



OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA INVERSO NA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS

Brunno Emidio Sobrinho

Gilberto Gomes

br_emidio@yahoo.com.br

ggomes2007@gmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

Genasil Francisco dos Santos

genasil@hotmail.com

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PGECIV, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Erwin Ulises Lopez Palechor

erwinlopezpalechor@hotmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva

salenoyure@hotmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

Resumo. *Os trabalhos com erros e incertezas oriundos da utilização de modelos numéricos e experimentais por meio de processos de otimização têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores. Neste campo de atuação, muitas dificuldades são encontradas, pois simular o comportamento real das estruturas, principalmente em problemas que envolvem danos, requer uma adequação matemática dos modelos numéricos a partir de medidas experimentais, seja na modelagem da rigidez de conexões, nas condições de apoio ou em alguns parâmetros relevantes, buscando-se, desta forma, a mínima distorção dos resultados*

obtidos. A partir de um processo numérico se obtém uma configuração da estrutura que resulta em uma performance ótima, seja devido ao atendimento de algum critério de máxima rigidez, seja por satisfazer restrições tanto sobre as variáveis de projeto quanto sobre o comportamento da estrutura (tensão de falha, frequência, modos, deslocamentos, etc...). Neste trabalho, propõe-se o ajuste de estruturas de vigas metálicas modeladas pelo Método de Elementos Finitos (MEF) com uso do ANSYS, tendo como base dados experimentais estáticos (deslocamentos), por meio dos problemas inversos e métodos de otimização. A partir dos modelos ajustados serão simulados danos nas estruturas e em seguida aplicada uma técnica de otimização, denominada Evolução Diferencial (Estocástico). Vigas com diferentes carregamentos e grandezas de danos foram testadas apresentando resultados coerentes.

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

INTRODUÇÃO

Os processos 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 muitos dos resultados obtidos, principalmente quando são envolvidos danos. É nesse intuito que o processo de otimização ou ajuste de modelos numéricos entra para auxiliar esses modelos numéricos, bem como o comportamento físico real da estrutura modelada. 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 aos dados experimentais, de modo a torná-lo mais preciso, por meio da melhora do comportamento do modelo numérico em relação ao modelo/dados experimentais no intuito de aumentar sua precisão.

Esse processo constitui-se essencialmente de:

Otimização → Refinamento → Fases } $\begin{matrix} \text{Manual} \\ \text{Automática} \end{matrix}$

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 Lopes (2010), aborda-se 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 desse processo, 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” 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 das vigas metálicas torna-se imprescindível o conhecimento da sua função e das características de cada tipo de viga.

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

Neste intuito, este artigo 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 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 poderosas 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 e 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 da 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 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 estática, a formulação básica utilizada está apresentada na Eq. 1 seguinte.

$$([K][x]) = [P] \quad (1)$$

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 Eq. 2 seguinte.

$$K = [K(A, t, l, E, I, G, J)] \quad (2)$$

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 Eq. 3 a seguir contempla:

$$F = \sum_i \sum_j (Y_m^{ij} - Y_a^{ij})^2 \quad (3)$$

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 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 Eq. 4 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.

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

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 “Fig. 1” a seguir.

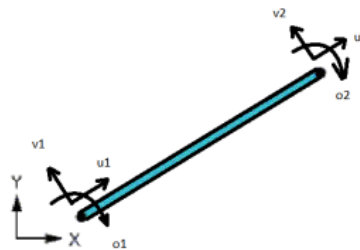


Figura 1. Elemento Finito tipo viga

1.2 Descrição genérica dos métodos de otimização

Os problemas de otimização podem ser resultados do método de avaliação de danos. A “Fig. 2” seguinte mostra o fluxograma com os métodos de otimização.

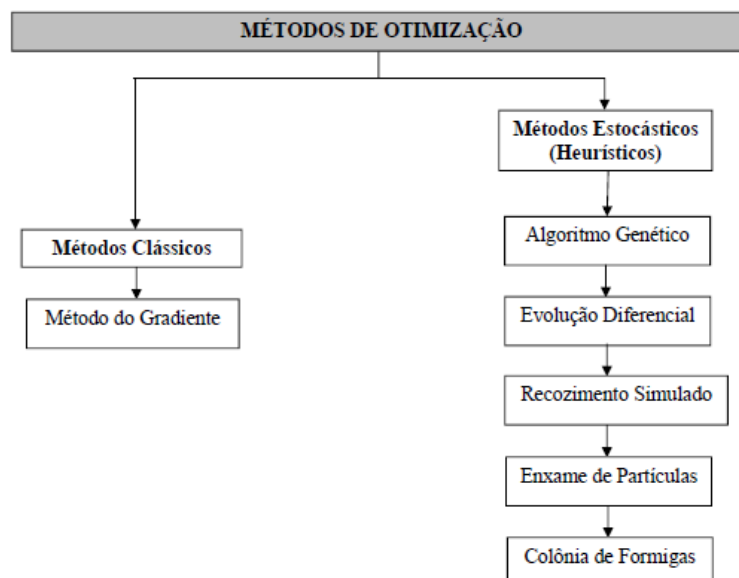


Figura 2. Métodos de otimização

Como pôde ser observado 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.

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 (“Fig. 3”) que resume as etapas do método de Evolução Diferencial, caracterizando os critérios de parada.

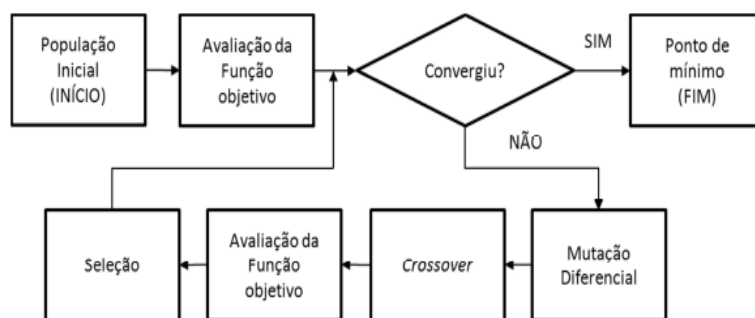


Figura 3. Viga testada Fluxograma do método de Evolução Diferencial – DE (Suveges, 2014)

1.3 Modelo de elemento estrutural analisado

A viga metálica (perfil-I) testada foi de aço MR-250 de comprimento total de 6,00 metros, em condição biapoada, submetida à diferentes estágios de carga aplicadas no meio do vão, conforme ilustrado na “Fig.3” seguinte.

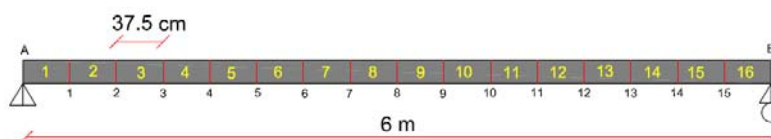


Figura 3. Viga testada

A modelagem da viga (perfil-I), biapoiada, 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 (ver “Fig.4”) e SHELL63 (ver “Fig.5”). Utilizou-se também uma rotina de programação em MATLAB, baseada na teoria de viga de EULER-BERNOULLI.

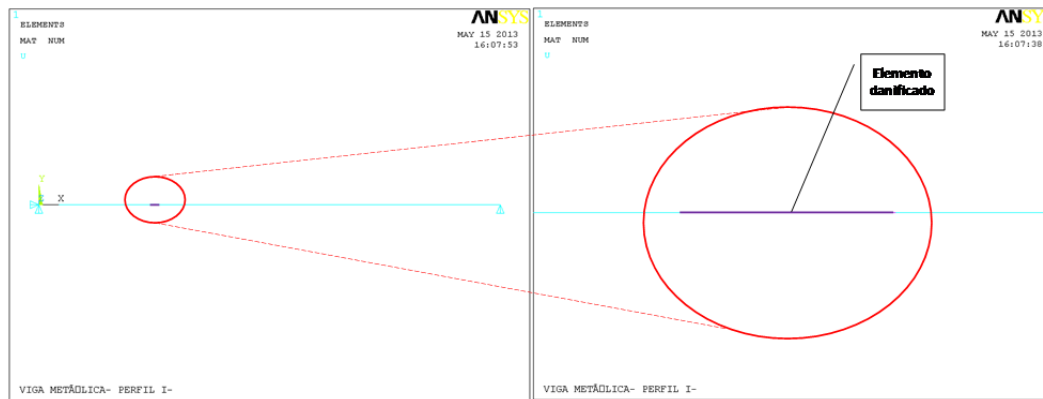


Figura 4. Simulação do dano: elemento BEAM3 (ANSYS, 2007)

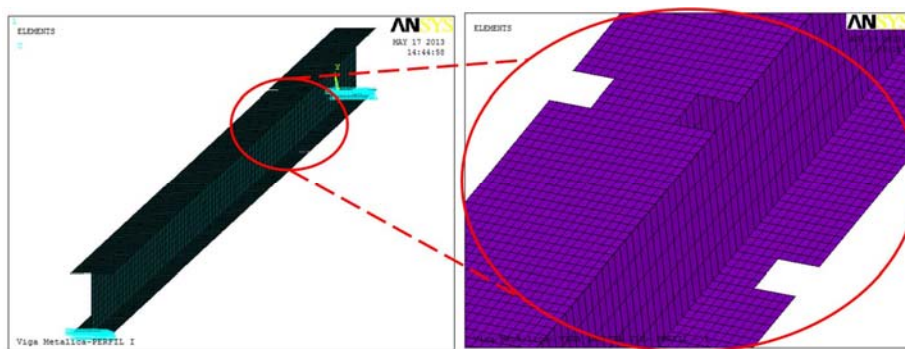
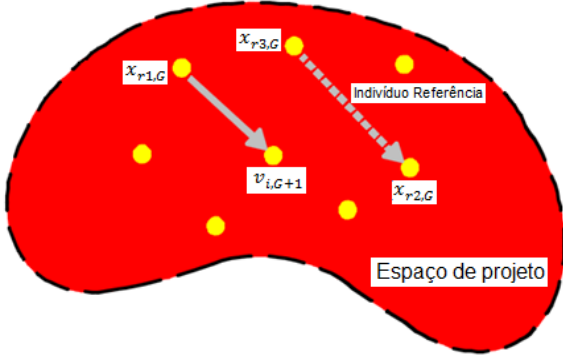
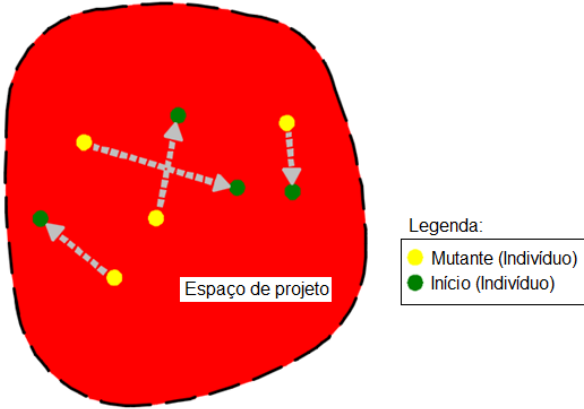


Figura 5. Simulação do dano: elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)

1.4 Aplicação do Método de Evolução Diferencial na avaliação de danos em vigas

Serão apresentados os resultados da aplicação do Método de Evolução Diferencial (ver esquema de funcionamento geral do método na “Tab. 1”) a diferentes situações de vigas com números constantes de elementos (denominado dentro do método de número de parâmetros da função objetivo, ou mesmo de variáveis envolvidas ou até mesmo de dimensionalidade). Foram utilizados como resultados experimentais deslocamentos estáticos. Os dados medidos foram simulados sinteticamente utilizando o modelo analítico em elementos finitos da estrutura com determinados elementos danificados (rigidez reduzida).

Tabela 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
	Mutação: $v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$ Indivíduo Referência: $x_{r1,G}$ ↓ Mutação: $v_{i,G+1} = x_{mutante} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$
 Legenda: ● Mutante (Indivíduo) ● Início (Indivíduo)	Indivíduo Referência: $x_{mutante}$ ↓ Mutação: $v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{mutante} - x_{r3,G}) + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$ Indivíduo Referência: $x_{r1,G}$

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.

Os danos serão simulados a fim de serem identificados pelo Método de Evolução Diferencial, 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 nos 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 (ver “Tab. 2”) foram:

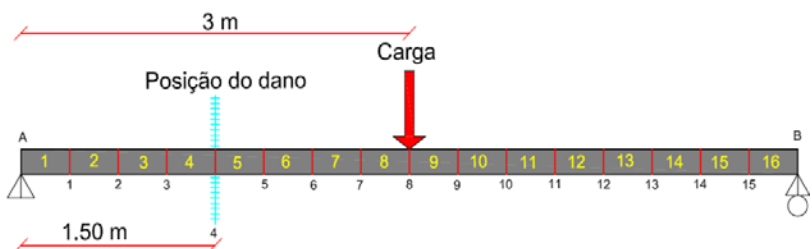
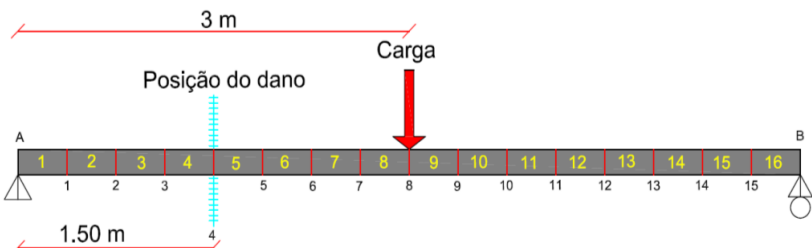
→ I_D = 16: número de elementos das vigas em estudo (variáveis);

→ I_NP = 10.I_D → I_NP = 160: número de populações ou tamanho da 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.

Tabela 2. Características dos elementos utilizados na modelagem numérica

TIPO DE ANÁLISE ESTATICA E CARGAS APLICADAS		PANORAMAS DE VIGAS ANALISADAS E SUAS CARACTERÍSTICAS GERAIS	
Análise (Intacta e Danificada)	Cargas	 (b) Viga danificada V2E com localização do dano a 1,50m do apoio esquerdo, com longitude do dano de 2cm (45%) e aplicação da carga no meio do vão	
Experimental	2280N		
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)			
Numérico: Viga Euler Bernoulli			
Análise (Intacta e Danificada)	Cargas	 (c) Viga danificada V2E-2 com localização do dano a 1,50m do apoio esquerdo, com longitude do dano de 4cm (65,5%) e aplicação da carga no meio do vão.	
Experimental	3060N		
Numérico: ANSYS (BEAM3 e SHELL63)			
Numérico: Viga Euler Bernoulli			

1.5 Viga 1 (V2E): carga 2280N

Nas análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E é apresentada na “Fig. 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 2280N.

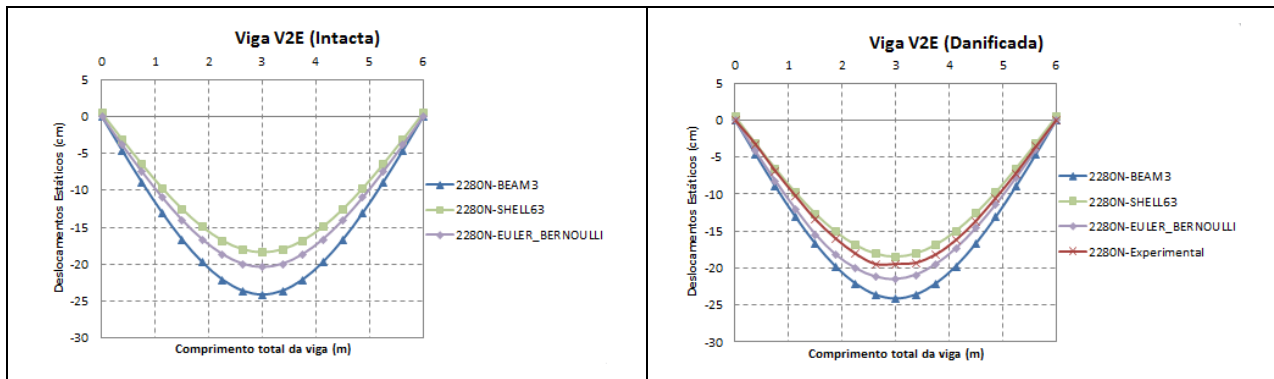


Figura 6. Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 2280N)

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 utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga. Na “Fig. 7” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 0,03449685 na quadragésima iteração e os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com alguns pequenos picos, principalmente nas proximidades do dano e do carregamento concentrado, sendo estas distorções encontradas principalmente relacionada com as diferenças quadráticas dos deslocamentos estáticos intactos e danificados obtidos.

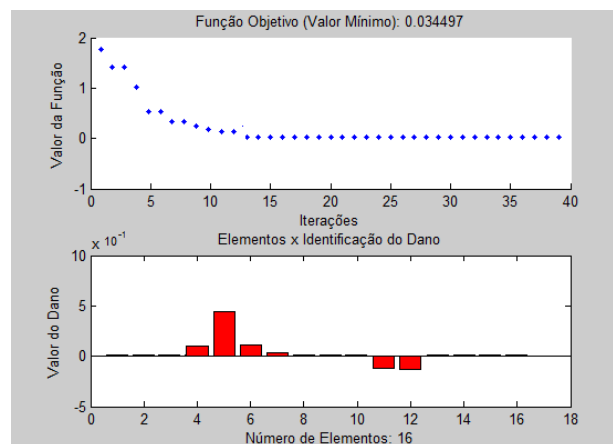


Figura 7. Identificação de dano: Viga V2E carga 2280N (BEAM3)

As simulações propostas na segunda abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento SHELL63 e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga. Na “Fig. 8” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 0,10221124 na quadragésima iteração e 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, além de alguns resíduos gerados, nas proximidades dos apoios, como já citado, do dano e do carregamento concentrado, sendo

estas distorções encontradas principalmente relacionada com as diferenças quadráticas dos deslocamentos estáticos intactos e danificados obtidos por meio da função objetivo utilizada.

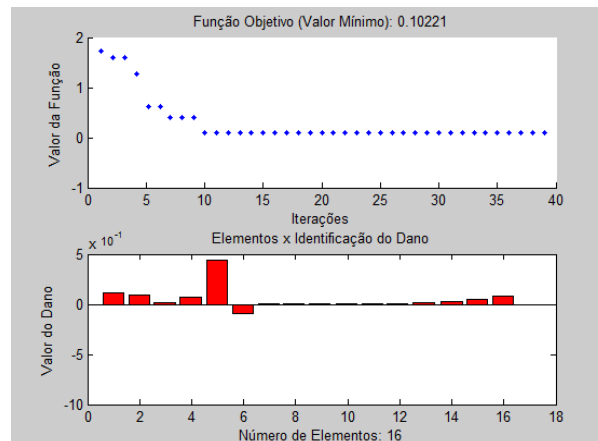


Figura 8. Identificação de dano: Viga V2E carga 2280N (SHELL63)

As simulações propostas na terceira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica 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 dos elementos da viga. Na “Fig. 9” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 13,84061903 na quadragésima iteração e os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto, com algumas pequenas distorções com melhoras por causa do número de iterações utilizadas e devido aos bons resultados obtidos dos deslocamentos estáticos na análise da viga.

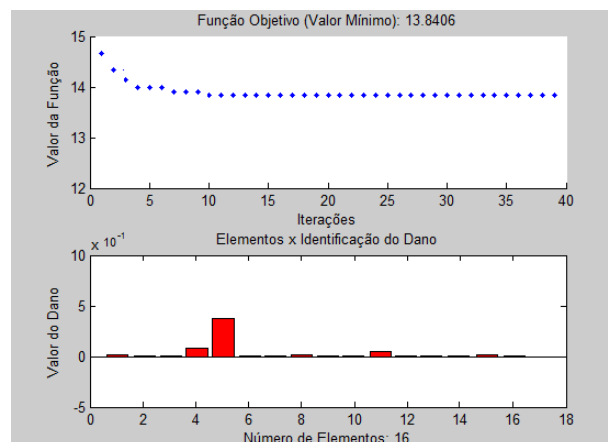


Figura 9. Identificação de dano: Viga V2E carga 2280N (EULER BERNOULLI)

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 “Fig. 10”, 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 2280N.

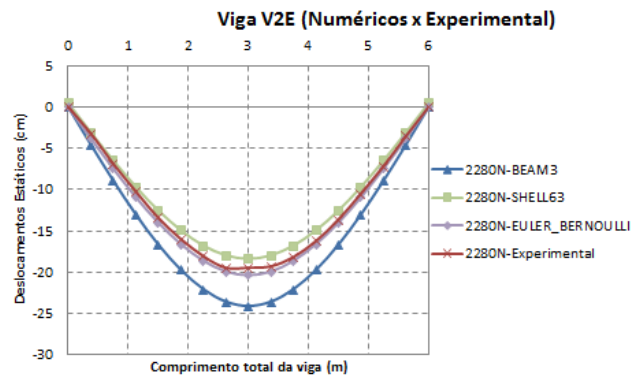


Figura 10. Análises gráficas intactas (numéricas) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E (carga 2280N)

Essa tentativa de análise de identificação de dano já é possível pois os deslocamentos obtidos na análise numérica intacta do ANSYS por meio do elemento SHELL63, tem grandezas inferiores aos valores obtidos na análise danificada via modelo experimental, demonstrando possibilidades de coerências na análise. Isso pode ser explicado pelo fato desse elemento apresentar condições de simulações muito próximas do que foi aplicado nas análises experimentais.

Nessa simulação proposta na quarta abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica intacta do ANSYS por meio do elemento SHELL63 em conjunto com a análise experimental danificada e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga. Na “Fig. 11” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 45% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 15,6654 na centésima iteração e 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.

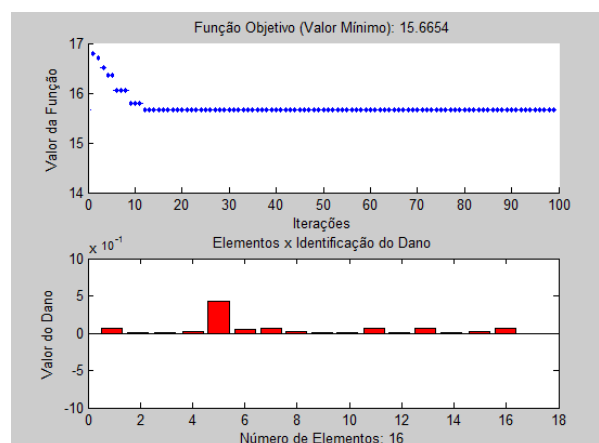


Figura 11. Identificação de dano: Viga V2E carga 2280N (Numérico x Experimental)

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 (encontrando até mesmo resultados negativos), 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 1 (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.

1.6 Viga 2 (V2E-2): carga 3060N

Nas análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 é apresentada na “Fig. 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 3060N.

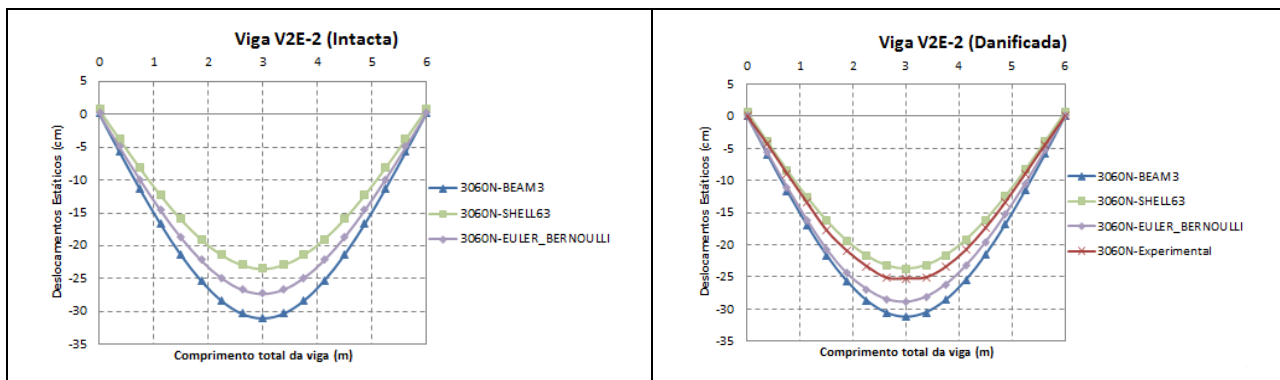


Figura 12. Análises gráficas intactas e danificadas correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 3060N)

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 utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga. Na “Fig. 13” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 0,23957408 na quadragésima iteração e os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto.

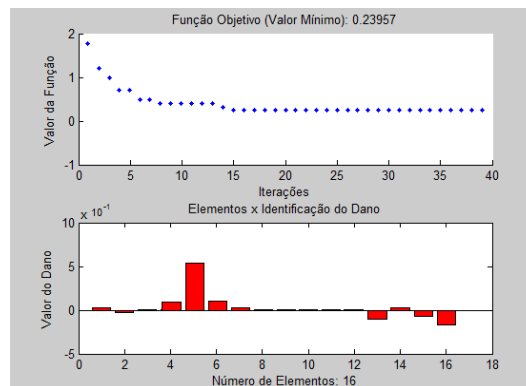


Figura 13. Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3060N (BEAM3)

As simulações propostas na segunda abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica com o ANSYS por meio do elemento SHELL63 e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, apenas foram considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga. Na “Fig. 14” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 0,318490001 na quadragésima iteração e os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto.

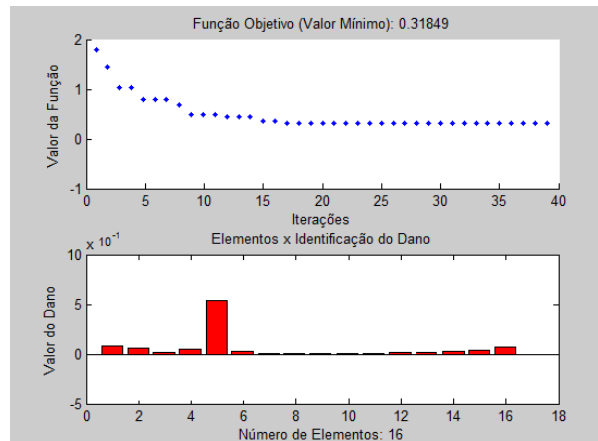


Figura 14. Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3060N (SHELL63)

As simulações propostas na terceira abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica 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 dos elementos da viga. Na “Fig. 15” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 24,92639353 na quadragésima iteração e os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto.

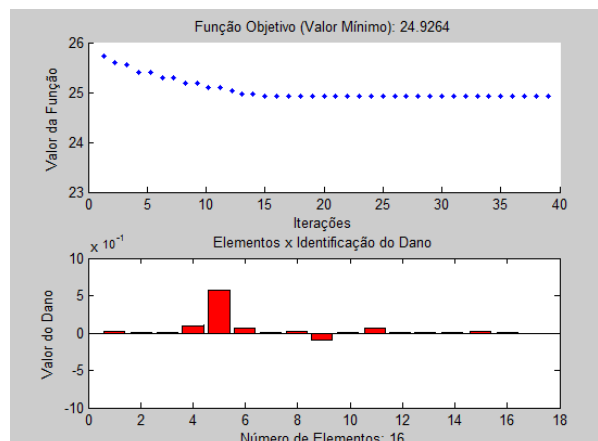


Figura 15. Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3060N (EULER BERNOULLI)

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 “Fig. 16”, 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.

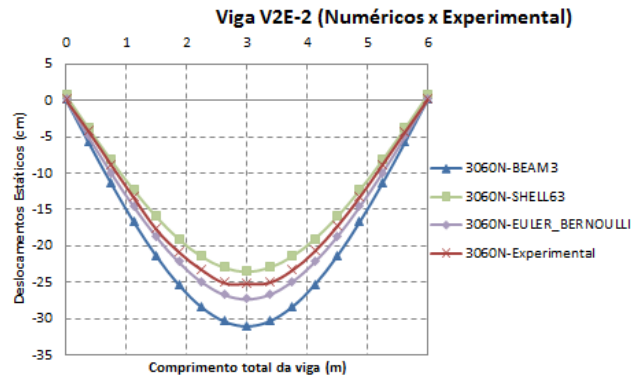


Figura 16. Análises gráficas intactas (numéricos) e danificada (experimental) correspondentes aos deslocamentos para a viga V2E-2 (carga 3060N)

Essa tentativa de análise de identificação de dano já é possível pois os deslocamentos obtidos na análise numérica intacta do ANSYS por meio do elemento SHELL63, tem grandezas inferiores aos valores obtidos na análise danificada via modelo experimental, demonstrando possibilidades de coerências na análise. Isso pode ser explicado pelo fato desse elemento apresentar condições de simulações muito próximas do que foi aplicado nas análises experimentais.

Nessa simulação proposta na quarta abordagem dizem respeito aos resultados dos valores obtidos na análise numérica intacta do ANSYS por meio do elemento SHELL63 em conjunto com a análise experimental danificada e utilizados para identificar um elemento danificado na estrutura. Nesta análise, também foram apenas considerados os valores dos deslocamentos estáticos dos elementos da viga. Na “Fig, 17” é mostrado o resultado da solução do problema, sendo encontrado dano de 65,5% no elemento 5 e dano zero para os demais elementos. O valor mínimo da função objetivo encontrado foi 33,1713000 na centésima iteração e os valores de danos dos elementos seguem em conformidade ao problema proposto.

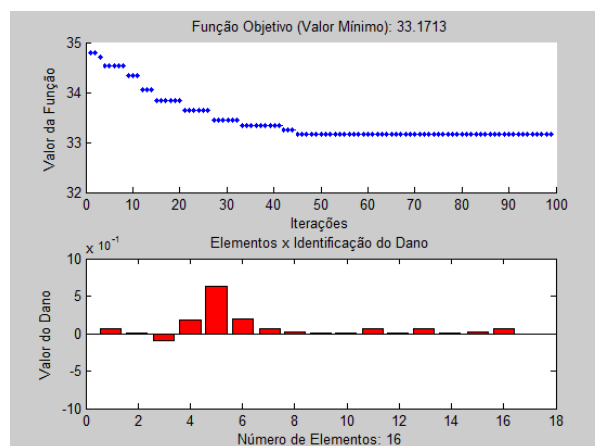


Figura 17. Identificação de dano: Viga V2E-2 carga 3060N (Numérico x Experimental)

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 2 (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.

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 (diminuindo) das propriedades de rigidez destes elementos. Estes constituem estudos oriundos dos Métodos de Problemas Inversos ou Métodos de Identificação de Sistemas.

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 e aos carregamentos pontuais, 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.

Um problema onde as restrições são de igualdade e resolvidas implicitamente e são representadas pelas equações de equilíbrio na análise de problemas estáticos. Suas características são automaticamente satisfeitas quando o problema analítico é resolvido. Os resultados necessários, no caso os deslocamentos estáticos intactos e danificados, nos problemas de minimização da função objetivo, demonstraram que podem ser resolvidos 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. Algumas vigas foram testadas apresentando resultados em sua maioria 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.

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.

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, bem como de resultados comparativos para o teste da real eficácia dessa ferramenta.

REFERÊNCIAS

- 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.; grafs.; tabs. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Bueno, Luiz Otávio Silva. . *Cálculo e Dimensionamento de Lajes e Comparação com as Ferramentas Disponíveis*. 2008. 52 p. – Trabalho de conclusão de curso – Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2008.
- 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.
- Kleinermann, J. P. (2000). *Identification Parametrique et Optimization des Procèdès de Mise a Forme par Problemes Inverses*. Unpublished doctoral dissertation. University of Liege. Liege, Belgium.
- 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.
- Price, K. e Storn, R.; *Differential Evolution for Continuous Function Optimization*, <<http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>>. Acesso em 20 jan. 2015.

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.

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.

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.

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.