

**ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA
INVERSO APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE DANOS
ESTRUTURAIS COM O USO DO MEF**

BRUNNO EMIDIO SOBRINHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO 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**

**ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA
INVERSO APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE DANOS
ESTRUTURAIS COM O USO DO MEF**

BRUNNO EMIDIO SOBRINHO

ORIENTADOR: GILBERTO GOMES

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

PUBLICAÇÃO: E.DM-020A/15

**BRASÍLIA, DF
2015**

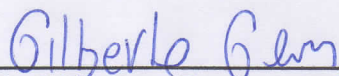
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA INVERSO
APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS COM
O USO DO MEF

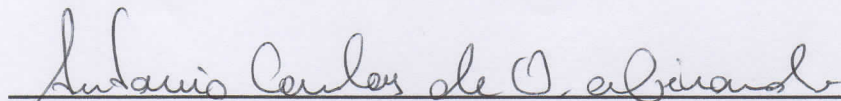
BRUNNO EMIDIO SOBRINHO

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


APROVADA POR:




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



Prof. Antonio Carlos de Oliveira Miranda, DSc (ENC/UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Carlos Eduardo Luna de Melo, DSc (FAU/UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Carla Tatiana Mota Anflor, DSc (FGA/UnB)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA, 03 DE SETEMBRO DE 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

SOBRINHO, BRUNNO EMIDIO. Algoritmos de Otimização e o Problema Inverso Aplicados à Identificação de Danos Estruturais com o uso do MEF. [Distrito Federal] 2015. xxxviii, 169p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2015). Dissertação de Mestrado – 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	
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOBRINHO, B. E. (2015). Algoritmos de Otimização e o Problema Inverso Aplicados à Identificação de Danos Estruturais com o Uso do MEF. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-020A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruno Emidio Sobrinho

TÍTULO: Algoritmos de Otimização e o Problema Inverso Aplicados à Identificação de Danos Estruturais com o Uso do MEF.

GRAU: Mestre ANO: 2015

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



Brunno Emidio Sobrinho
QUADRA 45, conjunto M casa 50 – Brazlândia.
72.745-000 Brasília - DF- Brasil
e-mail: br_emidio@yahoo.com.br

Dedicatória.

Aos meus Pais Rosilane Emidio e Joilde de Moraes

Aos meus irmãos Hudson Emidio e Talita Maria Emidio

Aos meus familiares em geral

Aos meus amigos 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.

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, amigos e pessoas iluminadas que Deus colocou nos meus caminhos pelo apoio e orações incondicionais.

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

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

Aos meus amigos, o doutor Ramon Saleno, o doutorando Erwin Ulises, o doutorando Robinson Zuluaga, os mestrandos Welington Vital e José Fabiano pela colaboração e amizade.

Aos amigos e colegas de trabalho, da empresa Dinamiza, que sempre me deram o apoio e suporte necessário, incentivando na concretização deste sonho.

A uma pessoa especial que entrou em minha vida recentemente, sempre me incentivando e me apoiando muito na busca pela finalização de mais uma etapa em minha vida.

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 pelas inúmeras ajudas, companheirismo e solidariedade, que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desta dissertação de mestrado.

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

Albert Einstein.

RESUMO

ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA INVERSO APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS COM O USO DO MEF

Autor: Brunno Emidio Sobrinho

Orientador: Gilberto Gomes, DSc

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Setembro de 2015

Os trabalhos com erros e incertezas oriundos da utilização de modelos numéricos e experimentais, têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores tanto na simulação do comportamento físico real quanto na otimização da resposta estrutural, principalmente devido às dificuldades encontradas, por exemplo, na modelagem da rigidez de conexões, das condições de apoio ou dos parâmetros relevantes em estruturas que envolvem danos. Assim, propor uma metodologia que melhor represente as respostas das estruturas aos carregamentos, de forma sistemática e sem negligenciar as simplificações, é propor técnicas de otimização de estruturas capazes de formular matematicamente um problema, em busca da resposta ótima. Isto é, 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 contexto, este trabalho apresenta um estudo de ajuste de estruturas de vigas metálicas modeladas pelo Método de Elementos Finitos (MEF) e baseado em dados experimentais estáticos (deslocamentos), através dos Problemas Inversos, para melhor compreender o comportamento físico real das estruturas, e da aplicação de uma técnica de otimização, denominada Evolução Diferencial, para simulação e identificação de danos. Uma série de vigas com diferentes carregamentos e posições de danos foram simulados para comprovar a eficácia do algoritmo, apresentando resultados consistentes.

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

ABSTRACT

OPTIMIZATION ALGORITHMS AND THE INVERSE PROBLEMS APPLIED TO THE STRUCTURAL DAMAGE IDENTIFICATION WITH THE USE OF FEM

Author: Bruno Emidio Sobrinho

Supervisor: Gilberto Gomes, DSc

Graduate Program in Structures and Civil Construction

Brasilia, September of 2015

Works with errors and uncertainties arising from the use of numerical models and experimental have been studied by many researchers both in simulation of real physical behavior as optimization of the structural response, mainly due to the difficulties encountered for example in modeling the rigidity of connections, the supporting conditions or parameters relevant structures that involve damage. Thus propose a methodology that best represents the responses of structures to loading, systematically and without neglecting the simplifications, it is to propose structural optimization techniques to mathematically formulate a problem in search of the optimal response. That is, from a numerical method to get a frame configuration that results in a great performance, whether due care some criteria of maximum rigidity, is to satisfy restrictions both on the design variables as on the behavior of the structure (failure stress, frequency, mode, displacement). In this context, this work presents a study of metal beams structures adjustment modeled by the Finite Element Method (FEM) and based on static experimental data (displacement) through Inverse Problems, to better understand the real physical behavior of structures, and applying an optimization technique named Differential Evolution, for simulation and damage identification. A series of beams with various loads and positions damage were simulated to demonstrate the effectiveness of this algorithm, with consistent results.

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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONCEITOS E GENERALIDADES	5
1.1.1 Os algoritmos de otimização	7
1.1.2 Os Problemas Inversos	8
1.1.3 Influência dos danos numa estrutura	9
1.1.4 O MEF	10
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	11
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	13
2. FORMULAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS.....	15
2.1.1 As respostas dos métodos de identificação de danos	18
2.1.2 Respostas por meio de métodos estáticos e a variação dos mesmos.....	18
2.1.3 Utilização de técnicas de otimização.....	20
2.1.3.1 O método da viga conjugada	21
3. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	24
3.1.1 Apresentação do Método Clássico: Método do Gradiente	25
3.1.2 Método de Evolução Diferencial.....	28
3.1.2.1 Evolução Diferencial: População	30
3.1.2.2 Evolução Diferencial: Mutaç�o.....	31
3.1.2.3 Evolu�o Diferencial: Cruzamento (Crossover).....	32
3.1.2.4 Evolu�o Diferencial: Sele�o.....	32
3.1.2.5 Evolu�o Diferencial: Crit�rio de parada	33
3.2 COMPORTAMENTO GERAL: M�TODOS DE EVOLU�O DIFERENCIAL....	35
3.2.1 Comportamento do M�todo de Evolu�o Diferencial na busca por um m�nimo global de uma fun�o.....	36
4. METODOLOGIA.....	41
4.1 INTRODU�O �S AN�LISES REALIZADAS.....	42
4.2 AN�LISE EXPERIMENTAL.....	44
4.2.1 Instrumenta�o	46

4.3	ANÁLISE NUMÉRICA.....	48
4.3.1	Características dos elementos utilizados na modelagem com o Programa ANSYS.....	48
4.3.1.1	Elemento BEAM3	48
4.3.1.2	Elemento SHELL63	51
4.4	ANÁLISE COM O MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL.....	55
5.	APLICAÇÃO E RESULTADOS	56
5.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL NA AVALIAÇÃO DE DANOS EM VIGAS	57
5.1.1	Análise Estática da Viga 2 (V2E).....	60
5.1.1.1	Viga 2 (V2E): carga 1020N.....	60
5.1.1.2	Viga 2 (V2E): carga 1320N.....	63
5.1.1.3	Viga 2 (V2E): carga 2280N.....	65
5.1.1.4	Viga 2 (V2E): carga 3330N.....	68
5.1.1.5	Viga 2 (V2E): carga 4200N.....	71
5.1.1.6	Considerações gerais de resultados da viga 2 (V2E).....	74
5.1.2	Análise Estática da Viga 3 (V2E-2)	74
5.1.2.1	Viga 3 (V2E-2): carga 990N	74
5.1.2.2	Viga 3 (V2E-2): carga 2040N	77
5.1.2.3	Viga 3 (V2E-2): carga 3060N	79
5.1.2.4	Viga 3 (V2E-2): carga 3990N	82
5.1.2.5	Viga 3 (V2E-2): carga 4530N	85
5.1.2.6	Considerações gerais de resultados da viga 3 (V2E-2)	88
5.1.3	Análise Estática da Viga 4 (V3E).....	88
5.1.3.1	– Viga 4 (V3E): carga 960N.....	89
5.1.3.2	Viga 4 (V3E): carga 2040N.....	91
5.1.3.3	Viga 4 (V3E): carga 3120N.....	94
5.1.3.4	Viga 4 (V3E): carga 4350N.....	97
5.1.3.5	Viga 4 (V3E): carga 4620N.....	100
5.1.3.6	Considerações gerais de resultados da viga 4 (V3E).....	103
5.1.4	Análise Estática da Viga 5 (V4E).....	104
5.1.4.1	Viga 5 (V4E): carga 1000N.....	104
5.1.4.2	Viga 5 (V4E): carga 2000N.....	106

5.1.4.3	Viga 5 (V4E): carga 3000N.....	108
5.1.4.4	Viga 5 (V4E): carga 4000N.....	110
5.1.4.5	Considerações gerais de resultados da viga 5 (V4E).....	112
5.1.5	Análise Estática da Viga 6 (V5E).....	112
5.1.5.1	Viga 6 (V5E): carga 1000N.....	112
5.1.5.2	Viga 6 (V5E): carga 2000N.....	114
5.1.5.3	Viga 6 (V5E): carga 3000N.....	116
5.1.5.4	Viga 6 (V5E): carga 4000N.....	118
5.1.5.5	Considerações gerais de resultados da viga 6 (V5E).....	120
6.	CONCLUSÕES.....	122
6.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
	APÊNDICE.....	130
	APÊNDICE A. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA INTACTA DAS VIGAS - ELEMENTO BEAM3.....	131
	APÊNDICE B. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA DANIFICADA DAS VIGAS - ELEMENTO BEAM3.....	134
	APÊNDICE C. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA INTACTA DAS VIGAS - ELEMENTO SHELL63.....	137
	APÊNDICE D. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA DANIFICADA DAS VIGAS - ELEMENTO SHELL63.....	143
	APÊNDICE E. OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DOS DESLOCAMENTOS MEDIDOS NA ANÁLISE EXPERIMENTAL ESTÁTICA (PALECHOR, 2013)...	150
	APÊNDICE F. OBTENÇÃO DE RESULTADOS DOS DESLOCAMENTOS MEDIDOS - ANÁLISE NUMÉRICA ESTÁTICA (BEAM3, SHELL63 E EULER- BERNOULLI) 152	
1.	OBTENÇÃO DE RESULTADOS: ELEMENTO BEAM3.....	152
2.	OBTENÇÃO DE RESULTADOS: ELEMENTO SHELL63.....	158
3.	OBTENÇÃO DE RESULTADOS: EULER-BERNOULLI.....	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Método da viga conjugada e equações relacionadas	21
Tabela 3.1 – Esquema do comportamento das variáveis envolvidas no Método de Evolução Diferencial	34
Tabela 4.1 – Características dos elementos utilizados na modelagem numérica	43
Tabela 4.2 – Características geométricas e do material das vigas testadas	44
Tabela 4.3 – Características do elemento BEAM3.....	49
Tabela 4.4 – Constantes reais: modelagem numérica elemento BEAM3	50
Tabela 4.5 – Diminuição da inércia do elemento danificado na modelagem numérica – elemento BEAM3	51
Tabela 4.6 – Características do elemento SHELL63.....	53
Tabela 4.7 – Valores obtidos da diminuição da seção transversal da viga.....	55
Tabela 5.1 - Análise Estática: Viga V1E intacta	56
Tabela 5.2 - Panoramas de vigas em geral para análise estática	58
Tabela 5.3 – Tabela resumo: Viga V2E carga 1020N.....	62
Tabela 5.4 – Tabela resumo: Viga V2E carga 1320N.....	64
Tabela 5.5 – Tabela resumo: Viga V2E carga 2280N.....	67
Tabela 5.6 – Tabela resumo: Viga V2E carga 3330N.....	70
Tabela 5.7 – Tabela resumo: Viga V2E carga 4200N.....	73
Tabela 5.8 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 990N.....	76
Tabela 5.9 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 2040N.....	78
Tabela 5.10 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 3060N.....	81
Tabela 5.11 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 3990N.....	84
Tabela 5.12 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 4530N.....	87
Tabela 5.13 – Tabela resumo: Viga V3E carga 960N.....	90
Tabela 5.14 – Tabela resumo: Viga V3E carga 2040N.....	93
Tabela 5.15 – Tabela resumo: Viga V3E carga 3120N.....	96
Tabela 5.16 – Tabela resumo: Viga V3E carga 4350N.....	99
Tabela 5.17 – Tabela resumo: Viga V3E carga 4620N.....	102
Tabela 5.18 – Tabela resumo: Viga V4E carga 1000N.....	105
Tabela 5.19 – Tabela resumo: Viga V4E carga 2000N.....	107
Tabela 5.20 – Tabela resumo: Viga V4E carga 3000N.....	109

Tabela 5.21 – Tabela resumo: Viga V4E carga 4000N.....	111
Tabela 5.22 – Tabela resumo: Viga V5E carga 1000N.....	114
Tabela 5.23 – Tabela resumo: Viga V5E carga 2000N.....	116
Tabela 5.24 – Tabela resumo: Viga V5E carga 3000N.....	118
Tabela 5.25 – Tabela resumo: Viga V5E carga 4000N.....	120
Tabela E.1- Deslocamentos verticais U_y - Viga V2E	150
Tabela E.2- Deslocamentos verticais U_y - Viga V2E-2.....	150
Tabela E.3- Deslocamentos verticais U_y - Viga V3E	151
Tabela F.1 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E (BEAM3).....	152
Tabela F.2 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E (BEAM3)	153
Tabela F.3 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E-2 (BEAM3).....	153
Tabela F.4 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E-2 (BEAM3).....	154
Tabela F.5 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V3E (BEAM3).....	154
Tabela F.6 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V3E (BEAM3)	155
Tabela F.7 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V4E (BEAM3).....	155
Tabela F.8 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V4E (BEAM3)	156
Tabela F.9 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V5E (BEAM3).....	156
Tabela F.10 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V5E (BEAM3)	157
Tabela F.11 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E (SHELL63).....	158
Tabela F.12 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E (SHELL63)	159
Tabela F.13 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E-2 (SHELL63).....	159
Tabela F.14 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E-2 (SHELL63)....	160
Tabela F.15 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V3E (SHELL63).....	160
Tabela F.16 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V3E (SHELL63)	161
Tabela F.17 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V4E (SHELL63).....	161
Tabela F.18 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V4E (SHELL63)	162
Tabela F.19 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V5E (SHELL63).....	162
Tabela F.20 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V5E (SHELL63)	163
Tabela F.21 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E (EULER-BERNOULLI)	164
Tabela F.22 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E (EULER- BERNOULLI).....	165
Tabela F.23 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E-2 (EULER- BERNOULLI).....	165

Tabela F.24 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E-2 (EULER-BERNOULLI).....	166
Tabela F.25 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V3E (EULER-BERNOULLI).....	166
Tabela F.26 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V3E (EULER-BERNOULLI).....	167
Tabela F.27 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V4E (EULER-BERNOULLI).....	167
Tabela F.28 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V4E (EULER-BERNOULLI).....	168
Tabela F.29 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V5E (EULER-BERNOULLI).....	168
Tabela F.30 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V5E (EULER-BERNOULLI).....	169

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Perfis diversos de vigas metálicas.....	3
Figura 1.2 – Situação deformada de uma viga metálica biapoiada perfil “I” sob flexão	3
Figura 1.3 – Tipos de danos em vigas metálicas com naturezas diversas.....	5
Figura 2.1 – Elemento Finito tipo viga.....	18
Figura 2.2 – 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).....	22
Figura 3.1 – Métodos de otimização	24
Figura 3.2 – Diminuição de gradiente (verde) e gradiente conjugado (vermelho).....	26
Figura 3.3 – Fluxograma do método de Evolução Diferencial – DE (Suveges, 2014)	34
Figura 3.4 – Superfície 3-D da função	35
Figura 3.5 - 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	36
Figura 3.6 - 2ª Geração: Representação gráfica do valor mínimo da função objetivo e seu comportamento à cada geração	37
Figura 3.7 - 2ª Geração: Representação gráfica da distribuição da diferença vetorial entre os indivíduos no espaço de projeto à cada geração	37
Figura 3.8 - Representação gráfica da evolução das gerações onde os pontos tendem a convergir para a região em que se encontra o mínimo global da função	38
Figura 3.9 - Representação gráfica dos indivíduos quando se iniciam um processo migratório para a região que apresente o menor valor da função objetivo.....	39
Figura 3.10 - 15ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência para a região que possui um ponto de mínimo.....	39
Figura 3.11 - 25ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência final para a região que possui um ponto de mínimo	40
Figura 4.1 - Fluxograma geral da pesquisa para otimização (DE), identificação e quantificação de dano	41
Figura 4.2 – Panorama das vigas ensaiadas (Palechor, 2013).....	42
Figura 4.3 – Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)	43

Figura 4.4 – Panorama das vigas: (a) demonstração da viga em 16 elementos e (b) danos induzidos de 2cm e 4cm (Palechor, 2013).....	45
Figura 4.5 – Simulações das condições de apoio das vigas (Palechor, 2013).....	46
Figura 4.6 – Detalhe dos LVDT's (a), posicionamento dos LVDT's no lado esquerdo (b) e posicionamento dos LVDT's no lado direito (c) - (Palechor, 2013).....	47
Figura 4.7 – Detalhamentos da célula de carga (Palechor, 2013).....	47
Figura 4.8 – Elemento BEAM3 (ANSYS, 2007).....	48
Figura 4.9 – Análise de convergência da malha do elemento BEAM3.....	49
Figura 4.10 – Malha da viga com o elemento BEAM3 (ANSYS, 2007).....	50
Figura 4.11 – Simulação do dano: elemento BEAM3 (ANSYS, 2007).....	51
Figura 4.12 – Apoios viga-elemento: BEAM3 (ANSYS, 2007).....	51
Figura 4.13 – Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007).....	52
Figura 4.14 - Convergência da malha do elemento SHELL63.....	53
Figura 4.15 – Malha gerada no ANSYS – Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007).....	54
Figura 4.16 – Condições de contorno: elemento SHELL63 (ANSYS, 2007).....	54
Figura 4.17 – Simulação do dano: elemento SHELL63 (ANSYS, 2007).....	55
Figura 5.1 – Viga intacta utilizada para verificação de confiabilidade de resultados obtidos pelos métodos utilizados.....	56
Figura 5.2 – Análise gráfica comparativa dos deslocamentos estáticos obtidos com os métodos utilizados.....	57
Figura 5.3 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1020N).....	61
Figura 5.4 - Identificação de dano: Viga V2E carga 1020N.....	61
Figura 5.5 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1020N).....	62
Figura 5.6 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1320N).....	63
Figura 5.7 - Identificação de dano: Viga V2E carga 1320N.....	64
Figura 5.8 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1020N).....	65
Figura 5.9 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 2280N).....	66
Figura 5.10 - Identificação de dano: Viga V2E carga 2280N.....	66

Figura 5.11 - Viga V2E carga 2280N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	67
Figura 5.12 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 3330N).....	68
Figura 5.13 - Identificação de dano: Viga V2E carga 3330N.....	69
Figura 5.14 - Viga V2E carga 3330N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	70
Figura 5.15 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 4200N).....	71
Figura 5.16 - Identificação de dano: Viga V2E carga 4200N.....	72
Figura 5.17 - Viga V2E carga 4200N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	73
Figura 5.18 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 990N).....	75
Figura 5.19 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 990N.....	75
Figura 5.20 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 990N).....	77
Figura 5.21 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 2040N).....	77
Figura 5.22 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 2040N.....	78
Figura 5.23 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 2040N).....	79
Figura 5.24 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 3060N).....	80
Figura 5.25 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3060N.....	80
Figura 5.26 - Viga V2E-2 carga 3060N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	81
Figura 5.27 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 3990N).....	82
Figura 5.28 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3990N.....	83

Figura 5.29 - Viga V2E-2 carga 3990N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	84
Figura 5.30 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 4530N).....	85
Figura 5.31 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 4530N.....	86
Figura 5.32 - Viga V2E-2 carga 4530N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	87
Figura 5.33 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 960N).....	89
Figura 5.34 - Identificação de dano: Viga V3E carga 960N.....	90
Figura 5.35 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 960N).....	91
Figura 5.36 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 2040N).....	91
Figura 5.37 - Identificação de dano: Viga V3E carga 2040N.....	92
Figura 5.38 - Viga V3E carga 2040N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	93
Figura 5.39 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 3120N).....	94
Figura 5.40 - Identificação de dano: Viga V3E carga 3120N.....	95
Figura 5.41 - Viga V3E carga 3120N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	96
Figura 5.42 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 4350N).....	97
Figura 5.43 - Identificação de dano: Viga V3E carga 4350N.....	98
Figura 5.44 - Viga V3E carga 4350N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	99
Figura 5.45 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 4620N).....	100

Figura 5.46 - Identificação de dano: Viga V3E carga 4620N	101
Figura 5.47 - Viga V3E carga 4620N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b).....	102
Figura 5.48 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 1000N).....	104
Figura 5.49 - Identificação de dano: Viga V4E carga 1000N	105
Figura 5.50 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 2000N)	106
Figura 5.51 - Identificação de dano: Viga V4E carga 2000N	107
Figura 5.52 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 3000N)	108
Figura 5.53 - Identificação de dano: Viga V4E carga 3000N	109
Figura 5.54 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 4000N).....	110
Figura 5.55 - Identificação de dano: Viga V4E carga 4000N	111
Figura 5.56 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 1000N)	113
Figura 5.57 - Identificação de dano: Viga V5E carga 1000N	113
Figura 5.58 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 2000N)	115
Figura 5.59 - Identificação de dano: Viga V5E carga 2000N	115
Figura 5.60 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 3000N).....	117
Figura 5.61 - Identificação de dano: Viga V5E carga 3000N	117
Figura 5.62 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 4000N)	119
Figura 5.63 - Identificação de dano: Viga V5E carga 4000N	119

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A	Área
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
MEF	Métodos dos Elementos Finitos
Nd	Número de elementos danificados
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
$g(x)$	Função de restrição g
$h(x)$	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
I_{NP}	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 (crossover) 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
ND	Número de elementos danificados
MPa	Megapascal
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
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 trabalhos com erros e incertezas oriundos da utilização de modelos numéricos e experimentais, por meio do processo de otimização estão se tornando cada vez mais pesquisados. Muitas vezes se acaba não simulando o comportamento real das estruturas devido à dificuldade na modelagem da rigidez de conexões, condições de apoio e levando em consideração alguns parâmetros da realidade relevantes, distorcendo muito os resultados obtidos, principalmente quando são envolvidos danos. Esse processo envolve uma adequação matemática dos modelos numéricos a partir de medidas experimentais.

Uma área multidisciplinar que vem apresentando grande crescimento, e também tem grandes potencialidades na compreensão do comportamento físico real da estrutura, principalmente quando se envolvem danos, são os problemas inversos, que entram principalmente quando se desconhece parâmetros de entrada necessários para a análise direta de um problema.

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).

Como o processo de otimização tem o intuito de aproximar o comportamento do modelo numérico aos dados modais experimentais, de modo a torná-lo mais preciso, sendo que o mesmo busca aproximar o comportamento do modelo numérico ao modelo/dados experimentais no intuito de aumentar sua precisão.

Esse processo constitui-se essencialmente de:

Otimização → Refinamento → Fases } $\left. \begin{array}{l} \text{Manual} \\ \text{Automática} \end{array} \right\}$

Ainda 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 (Rus e Gallego, 2002).

Em termos de classificação, 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.

Lopes (2010), aborda o uso de métodos de identificação de parâmetros ou de otimização podem solucionar tais problemas, 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 requerem aplicações de métodos com uma maior precisão.

As vigas são elementos estruturais 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 escolha está ligada principalmente com a precisão de cada projeto.

As vigas possuem enorme importância, pois são estas que propiciam capacidade de suporte para as estruturas de um edifício, de uma ponte, de uma barragem, dentre outras funcionalidades e aplicações. 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 constituem elementos obrigatórios no dimensionamento de estruturas simples ou complexas. 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. Os diversos perfis de vigas metálicas existentes podem ser observados na Figura 1.1 seguinte.

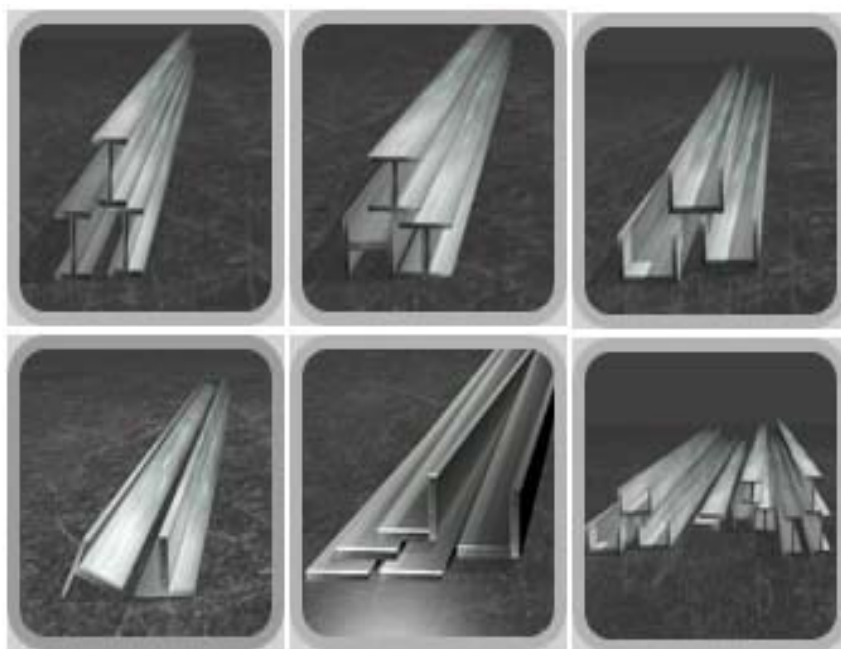


Figura 1.1 – Perfis diversos de vigas metálicas

As vigas metálicas produzidas em uma forma que sua seção transversal se parece com uma letra "I", são concebidas com duas chapas de aço colocadas a 90 graus de uma chapa principal e correndo por todo o comprimento da mesma, para evitar a torção ou flexão. O comportamento de uma viga metálica perfil "I" flexionada pode ser observada na Figura 1.2 a seguir.



Figura 1.2 – Situação deformada de uma viga metálica biapoiada perfil "I" sob 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 criação de ferramentas computacionais capazes de realizar análises estruturais complexas de estruturas ousadas com um elevado grau de precisão.

A identificação de danos tem como objetivos, segundo Volkmar (2002), a detecção 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 que determinadas propriedades são alteradas pelo dano, o que é possível somente pela detecção de determinadas irregularidades ou alterações da resposta da estrutura.

Com isso a identificação de um sistema que descreve a relação entre uma entrada e uma saída conhecida, é um dos objetivos dos sistemas de identificação de danos que é a solução do problema inverso.

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 à corrosão, que é um tipo de deterioração que pode ser facilmente encontrada em elementos estruturais de obras desse tipo. 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 do material 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, podem ser observados na Figura 1.3 seguinte.



Figura 1.3 – Tipos de danos em vigas metálicas com naturezas diversas

Muitas vezes, fica nítido que a manutenção, quando ocorre, somente de forma corretiva e só vem a ser realizada quando a obra está no limiar do seu estado limite de utilização ou já de colapso. O tema conservação só fica em evidência quando acontece um acidente estrutural com alguma obra importante, daí a importância de temas correlatos.

1.1 CONCEITOS E GENERALIDADES

O processo de otimização tem o intuito de aproximar o comportamento do modelo numérico aos dados experimentais, de modo a torná-lo mais preciso. Já os danos podem indicar variações em parâmetros de rigidez e de massa de uma estrutura. Para identificação/detecção de danos utilizam-se métodos de ensaios destrutivos e os não destrutivos, que auxiliam na detecção 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 refinada.

A resolução dos problemas, após a definição de suas formulações, principalmente pela análise de uma Função Objetivo, que é uma função que associa cada ponto 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 serão diferentes. Depreende-se disso, que um método aleatório não executará a mesma seqüência de operações em duas execuções sucessivas. Partindo de um mesmo ponto inicial, cada execução do código seguirá o seu próprio caminho, e possivelmente levará a uma resposta final diferente.

Outro ponto, é que nitidamente encontra-se uma dificuldade atualmente em se detectar danos em estruturas. Muitas vezes, para se encontrar essas singularidades são necessárias aplicações de métodos com essa precisão necessária. Como por exemplo, a utilização do Método de Evolução Diferencial.

Um processo que foi muito utilizado para detecção de danos foi a inspeção visual, mas que perdeu sua eficiência em função da complexidade das estruturas que foram surgindo.

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. O que segundo Peña (2013), a otimização de modelos é essencialmente um procedimento de ajuste de determinados parâmetros do modelo numérico em elementos finitos.

1.1.1 Os algoritmos de otimização

Os algoritmos numéricos para solução de problemas de otimização são essencialmente classificados em métodos de programação matemática e métodos probabilísticos. A diferença essencial dos 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 fornecem 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 o mínimo global. 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 ser chamado de f , que minimiza a diferença 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 representa as grandezas medidas no experimento. Tudo isto está inserido no contexto de otimização.

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

- Função objetivo: é a função matemática, $f(p)$, cujo mínimo 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, em cujo interior ou fronteira se localiza o ótimo da função objetivo.

Sua eficiência é alcançada por meio de uma boa escolha da função objetivo e das variáveis de projeto.

Os algoritmos de otimização carregam formulações matemáticas bem definidas, em que um conjunto de variáveis descreve o sistema, denominadas 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).

1.1.2 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 direto, 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 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 Kubo (1988) e Tikhonov e Arsenin (1977) este tipo de problema é classificado 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).

Com base na observação dos efeitos determinados pelas causas é que se pode obter a solução de um problema inverso.

1.1.3 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 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), 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.

1.1.4 O 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 Zienkiewicz e Taylor (2000), Bathe (1996), 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 mesmo será utilizado na modelagem das vigas metálicas a serem avaliadas nessa pesquisa.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Com o efervescente crescimento do setor da construção civil e do rápido surgimento da necessidade de investimento no Brasil em infraestrutura, e 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.

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 é justificado pela utilidade em se conhecer o comportamento estrutural das vigas sob as condições de mecanismos de deterioração e desta forma possibilitar 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).

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, utilizando métodos de otimização, simulando danos nas estruturas e aplicando técnicas de identificação de danos.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa proposta é fazer uma abordagem teórica e numérica do comportamento de elementos estruturais danificados, usando problemas inversos e processos de otimização.

1.2.2 Objetivos específicos

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

- Ajustar estruturas de vigas metálicas modeladas pelo Método de Elementos Finitos (MEF) baseado em dados experimentais estáticos (deslocamentos), 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 do Método de Evolução Diferencial (Estocástico), testando a eficiência do mesmo para tal finalidade;
- Serão implementadas também todas as rotinas de otimização em MATLAB por meio das ferramentas desenvolvidas por Price e Storn (2009).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é constituído de seis capítulos. O primeiro capítulo é dedicado à introdução do tema proposto, alguns conceitos e generalidades, bem como a motivação e os objetivos da pesquisa. No segundo capítulo, apresenta-se 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 utilizados para identificar os danos em uma estrutura. Além disso, são apresentados alguns trabalhos já desenvolvidos na área de detecção de danos, otimização, problemas inversos e elementos finitos.

O terceiro capítulo mostra os conceitos fundamentais relacionados à área da pesquisa; uma descrição geral da história da otimização. Neste capítulo, também são apresentados os diferentes métodos de otimização utilizados ou não no processamento de dados desta pesquisa.

O quarto capítulo, por sua vez, apresenta a metodologia utilizada, mostrando a descrição da análise numérica e experimental, as diferentes condições nas quais as vigas foram ensaiadas, além de apresentar os resultados obtidos com a identificação de danos. Nesse mesmo capítulo apresenta a análise numérica desenvolvida no programa ANSYS.

Já no quinto capítulo, apresenta-se a aplicação e os resultados obtidos com a metodologia proposta através do Método de Evolução Diferencial, em conjunto com as considerações geradas para cada modelo analisado.

Finalmente, o quinto capítulo reporta as conclusões obtidas neste trabalho e às propostas para trabalhos futuros.

Por fim, há ainda os apêndices gerados, contendo alguns dados necessários para um melhor entendimento da pesquisa desenvolvida.

2. 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.

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) seguinte (matriz de rigidez e massa) origina um problema de autovalores para um sistema sem amortecimento, por meio de um modelo analítico.

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

Onde,

$[K]$: matriz de rigidez;

ω_i^2 : i-ésimo autovalor;

$[M]$: matriz de massa;

$[q_i]$: i-ésimo autovetor.

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

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

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

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 Equação (2.3) seguinte.

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

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.

Esta pesquisa está limitada ao uso apenas de respostas estáticas (deslocamentos), sendo assim a uma única variável, onde o dano entra modificando 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:

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

Onde,

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.

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. 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 armazenados, e também como cada elemento de viga será modificada 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,

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 nesta modelagem 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 2.1 a seguir.

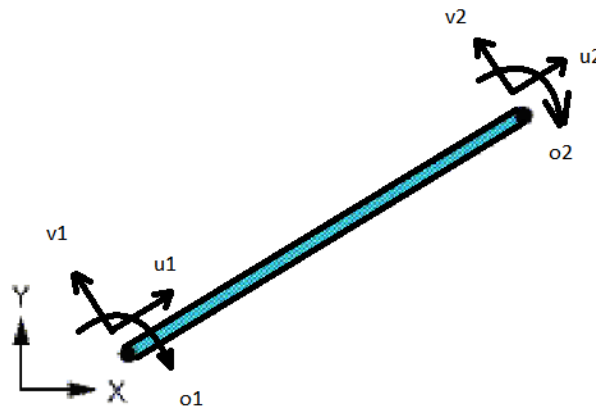


Figura 2.1 – Elemento Finito tipo viga

2.1.1 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 e dos modos de vibração. Aborda-se aqui então, nessa pesquisa, os métodos de identificação de danos que utilizam a resposta estática.

2.1.2 Respostas por meio de métodos estáticos e a variação dos mesmos

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, já demonstrada anteriormente. Seguindo com o vetor de deslocamentos x calculado por meio da Equação (2.6) a seguir.

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

Trabalhando-se a equação de equilíbrio da estrutura, agora numa situação danificada, agora 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 deslocamento vetor x^* por meio da aproximação de primeira ordem 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.

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

Onde:

ND : número de elementos danificados;

B_i : matriz Booleana correspondente ao i -ésimo elemento;

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

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

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

Onde:

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.

2.1.3 Utilização de técnicas de otimização

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 (2.12) observa-se:

$$X = (\beta_1, \beta_2, \dots, \dots, \beta_{nl},) \quad (2.12)$$

Onde:

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 (2.13) seguinte.

$$F = \sum_{i=1}^{nn} \left| \frac{D_i^M}{D_i^C} - 1 \right| \quad (2.13)$$

Em que:

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

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

nn : número de nós do sistema.

2.1.3.1 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 2.1).

Tabela 2.1- Método da viga conjugada e equações relacionadas

VIGA: REAL	VIGA: FICTÍCIA	EQUAÇÕES
Momento: M	Carga (M/EI)	$Pendente = \frac{dy}{dx} \quad (2.14)$
Ângulo	Cortante	$Momento(M) = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.15)$
Flecha	Momento	$Cisalhamento = \frac{d^3y}{dx^3} \quad (2.16)$
		$Carga(q) = \frac{d^4y}{dx^4} \quad (2.17)$

O momento correspondente na viga conjugada é numericamente igual a carga estática P_j e M_j/E_jI_j e o deslocamento de qualquer ponto da viga real. Tem-se também P_j ,

que é a carga do j ésimo elemento e δ_{ij} que é o deslocamento no nó i devido à carga unitária. A Figura 2.2 seguinte apresenta esses panoramas.

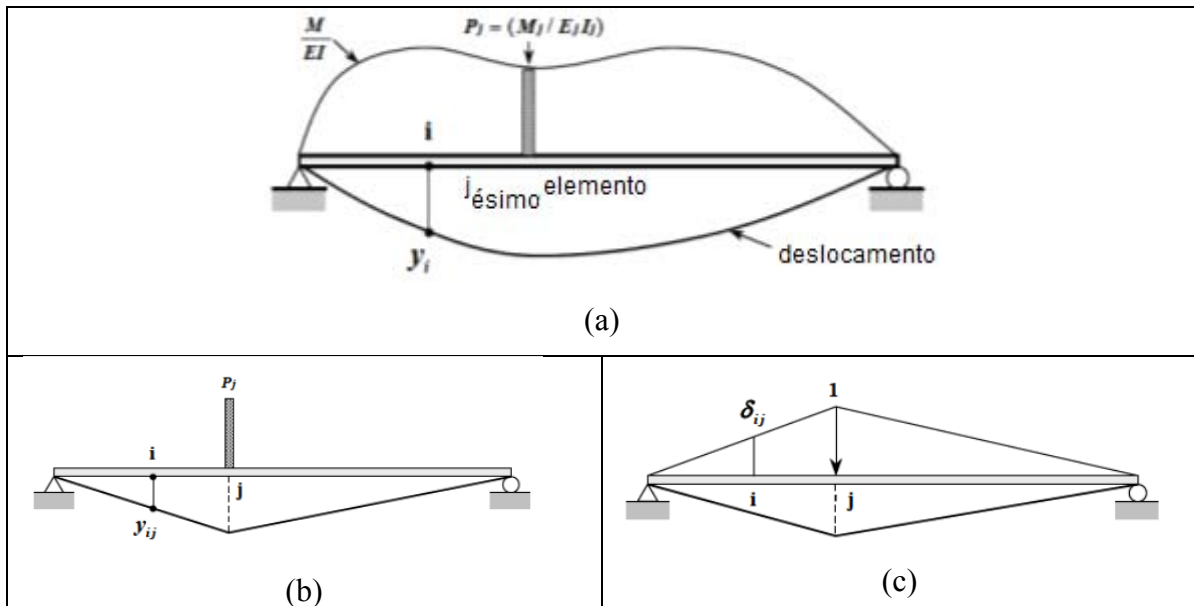


Figura 2.2 – Viga conjugada: (a) viga fictícia, (b) carga estática P_j que provoca o deslocamento e (c) carga estática unitária no j ésimo elemento que também provoca o deslocamento (Choi, 2002)

O deslocamento, devido à carga estática do elemento j ésimo, pode ser obtido pela Equação (2.18) e com a aplicação do método da superposição, os deslocamentos podem ser obtidos pela Equação (2.19).

$$y_{ij} = \delta_{ij} P_j \quad (2.18)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^{nl} y_{ij} \quad (2.19)$$

Onde:

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.

O momento real pode ser facilmente calculado se as cargas aplicadas na viga real forem conhecidas. Observe a Equação (2.20):

$$y_i = \sum_{j=1}^{nl} \delta_{ij} P_j \quad (2.20)$$

Define-se o dano do elemento como a redução da rigidez à flexão, obtido por meio da Equação (2.21).

$$E_j I_j = \beta_j E_{j0} I_{j0} \quad (2.21)$$

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 (2.22).

$$y_i = \sum_{j=1}^{nl} \alpha_j \delta_{ij} P_{j0} \quad (2.22)$$

Onde:

$$P_{ij} = \delta_{ij} P_{j0} \quad (2.23)$$

A Equação (2.24) pode ser expressa como forma de matriz, em que Y e α são o vetor deslocamento e o índice de dano do elemento respectivamente; P é a matriz P_{ij} .

$$Y = P \alpha \quad (2.24)$$

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.

3. 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. 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 a explosão 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 3.1 seguinte mostra o fluxograma com métodos de otimização principais.

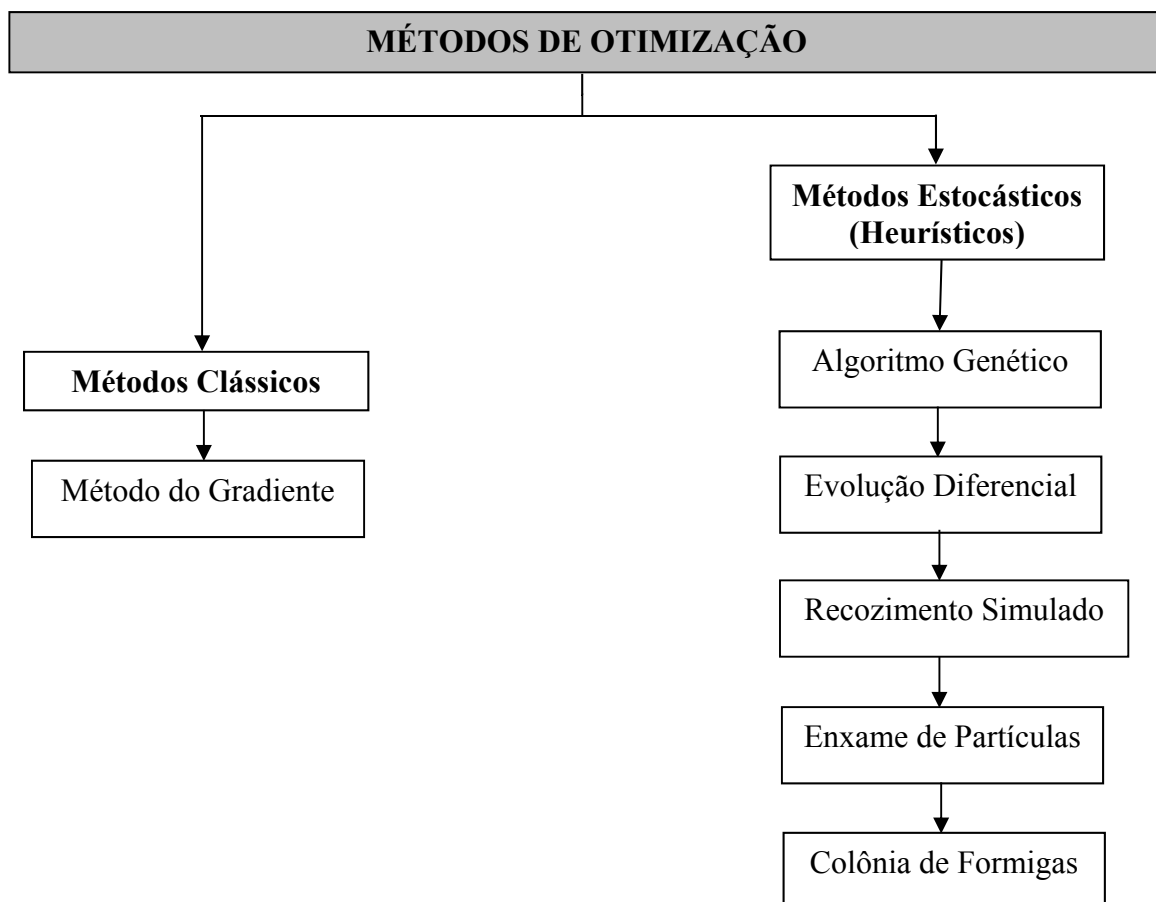


Figura 3.1 – Métodos de otimização

Dentro dos Métodos Estocásticos pode-se citar também o Método do Recozimento Simulado, Método do Algoritmo Genético, Método do Enxame de Partículas, Método da Colônia de Formigas, dentre outros.

O Método do Recozimento Simulado (*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. Já o Método do Algoritmo Genético (*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. O Método do Enxame de Partículas (*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. O Método da Colônia de Formigas (*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.

3.1.1 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 convexas com a seguinte Equação (3.1) da forma:

$$f(x) = \frac{1}{2} x^T A x - x^T b \quad (3.1)$$

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 3.2 a seguir mostra um exemplo de aplicação do mesmo.

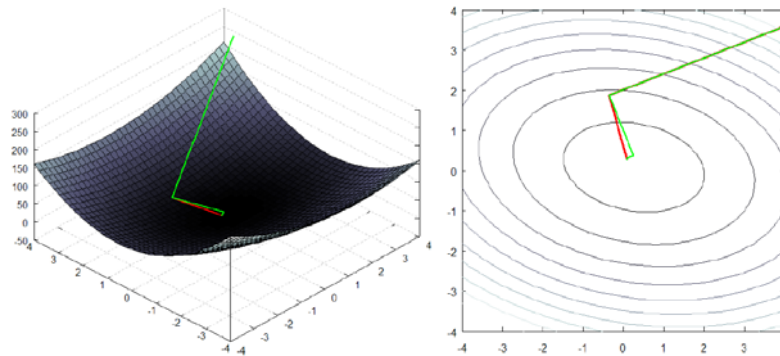


Figura 3.2 – Diminuição de gradiente (verde) e gradiente conjugado (vermelho)

Minimizando $f(x)$ por meio da Equação (3.2) e de seu gradiente:

$$\nabla f(x) = Ax - b \quad (3.2)$$

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 (3.3) seguinte.

$$Ax = b \quad (3.3)$$

A partir de uma matriz A simétrica positiva definida, define-se o produto interno como sendo a Equação (3.4).

$$x^T Ay = (x, y)_A \quad (3.4)$$

Se diz então, que um vetor x é conjugado a outro vetor y com relação a uma matriz A , conforme Equação (3.5) se:

$$(x, y)_A = 0, \text{ com } x \neq y \quad (3.5)$$

A idéia do algoritmo é utilizar direções conjugadas para a redução na busca do ponto ótimo x , sendo descrito como a Equação (3.6):

$$x^* = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 + \dots + \alpha_n p_n \quad (3.6)$$

Os coeficientes foram dados a partir da combinação linear, conforme a Equação (3.7) que segue:

$$Ax^* = \alpha_1 A p_1 + \alpha_2 A p_2 + \dots + \alpha_n A p_n = b$$

$$\alpha_k = \frac{p_k^T b}{p_k^T A p_k} = \frac{(p_k b)}{(p_k p_k)_A} \quad (3.7)$$

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 (3.8):

$$x_{k+1} = x_k + \alpha p_k \quad (3.8)$$

Onde p é tido como uma redução de direção. Define-se então a Equação (3.9):

$$g_k = \nabla f(x_k) \quad (3.9)$$

O tamanho do passo α que minimiza a função $f(x)$ ao longo da direção $x_k + \alpha p_k$ é dado pela Equação (3.10):

$$\alpha_k = \frac{g_k^T p_k}{p_k^T A p_k} \quad (3.10)$$

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 (3.11):

$$p_{k+1} = -g_k + \frac{p_k^T A g_k}{p_k^T A p_k} p_k \quad (3.11)$$

3.1.2 Método de Evolução Diferencial

Segundo Storn e Price (1995), propositores do método de Evolução Diferencial (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).

O método de Evolução Diferencial (ED) é um algoritmo de metaheurísticas inspirados na natureza. É um método multi ponto, derivado livre de otimização. 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), e pára quando um usuário define esses critérios e quando o mesmo for atendido.

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 (3.12):

$$x^* = \operatorname{arg\,min}_x f(x) \quad , \quad \text{Sujeito a: } \begin{cases} g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Inicialmente considera-se o problema irrestrito, isto é, sem as funções de restrição $g(x)$ e $h(x)$. A notação é a seguinte:

$U_{[a,b]}$: 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 (3.13):

$$x_{t,i} = \begin{bmatrix} x_{t,i,1} \\ x_{t,i,2} \\ x_{t,i,n} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Em que, o terceiro índice indica uma entre as n variáveis do problema. O mecanismo de busca do método de Evolução Diferencial que utiliza vetores-diferença, determinado pelos seguintes pontos:

- 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.

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.

3.1.2.1 Evolução Diferencial: População

O valor mínimo da função objetivo é localizado dentro de um espaço de projeto por uma população de indivíduos gerados aleatoriamente, onde a recombinação e a evolução dessa população, por meio de novas gerações e vetores populacionais. A Equação (3.14) seguinte, expressa por meio de uma matriz uma população de indivíduos.

$$I_{NP} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Onde,

I_NP : número de populações ou tamanho da i população;

i : número de indivíduos da população;

j : número de variáveis de projeto.

3.1.2.2 Evolução Diferencial: Mutaç o

A muta o, por meio de um vetor de muta o $v_{i,G+1}$ criado e para cada vetor alvo $x_{i,G}$ ($i = 1, 2, \dots, I_NP$), conforme a Equa o (3.15):

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (3.15)$$

Onde,

$v_{i,G+1}$: vetor de muta o ou vetor mutante;

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

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

$x_{r2,G}$: vetor 2 aleatoriamente selecionado da popula o;

$x_{r3,G}$: vetor 3 aleatoriamente selecionado da popula o;

i : popula o ($i = 1, 2, \dots, I_NP$);

F : fator de muta o, ou constante de fator de escala ou constante de pondera o (tamanho de passo da evolu o diferencial).

Os vetores citados anteriormente n o devem ser iguais entre si e nem iguais ao vetor alvo, requerendo uma popula o que possua pelo menos quatro vetores, $I_NP=4$. A constante F (fator de muta o)   o segundo par metro de controle do algoritmo, tamb m denominado de tamanho de passo da evolu o diferencial, que costuma ser especificado no intervalo $[0,2]$.

Para a cria o de um vetor mutante, todos os indiv duos da popula o ter o sido escolhidos uma vez como vetor alvo, ao t rmino de cada gera o G .

3.1.2.3 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 (3.16) a seguir.

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & , \text{ se } rand_{ji} \leq F_CR \\ x_{ji,G} & , \text{ se } rand_{ji} > F_CR \end{cases} \quad (3.16)$$

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;

$rand_{ji}$: 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.

3.1.2.4 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 (3.17) a seguir.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G} \\ x_{i,G} \end{cases}, \quad \text{se } \begin{cases} f(u_{i,G}) \leq f(x_{i,G}) \\ f(u_{i,G}) > f(x_{i,G}) \end{cases} \quad (3.17)$$

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.

3.1.2.5 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 3.3) que resume as etapas do método de Evolução Diferencial, caracterizando os critérios de parada.

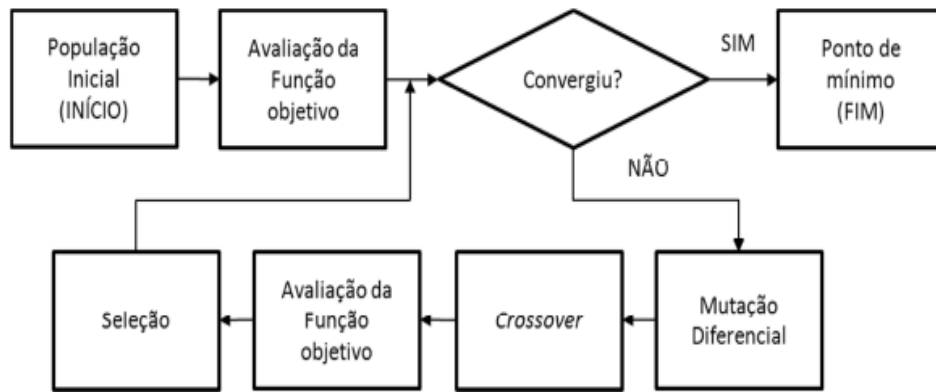


Figura 3.3 – Fluxograma do método de Evolução Diferencial – DE (Suveges, 2014)

O esquema a seguir da Tabela 3.1 mostra o comportamento das variáveis envolvidas no Método de Evolução Diferencial.

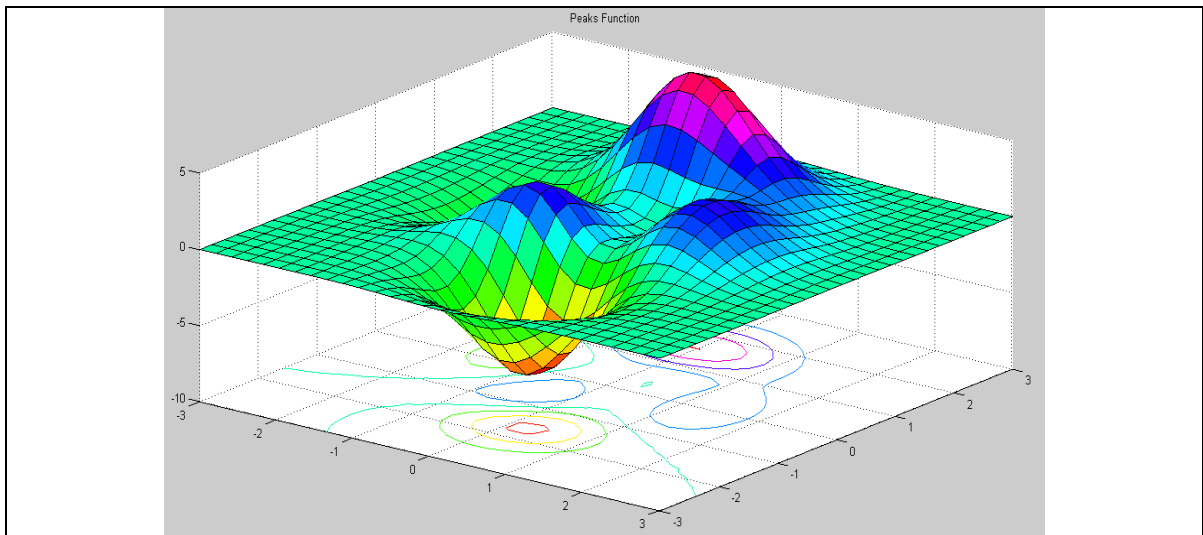
Tabela 3.1 – Esquema do comportamento das variáveis envolvidas no Método de Evolução Diferencial

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

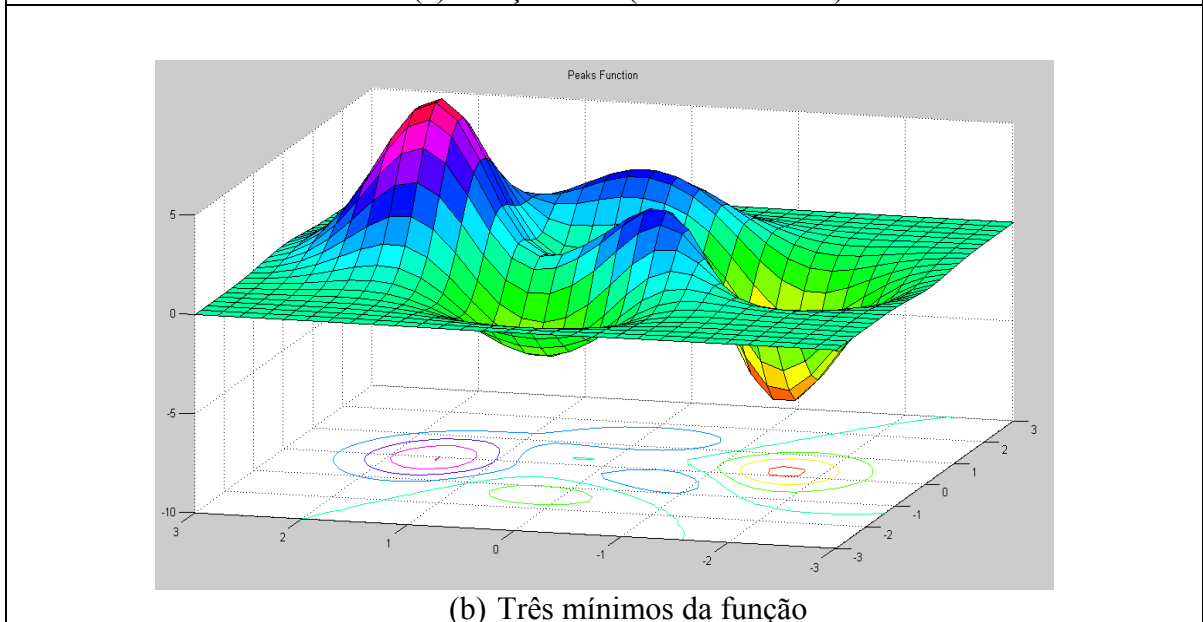
3.2 COMPORTAMENTO GERAL: MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Santos (2009) apresenta a Equação (3.18) na forma analítica de uma função de 2 variáveis com alguns pontos de mínimo, onde pode-se obter a análise gráfica 3-D da mesma, por meio das Funções Pico (Peaks Functions – MATLAB R2014a). A Figura 3.4 (a) seguinte mostra o panorama das Funções Pico, bem como a Figura 3.4 (b) apresenta o detalhe da percepção dos 3 mínimos da função.

$$z = 3(1 - x)^2 e^{-(x^2)} - (y + 1)^2 - 10 \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5 \right) e^{(-x^2 - y^2)} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2 - y^2} \quad (3.18)$$



(a) Função Pico (Peaks Function)



(b) Três mínimos da função

Figura 3.4 – Superfície 3-D da função

3.2.1 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 3.5 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.

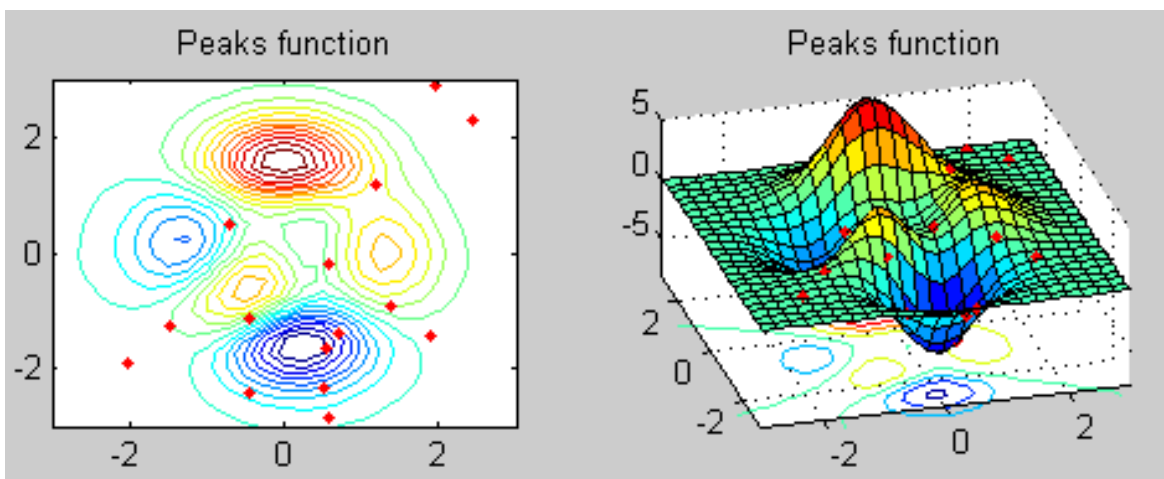


Figura 3.5 - 2ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a verificação da distribuição aleatória dos pontos pelo espaço de projeto definido e redução do espaço amostral

A Figura 3.6, 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.

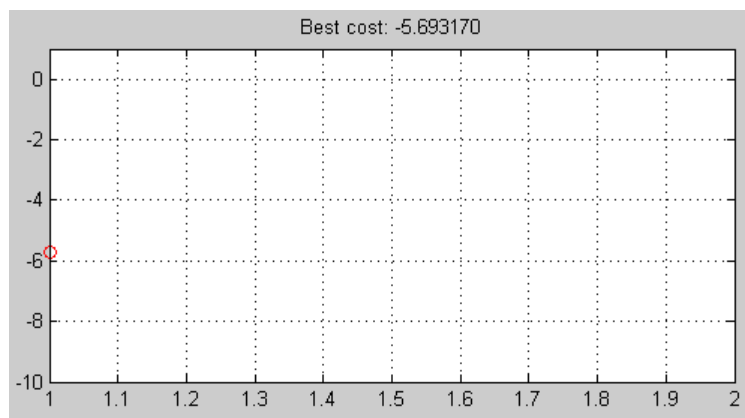


Figura 3.6 - 2ª Geração: Representação gráfica do valor mínimo da função objetivo e seu comportamento à cada geração

Já a Figura 3.7 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 consequentemente maior será a distância entre os indivíduos no espaço de projeto.

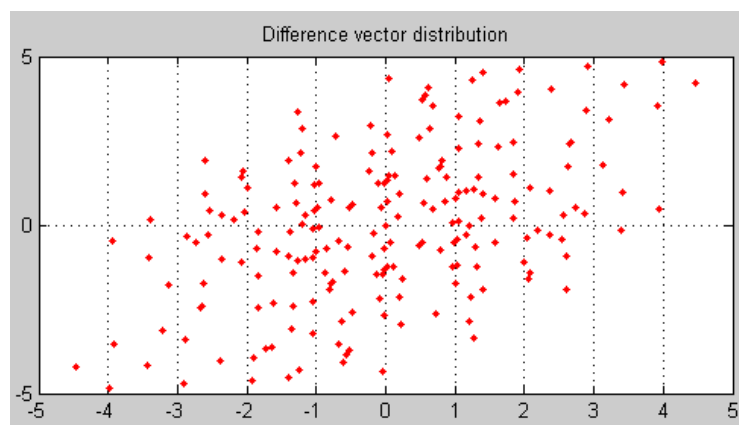


Figura 3.7 - 2ª Geração: Representação gráfica da distribuição da diferença vetorial entre os indivíduos no espaço de projeto à cada geração

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 3.8, 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.

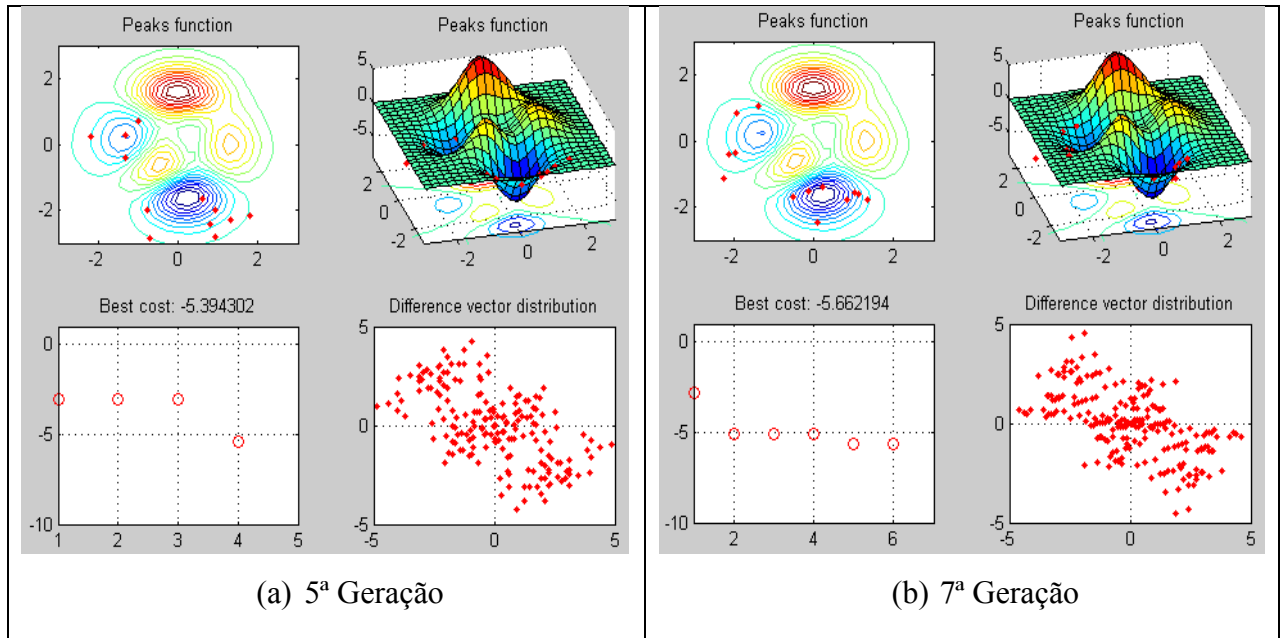


Figura 3.8 - Representação gráfica da evolução das gerações onde os pontos tendem a convergir para a região em que se encontra o mínimo global da função

A partir daí, passa-se a encontrar, na Figura 3.9 (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 3.9 (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.

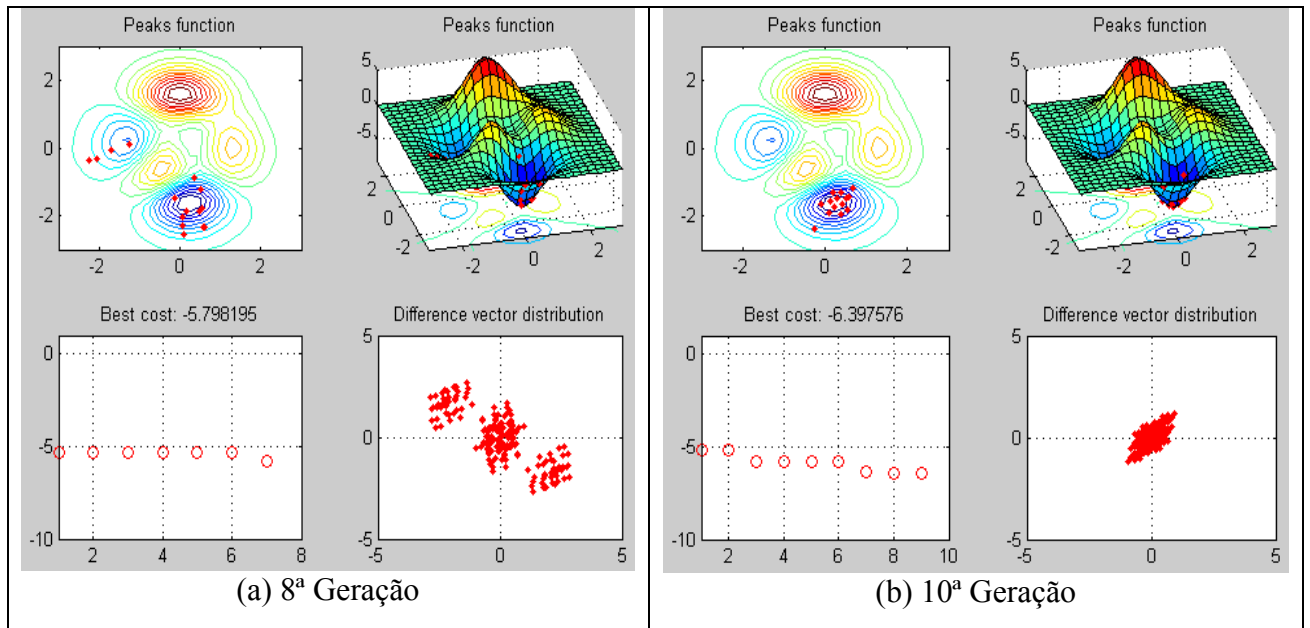


Figura 3.9 - Representação gráfica dos indivíduos quando se iniciam um processo migratório para a região que apresenta o menor valor da função objetivo

Já a Figura 3.10, 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.

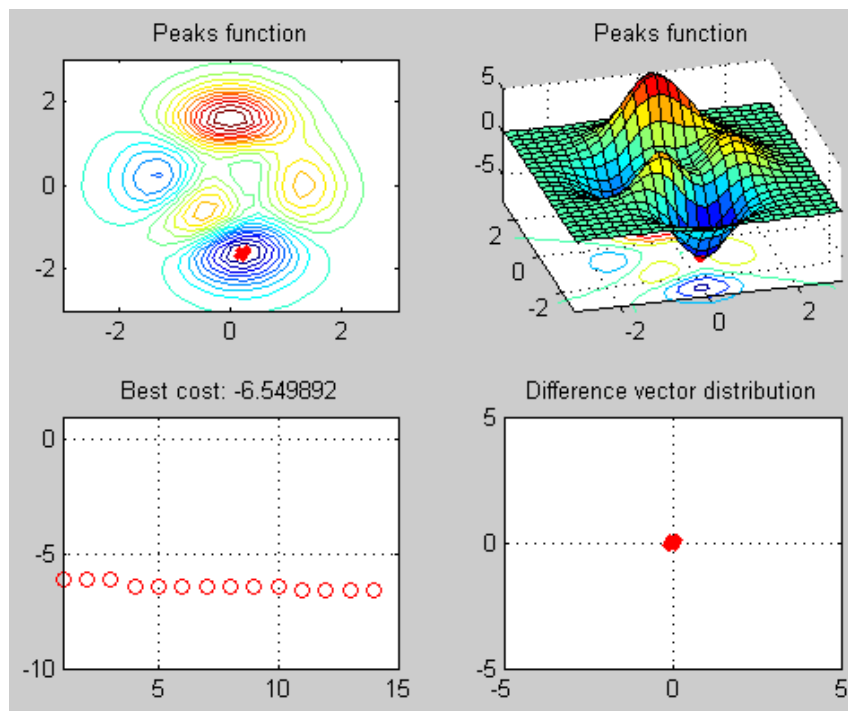


Figura 3.10 - 15ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência para a região que possui um ponto de mínimo

Por fim, a Figura 3.11, 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.

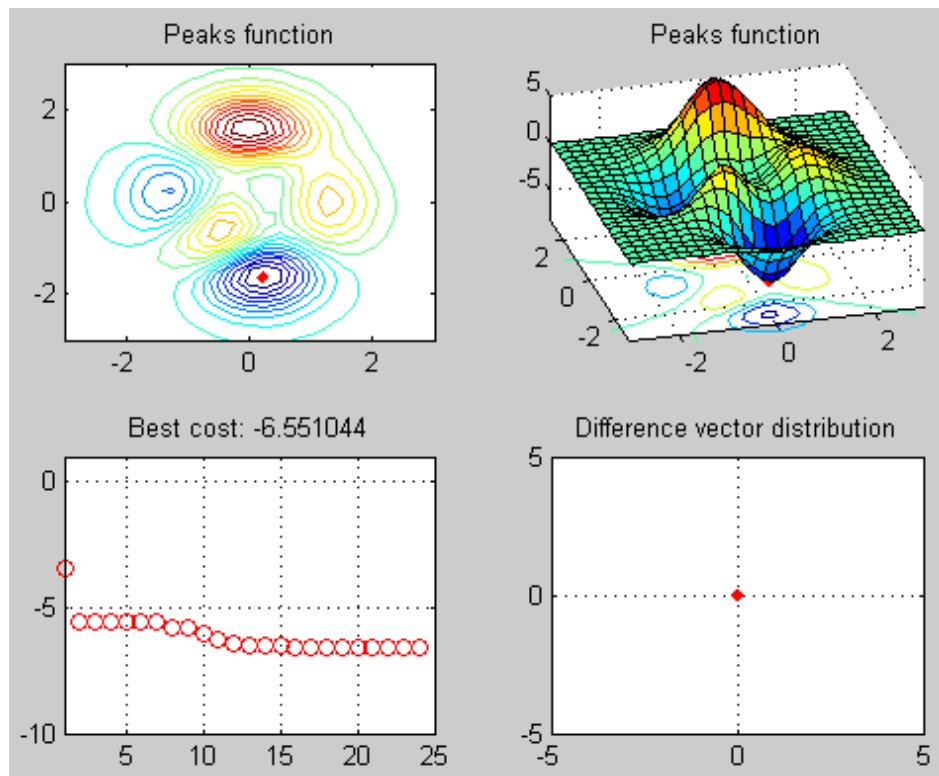


Figura 3.11 - 25ª Geração: Representação gráfica da Função Pico e a sua consequente convergência final para a região que possui um ponto de mínimo

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 $[0, 1]$. O fluxograma da Figura 4.1 seguinte apresenta o esquema de avaliação de dano a ser implementada neste trabalho.

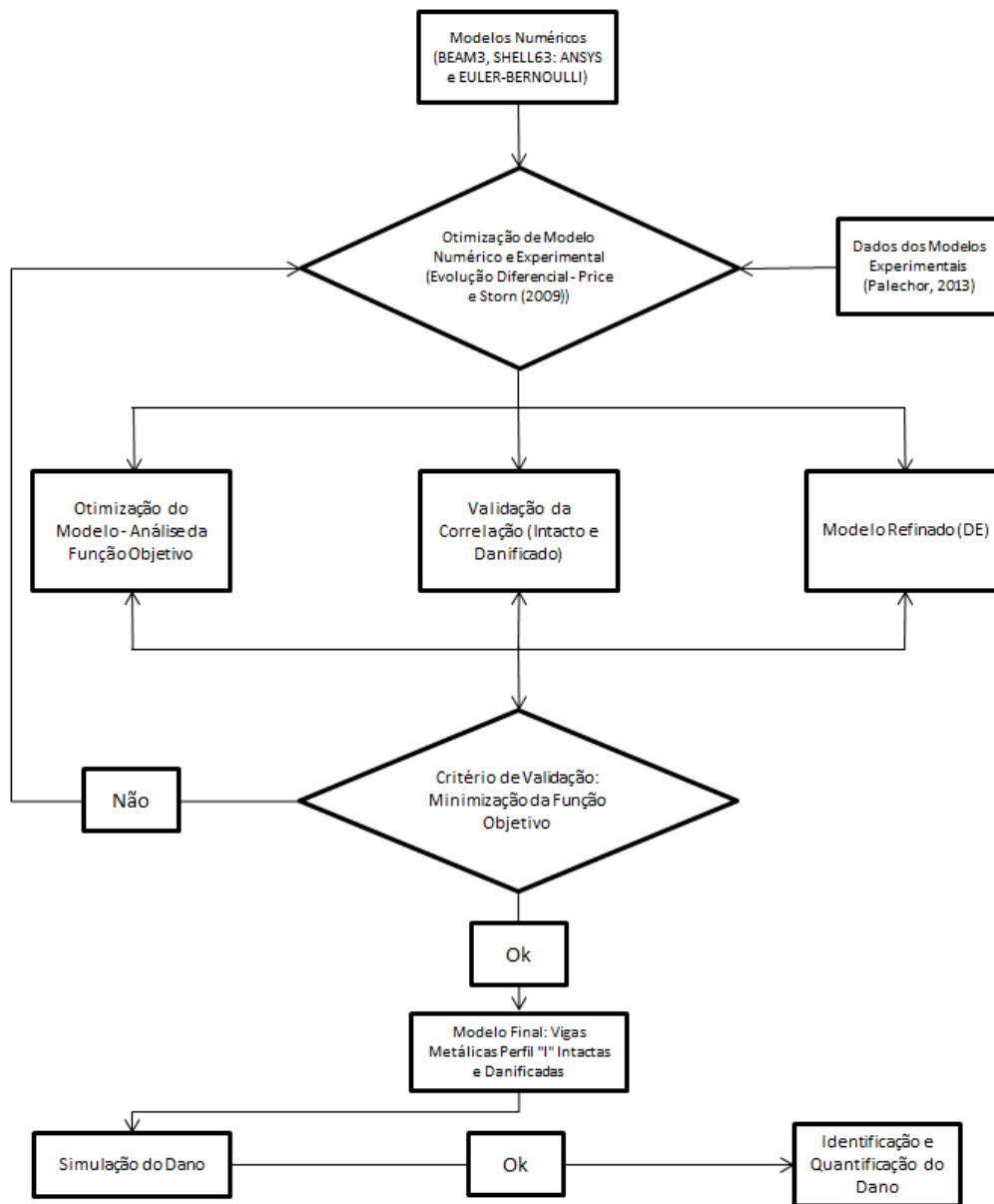


Figura 4.1 - Fluxograma geral da pesquisa para otimização (DE), identificação e quantificação de dano

Inicialmente, adotou-se o programa experimental desenvolvido por Palechor (2013) para estruturas de vigas metálicas, bem como sua modelagem pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) através do *software* ANSYS, visando determinar a posição do dano introduzido numa viga (perfil-I), pela resposta estática (deslocamentos) das vigas danificadas. Vale ressaltar que nas análises numéricas realizadas foram utilizadas respostas das vigas intactas e danificadas. A viga metálica (perfil-I) testada foi de aço MR-250 de comprimento total de 6,00 metros, em condição biapoiada, submetida à diferentes estágios de carga aplicadas no meio do vão e também em outros pontos, conforme ilustrado na Figura 4.2 seguinte.

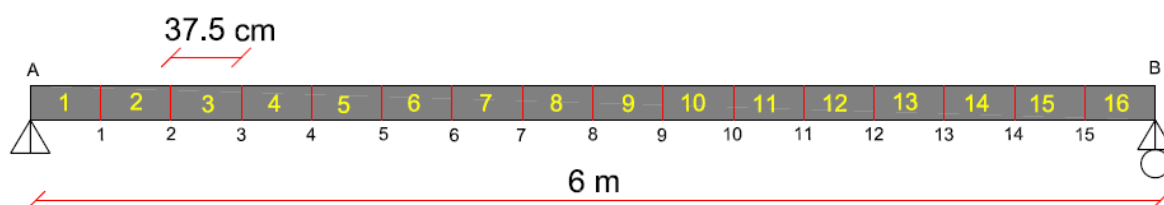


Figura 4.2 – Panorama das vigas ensaiadas (Palechor, 2013)

Em seguida, a partir da resposta experimental obtida pelo ANSYS para localização e quantificação do dano estrutural, serão utilizadas uma ferramenta otimizadora: o método de Evolução Diferencial (Price *et al*, 2005), implementado em MATLAB.

Por fim, outros exemplos de vigas modeladas tanto com o ANSYS quanto com o MATLAB (pela análise da função objetivo) serão implementadas.

4.1 INTRODUÇÃO ÀS ANÁLISES REALIZADAS

A modelagem da viga (perfil-I), biapoiada, foi realizada por Palechor (2013) utilizando o programa ANSYS (versão 11.0), onde tentou-se simular as condições reais do ensaio experimental realizado por Palechor (2013), em que os pontos de medição são limitados. Por isso, a discretização da viga para cada tipo de elemento, considerando os pontos de medição na análise experimental, ou seja, para a modelagem feita com os elementos BEAM3 e SHELL63 que são os elementos mais simples na representação do comportamento da viga. A criação da malha desenvolvida, com os dados utilizados para a identificação do dano, foram de 17 pontos igualmente espaçados ao longo da viga, as

características dos elementos mostrados na modelagem numérica, conforme a Tabela 4.1. Na seguinte seção é explicada mais claramente a discretização da malha utilizada por Palechor (2013) para cada tipo de elemento.

Tabela 4.1 – Características dos elementos utilizados na modelagem numérica

ELEMENTO	NÚMERO DE NÓS	GRAUS DE LIBERDADE POR NÓ
BEAM3	2	2 de translação e 1 de rotação
SHELL63	4	2 de translação e 3 de rotação

Para a posição do dano, Palechor (2013) testou várias posições para a análise estática. A simulação da estrutura intacta e danificada 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. Já a rotina criada em elementos finitos por meio da teoria de EULER-BERNOULLI, o dano foi simulado também com a redução da área e do momento de inércia do elemento danificado.

Para a obtenção da resposta estática (deslocamentos) da viga, Palechor (2013), modelou as vigas para diferentes condições de carga aplicada em diferentes pontos ao longo da viga. A resposta estática da estrutura foi definida por 17 pontos colineares e espaçados igualmente ao longo da viga, localizados na parte inferior central do perfil-I, tentando simular os mesmos pontos coletados na análise experimental (Figura 4.3).

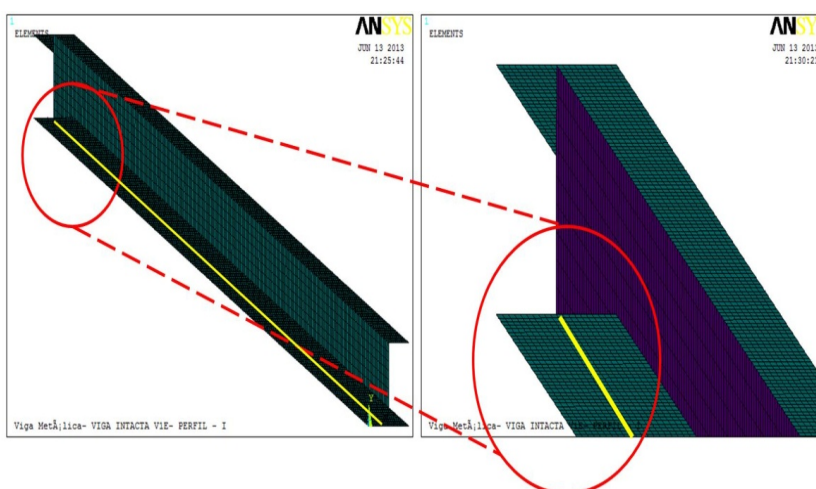


Figura 4.3 – Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)

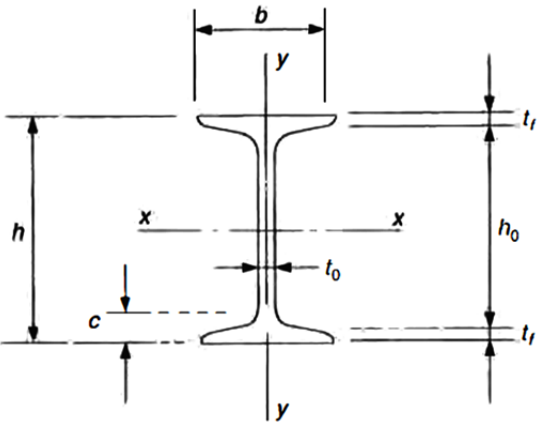
A partir dos dados obtidos, tanto nos ensaios experimentais e as modelagens realizadas por Palechor (2013), será utilizado o método de Otimização de Evolução Diferencial. A aplicação do método de Evolução Diferencial será feita, por meio de uma escolha dos melhores resultados, em que é evidente a localização do dano, muitas vezes realizada por uma diversidade de iterações para se alcançar uma boa convergência.

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A análise experimental (estática) desenvolvida por Palechor (2013), e cujo os resultados foram usados nessa pesquisa, testando vigas metálicas (perfil-I) de aço MR-250, tendo suas características geométricas e do material das vigas ensaiadas mostradas na Tabela 4.2. Cabe ressaltar que os valores, principalmente da tensão de escoamento (f_y), módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν), foram oriundos de catálogo fornecido pelo fabricante, não tendo sido feito, ensaios de caracterização do material (no caso o aço).

Tabela 4.2 – Características geométricas e do material das vigas testadas

PERFIL I – AÇO: 102 X 11,4	
h(cm)	10,16
h ₀ (cm)	8,68
t _f (cm)	0,74
t ₀ (cm)	0,483
c(cm)	1,59
b(cm)	6,76
Área (cm ²)	14,5
I _x (cm ⁴)	252
W _x (cm ³)	49,7
i _x (cm)	4,17
I _y (cm ⁴)	31,7
W _y (cm ³)	9,37
i _y (cm)	1,48
Z _x (cm ³)	56,220
Z _y (cm ³)	17,414
f _y (KN/cm ²)	25,00
E (KN/cm ²)	20000
Comprimento (m)	6,00



Testou-se quatro vigas no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília, onde as mesmas foram divididas em 16 elementos de 37,5 cm de comprimento cada um, com 17 nós igualmente espaçados ao longo da viga como é mostrado na Figura 4.4 (a). Já os danos induzidos nas vigas foram feitos com uma serra circular, com cortes que tinham dimensões de 2cm e de 4cm, ambos produzindo uma igual diminuição na inércia da seção transversal, conforme pode ser observado na Figura 4.4 (b).

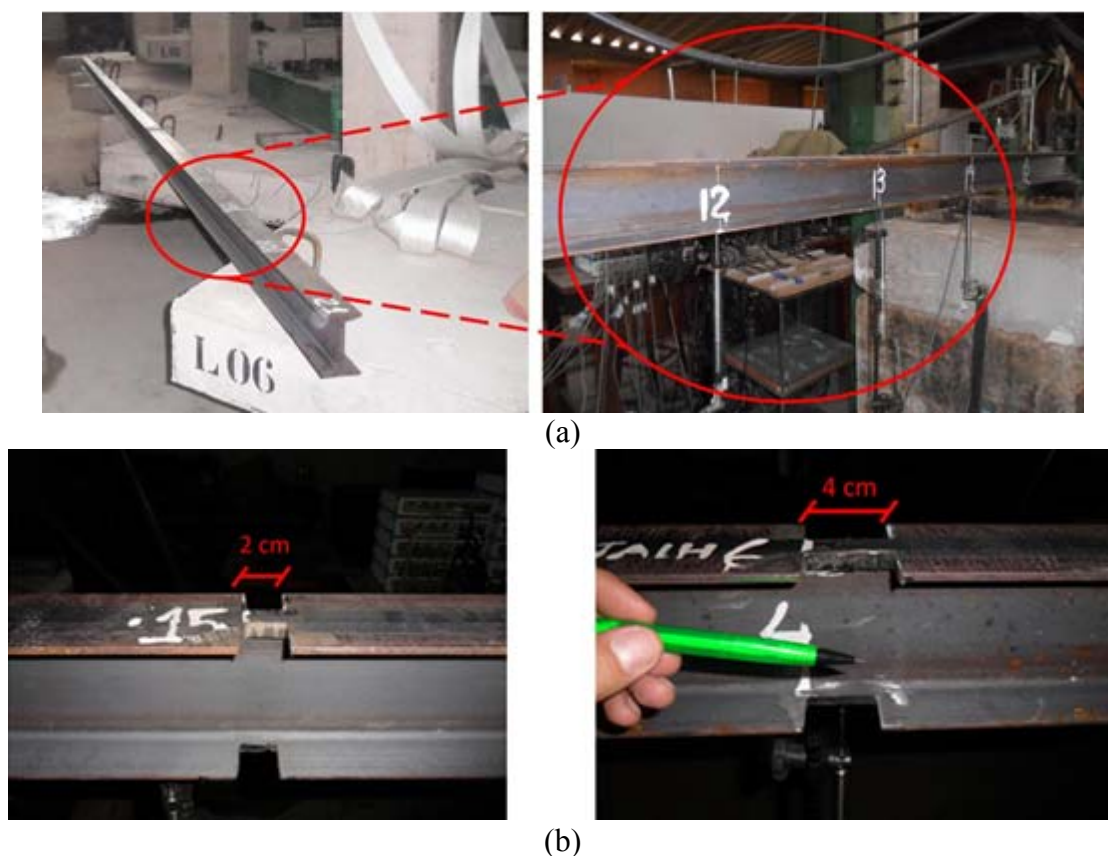


Figura 4.4 – Panorama das vigas: (a) demonstração da viga em 16 elementos e (b) danos induzidos de 2cm e 4cm (Palechor, 2013)

Lembrando que foi testada uma viga intacta (V1E), para se ter uma viga de referência, onde os resultados da resposta da viga intacta foram utilizados posteriormente na metodologia de uso da ferramenta do método de Evolução Diferencial proposta neste trabalho, 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 4.5 (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 4.5 (b)) utilizou-se duas placas dispostas de modo que o rolete não tivesse deslocamento na direção x, y e z (rotação livre).



Figura 4.5 – Simulações das condições de apoio das vigas (Palechor, 2013)

4.2.1 Instrumentação

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 (LVDT's), 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 LVDT's são mostrados na seguinte. A Figura 4.6 seguinte mostra os detalhes da instrumentação utilizada.

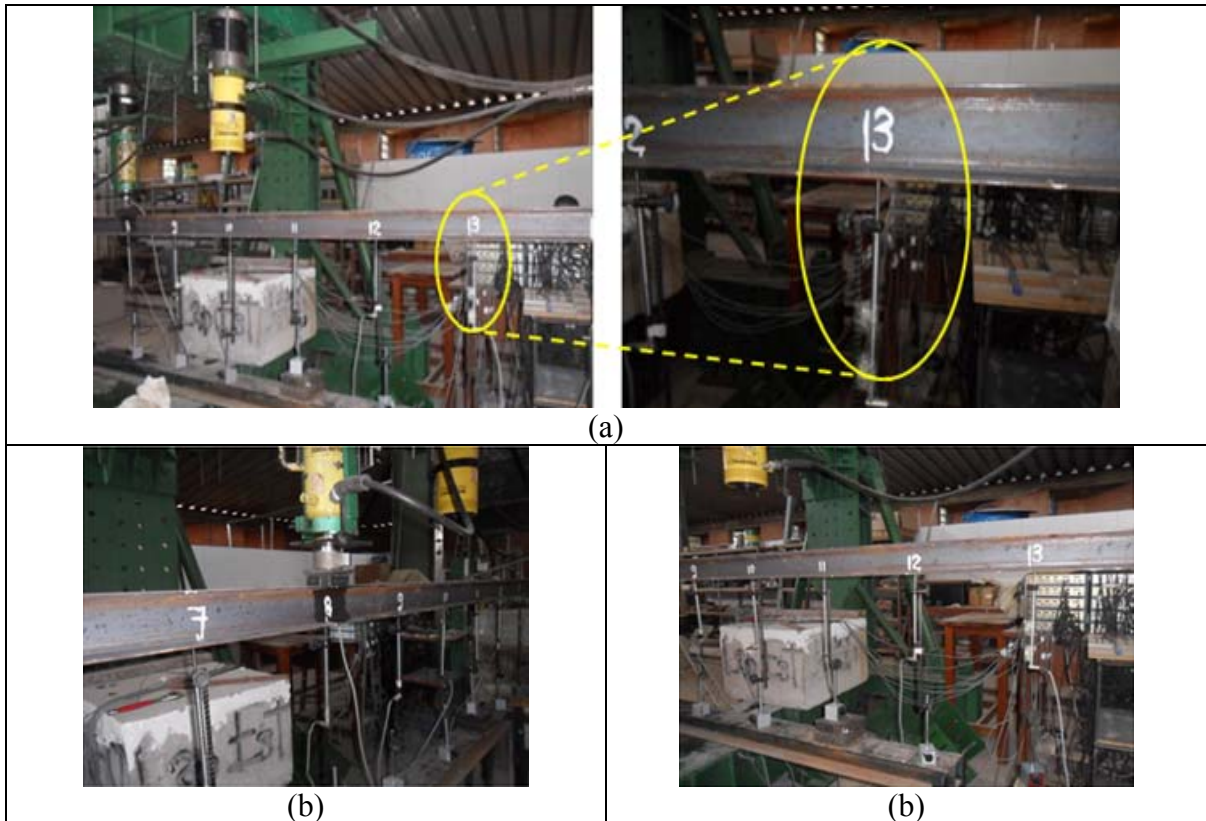


Figura 4.6 – Detalhe dos LVDT's (a), posicionamento dos LVDT's no lado esquerdo (b) e posicionamento dos LVDT's no lado direito (c) - (Palechor, 2013)

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. 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 consequentemente auxiliar na escolha dos estágios de carga a serem analisados. O detalhamento da célula de carga pode ser observado na Figura 4.7 seguinte.

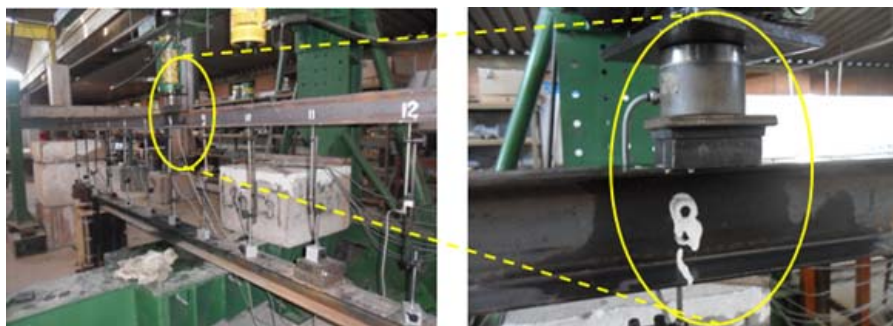


Figura 4.7 – Detalhamentos da célula de carga (Palechor, 2013)

4.3 ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica (estática) feita por Palechor (2013), no que tange às estruturas danificadas, no programa ANSYS (versão 11.0) para uma viga (perfil-I) biapoiada, na tentativa de reproduzir as condições da análise experimental estática, bem como foi realizada análise numérica das estruturas intactas, auxiliando nas comparações posteriores.

A viga modelada por Palechor (2013) foi submetida a diferentes condições de carga e diferentes localizações de posição do dano. Os elementos utilizados para a modelagem numérica foram: o elemento BEAM3 e SHELL63. 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.

4.3.1 Características dos elementos utilizados na modelagem com o Programa ANSYS

A seguir é apresentada a modelação numérica da viga em estudo, utilizando cada um dos elementos escolhidos. São apresentadas características comuns para a análise desenvolvida (análise estática).

4.3.1.1 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 4.8 seguinte, onde mostra-se a geometria do elemento, a localização dos nós e o sistema de coordenadas deste elemento.

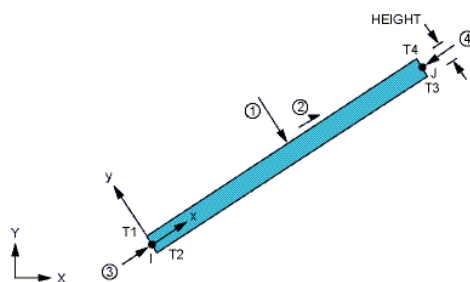


Figura 4.8 – Elemento BEAM3 (ANSYS, 2007)

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 4.3.

Tabela 4.3 – 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 4kN e variando a quantidade de elementos (refinamento da malha em sentido longitudinal). Os resultados apresentados por Palechor (2013), podem ser observados na Figura 4.9 a seguir.

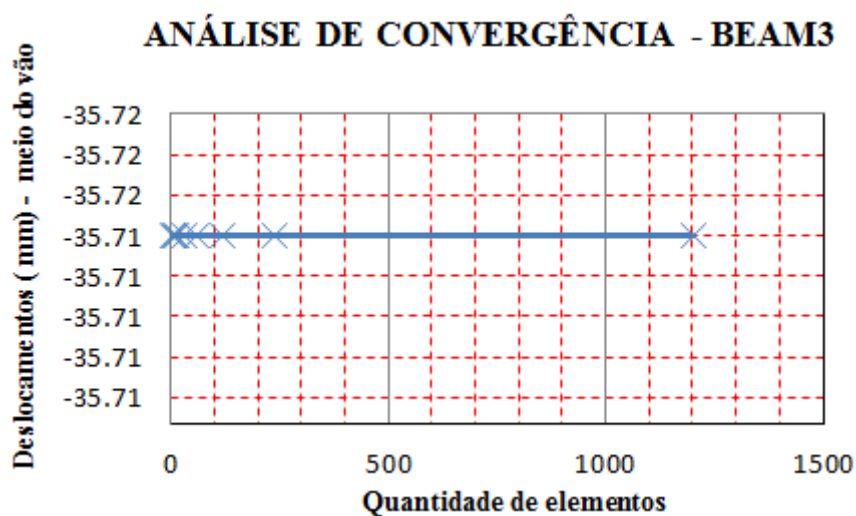


Figura 4.9 – Análise de convergência da malha do elemento BEAM3

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 4.10.

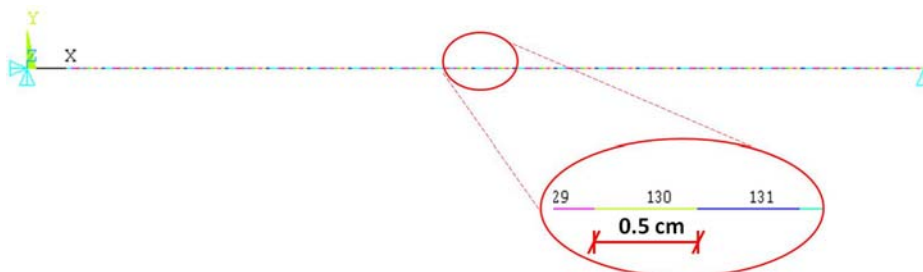


Figura 4.10 – Malha da viga com o elemento BEAM3 (ANSYS, 2007)

As propriedades da viga introduzidas na modelagem, como o elemento BEAM3, foram as seguintes, conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – 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)	$2,00 \cdot 10^{11}$
Coefficiente de Poisson: ν	0,3000
Densidade do aço (kg/m ³)	7,8000
Área da seção (m ²)	$1,45 \cdot 10^{-3}$
Inércia da seção (m ⁴)	$2,52 \cdot 10^{-6}$
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 4.5 e na Figura 4.11, onde mostra-se o elemento danificado no ANSYS.

Tabela 4.5 – 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 Ix (cm ⁴)	252,0000

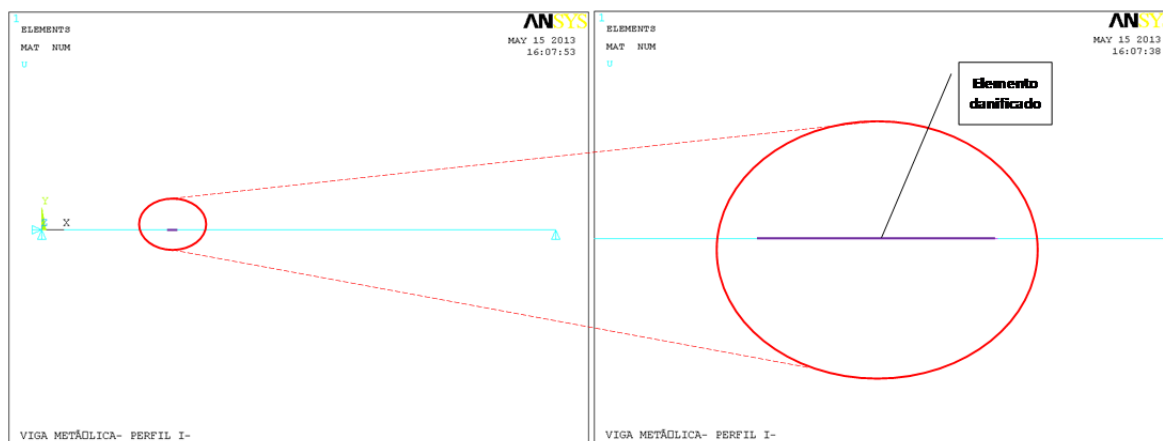


Figura 4.11 – Simulação do dano: elemento BEAM3 (ANSYS, 2007)

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 4.12, 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.

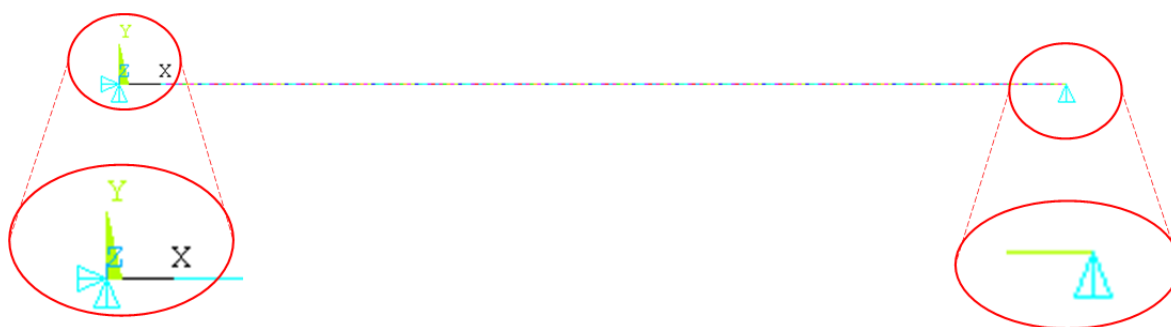


Figura 4.12 – Apoios viga-elemento: BEAM3 (ANSYS, 2007)

4.3.1.2 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 4.13. A propriedade dos materiais é ortotrópica e corresponde à orientação do sistema de coordenadas do elemento.

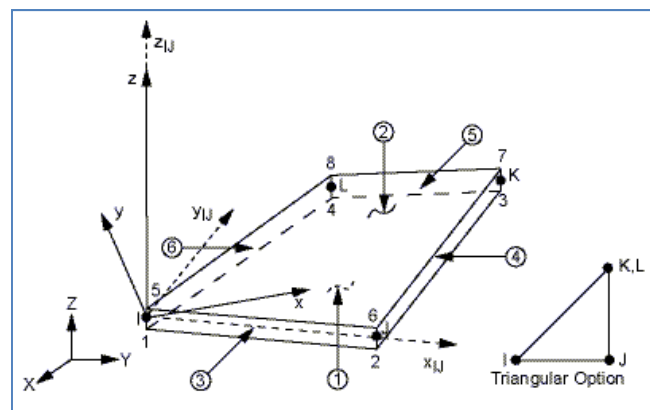


Figura 4.13 – Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)

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 4.13. A Tabela 4.6 seguinte mostra as características do elemento SHELL63.

Tabela 4.6 – 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 4.14 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.

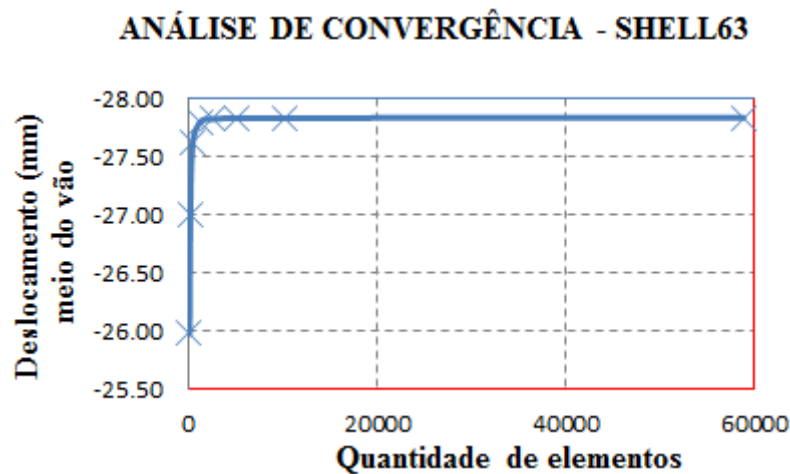


Figura 4.14 - Convergência da malha do elemento SHELL63

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 4.15 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.

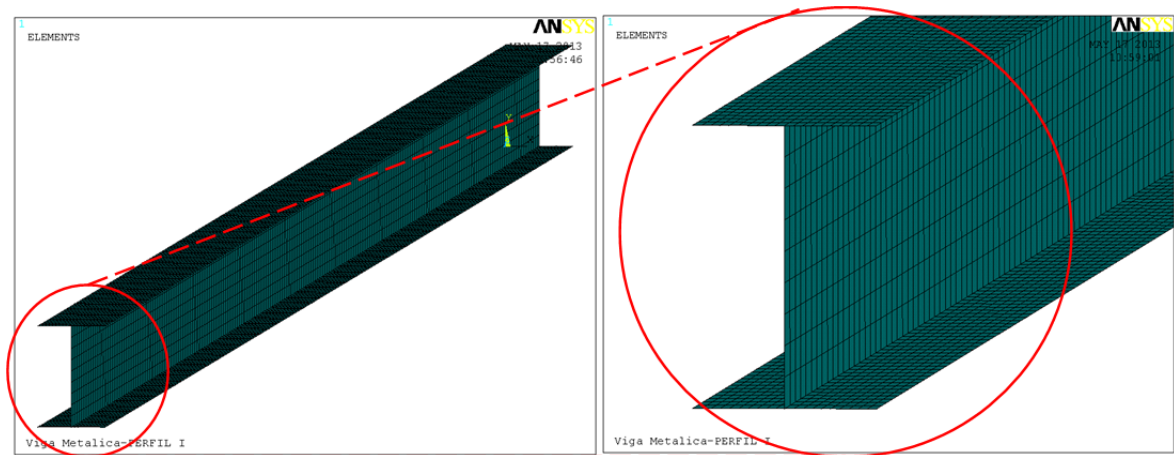


Figura 4.15 – Malha gerada no ANSYS – Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)

As características das condições de contorno para nossa viga são: o apoio de primeiro gênero (Figura 4.16 (b)), e o apoio de segundo gênero (Figura 4.16 (a)). Para simular o apoio do segundo gênero, foram restringidos os deslocamentos na direção x, y e z para a fila de nós localizados 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 localizada na parte inferior da viga localizado a 7,50 cm do extremo oposto ao anterior (Figura 4.17).

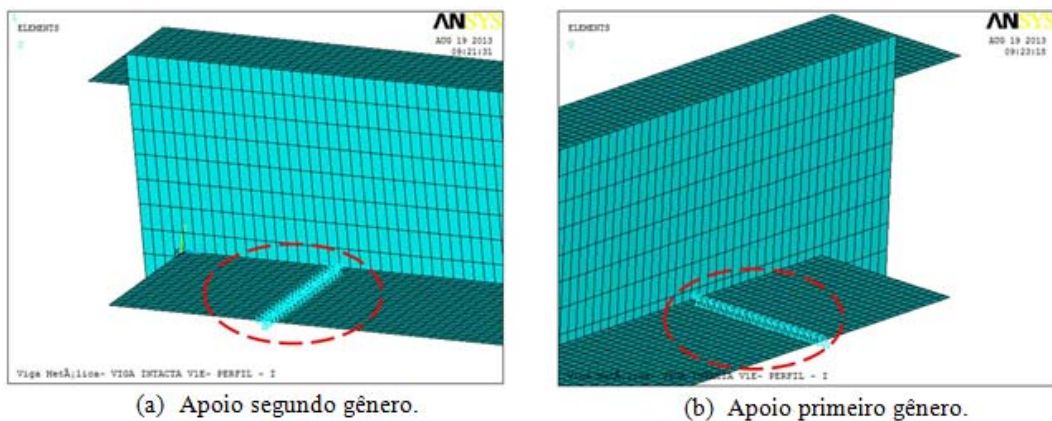


Figura 4.16 – Condições de contorno: elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)

Palechor (2013) fez a simulação do dano eliminando elementos da malha (Figura 4.17). 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 4.7 a seguir.

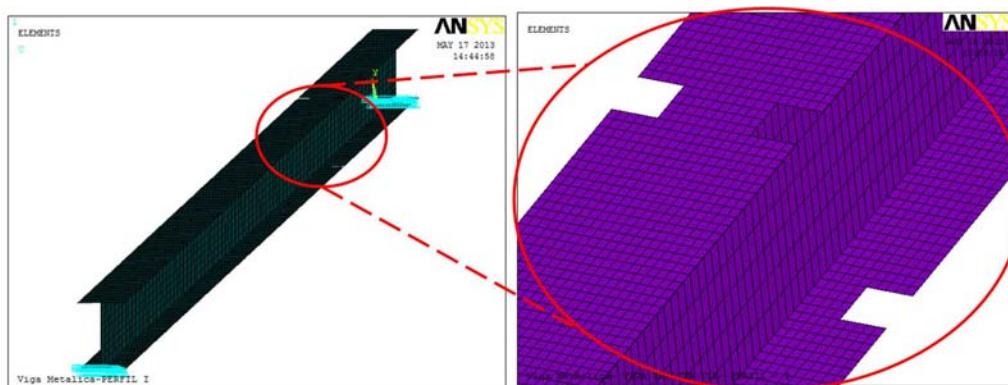


Figura 4.17 – Simulação do dano: elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)

Tabela 4.7 – 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

4.4 ANÁLISE COM O MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A análise com o método de Evolução Diferencial se deu por meio da verificação das ferramentas desenvolvidas para MATLAB em geral e produzida por Price e Storn (2009), utilizando-se várias tentativas para se calibrar o método, com os panoramas numéricos e experimentais já demonstrados anteriormente.

O método possui um bom número de parâmetros de controle de entrada, que vão auxiliar, dependendo das características das populações envolvidas, nesse caso os valores dos deslocamentos estáticos das estruturas intactas e danificadas de vigas foram utilizados, permitindo uma melhor aproximação à situação que está tentando se simular, tendo como finalidade a identificação 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) 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.

5. APLICAÇÃO E RESULTADOS

Para calibrar a ferramenta de otimização, utilizou-se os deslocamentos extraídos da viga intacta V1E. Inicialmente para se verificar a confiabilidade dos resultados obtidos de deslocamentos estáticos dos métodos verificados, no caso o MEF, por meio dos elementos BEAM3 e SHELL63 do ANSYS e da teoria de viga de EULER-BERNOULLI, bem como dos resultados experimentais utilizou-se a viga intacta da Figura 5.1 seguinte.

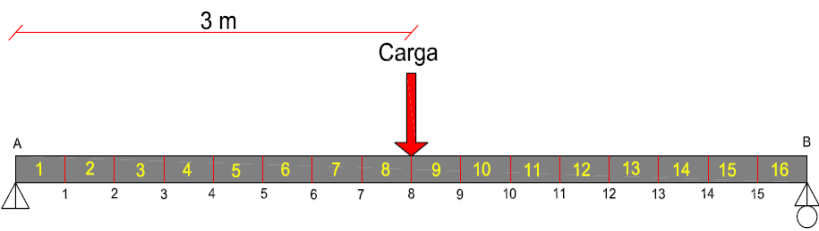
Análise (Intacta)	Cargas	
Experimental	930N	 <p>(a) Viga Intacta V1E com aplicação da carga no meio do vão.</p>
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)	2010N 3090N	
Numérico: Viga Euler-Bernoulli	4080N	

Figura 5.1 – Viga intacta utilizada para verificação de confiabilidade de resultados obtidos pelos métodos utilizados

Os resultados das análises estáticas dos deslocamentos no meio do vão obtidos para cada método podem ser observados na Tabela 5.1 seguinte.

Tabela 5.1 - Análise Estática: Viga V1E intacta

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA V1E INTACTA				
TIPO	CARGA (Newton)			
	930	2010	3090	4080
BEAM3	-9.419900	-16.049000	-22.679000	-28.756000
SHELL63	-9.431000	-16.577000	-23.722000	-30.272000
EULER-BERNOULLI	-8.299800	-17.943000	-27.586000	-36.425000
EXPERIMENTAL	-8.815625	-17.200000	-26.003125	-34.434375

A Figura 5.2 a seguir mostra a análise gráfica dos resultados obtidos da Viga 1 intacta V1E utilizada para verificação de confiabilidade de resultados obtidos pelos métodos utilizados.

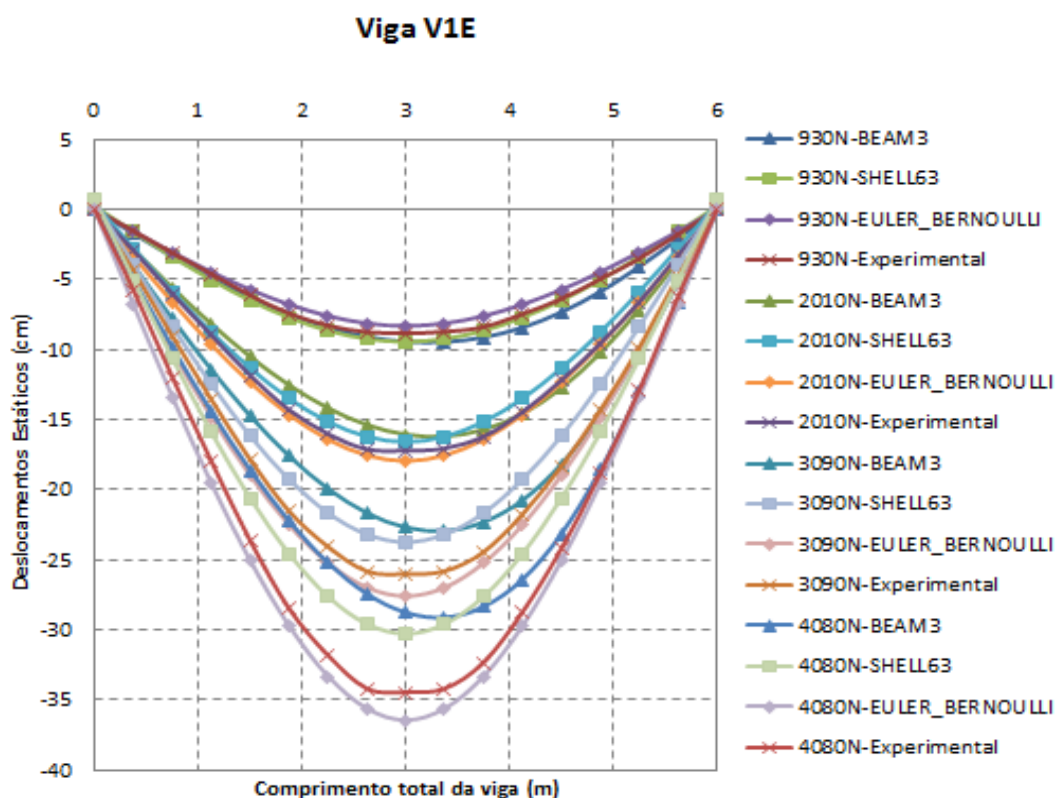


Figura 5.2 – Análise gráfica comparativa dos deslocamentos estáticos obtidos com os métodos utilizados

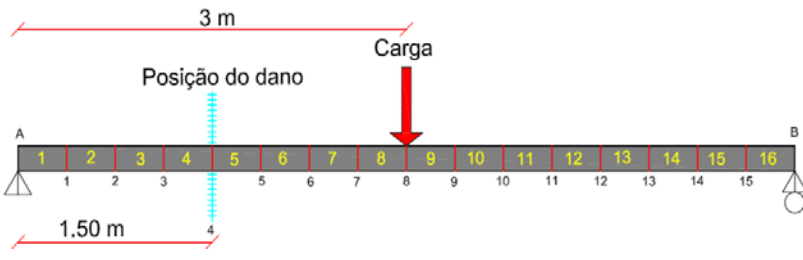
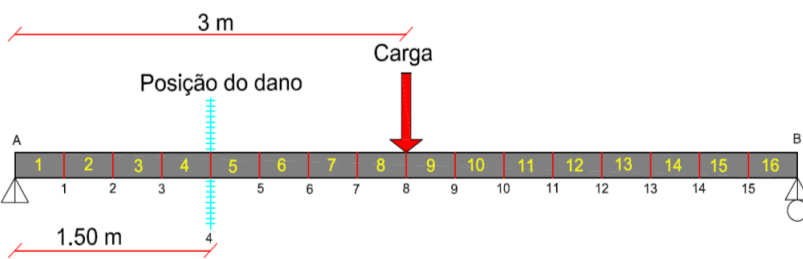
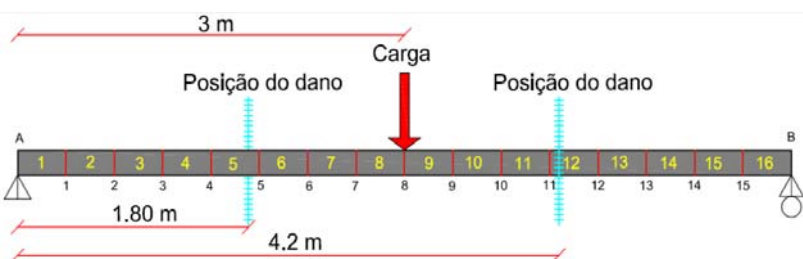
Observa-se uma aproximação dos resultados obtidos, bem como pequenas diferenças encontradas, mas que acarretam numa consequente confiabilidade nos dados a serem utilizados posteriormente, validando inicialmente os resultados apresentados.

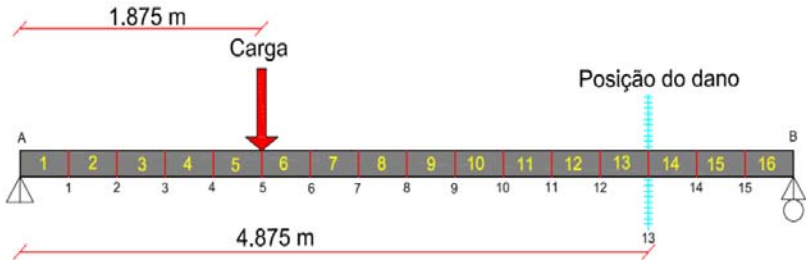
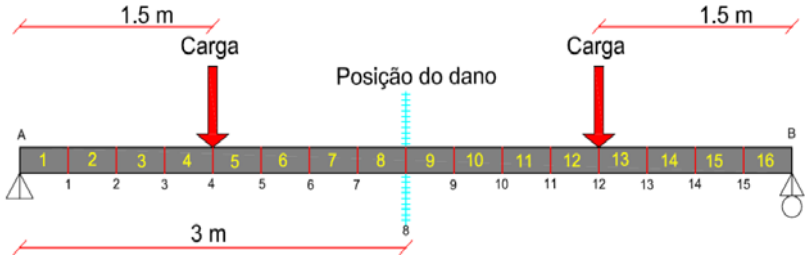
5.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL NA AVALIAÇÃO DE DANOS EM VIGAS

Serão apresentados os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial a diferentes situações de vigas (ver Tabela 5.2) 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). Foram utilizados como resultados numéricos e experimentais, os deslocamentos estáticos. Os dados medidos foram simulados sinteticamente utilizando o modelo analítico em elementos finitos da estrutura com determinados elementos danificados (rigidez reduzida), bem como os modelos experimentais. Em termos gerais, os resultados a serem obtidos para cada tipo de

modelo de viga e seus respectivos passos de cargas levarão em consideração os deslocamentos da estrutura intacta e danificada, com a inserção de dano em um elemento qualquer da estrutura e a consequente análise de uma função objetivo que envolvesse esses resultados obtidos e finalmente sendo trabalhada no método de otimização.

Tabela 5.2 - Panoramas de vigas em geral para análise estática

TIPO DE ANÁLISE ESTÁTICA E CARGAS APLICADAS		PANORAMAS DE VIGAS ANALISADAS E SUAS CARACTERÍSTICAS GERAIS
Análise (Intacta e Danificada)	Cargas	 <p>(b) Viga danificada V2E com localização do dano a 1,50m do apoio esquerdo, com longitude do dano de 2cm e aplicação da carga no meio do vão.</p>
Experimental	1020N	
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)	1320N	
	2280N	
Numérico: Viga Euler Bernoulli	3330N	
	4200N	
Análise (Intacta e Danificada)	Cargas	 <p>(c) Viga danificada V2E-2 com localização do dano a 1,50m do apoio esquerdo, com longitude do dano de 4cm e aplicação da carga no meio do vão.</p>
Experimental	990N	
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)	2040N	
	3060N	
Numérico: Viga Euler Bernoulli	3990N	
	4530N	
Análise (Intacta e Danificada)	Cargas	 <p>(d) Viga danificada V3E com localização do dano a 1,80m e 4,20m do apoio esquerdo, com longitude de cada dano de 2cm e aplicação da carga no meio do vão.</p>
Experimental	960N	
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)	2040N	
	3120N	
Numérico: Viga Euler Bernoulli	4350N	
	4620N	

Análise (Intacta e Danificada)	Cargas	 <p>(e) Viga danificada V4E com localização do dano a 4,875m do apoio esquerdo e aplicação da carga a 1,875m desse mesmo apoio.</p>
Experimental	1000N	
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)	2000N 3000N 4000N	
Numérico: Viga Euler Bernoulli		
Análise (Intacta e Danificada)	Cargas	 <p>(f) Viga danificada V5E com localização do dano no meio do vão (3,00m) e aplicação de cargas em ambos os lados das vigas.</p>
Experimental	1000N	
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)	2000N 3000N 4000N	
Numérico: Viga Euler Bernoulli		

As informações dos dados experimentais sintéticos (numéricos), é utilizada na terminologia relacionada a problemas inversos, uma vez que a resposta da estrutura foi conseguida a partir das respostas intactas e danificadas. A avaliação de danos através de dados experimentais trazem uma aproximação maior do comportamento real das estruturas tendo em vista que podem ser produzidas por uma aparelhagem de medição, apesar das limitações práticas para se obter muitas informações.

As funções objetivos produzidas pelos acúmulos das diferenças quadráticas das respostas intactas e danificadas utilizadas podem ser observadas na Equação (5.1) a seguir, que contempla:

$$F = \sum_{i=1}^6 (Y_m^{ij} - Y_a^{ij})^2 \quad (5.1)$$

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 danos serão simulados a fim de serem identificados pelo DE, por meio de respostas intactas e danificadas das estruturas. O otimizador fará com que ocorra sucessivas alterações nas variáveis de dano do modelo danificado para que sejam encontrados os danos em todos os elementos testados. O processo que envolve esse procedimento é composto pelo Problema Inverso que irá plotar o estado que a estrutura se mantém.

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.

5.1.1 Análise Estática da Viga 2 (V2E)

A seguir serão demonstradas as análises para diferentes passos de carga para a Viga 2 (V2E), ver Tabela 5.2 (b).

5.1.1.1 Viga 2 (V2E): carga 1020N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.3, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 1020N.

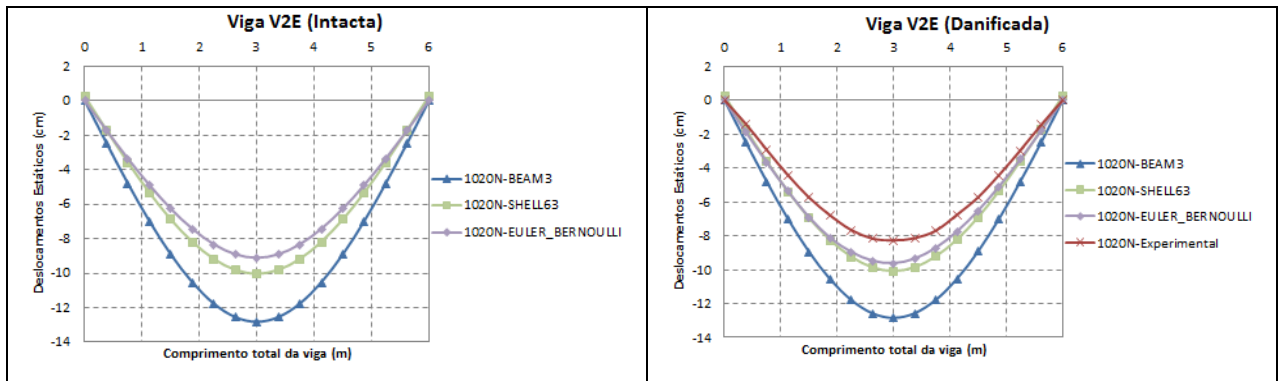


Figura 5.3 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1020N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.4 é mostrado o resultado da solução do problema.

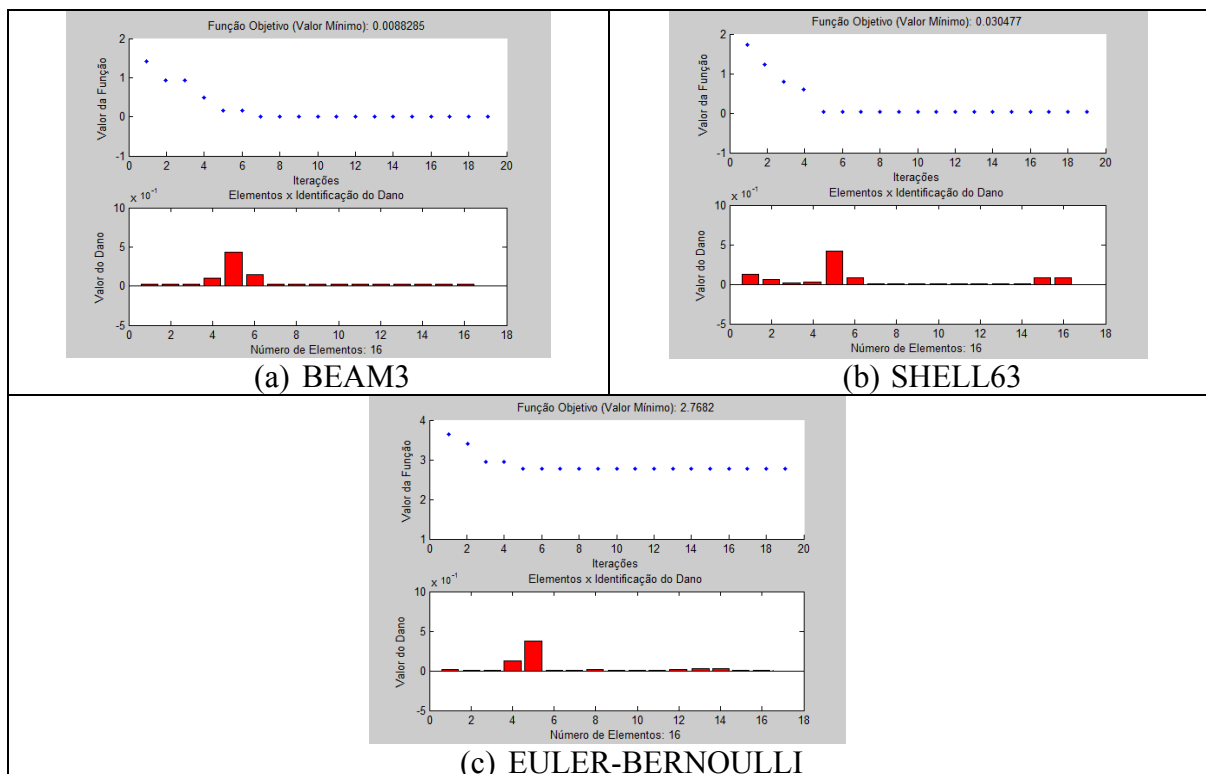


Figura 5.4 - Identificação de dano: Viga V2E carga 1020N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3 – Tabela resumo: Viga V2E carga 1020N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,00882848	Vigésima	45,00%	5
SHELL63	0,03047796	Vigésima	45,00%	5
EULER-BERNOULLI	2,76824840	Vigésima	45,00%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na vigésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3 há algumas perturbações próximas ao elemento danificado. Já com o elemento SHELL63, no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, com algumas perturbações, mas com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto.

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.5, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 1020N.

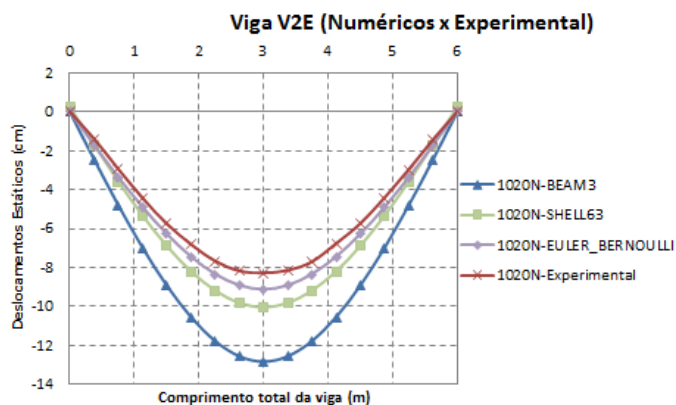


Figura 5.5 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1020N)

Essa tentativa de análise de identificação de dano não foi possível pois os deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas tem grandezas superiores aos valores obtidos na análise danificada via modelo experimental.

5.1.1.2 Viga 2 (V2E): carga 1320N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.6, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 1320N.

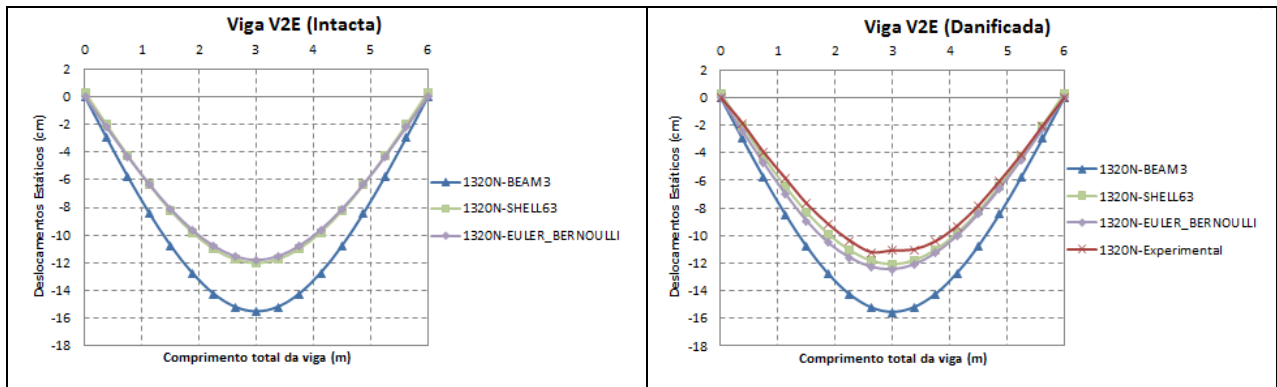


Figura 5.6 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1320N)

As simulações propostas na segunda abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.7 é mostrado o resultado da solução do problema.

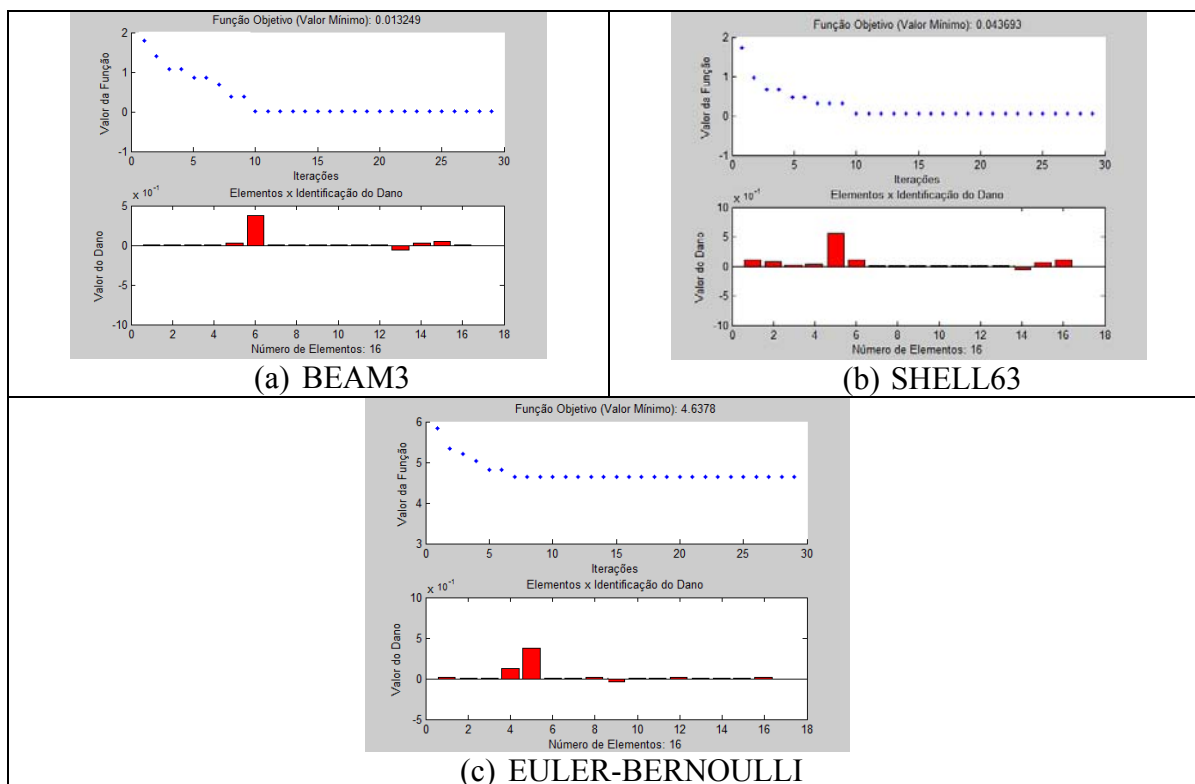


Figura 5.7 - Identificação de dano: Viga V2E carga 1320N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.4 a seguir.

Tabela 5.4 – Tabela resumo: Viga V2E carga 1320N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,01324942	Trigésima	45,00%	5
SHELL63	0,04369391	Trigésima	45,00%	5
EULER-BERNOULLI	4,63781823	Trigésima	45,00%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na trigésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, sendo que ao final da análise de danos caso fosse utilizado um número maior de iterações, possivelmente haveria uma melhor análise de resultados de identificação de dano, sem resíduos. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, sendo que no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por

causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações, para mais uma vez poder haver uma melhor análise de resultados de identificação de dano. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, com algumas perturbações, mas os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, sendo que se utilizado um número maior de iterações, possivelmente haveria uma melhor análise de resultados de identificação de dano.

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.8, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 1320N.

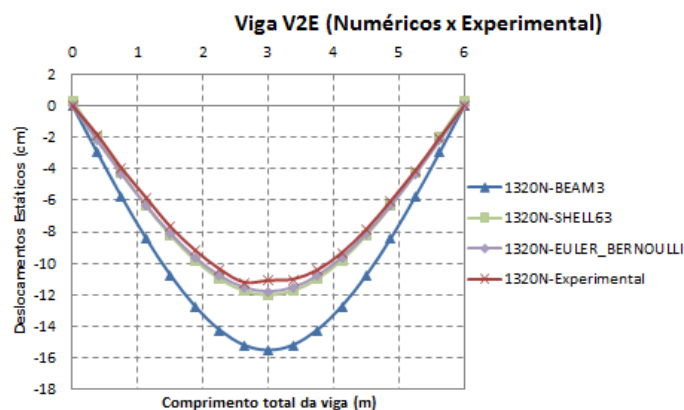


Figura 5.8 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 1020N)

Essa tentativa de análise de identificação de dano também não foi possível pois os deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas tem grandezas superiores aos valores obtidos na análise danificada via modelo experimental.

5.1.1.3 Viga 2 (V2E): carga 2280N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.9, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao

comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2280N.

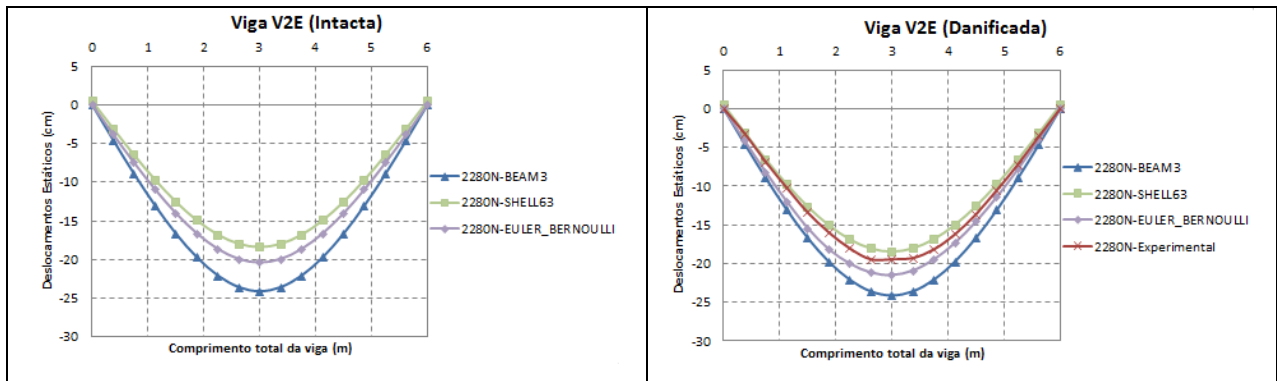


Figura 5.9 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 2280N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.10 é mostrado o resultado da solução do problema.

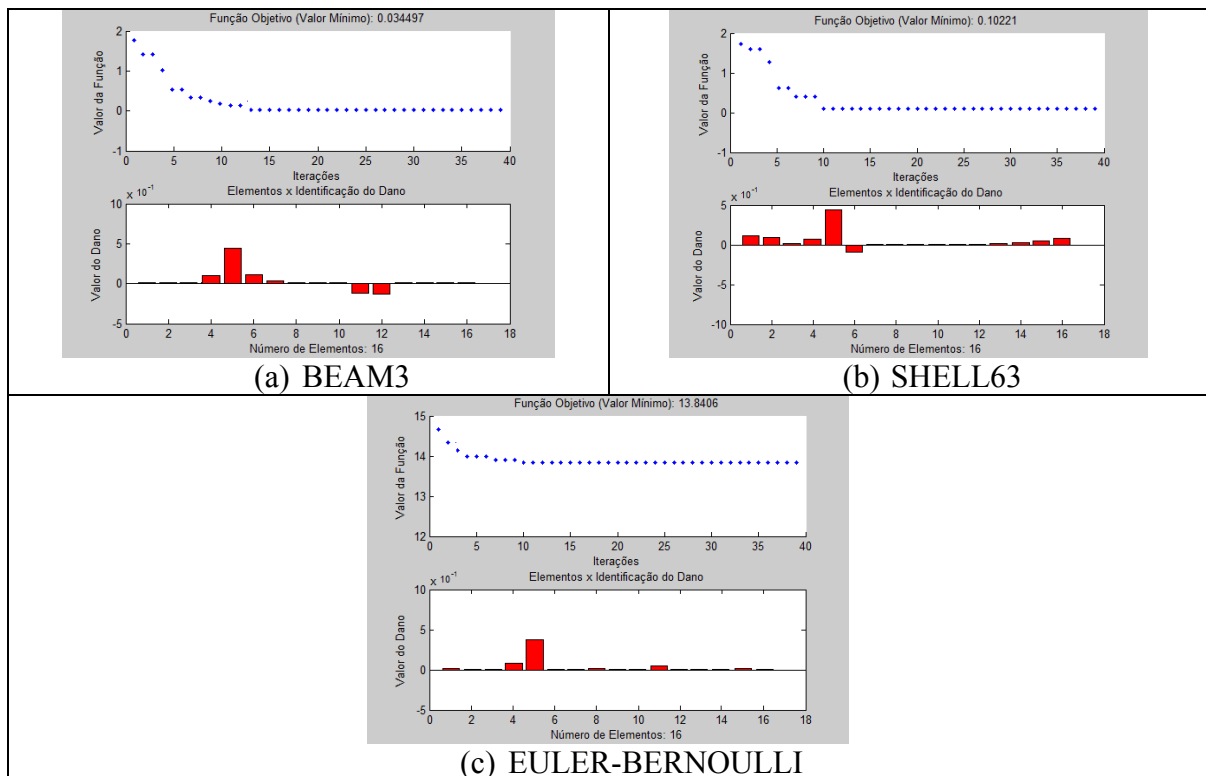


Figura 5.10 - Identificação de dano: Viga V2E carga 2280N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.11 (a), onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2280N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.11 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

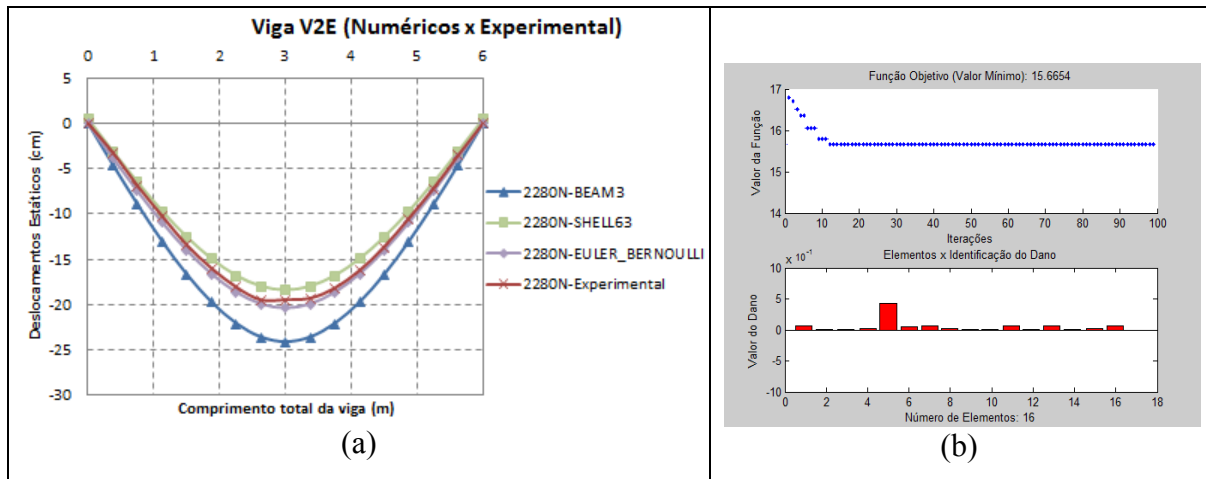


Figura 5.11 - Viga V2E carga 2280N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.5 a seguir.

Tabela 5.5 – Tabela resumo: Viga V2E carga 2280N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,03449685	Quadragésima	45,00%	5
SHELL63	0,10221124	Quadragésima	45,00%	5
EULER-BERNOULLI	13,84061903	Quadragésima	45,00%	5
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	15,66540000	Centésima	45,00%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na quadragésima iteração e o numérico-experimental na centésima iteração, onde os valores de danos dos

elementos seguiram em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com alguns pequenos picos. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações. Na análise com EULER-BERNOULLI, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com algumas pequenas distorções e com melhoras por causa do número de iterações utilizadas.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior ainda de iterações.

5.1.1.4 Viga 2 (V2E): carga 3330N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.12, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3330N.

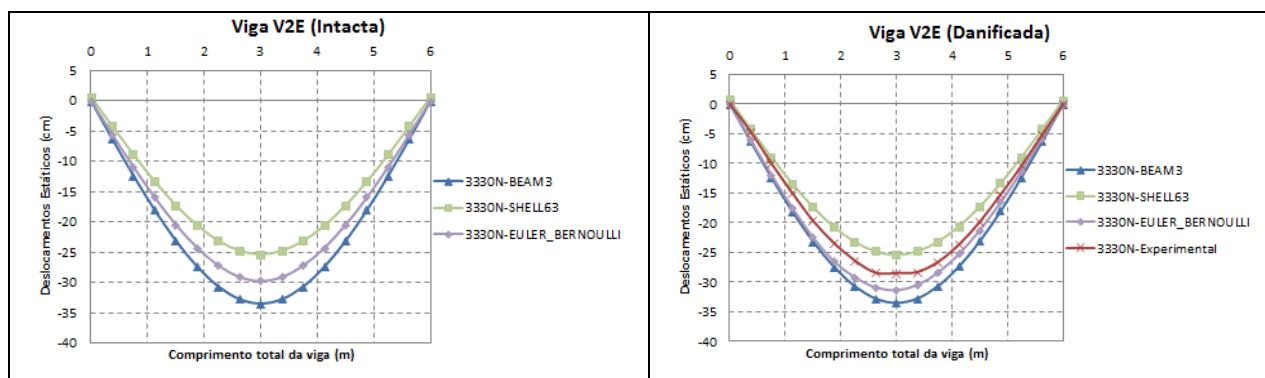


Figura 5.12 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 3330N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.13 é mostrado o resultado da solução do problema.

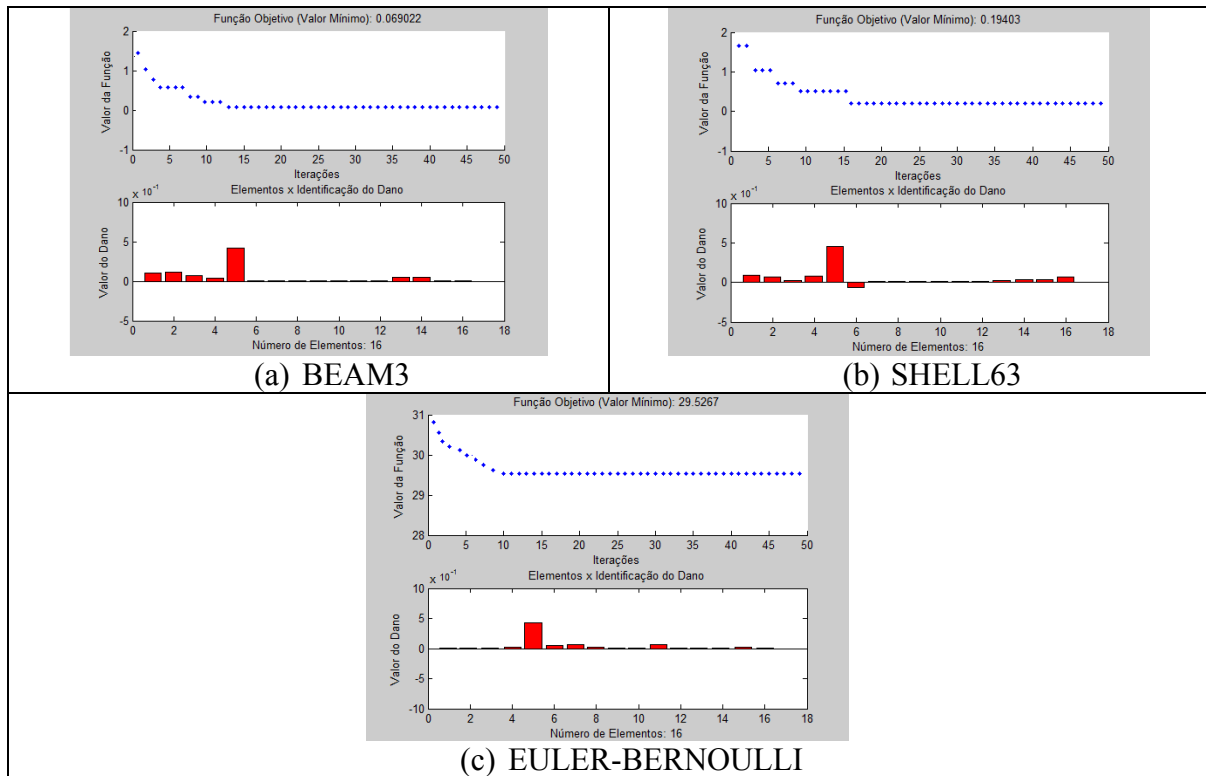


Figura 5.13 - Identificação de dano: Viga V2E carga 3330N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.14 (a), onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3330N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.14 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

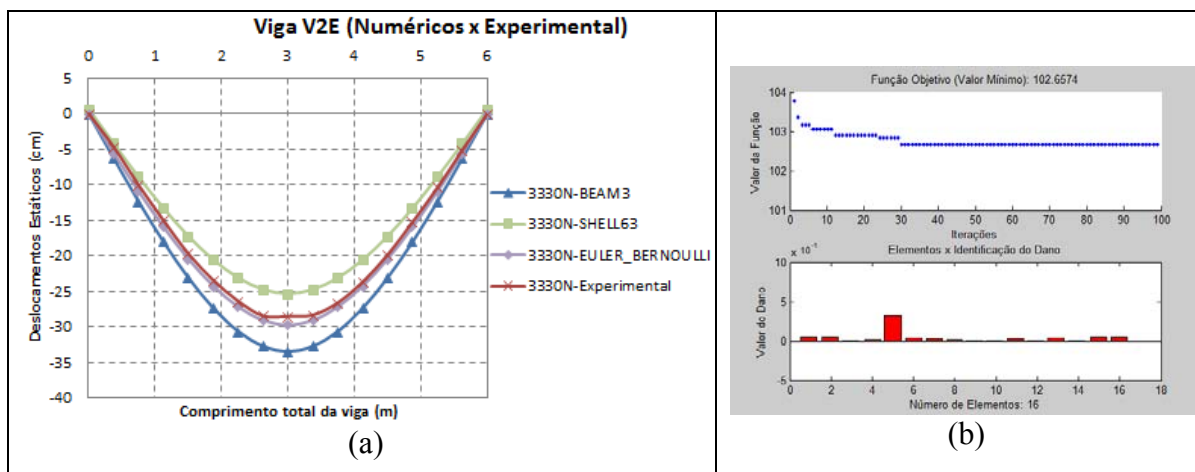


Figura 5.14 - Viga V2E carga 3330N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.6 a seguir.

Tabela 5.6 – Tabela resumo: Viga V2E carga 3330N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,06902206	Quinquagésima	45,00%	5
SHELL63	0,19403575	Quinquagésima	45,00%	5
EULER-BERNOULLI	29,52675177	Quinquagésima	45,00%	5
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	102,65740000	Centésima	45,00%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na quinquagésima iteração e o numérico-experimental na centésima iteração, onde os valores de danos dos elementos seguiram em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, encontrando poucos resíduos. Já com o elemento SHELL63, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações, para mais uma vez poder haver uma melhor análise de resultados de identificação de dano. Na análise com EULER-BERNOULLI, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com pequenas variações.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma provavelmente com a utilização de um número maior de iterações com a consequente diminuição dos resíduos gerados.

5.1.1.5 Viga 2 (V2E): carga 4200N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.15, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4200N.

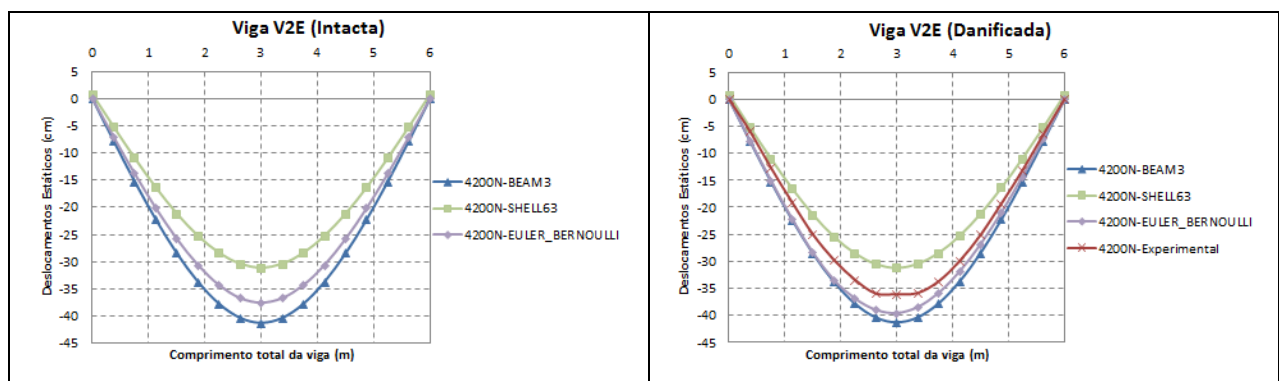


Figura 5.15 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 4200N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.16 é mostrado o resultado da solução do problema.

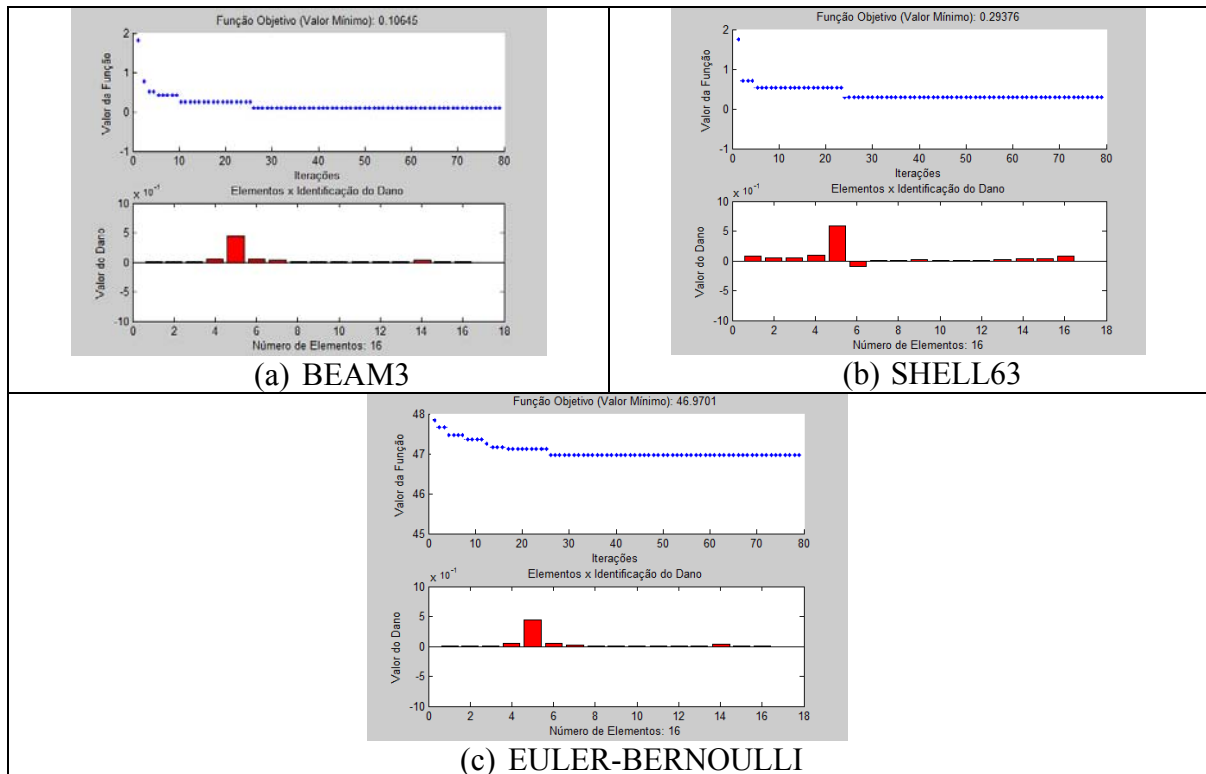


Figura 5.16 - Identificação de dano: Viga V2E carga 4200N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na Figura 5.17 (a), onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4200N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.17 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

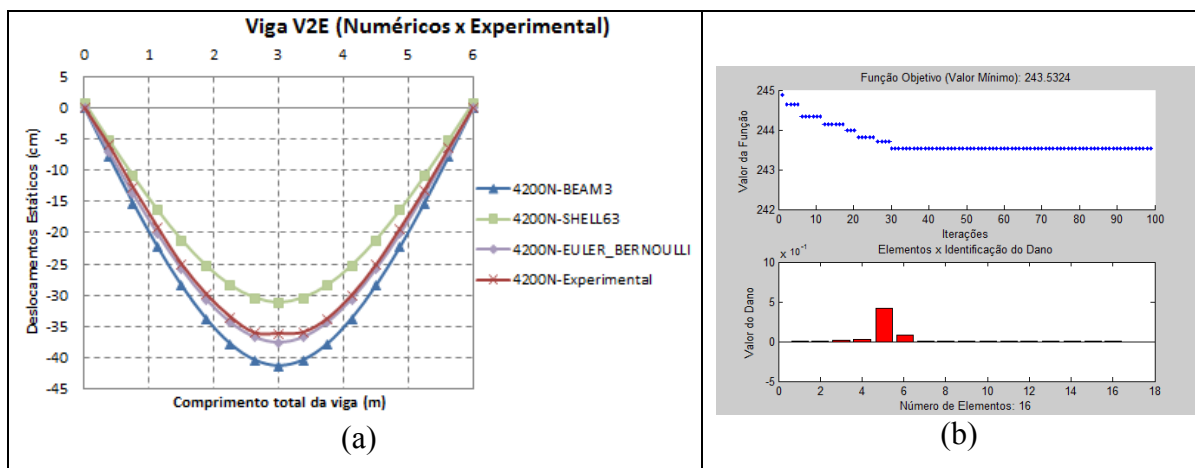


Figura 5.17 - Viga V2E carga 4200N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.6 a seguir.

Tabela 5.7 – Tabela resumo: Viga V2E carga 4200N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,10645205	Octagésima	45,00%	5
SHELL63	0,29376007	Octagésima	45,00%	5
EULER-BERNOULLI	46,97010570	Octagésima	45,00%	5
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	243,53240000	Centésima	45,00%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na octagésima iteração e o numérico-experimental na centésima iteração, onde os valores de danos dos elementos seguiram em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com pequenas variações. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, há algumas distorções, mais uma vez por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, com uma diminuição das distorções por causa do número maior de iterações, propiciando uma melhor análise de resultados de identificação de dano. Na análise com EULER-BERNOULLI, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema

proposto, há pequenas distorções, mas o número maior de iterações, propicia uma melhor análise de resultados de identificação de dano.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com algumas diferenças na região de proximidade ao dano, mas com bons valores devido ao número maior de iterações feitas.

5.1.1.6 Considerações gerais de resultados da viga 2 (V2E)

As análises de identificação de dano nesse exemplo, se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas, sendo utilizado um número pequeno de iterações que geram a presença de resíduos de identificação de danos em outros elementos, principalmente 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 dessa Viga 2 (V2E), pode-se afirmar também que um número maior de informações de deslocamentos também auxiliariam no trabalho do otimizador. As respostas tiveram características de convergência relativamente rápidas, levando-se em conta a pequena quantidade de iterações envolvidas. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer da estrutura em estudo.

5.1.2 Análise Estática da Viga 3 (V2E-2)

A seguir serão demonstradas as análises para diferentes passos de carga para a Viga 3 (V2E-2), ver Tabela 5.2 (c).

5.1.2.1 Viga 3 (V2E-2): carga 990N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.18, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao

comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 990N.

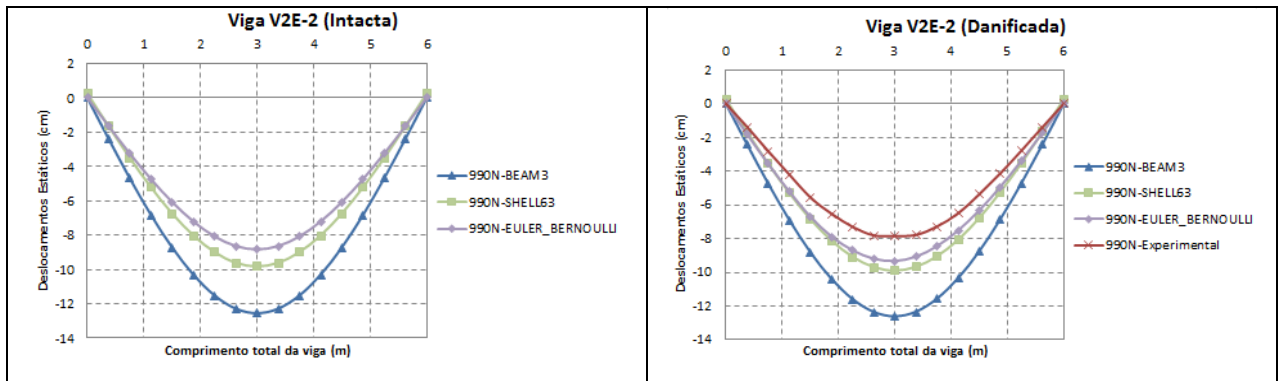


Figura 5.18 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 990N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.19 é mostrado o resultado da solução do problema.

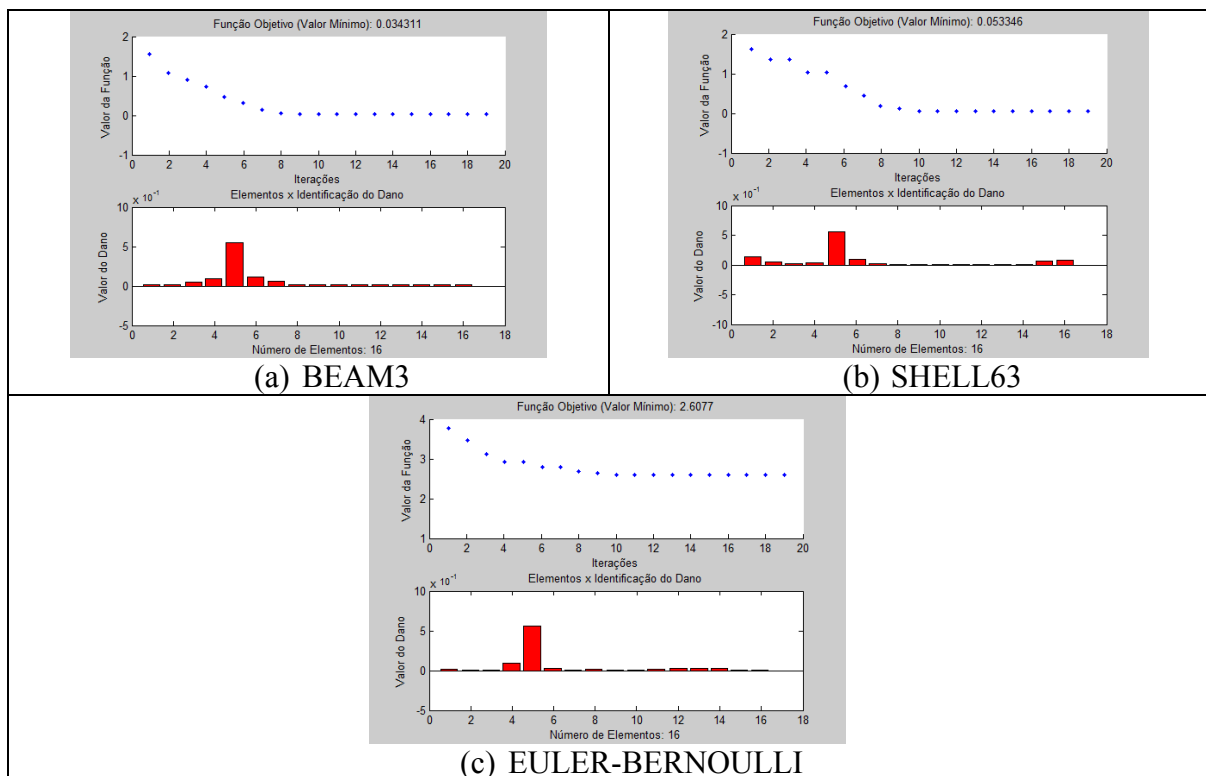


Figura 5.19 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 990N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.8 a seguir.

Tabela 5.8 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 990N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,03431154	Vigésima	65,50%	5
SHELL63	0,05334656	Vigésima	65,50%	5
EULER-BERNOULLI	2,60769024	Vigésima	65,50%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na vigésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3 há mais uma vez algumas perturbações próximas ao elemento danificado. Já com o elemento SHELL63, no início e final da análise de danos com alguns resíduos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, podendo sanar ou diminuir os mesmos provavelmente com a utilização de um número maior de iterações. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, já com alguns resíduos, mas com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto.

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.5, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 990N.

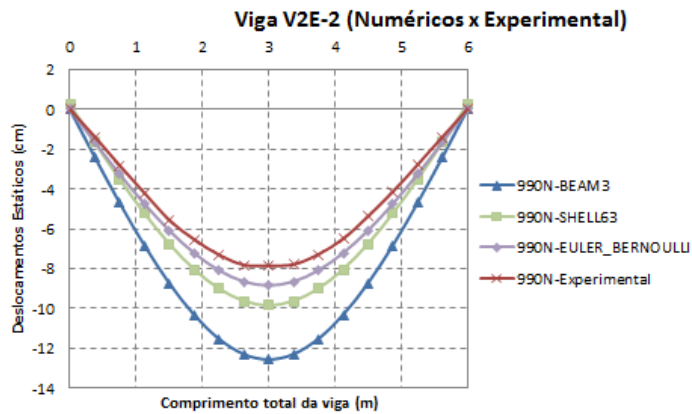


Figura 5.20 - Análises gráficas intactas (numéricas) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 990N)

Essa tentativa de análise de identificação de dano não foi possível pois os deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas tem grandezas superiores aos valores obtidos na análise danificada via modelo experimental.

5.1.2.2 Viga 3 (V2E-2): carga 2040N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.21, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2040N.

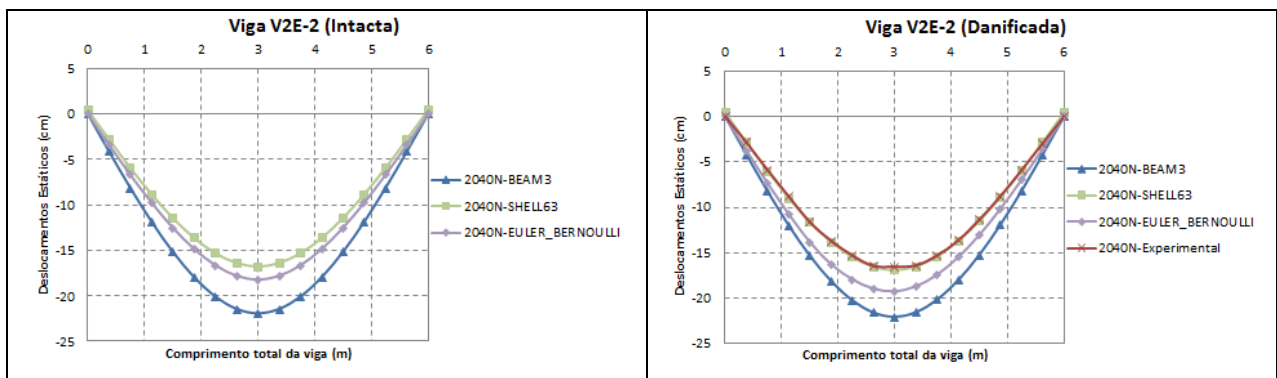


Figura 5.21 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 2040N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados

os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.22 é mostrado o resultado da solução do problema.

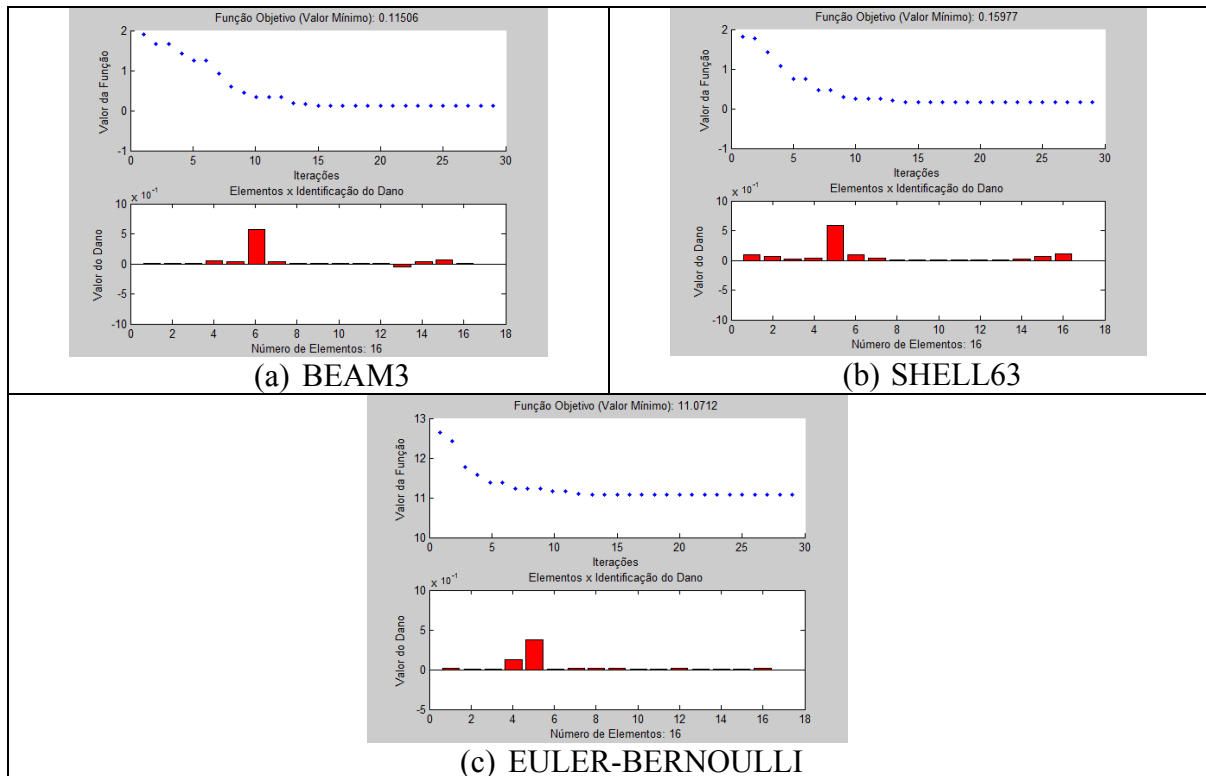


Figura 5.22 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 2040N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.9 a seguir.

Tabela 5.9 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 2040N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,11506073	Trigésima	65,50%	5
SHELL63	0,15976978	Trigésima	65,50%	5
EULER-BERNOULLI	11,07122538	Trigésima	65,50%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na trigésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, sendo que ao final da análise de danos caso fosse utilizado um número maior de iterações, possivelmente haveria uma melhor análise de resultados de identificação de dano, já não mais com os resíduos observados. O

elemento SHELL63, teve os valores de danos dos elementos seguindo o problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve alguns resíduos, provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, e mais uma vez com a utilização de um número maior de iterações, podendo haver uma melhor análise de resultados de identificação de dano. Já a análise com EULER-BERNOULLI, com algumas distorções, mas os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, sendo que se utilizado um número maior de iterações, possivelmente haveria uma melhor análise de resultados de identificação de dano com a consequente diminuição dos resíduos.

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.23, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2040N.

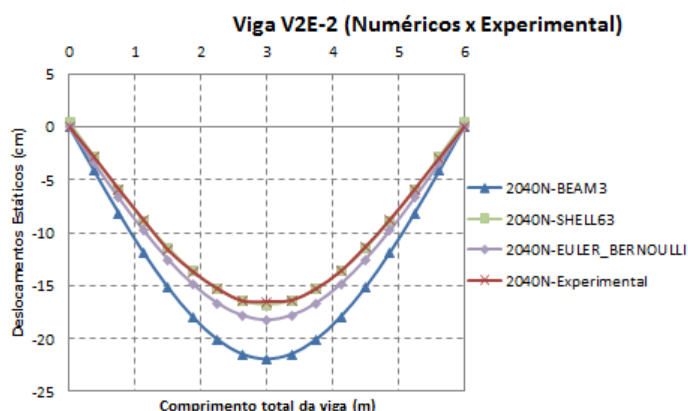


Figura 5.23 - Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 2040N)

Essa tentativa de análise de identificação de dano não foi possível pois os deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas tem grandezas superiores aos valores obtidos na análise danificada via modelo experimental.

5.1.2.3 Viga 3 (V2E-2): carga 3060N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.24, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao

comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3060N.

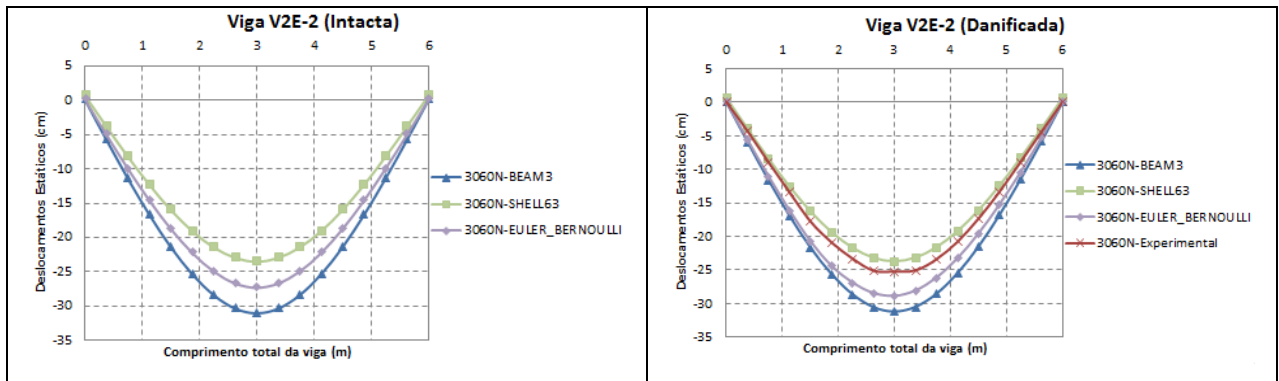


Figura 5.24 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 3060N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.25 é mostrado o resultado da solução do problema.

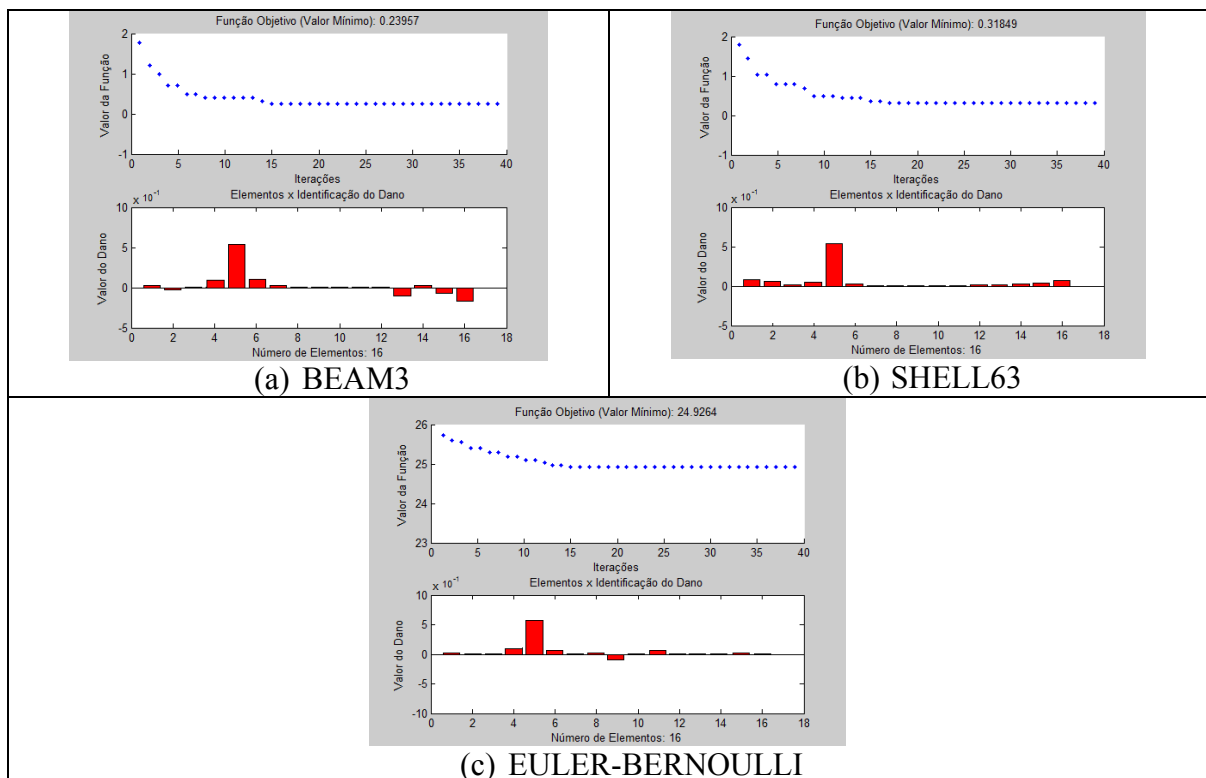


Figura 5.25 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3060N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.26 (a), onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3060N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.26 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

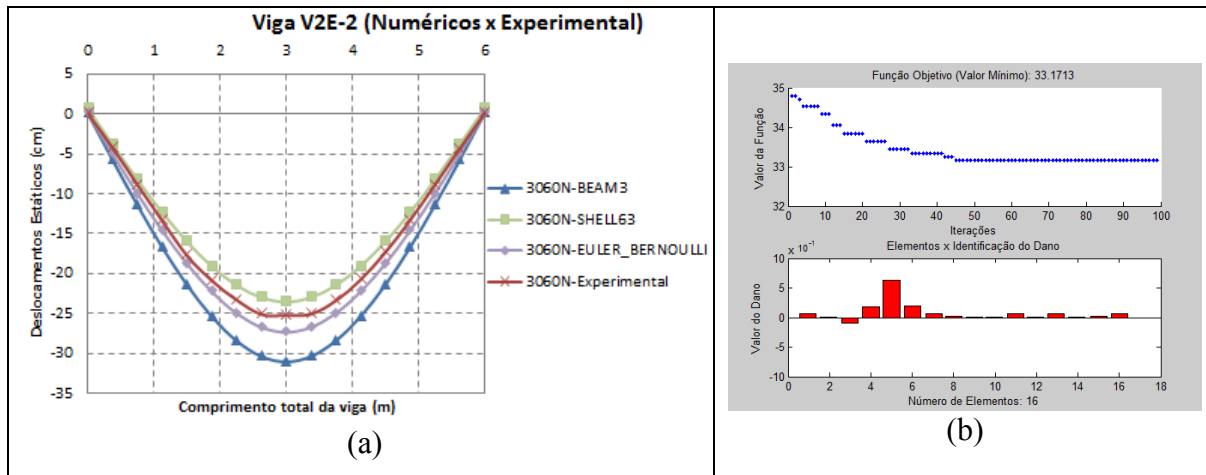


Figura 5.26 - Viga V2E-2 carga 3060N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.10 a seguir.

Tabela 5.10 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 3060N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,23957408	Quadragésima	65,50%	5
SHELL63	0,31849000	Quadragésima	65,50%	5
EULER-BERNOULLI	24,92639353	Quadragésima	65,50%	5
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	33,17130000	Centésima	65,50%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na quadragésima iteração e o numérico-experimental na centésima iteração, onde os valores de danos dos

elementos seguiram em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com pequenas variações de resíduos de danos. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, há alguns resíduos de danos, mais uma vez por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, com uma diminuição das distorções por causa do número maior de iterações, propiciando uma melhor análise de resultados de identificação de dano. Na análise com EULER-BERNOULLI, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, há pequenas variações de resíduos de danos, mas o número maior de iterações, propiciando uma boa identificação de dano.

E por último, na análise numérico-experimental, também com um número maior de iterações, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com algumas diferenças na região de proximidade ao dano, mas com bons resultados devido ao número maior de iterações feitas.

5.1.2.4 Viga 3 (V2E-2): carga 3990N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.27, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3990N.

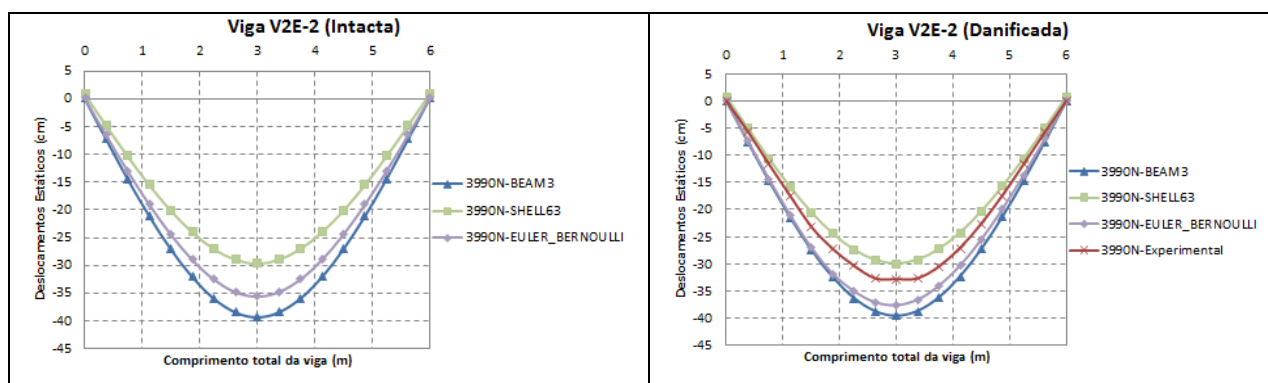


Figura 5.27 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 3990N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.28 é mostrado o resultado da solução do problema.

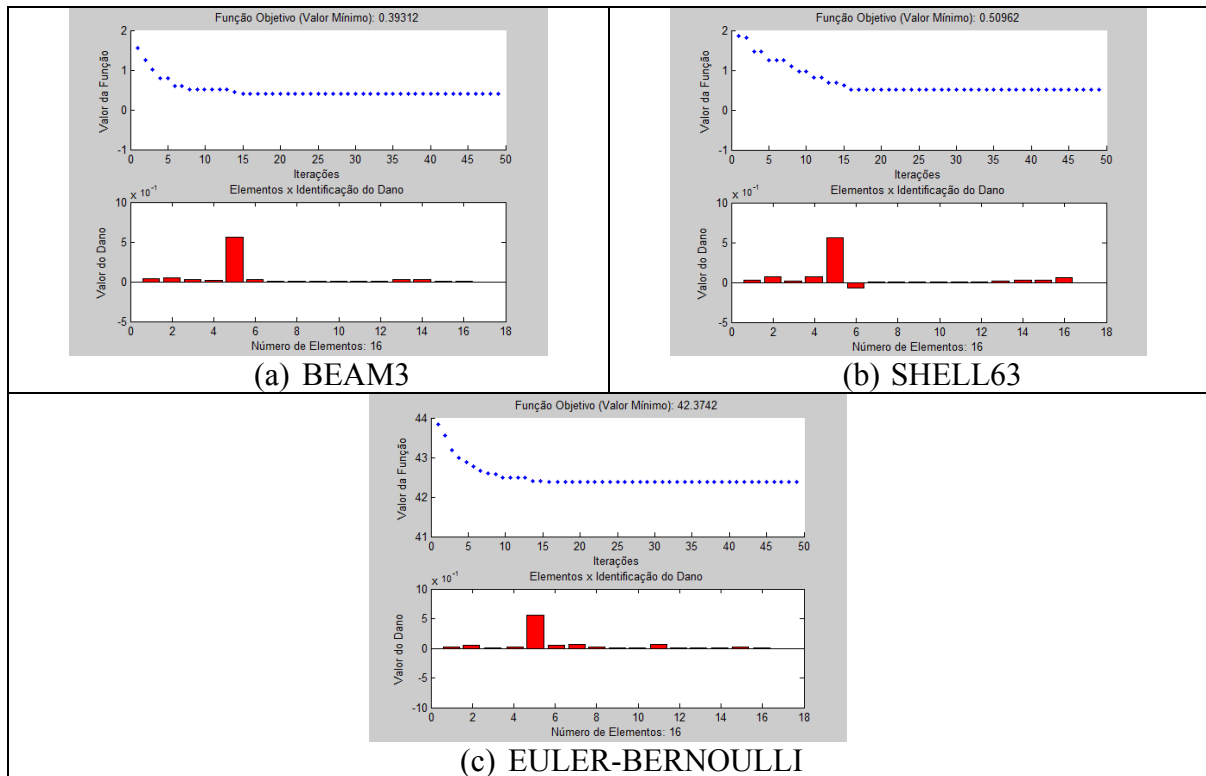


Figura 5.28 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3990N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.29 (a), onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3990N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.29 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

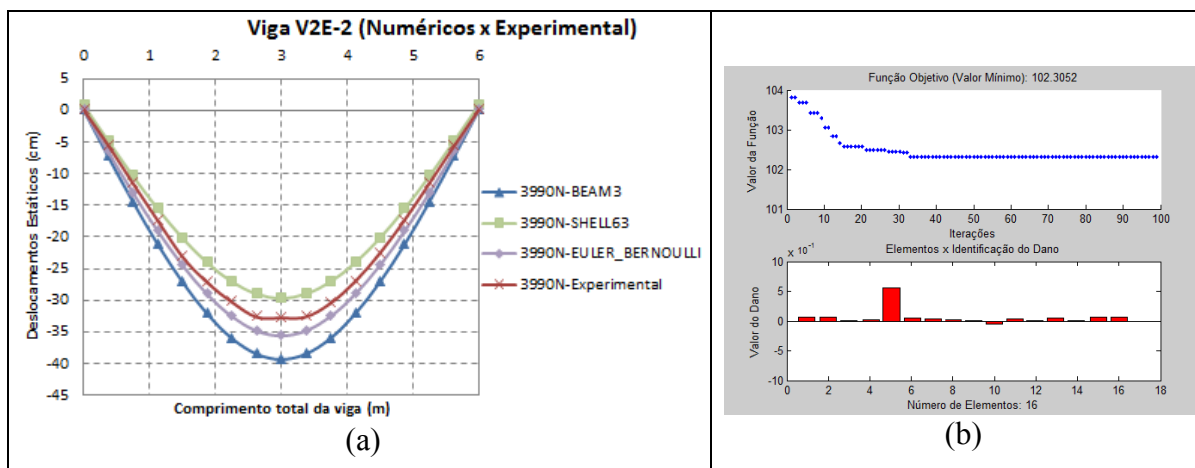


Figura 5.29 - Viga V2E-2 carga 3990N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.11 a seguir.

Tabela 5.11 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 3990N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,39312000	Quinquagésima	65,50%	5
SHELL63	0,50962591	Quinquagésima	65,50%	5
EULER-BERNOULLI	42,37424537	Quinquagésima	65,50%	5
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	102,30520000	Centésima	65,50%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na quinquagésima iteração e o numérico-experimental na centésima iteração, onde os valores de danos dos elementos seguiram em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, encontrando poucos resíduos de danos. Já com o elemento SHELL63, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde houve poucas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações, para mais uma vez poder haver uma melhor análise de resultados de identificação de dano. Na análise com EULER-BERNOULLI, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com pequenas variações para a avaliação de danos.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve alguns resíduos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma provavelmente com a utilização de um número maior de iterações com a consequente diminuição dos resíduos gerados.

5.1.2.5 Viga 3 (V2E-2): carga 4530N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.30, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4530N.

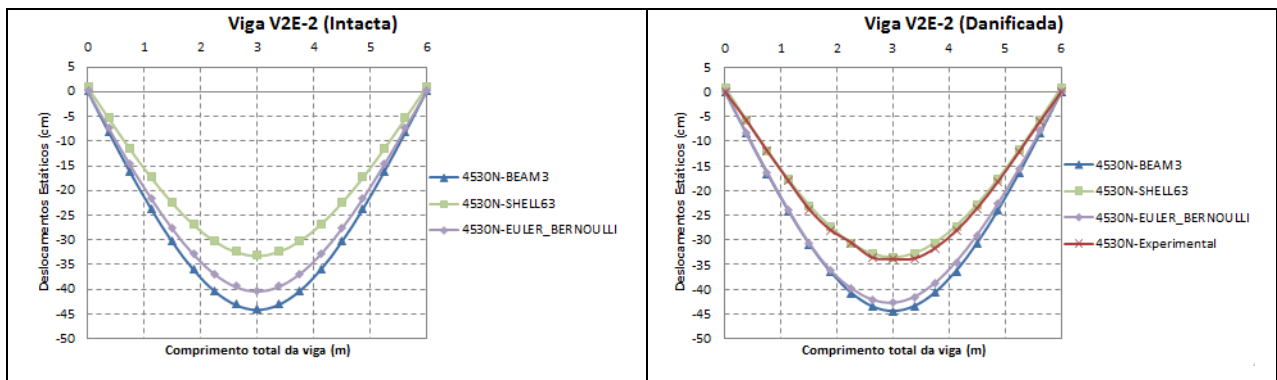


Figura 5.30 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 4530N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.31 é mostrado o resultado da solução do problema.

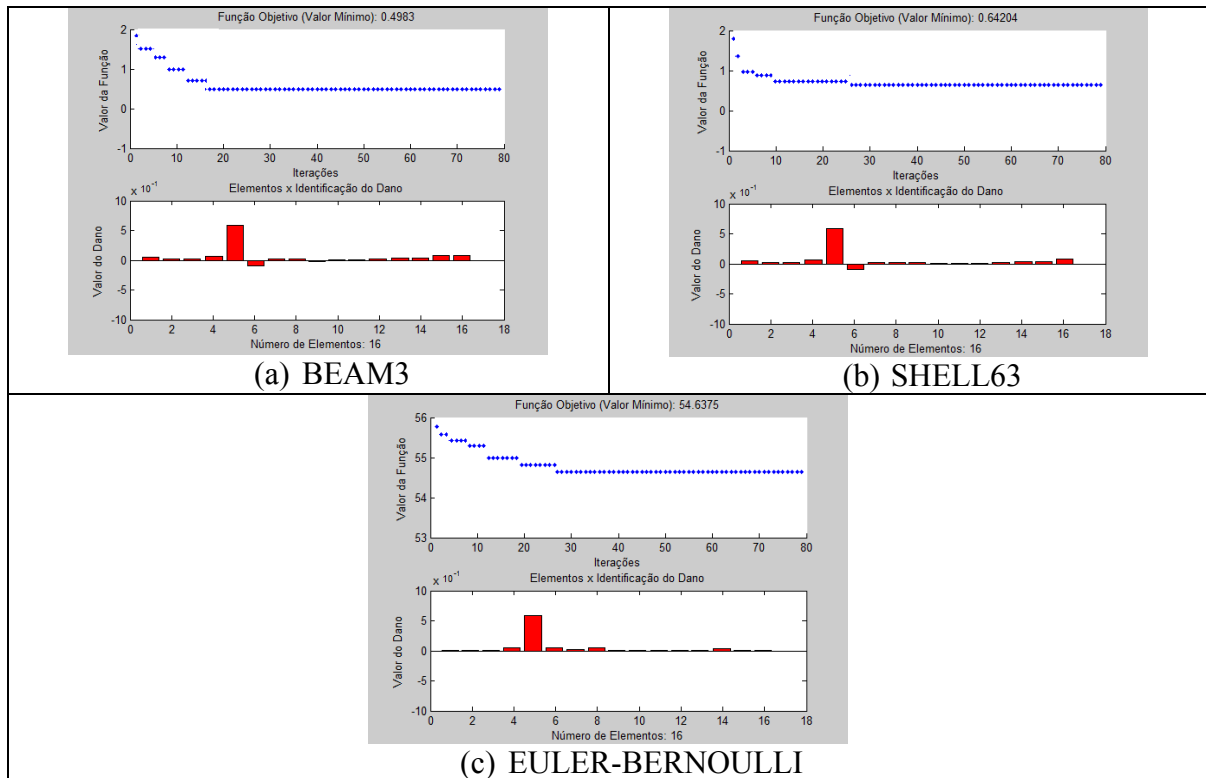


Figura 5.31 - Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 4530N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na Figura 5.32 (a), onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4530N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.32 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

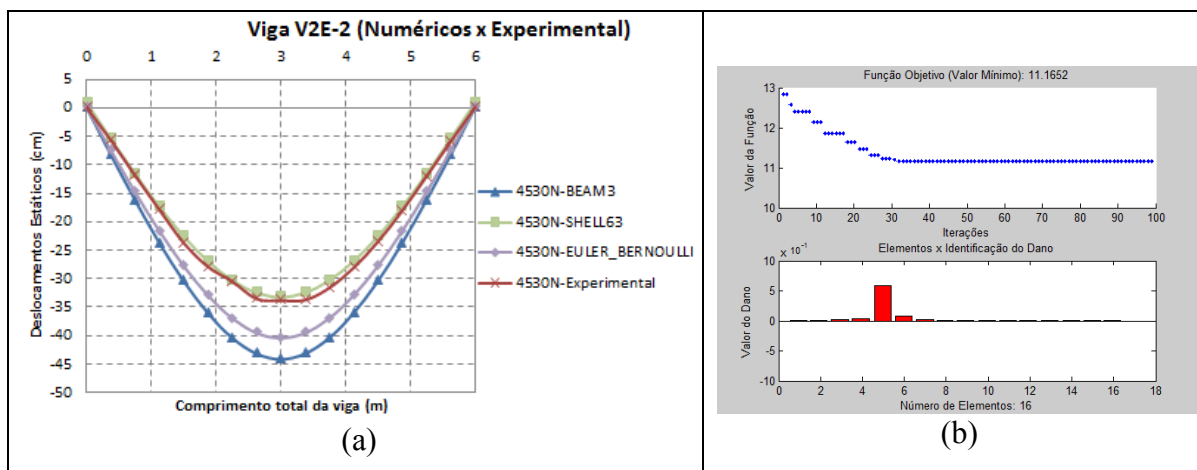


Figura 5.32 - Viga V2E-2 carga 4530N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.12 a seguir.

Tabela 5.12 – Tabela resumo: Viga V2E-2 carga 4530N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,49830190	Octagésima	65,50%	5
SHELL63	0,64204528	Octagésima	65,50%	5
EULER-BERNOULLI	54,63753836	Octagésima	65,50%	5
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	11,16520000	Centésima	65,50%	5

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na octagésima iteração e o numérico-experimental na centésima iteração, onde os valores de danos dos elementos seguiram em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com pequenas variações dos resíduos de identificação de danos. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, há algumas variações, mais uma vez por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, com uma diminuição das distorções por causa do número maior de iterações, propiciando uma melhor análise de resultados de identificação de dano. Na análise com EULER-BERNOULLI, os valores de danos dos elementos seguem em

conformidade ao problema proposto, há pequenos resíduos, mas o número maior de iterações, propicia uma melhor análise de resultados de identificação de dano.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com algumas diferenças na região de proximidade ao dano, mas com bons valores devido ao número maior de iterações feitas.

5.1.2.6 Considerações gerais de resultados da viga 3 (V2E-2)

Já nas análises de identificação de dano nesse exemplo, que também se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises experimentais danificadas, numéricas intactas e danificadas, com a presença de um dano maior que o proposto na estrutura em estudo anterior, também com um número pequeno de iterações que geraram a presença de resíduos de identificação de danos em outros elementos, principalmente onde houvesse grandes diferenças de deslocamentos, presença de cargas pontuais, proximidades dos apoios ou mesmo nas proximidades das regiões danificadas, mas 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 dessa Viga 3 (V2E-2), pode-se afirmar também que um número maior de informações de deslocamentos também auxiliariam no trabalho do otimizador. As respostas tiveram características de convergência relativamente rápidas, levando-se em conta a pequena quantidade de iterações envolvidas. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer da estrutura em estudo.

5.1.3 Análise Estática da Viga 4 (V3E)

A seguir serão demonstradas as análises para diferentes passos de carga para a Viga 4 (V3E), ver Tabela 5.2 (d).

5.1.3.1 – Viga 4 (V3E): carga 960N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.33, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 960N.

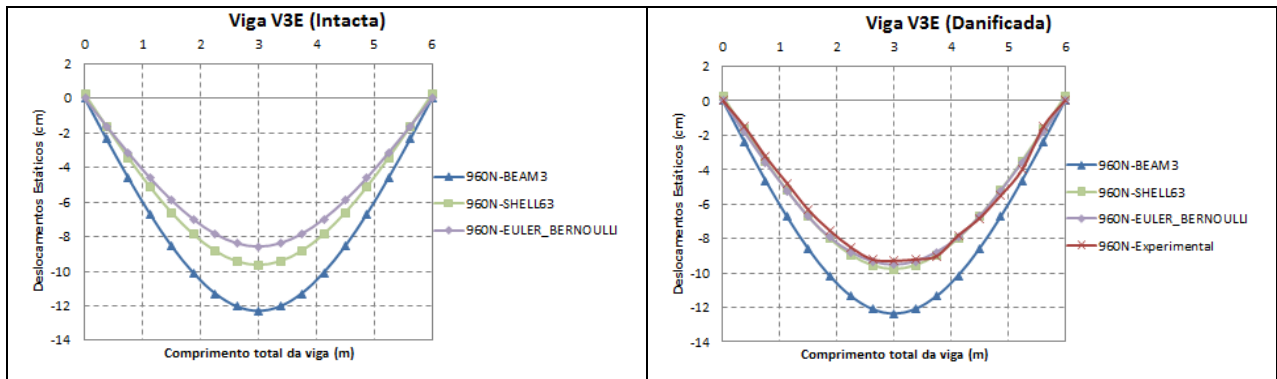
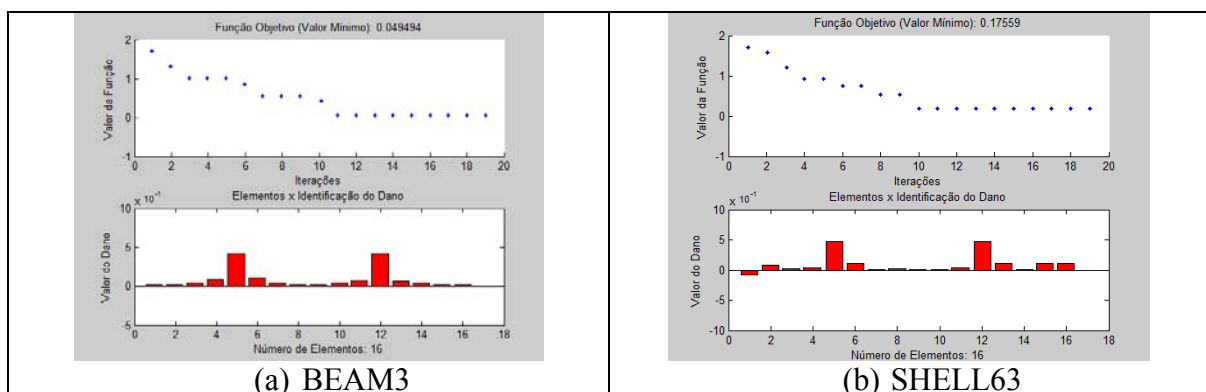


Figura 5.33 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 960N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.34 é mostrado o resultado da solução do problema.



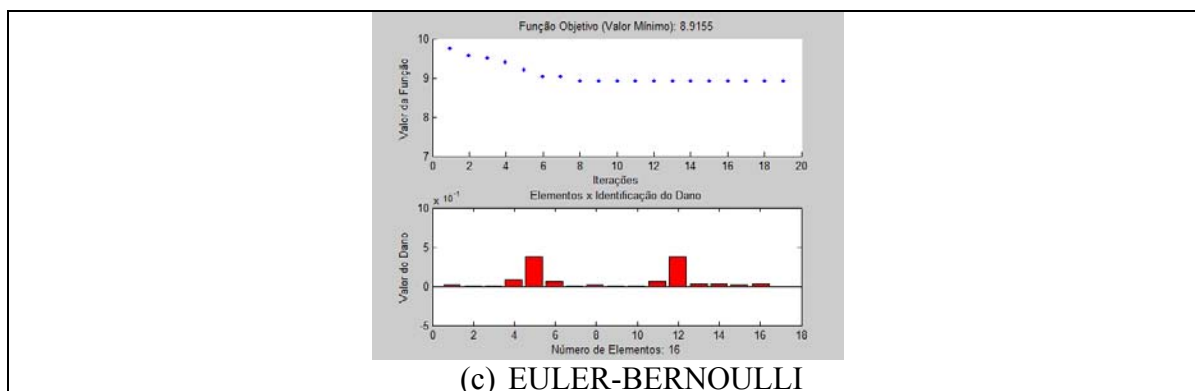


Figura 5.34 - Identificação de dano: Viga V3E carga 960N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.13 a seguir.

Tabela 5.13 – Tabela resumo: Viga V3E carga 960N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elementos Danificados
BEAM3	0,04949385	Vigésima	45,00%	5 e 12
SHELL63	0,17559067	Vigésima	45,00%	5 e 12
EULER-BERNOULLI	8,91554887	Vigésima	45,00%	5 e 12

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na vigésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se danos de 45% nos elementos 5 e 12, com dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3 há algumas perturbações próximas aos elementos danificados, pequenos resíduos. Já com o elemento SHELL63, no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações, até nas proximidades dos elementos danificados. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, com alguns resíduos, mas com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto.

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.35, onde: o

eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 960N.

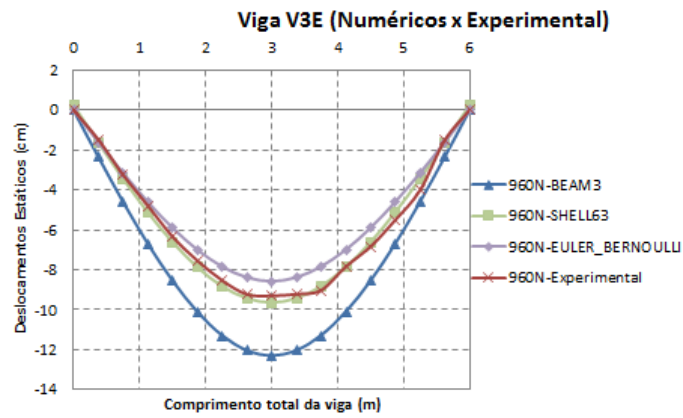


Figura 5.35 - Análises gráficas intactas (numéricas) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 960N)

Essa tentativa de análise de identificação de dano não foi possível pois os deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas tem grandezas superiores aos valores obtidos na análise danificada via modelo experimental.

5.1.3.2 Viga 4 (V3E): carga 2040N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.36, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2040N.

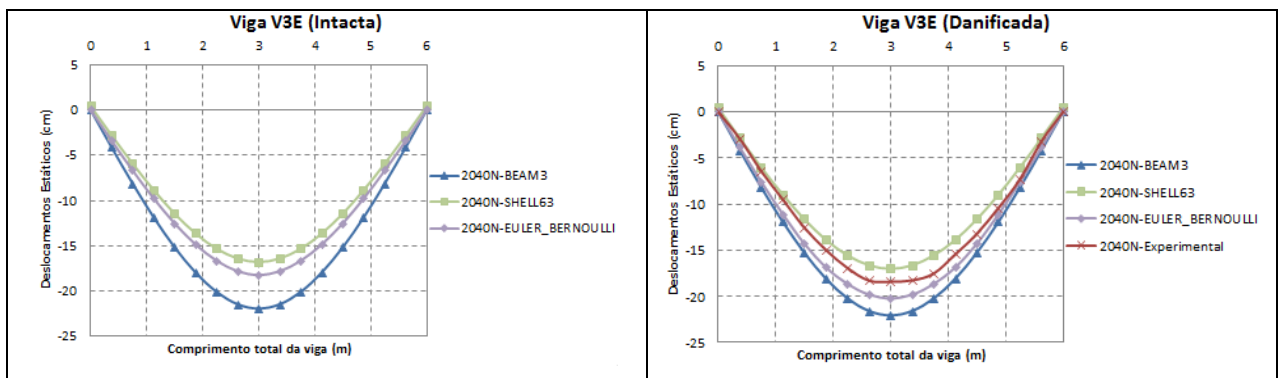


Figura 5.36 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 2040N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.37 é mostrado o resultado da solução do problema.

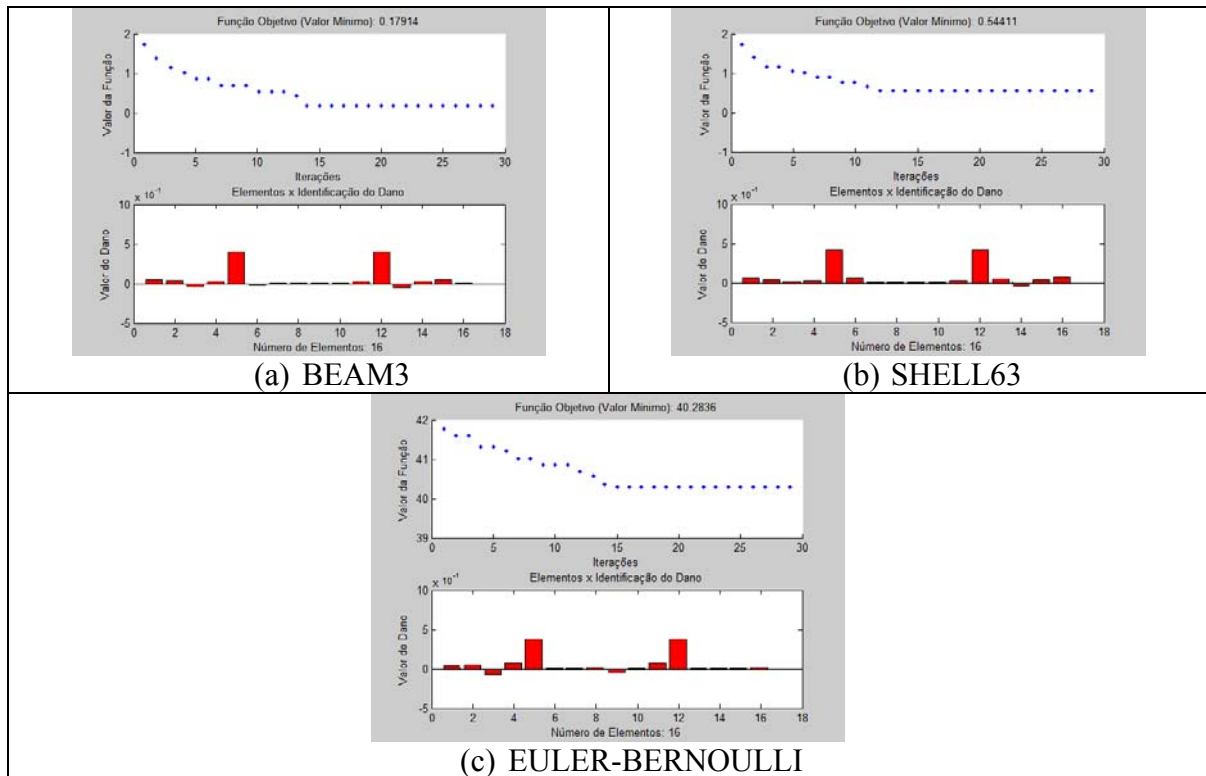


Figura 5.37 - Identificação de dano: Viga V3E carga 2040N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.38 (a), onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2040N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.38 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

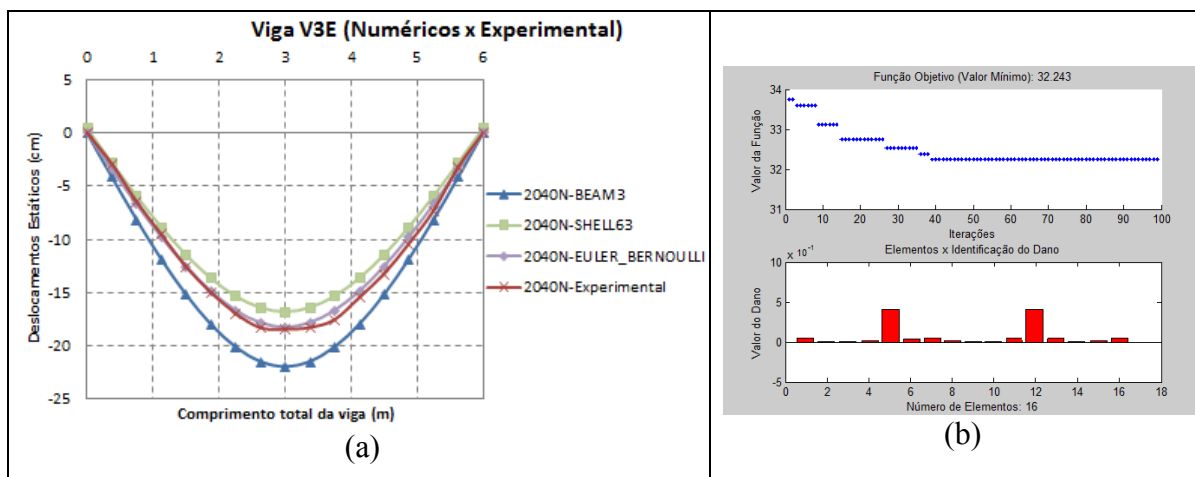


Figura 5.38 - Viga V3E carga 2040N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.14 a seguir.

Tabela 5.14 – Tabela resumo: Viga V3E carga 2040N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,17914158	Trigésima	45,00%	5 e 12
SHELL63	0,54411441	Trigésima	45,00%	5 e 12
EULER-BERNOULLI	40,28359062	Trigésima	45,00%	5 e 12
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	32,24300000	Centésima	45,00%	5 e 12

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na trigésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se danos de 45% nos elementos 5 e 12, com dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com alguns pequenos picos. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações. Na análise com EULER-BERNOULLI, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com alguns pequenos resíduos e com possíveis melhoras por causa do número de iterações utilizadas.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve alguns resíduos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, e na tentativa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior ainda de iterações.

5.1.3.3 Viga 4 (V3E): carga 3120N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.39, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3120N.

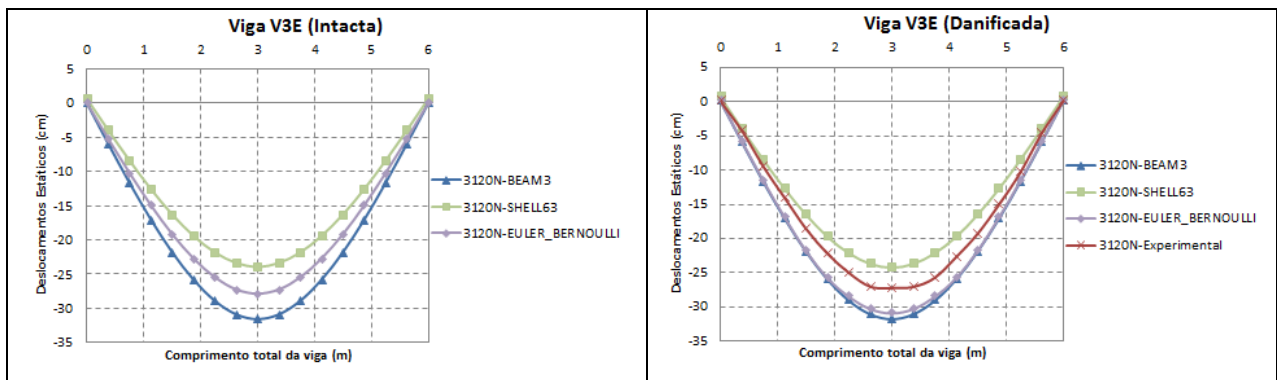


Figura 5.39 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 3120N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.40 é mostrado o resultado da solução do problema.

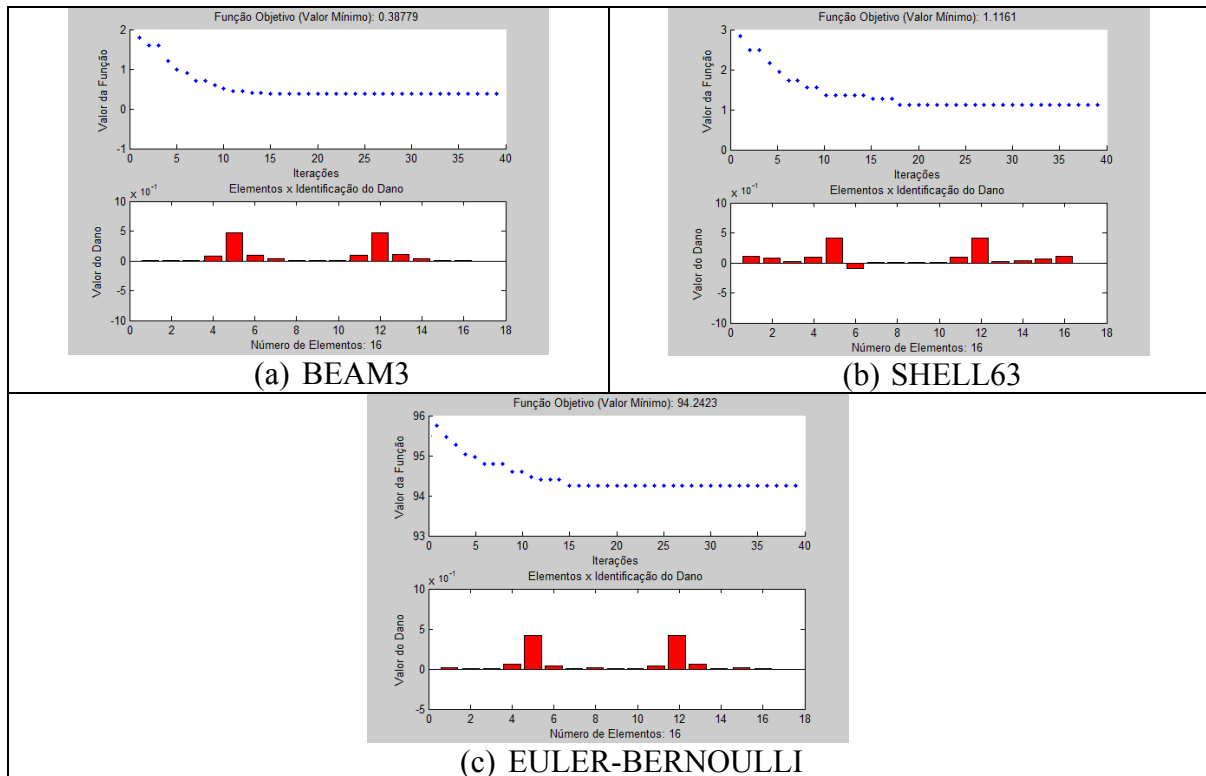


Figura 5.40 - Identificação de dano: Viga V3E carga 3120N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.41 (a), onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3120N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.41 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

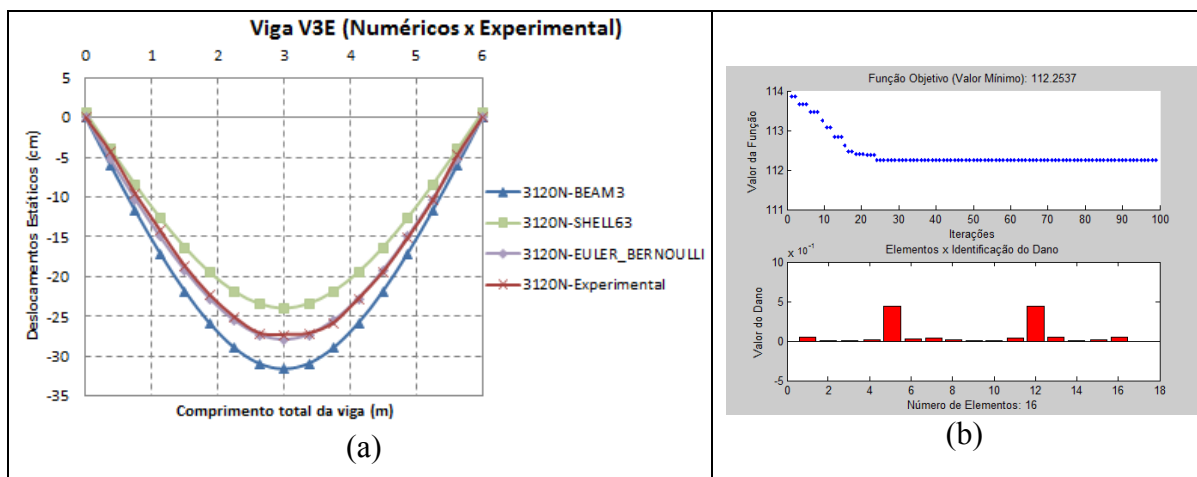


Figura 5.41 - Viga V3E carga 3120N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.15 a seguir.

Tabela 5.15 – Tabela resumo: Viga V3E carga 3120N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,38779213	Quadragésima	45,00%	5 e 12
SHELL63	0,10221124	Quadragésima	45,00%	5 e 12
EULER-BERNOULLI	1,11613561	Quadragésima	45,00%	5 e 12
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	94,24233792	Centésima	45,00%	5 e 12

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na trigésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se danos de 45% nos elementos 5 e 12, com dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com alguns pequenos picos de resíduos. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve alguns resíduos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, melhorando a mesma com a utilização de um número maior de iterações. Na análise com EULER-BERNOULLI, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com algumas pequenas distorções, mas com nítidas melhoras por causa do número de iterações utilizadas.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e no final da análise de danos encontrou-se alguns resíduos, provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior ainda de iterações, mas já com bons resultados.

5.1.3.4 Viga 4 (V3E): carga 4350N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.12, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4350N.

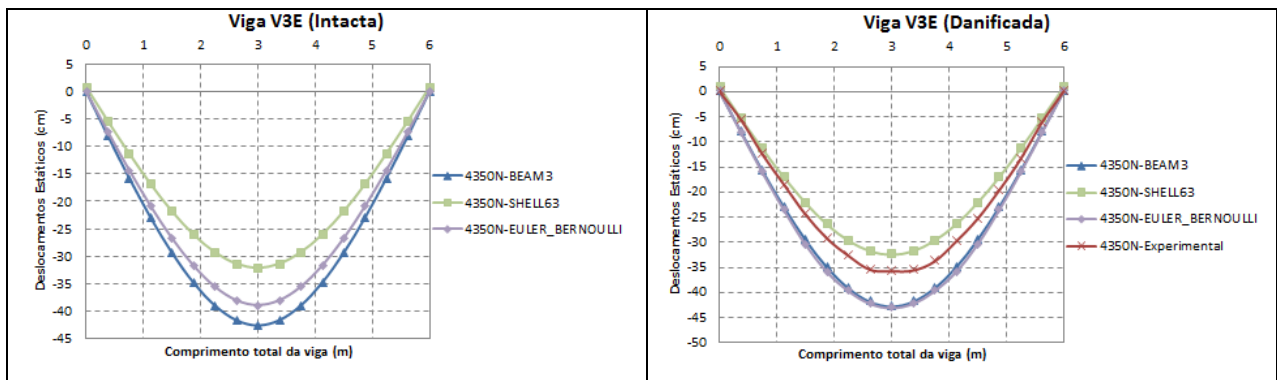


Figura 5.42 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 4350N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.13 é mostrado o resultado da solução do problema.

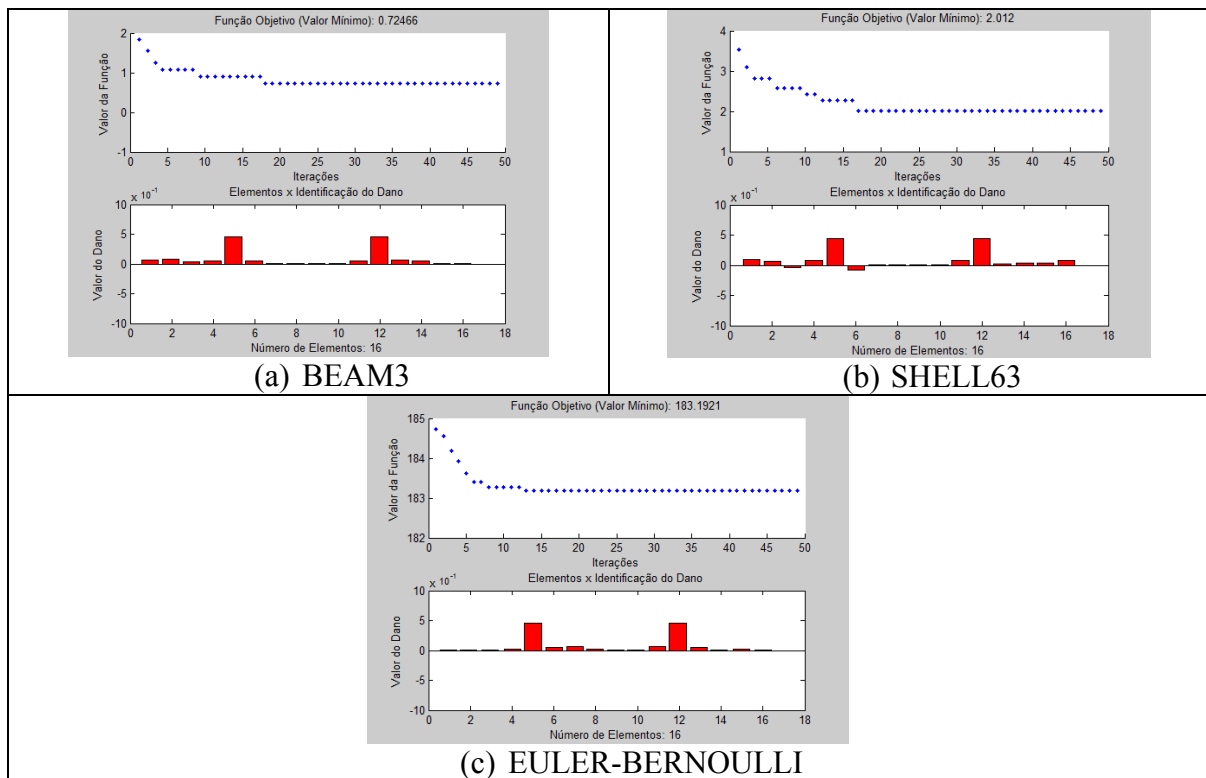


Figura 5.43 - Identificação de dano: Viga V3E carga 4350N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.44 (a), onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4350N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.44 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

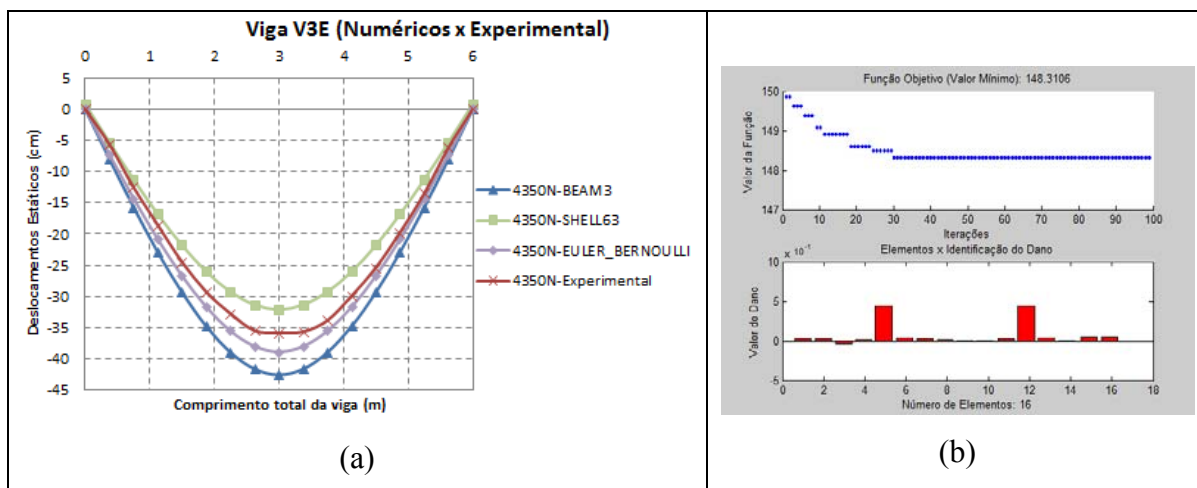


Figura 5.44 - Viga V3E carga 4350N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.16 a seguir.

Tabela 5.16 – Tabela resumo: Viga V3E carga 4350N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,72466525	Quinquagésima	45,00%	5 e 12
SHELL63	2,01215635	Quinquagésima	45,00%	5 e 12
EULER-BERNOULLI	183,19207908	Quinquagésima	45,00%	5 e 12
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	148,31064460	Centésima	45,00%	5 e 12

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 danos de 45% nos elementos 5 e 12, com dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, encontrando poucos resíduos. Já com o elemento SHELL63, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma com a utilização de um número maior de iterações, para mais uma vez poder haver uma melhor análise de resultados de identificação de dano, que mesmo assim apresentaram bons comportamentos em função do número maior de iterações. Na

análise com EULER-BERNOULLI, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com pequenas variações, mas com bons resultados.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, por causa da adequação mais realista ao modelo experimental, diminuindo a mesma provavelmente com a utilização de um número maior de iterações com a consequente diminuição dos resíduos gerados, mas já apresentando bom comportamento por causa do número maior de iterações.

5.1.3.5 Viga 4 (V3E): carga 4620N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.45, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4620N.

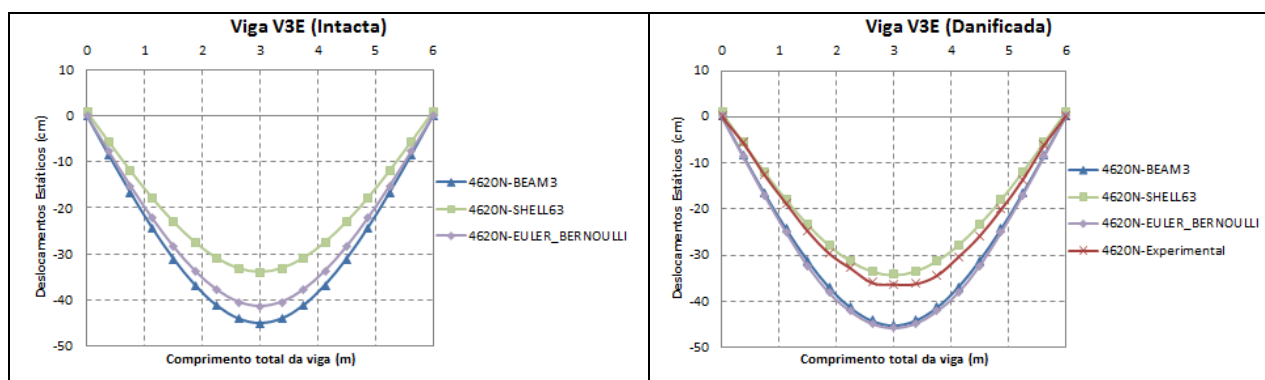


Figura 5.45 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E (carga 4620N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.46 é mostrado o resultado da solução do problema.

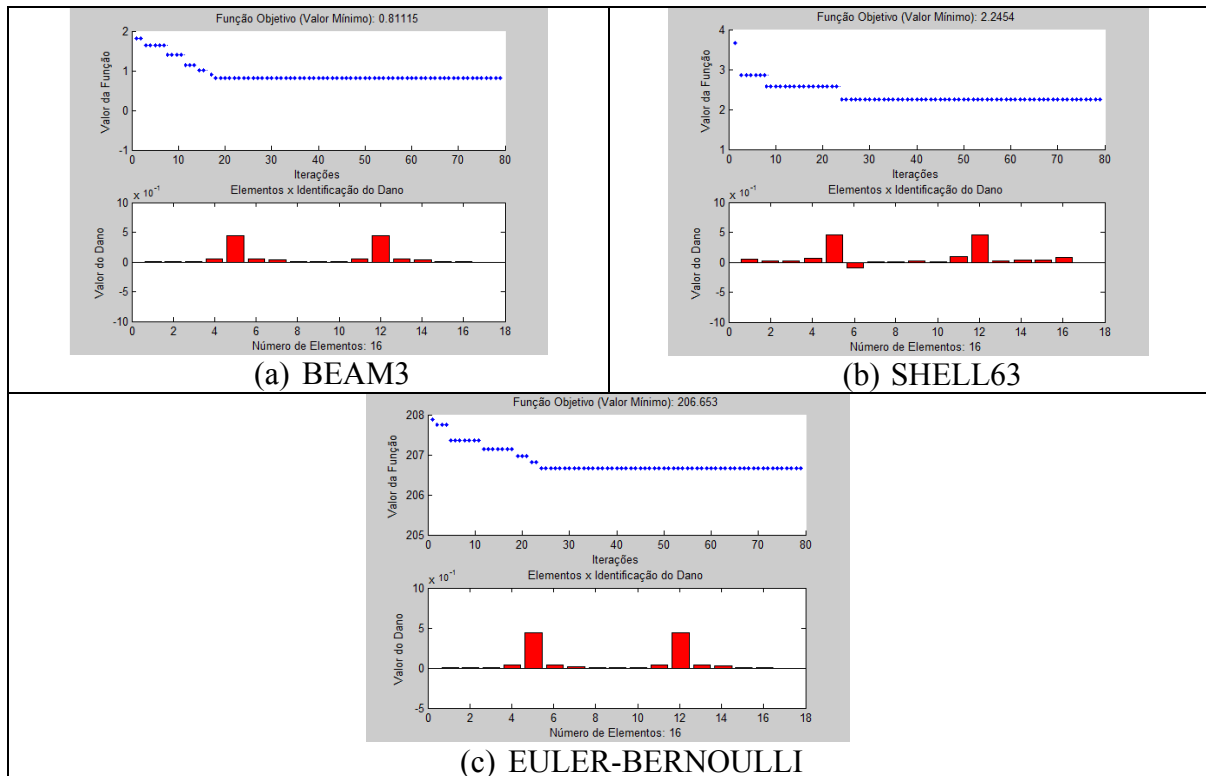


Figura 5.46 - Identificação de dano: Viga V3E carga 4620N

Por último buscou-se uma simulação proposta que relacionasse os resultados dos valores obtidos nas análises numéricas intactas com as análises experimentais danificadas e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Essa relação comparativa entre as análises gráficas intactas (numéricos) e danificadas (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V3E é apresentada na Figura 5.47 (a), onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4620N. Os resultados dos valores obtidos nessa análise e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura podem ser observados na Figura 5.47 (b). Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga.

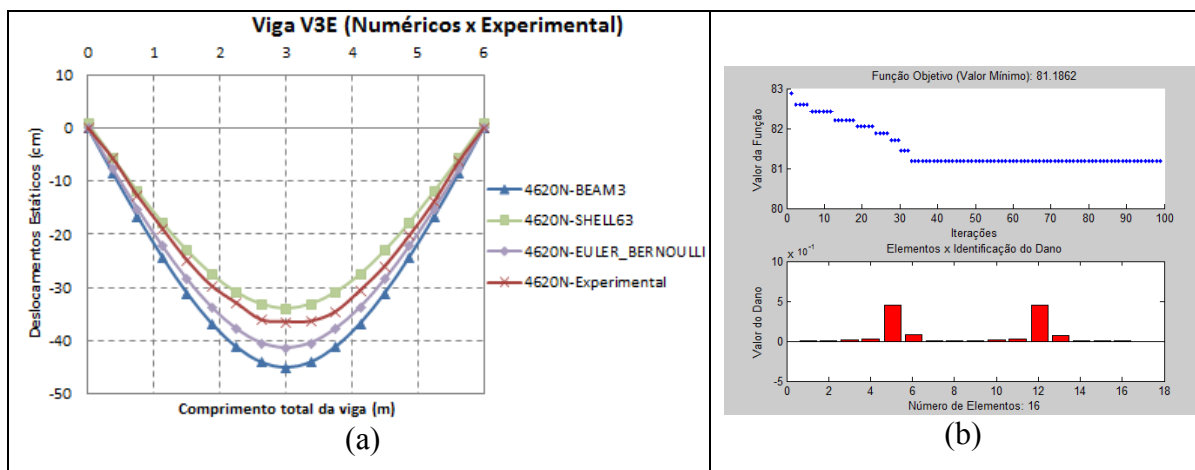


Figura 5.47 - Viga V3E carga 4620N (Numérico x Experimental): Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos da viga (a) e Identificação de dano (b)

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.17 a seguir.

Tabela 5.17 – Tabela resumo: Viga V3E carga 4620N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,81115541	Octagésima	45,00%	5 e 12
SHELL63	2,24548312	Octagésima	45,00%	5 e 12
EULER-BERNOULLI	206,65297728	Octagésima	45,00%	5 e 12
NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	81,18619926	Centésima	45,00%	5 e 12

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na octagésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se danos de 45% nos elementos 5 e 12, com dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com pequenas variações, mas com bons resultados devido ao número maior de iterações, mesmo com mais de um elemento danificado. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, há algumas distorções, mais uma vez por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, com uma diminuição das distorções por causa do número maior de iterações, propiciando uma melhor análise de resultados de identificação de dano. Na análise com EULER-BERNOULLI, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao

problema proposto, há pequenas distorções, mas o número maior de iterações, propicia uma melhor análise de resultados de identificação de dano.

E por último, na análise numérico-experimental, já com um número maior de iterações, valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com algumas diferenças na região de proximidade ao dano, mas com bons valores devido ao número maior de iterações feitas.

5.1.3.6 Considerações gerais de resultados da viga 4 (V3E)

Pode se observar que o aumento no número de elementos danificados passa a ser uma idealização de uma configuração estrutural mais complexa, que para o otimizador (ED), gera uma situação mais complicada a fim de explorar a sua capacidade de convergência, apesar disso o otimizador atendeu à identificação de dano proposta.

As análises de identificação de dano nesse exemplo, se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas, sendo utilizado um número pequeno de iterações que geram a presença de resíduos de identificação de danos em outros elementos, principalmente 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, mesmo com os 2 pontos danificados na estrutura. 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 dessa Viga 4 (V3E), pode-se afirmar também que um número maior de informações de deslocamentos também auxiliariam no trabalho do otimizador. As respostas tiveram características de convergência relativamente rápidas, levando-se em conta a pequena quantidade de iterações envolvidas. Mesmo assim a ferramenta atendeu à capacidade de localização e quantificação de dano em um elemento qualquer da estrutura em estudo.

A partir da viga 5 (V4E) e também na viga 6 (V5E), passou-se a fazer testes com um número maior de iterações, para tentar verificar a eficácia de minimização de resíduos de identificação de danos em outros elementos não danificados.

5.1.4 Análise Estática da Viga 5 (V4E)

A seguir serão demonstradas as análises para diferentes passos de carga para a Viga 5 (V4E), ver Tabela 5.2 (e).

5.1.4.1 Viga 5 (V4E): carga 1000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E é apresentada na Figura 5.48, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 1000N.

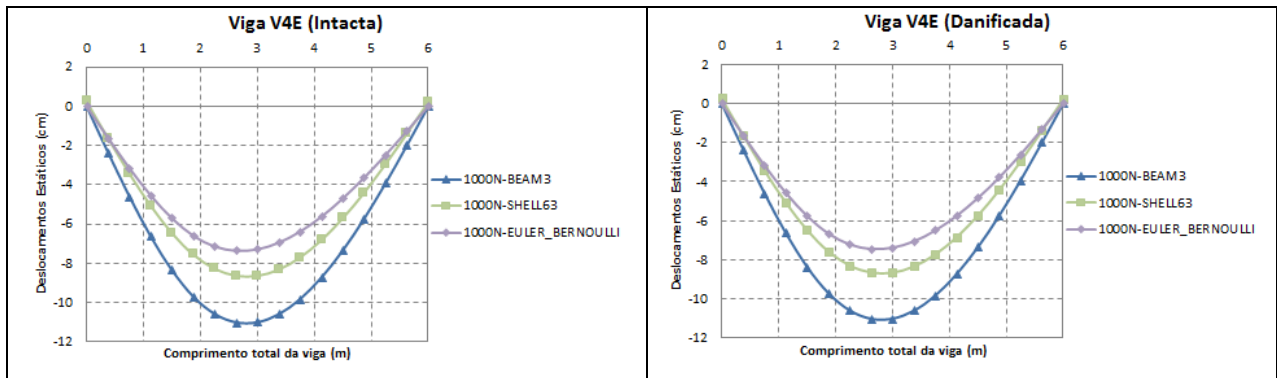


Figura 5.48 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 1000N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.49 é mostrado o resultado da solução do problema.

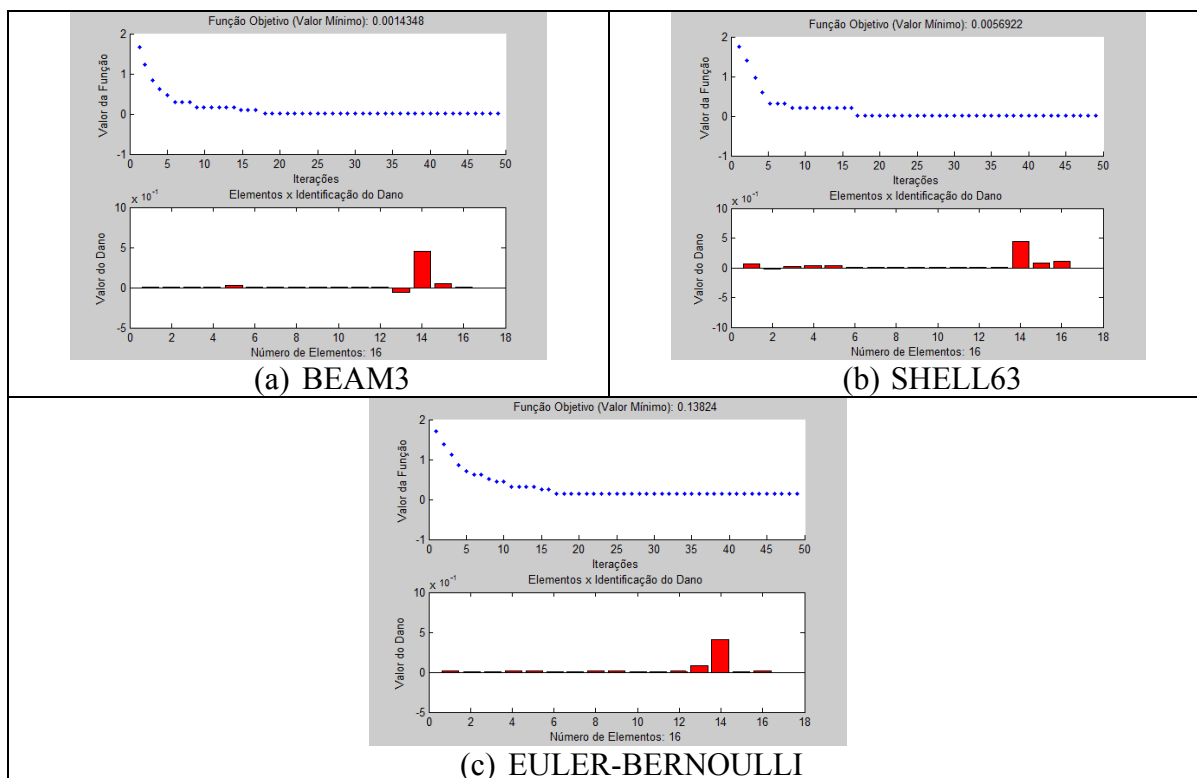


Figura 5.49 - Identificação de dano: Viga V4E carga 1000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.18 a seguir.

Tabela 5.18 – Tabela resumo: Viga V4E carga 1000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,00143480	Quinquagésima	45,00%	14
SHELL63	0,0056922	Quinquagésima	45,00%	14
EULER-BERNOULLI	0,13823795	Quinquagésima	45,00%	14

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 45% no elemento 14 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3 há pequenas perturbações próximas ao elemento danificado, mas com bons resultados. Já com o elemento SHELL63, no início e final da análise de danos com muito pouco resíduos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, podendo sanar ou diminuir os mesmos provavelmente com a utilização de um número maior de iterações, de qualquer forma com resultados muito bons. E por último

a análise com EULER-BERNOULLI, também com pouquíssimos resíduos, mas com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto.

As análises de identificação de dano nesse exemplo se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas.

5.1.4.2 Viga 5 (V4E): carga 2000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E é apresentada na Figura 5.50, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2000N.

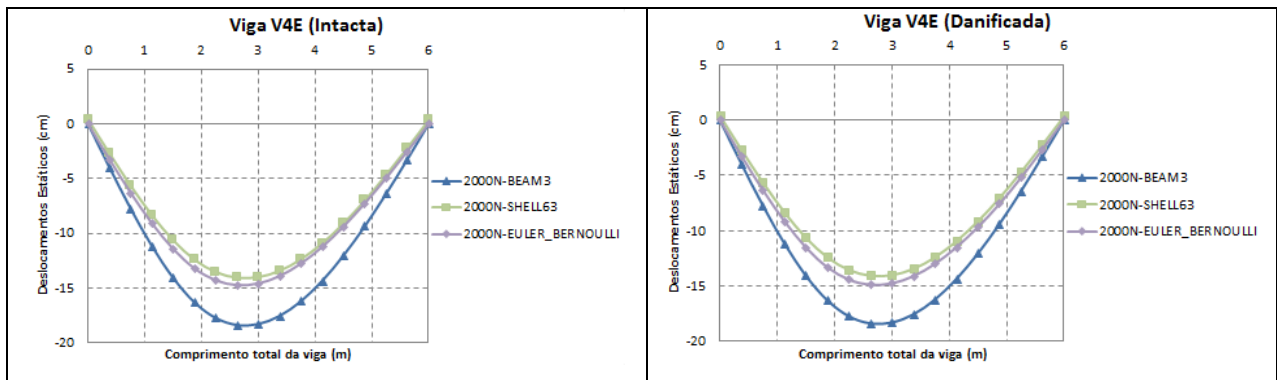


Figura 5.50 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 2000N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.51 é mostrado o resultado da solução do problema.

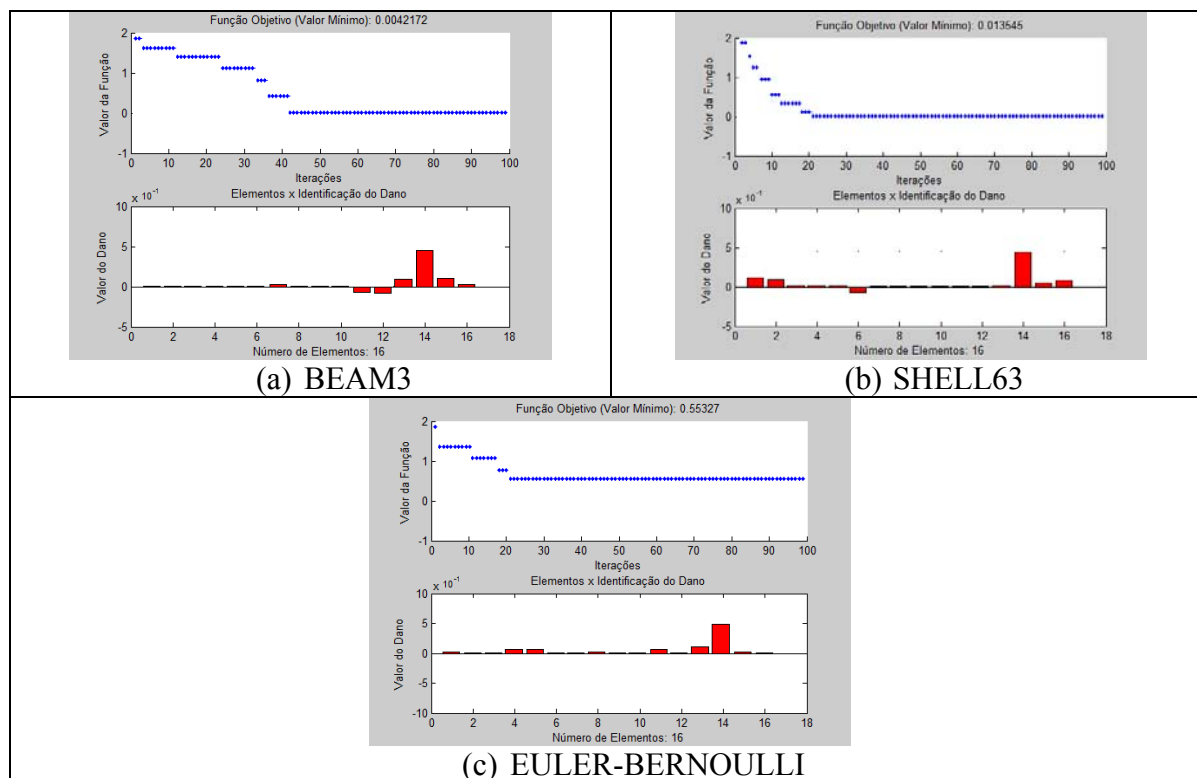


Figura 5.51 - Identificação de dano: Viga V4E carga 2000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.19 a seguir.

Tabela 5.19 – Tabela resumo: Viga V4E carga 2000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,00421720	Centésima	45,00%	14
SHELL63	0,01354500	Centésima	45,00%	14
EULER-BERNOULLI	0,55327282	Centésima	45,00%	14

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 45% no elemento 14 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3 há algumas perturbações próximas ao elemento danificado, ainda assim com muito poucos resíduos. Já com o elemento SHELL63, no início e final da análise de danos houve algumas distorções provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, mas com bons resultados devido ao número maior de iterações. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, com algumas perturbações, mas com os

valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto com resultados muito bons.

Ressalta-se que as análises de identificação de dano nesse exemplo se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas.

5.1.4.3 Viga 5 (V4E): carga 3000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E é apresentada na Figura 5.52, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3000N.

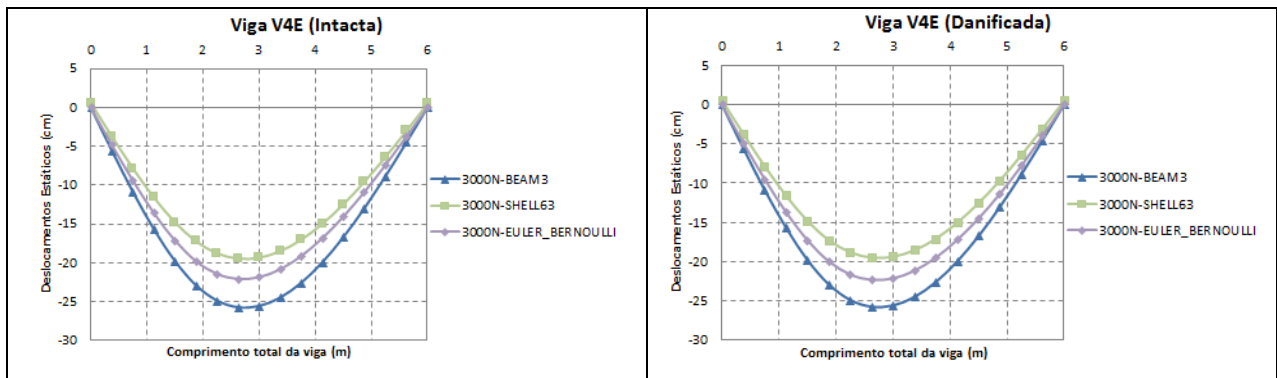


Figura 5.52 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 3000N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.53 é mostrado o resultado da solução do problema.

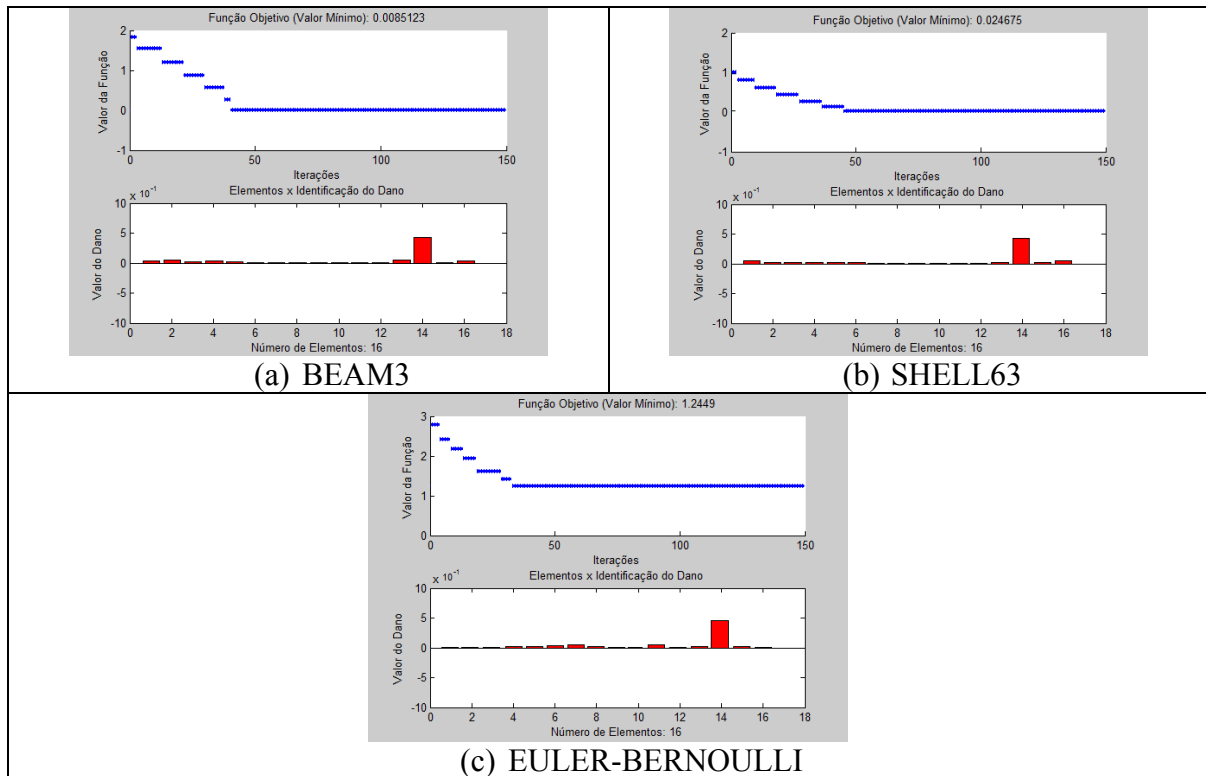


Figura 5.53 - Identificação de dano: Viga V4E carga 3000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.20 a seguir.

Tabela 5.20 – Tabela resumo: Viga V4E carga 3000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,00851229	Centésima Quinquagésima	45,00%	14
SHELL63	0,02467599	Centésima Quinquagésima	45,00%	14
EULER-BERNOULLI	1,24490178	Centésima Quinquagésima	45,00%	14

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima quinquagésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 14 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, sendo que na análise de danos com um número maior de iterações, já se encontra uma melhor análise de resultados, já com pouquíssimos resíduos observados. O elemento SHELL63, teve os valores de danos dos elementos seguindo o problema proposto, onde no início e final da análise de danos houve

alguns resíduos, mas com a utilização de um número maior de iterações, os resultados de identificação de dano estão bem melhores. Já a análise com EULER-BERNOULLI, com pouquíssimas distorções, e os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com a consequente diminuição dos resíduos devido ao número maior de iterações.

Por fim, vale ressaltar que as análises de identificação de dano nesse exemplo se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas.

5.1.4.4 Viga 5 (V4E): carga 4000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E é apresentada na Figura 5.54, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4000N.

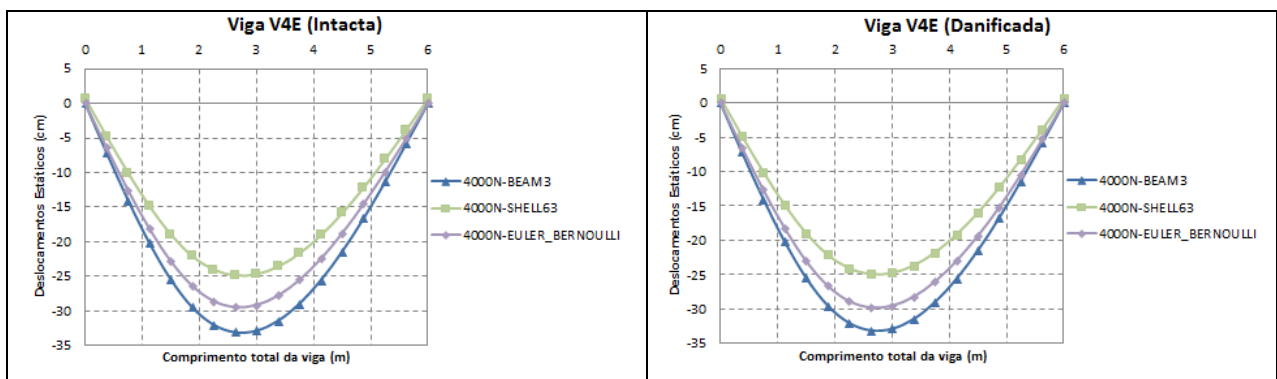


Figura 5.54 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V4E (carga 4000N)

As simulações propostas na segunda abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.55 é mostrado o resultado da solução do problema.

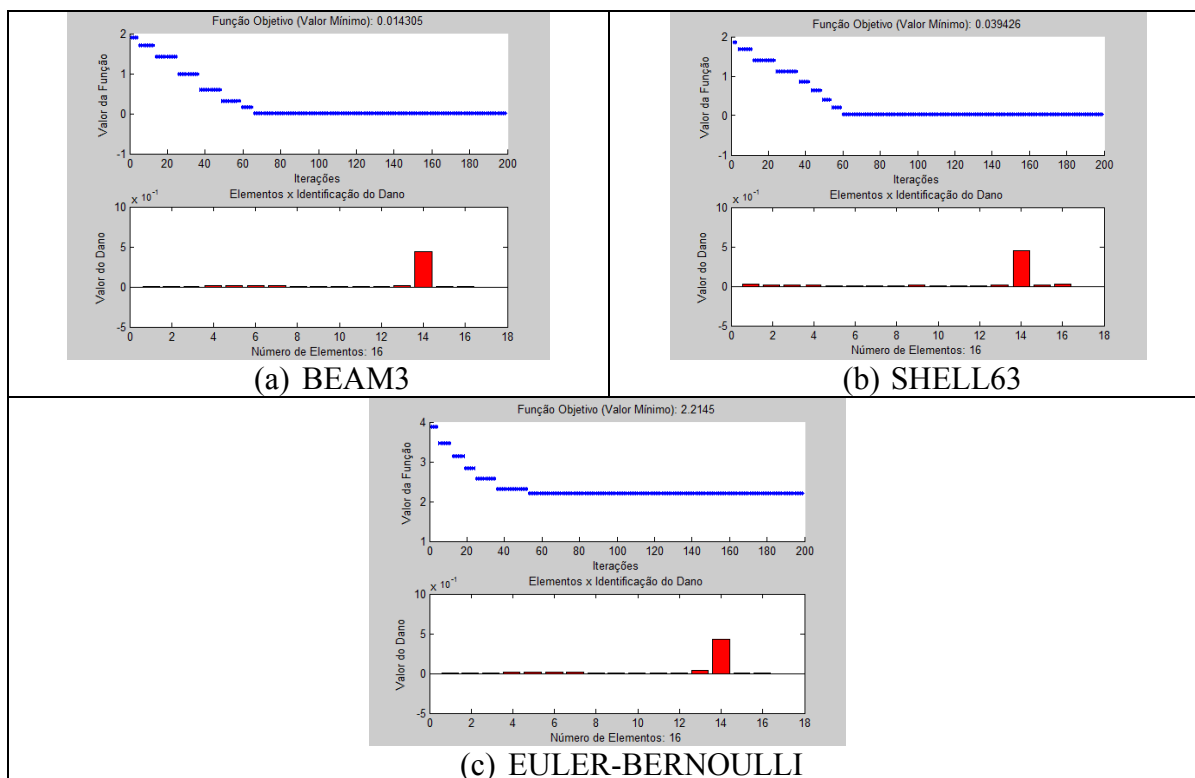


Figura 5.55 - Identificação de dano: Viga V4E carga 4000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.21 a seguir.

Tabela 5.21 – Tabela resumo: Viga V4E carga 4000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,01430500	Ducentésima	45,00%	14
SHELL63	0,03942607	Ducentésima	45,00%	14
EULER-BERNOULLI	2,21452509	Ducentésima	45,00%	14

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na ducentésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 14 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com uma melhor análise de resultados de identificação de dano, sem quase nenhum resíduo. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com muito bons resultados devido a utilização de um número maior de iterações, para mais uma vez poder haver uma melhor análise de resíduos de identificação de dano. E por último a

análise com EULER-BERNOULLI, com quase nenhuma perturbação, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, e uma consequente melhora na análise de resultados de identificação de dano.

5.1.4.5 Considerações gerais de resultados da viga 5 (V4E)

Como foi observado que nas vigas: 2 (V2E), 3 (V2E-2) e 4 (V3E), foram gerados pequenos resíduos para identificação de danos em outros elementos, principalmente devido à presença de cargas pontuais próximas a esses elementos ou mesmo próximos aos elementos danificados. Para sanar tais ruídos gerados, foram feitas análises de identificação de dano nesse exemplo que se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas, sendo que aqui foram feitas tentativas com um número maior de iterações que possibilitaram, conforme pôde ser observado 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 dessa Viga 5 (V4E), 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.

5.1.5 Análise Estática da Viga 6 (V5E)

A seguir serão demonstradas as análises para diferentes passos de carga para a Viga 6 (V5E), ver Tabela 5.2 (f).

5.1.5.1 Viga 6 (V5E): carga 1000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E é apresentada na Figura 5.56, onde: o eixo x (abcissas) corresponde ao

comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 1000N.

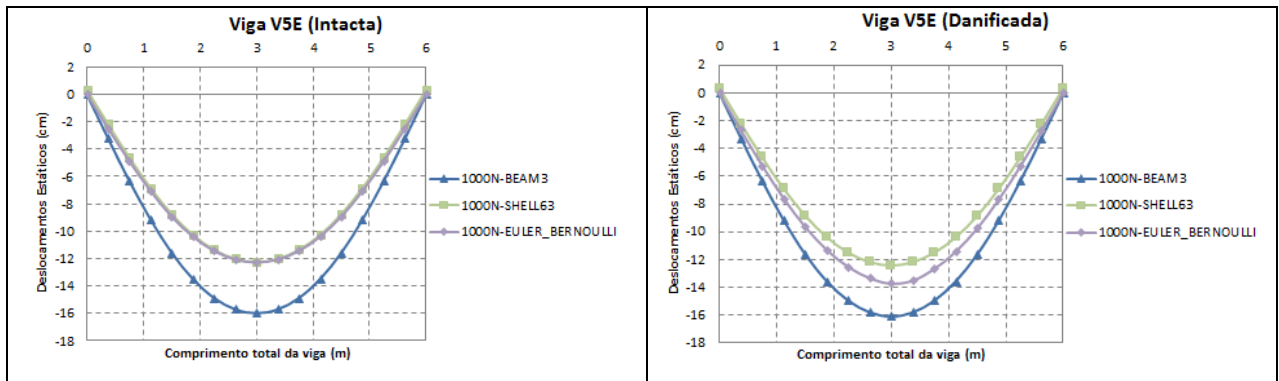


Figura 5.56 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 1000N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.57 é mostrado o resultado da solução do problema.

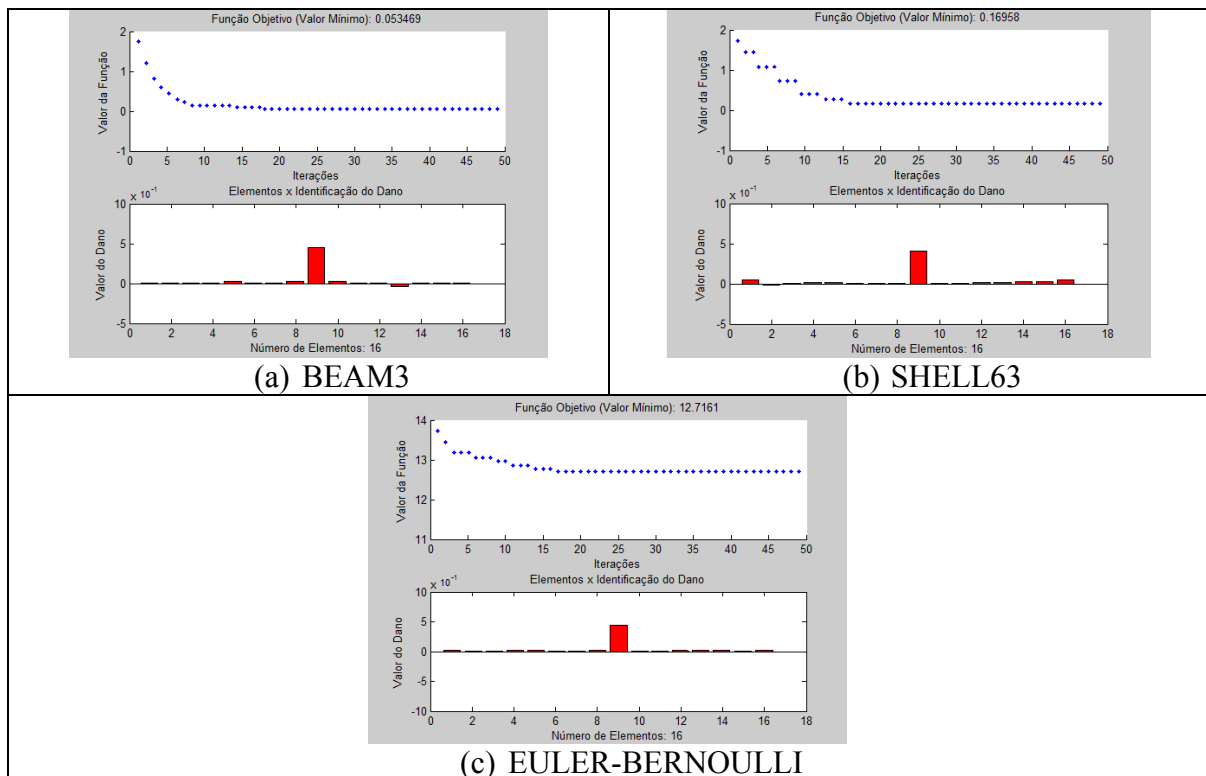


Figura 5.57 - Identificação de dano: Viga V5E carga 1000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.22 a seguir.

Tabela 5.22 – Tabela resumo: Viga V5E carga 1000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,05346874	Quinquagésima	45,00%	9
SHELL63	0,16958828	Quinquagésima	45,00%	9
EULER-BERNOULLI	12,71609475	Quinquagésima	45,00%	9

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 45% no elemento 9 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3 há pequenas perturbações próximas ao elemento danificado, e alguns outros resíduos mas com bons resultados. Já com o elemento SHELL63, no início e final da análise de danos com muito pouco resíduos, com resultados muito bons. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, também com pouquíssimos pequenos resíduos, mas com os valores de identificação de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto.

Nesse exemplo as análises de identificação de dano se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas.

5.1.5.2 Viga 6 (V5E): carga 2000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E é apresentada na Figura 5.58, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 2000N.

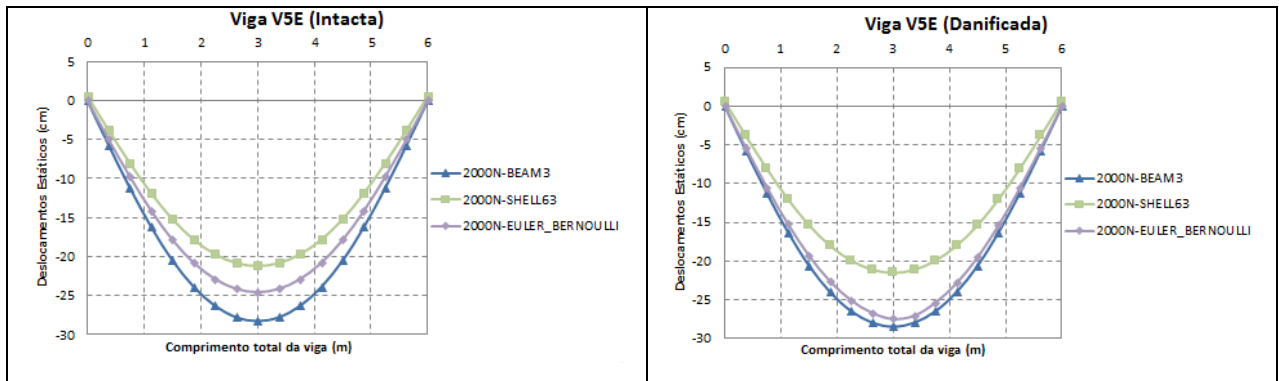


Figura 5.58 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 2000N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.59 é mostrado o resultado da solução do problema.

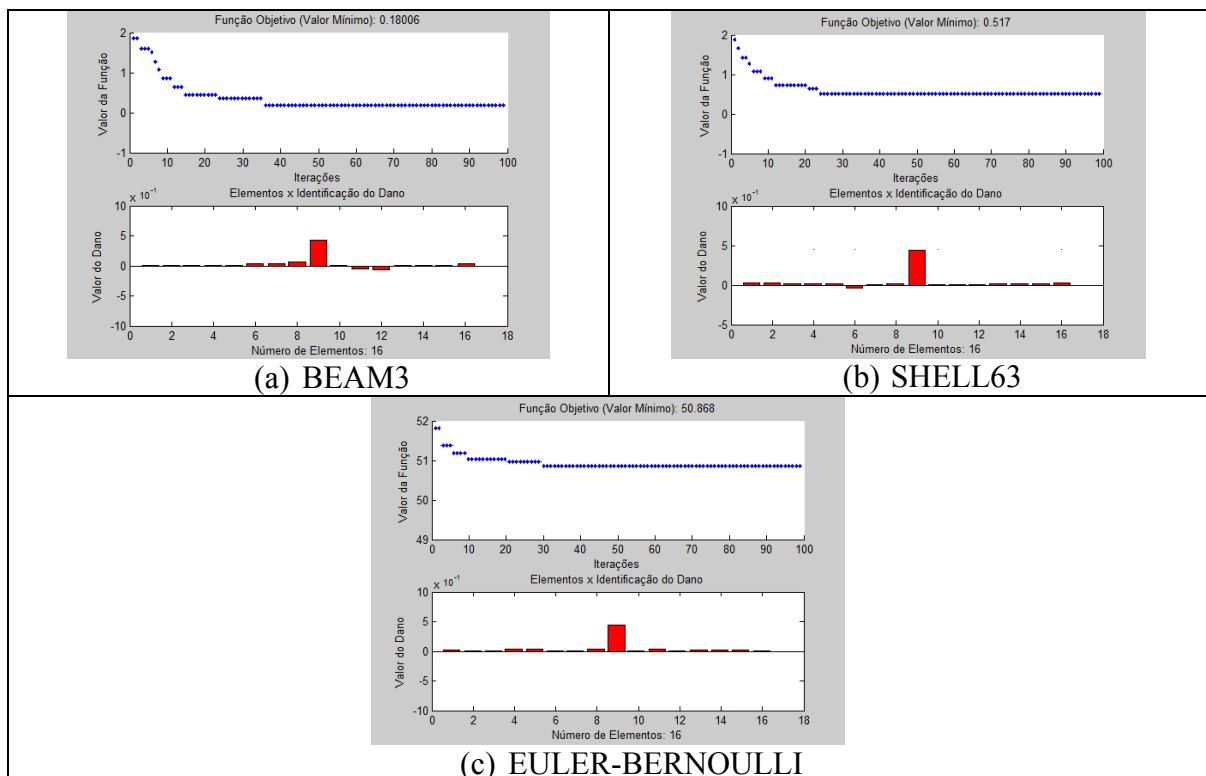


Figura 5.59 - Identificação de dano: Viga V5E carga 2000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.23 a seguir.

Tabela 5.23 – Tabela resumo: Viga V5E carga 2000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,18006354	Centésima	45,00%	9
SHELL63	0,51703227	Centésima	45,00%	9
EULER-BERNOULLI	50,86801964	Centésima	45,00%	9

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 45% no elemento 9 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3 há alguns resíduos de danos próximas ao elemento danificado, ainda assim com valores muito próximos. Já com o elemento SHELL63, no início e final da análise de danos houve alguns resíduos provavelmente por causa dos deslocamentos não nulos próximos aos apoios, para adequação mais realista ao modelo experimental, mas apresentando bons resultados devido ao número maior de iterações. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, com algumas perturbações, mas com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto com resultados bons, apesar do mínimo da função objetivo estar um pouco maior.

As análises de identificação de dano nesse exemplo se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas.

5.1.5.3 Viga 6 (V5E): carga 3000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E é apresentada na Figura 5.60, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 3000N.

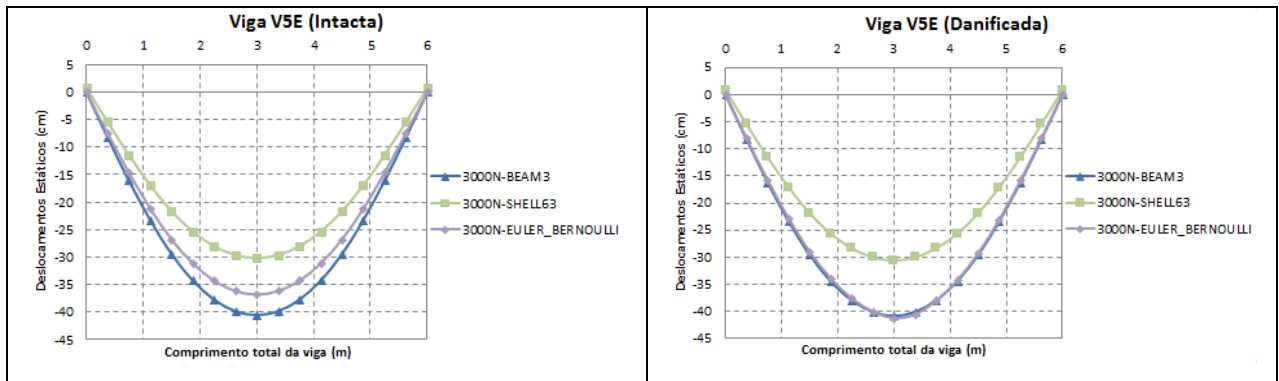


Figura 5.60 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 3000N)

As simulações propostas na primeira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de viga de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.61 é mostrado o resultado da solução do problema.

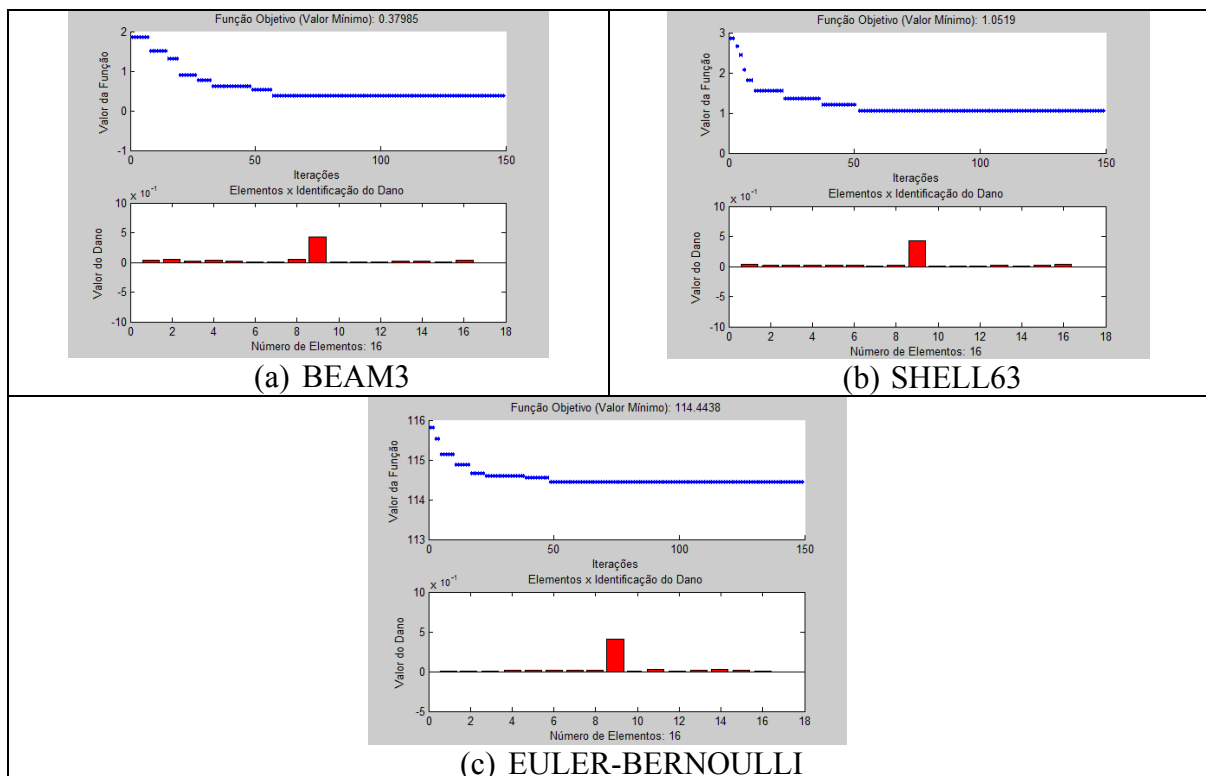


Figura 5.61 - Identificação de dano: Viga V5E carga 3000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.24 a seguir.

Tabela 5.24 – Tabela resumo: Viga V5E carga 3000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,37984684	Centésima Quinquagésima	45,00%	9
SHELL63	1,05195079	Centésima Quinquagésima	45,00%	9
EULER-BERNOULLI	114,44384542	Centésima Quinquagésima	45,00%	9

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na centésima quinquagésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 9 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, que possui uma melhor análise de resultados, também com pouquíssimos resíduos observados. O elemento SHELL63, teve os valores de danos dos elementos seguindo o problema proposto, com os resultados de identificação de dano, também bem melhores. Já a análise com EULER-BERNOULLI, com algumas distorções, mas com os valores de danos dos elementos seguindo ao problema proposto, com a consequente diminuição dos resíduos devido ao número maior de iterações.

As análises de identificação de dano nesse exemplo, por fim se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas intactas e danificadas.

5.1.5.4 Viga 6 (V5E): carga 4000N

As análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E é apresentada na Figura 5.62, onde: o eixo x (abscissas) corresponde ao comprimento da viga (6,00m) e o eixo y (ordenadas) corresponde aos deslocamentos gerados pela aplicação da carga de 4000N.

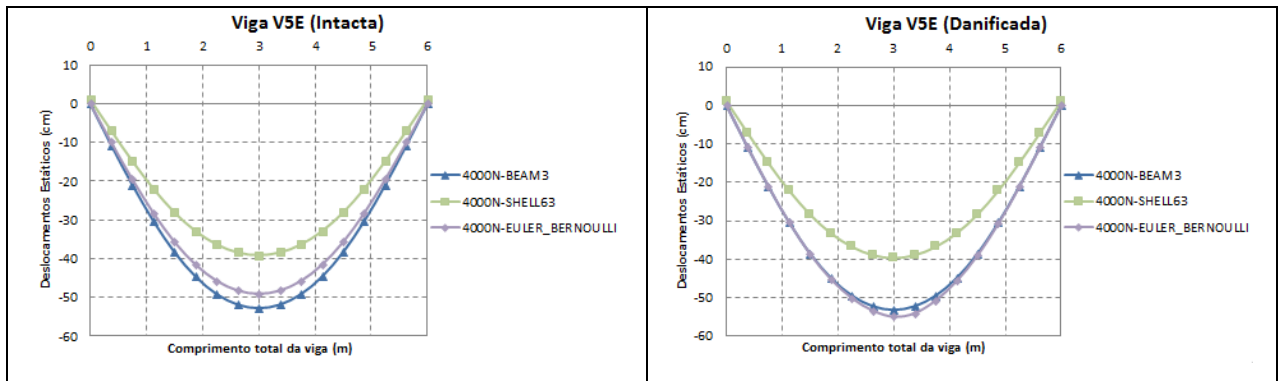


Figura 5.62 - Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V5E (carga 4000N)

As simulações propostas na segunda abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento BEAM3 e SHELL63, além da análise com a teoria de Euler-Bernoulli e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos intactos e danificados dos elementos da viga. Na Figura 5.63 é mostrado o resultado da solução do problema.

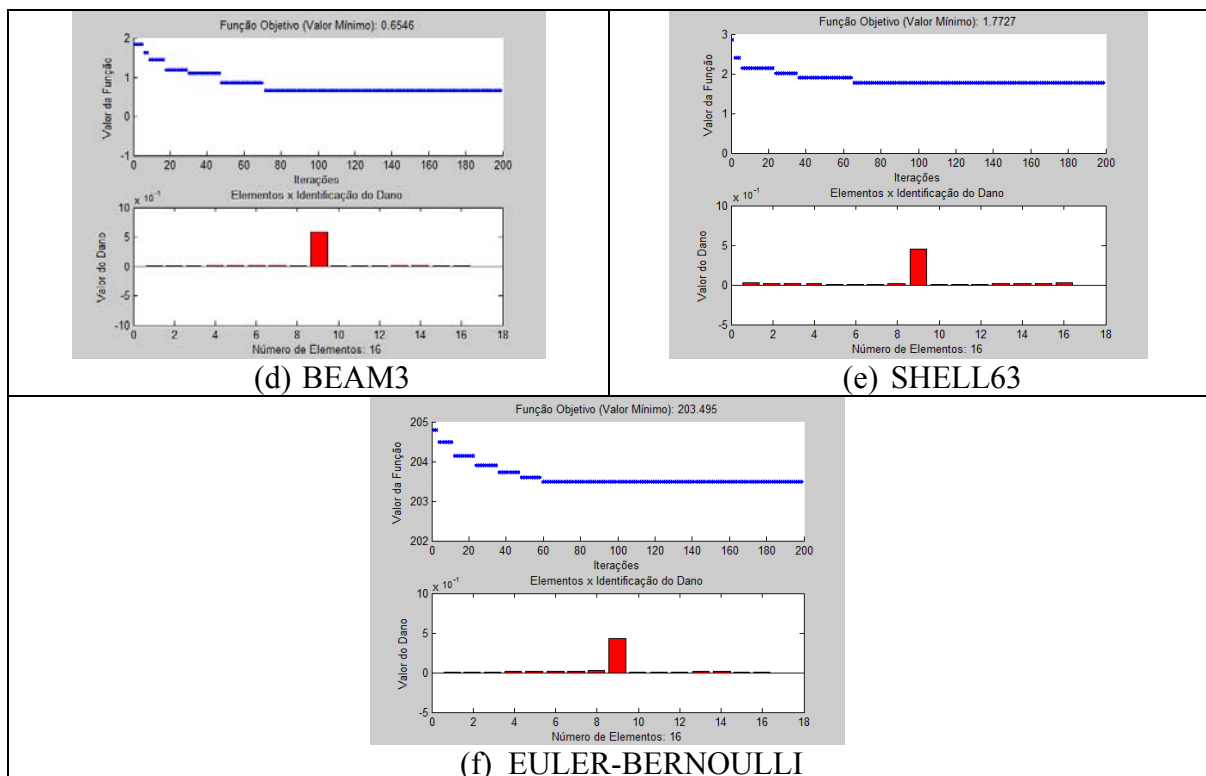


Figura 5.63 - Identificação de dano: Viga V5E carga 4000N

O resumo dos resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.25 a seguir.

Tabela 5.25 – Tabela resumo: Viga V5E carga 4000N

Análise	Valor mínimo da função objetivo	Iteração	Dano	Elemento Danificado
BEAM3	0,65460300	Ducentésima	45,00%	9
SHELL63	1,77274661	Ducentésima	45,00%	9
EULER-BERNOULLI	203,49498342	Ducentésima	45,00%	9

Com esses valores mínimos das funções objetivos encontradas na ducentésima iteração e com os valores de danos dos elementos seguindo em conformidade ao problema proposto, encontrando-se dano de 45% no elemento 9 e dano zero para os demais elementos.

Na análise com o elemento BEAM3, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com uma melhor análise de resultados de identificação de dano, sem quase nenhum resíduo. Já com o elemento SHELL63, os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com muito bons resultados devido a utilização de um número maior de iterações, para mais uma vez poder haver uma melhor análise de resíduos de identificação de dano. E por último a análise com EULER-BERNOULLI, com quase nenhuma perturbação, onde os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, e consequentes bons resultados de identificação de dano.

5.1.5.5 Considerações gerais de resultados da viga 6 (V5E)

As análises de identificação de dano nesse exemplo, se restringiram aos deslocamentos obtidos nas análises numéricas 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 dessa Viga 6 (V5E), 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.

Com as análises dessa Viga 6 (V5E), 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.

6. CONCLUSÕES

Foram utilizadas as respostas estruturais de vigas, sob diferentes condições de carregamentos, por meio dos seus deslocamentos estáticos, para identificação de danos. Sendo que o dano é considerado 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 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.

Com relação às análises numéricas realizadas, para os elementos BEAM3, SHELL63 e a teoria de viga de Euler-Bernoulli, foram encontradas algumas diferenças de resultados, principalmente à medida que as cargas eram aumentadas. 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 (DE) 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.

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 ao tempo computacional, utilizou-se um padrão de dez vezes o número de elementos de cada viga 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.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as possíveis propostas para trabalhos futuros, têm-se:

- A utilização de novas ferramentas otimizadoras tais como: o Método do Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*, SA), o Método do Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm*, GA), o Método do Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO), o Método da Colônia de Formigas (*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 (frequências naturais e modos de vibração) desse elemento tipo viga, ou mesmo de outros elementos estruturais, poderiam trazer um leque maior de parâmetros de identificação de danos;
- Por fim a realização de experimentos com diferentes metodologias que comprovem a aplicabilidade da metodologia desenvolvida traria novas perspectivas à presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.J.M. Ferreira. MATLAB Codes for Finite Element Analysis: Solids and Structures. Springer, Berlin, 2008.
- Alves, Vinicius Nicchio. Estudo de novas estratégias para identificação de danos estruturais a partir de dados vibracionais / Vinicius Nicchio Alves - 2012. vi, 188f.: il. color.; graf.; tabs. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Araújo, Aldecir Alves de Ajuste de modelos numéricos de elementos finitos usando métodos de otimização / Aldecir Alves de Araújo. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- Bathe, K.J.; Finite Element Procedures. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 1996.
- 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 Anhembi 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.
- CEB (2010), CEB - FIP Model Code for Concrete Structures (MC 2010).
- Choi, Y. Il. (2002). “Damage Identification Techniques for Bridges Using Static Response”. Tese de Doutorado, Hanyang University, Seoul, 153p.
- 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*, 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.
- Doebbling, 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.
- E. F. D'Azevedo, V. L. Eijkhout, C. H. Romine. Conjugate Gradient Algorithms with Reduced Synchronization Overhead on Distributed Memory Multiprocessors. *Lapack Working, Note 56*. 1993.
- Fish, J.; Belytschko T.; Um Primeiro Curso em Elementos Finitos, Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos Editora; 2009.
- Helene, P. R. L.; Pereira, F.(2007). *Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto*. São Paulo: Cargraphics, 598p.
- 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.
- J. Nocedal, S. J. Wright. *Numerical Optimization*, Springer, 2006.
- J. Paulo Davim. *Dynamic Methods and Process Advancements in Mechanical, Manufacturing, and Materials Engineering*. University of Aveiro, Portugal.
- 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.
- 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.

- 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.
- Lopes, P. S.; Modelagem de problema inverso de detecção de danos por técnicas de identificação de parâmetros e otimização. 2010. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- 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.
- Peña, P. A. N. (2013). Atualização de modelos numéricos em elementos finitos para a análise de arquivancadas 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.
- Rainer Storn. *Advances in differential evolution*, chapter *Differential Evolution Research - Trends and Open Questions*, pages 1–32. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- Ramos, L.F. (2007), *Damage identification on masonry structures based on vibration signatures*, Ph D dissertation, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- Rus, G.; Gallego, R.; Optimization algorithms for identification inverse problems with the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, v. 26, p. 315-327, 2002.
- 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.; 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, 2009.
- 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, 136p.
- S. Das and P.N. Suganthan. Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(1):4–31, 2011.
- 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, 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, 2007.
- Soriano, H.L.; Elementos Finitos – Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das estruturas, Rio de Janeiro; Editora Ciência Moderna, 2009.
- Stavroulakis, G. E.; Antes, H.; Flaw identification in elastomechanics: BEM simulation with local and genetic optimization. *Structural Optimization*, v. 16, p. 162-175, 1998.
- Storn, R.; Price, K.; Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, v. 11, p-341-359, 1995.
- 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.
- Price, K. e Storn, R.; Differential Evolution for Continuous Function Optimization, <<http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>>. Acesso em 20 jan. 2015.
- Price, K., Storn, R. e Lampinen, J.; Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization, Natural Computing Series, Springer, 2005.
- Tikhonov A. N., and V. Y. Arsenin. (1977). “Solutions of ill-posed problems” . New York: John Wiley.
- Tusar, T.; Filipic, B.; 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, 2007, p. 257–271 (Lectures Notes in Computer Science, v. 4403).
- Volkmar, Z. (2002). “Applications of Wavelet Analysis in System Identification”. Doctoral Thesis, Bauhaus-Universität at Weimar.

Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.; The Finite Element Method. Volume 2: Solid Mechanics, 5^a edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

APÊNDICE

APÊNDICE A. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA INTACTA DAS VIGAS - ELEMENTO BEAM3.

Análise Estática:

FINISH

/CLEAR

/PREP7

/TITLE, VIGA METÁLICA- PERFIL I-

!*****

!-----VARIÁVEIS-----

!*****

Ea = 2e11 !módulo de elasticidade do aço (N/m2)

va = 0.3 !coeficiente de Poisson aço

da = 7800 !densidade do aço (Kg/m3)

!*****

!----DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO-----

!*****

ET,1,BEAM3

!*****

!----Definição de Constantes Reais-----

!*****

R,1,1.45e-3,2.52e-6,0.1016, , , , ! área, inércia, altura

!*****

!----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----

!*****

MPTMP,,,,,,,,

MPTMP,1,0

MPDATA,EX,1,,Ea ! Modulo de elasticidade do material 1

```

MPDATA,PRXY,1,,va      ! coeficiente de poisson do material 1

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,(Ea*(1-0.30))  ! Modulo de elasticidade do material 2 (30% de reducao da rigidez)
MPDATA,PRXY,2,,va      ! coeficiente de Poisson do material 2

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,da      ! densidade material 1

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,da      ! densidade material 2

```

```

!*****
!----DEFINIÇÃO DE KEYPOINTS-----
!*****

```

```

K,1,0,0,0,
K,17,6,0,0,

```

```

!*****
!----CRIAÇÃO DA LINHA-----
!*****

```

```

LSTR,1,17

```

```

!*****
!----CRIAÇÃO DA MALHA-----
!*****

```

```

FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,1
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,240, , , ,1  ! divisão em 240 elementos
!*
LMESH, 1

```

```

!*****
!----CONDIÇÕES DE CONTORNO-----
!*****

```

```

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1
!*
/GO

```

D,P51X, ,0, , , ,UX,UY, , , , ! apoio de segundo genero

FLST,2,1,1,ORDE,1

FITEM,2,2

!*
/GO

D,P51X, ,0, , , ,UY, , , , , ! apoio de primeiro genero

!*****
!----APLICAÇÃO DA FORÇA NO MEIO DO VÃO-----

!*****

FLST,2,1,1,ORDE,1

FITEM,2,122

! aplicação da força no nó 122 (metade do vão)

!*
/GO

F,P51X,FY,-1020

! aplicação da força de 1020N

nset,all,all

esel,all,all

eplot,all

!*****
!----FORÇA DA GRAVIDADE-----

!*****

ACEL,0,9.8,0,

! aceleração devido a força de gravidade = 9.8m/s2

!*****
!----ANÁLISE ESTÁTICA-----

!*****

FINISH

/SOL

!*
ANTYPE,0eplot

/STATUS,SOLU

SOLVE

!*****
!----END-----

!*****

APÊNDICE B. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA DANIFICADA DAS VIGAS - ELEMENTO BEAM3.

Análise Estática:

FINISH

/CLEAR

/PREP7

/TITLE, VIGA METÁLICA- PERFIL I-

!*****

!-----VARIÁVEIS-----

!*****

Ea = 2e11 !módulo de elasticidade do aço (N/m2)

va = 0.3 !coeficiente de Poisson do aço

da = 7800 !densidade do aço (Kg/m3)

!*****

!-----DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO-----

!*****

ET,1,BEAM3

!*****

!-----Definição das Constantes Reais-----

!*****

R,1,1.45e-3,2.52e-6,0.1016, , , ! área, inércia, altura

!*****

!-----DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS-----

!*****

MPTMP,,,,,,,,

MPTMP,1,0

MPDATA,EX,1,,Ea ! módulo de elasticidade do material 1

MPDATA,PRXY,1,,va ! coeficiente de Poisson do material 1

MPTMP,,,,,,,,

MPTMP,1,0

MPDATA,EX,2,,(Ea*(1-0.30)) ! módulo de elasticidade do material 2 (30% redução da rigidez)
MPDATA,PRXY,2,,va ! coeficiente de Poisson do material 2

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,da ! densidade do material 1

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,da ! densidade do material 2

!*****
!----DEFINIÇÃO DOS KEYPOINTS-----
!*****

K,1,0,0,0,
K,17,6,0,0,

!*****
!----CRIAÇÃO DA LINHA-----
!*****

LSTR,1,17

!*****
!----CRIAÇÃO DA MALHA-----
!*****

FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,1
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,240,,,,1 ! divisão em 240 elementos
!*
LMESH, 1

!*****
!----CONDIÇÕES DE CONTORNO-----
!*****

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1
!*
/GO
D,P51X,0,,,,UX,UY,,,, ! apoio de segundo gênero

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,2

```
!*
/GO
D,P51X,0,0,0,UY,0,0,0 ! apoio de primeiro gênero
```

```
!*****
!----SELEÇÃO DO NÓ NA POSIÇÃO DO DANO-----
!*****
```

```
NSEL,S,LOC,X,1.5 ! seleção do nó na posição a 1.5 m do apoio esquerdo
ESLN,S ! seleção dos elementos colados no nó
```

```
!*****
!----MUDANÇA DO MATERIAL AO ELEMENTO DANIFICADO-----
!*****
```

```
MPCHG,2,61 !redução do módulo de elasticidade do elemento danificado elemento 61
```

```
nsel,all,all
esel,all,all
```

```
!*****
!----APLICAÇÃO DA FORÇA NO MEIO DO VÃO-----
!*****
```

```
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,122 ! aplicação da força no nó 122 (meio do vão)
```

```
!*
/GO
F,P51X,FY,-1020 ! aplicação da força de 1020N
```

```
nsel,all,all
esel,all,all
eplot,all
```

```
!*****
!----FORÇA DA GRAVIDADE-----
!*****
```

```
ACEL,0,9.8,0, ! aceleração devido à força de gravidade = 9.8m/s2
```

```
!*****
!----ANÁLISE ESTÁTICA-----
!*****
```

```
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0eplot
```

```
/STATUS,SOLU
SOLVE
```

```
!*****
!----END-----
!*****
```

APÊNDICE C. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA INTACTA DAS VIGAS - ELEMENTO SHELL63.

Análise Estática:

FINISH

/CLEAR

/PREP7

/TITLE, Viga Metálica- VIGA INTACTA V1E- PERFIL - I

!*****!

!Variáveis!

!*****!

Ec = 2e11 !módulo de elasticidade do Aço (N/m2)

vc = 0.3 !coeficiente de Poisson aço

dc = 7800 !densidade do Aço

!*****!

!Definição da geometria!-----

!*****!

!*****!

!Definição dos keypoints!-----

!*****!

K,1,0,0,0

K,2,0.0338,0,0

K,3,0.0676,0,0 !criação do keypoint número 1 com coordenadas 0,0,0

K,4,0,0.1016,0

K,5,0.0338,0.1016,0

K,6,0.0676,0.1016,0

K,7,0,0,6

K,8,0.0338,0,6

K,9,0.0676,0,6

K,10,0,0.1016,6

K,11,0.0338,0.1016,6

K,12,0.0676,0.1016,6

!*****!

!Definição das áreas da mesa e da alma-----

!*****!

A,4,5,6,12,11,10 !criação da área da seção transversal

A,1,2,3,9,8,7

A,2,8,11,5

!*****!

!-----Tipo de elemento SHELL63-----

!*****!

ET,1,SHELL63 !criação do tipo de elemento SHELL63

!*****!

!-----MATERIAIS-----

!*****!

MP,EX,1,Ec !módulo de elasticidade do concreto de material 1

MP,NUXY,1,vc !coeficiente de Poisson do concreto de material 1

MP,dens,1,dc !densidade do concreto de material 1

!*****!

!Criação das Constantes Reais-----

!*****!

R,1,0.00743, , , , ,

RMORE, , , ,

RMORE

RMORE, ,

!*
R,2,0.00483, , , , ,

RMORE, , , ,

RMORE, , , ,

RMORE

RMORE, ,

!*****!

!Colagem das áreas-----
!*****!

FLST,2,3,5,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-3

AGLUE,P51X

!*****!

!Divisão de Linhas-----
!*****!

FLST,5,6,4,ORDE,6

FITEM,5,3

FITEM,5,6

FITEM,5,9

FITEM,5,12

FITEM,5,13

FITEM,5,15

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

```

!*
LESIZE,_Y1,0.025,,,,,1
!*

FLST,5,8,4,ORDE,8
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
FITEM,5,4
FITEM,5,-5
FITEM,5,7
FITEM,5,-8
FITEM,5,10
FITEM,5,-11
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,Y
!*
LESIZE,_Y1,0.00338,,,,,1
!*
!*****!
!Geração da Malha-----
!*****!

FLST,5,5,5,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,-7
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'

```

CMSEL,S,_Y

!*

AMESH,_Y1

!*

!*****!

!Condições de Contorno-----

!*****!

FLST,2,21,1,ORDE,21

FITEM,2,4

FITEM,2,7488

FITEM,2,7491

FITEM,2,7730

FITEM,2,7969

FITEM,2,8208

FITEM,2,8447

FITEM,2,8686

FITEM,2,8925

FITEM,2,9164

FITEM,2,9403

FITEM,2,9653

FITEM,2,9901

FITEM,2,10140

FITEM,2,10379

FITEM,2,10618

FITEM,2,10857

FITEM,2,11096

FITEM,2,11335

FITEM,2,11574

FITEM,2,11813

!*

/GO

D,P51X, ,0, , , ,UX,UY,UZ, , ,

FLST,2,21,1,ORDE,21

FITEM,2,240

FITEM,2,7252

FITEM,2,7727

FITEM,2,7966

FITEM,2,8205

FITEM,2,8444

FITEM,2,8683

FITEM,2,8922

FITEM,2,9161

FITEM,2,9400

FITEM,2,9639

FITEM,2,9889

FITEM,2,10137

FITEM,2,10376

FITEM,2,10615

FITEM,2,10854

FITEM,2,11093

FITEM,2,11332

FITEM,2,11571


```
FITEM,2,11810
FITEM,2,12049
!*
/GO
D,P51X,,0,,,UX,UY,,,,
```

```
!*****!
```

```
!-----Aplicação força a 3m-----
!*****!
```

```
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,371
!*
/GO
F,P51X,FY,-1020
```

```
!*****!
!-----Força da gravidade-----
!*****!
```

```
ACEL,0,9.8,0,
```

```
!*****!
!Tipo de Análise-----
!*****!
```

```
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0eplot
```

```
/STATUS,SOLU
SOLVE
```

```
!*****!
!-----SELEÇÃO DA FILA DE NÓS-----
!*****!
```

```
FLST,5,241,1,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-241
NSSEL,S,,P51X
NPLOT
FINISH
```

```
!*****!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!END!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!-----
!*****!
```

APÊNDICE D. SCRIPT DA ANÁLISE ESTÁTICA DANIFICADA DAS VIGAS - ELEMENTO SHELL63.

Análise Estática:

FINISH

/CLEAR

/PREP7

/TITLE, Viga Metálica- VIGA INTACTA V1E- PERFIL - I

!*****!

!Variáveis!

!*****!

Ec = 2e11 !módulo de elasticidade do Aço (N/m2)

vc = 0.3 !coeficiente de Poisson aço

dc = 7800 !densidade do Aço

!*****!

!Definição da geometria!-----

!*****!

!*****!

!Definição dos keypoints!-----

!*****!

K,1,0,0,0

K,2,0.0338,0,0

K,3,0.0676,0,0 !criação do keypoint número 1 com coordenadas 0,0,0

K,4,0,0.1016,0

K,5,0.0338,0.1016,0

K,6,0.0676,0.1016,0

K,7,0,0,6

K,8,0.0338,0,6

K,9,0.0676,0,6

K,10,0,0.1016,6

K,11,0.0338,0.1016,6

K,12,0.0676,0.1016,6

!*****!

!Definição das áreas da mesa e da alma-----

!*****!

A,4,5,6,12,11,10 !criação da área da seção transversal

A,1,2,3,9,8,7

A,2,8,11,5

!*****!

!-----Tipo de elemento SHELL63-----

!*****!

ET,1,SHELL63 !criação do tipo de elemento SHELL63

!*****!

!-----MATERIAIS-----

!*****!

MP,EX,1,Ec !módulo de elasticidade do concreto de material 1

MP,NUXY,1,vc !coeficiente de Poisson do concreto de material 1

MP,dens,1,dc !densidade do concreto de material 1

!*****!

!Criação das Constantes Reais-----

!*****!

R,1,0.00743, , , , ,

RMORE, , , ,

RMORE

RMORE, ,

!*

R,2,0.00483, , , , ,

RMORE, , , ,

RMORE

RMORE, ,

!*****!

!Colagem das áreas-----

!*****!

FLST,2,3,5,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-3

AGLUE,P51X

!*****!

!Divisão de Linhas-----

!*****!

FLST,5,6,4,ORDE,6

FITEM,5,3

FITEM,5,6

FITEM,5,9

FITEM,5,12

FITEM,5,13

FITEM,5,15

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1,0.025, , , , ,1

!*

FLST,5,8,4,ORDE,8

FITEM,5,1

FITEM,5,-2

FITEM,5,4

FITEM,5,-5

```
FITEM,5,7
FITEM,5,-8
FITEM,5,10
FITEM,5,-11
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,0.00338, , , , ,1
```

```
!*
!*****!
```

```
!Geração da Malha-----
!*****!
```

```
FLST,5,5,5,ORDE,2
```

```
FITEM,5,3
```

```
FITEM,5,-7
```

```
CM,_Y,AREA
```

```
ASEL, , , ,P51X
```

```
CM,_Y1,AREA
```

```
CHKMSH,'AREA'
```

```
CMSEL,S,_Y
```

```
!*
```

```
AMESH,_Y1
```

```
!*
```

```
!*****!
```

```
!Condições de Contorno-----
!*****!
```

```
FLST,2,21,1,ORDE,21
```

```
FITEM,2,4
```

```
FITEM,2,7488
```

```
FITEM,2,7491
```

```
FITEM,2,7730
```

FITEM,2,7969
FITEM,2,8208
FITEM,2,8447
FITEM,2,8686
FITEM,2,8925
FITEM,2,9164
FITEM,2,9403
FITEM,2,9653
FITEM,2,9901
FITEM,2,10140
FITEM,2,10379
FITEM,2,10618
FITEM,2,10857
FITEM,2,11096
FITEM,2,11335
FITEM,2,11574
FITEM,2,11813
!*
/GO
D,P51X, ,0, , , ,UX,UY,UZ, , ,

FLST,2,21,1,ORDE,21
FITEM,2,240
FITEM,2,7252
FITEM,2,7727
FITEM,2,7966
FITEM,2,8205
FITEM,2,8444
FITEM,2,8683
FITEM,2,8922
FITEM,2,9161
FITEM,2,9400
FITEM,2,9639
FITEM,2,9889
FITEM,2,10137
FITEM,2,10376
FITEM,2,10615
FITEM,2,10854
FITEM,2,11093
FITEM,2,11332
FITEM,2,11571
FITEM,2,11810
FITEM,2,12049
!*
/GO
D,P51X, ,0, , , ,UX,UY, , , ,

!*****!

!-----Deletar elementos a 1,5m do apoio esquerdo-----

!*****!

FLST,5,20,2,ORDE,20 !a segunda e a última posição corresponde ao número de elementos a deletar

FITEM,5,2761

FITEM,5,2762
FITEM,5,2763
FITEM,5,2764
FITEM,5,2765
FITEM,5,5166
FITEM,5,5167
FITEM,5,5168
FITEM,5,5169
FITEM,5,5170
FITEM,5,9966
FITEM,5,9967
FITEM,5,9968
FITEM,5,9969
FITEM,5,9970
FITEM,5,7561
FITEM,5,7562
FITEM,5,7563
FITEM,5,7564
FITEM,5,7565

ESEL,U, , ,P51X

!*****!

!-----Aplicação de força 3m-----
!*****!

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,371
!*
/GO
F,P51X,FY,-1020

!*****!

!-----Força da gravidade-----
!*****!

ACEL,0,9.8,0,

!*****!

!Tipo de Análise-----
!*****!

FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0,plot

/STATUS,SOLU
SOLVE

!*****!

!-----SELEÇÃO DA FILA DE NÓS-----

!*****!

FLST,5,241,1,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-241
NSEL,S,,P51X
NPLOT
FINISH

!*****!

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!END!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!-----

!*****!

APÊNDICE E. OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DOS DESLOCAMENTOS MEDIDOS NA ANÁLISE EXPERIMENTAL ESTÁTICA (PALECHOR, 2013).

Serão apresentados os resultados obtidos por Palechor (2013) na resposta estática (deslocamentos verticais U_y) para cada viga ensaiada.

Já na Tabela E.1 apresenta-se os deslocamentos da viga danificada somente em um local, V2E.

Tabela E.1- Deslocamentos verticais U_y - Viga V2E

DESLOCAMENTOS VERTICAIS U_y (cm) - VIGA V2E						
LVDT	COMPRIMENTO (m)	LEITURA DA CÉLULA DE CARGA (Newton)				
		1020	1320	2280	3330	4200
APOIO A	0,000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000000	0,0000000
LVDT01	0,375	1,3750000	1,8250000	3,2000000	4,6781250000	5,9500000
LVDT02	0,750	2,9312500	3,9593750	6,8750000	10,0312500000	12,7062500
LVDT03	1,125	4,4156250	5,8250000	10,2218750	15,0093750000	19,0468750
LVDT04	1,500	5,7406250	7,6750000	13,4187500	19,7000000000	25,0125000
LVDT05	1,875	6,7968750	9,1531250	15,9812500	23,4281250000	29,7281250
LVDT06	2,250	7,6562500	10,3500000	18,0562500	26,3812500000	33,4093750
LVDT07	2,625	8,1625000	11,1906250	19,4625000	28,4375000000	35,9625000
LVDT08	3,000	8,2656250	11,0750000	19,4437500	28,4968750000	36,0781250
LVDT09	3,375	8,1375000	11,0000000	19,2812500	28,3093750000	35,8843750
LVDT10	3,750	7,6906250	10,4125000	18,1625000	26,5906250000	33,6906250
LVDT11	4,125	6,7531250	9,3156250	16,2093750	23,6687500000	29,9562500
LVDT12	4,500	5,7250000	7,8343750	13,6093750	19,8437500000	25,1125000
LVDT13	4,875	4,3968750	6,0312500	10,4656250	15,2343750000	19,2562500
LVDT14	5,250	2,9500000	4,1156250	7,1531250	10,4062500000	13,1406250
LVDT15	5,625	1,4218750	2,0250000	3,5062500	5,0968750000	6,4406250
APOIO B	6,000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000000	0,0000000

A Tabela E.2 apresenta os deslocamentos da viga danificada, sendo esta maior do que a viga anterior somente em um local, viga V2E-2.

Tabela E.2- Deslocamentos verticais U_y - Viga V2E-2

DESLOCAMENTOS VERTICAIS U_y (cm) - VIGA V2E-2						
LVDT	COMPRIMENTO (m)	LEITURA DA CÉLULA DE CARGA (Newton)				
		990	2040	3060	3990	4530
APOIO A	0,000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000

DESLOCAMENTOS VERTICAIS U_y (cm) - VIGA V2E-2						
LVDT	COMPRIMENTO (m)	LEITURA DA CÉLULA DE CARGA (Newton)				
		990	2040	3060	3990	4530
LVDT01	0,375	1,3656250	2,8312500	4,3000000	5,5750000	5,7250000
LVDT02	0,750	2,8093750	5,8656250	8,9281250	11,6125000	11,9437500
LVDT03	1,125	4,1937500	8,7781250	13,4062500	17,4437500	17,9343750
LVDT04	1,500	5,5500000	11,6062500	17,7562500	23,1437500	23,7437500
LVDT05	1,875	6,5250000	13,6562500	20,8781250	27,2093750	27,9187500
LVDT06	2,250	7,2968750	15,2718750	23,2843750	30,2937500	30,4937500
LVDT07	2,625	7,8062500	16,4312500	25,0937500	32,6500000	33,5437500
LVDT08	3,000	7,8437500	16,5062500	25,2156250	32,7906250	33,8437500
LVDT09	3,375	7,7812500	16,3750000	25,0500000	32,6281250	33,7562500
LVDT10	3,750	7,2812500	15,3000000	23,3937500	30,4687500	31,6218750
LVDT11	4,125	6,4968750	13,6312500	20,7906250	27,0250000	28,1156250
LVDT12	4,500	5,3687500	11,3406250	17,3468750	22,5656250	23,5312500
LVDT13	4,875	4,1312500	8,7531250	13,3468750	17,3500000	18,1156250
LVDT14	5,250	2,7750000	5,8843750	8,9250000	11,5718750	12,0843750
LVDT15	5,625	1,3750000	2,9281250	4,4125000	5,6937500	5,9406250
APOIO B	6,000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000

A Tabela E.3 apresenta os deslocamentos da viga danificada em dois locais diferentes, viga V3E.

Tabela E.3- Deslocamentos verticais U_y - Viga V3E

DESLOCAMENTOS VERTICAIS U_y (cm) - VIGA V3E						
LVDT	COMPRIMENTO (m)	LEITURA DA CÉLULA DE CARGA (Newton)				
		960	2040	3120	4350	4620
APOIO A	0,000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
LVDT01	0,375	1,4687500	2,9031250	4,2937500	5,6312500	5,7156250
LVDT02	0,750	3,2375000	6,4343750	9,5218750	12,5281250	12,7093750
LVDT03	1,125	4,7781250	9,5125000	14,1062500	18,5531250	18,8250000
LVDT04	1,500	6,3312500	12,5531250	18,6156250	24,4812500	24,8093750
LVDT05	1,875	7,5312500	14,9750000	22,2312500	29,2625000	29,6593750
LVDT06	2,250	8,5218750	16,9312500	25,0250000	32,7250000	32,8656250
LVDT07	2,625	9,2187500	18,2968750	27,0343750	35,4781250	36,0062500
LVDT08	3,000	9,2968750	18,4218750	27,2343750	35,7781250	36,3656250
LVDT09	3,375	9,2156250	18,2687500	27,0593750	35,6281250	36,2750000
LVDT10	3,750	9,0218750	17,5281250	25,7468750	33,8375000	34,5031250
LVDT11	4,125	7,8343750	15,4500000	22,7312500	29,8812500	30,5000000
LVDT12	4,500	6,8343750	13,2218750	19,3500000	25,3687500	25,9281250
LVDT13	4,875	5,5062500	10,4187500	15,0937500	19,7281250	20,1687500
LVDT14	5,250	4,0062500	7,2937500	10,3937500	13,4750000	13,7718750
LVDT15	5,625	1,5031250	3,1843750	4,6843750	6,1437500	6,2781250
APOIO B	6,000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000

APÊNDICE F. OBTENÇÃO DE RESULTADOS DOS DESLOCAMENTOS MEDIDOS - ANÁLISE NUMÉRICA ESTÁTICA (BEAM3, SHELL63 E EULER-BERNOULLI)

1. Obtenção de Resultados: elemento BEAM3

A Tabela F.1, Tabela F.2, Tabela F.3, Tabela F.4, Tabela F.5, Tabela F.6, Tabela F.7, Tabela F.8, Tabela F.9 e Tabela F.10 apresentam os resultados dos deslocamentos verticais U_y (análise estática) utilizando o programa ANSYS com o uso do elemento BEAM3, para as seis vigas modeladas.

Tabela F.1 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V2E (BEAM3)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	1020	1320	2280	3330	4200
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,435300	-2,934900	-4,533700	-6,282300	-7,731200
0,750	-4,785000	-5,768500	-8,915800	-12,358000	-15,210000
1,125	-6,967400	-8,403500	-12,999000	-18,025000	-22,190000
1,500	-8,905300	-10,747000	-16,640000	-23,085000	-28,425000
1,875	-10,526000	-12,710000	-19,699000	-27,344000	-33,678000
2,250	-11,760000	-14,209000	-22,043000	-30,613000	-37,713000
2,625	-12,544000	-15,163000	-23,542000	-32,706000	-40,299000
3,000	-12,818000	-15,497000	-24,068000	-33,443000	-41,211000
3,375	-12,544000	-15,163000	-23,542000	-32,706000	-40,299000
3,750	-11,760000	-14,209000	-22,043000	-30,613000	-37,713000
4,125	-10,526000	-12,710000	-19,699000	-27,344000	-33,678000
4,500	-8,905300	-10,747000	-16,640000	-23,085000	-28,425000
4,875	-6,967400	-8,403500	-12,999000	-18,025000	-22,190000
5,250	-4,785000	-5,768500	-8,915800	-12,358000	-15,210000
5,625	-2,435300	-2,934900	-4,533700	-6,282300	-7,731200
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.2 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA V2E DANIFICADA (BEAM3)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	1020	1320	2280	3330	4200
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,445700	-2,947600	-4,553900	-6,310800	-7,766500
0,750	-4,805800	-5,794000	-8,956400	-12,415000	-15,281000
1,125	-6,998800	-8,442000	-13,060000	-18,111000	-22,296000
1,500	-8,947600	-10,799000	-16,721000	-23,200000	-28,567000
1,875	-10,564000	-12,757000	-19,774000	-27,449000	-33,808000
2,250	-11,794000	-14,250000	-22,110000	-30,707000	-37,830000
2,625	-12,574000	-15,199000	-23,601000	-32,790000	-40,404000
3,000	-12,844000	-15,529000	-24,121000	-33,518000	-41,304000
3,375	-12,566000	-15,190000	-23,587000	-32,771000	-40,380000
3,750	-11,779000	-14,232000	-22,082000	-30,668000	-37,782000
4,125	-10,541000	-12,729000	-19,731000	-27,390000	-33,735000
4,500	-8,917300	-10,762000	-16,665000	-23,121000	-28,471000
4,875	-6,976300	-8,414800	-13,018000	-18,052000	-22,224000
5,250	-4,790900	-5,776000	-8,928400	-12,376000	-15,233000
5,625	-2,438200	-2,938600	-4,540000	-6,291400	-7,742600
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.3 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E-2 (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V2E-2 (BEAM3)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	990	2040	3060	3990	4530
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,385300	-4,134000	-5,832700	-7,381500	-8,280800
0,750	-4,686600	-8,129000	-11,473000	-14,522000	-16,292000
1,125	-6,823800	-11,850000	-16,733000	-21,185000	-23,769000
1,500	-8,721200	-15,166000	-21,428000	-27,136000	-30,451000
1,875	-10,307000	-17,952000	-25,378000	-32,149000	-36,081000
2,250	-11,515000	-20,085000	-28,409000	-35,999000	-40,406000
2,625	-12,282000	-21,447000	-30,349000	-38,467000	-43,180000
3,000	-12,550000	-21,925000	-31,033000	-39,336000	-44,158000
3,375	-12,282000	-21,447000	-30,349000	-38,467000	-43,180000
3,750	-11,515000	-20,085000	-28,409000	-35,999000	-40,406000
4,125	-10,307000	-17,952000	-25,378000	-32,149000	-36,081000
4,500	-8,721200	-15,166000	-21,428000	-27,136000	-30,451000
4,875	-6,823800	-11,850000	-16,733000	-21,185000	-23,769000
5,250	-4,686600	-8,129000	-11,473000	-14,522000	-16,292000
5,625	-2,385300	-4,134000	-5,832700	-7,381500	-8,280800
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.4 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E-2 (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA V2E-2 DANIFICADA (BEAM3)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	990	2040	3060	3990	4530
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,405600	-4,170800	-5,885500	-7,448900	-8,356700
0,750	-4,727400	-8,202700	-11,579000	-14,657000	-16,444000
1,125	-6,885400	-11,961000	-16,892000	-21,387000	-23,998000
1,500	-8,804000	-15,315000	-21,640000	-27,408000	-30,756000
1,875	-10,383000	-18,089000	-25,575000	-32,400000	-36,363000
2,250	-11,582000	-20,207000	-28,586000	-36,226000	-40,661000
2,625	-12,341000	-21,556000	-30,507000	-38,669000	-43,408000
3,000	-12,601000	-22,021000	-31,172000	-39,515000	-44,359000
3,375	-12,326000	-21,529000	-30,470000	-38,622000	-43,355000
3,750	-11,552000	-20,155000	-28,512000	-36,132000	-40,556000
4,125	-10,337000	-18,010000	-25,463000	-32,259000	-36,205000
4,500	-8,744800	-15,213000	-21,495000	-27,224000	-30,550000
4,875	-6,841300	-11,884000	-16,783000	-21,250000	-23,844000
5,250	-4,698200	-8,151800	-11,507000	-14,566000	-16,342000
5,625	-2,391100	-4,145400	-5,849500	-7,403300	-8,305500
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.5 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V3E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V3E (BEAM3)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	960	2040	3120	4350	4620
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,335400	-4,134000	-5,932600	-7,981000	-8,430700
0,750	-4,588300	-8,129000	-11,670000	-15,702000	-16,587000
1,125	-6,680200	-11,850000	-17,020000	-22,908000	-24,200000
1,500	-8,537000	-15,166000	-21,796000	-29,346000	-31,004000
1,875	-10,089000	-17,952000	-25,815000	-34,770000	-36,736000
2,250	-11,270000	-20,085000	-28,899000	-38,937000	-41,141000
2,625	-12,021000	-21,447000	-30,873000	-41,609000	-43,965000
3,000	-12,283000	-21,925000	-31,568000	-42,550000	-44,961000
3,375	-12,021000	-21,447000	-30,873000	-41,609000	-43,965000
3,750	-11,270000	-20,085000	-28,899000	-38,937000	-41,141000
4,125	-10,089000	-17,952000	-25,815000	-34,770000	-36,736000
4,500	-8,537000	-15,166000	-21,796000	-29,346000	-31,004000
4,875	-6,680200	-11,850000	-17,020000	-22,908000	-24,200000
5,250	-4,588300	-8,129000	-11,670000	-15,702000	-16,587000
5,625	-2,335400	-4,134000	-5,932600	-7,981000	-8,430700
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.6 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V3E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V3E (BEAM3)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	960	2040	3120	4350	4620
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,350200	-4,162300	-5,974300	-8,038100	-8,491100
0,750	-4,618100	-8,185700	-11,753000	-15,816000	-16,708000
1,125	-6,725200	-11,935000	-17,145000	-23,079000	-24,382000
1,500	-8,597500	-15,281000	-21,964000	-29,575000	-31,246000
1,875	-10,162000	-18,090000	-26,018000	-35,047000	-37,029000
2,250	-11,342000	-20,221000	-29,100000	-39,212000	-41,432000
2,625	-12,092000	-21,583000	-31,074000	-41,883000	-44,255000
3,000	-12,353000	-22,061000	-31,768000	-42,824000	-45,251000
3,375	-12,091000	-21,582000	-31,073000	-41,882000	-44,255000
3,750	-11,342000	-20,221000	-29,099000	-39,211000	-41,430000
4,125	-10,162000	-18,089000	-26,016000	-35,045000	-37,026000
4,500	-8,597700	-15,281000	-21,964000	-29,576000	-31,247000
4,875	-6,725300	-11,936000	-17,146000	-23,080000	-24,382000
5,250	-4,618200	-8,185800	-11,754000	-15,817000	-16,709000
5,625	-2,350300	-4,162400	-5,974400	-8,038200	-8,491200
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.7 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V4E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V4E (BEAM3)				
DISTÂNCIA (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,343100	-3,949700	-5,556200	-7,162700
0,750	-4,582100	-7,723200	-10,864000	-14,005000
1,125	-6,616600	-11,148000	-15,680000	-20,212000
1,500	-8,350900	-14,058000	-19,765000	-25,471000
1,875	-9,693500	-16,287000	-22,881000	-29,475000
2,250	-10,575000	-17,714000	-24,852000	-31,991000
2,625	-10,999000	-18,356000	-25,712000	-33,069000
3,000	-10,992000	-18,272000	-25,553000	-32,834000
3,375	-10,584000	-17,527000	-24,470000	-31,413000
3,750	-9,811700	-16,188000	-22,564000	-28,940000
4,125	-8,712600	-14,326000	-19,939000	-25,552000
4,500	-7,330800	-12,017000	-16,704000	-21,391000
4,875	-5,714200	-9,343600	-12,973000	-16,602000
5,250	-3,915100	-6,389200	-8,863300	-11,337000
5,625	-1,990000	-3,243400	-4,496800	-5,750200
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.8 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V4E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V4E (BEAM3)				
DISTÂNCIA (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,344000	-3,951500	-5,558900	-7,166400
0,750	-4,583900	-7,726800	-10,870000	-14,013000
1,125	-6,619400	-11,154000	-15,689000	-20,223000
1,500	-8,354700	-14,065000	-19,776000	-25,486000
1,875	-9,698300	-16,297000	-22,895000	-29,494000
2,250	-10,581000	-17,725000	-24,869000	-32,014000
2,625	-11,006000	-18,369000	-25,732000	-33,096000
3,000	-11,000000	-18,288000	-25,576000	-32,864000
3,375	-10,595000	-17,546000	-24,496000	-31,447000
3,750	-9,823600	-16,209000	-22,594000	-28,979000
4,125	-8,726500	-14,349000	-19,972000	-25,595000
4,500	-7,346800	-12,044000	-16,742000	-21,439000
4,875	-5,732600	-9,373700	-13,015000	-16,656000
5,250	-3,927300	-6,409300	-8,891300	-11,373000
5,625	-1,996100	-3,253400	-4,510800	-5,768100
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.9 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V5E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V5E (BEAM3)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-3,230300	-5,724000	-8,217800	-10,711000
0,750	-6,323800	-11,207000	-16,089000	-20,972000
1,125	-9,147400	-16,210000	-23,273000	-30,335000
1,500	-11,573000	-20,501000	-29,430000	-38,358000
1,875	-13,493000	-23,886000	-34,280000	-44,673000
2,250	-14,875000	-26,315000	-37,755000	-49,195000
2,625	-15,709000	-27,777000	-39,844000	-51,912000
3,000	-15,988000	-28,265000	-40,541000	-52,818000
3,375	-15,709000	-27,777000	-39,844000	-51,912000
3,750	-14,875000	-26,315000	-37,755000	-49,195000
4,125	-13,493000	-23,886000	-34,280000	-44,673000
4,500	-11,573000	-20,501000	-29,430000	-38,358000
4,875	-9,147400	-16,210000	-23,273000	-30,335000
5,250	-6,323800	-11,207000	-16,089000	-20,972000
5,625	-3,230300	-5,724000	-8,217800	-10,711000
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.10 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V5E (BEAM3)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V5E (BEAM3)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-3,242400	-5,746500	-8,250600	-10,755000
0,750	-6,348000	-11,252000	-16,155000	-21,059000
1,125	-9,183900	-16,278000	-23,371000	-30,465000
1,500	-11,622000	-20,592000	-29,562000	-38,532000
1,875	-13,554000	-24,000000	-34,445000	-44,890000
2,250	-14,950000	-26,452000	-37,953000	-49,455000
2,625	-15,797000	-27,937000	-40,077000	-52,217000
3,000	-16,089000	-28,449000	-40,808000	-53,168000
3,375	-15,797000	-27,938000	-40,078000	-52,219000
3,750	-14,950000	-26,453000	-37,955000	-49,457000
4,125	-13,555000	-24,000000	-34,446000	-44,891000
4,500	-11,622000	-20,592000	-29,563000	-38,533000
4,875	-9,184200	-16,278000	-23,372000	-30,466000
5,250	-6,348200	-11,252000	-16,156000	-21,059000
5,625	-3,242500	-5,746700	-8,250800	-10,755000
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

2. Obtenção de resultados: elemento SHELL63

A Tabela F.11, Tabela F.12, Tabela F.13, Tabela F.14, Tabela F.15, Tabela F.16, Tabela F.17, Tabela F.18, Tabela F.19 e Tabela F.20 apresentam os resultados dos deslocamentos verticais U_y (análise estática) utilizando o programa ANSYS com o uso do elemento SHELL63, para as seis vigas modeladas.

Tabela F.11 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V2E (SHELL63)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	1020	1320	2280	3330	4200
0,000	0,258810	0,308960	0,469450	0,644980	0,790420
0,375	-1,684500	-2,010800	-3,055200	-4,197400	-5,143800
0,750	-3,566400	-4,258800	-6,474600	-8,898200	-10,906000
1,125	-5,318000	-6,353800	-9,668300	-13,294000	-16,297000
1,500	-6,875400	-8,219600	-12,521000	-17,226000	-21,124000
1,875	-8,178700	-9,784200	-14,922000	-20,541000	-25,197000
2,250	-9,172100	-10,980000	-16,764000	-23,090000	-28,332000
2,625	-9,803900	-11,742000	-17,944000	-24,727000	-30,347000
3,000	-10,026000	-12,011000	-18,363000	-25,310000	-31,066000
3,375	-9,803900	-11,742000	-17,944000	-24,727000	-30,347000
3,750	-9,172100	-10,980000	-16,764000	-23,090000	-28,332000
4,125	-8,178700	-9,784200	-14,922000	-20,541000	-25,197000
4,500	-6,875400	-8,219600	-12,521000	-17,226000	-21,124000
4,875	-5,318000	-6,353800	-9,668300	-13,294000	-16,297000
5,250	-3,566400	-4,258900	-6,474600	-8,898200	-10,906000
5,625	-1,684500	-2,010900	-3,055200	-4,197400	-5,143800
6,000	0,258810	0,308960	0,469450	0,644980	0,790420

Tabela F.12 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V2E (SHELL63)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	1020	1320	2280	3330	4200
0,000	0,261440	0,312110	0,474240	0,651580	0,798510
0,375	-1,701600	-2,031300	-3,086400	-4,240300	-5,196400
0,750	-3,603300	-4,303000	-6,541900	-8,990600	-11,020000
1,125	-5,374900	-6,421700	-9,771700	-13,436000	-16,472000
1,500	-6,951600	-8,310600	-12,659000	-17,416000	-21,357000
1,875	-8,249200	-9,868500	-15,050000	-20,718000	-25,414000
2,250	-9,235400	-11,055000	-16,880000	-23,250000	-28,528000
2,625	-9,860300	-11,810000	-18,048000	-24,870000	-30,524000
3,000	-10,076000	-12,071000	-18,455000	-25,437000	-31,222000
3,375	-9,846900	-11,794000	-18,024000	-24,837000	-30,483000
3,750	-9,208500	-11,024000	-16,832000	-23,184000	-28,448000
4,125	-8,208800	-9,820500	-14,978000	-20,619000	-25,293000
4,500	-6,899200	-8,248300	-12,566000	-17,287000	-21,200000
4,875	-5,335600	-6,375000	-9,701200	-13,339000	-16,354000
5,250	-3,577800	-4,272700	-6,496100	-8,927900	-10,943000
5,625	-1,689800	-2,017300	-3,065100	-4,211200	-5,160800
6,000	0,259620	0,309950	0,470980	0,647100	0,793040

Tabela F.13 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E-2 (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V2E-2 (SHELL63)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	990	2040	3060	3990	4530
0,000	0,253790	0,429330	0,599840	0,755310	0,845590
0,375	-1,651900	-2,794100	-3,903700	-4,915400	-5,502800
0,750	-3,497200	-5,920700	-8,275000	-10,422000	-11,668000
1,125	-5,214500	-8,839700	-12,361000	-15,572000	-17,437000
1,500	-6,741000	-11,446000	-16,016000	-20,183000	-22,602000
1,875	-8,018100	-13,637000	-19,096000	-24,073000	-26,963000
2,250	-8,991300	-15,318000	-21,463000	-27,067000	-30,320000
2,625	-9,610100	-16,393000	-22,983000	-28,991000	-32,479000
3,000	-9,827900	-16,775000	-23,524000	-29,677000	-33,250000
3,375	-9,610100	-16,393000	-22,983000	-28,991000	-32,479000
3,750	-8,991300	-15,318000	-21,463000	-27,067000	-30,320000
4,125	-8,018100	-13,637000	-19,096000	-24,073000	-26,963000
4,500	-6,741000	-11,446000	-16,016000	-20,183000	-22,602000
4,875	-5,214500	-8,839700	-12,361000	-15,572000	-17,437000
5,250	-3,497200	-5,920700	-8,275000	-10,422000	-11,668000
5,625	-1,651900	-2,794100	-3,903700	-4,915400	-5,502800
6,000	0,253800	0,429330	0,599840	0,755310	0,845590

Tabela F.14 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E-2 (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V2E-2 (SHELL63)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	990	2040	3060	3990	4530
0,000	0,257280	0,435300	0,608250	0,765930	0,857490
0,375	-1,674500	-2,833000	-3,958300	-4,984400	-5,580200
0,750	-3,546000	-6,004500	-8,392700	-10,570000	-11,835000
1,125	-5,289700	-8,968600	-12,542000	-15,801000	-17,693000
1,500	-6,842300	-11,619000	-16,259000	-20,490000	-22,946000
1,875	-8,112300	-13,799000	-19,324000	-24,361000	-27,286000
2,250	-9,075500	-15,463000	-21,669000	-27,327000	-30,612000
2,625	-9,684700	-16,523000	-23,167000	-29,224000	-32,741000
3,000	-9,893200	-16,889000	-23,686000	-29,882000	-33,480000
3,375	-9,666500	-16,493000	-23,124000	-29,170000	-32,680000
3,750	-9,039000	-15,402000	-21,583000	-27,219000	-30,491000
4,125	-8,057300	-13,707000	-19,195000	-24,199000	-27,105000
4,500	-6,771900	-11,501000	-16,094000	-20,283000	-22,715000
4,875	-5,237300	-8,880400	-12,419000	-15,646000	-17,520000
5,250	-3,512000	-5,947100	-8,312700	-10,470000	-11,722000
5,625	-1,658700	-2,806400	-3,921200	-4,937700	-5,527900
6,000	0,254850	0,431210	0,602540	0,758750	0,849450

Tabela F.15 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V3E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V3E (SHELL63)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	960	2040	3120	4350	4620
0,000	0,248780	0,429330	0,609870	0,815490	0,860630
0,375	-1,619200	-2,794100	-3,968900	-5,307000	-5,600700
0,750	-3,427900	-5,920700	-8,413500	-11,252000	-11,876000
1,125	-5,110900	-8,839700	-12,568000	-16,815000	-17,747000
1,500	-6,606600	-11,446000	-16,285000	-21,796000	-23,006000
1,875	-7,857600	-13,637000	-19,417000	-26,000000	-27,445000
2,250	-8,810600	-15,318000	-21,825000	-29,236000	-30,862000
2,625	-9,416300	-16,393000	-23,370000	-31,317000	-33,061000
3,000	-9,629500	-16,775000	-23,921000	-32,059000	-33,845000
3,375	-9,416300	-16,393000	-23,370000	-31,317000	-33,061000
3,750	-8,810600	-15,318000	-21,825000	-29,236000	-30,862000
4,125	-7,857600	-13,637000	-19,417000	-26,000000	-27,445000
4,500	-6,606600	-11,446000	-16,285000	-21,796000	-23,006000
4,875	-5,110900	-8,839700	-12,568000	-16,815000	-17,747000
5,250	-3,427900	-5,920700	-8,413500	-11,252000	-11,876000
5,625	-1,619200	-2,794100	-3,969000	-5,307000	-5,600700
6,000	0,248780	0,429330	0,609870	0,815500	0,860630

Tabela F.16 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V3E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V3E (SHELL63)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	960	2040	3120	4350	4620
0,000	0,252650	0,436140	0,619630	0,828610	0,874480
0,375	-1,644400	-2,838400	-4,032400	-5,392200	-5,690700
0,750	-3,482100	-6,016100	-8,550200	-11,436000	-12,070000
1,125	-5,194300	-8,986400	-12,779000	-17,097000	-18,045000
1,500	-6,719400	-11,644000	-16,569000	-22,177000	-23,408000
1,875	-7,994800	-13,878000	-19,762000	-26,463000	-27,934000
2,250	-8,946800	-15,558000	-22,168000	-29,697000	-31,350000
2,625	-9,551800	-16,632000	-23,713000	-31,777000	-33,547000
3,000	-9,764500	-17,013000	-24,262000	-32,518000	-34,330000
3,375	-9,551300	-16,631000	-23,712000	-31,775000	-33,545000
3,750	-8,945800	-15,556000	-22,166000	-29,694000	-31,346000
4,125	-7,993400	-13,876000	-19,758000	-26,458000	-27,929000
4,500	-6,719800	-11,645000	-16,569000	-22,178000	-23,409000
4,875	-5,194600	-8,986900	-12,779000	-17,098000	-18,046000
5,250	-3,482300	-6,016500	-8,550600	-11,437000	-12,070000
5,625	-1,644500	-2,838500	-4,032600	-5,392500	-5,691000
6,000	0,252660	0,436160	0,619660	0,828650	0,874530

Tabela F.17 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V4E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V4E (SHELL63)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,249160	0,410020	0,570880	0,731750
0,375	-1,622200	-2,669500	-3,716800	-4,764100
0,750	-3,419600	-5,627100	-7,834600	-10,042000
1,125	-5,059300	-8,322300	-11,585000	-14,848000
1,500	-6,462700	-10,620000	-14,778000	-18,936000
1,875	-7,555000	-12,390000	-17,225000	-22,060000
2,250	-8,273400	-13,520000	-18,767000	-24,014000
2,625	-8,625200	-14,036000	-19,447000	-24,857000
3,000	-8,629500	-13,981000	-19,333000	-24,685000
3,375	-8,309500	-13,405000	-18,500000	-23,595000
3,750	-7,692300	-12,358000	-17,024000	-21,690000
4,125	-6,809200	-10,899000	-14,988000	-19,077000
4,500	-5,695600	-9,086100	-12,477000	-15,867000
4,875	-4,390900	-6,985400	-9,579900	-12,174000
5,250	-2,938600	-4,665200	-6,391700	-8,118200
5,625	-1,386500	-2,198200	-3,009800	-3,821400
6,000	0,213040	0,337790	0,462540	0,587290

Tabela F.18 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V4E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V4E (SHELL63)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,249460	0,410510	0,571560	0,732610
0,375	-1,624200	-2,672700	-3,721200	-4,769600
0,750	-3,423900	-5,633900	-7,844000	-10,054000
1,125	-5,065900	-8,332800	-11,600000	-14,867000
1,500	-6,471700	-10,635000	-14,798000	-18,961000
1,875	-7,566400	-12,408000	-17,250000	-22,092000
2,250	-8,287300	-13,542000	-18,797000	-24,053000
2,625	-8,641600	-14,062000	-19,482000	-24,902000
3,000	-8,648600	-14,011000	-19,374000	-24,736000
3,375	-8,331300	-13,439000	-18,546000	-23,653000
3,750	-7,717100	-12,397000	-17,076000	-21,756000
4,125	-6,837000	-10,941000	-15,046000	-19,150000
4,500	-5,726500	-9,133500	-12,540000	-15,947000
4,875	-4,424800	-7,036900	-9,649000	-12,261000
5,250	-2,961200	-4,699500	-6,437800	-8,176100
5,625	-1,397000	-2,214100	-3,031200	-3,848300
6,000	0,214650	0,340240	0,465830	0,591420

Tabela F.19 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V5E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V5E (SHELL63)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,336000	0,583710	0,831420	1,079100
0,375	-2,187400	-3,800000	-5,412500	-7,025100
0,750	-4,615500	-8,018800	-11,422000	-14,826000
1,125	-6,838900	-11,881000	-16,924000	-21,967000
1,500	-8,753800	-15,202000	-21,651000	-28,100000
1,875	-10,268000	-17,816000	-25,364000	-32,912000
2,250	-11,360000	-19,693000	-28,026000	-36,359000
2,625	-12,019000	-20,823000	-29,627000	-38,432000
3,000	-12,239000	-21,200000	-30,162000	-39,123000
3,375	-12,019000	-20,823000	-29,627000	-38,432000
3,750	-11,360000	-19,693000	-28,026000	-36,359000
4,125	-10,268000	-17,816000	-25,364000	-32,912000
4,500	-8,753800	-15,202000	-21,651000	-28,100000
4,875	-6,838900	-11,881000	-16,924000	-21,967000
5,250	-4,615500	-8,018800	-11,422000	-14,826000
5,625	-2,187500	-3,800000	-5,412600	-7,025100
6,000	0,336010	0,583720	0,831430	1,079100

Tabela F.20 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V5E (SHELL63)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V5E (SHELL63)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,339000	0,588970	0,838930	1,088900
0,375	-2,207000	-3,834100	-5,461300	-7,088500
0,750	-4,657500	-8,092400	-11,527000	-14,962000
1,125	-6,903600	-11,995000	-17,086000	-22,177000
1,500	-8,841100	-15,355000	-21,869000	-28,383000
1,875	-10,378000	-18,009000	-25,639000	-33,269000
2,250	-11,493000	-19,925000	-28,358000	-36,790000
2,625	-12,175000	-21,096000	-30,016000	-38,937000
3,000	-12,418000	-21,511000	-30,605000	-39,698000
3,375	-12,177000	-21,098000	-30,019000	-38,941000
3,750	-11,494000	-19,927000	-28,361000	-36,794000
4,125	-10,379000	-18,010000	-25,641000	-33,272000
4,500	-8,841900	-15,356000	-21,871000	-28,386000
4,875	-6,904200	-11,996000	-17,087000	-22,178000
5,250	-4,657900	-8,093100	-11,528000	-14,963000
5,625	-2,207100	-3,834500	-5,461800	-7,089100
6,000	0,339030	0,589020	0,839000	1,089000

3. Obtenção de Resultados: EULER-BERNOULLI

A Tabela F.21, Tabela F.22, Tabela F.23, Tabela F.24, Tabela F.25, Tabela F.26, Tabela F.27, Tabela F.28, Tabela F.29 e Tabela F.30 apresentam os resultados dos deslocamentos verticais U_y (análise estática) utilizando a teoria de EULER-BERNOULLI, para as 6 vigas programadas.

Tabela F.21 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V2E (EULER-BERNOULLI)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	1020	1320	2280	3330	4200
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,698000	-2,197600	-3,796300	-5,545000	-6,993900
0,750	-3,342600	-4,326100	-7,473400	-10,916000	-13,768000
1,125	-4,880500	-6,316600	-10,912000	-15,938000	-20,103000
1,500	-6,258500	-8,100000	-13,993000	-20,438000	-25,779000
1,875	-7,423100	-9,607300	-16,597000	-24,241000	-30,575000
2,250	-8,321000	-10,769000	-18,604000	-27,174000	-34,274000
2,625	-8,898900	-11,517000	-19,896000	-29,061000	-36,654000
3,000	-9,103400	-11,782000	-20,353000	-29,728000	-37,496000
3,375	-8,898900	-11,517000	-19,896000	-29,061000	-36,654000
3,750	-8,321000	-10,769000	-18,604000	-27,174000	-34,274000
4,125	-7,423100	-9,607300	-16,597000	-24,241000	-30,575000
4,500	-6,258500	-8,100000	-13,993000	-20,438000	-25,779000
4,875	-4,880500	-6,316600	-10,912000	-15,938000	-20,103000
5,250	-3,342600	-4,326100	-7,473400	-10,916000	-13,768000
5,625	-1,698000	-2,197600	-3,796300	-5,545000	-6,993900
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.22 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V2E (EULER-BERNOULLI)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	1020	1320	2280	3330	4200
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,857800	-2,404400	-4,153700	-6,066900	-7,652200
0,750	-3,662200	-4,739800	-8,188100	-11,960000	-15,085000
1,125	-5,360000	-6,937200	-11,984000	-17,504000	-22,078000
1,500	-6,897800	-8,927400	-15,422000	-22,526000	-28,412000
1,875	-8,115000	-10,503000	-18,144000	-26,501000	-33,425000
2,250	-8,950000	-11,583000	-20,011000	-29,228000	-36,865000
2,625	-9,465000	-12,250000	-21,162000	-30,909000	-38,986000
3,000	-9,606600	-12,433000	-21,478000	-31,372000	-39,569000
3,375	-9,339200	-12,087000	-20,881000	-30,499000	-38,468000
3,750	-8,698400	-11,258000	-19,448000	-28,406000	-35,828000
4,125	-7,737600	-10,014000	-17,300000	-25,268000	-31,871000
4,500	-6,510100	-8,425600	-14,555000	-21,260000	-26,815000
4,875	-5,069200	-6,560800	-11,334000	-16,555000	-20,880000
5,250	-3,468400	-4,488900	-7,754700	-11,327000	-14,286000
5,625	-1,760900	-2,279000	-3,937000	-5,750400	-7,253000
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.23 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V2E-2 (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V2E-2 (EULER-BERNOULLI)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	990	2040	3060	3990	4530
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,648000	-3,396600	-5,095300	-6,644200	-7,543500
0,750	-3,244200	-6,686600	-10,031000	-13,080000	-14,850000
1,125	-4,736900	-9,763200	-14,646000	-19,098000	-21,683000
1,500	-6,074300	-12,520000	-18,781000	-24,490000	-27,804000
1,875	-7,204700	-14,849000	-22,276000	-29,047000	-32,978000
2,250	-8,076200	-16,646000	-24,970000	-32,560000	-36,967000
2,625	-8,637100	-17,802000	-26,704000	-34,821000	-39,534000
3,000	-8,835500	-18,211000	-27,318000	-35,621000	-40,443000
3,375	-8,637100	-17,802000	-26,704000	-34,821000	-39,534000
3,750	-8,076200	-16,646000	-24,970000	-32,560000	-36,967000
4,125	-7,204700	-14,849000	-22,276000	-29,047000	-32,978000
4,500	-6,074300	-12,520000	-18,781000	-24,490000	-27,804000
4,875	-4,736900	-9,763200	-14,646000	-19,098000	-21,683000
5,250	-3,244200	-6,686600	-10,031000	-13,080000	-14,850000
5,625	-1,648000	-3,396600	-5,095300	-6,644200	-7,543500
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.24 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V2E-2 (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V2E-2 (EULER-BERNOULLI)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	990	2040	3060	3990	4530
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,803100	-3,716400	-5,575000	-7,269600	-8,253500
0,750	-3,554500	-7,326000	-10,990000	-14,330000	-16,270000
1,125	-5,202300	-10,722000	-16,085000	-20,974000	-23,813000
1,500	-6,694800	-13,799000	-20,699000	-26,991000	-30,644000
1,875	-7,876200	-16,233000	-24,352000	-31,754000	-36,052000
2,250	-8,686700	-17,904000	-26,858000	-35,021000	-39,762000
2,625	-9,186500	-18,934000	-28,403000	-37,036000	-42,049000
3,000	-9,323900	-19,217000	-28,828000	-37,590000	-42,678000
3,375	-9,064400	-18,682000	-28,025000	-36,544000	-41,490000
3,750	-8,442500	-17,400000	-26,103000	-34,037000	-38,644000
4,125	-7,509900	-15,478000	-23,219000	-30,277000	-34,375000
4,500	-6,318500	-13,023000	-19,536000	-25,474000	-28,922000
4,875	-4,920100	-10,141000	-15,212000	-19,836000	-22,521000
5,250	-3,366300	-6,938300	-10,408000	-13,572000	-15,409000
5,625	-1,709000	-3,522500	-5,284100	-6,890300	-7,822900
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.25 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V3E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V3E (EULER-BERNOULLI)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	960	2040	3120	4350	4620
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,598000	-3,396600	-5,195300	-7,243700	-7,693300
0,750	-3,145900	-6,686600	-10,227000	-14,260000	-15,145000
1,125	-4,593300	-9,763200	-14,933000	-20,821000	-22,113000
1,500	-5,890200	-12,520000	-19,149000	-26,699000	-28,357000
1,875	-6,986300	-14,849000	-22,712000	-31,668000	-33,633000
2,250	-7,831400	-16,646000	-25,460000	-35,498000	-37,702000
2,625	-8,375200	-17,802000	-27,228000	-37,963000	-40,320000
3,000	-8,567700	-18,211000	-27,853000	-38,836000	-41,246000
3,375	-8,375200	-17,802000	-27,228000	-37,963000	-40,320000
3,750	-7,831400	-16,646000	-25,460000	-35,498000	-37,702000
4,125	-6,986300	-14,849000	-22,712000	-31,668000	-33,633000
4,500	-5,890200	-12,520000	-19,149000	-26,699000	-28,357000
4,875	-4,593300	-9,763200	-14,933000	-20,821000	-22,113000
5,250	-3,145900	-6,686600	-10,227000	-14,260000	-15,145000
5,625	-1,598000	-3,396600	-5,195300	-7,243700	-7,693300
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.26 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V3E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V3E (EULER-BERNOULLI)					
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)				
	960	2040	3120	4350	4620
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,807600	-3,842200	-5,876700	-8,193900	-8,702500
0,750	-3,565100	-7,577700	-11,590000	-16,160000	-17,163000
1,125	-5,222200	-11,100000	-16,977000	-23,671000	-25,141000
1,500	-6,728600	-14,302000	-21,875000	-30,500000	-32,393000
1,875	-7,933400	-16,863000	-25,792000	-35,961000	-38,193000
2,250	-8,778500	-18,659000	-28,539000	-39,791000	-42,262000
2,625	-9,322400	-19,815000	-30,307000	-42,257000	-44,880000
3,000	-9,514800	-20,224000	-30,933000	-43,129000	-45,806000
3,375	-9,322400	-19,815000	-30,307000	-42,257000	-44,880000
3,750	-8,778500	-18,659000	-28,539000	-39,791000	-42,262000
4,125	-7,933400	-16,863000	-25,792000	-35,961000	-38,193000
4,500	-6,728600	-14,302000	-21,875000	-30,500000	-32,393000
4,875	-5,222200	-11,100000	-16,977000	-23,671000	-25,141000
5,250	-3,565100	-7,577700	-11,590000	-16,160000	-17,163000
5,625	-1,807600	-3,842200	-5,876700	-8,193900	-8,702500
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.27 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V4E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V4E (EULER-BERNOULLI)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,605800	-3,212300	-4,818900	-6,425400
0,750	-3,139700	-6,280800	-9,421900	-12,563000
1,125	-4,529800	-9,061600	-13,593000	-18,125000
1,500	-5,704100	-11,411000	-17,118000	-22,824000
1,875	-6,590900	-13,185000	-19,779000	-26,373000
2,250	-7,135500	-14,274000	-21,413000	-28,552000
2,625	-7,353200	-14,710000	-22,067000	-29,424000
3,000	-7,276900	-14,558000	-21,838000	-29,119000
3,375	-6,939100	-13,882000	-20,825000	-27,767000
3,750	-6,372500	-12,749000	-19,125000	-25,501000
4,125	-5,609900	-11,223000	-16,836000	-22,449000
4,500	-4,684000	-9,370600	-14,057000	-18,744000
4,875	-3,627300	-7,256700	-10,886000	-14,516000
5,250	-2,472700	-4,946800	-7,420900	-9,895000
5,625	-1,252700	-2,506100	-3,759500	-5,012900
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.28 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V4E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V4E (EULER-BERNOULLI)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-1,617800	-3,236300	-4,854900	-6,473400
0,750	-3,163700	-6,328800	-9,494000	-12,659000
1,125	-4,565800	-9,133600	-13,702000	-18,269000
1,500	-5,752100	-11,507000	-17,262000	-23,017000
1,875	-6,650800	-13,305000	-19,959000	-26,613000
2,250	-7,207500	-14,418000	-21,629000	-28,840000
2,625	-7,437200	-14,878000	-22,319000	-29,760000
3,000	-7,372900	-14,750000	-22,126000	-29,503000
3,375	-7,047100	-14,098000	-21,149000	-28,200000
3,750	-6,492500	-12,989000	-19,485000	-25,981000
4,125	-5,741900	-11,487000	-17,232000	-22,977000
4,500	-4,828000	-9,658700	-14,489000	-19,320000
4,875	-3,783300	-7,568800	-11,354000	-15,140000
5,250	-2,600200	-5,202000	-7,803800	-10,406000
5,625	-1,316400	-2,633700	-3,950900	-5,268200
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.29 - Deslocamentos: análise estática – Viga Intacta V5E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA INTACTA V5E (EULER-BERNOULLI)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,493000	-4,986700	-7,480400	-9,974100
0,750	-4,881400	-9,764200	-14,647000	-19,530000
1,125	-7,060500	-14,123000	-21,186000	-28,248000
1,500	-8,925900	-17,854000	-26,783000	-35,712000
1,875	-10,390000	-20,784000	-31,177000	-41,571000
2,250	-11,436000	-22,876000	-34,316000	-45,755000
2,625	-12,064000	-24,131000	-36,199000	-48,266000
3,000	-12,273000	-24,550000	-36,827000	-49,103000
3,375	-12,064000	-24,131000	-36,199000	-48,266000
3,750	-11,436000	-22,876000	-34,316000	-45,755000
4,125	-10,390000	-20,784000	-31,177000	-41,571000
4,500	-8,925900	-17,854000	-26,783000	-35,712000
4,875	-7,060500	-14,123000	-21,186000	-28,248000
5,250	-4,881400	-9,764200	-14,647000	-19,530000
5,625	-2,493000	-4,986700	-7,480400	-9,974100
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabela F.30 - Deslocamentos: análise estática – Viga Danificada V5E (EULER-BERNOULLI)

DESLOCAMENTOS (cm) - VIGA DANIFICADA V5E (EULER-BERNOULLI)				
COMPRIMENTO (m)	CARGA (Newton)			
	1000	2000	3000	4000
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,375	-2,675000	-5,350700	-8,026500	-10,702000
0,750	-5,245300	-10,492000	-15,739000	-20,986000
1,125	-7,606500	-15,215000	-22,824000	-30,433000
1,500	-9,653800	-19,311000	-28,967000	-38,624000
1,875	-11,300000	-22,604000	-33,908000	-45,211000
2,250	-12,528000	-25,060000	-37,592000	-50,124000
2,625	-13,338000	-26,680000	-40,021000	-53,363000
3,000	-13,729000	-27,462000	-41,195000	-54,928000
3,375	-13,508000	-27,019000	-40,531000	-54,043000
3,750	-12,674000	-25,351000	-38,029000	-50,707000
4,125	-11,422000	-22,847000	-34,272000	-45,697000
4,500	-9,750900	-19,505000	-29,259000	-39,012000
4,875	-7,679300	-15,361000	-23,042000	-30,724000
5,250	-5,293900	-10,589000	-15,885000	-21,180000
5,625	-2,699200	-5,399300	-8,099300	-10,799000
6,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000