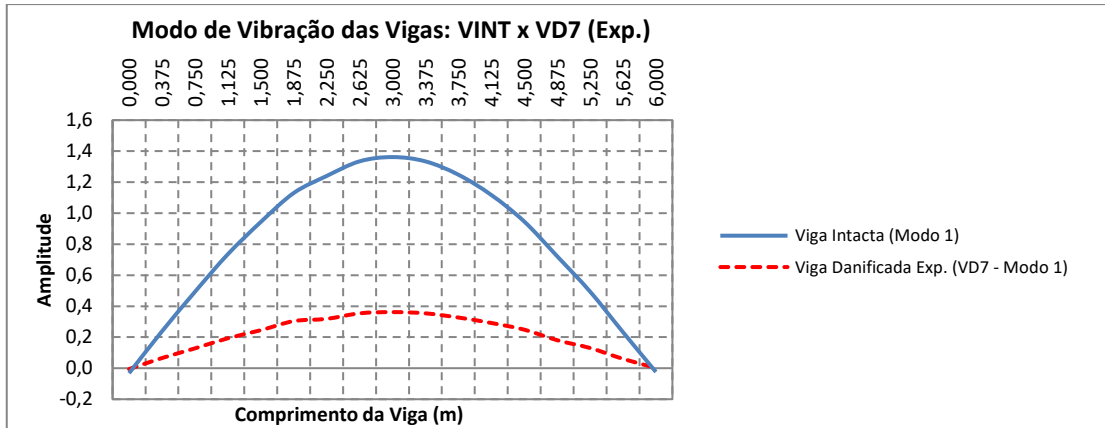


Figura A1.105 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 16 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.106 é mostrado o resultado da solução do problema.

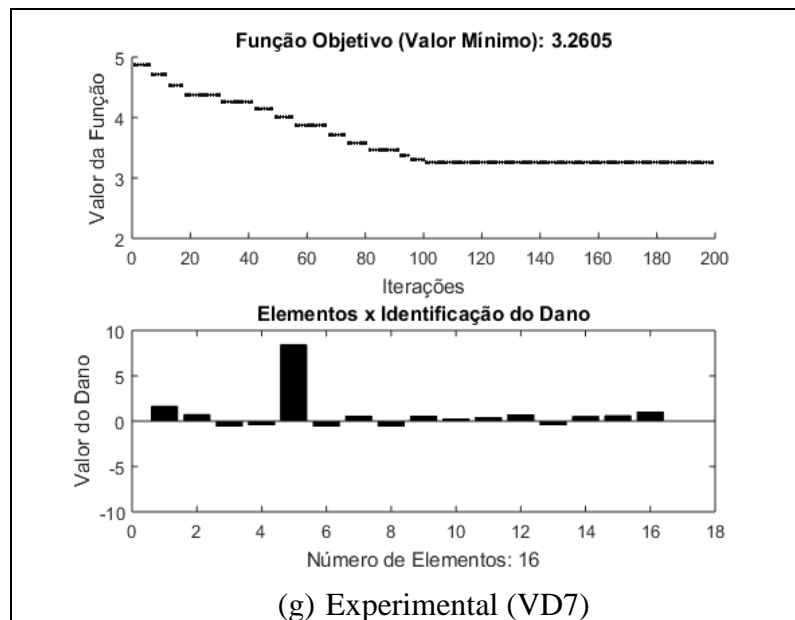


Figura A1.106 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD7 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 16 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,875m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.14.2 Análise Dinâmica Caso 16 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD7):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.107 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

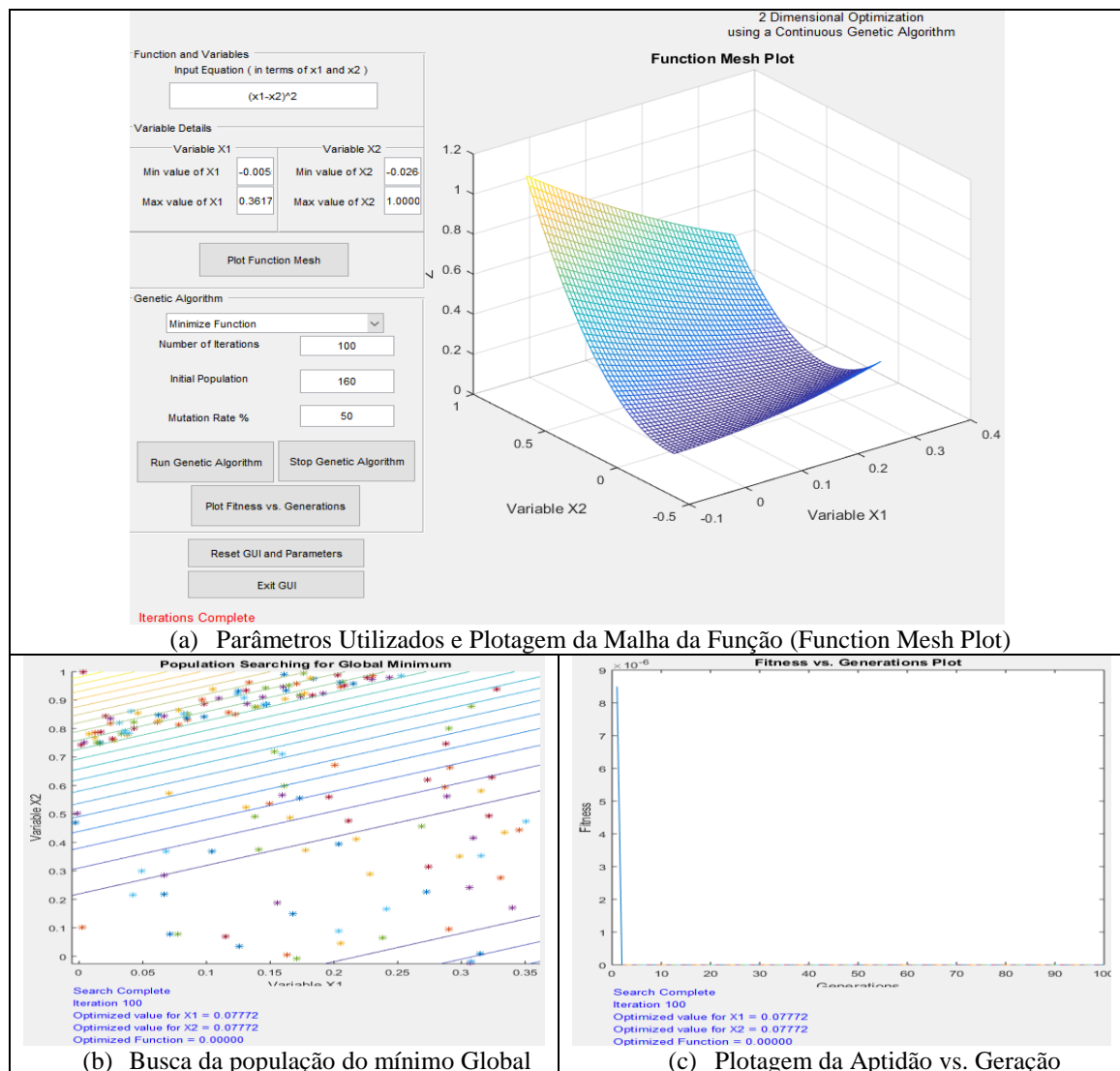


Figura A1.107 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD7 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 16 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,875m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.15 Caso 17 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD8)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD8), com configuração de dano conforme representado na Figura A1.108 (Silva, 2015).

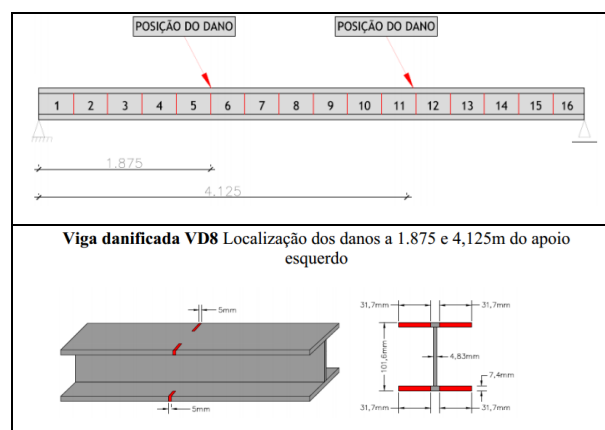


Figura A1.108 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD8 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 17 são apresentadas a seguir.

1.4.15.1 Análise Dinâmica Caso 17 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD8): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,8$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 17, apresentada na Figura A1.109, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

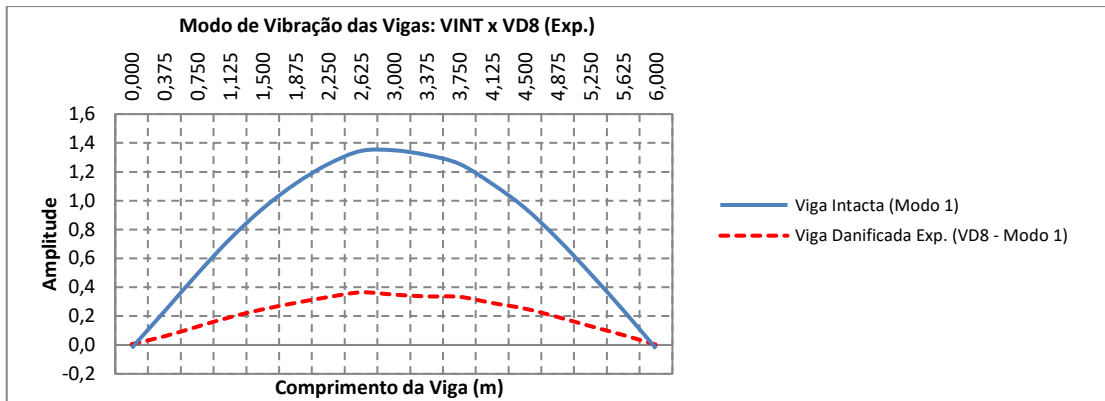


Figura A1.109 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 17 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos modos de vibração intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.110 é mostrado o resultado da solução do problema.

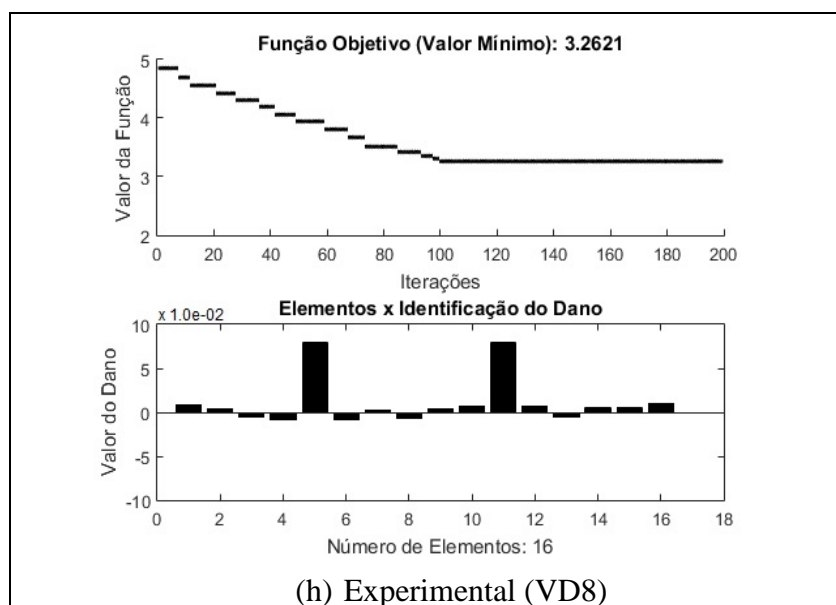


Figura A1.110 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD8 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 17 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m e 4.125m)

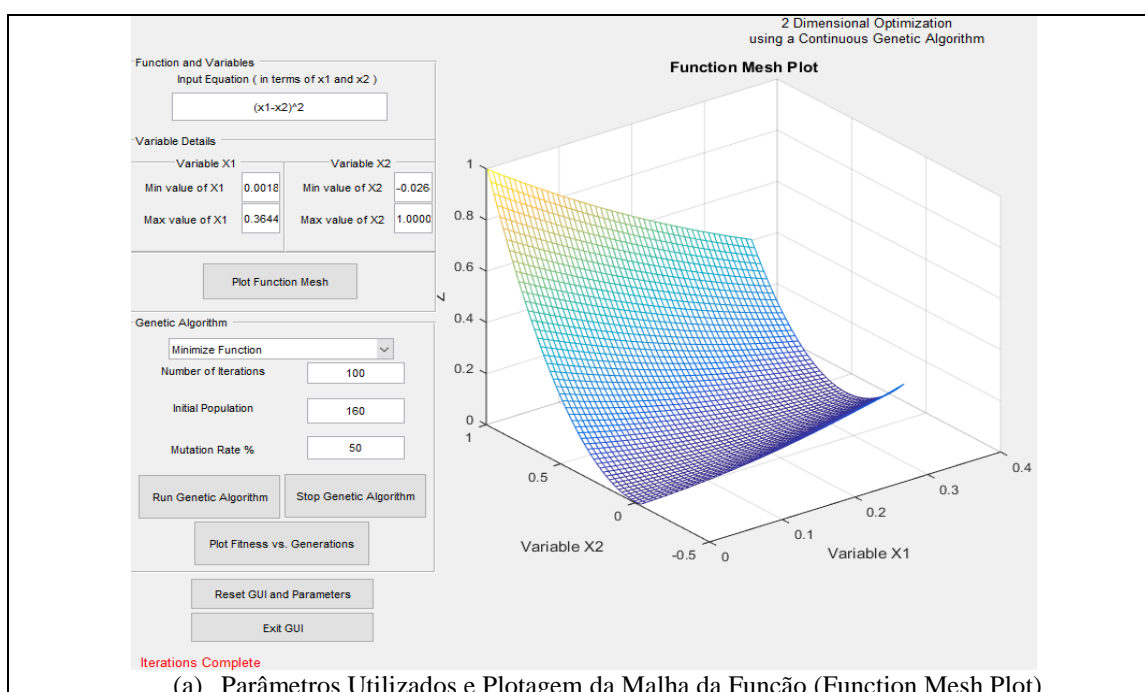
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.15.2 Análise Dinâmica Caso 17 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD8):

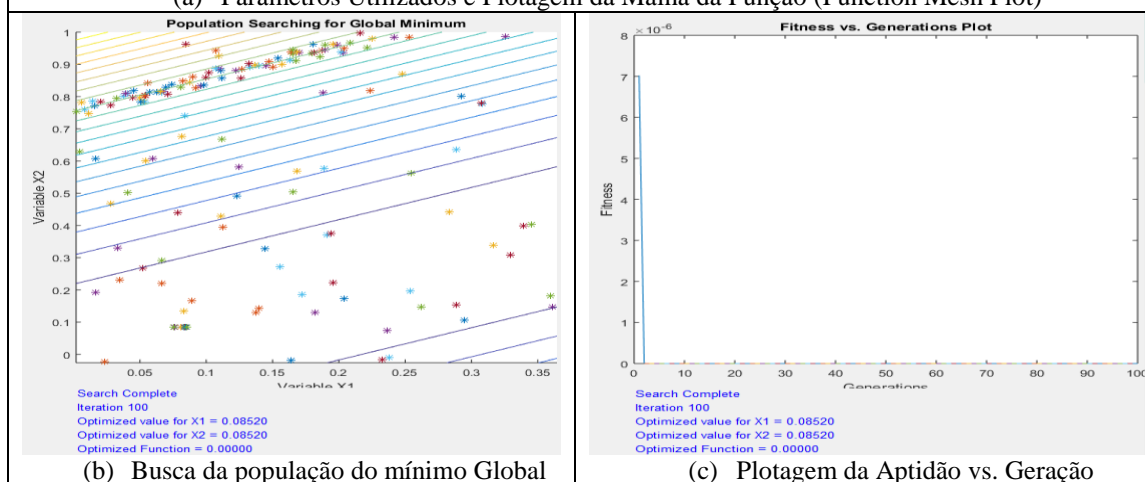
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.111 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.111 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD8 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 17 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m e 4.125m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.16 Caso 18 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD9)

Para a viga metálica biapoiada danificada (VD9), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.112 a seguir.

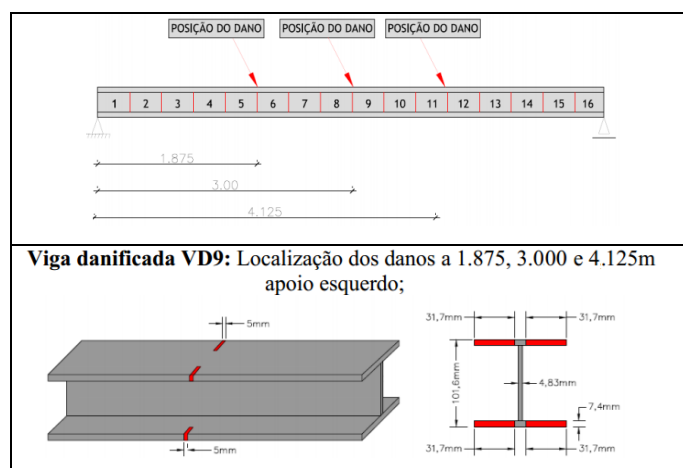


Figura A1.112 - Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica: VD9 (Silva, 2015)

As análises de otimização de cada método para o caso 18 são apresentadas a seguir.

1.4.16.1 Análise Dinâmica Caso 18 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD9): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 18, apresentada na Figura A1.113, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

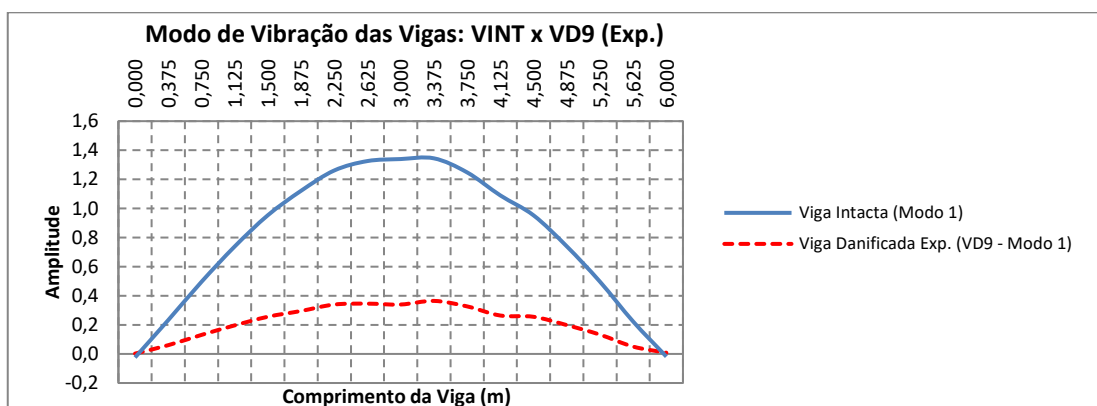


Figura A1.113 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 18 (carga de $\cong 3kN$)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.114 é mostrado o resultado da solução do problema.

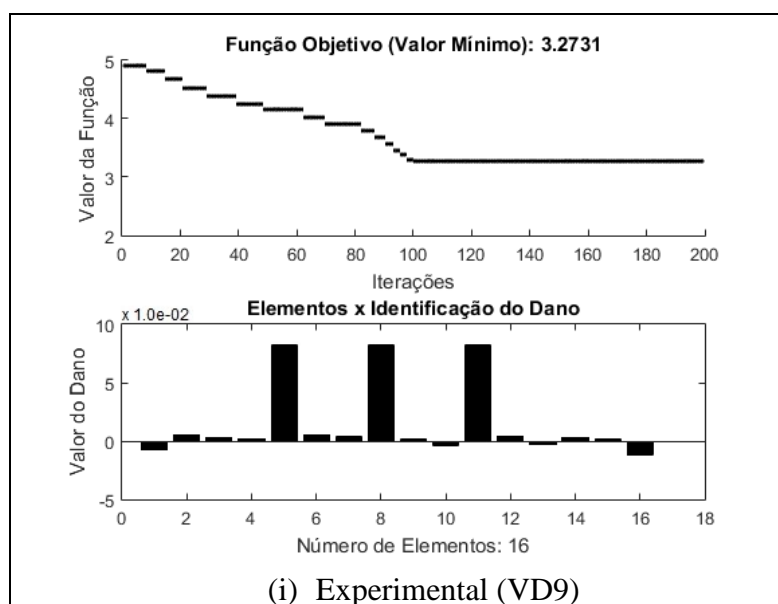


Figura A1.114 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano VD9 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 18 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m, 3.000m e 4.125m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.17.

1.4.16.2 Análise Dinâmica Caso 18 Viga Metálica Biapoiada Danificada (VD9):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.115 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

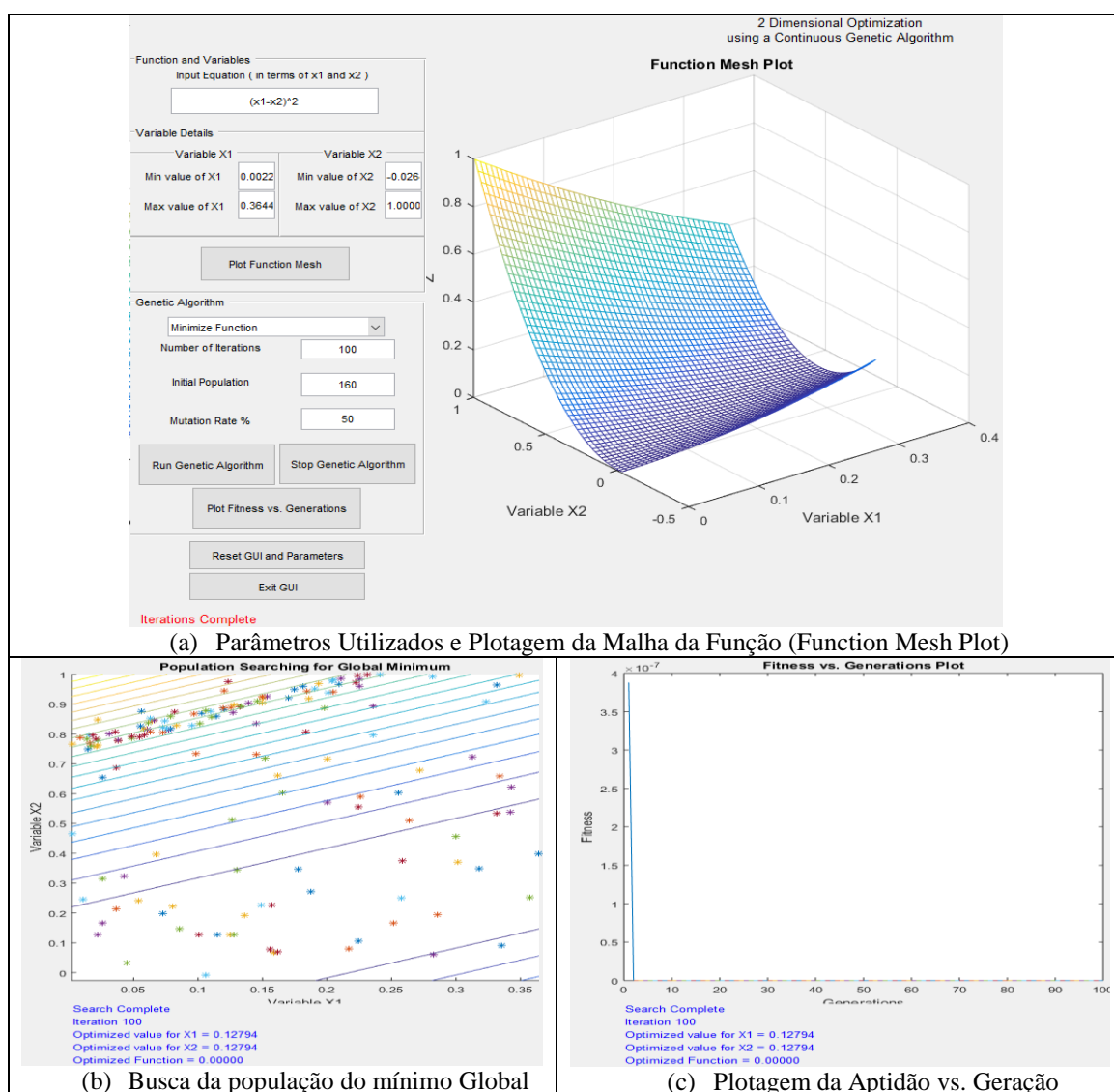


Figura A1.115 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano VD9 (100 iterações): Viga Biapoiada Caso 18 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – a 1.875m, 3.000m e 4.125m)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.4.18.

1.4.17 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 10 a 18 (VD1 a VD9) - Análise Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.25 a seguir.

Tabela A1.25 - Análise Resumo ED: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 10 a 18

Item Caso Geral	Modo de Vib.	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
10		VD1		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	≅0.147%	3.2663
11		VD2		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	≅0.294%	3.2598
12		VD3		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	≅0.882%	3.2615
13		VD4		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	≅1.764%	3.2620
14		VD5	ED	a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	≅0.517%	3.2637
15	Modo 1	VD6	/ Experim. / Dinâmico	a 1.5m e 4.5 m	100 ^a	4 e 12	≅1.764% e ≅1.551%	3.2654
16		VD7		a 1.875m	100 ^a	5	≅0.863%	3.2605
17		VD8		a 1.875m e 4.125m	100 ^a	5 e 11	≅0.863%	3.2621
18		VD9		a 1.875m, 3.000m e 4.125m	100 ^a	5, 8 e 11	≅0.863%	3.2731

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, para os casos com um ponto de dano, encontrando-se danos de aproximadamente de 0,147% para o caso VD1, de 0,294% para o caso VD2, de 0,882% para o caso VD3, de 1,764% para o caso VD4 e de 0,517% para o caso VD5, todos com a posição danificada no elemento 4, e ainda o caso VD7 com 0,863% no elemento 5. Verificou-se nesses casos com um ponto de dano alguns picos próximos aos apoios e quando se aproxima ao local do dano.

Já para as análises dos casos com dois pontos de danos, a viga VD6 com danos de aproximadamente 1,764% e 1,551% nos elementos 4 e 12, além da viga VD8 com danos iguais de aproximadamente 0,863% nos elementos 5 e 11, ambos com algumas perturbações para os demais elementos.

Por fim, o caso com três pontos de danos nos elementos 5, 8 e 11, todos com percentual de dano de aproximadamente 0,863%, seguindo em conformidade ao problema proposto, além de mais algumas pequenas perturbações para os demais elementos, principalmente nas proximidades dos apoios.

Nas proximidades dos pontos de danos houve também algumas distorções provavelmente por causa da perturbação causada, onde para uma adequação mais realista ao modelo, poderia se utilizar de um número maior de iterações.

As análises de identificação de dano nesse exemplo, se restringiram aos modos de vibração obtidos nas análises experimentais intactas e danificadas, mas como foi relatado anteriormente, buscou-se utilizar novamente um número maior de iterações que possibilitaram uma diminuição nos resíduos gerados, mesmo onde houvesse grandes diferenças de deslocamentos, presença de cargas pontuais, proximidades dos apoios ou mesmo nas proximidades das regiões danificadas, apesar disso os valores de danos dos elementos seguiram em conformidade ao problema proposto. Enfatiza-se aí que o aumento do número de iterações, em alguns casos, auxilia na resolução do problema de aproximação de mínimo local.

Com as análises dessas vigas, pode-se afirmar também que um número maior de informações de modos de vibração também auxiliariam no trabalho do otimizador. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer das estruturas em estudo.

1.4.18 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 10 a 18 (VD1 a VD9) - Análise Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.26 a seguir.

Tabela A1.26 – Análise Resumo AG: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 10 a 18

Item Caso Geral	Modo de Vib.	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
10		VD1		a 1.5m = (L/4)	200 ^a	4	$\cong 2.2e-04\%$ Correto $\cong 0.147\%$	0.12198
11		VD2		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	$\cong 6.4e-03\%$ Correto $\cong 0.294\%$	0.17385
12		VD3		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	$\cong 1.95e-04\%$ Correto $\cong 0.882\%$	0.13056
13		VD4		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	$\cong 3.7e-03\%$ Correto $\cong 1.764\%$	0.28187
14	Modo 1	VD5	AG / Experim. / Dinâmico	a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	$\cong 1.3e-05\%$ Correto $\cong 0.517\%$	0.13452
15		VD6		a 1.5m e 4.5 m	100 ^a	4 e 12	$\cong 1.85e-04\%$ Correto $\cong 1.764\%$ e $\cong 1.551\%$	0.08661
16		VD7		a 1.875m	100 ^a	5	$\cong 8.5e-04\%$ Correto $\cong 0.863\%$	0.07772
17		VD8		a 1.875m e 4.125m	100 ^a	5 e 11	$\cong 7.0e-04\%$ Correto $\cong 0.863\%$	0.08520
18		VD9		a 1.875m, 3.000m e 4.125m	100 ^a	5, 8 e 11	$\cong 3.85e-05\%$ Correto $\cong 0.863\%$	0.12794

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do AG, com análises na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, mas os casos 16 (VD7) e 17 (VD8) tiveram melhores resultados, mais ainda o caso 16 em termos de aproximação maior, mas em quase todas as situações encontrou-se algumas perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificado como as variáveis x1 e x2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.27 resumo a seguir.

Tabela A1.27 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados

Valores das Variáveis	Intacto	Caso Geral 10 VD1	Caso Geral 11 VD2	Caso Geral 12 VD3	Caso Geral 13 VD4	Caso Geral 14 VD5	Caso Geral 15 VD6	Caso Geral 16 VD7	Caso Geral 17 VD8	Caso Geral 18 VD9
max/>	1,0000000	0,3534861	0,3562011	0,3605381	0,3646910	0,3636010	0,3552605	0,3617563	0,3644964	0,3644592
min/<	-0,0264915	-0,0002133	0,0010267	-0,0152502	0,0005216	-0,0064792	-0,0115714	-0,0055430	0,0018758	0,0022081

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG.

1.5 ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS METÁLICAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (DISSERTAÇÃO: PALECHOR, 2013)

Numa continuação da minha pesquisa de mestrado, através das análises da dissertação de Palechor (2014), agora buscou-se estudos de análises dinâmicas com verificações em vigas metálicas (perfil-I), de aço MR-250 de comprimentos totais de 6,00 metros, em condição biapoiada, com várias posições do dano para a análise.

A simulação do dano na modelagem numérica foi feita da seguinte forma: no caso da modelagem feita com o elemento BEAM3, o dano foi simulado com a redução da área e do momento de inércia do elemento danificado; no caso da modelagem, com o elemento SHELL63, a simulação do dano foi feita eliminando elementos da malha gerada pelo programa.

Todos esses casos, constam em Palechor (2013), já com as análises dinâmicas em sua dissertação de mestrado e sendo estes os elementos trabalhados para continuação dessa pesquisa através da mesma ideia da dissertação de mestrado com somente análises estáticas.

1.5.1 Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada Intacta

A viga metálica biapoiada intacta está representada na Figura A1.116, do trabalho de mestrado de Palechor (2013).

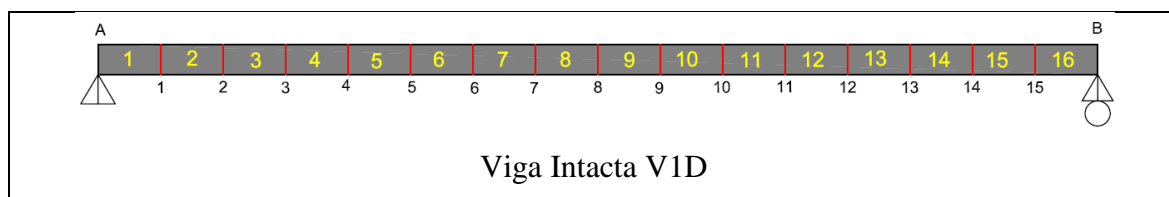


Figura A1.116 - Viga Metálica Biapoiada Intacta: V1D (Palechor, 2013)

Em termos de análises dos modos de vibração utilizados nos casos de vigas V1D, V2D (Caso 19), V3D (Caso 20), V4D (Caso 21) e V5D (Caso 22), a condição intacta será utilizada como parâmetro para verificação das condições danificadas dinâmicas das vigas do caso geral 19 ao 22.

1.5.2 Caso 19 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V2D)

Para a viga metálica biapoiada danificada (V2D), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.117 a seguir.

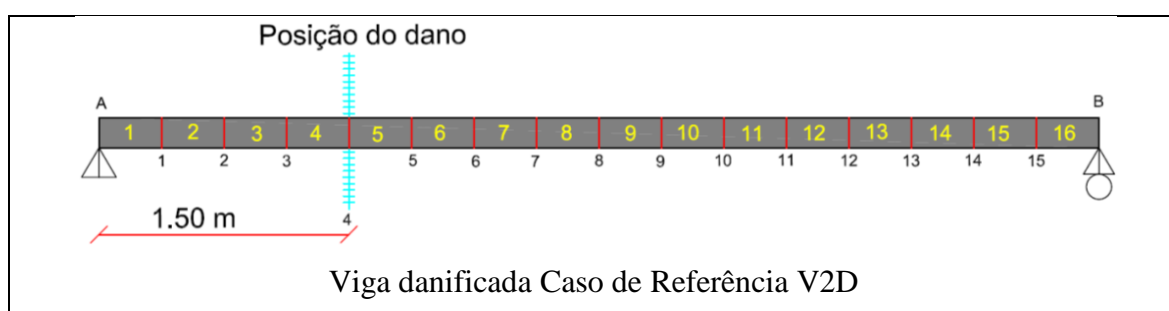


Figura A1.117 - Caso Geral 19: Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica V2D (Palechor, 2013)

As análises de otimização de cada método para o caso 19 são apresentadas a seguir.

1.5.2.1 Análise Dinâmica Caso 19 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V2D):

Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 19, apresentada na Figura A1.118, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração

gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

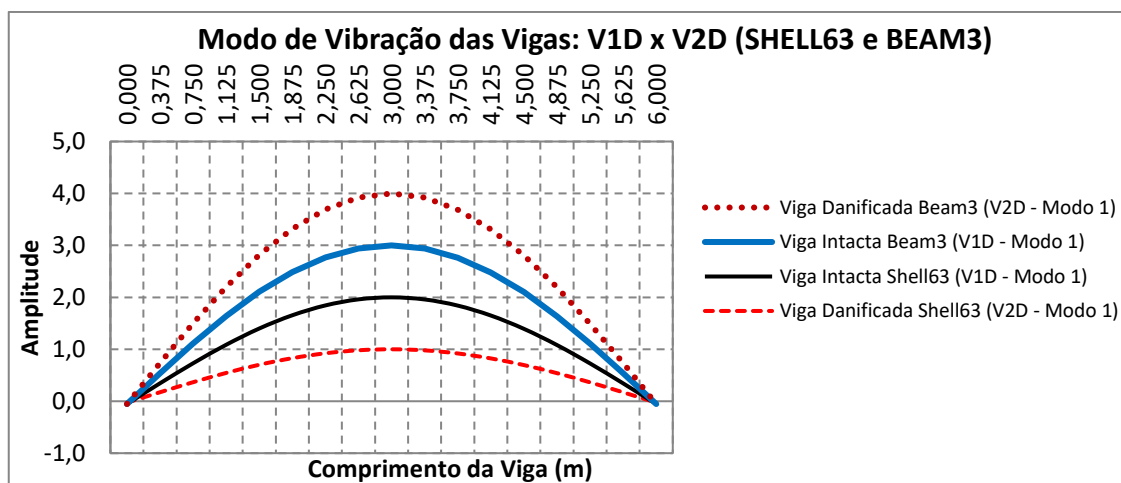


Figura A1.118 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 19 (V2D)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.119 e na Figura A1.120 são mostrados os resultados da solução do problema.

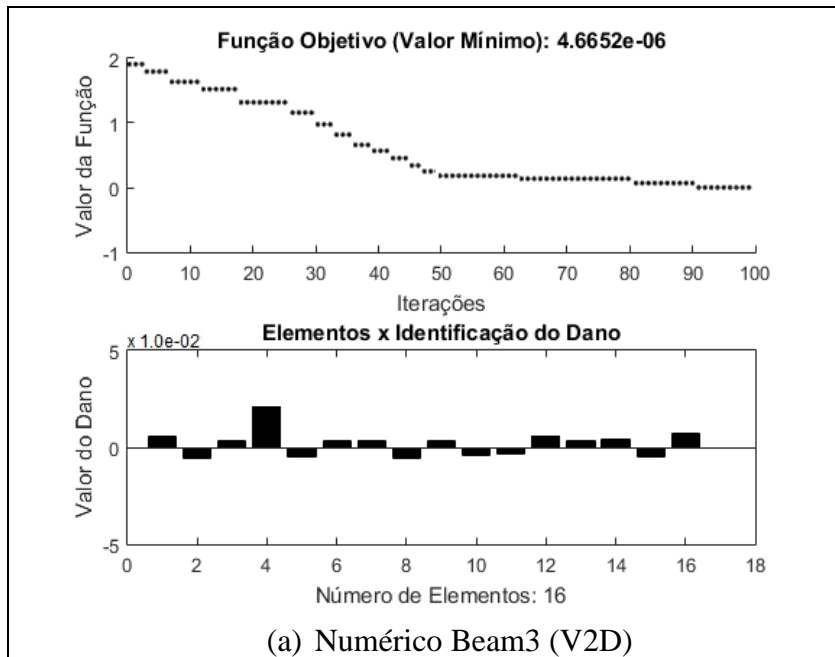


Figura A1.119 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)

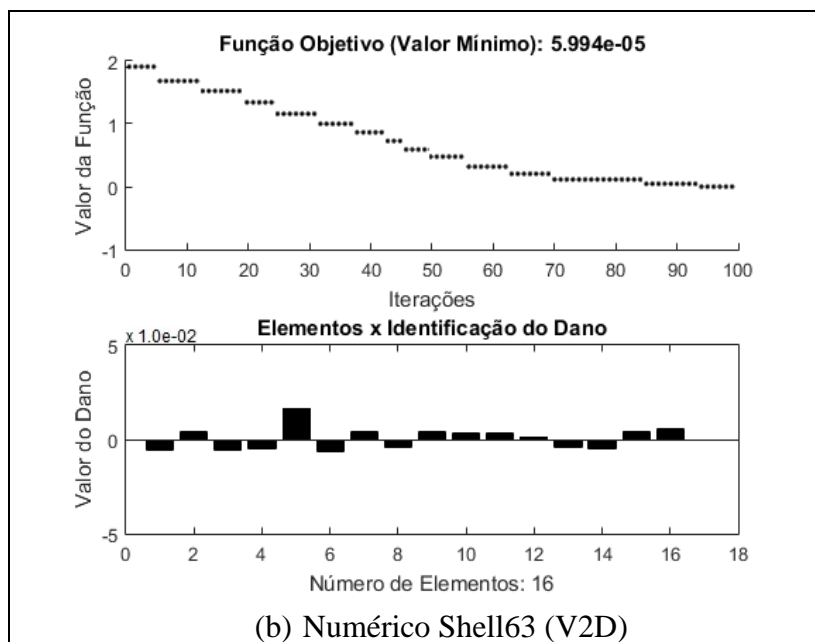


Figura A1.120 – Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.6.

1.5.2.2 Análise Dinâmica Caso 19 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V2D):

Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.121 e Figura A1.122, onde são discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

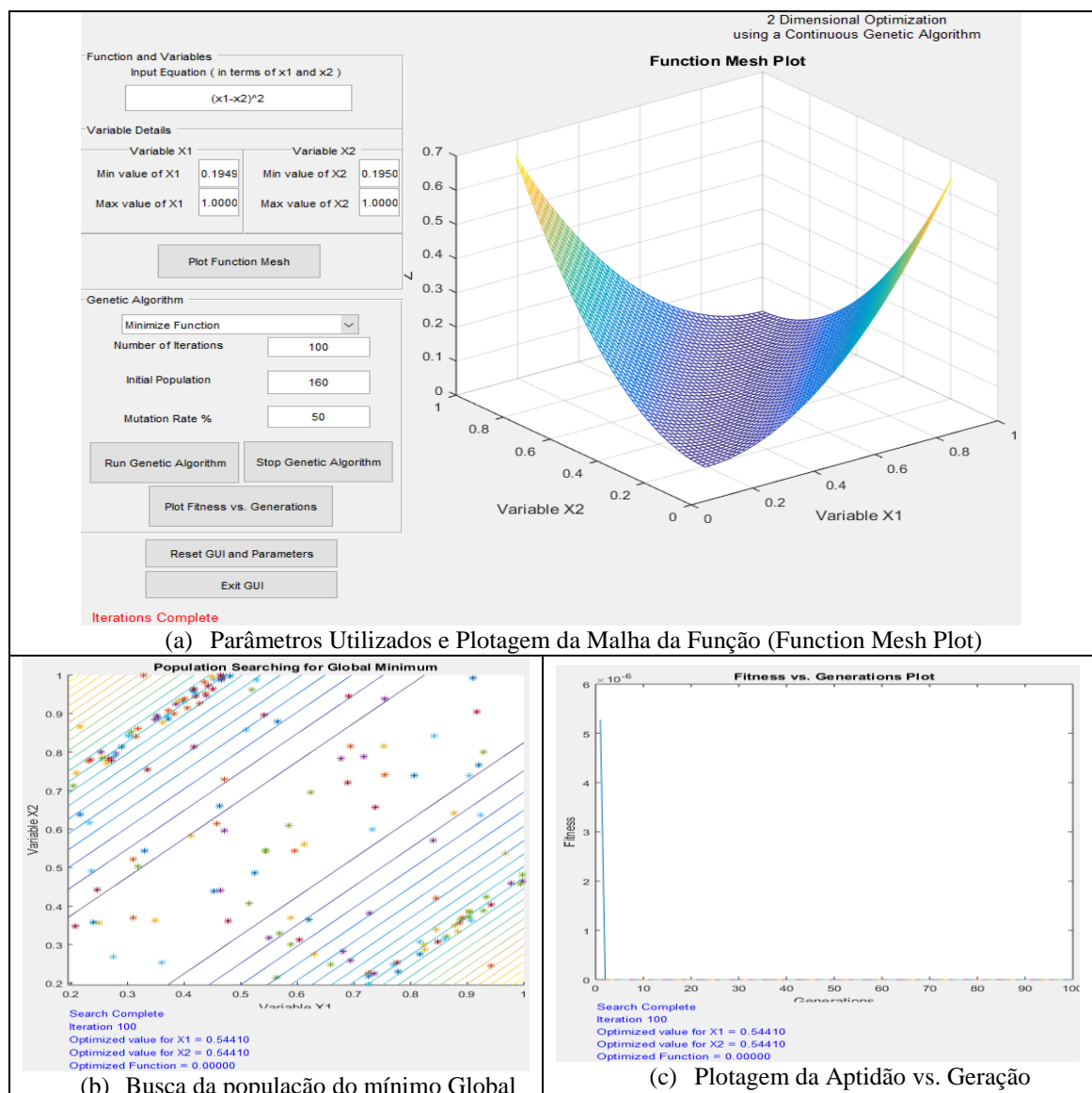


Figura A1.121 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)

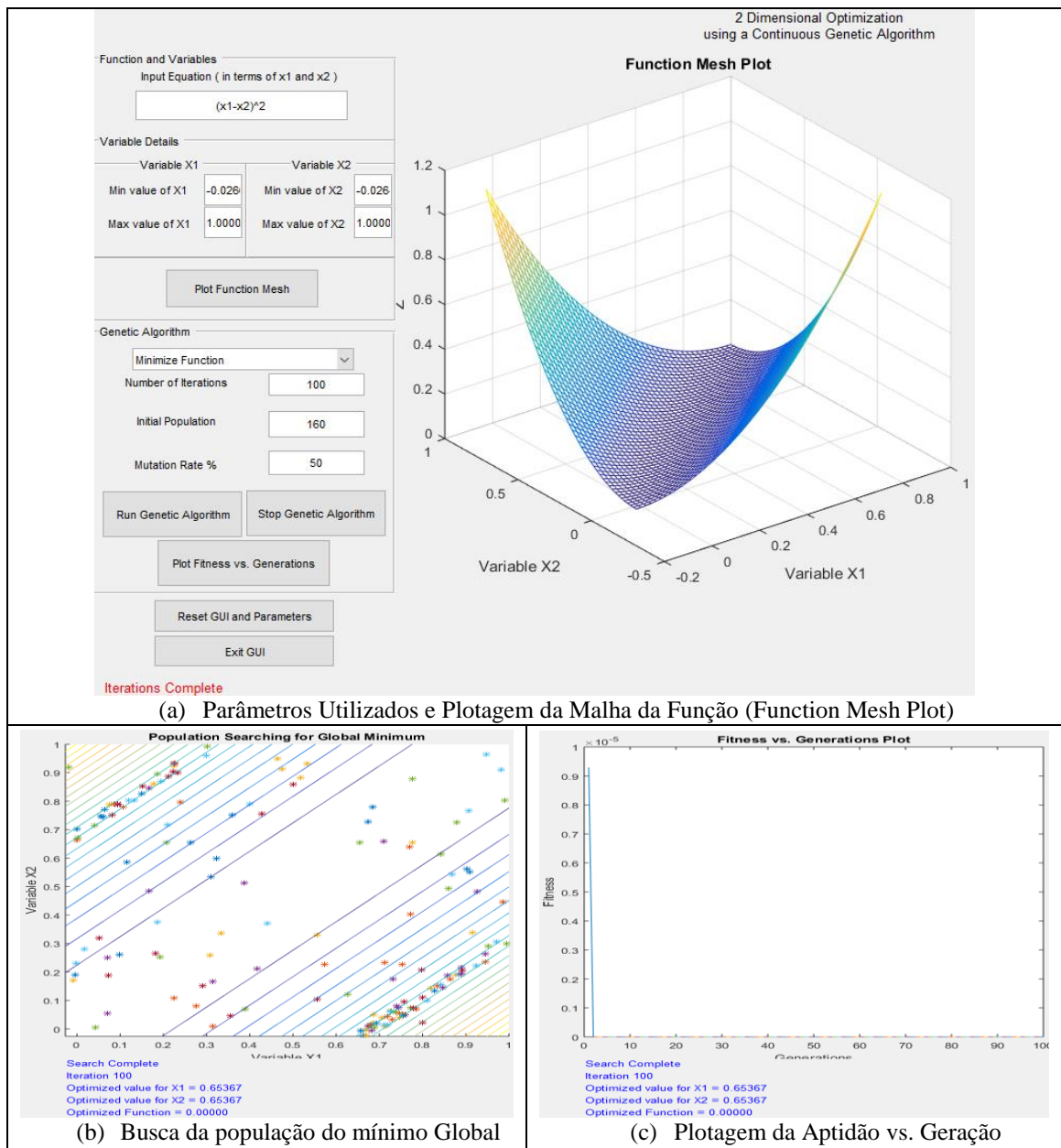


Figura A1.122 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 19 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,5 m dano de 2 cm)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.7.

1.5.3 Caso 20 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V3D)

Já a viga metálica biapoiada danificada (V3D) com configuração de dano conforme representado na Figura A1.123, do trabalho de Palechor (2013).

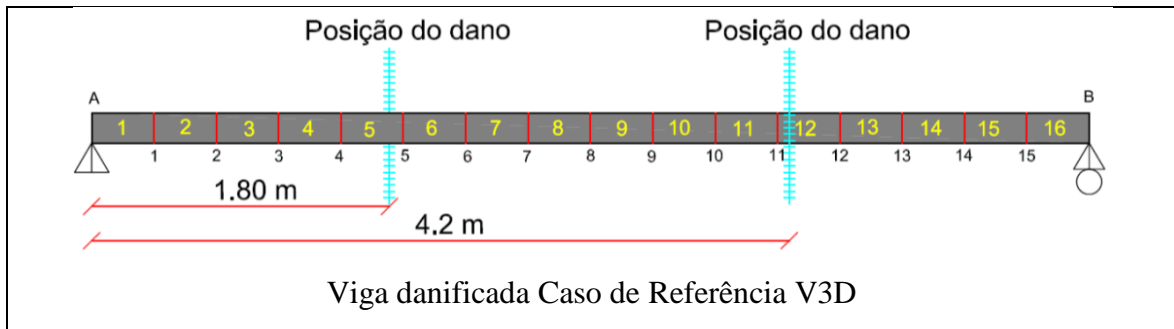


Figura A1.123 - Caso Geral 20: Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica V3D (Palechor, 2013)

As análises de otimização de cada método para o caso 20 são apresentadas a seguir.

1.5.3.1 Análise Dinâmica Caso 20 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V3D):

Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,8$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 20, apresentada na Figura A1.124, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

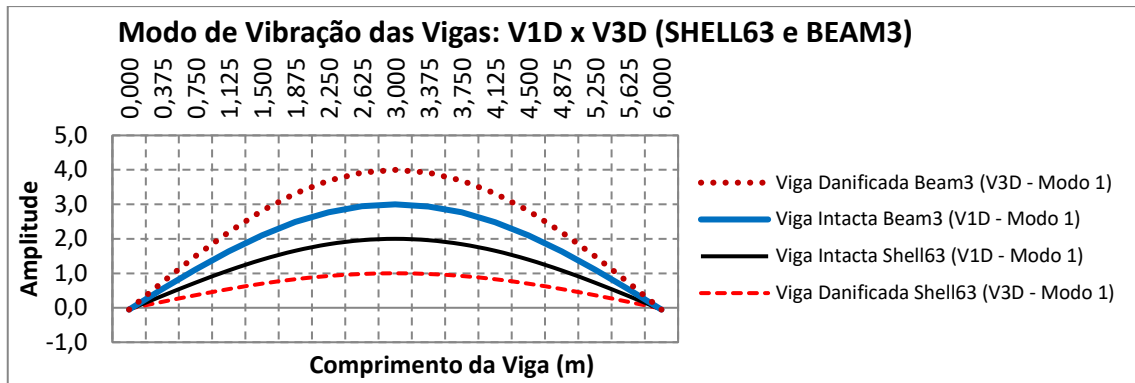


Figura A1.124 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 20 (V3D)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.125 e Figura A1.126 são mostrados os resultados da solução do problema.

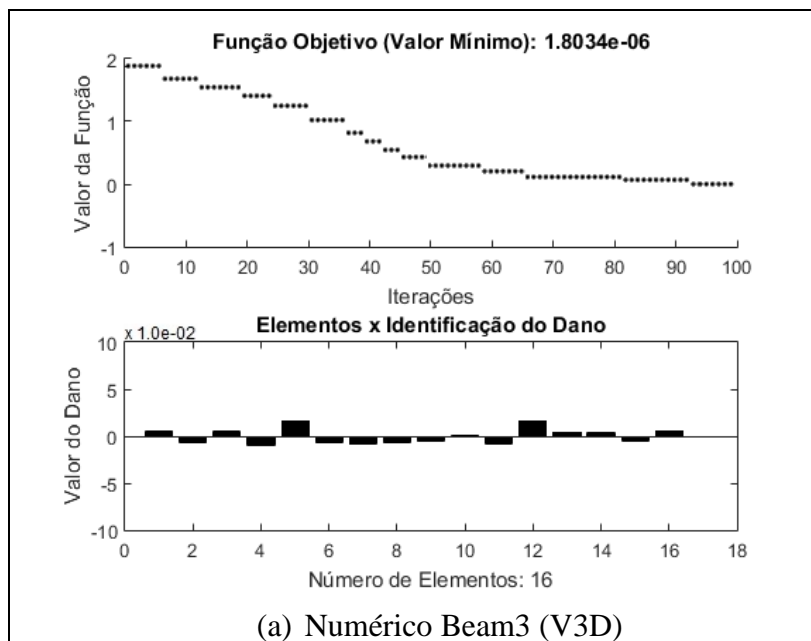


Figura A1.125 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V3D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)

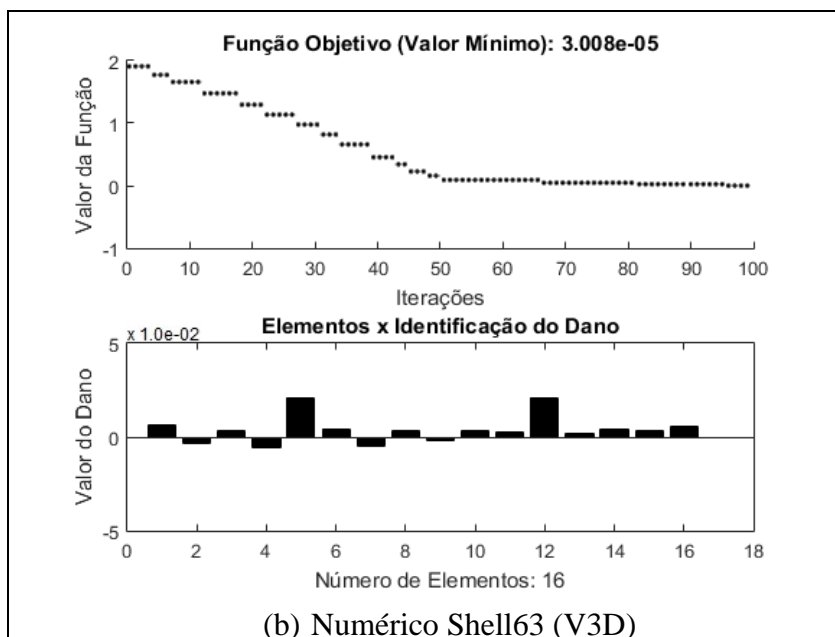


Figura A1.126 – Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V2D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)

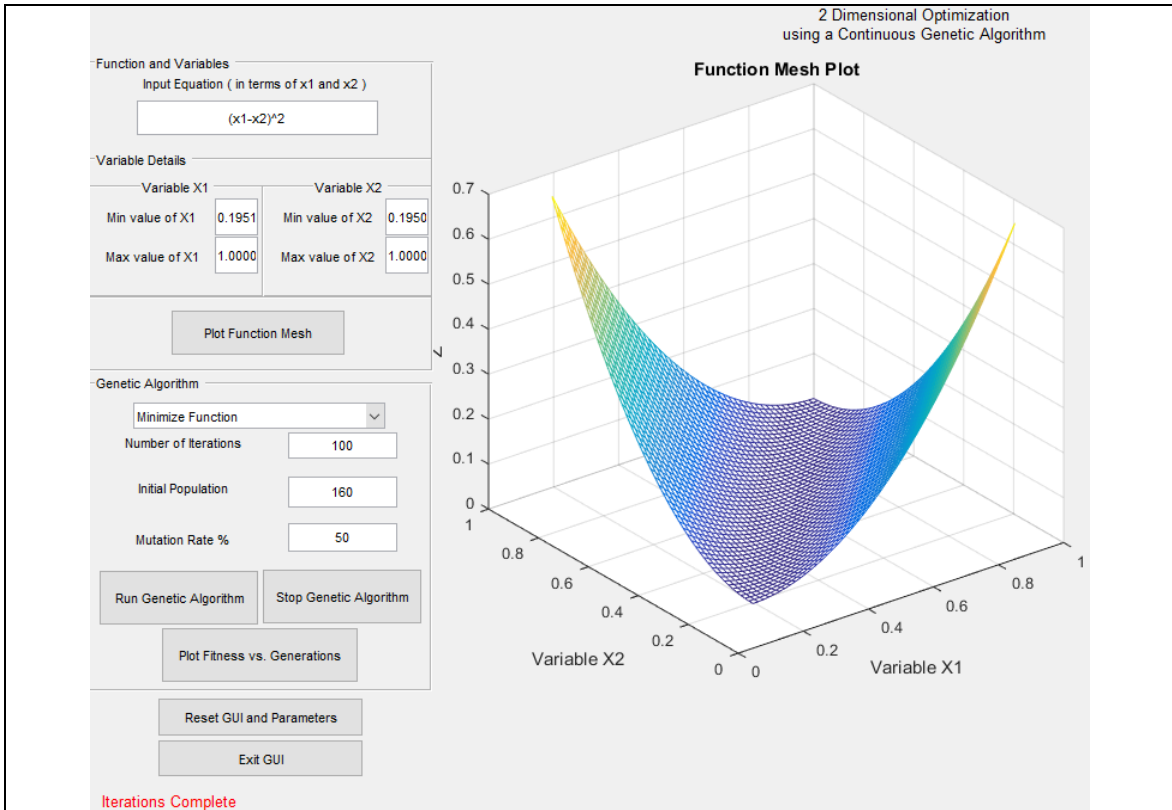
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.6.

1.5.3.2 Análise Dinâmica Caso 20 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V3D):

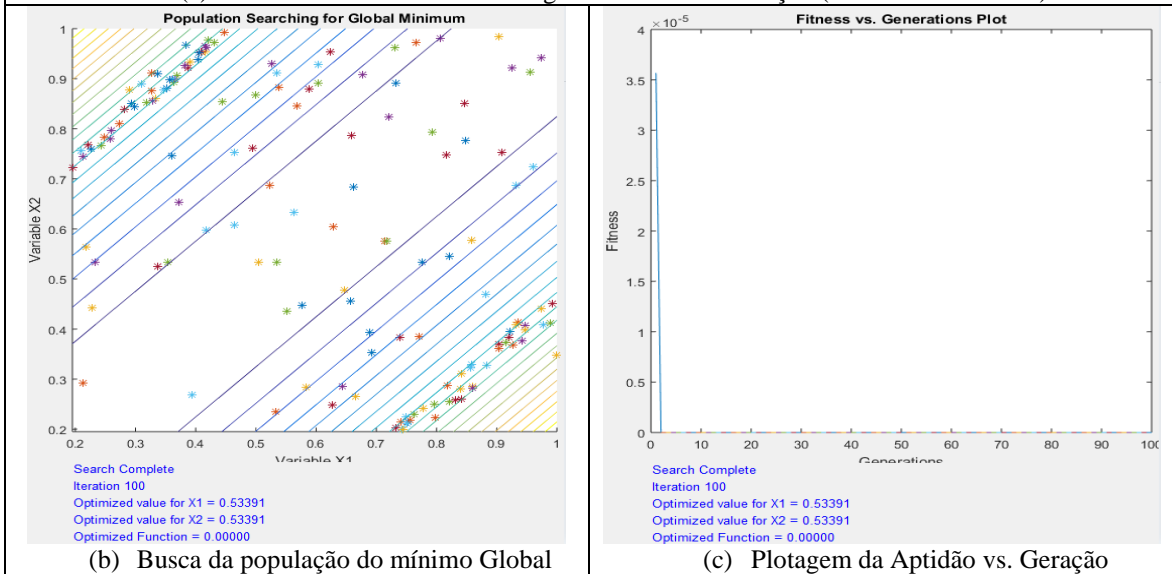
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.127 e Figura A1.128, onde são discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



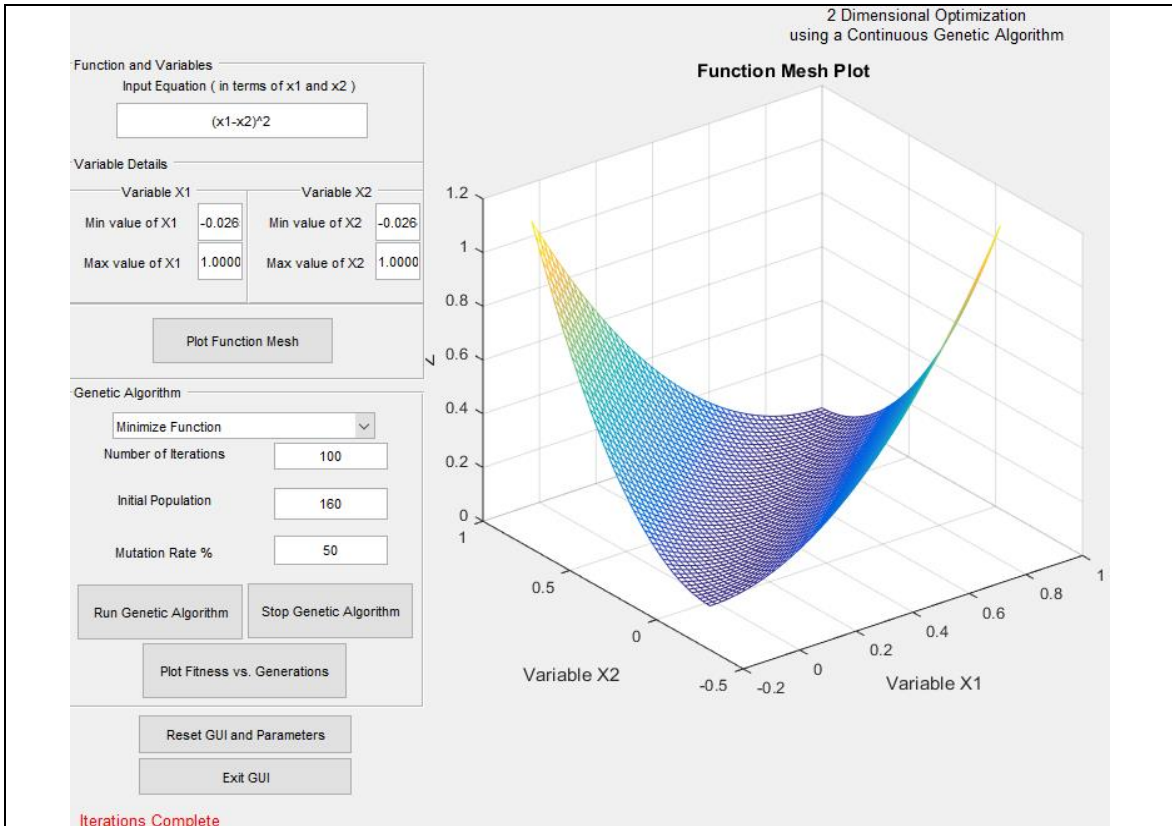
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



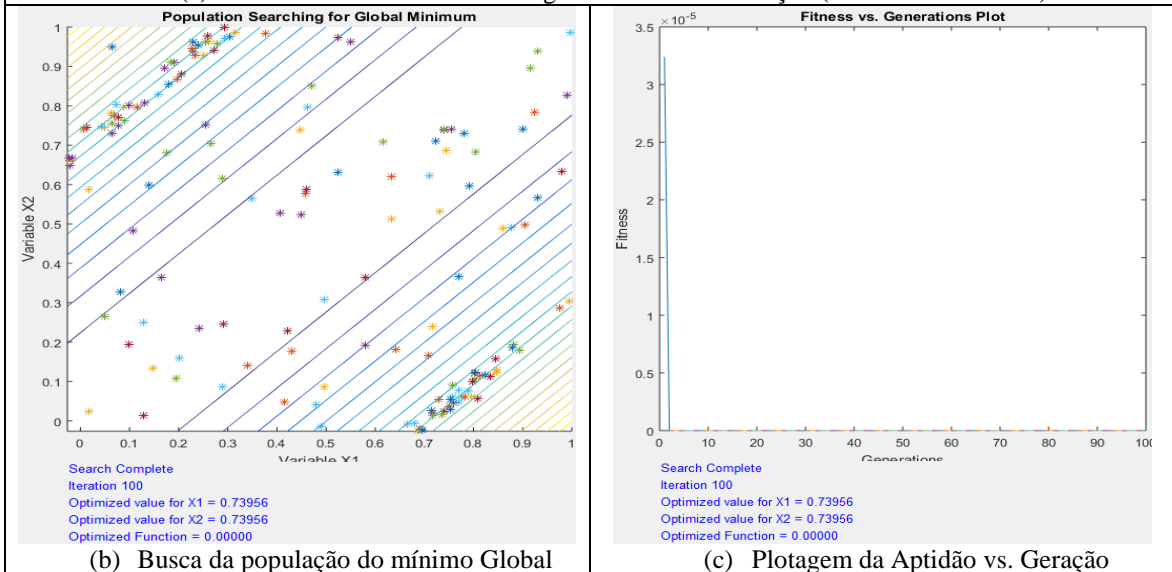
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.127 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V3D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.128 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V3D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 20 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 1,8 m e 4,2 m; dano de 2 cm)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.7.

1.5.4 Caso 21 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V4D)

Para a viga metálica biapoiada danificada (V4D), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.129 a seguir.

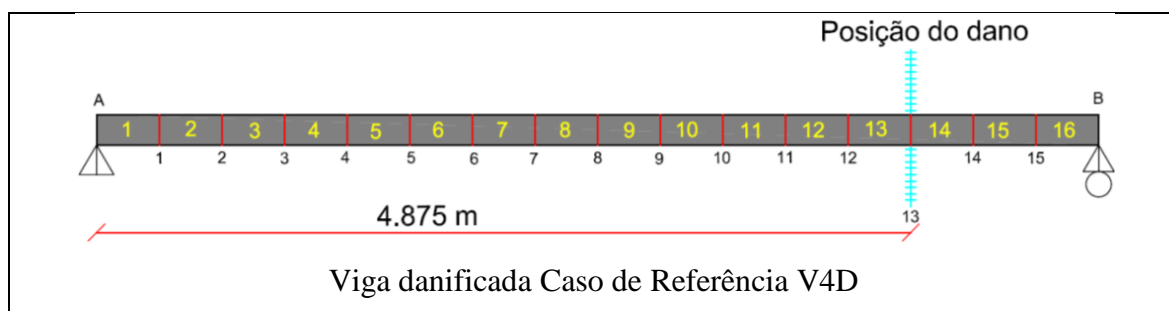


Figura A1.129 - Caso Geral 21: Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica V4D (Palechor, 2013)

As análises de otimização de cada método para o caso 21 são apresentadas a seguir.

1.5.4.1 Análise Dinâmica Caso 21 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V4D):

Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,8$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 21, apresentada na Figura A1.130 onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

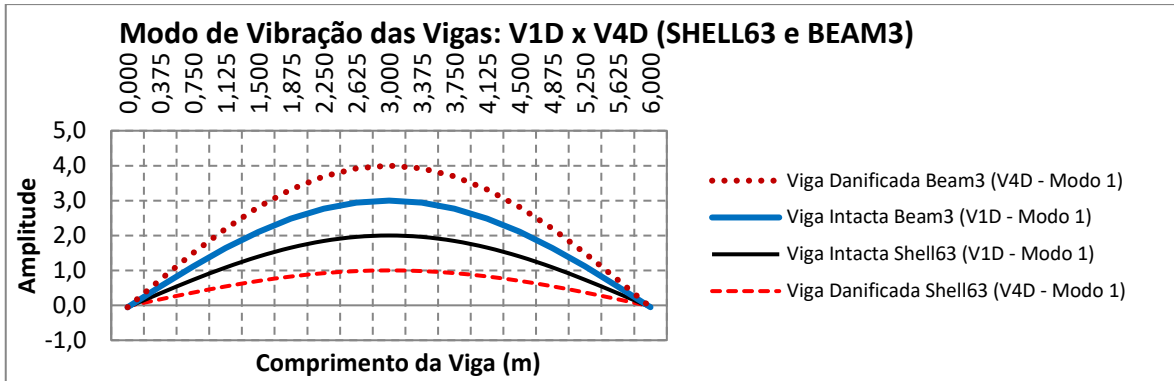


Figura A1.130 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 21 (V4D)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.131 e Figura A1.132 são mostrados os resultados da solução do problema.

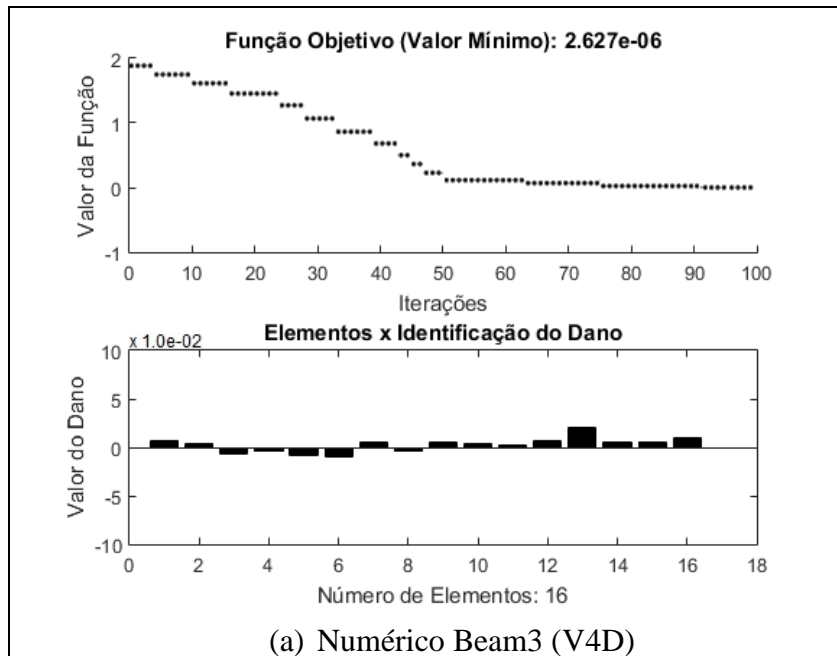


Figura A1.131 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)

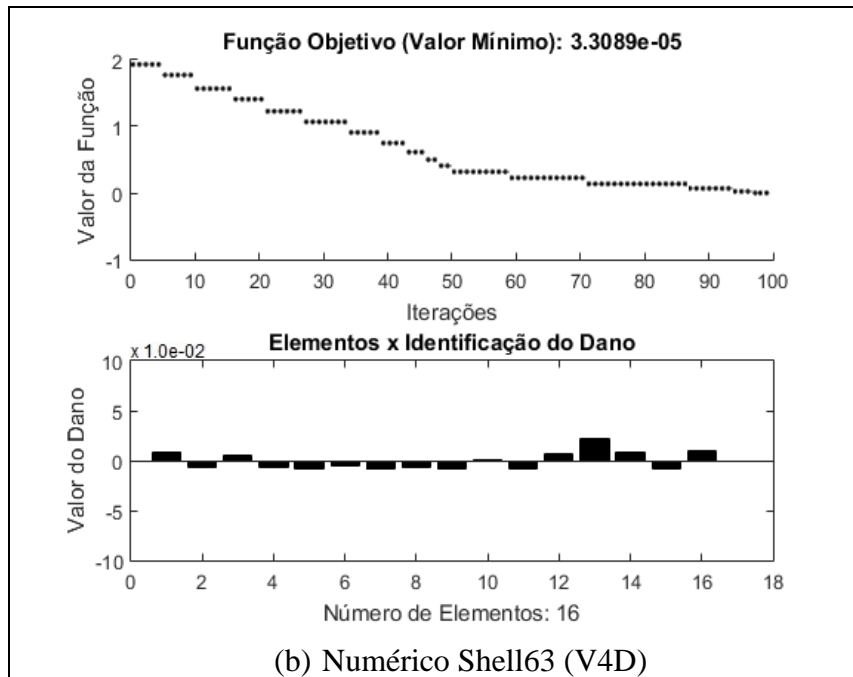


Figura A1.132 – Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)

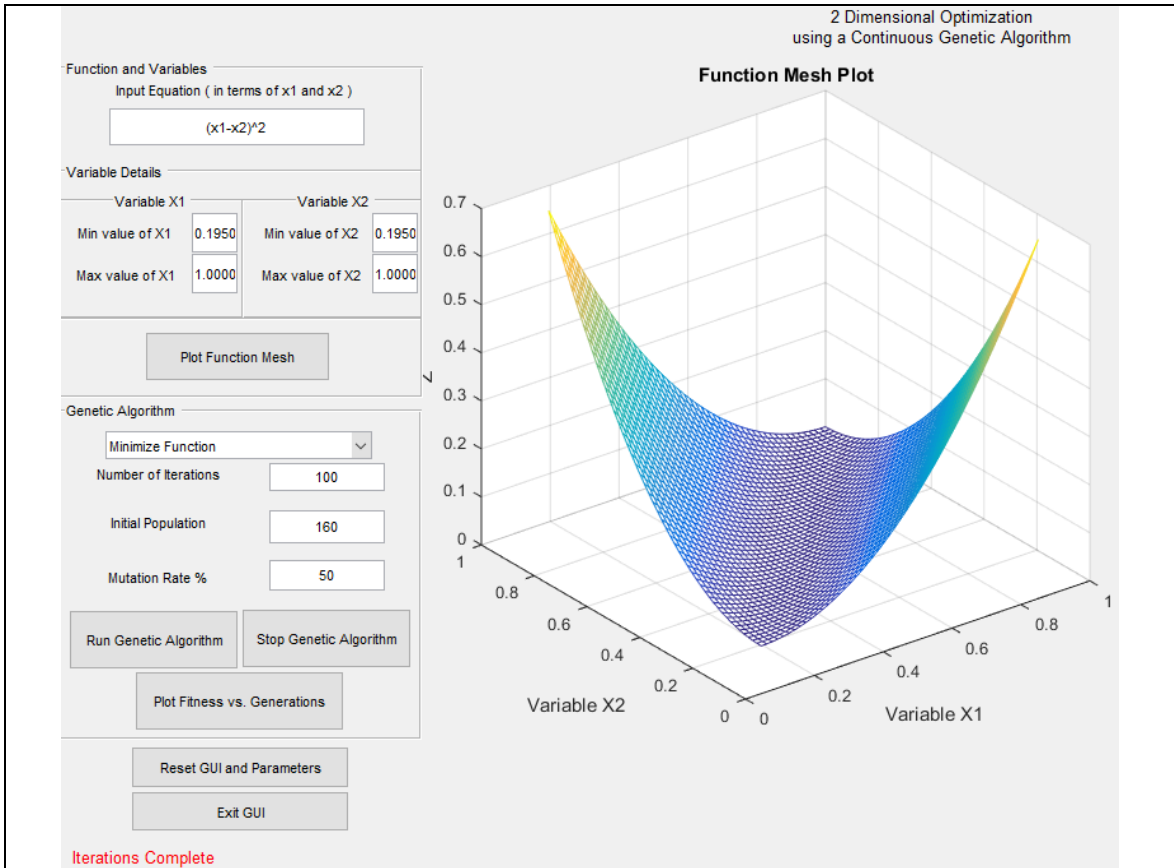
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.6.

1.5.4.2 Análise Dinâmica Caso 21 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V4D):

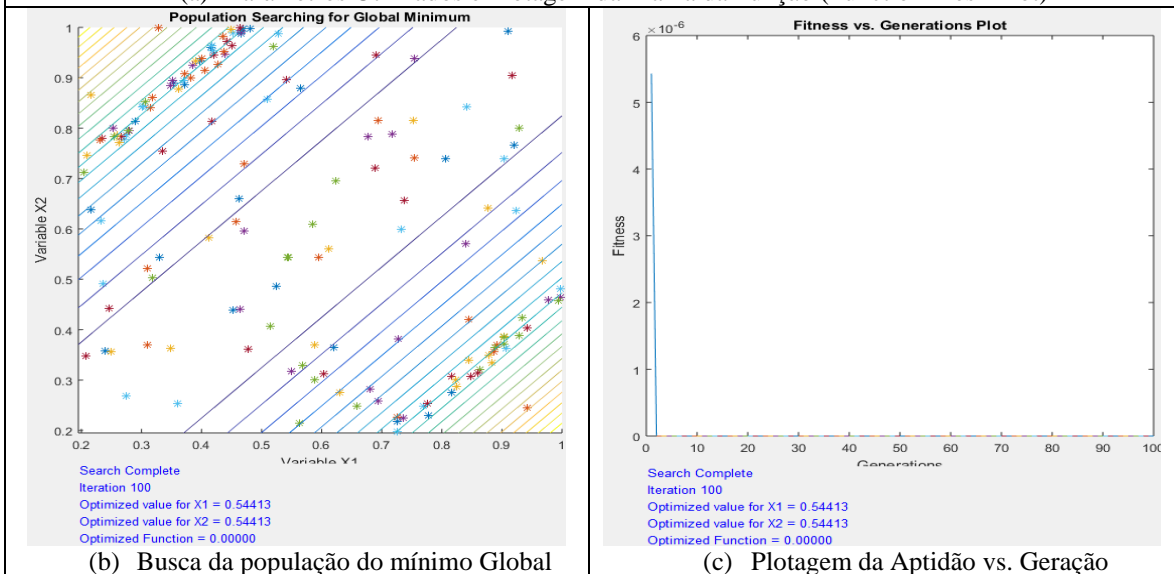
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.133 e Figura A1.134, onde são discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



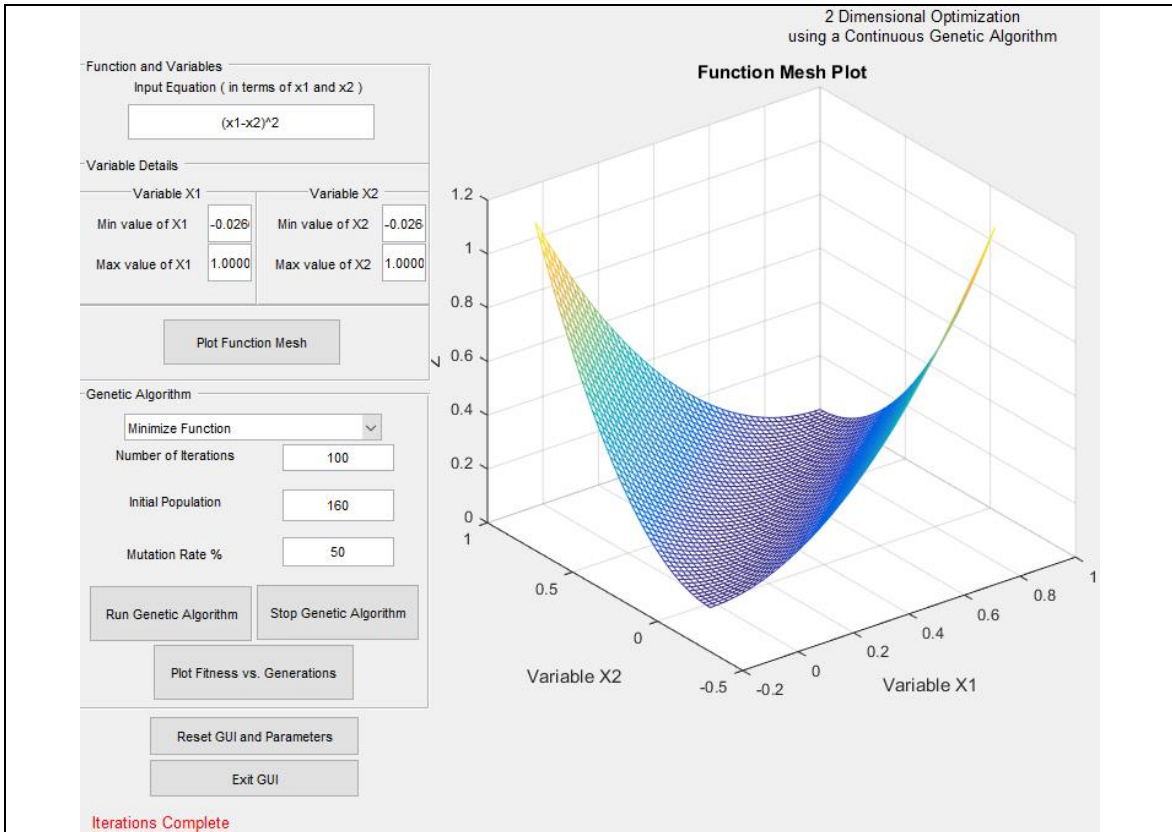
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



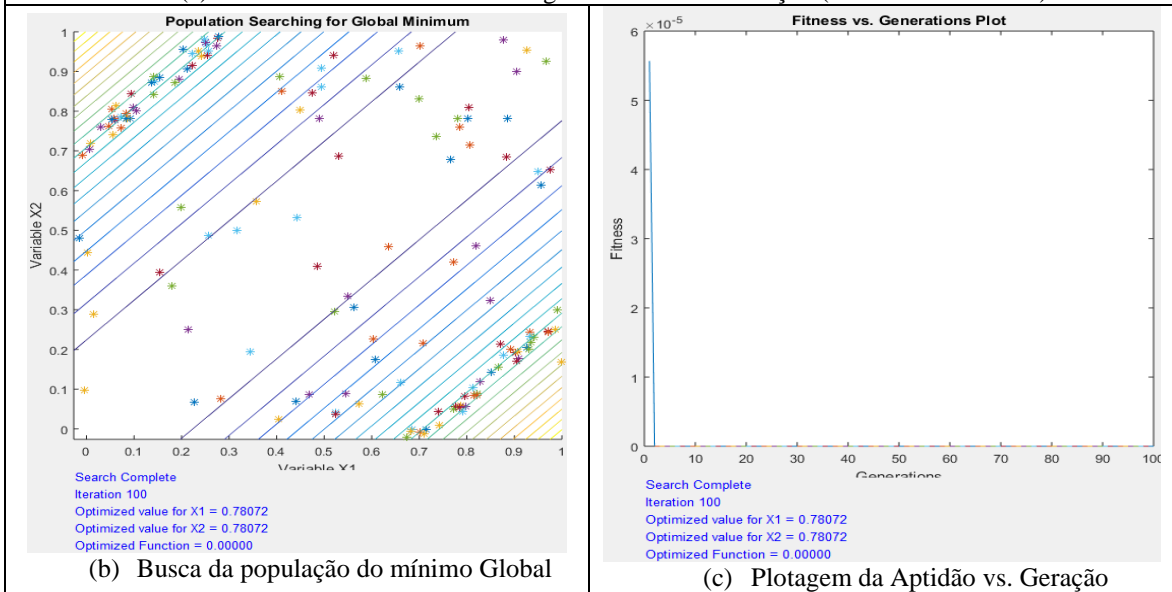
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.133 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.134 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V4D (100 iterações): Viga Biopoiada Caso Geral 21 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 4,875 m; dano de 2 cm)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.7.

1.5.5 Caso 22 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada (V5D)

Já a viga metálica biapoiada danificada (V5D) com configuração de dano conforme representado na Figura A1.135, do trabalho de Palechor (2013).

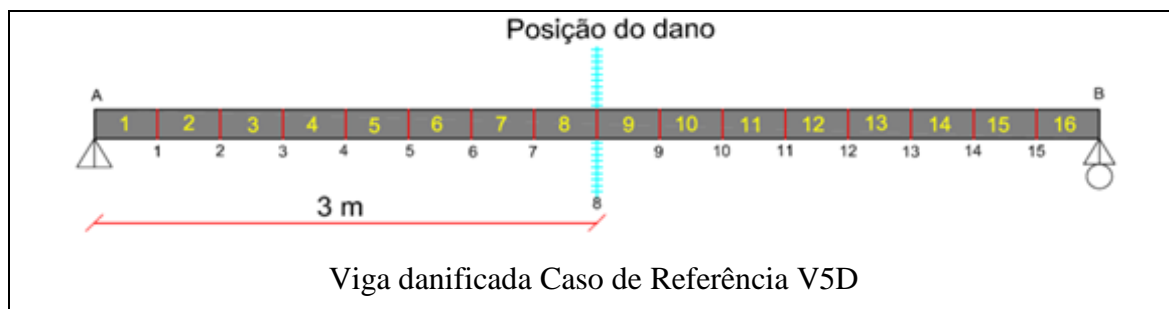


Figura A1.135 - Caso Geral 22: Viga metálica biapoiada danificada para análise dinâmica V5D (Palechor, 2013)

As análises de otimização de cada método para o caso 22 são apresentadas a seguir.

1.5.5.1 Análise Dinâmica Caso 22 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V5D):

Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar danos nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 16$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 160$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,8$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do caso 22, apresentada na Figura A1.136, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos modos de vibração gerados pela aplicação das cargas, no caso sendo utilizadas as cargas de aproximadamente $\cong 3kN$.

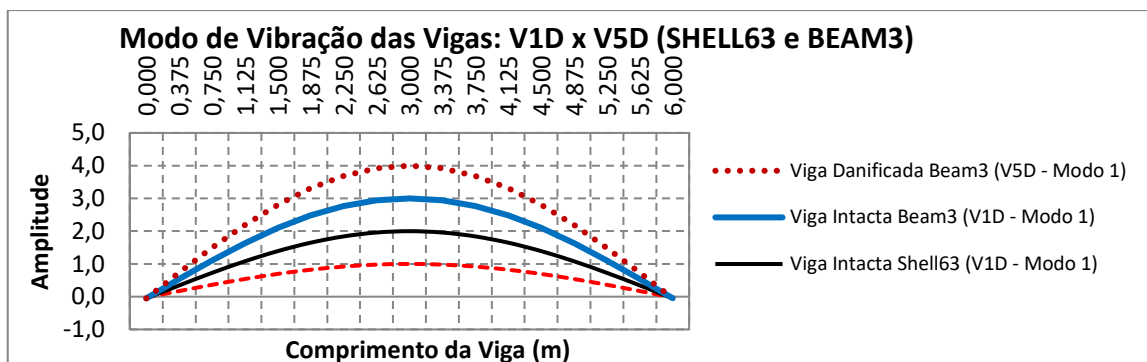


Figura A1.136 – Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos modos de vibração para a viga do Caso Geral 21 (V5D)

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.137 e Figura A1.138 são mostrados os resultados da solução do problema.

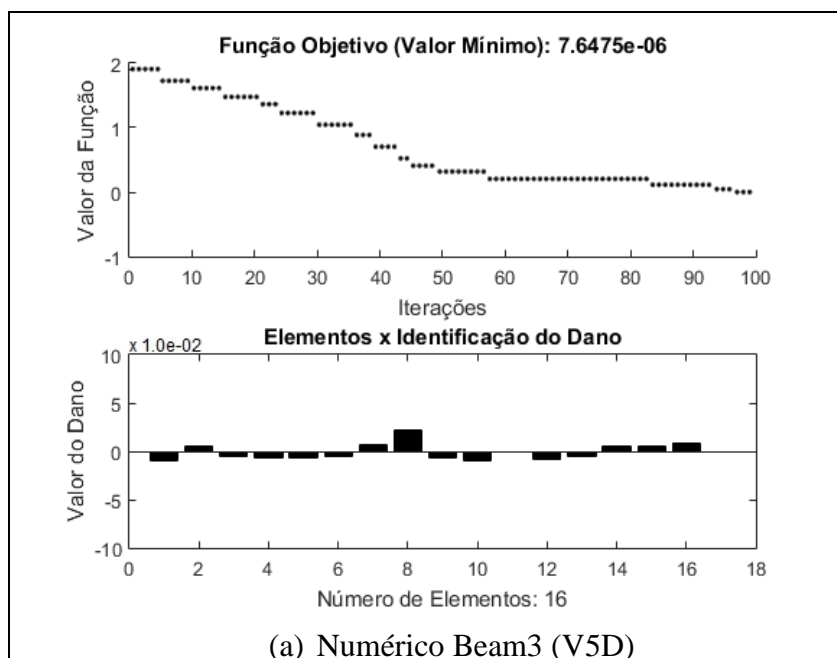


Figura A1.137 – Beam3: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)

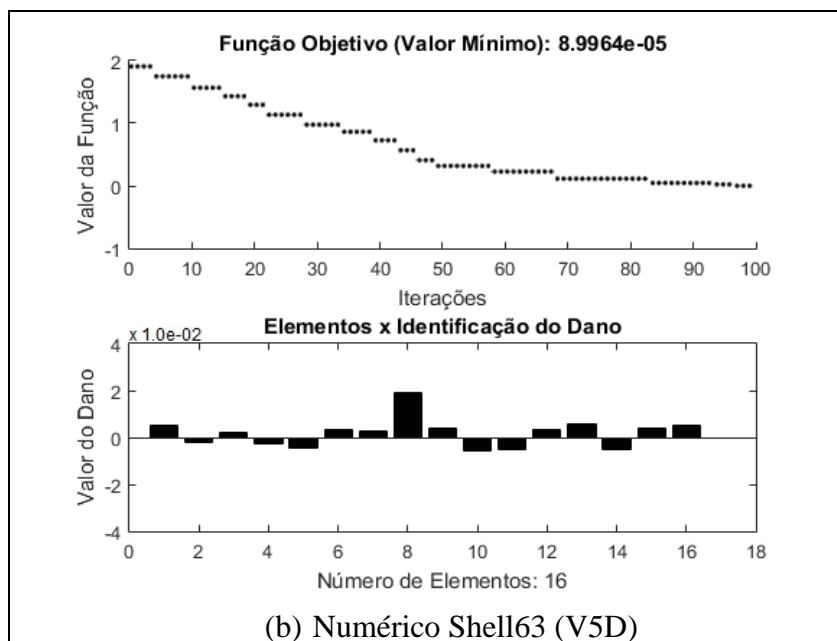


Figura A1.138 - Shell63: Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)

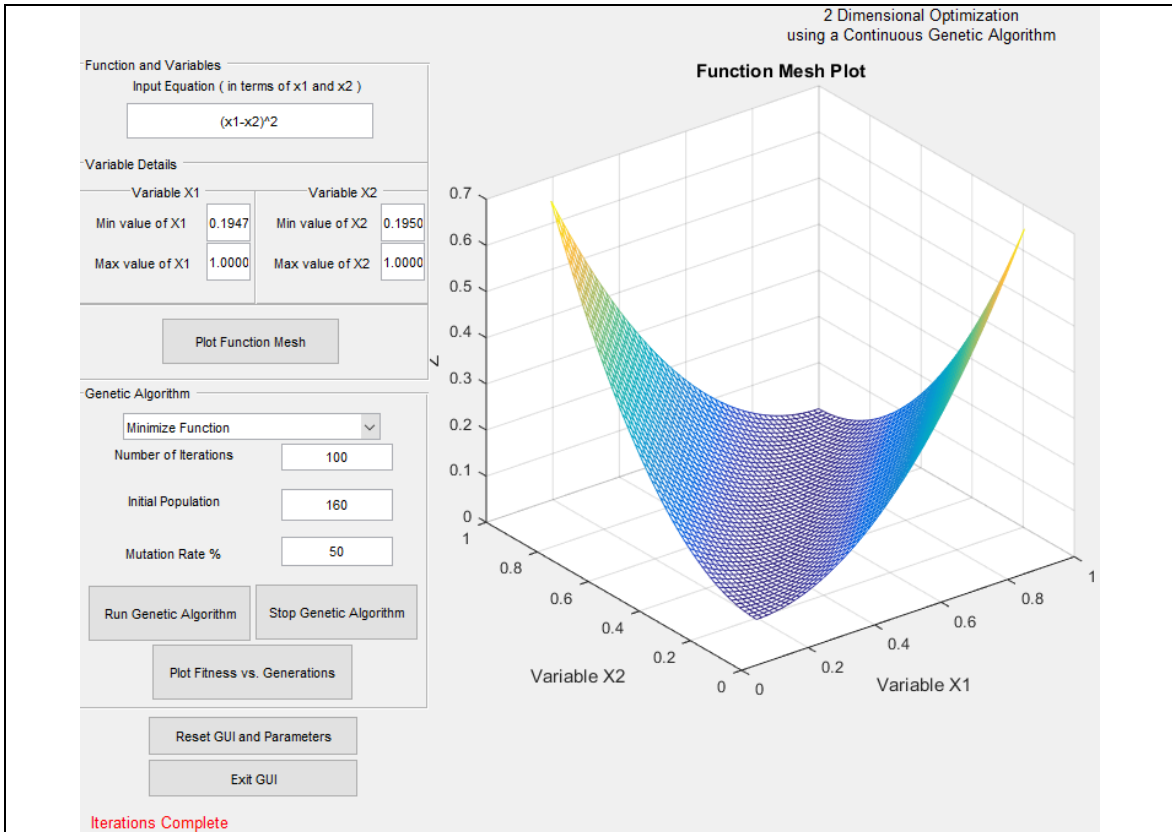
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.6.

1.5.5.2 Análise Dinâmica Caso 22 Viga Metálica Biapoiada Danificada (V5D):

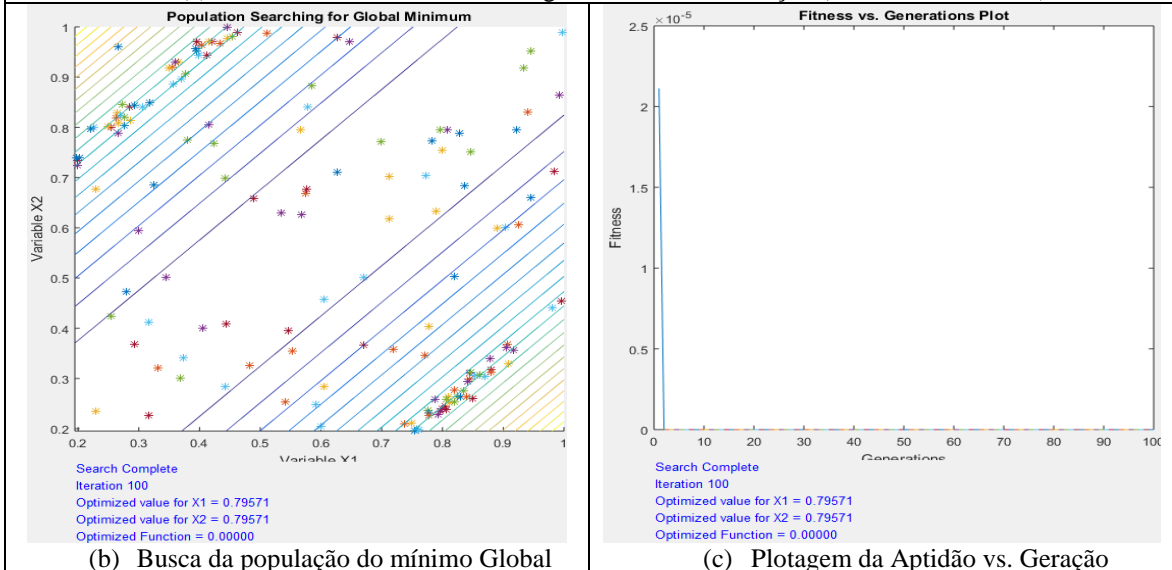
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.139 e Figura A1.140, onde são discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



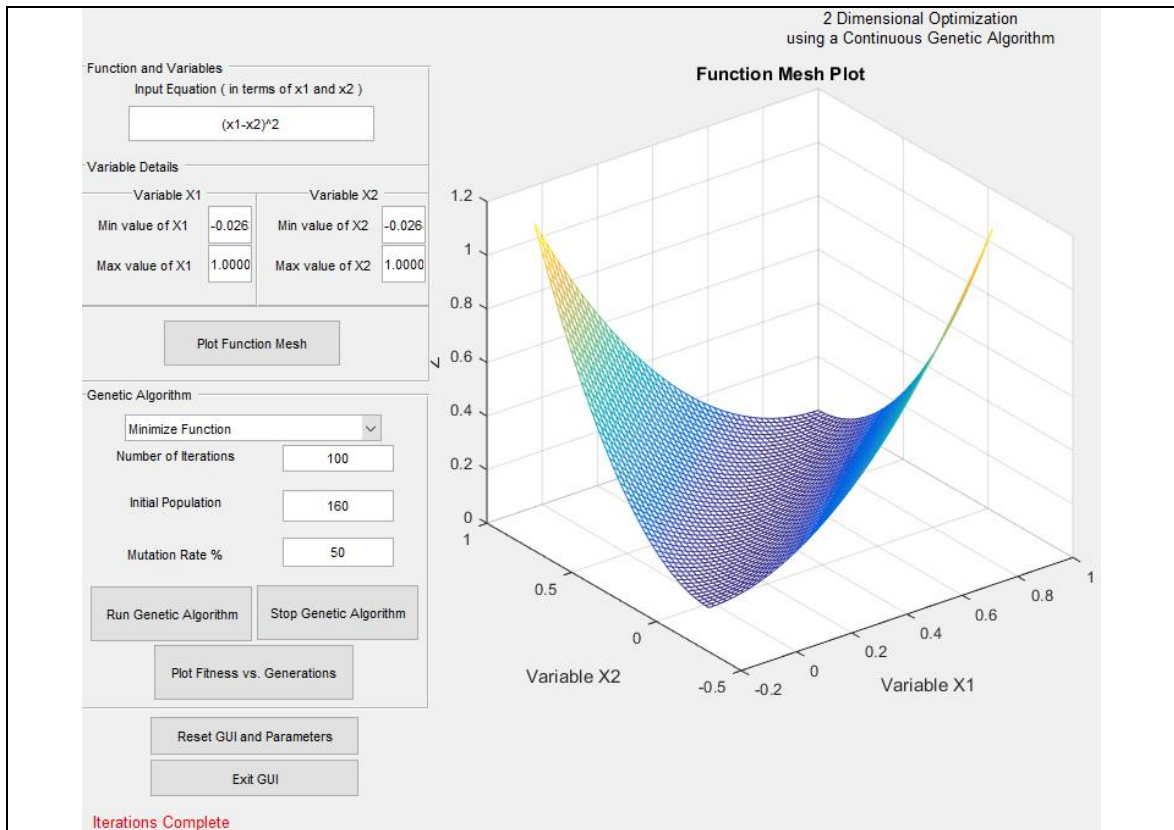
(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



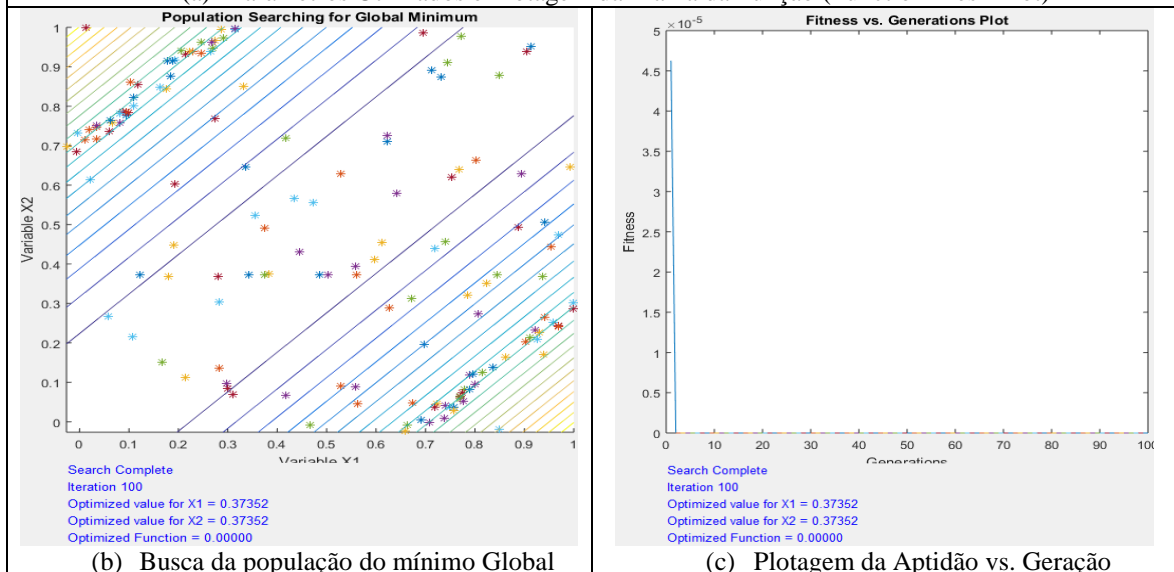
(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.139 – Beam3: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.140 – Shell63: Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano V5D (100 iterações): Viga Biapoiada Caso Geral 22 (caso de dano a partir do apoio esquerdo – 3 m; dano de 2 cm)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.5.7.

1.5.6 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 19 a 22 (V2D a V5D) - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.28 a seguir.

Tabela A1.28 - Análise Resumo ED: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 19, 20, 21 e 22

Item Caso Geral	Modo de Vib.	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste Esquerdo	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
19		V2D		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	≅ 2%	Beam3: 4.6652e-06 Shell63: 5.994e-05
20	Modo 1	V3D	ED / Numérica	a 1.8m e 4.2 m	100 ^a	5 e 12	≅ 2%	Beam3: 1.8034e-06 Shell63: 3.008e-05
21		V4D	Dinâmica	a 4.875m	100 ^a	13	≅ 2%	Beam3: 2.627e-06 Shell63: 3.3089e-05
22		V5D		a 3.0m = (L/2)	100 ^a	8	≅ 2%	Beam3: 7.6475e-06 Shell63: 8.9964e-05

Nesses casos em que foram realizadas análises com o elemento BEAM3 e o elemento SHELL63, obteve-se com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano no elemento 4 para as análises com a viga V2D, dano no elemento 13 para as análises com a viga V4D e dano no elemento 8 para as análises com a viga V5D, que constituíam as situações com danos únicos e por fim os danos nos elementos 5 e 12. Todos apresentam percentual de dano de aproximadamente 2%. Algumas pequenas perturbações para os demais elementos, principalmente nas proximidades dos apoios foram encontrados.

As análises de identificação de dano se restringiram aos modos de vibração obtidos nas análises experimentais intactas e danificadas, mas como foi relatado anteriormente, utilizou-se novamente um número maior de iterações que possibilitaram uma diminuição nos resíduos gerados, mesmo onde houvesse grandes diferenças de modos de vibração, presença de cargas pontuais, proximidades dos apoios ou mesmo nas proximidades das regiões danificadas, apesar disso os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto. Enfatiza-se aí que o aumento do número de iterações, em alguns casos, auxilia na resolução do problema de aproximação de mínimo local.

Com as análises dessas vigas, pode-se verificar inclusive, afirmar também que um número maior de informações de modos de vibração também auxiliariam no trabalho do

otimizador. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer da estrutura em estudo.

1.5.7 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 19 a 22 (V2D a V5D) - Análise Dinâmica: Viga Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.29 a seguir.

Tabela A1.29 - Análise Resumo AG: Vigas Metálicas Biapoiadas Casos 19, 20, 21 e 22

Item Caso Geral	Modo de Vib.	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste Esquerdo	Iterações	Posição dos Elem. Danif.	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
19		V2D		a 1.5m = (L/4)	100 ^a	4	Beam3: $\cong 5.2e-04\%$ Shell63: $\cong 0.92e-03\%$ Correto Ambos $\cong 2\%$	Beam3: 0.54410 Shell63: 0.65367
20	Modo 1	V3D	AG / Numérica	a 1.8m e 4.2 m	100 ^a	5 e 12	Beam3: $\cong 3.65e-03\%$ Shell63: $\cong 3.25e-03\%$ Correto Ambos $\cong 2\%$	Beam3: 0.53391 Shell63: 0.73956
21		V4D	/ Dinâmica	a 4.875m	100 ^a	13	Beam3: $\cong 5.45e-04\%$ Shell63: $\cong 5.65e-03\%$ Correto Ambos $\cong 2\%$	Beam3: 0.54413 Shell63: 0.78072
22		V5D		a 3.0m = (L/2)	100 ^a	8	Beam3: $\cong 2.1e-03\%$ Shell63: $\cong 4.6e-03\%$ Correto Ambos $\cong 2\%$	Beam3: 0.79571 Shell63: 0.37352

Com esses valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises do AG, com análises na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, mas o caso 22 (V5D) com o elemento Beam3 apresentaram melhores resultados, que em termos de aproximação maior, nas situações encontrou-se algumas perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.30 resumo a seguir.

Tabela A1.30 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intactos e danificados

Elemento	Valores das Variáveis	Intacto (V1D)	Caso Geral 19 (V2D)	Caso Geral 20 (V3D)	Caso Geral 21 (V4D)	Caso Geral 22 (V5D)
Beam3	max/>	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000
	min/<	0,1950941	0,1949706	0,1951390	0,1950233	0,1947724
Shell63	max/>	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000
	min/<	-0,0264915	-0,0266391	-0,0265229	-0,0266229	-0,0263368

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG. Enfatiza-se também que o aumento do número de iterações, em alguns casos, auxilia na resolução do problema de aproximação de mínimo local.

1.6 ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS METÁLICAS COM OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO (TESE: PALECHOR, 2018)

Numa última análise, já nos estudos realizados na tese de Palechor (2018), também em vigas metálicas biapoias, para variações das Frequências Naturais pela aplicação de uma massa móvel adicional, com 12 casos danificados a serem utilizados, mais especificamente os casos 1, 2, 3, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18, dos 18 casos da pesquisa.

1.6.1 Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga Metálica Biapojada Intacta

A viga metálica biapojada intacta para a análise dinâmica, conforme representação na Figura A1.141 (viga de 6 m) e na Figura A1.142 (viga de 5 m), agora da pesquisa de doutorado de Palechor (2018).

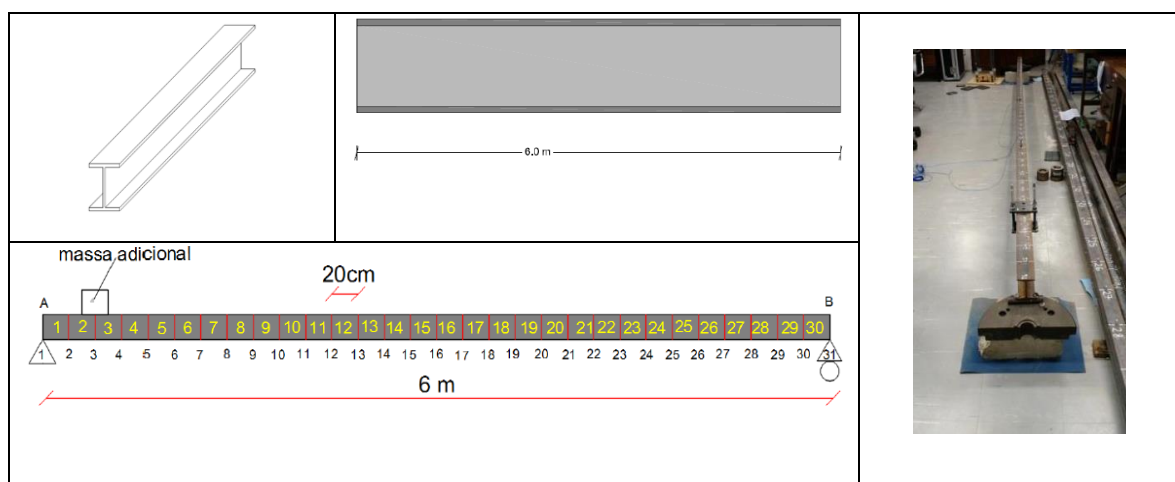


Figura A1.141 - Viga Metálica Biapojada Intacta (6 m): caso 4 (Palechor, 2018)

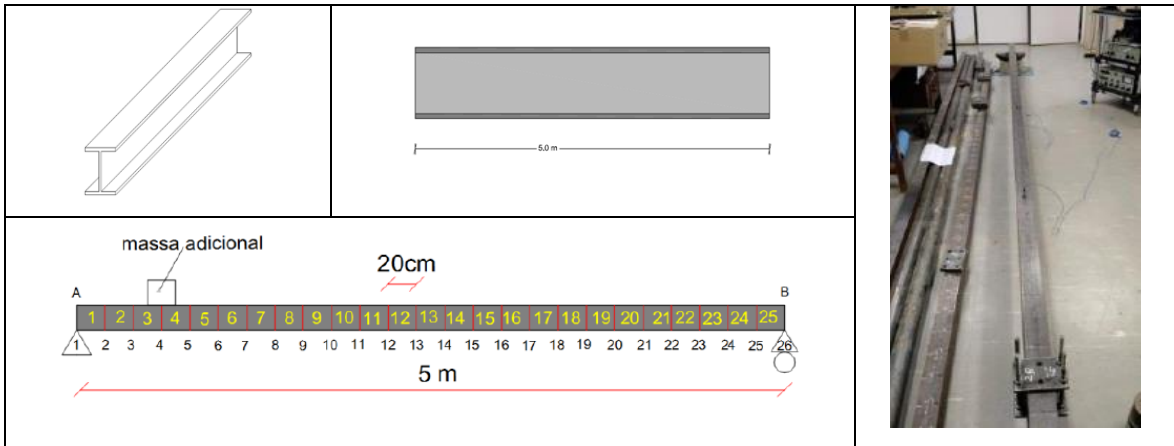


Figura A1.142 - Viga Metálica Biapoiada Intacta (5 m): caso 11 (Palechor, 2018)

As condições intactas serão utilizadas como parâmetro para verificação das condições danificadas dinâmicas das vigas dos casos 23 a 34 (todos os casos da tese de Palechor, 2018). Nesses casos foi realizada uma discretização na viga Perfil-I com tamanhos de elementos pré-definidos, no caso o utilizado foi de 20 cm, e posicionamentos de massas diferenciados conforme demonstrado na Figura A1.143 a seguir apresentada em Palechor (2018).

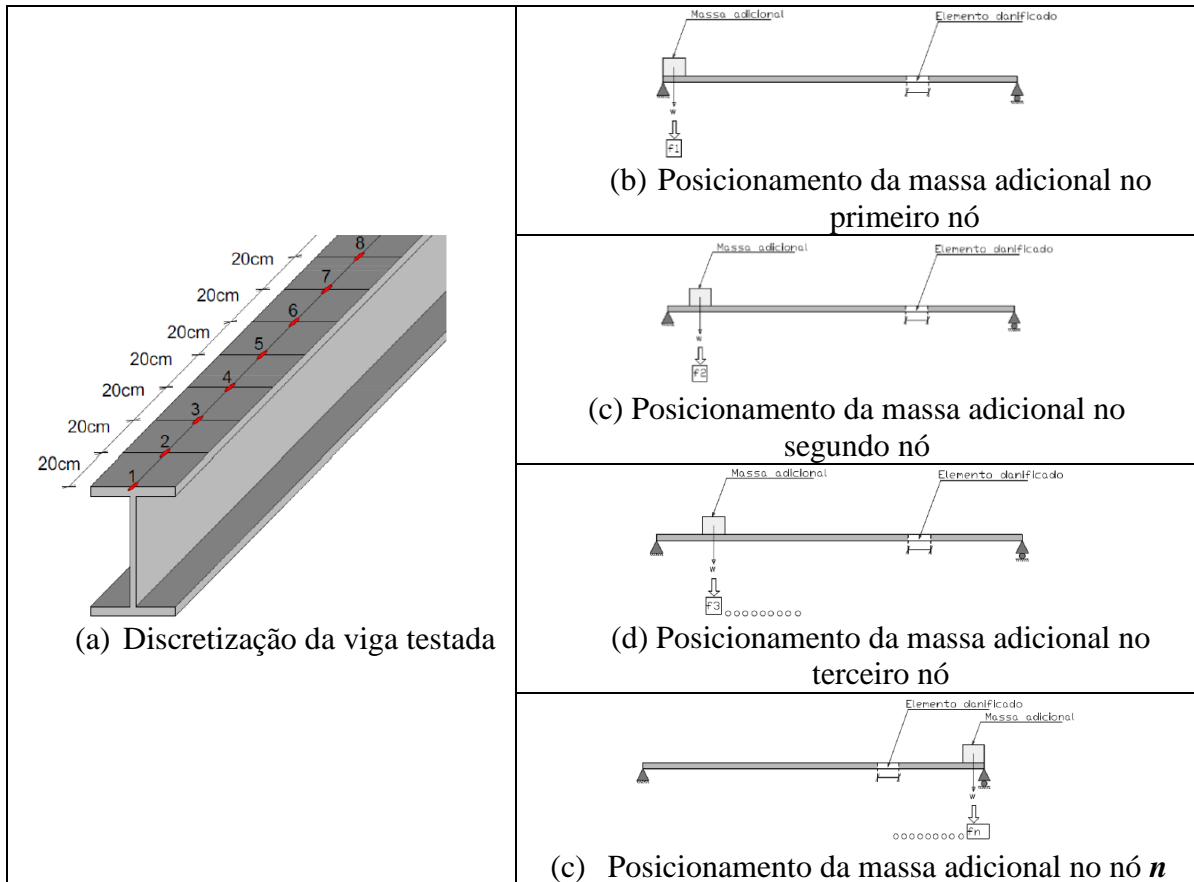


Figura A1.143 – Panoramas da viga testada (Palechor, 2018)

Cabe destacar que foram utilizados os dados de “Frequência vs. Posição de Massa” plotados e interpolados com o método de interpolação *cubic spline* devido à necessidade do método de identificação de danos proposto na tese de Palechor (2018) utilizando a Transformada Discreta de Wavelet (TDW), tendo sido necessário o aumento do número de dados em relação aos obtidos na análise experimental e da aplicação de métodos de interpolação na curva “Frequências vs. Posição da Massa”, conforme demonstração na Figura A1.144. O que foi ratificado em sua publicação em Palechor *et al.* (2014), que dentre os métodos de interpolação analisados, o método de interpolação mais adequado para identificação de danos é o *Cubic-Spline*, cuja função está disponível no software MATLAB[®].

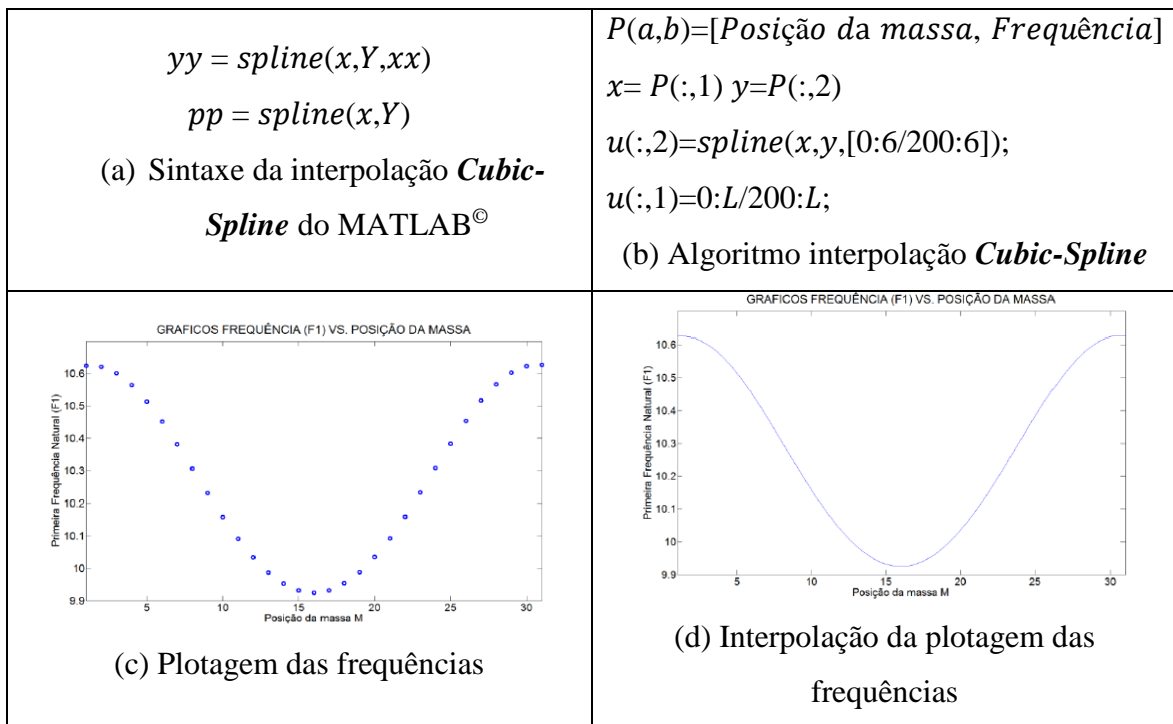


Figura A1.144 – Demonstração da aplicação do método de interpolação *Cubic-Spline*

Em que o número 200 corresponde ao número total de pontos interpolados e:

- $P(a,b)$: matriz das frequências;
- $x=P(:,1)$: corresponde à posição da massa;
- $y=P(:,2)$: frequência correspondente a cada posição de massa;
- $u(m,n)$: matriz na qual se guarda os valores interpolados;
- $u(:,1)$: número total de pontos, e
- $u(:,2)$: são os dados interpolados.

As propriedades geométricas e dos materiais das vigas nas análises experimentais, bem como as condições de danos a serem verificadas podem ser observadas a seguir na Figura A1.145.

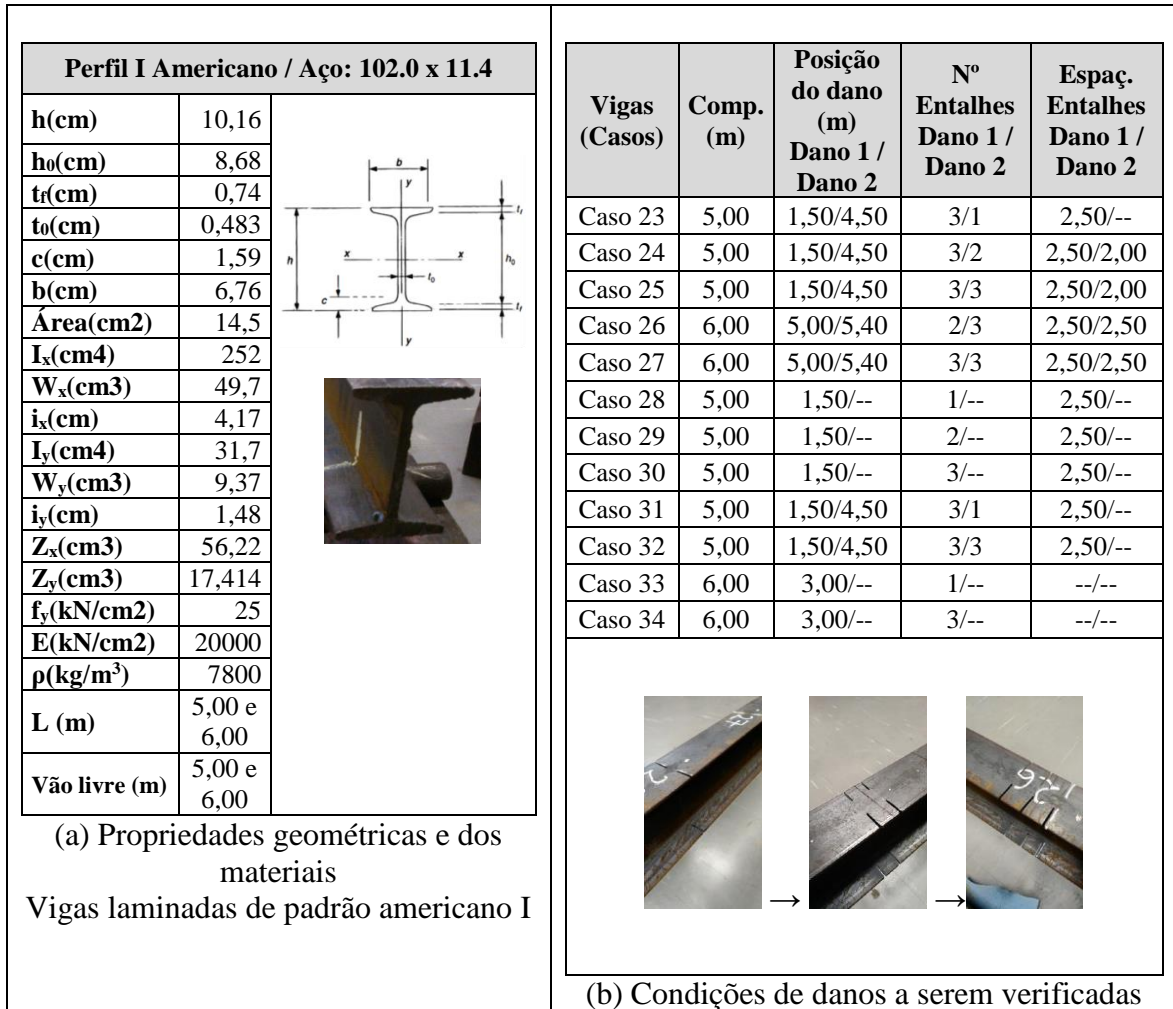


Figura A1.145 – Demonstrações da geometria, propriedades dos materiais e das condições de danos das vigas da tese de Palechor (2018)

Os valores da tensão de escoamento (f_y) e do coeficiente de Poisson (ν) foram oriundos de catálogo fornecido pelo fabricante, já o módulo de elasticidade (E), área da seção transversal (A), densidade (ρ) e momento de inércia (I_x), foram obtidos experimentalmente no trabalho de Palechor (2018).

Em termos de panoramas gerais dos ensaios experimentais dinâmicos pode ser observado na Figura A1.146 seguinte.

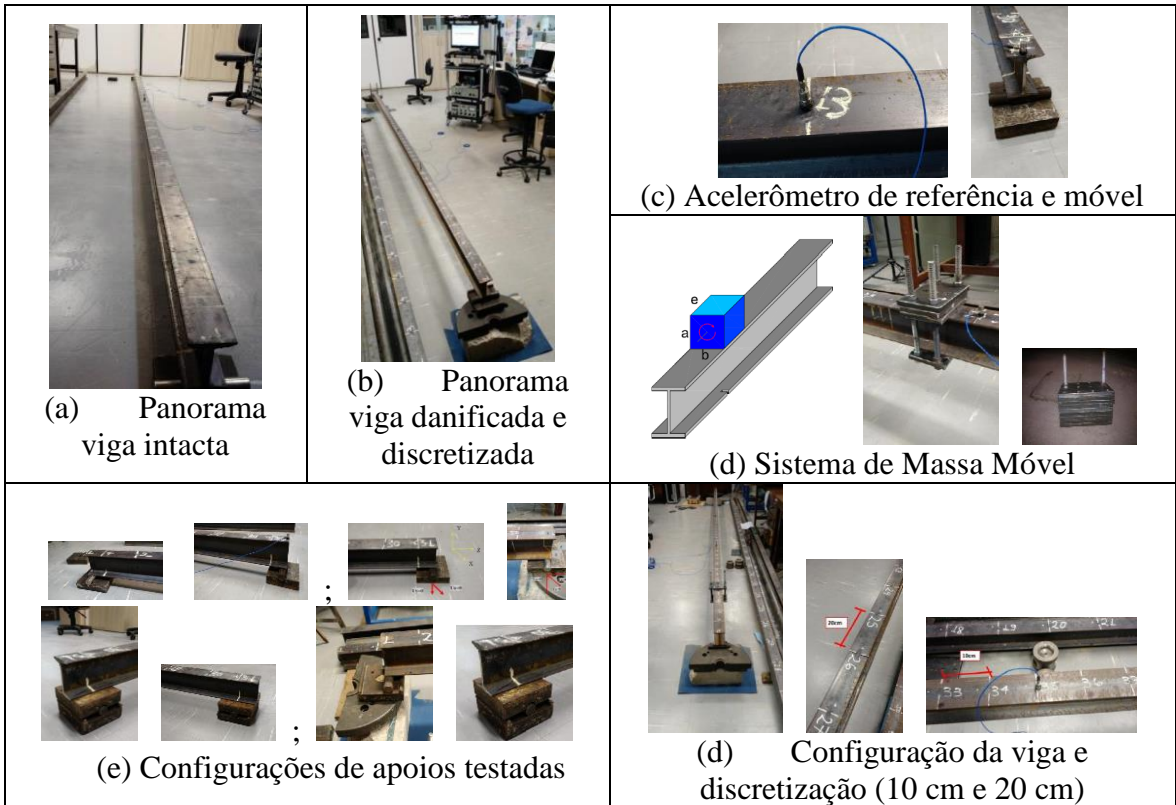


Figura A1.146 – Configurações dos sistemas de ensaios experimentais dinâmicos das vigas do trabalho de Palechor (2018)

Com relação às ferramentas para instrumentação verifica-se na Figura A1.147 algumas utilizadas.

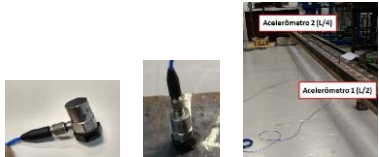


 <p>(a) Acelerômetros C33 e C34 e posicionamentos</p>	 <p>(b) Martelo de impacto</p>
 <p>(c) Sistema de aquisição de dados</p>	<p>Lista de ferramentas para instrumentação:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Condicionador de sinal Ni Compact DAQ modelo NI cDaQ-91; ❖ Acelerômetro modelo 352C34 da PCB com sensibilidade 99,7 mV/g (Figura 5.6b); ❖ Acelerômetro modelo 352C33 da PCB com sensibilidade 100,5 mV/g (Figura 5.6a); ❖ Martelo instrumentado PCB modelo 086C0 com capacidade para desenvolver uma força máxima de 100 lbf = 444,82 N aproximadamente, com ponteira metálica; ❖ Computador com o software Lab-View para aquisição de dados.

Figura A1.147 - Ferramentas para instrumentação dos sistemas de ensaios experimentais dinâmicos das vigas do trabalho de Palechor (2018)

Cabe destacar que na tese de Palechor (2018) os ensaios foram planejados em horário noturno evitando assim as influências que poderiam causar equipamentos, trânsito de carros e outras atividades desenvolvidas em volta do laboratório. Com relação aos acelerômetros piezoelétricos que são sensíveis às vibrações que atuam em direções diferentes à direção analisada, sinaliza-se que nos ensaios esses acelerômetros foram posicionados de forma adequada na direção correta para minimizar o efeito dessa interferência nos resultados.

Além dos cuidados anteriores, Palechor (2018), aponta que para diminuir o ruído presente no sinal, foram feitos testes com diferentes configurações nos apoios das vigas. Isto porque nos pontos de apoio é gerado um ruído por causa do atrito entre a viga e a estrutura (chapa ou rolete metálico). Para evitar isto, foram configurados de tal forma que não existisse a possibilidade da viga trepidar em cima e minimizar a área de contato viga-suporte.

Foram utilizados os resultados em que foram obtidos os valores mais adequados à identificação de danos utilizando os métodos de otimização propostos buscando sempre uma coerência entre os dados da estrutura intacta e danificada, nesse sentido a conformação gráfica dos resultados para a 1ª frequência natural foram os que alcançaram a maior excelência em termos de análises finais obtidas. A ação da massa móvel adicional foi de 3,266 kg nos casos utilizados como parâmetro.

1.6.2 Caso 23 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 1)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 1), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.148 a seguir.

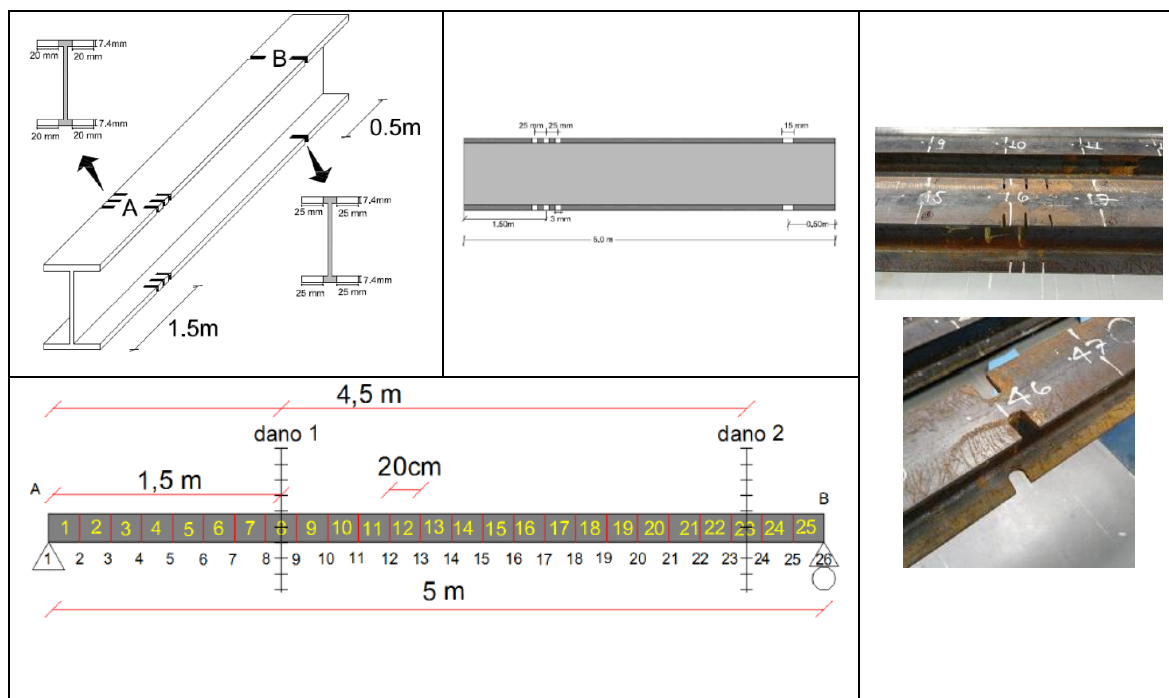


Figura A1.148 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe): caso 12 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 23 são apresentadas a seguir.

1.6.2.1 Análise Dinâmica Caso 23 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 1): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 25$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 250$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 23, apresentada na Figura A1.149, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (5 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

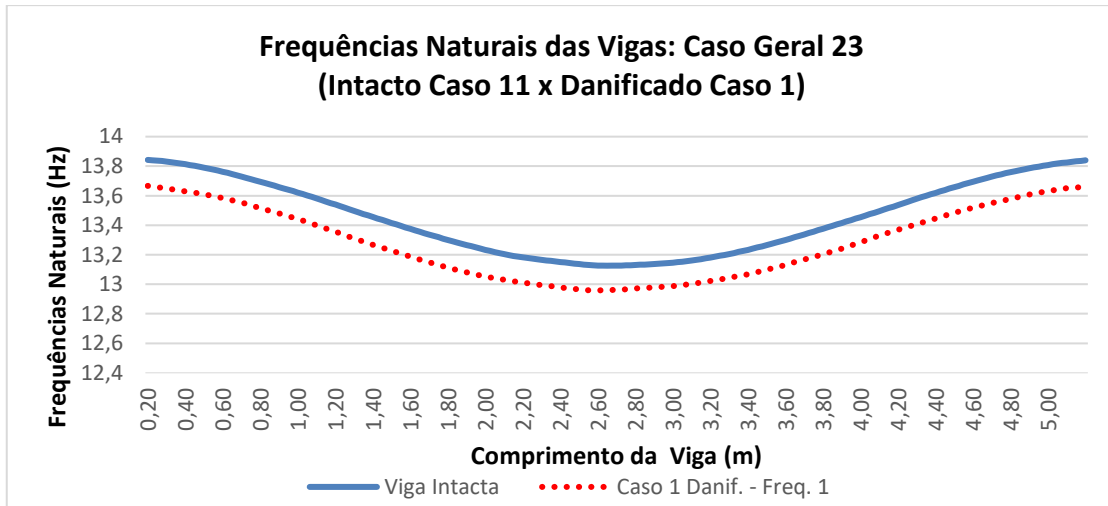


Figura A1.149 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 23

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.150 é mostrado o resultado da solução do problema.

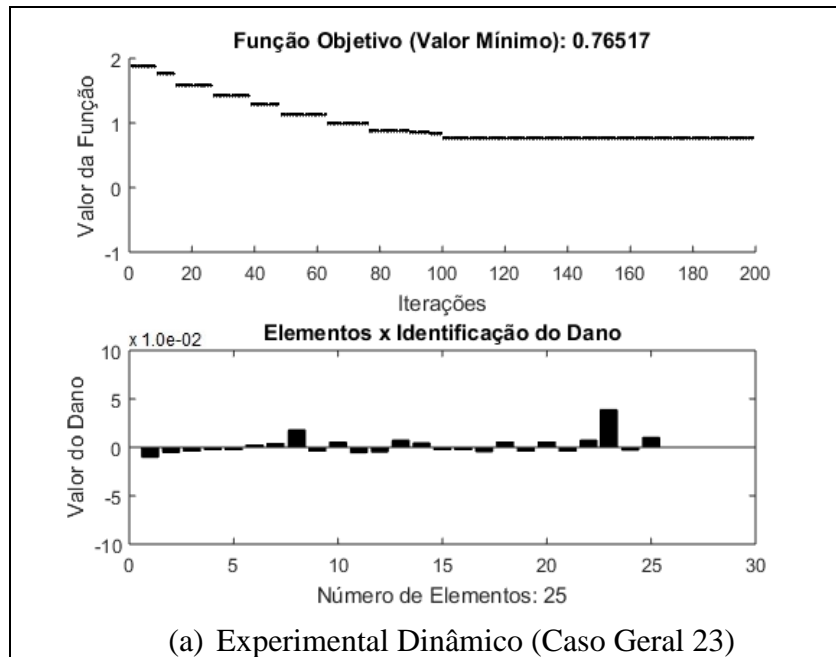


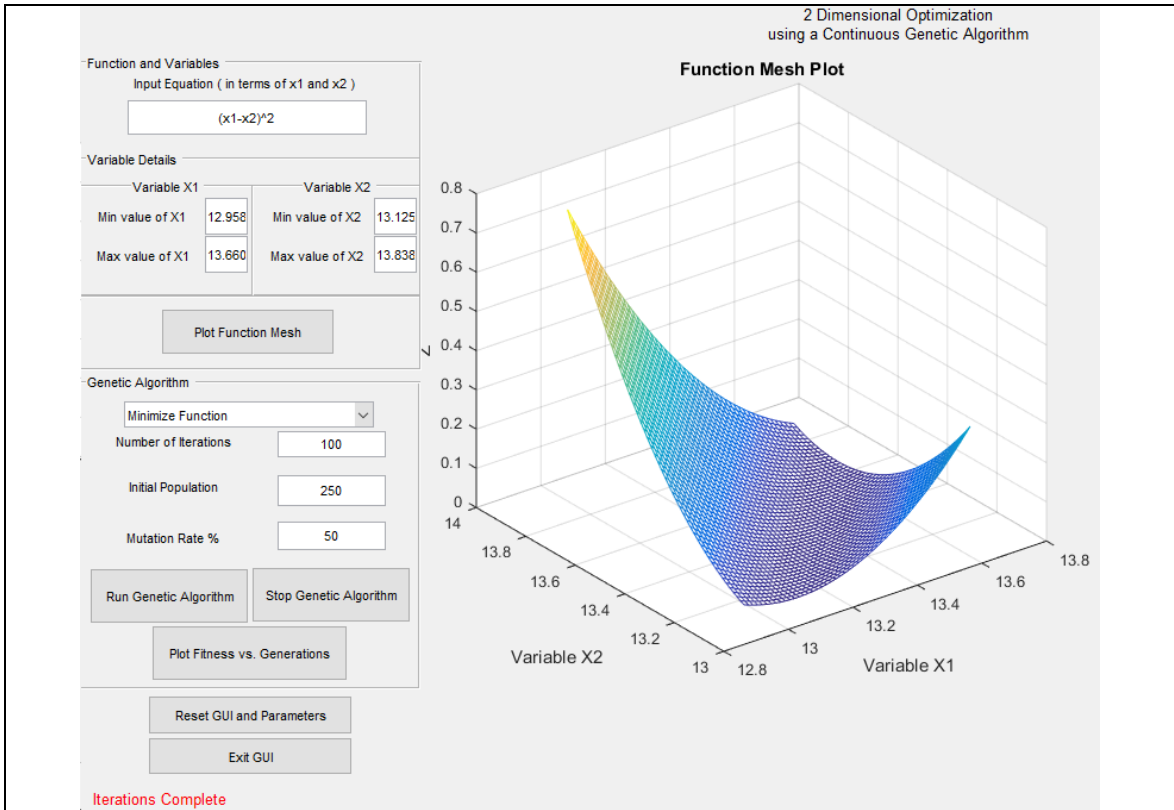
Figura A1.150 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 23 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 1: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

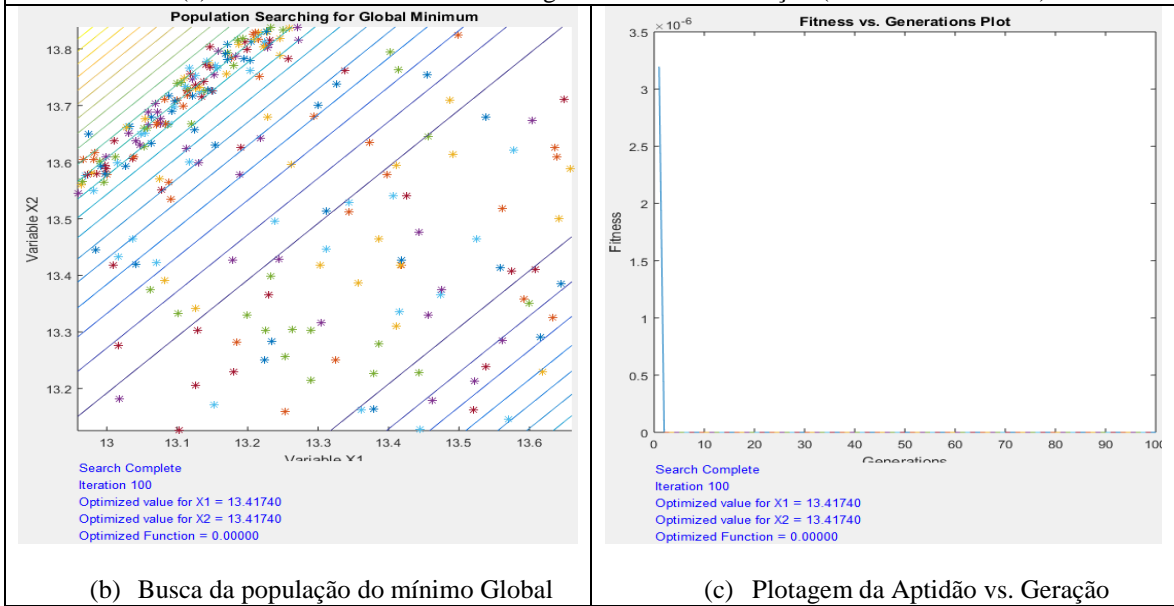
1.6.2.2 Análise Dinâmica Caso 23 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 1): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.151 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.151 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 23 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 1: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.3 Caso 24 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 2)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 2), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.152 a seguir.

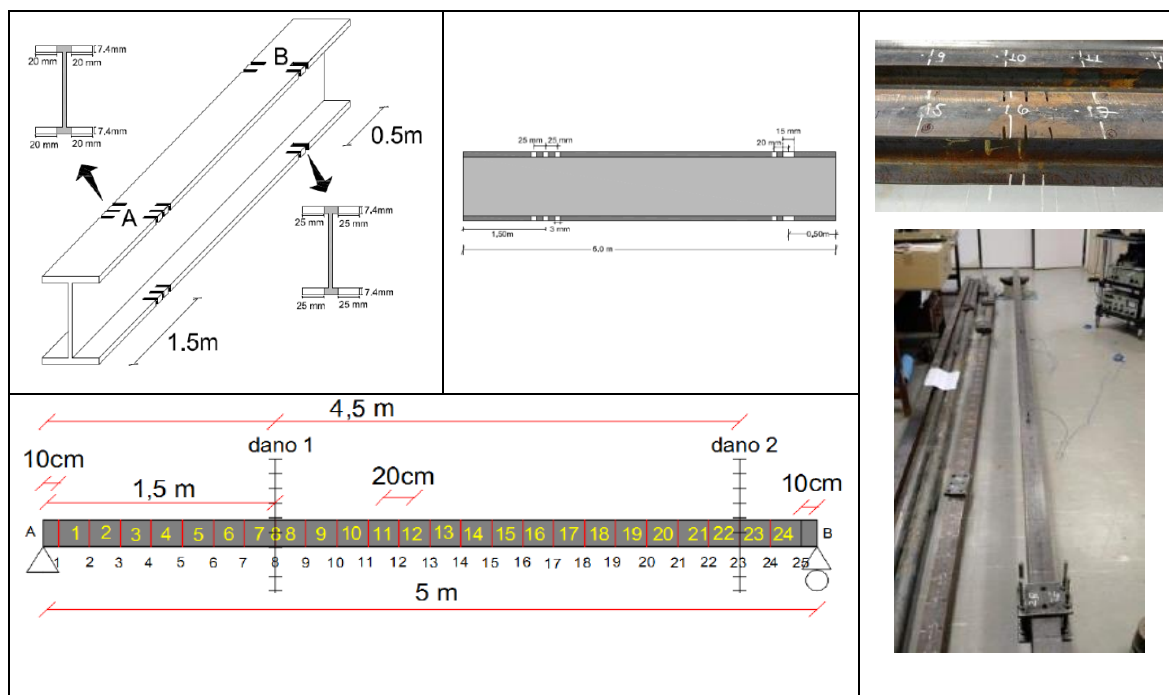


Figura A1.152 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes): caso 2 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 24 são apresentadas a seguir.

1.6.3.1 Análise Dinâmica Caso 24 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 2):

Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 201$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_{NP} = 10 \cdot I_D \rightarrow I_{NP} = 2010$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais da análise dinâmica para a viga do Caso Geral 24, apresentada na Figura A1.153, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (5 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

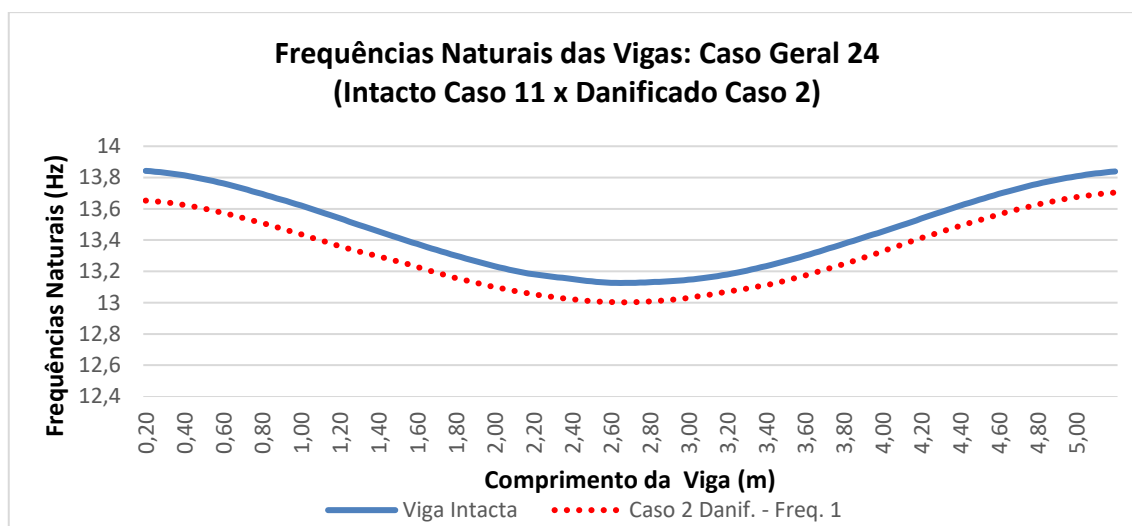
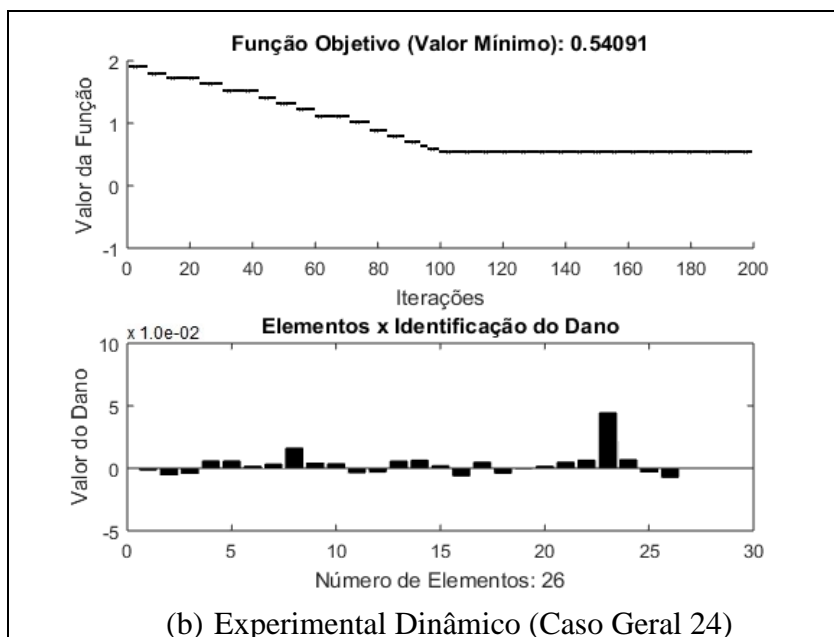


Figura A1.153 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 24

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.154 é mostrado o resultado da solução do problema.



(b) Experimental Dinâmico (Caso Geral 24)

Figura A1.154 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 24 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 2: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

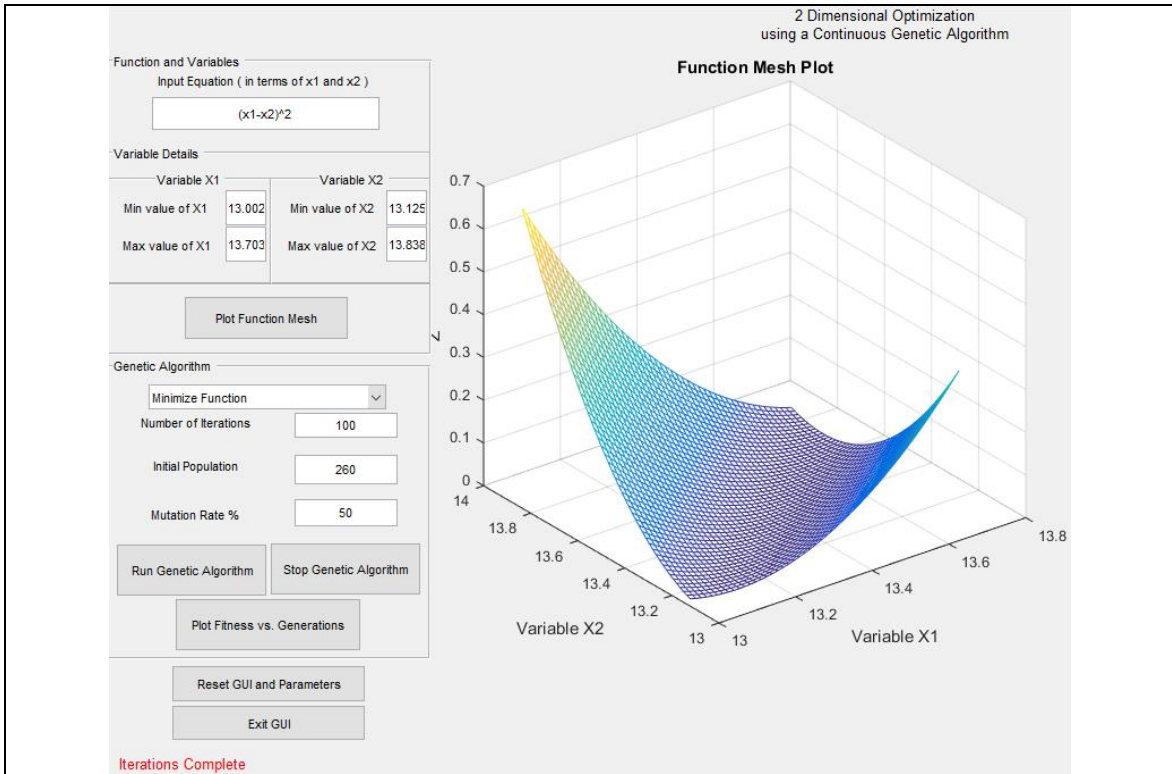
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

1.6.3.2 Análise Dinâmica Caso 24 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 2):

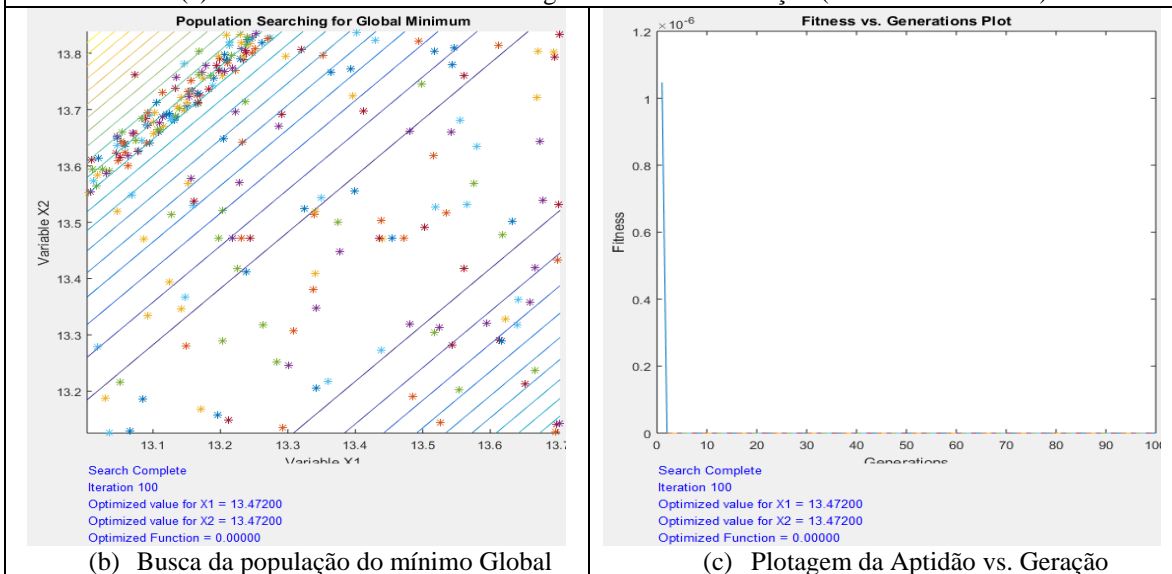
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.155 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.155 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 24 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 2: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.4 Caso 25 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 3)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 3), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.156 a seguir.

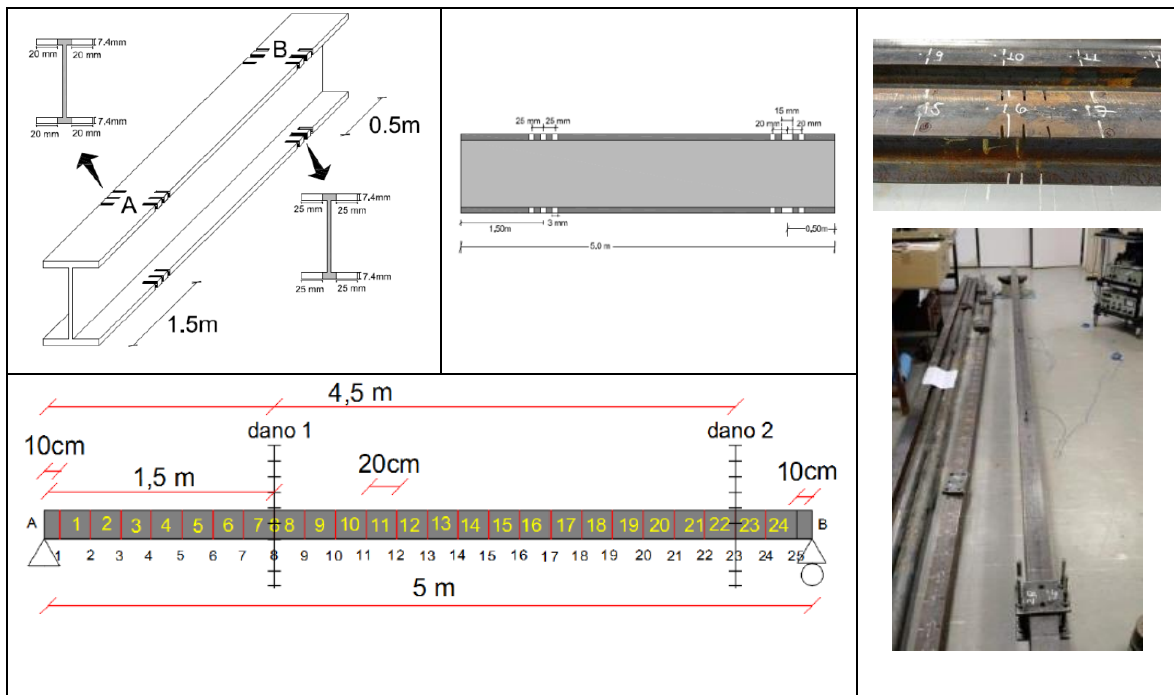


Figura A1.156 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes): caso 3 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 25 são apresentadas a seguir.

1.6.4.1 Análise Dinâmica Caso 25 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 3): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 201$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 2010$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,6$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,8$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 25, apresentada na Figura A1.157, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (5 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

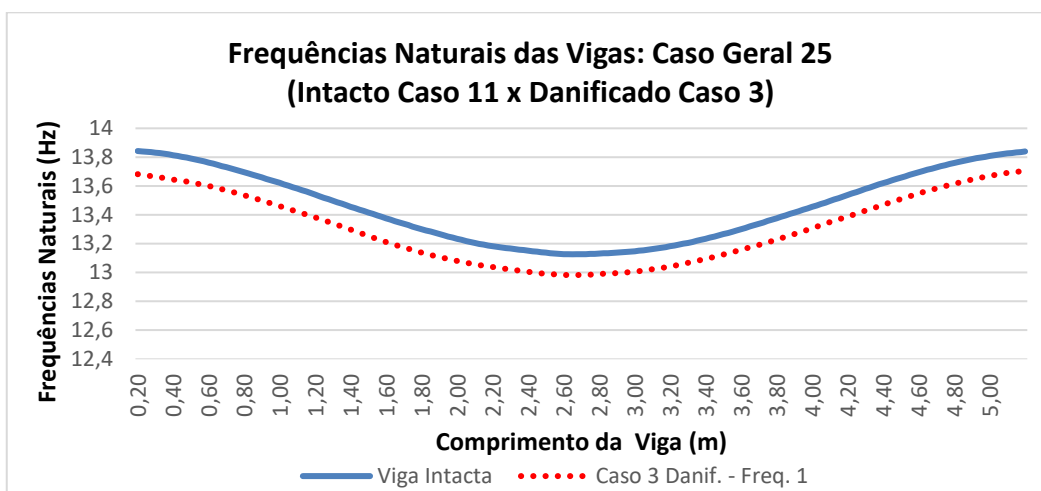
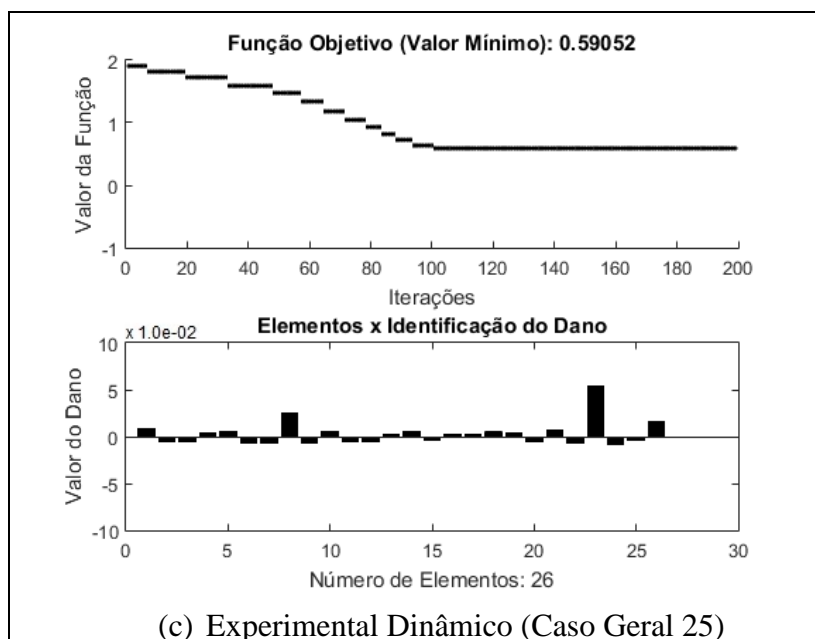


Figura A1.157 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 25

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.158 é mostrado o resultado da solução do problema.



(c) Experimental Dinâmico (Caso Geral 25)

Figura A1.158 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 25 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 3: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

1.6.4.2 Análise Dinâmica Caso 25 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 3): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.159 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.

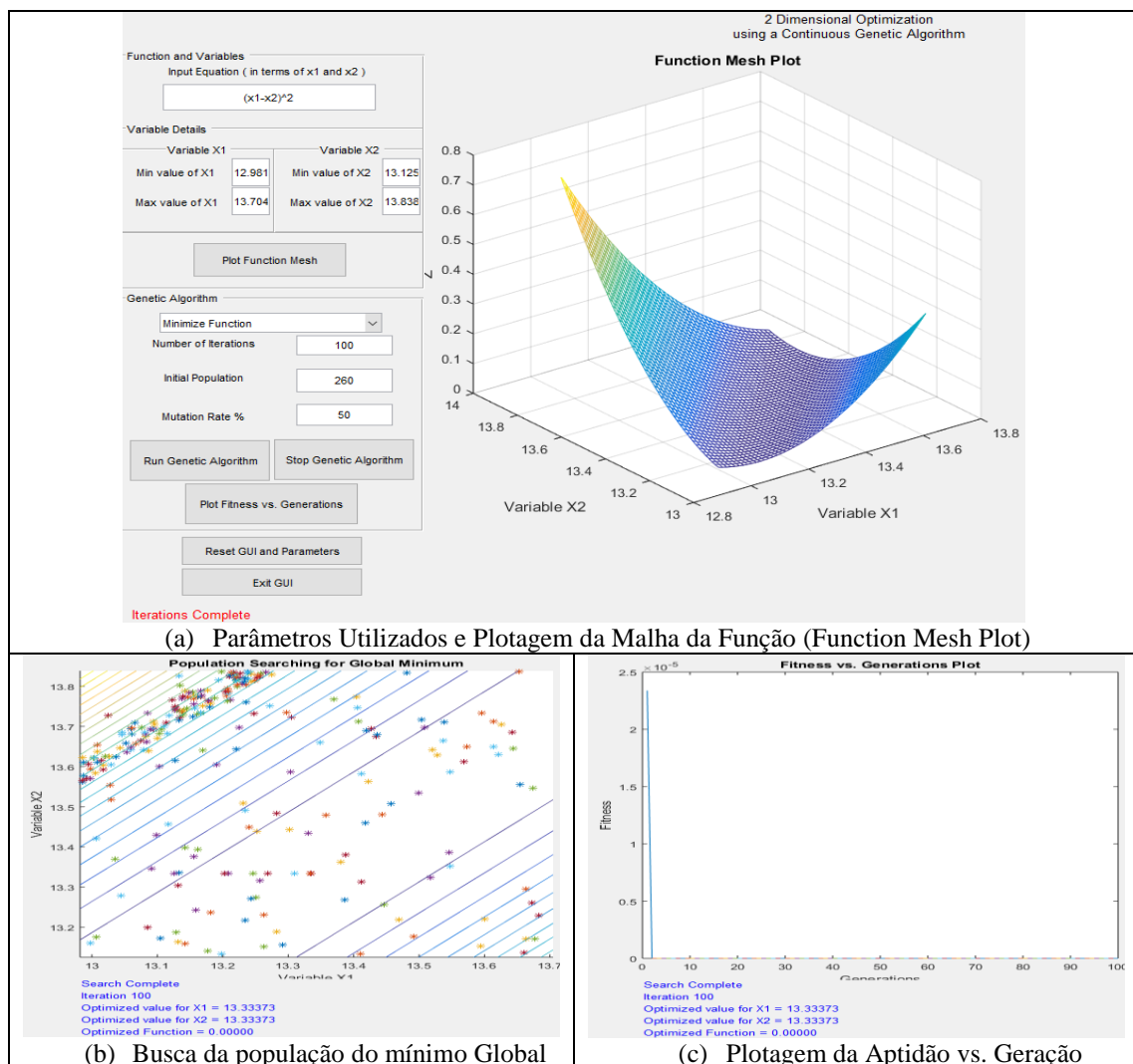


Figura A1.159 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 25 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 3: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.5 Caso 26 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 9)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 9), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.160 a seguir.

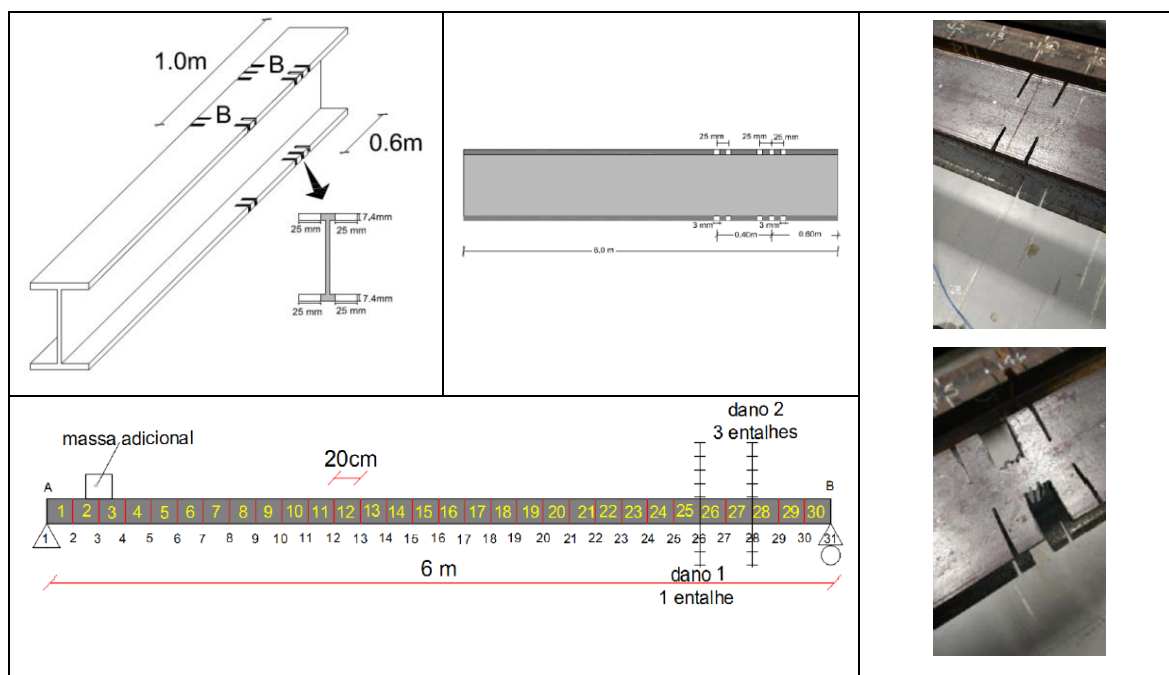


Figura A1.160 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes): caso 9 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 26 são apresentadas a seguir.

1.6.5.1 Análise Dinâmica Caso 26 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 9): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 30$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 300$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 26, apresentada na Figura A1.161, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

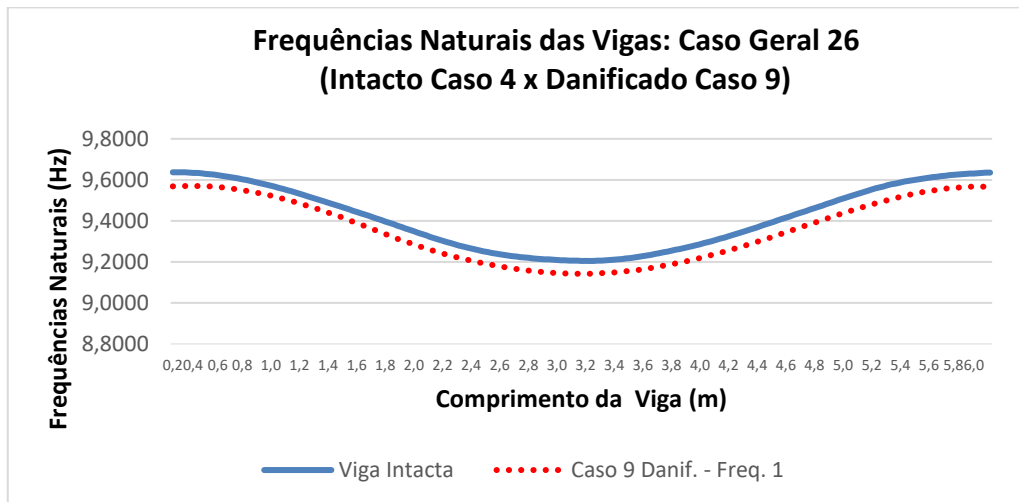


Figura A1.161 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 26

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.162 é mostrado o resultado da solução do problema.

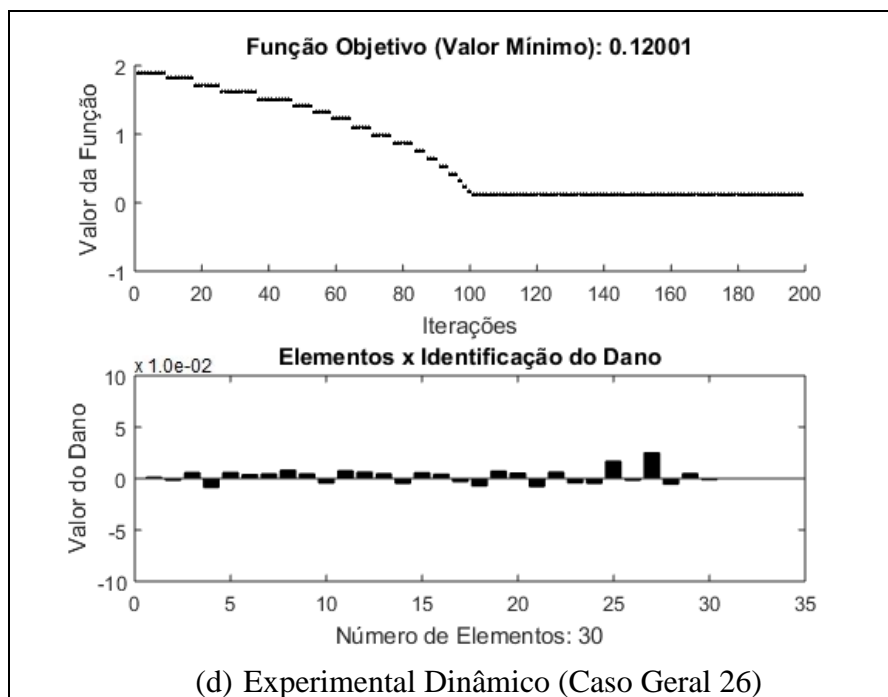


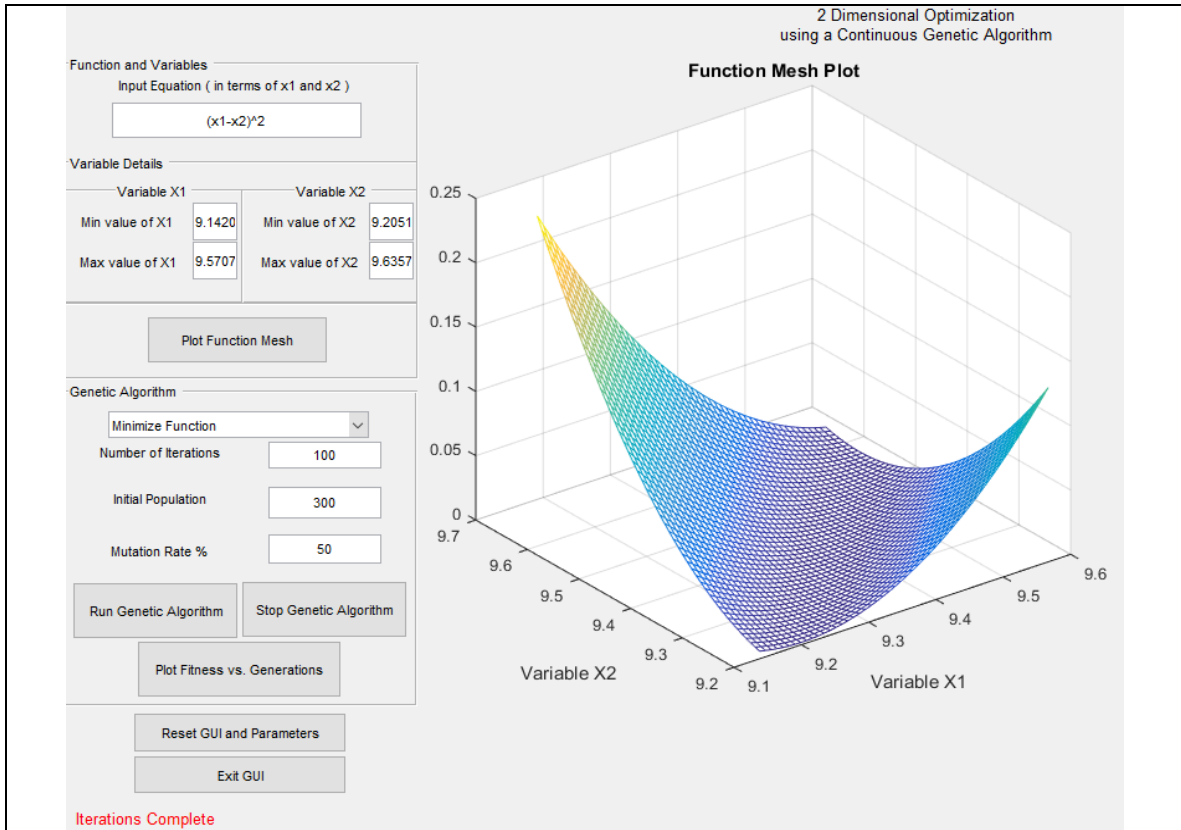
Figura A1.162 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 26 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 9: Dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.16.

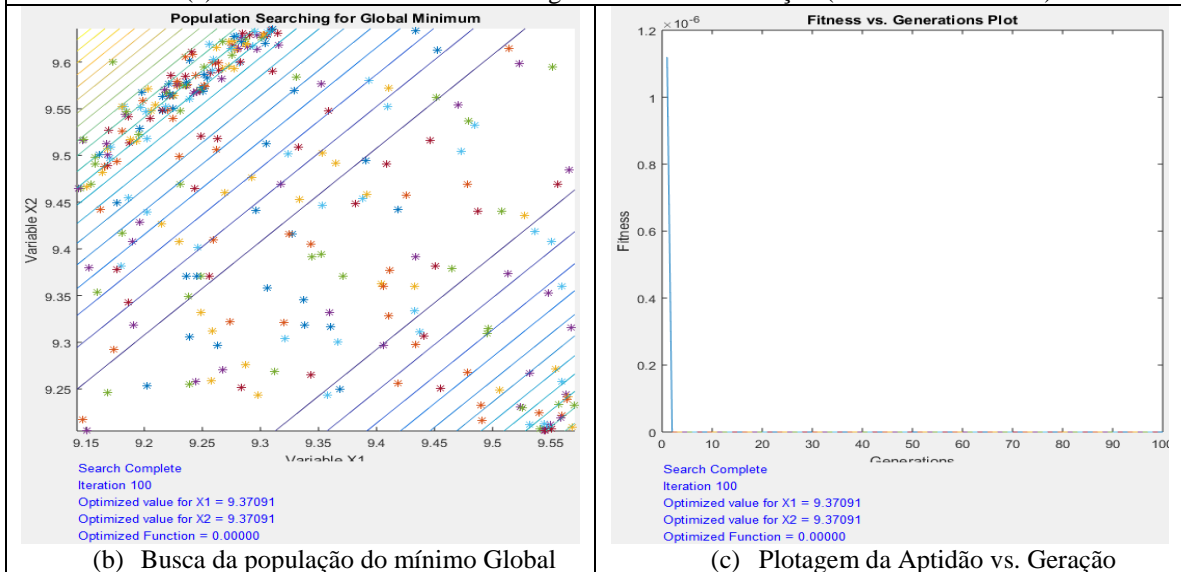
1.6.5.2 Análise Dinâmica Caso 26 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 9): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.163 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.163 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 26 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 9: Dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.17.

1.6.6 Caso 27 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 10)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 10), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.164 a seguir.

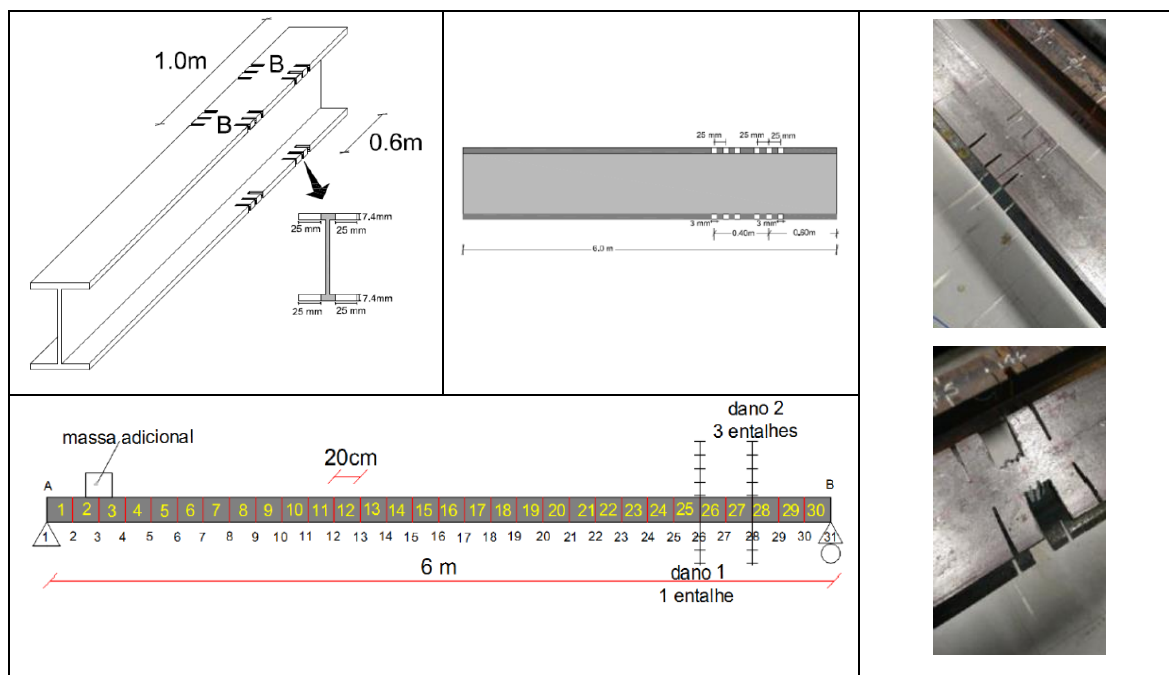


Figura A1.164 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes): caso 10 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 27 são apresentadas a seguir.

1.6.6.1 Análise Dinâmica Caso 27 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 10): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 30$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 300$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 27, apresentada na Figura A1.165, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

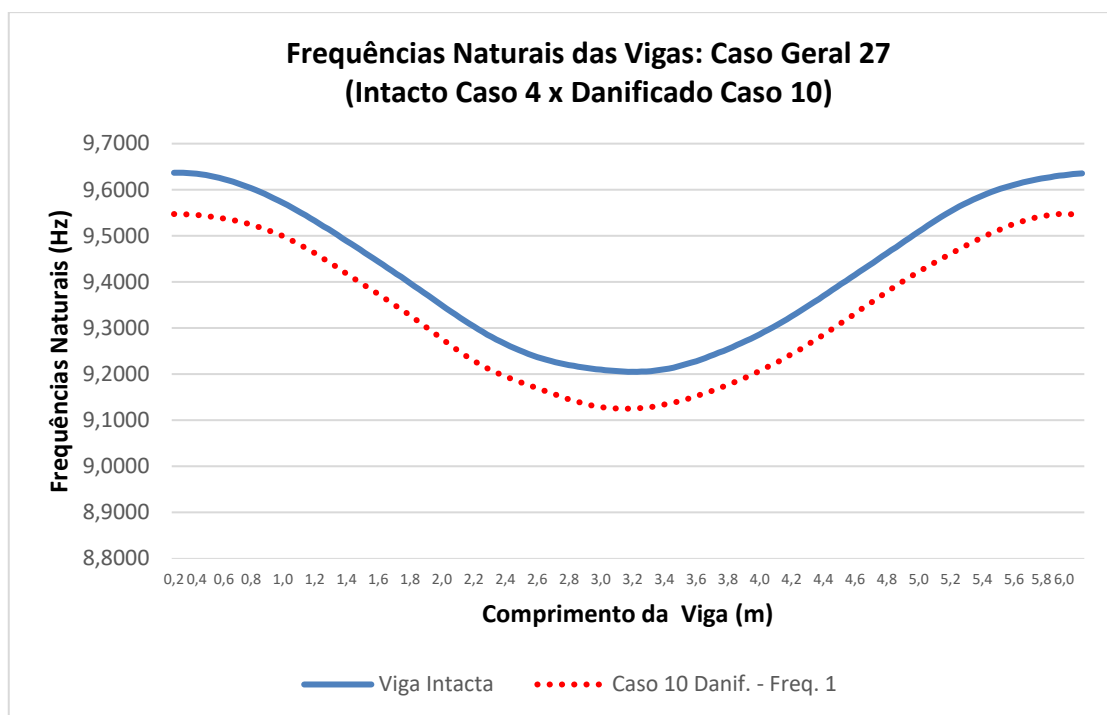
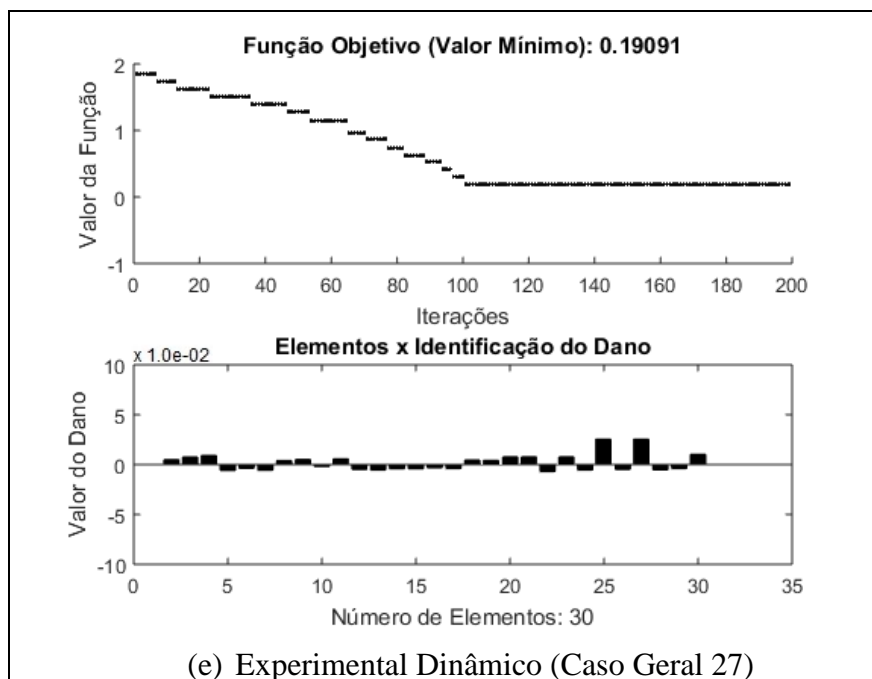


Figura A1.165 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 27

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.166 é mostrado o resultado da solução do problema.



(e) Experimental Dinâmico (Caso Geral 27)

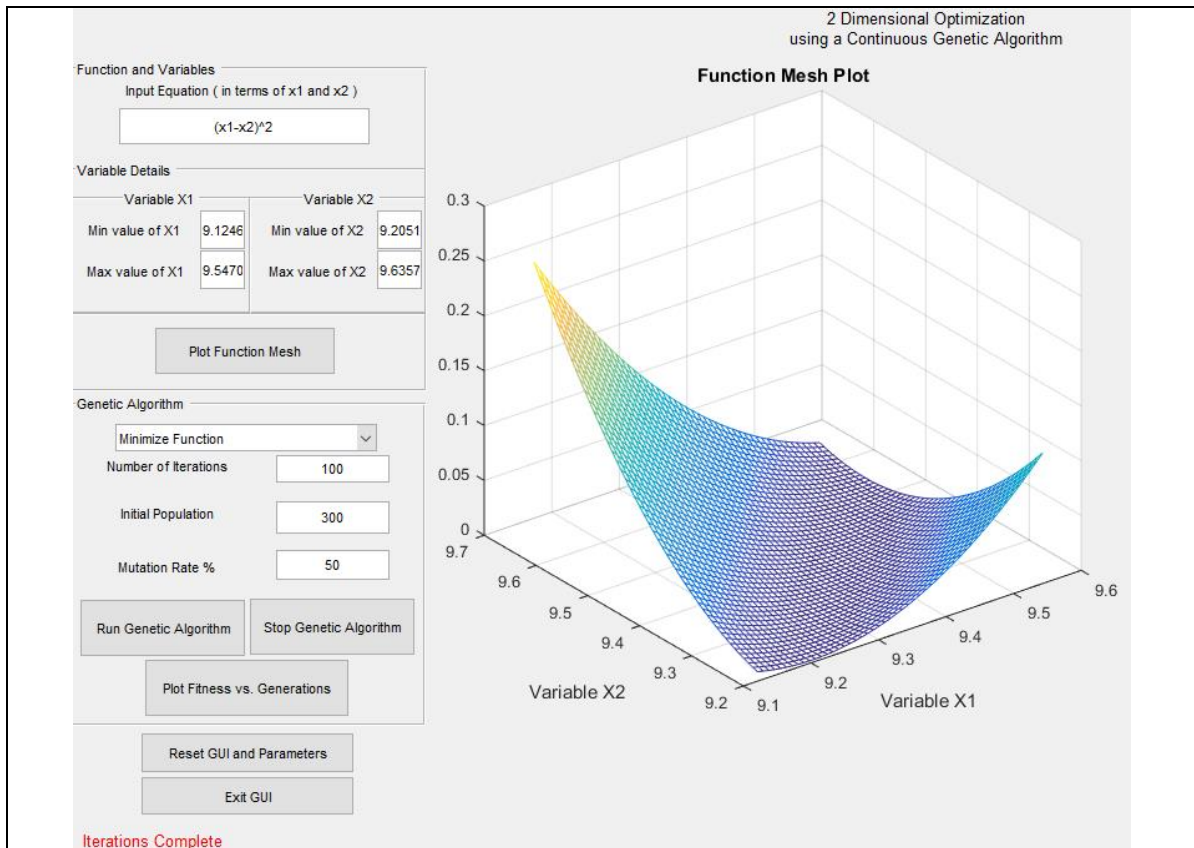
Figura A1.166 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 27 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 10: Dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.16.

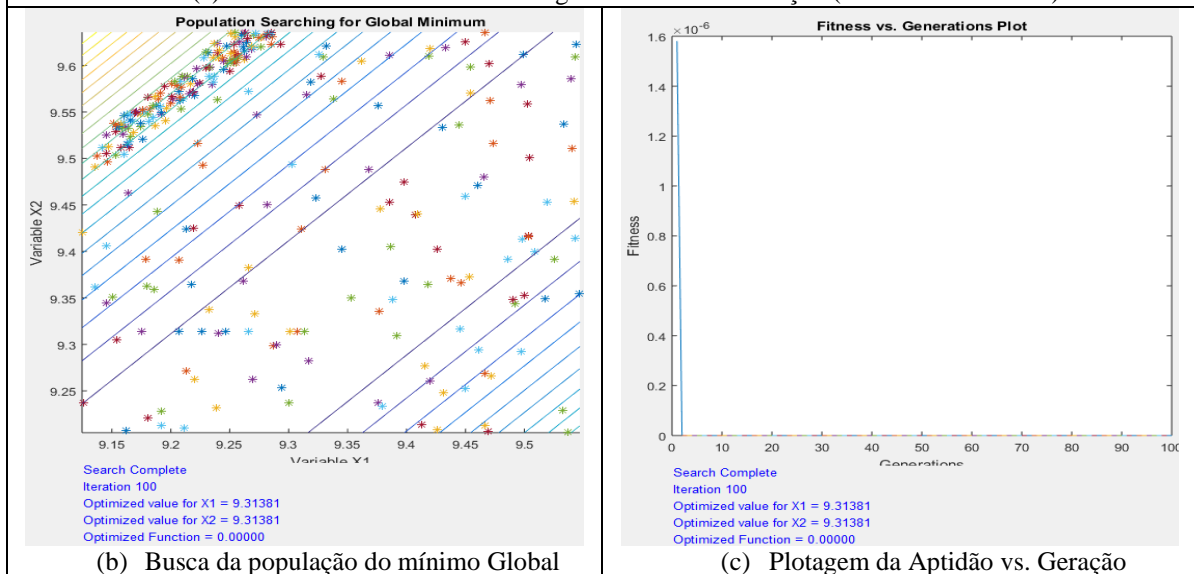
1.6.6.2 Análise Dinâmica Caso 27 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 10): Algoritmos Genéticos (GA)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.167 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.167 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 27 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 10: Dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.17.

1.6.7 Caso 28 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 12)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 12), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.168 a seguir.

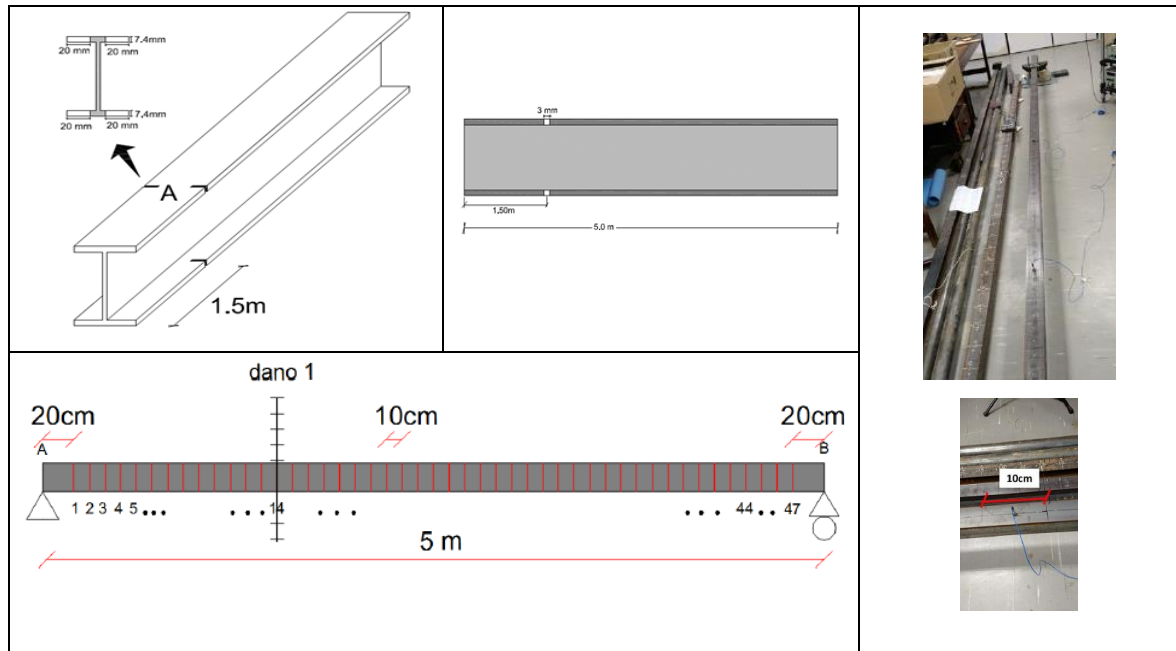


Figura A1.168 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe): caso 12 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 28 são apresentadas a seguir.

1.6.7.1 Análise Dinâmica Caso 28 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 12): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 48$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 480$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 28, apresentada na Figura A1.169, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (5 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

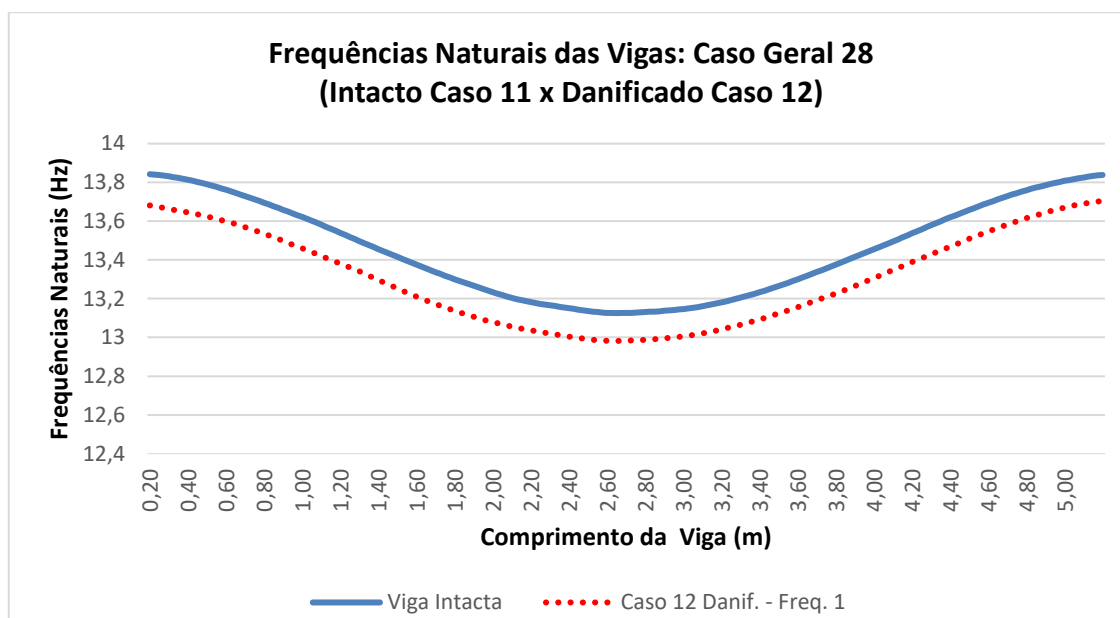
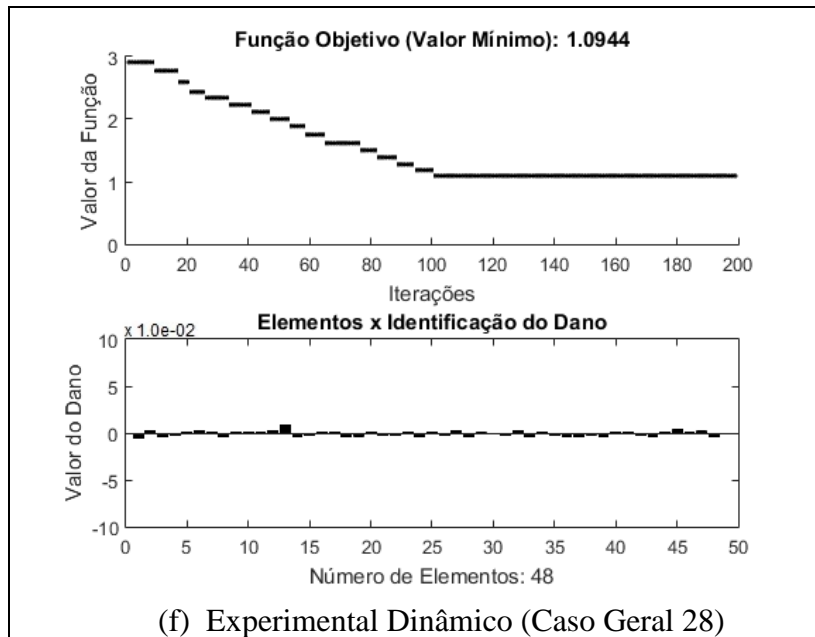


Figura A1.169 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 28

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.170 é mostrado o resultado da solução do problema.



(f) Experimental Dinâmico (Caso Geral 28)
 Figura A1.170 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 28 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 12: Dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe)

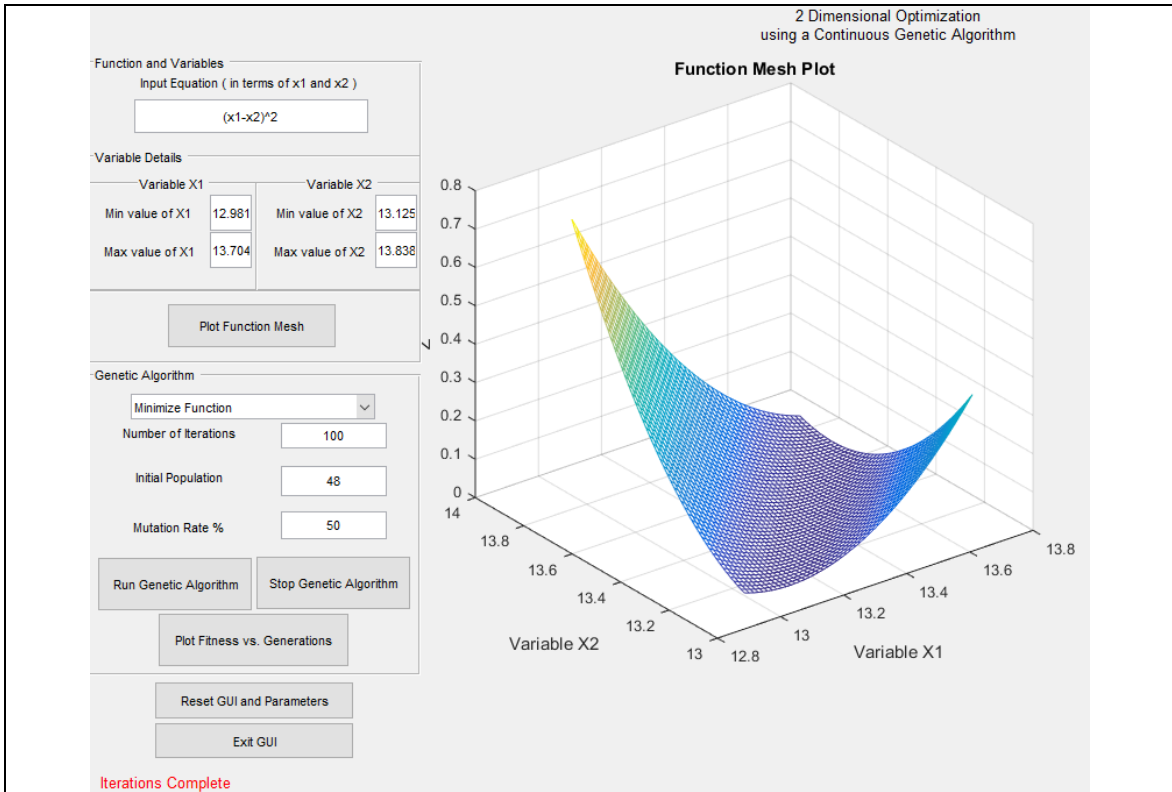
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

1.6.7.2 Análise Dinâmica Caso 28 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 12):

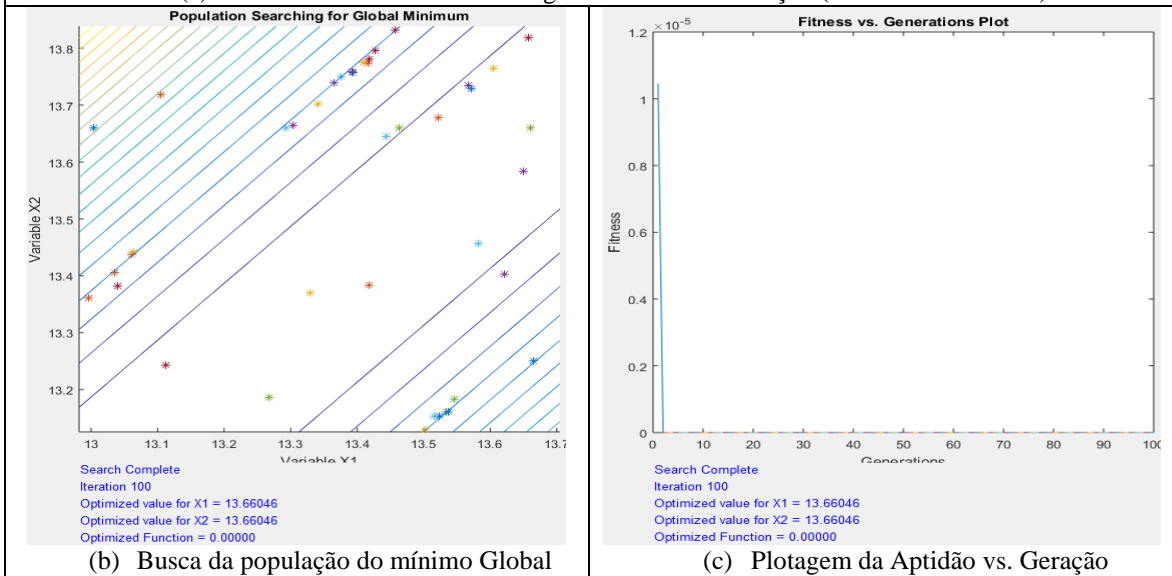
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.171 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.171 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 28 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 12: Dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.8 Caso 29 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 13)

Já a viga metálica biapoiada danificada (caso 13) com configuração de dano conforme representado na Figura A1.172, do trabalho de Palechor (2018).

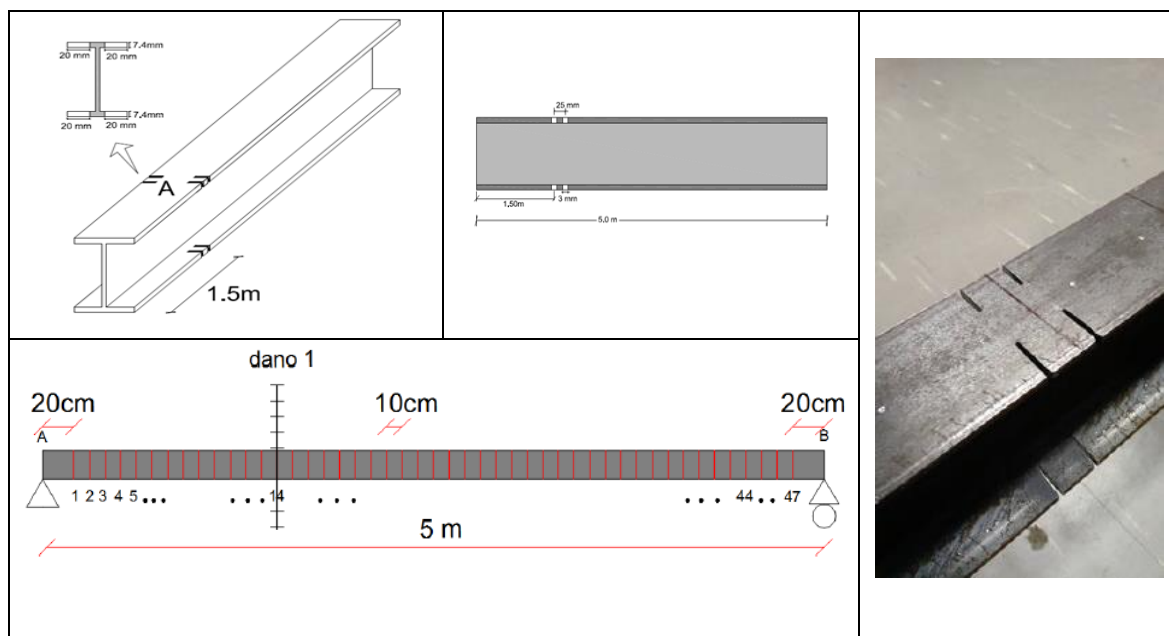


Figura A1.172 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes): caso 13 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 29 são apresentadas a seguir.

1.6.8.1 Análise Dinâmica Caso 29 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 13): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 48$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_{NP} = 10 \cdot I_D \rightarrow I_{NP} = 480$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 29, apresentada na Figura A1.173, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

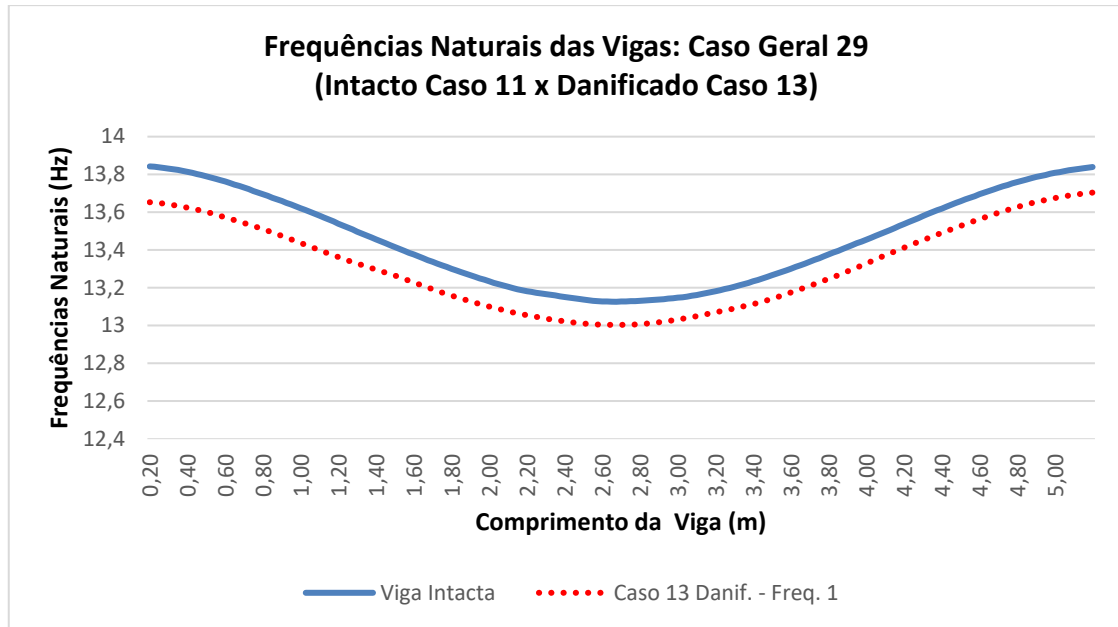
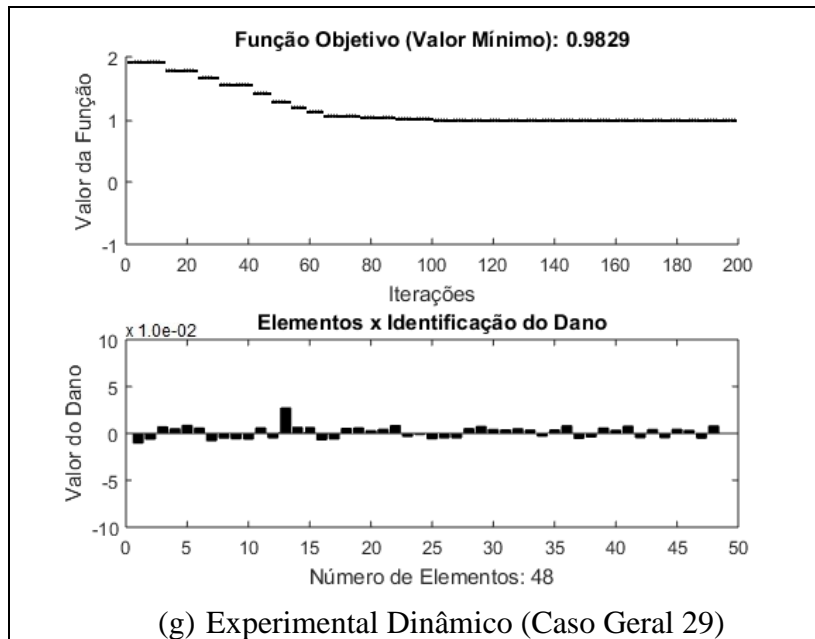


Figura A1.173 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 29

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.174 é mostrado o resultado da solução do problema.



(g) Experimental Dinâmico (Caso Geral 29)
 Figura A1.174 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 29 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 13: Dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes)

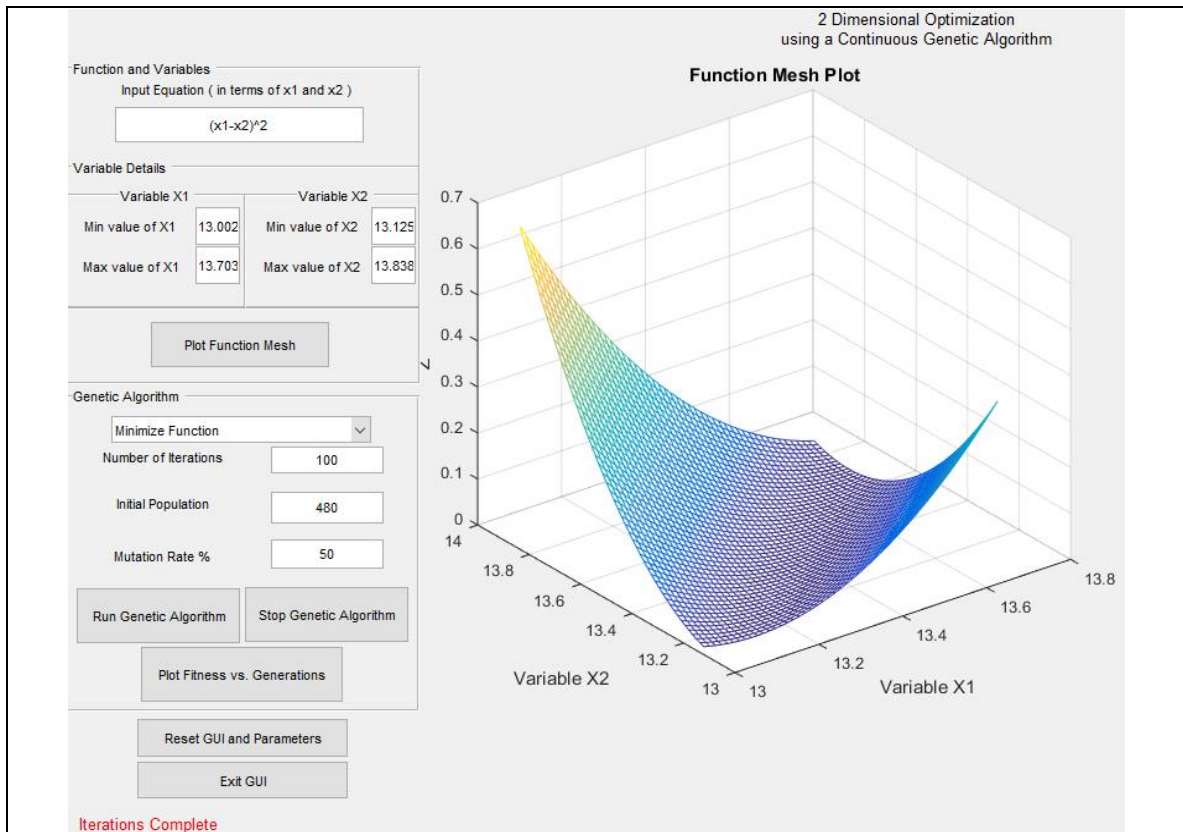
As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

1.6.8.2 Análise Dinâmica Caso 29 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 13):

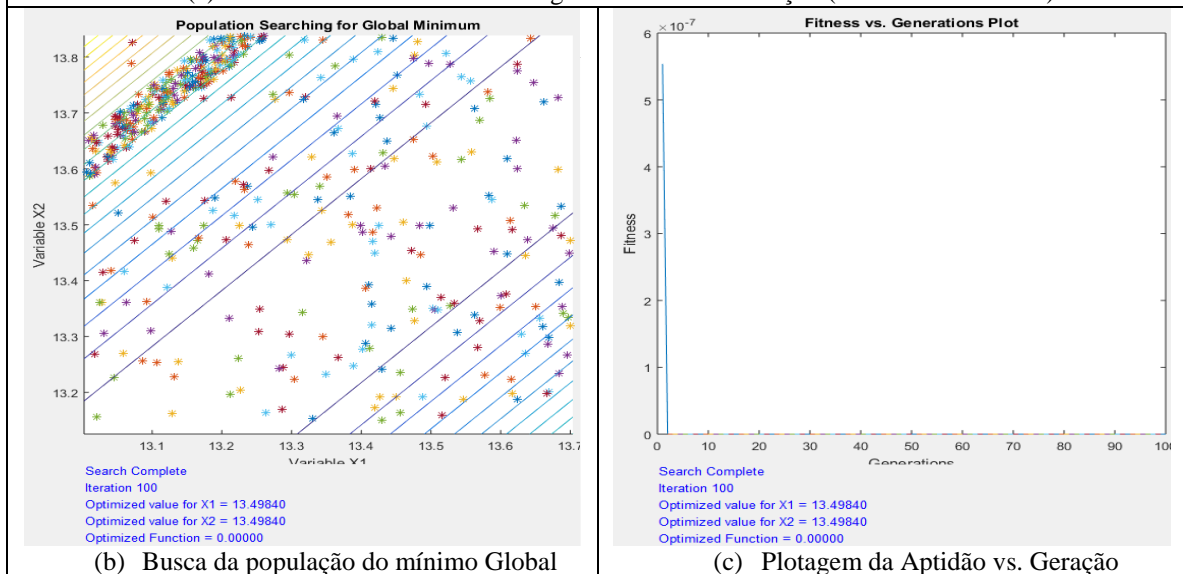
Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.175 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.175 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 29 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 13: Dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.9 Caso 30 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 14)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 14), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.176 a seguir.

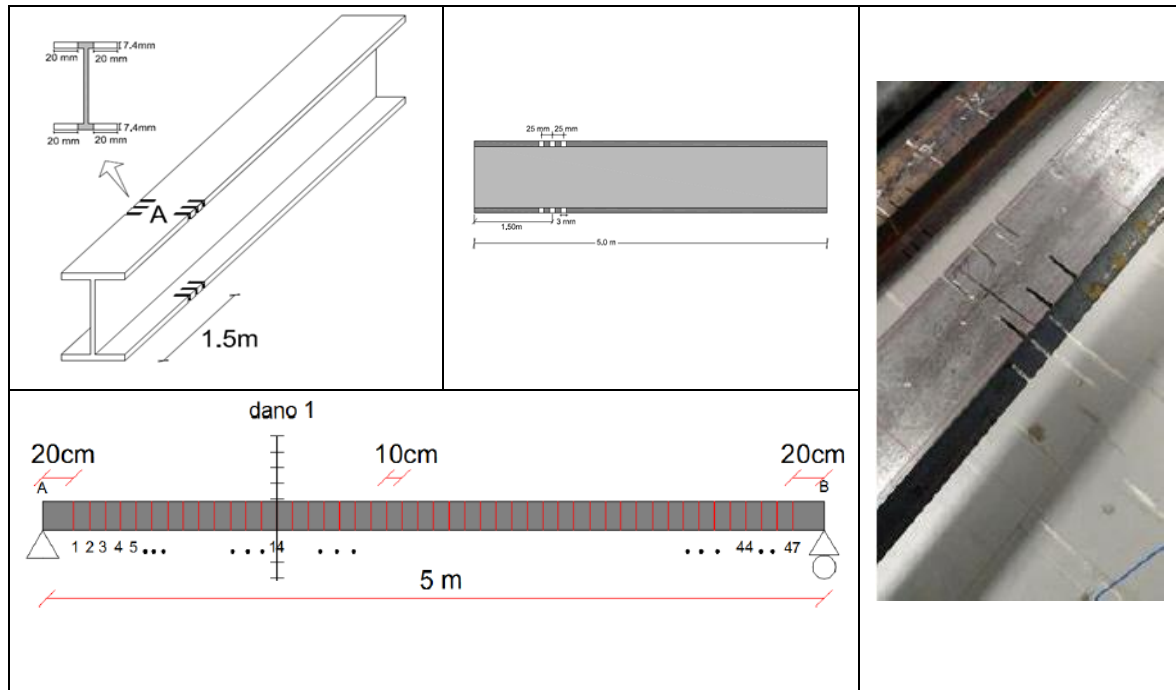


Figura A1.176 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes): caso 14 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 30 são apresentadas a seguir.

1.6.9.1 Análise Dinâmica Caso 30 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 14): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 48$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 480$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 30, apresentada na Figura A1.177, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (5 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

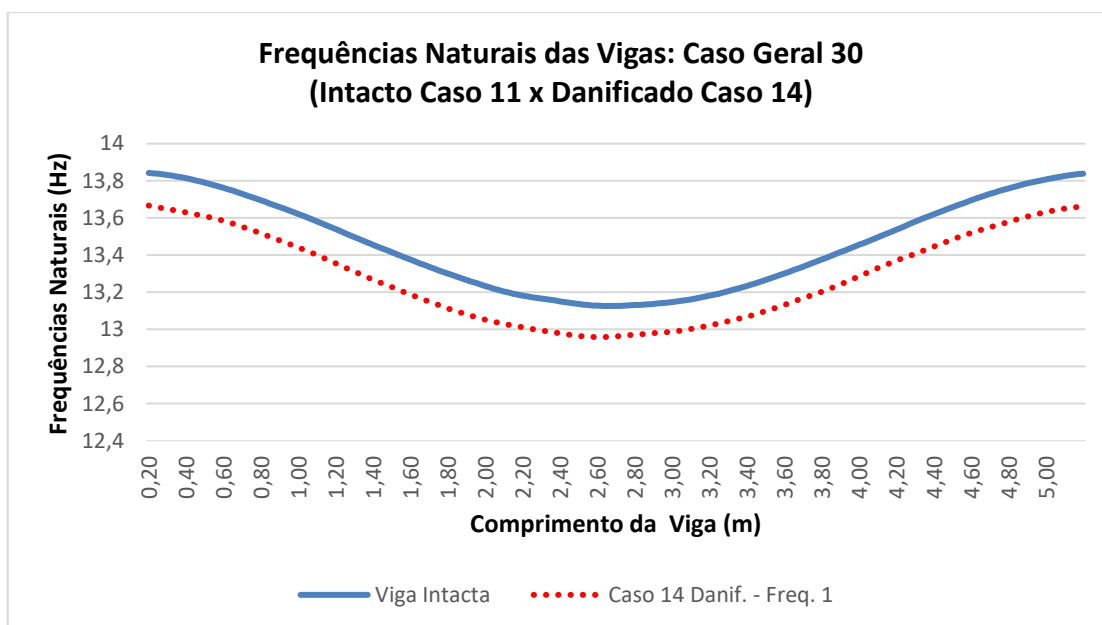


Figura A1.177 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 30

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.178 é mostrado o resultado da solução do problema.

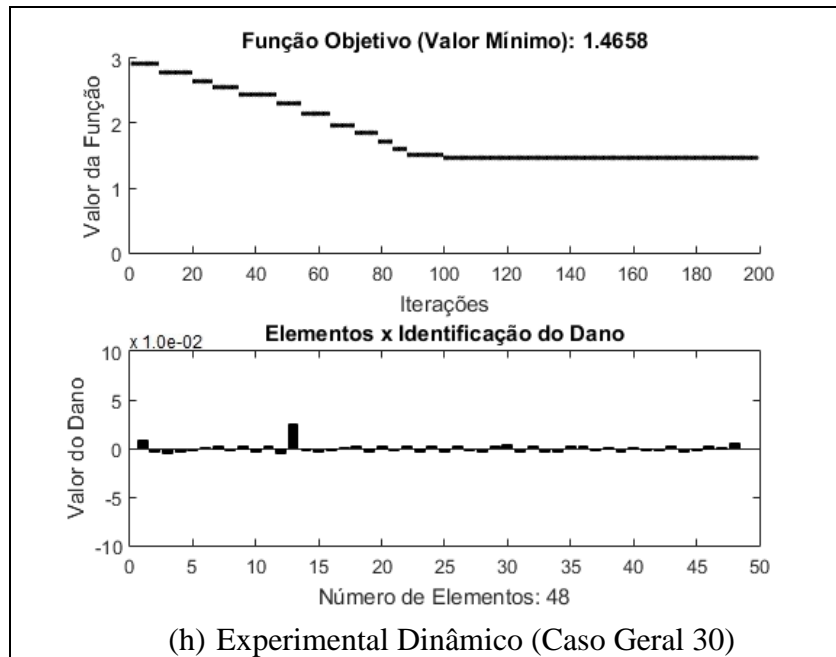


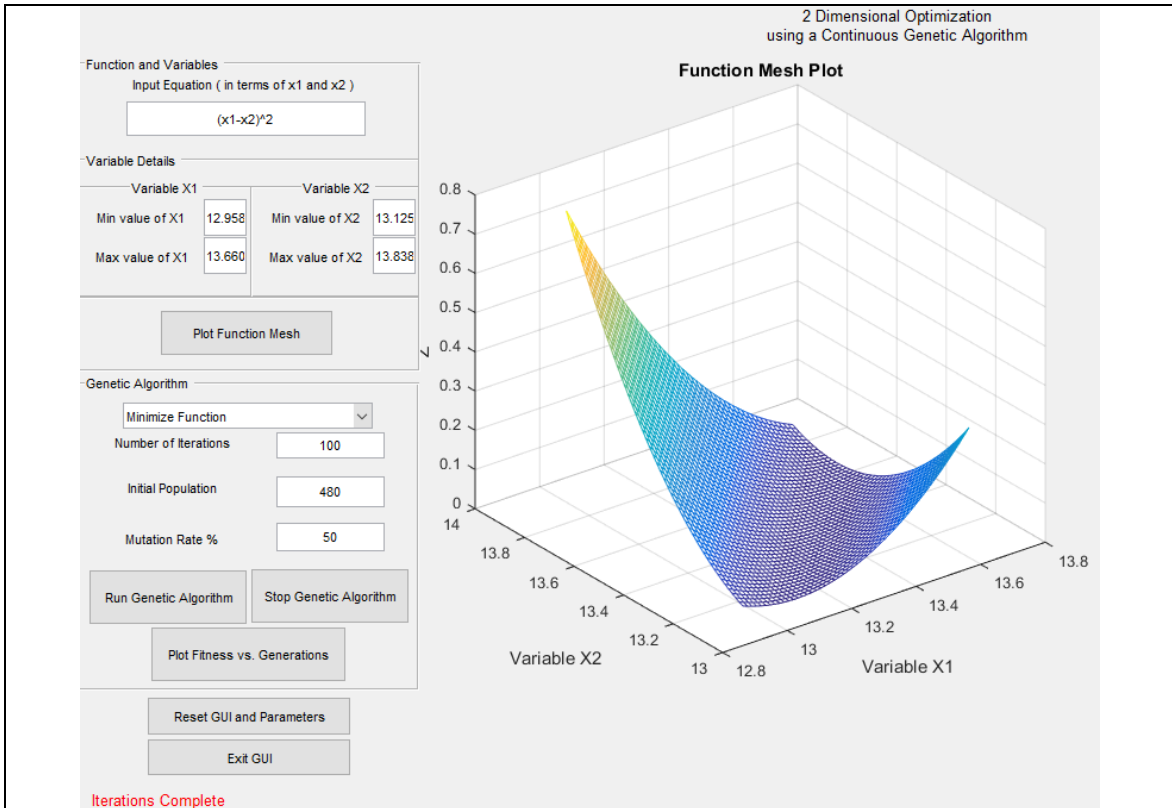
Figura A1.178 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 30 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 14: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

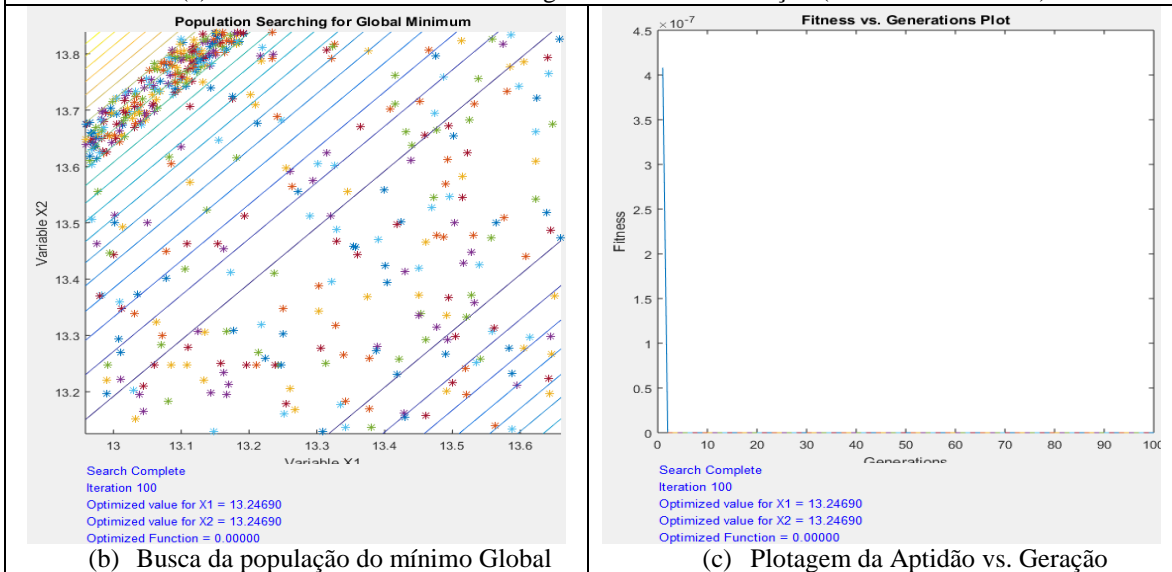
1.6.9.2 Análise Dinâmica Caso 30 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 14): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.179 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.179 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 30 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 14: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.10 Caso 31 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 15)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 15), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.180 a seguir.

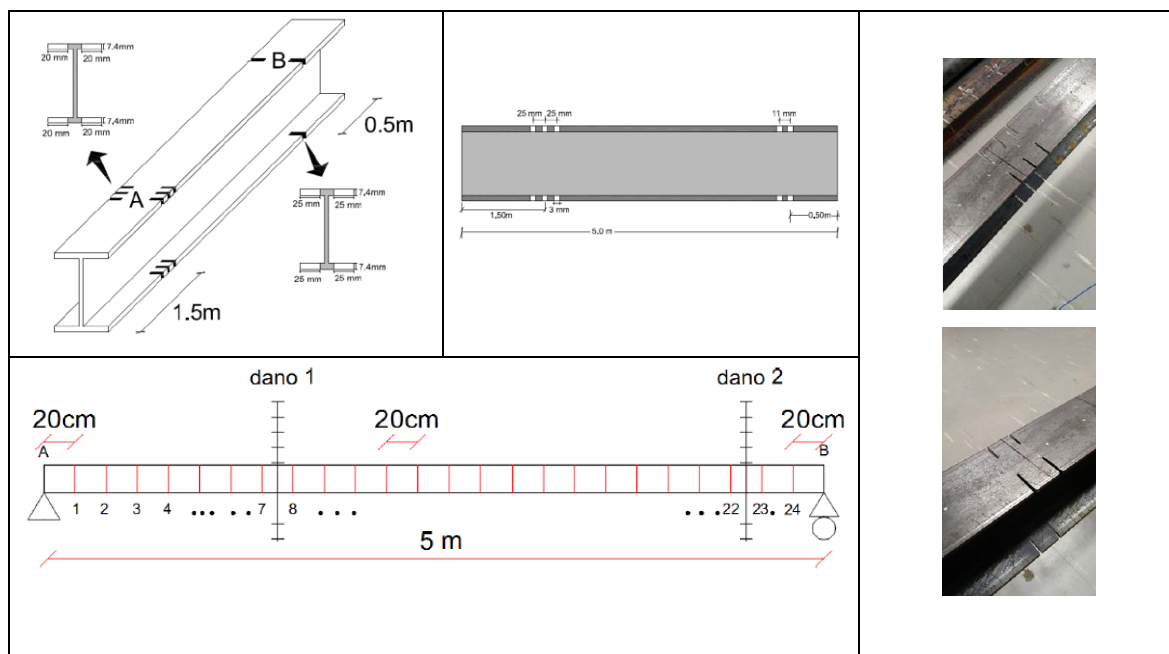


Figura A1.180 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes): caso 15 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 31 são apresentadas a seguir.

1.6.10.1 Análise Dinâmica Caso 31 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 15): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 25$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 250$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 31, apresentada na Figura A1.181, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

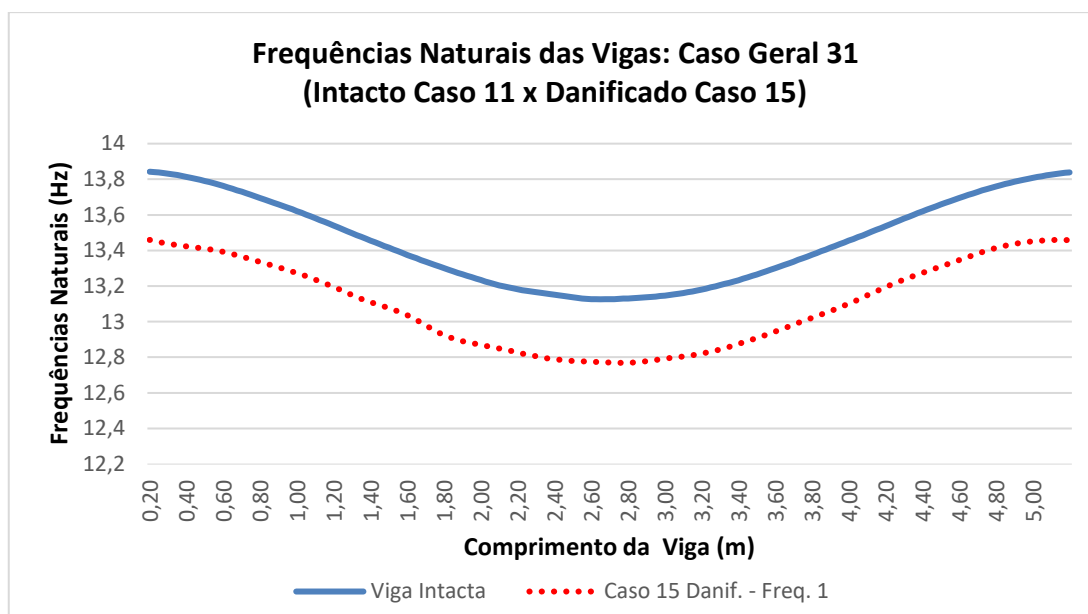
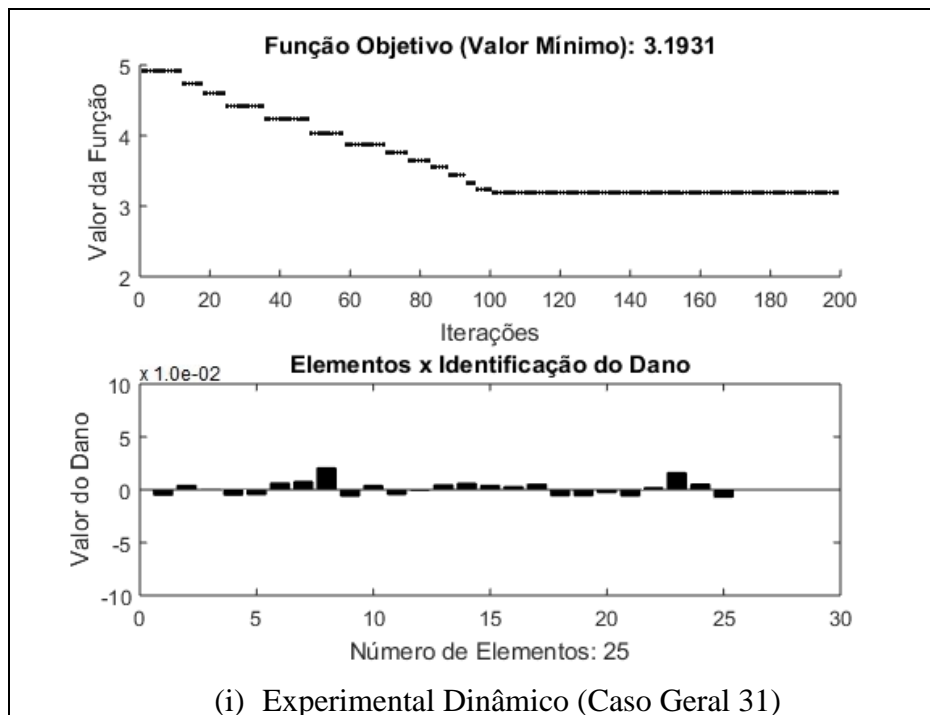


Figura A1.181 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 31

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.182 é mostrado o resultado da solução do problema.



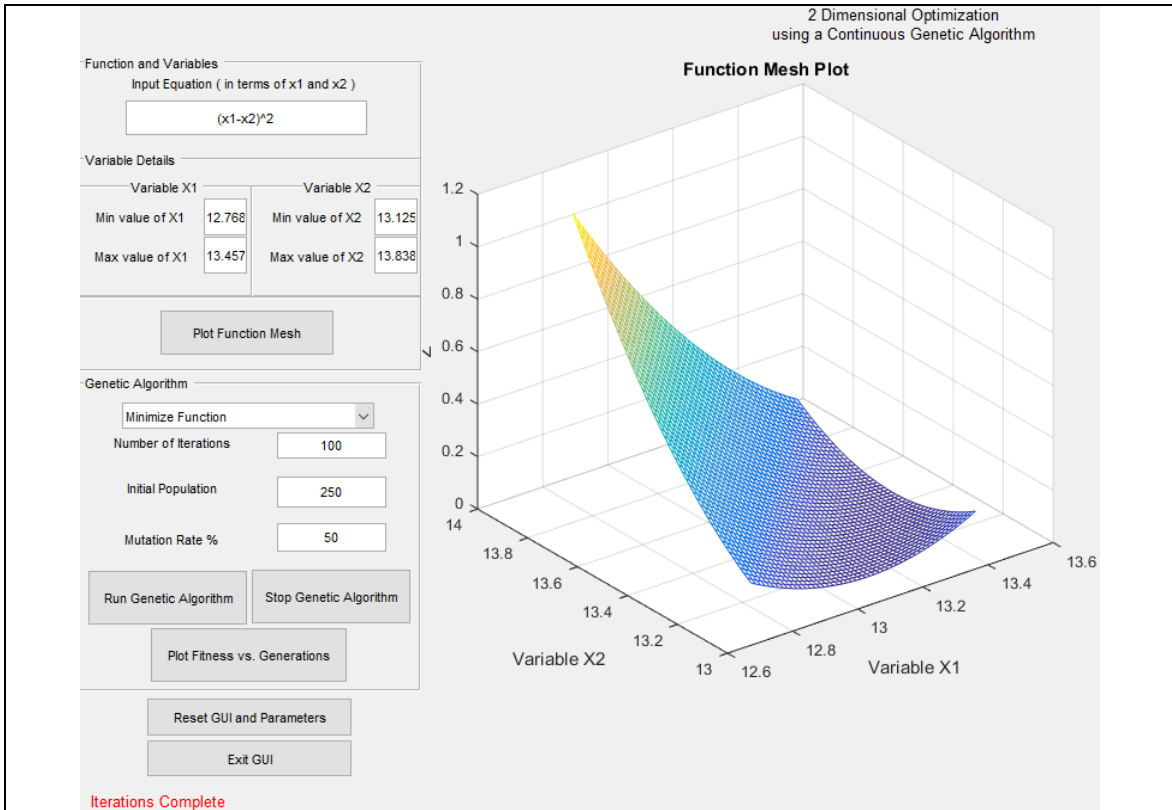
(i) Experimental Dinâmico (Caso Geral 31)
 Figura A1.182 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 31 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 15: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

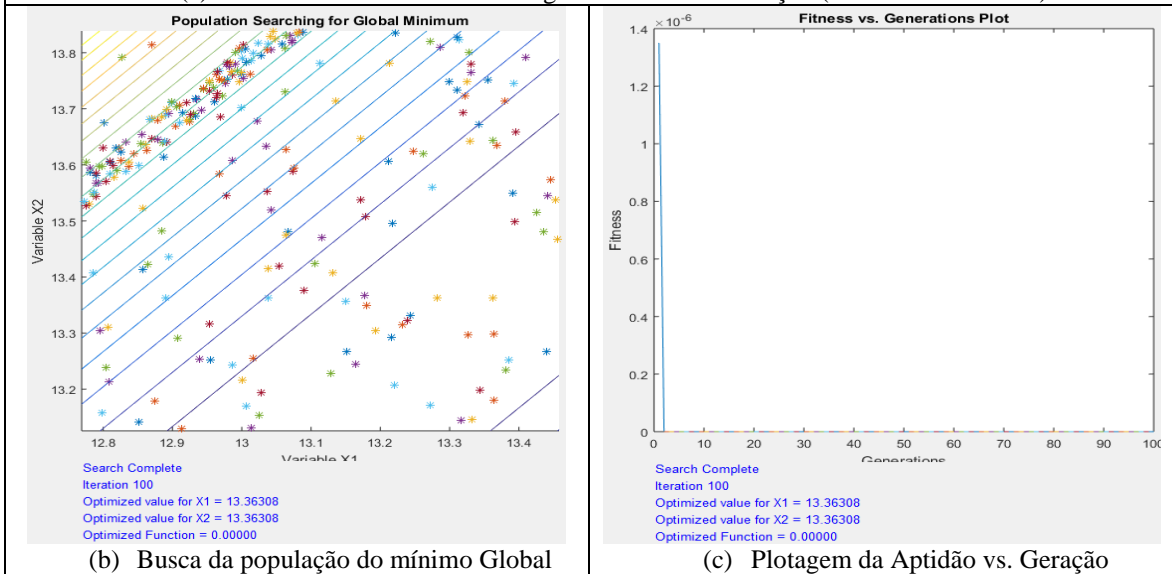
1.6.10.2 Análise Dinâmica Caso 31 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 15): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.183 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.183 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 31 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 15: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.11 Caso 32 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada (caso 16)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 16), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.184 a seguir.

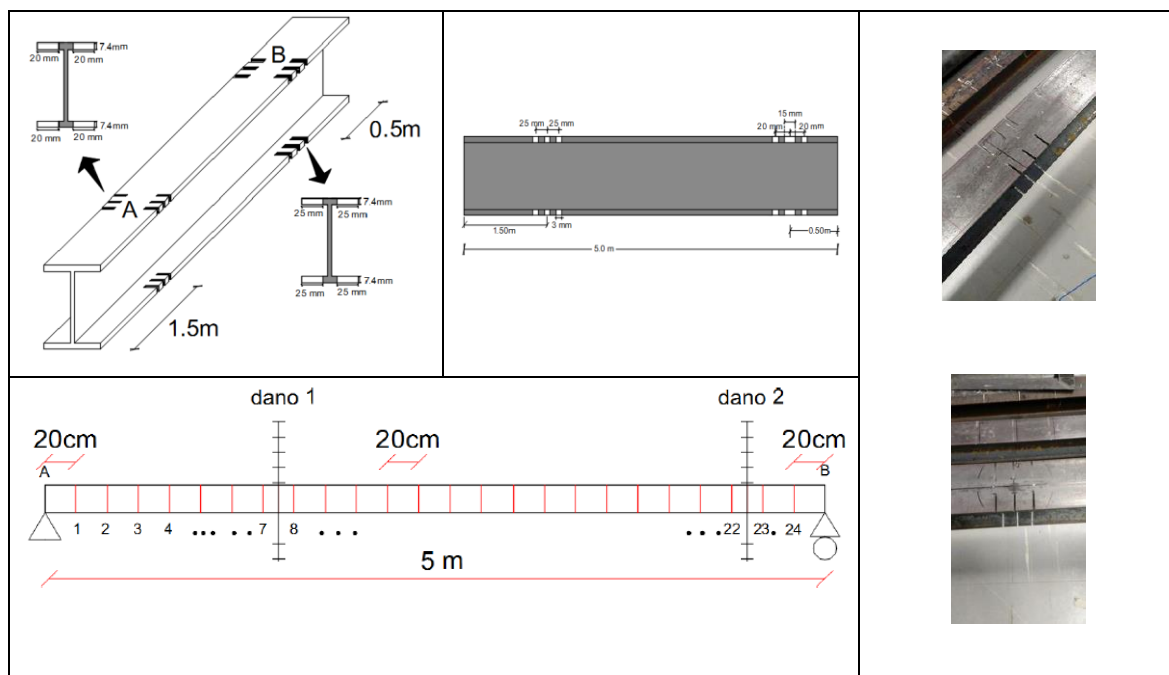


Figura A1.184 - Viga Metálica Biapoiada Danificada: caso 16 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 32 são apresentadas a seguir.

1.6.11.1 Análise Dinâmica Caso 32 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 16): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 25$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_{NP} = 10 \cdot I_D \rightarrow I_{NP} = 250$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 32, apresentada na Figura A1.185, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (5 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

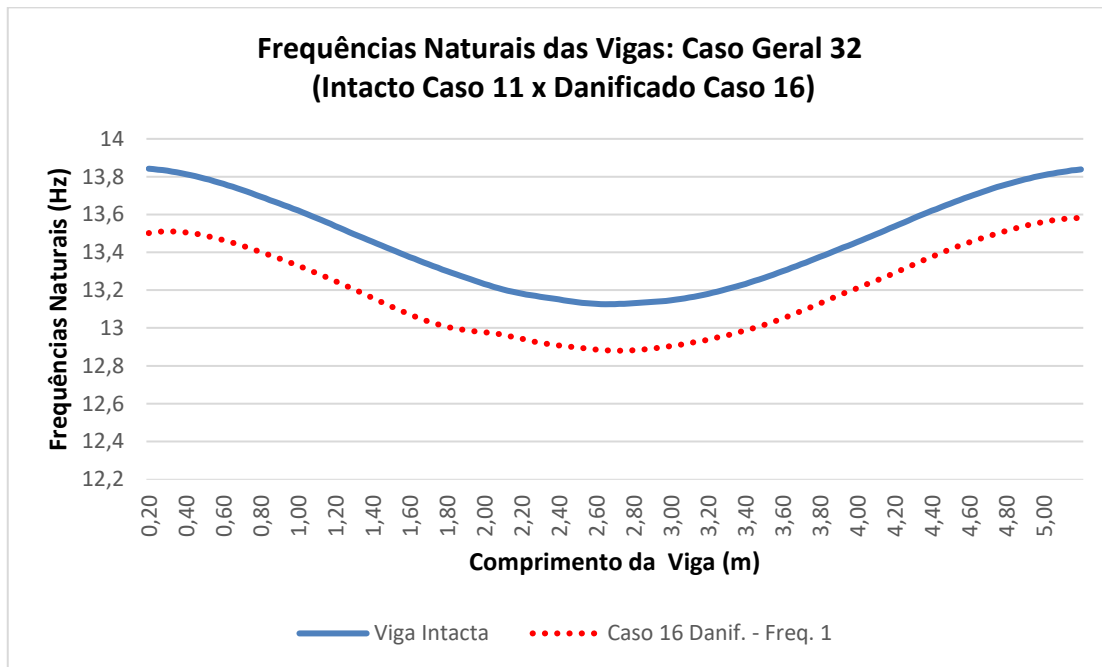
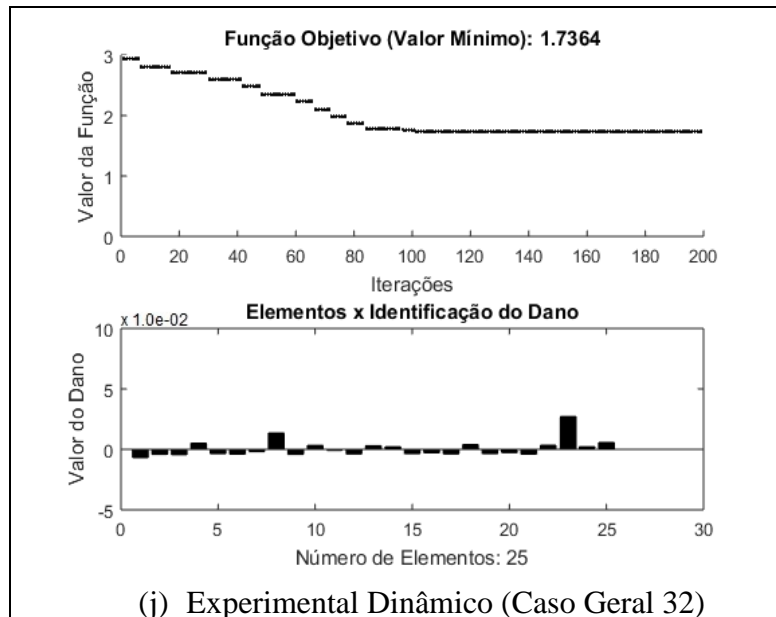


Figura A1.185 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 32

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.186 é mostrado o resultado da solução do problema.



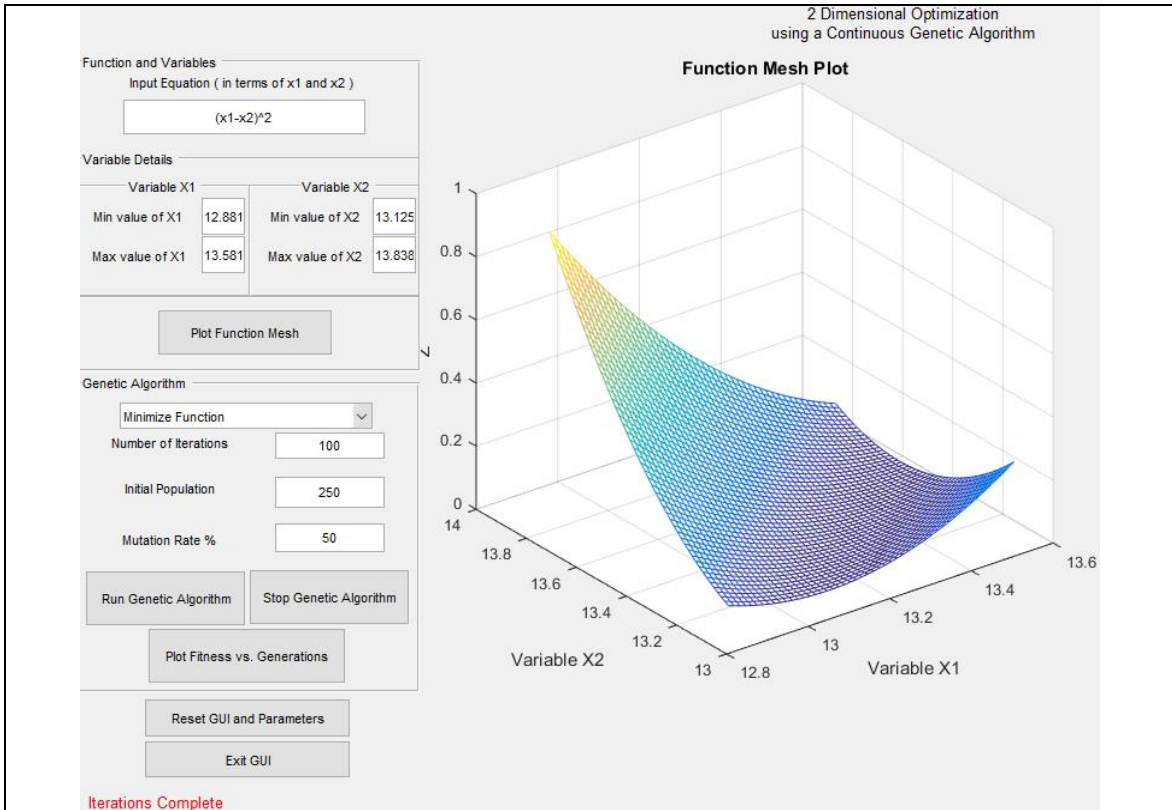
(j) Experimental Dinâmico (Caso Geral 32)
 Figura A1.186 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 32 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 16: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.14.

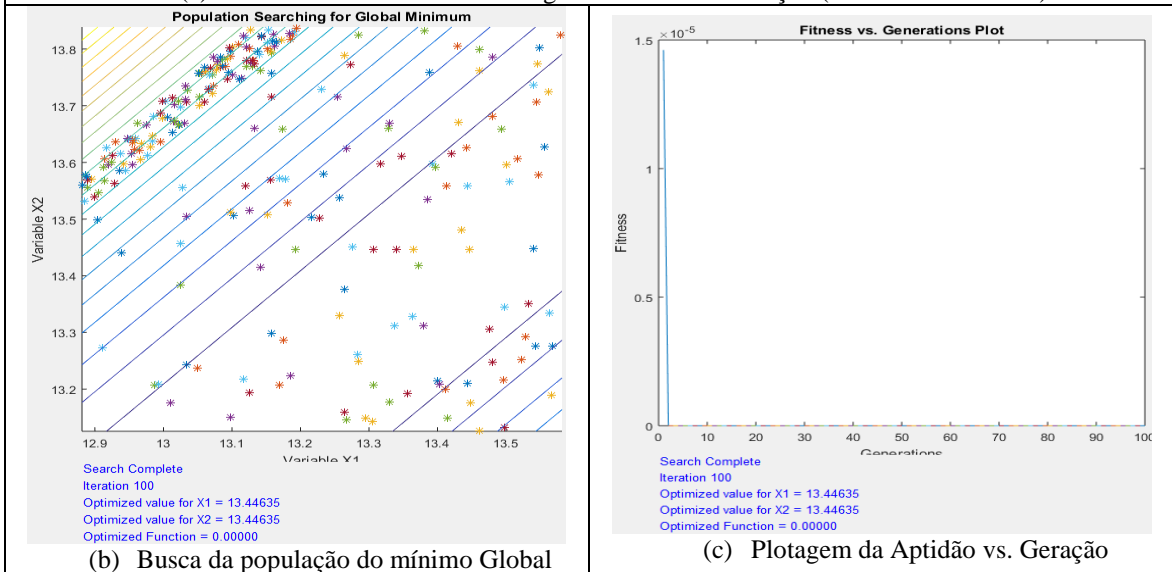
1.6.11.2 Análise Dinâmica Caso 32 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 16): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.187 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.187 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 32 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 16: Dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.15.

1.6.12 Caso 33 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 17)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 17), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.188 a seguir.

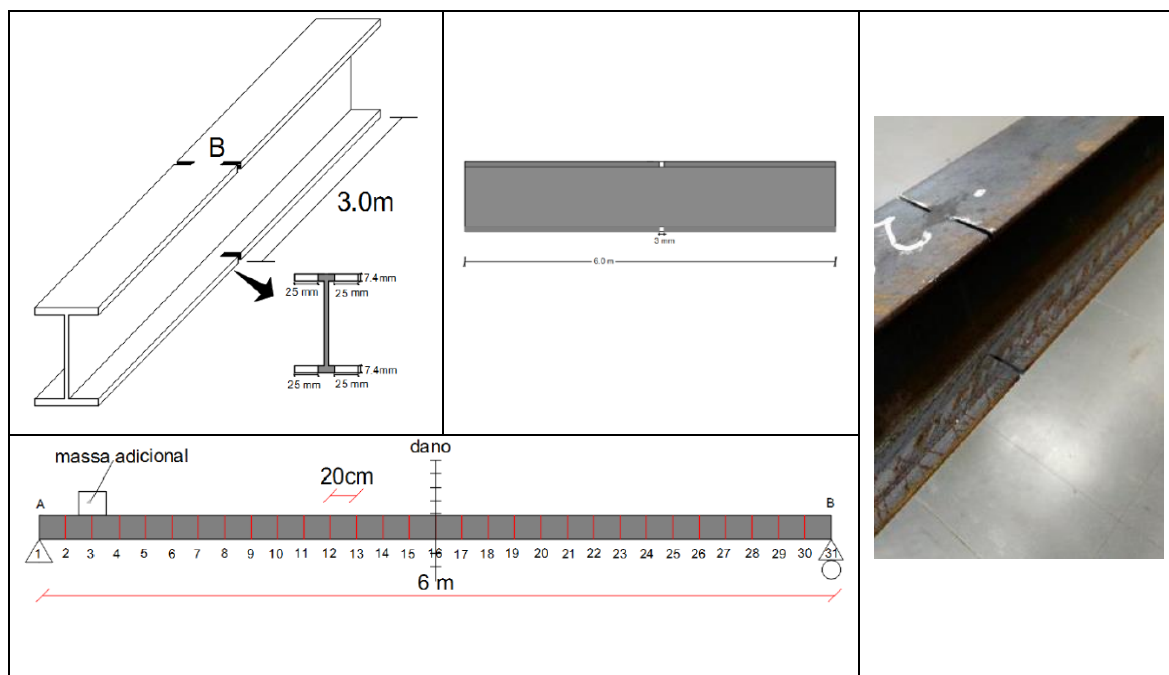


Figura A1.188 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano a 3,0 m com 1 entalhe): caso 17 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 33 são apresentadas a seguir.

1.6.12.1 Análise Dinâmica Caso 33 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 17): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 30$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_{NP} = 10 \cdot I_D \rightarrow I_{NP} = 300$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 33, apresentada na Figura A1.189, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

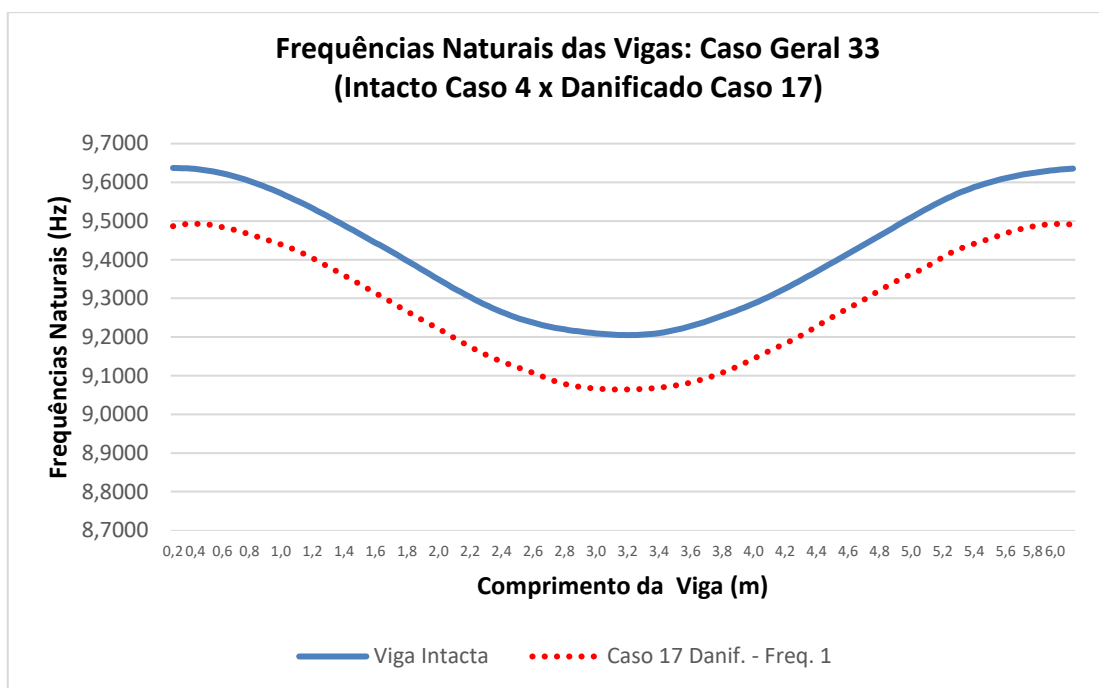
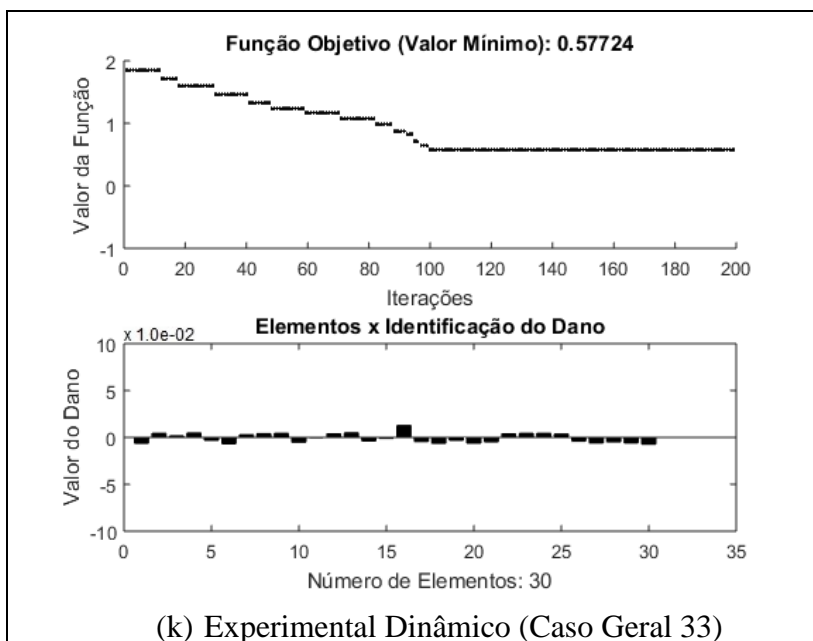


Figura A1.189 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 33

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidos utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.190 é mostrado o resultado da solução do problema.



(k) Experimental Dinâmico (Caso Geral 33)

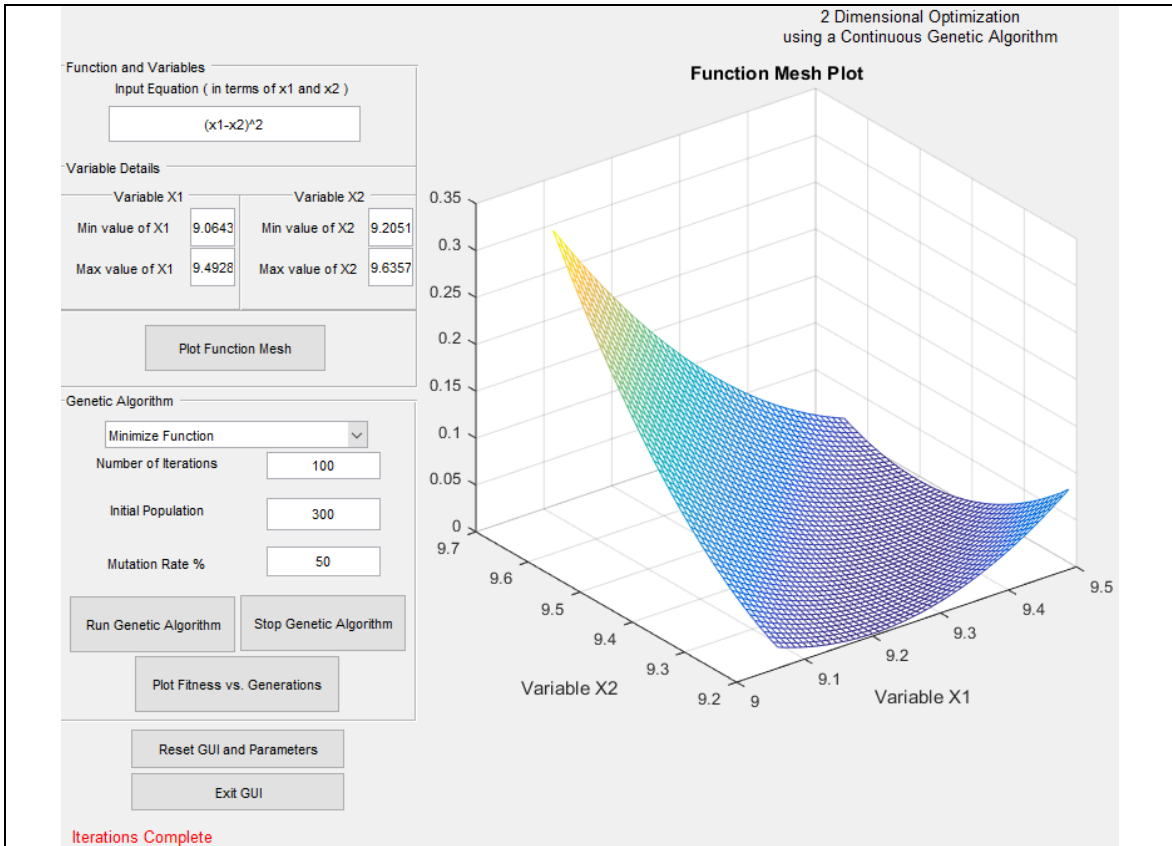
Figura A1.190 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 33 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 17: Dano a 3,0 m com 1 entalhe)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.16.

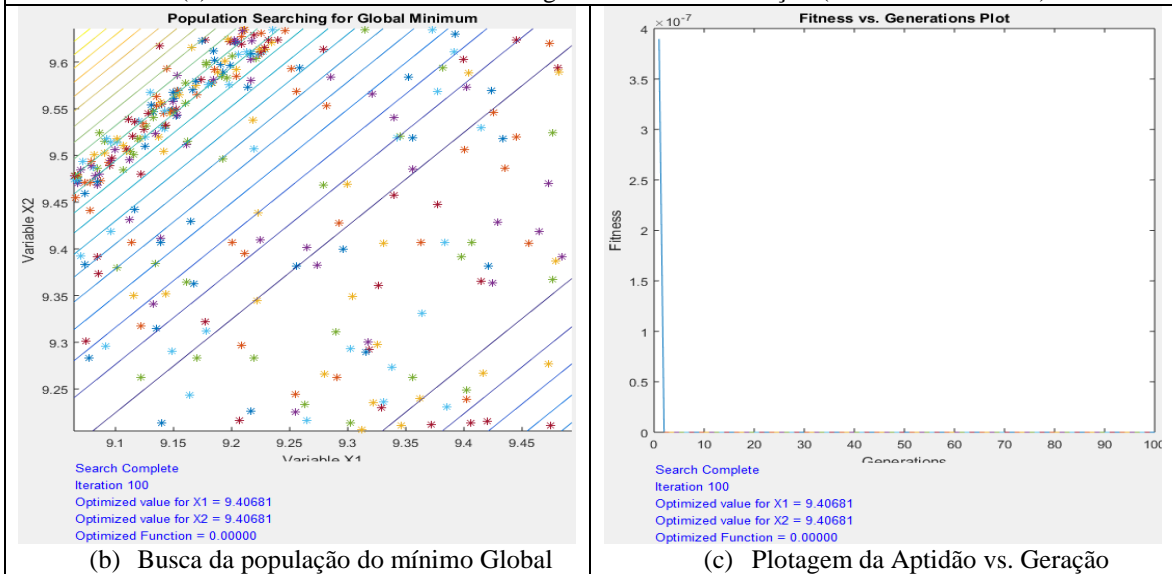
1.6.12.2 Análise Dinâmica Caso 33 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 17): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.191 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.191 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 33 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 17: Dano a 3,0 m com 1 entalhe)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.17.

1.6.13 Caso 34 - Análise Numérica e Experimental Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada (caso 18)

Para a viga metálica biapoiada danificada (caso 18), para a análise dinâmica, pode ser observada na Figura A1.192 a seguir.

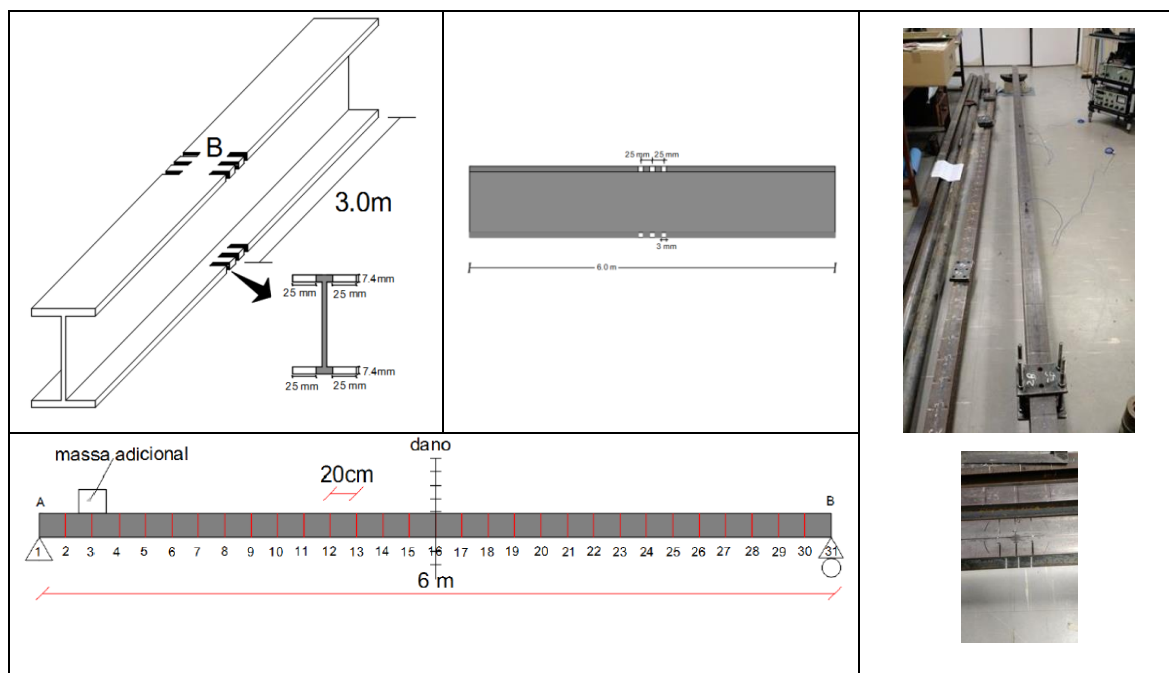


Figura A1.192 - Viga Metálica Biapoiada Danificada (dano a 3,0 m com 3 entalhes): caso 18 (Palechor, 2018)

As análises de otimização de cada método para o caso 34 são apresentadas a seguir.

1.6.13.1 Análise Dinâmica Caso 34 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 18): Evolução Diferencial (ED)

A ferramenta otimizadora utilizada foi desenvolvida para MATLAB[®] do Método de Evolução Diferencial em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizou-se várias tentativas para se calibrar o método, sendo que os parâmetros de entrada que melhores saídas geraram para se identificar os danos simulados com a introdução da massa móvel nas vigas em estudo foram:

- $I_D = 30$: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);
- $I_NP = 10 \cdot I_D \rightarrow I_NP = 300$: número de populações ou tamanho da i população;
- $F = 0,5$: fator de mutação, ou constante de fator de escala ou constante de ponderação (tamanho de passo da evolução diferencial);
- $F_{CR} = 0,9$: taxa de cruzamento (*crossover*) ou constante de probabilidade de cruzamento.

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes às frequências naturais para a viga do Caso Geral 34, apresentada na Figura A1.193, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6 m) e o eixo y (ordenadas) corresponde às frequências naturais da análise dinâmica.

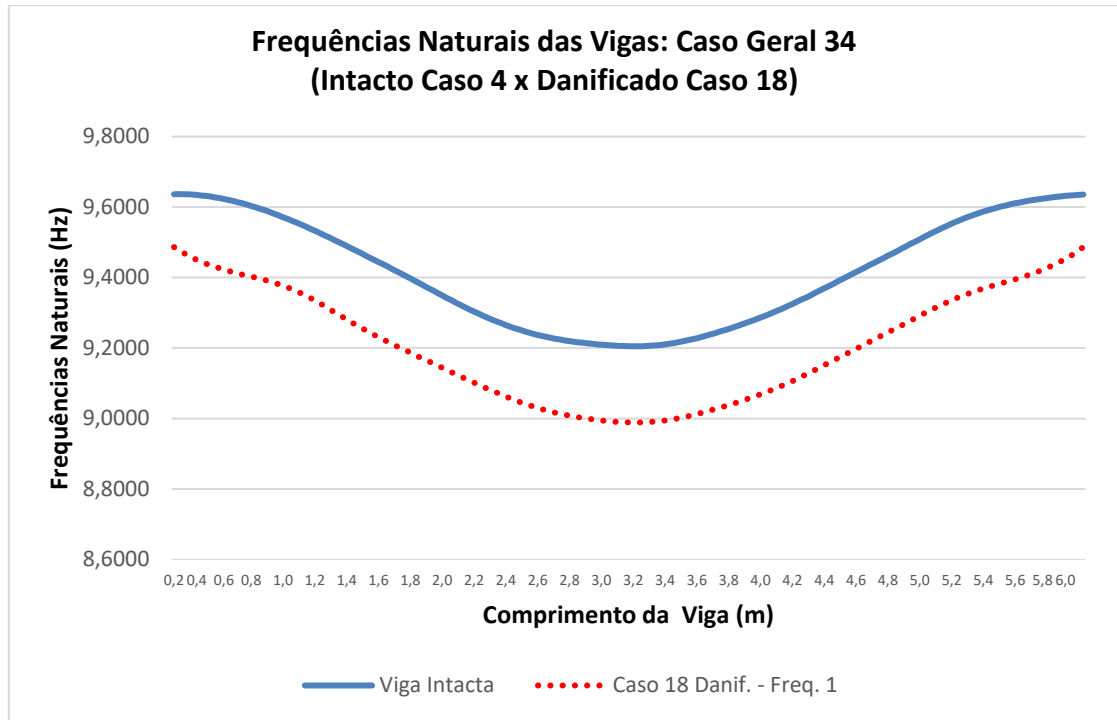


Figura A1.193 – Análises gráficas dinâmica intacta e danificada correspondente às frequências naturais para a viga do Caso Geral 34

As simulações propostas nessa abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise essencialmente experimental utilizados para identificar os elementos danificados na estrutura. Devido ao razoável tempo computacional de processamento, foram definidas utilizações de 100 iterações para essa análise experimental. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura A1.194 é mostrado o resultado da solução do problema.

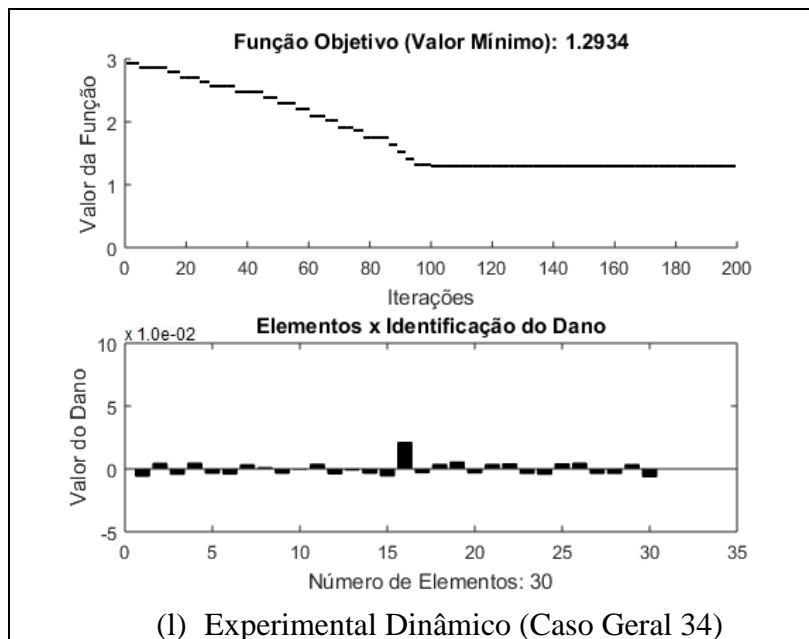


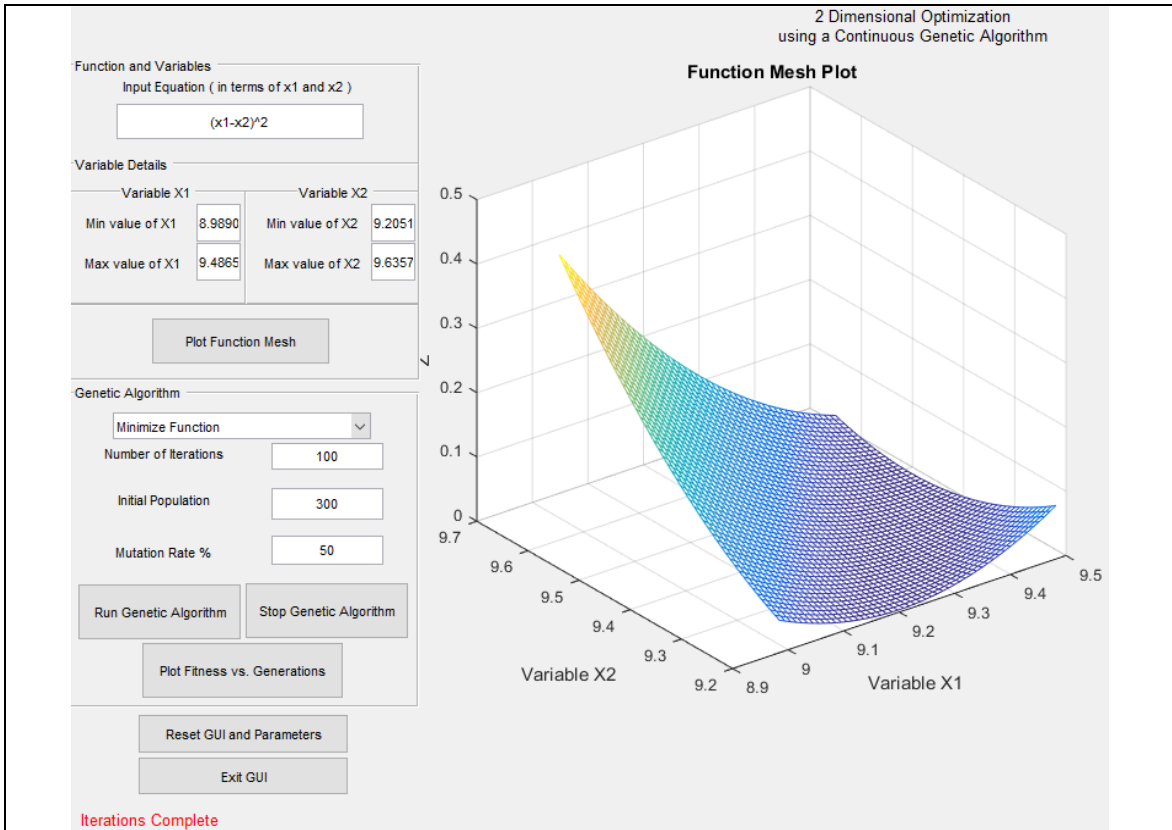
Figura A1.194 - Evolução Diferencial - ED / Identificação de dano Caso Geral 34 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 18: Dano a 3,0 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.16.

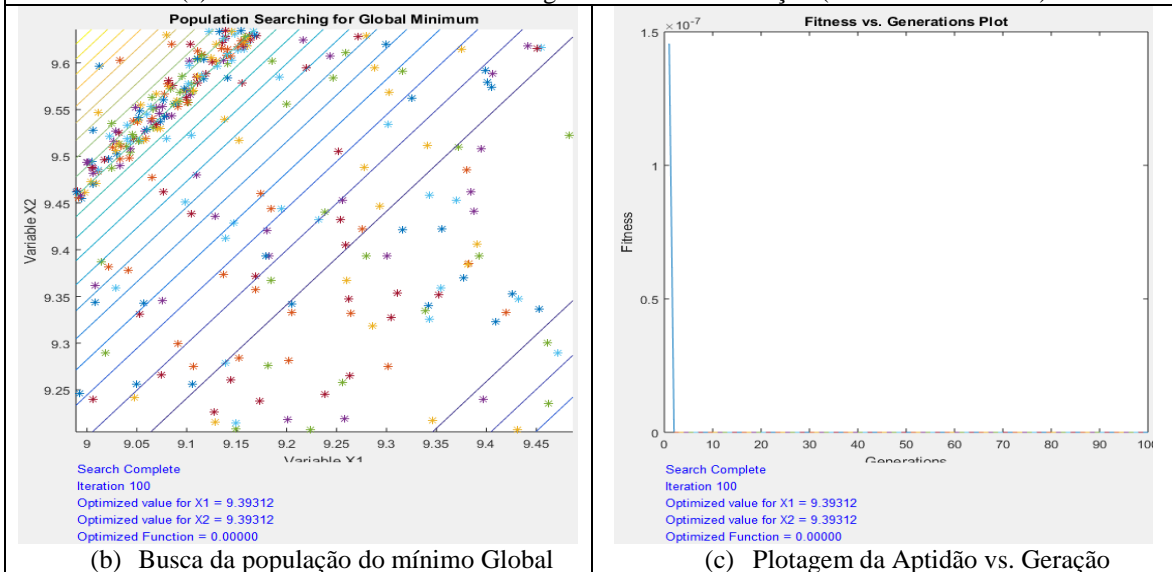
1.6.13.2 Análise Dinâmica Caso 34 Viga Metálica Biapoiada Danificada (caso 18): Algoritmos Genéticos (AG)

A aplicação do Método de Algoritmos Genéticos utilizou os mesmos parâmetros verificados com o Método de Evolução Diferencial. Nesta análise, mais uma vez apenas foram considerados os valores dinâmicos intactos e danificados dos elementos da viga.

Os parâmetros definidos são apresentados nos campos à esquerda no item (a) da Figura A1.195 e discutidos nas considerações finais do método bem como os resultados demonstrados da solução do problema.



(a) Parâmetros Utilizados e Plotagem da Malha da Função (Function Mesh Plot)



(b) Busca da população do mínimo Global

(c) Plotagem da Aptidão vs. Geração

Figura A1.195 – Algoritmo Genético - AG (Hashem, 2020) / Identificação de dano Caso Geral 34 (100 iterações): Viga Biapoiada Metálica (Caso de Referência 18: Dano a 3,0 m com 3 entalhes)

As análises dos resultados obtidos nesse caso serão discutidas no item 1.6.17.

1.6.14 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31 e 32 - Análise Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.31 a seguir.

Tabela A1.31 - Análise Resumo ED: Vigas de 5 m Metálicas Biapoiadas
Casos 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31 e 32 - Análise Dinâmica

Item Caso Geral	Freq. Nat.	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
23		1		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 1 entalhe	100 ^a	8 e 23	≅ 1.837% e ≅ 3.828%	0.76517
24		2		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	≅ 1.837% e ≅ 4.593%	0.54091
25		3	ED / Experim.	a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	≅ 1.837% e ≅ 5.359%	0.59052
28	1 ^a Frequência	12	Dinâmico / Massa Móvel: 3,266 kg	a 1,5 m: 1 entalhe	100 ^a	13	≅ 1.225%	1.0944
29		13		a 1,5 m: 2 entalhes	100 ^a	13	≅ 2.450%	0.9829
30		14		a 1,5 m: 3 entalhes	100 ^a	14	≅ 2.674%	1.4658
31		15		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	≅ 1.837% e ≅ 1.531%	3.1931
32		16		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	≅ 1.837% e ≅ 3.062%	1.7364

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, em que foram encontrados 2 picos de danos nos casos gerais 23, 24, 25, além dos casos 31 e 32, todos com o primeiro pico de dano no elemento 8 de aproximadamente 1,837% e o segundo pico no elemento 24 crescendo o percentual de dano entre 1,531% até 5,359%. Verificou-se nesses casos com 2 picos de danos uma certa dificuldade de convergência até se alcançar as 100 iterações verificadas, todos com algumas perturbações para os demais elementos.

Já os valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração, para um único pico de dano com os casos gerais 28 (dano de 1,225%) e 29 (dano de 2,450%),

no elemento 13 e o caso geral 30 (dano de 2,674%) no elemento 14, com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, além de mais algumas pequenas perturbações para os demais elementos, principalmente nas proximidades dos apoios.

Nas proximidades dos pontos de danos houve algumas distorções provavelmente por causa da perturbação causada, onde para uma adequação mais realista ao modelo, poderia se utilizar de um número maior de iterações.

As análises de identificação de dano nesse exemplo da Evolução Diferencial com a viga de 5 metros de comprimento, se restringiram às frequências naturais obtidas nas análises experimentais intactas e danificadas, mas como foi relatado anteriormente, utilizou-se novamente um número maior de iterações que possibilitaram uma diminuição nos resíduos gerados, mesmo onde houvesse grandes diferenças de frequências naturais, presença de cargas pontuais, proximidades dos apoios ou mesmo nas proximidades das regiões danificadas, apesar disso os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto. Enfatiza-se aí que o aumento do número de iterações, em alguns casos, auxilia na resolução do problema de aproximação de mínimo local.

Com as análises dessas vigas, pode-se afirmar também que um número maior de informações de frequências naturais também auxiliariam no trabalho do otimizador. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer das estruturas em estudo.

1.6.15 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31 e 32 - Análise Dinâmica: Viga de 5 m Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.32 a seguir.

Tabela A1.32 - Análise Resumo AG: Vigas de 5 m Metálicas Biapoiadas
Casos 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31 e 32 - Análise Dinâmica

Item Caso Geral	Freq. Nat.	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
23		1		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 1 entalhe	100 ^a	8 e 23	$\cong 3.2e-04\%$ ^e $\cong 3.2e-04\%$ Correto: $\cong 1.837\%$ ^e $\cong 3.828\%$	13.41740
24		2		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	$\cong 1.05e-04\%$ ^e $\cong 1.05e-04\%$ Correto: $\cong 1.837\%$ ^e $\cong 4.593\%$	13.47200
25		3	AG / Experim.	a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	$\cong 2.35e-03\%$ ^e $\cong 2.35e-03\%$ Correto: $\cong 1.837\%$ ^e $\cong 5.359\%$	13.33373
28	1 ^a Frequência	12	Dinâmico / Massa Móvel: 3,266 kg	a 1,5 m: 1 entalhe	100 ^a	13	$\cong 1.02e-03\%$ Correto: $\cong 1.225\%$	13.66046
29		13		a 1,5 m: 2 entalhes	100 ^a	13	$\cong 5.5e-05\%$ Correto: $\cong 2.450\%$	13.49840
30		14		a 1,5 m: 3 entalhes	100 ^a	14	$\cong 4.1e-05\%$ Correto: $\cong 2.674\%$	13.24690
31		15		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	$\cong 1.35e-04\%$ ^e $\cong 1.35e-04\%$ Correto: $\cong 1.837\%$ ^e $\cong 1.531\%$	13.36308
32		16		a 1,5 m: 3 entalhes / a 4,5 m: 2 entalhes	100 ^a	8 e 23	$\cong 1.45e-03\%$ ^e $\cong 1.45e-03\%$ Correto: $\cong 1.837\%$ ^e $\cong 3.062\%$	13.44635

Com esses casos da viga de 5 metros agora com os valores mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises da ED, com análises também na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos não estão em conformidade ao problema proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, principalmente para os casos com 2 picos de danos, encontrando-se dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global. Nos casos com um único pico

de dano somente o caso geral 28 demonstrou proximidades em relação ao percentual de dano no elemento 13.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.33 resumo a seguir.

Tabela A1.33 - Mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificados

Valores das Variáveis	Intacto	Caso Geral 23 Ref. 1	Caso Geral 24 Ref. 2	Caso Geral 25 Ref. 3	Caso Geral 28 Ref. 12	Caso Geral 29 Ref. 13	Caso Geral 30 Ref. 14	Caso Geral 31 Ref. 15	Caso Geral 32 Ref. 16
max/>	13,8387072	13,6601525	13,7035957	13,7048040	13,7048040	13,7035957	13,6601525	13,4579874	13,5817213
min/<	13,1256981	12,9587547	13,0023153	12,9819535	12,9819535	13,0023153	12,9587547	12,7689630	12,8811302

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG, podendo os casos com 2 elementos danificados exigir ainda grandezas maiores.

1.6.16 Considerações dos Resultados com o Método de Evolução Diferencial (ED) sobre os casos 26, 27, 33 e 34 - Análise Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela A1.34 a seguir.

Tabela A1.34 – Análise Resumo ED: Vigas de 6 m Metálicas Biapoiadas
Casos 26, 27, 33 e 34 - Análise Dinâmica

Item Caso Geral	Freq. Nat.	Viga (Caso Ref.)	Método/ Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
26		9	ED / Experim.	a 5,0 m: 2 entalhes / a 5,6 m: 3 entalhes	100 ^a	25 e 27	$\cong 1.531\%$ e $\cong 2.297\%$	0.12001
27	1 ^a Frequência	10	Dinâmico / Massa	a 5,0 m: 3 entalhes / a 5,6 m: 3 entalhes	100 ^a	25 e 27	$\cong 2.297\%$	0.19091
33		17	Móvel: 3,266 kg	a 3,0 m: 1 entalhe	100 ^a	16	$\cong 0.766\%$	0.57724
34		18		a 3,0 m: 3 entalhes	100 ^a	16	$\cong 2.297\%$	1.2934

Já agora as considerações finais para a viga de 6 metros na análise com a ED com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se no caso geral 26 danos de aproximadamente 1,531% e 2,297% nos

elementos 25 e 27, além de danos iguais de aproximadamente 2,297% nesses mesmos elementos para o caso geral 27. Já para as análises com a viga dos casos gerais 33 (dano de aproximadamente 0,766%) e 34 (dano de aproximadamente 2,297%), nos casos de dano único no elemento 16, com percentuais de danos crescentes de um caso em relação ao outro.

Algumas pequenas perturbações nas proximidades dos pontos de danos foram encontradas provavelmente por causa da perturbação causada, onde para uma adequação mais realista ao modelo, poderia se utilizar de um número maior de iterações.

Com as análises dessas vigas de 6 metros, pode-se afirmar também que um número maior de informações dinâmicas também auxiliariam no trabalho do otimizador. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer das estruturas em estudo.

1.6.17 Considerações dos Resultados com o Método de Algoritmos Genéticos (AG) sobre os casos 26, 27, 33 e 34 - Análise Dinâmica: Viga de 6 m Metálica Biapoiada

Por fim, verifica-se o resumo dos resultados para a viga de 6 metros obtidos nas análises do Método de AG na Tabela A1.35 a seguir.

Tabela A1.35 - Tabela Resumo AG: Vigas de 6 m Metálicas Biapoiadas
Casos 26, 27, 33 e 34 - Análise Dinâmica

Item Caso Geral	Freq. Nat.	Viga (Caso Ref.)	Análises	Caso de Dano A Partir do Engaste	Iterações	Posição dos Elementos Danificados	% de Dano	Mínimo Função Objetivo
26		9	AG / Experim.	a 5,0 m: 2 entalhes / a 5,6 m: 3 entalhes	100 ^a	25 e 27	$\cong 1.12e-04\%$ ^e $\cong 1.12e-04\%$ Correto: $\cong 1.531\%$ ^e $\cong 2.297\%$	9.37091
27	1 ^a Frequência	10	Dinâmico / Massa	a 5,0 m: 3 entalhes / a 5,6 m: 3 entalhes	100 ^a	25 e 27	$\cong 1.58e-04\%$ Correto: $\cong 2.297\%$	9.31381
33		17	Móvel: 3,266 kg	a 3,0 m: 1 entalhe	100 ^a	16	$\cong 3.8e-05\%$ Correto: $\cong 0.766\%$	9.40681
34		18		a 3,0 m: 3 entalhes	100 ^a	16	$\cong 1.45e-05\%$ Correto: $\cong 2.297\%$	9.39312

Com esses valores finais dos resultados com as análises do AG em que os mínimos das funções objetivos, equiparadas com as análises da ED, também na centésima iteração e com os valores de danos dos elementos que não estão em conformidade ao problema

proposto conforme observado na grandeza do pico da plotagem da “Aptidão vs. Geração”, encontrando-se algumas perturbações e dificuldades de convergência na busca da população para o mínimo global.

Ressalta-se que foram utilizados os mínimos e máximos valores dinâmicos intacto e danificado como as variáveis x_1 e x_2 solicitados em Hashem (2020) conforme pode ser observado na Tabela A1.36 resumo a seguir.

Tabela A1.36 - Menores e maiores valores dinâmicos intactos e danificados

Valores das Variáveis	Intacto Caso Ref. 4	Caso Geral 26 Caso Ref. 9	Caso Geral 27 Caso Ref. 10	Caso Geral 33 Caso Ref. 17	Caso Geral 34 Caso Ref. 18
max/>	9,6357201	9,5707452	9,5470500	9,4928465	9,4865562
min/<	9,2051251	9,1420604	9,1246803	9,0643336	8,9890428

Um número maior de iterações poderiam ser a solução da busca da convergência utilizando o método de AG.

ANEXO 2. MÉTODOS ESTOCÁSTICOS

Alguns outros Métodos Estocásticos também foram abordados em termos de características gerais a seguir, tais como o Método do Recozimento Simulado, Método de Otimização Extrema Generalizada, Método de Colônia de Formigas, Método de Redes Neurais Artificiais, Método do Enxame de Partículas, Método de Busca Tabu, Método GRASP.

2.1 MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO - RS (*SIMULATED ANNEALING, SA*)

O Método do Recozimento Simulado - RS (*Simulated Annealing, SA*) teve sua origem na analogia entre o processo físico do resfriamento de um metal em estados de fusão. Consiste em primeiro “fundir” o sistema a ser otimizado a uma temperatura elevada e depois em reduzir a temperatura até que o sistema “congele” e não ocorra nenhuma melhora no valor da função objetivo. Em processos metalúrgicos, os materiais atingem estágios ideais de resistência ao sofrer um processo gradual de resfriamento. Esse método não será utilizado nas análises dessa pesquisa.

O método foi proposto por Kirckpatrick *et al.* (1983) e Černý (1985). O algoritmo SA utiliza o critério de Metropolis para simular o equilíbrio térmico (Aarts e Korst, 1989).

Possui a característica de aceitar soluções com piora do valor da função objetivo, com uma probabilidade decrescente ao longo das iterações, buscando escapar de ótimos locais, a Tabela B2.1 do trabalho de Dowsland (1995 – p.23) mostra as características desses comportamentos.

Tabela B2.1 – Analogia entre o sistema físico e o problema de otimização

Simulação termodinâmica	Otimização
Estados do sistema	Soluções viáveis
Energia	Custo
Mudança de estado	Estrutura de vizinhança
Temperatura	Parâmetro de controle
Estado congelado	Solução heurística

O SA é baseado em uma analogia com o processo físico de processos de resfriamento. A existência de uma distribuição estacionária para o SA é equivalente à existência da distribuição de Boltzmann ao equilíbrio térmico em física estatística.

Tem sua fundamentação teórica nas cadeias de Markov, sendo possível demonstrar matematicamente a convergência assintótica do algoritmo SA para o conjunto de soluções ótimas globais (Aarts e Korst, 1989).

Para problemas de otimização combinatória de grande porte, a convergência para o ótimo global não pode ser obtida em tempo computacional admissível. Os parâmetros Método do Recozimento Simulado são os parâmetros de um SA padrão, a temperatura inicial, o número de iterações ou limite de tempo de processamento e o fator de redução de temperatura.

Um exemplo de processo de recozimento com a estrutura cristalina do material antes e depois pode ser verificada na Figura B2.1 a seguir.

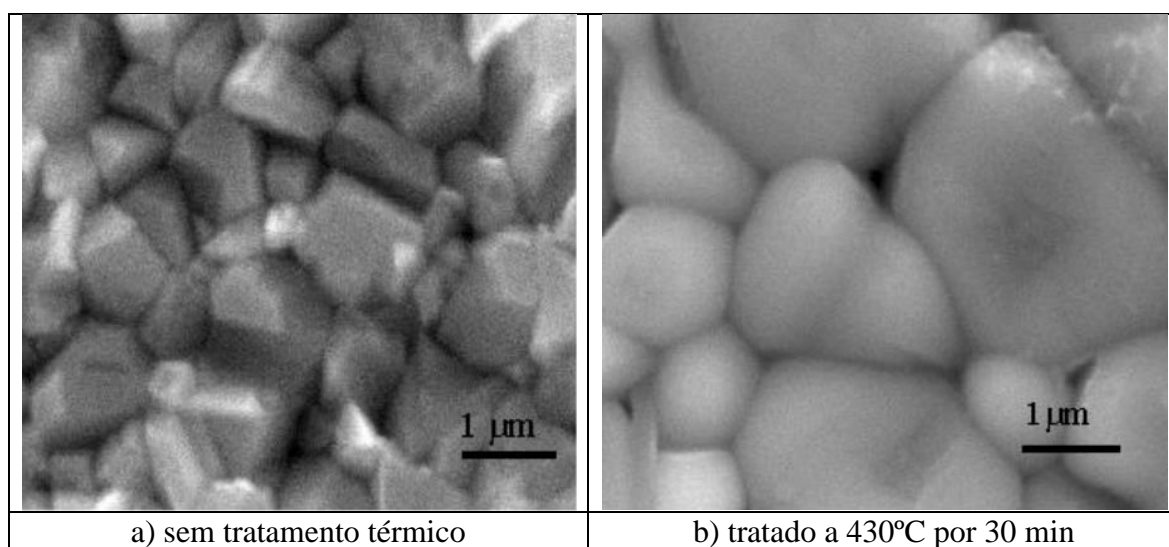


Figura B2.1 - Morfologia de um filme de CdTe depositado pela técnica CSS (Cruz *et al.*, 1999)

O algoritmo SA é de fácil implementação computacional, possuindo uma baixa dependência de parâmetros, que demanda algum mecanismo para o controle de soluções repetidas. O mecanismo de aceitação de soluções de piora com uma probabilidade decrescente é um mecanismo poderosíssimo e deve ser agregado em outras meta-heurísticas. Algoritmos de busca local devem ser incorporados ao SA padrão.

2.2 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO EXTREMA GENERALIZADA - OEG (GENERALIZED EXTREMAL OPTIMIZATION, GEO)

O Método de Otimização Extrema Generalizada - OEG (*Generalized Extremal Optimization*, GEO), segundo De Sousa (2002) é um algoritmo voltado preferencialmente para atacar problemas de otimização com um espaço de busca complexo, não convexo,

disjunto, com múltiplos mínimos e não linearidade na função objetivo e nas restrições. Pode ser aplicado a problemas com qualquer tipo de variável, sejam elas contínuas, inteiras ou discretas. Esse método não será utilizado nas análises dessa pesquisa.

Anteriormente ao método GEO, havia o método da Otimização Extrema – OE (*Extrema Optimization* – EO) que foi criado com o intuito de ser uma meta-heurística que pudesse ser aplicada a uma grande classe de problemas, mas segundo Boettcher e Percus (2001), pela maneira como foi implementado para um dado problema é específico a uma maneira geral de tratar a classificação das variáveis do problema que serão alteradas ao longo de uma busca pelo ótimo, podendo se mostrar ambígua, ou mesmo impossível.

Para resolver esse problema, De Sousa (2002) propôs um algoritmo que generaliza o método da otimização extrema, denominado de Otimização Extrema Generalizada. Esse método possibilita a implementação do EO independente do tipo de problema atacado, pois parte do pressuposto de que a probabilidade da variável selecionada poder sofrer mutação.

Foram Boettcher e Percus (2001) os propositores do método da Otimização Extrema – OE (*Extremal Optimization* – EO), que foi desenvolvido para mostrar evidências da presença de Criticalidade Auto-Organizada – CAO (*Self-Organized Criticality* - SOC) em ecossistemas naturais (Bak e Sneppen, 1993).

Neste algoritmo GEO foi introduzido a capacidade de auto-reinicialização da configuração corrente durante a busca. Esta funcionalidade permite ao algoritmo monitorar, ao longo da busca, o decaimento do valor da função objetivo (consideram-se aqui problemas de minimização, sem perda de generalidade). Se em algum momento este decaimento estagnar, a auto-reinicialização entra em ação, sorteando um novo ponto no espaço das variáveis de projeto a partir do qual a busca continuará (Galski, 2006).

2.3 MÉTODO DA COLÔNIA DE FORMIGAS – CF (*ANT COLONY OPTIMIZATION, ACO*)

O Método da Colônia de Formigas – CF (*Ant Colony Optimization, ACO*) utiliza o conhecimento do comportamento das formigas, com o uso de feromônio e sua otimização de caminhos, em uma busca pelo ótimo global. Segundo Dorigo e Stützle (2004), colônias de insetos sociais são sistemas distribuídos os quais, apesar da simplicidade dos seus indivíduos, apresentam uma organização social altamente estruturada. Esse método não será utilizado nas análises dessa pesquisa.

Esse nível de organização implica que tais colônias possam desempenhar tarefas com um alto grau de complexidade, o que tem como consequência, indivíduos que não conseguiriam desempenhar individualmente essas tarefas.

Envolvem processos de competição versus cooperação e tem nomenclaturas com diversas variações (Ant Systems, Ant-Q, AntColony Systems, Max Min Ant Systems, etc).

Para Dorigo *et al.* (1996), o algoritmo não simula o comportamento das formigas, mas usa formigas artificiais como uma ferramenta de otimização, apresentando as seguintes principais diferenças em relação às formigas reais: formigas artificiais apresentam alguma memória, elas não são completamente cegas e elas vivem em um ambiente no qual o tempo é discreto. A experiência da ponte dupla de tamanhos distintos apresentadas na Figura B2.2 pode exemplificar alguns desses comportamentos.

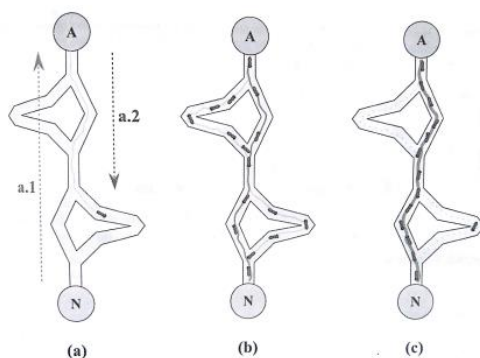


Figura B2.2 – Comportamento das Formigas: Experiência da ponte dupla de tamanhos distintos (Golliat *et al.*, 2012 – p. 89)

Alguns conceitos básicos das características auto-organizadas, são apresentadas por Dréo *et al.* (2006), são elas: estigmergia – forma de comunicação por meio de modificações no ambiente; controle descentralizado – cada indivíduo possui uma visão limitada do ambiente e não conhece o problema como um todo; e a heterarquia densa - não há controle centralizado vertical.

Como partes principais de um ACO tem-se: inicialização dos parâmetros, geração matriz de feromônio inicial, elaboração de uma heurística construtiva para a resolução do problema, geração de uma população de formigas de forma construtiva e a atualização da matriz de feromônio.

Em termos gerais, a meta-heurística colônia de formigas é uma técnica robusta para resolução de problemas de otimização complexos que baseia-se na simulação de formigas inteligentes, as quais diferem-se das formigas tradicionais. Gerando-se uma população de

soluções de forma construtiva, através do compartilhamento de informação entre si. A sinergia entre as formigas leva a resultados superiores do que se as formigas trabalhassem isoladamente. Como ressalva, apresenta muitos parâmetros para serem ajustados.

2.4 MÉTODO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS – RNA (*ARTIFICIAL NEURAL NETWORK, ANN*)

O Método de Redes Neurais Artificiais - RNA (*Artificial Neural Network, ANN*) é em si um método avançado de regressão não linear baseado no comportamento do cérebro humano. McCulloch e Pitts em 1943, foram os propositores do primeiro modelo de neurônio artificial, chamado de MCP e mais conhecido por Neurônio Booleano. Esse método não será utilizado nas análises dessa pesquisa.

Segundo Haykin (2001), o aprendizado de uma rede neural é um processo pelo qual os parâmetros livres da mesma são adaptados pelo processo de estimulação no ambiente onde a rede está inserida.

Ainda em Haykin (2001), é citado que as RNAs diferenciam-se pela sua arquitetura e pela forma como os pesos associados às conexões são ajustados durante o processo de aprendizado. A arquitetura de uma rede neural restringe o tipo de problema no qual a rede poderá ser utilizada e é definida pelo número de camadas (camada única ou múltiplas camadas), pelo número de nós em cada camada, pelo tipo de conexão entre os nós (*feedforward* ou *feedback*) e por sua topologia.

Haykin (1998) apresenta esse exemplo de rede *feedforward* (“alimentadas adiante”), conforme Figura B2.3 a seguir, onde os sinais são transmitidos somente na direção da entrada para a saída. Esta é a forma mais simples de se implementar uma rede em camadas, na qual a rede possui uma camada de entrada de nós que se conectam aos neurônios (nós computacionais) da camada de saída.

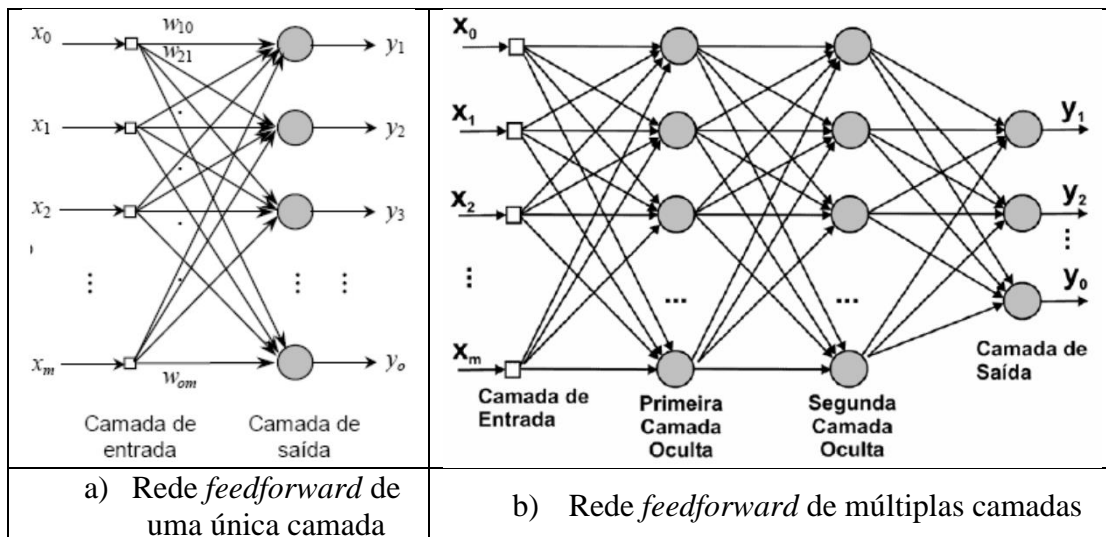


Figura B2.3 – Exemplos de rede *feedforward* (Haykin, 1998)

Em termos de vantagens e características as Redes Neurais Artificiais (RNA) se baseiam na estrutura do sistema nervoso humano, principalmente o cérebro. As RNAs têm a capacidade de aprender através de uma fase chamada fase de aprendizagem. Trata-se de fornecer dados como entrada RNA, por sua vez, informando qual é a saída (resposta) que é esperada.

A auto-organização de uma RNA cria sua própria representação de informação no seu interior, descarregando ao usuário isto. No que diz respeito à tolerância a falhas, uma RNA armazena informações de forma redundante, pode continuar a responder de uma forma aceitável, mesmo que esteja parcialmente danificada. Em se tratando de flexibilidade, uma rede neural pode lidar com grandes mudanças na informação de entrada, tais como sinais ruidosos ou outras alterações na entrada (por exemplo, se a informação de entrada é a imagem de um objeto, a correspondente resposta mantém-se inalterada, mesmo se a imagem muda um pouco de brilho ou o objeto muda um pouco de formato). Em termos de estrutura de uma RNA, que é paralela, possibilitando sua implementação com computadores ou dispositivos eletrônicos especiais, podendo obter respostas em tempo real (*Real Time*).

2.5 MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS – EP (*PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, PSO*)

O Método do Enxame de Partículas - EP (*Particle Swarm Optimization, PSO*) é inspirado no comportamento colaborativo de grupo de populações biológicas, pode ser feita por meio da otimização de funções não-lineares contínuas. Esse método não será utilizado nas análises dessa pesquisa.

Mas em linhas gerais, os algoritmos evolucionários preconizam a simulação de princípios relacionados à teoria de evolução das espécies, utilizando processos de recombinação de soluções, com vistas a efetuar uma busca inteligente no espaço de soluções viáveis.

Cientistas das áreas de computação e zoologia, na década de 90, debruçavam-se sob o estudo do comportamento psicológico e social de determinadas espécies. Tais pesquisadores estavam fascinados com as interações que bandos de aves e cardumes de peixes realizavam em suas atividades cotidianas. Tais grupos de animais, ao procurarem por comida ou ao fugirem de predadores, possuem um tipo de consciência coletiva. Cada elemento do grupo aprende com o comportamento dos seus demais componentes. Tendo em vista esse comportamento, diversos pesquisadores buscaram simular esses tipos de interação por intermédio de computadores.

Uma nova meta-heurística destinada à resolução de problemas irrestritos de otimização não-linear denominada *Particle Swarm Optimization* (PSO) foi proposta por Kennedy e Ebehart (1995a).

A Figura B2.4 a seguir demonstra um desses comportamentos de enxames.

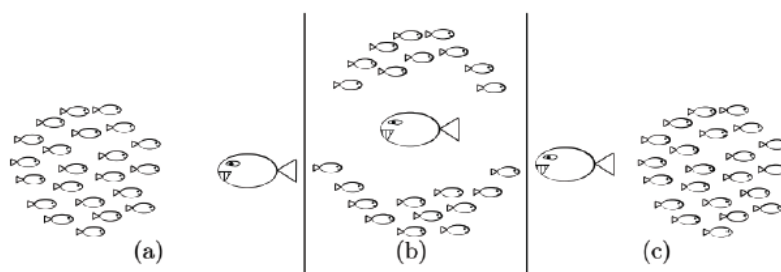


Figura B2.4 – Um cardume de peixes evitando um predador (Dréo *et al.*, 2006 – p. 163)

Segundo Dréo *et al.* (2006), cada partícula é caracterizada por sua aptidão, sua posição e por um vetor (velocidade) que regula a mudança de posições. Gera-se uma população inicial de partículas (soluções), cada qual numa posição inicial do espaço de busca e dotada de uma velocidade inicial. Cada partícula percorrerá o espaço de busca e terá sua velocidade atualizada de acordo com a velocidade das demais partículas. Partículas que estiverem distantes das regiões promissoras do espaço de busca terão sua velocidade incrementada, enquanto partículas que estiverem próximas das regiões promissoras do espaço de busca terão sua velocidade moderada.

Em Kennedy e Ebehart (1995a, 1995b), são listadas como vantagens do PSO a fácil implementação computacional, a utilização de pouca memória e requer pouca velocidade de processamento e o processo de busca é racionalizado pelo contínuo aprendizado das partículas.

Após os promissores resultados advindos da aplicação de PSO em problemas de programação não-linear, foram iniciados diversos estudos que objetivavam avaliar o desempenho da meta-heurística supramencionada em problemas de otimização discreta e combinatória.

Em termos de considerações finais, a meta-heurística PSO é uma técnica promissora para resolução de problemas de otimização complexos que baseia-se nos conceitos da inteligência de enxame (*swarm intelligence*), trabalhando com uma população de soluções. Trabalha, de uma forma extremamente simples, os paralelismos explícito e implícito. Apresenta uma fácil implementação computacional e uma baixa dependência de parâmetros. Por trabalhar com uma população de soluções, consiste em uma abordagem robusta para problemas de otimização multiobjetivo.

2.6 MÉTODO DE BUSCA TABU - BT (*TABU SEARCH, TS*)

O Método de Busca Tabu - BT (*Tabu Search, TS*) é uma técnica para guiar uma busca local usando estruturas de memória (Souza, 2012). Esse método não será utilizado nas análises dessa pesquisa.

Pode ser verificado um conjunto discreto de soluções viáveis que cresce exponencialmente com o tamanho do problema em problemas de otimização combinatória com algoritmos que tem componentes de aleatoriedade. A ocorrência de soluções repetidas pode representar uma parcela significativa das soluções visitadas. Nesse sentido, a incorporação de mecanismos de controle sobre as soluções geradas é de grande importância.

O termo “Tabu” remete à proibição de uma prática e esse método TS foi proposto paralelamente por Glover e Hansen (1986) em que parte de uma solução inicial e efetua, por meio de movimentos, uma busca em uma determinada vizinhança. Essencialmente se baseia na concepção de uma lista de movimentos proibidos, onde tal proibição inibirá a obtenção de soluções repetidas e conduzirá a busca para regiões promissoras do espaço de soluções. A Figura B2.5 a seguir mostra alguns exemplos para se realizar uma TS.

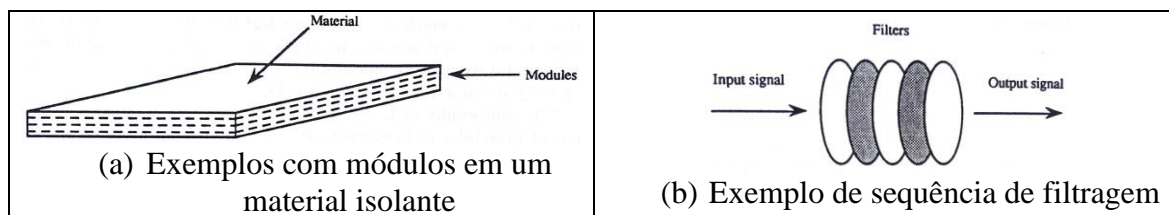


Figura B2.5 – Exemplos para realização de uma TS (Glover e Laguna, 1995 – p. 72 e 73)

Segundo Glover e Laguna (1997), a estrutura de memória do TS atua sobre quatro principais dimensões: a qualidade com a habilidade de diferenciar o mérito de soluções visitadas ao longo do processo de busca, a influência que envolve a consideração dos impactos das decisões tomadas ao longo do processo de busca, a frequência com a memória de curto prazo e com a memória de longo prazo.

Em Souza (2012), cita-se que um algoritmo TS padrão compreende os seguintes componentes básicos: o critério de escolha da próxima solução vizinha; a seleção dos atributos de movimento, a memória de curto prazo para armazenar as regras de proibição (lista tabu); o número de iterações que um atributo selecionado permanecerá proibido (tamanho da lista); e por último o critério de aspiração (retirar o *status* tabu de um movimento sob certas circunstâncias).

Em termos de parâmetros de um algoritmo TS padrão pode se citar o tamanho da lista tabu, o critério de aspiração, a quantidade de soluções vizinhas avaliadas em cada iteração e o número máximo de iterações ou limite de tempo computacional.

Por tudo que foi supracitado, pode se dizer que a meta-heurística TS é uma técnica extremamente robusta para a resolução de problemas de otimização combinatória, onde o conceito de lista tabu pode permitir a exploração, de forma eficiente, de vizinhanças complexas, sendo seu desempenho sensível aos seus parâmetros, de modo que devem ser ajustados cuidadosamente. Como prática de melhoria no TS padrão estão os aspectos como lista tabu dinâmica, reconexão por caminhos e oscilação estratégica.

2.7 MÉTODO GRASP (GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURES, GRASP)

O Método de GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures Neural Network*, GRASP) é em sua essência de tradução “Procedimentos de Busca Gulosos e Adaptativos. Uma heurística construtiva é um procedimento que se destina a gerar uma solução para um problema de otimização em que a cada passo do algoritmo, diversos candidatos que podem ser escolhidos para compor a solução, o que define uma Lista de

Candidatos Restrita (que em inglês traduz-se como *Recent Candidate List* – RCL). Um algoritmo em que se é dito guloso, se escolhe, a cada passo do algoritmo, aquele candidato que tem o melhor impacto para a função de avaliação utilizada. Mas a experiência tem mostrado que algoritmos gulosos frequentemente ficam presos em ótimos locais. Esse método não será utilizado nas análises dessa pesquisa.

Em termos de vantagens, a meta-heurística GRASP é dita como pouco dependente de parâmetros, possui uma implementação computacional extremamente simples, devido ao conceito de construção gulosa aleatorizada, GRASP facilita que sejam construídas soluções viáveis, é facilmente paralelizável, uso de uma heurística construtiva aleatorizada, em conjunto com uma busca local, combina mecanismos de diversificação e intensificação.

Dois mecanismos para aprimorar a eficácia de um algoritmo guloso foram propostos por Hart e Shogan (1987), onde: um mecanismo baseado em cardinalidade, no qual os k melhores candidatos são adicionados na RCL e um mecanismo baseado em valor, no qual todas as soluções que tiverem valores melhores do que $\alpha \times$ melhor valor, devem compor a RCL, em que $\alpha \in [0,1]$.

Em Feo e Resende (1989), o conceito de construção gulosa aleatorizada foi proposta de forma paralela, o qual, seguido de um procedimento de busca local.

Segundo Resende e Ribeiro (2003), GRASP é uma meta-heurística de multi-partida composta por duas fases: uma etapa de construção, a qual objetiva gerar uma solução inicial por uma heurística construtiva gulosa aleatorizada e outra etapa de busca local, a qual prima por efetuar uma busca na vizinhança da solução inicial gerada. Estas duas etapas são repetidas por um número máximo de iterações (o qual é um parâmetro da meta-heurística), e, no final do processo, a melhor solução obtida na busca é retornada.

A busca é dita gulosa e aleatorizada devido ao parâmetro α , na qual controla a cardinalidade da RCL. Em um problema de minimização, para $\alpha=0$ tem-se uma busca aleatória, e, para $\alpha=1$ tem-se um algoritmo guloso. Os valores intermediários para o parâmetro α propiciam um *trade-off* entre aleatoriedade e gulosidade. Já a busca é dita adaptativa, pois a função para avaliação da gulosidade é atualizada a cada iteração da heurística construtiva.

Em termos de parâmetros, um algoritmo GRASP padrão possui: parâmetro α (controle da RCL) e número máximo de iterações ou limite de tempo computacional. Para a calibração do parâmetro α , Prais e Ribeiro (2000) dizem que podem ser consideradas as seguintes estratégias: uso de valor fixo, uso de valor escolhido aleatoriamente em uma

distribuição uniforme, uso de valor escolhido aleatoriamente em uma distribuição empírica e uma estratégia reativa.

Piores resultados em geral podem incorrer com o uso de um valor α fixo, que com o uso de α nessas condições, o algoritmo GRASP retarda o processo de obtenção de melhores soluções, as quais poderiam ser obtidas se outro valor de α fosse utilizado. A estratégia reativa consiste em escolher o valor de α de acordo com uma distribuição de probabilidades, a qual é atualizada dinamicamente de forma seletiva. Os valores de α que levem a melhores soluções terão uma maior probabilidade de serem escolhidos ao longo das iterações GRASP.

Como considerações finais desse método, diz-se que esse método GRASP é uma das meta-heurísticas mais robustas para resolução de problemas de otimização combinatória. A fase de construção GRASP pode ser utilizada em outras meta-heurísticas, como, por exemplo, algoritmos evolucionários. A fase de construção desse métodos desempenha papel fundamental na performance do algoritmo. Em geral, estratégias como *path relinking* (reconexão por caminhos) e estratégia reativa conduzem a melhores resultados.

APÊNDICES

APÊNDICE A. OBTENÇÃO DE RESULTADOS DOS DESLOCAMENTOS MEDIDOS - ANÁLISE EXPERIMENTAL ESTÁTICA (VR, VD1-2, VD1-4 e VD2-2)

A.1 Obtenção de Resultados: vigas experimentais

A Tabela A.1 apresenta os resultados dos deslocamentos verticais U_y (análise estática) dos programas experimentais desenvolvidos por Silva (2015), para três casos de vigas.

Tabela A.1 - Deslocamentos: análise estática – Vigas VR, VD1-2, VD1-4 e VD2-2

DADOS		ELEMENTO / CÉLULA DE CARGA (Newton)			
		VR	VD1-2	VD1-4	VD2-2
LVDT	DISTÂNCIA (m)	≈ 3000	≈ 3000	≈ 3000	≈ 3000
APOIO A	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
LVDT01	0.375	4.381250	4.6781250	4.2937500	5.5750000
LVDT02	0.75	9.046875	10.0312500	9.5218750	11.6125000
LVDT03	1.125	13.550000	15.0093750	14.1062500	17.4437500
LVDT04	1.5	17.840625	19.7000000	18.6156250	23.1437500
LVDT05	1.875	21.518750	23.4281250	22.2312500	27.2093750
LVDT06	2.25	24.059375	26.3812500	25.0250000	30.2937500
LVDT07	2.625	25.812500	28.4375000	27.0343750	32.6500000
LVDT08	3	26.003125	28.4968750	27.2343750	32.7906250
LVDT09	3.375	25.793750	28.3093750	27.0593750	32.6281250
LVDT10	3.75	24.428125	26.5906250	25.7468750	30.4687500
LVDT11	4.125	21.740625	23.6687500	22.7312500	27.0250000
LVDT12	4.5	18.312500	19.8437500	19.3500000	22.5656250
LVDT13	4.875	14.296875	15.2343750	15.0937500	17.3500000
LVDT14	5.25	9.818750	10.4062500	10.3937500	11.5718750
LVDT15	5.625	4.753125	5.0968750	4.6843750	5.6937500
APOIO B	6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

APÊNDICE B. VERIFICAÇÃO DA CARGA MÁXIMA DAS VIGAS METÁLICAS PERFIL I AMERICANO (102.0 x 11.4) E PERFIL I EUROPEU IPN 500x104 (ANÁLISE EXPERIMENTAL DO AUTOR)

B.1 Propriedades mecânicas e especificações das vigas

As propriedades mecânicas e especificações das vigas verificadas nessa pesquisa são apresentadas na Tabela B.1 e Tabela B.2 a seguir.

Tabela B.1 - Viga Perfil I Americano (102.0x11.4): Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas

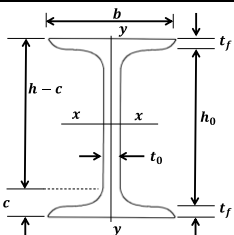
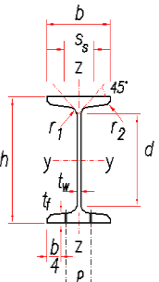
		American I Profile – Steel: 102.0 x 11.4							
		h (cm)	h ₀ (cm)	t _r (cm)	t ₀ (cm)	c (cm)	b (cm)	Area (cm ²)	I _x (cm ⁴)
	10.16	8.68	0.74	0.483	1.59	6.76	14.50	252	200
Length (m)	W _x (cm ³)	i _x (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	i _y (cm)	Z _x (cm ³)	Z _y (cm ³)	f _y *	(MPa)
6.00	49.70	4.17	31.70	9.37	1.48	56.220	17.414	250	

Tabela B.2 - Viga Perfil I Europeu IPN 500x104: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas

		European I Profile – Steel: IPN 500x104							
		h (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _r (mm)	r ₁ (mm)	r ₂ (mm)	Area (cm ²)	G (kg/m)
	500	185	18	27	18	10.8	179	141	200
Length (m)	d (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	A _L (m ² /m)	A _G (m ² /t)	Z _x (cm ³)	Z _y (cm ³)	f _y *	(MPa)
6.00	404.3	68740	2480	1.63	11.60	3240	456	345	

B.2 Análise do limite de carga da viga intacta

Para se ter uma noção de grandeza da resistência das vigas metálicas de Perfil I Americano (102.0x11.4) e de Perfil I Europeu IPN 500x104 por meio da análise do limite de carga das vigas intactas balizando a ideia de aplicação da massa móvel a ser aplicada nas vigas danificadas, visando principalmente as ideias de determinação da massa móvel a ser utilizada na viga. Essa determinação da carga máxima será calculada por meio das verificações de flambagens locais.

B.3 Análise de flambagem local

Para análise da carga estática máxima para verificação da ocorrência de flambagem local no elemento com o intuito de determinar a grandeza da massa adicional a ser aplicada

na viga. Para tanto serão utilizados parâmetros das normas norte-americana (AISC) e brasileira (ABNT NBR 8800, 2008), onde são classificadas em seção compacta, semi compacta e esbelta, em decorrência da influência da flambagem local sobre os respectivos momentos fletores resistentes (MR). A Figura B.1 mostra o comportamento esquemático de uma viga metálica com suas análises de ocorrências de flambagens e alguns outros danos característicos.

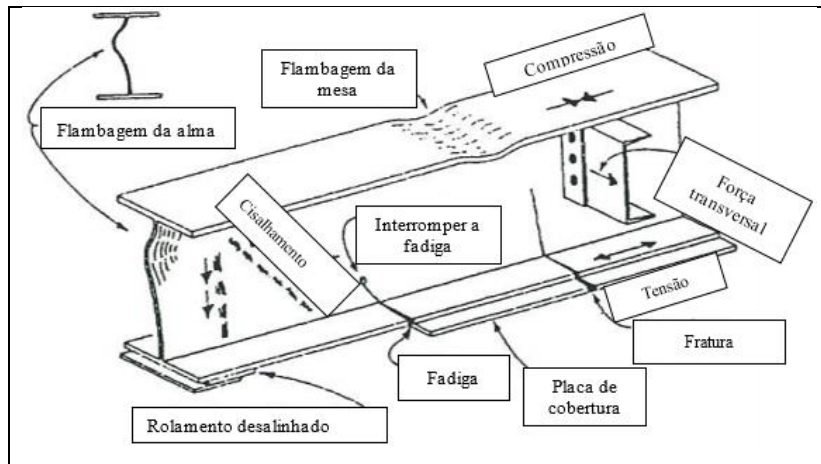
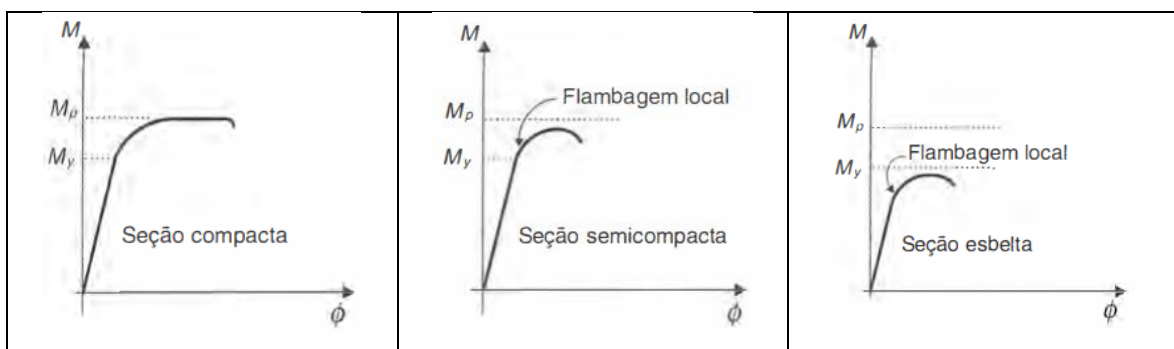


Figura B.1 – Comportamento esquemático de uma viga metálica com suas análises de ocorrências de flambagens e alguns outros danos característicos (Adaptado de NZTA, 2001)

Além disso, a Figura B.2 a seguir demonstra o comportamento de vigas com seções compacta, semicompacta e esbelta, conforme Pfeil (2009).



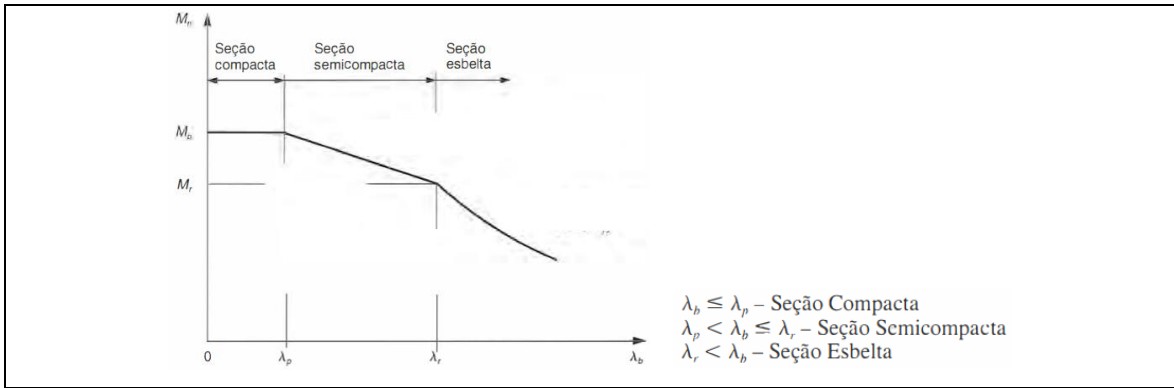


Figura B.2 - Comportamento de vigas com seções compacta, semicompacta e esbelta (Adaptado de Pfeil, 2009)

Mais especificamente os comportamentos de ocorrências de flambagens em vigas metálicas são demonstrados na Figura B.3 seguinte.

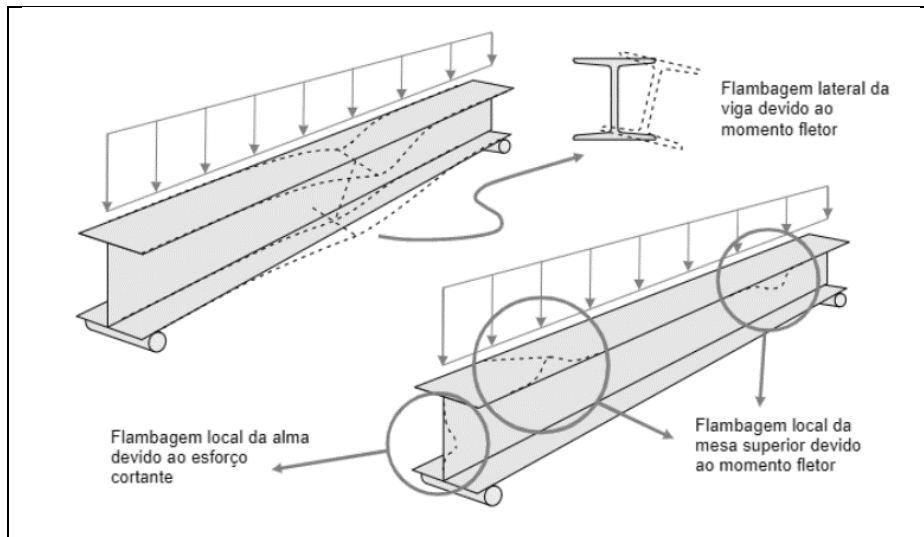


Figura B.3 - Comportamentos de ocorrências de flambagens em vigas metálicas (Autor Desconhecido)

No cálculo do momento resistente visando atender às verificações dos Estados Limites (EL) preconizados na norma ABNT NBR 8800:2008 conforme Pfeil (2009) apresenta-se:

- Determinação do Módulo Plástico (Z_x) conforme Equação (B.1) a seguir:

$Z_x = b_f t_f (h - t_f) + \frac{t_w}{4} (h - 2t_f)^2 \quad (B.1)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$Z_x = 6,76 \cdot 0,74(10,16 - 0,74) + \frac{0,483}{4}(10,16 - 2 \cdot 0,74)^2$ $Z_x = 56,22 \text{ cm}^3$	$Z_x = 18,5 \cdot 1,8(50,00 - 2,7) + \frac{1,8}{4}(50,00 - 2 \cdot 2,7)^2$ $Z_x = 3257,757 \text{ cm}^3$

Na determinação da esbeltez da placa para verificação de Flambagem Lateral da Mesa (FLM) tem-se a Equação (B.2) e (B.3):

$\lambda_b = \frac{1}{2} * \frac{b_f}{t_f} \quad (B.2)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$\lambda_b = \frac{1}{2} * \frac{6,76}{0,74} = 4,567$	$\lambda_b = \frac{1}{2} * \frac{18,5}{2,7} = 3,4259$

$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (B.3)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 10,74$	$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 9,149324836$

Em que,

λ_b : esbeltez de placa de largura b e espessura t = b/t;

λ_p : esbeltez de placa;

b_f : largura da mesa;

t_f : espessura da mesa;

E : Módulo de Elasticidade;

f_y : Resistência ao Escoamento do Aço.

Onde se verifica que quando $\lambda_b \leq \lambda_p$ define-se a seção como sendo compacta, em que para uma seção compacta, determina-se o Momento Nominal M_n da seguinte forma na Equação (B.4):

$M_n = Z_x f_y \quad (B.4)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_n = 56,220 * 25 = 1405,5 \text{ kN.cm} = 14,04 \text{ [kN.m]}$	$M_n = 3257,757 * 34.5 = 1,1239.10^5 \text{ kN.cm}$ $= 112,39 \text{ [kN.m]}$

Para a determinação do Momento de Serviço M_s conforme a Equação (B.5), tem-se:

$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} \quad (B.5)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_s = 1,50P + 0,50265 \text{ [kN.m]}$	$M_s = 1,50P + 6,345 \text{ [kN.m]}$

Considerando a Equação (B.6) seguinte e substituindo na Equação (B.5) anterior:

$M_s = M_n \quad (B.6)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$1,50P + 0,50265 = 14,04$ $P_{max} = 9,0249 \text{ kN} = 9024,9N \cong 903 \text{ kg}$	$1,50P + 6,345 = 112,39$ $P_{max} = 443,31411 \text{ kN} = 443314,11N$ $\cong 44331 \text{ kg}$

Em que a equação está em função da definição da carga P, sendo que a carga $q = 0,1117 \text{ kN/m}$ para a Viga Perfil Americano (102.0x11.4) e $1,4100 \text{ kN/m}$ para a Viga Perfil Europeu IPN 500x104, onde estão relacionadas com os pesos próprios das vigas.

Já na determinação da esbeltez da placa para verificação de Flambagem Lateral da Alma (FLA) tem-se a Equação (B.7) e (B.8):

$\lambda_b = \frac{h_w}{t_w} \quad (B.7)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$\lambda_b = \frac{10,16 - 2 * 0,74}{0,483} = 17,97$	$\lambda_b = \frac{50,00 - 2 * 2,7}{1,8} = 24,78$

$\lambda_p = D * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (B.8)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 106,34$	$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53016153$

Em que,

λ_b : esbeltez de placa de largura b e espessura t = b/t;

λ_p : esbeltez de placa;

h_w : altura da alma;

t_w : espessura da alma;

E : Módulo de Elasticidade;

f_y : Resistência ao Escoamento do Aço.

Onde se verifica que quando $\lambda_b \leq \lambda_p$ define-se a seção como sendo compacta, em que para uma seção compacta, determina-se o Momento Nominal M_n da seguinte forma na Equação (B.9):

$M_n = Z_x f_y$ (B.9)	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_n = 56,220 * 25 = 1405,5 \text{ kN.cm} = 14,04 \text{ [kN.m]}$	$M_n = 3257,757 * 34.5 = 1,1239.10^5 \text{ kN.cm}$ $= 112,39 \text{ [kN.m]}$

Para a determinação do Momento de Serviço M_s conforme a Equação (B.10), tem-se:

$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8}$ (B.10)	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_s = 1,50P + 0,50265 \text{ [kN.m]}$	$M_s = 1,50P + 6,345 \text{ [kN.m]}$

Considerando a Equação (B.11) seguinte e substituindo na Equação (B.10) anterior:

$M_s = M_n$ (B.11)	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$1,50P + 0,50265 = 14,04$ $P_{max} = 9,0249 \text{ kN} = 9024,9N \cong 903 \text{ kg}$	$1,50P + 6,345 = 112,39$ $P_{max} = 443,31411 \text{ kN} = 443314,11N$ $\cong 44331 \text{ kg}$

E novamente a equação está em função da definição da carga P, sendo que a carga $q = 0,1117 \text{ kN/m}$ para a Viga Perfil Americano (102.0x11.4) e $1,4100 \text{ kN/m}$ para a Viga Perfil Europeu IPN 500x104, onde estão relacionadas com os pesos próprios das vigas.

E por fim na determinação da esbeltez da placa para verificação de Flambagem Lateral por Flexo-Torção (FLT) tem-se a Equação (B.12) e (B.13):

$\lambda = \frac{l_b}{r_y}$ (B.12)	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$\lambda = \frac{600}{1,48} = 405,405$	$\lambda = \frac{600}{1,8} = 333,333$

$\lambda_p = 1,76 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (B.13)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 49,78$	$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 42,37582029$

Em que,

λ_b : esbeltez de placa de largura b e espessura t = b/t;

λ_p : esbeltez de placa;

r_y : raio de giração da seção intacta em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

l_b : distância entre duas seções, contidas a flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

E : Módulo de Elasticidade;

f_y : Resistência ao Escoamento do Aço.

E na FLT se verifica que quando $\lambda > \lambda_p$ define-se l_{br} na Equação (B.14) como:

$l_{br} = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (B.14)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$l_{br} = \frac{1,38 \sqrt{31,7 * 2,152}}{1,48 * 2,152 * 0,0202} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 * 703,23 * 0,0202^2}{31,7}}} = 177,1$	$l_{br} = \frac{1,38 \sqrt{2480 * 329,4594}}{1,8 * 329,4594 * 0,008605} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 * 1387119,8 * 0,008605^2}{2480}}} = 337,9909977$

Onde,

C_w : constante do empenamento da seção intacta;

I_y : momento de inércia da seção em relação ao eixo da seção intacta, que passa pelo médio da alma;

d : altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

t_f : espessura da mesa.

Sendo que as constantes J e C_w para perfis I ou H são definidas na Equação (B.15), (B.16) e (B.17) como:

$J = \frac{1}{3}(2b_f t_f^3 + h_0 t_w^3) \quad (B.15)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$J = \frac{1}{3}(2 * 6,76 * 0,74^3 + (10,16 - 2 * 0,74) * 0,483^3)$ $= 2,152 \text{ cm}^3$	$J = \frac{1}{3}(2 * 18,5 * 2,7^3 + (50,00 - 2 * 2,7) * 1,8^3)$ $= 329,4594 \text{ cm}^3$

$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_x}{EJ} \quad (B.16)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$\beta_1 = \frac{(25 - 0,3 * 25)49,7}{20000 * 2,152} = 0,0202$	$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 * 34,5)2730}{20000 * 329,4594} = 0,0100057$

$C_w = \frac{I_y(d - t_f)^2}{4} \quad (B.17)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$C_w = \frac{31,7(10,16 - 0,74)^2}{4} = 703,23 \text{ cm}^6$	$C_w = \frac{2480(50,00 - 2,7)^2}{4} = 1387119,8 \text{ cm}^6$

Quanto aos momentos M_A , M_B e M_C , utilizam-se a Equação (B.18), (B.19) e (B.20):

$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} \quad (B.18)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_A \left(\frac{l}{4}\right) = 0,3769 + 0,75P$	$M_A \left(\frac{l}{4}\right) = 0,3769 + 0,75P$

$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} \quad (B.19)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_B \left(\frac{l}{2}\right) = 0,50265 + 1,50P$	$M_B \left(\frac{l}{2}\right) = 6,345 + 1,50P$

$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} \quad (B.20)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_C \left(\frac{3l}{4}\right) = 0,3769 + 0,75P$	$M_C \left(\frac{3l}{4}\right) = 0,3769 + 0,75P$

Determinando a Equação (B.21), por meio da Equação (B.18), (B.19) e (B.20), tem-se:

$C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad Rm \leq 3,0 ; Rm = 1 \quad (B.21)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$C_b = \frac{12,5(1,50P + 0,50265)}{2,5(1,50P + 0,50265) + 3(0,75P + 0,3769) + 4(1,50P + 0,50265) + 3(0,75P + 0,3769)}$	
$C_b = \frac{18,75P + 6,0318}{14,25P + 5,528625}$	$C_b = \frac{12,5(1,50P + 6,345)}{2,5(1,50P + 6,345) + 3(0,75P + 0,3769) + 4(1,50P + 6,345) + 3(0,75P + 0,3769)}$

Para a determinação do Momento de Serviço M_s conforme a Equação (B.22), tem-se:

$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} \quad (B.22)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_s = 1,50P + 0,50265 \text{ [kN.m]}$	$M_s = 1,50P + 6,345 \text{ [kN.m]}$

Em que a equação está em função da definição da carga P, sendo que a carga $q = 0,1117 \text{ kN/m}$ para a Viga Perfil Americano (102.0x11.4) e $1,4100 \text{ kN/m}$ para a Viga Perfil Europeu IPN 500x104, onde estão relacionadas com os pesos próprios das vigas.

E determinando o Momento Nominal M_n igualado ao Momento Crítico M_{cr} , ou seja, o $M_n = M_{cr}$ considerando $l_b > l_{br}$ para viga longa, conforme Equação (B.23):

$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 EI_y}{l_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J l_b^2}{C_w} \right)} \quad (B.23)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$M_n = 56,220 * 25 = 1405,5 \text{ kN.cm} = 14,04 \text{ [kN.m]}$	$M_n = 3257,757 * 34.5 = 1,1239 \cdot 10^5 \text{ kN.cm} = 112,39 \text{ [kN.m]}$

Considerando a Equação (B.24) seguinte e substituindo na Equação (B.23) anterior:

$M_s = M_{cr} \quad (B.24)$	
Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104 (500.0x18.5)
$1,50P + 0,50265 = \frac{C_b \pi^2 EI_y}{l_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J l_b^2}{C_w} \right)}$	$1,50P + 6,345 = \frac{C_b \pi^2 EI_y}{l_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J l_b^2}{C_w} \right)}$
$P_{max} = 4,3735 \text{ kN} = 4373 \text{ N} \cong 438 \text{ kg}$	$P_{max} = 363,58 \text{ kN} = 363580,0 \text{ N} \cong 36358 \text{ kg}$

Em termos de resumo final, as cargas máximas encontradas para as verificações de ocorrências de flambagens nas vigas são apresentadas na Tabela B.3 seguinte.

Tabela B.3 – Resumo de Resultados Finais – Cargas Máximas nas Vigas

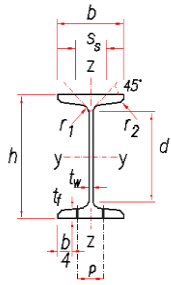
Ocorrências	Perfis de Vigas Metálicas	
	Viga Perfil Americano (102.0x11.4)	Viga Perfil Europeu IPN 500x104
Flambagem Lateral Mesa (FLM)	$P_{max_amer} = 903 \text{ kg}$	$P_{max_eur} = 44331 \text{ kg}$
Flambagem Lateral da Alma (FLA)	$P_{max_amer} = 903 \text{ kg}$	$P_{max_eur} = 44331 \text{ kg}$
Flambagem Lateral por Flexo-Torção (FLT)	$P_{max_amer} = 438 \text{ kg} = 4373\text{N}$	$P_{max_eur} = 36358 \text{ kg} = 363580\text{N}$

Essa verificação de carregamento estático máximo é realizada para a viga intacta sendo este o valor de carga máxima a ser aplicado no meio do vão das vigas para não haver ocorrências de flambagens locais.

B.4 Memória de Cálculo para Análise de flambagem local

A demonstração da verificação da ocorrência de flambagem local com as novas propriedades geométricas apresentadas na Tabela B.4 obtidas por meio dessas verificações geométricas “in loco” com o uso do paquímetro e demais ferramentas por meio da memória de cálculo da viga com as especificações técnicas de catálogo conforme a seguir.

Tabela B.4 - Especificações Técnicas Medidas “in loco”: Geometria, Massa e Propriedades Mecânicas (Viga IPN 500x104)

	Medidas “in loco” / European I Profile – Steel: IPN 500x104								
	h (mm)	b (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	r₁ (mm)	r₂ (mm)	Area (cm ²)	G (kg/m)	E (MPa)
	497.8003	177.7968	18.2500	20.0853	21.3516	11.0889	151,7522	141	200
Length (m)	d (mm)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	A_L (m ² /m)	A_G (m ² /t)	Z_x (cm ³)	Z_y (cm ³)	f_y* (MPa)	
6.00	405.0400	68740	2480	0.2529	1.7936	2435	682	345	

Dados com as Especificações Técnicas Medidas “in loco” (Viga IPN 500x104):

$$bf := 17.77968$$

	$bf := 17.77968$
$tf := 2.00853$	$tf := 2.00853$
$tw := 1.825$	$tw := 1.825$
$h := 49.78003$	$h := 49.78003$
$hw := (h - 2 \cdot tf)$	$hw := 45.76297$
$E := 20000$	$E := 20000$
$fy := 34.5$	$fy := 34.5$
$L := 600$	$L := 600$
$q := 1.0199$	$q := 1.0199$
$ry := 2.13516$	$ry := 2.13516$
$lb := 600$	$lb := 600$
$Iy := 2480$	$Iy := 2480$
$G := 141$	$G := 141$
$\sigma_r := 0.30 \cdot fy$	$\sigma_r := 10.350$
$W := 2730$	$W := 2730$
$J := \frac{1}{3} \cdot (2bf \cdot tf^3 + hw \cdot tw^3)$	$J := 188.7651633$
$\beta I := \frac{(fy - \sigma_r) \cdot W}{E \cdot J}$	$\beta I := 0.01746336529$
$Cw := \frac{Iy \cdot (h - tf)^2}{4}$	$Cw := 1.414912052 \cdot 10^6$
Determinação do Módulo Plástico:	
$zx := bf \cdot tf \cdot (h - tf) + \frac{tw}{4} \cdot (h - 2 \cdot tf)^2$	$zx := 2661.470323$

FLM

$$\lambda_b := \frac{1}{2} \cdot \frac{bf}{tf}$$

$$\lambda_b := 4.426042927$$

$$\lambda_p := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p := 9.149324836$$

$$Seção := \text{if}(\lambda_b \leq \lambda_p, Seção_Compacta, Seção_Não_Compacta)$$

$$Seção := Seção_Compacta$$

Para uma seção compacta o momento nominal é definido como:

$$M_n := z_x \cdot f_y$$

$$M_n := 91820.72614$$

$$M_s := \frac{P \cdot L}{4} + \frac{q \cdot L^2}{8}$$

$$M_s := 91820.72615$$

$$P := \frac{4}{L} \cdot \left(M_n - \frac{q \cdot L^2}{8} \right)$$

$$P := 306.1681743$$

FLA

$$\lambda_a := \frac{hw}{tw}$$

$$\lambda_a := 25.07560000$$

$$\lambda_{pa} := 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_{pa} := 90.53016153$$

$$Seção := \text{if}(\lambda_a \leq \lambda_{pa}, Seção_Compacta, Seção_Não_Compacta)$$

$$Seção := Seção_Compacta$$

$$M_n := z_x \cdot f_y$$

$$M_n := 91820.72614$$

$$P := \frac{4}{L} \cdot \left(M_n - \frac{q \cdot L^2}{8} \right)$$

$$P := 306.1681743$$

FLT

$$\lambda := \frac{lb}{r_y}$$

$$\lambda := 281.0093857$$

$$\lambda_{pf} := 1.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_{pf} := 42.37582029$$

Verificar := **if**($\lambda_{pf} \leq \lambda$, *Usar_lbr*, *Não_usar_lbr*)

Verificar := *Usar_lbr*

$$lbr := \frac{1.38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta I} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta I^2}{I_y}}}$$

$$lbr := 246.8846410$$

Conferir := **if**($lb \geq lbr$, *Viga_Longa*, *Não_Usar_Mn*)

Conferir := *Viga_Longa*

Momento fletor resistente de cálculo

O momento fletor resistente de cálculo para o estado-limite de flambagem lateral com torção, entre seções contidas lateralmente, não pode ser inferior ao momento fletor solicitante de cálculo da seção onde ocorre a maior tensão de compressão nas mesas. Para esse estado-limite aplicam-se as prescrições de 5.4, mas determinando-se o fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme, C_b , por análise racional ou, de forma conservadora, tomando-o como igual a 1,0.

De forma conservadora adotou-se o valor de $C_b=1.50$, ou seja, a metade do valor máximo que seria "3". $\gamma_m = 1.10$

$$C_b := 1.50$$

$$C_b := 1.50$$

$$M_{cr} := \text{evalf} \left(\frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{l b^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot \left(1 + \frac{0.039 \cdot J \cdot l b^2}{C_w} \right)} \right)$$

$$M_{cr} := 82581.72687$$

$$P_{max} := \frac{4}{L} \cdot \left(M_{cr} - \frac{q \cdot L^2}{8} \right)$$

$$P_{max} := 244.5748458$$

$$\frac{P_{max}}{1.10}$$

$$222.3407689$$

APÊNDICE C. DADOS DO MODELO NUMÉRICO DA ESTRUTURA INTACTA E DANIFICADA DE DESLOCAMENTOS DO PERFIL I EUROPEU IPN 500x104

Os dados da atualização do modelo numérico da viga IPN 500x104 são apresentados a seguir na Tabela C.1 com os dados da estrutura intacta, e a Figura C.1 com as análises gráficas de carga e deslocamento da estrutura danificada, além da Tabela C.2 com dano em L/2, da Tabela C.3 com danos em L/4 e por fim da Tabela C.4 com danos em L/8.

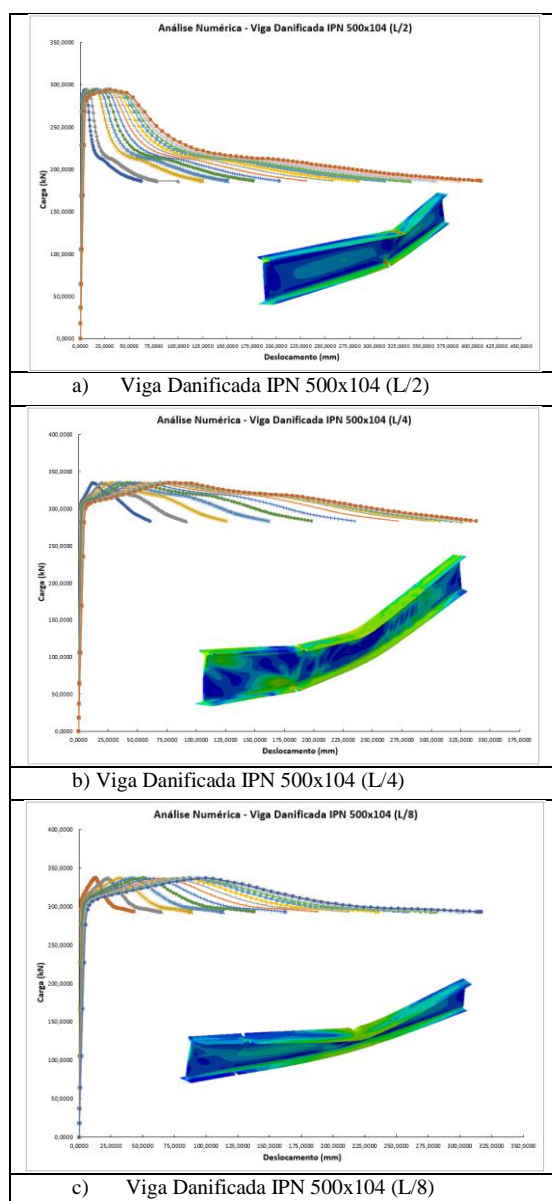


Figura C.1 – Análises Numéricas - Viga Danificada IPN 500x104 (L/2, L/4 e L/8)

Tabela C.1 – Dados de deslocamentos do modelo numérico da viga metálica intacta perfil I europeu IPN 500x104

Perfil IPN 500x104 (Intacto)															
Carga (kN)	DEF-1 (mm)	DEF-2 (mm)	DEF-3 (mm)	DEF-4 (mm)	DEF-5 (mm)	DEF-6 (mm)	DEF-7 (mm)	DEF-8 (mm)	DEF-9 (mm)	DEF-10 (mm)	DEF-11 (mm)	DEF-12 (mm)	DEF-13 (mm)	DEF-14 (mm)	DEF-15 (mm)
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
17,8761	0,4489	0,7182	0,9917	1,2625	1,5263	1,7796	2,0190	2,2410	2,4417	2,6173	2,7640	2,8776	2,9529	2,9906	2,9903
34,6196	0,8977	1,4369	1,9845	2,5265	3,0547	3,5620	4,0415	4,4859	4,8879	5,2397	5,5332	5,7605	5,9108	5,9857	5,9845
57,9171	1,5714	2,5163	3,4761	4,4262	5,3522	6,2417	7,0826	7,8621	8,5671	9,1839	9,6982	10,0960	10,3586	10,4885	10,4846
89,4833	2,5830	4,1381	5,7181	7,2823	8,8072	10,2725	11,6580	12,9426	14,1043	15,1204	15,9670	16,6206	17,0508	17,2611	17,2500
131,0478	4,1028	6,5748	9,0879	11,5765	14,0037	16,3370	18,5439	20,5906	22,4416	24,0599	25,4068	26,4435	27,1227	27,4486	27,4195
184,5145	6,3860	10,2319	14,1466	18,0255	21,8108	25,4519	28,8977	32,0946	34,9860	37,5124	39,6118	41,2209	42,2668	42,7542	42,6818
244,3957	9,6238	15,4455	21,3818	27,2702	33,0233	38,5652	43,8186	48,7011	53,1248	56,9964	60,2187	62,6901	64,3009	65,0532	64,9462
290,4270	12,7340	20,4625	28,3641	36,2148	43,8988	51,3173	58,3689	64,9445	70,9267	76,1897	80,6011	84,0150	86,2273	87,2588	87,1123
320,6160	15,5998	25,0901	34,8305	44,5353	54,0645	63,3020	72,1291	80,4171	88,0255	94,8026	100,5840	105,1410	108,0730	109,4110	109,1610
340,5158	18,3240	29,4637	40,9524	52,4386	63,7609	74,7908	85,3981	95,4410	104,7630	113,1920	120,5310	126,4410	130,2510	131,9310	131,4800
354,7450	21,0148	33,7224	46,9004	60,1241	73,2111	86,0234	98,4237	110,2620	121,3700	131,5630	140,6120	148,0660	152,7880	154,7440	153,9740
367,6095	23,7195	37,9062	52,7041	67,6068	82,4091	96,9645	111,1300	124,7500	137,6490	149,6310	160,4410	169,5450	175,3420	177,6380	176,4770
381,6408	26,4581	42,0561	58,4272	74,9714	91,4572	107,7280	123,6370	139,0220	153,7010	167,4670	180,0450	190,8240	197,6970	200,2490	198,5540
397,1644	29,2837	46,2662	64,2050	82,3952	100,5750	118,5780	136,2510	153,4280	169,9210	185,5130	199,9070	212,4280	219,9880	222,3500	219,8940
401,2745	30,0081	47,3343	65,6660	84,2704	102,8780	121,3180	139,4380	157,0690	174,0240	190,0800	204,9390	217,9090	225,5980	227,8110	225,0960
405,4622	30,7373	48,4039	67,1268	86,1441	105,1780	124,0560	142,6210	160,7070	178,1220	194,6440	209,9680	223,3870	231,1980	233,2420	230,2490
406,5045	30,9211	48,6726	67,4934	86,6143	105,7550	124,7430	143,4210	161,6200	179,1510	195,7900	211,2300	224,7620	232,6020	234,5950	231,5260
407,0885	31,0248	48,8241	67,7000	86,8792	106,0800	125,1300	143,8710	162,1340	179,7300	196,4350	211,9410	225,5360	233,3920	235,3540	232,2420
407,1217	31,0308	48,8328	67,7119	86,8945	106,0990	125,1520	143,8970	162,1640	179,7640	196,4720	211,9820	225,5810	233,4380	235,3980	232,2830
407,1661	31,0390	48,8449	67,7284	86,9157	106,1250	125,1830	143,9330	162,2050	179,8100	196,5230	212,0380	225,6420	233,5010	235,4590	232,3410
407,2363	31,0515	48,8631	67,7532	86,9475	106,1640	125,2290	143,9870	162,2660	179,8790	196,6010	212,1240	225,7350	233,5950	235,5500	232,4260
407,3398	31,0702	48,8904	67,7905	86,9952	106,2230	125,2990	144,0680	162,3590	179,9840	196,7170	212,2510	225,8740	233,7370	235,6860	232,5540
407,3509	31,0712	48,8920	67,7926	86,9980	106,2260	125,3030	144,0720	162,3640	179,9890	196,7230	212,2580	225,8810	233,7440	235,6930	232,5610
407,3509	31,0728	48,8942	67,7957	87,0020	106,2310	125,3090	144,0790	162,3720	179,9980	196,7330	212,2700	225,8940	233,7570	235,7050	232,5720
407,3620	31,0743	48,8965	67,7988	87,0060	106,2360	125,3150	144,0860	162,3800	180,0070	196,7430	212,2800	225,9050	233,7680	235,7160	232,5830
407,3694	31,0759	48,8988	67,8019	87,0100	106,2410	125,3210	144,0930	162,3870	180,0160	196,7520	212,2910	225,9170	233,7800	235,7270	232,5930
407,3767	31,0775	48,9010	67,8050	87,0139	106,2460	125,3270	144,0990	162,3950	180,0240	196,7620	212,3010	225,9280	233,7920	235,7390	232,6040
407,3841	31,0790	48,9033	67,8082	87,0180	106,2510	125,3330	144,1060	162,4030	180,0330	196,7720	212,3120	225,9400	233,8040	235,7500	232,6150
407,3915	31,0794	48,9039	67,8090	87,0190	106,2520	125,3340	144,1080	162,4050	180,0350	196,7740	212,3140	225,9420	233,8060	235,7520	232,6170
407,3952	31,0798	48,9045	67,8098	87,0201	106,2530	125,3360	144,1100	162,4070	180,0370	196,7760	212,3170	225,9450	233,8090	235,7550	232,6200
407,3952	31,0798	48,9046	67,8099	87,0202	106,2530	125,3360	144,1100	162,4070	180,0370	196,7760	212,3170	225,9450	233,8090	235,7550	232,6200
407,3952	31,0798	48,9046	67,8099	87,0202	106,2540	125,3360	144,1100	162,4070	180,0370	196,7760	212,3170	225,9450	233,8090	235,7550	232,6200
407,3952	31,0799	48,9046	67,8099	87,0202	106,2540	125,3360	144,1100	162,4070	180,0370	196,7760	212,3170	225,9450	233,8090	235,7550	232,6200
407,3952	31,0799	48,9046	67,8099	87,0203	106,2540	125,3360	144,1100	162,4070	180,0380	196,7760	212,3170	225,9450	233,8090	235,7550	232,6200
407,3952	31,0799	48,9047	67,8100	87,0204	106,2540	125,3360	144,1100	162,4070	180,0380	196,7770	212,3170	225,9450	233,8090	235,7560	232,6200
407,3952	31,0799	48,9047	67,8101	87,0204	106,2540	125,3360	144,1100	162,4070	180,0380	196,7770	212,3170	225,9450	233,8100	235,7560	232,6200
407,3952	31,0799	48,9047	67,8101	87,0204	106,2540	125,3360	144,1100	162,4070	180,0380	196,7770	212,3170	225,9450	233,8100	235,7560	232,6200

Tabela C.2 - Dados de deslocamentos do modelo numérico da viga metálica danificada perfil I europeu IPN 500x104 (danos em L/2)

Perfil IPN 500x104 (Dano em L/2)															
Carga (kN)	DEF-1 (mm)	DEF-2 (mm)	DEF-3 (mm)	DEF-4 (mm)	DEF-5 (mm)	DEF-6 (mm)	DEF-7 (mm)	DEF-8 (mm)	DEF-9 (mm)	DEF-10 (mm)	DEF-11 (mm)	DEF-12 (mm)	DEF-13 (mm)	DEF-14 (mm)	DEF-15 (mm)
0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18,4760	0,0838	0,1001	0,1485	0,1742	0,1994	0,2236	0,2463	0,2671	0,2855	0,3014	0,3146	0,3263	0,3287	0,3297	0,3315
36,9403	0,1676	0,2003	0,2969	0,3483	0,3988	0,4472	0,4925	0,5340	0,5710	0,6028	0,6291	0,6524	0,6573	0,6594	0,6628
64,6197	0,2934	0,3506	0,5196	0,6094	0,6978	0,7825	0,8618	0,9344	0,9991	1,0547	1,1007	1,1416	1,1500	1,1537	1,1597
106,1136	0,4825	0,5763	0,8538	1,0013	1,1465	1,2855	1,4159	1,5352	1,6415	1,7328	1,8083	1,8755	1,8893	1,8953	1,9052
169,5493	0,7730	0,9228	1,3664	1,6023	1,8344	2,0569	2,2655	2,4564	2,6265	2,7726	2,8933	3,0003	3,0218	3,0321	3,0477
228,3373	1,0455	1,2488	1,8492	2,1685	2,4825	2,7837	3,0662	3,3249	3,5556	3,7541	3,9183	4,0639	4,0855	4,1041	4,1229
268,2404	1,2500	1,5068	2,2499	2,6423	3,0281	3,3984	3,7463	4,0660	4,3523	4,6001	4,8067	4,9911	4,9854	5,0304	5,0457
281,3612	1,4096	1,7640	2,7290	3,2274	3,7156	4,1843	4,6261	5,0343	5,4029	5,7258	5,9989	6,2395	6,2036	6,2929	6,3116
284,7013	1,5612	2,0275	3,2382	3,8528	4,4527	5,0283	5,5716	6,0751	6,5315	6,9337	7,2760	7,5722	7,5418	7,6574	7,6917
287,1275	1,8393	2,5010	4,1365	4,9523	5,7459	6,5067	7,2252	7,8923	8,4987	9,0351	9,4931	9,8811	9,8867	10,0295	10,0972
289,1230	2,3351	3,3142	5,6418	6,7878	7,8995	8,9642	9,9698	10,9041	11,7545	12,5080	13,1519	13,6870	13,7710	13,9427	14,0685
290,9799	3,0620	4,4694	7,7419	9,3419	10,8919	12,3756	13,7767	15,0787	16,2641	17,3150	18,2127	18,9494	19,1507	19,3526	19,5593
292,7248	3,8269	5,6640	9,8948	11,9577	13,9550	15,8666	17,6718	19,3495	20,8772	22,2315	23,3879	24,3306	24,6549	24,8840	25,1731
294,5363	4,6071	6,8729	12,0663	14,5956	17,0443	19,3881	21,6017	23,6592	25,5330	27,1943	28,6126	29,7641	30,2127	30,4685	30,8404
292,7149	5,3364	8,0063	14,1137	17,0891	19,9723	22,7352	25,3490	27,7835	30,0068	31,9853	33,6833	35,0702	35,6867	35,9638	36,4590
291,6256	6,0852	9,1676	16,2117	19,6456	22,9758	26,1707	29,1975	32,0219	34,6073	36,9154	38,9050	40,5385	41,3319	41,6307	42,2566
290,5737	6,8201	10,3073	18,2747	22,1618	25,9350	29,5590	32,9975	36,2119	39,1614	41,8028	44,0897	45,9778	46,9590	47,2787	48,0468
285,2395	7,4702	11,3279	20,1466	24,4562	28,6468	32,6811	36,5203	40,1231	43,4459	46,4420	49,0612	51,2543	52,4988	52,8341	53,8187
276,0251	8,0700	12,2811	21,9205	26,6428	31,2463	35,6928	39,9425	43,9530	47,6789	51,0718	54,0786	56,6471	58,2473	58,5945	59,8853
267,7100	8,6542	13,2081	23,6480	28,7743	33,7833	38,6359	43,2917	47,7073	51,8362	55,6281	59,0279	61,9804	63,9474	64,3069	65,9175
258,7843	9,2088	14,0902	25,3011	30,8196	36,2244	41,4767	46,5358	51,3582	55,8968	60,1004	63,9126	67,2759	69,6455	70,0166	71,9854
251,2842	9,7688	14,9749	26,9542	32,8641	38,6642	44,3155	49,7774	55,0061	59,9538	64,5685	68,7924	72,5663	75,3364	75,7196	78,0459
245,0241	10,3335	15,8608	28,6042	34,9039	41,0978	47,1466	53,0096	58,6425	63,9973	69,0208	73,6540	77,8357	81,0019	81,3981	84,0788
239,7801	10,9029	16,7476	30,2505	36,9382	43,5241	49,9687	56,2309	62,2662	68,0258	73,4558	78,4958	83,0827	86,6409	87,0506	90,0828
235,3806	11,4772	17,6352	31,8927	38,9666	45,9428	52,7813	59,4409	65,8766	72,0389	77,8732	83,3175	88,3070	92,2536	92,6771	96,0580
231,6793	12,0564	18,5232	33,5296	40,9875	48,3519	55,5824	62,6372	69,4711	76,0339	82,2698	88,1159	93,5054	97,8375	98,2745	102,0010
228,4970	12,6385	19,4092	35,1577	42,9967	50,7465	58,3661	65,8132	73,0421	80,0021	86,6365	92,8808	98,6667	103,3830	103,8310	107,9000
225,8125	13,2255	20,2957	36,7810	44,9991	53,1323	61,1390	68,9765	76,5985	83,9535	90,9840	97,6242	103,8040	108,9020	109,3600	113,7690
223,5734	13,8182	21,1832	38,3992	46,9942	55,5088	63,9007	72,1265	80,1394	87,8872	95,3114	102,3450	108,9160	114,3930	114,8610	119,6080
221,7202	14,4169	22,0717	40,0124	48,9821	57,8760	66,6510	75,2630	83,6647	91,8031	99,6189	107,0430	114,0030	119,8570	120,3350	125,4170
220,2033	15,0221	22,9616	41,6208	50,9628	60,2339	69,3898	78,3860	87,1744	95,7013	103,9060	111,7200	119,0660	125,2930	125,7820	131,1960
218,9799	15,6339	23,8529	43,2241	52,9361	62,5823	72,1171	81,4954	90,6683	99,5815	108,1730	116,3730	124,1040	130,7020	131,2000	136,9460
217,9671	16,2489	24,7408	44,8143	54,8921	64,9092	74,8190	84,5753	94,1288	103,4240	112,3990	120,9810	129,0910	136,0560	136,5650	142,6370
216,8738	16,8672	25,6212	46,3804	56,8170	67,1981	77,4757	87,6030	97,5297	107,2000	116,5500	125,5070	133,9900	141,3190	141,8340	148,2270
215,9291	17,4936	26,5032	47,9400	58,7323	69,4746	80,1176	90,6134	100,9110	110,9540	120,6770	130,0060	138,8600	146,5520	147,0720	153,7850
215,1263	18,1276	27,3866	49,4928	60,6379	71,7388	82,7446	93,6065	104,2730	114,6860	124,7800	134,4800	143,7040	151,7570	152,2820	159,3140
214,4743	18,7703	28,2728	51,0412	62,5364	73,9936	85,3600	96,5858	107,6180	118,4000	128,8630	138,9320	148,5220	156,9360	157,4650	164,8140
213,9151	19,4217	29,1639	52,5893	64,4324	76,2436	87,9684	99,5558	110,9520	122,0990	132,9290	143,3640	153,3180	162,0890	162,6230	170,2860
213,4416	20,0809	30,0584	54,1353	66,3246	78,4881	90,5697	102,5170	114,2760	125,7870	136,9810	147,7810	158,0970	167,2240	167,7620	175,7380
213,0114	20,7484	30,9556	55,6768	68,2094	80,7229	93,1588	105,4640	117,5830	129,4550	141,0120	152,1730	162,8500	172,3300	172,8720	181,1590
212,6481	21,4174	31,8467	57,1996	70,0702	82,9283	95,7134	108,3710	120,8450	133,0740	144,9880	156,5060	167,5380	177,3680	177,9130	186,5070
212,3764	22,0954	32,7412	58,7186	71,9247	85,1252	98,2573	111,2650	124,0920	136,6760	148,9450	160,8190	172,2040	182,3820	182,9300	191,8290
212,0275	22,7617	33,6124	60,1908	73,7211	87,2529	100,7210	114,0690	127,2380	140,1650	152,7800	164,9980	176,7280	187,2450	187,7960	196,9930
211,4698	23,4396	34,4911	61,6666	75,5202	89,3826	103,1860	116,8730	130,3830	143,6550	156,6140	169,1770	181,2500	192,1050	192,6600	202,1550
211,0044	24,1245	35,3709	63,1346	77,3082	91,4981	105,6340	119,6570	133,5070	147,1190	160,4200	173,3250	185,7400	196,9330	197,4900	207,2810
210,2948	24,7924	36,2230	64,5519	79,0339	93,5395	107,9960	122,3430	136,5190	150,4580	164,0890	177,5230	190,0660	201,5820	202,1420	212,2180
209,4484	25,4651	37,0748	65,9613	80,7487	95,5673	110,3420	125,0090	139,5080	153,7730	167,7290	181,2890	194,3570	206,1930	206,7570	217,1150
208,6371	26,1427	37,9254	67,3601	82,4491	97,5770	112,6660	127,6510	142,4700	157,0570	171,3350	185,2180	198,6080	210,7620	211,3290	221,9680
207,8539	26,8250	38,7750	68,7483	84,1351	99,5688	114,9680	130,2680	145,4040	160,3090	174,9080	189,1110	202,8210	215,2900	215,8600	226,7770
207,0518	27,5187	39,6321	70,1397	85,8231	101,5620	117,2710	132,8850	148,3370	163,5610	178,4780	193,0010	207,0300	219,8140	220,3880	231,5810

Perfil IPN 500x104 (Dano em L/2)															
Carga (kN)	DEF-1 (mm)	DEF-2 (mm)	DEF-3 (mm)	DEF-4 (mm)	DEF-5 (mm)	DEF-6 (mm)	DEF-7 (mm)	DEF-8 (mm)	DEF-9 (mm)	DEF-10 (mm)	DEF-11 (mm)	DEF-12 (mm)	DEF-13 (mm)	DEF-14 (mm)	DEF-15 (mm)
206,2941	28,2208	40,4928	71,5275	87,5050	103,5460	119,5640	135,4890	151,2560	166,7960	182,0310	196,8720	211,2190	224,3170	224,8930	236,3630
205,5545	28,9330	41,3594	72,9157	89,1855	105,5280	121,8530	138,0880	154,1690	170,0240	185,5750	200,7330	215,3970	228,8080	229,3870	241,1330
204,8338	29,6546	42,2311	74,3029	90,8628	107,5050	124,1340	140,6790	157,0720	173,2410	189,1080	204,5820	219,5610	233,2840	233,8660	245,8860
204,1245	30,3854	43,1076	75,6884	92,5364	109,4760	126,4090	143,2610	159,9640	176,4460	192,6270	208,4150	223,7090	237,7430	238,3270	250,6210
203,4308	31,1271	43,9912	77,0759	94,2101	111,4450	128,6810	145,8400	162,8520	179,6450	196,1390	212,2410	227,8480	242,1930	242,7790	255,3460
202,7632	31,8797	44,8818	78,4648	95,8835	113,4130	130,9500	148,4140	165,7340	182,8370	199,6430	216,0570	231,9770	246,6290	247,2190	260,0570
202,0891	32,6411	45,7770	79,8517	97,5527	115,3750	133,2100	150,9780	168,6040	186,0170	203,1330	219,8590	236,0890	251,0470	251,6420	264,7510
201,3561	33,4081	46,6729	81,2308	99,2105	117,3220	135,4530	153,5220	171,4520	189,1710	206,5950	223,6300	240,1700	255,4320	256,0320	269,4100
200,6250	34,1852	47,5747	82,6096	100,8660	119,2650	137,6910	156,0590	174,2930	192,3170	210,0480	227,3920	244,2400	259,8070	260,4100	274,0560
199,9128	34,9723	48,4827	83,9889	102,5200	121,2060	139,9250	158,5910	177,1260	195,4540	213,4920	231,1430	248,2990	264,1700	264,7770	278,6910
199,2246	35,7697	49,3974	85,3693	104,1740	123,1440	142,1550	161,1180	179,9540	198,5860	216,9290	234,8870	252,3500	268,5240	269,1350	283,3160
198,5563	36,5777	50,3191	86,7513	105,8270	125,0800	144,3830	163,6410	182,7770	201,7120	220,3590	238,6230	256,3930	272,8700	273,4840	287,9320
197,9043	37,3961	51,2477	88,1347	107,4800	127,0150	146,6070	166,1610	185,5950	204,8310	223,7830	242,3520	260,4270	277,2060	277,8240	292,5380
197,2738	38,2251	52,1836	89,5201	109,1330	128,9490	148,8290	168,6770	188,4090	207,9460	227,2010	246,0740	264,4540	281,5340	282,1560	297,1360
196,6621	39,0636	53,1259	90,9071	110,7870	130,8820	151,0490	171,1900	191,2190	211,0560	230,6130	249,7900	268,4740	285,8550	286,4800	301,7250
196,0707	39,9125	54,0755	92,2961	112,4400	132,8130	153,2670	173,6990	194,0250	214,1610	234,0190	253,4990	272,4870	290,1670	290,7960	306,3060
195,4941	40,7721	55,0326	93,6874	114,0950	134,7440	155,4830	176,2060	196,8270	217,2610	237,4200	257,2020	276,4930	294,4720	295,1050	310,8790
194,9334	41,6423	55,9970	95,0805	115,7490	136,6730	157,6960	178,7090	199,6240	220,3560	240,8150	260,8980	280,4910	298,7690	299,4060	315,4430
194,3912	42,5230	56,9689	96,4759	117,4040	138,6020	159,9070	181,2090	202,4180	223,4460	244,2040	264,5880	284,4830	303,0580	303,6990	319,9990
193,8667	43,4144	57,9484	97,8738	119,0590	140,5300	162,1170	183,7070	205,2080	226,5320	247,5880	268,2720	288,4680	307,3400	307,9840	324,5470
193,3593	44,3165	58,9355	99,2740	120,7160	142,4570	164,3250	186,2010	207,9940	229,6130	250,9670	271,9510	292,4460	311,6150	312,2630	329,0870
192,8684	45,2292	59,9305	100,6770	122,3730	144,3840	166,5310	188,6930	210,7760	232,6900	254,3410	275,6230	296,4180	315,8820	316,5340	333,6200
192,3938	46,1526	60,9331	102,0820	124,0310	146,3100	168,7350	191,1830	213,5550	235,7620	257,7090	279,2890	300,3830	320,1420	320,7980	338,1450
191,9348	47,0866	61,9437	103,4900	125,6900	148,2360	170,9380	193,6690	216,3310	238,8310	261,0730	282,9500	304,3420	324,3950	325,0550	342,6630
191,4905	48,0313	62,9620	104,9010	127,3500	150,1610	173,1390	196,1530	219,1030	241,8940	264,4310	286,6050	308,2940	328,6410	329,3050	347,1730
191,0614	48,9866	63,9884	106,3150	129,0110	152,0870	175,3390	198,6350	221,8720	244,9540	267,7850	290,2550	312,2400	332,8800	333,5490	351,6750
190,6474	49,9524	65,0224	107,7310	130,6730	154,0110	177,5370	201,1140	224,6370	248,0090	271,1330	293,8980	316,1800	337,1120	337,7840	356,1700
190,2449	50,9290	66,0646	109,1500	132,3360	155,9360	179,7340	203,5910	227,3990	251,0610	274,4770	297,5360	320,1130	341,3370	342,0140	360,6570
189,8520	51,9160	67,1147	110,5720	134,0000	157,8600	181,9290	206,0650	230,1570	254,1080	277,8150	301,1680	324,0410	345,5560	346,2360	365,1380
189,4706	52,9136	68,1728	111,9970	135,6660	159,7840	184,1230	208,5360	232,9120	257,1510	281,1490	304,7950	327,9620	349,7670	350,4520	369,6130
189,1013	53,9217	69,2391	113,4250	137,3330	161,7070	186,3150	211,0060	235,6640	260,1900	284,4790	308,4170	331,8770	353,9720	354,6620	374,0800
188,7425	54,9405	70,3136	114,8560	139,0010	163,6310	188,5070	213,4730	238,4140	263,2250	287,8030	312,0340	335,7870	358,1710	358,8650	378,5410
188,3884	55,9705	71,3970	116,2910	140,6710	165,5560	190,6980	215,9390	241,1600	266,2570	291,1250	315,6460	339,6920	362,3640	363,0630	382,9960
188,0361	57,0119	72,4897	117,7310	142,3450	167,4820	192,8890	218,4040	243,9060	269,2870	294,4430	319,2550	343,5930	366,5520	367,2570	387,4470
187,6902	58,0642	73,5910	119,1740	144,0200	169,4090	195,0800	220,8680	246,6490	272,3140	297,7570	322,8600	347,4890	370,7350	371,4450	391,8920
187,3542	59,1269	74,7006	120,6210	145,6970	171,3360	197,2700	223,3300	249,3890	275,3370	301,0670	326,4590	351,3800	374,9120	375,6270	396,3300
187,0271	60,2001	75,8185	122,0710	147,3750	173,2630	199,4590	225,7900	252,1260	278,3570	304,3730	330,0540	355,2650	379,0820	379,8040	400,7620
186,7089	61,2838	76,9447	123,5240	149,0550	175,1900	201,6470	228,2480	254,8610	281,3740	307,6750	333,6440	359,1450	383,2450	383,9740	405,1880
186,3901	61,5563	77,2274	123,8880	149,4750	175,6720	202,1940	228,8610	255,5430	282,1270	308,4990	334,5400	360,1130	384,2850	385,0150	406,2920
186,5104	61,9663	77,6526	124,4340	150,1060	176,3950	203,0130	229,7820	256,5670	283,2560	309,7350	335,8840	361,5650	385,8430	386,5750	407,9490
186,4357	62,1976	77,8921	124,7410	150,4600	176,8000	203,4740	230,2990	257,1420	283,8900	310,4290	336,6380	362,3800	386,7170	387,4510	408,8780
186,4357	62,1976	100,0000	124,7410	150,4600	176,8000	203,4740	230,2990	257,1420	283,8900	310,4290	336,6380	362,3800	386,7170	387,4510	408,8780

Tabela C.3 - Dados de deslocamentos do modelo numérico da viga metálica danificada perfil I europeu IPN 500x104 (danos em L/4)

Perfil IPN 500x104 (Dano em L/4)															
Carga (kN)	DEF-1 (mm)	DEF-2 (mm)	DEF-3 (mm)	DEF-4 (mm)	DEF-5 (mm)	DEF-6 (mm)	DEF-7 (mm)	DEF-8 (mm)	DEF-9 (mm)	DEF-10 (mm)	DEF-11 (mm)	DEF-12 (mm)	DEF-13 (mm)	DEF-14 (mm)	DEF-15 (mm)
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18,4781	0,0813	0,0996	0,1227	0,1479	0,1735	0,1987	0,2229	0,2450	0,2650	0,2828	0,2980	0,3106	0,3218	0,3243	0,3252
36,9509	0,1626	0,1991	0,2454	0,2958	0,3470	0,3974	0,4457	0,4900	0,5300	0,5655	0,5959	0,6211	0,6435	0,6485	0,6503
64,6496	0,2846	0,3486	0,4295	0,5176	0,6073	0,6954	0,7799	0,8574	0,9273	0,9895	1,0427	1,0867	1,1260	1,1347	1,1379
106,1864	0,4680	0,5729	0,7058	0,8504	0,9976	1,1424	1,2811	1,4084	1,5232	1,6254	1,7127	1,7851	1,8494	1,8638	1,8691
169,1912	0,7472	0,9139	1,1256	1,3558	1,5905	1,8211	2,0422	2,2450	2,4281	2,5909	2,7300	2,8451	2,9487	2,9707	2,9792
235,1840	1,0420	1,2741	1,5686	1,8891	2,2157	2,5367	2,8445	3,1269	3,3821	3,6090	3,8031	3,9634	4,1100	4,1375	4,1490
281,7759	1,2587	1,5464	1,9081	2,3002	2,6994	3,0916	3,4678	3,8134	4,1251	4,4030	4,6413	4,8389	5,0229	5,0465	5,0550
300,3333	1,4118	1,8014	2,2687	2,7646	3,2645	3,7539	4,2229	4,6488	5,0239	5,3586	5,6464	5,8860	6,1066	6,1151	6,1061
304,1414	1,5312	2,0377	2,6208	3,2283	3,8356	4,4276	4,9942	5,5010	5,9365	6,3241	6,6566	6,9315	7,1761	7,1821	7,1608
306,1032	1,6745	2,3193	3,0375	3,7752	4,5074	5,2191	5,8992	6,4998	7,0055	7,4544	7,8378	8,1523	8,4217	8,4316	8,4006
307,8511	1,9295	2,8043	3,7452	4,6977	5,6369	6,5469	7,4151	8,1716	8,7956	9,3472	9,8159	10,1958	10,5057	10,5285	10,4867
309,5288	2,3740	3,6141	4,9087	6,2041	7,4749	8,7031	9,8733	10,8816	11,6992	12,4191	13,0273	13,5140	13,8912	13,9408	13,8873
311,2656	3,0229	4,7532	6,5262	8,2884	10,0121	11,6756	13,2593	14,6141	15,7013	16,6557	17,4584	18,0946	18,5678	18,6583	18,5929
312,9395	3,7079	5,9293	8,1856	10,4215	12,6058	14,7126	16,7177	18,4271	19,7922	20,9888	21,9927	22,7839	23,3582	23,4922	23,4169
314,6797	4,4101	7,1209	9,8617	12,5738	15,2219	17,7756	20,2059	22,2743	23,9222	25,3654	26,5747	27,5245	28,2033	28,3824	28,2983
316,5447	5,1206	8,3185	11,5438	14,7329	17,8461	20,8485	23,7061	26,1359	28,0697	29,7626	31,1802	32,2912	33,0771	33,3023	33,2100
318,5487	5,8346	9,5174	13,2265	16,8926	20,4715	23,9234	27,2092	30,0024	32,2245	34,1695	35,7977	37,0720	37,9668	38,2388	38,1388
320,6640	6,5490	10,7141	14,9057	19,0480	23,0921	26,9935	30,7080	33,8657	36,3780	38,5772	40,4180	41,8577	42,8634	43,1831	43,0758
322,8488	7,2619	11,9064	16,5786	21,1958	25,7043	30,0547	34,1979	37,7210	40,5253	42,9809	45,0365	46,6440	47,7628	48,1308	48,0168
325,1315	7,9731	13,0943	18,2455	23,3364	28,3085	33,1074	37,6792	41,5686	44,6666	47,3803	49,6527	51,4299	52,6638	53,0805	52,9600
327,5118	8,6821	14,2774	19,9058	25,4692	30,9038	36,1508	41,1509	45,4073	48,8004	51,7738	54,2649	56,2135	57,5642	58,0301	57,9031
329,7771	9,3904	15,4610	21,5690	27,6076	33,5083	39,2072	44,6403	49,2622	52,9404	56,1646	58,8662	60,9792	62,4405	62,9502	62,8125
331,6876	10,1074	16,6655	23,2660	29,7937	36,1748	42,3411	48,2238	53,2077	57,1506	60,6066	63,5015	65,7639	67,3225	67,8625	67,7036
333,3575	10,8150	17,8534	24,9408	31,9524	38,8096	45,4397	51,7695	57,1171	61,3309	65,0263	68,1234	70,5450	72,2108	72,7800	72,5967
334,7033	11,5218	19,0433	26,6216	34,1219	41,4608	48,5615	55,3461	61,0540	65,5229	69,4434	72,7304	75,3012	77,0647	77,6562	77,4429
334,7018	12,2682	20,3248	28,4475	36,4917	44,3693	51,9995	59,3003	65,3530	69,9851	74,0434	77,4386	80,0839	81,8789	82,4411	82,1589
334,4102	13,0002	21,5748	30,2273	38,8018	47,2054	55,3535	63,1602	69,5578	74,3633	78,5715	82,0888	84,8238	86,6661	87,2169	86,8806
334,2864	13,7265	22,8108	31,9864	41,0851	50,0094	58,6706	66,9789	73,7220	78,7063	83,0702	86,7162	89,5478	91,4439	91,9879	91,6018
334,3329	14,4483	24,0348	33,7276	43,3454	52,7856	61,9557	70,7621	77,8512	83,0190	87,5440	91,3246	94,2585	96,2126	96,7511	96,3159
332,6767	15,2381	25,4276	35,7390	45,9795	56,0421	65,8313	75,2498	82,6464	87,7943	92,2858	96,0169	98,8821	100,7410	101,1520	100,5820
331,0482	16,0438	26,8485	37,7930	48,6716	59,3730	69,7988	79,8480	87,5510	92,6579	97,0960	100,7590	103,5390	105,2900	105,5590	104,8410
329,7124	16,8452	28,2534	39,8213	51,3291	62,6610	73,7154	84,3883	92,3991	97,4755	101,8710	105,4780	108,1840	109,8350	109,9690	109,1080
328,1919	17,6606	29,6872	41,8952	54,0501	66,0317	77,7355	89,0541	97,3632	102,3640	106,6750	110,1860	112,7810	114,3010	114,2740	113,2530
326,7397	18,4834	31,1282	43,9785	56,7840	69,4195	81,7777	93,7483	102,3540	107,2680	111,4830	114,8890	117,3660	118,7490	118,5570	117,3710
325,5144	19,3042	32,5535	46,0348	59,4804	72,7602	85,7636	98,3774	107,2820	112,1230	116,2580	119,5730	121,9450	123,2020	122,8530	121,5100
324,4791	20,1231	33,9626	48,0630	62,1379	76,0516	89,6905	102,9380	112,1440	116,9280	120,9960	124,2350	126,5170	127,6620	127,1670	125,6720
323,5333	20,9495	35,3712	50,0853	64,7850	79,3290	93,6002	107,4790	116,9880	121,7140	125,7170	128,8810	131,0740	132,1100	131,4700	129,8230
322,6773	21,7765	36,7652	52,0801	67,3930	82,5562	97,4493	111,9500	121,7650	126,4480	130,4020	133,5080	135,6280	136,5680	135,7970	134,0040
321,9288	22,5972	38,1342	54,0339	69,9449	85,7128	101,2140	116,3220	126,4470	131,1110	135,0380	138,1070	140,1760	141,0410	140,1550	138,2280
321,2517	23,4158	39,4888	55,9635	72,4637	88,8283	104,9300	120,6390	131,0740	135,7270	139,6370	142,6800	144,7080	145,5090	144,5170	142,4600
320,6777	24,2267	40,8163	57,8489	74,9224	91,8679	108,5540	124,8500	135,6000	140,2650	144,1820	147,2220	149,2320	149,9910	148,9090	146,7350
320,1562	25,0247	42,1073	59,6766	77,3028	94,8094	112,0610	128,9240	139,9940	144,7040	148,6590	151,7280	153,7520	154,4970	153,3460	151,0660
319,6642	25,8097	43,3628	61,4482	79,6075	97,6560	115,4550	132,8650	144,2620	149,0480	153,0730	156,2020	158,2700	159,0300	157,8250	155,4490
319,2351	26,5872	44,5927	63,1785	81,8560	100,4320	118,7630	136,7080	148,4350	153,3180	157,4350	160,6460	162,7800	163,5740	162,3270	159,8640
318,8555	27,3572	45,7976	64,8683	84,0493	103,1380	121,9880	140,4540	152,5140	157,5170	161,7460	165,0600	167,2820	168,1290	166,8520	164,3080
318,3588	28,1336	47,0113	66,5713	86,2609	105,8680	125,2420	144,2340	156,6200	161,7190	166,0400	169,4380	171,7270	172,6080	171,2860	168,6500
317,8635	28,9102	48,2132	68,2532	88,4428	108,5610	128,4500	147,9610	160,6780	165,8920	170,3230	173,8210	176,1960	177,1270	175,7640	173,0370

Perfil IPN 500x104 (Dano em L/4)															
Carga (kN)	DEF-1 (mm)	DEF-2 (mm)	DEF-3 (mm)	DEF-4 (mm)	DEF-5 (mm)	DEF-6 (mm)	DEF-7 (mm)	DEF-8 (mm)	DEF-9 (mm)	DEF-10 (mm)	DEF-11 (mm)	DEF-12 (mm)	DEF-13 (mm)	DEF-14 (mm)	DEF-15 (mm)
317,2152	29,6911	49,4100	69,9227	90,6065	111,2290	131,6300	151,6550	164,7040	170,0420	174,5900	178,1970	180,6670	181,6540	180,2490	177,4290
316,4154	30,4849	50,6181	71,6046	92,7844	113,9150	134,8290	155,3710	168,7510	174,2040	178,8630	182,5730	185,1310	186,1690	184,7120	181,7910
315,5157	31,2903	51,8356	73,2959	94,9727	116,6120	138,0410	159,1020	172,8130	178,3780	183,1450	186,9540	189,5970	190,6810	189,1640	186,1310
314,5499	32,0954	53,0401	74,9639	97,1281	119,2670	141,2020	162,7740	176,8180	182,5110	187,4010	191,3250	194,0680	195,2120	193,6380	190,4870
313,5505	32,9007	54,2342	76,6127	99,2566	121,8870	144,3220	166,3980	180,7750	186,6050	191,6270	195,6760	198,5300	199,7430	198,1180	194,8440
312,3962	33,7245	55,4554	78,2998	101,4350	124,5710	147,5180	170,1100	184,8120	190,7470	195,8700	200,0130	202,9480	204,2050	202,5170	199,1030
311,1721	34,5601	56,6877	79,9998	103,6300	127,2740	150,7370	173,8490	188,8740	194,9040	200,1180	204,3450	207,3530	208,6480	206,8980	203,3400
309,9461	35,3912	57,8991	81,6647	105,7760	129,9150	153,8820	177,5020	192,8520	198,9970	204,3220	208,6550	211,7560	213,1090	211,3120	207,6150
308,7375	36,2217	59,0971	83,3052	107,8880	132,5130	156,9730	181,0910	196,7690	203,0430	208,4920	212,9440	216,1530	217,5750	215,7410	211,9130
307,5506	37,0464	60,2719	84,9074	109,9470	135,0430	159,9840	184,5870	200,5950	207,0190	212,6150	217,2080	220,5450	222,0600	220,1970	216,2480
306,3768	37,8722	61,4375	86,4918	111,9800	137,5410	162,9550	188,0360	204,3760	210,9580	216,7090	221,4510	224,9270	226,5410	224,6490	220,5790
305,2461	38,7025	62,5989	88,0658	113,9980	140,0180	165,9010	191,4560	208,1280	214,8720	220,7840	225,6810	229,3010	231,0210	229,0990	224,9100
304,0711	39,5130	63,7106	89,5615	115,9100	142,3630	168,6870	194,6890	211,7060	218,6680	224,7940	229,9020	233,7210	235,5980	233,6430	229,3240
302,9083	40,3247	64,8129	91,0391	117,7960	144,6730	171,4320	197,8750	215,2390	222,4300	228,7830	234,1140	238,1450	240,1910	238,1940	233,7360
301,7592	41,1358	65,9019	92,4926	119,6480	146,9410	174,1250	200,9990	218,7130	226,1500	232,7450	238,3150	242,5750	244,8090	242,7640	238,1550
300,6027	41,9430	66,9708	93,9115	121,4510	149,1470	176,7440	204,0370	222,1080	229,8130	236,6760	242,5100	247,0260	249,4720	247,3710	242,5950
299,4251	42,7481	68,0228	95,3007	123,2140	151,3000	179,2990	207,0010	225,4320	233,4280	240,5800	246,7010	251,4950	254,1760	252,0090	247,0460
298,2742	43,5597	69,0741	96,6840	124,9660	153,4400	181,8370	209,9430	228,7360	237,0290	244,4760	250,8900	255,9690	258,8890	256,6430	251,4800
297,1435	44,3757	70,1206	98,0550	126,6990	155,5540	184,3440	212,8500	232,0060	240,6020	248,3530	255,0670	260,4400	263,6100	261,2840	255,9080
296,0746	45,2084	71,1857	99,4485	128,4600	157,7020	186,8890	215,8010	235,3160	244,2010	252,2400	259,2410	264,8940	268,3010	265,8920	260,2980
295,0408	46,0536	72,2612	100,8520	130,2310	159,8620	189,4490	218,7670	238,6390	247,8050	256,1250	263,4050	269,3310	272,9730	270,4820	264,6640
294,0514	46,9085	73,3418	102,2590	132,0040	162,0210	192,0070	221,7320	241,9580	251,4040	260,0020	267,5590	273,7570	277,6320	275,0630	269,0140
293,1181	47,7771	74,4351	103,6780	133,7920	164,1990	194,5860	224,7190	245,2980	255,0140	263,8820	271,7070	278,1680	282,2680	279,6180	273,3350
292,2199	48,6593	75,5419	105,1130	135,5980	166,3960	197,1890	227,7340	248,6610	258,6370	267,7640	275,8460	282,5600	286,8740	284,1430	277,6210
291,3676	49,5625	76,6760	106,5840	137,4480	168,6490	199,8560	230,8240	252,0940	262,3070	271,6700	279,9870	286,9310	291,4380	288,6170	281,8580
290,5563	50,4838	77,8344	108,0870	139,3400	170,9530	202,5840	233,9830	255,5900	266,0160	275,5910	284,1180	291,2670	295,9460	293,0320	286,0350
289,7694	51,4411	79,0533	109,6780	141,3490	173,4010	205,4840	237,3430	259,2740	269,8560	279,5840	288,2630	295,5600	300,3520	297,3230	290,0920
289,0158	52,4154	80,2927	111,2950	143,3890	175,8880	208,4310	240,7580	263,0090	273,7280	283,5930	292,4060	299,8320	304,7210	301,5710	294,1070
288,2696	53,4057	81,5564	112,9450	145,4740	178,4310	211,4440	244,2480	266,8120	277,6410	287,6140	296,5320	304,0600	309,0190	305,7390	298,0460
287,5222	54,4227	82,8640	114,6590	147,6430	181,0770	214,5810	247,8830	270,7510	281,6470	291,6850	300,6660	308,2510	313,2390	309,8120	301,8920
286,7682	55,4690	84,2207	116,4430	149,9020	183,8360	217,8530	251,6740	274,8350	285,7530	295,8100	304,8070	312,4040	317,3760	313,7840	305,6400
286,0257	56,5409	85,6196	118,2870	152,2400	186,6930	221,2410	255,6010	279,0450	289,9410	299,9730	308,9430	316,5070	321,4220	317,6500	309,2880
285,2986	57,6254	87,0316	120,1440	154,5950	189,5690	224,6520	259,5550	283,2790	294,1420	304,1400	313,0730	320,5940	325,4420	321,4860	312,9060
284,5834	58,7209	88,4523	122,0100	156,9580	192,4540	228,0730	263,5190	287,5200	298,3470	308,3040	317,1950	324,6690	329,4460	325,3030	316,5060
283,8864	59,8282	89,8820	123,8840	159,3290	195,3490	231,5050	267,4960	291,7730	302,5560	312,4680	321,3100	328,7300	333,4300	329,0980	320,0840
283,1996	60,9458	91,3176	125,7630	161,7040	198,2470	234,9400	271,4760	296,0270	306,7640	316,6270	325,4170	332,7800	338,1800	332,8770	323,6490

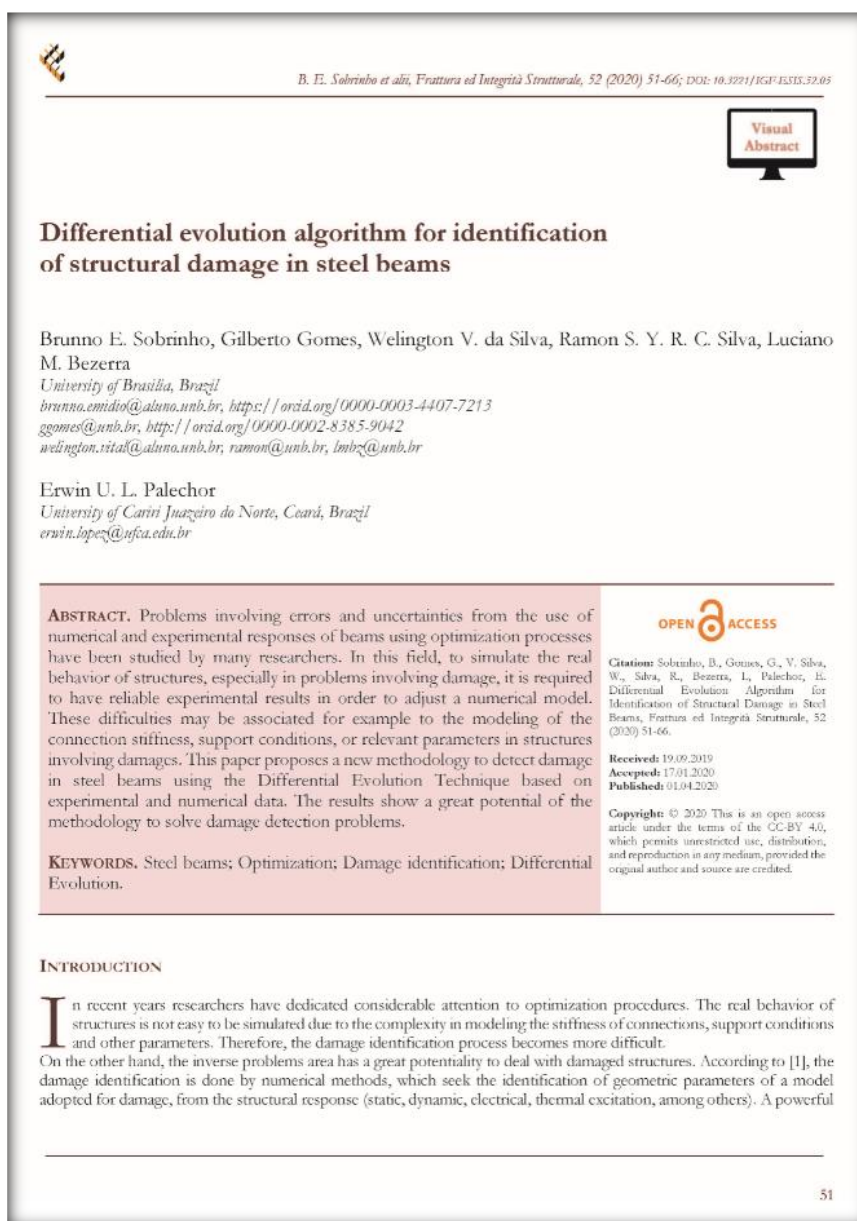
Perfil IPN 500x104 (Dano em L/8)															
Carga (kN)	DEF-1 (mm)	DEF-2 (mm)	DEF-3 (mm)	DEF-4 (mm)	DEF-5 (mm)	DEF-6 (mm)	DEF-7 (mm)	DEF-8 (mm)	DEF-9 (mm)	DEF-10 (mm)	DEF-11 (mm)	DEF-12 (mm)	DEF-13 (mm)	DEF-14 (mm)	DEF-15 (mm)
297,0748	32,5255	51,2964	71,9106	93,0966	113,7740	134,3320	154,5940	174,3970	193,5450	211,8400	229,0400	244,7720	250,7990	256,9130	256,5080
296,8072	33,3743	52,3511	73,2732	94,8125	115,8660	136,8120	157,4730	177,6840	197,2460	215,9580	233,5760	249,7210	255,6610	262,0640	261,7920
296,5333	34,2377	53,4156	74,6412	96,5297	117,9560	139,2850	160,3420	180,9570	200,9290	220,0540	238,0850	254,6390	260,4890	267,1810	267,0430
296,2542	35,1135	54,4870	76,0117	98,2449	120,0390	141,7480	163,1960	184,2120	204,5900	224,1240	242,5650	259,5240	265,2790	272,2580	272,2560
295,9552	35,9999	55,5632	77,3822	99,9561	122,1140	144,2000	166,0350	187,4490	208,2300	228,1700	247,0170	264,3790	270,0420	277,3050	277,4400
295,6229	36,8964	56,6435	78,7518	101,6620	124,1800	146,6370	168,8570	190,6650	211,8440	232,1870	251,4360	269,1960	274,7670	282,3120	282,5840
295,2544	37,8001	57,7246	80,1165	103,3580	126,2310	149,0560	171,6560	193,8540	215,4280	236,1690	255,8170	273,9730	279,4510	287,2740	287,6870
294,8682	38,7124	58,8077	81,4778	105,0460	128,2700	151,4580	174,4340	197,0190	218,9840	240,1190	260,1620	278,7100	284,1010	292,2010	292,7490
294,4698	39,6397	59,9014	82,8459	106,7380	130,3090	153,8590	177,2080	200,1770	222,5300	244,0570	264,4910	283,4280	288,7360	297,1110	297,7910
294,0558	40,5763	60,9991	84,2132	108,4260	132,3400	156,2460	179,9650	203,3140	226,0520	247,9670	268,7880	288,1100	293,3440	301,9910	302,7980
293,6104	41,5204	62,0976	85,5757	110,1030	134,3560	158,6150	182,7000	206,4260	229,5450	251,8440	273,0500	292,7540	297,9160	306,8310	307,7650
293,1381	42,4732	63,1991	86,9362	111,7740	136,3630	160,9690	185,4160	209,5170	233,0140	255,6940	277,2810	297,3630	302,4560	311,6370	312,6960
292,6457	42,7131	63,4754	87,2767	112,1920	136,8630	161,5570	186,0940	210,2880	233,8780	256,6540	278,3350	298,5110	303,5870	312,8350	313,9240
292,8937	42,9537	63,7522	87,6175	112,6090	137,3640	162,1440	186,7700	211,0570	234,7420	257,6110	279,3870	299,6570	304,7160	314,0300	315,1510
292,8243	43,0895	63,9085	87,8099	112,8450	137,6460	162,4740	187,1510	211,4910	235,2280	258,1500	279,9790	300,3020	305,3510	314,7030	315,8400
292,7847	43,1662	63,9968	87,9185	112,9780	137,8050	162,6600	187,3650	211,7350	235,5010	258,4540	280,3120	300,6640	305,7090	315,0810	316,2280
292,7208	43,2812	64,1300	88,0829	113,1790	138,0450	162,9390	187,6860	212,0990	235,9090	258,9060	280,8080	301,2040	306,2400	315,6430	316,8050
292,7215	43,2814	64,1302	88,0831	113,1790	138,0450	162,9400	187,6860	212,1000	235,9100	258,9060	280,8090	301,2040	306,2410	315,6440	316,8060
292,7226	43,2816	64,1305	88,0835	113,1800	138,0460	162,9400	187,6870	212,1010	235,9110	258,9070	280,8090	301,2050	306,2420	315,6450	316,8070
292,7241	43,2819	64,1309	88,0840	113,1800	138,0460	162,9410	187,6880	212,1020	235,9120	258,9090	280,8110	301,2070	306,2430	315,6470	316,8080
292,7263	43,2824	64,1314	88,0847	113,1810	138,0470	162,9420	187,6890	212,1030	235,9140	258,9110	280,8130	301,2090	306,2460	315,6490	316,8100
292,7230	43,2829	64,1320	88,0853	113,1820	138,0480	162,9430	187,6900	212,1050	235,9160	258,9130	280,8150	301,2120	306,2480	315,6520	316,8140
292,7256	43,2834	64,1326	88,0861	113,1830	138,0490	162,9450	187,6920	212,1070	235,9170	258,9150	280,8170	301,2140	306,2510	315,6540	316,8160
292,7263	43,2835	64,1327	88,0862	113,1830	138,0500	162,9450	187,6920	212,1070	235,9180	258,9150	280,8180	301,2150	306,2510	315,6550	316,8160
292,7267	43,2836	64,1328	88,0863	113,1830	138,0500	162,9450	187,6920	212,1070	235,9180	258,9150	280,8180	301,2150	306,2510	315,6550	316,8170
292,7271	43,2837	64,1329	88,0865	113,1830	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9180	258,9160	280,8190	301,2150	306,2520	315,6550	316,8170
292,7274	43,2838	64,1330	88,0866	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2520	315,6560	316,8180
292,7274	43,2838	64,1330	88,0866	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2520	315,6560	316,8180
292,7278	43,2838	64,1330	88,0866	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2520	315,6560	316,8180
292,7278	43,2838	64,1330	88,0867	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2520	315,6560	316,8180
292,7274	43,2838	64,1330	88,0867	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2520	315,6560	316,8180
292,7274	43,2838	64,1330	88,0867	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2520	315,6560	316,8180
292,7274	43,2838	64,1330	88,0867	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2520	315,6560	316,8180
292,7274	43,2838	64,1331	88,0867	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180
292,7274	43,2838	64,1331	88,0867	113,1840	138,0500	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180
292,7274	43,2839	64,1331	88,0867	113,1840	138,0510	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9160	280,8190	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180
292,7278	43,2839	64,1331	88,0868	113,1840	138,0510	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9170	280,8190	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180
292,7278	43,2839	64,1331	88,0868	113,1840	138,0510	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9170	280,8190	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180
292,7278	43,2839	64,1332	88,0868	113,1840	138,0510	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9170	280,8200	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180
292,7278	43,2839	64,1332	88,0868	113,1840	138,0510	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9170	280,8200	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180
292,7278	43,2839	64,1332	88,0868	113,1840	138,0510	162,9460	187,6930	212,1080	235,9190	258,9170	280,8200	301,2160	306,2530	315,6560	316,8180

APÊNDICE D. PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DESSA PESQUISA

Serão apresentados as publicações oriundas dessa pesquisa por meio dos Artigos Publicados e em Desenvolvimento.

D.1 Artigo Publicado: Differential Evolution Algorithm for Identification of Structural Damage in Steel Beams (Frattura ed Integritá Strutturale / Fracture and Structural Integrity - FIS)

ISSN 1971-8993; Vol. 14 No. 52 (2020): April 2020 Structural Integrity and Durability of Structures; Vol. XIV, Issue 52, April 2020; DOI: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.52.05>
Site: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/2639>



The image shows a page from the journal 'Frattura ed Integritá Strutturale' (Volume 52, Issue 52, April 2020). The article title is 'Differential evolution algorithm for identification of structural damage in steel beams'. The authors listed are Brunno E. Sobrinho, Gilberto Gomes, Welington V. da Silva, Ramon S. Y. R. C. Silva, Luciano M. Bezerra, and Erwin U. L. Palechor. The abstract discusses the use of optimization processes for structural damage identification. The page also features a 'Visual Abstract' icon, an 'OPEN ACCESS' logo, and a 'Citation' section with the full reference. The introduction begins with 'In recent years researchers have dedicated considerable attention to optimization procedures...'. The page number 51 is visible at the bottom right.

B. E. Sobrinho et alii, *Frattura ed Integritá Strutturale*, 52 (2020) 51-66; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.52.05

Visual Abstract

Differential evolution algorithm for identification of structural damage in steel beams

Brunno E. Sobrinho, Gilberto Gomes, Welington V. da Silva, Ramon S. Y. R. C. Silva, Luciano M. Bezerra
University of Brasília, Brazil
brunno.emidio@aluno.unb.br, <https://orcid.org/0000-0003-4407-7213>
ggomes@unb.br, <https://orcid.org/0000-0002-8385-9042>
welington.vital@aluno.unb.br, ramon@unb.br, lmbez@unb.br

Erwin U. L. Palechor
University of Cariri Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil
erwin.lopez@ufca.edu.br

ABSTRACT. Problems involving errors and uncertainties from the use of numerical and experimental responses of beams using optimization processes have been studied by many researchers. In this field, to simulate the real behavior of structures, especially in problems involving damage, it is required to have reliable experimental results in order to adjust a numerical model. These difficulties may be associated for example to the modeling of the connection stiffness, support conditions, or relevant parameters in structures involving damages. This paper proposes a new methodology to detect damage in steel beams using the Differential Evolution Technique based on experimental and numerical data. The results show a great potential of the methodology to solve damage detection problems.

KEYWORDS. Steel beams; Optimization; Damage identification; Differential Evolution.

OPEN ACCESS

Citation: Sobrinho, B., Gomes, G., V. Silva, W., Silva, R., Bezerra, L., Palechor, E. Differential Evolution Algorithm for Identification of Structural Damage in Steel Beams. *Frattura ed Integritá Strutturale*, 52 (2020) 51-66.

Received: 19.09.2019
Accepted: 17.01.2020
Published: 01.04.2020

Copyright: © 2020 This is an open access article under the terms of the CC-BY 4.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

INTRODUCTION

In recent years researchers have dedicated considerable attention to optimization procedures. The real behavior of structures is not easy to be simulated due to the complexity in modeling the stiffness of connections, support conditions and other parameters. Therefore, the damage identification process becomes more difficult. On the other hand, the inverse problems area has a great potentiality to deal with damaged structures. According to [1], the damage identification is done by numerical methods, which seek the identification of geometric parameters of a model adopted for damage, from the structural response (static, dynamic, electrical, thermal excitation, among others). A powerful

51

Visual Abstract



University of Brasília - UnB

Department of Civil Engineering- ENC

Differential Evolution Algorithm for Identification of Structural Damage in Steel Beams

Authors:

Brunno Emidio Sobrinho, MSc.
Gilberto Gomes, DSc.
Wellington Vital da Silva, MSc.
Ramon S. Y. R. C. Silva, DSc
Luciano Mendes Bezerra, PhD.
Erwin Ulises Lopez Palechor, DSc.

Brasilia, 2020



D.2 Artigo Publicado: Otimização e o Problema Inverso na Identificação de Danos Estruturais (Congress on Computational Methods in Engineering – XXXVI CILAMCE)



OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA INVERSO NA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS

Brunno Emidio Sobrinho

Gilberto Gomes

br_emidio@yahoo.com.br

ggomes2007@gmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

Genasil Francisco dos Santos

genasil@hotmail.com

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PGECIV, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Erwin Ulises Lopez Palechor

erwinlopezpalechor@hotmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva

salenoyure@hotmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

Resumo. *Os trabalhos com erros e incertezas oriundos da utilização de modelos numéricos e experimentais por meio de processos de otimização têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores. Neste campo de atuação, muitas dificuldades são encontradas, pois simular o comportamento real das estruturas, principalmente em problemas que envolvem danos, requer uma adequação matemática dos modelos numéricos a partir de medidas experimentais, seja na modelagem da rigidez de conexões, nas condições de apoio ou em alguns parâmetros relevantes, buscando-se, desta forma, a mínima distorção dos resultados*

CILAMCE 2015

Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
Ney Augusto Dumont (Editor), ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, November 22-25, 2015

obtidos. A partir de um processo numérico se obtém uma configuração da estrutura que resulta em uma performance ótima, seja devido ao atendimento de algum critério de máxima rigidez, seja por satisfazer restrições tanto sobre as variáveis de projeto quanto sobre o comportamento da estrutura (tensão de falha, frequência, modos, deslocamentos, etc...). Neste trabalho, propõe-se o ajuste de estruturas de vigas metálicas modeladas pelo Método de Elementos Finitos (MEF) com uso do ANSYS, tendo como base dados experimentais estáticos (deslocamentos), por meio dos problemas inversos e métodos de otimização. A partir dos modelos ajustados serão simulados danos nas estruturas e em seguida aplicada uma técnica de otimização, denominada Evolução Diferencial (Estocástico). Vigas com diferentes carregamentos e grandezas de danos foram testadas apresentando resultados coerentes.

Palavras-chave: Otimização; Problemas Inversos; Identificação de Danos; Método dos Elementos Finitos; ANSYS; Evolução Diferencial.

D.3 Artigos em Desenvolvimento e a Serem Submetidos

- Dynamic Analysis Using Additional Rove Mass with Differential Evolution Algorithm Envolving Experimental and Numerical Data for Identification of Structural Damage in Steel Beams (under preparation and to be submitted)

- Proposed a Damage Analysis Equation with Numerical Data for Location and Identification of Structural Damage (under preparation and to be submitted)