

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**UMA ABORDAGEM NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA A IDENTIFICAÇÃO  
DE DANO ESTRUTURAL UTILIZANDO O MÉTODO SIMULATED ANNEALING**

**por**

**Franklin de Souza Ferreira**

Dissertação para Obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, novembro de 2008

UMA ABORDAGEM NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA A IDENTIFICAÇÃO DE  
DANO ESTRUTURAL UTILIZANDO O MÉTODO SIMULATED ANNEALING

por

Franklin de Souza Ferreira  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. José Roberto de França Arruda (UNICAMP)

Prof. Dr. Alberto Tamagna (UFRGS)

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja (ULBRA)

Prof. Dr. Flávio José Lorini  
Coordenador do PROMEC/UFRGS

Porto Alegre, 10 de novembro de 2008.

*Dedico este trabalho a todos que lutam por um mundo melhor.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Herbert Martins Gomes pela orientação, paciência, incentivo e dedicação recebida durante o desenvolvimento de todas as etapas dessa dissertação.

Aos professores Ignacio Iturrioz, Letícia F. F. Miguel, André Casagrande e Rubén Galiano pelo conhecimento transmitido, idéias trocadas, sugestões e pela amizade cunhada neste tempo de mestrado.

Aos colegas de Pós-graduação Tales Lisboa, Vicente Bergamini, Daniel Thomasi, Carla Anflor, Raul Mondadori, Leandro Corso e Fabrício Marocco pelas sugestões, convivência e amizade.

Aos bolsistas de iniciação científica Ingrid Zitto, Daniel Savioneck, Rodrigo Argenta, e pelas sugestões, convivência e pela parceria em algumas festas, em especial a Gustavo Gjordani pelo desenvolvimento parcial da parte teórica.

Aos meus pais e irmãos que sempre me incentivaram mesmo fisicamente distantes.

A Tatiana Milheti pela companhia de cada dia e pelo apoio incondicional prestado não apenas na execução desta dissertação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro fornecido em forma de bolsa de estudos durante o tempo de mestrado.

O Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) é como uma grande família. Tem as tias que não se bicam, os primos que não se largam, os parentes distantes, a molecada que joga vídeo game na sala, tem de tudo. As diferenças ficam claras num simples passar de olhos. Somos unidos por um único motivo, a vontade de fazer ciência e a intenção quase intrínseca de entender cada vez melhor o mundo que nos cerca, salvo raríssimas exceções. Essa é uma das principais conclusões desta dissertação, que apesar de não tocar nesse assunto, é uma das principais partes deste trabalho.

Sinto-me muito feliz por fazer parte deste grupo.

## RESUMO

A detecção de dano estrutural é um assunto muito estudado em virtude do grau de responsabilidade envolvido na manutenção de certas estruturas por diversas décadas, tais como pontes, torres de transmissão de energia, ou mesmo em falhas mecânicas de componentes automotivos, navais, de aviação, etc. A identificação do dano em estruturas por meio de ensaios dinâmicos não destrutivos tem se tornado uma técnica atrativa, devido principalmente a redução de incertezas e queda nos preços dos equipamentos utilizados, tais como acelerômetros, placas de aquisição de sinais, computadores, etc.

*Simulated Annealing* (Recozimento Simulado) é uma técnica baseada em algoritmos heurísticos utilizada para otimização (minimização ou maximização) de problemas de larga escala, sem necessidade de cálculos de gradientes, que contenham diversos ótimos locais, onde é necessário encontrar um ótimo global. No caso de detecção de danos, esta otimização pode ser usada para sintonizar o comportamento dinâmico de um modelo paramétrico com resultados experimentais modais, como por exemplo: frequências naturais, amortecimento modal, modos, etc. Neste trabalho é avaliado o desempenho do emprego deste método na localização e quantificação de danos em estruturas simples. Alguns dos resultados foram comparados com uma outra técnica heurística de Algoritmos Genéticos. A avaliação das incertezas envolvidas na determinação dos parâmetros experimentais foi realizada de modo a se ter idéia da ordem de exatidão do sistema assim como limitações das previsões feitas por esta metodologia. Esta abordagem é de extrema importância, pois o sistema pode indicar falsos danos em virtude de falta de exatidão nas medições das frequências naturais da estrutura estudada.

Uma abordagem teórica nos casos da viga bi apoiada e engastada livre foi feita através da equação diferencial da viga. Esta abordagem demonstrou regiões onde certas frequências não são alteradas independentemente da condição de dano. Esta é uma das maiores contribuições deste trabalho. O mesmo estudo foi feito de forma experimental, onde se verificou a confirmação dos lugares sugeridos pelos dois estudos anteriores, ou seja, determinadas frequências não se alteram quando determinadas regiões da estrutura são danificadas.

Concluiu-se que o método de *simulated annealing* tem eficiência equivalente aos algoritmos genéticos, pois em termos da eficiência em detectar corretamente danos, ele apresentou desempenho semelhante, o que foi comprovado pelas simulações numéricas e ensaios experimentais. As dificuldades de identificação de danos, como danos próximos as condições de contorno e danos menores de 10%, foram sentidos de forma parecida, sendo que para estes casos, o algoritmo não convergiu completamente. Os tempos de processamento em ambos os métodos de otimização foram similares, para todos os casos estudados.

## ABSTRACT

The detection of structural damage has received an increasing interest on both academic research and industry application for several decades, including structures such as bridges, transmission lines towers, or even in automotive mechanical fault detection and naval and aviation components. The damage identification in structures by means of dynamic non-destructive tests became an attractive technique, since there was and increase in the measurement accuracy and cost decrease of devices used to perform this task, like accelerometers, data acquisition boards, computers, etc.

Simulated Annealing is a technique that belongs to a class of the so called Heuristic Algorithms used in optimizations (maximizations or minimizations) of large scale problems. This technique does not use gradient evaluations and can be used with functions with several local optima, where it is desired to reach the global optimum. In damage detection, this technique can be used to tune the dynamic behavior of a parametric model with experimental modal results, such as: natural frequencies, modal damping, mode shapes, etc. In this work, the performance of this method in finding and quantificating damage in simple structures is evaluated. Some of the results were compared with another Heuristic technique: the Genetic Algorithm. The importance of uncertainties in the involved experimental parameters was investigated in order to estimate the system accuracy and limitations of the methodology. This approach is important, since the methodology could indicate false damages by virtue of lack of accuracy in the measurements.

A theoretical approach for simple beams was accomplished by the differential equation of motion and a simple model for the crack. This study shows points where damage will not affect some frequencies, regardless of their extent. This is one of the main contributions of this work. The same study was carried experimentally, where there was a perfect agreement with the predicted sites for null interference suggested by the two previous studies, i.e., certain frequencies did not change when those sites where damaged.

Finally it is concluded that the Simulated Annealing Technique has equivalent efficiency as the genetic algorithm, since the performance in detecting damage was similar, checked by the numerical simulations and experimental tests. The difficulties on damage identification lied in damage close to support conditions and damage about 10%, and for these cases, the algorithms did not converge completely. The processing times on both techniques used were similar, for all the studied cases.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações iniciais .....	2
1.2 Justificativa .....	2
1.3 Objetivo .....	3
1.3.1 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Metodologia .....	4
1.5 Organização do Trabalho .....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1 Introdução .....	7
2.2 Técnicas Convencionais de Detecção de Dano Existentes Baseadas nas Características Modais .....	11
2.3 Algoritmos Heurísticos Aplicados a Detecção de Dano .....	15
2.4 Análises Estatísticas Aplicadas a Detecção de Dano .....	18
3. SIMULATED ANNEALING .....	20
3.1 Introdução .....	20
3.2 O Critério de Metrópolis .....	23
3.3 Breve Histórico .....	25
3.4 Aspectos de Construção .....	25
3.5 Exemplos de utilização do Simulated Annealing .....	26
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	29
4.1 Introdução .....	29
4.2 Formulação da equação do movimento .....	29
4.3 Formulação teórica do dano em uma viga bi apoiada .....	34
4.4 Formulação teórica do dano em uma viga engastada livre .....	38
4.5 Relação entre a profundidade de corte e momento de inércia de área .....	42
4.6 Análise de incertezas .....	44

5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS .....	47
5.1 Introdução .....	47
5.2 Programa Simulated Annealing .....	47
5.3 Resultados e comparações para uma viga bi apoiada .....	50
5.4 Comprovação numérica da predição dos lugares onde não ocorre variação de frequência em função do dano.....	53
6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	56
6.1 Introdução .....	56
6.2 Materiais.....	56
6.3 Determinação do Módulo de Elasticidade.....	56
6.4 Ensaio viga engastada livre .....	57
6.5 Redução de Temperatura .....	61
6.6 Comprovação experimental da predição dos lugares onde não ocorre variação de frequência em função do dano.....	62
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
7.1 Conclusões .....	64
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
ANEXOS.....	68



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Valores das médias e covariâncias das propriedades medidas.....	45
Tabela 4.2: Valores de média e desvio padrão para a primeira e segunda frequência.....	46
Tabela 5.1: Valores heurísticos utilizados no algoritmo.....	47
Tabela 5.1: Frequências numéricas para cada condição de dano. ....	51
Tabela 5.2: Variação de frequências numéricas com dano no meio da viga.....	53
Tabela 5.3: Variação de frequências numéricas com danos a um terço de cada extremidade. .	54
Tabela 5.4: Variação de frequências numéricas com dano a 78% da extremidade livre. ....	54
Tabela 5.5: Variação de frequências numéricas com danos a 50% e a 87% da extremidade livre.....	55
Tabela 6.1: Frequências experimentais para cada condição de dano. ....	59
Tabela 6.2: Variação das frequências experimentais (%) para o segundo modo de vibração, em porcentagem.....	63
Tabela 6.3: Variação das frequências experimentais (%) para o terceiro modo de vibração. ..	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de subdivisões das técnicas de detecção de dano. ....	9
Figura 3.1: Estrutura cristalina de um (a) diamante (b) grafite (c) fulereno. ....	21
Figura 3.2: Fluxograma de funcionamento do Algoritmo <i>Simulated Annealing</i> . ....	23
Figura 3.3: Esquemas das variáveis envolvidas na otimização da excitação dos músculos envolvidos em uma pedalada. ....	27
Figura 3.4: Esquema do SA seqüencial (a) e paralelo (b). ....	28
Figura 4.1: Exemplo de uma viga bi apoiada sujeita a força distribuída e peso próprio. ....	30
Figura 4.2: Exemplo de uma viga engastada livre com as trincas representadas por molas torcionais. ....	33
Figura 4.3: Variação da primeira frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (bi-apoiada). ....	36
Figura 4.4: Variação da segunda frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (bi-apoiada). ....	37
Figura 4.5 Variação da terceira frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (bi-apoiada). ....	37
Figura 4.6 Variação da primeira frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (engastada –livre). ....	39
Figura 4.7: Variação da segunda frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (engastada –livre). ....	39
Figura 4.8: Variação da terceira frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (engastada –livre). ....	40
Figura 4.10: Os 3 modos com suas segundas derivadas indicando variação zero de frequência com a inclusão dos danos, para o caso de vigas engastadas livre. ....	42
Figura 4.11: Relação entre redução da inércia da viga danificada em relação a viga sem dano versus a relação entre o comprimento da trinca e a altura da viga. ....	44
Figura 4.12: Distribuição da função de densidade de probabilidade da primeira frequência natural em função da variação relativa da primeira frequência natural da viga. ....	46
Figura 4.13: Distribuição da função densidade de probabilidade da primeira frequência natural em função da variação relativa da segunda frequência natural da viga. ....	46
Figura 5. 1: Esquema em código aberto do algoritmo de SA. ....	49

Figura 5.2: Representação de uma viga bi apoiada utilizada pelos algoritmos de detecção de dano.....	50
Figura 5.3: Gráficos de barra do teste numérico do caso de 5% de dano no elemento 9.....	51
Figura 5.4: Gráficos de barra do teste numérico do caso de 10% de dano no elemento 22.....	52
Figura 5.5: Gráficos de barra do teste numérico do caso de 10% de dano nos elementos 2,16 e 22. ....	52
Figura 6.1: Análise do espectro adquirido no domínio da frequência. ....	57
Figura 6.2: Montagem da viga engastada utilizada nos ensaios.....	58
Figura 6.3: Gráficos de barra do teste experimental do caso de 20% de dano no elemento 6. ....	59
Figura 6.4: Gráficos de barra do teste experimental do caso de 50% de dano no elemento 6. ....	60
Figura 6.5: Gráficos de barra do teste experimental do caso de 70% de dano no elemento 6. ....	60
Figura 6.6: Comportamento da redução de temperatura em função do número de iterações. .	61
Figura A.1: Definição de forças no sistema local de viga de pórtico espacial. ....	79
Figura A.2: Representação do modelo numérico estudado. ....	81
Figura A.3: Desenho da estrutura analisada. ....	82
Figura A.4: Representação da estrutura com o escala de dano encontrado pelo algoritmo. ....	83
Figura A.5: Modelo da ponte de alumínio utilizada para detecção de dano.....	84
Figura A.6: Detalhe do apoio de uma das extremidades. ....	84

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas minúsculas

$a$	Comprimento da trinca [m]
$b$	Largura da viga [m]
$b'$	Largura da viga gerada a partir das incertezas levantadas [m]
$d$	Flecha [m]
$e$	Número Neperiano
$h$	Altura da seção transversal [m]
$i$	Grau de liberdade analisado
$j$	Número de elementos
$m$	Peso por metro da viga [kg/m]
$\bar{m}$	Densidade linear do material [N/m <sup>3</sup> ]
$p$	Probabilidade calculada pela lei de Boltzman
$q_{ij}$	Deslocamento do ponto de medição $j$ em relação ao ponto de referência para o modo $i$
$r$	Número aleatório entre 0 e 1
$t$	Tempo [s]
$x$	Distância horizontal ao longo da viga da extremidade até a trinca
$\mathbf{x}$	Vetor de variáveis de projeto
$y$	Função objetivo, vetor deslocamento, amplitude do pico na frequência natural $i$ do ponto de referência $10$ no espectro do primeiro acelerômetro
$\dot{y}$	Vetor de velocidade [m/s]
$\ddot{y}$	Vetor de aceleração [m/s <sup>2</sup> ]

### Letras romanas maiúsculas

$A_n$	Constantes que definem a forma e amplitude da vibração da viga
$E_{i+1}$	Valor da função de custo na condição posterior
$E_i$	Valor da função de custo na condição anterior

$E$	Módulo de Elasticidade [Pa]
$E'$	Módulo de Elasticidade da viga gerada a partir das incertezas levantadas [m]
$F$	Forças concentradas [N], forças externas [N]
$H$	Comprimento [m]
$I$	Momento de Inércia [m <sup>4</sup> ]
$I_o$	Momento de inércia para o estado sem dano [m <sup>4</sup> ]
$I_d$	Momento de inércia para o estado danificado [m <sup>4</sup> ]
$I_{CD}$	Momento de inércia para o estado danificado, considerando corte dos dois lados
$K$	Constante de Boltzmann (1,381x10 <sup>-23</sup> J/K)
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez [N/m]
$\mathbf{K}_e$	Matriz de rigidez local do elemento $e$ [N/m]
$L$	Comprimento [m]
$L'$	Comprimento da viga gerada a partir das incertezas levantadas [m]
$\mathbf{M}$	Matriz de massa [kg]
$N$	Número de modos utilizados
$T$	Temperatura atual do processo de recozimento simulado
$T_o$	Temperatura inicial do processo de recozimento simulado
$T_f$	Temperatura final do processo de recozimento simulado
$Y(t)$	Amplitude variando no tempo da forma modal [m]
$\dot{Y}(0)$	Velocidade da forma modal no tempo [m/s]
$\ddot{Y}(t)$	Aceleração da forma modal no tempo [m/s <sup>2</sup> ]
$X_{max}$	Valor máximo para uma variável
$X_{min}$	Valor mínimo para uma variável

### Letras gregas minúsculas

$\phi_{ij}$	Fase do espectro instantâneo no ponto de referência $j$ para a frequência natural $i$ dos acelerômetros [rad]
$\phi^{IV}$	Quarta derivada da forma modal
$\phi_{i,j}^A$	Forma modal para o $j$ ésimo modo no ponto $i$ para valores medidos A [m]
$\phi_{i,j}^B$	Forma modal para o $j$ ésimo modo no ponto $i$ para valores teóricos B [m]

$\phi(x)$	Forma modal [m]
	Densidade do material [kg/m <sup>3</sup> ]
'	Densidade da viga gerada a partir das incertezas levantadas [kg/m <sup>3</sup> ]
$m$	Desvio quadrático médio
$\chi$	Parâmetro adicional para a posição da trinca na viga
	Deslocamento perpendicular ao eixo da viga
	Frequência natural não amortecida [rad/s]
$\mu E$	Média dos módulos de elasticidade gerado a partir das incertezas levantadas [Pa]
$\mu b$	Média das larguras geradas a partir das incertezas levantadas [m]
$\mu L$	Média dos comprimentos geradas a partir das incertezas levantadas [m]
$\mu$	Média das densidades geradas a partir das incertezas levantadas [kg/m <sup>3</sup> ]

### Letras gregas maiúsculas

	Varição
$(\mathbf{x})$	Matriz modal do sistema
$\mathbf{T}$	Transposta da matriz modal do sistema
	Matriz que contém os quadrados das frequências naturais
$\Sigma$	Somatório

### Símbolos especiais

$u(\Phi_i)_e$	Deslocamento local da forma modal do elemento $e$
$u(\Phi_i)_e^T$	Transposta do deslocamento local da forma modal do elemento $e$
$sen$	Seno
$senh$	Seno hiperbólico
$cos$	Co-seno
$cosh$	Co-seno hiperbólico
$\partial$	Derivada parcial
$\delta \mathbf{D}$	Vetor de múltiplos danos

$\delta D_m$	Escalar do dano local em um elemento
$\delta D^T$	Transposta do vetor de múltiplos danos
$\delta \mathbf{M}$	Pequena variação na matriz de massa do sistema
$\delta \mathbf{K}$	Pequena variação na matriz de rigidez do sistema
$\delta \mathbf{K}_e$	Variação na matriz de rigidez local do elemento $e$
$\delta \mathbf{K}_m$	Pequena variação na rigidez do elemento $m$
$\delta \omega_i^2$	Variação do quadrado da $i$ -ésima frequência natural [(rad/s) <sup>2</sup> ]
$\delta \omega_{m,i}^2$	Variação do quadrado da $i$ -ésima frequência natural com dano no elemento $m$
$\frac{\delta \omega_{n,i}^2}{\delta \omega_{n,j}^2}$	Relações de variações dos quadrados de frequências
$\delta \Phi$	Pequena variação na matriz modal do sistema
$\delta \Omega$	Variações teóricas dos autovalores
$\delta \Omega$	Pequena variação na matriz que contém os quadrados das frequências naturais
$f$	Variações numéricas das frequências
$\Delta \omega$	Variações experimentais
$\Delta$	Variações experimentais dos quadrados das frequências
$\Delta^T$	Transposta das variações experimentais dos quadrados das frequências
$max(\delta \omega_i)$	Valor máximo das frequências numéricas
$max(\Delta \omega_i)$	Valor máximo das frequências experimentais

## 1. INTRODUÇÃO

Deteção de dano estrutural é um assunto muito estudado em virtude do grau de responsabilidade envolvido na manutenção, deteção de falhas em componentes automotivos, navais, aeronáuticos, etc. Atualmente, muitas das estruturas citadas estão perto do fim da sua vida útil. Os custos desta reposição, associado ao transtorno causado por estas manutenções chegam a altas cifras. Portanto, um sistema de medição de dano e verificação da integridade de estruturas é de grande valia, pois através dele é possível realizar manutenções mais precisas e eficientes.

Os principais objetivos de um sistema de deteção de danos são: fornecer informação sobre o estado da estrutura e detectar potenciais estados de falha, permitindo que medidas corretivas sejam tomadas a tempo de evitar uma catástrofe ou causar maiores perdas financeiras.

Por esta razão, tem-se procurado condições tecnológicas, econômicas e legais que impulsionem o desenvolvimento e emprego de tecnologias para a deteção de dano.

Os EUA gastam cerca de 10 bilhões de dólares com reparos de pontes obsoletas (CHASE [2001] *apud* Carrillo, 2007). Este gasto é justificado em função das inspeções visuais e métodos de deteção local de falhas, o que não garante que estruturas comprometidas sejam integralmente identificadas ou estruturas com pouco dano sejam condenadas, em função da dificuldade em se verificar a severidade de um dano na resistência global da estrutura.

Motivados pela segurança, agências asiáticas começaram a exigir das construtoras a instrumentação das mesmas e a certificação periódica de sua “saúde estrutural”.

O mesmo conceito de deteção em dano de estruturas civis é também empregado em outras estruturas como aeronaves e estruturas petrolíferas, onde a responsabilidade é grande e portanto a monitoração *on-line* da estrutura se faz necessária em virtude dos danos por falha nestes equipamentos.

Os métodos de otimização têm sido largamente usados com êxito neste tipo de problema, porém muito tem se investigado a respeito do desempenho destes métodos, em função das diversas dimensões do problema e dos muitos ótimos locais da função de custo utilizada pelo algoritmo. Através da função de custo, o algoritmo pode encontrar a localização e extensão do dano, em função da comparação das frequências naturais numéricas e experimentais.

Neste contexto de verificação, o *Simulated Annealing* é uma técnica baseada no reconhecimento de materiais como aço e vidro onde se busca um estado de menor energia. É utilizado para otimização (minimização ou maximização) de problemas de larga escala que contenham diversos ótimos locais, onde é necessário encontrar o ótimo global. No caso da deteção de danos, este



método, assim como diversos outros similares encontrados na literatura, pode ser utilizado para encontrar o mínimo de uma função que represente a diferença entre características dinâmicas de uma estrutura real e uma estrutura parametrizada, caracterizando assim o dano.

## 1.1 Considerações iniciais

Diversos métodos de otimização em conjunto com sistemas de detecção de dano têm sido usados com o objetivo de melhorar o desempenho destes sistemas. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do método *Simulated Annealing* nesta aplicação, fazendo uma comparação com algoritmos em relação a tempo de processamento e desempenho do sistema (localização e quantificação do dano). Outra abordagem deste trabalho é o estudo do efeito da incerteza das variáveis envolvidas no processo de determinação de frequências naturais, este estudo se justifica pela possibilidade de previsões de danos falsos em virtude da falta de exatidão do sistema de medição.

## 1.2 Justificativa

Existe uma série de métodos não destrutivos utilizados largamente pela indústria em geral, como líquidos penetrantes, ultra-som, raios X, partículas magnéticas, dentre outras. Todos eles têm eficiência comprovada no meio industrial e científico, sendo que muitos deles detectam defeitos não apenas na superfície das peças e estruturas, mas também no interior das mesmas, como por exemplo, os raios X que é utilizado na inspeção de juntas de solda com elevada responsabilidade.

Uma das desvantagens destes métodos é a obrigatoriedade de acesso a todos os pontos da estrutura, ou pelo menos aos mais propícios a falhas. Nem todas as estruturas são totalmente acessíveis ou mesmo as que são muitas vezes oferecem risco com relação a segurança da pessoa responsável pela inspeção ou mesmo um custo elevado para o acesso a determinadas regiões da estrutura como plataformas petrolíferas.

Neste contexto, fica evidente o sucesso atual das técnicas de detecção de dano via a resposta dinâmica da estrutura. Porém, estes métodos ainda estão em fase de desenvolvimento, e

ainda há muita pesquisa sendo realizada com o objetivo de verificar a robustez de cada método, em relação a sensibilidade a presença de dano em uma estrutura.

Atualmente, não existe um sistema robusto de detecção de dano reconhecido pela comunidade científica como definitivo. Um dos motivos é a necessidade de se ter uma grande quantidade de dados a respeito da estrutura, quase sempre difíceis de serem obtidos experimentalmente com precisão. A utilização de características modais é quase sempre preferível devido à forma não invasiva ou destrutiva com que diversos ensaios podem ser conduzidos. Por esta razão, optou-se neste trabalho por utilizar apenas as frequências naturais para a predição do dano, evitando maiores aparatos experimentais, como os necessários para a aquisição dos modos de vibrações, que exigem cálculos mais complexos e são mais difíceis de serem determinados experimentalmente, além de adicionarem maior incerteza ao sistema de detecção.

No caso de grandes estruturas, diversos trabalhos baseados em modelos paramétricos e na identificação dos parâmetros estruturais têm mostrado certa dificuldade na obtenção dos parâmetros estruturais devido ao grande problema de otimização que se forma. O método *Simulated Annealing* tem a característica principal de apresentar a robustez necessária para estes casos, não ficando confinado a mínimos ou máximos locais em virtude da procura aleatória de pontos mais próximos do ótimo.

Neste trabalho, uma abordagem teórica é feita através da verificação das variações das três primeiras frequências naturais em função da posição e extensão do dano. Este estudo é muito importante para este tipo de análise de identificação de dano, pois dará a ordem de grandeza de variação de frequências, possibilitando assim definir as características do sistema de aquisição necessário para detectar tais variações de frequências e principalmente definindo as limitações da detecção de dano, definindo que em alguns lugares será mais difícil localizar danos ou que de modo geral apenas danos a partir de um limite mínimo serão detectados.

A investigação do método é realizada de forma numérica e experimental, sendo que foram realizados testes em diferentes estruturas com danos com diferentes severidades em diferentes locais.

### 1.3 Objetivo

O objetivo principal desse trabalho é avaliar o desempenho do método de otimização por *Simulated Annealing* na localização e quantificação de danos estruturais, além da verificação dos

efeitos das incertezas envolvidas no processo de medição das variáveis envolvidas na medição das frequências naturais.

### ***1.3.1 Objetivos Específicos***

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Analisar, entender e revisar algumas das técnicas usuais e alternativas de detecção de dano;
- Implementar a técnica de *Simulated Annealing*;
- Comparar os resultados das análises com *Simulated Annealing* com as técnicas clássicas de detecção de dano por variações modais, como sensibilidade modal e algoritmos genéticos, analisando questões como tempo de processamento e determinação de ponto ótimo (localização e quantificação do dano);
- Investigar, por análise experimental, as principais tendências de comportamento estrutural (mudanças de frequências, modos e amplitudes de vibração) quando da presença do dano em diferentes estruturas;
- Validar o sistema proposto (*Simulated Annealing* para detecção de dano) com exemplos de literatura;
- Avaliar as incertezas presentes no sistema e sugerir os limites do sistema (menor dano detectado, danos em várias regiões da viga, por exemplo e regiões de sombra que encobrem danos na vizinhança);
- Verificar teoricamente as variações de frequências em função da localização de um dano;
- Analisar e comentar os exemplos de validação, mostrando as limitações e vantagens do método estudado.

### **1.4 Metodologia**

A metodologia para a condução deste trabalho começa por revisar trabalhos já existentes e conceitos sobre o tema proposto (*Simulated Annealing*) e técnicas de detecção de dano. A avaliação da variação teórica de frequências naturais em função do dano e das incertezas do sistema de medição (importante para a determinação das limitações do sistema) é uma das etapas intermediárias, além da construção das respectivas ferramentas numéricas e finalmente validando o método através de ensaios práticos experimentais de diversas estruturas danificadas.

## 1.5 Organização do Trabalho

O conteúdo desta Dissertação está distribuído em sete capítulos, como descrito abaixo:

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica mostrando as diferenças entre as técnicas usuais de detecção de dano e as técnicas alternativas de detecção de dano por variações modais. É realizada ainda uma revisão geral da fundamentação matemática utilizada nas técnicas de detecção de dano.

No capítulo 3 é realizada uma revisão sobre *Simulated Annealing*, onde se mostra como o método procura os pontos ótimos e as diferenças com relação a outros métodos clássicos de otimização (vantagens e desvantagens).

No capítulo 4, é mostrada a fundamentação matemática do sistema de detecção de dano para simples vigas bi apoiadas e engastada-livres, além da avaliação das incertezas físicas de uma viga bi apoiada no valor das duas primeiras frequências naturais.

O capítulo 5 trata dos ensaios numéricos realizados, bem como a metodologia utilizada e os resultados. A comparação dos resultados é feita com Algoritmos Genéticos. Neste capítulo, uma investigação numérica dos resultados apresentados no capítulo 4 é feita, no sentido de se verificar se os resultados levantados no capítulo anterior são confirmados em uma análise numérica.

No capítulo 6 trata-se dos ensaios experimentais, incluindo material utilizados, metodologia e resultados do SA também comparados com GA. Uma comprovação experimental dos resultados descritos nos 2 capítulos anteriores é feita, com o intuito de investigar até onde os resultados levantados nas abordagens teóricas e numéricas são comprovados em uma experiência real.

As conclusões são apresentadas no capítulo 7, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

Nos apêndices, procurou se descrever assuntos importantes pertinentes ao assunto, porém não ligados diretamente com a detecção de dano propriamente dita.

No apêndice 1, a codificação do programa *simulated annealing* utilizado é apresentada na linguagem FORTRAN. No anexo 2 traz uma resumida explicação de como é resolvido o problema de autovalores e autovetores utilizada na análise de elementos finitos. Nesta análise, os valores das frequências naturais são definidos em função dos danos inseridos na estrutura. O apêndice 3 finaliza o trabalho com o registro das simulações e ensaios mal sucedidos, com a inten-

ção de que outros estudantes não repitam os mesmos erros ou possam planejar melhor seus ensaios.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

A área de avaliação de dano não-destrutivo tem ganhado muita atenção ultimamente em virtude da falência de estruturas de grandes responsabilidades nos últimos tempos, como a ponte que caiu no centro da China, no mês de Agosto de 2007, matando 29 pessoas, fato largamente coberto pela mídia. O governo chinês investiga mais de 6 mil pontes em todo o país, devido o seu estado apresentar possível perigo a sociedade. O acidente interrompeu a estrada que liga o distrito com Daxing gerando grandes prejuízos para as cidades próximas [EFE, 2007].

Existe uma gama de métodos de detecção de dano aplicados para diferentes casos. Este capítulo tem a intenção de localizar e situar o leitor quanto a área de interesse do trabalho, além de dar uma idéia básica dos outros métodos existentes. A figura 2.1 mostra uma visão geral das subáreas gerais da detecção de dano.

Os métodos destrutivos geralmente são utilizados em fábricas que avaliam por amostragem seus produtos. Como o próprio nome propõe a estrutura não pode ser reutilizada, já que será destruída. Por essa razão, tende-se a abandonar ou reduzir o uso deste método, já que ao longo do tempo ele se torna caro em relação a métodos mais inteligentes.

Dentro dos métodos não destrutivos, têm-se basicamente duas divisões: os de acesso local e os que utilizam apenas respostas da estrutura. Os de acesso local tiveram um grande desenvolvimento no século passado, em função da necessidade de verificação de estruturas de responsabilidade, como em auditorias de soldas, onde uma fusão mal feita do material pode gerar cordões com grandes falhas internas, podendo provocar o colapso da estrutura.

Os métodos como líquidos penetrantes detectam apenas defeitos superficiais, como trincas e fissuras, defeitos comuns em caso de fadiga (responsável por 90% das falhas mecânicas) ou falhas provocadas por impactos ou eventos externos. Dentro desta classe, o método que utiliza partículas magnéticas é um dos mais completos, pois aponta para falhas internas do material, em virtude da alteração do campo magnético gerado pela descontinuidade do material na região de defeito. Esta característica também é observada nos métodos que utilizam ultrassom, já que a velocidade aparente da onda é alterada em virtude da falha encontrada no interior ou na superfície no material.

Uma das desvantagens destes métodos citados é o fato de termos obrigatoriamente acesso a todas as regiões da estrutura, fato que além de ser muito dispendiosa, pode não dar a garantia total do estado real da estrutura.

Os métodos baseados na resposta da estrutura, têm a característica de analisar globalmente a integridade da estrutura, através de mudanças nas características da estrutura, sejam ela estáticas ou dinâmicas. A caracterização estática pode ser obtida através da análise de translação ou rotação dos pontos da estrutura. Medidas destas grandezas podem ser tomadas e correlacionadas com aquelas obtidas por uma discretização de um modelo de elementos finitos (MEF) ou através de uma formulação analítica. O inconveniente deste processo é o fato de que esta abordagem não fornece muitas informações a respeito da estrutura, o que dificulta a identificação do dano, principalmente se houver vários danos.

Teoricamente, mudanças no comportamento vibratório da estrutura refletem alterações nos parâmetros físicos e nas condições de serviço e assim, podem ser utilizadas como indicadores de dano. A abordagem do monitoramento das características dinâmicas da estrutura tem uma série de vantagens em relação aos outros métodos, pois é muito mais rica que a resposta estática, no sentido de trazer muito mais informações que a análise estática, o que proporciona maior facilidade de identificação do dano. A identidade dinâmica pode ser representada pelas frequências naturais, modos de vibração, função de resposta em frequência (FRF), amortecimento modal, dentre outras que possam caracterizar o comportamento da estrutura sujeita a cargas dinâmicas. Assim como na abordagem estática, a identificação do dano é feita através da análise da variação da resposta com dano em relação à resposta sem dano. Um fato a ser investigado dentro da área dinâmica, é a exatidão das chamadas característica dinâmicas da estrutura. Incertezas na avaliação experimental das variações destas medidas podem gerar imprecisões na identificação de dano, como erros na localização ou sua quantificação do dano.

Existem ainda técnicas baseadas no monitoramento periódico do comportamento estrutural. A estrutura é monitorada durante um longo tempo, de modo a medir respostas dinâmicas (deslocamentos, velocidades e acelerações) antes de apresentar falha. Essas informações são arquivadas e assim, é possível prever danos na estrutura quando se verificam mudanças significativas de vibrações nos padrões arquivados. Embora seja eficiente, o método é pouco utilizado em função do tempo de observação para o “aprendizado” dos modos de falha. Por essa razão, a utilização de simulações numéricas vem sendo cada vez mais utilizados, porém deve-se observar e avaliar as diferenças existentes entre o modelo numérico e o real.

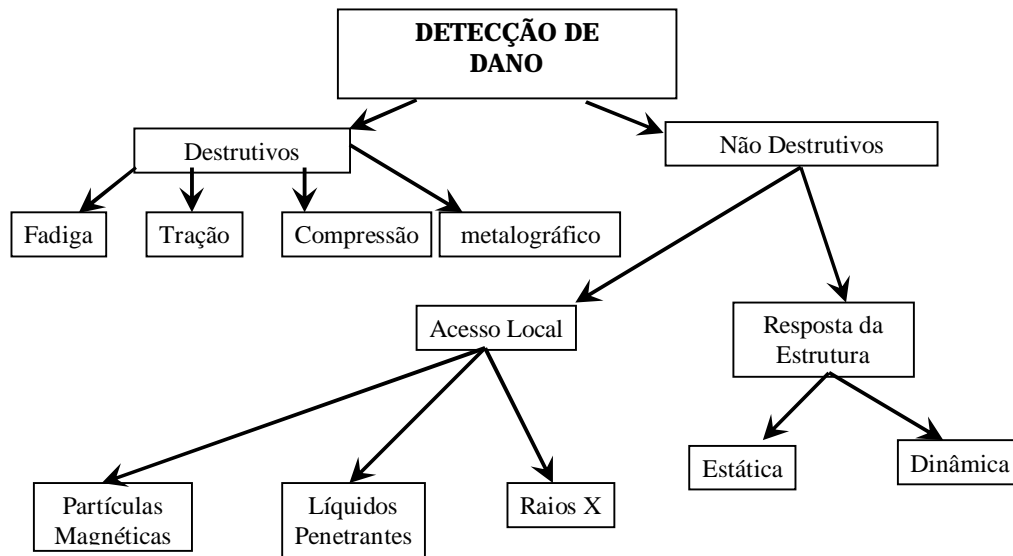


Figura 2.1: Esquema de subdivisões das técnicas de detecção de dano.

Dentro desta subdivisão da detecção de dano, ainda existem outras divisões em função do grau de responsabilidade de estruturas, custos, etc, já que em muitas estruturas não é viável implementar um sistema complexo de detecção de dano, sendo que apenas um sistema simples de monitoramento baseado em um banco de dados pode sugerir a substituição da estrutura em questão.

Rytter [1993] basicamente divide o problema de detecção de dano em quatro níveis:

-1º Nível (localização): o primeiro nível busca saber se a estrutura sofreu algum dano, não informando a gravidade deste dano. Muitas vezes apenas um parâmetro dinâmico é medido (frequência, modo, etc) e comparado com um padrão. Havendo discrepância, o sistema indica dano sem apontar maiores detalhes.

-2º Nível (quantificação): avalia o quanto a estrutura foi avariada, não informando nada a respeito da localização. Desta forma, pode-se condenar a estrutura, adotando-se um limite de dano para determinada estrutura, já que níveis leves de dano não comprometem seriamente a estrutura;

-3º Nível: este nível reúne as características dos dois anteriores, já que informa a localização e quantificação dos possíveis danos. São mais utilizados em estruturas de maior responsabilidade, pois seu custo é mais alto em relação aos anteriores;

-4º Nível: utiliza as informações do nível anterior para o cálculo da vida residual da estrutural. Esta previsão é feita com o estudo da mecânica da fratura linear elástica (MFLE),



fadiga mecânica ou qualquer outro método que consiga prever a vida de estruturas em função do nível e localização de dano.

Neste capítulo, serão abordados alguns métodos de detecção de dano de uma maneira geral. É necessário comentar que muitos métodos não utilizam apenas uma forma de análise estrutural e sim combinam duas formas independentes de previsão de dano. Este fato sugere que apenas um método talvez não seja suficiente para prever o dano de uma forma completa (localização e quantificação do dano) e precisa. Seguindo esta tendência, são utilizadas deformações estáticas como uma maneira simples e de baixo custo de detecção de dano, no entanto, pobres em informações em relação aos modelos dinâmicos, além de apresentarem uma tarefa bastante trabalhosa em estruturas grandes ou complexas.

A caracterização da estrutura em função da resposta dinâmica pode ser realizada através da transformada de Fourier (FFT) de sinais medidos por transdutores (geralmente acelerômetros). Em geral, quanto maior o número de transdutores, melhor será a caracterização da estrutura (identificação dos parâmetros estruturais), por exemplo, em relação aos seus modos de vibração, em relação ao modelo numérico, aumentando assim a semelhança entre modelo e protótipo assim como a robustez na detecção do dano.

Existem muitas literaturas recentes a respeito de detecção de dano, o que sugere que muitas diretrizes a respeito do assunto devem ser verificadas e, portanto, estão distantes de apresentar algum método robusto para compor um procedimento comercial, segundo (Friswell *et al.*, 1997). Pode-se destacar o crescente número de trabalhos que utilizam metodologias “inteligentes” na detecção de dano, como algoritmos genéticos, redes neurais, métodos híbridos, dentre outros. Estes algoritmos são utilizados para a otimização (maximização ou minimização) de uma função de custo específica, montada com as características dinâmicas da estrutura sã e com dano. No caso de se ter metodologias que utilizem modelos paramétricos para ajustar aos protótipos e estes modelos possuam muitos graus de liberdade, esta função de custo tem como característica muitos mínimos e máximos locais, podendo assim dificultar o processo de detecção. Por esta razão, têm-se visto trabalhos na área de detecção de dano testando e comparando métodos de modo a se descrever as vantagens e desvantagens de cada um e responder as clássicas perguntas a respeito do assunto (Stubbs e Gomes [1990] *apud* Doebling *et al.* [1996]):

i) A partir de qual tamanho o defeito pode ser detectado?

ii) O método é robusto quanto ao ruído dos sensores?

iii) Quanto os efeitos do comportamento não linear irá influenciar na exatidão do método?

iv) Quão exato pode ser método para uma estrutura existente e desconhecida *a priori*?

O principal problema é que as respostas para estas perguntas variam em função de uma série de parâmetros, como tipo de estrutura, condições de dano (localização e extensão), propriedades do material e outros comportamentos não previsíveis, como variação das condições de contorno em função de condições de utilização real, como por exemplo, a corrosão de um pino.

## 2.2 Técnicas Convencionais de Detecção de Dano Existentes Baseadas nas Características Modais

As técnicas convencionais de detecção de dano baseadas nas características modais foram as primeiras na abordagem de predição de dano. A partir delas, as técnicas heurísticas e as análises estatísticas (abordadas nos próximos capítulos) puderam consolidar suas bases, com o objetivo de melhorar a resolução da predição de dano e avaliar a robustez dos métodos frente ao ruído oriundos de sensores convencionais. Basicamente, pode-se resumir as técnicas de detecção baseadas em características dinâmicas como uma forma de caracterizar dinamicamente qualquer estrutura e avaliar estas características depois de ocorrido o dano. Através da análise da diferença destas características, é possível determinar o lugar do dano, a extensão do mesmo ou ambos.

Existem três frentes usadas para a caracterização dinâmica:

- (a) O domínio do tempo, onde a variação de velocidade, posição ou aceleração da estrutura é gravada em função do tempo;
- (b) O domínio da frequência, onde é verificada a variação de comportamento da estrutura em função da frequência de trabalho;
- (c) A forma modal, onde é descrito a forma com que a estrutura se move em função da frequência de trabalho (Friswell *et al.*, 1997).

Tanto a análise modal quanto a análise no domínio da frequência são obtidas através da medição de dados ao longo do tempo, através da aplicação da transformada de Fourier (FFT)

no caso do domínio da frequência ou através da resolução da equação diferencial do movimento para o caso do modelo modal (auto valores/vetores da equação de movimento).

O mais comum é avaliar a alteração de frequências naturais e formas modais das estruturas antes e após o dano, em virtude da facilidade de obtenção destes valores. Uma das principais vantagens da utilização do uso de frequências naturais é o fato de necessitar de poucos sensores dispostos na estrutura, pois apenas as formas globais da estrutura são procuradas. A seguir, alguns dos principais trabalhos utilizando técnicas convencionais serão resumidos:

Um dos trabalhos nesta área é o apresentado por Cawley e Adams [1979] e *Carriño* [2007]. Os autores sugerem a localização do dano em uma placa de alumínio através das alterações nas frequências naturais baseado em um modelo MEF (sem considerar amortecimento). A presença de dano é identificada com grande incerteza, tendo em vista o problema da simetria em problemas abordados através de alteração de frequências naturais.

Lieven e Ewins [1988] propõem a utilização de um método de comparação e correlação de formas modais, o COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*). O método correlaciona dois conjuntos de formas modais, obtidos de forma analítica ou experimental, identificando as coordenadas responsáveis pela falta de correlação. A técnica é utilizada para detectar regiões inconsistentes (como por exemplo, regiões com aumento de massa) dentro de uma estrutura com molas e massas com oito graus de liberdade.

Quando dados experimentais de vibração da estrutura estão disponíveis, a correlação entre os dados experimentais e analíticos pode ser feita e assim, detectado o dano, além da possibilidade de verificação da qualidade do modelo. A equação para o cálculo do COMAC pode ser verificada na equação 2.1.

$$COMAC(i) = \frac{\left[ \sum_{j=1}^N \Phi_{i,j}^A \Phi_{i,j}^B \right]^2}{\sum_{j=1}^N (\Phi_{i,j}^A)^2 \sum_{j=1}^N (\Phi_{i,j}^B)^2} \quad (2.1)$$

onde:  $i$ : grau de liberdade analisado;  $j$ : modo analisado;  $N$ : Número total de modos analisados;  $\Phi_{i,j}^A$ : forma modal analítica do  $i$ -ésimo grau de liberdade e no  $j$ -ésimo modo da estrutura;  $\Phi_{i,j}^B$ : forma modal experimental do  $i$ -ésimo grau de liberdade e no  $j$ -ésimo modo da estrutura.

É importante ressaltar que o método é sensível para a detecção de outros tipos de variação na estrutura como massa, não estando apenas limitado a alteração de rigidez da estrutura.

O análogo do COMAC no domínio da frequência é o chamado de FRAC (*Frequency Response Assurance Criterion*) e foi proposto por Heylen e Avitabile [1998] *apud* Carrillo [2007]. O equacionamento do FRAC pode ser verificado na equação 2.2.

$$FRAC(j) = \frac{|H_x(\omega_j)_i * H_a(\omega_j)_i|}{|H_x(\omega_j)_i * H_x(\omega_j)_i| |H_a(\omega_j)_i * H_a(\omega_j)_i|} \quad (2.2)$$

onde:  $H_a(\omega_j)_i$  é: a FRF (Função de Resposta em Frequência) analítica ou numérica calculada no  $i$ -ésimo grau de liberdade;  $H_x(\omega_j)_i$ : vetor de FRFs correspondente (ao grau de liberdade) medido experimentalmente;  $c$ : representa a transposta complexa conjugada.

Messina *et al.* [1998], propõe um trabalho importante na área de detecção de dano, que sugere um critério para identificar a localização de múltiplos locais de dano *MDLAC* (*Multiple Damage Location Assurance Criterion*) para avaliar a correlação entre os valores numéricos de um modelo paramétrico e os resultados experimentais das variações de frequências devido ao dano.

$$MDLAC(\delta \mathbf{D}) = \frac{|\Delta^T \cdot \delta(\delta \mathbf{D})|}{(\Delta^T \cdot \Delta) \cdot [\delta(\delta \mathbf{D})^T \cdot \delta(\delta \mathbf{D})]} \quad (2.3)$$

onde:  $\Delta \Omega$  significa variações experimentais,  $\delta \Omega$  variações teóricas de um modelo paramétrico e  $\delta \mathbf{D}$  significa o vetor de múltiplos danos no modelo paramétrico.

Os índices MDLAC, COMAC e FRAC assumem o valor 1 quando houver completa correlação entre as variações de frequência dos resultados numéricos e os resultados experimentais e 0 para dados não correlacionados.

Os mesmos autores propõem aproximações de 1ª e 2ª ordem para levar em conta relações não lineares entre mudanças de frequências e a extensão e localização do dano. Estas aproximações vêm dos termos de expansão da série de Taylor. A 1ª ordem trata a respeito do primeiro termo da série e a 2ª ordem trata do primeiro termo somado ao segundo. A forma como é desenvolvido a 1ª ordem pode ser visto na equação 2.4.

$$\{\delta f\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial D_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial D_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_p}{\partial D_1} & \dots & \frac{\partial f_p}{\partial D_m} \end{bmatrix} \{\delta D\} \text{ ou } \{\delta f\} = [S] \{\delta D\} \quad (2.4)$$

onde:  $f$  significa as variações numéricas das frequências,  $j$  é o número de elementos da estrutura e  $p$  número de frequências levantadas pelo modelo paramétrico.

Para algumas configurações de dano e principalmente para danos maiores, a primeira ordem começa a apresentar erros na determinação da extensão do dano. Para amenizar este problema, o segundo termo da série de Taylor é desenvolvido (equação 2.5).

$$f_k - f_k^0 = \left\{ \frac{\partial f_k}{\partial D_1} \dots \frac{\partial f_k}{\partial D_m} \right\} \{\delta D\} + \frac{1}{2} \{\delta D\}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_k}{\partial D_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 f_k}{\partial D_1 \partial D_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f_k}{\partial D_m \partial D_1} & \dots & \frac{\partial^2 f_k}{\partial D_m^2} \end{bmatrix} \{\delta D\} \text{ ou} \quad (2.5)$$

$$f_k = f_k^0 + \{S_k\} \{\delta D\} + \frac{1}{2} \{\delta D\}^T [H_k] \{\delta D\} \quad \text{com } k=1, \dots, p$$

Onde os termos de derivada segunda, definida como a matriz Hessiana  $[H_k]$ , são definidos pela (equação 2.6).

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^2 f_k}{\partial D_i \partial D_j} &= \sum_{r=1}^n (f_k^0 - f_r^0) \beta(j)_{kr} [\beta(j)_{kr} - \beta(j)_{rk}] \\ \text{onde } \beta(j)_{rk} &= \frac{\{\phi_r^0\}^T [K_j] \{\phi_k^0\}}{(f_k^0 - f_r^0)} \end{aligned} \right. \quad (2.6)$$

Estas aproximações são importantes, pois podem substituir a utilização do método de elementos finitos, a parte mais custosa do processo de detecção de dano utilizando algoritmos heurísticos. Para estas avaliações, é necessário levantar apenas uma vez as matrizes  $S$  e  $H$  da estrutura estudada.

Sanayei e Onipede *apud* Doebling *et al.* [1996] apresentaram uma técnica para atualização das características de rigidez de um modelo de elementos finitos usando os resultados de um teste estático de carga-deslocamento. Um parâmetro de atualização de método baseado na sensibilidade do nível do elemento é usado para minimizar o erro entre as forças aplicadas e as forças produzidas pela aplicação de deslocamentos medidos na matriz de rigidez do modelo. A matriz de sensibilidade é computada analiticamente. Os graus de liberdade da estrutura são

separados de forma que a localização da carga aplicada e a localização dos deslocamentos medidos são completamente independentes. A técnica é mostrada em dois exemplos de elementos finitos.

Iturrioz *et al.* [1999] propôs a utilização do índice *Co-ordinate Modal Assurance Criterion* - COMAC com algumas alterações em relação ao método convencional para determinar a magnitude e a posição de danos em duas estruturas, usando como método de análise um modelo de elementos finitos. A primeira estrutura analisada consiste em uma viga simplesmente apoiada onde foram simulados diversos danos nos elementos, um de cada vez, por redução do módulo de elasticidade, onde o índice COMAC obteve um bom desempenho para avaliar a posição do dano. A segunda estrutura analisada foi uma típica estrutura de concreto armado de um estádio de futebol. Considerando que a estrutura foi modelada com poucos elementos e a redução de rigidez pequena pode-se afirmar que os resultados foram aceitáveis. O uso dos graus de liberdade de rotação para obtenção dos modos de vibração conduziu a uma precisão maior dos resultados.

### **2.3 Algoritmos Heurísticos Aplicados a Detecção de Dano**

Os trabalhos recentes têm cada vez mais trazido o conceito da abordagem do problema de detecção de dano através de algoritmos heurísticos. Estes métodos, têm sido investigados neste tipo de problema em virtude dos diversos mínimos locais existentes, onde os típicos métodos de otimização baseados em gradientes ficam presos. Daí a necessidade de verificação do desempenho de diversos métodos, atentando para suas vantagens e desvantagens ao tratar o problema.

Interessante ressaltar que muitos trabalhos já mesclam duas metodologias diferentes, na tentativa de compensar as desvantagens de um método com as vantagens de outros, originando um algoritmo híbrido.

A idéia de identificação do dano em função das alterações de características dinâmicas é a mesma utilizada nas técnicas convencionais. A diferença está na forma como estas alterações são avaliadas, pois, nessa abordagem, uma função é otimizada de modo a se buscar em um modelo discretizado da estrutura as mesmas características dinâmicas medidas, identificando o dano.

Alguns dos principais trabalhos que abordam o problema de detecção de dano com algoritmos heurísticos são descritos a seguir.

Os primeiros trabalhos onde se usou algoritmos heurísticos como sistema de procura de danos foram investigações feitas com rede neural, como o sistema sugerido por Spillman *et al.* *apud* Doebling *et al.* [1996]. Neste trabalho, uma rede neural de retro propagação é utilizada para identificar experimentalmente danos num elemento de uma ponte de aço. O elemento tinha um comprimento de aproximadamente 4,5m. O dano foi introduzido cortando o elemento e colocando em cima do corte como reforço uma placa aparafusada. Com a placa de reforço totalmente apertada o elemento é considerado sem dano. Se a placa de reforço estiver parcialmente apertada o elemento é considerado parcialmente danificado e sem a placa de reforço o elemento é considerado totalmente danificado. Foram usados como sensores dois acelerômetros e um sensor modal de fibra óptica. A viga foi excitada em quatro locais diferentes com um impacto calibrado, ou seja, uma massa fixa liberado por uma altura determinada. Foi realizado um total de onze testes. Do sinal de cada sensor foi realizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e as frequências dos picos dos dois primeiros modos foram usadas como entrada para a rede neural. A intensidade do impacto e a sua localização também foram usadas como entrada para a rede neural. A configuração da rede foi então selecionada com quatorze entradas, vinte camadas ocultas de neurônios e três saídas, uma para cada estado de dano. O corpo de dados de treino foi repetido no algoritmo até que atingisse a convergência que geralmente foi menos de cem épocas de treinamento. Uma outra rede foi treinada para identificar se o sensor de fibra óptica estava fornecendo alguma informação coerente. Os resultados foram moderadamente satisfatórios. Usando os três sensores os autores chegaram à proporção de 58% de diagnósticos corretos. Os autores creditam esse número ao pequeno número de dados de treinamento.

He e Hwang [2006] propõem a utilização da análise dinâmica em conjunto com análise estática para avaliação em vigas simples com diferentes condições de dano. A análise dinâmica é feita com um algoritmo denominado de RGA (*Real-parameter Genetic Algorithm*). Trata-se de um algoritmo híbrido que utiliza genéticos com *Simulated Annealing (SA)* internamente para tratamento das variáveis com um programa de elementos finitos, no caso ANSYS. A versão de SA vem de encontro com o problema de codificação dos genes dos indivíduos da população em variáveis reais e vice-versa, que deve ser realizado cada vez que o programa de elementos finitos é chamado. Neste trabalho é reportado que esta operação é muito custosa computacionalmente, assim o SA manipula diretamente as variáveis, além de

fazer as chamadas do software de elementos finitos. O trabalho mostra uma robusta forma de detecção de dano com dados teóricos (numéricos) de modo que os danos foram encontrados precisamente em todos os casos onde não foram incluídos ruído nos sensores. Ao ser acrescentado ruído as variáveis, o sistema apresenta um erro médio de aproximadamente 15%.

Gádea [2002] sugere a utilização de um método indireto e iterativo denominado *Goal Programming* (SID-G). Trata-se de uma técnica de otimização não linear baseada na minimização do erro entre as FRF (Funções de Resposta em Frequência) e as frequências numéricas calculadas por um software de elementos finitos. O trabalho traz um enriquecimento em relação à análise numérica, já que são consideradas as rotações dos nós no modelo e não apenas as translações, como de costume. Foram desenvolvidas simulações numéricas em estruturas simples e em um modelo de plataforma de petróleo para averiguar a eficiência do método. Os resultados indicam que o método é eficiente, desde que os danos estejam contidos no conjunto de variáveis utilizadas no processo de otimização.

Silva [2006] utilizou o método dos algoritmos genéticos para a avaliação de danos em vigas estruturais utilizando o princípio de mudanças na frequência natural das vigas com o aparecimento de danos na estrutura. O método foi avaliado com quatro exemplos de estruturas de materiais diferentes (vigas de alumínio e aço e um pórtico de concreto), com danos simulados experimentalmente e numericamente. O método se mostrou mais eficiente que os métodos de sensibilidade modal, sendo mais eficiente na localização que na quantificação dos danos no caso das estruturas estudadas. A função de custo sugerida por Silva, é mostrada na equação 2.7.

$$f(\delta\mathbf{D}) = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^N \left( \frac{\delta\omega_j(\delta\mathbf{D})}{\max(\delta\omega_j)} - \frac{\Delta\omega_j}{\max(\Delta\omega_j)} \right)^2} \quad (2.7)$$

Essa função de custos apresenta algumas características interessantes, como a normalização dos vetores de dano. Com esse procedimento, podem-se admitir diferenças entre o modelo paramétrico e o experimental, já que o que é efetivamente comparado é um número adimensional, desde que a relação entre eles seja a mesma.

Carrillo [2007] avaliou o desempenho de um programa híbrido que utiliza PSO (Particle Swarm Optimization) em conjunto com o método Simplex e o método SA (*Simulated Annealing*) para a otimização de função clássicas descritas na literatura de detecção de dano, co-



mo a função de Rosenbrock e função de Venter e Sobieszczanski-Sobieski, além de exemplos como treliças simples e vigas. A avaliação numérica demonstrou que o algoritmo híbrido, apresentou melhor precisão e robustez que o SA, inclusive quando avaliado com ruído numérico, porém menciona que o SA fornece resultados acurados quando comparado com as técnicas convencionais de otimização. O fato que prejudicou o desempenho do SA frente ao PSO foi a maior necessidade de avaliação da função objetivo, fato possivelmente resolvido através da paralelização do programa. Porém como não foram avaliados informações de sensores reais, nada se pode afirmar com relação ao desempenho destes métodos em relação a casos reais.

Um outro sistema híbrido chamado de ASAGA (*Adaptive Simulated Annealing Genetic Algorithm*) é sugerido por Jeong *et al.* [1996], onde os métodos SA e GA são combinados de forma que um tende a compensar os pontos fracos do outro. GA tem dificuldade em sair de mínimos locais, já que muitas vezes é necessária uma população grande para cobrir todo espaço de procura. O método SA tem por principal característica a habilidade de sair com facilidade de ótimos locais, porém com grande tempo de convergência. A combinação tende a acelerar o processo de procura do SA através de uma curva de resfriamento adaptativa, ou seja, a curva pode mudar de acordo com o desempenho do método. Um exemplo discreto de identificação de dano mostra que o método híbrido é mais eficiente que os métodos GA puros e que os baseados em gradientes, além de ter acelerado o processo de procura do método SA, sem comprometer sua eficiência.

## 2.4 Análises Estatísticas Aplicadas a Detecção de Dano

Ultimamente, muitos trabalhos estatísticos têm sido publicados na detecção de dano. O objetivo é avaliar a robustez dos métodos usuais com a introdução de incertezas nas propriedades dinâmicas das estruturas. Essas incertezas são geradas por vários fatores, como ruído do sinal medido (impulsos elétricos geralmente gerados por acelerômetros para a avaliação das propriedades dinâmicas), variações nas condições de contorno, comportamento não linear de estruturas (comportamento vibratório de uma viga que contém uma trinca, por exemplo) e a falta de uniformidade de propriedades físicas de materiais, fato que frequentemente ocorre no ramo da construção civil. Todas essas imprecisões citadas referem-se às deficiências que todos os métodos encontram, já que todos se referem à imprecisões ligadas ao mundo físico. Existem também as incertezas numéricas, como a imprecisão das hipóteses adotadas pelo do programa

de elementos finitos e do sistema de otimização utilizado para tratar as propriedades dinâmicas do problema.

Como já citado anteriormente, a maioria dos trabalhos utilizam as características dinâmicas como frequências naturais ou modos de vibração. Segundo Friswell *et al.* [1997], a resolução típica para o cálculo de frequências naturais é da ordem de 0,1% e para obtenção de formas modais é da ordem de 10% ou mais. A situação é mais agravante para trabalhos onde as formas modais são utilizadas, pois além de serem obtidas com maior incerteza, são relativamente também insensíveis a pequenos danos. Por outro lado, a avaliação de dano utilizando frequências naturais pode encontrar problemas na localização de dano em estruturas simétricas, já que o mesmo dano em regiões simétricas provoca a mesma alteração nas frequências de ressonância. Todas estas incertezas geram diferenças na avaliação do dano, daí a abordagem estatística para avaliar a influência desses fatores na eficiência de cada método estudado.

Dentro desta linha, pode-se destacar o trabalho de Xia *et al.* [2003] que através da simulação de Monte Carlo provoca variações nas propriedades físicas de uma viga ensaiada numericamente. Em um primeiro estágio são verificadas as variações no programa MEF em função da variação estatísticas das propriedades utilizadas para a discretização da estrutura e das frequências medidas da estrutura sem dano. Com isso, podem-se levantar os valores médios e os desvios padrão das propriedades dinâmicas geradas pelo programa. Em um segundo passo, é tomado em conta a variação das medidas das frequências naturais medidas da estrutura com dano. Todas as variáveis são tomadas como tendo uma distribuição Lognormal. A probabilidade de existência de dano pode ser estimada comparando-se as distribuições de probabilidade das variáveis levantadas, sendo que ao invés de se apontar a localização do dano, apenas se apresenta a possibilidade de dano em cada elemento da estrutura. Este é um dos poucos trabalhos que aborda as incertezas de todo o problema, não concentrando as apenas na análise numérica (MEF) ou no ruído do sinal medido das aquisições de dados.

### 3. SIMULATED ANNEALING

#### 3.1 Introdução

O *Simulated Annealing* (SA) é um método heurístico baseado na mecânica estatística. Assim como Algoritmos genéticos (AG), *Particle Swarm Optimization* (PSO), dentre outros o método tem origem a partir de um processo natural, que utiliza essencialmente o processo aleatório como forma de evolução. Esse processo, em tese, garantiu a evolução em todos os aspectos da vida terrestre, na qual os seres desprovidos de aptidão para o ambiente possuem menor possibilidade de sobreviver, conforme descreve Charles Darwin em seu livro *A Origem das Espécies*. Daí a importância de se estudar a natureza e entender seu progresso na intimidade, pois muitos problemas de engenharia e até mesmo matemáticos foram solucionados apenas pela cópia de alguns processos naturais, mostrando nossa pequenez diante de uma complexa e porque não dizer, inteligente natureza.

A rigor, um algoritmo heurístico não é um algoritmo que tem a garantia de encontrar uma solução ótima, porém, tem a capacidade de encontrar soluções quase ótimas ou ótimas de forma rápida quando comparadas a métodos de busca exaustiva. Estes métodos são utilizados quando os algoritmos (clássicos) não apresentam bom desempenho, principalmente pelo fato de ficar presos em mínimos locais, já que os métodos clássicos utilizam procedimentos baseado em gradientes (derivadas).

Felizmente, alguns resultados teóricos sobre a prova de convergência do Método de Simulated Annealing em encontrar ótimos globais têm sido publicados, como Laarhoven e Aarts [1987] *apud* Carrillo [2007] que mostraram a convergência do SA para resultados teóricos e Locatelli [2000] *apud* Carrillo [2007] que provou a convergência do SA para problemas de otimização com variáveis contínuas.

O método Simulated Annealing, ou recozimento simulado, tem sua origem na termodinâmica. O recozimento tem a finalidade de reduzir ao máximo possível a energia do material de forma a se ter um cristal o mais organizado possível. Esse processo é realizado reduzindo-se a temperatura de forma lenta e gradual, possibilitando assim, que as moléculas possam se estabilizar em estados de mínima energia, formando um único cristal. Assim, a essência do processo é o resfriamento lento da mistura (geralmente empregado em aços e em vidros) permitindo tempo suficiente para que as moléculas possam se redistribuir gradualmente à medida que perdem mobilidade, atingindo um estado de menor energia e conseqüentemente aumentan-

do a capacidade de absorver energia (tenacidade). A figura 3.1 mostra exemplos de estruturas regulares, assim como as formas procuradas pelo processo do recozimento.

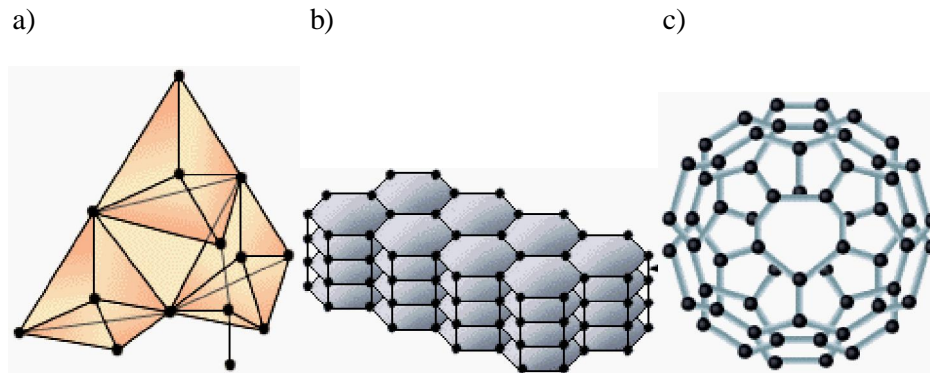


Figura 3.1: Estrutura cristalina de um (a) diamante (b) grafite (c) fulereno.

A contrapartida numérica da técnica é indicada para otimização (minimização ou maximização) de sistemas que apresentem vários mínimos locais, além de várias dimensões (variáveis a serem otimizadas), como na detecção de dano. A grande vantagem do método em termos de otimização é conter em sua formulação um tratamento estatístico de controle das variáveis, ou seja, o método aceita como ótimo, combinações de variáveis com propriedades inferiores a outros já encontrados. Esta característica é baseada na lei de Boltzman, que define a probabilidade de uma molécula ter uma energia superior a que deveria ter em função da temperatura do sistema. Mais detalhes da utilização da lei de Boltzman serão abordados na próxima seção, Critério de Metrópolis. O equacionamento da lei de Boltzman pode ser verificado na equação 3.1, que fornece a probabilidade ( $p$ ) de aceitação de um determinado estado energético ou configuração das moléculas.

$$p = e^{\left(\frac{\Delta E}{K \cdot T}\right)} \quad (3.1)$$

onde:  $E_1 - E_2 = \Delta E$  é a diferença de energia entre duas configurações sendo uma delas a perturbada (em Joules);  $T$  a temperatura em graus Kelvin;  $K$ : constante de Boltzman ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K).

Esta probabilidade é calculada cada vez que a configuração do arranjo molecular posterior possuir energia inferiores em relação a configuração do arranjo molecular anteriormente tido como ótimo. Este é o grande diferencial do método, pois permite a saída de mínimos lo-

cais e a possível investigação de “regiões” com pequena probabilidade de mínimos, já que para chegar até eles, é preciso passar por “zonas” menos favorecidas.

O método tem sido cada vez mais usado não apenas pelas vantagens citadas, mas também pela simplicidade do mesmo, como pode ser melhor observado pelo fluxograma indicado na figura 3.2, para o caso da minimização de um problema.

A convergência é alcançada quando um número suficientemente grande de avaliações é realizada sem que o ponto ótimo seja alterado ou quando o critério baseado na diminuição da temperatura é atingido.

Um dos possíveis inconvenientes desta técnica pode ser o tempo de procura pelo ponto ótimo, já que a temperatura (grandeza que representa a variável a ser “varrida”) deve ser reduzida lentamente para o correto funcionamento do método. Para a resolução deste problema, vários autores propõem formas diversas de redução da temperatura em função das características do problema a ser abordado pelo método, fato que será investigado neste trabalho.

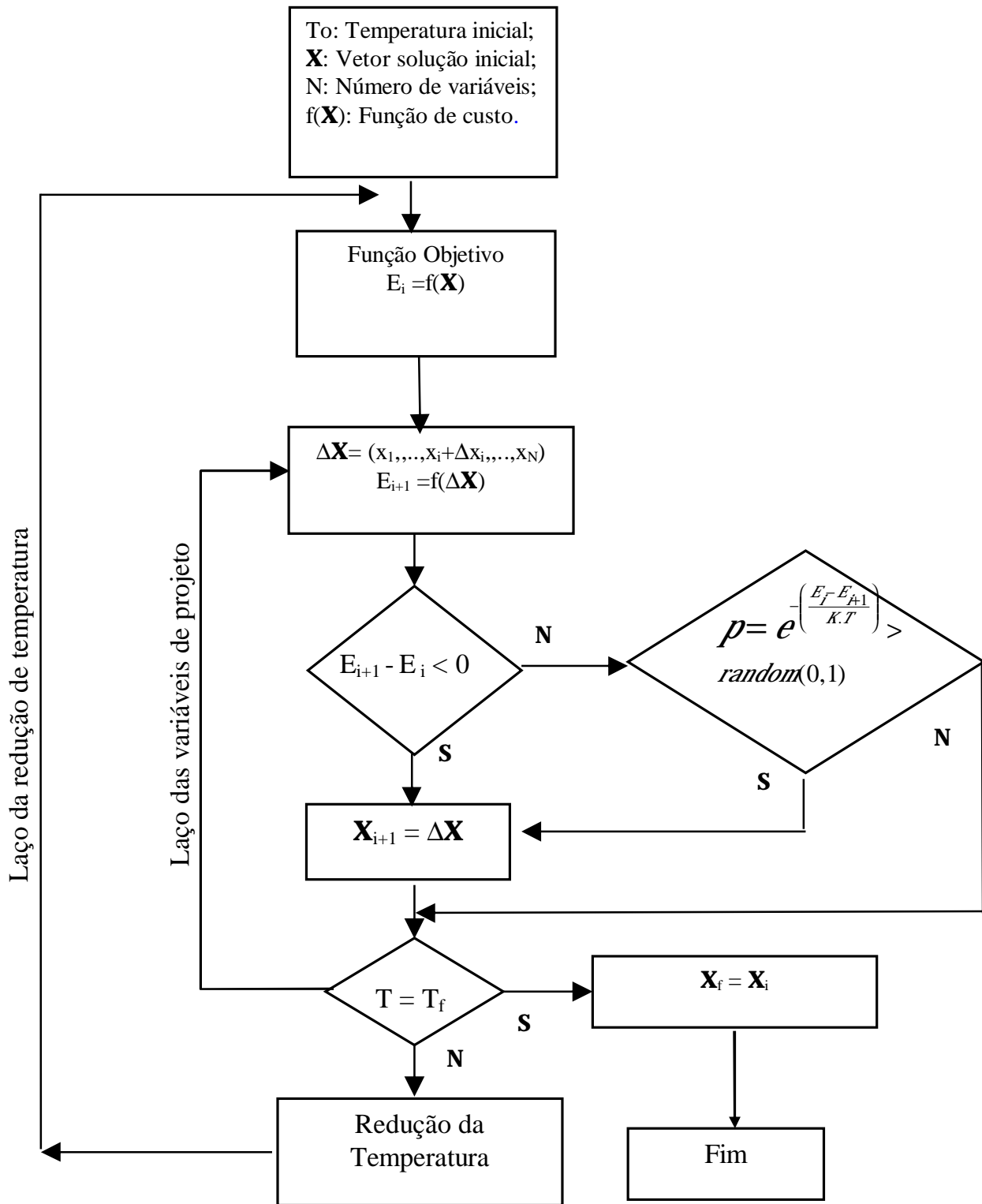


Figura 3.2: Fluxograma de funcionamento do Algoritmo *Simulated Annealing*.

### 3.2 O Critério de Metrópolis

O critério de Metrópolis é a parte principal do método. É este algoritmo que permite com que o método possa sair dos mínimos locais em busca dos mínimos globais (no caso da minimização de funções). Trata-se de uma comparação entre números aleatórios entre 0 e 1 e a probabilidade do arranjo da molécula trocar de certo nível de energia na temperatura atual do algoritmo, dada pela lei de Boltzman (Equação 3.2).

$$Prob(E_{i+1} > E_i) = e^{\left(\frac{\Delta E}{K.T}\right)} \quad (3.2)$$

onde:  $K$ : constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K);  $\Delta E$ : ( $E_i - E_{i+1}$ ) é a diferença de Energia da molécula nas configurações anterior ( $E_i$ ) e posterior ( $E_{i+1}$ ) para a temperatura  $T$ .

A constante  $K$  garante a relação de proporção entre a temperatura e a energia. Nos exemplos práticos de aplicação do método, a constante funciona como uma constante de proporcionalidade entre as variáveis, sendo que pode até ser retirada se as variáveis já são naturalmente proporcionais.

Este critério pressupõe a presença de dois níveis energéticos um anterior ( $E_i$ ) e outro posterior ( $E_{i+1}$ ), sendo este último obtido através de pequenas perturbações aplicadas à configuração da molécula na sua situação anterior. Caso o nível posterior tenha menor energia o critério não necessita ser aplicado, sendo esta configuração aceita como de menor energia. Caso contrário ( $\Delta E < 0$ ), o critério é aplicado.

Quando a probabilidade (calculada através da Equação 3.3) for maior ou igual a um número aleatório entre 0 e 1, o critério de Metrópolis indicará 1 e a configuração da molécula é considerada como provável de ocorrer, independente de ter uma energia maior que a configuração anterior. Quando a probabilidade calculada for menor que o número sorteado, o critério indicará 0 e a configuração da molécula é considerada como não provável de ocorrer e portanto a configuração anterior é mantida como sendo a de menor energia. O funcionamento deste critério pode ser melhor visualizado na equação 3.3.

$$p = e^{-\left(\frac{\Delta E}{K.T}\right)} \begin{cases} \text{aceita-se se } p > r \\ \text{rejeita-se se } p \leq r \end{cases} \quad (3.3)$$

$$r = \text{random}(0,1)$$

onde:  $r$  é um número aleatório entre 0 e 1;  $E$ : diferença de energia entre um estado e outro consecutivo.

Através da equação 3.3, pode se verificar o fato do critério aceitar mais pontos quando a temperatura é alta, o que possibilita que o método verifique possíveis pontos (configurações)

ótimos em todo o espaço amostral. Conforme a temperatura vai caindo, a probabilidade vai caindo também, de modo a ficar menos provável a aceitação de pontos piores que os já encontrados como ótimo, fato que garante a convergência do método.

### 3.3 Breve Histórico

Proposto em 1982 e publicado em 1983, o método sugerido por três pesquisadores da IBM (Kirkpatrick *et al.*, 1983) foi inspirado na analogia de fenômenos físicos para a resolução de problemas de otimização, tendo em vista que na natureza muitos processos são otimizados sem a intervenção humana. O primeiro exemplo foi a abordagem do problema de determinação de layout de circuitos eletrônicos, onde a disposição de componentes determina as trilhas a serem feitas na placa com o objetivo de ligar os componentes. Neste último caso, o método tem como objetivo de ordenar os componentes de modo a minimizar o comprimento das ligações entre eles, reduzindo assim o custo.

O método ganhou destaque por evitar ótimos locais e buscar ótimos globais iterativamente. Um trabalho parecido foi desenvolvido ao mesmo tempo por (Cerny, 1985).

Desde a época da sua descoberta, o SA tem provado ser eficiente em muitos problemas de ordem combinatorial, como o clássico problema do caixeiro viajante que deve percorrer várias cidades para entregar mercadorias, dentre outros.

### 3.4 Aspectos de Construção

Na construção de algoritmos SA é importante a observação de vários parâmetros existentes na técnica, como descritos a seguir:

- § Temperatura inicial ( $T_0$ ): deve ser alta suficiente para que no início da procura a maioria dos pontos (configurações das variáveis de projeto) sejam aceitos ou eventualmente todos eles. Do ponto de vista prático, é necessário um conhecimento do comportamento (ou pelo menos dos limites) da função objetivo. Não havendo este conhecimento, podem se fazer algumas tentativas de executar o algoritmo com alguns valores teste. A taxa de aceitação de subidas ou descidas da função de custo entre 40% e 60% indica que o algoritmo está fazendo procuras além de uma região local. Um alto valor desta variável pode ser eficiente no sentido do acerto do ponto ótimo, tendo como desvanta-



gem um custo computacional maior. De forma recíproca, quando este valor é tomado demasiado pequeno, onde o algoritmo pode não fazer procuras mais abrangentes, os custos podem ser menores e os resultados piores;

- § Temperatura final ( $T_f$ ): Teoricamente a temperatura final seria zero, mas na prática, a parada deve ocorrer quando a probabilidade de haver aumentos na função de custo for próxima de zero;
- § Redução da temperatura: o critério de redução da temperatura é um dos mais importantes do método, pois deve ser suficientemente lento para possibilitar ascensões na curva da função objetivo (no caso de minimizações) e rápido o suficiente para não aumentar demasiadamente o tempo de procura do algoritmo por pontos máximos. É necessário decidir cuidadosamente esta curva de decréscimo para que o método possa ser eficiente sem se tornar muito custoso e demorado;
- § Fator de convergência: fator que garante a convergência do método. Se a diferença entre certo número de avaliações (neste trabalho foi adotado 4) da função de custo for menor que este fator, o ponto é considerado ótimo e o algoritmo pára.
- § Perturbação das variáveis: o passo de perturbação das variáveis, ou seja, o valor que incrementa as variáveis do problema pode ser variável ou fixo. O passo variável varia de acordo com o número de aceitações desfavoráveis do método. Se o número de aceitações for acima de uma constante, o passo tende a aumentar para que o sistema procure o ponto ótimo em regiões diferentes das atuais, aumentando a possibilidade de encontrar um ponto com características melhores que o anterior, escapando de possíveis ótimos locais;
- § Número máximo de iterações: este parâmetro depende dos fatores anteriores e tem a função de reduzir ou limitar o tempo de processamento.

### 3.5 Exemplos de utilização do *Simulated Annealing*

Além dos exemplos citados anteriormente, o *Simulated Annealing* tem sido empregado nos mais diferentes tipos de problema como problemas biológicos, mecânicos, etc., mostrando a habilidade do método estatístico em tratar os mais diferentes tipos de problemas.

Higginson, J. S [2004], sugere a utilização do método para a otimização da excitação em músculos esqueléticos relacionados a uma pedalada (foram analisados apenas os músculos de uma perna, sendo adotado a outra perna como simétrica na pedalada). Em seu artigo ele

descreve que são nove os músculos analisados simultaneamente, onde cada um tem 3 variáveis intrínsecas que são a magnitude, a duração do movimento e o tipo de excitação, totalizando 27 variáveis. O critério de desempenho foi formulado para minimizar a soma dos quadrados da diferença entre as forças das pedaladas simuladas e experimentais. A força simulada da pedalada foi calculada de acordo com o critério das propriedades musculares de Hill. A Figura 3.3 mostra o esquema dos músculos analisados.

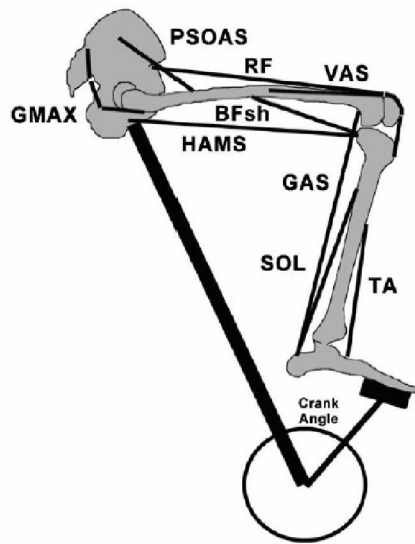


Figura 3.3: Esquemas das variáveis envolvidas na otimização da excitação dos músculos envolvidos em uma pedalada.

O problema proposto foi avaliado com a utilização do SA convencional e do SPAN (*Simulated Parallel Annealing within a Neighborhood*), uma espécie de método de paralelização do método SA para a redução do tempo de procura da solução ótima. A paralelização foi avaliada com 1,2,4,8,16 e 32 processadores. Todas as configurações encontraram a mesma solução, sendo que a velocidade foi linearmente inversa à quantidade de processadores, indicando a robustez para o problema proposto e a possibilidade de resolução de um complexo problema em todos os métodos de otimização que é o alto custo computacional. A comparação entre o esquema convencional e o método paralelizado proposto pode ser verificado na figura 3.4.

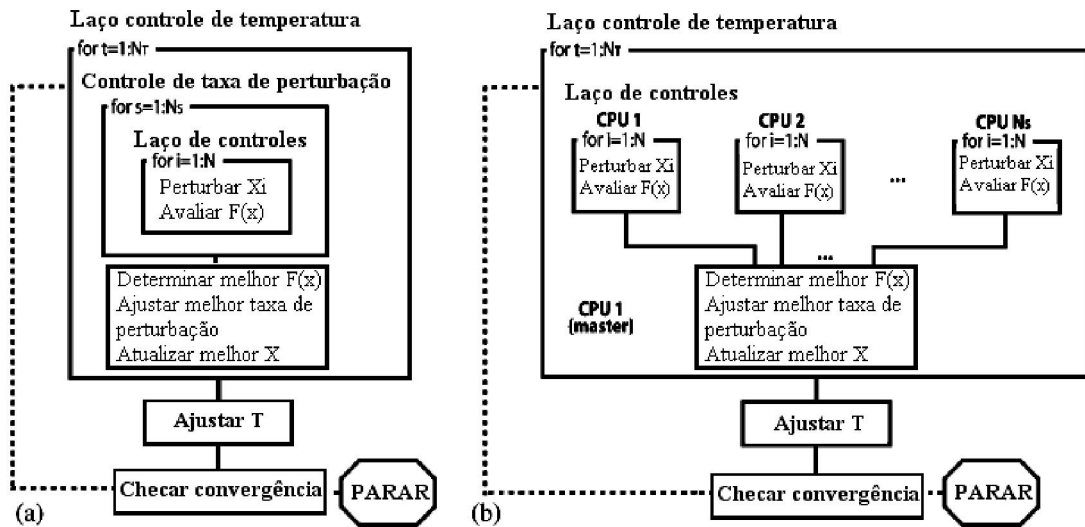


Figura 3.4: Esquema do SA seqüencial (a) e paralelo (b).

Na esteira dos problemas de otimização em biomecânica, o SA tem sido aplicado com efetividade em estudos do andar, corridas, pedaladas (Neptune *et al.*, 2001 *apud* Kigginson J.S. *et al.*), implantes de joelhos (Mahfouz *et al.*, 2003 *apud* Kigginson J.S. *et al.*), registro de imagens médicas (Matsopoulos *et al.*, 2003 *apud* Kigginson J.S. *et al.*) e análise cinemática de implantes de juntas (Sarojak *et al.*, 1999 *apud* Kigginson J.S. *et al.*).

Em uma outra aplicação de SA, Hasañebi, O. e Erbatur, F. [2002] propõem a utilização do SA para a otimização de treliças simples considerando o peso, área da seção transversal, forma e disposição das vigas como variáveis do processo. Para a escolha da forma, existe uma lista pré-definida dos perfis comerciais a serem escolhidos. Quando uma viga apresenta área zero, esta é automaticamente retirada do conjunto existente, alterando a disposição das vigas na treliça.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Introdução

É possível através da formulação teórica, introduzir uma descontinuidade (dano) no equacionamento do comportamento dinâmico de uma estrutura. A seguir serão mostrados os desenvolvimentos deste equacionamento para uma viga bi apoiada e para uma viga engastada livre. Essa análise possibilita saber a alteração teórica de frequência em função da localização e da fissura da viga para casos particulares de vigas, além de prever o desempenho do sistema de aquisição de dados utilizado, já que este, muitas vezes, é um gargalo na obtenção da mínima incerteza do sistema, pois em algumas ocasiões as variações de frequência são sutis o suficiente para passarem despercebidas pelo sistema de aquisição, provocando erros na previsão da falha.

### 4.2 Formulação da equação do movimento para um modelo contínuo

A figura 4.2.1 mostra uma típica viga sujeita aos esforços causados pelo peso próprio, uma força arbitrária ( $p$ ) dependente do tempo e da posição em  $x$  em uma parte infinitesimal desta mesma viga. A partir deste pedaço infinitesimal, pode se prever o comportamento dinâmico de cada região da viga, o que será essencial nas próximas seções onde usa se a variação destas características como forma de previsão de dano, Clough, *et al.* 1975.

Utilizando a hipótese de Euler-Bernoulli (seções planas permanecem planas e perpendiculares ao eixo da viga), juntamente com a hipótese de linearidade geométricas, pode-se obter as equações de comportamento vibracional de uma viga.

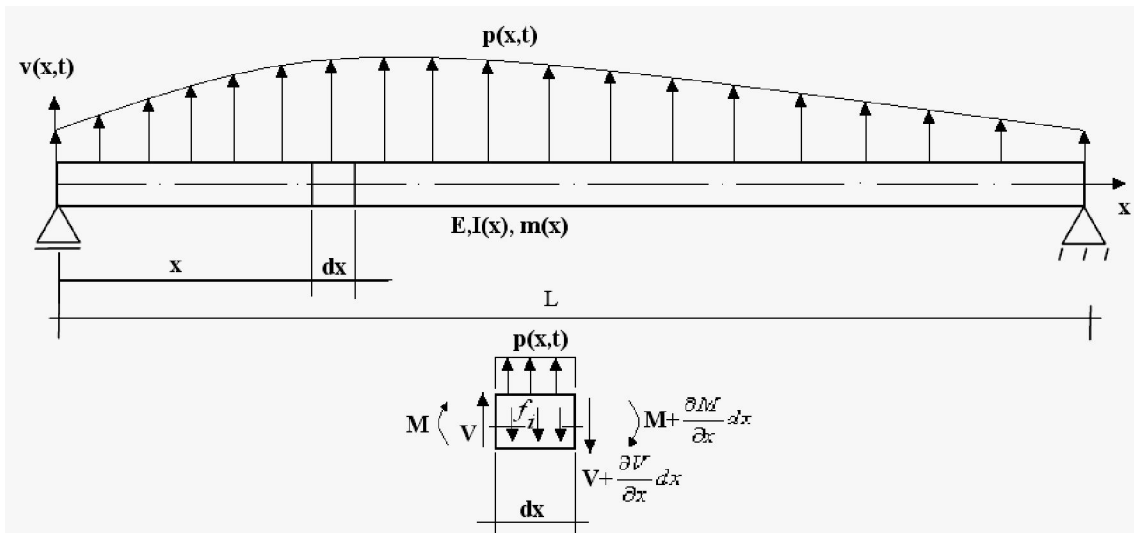


Figura 4.1: Exemplo de uma viga bi apoiada sujeita a força distribuída e peso próprio.

Realizando a somatória de forças igual a zero no eixo vertical, têm-se:

$$V + p^* dx - (V + \frac{\partial V}{\partial x} dx) - f_i dx = 0 \quad (4.1)$$

Pela 2ª lei de Newton:

$$f_i dx = m dx \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} dx \quad (4.2)$$

Substituindo a equação 4.2.1 na 4.2.2, têm-se:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = p - m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (4.3)$$

Realizando a somatória de momentos igual a zero do pedaço \$dx\$, têm-se:

$$M + V^* dx - (M + \frac{\partial M}{\partial x} dx) = 0 \quad (4.4)$$

Sabendo que \$V = (\partial M / \partial x)\$ e portanto \$\partial V / \partial x = (\partial^2 M / \partial x^2)\$ e substituindo na equação 4.3, têm-se:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = p \quad (4.5)$$

Chega-se então a equação 4.6:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}) + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = p \quad (4.6)$$

onde: \$m\$ é a massa por metro da viga; \$E\$ é módulo de elasticidade da viga (podendo ser variável ao longo da viga); \$I\$ representa o momento de inércia da viga (podendo ser variável ao longo

da viga);  $p$  força distribuída na viga (podendo ser variável ao longo da viga e no tempo);  $V$  é força cortante na viga; e  $v$  é o deslocamento transversal da viga;

Fazendo-se algumas desconsiderações como amortecimento, distorções em virtude do cisalhamento, propriedades constantes ao longo da viga, falta de forças distribuídas na viga e forças axiais na direção  $x$ , chega-se á equação 4.7:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (4.7)$$

Dividindo a equação anterior por EI, têm-se:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{m}{EI} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (4.8)$$

Considerando a resposta  $v(x,t)$  como uma função variável no espaço ( $\phi(x)$ ) e outra variável no tempo ( $Y(t)$ ), têm-se:

$$v(x,t) = \phi(x) * Y(t) \quad (4.9)$$

Substituindo na equação 4.8, têm-se:

$$\phi^{IV}(x) * Y(t) + \frac{m}{EI} \phi(x) * \ddot{Y}(t) = 0 \quad (4.10)$$

Dividindo a equação anterior por ( $\phi(x) * Y(t)$ ), têm-se:

$$\frac{\phi^{IV}(x)}{\phi(x)} + \frac{m}{EI} * \frac{\ddot{Y}(t)}{Y(t)} = 0 \quad (4.11)$$

Reorganizando a equação anterior, têm-se:

$$\frac{\phi^{IV}(x)}{\phi(x)} = -\frac{m}{EI} * \frac{\ddot{Y}(t)}{Y(t)} = C = a^4 \quad (4.12)$$

Considerando:

$$\omega^2 = \frac{a^4 EI}{m} \quad ou \quad \frac{\omega^2 m}{EI} = a^4 \quad (4.13)$$

Têm-se:

$$\phi^{IV}(x) - a^4 \phi(x) = 0 \quad e \quad \ddot{Y}(t) + \omega^2 Y(t) = 0 \quad (4.14)$$

Considerando  $Y(t)$  e  $\phi(x)$  da forma descrita abaixo:

$$\phi(x) = C e^{ax} \quad (4.15)$$

$$Y(t) = A * \text{sen}(\omega t) + B * \text{cos}(\omega t) \quad (4.16)$$

Os valores das constantes A e B dependem da velocidade e posição iniciais do sistema.

Portanto:

$$B = Y(0) \quad e \quad A = \dot{Y}(0) / \omega \quad (4.17)$$

Substituindo os valores de A e B na equação 4.16, chegamos á equação a seguir:

$$\ddot{Y}(t) = \frac{\dot{Y}(0)}{\omega} \text{sen}(\omega t) + Y(0) \cos(\omega t) \quad (4.18)$$

Substituindo as equações 4.15 em 4.14, têm-se:

$$(s - a) C e^{sX} = 0 \quad (4.19)$$

Sendo que:

$$s = \pm a, \pm ia \quad (4.20)$$

Substituindo estes valores em 4.15, têm-se:

$$\phi(x) = C_1 e^{jax} + C_2 e^{-iax} + C_3 e^{ax} + C_4 e^{-ax} \quad (4.21)$$

Apresentando a equação anterior em função de termos trigonométricos e hiperbólicos, têm-se:

$$Y(x) = C_1 \sinh(\alpha x / L) + C_2 \cosh(\alpha x / L) + C_3 \sin(\beta x / L) + C_4 \cos(\beta x / L) \quad (4.22)$$

As constantes  $C_n$  definem a forma e a amplitude de vibração da viga. São definidas através das condições de contorno determinadas através das vinculações da viga e das condições iniciais, como deslocamento e velocidade iniciais.

Onde as constantes  $\alpha$  e  $\beta$  são definidas como:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\omega L} \sqrt{\frac{\rho A}{EI}} \omega L \quad (4.23)$$

Uma outra forma de apresentação da equação 4.22 em função do parâmetro adimensional é mostrada na equação 4.24.

$$Y(\chi) = Y(0) A(\chi) + Y'(0) B(\chi) + Y''(0) C(\chi) + Y'''(0) D(\chi) \quad (4.24)$$

Onde  $\chi$  representa um parâmetro adimensional para a posição da trinca na viga em relação ao comprimento da viga.

$$\chi = x / L \quad (4.25)$$

Onde  $Y(0)$ ,  $Y'(0)$ ,  $Y''(0)$  e  $Y'''(0)$  significam a primeira, segunda e terceira derivada em  $x=0$  respectivamente. Estes parâmetros são relacionados com força, momentos e deslocamentos através das seguintes equações:

$$Y(\chi) = \theta(\chi) L \quad Y'(\chi) = M(\chi) L^2 / EI \quad Y''(\chi) = V(\chi) L^3 / EI \quad (4.26)$$

As outras constantes  $A(\chi)$ ,  $B(\chi)$ ,  $C(\chi)$  e  $D(\chi)$  representam matematicamente as condições de contorno da viga. Estas funções são selecionadas para serem linearmente dependentes da forma que o seguinte equacionamento é satisfeito, Gomes *et al.* 2008:

$$\begin{bmatrix} A(0) & A'(0) & A''(0) & A'''(0) \\ B(0) & B'(0) & B''(0) & B'''(0) \\ C(0) & C'(0) & C''(0) & C'''(0) \\ D(0) & D'(0) & D''(0) & D'''(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Para a representação de uma trinca neste equacionamento, uma viga é discretizada em vários elementos, como se cada um fosse uma viga. A fissura é introduzida na equação através de uma mola flexional de flexibilidade variável sem massa, de acordo com a figura 4.2.

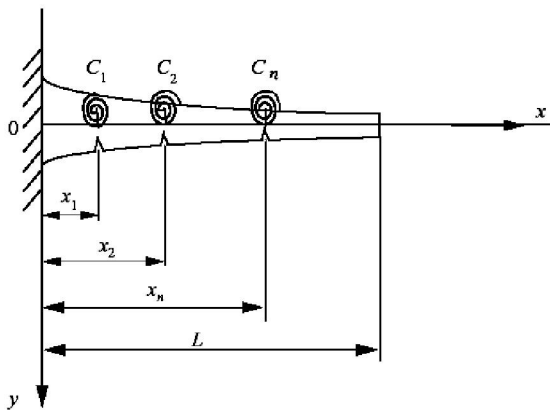


Figura 4.2: Exemplo de uma viga engastada livre com as trincas representadas por molas torcionais.

As condições de contorno são iguais nos nós das duas vigas por ele conectados, ou seja, o deslocamento nesse nó é igual para as duas vigas, bem como esforço cortante e momento fletor, mas não a rotação, com mostrado nas equações 4.28.

$$\begin{aligned} Y_{bc}(\chi) &= Y_{ac}(\chi) \\ M_{bc}(\chi) &= Y'_{bc}(\chi) EI \hat{L} = M_{ac}(\chi) = Y'_{ac}(\chi) EI \hat{L} & Y''_{bc}(\chi) &= Y''_{ac}(\chi) \\ V_{bc}(\chi) &= Y''_{bc}(\chi) EI \hat{L} = V_{ac}(\chi) = Y''_{ac}(\chi) EI \hat{L} & Y'''_{bc}(\chi) &= Y'''_{ac}(\chi) \\ Y_{bc}(\chi) &= Y_{ac}(\chi) + CY_{ac}(\chi) \end{aligned} \quad (4.28)$$

A quantidade de trincas que pode ser utilizada no modelo é função do nível de discretização desejado, já que em cada nó pode ser utilizada uma mola para representar matematicamente as fissuras.

As trincas influenciam de forma direta apenas na redução do momento de inércia local da viga. Alguns autores como Lin *et al.* [2007] e Bicini [2005] o sugerem esta relação em fun-



ção da localização e extensão da trinca, já que ambos fatores influenciam diretamente na mudança de frequências fundamentais da viga. A equação 4.29 mostra o polinômio utilizado para representar a flexibilidade local da viga ocasionado pela trinca. Esta equação é derivada de estudos da mecânica da fratura puramente sem dados experimentais. A mesma equação tem também sido obtida através de ajustes de experimentos que medem a rigidez flexional no local da fissura.

$$C_f(a_f/h) = 5,346(h/L) \begin{pmatrix} (1,8624(a_f/h)^2) - 3,95(a_f/h)^3 + 16,375(a_f/h)^4 \\ -37,226(a_f/h)^5 + 76,81(a_f/h)^6 - 126,9(a_f/h)^7 \\ +172(a_f/h)^8 - 143,97(a_f/h)^9 + 66,56(a_f/h)^{10} \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

onde  $a_f$  representa a profundidade da fissura e  $h$  representa a altura da seção transversal da viga e  $L$  representa o comprimento total da viga.

Desta forma, obtêm-se uma relação entre as frequências naturais da viga em função do deslocamento de cada segmento discretizado da mesma, interligados através das molas rotacionais  $C_f$ .

É importante ressaltar que apenas a partir deste ponto as características relativas a particularidades de cada viga serão utilizadas, portanto o equacionamento até este ponto é válido para qualquer viga em qualquer condição, salvo as considerações feitas anteriormente como propriedades constantes ao longo da viga, desconsiderando amortecimento, cargas axiais e cisalhamento.

### 4.3 Formulação teórica do dano em uma viga bi apoiada

O objetivo nesta seção é mostrar a equação de frequências naturais em uma viga bi apoiada e mostrar a influência da posição e extensão do dano na variação das frequências naturais da viga.

A partir da equação 4.22, serão consideradas as particularidades para uma viga bi apoiada. As condições de contorno para uma viga bi apoiada são deslocamentos e momentos nulos nos suportes. Nas equações a seguir têm-se a representação teórica destas condições:

Em  $x = 0$ ;

$$\phi(0) = 0 \quad e \quad M(0) = EI\phi''(0) = 0 \quad (4.30)$$

Em  $x = L$ ;

$$\phi(L) = 0 \quad e \quad M(L) = EI\phi''(L) = 0 \quad (4.31)$$

Substituindo as condições de contorno provenientes da viga na equação 4.2, lembrando que  $M = \ddot{\phi}(x)$  e resolvendo o sistema proveniente destas conclusões, chega-se as seguintes conclusões:

$$A_2 = A_4 = 0 \quad e \quad \text{sen}(aL) = 0 \quad (4.32)$$

Como:

$$aL = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (4.33)$$

Substituindo a equação 4.13 na equação acima, têm-se os valores das frequências naturais da viga:

$$\omega^4 = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (4.34)$$

Da mesma forma, obtêm-se os modos de vibração:

$$\phi(x) = A_1 \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (4.35)$$

Assim, pode-se investigar a variação de frequências em função do dano. As equações serão desenvolvidas para apenas um dano.

A equação 4.24, aplicada duas vezes, uma para a parte antes da fissura e outra para a parte após a fissura, pode ser simplificada apenas inserindo as condições de contorno expostas anteriormente, sendo  $\chi = 0$  e  $\chi = 1$  ( $x = 0$  e  $x = L$ ).

$$Y_1(\chi) = Y_1'(0)B(\chi) + Y_1'''(0)D(\chi) \quad (4.36)$$

$$Y_2(\chi) = Y_1(\chi) + C_1 Y_1'(\chi_1)G(\chi - \chi_1) \quad (4.37)$$

Onde  $B(\chi)$ ,  $D(\chi)$  e  $G(\chi)$  são funções definidas como e os índices 1 e 2 indicam a parte anterior e posterior à fissura, Gomes *et al.* 2008:

$$G(\chi) = \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} [\alpha \sinh(\alpha\chi) + \beta \sin(\beta\chi)] \quad (4.38)$$

$$D(\chi) = \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \left[ \frac{1}{\alpha} \sinh(\alpha\chi) - \frac{1}{\beta} \sin(\beta\chi) \right] \quad (4.39)$$

$$B(\chi) = G(\chi) + 2\Phi D(\chi) \quad (4.40)$$

Assim as equações 4.3.6 e 4.3.7 podem ser colocadas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} B(1) + CG(1-\chi)B'(\chi) & D(1) + CG(1-\chi)D'(\chi) \\ B'(1) + CG'(1-\chi)B''(\chi) & D'(1) + CG'(1-\chi)D''(\chi) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Y_1(\chi) \\ Y_1''(\chi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Esta equação terá solução diferente da trivial quando o determinante da matriz da parcela do lado esquerdo for igual a zero. Assim, com esta equação pode-se resolver para a frequência desejada.

Nas figuras a seguir, Fig. 4.3 a Fig. 45, a variação das freqüências são mostradas para uma viga bi apoiada. São mostradas três condições de danos: 10%, 20% e 50%. Como já dito anteriormente, o valor igual a 1 representa uma extremidade da viga, enquanto o valor igual a 0 representa o começo da viga. Como as condições de contorno apresentam simetria em relação ao centro da viga, onde começa e onde termina a viga não tem muita importância, no caso deste estudo.

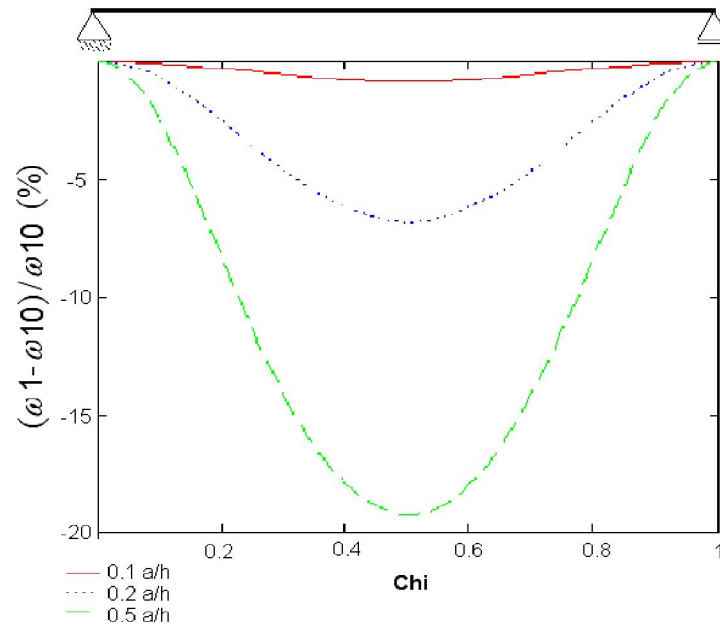


Figura 4.3: Variação da primeira freqüência natural com dano em função da mesma freqüência sem dano (bi-apoiada).

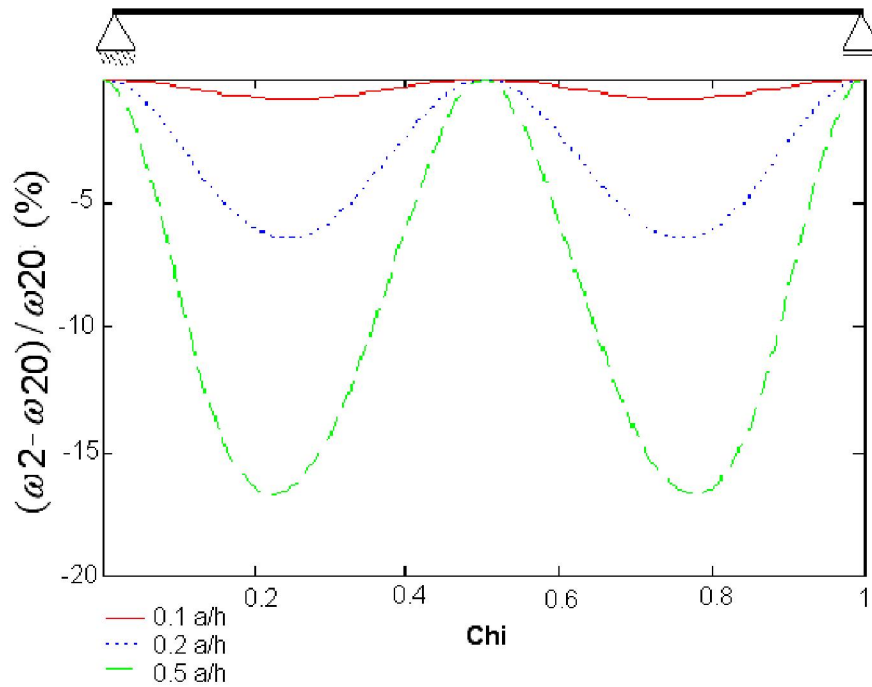


Figura 4.4: Variação da segunda frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (bi-apoiada).

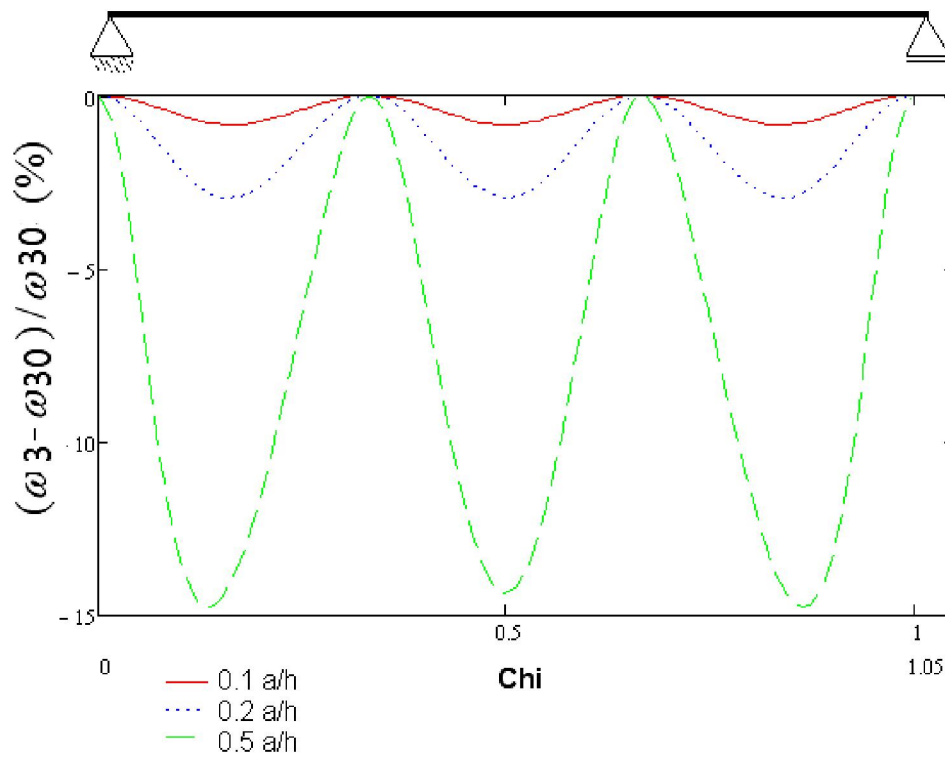


Figura 4.5 Variação da terceira frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (bi-apoiada).

Como previsto, a maior variação ocorreu quando o dano foi maior, como indicado pela linha tracejada (verde). A variação nula de frequência aconteceu nos nós de cada modo, como previsto também, já que nestes modos não há movimentação destes pontos.

#### 4.4 Formulação teórica do dano em uma viga engastada livre

Para a formulação da variação de frequências na viga engastada livre, o mesmo procedimento é aplicado no caso da viga bi apoiada, a diferença fica nas condições de contorno das vigas da extremidade.

Para uma viga engastada livre, têm-se as seguintes condições de contorno:

Em  $x = 0$ ,

$$\phi(0) = 0 \quad e \quad \phi'(0) = 0 \quad (4.42)$$

Em  $x = L$ ;

$$M = EI\phi''(L) = 0 \quad e \quad V = EI\phi'''(L) = 0 \quad (4.43)$$

$$\frac{\phi V(x)}{\phi(x)} + \frac{m_* \dot{V}(x)}{EI \dot{V}(x)} = 0 \quad (4.44)$$

Inserindo estas características na equação 4.24, têm-se a equação 4.45.

$$Y_1(x) = Y_1(0) \mathcal{B}(x) + Y_1''(0) \mathcal{A}(x) \quad (4.45)$$

Importante ressaltar que para efeito de discretização, a estrutura começa na ponta livre da viga e termina no engaste ( $x=1$ ). As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram a variação da primeira, segunda e terceira frequência respectivamente em relação às frequências sem dano.

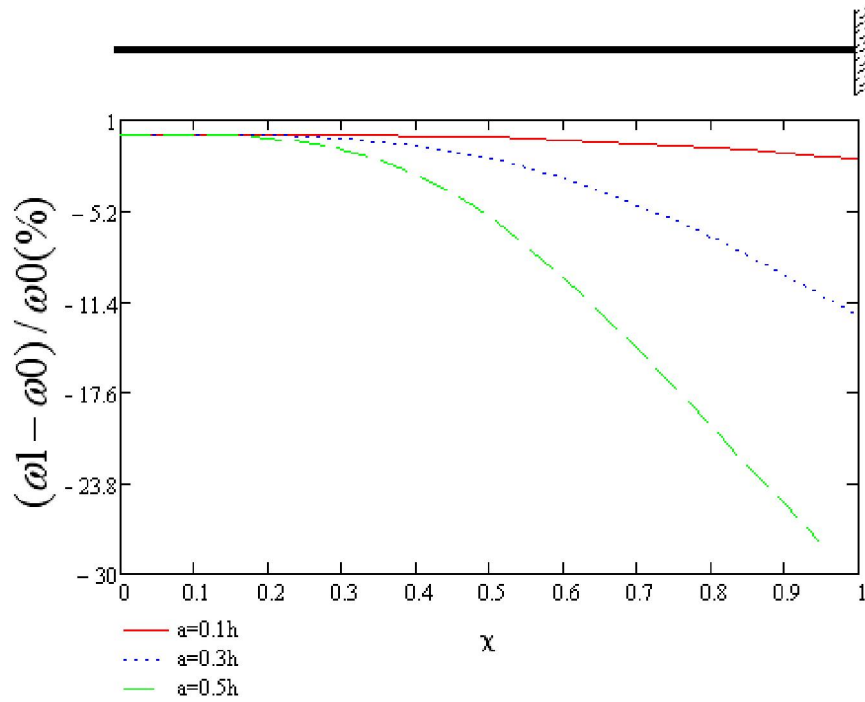


Figura 4.6 Variação da primeira frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (engastada –livre).

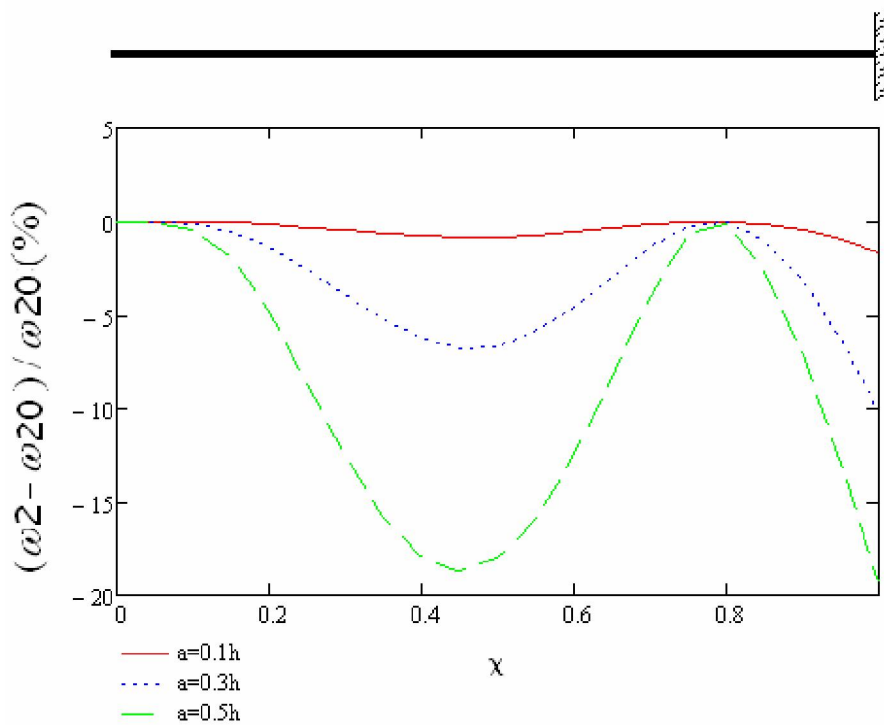


Figura 4.7: Variação da segunda frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (engastada –livre)..

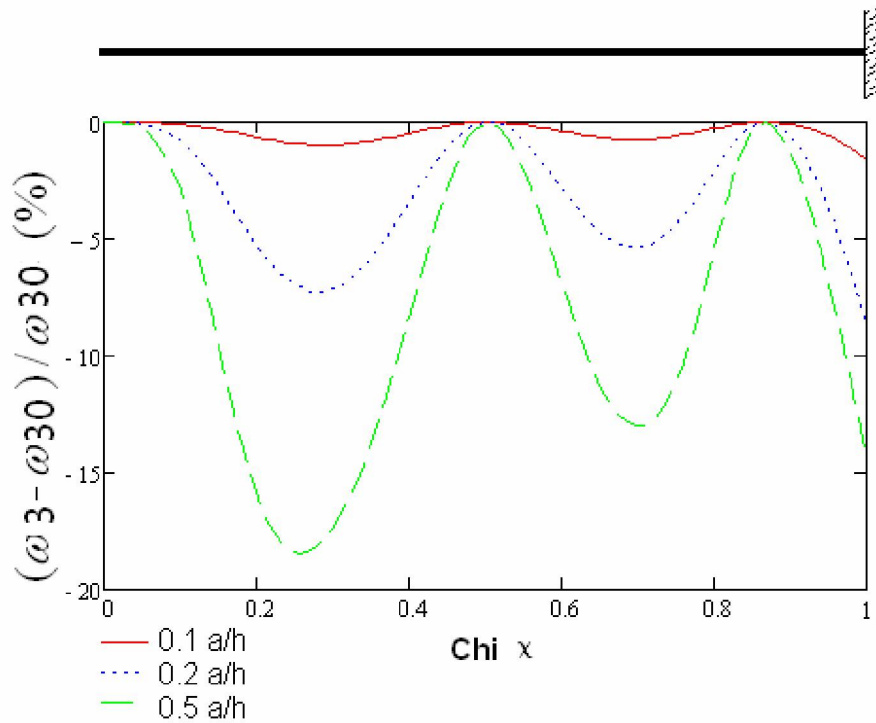


Figura 4.8: Variação da terceira frequência natural com dano em função da mesma frequência sem dano (engastada-livre)..

De forma razoavelmente lógica, a variação de frequências é maior quanto maior o dano na estrutura. Pode-se perceber que, em todos os casos mostrados, a variação de frequência no caso de dano de 10% foram por volta de 2%, o que justifica a não aparição de equipamentos que detectem danos em estruturas reais de forma comercial, principalmente em função do ruído dos sensores, mas também em virtude da imprecisão dos modelos paramétricos hoje existentes. Em outras palavras, consegue-se enxergar de maneira míope o comportamento da estrutura e reproduzir seu comportamento de forma errônea para se prever pequenas variações de frequências com pequenos danos.

O estudo em ambos os casos (bi-apoiada e engastada-livre) sugere que danos em alguns lugares da viga não afetam determinadas frequências, portanto, a procura de dano deve ser efetuada com o máximo de frequências possível, sendo limitada apenas pelos equipamentos de aquisição de sinais. Como concluído na viga bi apoiada, quanto menor o dano, menor é a diferença de frequência induzida pelo mesmo. Esta afirmação também é válida para a viga engastada livre.

O mais intrigante deste estudo foi a procura por uma regra comum a todos os casos que prevê o local de nenhuma influência do dano. No início, de uma forma simplista, pensava-

se que os nodos (regiões sem movimento) de cada modo seriam as regiões onde se danificadas não alterariam o modo em questão, mas as figuras 4.6 e 4.7 desmentiram esta suposta verdade.

Tudo indica que essas regiões podem ser previstas por pontos de inflexão da curva de cada modo, ou seja, quando a derivada segunda do modo em questão passa pelo ponto zero, conforme mostrado matematicamente na equação 4.46.

$$\left(\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2}\right) = 0 \quad (4.46)$$

Esta comprovação pode ser verificada na figura 4.9 para vigas bi apoiadas e 4.10 para vigas engastadas livres. Em todos os casos, a derivada segunda indica a falta de variação de freqüências quando esta cruza o eixo zero. A diferença é que no caso da viga bi apoiada, os pontos onde as variações de freqüências não são verificadas coincidem com os nodos do modo.

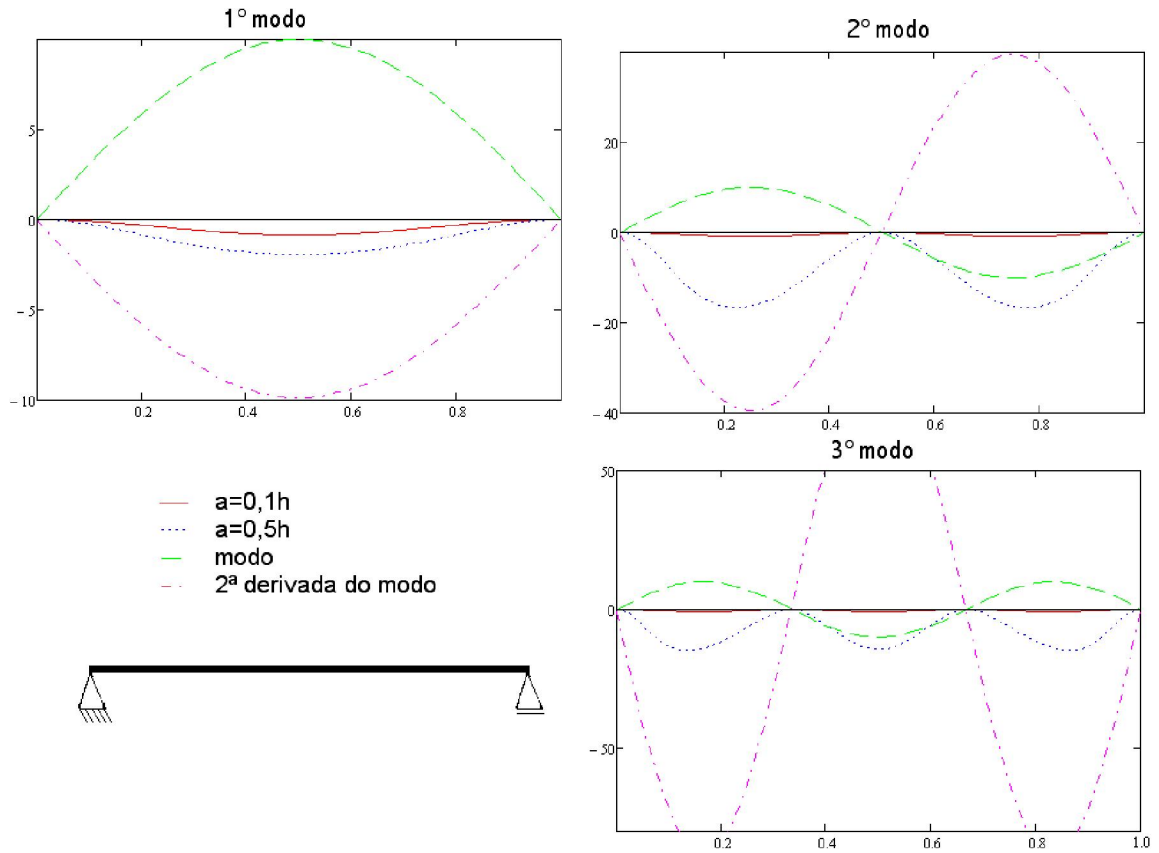


Figura 4.9: Os 3 modos com suas segundas derivadas indicando variação zero de freqüência com a inclusão dos danos, para o caso de vigas bi apoiadas.

Percebe-se que, também para casos onde o senso comum pode prever a falta de variação de freqüências (quando o nodo do modo coincide com a falta de variação de freqüência em



função do dano), a forma sugerida para prever estas regiões (linha rosa ou traço-ponto) também funciona, como previsto.

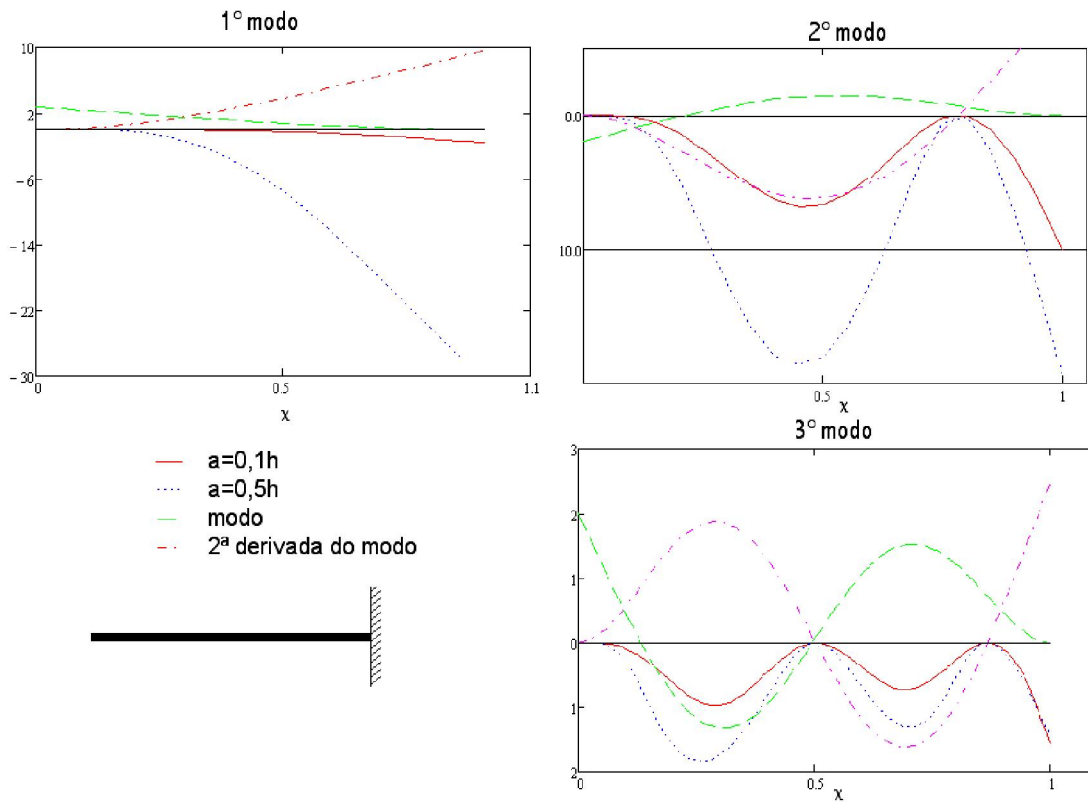


Figura 4.10: Os 3 modos com suas segundas derivadas indicando variação zero de frequência com a inclusão dos danos, para o caso de vigas engastadas livre.

Através deste estudo, pode-se ter idéia das limitações do sistema de detecção de dano, bastando apenas saber a resolução do sistema de aquisição e as frequências sem dano da estrutura a ser analisada. Esta análise também justifica a dificuldade de identificação do dano em alguns lugares, já que a variação de frequência em função do dano é nula ou muito pequena em alguns modos, anulando a utilização deste modo para contribuição na procura do dano. Saber de antemão onde o sistema tem maior dificuldade de detectar dano é de extrema importância, pois pode se ficar mais atento a estas regiões, inclusive sugerindo se inspeções visuais mais frequentes nestes pontos.

#### 4.5 Relação entre a profundidade de corte e momento de inércia de área

À primeira vista, pode-se deixar levar pela falsa idéia de que um corte que compromete 20 % da altura da viga comprometa com 20% da resistência da mesma. A relação entre a profundidade do corte e o momento de inércia não apresenta linearidade e por isso, essa relação deve ser investigada, pois muitas vezes um pequeno dano pode ser responsável pela falência da estrutura, além da importância deste fator em um caso de procura visual do dano.

A viga no caso estudado é uma viga retangular prismática de altura  $h$ , largura  $b$  e profundidade de corte  $a$ . Foram estudados dois casos de redução de inércia para a mesma viga. No primeiro caso, a fissura acontece em apenas um dos lados, linha vermelha contínua da figura 4.11. No segundo caso, a fissura está dividida nos dois lados da viga, representada pela linha azul pontilhada da mesma figura.

A equação do momento de inércia para uma viga retangular sem dano em relação a linha de centro é mostrada na equação 4.47.

$$I_0 = \frac{bh^3}{12} \quad (4.47)$$

onde:  $I_0$  inércia para o estado sem dano;  $b$ : base da viga a ser ensaiada e  $h$ : altura da viga.

No caso de uma trinca em apenas um lado da viga, situação mais comum na vida real, a equação do momento de inércia muda para conceber esta redução de inércia, como é mostrado na equação 4.48.

$$I_d = \frac{b\left(\frac{h}{2}\right)^3}{3} + \frac{b\left(\frac{h-a}{2}\right)^3}{3} \quad (4.48)$$

onde:  $I_d$  inércia para o estado danificado;  $a$ : comprimento da trinca.

No caso de duas trincas em lados opostos da viga (cada uma com metade da profundidade  $a$ ), a equação do momento de inércia muda. Neste caso, a redução acontece de forma proporcional em relação ao eixo médio da viga e portanto, pode se apenas reduzir a profundidade do corte da altura da viga para encontrar a inércia resistente aos esforços, como é mostrado na equação 4.49.

$$I_{CD} = \frac{b(h-a)^3}{12} \quad (4.49)$$

Onde:  $I_{CD}$  inércia para o estado danificado, considerando corte dos dois lados, cada lado com metade do comprimento total da trinca ( $a$ );

A figura 4.11 mostra como varia a relação entre o momento de inércia danificado e o momento de inércia sem dano, considerando o avançar das trincas ao longo as seção transversal.

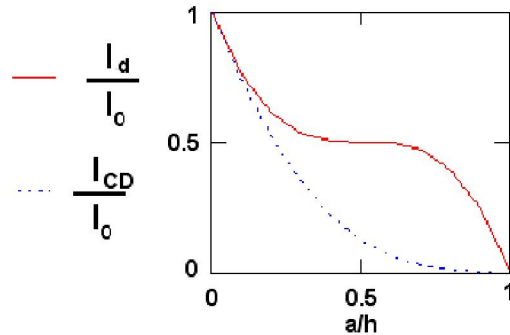


Figura 4.11: Relação entre redução da inércia da viga danificada em relação a viga sem dano versus a relação entre o comprimento da trinca e a altura da viga.

Pode-se concluir que a redução de inércia considerando a trinca apenas em um lado da viga é menos crítica, pois a inércia não cai tão abruptamente com o aumento da profundidade da trinca em relação a inércia de corte duplo. Ou seja, uma estrutura sujeita a condição de corte duplo irá a colapso precocemente em relação a condição de corte simples, já que sua inércia cai mais drasticamente para a mesma profundidade de dano. Esse fato acontece em virtude da trinca passar na região de linha neutra (região de menor tensão) antes de atingir o outro lado da viga.

#### 4.6 Análise de incertezas

Como visto nas seções passadas, existem alguns modos que não apresentam diferença de frequência em função do dano. Principalmente por essa razão, avaliar a variação de frequência natural em função das incertezas das propriedades físicas da estrutura é de extrema importância, já que esse fator implica diretamente em uma limitação do sistema de detecção de dano.

Foi avaliada a diferença de frequências naturais em um ensaio de uma viga bi-apoiada. As variações de propriedades foram feitas em função de 10 medidas experimentais de cada variável. A tabela 4.1 mostra as médias e variações das propriedades físicas medidas na viga do ensaio.

Tabela 4.1: Valores das médias e covariâncias das propriedades medidas.

	<b>Módulo de Elasticidade E</b> [N/m <sup>2</sup> ]	<b>Largura b</b> [m]	<b>Altura h</b> [m]	<b>Comprimento L</b> [m]	<b>Densidade</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Média</b>	2,07E+11	0,008	0,008	0,75	7445
<b>Coef. De Variação</b>	0,04	0,009	0,009	0,005	0,01

Após medir estes valores, foram simulados 5000 valores de cada propriedade de acordo com a distribuição Lognormal, já que não existem valores negativos para estas variáveis. Depois de gerados estes valores, estes foram incluídos nas equações da primeira e segunda frequência em função das propriedades físicas da estrutura. Assim, através da equação 4.50, pode se determinar a variação relativa das frequências em função das variações que estas variáveis apresentam. A forma destas distribuições dos valores encontrados (5000) em relação a média, são encontrados nas figuras 4.12 e 4.13.

$$\Delta\omega = \frac{\omega(E', b', L', \rho') - \omega(\mu E, \mu b, \mu L, \mu\rho)}{\omega(\mu E, \mu b, \mu L, \mu\rho)} \cdot 100 \quad (4.50)$$

onde:  $E'$ : módulo de elasticidade gerado a partir das incertezas levantadas;  $b'$ : base e altura da da viga (viga quadrada) gerado a partir das incertezas levantadas;  $L'$ : comprimento da viga gerado a partir das incertezas levantadas e  $\rho'$ : densidade gerada a partir das incertezas levantadas. Os valores precedidos da letra  $\mu$  significam a média dos valores em questão.

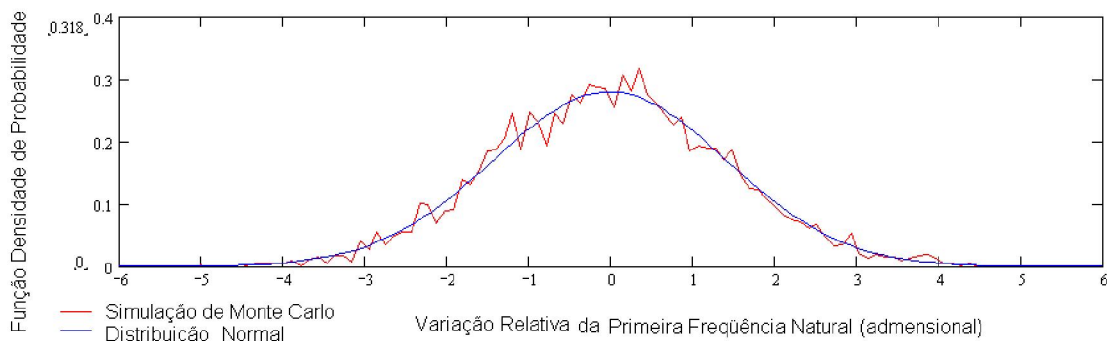


Figura 4.12: Distribuição da função de densidade de probabilidade da primeira frequência natural em função da variação relativa da primeira frequência natural da viga.

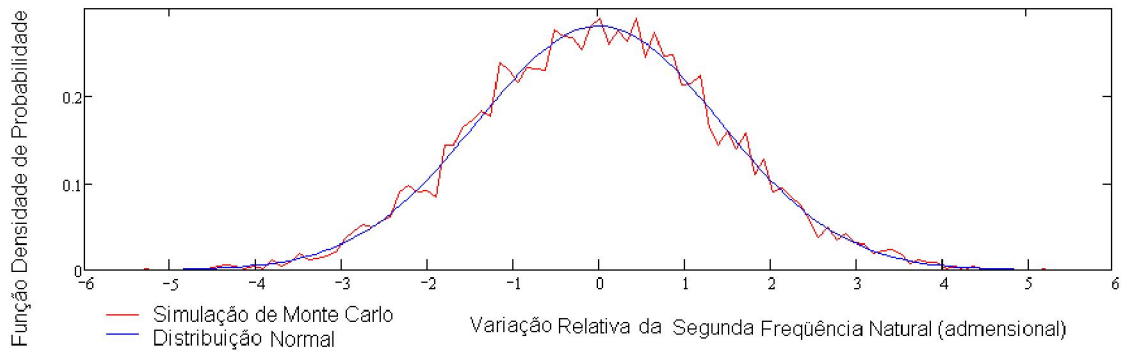


Figura 4.13: Distribuição da função densidade de probabilidade da primeira frequência natural em função da variação relativa da segunda frequência natural da viga.

Tabela 4.2: Valores de média e desvio padrão para a primeira e segunda frequência.

	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Variação relativa da 1ª Frequência	-0,024	1,427
Variação relativa da 2ª Frequência	0,010	1,423

As informações das figuras 4.12 e 4.13 são reforçadas pela tabela 4.2. Tudo indica que as variações percentuais são as mesmas para os modos, como mostrado no segundo e no primeiro modo. Como a incerteza de avaliação dos modos aumenta com o aumentar da ordem, espera-se que haja uma variação maior em modos mais altos.

Na seção anterior, foi concluído que quanto mais modos utilizados no processo de identificação do dano, melhor seria a exatidão do mesmo, porém deve-se levar em conta que as incertezas são crescentes com o aumento da ordem dos modos, como mostrado nesse estudo de incertezas.

## 5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

### 5.1 Introdução

A verificação do desempenho para ensaios numéricos é muito importante, pois através deles será verificado a eficiência do algoritmo de otimização já que nos ensaios experimentais, o sistema de aquisição de dados, sensibilidade dos sensores, deficiências do modelo numérico e outros fatores relacionados aos ensaios reais ocasionam variações não previstas nas frequências naturais.

### 5.2 Programa Simulated Annealing

A verificação do desempenho do algoritmo *Simulated Annealing* em detecção de dano é o real objetivo deste trabalho, por isso o algoritmo será esmiuçado neste capítulo.

O método foi programado em FORTRAN, sendo que foi obtido de Goffe [2008] e adaptado para o trabalho em conjunto com o programa de elemento finitos, também programado no mesmo software. A codificação em FORTRAN do algoritmo utilizado está comentado e disponível no Anexo 1, bem como, o detalhamento do programa de elementos finitos encontra-se no Anexo 2.

Os parâmetros heurísticos utilizados para o funcionamento do algoritmo na maioria dos casos rodados estão descritos na tabela 5.1. A explicação de cada variável está na seção 3.4.

Tabela 5.1: Valores heurísticos utilizados no algoritmo.

	<b>Temp. Inicial</b> [adm]	$\beta$ [adm]	<b>Tolerância convergência</b> <b>Tol</b> [adm]	<b>Limite máx. de iterações</b> <b>I</b> [adm]
<b>Valor</b>	100	0,8 - 0,85	1,00E-15	1,50E+06

Com a utilização da função de custo sugerida por Silva, 2006 (equação 2.3) foi necessário utilizar um padrão de convergência bem pequeno, já que as diferenças das frequências elevadas ao quadrado podem mascarar pequenas diferenças de frequências. Este valor foi adotado depois de realizado vários testes, onde verificou-se que mesmo alcançando a convergência, o algoritmo indicava falsos lugares de dano, o que indica que o critério de convergência não era robusto o suficiente para a forma da função de custo. O número de iterações máximo

sugerido pela tabela 5.1 foi adotado para casos mais complexos de dano, como por exemplo, vários danos na mesma estrutura, condições reais de ensaio (sinal com ruído), etc.

Todos os casos rodados utilizaram a aproximação de primeira ordem de Messina (equação 2.4) para acelerar o processo de convergência, desta forma, o programa de elementos finitos é executado apenas uma vez, sendo que as outras chamadas são realizadas através desta aproximação descrita no capítulo 2.

Como já comentado no capítulo 3, as variáveis precisam sofrer certa perturbação para que o valor da função de custo seja avaliado. Deseja-se que essa perturbação seja tal que os números de pontos aceitos pelo sistema sejam aproximadamente metade dos pontos analisados. Para isso, o valor de perturbação (VM) varia em função do número de aceitações do algoritmo. Este procedimento é realizado para a garantia do ponto ótimo, seja ele de máximo ou mínimo. Ele aumenta a perturbação quando o número de aceitações é menor de 40% dos pontos avaliados e reduz quando o número de aceitações ultrapassa o valor de 60% dos pontos, mantendo assim a taxa de aceitação entre estes dois valores (0,4 e 0,6). Este ajuste da perturbação é realizado a cada passo de redução de temperatura.

A figura 5.1 mostra um esquema completo do algoritmo, com seus detalhes mais importantes. No Anexo 1 o programa de otimização *Simulated Annealing* pode ser verificado de maneira mais detalhada, já que está totalmente listado e comentado em todos seus detalhes na linguagem FORTRAN. Importante ressaltar que este mesmo código pode ser aplicado em outros processos de otimização, trocando apenas a função de custo a ser analisada.

```

Inicializar variáveis a otimizar  $\mathbf{x}_n^c$ ;  $t = t^i$ ;  $z = 0$ ;  $b = 0$ ;  $\beta = 0.85$ 
Enquanto ( $t < t^f$ ) e  $(\mathbf{x}_{n-1}^{opt} - \mathbf{x}_n^{opt}) > tol$  faça (laço externo)
     $j = 1$ 
    Enquanto ( $j < I$ ) faça (laço das iterações)
         $k = 1$ 
         $E^c = f(\mathbf{x}_n^c)$ 
        Enquanto ( $k < n$ ) faça (laço interno variáveis)
            Perturbar cada variável  $x_k$  por vez
            através de ( $v_m x_k$ ) para ter  $\mathbf{x}_k^{c+1}$ 
             $E^{c+1} = f(\mathbf{x}_n^{c+1})$ 
             $z = z + 1$ 
            Se ( $E = E^{c+1} - E^c < 0$ ) então
                 $\mathbf{x}_n^{opt} = \mathbf{x}_n^{c+1}$ 
                 $b = b + 1$ 
            Senão
                Se  $e^{\frac{\Delta E}{\mathcal{N}T}} > \text{randon}(0,1)$  então
                     $\mathbf{x}_n^{opt} = \mathbf{x}_n^{c+1}$ 
                     $b = b + 1$ 
                Se  $0,6 < (b/z)$  então
                     $v_m = v_m (b/z)$ 
                Senão
                    Se  $0,4 > (b/z)$  então
                         $v_m = v_m (z/b)$ 
                         $k = k + 1$ 
            Fim Enquanto  $k$ 
         $j = j + 1$ 
    Fim Enquanto  $j$ 
     $t = t * \beta$ 
     $\mathbf{x}_{n-1}^{opt} = \mathbf{x}_n^{opt}$ 
Fim Enquanto  $t$ 

```

Figura 5. 1: Esquema em código aberto do algoritmo de SA.

No esquema da Figura 5.1 têm-se que:  $t$ : temperatura em cada etapa do processo;  $t^i$ : temperatura inicial;  $t^f$ : temperatura final;  $b$ : número de aceitações;  $z$ : número de pontos avaliados;  $v_m$ : parcela que perturba as variáveis;  $\beta$ : fator de redução de temperatura;  $j$ : número de iterações;  $\mathcal{N}$ : número máximo aceitável de iteração;  $n$ : número de dimensões do problema.



### 5.3 Resultados e comparações para uma viga bi apoiada

Os testes numéricos consistem da adoção de alguns cenários de danos gerados através do próprio programa de elementos finitos utilizados pelos algoritmos de otimização (SA e GA). Foram avaliadas situações de um dano na estrutura e com mais de um dano. As frequências da estrutura com e sem dano são utilizadas como parâmetros de entrada para os algoritmos SA e GA. O dano foi introduzido nos elementos da estrutura através da redução da inércia dos elementos tidos como danificados, o que não significa que se um elemento possui dano de 10% tem apenas 90% da seção original resistindo aos esforços, como foi apresentado na seção 4.4 (relação entre a profundidade de corte e a redução do momento de inércia de área).

Neste exemplo, utilizou-se uma viga bi apoiada de seção transversal retangular com altura  $h=0,24\text{m}$ , largura  $b=0,14\text{m}$  e comprimento  $L=2,4\text{m}$ . O material possui módulo de Young de  $E=2,5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  e massa específica de  $\rho = 2,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . A simplicidade deste modelo se justifica pela facilidade da reprodução experimental deste modelo, além da possibilidade de comparação com outros autores, já que este exemplo é citado na literatura.

A figura 5.1 representa o modelo utilizado, além da numeração dos elementos discretizados utilizados pelo programa de elementos finitos. Para esta análise, foram utilizados elementos de viga 3D com seis graus de liberdade por nó, restringidos no plano da estrutura, resultando em três graus de liberdade por nó da estrutura (duas translações e uma rotação). O programa de elementos finitos, bem como os detalhes do elemento utilizado, encontra-se no anexo 2.

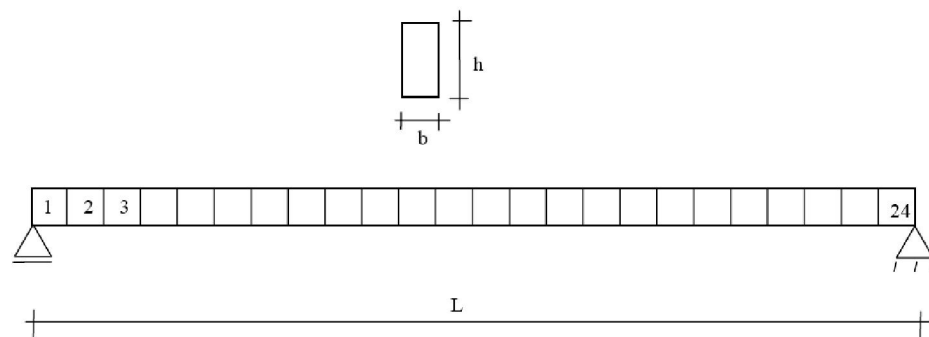


Figura 5.2: Representação de uma viga bi apoiada utilizada pelos algoritmos de detecção de dano.

Para a investigação do desempenho dos algoritmos, os primeiros 5 modos foram assumidos, ou seja, as primeiras cinco frequências do modelo danificado e sem dano foram utili-

zadas como parâmetros de entrada para o SA e GA para a maximização da função de custo. Para alguns casos mais difíceis de procura de danos, como fissuras próximas das condições de contorno ou danos em mais de um elemento, foram necessários mais modos de vibração, já que com apenas cinco modos, os algoritmos não apresentaram bons resultados. Os números de modos, bem como as condições onde eles foram necessários estão descritos nas figuras a seguir.

Na tabela 5.1, as frequências numéricas são mostradas para cada condição de dano. Como previsto, todas as frequências diminuíram com o aumento da extensão do dano.

Tabela 5.1: Frequências numéricas para cada condição de dano.

Frequências Numéricas (Hz)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Sem danos</b>	7,1	44,4	124,3	243,5	402,6	601,4	840,1
<b>10% element 6</b>	7,1	44,4	124,0	226,7	401,9	601,3	838,2
<b>20% element 6</b>	7,0	44,4	123,6	241,5	401,1	601,1	836,0
<b>30% element 6</b>	7,0	44,4	123,1	240,1	400,1	600,9	833,2
<b>40% element 6</b>	6,9	44,4	122,5	238,4	398,9	600,7	829,7
<b>50% element 6</b>	6,8	44,4	121,7	236,1	397,5	600,3	825,2
<b>70% element 6</b>	6,5	44,3	118,9	229,1	393,0	598,9	810,2

Nas figuras a seguir, é possível observar o desempenho de ambos os métodos de otimização para a maximização da função objetivo sugerida na equação 2.3.

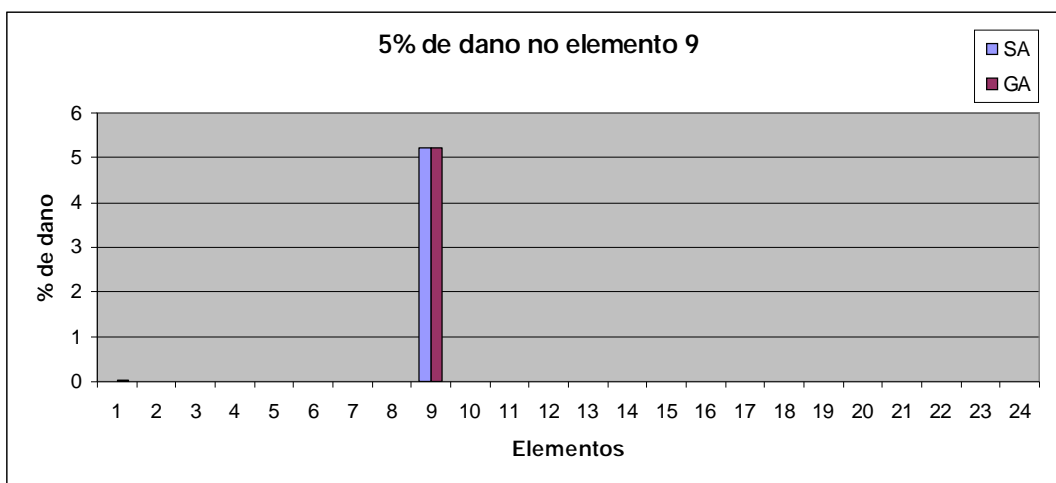


Figura 5.3: Gráficos de barra do teste numérico do caso de 5% de dano no elemento 9.

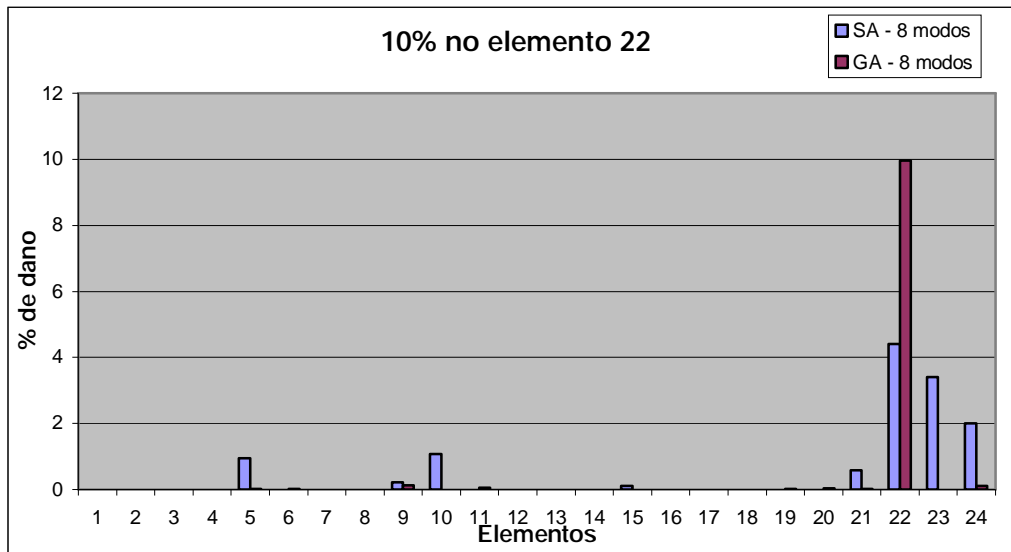


Figura 5.4: Gráficos de barra do teste numérico do caso de 10% de dano no elemento 22.

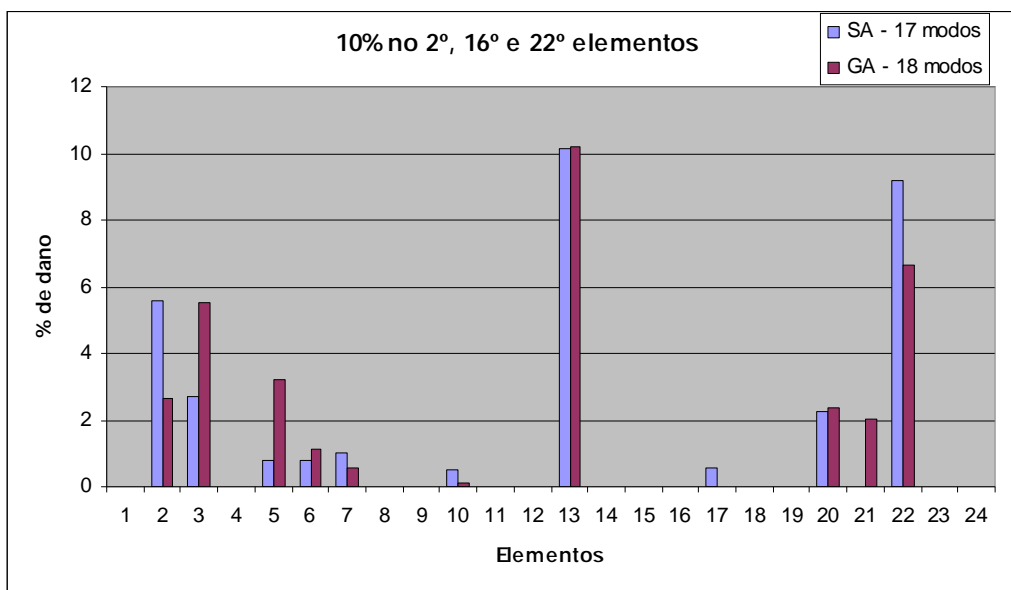


Figura 5.5: Gráficos de barra do teste numérico do caso de 10% de dano nos elementos 2, 16 e 22.

Para a localização do dano, apenas alguns modos foram necessários, mas mais modos são necessários para a indicação correta da extensão do dano.

Nos casos onde o dano está próximo da condição de contorno, foi mais difícil de identificar o dano. O mesmo acontece para vigas com mais de um lugar danificado, como no caso mostrado na figura 5.4.

De forma genérica, o desempenho dos testes numéricos foi satisfatório, o elemento danificado foi encontrado em quase todos os casos, ficando gravemente comprometido nos casos de danos múltiplos para ambos os algoritmos (SA e GA). O tempo gasto pelos algoritmos foi equivalente, cerca de 10 segundos para os piores casos. Os testes foram realizados com um computador Pentium IV, 3.0GHz, 1 GB RAM. É ainda importante citar que em todos os casos o algoritmo convergiu para o valor desejado da função de custo (igual a um).

#### 5.4 Comprovação numérica da predição dos lugares onde não ocorre variação de frequência em função do dano

Para verificar se a equação 4.46 realmente consegue indicar os locais onde não haverá variação de frequências em função de danos inseridos, ensaios numéricos foram feitos através de um simples modelo de vigas em um software de elementos finitos. A idéia é de simular numericamente o que foi estudado na abordagem teórica do capítulo anterior, reduzindo a inércia nas regiões onde o estudo sugere a variação zero de frequências, tanto para a viga bi apoiada, quanto para a engastada livre.

Em ambos os casos, uma viga com 100 elementos foi simulada, sendo que o dano foi inserido em um elemento no caso dos estudos da segunda frequência, já que para essa frequência, há apenas um local onde a variação de frequências é nula. Para o terceiro modo, o dano foi inserido em dois elementos, pois para esse modo existem dois lugares onde não ocorre a variação de frequências.

Para a análise da variação zero da segunda frequência, a viga foi danificada na metade da viga. A variação de frequências para este caso é mostrado na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Variação de frequências numéricas com dano no meio da viga.

<b>2º modo - 0,5 de uma das pontas</b>			
	30% dano	50% dano	70% dano
1ª Freq	0,15%	0,50%	1,46%
2ª Freq	<b>0,00%</b>	<b>0,01%</b>	<b>0,01%</b>
3ª Freq	1,59%	5,95%	23,46%

Para o caso da terceira frequência, a viga foi danificada a um terço de cada extremidade. Como trata se de um modo mais alto, o número de lugares danificados também aumenta. A variação de frequências para este caso é mostrado na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Variação de frequências numéricas com danos a um terço de cada extremidade.

<b>3º modo - 0,33 de uma das pontas</b>			
	30% dano	50% dano	70% dano
1ª Freq	2,22%	2,22%	83,62%
2ª Freq	2,04%	6,21%	70,93%
3ª Freq	<b>0,03%</b>	<b>0,38%</b>	<b>35,16%</b>
<b>3º modo - 0,66 de uma das pontas</b>			
	30% dano	50% dano	70% dano
1ª Freq	1,46%	0,41%	0,27%
2ª Freq	1,59%	4,82%	18,44%
3ª Freq	<b>0,61%</b>	<b>1,47%</b>	<b>3,62%</b>

Para o caso da análise da segunda frequência, os valores foram bem razoáveis, pois a variação de frequências foi bem menor que no caso da viga bi apoiada. A variação é 0,01% é considerada desprezível perto da variação das outras frequências analisadas.

Para o caso da terceira frequência, percebe se que os valores medidos não foram tão pequenos quanto esperados, porém foram menores que as duas frequências anteriores, sugerindo que realmente os danos provocados influem menos no terceiro modo em relação aos dois outros modos analisados.

Um estudo em relação a viga engastada livre também foi feita nos mesmos moldes do exemplo anterior. Os lugares danificados foram os mesmos sugeridos pelo estudo do capítulo anterior. Para a segunda frequência a região danificada é a 78% da ponta livre da viga. A variação de frequências para este caso é mostrado na tabela 5.4.

Para o caso da terceira frequência, a viga foi danificada no meio da viga e a 87% de distância da extremidade livre. A variação de frequências naturais para este caso esta mostrado na tabela 5.5.

Tabela 5.4: Variação de freqüências numéricas com dano a 78% da extremidade livre.

<b>2º modo - 0,78 da ponta livre</b>				
	30% dano	50% dano	70% dano	90% dano
1ª Freq	1,38%	2,39%	3,57%	7,93%
<b>2ª Freq</b>	<b>0,12%</b>	<b>0,19%</b>	<b>0,16%</b>	<b>0,18%</b>
3ª Freq	0,07%	0,00%	0,35%	2,31%
4ª Freq	0,07%	0,12%	0,15%	1,91%

Tabela 5.5: Variação de freqüências numéricas com danos a 50% e a 87% da extremidade livre.

<b>3º modo - 0,87 da ponta livre</b>				
	30% dano	50% dano	70% dano	90% dano
1ª Freq	6,96%	10,21%	13,64%	21,58%
2ª Freq	0,25%	1,02%	1,82%	4,06%
<b>3ª Freq</b>	<b>0,06%</b>	<b>0,08%</b>	<b>0,12%</b>	<b>0,12%</b>
4ª Freq	0,57%	1,84%	5,35%	9,76%
<b>3º modo - 0,50 da ponta livre</b>				
	30% dano	50% dano	70% dano	90% dano
1ª Freq	2,48 %	4,19%	5,32%	1,98%
2ª Freq	0,06%	0,41%	1,54%	7,16%
<b>3ª Freq</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,03%</b>	<b>7,57%</b>
4ª Freq	1,57%	5,80%	21,10%	47,53%

Para a viga engastada livre, o estudo apresentou melhores resultados. Apoiando as afirmações sugeridas pela abordagem teórica. Os valores encontrados foram os esperados, ou seja, valores quase nulos quando comparados com as outras freqüências. As diferenças encontradas podem ser consideradas bem razoáveis.

Pode se considerar que o ensaio numérico comprovou os resultados levantados na análise teórica. As diferenças encontradas podem ser atribuídas a discretização do modelo, ou seja, o ponto sugerido na abordagem teórica tem um comprimento real no ensaio numérico de cerca de 1% do comprimento total da viga, influenciando assim nas freqüências medidas.

## **6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

### **6.1 Introdução**

Os ensaios experimentais são necessários para uma análise mais efetiva e real do sistema de detecção de dano, pois apenas através deles pode se comprovar a efetividade do sistema frente aos problemas reais, como ruído dos sensores, imprecisão no modelo de FEM, etc. Os ensaios resumem-se a medição das primeiras 7 frequências de ressonâncias da estrutura estudada para cada condição de dano, além da condição de estrutura sem dano. Assim como nos ensaios numéricos, o desempenho do algoritmo SA foi comparado com GA.

### **6.2 Materiais**

Tanto para a medição da viga quanto para o ensaio do pórtico, os materiais foram os mesmos. O material utilizado está descrito abaixo:

- Notebook COMPAQ. Processador: AMD Duron 900 MHz. 240 Mb de memória RAM;
- Bateria 5 V (usado nos acelerômetros ADXL);
- Dois acelerômetros MEMS ADXL-311 (Analog Devices, 2003)  $\pm 2g$ . Sensibilidade de 312mV/g;
- Dois acelerômetros ENDEVCO  $\pm 10g$ . Modelo 2250A. Sensibilidade de 10mV/g e massa de 0,4g;
- Sistema de amplificação ENDEVCO 109 (ganho de 100);
- Software Agilent Vee 7.5 (Agilent Vee Pro 7.5, 2005a);
- Placa de aquisição 16 bits PCMCIA (Measurements Computing) com oito canais;
- Cera de abelha utilizada para fixação dos acelerômetros.

O amplificador Endevco foi utilizado nos acelerômetros de mesma marca em função da baixa sensibilidade dos mesmos.

### **6.3 Determinação do Módulo de Elasticidade**

Este ensaio é essencial para a simulação, já que na maioria das vezes, é difícil saber a composição do material a ser ensaiado, portanto não se pode estimar com baixa incerteza suas propriedades físicas.

Para essa determinação, foi realizado o ensaio de aquisição das primeiras duas frequências fundamentais de uma viga engastada-livre. Através destas frequências, pode-se estimar valores mais confiáveis do Módulo de Elasticidade (E) da liga com a equação analítica das frequências em função das propriedades físicas do material a ser ensaiado (Equação 6.1).

$$\omega_1 = (1,875)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^3}} \quad (6.1)$$

$$\omega_2 = (4,694)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^3}} \quad (6.2)$$

onde:  $\omega$ : Frequência de ordem n; E: Módulo de Elasticidade; I: Momento de Inércia; m: massa por metro da viga e L: comprimento da viga engastada.

Na figura 6.1 pode-se observar o espectro de frequência de uma dos cinco ensaios realizados para a determinação do módulo de elasticidade do material analisado. Podem-se observar nitidamente as três primeiras frequências bem definidas, sendo que apenas as duas primeiras frequências foram utilizadas. O software utilizado para o tratamento dos valores obtidos foi o Agilent Vee Pro 7.5.

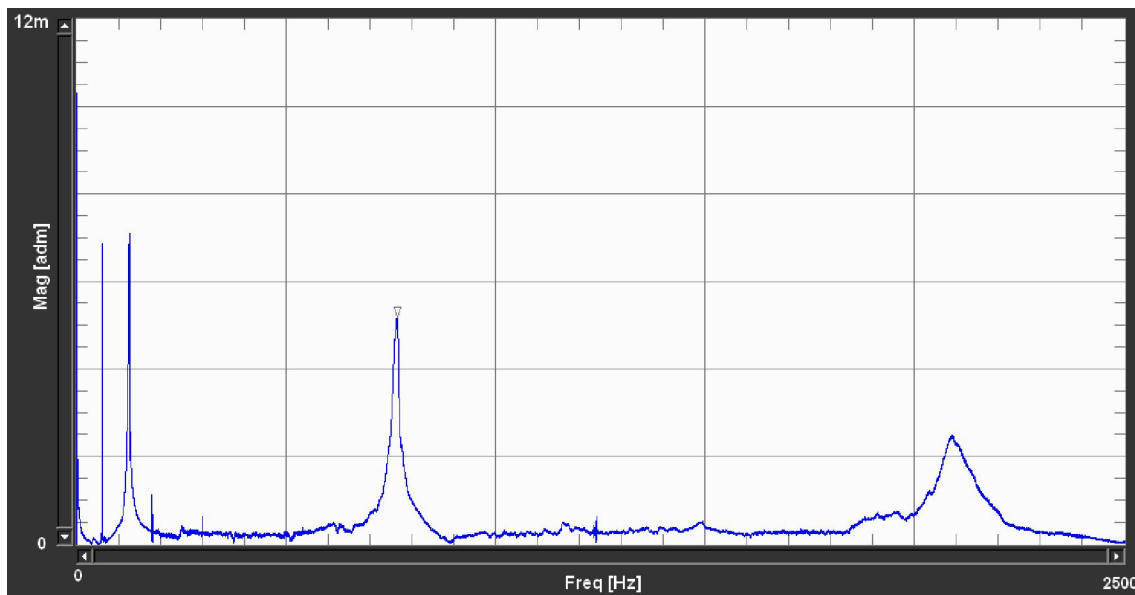


Figura 6.1: Análise do espectro adquirido no domínio da frequência.

O valor utilizado foi a média entre a média dos módulos de elasticidade calculados para a primeira e para a segunda frequências fundamentais.

#### 6.4 Ensaio da viga engastada livre



Nesse teste, uma viga engastada livre foi utilizada e testada, como indica a figura 6.1.

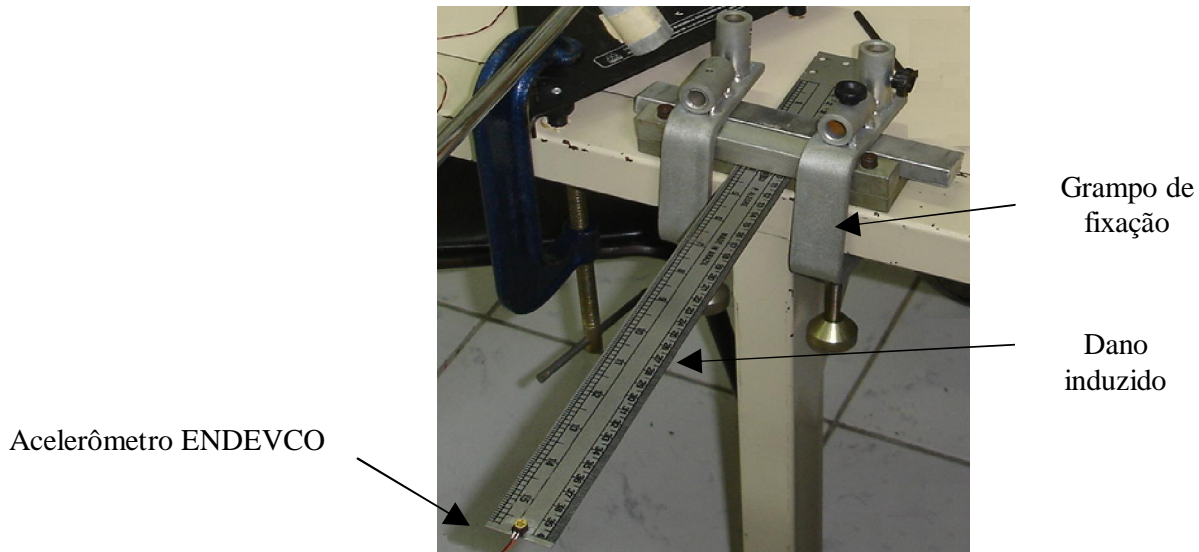


Figura 6.2: Montagem da viga engastada utilizada nos ensaios.

A viga utilizada possui seção transversal de 35,2mm x 0,9mm e comprimento de 303,5mm. O dano (corte) foi introduzido a 227,5mm em relação a ponta livre da viga. O módulo de elasticidade utilizado foi de 155GPa, valor conseguido através do ensaio de tração. A densidade foi de 7800 kg/m<sup>3</sup>, valor obtido ao pesar a viga e dividir pelo volume ocupado pela viga.

O dano foi aumentado passo a passo cortando-se cada vez mais o mesmo rasgo, de modo a comprometer 20%, 50% e 70% do momento de inércia da viga.

Para a investigação de desempenho do algoritmo, as sete primeiras frequências naturais da estrutura (danificadas e sem dano) foram utilizadas para como parâmetros de entrada para os algoritmos SA e GA para maximizar a função de custo.

Na Tabela 6.1 são mostrados as frequências medidas para cada condição de dano.

Tabela 6.1: Frequências experimentais para cada condição de dano.

Frequências Experimentais (Hz)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Sem dano</b>	6,8	43,5	122,2	239,7	398,8	595,5	837,3
<b>10% elemento 6</b>	6,8	43,5	122,2	239,2	398,4	596,5	832,8
<b>20% elemento 6</b>	6,7	43,5	121,8	238,4	397,7	594,8	828,0
<b>30% elemento 6</b>	6,7	43,4	121,1	237,0	397,5	592,2	822,2
<b>40% elemento 6</b>	6,6	43,4	120,0	235,3	396,0	588,1	812,4
<b>50% elemento 6</b>	6,5	43,3	118,8	233,1	393,9	582,5	802,6
<b>70% elemento 6</b>	6,2	43,0	114,6	226,7	387,6	546,2	776,8

De acordo com a tabela 6.1, todas as frequências reduziram ou mantiveram o mesmo valor com o aumento do dano. Teoricamente, todas as frequências devem reduzir de valor ao invés de manter o mesmo valor, mas isso pode ser justificado pela mistura de ruído e sinal vindo dos acelerômetros.

Nas figuras abaixo estão mostradas o desempenho de ambos os métodos (SA e GA) para a maximização da função de custo sugerida por Silva, 2006 (equação 2.3).

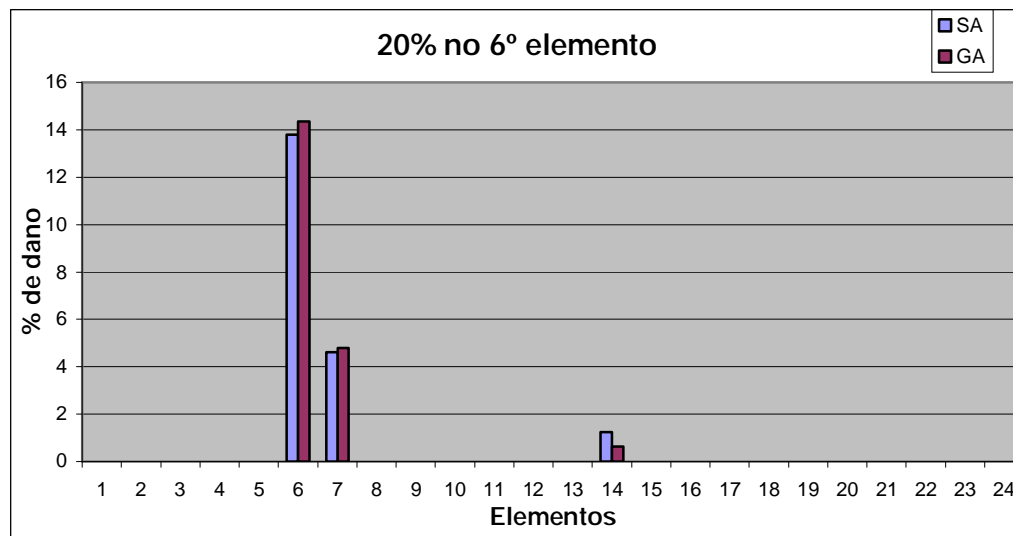


Figura 6.3: Gráficos de barra do teste experimental do caso de 20% de dano no elemento 6.

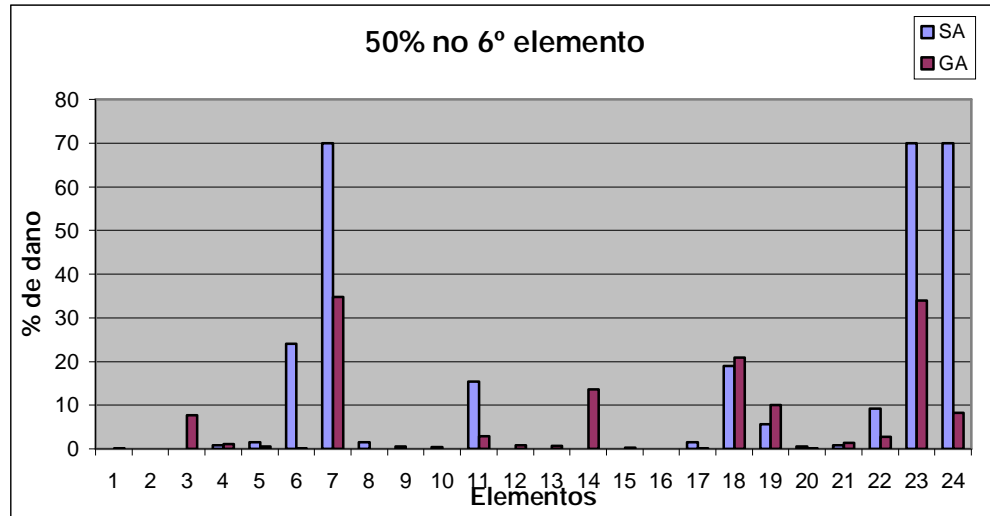


Figura 6.4: Gráficos de barra do teste experimental do caso de 50% de dano no elemento 6.

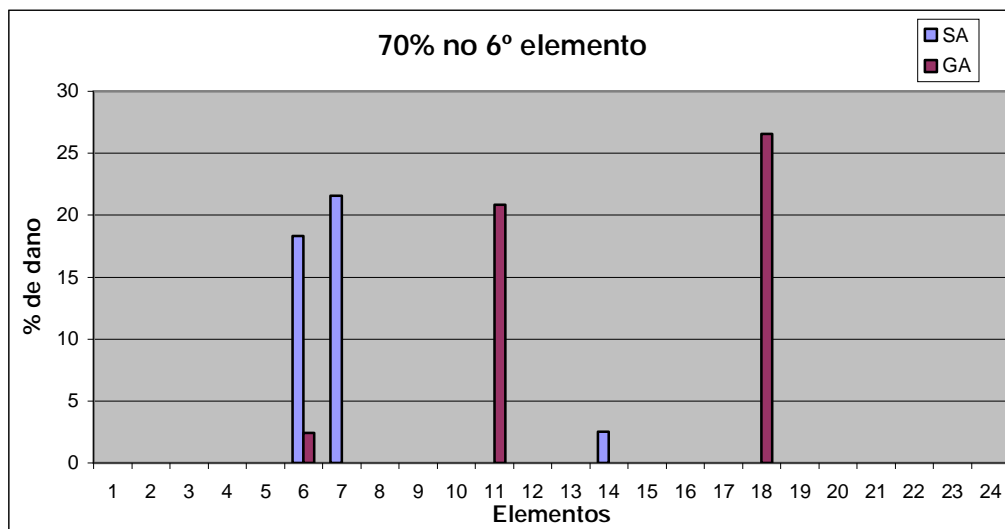


Figura 6.5: Gráficos de barra do teste experimental do caso de 70% de dano no elemento 6.

Um caso com 10% de dano no sexto elemento foi investigado, mas os algoritmos não conseguiram identificar o dano, sendo que ambos os casos mostraram uma estrutura íntegra para este caso.

É facilmente percebido que a localização do dano é um parâmetro razoavelmente bem encontrado pelo SA, mas a extensão do mesmo nem sempre é encontrado com esperada exatidão. Este problema é também citado por Messina *et al.* [1998] para o índice MDLAC. A extensão do dano foi mais bem identificada em todos os casos, utilizando a função de custo de Silva, 2006 (equação 2.3).

## 6.5 Redução de Temperatura

Como citado no tópico 3.4, a forma de resfriamento do método é um importante parâmetro heurístico para SA, pois interfere diretamente no desempenho do algoritmo.

Um teste utilizando 3 esquemas de resfriamento foram testados. As equações utilizadas para o decaimento da temperatura são as equações 6.3, 6.4 e 6.5. A figura 6.6 mostra o caimento da temperatura nas equações citadas em função do número de iterações.

$$T_{j+1} = T_{initial} / \ln(j) \quad (6.3)$$

$$T_{j+1} = T_{initial}^{(1/\sqrt{j})} \quad (6.4)$$

$$T_{j+1} = \beta T_j \quad (6.5)$$

onde:  $T_{j+1}$  significa a temperatura na próxima iteração,  $j$  número da iteração,  $\beta$  significa uma constante real entre 0 e 1. O valor de  $\beta$  define a curvatura de redução de temperatura. Este parâmetro foi testado para vários casos.

Na figura a seguir, é mostrado o comportamento da queda de temperatura em função do número de iterações. A primeira curva, determinada pela equação 6.5 é mostrada com igual a 0,8.

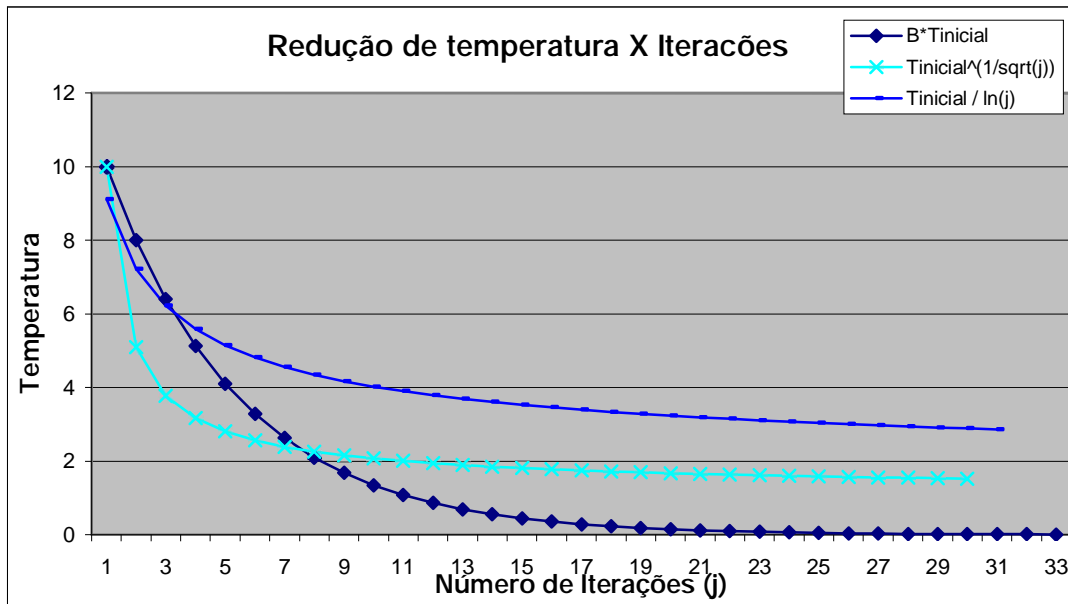


Figura 6.6: Comportamento da redução de temperatura em função do número de iterações.

O melhor desempenho foi observado com esquema definido pela equação 6.5, com igual a 0,8. Para as outras duas equações o algoritmo não chegou ao valor de função de custo esperado e também não convergiu. Estas conclusões foram concluídas após vários teste com a mesma *condição* de dano, alterando apenas as curvas de redução de temperatura e os valores de .

## **6.6 Comprovação experimental da predição dos lugares onde não ocorre variação de frequência em função do dano**

Como foi descrito no capítulo 5.4, o ensaio numérico apóia a investigação teórica. Neste capítulo, testes experimentais serão descritos com o objetivo de verificar se os resultados levantados anteriormente são comprovados em experimentos. Um ensaio onde uma viga engastada livre é danificada nos locais onde não ocorre variação de determinadas frequências.

As vigas utilizadas são semelhantes a descrita no capítulo 6.4. As frequências foram medidas através de acelerômetros instalados em posições onde os modos a serem medidos seriam medidos com maior facilidade, previamente indicados através de uma simulação.

Quatro ensaios em cada condição de dano foram executados no intuito de se verificar a repetitividade do processo, que se mostrou muito estável.

Para este primeiro ensaio experimental, a viga foi danificada a 78% da extremidade livre da viga. A tabela 6.2 mostra a variação das 4 primeiras frequências nos 4 ensaios realizados para as 3 condições de dano (30%, 50% e 70% de dano), com ênfase para a segunda frequência que praticamente não varia.

Tabela 6.2: Variação das frequências experimentais (%) para o segundo modo de vibração, em porcentagem.

30% DE DANO					50% DE DANO					70% DE DANO				
modos ->	1	2	3	4	modos ->	1	2	3	4	modos ->	1	2	3	4
ensaios					ensaios					ensaios				
1	0,78	<b>0,04</b>	0,29	0,66	1	1,83	<b>0,04</b>	0,88	1,73	1	3,92	<b>0,12</b>	2,28	3,67
2	0,78	<b>0,04</b>	0,29	0,63	2	3,92	<b>0,12</b>	0,88	1,56	2	3,92	<b>0,12</b>	2,28	3,64
3	0,78	<b>0,04</b>	0,29	0,63	3	0,78	<b>0,12</b>	0,99	1,64	3	3,92	<b>0,12</b>	2,28	3,58
4	0,78	<b>0,04</b>	0,35	---	4	1,83	<b>0,12</b>	0,99	1,73	4	4,96	<b>0,12</b>	2,34	3,73
<b>MÉDIA</b>	<b>0,78</b>	<b>0,04</b>	<b>0,31</b>	<b>0,64</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>2,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,94</b>	<b>1,67</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>4,18</b>	<b>0,12</b>	<b>2,29</b>	<b>3,65</b>

Pode se verificar que a variação do segundo modo é sempre menor que os outros modos, comprovando que realmente a região danificada interfere muito pouco na variação desta frequência.

Tabela 6.3: Variação das frequências experimentais (%) para o terceiro modo de vibração.

30% DE DANO					50% DE DANO					70% DE DANO				
modos ->	1	2	3	4	modos ->	1,0	2,0	3,0	4,0	modos ->	1,0	2,0	3,0	4,0
ensaios					ensaios					ensaios				
1	0,47	0,43	<b>0,05</b>	1,10	1	0,47	2,46	<b>0,26</b>	2,67	1	5,16	6,38	<b>0,56</b>	6,71
2	0,47	1,01	<b>0,05</b>	0,73	2	0,47	2,46	<b>0,26</b>	2,77	2	1,41	6,52	<b>0,56</b>	5,87
3	2,35	1,01	<b>0,20</b>	1,41	3	0,47	2,61	<b>0,31</b>	2,64	3	1,41	6,67	<b>0,61</b>	6,37
4	0,47	0,87	<b>0,15</b>	1,07	4	2,35	2,46	<b>0,26</b>	2,96	4	1,41	6,38	<b>0,67</b>	5,79
<b>MÉDIA</b>	<b>0,94</b>	<b>0,83</b>	<b>0,12</b>	<b>1,08</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>0,94</b>	<b>2,50</b>	<b>0,27</b>	<b>2,76</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>2,35</b>	<b>6,49</b>	<b>0,60</b>	<b>6,18</b>

A mesma conclusão obtida com a segunda frequência pode ser estendida para o terceiro modo, pois a variação de frequência neste modo foi muito pequena em relação as outras frequências.

Os resultados foram muito bons, tendo em vista que trata se de um ensaio experimental. A diferença percebida tem a mesma justificativa que os ensaios numéricos. Como a serra utilizada para gerar o dano tem espessura de 0,7mm, o dano na viga teve uma largura por volta de 1mm, fato que interfere diretamente nas medidas realizadas, justificando assim as diferenças encontradas.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

Primeiramente, pode-se afirmar que as variações de frequências são muito pequenas para danos menores do que 10% de dano, o que em muitos casos, compromete completamente a integridade da estrutura. Portanto, tentar detectar danos menores que este valor pode não ser viável para os níveis de ruído obtidos nos sensores atuais, que estão da ordem de 2,5% para frequências naturais.

A análise estatística se mostrou muito necessária para qualquer sistema de detecção de dano, pois através dela, será possível avaliar as limitações do sistema.

Pode se afirmar que tanto os ensaios numéricos quanto os experimentais apóiam os resultados descritos na abordagem teórica, inclusive confirmando que quando a segunda derivada do modo é igual a zero, têm-se um ponto de variação nula de frequências para o tal modo estudado, como sugerido nesse trabalho. O desvio dos valores esperados foi maior nos ensaios numéricos, que se apresentaram desta forma provavelmente devido à discretização do modelo utilizado.

O método SA se mostrou eficiente para os casos estudados, comparando se em eficiência e tempo de processamento ao método de algoritmos genéticos, o que afirma que existe viabilidade da utilização deste método em estruturas mais complexas.

De forma geral, este trabalho mapeou os possíveis motivos de alteração de frequências naturais em função do dano introduzido na estrutura, além de mostrar que tentar detectar dano apenas com as primeiras frequências é uma forma pouco viável, pois mesmo nos casos mais simples (como das vigas ensaiadas) os experimentos mostraram diferenças entre os locais indicados pelo algoritmo e o local danificado.

### 7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se generalizar que qualquer melhoria que reduza as diferenças entre modelos paramétricos (FEM) e experimentais pode trazer benefícios no sentido de redução de incertezas do sistema de detecção de dano.

Outro fator que pode melhorar a eficiência do método é a redução de ruído dos sensores. Um trabalho nesta linha traduz melhor o comportamento da estrutura, adquirindo sinais

mais fieis a estrutura, podendo aumentar a capacidade do sistema em procurar danos cada vez menores.

Avaliar a relação entre as equações de primeira e segunda ordem sugeridas por Messina *et al.* [1998] e as respostas do modelo paramétrico gerado pelo método de elementos finitos. Ou seja, entender em quais casos a primeira ordem se comporta melhor que a segunda ordem. Se for possível entender a relação entre estes dois modelos, a velocidade do processo de procura de dano será acelerada em muitas vezes.

Avaliar danos em uma estrutura real com grande responsabilidade, como pontes metálicas, chassis de automóvel, sujeitas aos carregamentos reais, como cargas dinâmicas, variações nas condições de contorno (juntas emperradas, etc), alteração de massa, etc.

Estudar como as possíveis mudanças nas condições de contorno podem alterar as frequências naturais e atrapalhar a detecção de dano. Sugerir formas de compensar nas equações de frequência, as possíveis variações ocorridas nas condições de contorno.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agilent Vee Pro 7.5, *Agilent Vee Pro User's Guide*, Agilent Technologies, Inc., 9th Edition, 626p., May, 2005a.
- Binici, B., *Vibration of beams with multiple open cracks subjected to axial force*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 287, pp.277-295, 2005.
- Carrilo, O. J. B., *Algoritmo Híbrido para a Avaliação da Integridade Estrutural: uma Abordagem Heurística*. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 152p., 2007.
- Cerny, V., *Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm*. Journal Optimum Theory Applied (34), 1985.
- Chapman, S. J., *FORTRAN 90/95 for Scientists and Engineers*. Second Edition. Mcgraw-Hill series in general engineering.
- Clough, R. W.; Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc., 1975.
- Doebling, S. W.; Farrar, C. R.; Prime, M. B.; Shevitz, D. W., Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS, 1996.
- EFE. *Queda de ponte na China deixa 29 operários mortos. Website disponível em <<http://noticias.uol.com.br/ultnot/efe/2007/08/14/ult1807u39112.jhtm>>. Acessado em 20 de Maio de 2008.*
- Friswell, M. I.; Penny, J. E. T., *Is damage Location using vibration measurements practical?*, Proceedings of the EUROMECH 365, International Workshop: DAMAS 97, Structural damage Assessment using Advanced Signal Processing Procedures, Sheffield, UK, June/July, 1997.
- Gadea, A. S. M., *Identificação de Danos Estruturais a Partir da Minimização dos Erros das Funções de Resposta em Frequência via Métodos de Otimização*, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- Goffe, W., *Simulated Annealing - Global Optimization Method That Distinguishes Between Different Local Optima*. Website disponível em: <<http://emlab.berkeley.edu/Software/abstracts/goffe895.html>>. Acessado em 01 Abril de 2008. 16:30:30.
- Gomes, H. M., Erbatur, Almeida, F. J. F., Giordane, G., Souza, F. H. *Theoretical frequency variation due to crack on beams*, Artigo submetido ao DINAME 2009.

- Hasançebi, O., Erbatur, F., *Layout optimization of trusses using simulated annealing*, Advanced in Engineering Software, 33 pp.681-696, 2002.
- He, R, Hwang, S., Damage Detection by an Adaptive Real-parameter Simulated Annealing Genetic Algorithm, Computers & Structures, 84, pp.2231-2243, 2006.
- Higginson, J. S., Neptune, R. R., Anderson, F. C., *Simulated Annealing with a neighbourhood for optimization of biomechanical system*, Journal of Biomechanics 38, pp. 1938-1942, 2005.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P., *Optimization by Simulated Annealing*, Science 4598, pp.671-80, 1983.
- Lieven, N.A.J. e Ewins, D. J., *Spatial Correlation of modes Shapes, the Coordinate Modal Assurance Criterion*, Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Modal Analysis, pp.231-244, 1988.
- Lin, R., Cheng, F., *Multiple crack identification of a free-free beam with uniform material property variation and varied noised frequency*, Engineering Structures 30 pp.909-929, 2007.
- Iturrioz, I.; Pasquetti, E.; Doz, G.; D'ambra, R. B., *Evaluation of structural damage through changes in dynamic properties*. In: International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21<sup>st</sup> Century - NDTISS'99, Torres, p. 162, 1999.
- Jeong, I.; Lee, J.; Contursi, T., *Adaptative simulated annealing genetic algorithm for system identification*, Vol. 9, No. 5, pp.523-532, 1996.
- Messina, A.; Williams, E. J.; Contursi, T., *Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 216, No. 5, pp.791-808, 1998.
- Rytter, A., *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*, PhD. Thesis, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 1993.
- Silva, N. R. S., *Algoritmos Genéticos para a Detecção de Dano Estrutural*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. PROMEC –UFRGS. Porto Alegre, RS, 134p, 2006.
- Xia, Y., Hao, H., *Statistical Damage Identification of Structures with Frequency Changes*, Journal of Sound and Vibration, 263 pp.:853-870, 2002.

## ANEXOS

## ANEXO 1 – CODIFICAÇÃO DO ALGORITMO SIMULATED ANNEALING UTILIZADO NO TRABALHO.

```

C.....
PROGRAM SIMANN
C....  DIMENSION BLOCK
        DOUBLE PRECISION,ALLOCATABLE::LB(:),UB(:),X(:),XOPT(:),C(:),XPRINT(:),
        .                               VM(:),XX(:),
        .                               FSTAR(:),XP(:),FREQN(:),FREQD(:,:),
        .                               DDDDW2(:,:),FREQNN(:)
        INTEGER(4), ALLOCATABLE:: NACP(:)
C....  DIMENSION BLOCK
        DOUBLE PRECISION T,EPS,RT,FOPT,AA,BB,CC
        INTEGER NS,NT,NFCNEV,IER,MAXEVL,IPRINT,NACC,NOBDS,IOCHEK,IPOSI,
        .                               NUNIT,IMAX
        INTEGER NPROB,NELEM,NPOIN,NDOFN,NNODE,NEVAB,NTOTG,NBAND,IITERA,
        .                               NNDX2,NNDX3,NNDX4,NINPUT,NOUPUT,NINPST,NMODE,NCASE

        LOGICAL MAX
C      EXTERNAL FCN
        CHARACTER*12 ARQ,ARQ1,ARQ2,ARQ3,TITLE
C....  COMMON BLOCK
        COMMON /PARAM/ NPROB,NELEM,NPOIN,NDOFN,NNODE,NEVAB,NTOTG,NBAND,
        .                               NNDX2,NNDX3,NNDX4,NINPUT,NOUPUT,NINPST,NCASE,
        .                               NMODE
C.....
        WRITE(6,20)
1      CONTINUE
        READ(*,'(A12)',IOSTAT=IOCHEK) ARQ
        IF (IOCHEK.GE.1) GO TO 1
c      ARQ='teste.dat'
        IPOSI=INDEX(ARQ,'.',.TRUE.)
        IF(IPOSI.EQ.0) THEN
            WRITE(*,*) '# - file data not found'
            STOP
        END IF
        NUNIT=1
        NINPST=4
        NOUPUT=6
        ARQ1=ARQ(1:(IPOSI-1))//'.DAT'
        ARQ2=ARQ(1:(IPOSI-1))//'.OUT'
        ARQ3=ARQ(1:(IPOSI-1))//'.STR'
C....  OPEN FILES
        OPEN(UNIT=NUNIT,FILE=ARQ1,STATUS='OLD',IOSTAT=IOCHEK,
        .                               FORM='FORMATTED')
        OPEN(UNIT=NOUPUT,FILE=ARQ2,STATUS='OLD',IOSTAT=IOCHEK,
        .                               FORM='FORMATTED')
        OPEN(UNIT=NINPST,FILE=ARQ3,STATUS='OLD',IOSTAT=IOCHEK,
        .                               FORM='FORMATTED')
        CALL TIMER(1,6)
        READ(NUNIT,*) N,NEPS,NS,NT,MAXEVL,IPRINT,IMAX,EPS,RT,T,NMODE,
        .                               NCASE

```

```

        IF (IMAX.EQ.1) THEN
            MAX=.TRUE.
        ELSE
            MAX=.FALSE.
        END IF
C..... READING STRUCTURAL PARAMETERS
        READ(NINPST,*) TITLE
        READ(NINPST,*) NPOIN,NELEM,NDOFN,NNODE
        NEVAB=NDOFN*NNODE
        NTOTG=NELEM*NEVAB
        NBAND=NDOFN*NPOIN
        NNDX2=2
        NNDX3=3
        NNDX4=4

C.... ALLOCATE MATRICES
        ALLOCATE (LB(N),UB(N),X(N),C(N),VM(N),FSTAR(NEPS),
        .
        .
        .
        XP(N),XX(N),XOPT(N),XPRINT(N),
        NACP(N),FREQN(NMODE),FREQD(NMODE,NCASE),
        .
        .
        .
        FREQNN(NBAND),DDDDW2(NBAND,NELEM))

        READ(NUNIT,*) AA,BB,CC
        DO I=1,N
            LB(I)=AA
            UB(I)=BB
            X(I)=CC
            XX(I)=0.0
        END DO
        READ(NUNIT,*) (FREQN(IMODE),IMODE=1,NMODE)
        DO J=1,NCASE
            READ(NUNIT,*) (FREQD(I,J),I=1,NMODE)
        END DO

C..... CALL F.E.M. ANALYSIS TO OBTAIN FREQUENCY AND MATRIX FOR UNDAMAGED STRUCTURE
        CALL FRAME3D(TITLE,XX,FREQNN,DDDDW2)

C.... SET LOWER AND UPPER VARIABLES' BOUND
C.... SET THE GUESS VALUES TO DESIGN VARIABLES
C.... SET THE STEP LENGHT RANGE ADJUSTMENT
C.... SET INPUT VALUES FOR THE I/O PARAMETERS
        DO I=1,N
            C(I)=1.5D+00
            VM(I)=1.0D+00
        END DO

C....
        WRITE(*,1000) N,MAX,T,RT,EPS,NS,NT,NEPS,MAXEVL,IPRINT

C....
        CALL SA(N,X,MAX,RT,EPS,NS,NT,NEPS,MAXEVL,LB,UB,C,IPRINT,
        .
        .
        .
        T,VM,XOPT,FOPT,NACC,NFCNEV,NOBDS,IER,FSTAR,XP,NACP,
        .
        .
        .
        FREQN,FREQD,DDDDW2,FREQNN)

C.... WRITES FINAL DESIGN VARIABLE SOLUTION
        DO I=1,N
            IF (XOPT(I).GT.1.0D-03) THEN
                XPRINT(I)=XOPT(I)*100
            ELSE
                XPRINT(I)=(0.0)
            END IF
        END DO
        END DO
    
```

```

WRITE(*,1002) (XPRINT(I),I=1,N)
DO I=1,N
    WRITE(6,1004) XPRINT(I)
END DO
C.... WRITES FINAL STEP LENGHT VECTOR
WRITE(*,1003) (VM(I),I=1,N)
C.... WRITES FUNC. EVAL., ACCEPTED DOWHILL, UPHILL, FOUND OPTIMUM
WRITE(*,1001) FOPT,NFCNEV,NACC,NOBDS,T,IER
CALL TIMER(1,6)
C.... FORMAT
20 FORMAT(1X,'Program for optimization with SIMULATED ANNEALING'//,
.      1X,'-----'//,
.      1X,'Data file name      :',\ )
1000 FORMAT('SIMULATED ANNEALING EXAMPLE'//,
.      'DESIGN VARIABLES=',I6//,
.      'MAXIMAZATION      =',L2//,
.      'INITIAL TEMP      =',E10.4//,
.      'RT                  =',E10.4//,
.      'EPS                  =',E10.4//,
.      'NS                    =',I10//,
.      'NT                    =',I10//,
.      'NEPS                  =',I10//,
.      'MAXEVL                =',I10//,
.      'IPRINT                =',I10)
1001 FORMAT('OPT. FUNC. VALUE      =',E10.4//,
.      'NUM. OF FUNCTION EVAL.    =',I10//,
.      'NUM. OF ACCEPTED EVAL.    =',I10//,
.      'NUM. OF OUT OF BOUND EVAL.=',I10//,
.      'FINAL TEMP              =',E10.4//,
.      'IER                      =',I10)
1002 FORMAT('FINAL DESIGN VARIABLE SOLUTION'//,10(E10.4,1X))
1003 FORMAT('FINAL STEP LENGHT VECTOR      ',/,10(E10.4,1X))
1004 FORMAT(100(E10.4,1X))
STOP
END
C.....
C.....
SUBROUTINE SA(N,X,MAX,RT,EPS,NS,NT,NEPS,MAXEVL,LB,UB,C,IPRINT,
.      T,VM,XOPT,FOPT,NACC,NFCNEV,NOBDS,IER,FSTAR,XP,NACP,
.      FREQN,FREQD,DDDDW2,FREQNN)
C.....
C..... DIMENSION BLOCK
LOGICAL MAX
INTEGER NPROB,NELEM,NPOIN,NDOFN,NNODE,NEVAB,NTOTG,NBAND,
.      NNDX2,NNDX3,NNDX4,NINPUT,NOUPUT,NINPST,NCASE
C.... COMMON BLOCK
COMMON /PARAM/ NPROB,NELEM,NPOIN,NDOFN,NNODE,NEVAB,NTOTG,NBAND,
.      NNDX2,NNDX3,NNDX4,NINPUT,NOUPUT,NINPST,NCASE,
.      NMODE
C.... Type all internal variables.
DOUBLE PRECISION X(N),LB(N),UB(N),C(N),VM(N),FSTAR(NEPS),
.      IITERA,XOPT(N),XP(N),T,EPS,RT,FOPT
INTEGER NACP(N),N,NS,NT,NEPS,NACC,MAXEVL,IPRINT,NOBDS,
.      I-
ER,NFCNEV,NTOTMOV,XTEST(N)

```

```

DOUBLE PRECISION  F,FP,P,PP,RATIO,RANMAR,FATOR,TINICIAL,TFINAL,A,B
DOUBLE PRECISION  FREQN(NMODE),FREQD(NMODE,NCASE),
                  DDDW2(NBAND,NELEM),FREQNN(NBAND),FREQX(NBAND)
INTEGER  NUP,NDOWN,NREJ,NNEW,LNOBDS,H,I,J,M,K
LOGICAL  QUIT

C....  If the initial temperature is not positive, notify the user and
C      return to the calling routine.
      IF(T.LE.0.0)THEN
          WRITE(*,*) 'T0 IS NOT POSITIVE, RESET VARIABLE T-STOPPED'
          IER=3
          RETURN
      END IF

C....  Initialize the random number generator
      RANMAR=DRAND(1)

C....  Set initial values.
      NACC  =0
      NOBDS =0
      NFCNEV =0
      IER   =99

C....  If the initial value is out of bounds, notify the user and return
C      to the calling routine.
      DO I=1,N
          XOPT(I)=X(I)
          NACP(I)=0
          IF ((X(I).GT.UB(I)).OR.(X(I).LT.LB(I))) THEN
              WRITE(*,28)'INITIAL GUESS VALUES ARE OUT OF BOUNDS -STOPPED'

          IER = 2
          RETURN
      END IF
      END DO

C....
      DO I=1,NEPS
          FSTAR(I)=1.0D+20
      END DO

C....  Evaluate the function with input X and return value as F.
      CALL FCN(N,X,FREQN,FREQD,DDDDW2,FREQNN,FREQX,F)

C....  If the function is to be minimized, switch the sign of the function.
C      Note that all intermediate and final output switches the sign back
C      to eliminate any possible confusion for the user.
      IF(.NOT. MAX) F=-F
      NFCNEV=NFCNEV+1
      FOPT=F
      FSTAR(1)=F

C....  WRITES INITIAL DESIGN VARIABLE GUESS AND OPTIMUM
      TINICIAL=T
      IF(IPRINT.GE.1) THEN
          WRITE(*,10) (X(I),I=1,N)
          IF (MAX) THEN
              WRITE(*,29)'INITIAL OPTIMUM VALUE=',F
          ELSE
              WRITE(*,29)'INITIAL OPTIMUM VALUE=',-F
          END IF
      END IF

C....  Start the main loop. Note that it terminates if

```

```

C          (a) the algorithm succesfully optimizes the function or
C          (b) there are too many function evaluations (more than MAXEVL)
QUIT=.FALSE.
c          IITERA=0
          DO WHILE(.NOT.QUIT)
              NUP      =0
              NREJ     =0
              NNEW     =0
              NDOWN    =0
              LNOBDS   =0
C....      Annealing Simulation
          DO M=1,NT
C....          Metropolis Simulation
              DO J=1,NS
C....          Sensitivity Simulation
                  DO H=1,N
C....          Gen. XP,the trial val. of X. Note use of VM to selec. XP
                      DO I=1,N
                          IF(I.EQ.H) THEN
                              XP(I)=X(I)+(DRAND(0)*2.- 1.)* VM(I)
                          ELSE
                              XP(I)=X(I)
                          END IF
C....          If XP is out of bounds, sel. a point in
                          bounds for the trial.
                              IF((XP(I).LT.LB(I)).OR.(XP(I).GT.UB(I)))
                                  THEN
                                      XP(I)=LB(I)+(UB(I)-LB(I))*DRAND(0)
                                      LNOBDS=LNOBDS+1
                                      NOBDS=NOBDS+1
                                      IF(IPRINT.GE.3) THEN
                                          WRITE(*,12) (X(K),K=1,N)
                                          IF (MAX) THEN
                                              WRITE(*,13) F
                                          ELSE
                                              WRITE(*,13) -F
                                          END IF
                                          WRITE(*,14)
                                  (XP(K),K=1,N)
                                      END IF
                                  END IF
                              END DO
                              CALL FCN(N,XP,FREQN,FREQD,DDDDW2,FREQNN,FREQX,FP)
                              IF(.NOT.MAX) FP=-FP
                              NFCNEV=NFCNEV+1
                              IF(IPRINT.GE.3) THEN
                                  WRITE(*,12) (X(K),K=1,N)
                                  IF (MAX) THEN
                                      WRITE(*,13) F
                                      WRITE(*,16) (XP(K),K=1,N)
                                      WRITE(*,17) FP
                                  ELSE
                                      WRITE(*,13) -F
                                      WRITE(*,16) (XP(K),K=1,N)
                                      WRITE(*,17) -FP
                                  END IF
                              END IF
                          END IF
                      END DO
                  END DO
              END DO
          END DO

```





```

IF (MAX) THEN
    WRITE(*,23)
ELSE
    WRITE(*,24)
END IF
END IF
END IF
END IF
C.... End of Sensitivity Simulation
END DO
C.... End of Metropolis Simulation
END DO
C.... Adjust VM so that approximately half of all evaluations are
c accepted
DO I=1,N
    RATIO=DFLOAT(NACP(I))/DFLOAT(NS)
    IF (RATIO.GT.0.6) THEN
        VM(I)=VM(I)*(1.0+C(I)*(RATIO-0.6)/0.4)
    ELSE IF (RATIO.LT.0.4) THEN
        VM(I)=VM(I)/(1.0+C(I)*((0.4-RATIO)/0.4))
    END IF
    IF (VM(I).GT.(UB(I)-LB(I))) THEN
        VM(I)=UB(I)-LB(I)
    END IF
END DO
IF(IPRINT.GE.2) THEN
    WRITE(*,25)
    WRITE(*,26) (VM(K),K=1,N)
    WRITE(*,27) (XOPT(K),K=1,N)
    WRITE(*,12) (X(K),K=1,N)
END IF
DO I=1,N
    NACP(I)=0
END DO
END DO
IF(IPRINT.GE.1) THEN
    NTOTMOV = NUP + NDOWN + NREJ
    WRITE(*,28)'INTERMEDIATE RESULTS BEFORE NEXT TEMP. REDUC.'
    WRITE(*,29)'CURRENT TEMPERATURE =',T
    IF (MAX) THEN
        WRITE(*,29)'MAX FUNC. VALUE SO FAR=',FOPT
        WRITE(*,30)'TOTAL MOVES =',NTOTMOV
        WRITE(*,30)'UPHILL =',NUP
        WRITE(*,30)'ACCEPTED DOWNHILL =',NDOWN
        WRITE(*,30)'REJECTED DOWNHILL =',NREJ
        WRITE(*,30)'OUT OF BOUNDS TRIALS =',LNOBDS
        WRITE(*,30)'NEW MAXIMA THIS TEMP. =',NNEW
    ELSE
        WRITE(*,29)'MIN FUNC. VALUE SO FAR=',-FOPT
        WRITE(*,30)'TOTAL MOVES =',NTOTMOV
        WRITE(*,30)'DOWNHILL =',NUP
        WRITE(*,30)'ACCEPTED UPHILL =',NDOWN
        WRITE(*,30)'REJECTED UPHILL =',NREJ
        WRITE(*,30)'OUT OF BOUNDS TRIALS =',LNOBDS
        WRITE(*,30)'NEW MINIMA THIS TEMP. =',NNEW
    
```

```

                                END IF
                                WRITE(*,27) (XOPT(K),K=1,N)
                                WRITE(*,26) (VM(K),K=1,N)
                                END IF
C....      Check termination criteria.
                                QUIT=.FALSE.
                                FSTAR(1)=F
                                IF ((FOPT-FSTAR(1)).LE.EPS) QUIT=.TRUE.
                                DO I=1,NEPS
                                        IF (DABS(F-FSTAR(I)).GT.EPS) QUIT=.FALSE.
                                END DO
C....      Terminate SA if appropriate.
                                IF (QUIT) THEN
                                        DO I = 1,N
                                                X(I)=XOPT(I)
                                        END DO
                                        IER=0
                                        IF(.NOT.MAX) FOPT=-FOPT
                                        IF(IPRINT.GE.1) THEN
                                                WRITE(*,28)'SIM. ANNEALING ACHIEVED CONVERG.CRITERIA'
C.....
C.....      CORRÇÃO DO NIVEL DE DANO PELO FATOR C DO MESSINA
C.....      funcao de custo Messina sensibilidade modal
                                        DO IMODE=1,NMODE
                                                FREQX(IMODE)=0.0d+00
                                                DO IELEM=1,NELEM
                                                        FREQX(IMODE)=FREQX(IMODE)
+ (DDDDW2(IMODE,IELEM)*XOPT(IELEM))
                                                END DO
                                        END DO
                                        FATOR=0
                                        DO IMODE=1,NMODE
                                                FATOR=FATOR+(FREQN(IMODE)**2-
FREQD(IMODE,NCASE)**2)/
                                                (FREQX(IMODE))
                                        END DO
                                        FATOR=FATOR/NMODE
                                        DO IELEM=1,NELEM
                                                XOPT(IELEM)=XOPT(IELEM)*FATOR
                                        END DO
                                        CALL FCN(N,XOPT,FREQN,FREQD,DDDDW2,FREQNN,FREQX,FOPT)
                                        RETURN
C.....
                                END IF
                                END IF
C....      If termination criteria is not met, prepare for another loop.
CC....      Temperature reduction (the comments below was used to try another ways to reduce
the temperature)
                                T=RT*T
                                DO I=NEPS,2,-1
                                        FSTAR(I)=FSTAR(I-1)
                                END DO
                                F=FOPT
                                DO I=1,N

```

```

                X(I)=XOPT(I)
            END DO
C....          End of Anealing Simulation

            END DO
            WRITE(NOUPUT,10) (X(K),K=1,N)
C....          FORMAT
10             FORMAT('INITIAL DESIGN VARIABLE SOLUTION',/,10(E10.4,1X))
11             FORMAT('INITIAL OPTIMUM VALUE=',E10.4)
12             FORMAT('ACTUAL DESIGN VARIABLE SOLUTION',/,10(E10.4,1X))
13             FORMAT('ACTUAL OPTIMUM VALUE=',E10.4)
14             FORMAT('POINT REJECT SINCE OUT OF BOUNDS',/,10(E10.4,1X))
16             FORMAT('TENTATIVE DESIGN VARIABLE SOLUTION',/,10(E10.4,1X))
17             FORMAT('RESULTING DESIGN VARIABLE SOLUTION',/,10(E10.4,1X))
18             FORMAT('TOO MANY FUNC. EVAL. CONSIDER INCR. MAXEVL OR EPS',
.              'OR DECREA. NT OR RT, THE RESULT. ARE LIKELY POOR')
19             FORMAT('POINT ACCEPTED')
20             FORMAT('NEW OPTIMUM')
21             FORMAT('ALTHOUGH LOWER, POINT ACCEPTED')
22             FORMAT('ALTHOUGH HIGHER, POINT ACCEPTED')
23             FORMAT('LOWER POINT REJECTED')
24             FORMAT('HIGHER POINT REJECTED')
25             FORMAT('INTERMEDIATE RESULTS AFTER STEP LENGTH ADJUSTMENT')
26             FORMAT('NEW STEP LENGHT (VM)',/,10(E10.4,1X))
27             FORMAT('ACTUAL OPTIMUM DESIGN VARIABLES',/,10(E10.4,1X))
28             FORMAT(1X,A47/)
29             FORMAT(A25,1X,E10.4)
30             FORMAT(A25,1X,I10)
            RETURN
        END
C.....
        SUBROUTINE FCN(N,X,FREQN,FREQD,DDDDW2,FREQNN,FREQX,F)
C.....
C....          DIMENSION BLOCK
                DOUBLE PRECISION X(N), F,SUMM1,SUMM2,SUMM3,XMAX1,XMAX2,XMAX3
                INTEGER NPROB,NELEM,NPOIN,NDOFN,NNODE,NEVAB,NTOTG,NBAND,
.              NNDX2,NNDX3,NNDX4,NINPUT,NOUPUT,NINPST,NCASE
C....          COMMON BLOCK
                COMMON /PARAM/ NPROB,NELEM,NPOIN,NDOFN,NNODE,NEVAB,NTOTG,NBAND,
.              NNDX2,NNDX3,NNDX4,NINPUT,NOUPUT,NINPST,NCASE,
.              NMODE
C          DIMENSION BLOCK
                DOUBLE PRECISION FREQN(NMODE),FREQD(NMODE,NCASE),
.
                DDDDW2(NBAND,NELEM),FREQNN(NBAND),FREQX(NBAND),FREQZ(NMODE)
c.....funcao de custo Messina sensibilidade modal
                DO IMODE=1,NMODE
                    FREQX(IMODE)=0.0d+00
                    DO IELEM=1,NELEM
                        FREQX(IMODE)=FREQX(IMODE)
.                      +(DDDDW2(IMODE,IELEM)*X(IELEM))
                    END DO
                END DO
C.....          Funcao de Custo de Silva

```

```
XMAX1=-1.0E+20
XMAX2=-1.0E+20
DO IMODE=1,NMODE
  IF (DABS(FREQX(IMODE)).GT.XMAX1) THEN
    XMAX1=DABS(FREQX(IMODE))
  END IF
  IF (DABS(FREQN(IMODE)**2-FREQD(IMODE,ICASE)**2).GT.XMAX2)
  THEN
    XMAX2=DABS(FREQN(IMODE)**2-FREQD(IMODE,NCASE)**2)
  END IF
END DO
XMAX3=0.0d+00
DO IMODE=1,NMODE
  XMAX3=XMAX3+(FREQX(IMODE)/XMAX1)-
  ((FREQN(IMODE)**2-(FREQD(IMODE,NCASE)**2))/XMAX2)**2
  XMAX3=XMAX3+(FREQX(IMODE)/1.)-
  ((FREQN(IMODE)**2-(FREQD(IMODE,NCASE)**2))/1.))**2
END DO
F=(1.0D+00/(1.0D+00+XMAX3))
RETURN
END
```





deslocamentos ou resolução da equação de autovetores e autovalores para a obtenção dos modos e frequências naturais (usando subrotina DGVCSP pronta da biblioteca do Digital FORTRAN) através da resolução da equação 4.1.

$$(\mathbf{K} - \mathbf{M}) = 0 \quad (\text{ii})$$

### Anexo 3 – Exemplos não resolvidos completamente.

Com a intenção de verificar a eficiência do método de detecção de dano com exemplos mais complexos, o programa foi solicitado a exemplos com estruturas mais complexas. Muitos trabalhos numéricos e experimentais têm trazido exemplos simples de detecção de dano, como vigas isoladas. A idéia deste ensaio é verificar a eficiência do método quando submetido a modelos complexos de estruturas, como pórticos tridimensionais. A figura A.2 mostra a representação matemática de um dos modelos numéricos estudado.

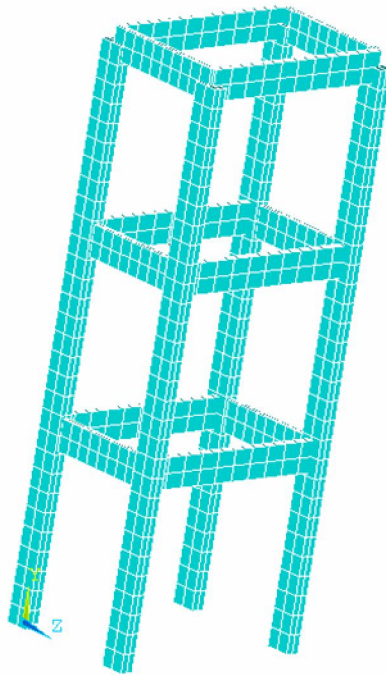


Figura A.2: Representação do modelo numérico estudado.

Para analisar o desempenho do programa de detecção de dano na utilização em estruturas complexas, foi analisado a redução das frequências naturais em um pórtico espacial. O modelo experimental foi construído com viga chata 1”x 3/16”. Uma figura da estrutura utilizada no estudo é mostrada na figura A.3.

As frequências foram capturadas através de dois acelerômetros Endevco, os mesmos utilizados nos ensaios anteriores.



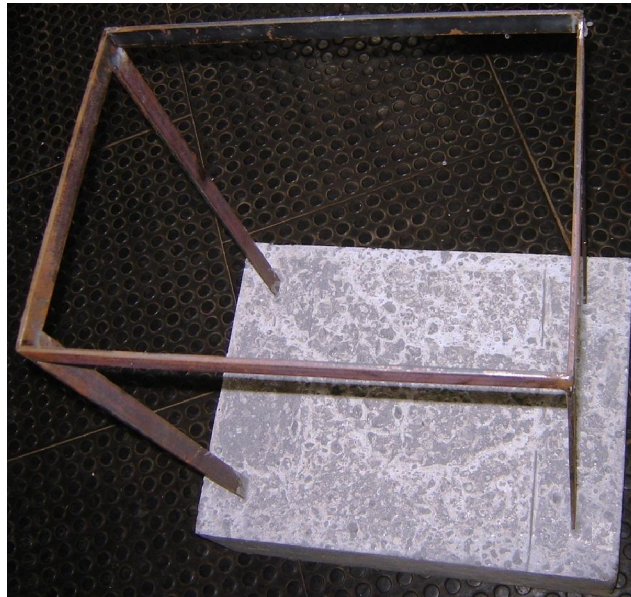


Figura A.3: Desenho da estrutura analisada.

Infelizmente, o desempenho das aproximações sugeridas por Messina, e utilizados nos ensaios para acelerar o resultado do programa de elementos finitos (a definição de variação de frequências em função da localização e quantificação do dano) não apresentaram bons resultados nesse ensaio. A função de custo chegou ao valor esperado (igual a 1), porém a localização e extensão do dano não foi corretamente identificada.

Uma tentativa de rodar o programa com a chamada ao programa de elementos finitos propriamente dita foi feita tanto no caso numérico quanto no caso experimental, porém com cerca de um mês de processamento, houve interrupções no fornecimento de energia elétrica, portanto não têm-se provas de que os danos seriam corretamente identificados. A figura A.4 mostra o resultado da procura de dano no caso de dano de 30% no elemento 16, lembrando que o programa não foi finalizado.

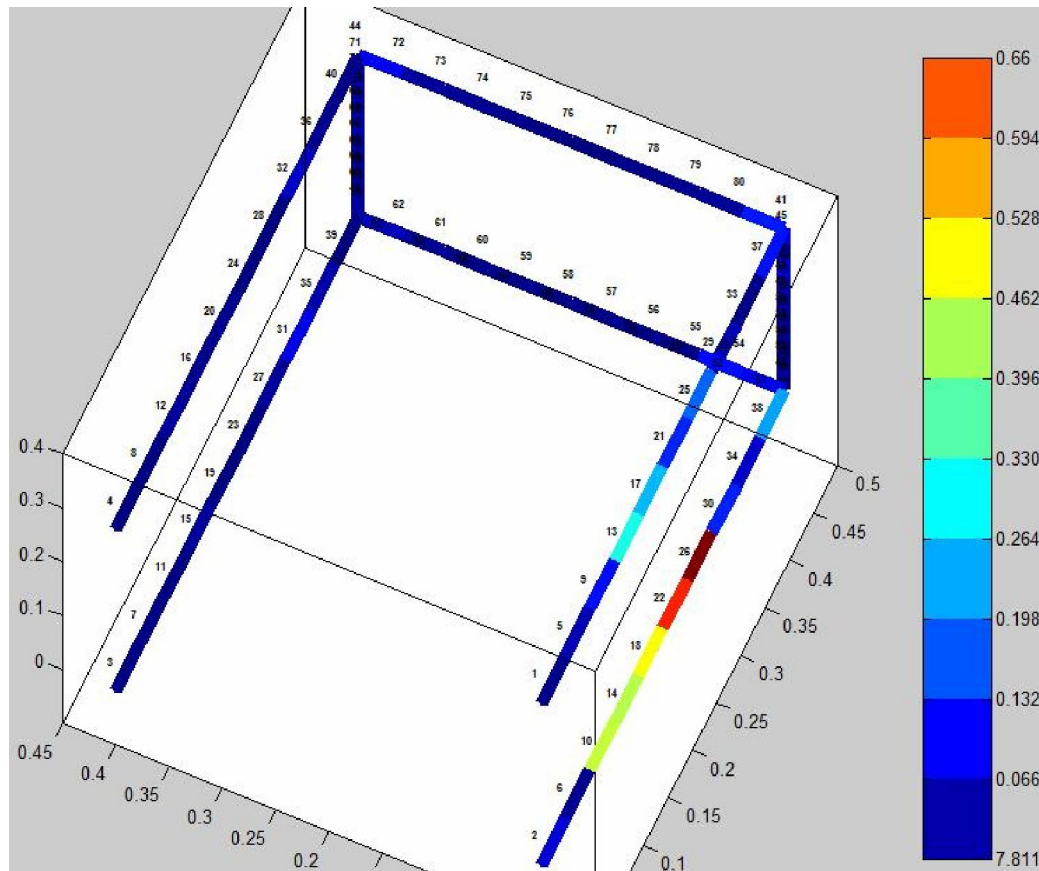


Figura A.4: Representação da estrutura com o escala de dano encontrado pelo algoritmo.

Na mesma linha de análise do comportamento do algoritmo quando aplicado a estruturas mais complexas, um pórtico em forma de ponte foi montada com tubos utilizados em antenas para televisão. A detecção de dano utilizada neste modelo não funcionou em virtude da diferença entre os modelos numéricos e experimentais.

No modelo numérico, as frequências do conjunto pareciam muito bem definidas, porém na análise experimental, apareceram muitas frequências não esperadas no modelo numérico, pois cada viga passou a ter sua própria frequência natural. Um estudo anterior a construção do modelo experimental foi feito, no intuito de prever as frequências naturais para se conseguir medi-las com razoável resolução, já que nosso sistema de aquisição tem taxa de aquisição fixa. Tanto a massa dos parafusos, quanto a distância dos eixos das vigas desalinhadas em relação aos nós foi considerada no modelo numérico.

A Figura A.5 mostra uma foto do modelo montado.



Figura A.5: Modelo da ponte de alumínio utilizada para detecção de dano.

Foi procurado representar no modelo experimental as considerações do modelo numérico, como a extremidade apoiada sobre uma esfera mostrado na figura A.6.

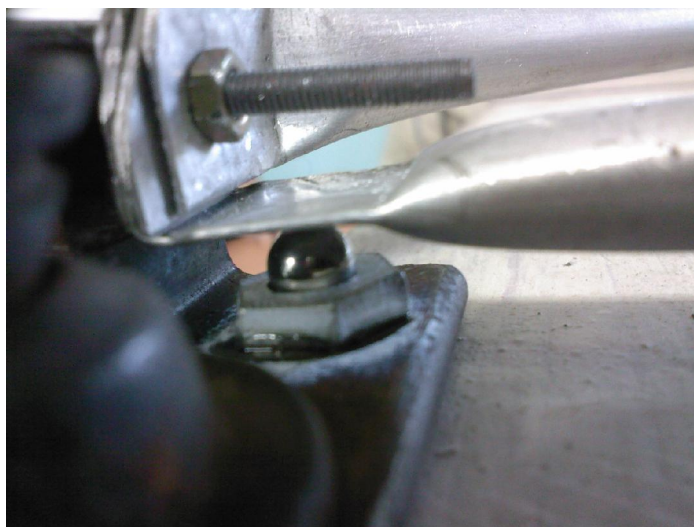


Figura A.6: Detalhe do apoio de uma das extremidades.

Estes exemplos não resolvidos completamente tiveram a mesma importância que os exemplos totalmente resolvidos, pois nos mostraram até onde muitas das nossas considerações realmente acontecem no mundo real. Neste último exemplo do pórtico espacial em forma de ponte, depois de encontrado o problema, foi feito um modelo numérico com as medidas reais do modelo experimental, ou seja, cada viga foi medida e representada no modelo numérico com suas características próprias. Os resultados foram muito diferentes dos esperados, pois os

modos de cada viga ficaram muito próximos, devido aos comprimentos parecidos de cada uma, sendo que o modo de cada uma separadamente passou a representar um modo global da estrutura. Os modos globais, os quais, realmente estávamos procurando, ficaram muito acima destes modos tidos como “locais”, isso explica o fato do sinal gerado pela FFT estar bem “sujo, ou seja, sem definição correta das frequências de ressonância.

Outro agravante foi a seção transversal da viga ser simétrica (circular), pois o modo em uma direção ficou muito parecido com a da sua direção perpendicular, sendo diferenciado apenas pela condições nas pontas das vigas, que foram amassadas para efeito de fixação.