

# Estado da arte sobre a aplicação de algoritmos genéticos para detecção de dano em estruturas

Jesús D. Villalba M.<sup>1</sup>, José E. Laier<sup>2</sup>

## Resumo

O problema de detecção de dano tem sido estudado ao longo das últimas décadas, encontrando-se diversas metodologias propostas na literatura especializada para resolvê-lo. Um dos tipos de metodologia é aquela que utiliza as mudanças nos parâmetros dinâmicos da estrutura, devidas ao dano, para a formulação de um problema de otimização. Neste artigo apresenta-se um estado da arte das metodologias que utilizam algoritmos genéticos e funções objetivo baseadas em parâmetros dinâmicos para localizar e quantificar dano em estruturas. Todos os algoritmos analisados são descritos em forma geral e algumas observações são apresentadas. Finalmente, é realizada uma discussão sobre o tema e são comentadas algumas orientações para trabalhos futuros.

*Palavras-chave:* Detecção de dano. Algoritmos genéticos. Parâmetros dinâmicos.

---

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo. São Carlos (SP), Av. Trabalhador Sãocarlense 400, CEP: 13566-590. villalba@sc.usp.br.

<sup>2</sup> Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo São Carlos (SP) , Av. Trabalhador Sãocarlense 400, CEP: 13566-590. jelaier@sc.usp.br

# 1 Introdução

Meta-heurísticas ganham cada dia mais espaço na resolução de problemas difíceis, principalmente quando não são conhecidas ferramentas específicas para resolvê-los. Quando a informação experimental contém ruído ou é incompleta, as técnicas heurísticas podem apresentar melhor desempenho na solução do problema em relação àquele obtido com a utilização de técnicas de otimização clássica. As características anteriores são típicas do problema de detecção de dano, no qual se procura pelas características atuais da estrutura, geralmente a matriz de rigidez danificada. Para a solução do problema de detecção de dano têm-se aplicações de técnicas clássicas de otimização, como em Jaishi e Ren (2006), ou meta-heurísticas tais como Redes Neurais (TANG et al, 2005), *Particle Swarm Optimization* (Begambre e Laier, 2009) e Algoritmos Genéticos. Estas últimas estão sendo muito aplicadas e, por isso, nesta revisão é apresentada uma série de trabalhos reportados na literatura que tratam da utilização de algoritmos genéticos para detecção de dano. As características destes algoritmos são comentadas e, a partir delas, uma discussão é realizada. Cabe salientar que todos os trabalhos analisados utilizam uma função objetivo baseada unicamente em parâmetros dinâmicos, porém na literatura encontram-se metodologias que utilizam outros tipos de funções objetivo como no caso de Chou e Ghaboussi (2001), He e Hwang (2006), Kouchmeshky *et al* (2006), He e Hwang (2007) e Kokot e Zembaty (2009)

## 2 Algoritmos genéticos

Algoritmos genéticos (AGs) seguem uma analogia com as leis da seleção natural e a sobrevivência do mais apto. Foram originalmente proposto por Holland (1975) e os passos básicos para a sua aplicação são apresentados a seguir. Primeiramente, define-se uma população de indivíduos em forma codificada, os quais correspondem a possíveis soluções do problema. Esses indivíduos são avaliados para se observar a sua adaptação ao ambiente no qual se encontram, sendo os melhores escolhidos para reprodução. Os indivíduos obtidos depois da fase de reprodução, que compartilham algumas características dos pais, podem ou não ser submetidos a um processo de mutação. Esse processo permite a introdução de novas características na população. A nova população tem então as características dos melhores indivíduos da geração anterior. O procedimento

é repetido até se encontrar a convergência da população ao indivíduo mais apto ou até se atingir um número pré-determinado de gerações. Dado que os AGs são algoritmos estocásticos, é necessário que sejam executados várias vezes para se obter uma boa resposta para o problema. A definição dos parâmetros de configuração de um AG, como o tamanho da população, a taxa de mutação e a taxa de reprodução, está relacionada diretamente ao problema em questão e pode ser realizada por meio de pré-execuções do algoritmo ou usando heurísticas específicas para o caso estudado. Atualmente, tem-se desenvolvido AGs que permitem uma auto-adaptação desses parâmetros, como explicado em Meyer-Nieberg e Beyer (2007).

### 3 Definição do problema de detecção de dano utilizando parâmetros dinâmicos

Geralmente na literatura, o dano é representado como uma redução na rigidez do elemento danificado  $j$ , da forma:

$$K_{dj} = (1 - \beta_j) \times K_j, \quad (1)$$

em que  $K_{dj}$  e  $K_j$  são as matrizes de rigidez do elemento  $j$  para as condições com e sem dano, respectivamente;  $\beta_j$  é um fator de redução de rigidez, que assume um valor de 0 se o elemento não se encontra danificado e 1 para representar a perda total de rigidez do elemento. Os fatores de redução para cada elemento em uma estrutura correspondem às variáveis a serem otimizadas na maioria dos diferentes trabalhos apresentados.

Para mostrar o efeito do dano nos parâmetros dinâmicos de uma estrutura, parte-se da equação de movimento para um sistema sem amortecimento em vibração livre, a qual tem a seguinte expressão:

$$M\ddot{u} + Ku = 0, \quad (2)$$

sendo  $M$  e  $K$  as matrizes de massa e rigidez da estrutura, respectivamente, e  $u$  o vetor de deslocamentos. Os parâmetros dinâmicos do sistema podem ser calculados a partir de:

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0, \quad (3)$$

onde  $\omega$  e  $\phi$  são as freqüências naturais e as formas modais da estrutura, respectivamente. Assim, se considerarmos que o dano é representado pela Eq. (1) e que a Eq. (3) ainda é válida, temos finalmente:

$$(K_d - \omega_d^2 M) \phi_d = 0, \quad (4)$$

na qual o índice  $d$  refere-se à condição danificada.

Em trabalhos analíticos, o dano é freqüentemente introduzido na matriz de rigidez original de forma direta e a Eq. (4) é resolvida para determinar as freqüências naturais e as formas modais da condição danificada. A partir destes parâmetros, aplicam-se os algoritmos genéticos na determinação dos valores dos fatores de redução que levam à matriz de rigidez danificada que produziu aqueles parâmetros dinâmicos. Com isto, fica formulado um problema de otimização.

## 4 Localização e quantificação de dano por algoritmos genéticos

### 4.1 Mares e Surace (1996)

Este trabalho foi um dos primeiros a serem propostos na literatura e nele foi utilizado um AG de código binário simples para resolver um problema de maximização. A função objetivo foi baseada no conceito do vetor de força residual, na seguinte forma:

$$F = \frac{c_1}{c_2 + \sum_{j=1}^{nm} R_j^* (\beta_1, \beta_2, \beta_n)^T R_j^* (\beta_1, \beta_2, \beta_n)}, \quad (5)$$

Com

$$R_j^* = K_a \phi_{dj} - \omega_{dj}^2 M \phi_{dj}, \quad (6)$$

no qual  $R_j^*$  é o vetor de força residual modificado,  $nm$  é o número de modos medidos e  $K_a$  é a matriz de rigidez obtida com a configuração de parâmetros  $\beta_j$ . O parâmetro  $c_1$  serve para controlar o valor da função objetivo e  $c_2$  para evitar uma possível divisão por zero, que pode ocorrer quando a matriz de rigidez obtida consegue reproduzir de forma exata os parâmetros modais experimentais. A função objetivo utilizada apresenta como desvantagem a necessidade de correspondência entre o tamanho do modelo de elementos

finitos e o tamanho do modelo experimental, para o qual devem ser utilizadas técnicas de redução de modelos ou de expansão de formas modais. Uma viga em balanço com 10 elementos e uma treliça com 26 elementos foram estudadas. Observou-se que um número pequeno de modos pode não garantir a convergência do algoritmo para o cenário de dano correto. No caso contrário, ou seja, quando uma quantidade considerável de modos era utilizada, não necessariamente se conseguia uma melhoria na extensão do dano, mas sim na localização do dano. Os melhores resultados se apresentaram para a treliça e para a viga com pelo menos 10 e 8 modos, respectivamente.

#### 4.1 Friswell, et al (1998)

Os autores empregaram um AG de código binário para determinar a localização de um ou dois elementos danificados numa estrutura. Esse algoritmo foi combinado com um método baseado em auto-sensibilidades para determinar a extensão do dano. Um problema de minimização foi estabelecido utilizando a seguinte função objetivo:

$$F = \sum_{j=1}^{nm} W_{wj} \left( \frac{\delta\omega_{mj} - \delta\omega_{aj}}{\omega_{mj}} \right)^2 + \sum_{j=1}^{nm} W_{\phi j} [1 - MAC(\phi_{mj}, \phi_{aj})] + W_{ns} \delta_{ns}, \quad (7)$$

na qual  $m$  e  $a$  referem-se a um parâmetro obtido em forma experimental e analítica, respectivamente;  $\delta\omega_{mj}$  e  $\delta\omega_{aj}$  são mudanças na j-ésima freqüência natural;  $MAC$  refere-se ao “Modal Assurance Criterion” (Allemang e Brown, 1982) entre a j-ésima forma modal medida,  $\phi_{mj}$ , e a analítica,  $\phi_{aj}$ ;  $W_{wj}$ ,  $W_{\phi j}$  e  $W_{ns}$  são fatores de peso e  $\delta_{ns}$  é uma penalização para quando se apresentam vários elementos danificados.

A formulação utilizada ajuda a reduzir o efeito de erros na modelagem, porém requer que as freqüências iniciais experimentais estejam disponíveis. O segundo termo na Eq. (7) corresponde a um fator que leva em conta mudanças nas formas modais, mas não foi incluso devido à pouca sensibilidade deste parâmetro ao dano. Para trabalhar o problema como um problema de maximização, a Eq. (7) tomou a forma

$$G = C - f, \quad (8)$$

onde  $C$  é uma constante que permite definir as probabilidades dos indivíduos de serem escolhidos, quando utilizados operadores de seleção como aquele da roleta. Se a constante não é escolhida adequadamente, pode se fazer com que não exista pressão de seleção sobre os indivíduos.

A metodologia foi aplicada no estudo de uma viga com 15 elementos, e 4 cenários de dano foram simulados. Resultados mostraram que para um único elemento danificado, o algoritmo proposto conseguia detectar dano, mas para o caso de dois elementos danificados, o algoritmo só conseguiu encontrar elementos danificados próximos aos reais. Os pesos utilizados na função objetivo foram de  $W_{nj} = 100$  e  $W_{ns} = 0,25$ . Uma avaliação experimental em uma placa foi realizada. A placa foi discretizada em 12 elementos e um cenário de dano simples foi proposto. Neste caso os fatores de peso foram  $W_{nj} = 1000$  e  $W_{ns} = 0,25$ . O cenário foi encontrado corretamente mostrando que o algoritmo era robusto a erros nas medições e na modelagem.

Finalmente, neste artigo é comentado que devido à presença de ruído nas medições e de incertezas no modelo, os parâmetros modais danificados não são reproduzidos em forma exata.

## 4.2 Moslem e Nafaspour (2002)

Os autores propuseram um processo de duas etapas para detecção de dano, em que primeiro localizam-se prováveis elementos danificados para posteriormente determinar a extensão do dano nesses elementos. Uma metodologia de localização de elementos danificados, baseada em uma modificação do conceito do vetor de força residual, foi utilizada para reduzir o número de variáveis a serem otimizadas. Essa metodologia apresenta a desvantagem de determinar de forma subjetiva se um elemento é ou não provavelmente danificado. Na segunda etapa foi utilizado um AG de estado permanente, que difere do AG clássico, uma vez que em cada geração, apenas dois indivíduos são escolhidos para gerar dois novos indivíduos. Isto faz com que se diminua o número de avaliações totais da função objetivo, que pode ser a etapa que despende a maior parte do tempo na execução de um AG. A função objetivo foi pensada em função de freqüências naturais e formas modais, na seguinte forma:

$$F = \sum_{j=1}^{nm} W_{wj} \left[ 1 - \left( \frac{\omega_{dj}}{\omega_{aj}} \right) \right]^2 + \sum_{j=1}^{nm} \sum_{i=1}^{ng} W_{\phi ji} (\phi_{dji} - \phi_{aji}), \quad (9)$$

na qual  $d$  refere-se à condição danificada,  $ng$  ao número de graus de liberdade lidos por modo, e  $W_{wj}$  e  $W_{\phi ji}$  são fatores de peso para ponderar a contribuição de cada termo, sendo

considerados neste trabalho iguais a 1. Uma vez que o método da roleta foi utilizado como operador de seleção, uma função de escalamento foi empregada, tal que a nova função a ser minimizada, fica:

$$G = \left[ 1 - \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\min}} \right]^3, \quad (10)$$

na qual  $f_{\max}$  e  $f_{\min}$  são a aptidão máxima e mínima na geração atual, respectivamente.

A metodologia foi aplicada em estruturas do tipo treliça, levando em consideração a presença de ruído nas medições. Para a avaliação da função objetivo, foram utilizados entre 4 e 12 modos, para uma treliça de 15 elementos, e 9 modos no caso de uma treliça com 40 elementos. Os resultados mostram que a quantidade de ruído pode levar o algoritmo a não encontrar o cenário de dano correto. Alguns elementos são falsamente identificados como danificados, com extensão de dano na ordem de 0,1. Uma comparação é realizada contra um método de programação não linear, sendo observado que esse algoritmo não conseguia encontrar alguns dos elementos danificados.

### 4.3 Hao e Xia (2002)

Os autores utilizaram um algoritmo de código real e três funções objetivo que utilizam dados experimentais das condições com e sem dano, evitando, assim, a necessidade de se utilizar um modelo analítico exato. As funções estão baseadas em freqüências naturais, formas modais e uma combinação das duas anteriores, sendo a terceira forma mostrada a seguir:

$$F = \sum_{j=1}^{nm} W_{w_j}^2 \left( \frac{\omega_{aj}^2 - \omega_{aj0}^2}{\omega_{aj0}^2} - \frac{\omega_{mj}^2 - \omega_{mj0}^2}{\omega_{mj0}^2} \right) + \sum_{i=1}^{ng} W_{\phi_i}^2 \sum_{j=1}^{nm} \left( \left[ \phi_{aj} - \phi_{aj0}^0 \right] - \left[ \phi_{mj} - \phi_{mj0}^0 \right] \right), \quad (11)$$

onde o índice 0 refere-se à condição inicial da estrutura. Os autores comentam que o peso entre as duas funções pode ser definido em termos das variâncias das medições, sendo geralmente maior para freqüências, pois estas são medidas de forma mais exata.

Para tornar o problema em um problema de maximização, a Eq. (11) assumiu a forma:

$$G = C - F, \quad (12)$$

na qual C é uma constante que pode ser definida no inicio da execução do algoritmo.

Resultados de um ensaio experimental de uma viga em balanço com 20 elementos, considerando 6 modos, e um corte no elemento 9, foram analisados. O elemento danificado é identificado com um valor de dano quase da metade do real e há presença de outro elemento considerado como danificado. Segundo os autores, isso aconteceu devido ao ruído nos dados experimentais e à não-linearidades induzidas pelo nível de dano no elemento 9.

Um pórtico com 30 elementos foi ensaiado sob diferentes cenários de dano e seus resultados foram analisados, considerando os primeiros 12 modos. O algoritmo encontrou os elementos realmente danificados e, também, aqueles que estão localizados em forma simétrica na estrutura, quando apenas o termo correspondente às freqüências naturais era utilizado. Um dos elementos danificados não foi detectado. Quando foram utilizadas só formas modais, o algoritmo não teve um bom desempenho, encontrando dano em quase todos os elementos. Os autores acreditam que seja devido à dificuldade associada à medição das formas modais. Finalmente, diversos valores de pesos foram estudados para a utilização da Eq. (11), encontrando-se os melhores resultados para um valor de 0,1 para modos e de 1 para freqüências. Com esse valor todos os locais danificados são encontrados, porém há presença de elementos com níveis de dano baixos.

Em relação a sensibilidade desta técnica à extensão do dano, foi observado que as mudanças nos parâmetros modais originadas pelo dano devem ser maiores que aquelas introduzidas pelo ruído para garantir um bom comportamento da metodologia.

#### **4.4 Au et al (2003)**

Um micro-AG, que consiste em trabalhar com populações pequenas e realizar vários processos de re-inicialização dos indivíduos, foi utilizado nesse trabalho. Quando comparado com um AG clássico, o micro-AG apresenta a vantagem de reduzir o tempo de execução do algoritmo devido ao menor número de avaliações da função objetivo. Estratégias de nicho e elitista foram, também, utilizadas.

O processo de detecção de dano foi dividido em duas etapas. Na primeira foram determinados elementos provavelmente danificados através de uma metodologia de localização de dano baseada em conceitos de energia. A seguinte função objetivo, baseada em mudanças nas freqüências naturais e formas modais, foi minimizada para a quantificação do dano:

$$F = \sum_{j=1}^{nm} \frac{\omega_{aj} - \omega_{dj}}{\omega_{dj}} + \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{nm} \frac{(\phi_{dij} - \phi_{aj})}{\phi_{aj}}. \quad (13)$$

Uma segunda função objetivo foi formulada para melhorar o desempenho do algoritmo, já que a quantidade de elementos provavelmente danificados obtidos na etapa 1 ainda podia ser considerável. Para isso, foi proposto um processo duplo de minimização, no qual se procura pela combinação de elementos,  $I_d$ , que minimiza a seguinte função:

$$\min_{I_d} \left( \min_{\beta} F \right) \quad (14)$$

O algoritmo foi aplicado para detectar dano em uma viga simplesmente apoiada com 16 elementos e uma viga de 48 elementos com múltiplos apoios. Em ambos os casos foi considerado que só os 5 primeiros modos estavam disponíveis e que as medições foram realizadas só em graus de liberdade verticais. Os resultados mostraram que o desempenho do algoritmo depende de uma boa estimativa dos elementos danificados por parte da metodologia de localização. Quando utilizados todos os 16 elementos da viga simplesmente apoiada, a metodologia de duas etapas mostrou problemas para o cálculo do verdadeiro valor da extensão de dano. Além disso, havia a presença de vários elementos falsamente identificados quando as medições apresentavam ruído e eram incompletas. Na viga com múltiplos apoios e considerando o processo duplo de minimização, observaram-se alguns problemas para a determinação da extensão do dano e a presença de elementos falsamente identificados como danificados. Esses resultados foram melhores que aqueles obtidos com a metodologia que emprega a Eq. (13).

#### 4.5 Ananda et al (2004)

Os autores utilizaram um AG simples para resolver o problema de maximização configurado a partir de uma função objetivo baseada no conceito do vetor de força residual. Essa função é dada a seguir:

$$F = \frac{c_1}{c_2 + \sqrt{R_{11}^2 + R_{22}^2 + \cdots + R_{nm,nm}^2}}, \quad (15)$$

na qual os termos  $R_{ii}$  correspondem aos elementos da diagonal da matriz de força residual. Como no caso da formulação de Mares e Surace (1996), foi utilizada uma técnica

para expandir formas modais. Os valores  $c_1$  e  $c_2$  foram assumidos com um valor de 1. Uma treliça, uma viga e um pórtico com 11, 10 e 6 elementos, respectivamente, foram analisados considerando-se cenários de dano múltiplo. Os resultados mostraram que a metodologia consegue detectar todos os cenários de dano propostos, incluindo a perda total de um elemento. A detecção equivocada de dano em alguns teve fatores de redução da rigidez com valores menores que 0,07. A solução do problema encontrada pela combinação dos operadores de seleção por torneio e cruzamento de dois pontos foi de melhor qualidade quando comparada com aquela encontrada utilizando seleção por roleta e cruzamento de um ponto. Os autores comentam que a metodologia consegue identificar dano para dados modais que apresentam até 10% de ruído.

#### 4.6 Perera e Torres (2006)

Nesse trabalho, um AG de código binário e dois critérios para a formulação da função objetivo foram utilizados para resolver o problema de minimização associado ao problema de detecção de dano. A primeira baseada no vetor de força residual e a segunda em uma combinação de formas modais e frequências naturais. O algoritmo foi executado com 5 conjuntos de dados dos parâmetros modais danificados para diminuir o efeito do ruído nos resultados. Uma média das soluções encontradas pelo AG foi utilizada como o cenário de dano encontrado. A função baseada no vetor de força residual apresenta a forma:

$$F = \|R_j^*\|_{L1}, \quad (16)$$

com  $R_j^*$  definido como em (6). Já a segunda função vem dada por:

$$F = 1 - MTMAC, \quad (17)$$

na qual

$$MTMAC = \prod_{j=1}^{nm} \frac{MAC(\phi_{dj}, \phi_{aj})}{1 + \left| \frac{\omega_{aj}^2 - \omega_{dj}^2}{\omega_{aj}^2 + \omega_{dj}^2} \right|}. \quad (18)$$

Para testar o algoritmo, foi utilizada uma viga simplesmente apoiada com 10 elementos sob diferentes cenários de dano. Se considerado que todos os modos da viga estavam disponíveis, e no caso da informação ter sido medida só em alguns graus de

liberdade, a convergência apresentou-se estável e em poucas gerações. Para o caso de só alguns modos estarem disponíveis, observou-se que a convergência da função baseada no vetor de força residual era mais estável, mais rápida e mais notória. Quando foi simulado ruído, observou-se que os melhores resultados se apresentam para a função baseada em modos e frequências naturais, especialmente com o aumento do valor do ruído. Nos dois casos foram observadas diferenças no valor da extensão do dano dos elementos danificados e a presença de alguns elementos falsamente identificados como danificados. Observou-se, ainda, que na medida em que o número de modos aumenta, a habilidade da metodologia para detectar o cenário de dano correto também aumenta.

Finalmente, um estudo experimental foi realizado em uma viga bi-engastada. Medições foram realizadas nos graus de liberdade verticais e a viga foi dividida em 20 elementos finitos. Um corte foi realizado no elemento 9 para simular o dano. Foi observado que o AG forneceu um valor muito mais baixo que o dano real introduzido e que valores relativamente grandes de dano estão presentes nos elementos perto dos apoios. Os autores acreditam que esse problema foi devido ao modelo numérico não estar correlacionado com os resultados experimentais, permitindo erros experimentais típicos, como a não reprodução das condições de contorno em forma exata.

#### **4.7 Borges et al (2007)**

Os autores empregaram um AG binário modificado para detectar dano por meio da formulação de um problema de minimização. Com o objetivo de diminuir o espaço de busca foi proposto que o valor do dano não fosse codificado diretamente, mas sim a posição do valor do dano dentro de uma tabela de valores discretos. Para melhorar o algoritmo, foi proposto utilizar o conceito de variáveis ativas e inativas, já que, como é frequente, o dano acontece em uns poucos elementos na estrutura e a presença falsa de dano em outros elementos pode levar o algoritmo a não convergir para o cenário de dano correto. Assim mesmo, foi proposto um operador de mutação especial e uma heurística para a geração da população inicial, a qual permitia orientar a busca para regiões nas quais poucos elementos se encontram danificados. A função objetivo utilizada busca dar uma contribuição mais uniforme entre os termos correspondentes as frequências naturais e as formas modais:

$$f_{(ev+em)_i} = \frac{f_{ev_i} - f_{ev_{\min}}}{f_{ev_{\max}} - f_{ev_{\min}}} + \frac{f_{em_i} - f_{em_{\min}}}{f_{em_{\max}} - f_{em_{\min}}}, \quad (19)$$

com

$$f_{evg} = \sum_{i=1}^{nm(g)} \left| (\lambda_{di} - \lambda_{ai}) \left( 1 + \phi_{ai}^T M \Delta \phi_i \right) - \phi_{ai}^T \left( \bigcup_{j=1}^{n_{el}} (\beta_j - 1) \right) (\phi_{ai} + \Delta \phi_i) \right|, \quad (20)$$

$$f_{em}(\beta) = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{nm} \left( \left| \phi_{ij}^d \right| - \left| \phi_{ij}^a(\beta) \right| \right), \quad (21)$$

$$f_{ev_a} = \sum_{i=1}^{nm} \left[ f_{ev_i} * \frac{n_{pop}}{\left( \sum_{j=1}^{n_{pop}} f_{ev_j} \right)} \right], \quad (22)$$

na qual  $\Delta \phi$  é a mudança no vetor de formas modais calculado para a configuração de dano analítica;  $n_{pop}$  é o tamanho da população; e  $\max$  e  $\min$  correspondem a valores máximo e mínimo na população, respectivamente. A introdução da informação das formas modais é realizada de forma gradual na medida em que a população começa a estagnar.

Um pórtico e uma treliça, com 13 e 26 elementos respectivamente, foram analisados sob diferentes cenários de dano. Para o caso do pórtico, utilizando a Eq. (20) e os 13 primeiros modos, foi encontrado que mais da metade das execuções do algoritmo, de um total de 10, encontravam o cenário de dano correto. No caso da treliça, considerando a presença de ruído e utilizando a Eq. (19), com 12 freqüências naturais e 4 formas modais, observou-se que o algoritmo consegue determinar a extensão do dano, com a identificação errônea de alguns elementos considerados danificados de forma errada e que apresentam valores baixos de dano. Para as duas estruturas, as heurísticas implementadas tornaram o algoritmo mais estável. Os autores mostraram que na presença de ruído a solução exata do problema não é necessariamente aquela com maior aptidão.

De outro lado, a aplicação de um AG na sua forma original não permitiu a identificação do cenário de dano correto. Os autores acreditam que seja devido ao forte acoplamento entre as variáveis de dano e a múltiplas configurações de dano, diferentes da real, na forma de ótimos locais.

## 4.8 Raich e Liszkai (2007)

Os autores utilizaram o conceito que o problema de detecção de dano pode ser considerado como não estruturado, no qual não se conhece *a priori* quais são os elementos danificados nem a extensão do dano. Por isso, utilizaram um algoritmo com representação

redundante implícita, o qual permite ao longo do processo evolutivo variar de forma dinâmica o número de variáveis consideradas a serem otimizadas. A função objetivo utilizada foi proposta para minimizar as diferenças nas funções de resposta em frequência da estrutura obtidas de forma analítica e experimental:

$$F = \sum_{k=1}^{k_n} \left( \int_{w_0}^{w_1} \left| H_{djk}(w) - H_{ajk}(w) \right|^2 dw \right)^2, \quad (23)$$

na qual os índices  $j$  e  $k$  correspondem aos graus de liberdade onde a força e a aceleração são medidos;  $k_1, k_2, \dots, k_n$  são as posições onde são realizadas as medições;  $w_0$  e  $w_1$  são os valores limites na faixa de frequência estudada;  $H$  corresponde a uma função de resposta em frequência e  $\left| \cdot \right|$  indica magnitude complexa.

Outra vantagem do tipo de codificação utilizado se encontra na exploração do fato que, geralmente, os elementos danificados na estrutura são poucos quando comparados com os elementos totais. Sendo assim, os autores propuseram introduzir elementos “zeros” para orientar a busca do algoritmo para uma região do espaço no qual se tem um número pequeno de elementos danificados.

Três diferentes estruturas foram analisadas e os resultados comparados com os obtidos a partir de um AG binário clássico. Este último só encontrou boas soluções quando utilizada a heurística para a geração da população inicial. O AG proposto encontrou em todos os casos o cenário de dano correto, mesmo para altos níveis de ruído. Para melhorar os resultados foi implementado um algoritmo *hillclimbing* e uma técnica para localização ótima de sensores. Foi mostrado que o desempenho do algoritmo pode ser baixo quando é utilizada uma configuração de medições não usual.

Finalmente, os autores comentam que o efeito do ruído é a uniformização dos valores de dano nos elementos encontrados como danificados.

#### 4.9 Koh e Dyke (2007)

O problema de detecção de dano estrutural é resolvido mediante a utilização de um AG de código binário e de critérios de correlação entre as freqüências naturais medidas e aquelas obtidas analiticamente. A seguinte função objetivo deve ser, então, maximizada:

$$F = \frac{\left| \{\delta\omega_m\}^T \{S\delta z\} \right|^2}{\left( \{\delta\omega_m\}^T \{\delta\omega_m\} \right) \left( \{S\delta z\}^T \{S\delta z\} \right)}, \quad (24)$$

na qual  $\delta\omega$  é o vetor de variações das  $nm$  frequências naturais,  $S$  é a matriz de derivadas de primeira ordem das  $nm$  frequências naturais em relação às  $nelem$  variáveis de dano  $z$ , com  $nelem$  o número de elementos da estrutura. A principal vantagem deste tipo de formulação é que ela não requer do cálculo dos parâmetros dinâmicos para cada cenário de dano encontrado pelo algoritmo genético, reduzindo consideravelmente o tempo de execução do algoritmo. Por outro lado, esta formulação apresenta a desvantagem que há a possibilidade que diversos cenários de dano levem a uma mesma variação nas frequências. Uma viga em balanço de 15 elementos foi testada e algumas aproximações foram discutidas, entre elas, o método do mínimos quadrados, o método do erro em frequências e o método de correlação.

Os resultados mostraram que a utilização do AG e da Equação (24) permite obter valores mais exatos da extensão do dano e produz um número menor de elementos falsamente considerados como danificados. Ainda, a metodologia proposta foi aplicada sobre uma ponte de grande porte, com 66 elementos, para detectar dano duplo. Para estes casos, a metodologia conseguiu localizar o dano, mas a determinação da extensão não foi tão exata. O número de elementos falsamente identificados como danificados aumentou com a redução no número de modos utilizados e a presença de ruído nas medições. Os autores afirmam que para a aplicação da metodologia poderia ser necessário encontrar uma faixa determinada de freqüências naturais medidas que seja útil para uma ampla quantidade de cenários de dano.

#### 4.10 Kouchmeshky et al (2008)

Koumesky et al propuseram um algoritmo denominado Estimation-Exploration Algorithm, que realiza um processo iterativo de busca dos locais danificados e da extensão de dano em duas fases. A primeira fase tem como objetivo definir um conjunto de soluções candidatas ao problema de detecção de dano. Dois cromossomos reais foram utilizados para representar um indivíduo. O primeiro é utilizado para representar a posição do dano e o segundo para calcular a extensão do dano. Este tipo de formulação apresenta a vantagem que o número de locais danificados pode variar dinamicamente durante o

processo evolutivo. Para definir se um elemento se encontra danificado, o valor do cromossomo 1 deve exceder um certo limite, relacionado à quantidade máxima provável de elementos danificados. O método “deterministic crowding” é utilizado para garantir a diversidade da população nas diferentes fases. A função objetivo para o problema de minimização é dada por:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^M \frac{|H_{djk}(w) - H_{ajk}(w)|}{\max(H_{ajk}(w))}, \quad (25)$$

na qual  $N$  é o número de ensaios físicos realizados na estrutura,  $R$  é o número de sensores na estrutura e  $M$  é o número total de freqüências de excitação. Na segunda fase, novos ensaios experimentais são realizados em função das soluções candidatas encontradas na primeira fase. Nesta etapa, um individuo codifica a posição da força de excitação e a localização dos sensores para a realização de um novo ensaio experimental. A função objetivo nesta fase foi definida visando obter a máxima diferença entre as soluções candidatas, e pode ser expressa como:

$$F_i = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^M \sqrt{\frac{1}{z} \sum_{a=1}^z |H_{djk}(w) - H_{ajk}(w)|^2}, \quad (26)$$

sendo  $z$  o número de modelos candidatos obtidos na fase de estimação. Segundo os autores, o procedimento anterior ajuda a reduzir o número de falsas identificações de dano e a orientar a fase de estimação para a solução ótima. Testes foram realizados sobre uma treliça com 75 elementos e foi observado que a metodologia proposta é mais precisa para identificar dano, produz menos elementos falsamente identificados como danificados, e apresenta uma convergência mais rápida e maior tolerância ao ruído nas medições, quando comparado a um algoritmo de controle. A medida que mais sensores eram utilizados se diminuía o desempenho da metodologia. Os autores justificam isso pelo fato de que o espaço de busca aumenta e a superfície de erro, na fase de estimação, se torna mais complexa.

#### 4.11 Yun et al (2008)

Os autores implementaram uma metodologia de duas etapas para a localização e quantificação do dano. Primeiro foi aplicado um procedimento de seleção de subconjuntos de parâmetros que permite reduzir o número de variáveis do problema. Esse procedimento

utiliza o vetor de força residual e tem a capacidade de localizar múltiplos danos. Os dados modais foram obtidos a partir de vibrações ambientais, e a técnica SEREP foi aplicada para a expansão das formas modais. Na segunda etapa foi aplicado um algoritmo genético de estado permanente para resolver o problema de minimização. A função objetivo utilizada está baseada nas flexibilidades analítica e experimental, como mostrado a seguir:

$$\underset{\beta}{\text{Min}} f_i = \|F_m - F_a\|_{Fro}, \quad (27)$$

na qual  $F$  é a matriz de flexibilidade modal expandida e  $\| \cdot \|$  é a norma Frobenius. Os autores expressaram que a vantagem da utilização da matriz de flexibilidade modal está no fato de ser insensível a modos de alta frequência.

Uma torre elétrica de tipo treliça com 47 elementos foi analisada sob um cenário de dano com múltiplos elementos, com perda de rigidez de 50%. Uma análise da influência do número de modos foi realizada e concluiu-se que deve existir uma quantidade recomendada de modos a ser utilizada. Um número muito pequeno não garante um bom comportamento da seleção de subconjuntos nem da quantificação, produzindo vários elementos erroneamente identificados como danificados. Por outro lado, problemas poderiam ser observados no caso de se utilizar uma quantidade alta de modos, pois essas formas modais são provavelmente mais afetadas por erros nas medições e erros na expansão modal.

#### 4.12 Gomez e Silva (2008)

Um problema de maximização foi formulado para localizar e quantificar dano em pórticos e resolvido mediante a utilização de um AG de código real. A função objetivo está baseada nas mudanças nas frequências naturais entre as condições com e sem dano e é dada por:

$$F = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{nm} \left( \frac{\delta\omega_{ai}}{\max(\delta\omega_{ai})} - \frac{\delta\omega_{mi}}{\max(\delta\omega_{mi})} \right)^2}. \quad (28)$$

Uma viga simplesmente apoiada de 2,4m de vão, dividida em 24 elementos, e um pórtico com vão de 2,4m, altura de 1,6m e dividida em 56 elementos, foram testados para

determinar o desempenho do algoritmo. Para ambas as estruturas, o número de freqüências naturais utilizada foi de 5. A metodologia conseguiu detectar cenários de dano onde um único elemento encontrava-se danificado. Porém, a metodologia não foi tão bem sucedida nos casos de múltiplos elementos com dano.

#### 4.13 Guo e Li (2009)

O problema de detecção de dano foi dividido em duas etapas: localização e quantificação. Na primeira etapa, um conjunto de elementos provavelmente identificados como danificado foi determinado por meio da aplicação da teoria da evidência a informações provenientes de critérios de correlação de formas modais e freqüências naturais. Na segunda etapa, um AG de código binário foi implementado para quantificar a extensão do dano. Algumas características especiais foram adicionadas ao algoritmo com o intuito de melhorar seu desempenho, entre elas, a utilização de um cruzamento multi-ponto e a realização de uma micro-busca ao redor do melhor indivíduo da população atual. A função objetivo utilizada no problema de minimização é a seguinte:

$$F = 2 - 2w_1 \frac{\left| \{ \delta\omega_{mi} \}^T \{ \delta\omega_{ai} \} \right|^2}{\left( \{ \delta\omega_{mi} \}^T \{ \delta\omega_{mi} \} \right) \left( \delta\omega_{ai}^T \delta\omega_{mi} \right)} - 2w_2 \frac{\left| \{ \delta\Phi_m \}^T \{ \delta\Phi_a \} \right|^2}{\left( \{ \delta\Phi_m \}^T \{ \delta\Phi_m \} \right) \left( \delta\Phi_a^T \delta\Phi_a \right)}, \quad (29)$$

na qual  $\delta\Phi$  é a variação nas  $nm$  formas modais entre as condições com e sem dano. Os autores fornecem expressões para calcular os fatores de peso em função do nível de ruído dos parâmetros dinâmicos. A metodologia é aplicada para detectar dano múltiplo em uma viga em balanço dividida em 20 elementos, considerando que apenas as 10 primeiras freqüências naturais e as duas primeiras formas modais estavam disponíveis. Para dois cenários de dano múltiplo, os resultados da metodologia de localização foram comparados com as metodologias originais, mostrando uma redução no número de elementos considerados como provavelmente danificados. A aplicação do AG proposto mostrou que o algoritmo consegue encontrar o cenário de dano correto em menos gerações quando comparados contra outros AG reportados na literatura.

#### 4.14 Laier e Villalba (2009)

Os autores propuseram detectar dano em estruturas por meio de um AG de código real. Heurísticas são propostas para a geração da população inicial com o intuito de ajudar

na convergência do algoritmo. Cada gene na população é gerado aleatoriamente ou com valores baixos de dano ou com zero, visando assim orientar a busca para cenários de dano não severos que apresentem poucos elementos danificados. Um problema de minimização foi resolvido utilizando uma função objetivo formulada em termos de frequências naturais e formas modais. Essa função é dada por:

$$\underset{\beta}{\text{Min}} \ f = \sum_{j=1}^{nm} \left| \frac{\omega_{aj} - \omega_{dj}}{\omega_{aj}} \right| + W \sum_{j=1}^{nm} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{ng} (\phi_{aij} - \phi_{dij})^2}{\sum_{i=1}^{ng} (\phi_{dij})^2}}. \quad (30)$$

Devido ao fato de que este algoritmo poder apresentar elementos falsamente identificados como danificados, os autores propuseram uma segunda execução do algoritmo, porém considerando como únicas variáveis aqueles elementos que superarem uma extensão de dano de 5%. Resultados mostraram que o algoritmo conseguiu detectar os elementos danificados com erros menores que 0,05 na extensão do dano. Entretanto, alguns elementos foram falsamente identificados como danificados com valores de dano na ordem de 0,06. Uma análise da convergência do algoritmo mostrou que a segunda execução do algoritmo e a utilização das heurísticas para a geração da população inicial permitem encontrar um estado de dano mais próximo ao cenário de dano real. Também é apresentada a influência do número de modos no desempenho do algoritmo, encontrando-se que para 4 modos, o algoritmo não consegue detectar o cenário de dano real, e que se precisa de pelo menos 8 modos para se obter um cenário de dano aproximado.

## 5 Discussão

Algumas observações podem ser realizadas a respeito das propostas anteriores:

- Diversos tipos de algoritmos genéticos com diversos operadores têm sido propostos na literatura, vide Tabelas 1 e 2. Porém, ainda não está claro qual é o tipo de codificação mais adequado. As formulações propostas nos trabalhos de Raich e Liszkai (2007) e Kouchmeshky *et al* (2008) parecem ser bem convenientes dada a natureza não estruturada do problema de detecção de dano. O símbolo “---” nas Tabelas 1 e 2 indica que o autor não forneceu explicitamente essa informação no seu trabalho.

Tabela 1: Resumo dos tipos de AGs e operadores utilizados nos trabalhos estudados.

Trabalho	Tipo de AG	Seleção	Cruzamento	Mutação
(4.1)	Binário Clássico	---	---	---
(4.2)	Binário Clássico	---	Um ponto	---
(4.3)	Steady State	Roleta	Dois pontos	Uniforme
(4.4)	Real	Roleta	Uniforme	Uniforme
(4.5)	Micro AG	---	Uniforme	Uniforme e Creep
(4.6)	Binário Clássico	Roleta e Torneio	Dois pontos	---
(4.7)	Binário Clássico	Roleta	Um Ponto	---
(4.8)	Binário Clássico	Ranking	Dois Pontos	Uniforme
(4.9)	Binário com representação redundante implícita	Torneio	Dois pontos Adaptativos	Uniforme
(4.10)	Binário Clássico	---	---	---
(4.11)	Multi-Cromossomo	---	Dois pontos	Creep
(4.12)	Steady State	---	---	---
(4.13)	Real	Roleta	BLX- $\alpha$	Uniforme
(4.14)	Binário Clássico	Torneio	Multi-ponto	Uniforme
(4.15)	Real	Torneio	BLX- $\alpha$	Uniforme

- Observa-se que as metodologias de localização de dano podem ter um papel importante para diminuir o número de variáveis incluídas no processo de otimização. Essa importância cresce a medida em que o número de elementos na estrutura aumenta. A metodologia deve garantir que entre os elementos selecionados se encontrem aqueles realmente danificados. Cabe salientar ainda, que, como mostrado na Tabela 2, não se tem aplicações de algoritmos genéticos para detecção de dano em estruturas de grande porte.
- Há a necessidade de desenvolver algoritmos auto-configurados que permitam determinar o tamanho da população e os parâmetros genéticos segundo o tipo e o tamanho da estrutura. Como observado na revisão, e na Tabela 2, a configuração dos parâmetros do algoritmo é realizada a partir de testes preliminares sobre cada caso em específico e difere entre um algoritmo e outro.

Tabela 2: Resumo dos parâmetros genéticos utilizados nos trabalhos estudados.

Trabalho	Estrutura	Elementos	População	Taxa de Cruzamento	Taxa de Mutação	Gerações máximas
(4.1)	Treliça	26	30	0,65	0,01	70
	Viga	10	30	0,65	0,01	70
(4.2)	Viga	15	10	0,6	0,005	10
	Placa	12	10	0,6	0,005	10
(4.3)	Treliça	15 e 40	Tamanho Cromo.	0,9-1,0	0,05	5000
	Viga	20	40	0,85	0,1	500
(4.4)	Pórtico	30	50	0,85	0,1	500
	Viga	16 e 48	----	0,5	0,02; 0,04	---
(4.5)	Treliça	11	40	1,0	0,001	1600
	Pórtico	6	40	1,0	0,001	500
(4.6)	Viga	10	40	1,0	0,001	850
	Viga	10	100	0,8	0,01	100
(4.7)	Viga	20	100	0,7	0,02	---
	Pórtico	13	40	0,8	---	150
(4.8)	Treliça	26	30	0,8	---	70
	Viga	10	100	0,9-1,0	0,01	200
(4.9)	Viga	20	200	0,9-1,0	0,005; 0,0075	200
	Pórtico	81	200	0,9-1,0	0,005	300
(4.10)	Viga	15	20	0,1	0,01	---
(4.11)	Treliça	75	100	1	0,1	300
(4.12)	Treliça	47	55	---	0,12	---
(4.13)	Pórtico	56	500	1,0	0,01	2000
(4.14)	Viga	20	800	0,9	0,1	300
(4.15)	Treliça	26	100	0,9	0,05	300

- Para formulações que utilizam combinações lineares de contribuições de frequências naturais e formas modais deve ser definido o valor do fator de peso entre as duas contribuições. Maiores estudos poderiam ser realizados para determinar como calcular a contribuição de cada termo.
- Ainda não se tem definido qual é a melhor função objetivo baseada em parâmetros dinâmicos para trabalhar com detecção de dano. Para se atingir esse objetivo seria útil realizar estudos que permitam a comparação entre as diferentes funções objetivo. Outra possibilidade, ainda aberta, é a formulação de um problema de otimização com múltiplos objetivos, como em Perera *et al* (2009).
- A convergência do algoritmo depende da utilização de uma quantidade mínima de modos. Resultados das diversas metodologias estudadas parecem indicar que a definição do número de modos a serem empregados na avaliação da função objetivo depende altamente da estrutura analisada. Isto pode ser uma limitante, pois na prática, só é possível medir de forma experimental uma quantidade específica de modos.

- Algumas heurísticas têm sido propostas com o intuito de orientar o algoritmo para regiões do espaço de busca nos quais os elementos danificados são poucos e, assim, ajudar à detecção do cenário dano correto. Essas heurísticas não deveriam ser utilizadas no caso do dano ter sido ocasionado por um evento extremo como um terremoto, já que o número de elementos danificados poderia ser alto.
- A combinação com técnicas de busca local pode ajudar a melhorar a solução final, uma vez que o algoritmo tiver encontrado quais os verdadeiros locais danificados.
- A maioria dos algoritmos pressupõe a existência de um modelo de elementos finitos atualizado da estrutura sem dano. Isto nem sempre será possível, já que podem existir diferenças entre o modelo analítico e o que foi construído, como por exemplo, em condições de contorno. O anterior converte-se em um dilema, uma vez que uma possível solução seria a utilização de medições das características dinâmicas na condição inicial, as quais não estão disponíveis, principalmente em estruturas antigas.
- O número de trabalhos que tem realizado algum tipo de avaliação experimental da metodologia sendo proposta é baixo. Este aspecto é de muita importância para demonstrar que a metodologia proposta funciona em casos reais.
- O efeito do ruído pode influenciar na determinação dos fatores de redução de rigidez dos elementos, estejam danificados ou não. A medida em que esse problema seja resolvido, as metodologias vistas anteriormente poderão ser aplicadas com maior grau de confiança.

## 6 Conclusões

Os algoritmos genéticos estão sendo amplamente utilizados para resolver o problema de detecção de dano. Diferentes tipos de codificações (binária, real e de código redundante) são encontradas na literatura para representar as possíveis soluções ao problema. Diversos parâmetros dinâmicos já foram utilizados na literatura, sendo as funções objetivo baseadas, principalmente, em combinações de frequências naturais e formas modais. Porem, não se tem um consenso sobre qual é o melhor parâmetro a ser utilizado. Como observado na discussão, muitos tópicos relevantes ao problema de detecção de dano ainda devem ser estudados. Pesquisas podem ser dirigidas à formulação de algoritmos auto-configurados que permitam detectar dano em estruturas de grande porte.

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro, sem o qual esta pesquisa não poderia ter sido realizada.

## 8 Referências

- ALLEMANG R. and brown D. (1982). A correlation coefficient for modal vector analysis. Em: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Modal Analysis Conference, Nashville, USA, p. 110-116.
- ANANDA, M.; SRINIVAS, J. AND MURTHY B. (2004). Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms. *Computers and Structures* v. 82, p. 963–968.
- AU, F.; CHENG, Y. S.; THAM L. G. AND BAI, Z. Z. (2003). Structural damage detection based on a micro-genetic algorithm using incomplete and noisy modal test data. *Journal of Sound and Vibration*, v. 259, n. 5, 1081–1094.
- BEGAMBRE, O. and LAIER, J.E. (2009). A hybrid Particle Swarm Optimization – Simplex algorithm (PSOS) for structural damage identification. *Advances in Engineering Software* v. 40, p. 883–891.
- BORGES, C.; BARBOSA, H. and LEMONGE, A.(2007). A structural damage identification method based on genetic algorithm and vibrational data. *International journal for numerical methods in engineering*, v. 69, p. 2663–2686.
- CHOU, J. H. and GHABOSSI, J. (2001). Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers and Structures* v. 79, p.1335-1353.
- FRISWELL, M.; PENNY, J. and GARVEY, S. (1998). A combined genetic eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures. *Computers and Structures* v. 69, p. 547-556.
- GOMES, H. M. and SILVA, N. R. S. (2008). Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method. *Applied Mathematical Modelling* v. 32, p. 2216–2232.
- GUO, H.Y. and LI, Z. L. (2009). A two-stage method to identify structural damage sites and extents by using evidence theory and micro-search genetic algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 23, p. 769–782.
- HAO, H. and XIA, Y. (2002). Vibration-based Damage detection of structures by genetic algorithms. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 16, n. 3, p. 222-229.
- HE, R. S. and HWANG, S. F. (2006). Damage detection by an adaptive real-parameter simulated annealing genetic algorithm. *Computers and Structures* v. 84, p. 2231–2243.
- HE, R. S. and HWANG, S. F. (2007). Damage detection by a hybrid real-parameter genetic algorithm under the assistance of grey relation analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* v. 20, p. 980–992.
- KOKOT, S. and ZEMBATY, Z. (2009). Damage reconstruction of 3D frames using genetic algorithms with Levenberg– Marquardt local search. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* v. 29, p. 311– 323.
- KOH, B. H. and DYKE, S. J. (2007). Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data. *Computers and Structures* v. 85, p. 117–130.

KOUCHMESHKY, B.; AQUINO, W.; BONGARD, J. C. and LIPSON, H. (2007). Co-evolutionary algorithm for structural damage identification using minimal physical testing. International. Journal for Numerical Methods in Engineering v. 69, p. 1085–1107.

KOUCHMESHKY, B.; AQUINO, W. and BILLEK, A. E. (2008). Structural damage identification using co-evolution and frequency response functions. Structural Control Health Monitoring v. 15, p. 162–182.

HOLLAND, J. H. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.

JAISHI, B. and REN, W. (2006). Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual. Journal of Sound and Vibration v. 290, p. 369–387

LAIER, J. E. and VILLALBA, J. D. (2009). “Improved Genetic Algorithm for Structural Damage Detection,” Em: Proceedings of the 2009 Computer Structural Engineering Symposium, Shanghai, China, p. 833-839.

MARES, C. and SURACE, C. (1996). An application of genetic algorithm to identify damage in elastic structures. Journal of Sound and Vibration, v. 195, n. 2, p. 195-215.

MEYER-NIEBERG, S. and BEYER, H. G. (2007). Self-adaptation in evolutionary algorithms. Em: Parameter Setting in **Evolutionary Algorithms**, v. 54, pp. 47–75. Springer.

MOSLEM, K. and NAFASPOUR, R. (2002). Structural Damage detection by genetic algorithms. AIAA Journal, v. 40, n. 7, p. 1395-1401.

PERERA, R. and TORRES, R. (2006). Structural Damage Detection via Modal Data with Genetic Algorithms. Journal of Structural Engineering, v. 132, n. 9, p. 1491-1501.

PERERA, R.; RUIZ, A. and MANZANO, C. (2009). Performance assessment of multicriteria damage identification genetic algorithms. Computers and Structures v. 87, p. 120–127.

RAICH, A. and LISZKAI, T. (2007). Improving the Performance of Structural Damage Detection Methods Using Advanced Genetic Algorithms. Journal of Structural Engineering, v. 133, n. 3, p. 449-461.

TANG, H. S.; XUE, S.T. and CHENG, R. (2005). Analyses on structural damage identification based on combined parameters. Applied Mathematics and Mechanics v. 26, n. 1, p. 44 -51.

YUN, G. J.; OGORZALEK, K.; DYKE, S. and SONG, W. (2008). A Structural Damage Detection Method Based On Subset Selection and Evolutionary Computation. Em: Proceedings of the 2008 Structural Congress: Crossing Borders, Vancouver, Canada, p. 1-10.

# **State of the art of the application of genetic algorithms for structural damage detection**

## **Abstract**

The damage detection problem has been studied for many years and various types of methodologies to solve it can be found in the specialized literature. One of them uses changes in dynamical parameters in the damaged structure to formulate an optimization problem. This paper presents the state of the art of methodologies that use genetic algorithms and dynamical parameters to locate and quantify damage in structures. All of the analyzed algorithms are described in a general way and some observations are made. A general discussion about the damage detection problem is performed and some orientations for future researches are provided.

*Keywords:* Damage detection. Genetic algorithms and Dynamical parameters.

## **1 Introduction**

Currently, metaheuristic techniques play an important role in the solution of hard problems. This paper presents a review of structural damage detection methodologies based on dynamical parameters and on a metaheuristic named genetic algorithms.

## **2 Genetic Algorithms**

Genetic algorithms (GAs) are stochastic algorithms that search for optimal or nearly optimal solutions to optimization problems through an analogy with the laws of natural selection and the survival of the strongest individual.

## **3 Formulation of the damage detection problem**

Damage is represented by a reduction in the stiffness of the damaged element  $j$  by using the factor reduction  $\beta_j$ . The idea is to formulate an optimization process in which the genetic algorithm searches for the  $\beta_j$  factors that create a new structure whose analytical dynamical parameters correspond to those measured parameters for the current structure.

## 4 Proposal

In the specialized literature, it is possible to find different kinds of genetic algorithms applied to damage detection, such as binary- coded GA, real- coded GA, micro-GA, steady state GA, multi-chromosome GA and GA with implicit redundant representation. Objective Functions are based on changes in natural frequencies, mode shapes, residual vector force and frequency response functions. Results have shown that those methodologies can detect damage in several types of structures (beams, trusses and frames).

## 5 Discussion

Some observations can be made concerning the analyzed methodologies:

- Several GAs have been proposed in the literature to detect damage. However, it is not clear which type of algorithm is the most adequate. The GA with implicit redundant representation and the multi-chromosome GA have the advantage of dynamically searching for both locating and quantifying damages.
- It is important to propose damage localization methodologies in order to diminish the number of optimization variables.
- The application of self-adaptive GAs, which compute the optimum values for the size of the population and the genetic parameters by themselves, may be necessary to avoid the definition of these parameters by the user.
- A minimum number of modes have to be used in order to guarantee the convergence of the algorithm.
- Genetic Algorithms may be combined with local search techniques in order to improve the final solution.
- Noise in measurements does not allow the GAs to compute the damage extension in an exact way, and produces several misidentified damaged elements.

## 6 Conclusions

Genetic algorithms have been used to solve the damage detection problem. Different types of GA have been proposed and many dynamical parameters have been used in objective functions. The most frequent objective function is based on natural frequencies and mode shapes. It can be observed in the discussion that many topics about damage detection have to be researched. Future researches should be oriented to the formulation of genetic algorithms able to identify damage in large structures.