

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS METÁLICAS ATRAVÉS DE RESPOSTAS DINÂMICAS¹

Oscar Begambre²

José E. Laier³

Resumo

É apresentado um novo procedimento iterativo de avaliação da integridade estrutural a partir de respostas dinâmicas (AIERD), baseado em modelos de elementos finitos (MEF), que identifica fissuras em estruturas com comportamento linear. O método proposto busca determinar a posição do dano dentro da estrutura e fazer uma estimativa de sua severidade (extensão) a partir de dados modais. Dentro da técnica apresentada, define-se um problema de otimização (solucionado mediante o uso do algoritmo de recozimento simulado RS), no qual deve ser minimizada a diferença entre as respostas geradas com o MEF e as respostas medidas experimentalmente (ou simuladas numericamente). Através deste processo, podem ser calculados valores dos parâmetros de rigidez do modelo analítico que indicam e quantificam o dano. Com a finalidade de demonstrar sua eficácia, o método desenvolvido foi testado numa viga com suas extremidades livres e numa treliça de 10 barras, modeladas mediante o Método dos Elementos Finitos. Os resultados dos testes numéricos confirmam a aplicabilidade do método, já que, foi possível determinar a posição da fissura dentro das estruturas e quantificar, de forma aproximada, sua extensão.

Palavras-chave: Integridade estrutural; Identificação de dano; Análise modal; Recozimento simulado.

INTEGRITY ASSESSMENT OF STEEL STRUCTURES BY DYNAMIC RESPONSES

Abstract

A new iterative procedure for structural integrity evaluation based on dynamic responses is presented. The proposed procedure uses the technique of modal analysis to identify cracks in structures with lineal behavior. By the correlation of the dynamic responses with the FE models, it is possible to detect the damage in the structure. In the presented technique, the difference between the responses generated with FEM and the measured responses must be minimized in order to assess the state of the structure (the optimization problem is solved by using the simulated annealing algorithm). With the purpose of demonstrating its effectiveness, the developed method was tested in a free-free beam and in a 10-bar truss, modeled with FEM. The results of the numeric tests confirm the applicability of the method, since it was possible to determine the position of the crack inside of the structures and to quantify, in approximate way, its extension.

Key words: Structural integrity; Damage identification; Modal analysis; Simulated annealing.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Doutorando Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

³ Professor titular Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

INTRODUÇÃO

Avaliar a integridade estrutural utilizando técnicas baseadas na resposta dinâmica da estrutura tem se tornado, nas últimas décadas, um procedimento muito atraente para as indústrias de construção civil e aeroespacial, devido à possibilidade de detectar danos em sua infra-estrutura de forma rápida e econômica, diminuindo desta forma, os riscos de perda de vidas humanas e de capital que o colapso de grandes estruturas pode acarretar.

Os métodos para avaliação da integridade estrutural a partir de respostas dinâmicas (AIERD) podem ser classificados em dois grandes grupos de acordo com sua dependência (o não) de um modelo estrutural, encontrando-se: os baseados em sinais (experimentais) e os baseados em modelos.⁽¹⁾

As técnicas baseadas em sinais (por ex. a inspeção visual, a emissão acústica os raios X, os métodos de ultra-som, as correntes de Eddy, os métodos de campo magnético e métodos foto térmicos⁽²⁾) precisam que a vizinhança do dano seja conhecida *a priori* e que a porção da estrutura a inspecionar-se seja acessível. Além destas limitações, estes métodos só podem detectar dano em (ou) próximo da superfície da estrutura e funcionam relativamente bem em estruturas de pequeno porte. As principais vantagens destas técnicas é que evitam os erros de modelagem e os custos computacionais envolvidos nas simulações numéricas. Porém, estes métodos são ineficientes quando se trata de grandes sistemas estruturais, onde as técnicas fundamentadas na resposta vibratória da estrutura são mais promissoras (como primeira linha de defesa para identificação de dano) devido a seu caráter global, desta forma, os métodos baseados em modelos permitem estimar a posição do dano e sua severidade mediante o uso do modelo matemático da estrutura e empregando dados experimentais de vibração.⁽³⁾

O problema AIERD pode ser definido como um problema inverso não linear, isto é, a partir de informação experimental da estrutura (deslocamentos, acelerações, tensões) busca-se identificar os parâmetros físicos do sistema (módulo de elasticidade, fatores de amortecimento). Devido a que os dados experimentais geralmente são limitados, podem encontrar-se múltiplas soluções que satisfaçam à formulação do problema inverso. Para contornar esta dificuldade, técnicas de computação branda como as redes neurais⁽⁴⁾ e os algoritmos genéticos,⁽⁵⁾ dentre outras, vêm sendo utilizadas para resolver o problema AIERD. A idéia central destas técnicas é substituir o problema inverso por um conjunto de problemas diretos, cuja solução permite obter uma representação (vetor) do sistema, onde as variações nos parâmetros da estrutura, devidos ao dano são realçadas, permitindo a identificação de possíveis falhas.

A principal dificuldade encontrada na AIERD baseada em modelos é a presença de erros, tanto nas medidas experimentais como nos modelos utilizados (de modelagem, na ordem do modelo e nos parâmetros do modelo). O efeito destes erros pode ser incorporado incluindo, por exemplo, ruído nos dados de entrada, utilizados durante o processo de treinamento da rede neural, ou nos dados que definem a função objetivo utilizada no algoritmo genético. Já, os erros no modelo de elementos finitos geralmente podem ser reduzidos mediante o emprego de técnicas de ajuste de modelos.⁽⁶⁾

Neste trabalho, é proposta uma nova técnica iterativa para AIERD, baseada em modelos de elementos finitos (MEF) e no algoritmo de recozimento simulado (RS) para identificar dano em nível de elemento. A técnica busca determinar a posição do dano dentro da estrutura e fazer uma estimativa de sua severidade (extensão). O método emprega dados modais (gerados numericamente) correlacionados com parâmetros de dano definidos no MEF da estrutura.

PROBLEMA INVERSO: ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO DA AIERD

De forma geral, nos problemas inversos (PI),⁽⁷⁾ busca-se determinar, a partir dos efeitos ou respostas (deslocamentos e/ou acelerações medidos experimentalmente) do sistema, as características geométricas da estrutura, assim como, seus parâmetros físicos, carregamentos e condições de contorno.

A abordagem empregada neste trabalho para solucionar o problema AIERD é a mesma que a usada na solução de outros problemas inversos em engenharia. O primeiro passo é a criação de um modelo que forneça a resposta da estrutura (solução do problema direto); o segundo passo é planejar o programa experimental para decidir quais métodos de medida serão empregados e que estratégias devem ser usadas para diminuir erros de medição (por exemplo, utilização de filtros). Neste estudo, este último passo é simulado mediante a solução do problema de auto valor generalizado, que é o análogo analítico da análise modal experimental. O terceiro passo consiste na utilização de um solucionador inverso (SI). Aqui, deve ser definida uma função objetivo (geralmente não linear) caso o PI não possa ser formulado de forma explícita. Diversas técnicas de PNL (Programação Não Linear) clássicas têm sido utilizadas como SI,⁽⁸⁾ porém, sua principal desvantagem é a possibilidade de convergirem para ótimos locais, comprometendo a qualidade da solução. Uma alternativa para contornar este problema é o uso de técnicas aproximadas como as redes neurais⁽⁹⁾ e os algoritmos genéticos.⁽¹⁰⁾ Uma das contribuições deste trabalho é testar o algoritmo de recozimento simulado (RS) como solucionador inverso. Por último, deve verificar-se se a resposta tem, ou não, sentido físico, e deve definir-se um critério de parada para o algoritmo. Nas seguintes seções os passos necessários para a AIERD são descritos em detalhe.

MODELO DE DANO UTILIZADO

Neste trabalho, entende-se por dano a degeneração estrutural que resulta em perda parcial de rigidez de um ou vários elementos da estrutura. Existem vários procedimentos propostos na literatura para simular dano (diminuição de rigidez) dentro de uma estrutura modelada com MEF. O mais simples deles consiste na redução de rigidez de um ou vários elementos do MEF com a finalidade de simular a presença de uma pequena fissura que permanece aberta durante todo o processo de carga.⁽¹¹⁾ Outros modelos, mais refinados apresentados⁽¹²⁾ utilizam a teoria da mecânica da fratura linear para determinar a variação de flexibilidade (rigidez) que uma fissura introduz na estrutura. O modelo utilizado neste trabalho está baseado numa aproximação da matriz de rigidez de um elemento de viga Euler-Bernulli fissurado e foi originalmente apresentado por Sinha *et. Al.*⁽¹³⁾ Esta abordagem permite uma identificação direta da posição do dano e de sua extensão. A matriz de rigidez para um elemento de secção retangular ($b \times h$) com uma fissura em seu interior (Figura 1) vem dada por:⁽¹³⁾

$$\left[K_{fiss} \right]_e = \begin{bmatrix} K_{11} & -K_{11} & K_{12} & K_{14} \\ -K_{11} & K_{11} & -K_{12} & -K_{14} \\ K_{12} & -K_{12} & K_{22} & K_{24} \\ K_{14} & -K_{14} & K_{24} & K_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde:

$$K_{11} = \frac{H}{le^4} \left[2J + 3lf \left(\frac{2x_j}{le} - 1 \right)^2 \right] \quad K_{12} = \frac{H}{le^3} \left[J + lf \left(2 - \frac{7x_j}{le} + \frac{6x_j^2}{le^2} \right)^2 \right]$$

$$K_{14} = \frac{H}{le^3} \left[J + lf \left(1 - \frac{5x_j}{le} + \frac{6x_j^2}{le^2} \right) \right] \quad K_{22} = \frac{H}{6le^2} \left[3J + 2lf \left(-2 + \frac{3x_j}{le} \right)^2 \right]$$

$$K_{24} = \frac{H}{6le^3} \left[3J + 2lf \left(2 - \frac{9x_j}{le} + \frac{9x_j^2}{le^2} \right) \right] \quad K_{44} = \frac{H}{6le^3} \left[3J + 2lf \left(-1 + \frac{3x_j}{le} \right) \right]$$

$$H = 12E(I_0 - I_{ff}), \quad x_j = \text{pos. fissura} \quad J = \frac{lf^3}{le^2}$$

$$I_0 = \text{Inércia seção intacta} \quad I_{ff} = \frac{b(h - \alpha_j)^3}{12}$$

$$l_f = 1.5h \text{ comp. efetivo fissura}$$

$$le = \text{comprimento de elemento}$$

$$\alpha_j = \text{altura da fissura}$$

$$E = \text{modulo de elasticidade}$$

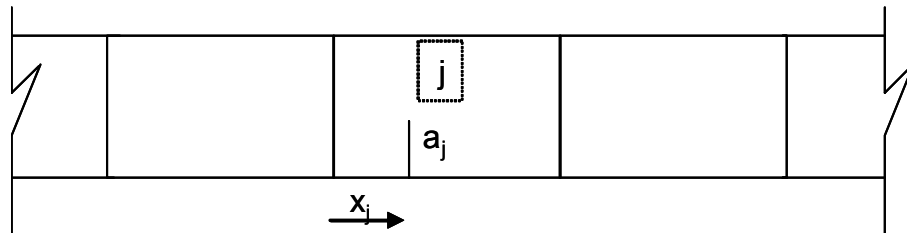


Figura 1. Posição (x_j) e tamanho (α_j) da fissura no elemento j da viga.

A equação (1) foi obtida a partir do modelo de variação da rigidez que uma fissura induz num elemento de viga.⁽¹³⁾ A principal vantagem deste enfoque é que a matriz de rigidez da estrutura danificada pode ser escrita em função do tamanho e da posição do dano. Supondo-se que as rotações da viga não foram medidas experimentalmente, a ordem usual dos deslocamentos na equação (1) foi alterada para $\{w_1, w_3, w_2, w_4\}$, com a finalidade de realizar a montagem da matriz de rigidez reduzida da estrutura, de acordo com o método de redução das equações de movimento proposto por Kidder.⁽¹⁴⁾ O modelo considera que a fissura está contida dentro de um único elemento, porém, é possível obter as matrizes para o caso da fissura estar localizada sobre mais de um elemento.

A matriz de rigidez da estrutura, $[K]_{fiss}$, pode agora ser montada segundo o procedimento normal empregado no MEF e vem dada pela equação (2):

$$[K]_{fiss} = \sum_{e=1}^M [K]_e - [K]_{fiss} \quad (2)$$

Onde $[K]_e$ é matriz de rigidez do elemento de viga intacto.

A anterior abordagem dispensa o emprego de malhas de elementos finitos muito refinadas para modelar a variação de tensões na ponta da fissura, já que, a mudança na flexibilidade local pode ser incorporada de forma eficiente e rápida dentro dos elementos clássicos da estrutura, evitando também, o uso de super-elementos (que contém termos singulares) e possibilitando sua aplicação em estruturas complexas.

TEORIA DE VIBRAÇÃO: EXTRAÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS

O problema abordado nesta secção é o do cálculo dos parâmetros modais para um sistema de N graus de liberdade. A equação (3) representa o problema do auto valor conhecido como problema de auto valor generalizado ou problema de auto valor linearizado, cuja solução fornece as frequências naturais e formas modais do sistema estrutural estudado:

$$[K]\{\varphi\} = \omega^2 [M]\{\varphi\} \quad (3)$$

Em geral, para um sistema de N graus de liberdade, sem amortecimento, a solução da equação (3) fornece N valores de ω^2 que são reais e positivos. Porém, se a matriz de massa do sistema, $[M]$, for singular, a equação (3) terá um ou mais autos valores infinitos. Por outro lado, quando a matriz de rigidez $[K]$ for singular, a equação (3) terá um ou mais autos-valores nulos. Associado a cada auto valor ω existe um auto vetor $\{\varphi\}$. Na análise de vibrações as raízes quadradas dos autos valores do problema de auto valor generalizado são chamadas de *frequências do sistema* e os autos vetores são chamados de *formas modais reais*.

Para resolver o problema de auto valor dado pela equação (1), existem diversos métodos numéricos reportados na literatura especializada.⁽¹⁵⁾ Neste trabalho foi utilizado o método de Jacobi.⁽¹⁵⁾

SOLUCIONADOR INVERSO: O ALGORITMO DE RECOZIMENTO SIMULADO

O algoritmo RS se baseia na analogia entre a simulação do processo de recozimento dos sólidos e a solução de problemas de otimização de grande porte, com variáveis contínuas e discretas.^(16,17) O RS é, basicamente, um procedimento de busca aleatória de pontos ótimos globais, que permite movimentos para fugir de pontos mínimos (máximos) locais. Estes movimentos de fuga são controlados através do conhecido critério de Metropolis.⁽¹⁸⁾ As vantagens que tornam atraente o RS para a solução de PI's são sua não dependência do cálculo de gradiente da função objetivo, e sua capacidade de fugir de pontos ótimos locais. O procedimento pode ser resumido nos seguintes passos:⁽¹⁹⁾

Definir a função objetivo: A expressão para a função objetivo utilizada para detecção de dano esta definida na equação (4):

$$F_{ob} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^C (\varphi_{ij}^e - \varphi_{ij}^a)^2 + \sum_{i=1}^P \left[1 - \frac{\omega_i^e}{\omega_i^a} \right] \quad (4)$$

Onde φ_{ij}^e é o j -ésimo elemento do i -ésimo auto vetor determinado experimentalmente, φ_{ij}^a é o j -ésimo elemento do i -ésimo auto vetor determinado analiticamente e ω_i^e e ω_i^a são i -ésima frequência natural experimental e analítica respectivamente. L é o número de auto vetores medidos e C é o número de graus de liberdade do modelo de elementos finitos da estrutura. A minimização da função objetivo fornece os valores dos parâmetros α_p e x_p (altura e posição da fissura e $p=1, n$ onde n é o número de elementos finitos utilizados). Os parâmetros (α_p, x_p) indicam a posição e tamanho da fissura dentro da estrutura. A equação (4) pode ser escrita da seguinte forma:

$$f_{obj}(A) = F_{ob}(\alpha_p, x_p) \quad (5)$$

onde $A = \{\alpha_p, x_p\}$ e $\alpha_p, x_p \in \mathfrak{R}^+$, com $p = 1 \dots N$. O problema agora, pode ser formulado da seguinte maneira: achar A_{ot} que satisfaça a equação (6):

$$f_{obj}(A_{ot}) = \min \{ F(A) / A \in \mathfrak{R}^n \} \quad (6)$$

onde o estado do sistema é definido pelo vetor de configuração atual A .

Definir variações aleatórias: Propor um mecanismo gerador de variações aleatórias para a configuração atual. Este mecanismo é uma forma de perturbar A para obter novas configurações \bar{A} . O mecanismo de transição funciona como descrito a seguir: a avaliação da função f_{obj} é feita no ponto inicial A_k e seu valor $F(A_k)$ é guardado. Um novo ponto \bar{A}_j é determinado mediante uma variação aleatória introduzida no elemento α_i do vetor A_k :

$$\bar{\alpha}_i = \alpha_i + \lambda \cdot \eta_i \quad (7)$$

Na equação (7), λ é um número aleatório no intervalo (-1,1), η_i representa um elemento do vetor η , que é o comprimento do passo para o vetor A_k e $\alpha_i, \bar{\alpha}_i$ são elementos de A_k e \bar{A}_j , respectivamente. O valor da função $F(\bar{A}_j)$ é calculado. Se $F(\bar{A}_j) < F(A_k)$, \bar{A}_j é aceite e A_k é substituído por \bar{A}_j , portanto, o algoritmo “desce” (se aproxima do mínimo). Se $F(\bar{A}_j) > F(A_k)$, a probabilidade de \bar{A}_j ser aceite vem dada pelo critério de Metropolis:⁽¹⁸⁾

$$P_r[\bar{A}_j] = e^{\left(\frac{-\Delta F}{T} \right)} \quad (8)$$

Na equação (8), $\Delta F = F(A_k) - F(\bar{A}_j)$ e T é o parâmetro de “temperatura”, que é o análogo da temperatura no processo físico de recozimento. Na prática, o valor P_r é comparado com P , que é um número randômico no intervalo (0,1). Se $P_r > P$, o novo

ponto é aceito e A_k é substituído por $\overline{A_j}$ e o algoritmo “Sobe” (se afasta do mínimo), caso contrário, $\overline{A_j}$ é rejeitado. O algoritmo RS começa numa temperatura “alta” T_o e uma seqüência de pontos $\overline{A_j}$ é gerada até atingir o equilíbrio, isto é, se obtém uma seqüência de pontos $\overline{A_j}$, cujo valor médio de F atinge um valor estável à medida que j aumenta. O melhor ponto alcançado (mínimo nesta temperatura) é guardado como A_{ot} .

Programa de esfriamento: Neste estágio, o parâmetro de controle T é diminuído de acordo com uma regra de decremento, conhecida como programa de esfriamento, que obedece à relação:

$$T_{j+1} = \theta \cdot T_j \quad (9)$$

onde θ é uma constante real cujo valor esta no intervalo (0,1). Com o valor de T reduzido segundo a equação (9), uma nova seqüência de pontos é gerada a partir de A_{ot} , até que o novo equilíbrio seja atingido.

Critério de parada: O processo termina para um valor de T pequeno, para o qual, nenhuma melhora no valor de F , possa ser esperada.

Da anterior exposição, fica claro que, grandes diferenças no valor da função e/ou baixas temperaturas diminuem a probabilidade de um movimento de “subida” do algoritmo. Por outro lado, a variação do passo η é feita segundo o proposto em Corana et al.,⁽¹⁹⁾ de tal forma que, a relação entre o número de movimentos de fuga (“subidas”) aceitos e o total de movimentos permaneça próxima de 0.5, e de esta maneira, manter um bom seguimento do valor da função estudada.

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS: RESULTADOS E ANÁLISE

Para demonstrar o potencial da estratégia descrita nas anteriores seções, são considerados dois exemplos numéricos: primeiro uma viga (modelo Euler-Bernoulli) com suas duas extremidades livres, contendo uma ou varias fissuras e segundo uma treliça metálica plana de 10 elementos danificada mediante uma redução de rigidez direta de um (ou vários de seus elementos). As estruturas são apresentadas na Figura 2. Suas propriedades são: área da seção transversal 0.00135m^2 , densidade 2650Kg/m^3 , comprimento $L=1.9$ m, modulo de elasticidade 70GPa , momento de inércia $6.50\text{E}-8\text{m}^4$. No primeiro exemplo foram analisados dois casos: inicialmente, a fissura foi colocada no elemento 4, com $\alpha_4 = 4E-3$ e $x_4 = 0.11$ (caso 1a) e, finalmente, o dano foi introduzido nos elementos 4, 6 e 9 (caso 1b) com os seguintes valores: $\alpha_4 = 4E-3$, $\alpha_6 = 3E-3$, $\alpha_9 = 2E-3$ e $x_4 = 0.11$, $x_6 = 0.082$, $x_9 = 0.061$. Em ambos os casos foi acrescentado ruído aleatório de $\pi=1\%$ para as freqüência naturais e de $\mu=2\%$ para as formas modais. No segundo exemplo, os elementos danificados com uma redução de rigidez de 10% foram os elementos 1, 4 e 8 da treliça plana mostrada na Figura 2. O nível de ruído introduzido é igual ao do primeiro exemplo.

Para determinar a presença do dano nas estruturas analisadas utilizando a estratégia AIERD, diferentes pontos iniciais e diferentes valores da semente para gerar os números aleatórios foram utilizados. Todos os exemplos foram rodados 10 vezes e nas tabelas 1 e 2 se apresentam os melhores resultados obtidos para cada exemplo. O valor de F_{ob} , em todos os casos, foi muito próximo do indicado nas Tabelas 1 e 2. O mesmo aconteceu com o vetor de parâmetros $\{\alpha_i, x_{ij}\}$. O valor t corresponde ao tempo de execução, em segundos e NA é o número total de chamadas da função objetivo. Também é apresentado o valor C , que expressa o número de vezes, do total de 10, que o algoritmo convergiu utilizando menos de 100000 avaliações da função objetivo. Em todos os exemplos a matriz de massa $[M]$ é suposta constante, isto é, não muda devido à presença da fissura.

Da equação (1) pode concluir-se que, tamanhos de fissura menores que $1E-4$ m tem efeito desprezível na resposta da estrutura. Por esta razão, as posições x_i correspondentes aos valores $\alpha_i < 1E-4$, na Tabela 1, podem ser ignoradas, restando unicamente os valores x_i que identificam a coordenada local, dentro do elemento i , onde esta localizada a fissura. Como uma forma de mostrar a eficácia da técnica desenvolvida foi empregado o método de Nelder e Mead⁽²⁰⁾ como solucionador inverso alternativo. Os resultados obtidos com esta técnica se encontram na Tabela 1 (Coluna N-M). O desempenho do procedimento proposto para AIERD é mais acurado que o do N-M como pode observado mediante a comparação dos valores da F_{ob} e dos valores dos parâmetros $\{\alpha_i, x_{ij}\}$. Nos casos 1a e 1b, a técnica N-M identifica um número maior de elementos danificados (dois e cinco, respectivamente) o qual é falso. Este resultado pobre pode ser explicado pela incapacidade do algoritmo N-M de fugir de pontos ótimos locais.

Da Tabela 1 pode-se concluir que a posição da fissura pode ser determinada com maior precisão do que seu tamanho. Para o caso 1a com ruído, o erro na posição x_4 foi de 0.09% e o erro em α_4 foi de 17.5%. Para o caso 1b com ruído, os erros na posição foram de $Ex_4=2.9\%$, $Ex_6=3.65\%$, $Ex_9=3.77\%$ e os erros no tamanho da fissura foram de $E\alpha_4=30.7\%$, $E\alpha_6=8\%$, $E\alpha_9=52.5\%$. Estes resultados confirmam a aplicabilidade do método, já que, uma vez determinada a presença e posição do dano, sua extensão pode ser mais bem avaliada mediante o uso de métodos locais de inspeção.

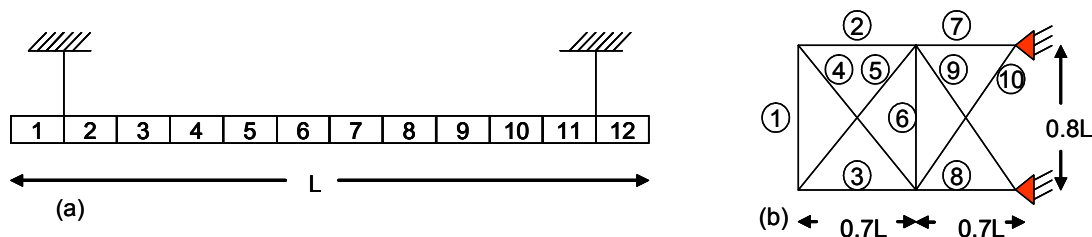


Figura 2. Estruturas analisadas: (a) viga livre. (b) treliça plana

Tabela 1. Resultados AIERD Viga Livre.

(α, ξ)	Caso 1a			Caso 1b		
	AIERD (Sem ruído)	AIERD (ruído 1, 2%)	N-M (ruído 1, 2%)	AIERD (Sem ruído)	AIERD (ruído 1, 2%)	N-M (ruído 1, 2%)
α_1	0.632E-4	0.208E-5	1.000E-2	0.343E-4	0.527E-7	0.670E-2
α_2	0.206E-5	0.240E-7	6.868E-5	0.174E-5	0.610E-8	0.394E-4
α_3	0.4668E-5	0.317E-7	2.691E-5	0.251E-5	0.904E-7	0.506E-4
α_4	0.400E-2	0.303E-2	1.823E-3	0.396E-2	0.277E-2	0.250E-2
α_5	0.307E-5	0.511E-7	2.648E-5	0.173E-5	0.708E-7	0.301E-3
α_6	0.468E-5	0.235E-7	2.761E-5	0.299E-2	0.234E-2	0.299E-2
α_7	0.163E-5	0.106E-7	3.801E-5	0.9016E-6	0.985E-7	0.196E-4
α_8	0.964E-7	0.205E-7	1.960E-4	0.118E-5	0.562E-7	0.000
α_9	0.337E-5	0.826E-8	1.763E-9	0.199E-2	0.949E-3	0.361E-4
α_{10}	0.540E-5	0.315E-7	5.481E-8	0.150E-5	0.555E-8	0.398E-4
α_{11}	0.135E-5	0.432E-8	1.580E-9	0.522E-5	0.650E-7	0.203E-4
α_{12}	0.131E-8	0.336E-6	4.949E-8	0.587E-4	0.708E-7	0.858E-2
x_1	0.0079	0.0088	9.557E-4	0.0253	0.0142	0.0024
x_2	0.1123	0.0581	0.0636	0.0862	0.1016	0.0389
x_3	0.0452	0.0750	0.0833	0.0675	0.0933	0.0291
x_4	0.1099	0.1130	0.1058	0.1095	0.1132	0.1081
x_5	0.0114	0.0313	0.0553	0.0171	0.1403	0.0226
x_6	0.0391	0.0332	0.0626	0.0820	0.0790	0.075
x_7	0.1158	0.1313	0.0706	0.0891	0.0278	0.1262
x_8	0.1395	0.0267	0.9685	0.0991	0.1481	0.0453
x_9	0.0621	0.0648	0.0800	0.0610	0.0587	0.1524
x_{10}	0.0744	0.0171	0.1000	0.0285	0.1430	0.0010
x_{11}	0.1301	0.0649	0.0819	0.0655	0.0126	0.0785
x_{12}	0.0777	0.1433	0.1318	0.1498	0.1157	0.1507
NA	54001	54000	25000	66758	55801	24300
t	51.25 s	51.68 s	9.31 s	52.516 s	53.21 S	7.89 s
Fob	2.02575E-8	8.2693E-4	1.0246E-3	3.96235E-8	6.29840E-4	8.31244E-4
C	100%	90%	100%	100%	100%	90%

Tabela 2. Resultados AIERD Treliça.

Elem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α_i	0.907	0.998	0.980	0.895	0.981	0.992	0.998	0.897	0.990	0.982
F_{ob}	1.06548E-5		NA = 32150		t = 38.15 s			C = 100%		

A Tabela 2 mostra o resultado do procedimento AIERD para a treliça da Figura 2. Neste caso, a matriz de rigidez utilizada tem a forma $\alpha_i [K]_i$, onde $0 < \alpha_i < 1$ é a redução de rigidez do i -ésimo elemento da estrutura. A matriz de rigidez global da estrutura foi montada da forma usual. Valores de $\alpha_i < 1$ indicam a presença de dano. Neste exemplo, a redução de rigidez de 10% foi localizada nos elementos 1, 4 e 8 e foram empregando os quatro primeiros modos. Neste caso, a técnica consegue determinar para todos os elementos danificados o valor correto do coeficiente de redução de rigidez α_i , dando uma indicação clara da posição dos elementos afetados e permitindo realizar uma boa estimativa de sua extensão.

CONCLUSÕES

Neste estudo foi mostrado que o método proposto, baseado no algoritmo *RS*, pode ser utilizado para solucionar o problema de AIEDR empregando respostas dinâmicas. Em todos os casos analisados se obteve uma identificação satisfatória da posição do dano e de sua extensão, empregando-se um conjunto de dados modais incompleto. O procedimento apresentado demonstrou que o algoritmo *RS* pode aumentar, de forma considerável, a confiabilidade do processo de detecção de dano.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ZOU, Y., TONG, L., STEVEN, P. Vibration based model dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures-a review. *Journal of Sound and Vibration*, 230, p. 357-378, 2000.
- 2 GOCH, G., SCHMITZ, B., KARPUSCHEWSKI, B., GEERKENS, J., REIGL, M., SPRONGL, P., RITTER, R. Review of non-destructive measuring methods for the assessment of surface integrity: a survey of new measuring methods for coatings, layered structures and processed surfaces. *Precision Engineering*, 23, p. 9-33, 1999.
- 3 WORDEN, K., DULIEU-BARTON, J. M. An overview of intelligent fault detection in systems and structures. *Structural health Monitoring*, Vol. 3(1), p.85-98. 2004.
- 4 LEE, J.J., LEE, J.W., YI, J.H., YUN, C.B., Jung, H.I. Neural networks-based damage detection for bridges considering errors in baseline Finite element models. *Journal of Sound and Vibration*, 280, p. 555-578. 2005.
- 5 RAO, M.A., SRINIVAS, J., MURTHY, B.S.N. Damage detection in Vibrating bodies using genetic algorithms. *Computers and Structures*, 82, p.963-968, 2004.
- 6 KWON, K-S., LIN R-M. Robust finite element model updating using Taguchi method. *Journal of Sound and Vibration*, 280(1-2), p.77-99, 2005.
- 7 GLADWELL, G. M. L. Inverse problems in vibration. *Appl. Mech. Rev.* 49 525–34. 1996a.
- 8 MORE, J J. The Levenberg-Marquardt algorithm. Implementation and theory In *Numerical Analysis*, G. A. Watson (Ed.), *Lecture Notes in Mathematics* 630, Springer-Verlag, New York, p. 105-116, 1977.
- 9 LU, Y., TU. Z. A two level neural network approach for dynamic FE model updating including damping. *Journal of Sound and Vibration* 275, p. 931-952, 2004.
- 10 HEMEZ, F. M., FARHAT, C., BACHER, E., VALLAT, S. On the efficiency of model updating via genetic algorithm for structural damage detection. 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural dynamics and materials conference and AIAA/ASME Adaptive Structures forum, p. 2792-2801, New Orleans, LA, USA. 1995.
- 11 SALAWU, O.S., WILLIAMS, C. Damage location using vibration mode shapes. *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, p.933-939. 1994.
- 12 SAAVEDRA, P.N., CUITIÑO, L.A. Crack detection and vibration behavior of cracked beams. *Computers and Structures*, Vol. 79, p. 1451-1459, 2001

- 13 SINHA, J.K., FRISWELL, M.I., EDWARDS, S. Simplified models for the locations of cracks in beam structures using measured vibration data. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251, No. 1, p 13-38, 2002.
- 14 KIDDER, R. L. Reduction of Structural Frequency Equations, *AIAA Journal*, v.11, n. 6, p.892, Jun. 1973.
- 15 BATHE, K-J. *Finite Element Procedures*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall. 1996.
- 16 KIRKPATRICK, S., GELATT, A., VECCHI, M.P. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, p.671-680, 1983.
- 17 YU CHEN,T., SU, J.J. Efficiency improvement of simulated annealing in optimal structural design. *Adv. Eng. Softw.* 33 ,p.675–680. 2002.
- 18 METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A., ROSENBLUTH, M.,TELLER, A.,TELLER. Equations of state calculations by fast computing machines. *J. of Chem. Physics*. 21, 1087–1092, 1953.
- 19 CORANA, A., MARCHESI, M., MARTINI, C., RIDELLA, S. Minimizing multimodal functions of continuous variables with the Simulated Annealing Algorithm. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 13, No. 3, p.262–280, 1987
- 20 NELDER, J.A., MEAD, R. A simplex method for function minimization, *Computer Journal* 7, p.308 313, 1965.