

Oscar Javier Begambre Carrillo

**Algoritmo Híbrido para Avaliação da Integridade Estrutural: uma
Abordagem Heurística**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas
Orientador: Professor Titular José Elias Laier

São Carlos
2007

Ao meu filho Sergio.
A minha esposa Liliana.

AGRADECIMENTOS

Eu tive a sorte de realizar esta pesquisa com um excelente grupo de professores, funcionários e alunos de pós-graduação no Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo-USP desde 2004.

Gostaria de agradecer, de forma especial, ao Professor Titular Dr. José E. Laier, por ter me dado a oportunidade de trabalhar com ele e por sua competente orientação nestes últimos três anos.

Aos meus amigos, os professores Dr. Wilson Venturini, Dr. Samuel Giongo, Dr. Humberto Coda, Dra. Heloisa Sobreiro pelas longas e valiosas horas de conversa, a Carlos Azevedo, Odília de Azevedo, Wesley Góis, Leandro Waidemam, Walter Oliveira, Claudius Barbosa, Priscila Castilho, Neire Castilho e Sandra Almeida, que sempre estiveram comigo durante minha permanência em São Carlos.

A Rosi Lopes e a Maria Nadir Minatel, pela amizade e as orientações fornecidas para a elaboração deste documento.

Ao CNPq pela bolsa de estudos, sem a qual não teria conseguido enfrentar o desafio de escrever esta tese.

À minha família.

Enquanto não alcançares a verdade, não poderás corrigi-la. Porém, se a não corrigires, não a alcançarás. Entretanto, não te resignes.

Do Livro dos Conselhos.

RESUMO

BEGAMBRE, O. Algoritmo Híbrido para Avaliação da Integridade Estrutural: Uma Abordagem Heurística. 2007. 152 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Neste estudo, o novo algoritmo híbrido autoconfigurado PSOS (*Particle Swarm Optimization – Simplex*) para avaliação da integridade estrutural a partir de respostas dinâmicas é apresentado. A formulação da função objetivo para o problema de minimização definido emprega Funções de Resposta em Frequência e/ou dados modais do sistema. Uma nova estratégia para o controle dos parâmetros do algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), baseada no uso do método de Nelder – Mead é desenvolvida; conseqüentemente, a convergência do PSO fica independente dos parâmetros heurísticos e sua estabilidade e precisão são melhoradas. O método híbrido proposto teve melhor desempenho, nas diversas funções teste analisadas, quando comparado com os algoritmos *Simulated Annealing*, Algoritmos Genéticos e o PSO. São apresentados diversos problemas de detecção de dano, levando em conta os efeitos do ruído e da falta de dados experimentais. Em todos os casos, a posição e extensão do dano foram determinadas com sucesso. Finalmente, usando o PSOS, os parâmetros de um oscilador não linear (oscilador de Duffing) foram identificados.

Palavras-chave: *Particle Swarm Optimization, Simulated Annealing, identificação de dano, problemas inversos, vigas fissuradas, oscilador não linear.*

ABSTRACT

Begambre, O. Hybrid algorithm for damage detection: a heuristic approach. 2007. 152 f. Thesis (Doctoral). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In this study, a new auto configured Particle Swarm Optimization – Simplex Algorithm for damage detection has been proposed. The formulation of the objective function for the minimization problem is based on the Frequency Response Functions (FRFs) and the modal parameters of the system. A novel strategy for the control of the Particle Swarm Optimization (PSO) parameters based on the Nelder–Mead algorithm (Simplex method) is presented; consequently, the convergence of the PSOS becomes independent of the heuristic constants and its stability and accuracy are enhanced. The formulated hybrid method performs better in different benchmark functions than the Simulated Annealing (SA), the Genetic Algorithm (GA) and the basic PSO. Several damage identification problems, taking into consideration the effects of noisy and incomplete data, were studied. In these cases, the damage location and extent were determined successfully. Finally, using the PSOS, a non-linear oscillator (Duffing oscillator) was identified with good results.

Keywords: Particle Swarm Optimization, Simulated Annealing, damage identification, inverse problems, cracked beam, non-linear oscillator.

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| AG | Algoritmo Genético |
| ARMA | <i>Autoregressive Moving Average</i> |
| COMAC | <i>Coordinate Modal Assurance Criterion</i> |
| DD | Detecção de Dano |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier |
| FRAC | <i>Frequency Response Assurance Criterion</i> |
| FRF | Função de Resposta em Frequência |
| GAC | <i>Global Amplitude Criterion</i> |
| GSC | <i>Global Shape Criterion</i> |
| HFRF | <i>High Frequency Response Function</i> |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| PD | Problema Direto |
| PI | Problema Inverso |
| PIP | Problema de Identificação Paramétrica |
| PNL | Programação Não Linear |
| PSO | <i>Particle Swarm Optimization</i> |
| RNA | Rede Neural Artificial |
| RNA-BP | <i>Rede Neural Artificial Back Propagation</i> |
| SA | <i>Simulated Annealing</i> |
| TBM | Técnicas Baseadas em Modelos |
| TBS | Técnicas Baseadas em Sinais |
| TW | Transformada Wavelet |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Necessidade de Avaliação da Integridade Estrutural | 1 |
| 1.2 Métodos de Detecção de dano a partir de respostas dinâmicas | 4 |
| 1.3 Detecção de dano como Problema Inverso | 6 |
| 1.4 Objetivos da Tese | 8 |
| 1.5 Alcance | 9 |
| 1.6 Síntese do conteúdo da Tese | 10 |
| 2 DETECÇÃO DE DANO-ESTADO DA ARTE | 12 |
| 2.1 Introdução | 12 |
| 2.2 Técnicas Baseadas em Modelos (TBM) | 14 |
| 2.2.1 Métodos que empregam dados Modais | 17 |
| 2.2.2 Métodos que Empregam Dados no Domínio da Frequência | 21 |
| 2.2.3 Métodos que Empregam Dados no Domínio do Tempo | 23 |
| 2.3 Técnicas Baseadas em Sinais (TBS) | 24 |
| 2.4 Métodos Heurísticos | 26 |
| 3 DETECÇÃO DE DANO: BASES TEÓRICAS | 31 |
| 3.1 Introdução | 31 |
| 3.2 Correlação entre Resultados Teóricos e Experimentais | 34 |
| 3.3 Modelos de Dano | 35 |
| 3.4 Equação de Movimento via Método dos Elementos Finitos (MEF) | 38 |
| 3.4.1 Problema do Auto Valor para Vibração Livre Não Amortecida | 40 |
| 3.4.2 Amortecimento Proporcional | 42 |
| 3.4.3 Amortecimento Geral | 43 |
| 3.4.4 Funções de Resposta em Frequência Analíticas (FRFs) | 46 |
| 3.4.5 Introdução de Dano no MEF da Estrutura | 48 |
| 3.5 Uso de Dados Experimentais para Avaliação da Integridade Estrutural | 49 |
| 3.5.1 Funções Objetivo | 50 |
| 3.6 Análise de Resultados | 54 |
| 4 ALGORITMOS HEURÍSTICOS PARA DETECÇÃO DE DANO | 56 |

| | |
|---|------------|
| 4.1 Introdução | 56 |
| 4.2 Algoritmo <i>Simulated Annealing</i> (SA) | 59 |
| 4.2.1 Função Objetivo | 61 |
| 4.2.2 Estruturas de Vizinhança | 62 |
| 4.2.3 Programa de Esfriamento | 63 |
| 4.2.4 Critério de Parada | 64 |
| 4.3 Algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO) | 66 |
| 4.3.1 Mecanismo e Parâmetros Básicos do PSO | 67 |
| 4.3.2 Topologias de Vizinhança | 70 |
| 4.3.3 Critérios de Parada | 71 |
| 4.4 Algoritmos Genéticos (AGs) | 72 |
| 4.4.1 Operadores e Parâmetros Básicos dos AGs | 73 |
| 4.4.2 Critérios de Parada | 75 |
| | |
| 5 O NOVO ALGORITMO HÍBRIDO: PSOS (PSO-SIMPLEX) | 76 |
| 5.1 Introdução | 76 |
| 5.2 Algoritmos Autoconfigurados | 77 |
| 5.3. O Algoritmo Nelder - Mead (N-M) | 78 |
| 5.4 O Algoritmo PSOS | 80 |
| 5.4.1 Heurística do PSOS | 81 |
| 5.4.2 Critérios de Parada do PSOS | 86 |
| 5.5 Análise de Convergência | 87 |
| | |
| 6 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS ALGORITMOS | 89 |
| 6.1 Introdução | 89 |
| 6.2 Critérios de Avaliação dos Algoritmos: Precisão, Estabilidade, Robustez, Custo Computacional e Confiança | 89 |
| 6.3 Funções Teste - Resultados | 90 |
| | |
| 7 DETECÇÃO DE DANO USANDO OS ALGORITMOS PSOS E SA E DADOS MODAIS: EXEMPLOS NUMÉRICOS E ANALÍTICOS | 98 |
| 7.1 Introdução | 98 |
| 7.2 Problema de Kabe: Tolerância ao Ruído | 98 |
| 7.3 Identificação de Dano Viga em Balanço | 103 |
| | |
| 8 DETECÇÃO DE DANO USANDO O PSOS E FRFS: EXEMPLOS NUMÉRICOS E ANALÍTICOS | 107 |
| 8.1 Introdução | 107 |
| 8.2 Treliza de Dez Barras | 107 |

| | |
|---|------------|
| 8.3 Viga Livre-Livre com Fissuras | 110 |
| 8.4 Oscilador Não-Linear | 112 |
| 9 CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHO FUTURO | 115 |
| 9.1 Conclusões | 115 |
| 9.2 Contribuições | 116 |
| 9.3 Trabalho futuro | 118 |
| BIBLIOGRAFIA | 119 |
| APÊNDICE A: LISTAGEM PROGRAMA SIMULATED ANNEALING | 132 |
| APÊNDICE B: LISTAGEM DO PROGRAMA PARTICLE SWARM OPTIMIZATION | 139 |
| APÊNDICE C: LISTAGEM DO PROGRAMA PSOS | 145 |

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

