

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Detecção de Danos Estruturais em Material
Compósito Laminado via Método de
Otimização e Parâmetros Dinâmicos**

Autor: **Guilherme Ferreira Gomes**

Orientador: **Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr.**

Coorientador: **Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Jr.**

Julho de 2016
Itajubá - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Guilherme Ferreira Gomes

Detecção de Danos Estruturais em Material Compósito Laminado via Método de Otimização e Parâmetros Dinâmicos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr.

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Jr.

Julho de 2016
Itajubá – MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Guilherme Ferreira Gomes

Detecção de Danos Estruturais em Material Compósito Laminado via Método de Otimização e Parâmetros Dinâmicos

Dissertação aprovada por banca examinadora em 15 de
Julho de 2016, conferindo ao autor o título de *Mestre em
Ciências em Engenharia Mecânica*.

Banca Examinadora:

Dr. Luís Felipe dos Santos Carollo – MAHLE Metal Leve S. A.

Profa. Dra. Patrícia da Silva Lopes Alexandrino – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Júnior – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Júnior – IEM/UNIFEI

Julho de 2016
Itajubá – MG

Dedicatória

Acima de tudo dedico este trabalho a Deus, fonte de toda inspiração.

Aos meus queridos pais que com muito amor e carinho me apoiaram em toda essa proveitosa jornada.

*"Se você quiser descobrir os segredos do Universo,
pense em termos de energia, frequência e vibração"*

Nikola Tesla

Agradecimentos

Ao professor Dr. Sebastião Simões pela excelente orientação deste trabalho e acima de tudo por sua amizade.

Ao professor Dr. Antonio Ancelotti pela coorientação imprescindível.

Aos meus queridos pais por todo apoio e dedicação dada desde o início de tudo e apoio e amor incondicional em todas as etapas desta proveitosa jornada.

Aos meus amigos da Pós-Graduação pelos momentos disfrutados juntos durante esse período de aprendizagem.

Aos amigos do grupo de pesquisa GEMEC e do NTC pela amizade e diversas discussões proveitosas que contribuíram para a evolução deste trabalho.

Aos professores, técnicos e amigos do Instituto de Engenharia Mecânica – IEM.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico – CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumindo, a todos aqueles que cooperaram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho: minha gratidão e meu muito obrigado.

Resumo

GOMES, G. F. (2016), *Detecção de Danos Estruturais em Material Compósito Laminado via Método de Otimização e Parâmetros Dinâmicos*, Itajubá, 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Estruturas de difícil manutenção e acesso necessitam ter como aliado um processo de monitoramento de sua integridade estrutural. Tal monitoramento por meio de estudos de detecção de danos está presente em diversas aplicações da engenharia uma vez que possibilitam que medidas corretivas sejam aplicadas para garantir a segurança estrutural de uma dada máquina e/ou equipamento. Neste trabalho, desenvolveu-se um estudo, via simulações numéricas, a fim de avaliar técnicas de detecção de danos aplicadas a materiais compósitos, pois a aplicação destes materiais em componentes e estruturas vem substituindo os materiais metálicos devido a sua alta performance mecânica. Este trabalho de pesquisa será baseado na resolução do problema direto e inverso, combinando tanto dados numéricos quanto experimentais. Realizou-se a modelagem por meio do método de elementos finitos e empregou-se técnicas heurísticas de otimização de modo a minimizar determinadas funções objetivo, escritas em função de parâmetros dinâmicos da estrutura analisada. A estrutura estudada constitui-se de um laminado de fibra de carbono e três modelos de danos foram adotados: *i*) um único furo circular; *ii*) múltiplos danos na forma de furos circulares e *iii*) trincas, além da inclusão de erros de medições na forma de ruídos em diferentes níveis. Os resultados dos algoritmos de otimização empregados em conjunto ao modelo em elementos finitos apresentaram boa eficácia na detecção de danos estruturais

Palavras-chave: Detecção de Danos, Otimização, Vibrações Mecânicas, Materiais Compósitos.

Abstract

GOMES, G. F. (2016), *Damage Detection in Laminated Composite Materials via Optimization Techniques and Dynamic Parameters*, Itajubá, 98 p. MSc. Thesis – Mechanical Engineering Institute, Federal University of Itajubá.

Structures with hard maintenance and access need to have as an ally a monitoring process of structural integrity. The structural health monitoring by means of damage detection studies is present in many engineering applications because they enable that corrective actions be applied to ensure the structural integrity of a given machine or equipment. In this work, we developed a study, using numerical simulations in order to assess damage detection techniques applied to composite materials, because the application of these materials in components and structures have replaced metallic materials due to its high performance. This research will be based on solving the direct and inverse problem by combining numerical and experimental data in order to detect structural damage. It carried out the mechanical modeling of the forward problem by finite element method and heuristic optimization techniques in order to minimize a particular objective function written in function of dynamic parameters. The structure studied is constituted of a laminate of carbon fiber, and three damage models were used: *i*) a single circular hole; *ii*) multiple damage modeled as circular holes and *iii*) cracks. In addition the inclusion of noise in measurements was adopted for this work. The result of the optimization algorithms shows good efficacy in the detection of structural damage.

Keywords: Damage Detection, Optimization, Mechanical Vibrations, Composite Materials.

Resumé

GOMES, G. F. (2016), *Détection des Dommages en Matériaux Composites Laminés par Techniques d'Optimisation et Paramètres Dynamiques*, Itajubá, 98 p. Master Recherche – Institut de Génie Mécanique, Université Fédérale d'Itajubá.

Structures de difficile maintenance et accès ont besoin d'avoir comme allié un de processus de surveillance de l'intégrité structurelle. La surveillance de l'intégrité structurelle par moyen des études de détection des dommages est présent dans de nombreuses applications d'ingénierie, car ils permettent que mesures correctives soit prises pour assurer la sécurité structurelle d'une machine ou d'un équipement donné. Dans ce travail, une étude par des simulations numériques pour évaluer les techniques de détection des dommages appliquées aux matériaux composites a été développée, en raison de l'application de ces matériaux dans les composants et structures ont remplacé les matériaux métalliques en raison de leur haute performance mécanique. Cette recherche sera basée sur la résolution du problème direct et inverse en combinant les données numériques et expérimentales en vue de détecter des dommages. Il a réalisé la modélisation avec la méthode des éléments finis et techniques heuristiques d'optimisation ont été utilisées pour minimiser certaines fonctions objectives, écrites en termes de paramètres dynamiques de la structure analysée. La structure étudiée est constituée d'un laminé de fibre de carbone et trois modèles de dommages ont été utilisés: *i)* des trous circulaires; *ii)* plusieurs dommages et *iii)* fissures, ainsi que l'inclusion du bruit dans les mesures a été adoptée pour ce travail. Les résultats des algorithmes d'optimisation utilisés ont montré une bonne efficacité dans la détection des dommages structuraux.

Mots clés: Détection des Dommages, Optimisation, Vibration Mécanique, Matériaux Composites.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
Simbologia.....	ix
Letras Latinas.....	ix
Letras Gregas.....	x
Siglas e Abreviaturas	xi
Capítulo 1	
INTRODUÇÃO	1
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	10
Capítulo 2	
MATERIAIS COMPÓSITOS.....	12
2.1 INTRODUÇÃO.....	12
2.2 DANOS E DEFEITOS ESTRUTURAIS EM MATERIAIS COMPÓSITOS.....	16
2.2.1. Danos e Defeitos Estruturais em Laminados	18
Capítulo 3	
MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	20
3.1 CONCEITOS GERAIS	20
3.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	22
3.2.1 Algoritmos Genéticos.....	24

3.3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	24
Capítulo 4	
MÉTODO DE DETECÇÃO DE DANOS	28
4.1 DETECÇÃO DE DANOS COMO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL	28
4.2 IDENTIFICAÇÃO DE DANOS BASEADO EM PARÂMETROS DINÂMICOS....	30
4.3 MÉTODO DIRETO: ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	32
4.3.1 Modelos de Danos Adotados	33
4.3.1.1 Furo Circular	33
4.3.1.2 Trincas.....	36
4.4 MÉTODO INVERSO: OTIMIZAÇÃO	38
Capítulo 5	
RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1 RESULTADOS PRELIMINARES	44
5.2 CASO 1: UM FURO CIRCULAR	48
5.2.1 Detecção de Dano sem Ruído de Medição	49
5.2.1.1 Furo na região central da placa	49
5.2.1.2 Furo fora da região central da placa.....	51
5.2.2 Detecção de Danos com Ruídos de Medição	53
5.3 CASO 2: MÚLTIPLOS FUROS CIRCULARES	56
5.3.1 Detecção de Danos sem Ruídos de Medição.....	57
5.3.1.1 Otimização com Função Objetivo J_1	57
5.3.1.2 Otimização com Função Objetivo J_2	58
5.3.2 Otimização Multiobjetivo para Detecção de Múltiplos Danos	62
5.3.3 Detecção de Danos com Ruídos de Medição	64
5.4 CASO 3: DETECÇÃO DE TRINCAS.....	67
5.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	72
Capítulo 6	
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	78
6.1 CONCLUSÕES	78
6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

Apêndice A	
CÁLCULO MATRICIAL DE UM LAMINADO DE MATERIAL COMPÓSITO.....	87
Apêndice B	
VIBRAÇÕES EM PLACAS LAMINADAS	90
Apêndice C	
ALGORITMO GENÉTICO.....	92
Apêndice D	
PROBLEMA INVERSO PARA ESTIMAÇÃO DE PROPRIEDADES.....	95

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Níveis de modelagem de material compósito	14
Figura 2.2 – Um exemplo de aeronave comercial. A porcentagem de massa compósito é de 21,5% da massa da estrutural total	15
Figura 2.3 - Riser de perfuração em uma plataforma de petróleo	15
Figura 2.4 - Alguns danos característicos em materiais compósitos. Bolha localizada na superfície (a), rachaduras de canto (b), corte superficial (c), esmagamento em um painel sanduíche (d), delaminação em um laminado (e), dano gerado por impacto (f), erosão superficial (g) e dano superficial gerado por excesso de aperto de fixadores (h)	19
Figura 3.1 - Problema de máximo e mínimo de uma função no processo de otimização.....	21
Figura 3.2 - Função de Ackley com inúmeros mínimos locais nas regiões periféricas e um mínimo global ao centro.....	23
Figura 3.3 - Otimização multiobjectivo considerando duas funções (a) e a formação de uma Frente de Pareto de soluções ótimas (b).....	26
Figura 4.1 - Acidente do voo Aloha Airlines 243, em 29 de abril de 1988, devido à corrosão, insuficientemente controlada por manutenção.....	29
Figura 4.2 - Modelagem do laminado em elementos finitos (a) e a orientação das camadas (b). 33	
Figura 4.3 - Variáveis de parametrização do dano para furo circular.	34
Figura 4.4 - Modelagem em elementos finitos dos modelos de danos como furos circulares.....	34
Figura 4.5 - Danos de borda evitados pelas equações de restrição (dano em escala Ampliada). .	35
Figura 4.6 - Modelagem de dois furos circulares.....	35
Figura 4.7 - Modelagem dos danos para identificação de parâmetros.	36
Figura 4.8 - Problemas ocasionados na detecção de múltiplos furos. Furos sobrepostos (a), furos com contato tangente (b) e furos em posições distintas no espaço.	36

Figura 4.9 – Modelagem de dano como trinca.....	37
Figura 4.10 – Modelagem das variáveis de projeto para o modelo de trinca.....	37
Figura 4.11 - Detecção de danos baseado em modelo com unidade de processamento.	38
Figura 4.12 - Configuração dos sensores na estrutura.	40
Figura 4.13 - Fluxograma do processo de detecção de danos.....	42
Figura 4.14 - Fluxograma do processo de inserção de ruídos ao modelo adotado.	42
Figura 5.1 – Variação das frequências naturais em função da posição do dano.	48
Figura 5.2 - Detecção de um furo central sem adição de ruído.....	50
Figura 5.3 - Distribuição da população final de indivíduos.	50
Figura 5.4 – Detecção de um furo não central sem adição de ruído.	51
Figura 5.5 - Melhores resultados ao longo das geração para detecção de um furo não central sem adição de ruído.	52
Figura 5.6 - População total de indivíduos gerados. Concentração de indivíduos próximos ao dano real.	52
Figura 5.7 - Detecção de um furo circular com acréscimo de 1% de ruído.	53
Figura 5.8 - Detecção de um furo circular com acréscimo de 5% de ruído nas medições.....	54
Figura 5.9 - Detecção de um furo circular com acréscimo de 10% de ruído nas medições.....	55
Figura 5.10 - Resultados para diferentes níveis de ruído (região ampliada).....	56
Figura 5.11 - Detecção de múltiplos danos usando J_1	57
Figura 5.12 - Detecção de múltiplos danos usando J_2 , com $w_1 = w_2 = 0,5$	59
Figura 5.13 - Detecção de múltiplos danos usando J_2 , com $w_1 = 0,7$ e $w_2 = 0,3$	60
Figura 5.14 - Detecção de múltiplos danos usando J_2 , com $w_1 = 0,3$ e $w_2 = 0,7$	61
Figura 5.15 - Detecção de múltiplos danos com diferentes ponderações para J_2	61
Figura 5.16 - Detecção de múltiplos danos utilizando J_3	62
Figura 5.17 - Conjunto de soluções ótimas viáveis com formação da Frente de Pareto.....	63
Figura 5.18 - Detecção de múltiplos danos com adição de 1% de ruído gaussiano.....	64
Figura 5.19 - Detecção de múltiplos danos com adição de 5% de ruído gaussiano.....	65
Figura 5.20 - Detecção de múltiplos danos com adição de 10% de ruído gaussiano.....	66

Figura 5.21 - Resultado de detecção de múltiplos danos com presença ruído gaussiano em diferentes níveis.....	66
Figura 5.22 - Detecção de trinca com critério de parada de 30 gerações.....	68
Figura 5.23 - Detecção de trinca com critério de parada de 100 gerações.....	68
Figura 5.24 - Detecção de trincas com acréscimo de 1% de ruído aleatório.	70
Figura 5.25 - Detecção de trincas com acréscimo de 5% de ruído aleatório.	70
Figura 5.26 - Detecção de trincas com acréscimo de 10% de ruído aleatório.	71
Figura 5.27 - Detecção de trincas com acréscimo de ruídos aleatórios.	71
Figura 5.28 - Placa laminada de fibra de carbono com dano no centro.	73
Figura 5.29 - Montagem experimental para obtenção da resposta em frequência da placa.....	73
Figura 5.30 - Esquema do ensaio de vibração composto ao método de detecção de danos usando modelos em elementos finitos.....	74
Figura 5.31 – Função Resposta em Frequência para a placa com e sem dano inserido.....	76
Figura 5.32 - Resultado do processo de busca pelo dano em uma placa laminada de fibra de carbono/epóxi.....	77
Figura A.1 - Localização das camadas em um compósito laminado.	89
Figura B.1 - Vibração de uma placa laminada retangular.....	90
Figura C.1 - Fluxograma básico do funcionamento de um algoritmo genético.....	93
Figura C.2 - Cruzamento de indivíduos e recombinação de código genético.....	94
Figura D.2 - Ajustes de modelos usando método inverso para estimar propriedades do material com base nas frequências naturais.	98

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Procedimento típico de reparação de danos compósitos.....	17
Tabela 4.1 Configurações das Camadas.....	32
Tabela 4.2 – Razão entre área danificada e área total da placa.	34
Tabela 4.3 – Posição dos sensores ao longo da superfícies da placa.	40
Tabela 4.4 - Parâmetros dos algoritmos genéticos.	43
Tabela 5.1 – Comparação entre frequências analíticas e numéricas obtidas pelo MEF.	45
Tabela 5.2 - Comparação entre frequências adimensionais analíticas, numéricas.....	45
Tabela 5.3 – Variação das frequências naturais com a presença de um dano estrutural.....	46
Tabela 5.4 - Resultados para um furo circular na posição central, sem ruído.	49
Tabela 5.5 – Resultados para um furo circular na posição não central, sem ruído.	51
Tabela 5.6 - Valores obtidos pelo acréscimo de 1% de ruído.	53
Tabela 5.7 – Valores obtidos pelo acréscimo de 5% de ruído nas medições.	54
Tabela 5.8 - Valores obtidos pelo acréscimo de 10% de ruído nas medições.....	55
Tabela 5.9 - Resultados para dois furos usando J_1	57
Tabela 5.10 – Ponderações para a função J_2	58
Tabela 5.11 - Resultado obtido pela função J_2 com pesos iguais ($w_1 = 0,5$ e $w_2 = 0,5$).	59
Tabela 5.12 - Resultado de J_2 com peso maior para frequências ($w_1 = 0,7$ e $w_2 = 0,3$).....	60
Tabela 5.13 - Resultado de J_2 com peso maior para acelerações ($w_1 = 0,3$ e $w_2 = 0,7$).....	61

Tabela 5.14 - Resultado obtido pela otimização de J_3	62
Tabela 5.15 - Resultados para detecção de múltiplos danos com 1% de ruído.....	64
Tabela 5.16 - Resultados para detecção de múltiplos danos com 5% de ruído.....	65
Tabela 5.17 - Resultados para detecção de múltiplos danos com 10% de ruído.....	66
Tabela 5.18 - Detecção de trincas em 30 e 100 gerações.....	68
Tabela 5.19 – Detecção de trincas com acréscimo de 1% e 5% de ruído.....	69
Tabela 5.20 - Detecção de trincas com acréscimo de 10% de ruído.....	71
Tabela 5.21 - Propriedades mecânicas do material laminado.....	73
Tabela 5.22 - Frequências naturais obtidas para a estrutura real e numérica (sem dano).....	75
Tabela 5.23 - Frequências naturais para a estrutura com e sem dano.....	75
Tabela 5.24 - Resultados para detecção de danos em estrutura real.....	76
Tabela D.1 – Resultados de estimação de propriedades elásticas do laminado.....	97
Tabela D.2 – Frequências naturais numéricas antes e depois do ajuste.....	98

Simbologia

Letras Latinas

a	Comprimento longitudinal da placa.
A	Matriz de rigidez extensional.
b	Comprimento latitudinal da placa.
B	Matriz de acoplamento.
c_i	Fator de ponderação para as primeiras frequências naturais
C	Matriz de amortecimento.
D	Matriz de rigidez flexional.
E	Módulo de elasticidade longitudinal.
\bar{E}	Erro global.
f	Função objetivo arbitrária.
g	Função de restrição de desigualdade
G	Módulo de elasticidade transversal.
J_1	Função objetivo composta pelas seis primeiras frequências naturais.
J_2	Função objetivo composta por frequências naturais e acelerações.
J_3	Função objetivo composta por J_1 e J_2 , para a otimização multiobjetivo.
J_4	Função objetivo utilizada na parte experimental
K	Matriz de rigidez.
l	Função de restrição de igualdade
m	Número inteiro indicando a m -ésima frequência natural.
M	Matriz de massa.
M_x	Momento fletor em relação ao eixo x.

M_y	Momento fletor em relação ao eixo x .
n	Número inteiro indicando a n -ésima frequência natural.
r	Raio do furo.
$rand$	Número aleatório, normalmente distribuído com média zero e desvio padrão igual a um.
t	Espessura da placa.
w	Deslocamentos transversais da placa em vibração
w_1	Fator de ponderação da função objetivo baseada em frequências.
w_2	Fator de ponderação da função objetivo baseada em acelerações.
x	Coordenadas cartesianas x do centro dos furos circulares e elípticos.
\dot{x}	Velocidade em pontos específicos da placa.
\ddot{x}	Aceleração em pontos específicos da placa.
X	Vetor de variáveis de projeto.
y	Coordenadas cartesianas y do centro dos furos circulares e elípticos.

Letras Gregas

α	Vetor composto por variáveis de projeto.
ε	Escalar mínimo incorporado às equações de restrição.
ϵ	Vetor erro entre dados numéricos e experimentais
λ	Frequência natural adimensional.
ρ	Massa específica do material laminado.
θ	Orientação das camadas do laminado.
ν	Coefficiente de Poisson.
ω_n	Frequência natural.

Siglas e Abreviaturas

ACO	<i>Ant Colony Optimization.</i>
AG	Algoritmo Genético.
CLT	<i>Classical Laminated Theory.</i>
DLAC	<i>Damage Location Assurance Criterion</i>
ED	Evolução Diferencial.
FRF	Função de Resposta em Frequência.
FSDT	<i>First Order Shear Deformation Theory.</i>
GVT	<i>Ground Vibration Testing.</i>
GWN	<i>Gaussian White Noise</i>
MAC	<i>Modal Assurance Criterion.</i>
MDLAC	<i>Multiple Damage Location Assurance Criterion.</i>
MEC	Método de Elementos de Contorno.
MEF	Método de Elementos Finitos.
MO	Multiobjetivo.
MSE	<i>Modal Strain Energy.</i>
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics.</i>
NDI	<i>Nondestructive inspection.</i>
NSGA	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm.</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization.</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error.</i>
RNA	Rede Neural Artificial.
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A existência de estruturas de difícil manutenção, acesso restrito ou como no caso de estruturas espaciais, que devem funcionar com pequenas margens de variação dinâmica, necessitam ter como aliado um processo de monitoramento de sua integridade estrutural. Tal monitoramento tenta detectar regiões fragilizadas em uma fase inicial para, assim que for possível, permitir que providências adequadas possam ser tomadas rapidamente, garantindo uma sobrevida e segurança estrutural maior (BORGES *et al.*, 2009).

Um determinado tipo de dano estrutural pode ser caracterizado como a presença de furos, trincas e outras irregularidades que conduzem uma mudança nas propriedades estruturais de massa, rigidez ou amortecimento da estrutura em questão. Segundo Doebling *et al.* (1996), o interesse na capacidade de monitorar uma estrutura e detectar danos na fase mais precoce possível permeia os ramos de engenharia mecânica, aeroespacial e civil. A grande maioria dos métodos de detecção de danos atuais são visuais ou métodos experimentais tais como métodos acústicos ou ultrassom, partículas magnéticas, radiografias, métodos correntes parasitas e outros. Todas estas técnicas experimentais exigem que a vizinhança do dano seja conhecida a priori e que a estrutura a ser inspecionada esteja facilmente acessível. A necessidade de métodos adicionais de detecção de danos globais que podem ser aplicados a estruturas complexas conduziu ao desenvolvimento de métodos que examinam as alterações nas características de vibração da estrutura. A ideia básica é que os parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal) são funções das propriedades físicas da estrutura (massa,

amortecimento e rigidez). Portanto, as alterações nas propriedades físicas causarão alterações nas propriedades modais.

O conhecimento da mudança nas propriedades do material correspondente ao dano depende do tipo de material e da configuração estrutural. Uma avaliação apropriada do dano em uma estrutura pode ser útil para inferir sobre a vida útil remanescente da estrutura. Esta avaliação do dano estrutural pode ser realizada por meio de uma comparação entre dados medidos e simulados (LOPES, 2010a).

Segundo Heslehurst (2014), a aplicação de materiais avançados, como materiais compósitos, em componentes e estruturas evoluiu devido à necessidade de se reduzir peso e melhorar o desempenho estrutural. Outros atributos de materiais compósitos, como a resistência à corrosão, excelente acabamento superficial, a boa capacidade de resistência à fadiga e elevado desempenho estrutural, também têm sido contribuições significativas para o rápido aumento da aplicação desses materiais. Contudo, materiais compósitos são submetidos a altas solicitações estruturais devido ao seu alto desempenho, o que acarreta providências a critérios específicos de danos. No entanto, um desafio na avaliação da criticidade dos defeitos e danos em materiais compósitos se dá nas exigências de reparos subsequentes que não são tarefas muito fáceis. A maioria das técnicas de inspeção não destrutivas utilizadas em compósitos exigem elevados níveis de experiência dos operadores para sua realização com sucesso e posterior interpretação de resultados.

A implementação de métodos numéricos, tais como o método de elementos de contorno (MEC) e método de elementos finitos (MEF), podem ser usados para a modelagem numérica do caso de problema direto. Neste trabalho, lançou-se mão do método de elementos finitos devido à complexidade da análise de um material anisotrópico (compósito de fibra de carbono) com várias camadas de material laminado. Métodos heurísticos de otimização, como o algoritmo genético (AG), são utilizados como o procedimento de otimização por conseguirem encontrar uma região de ótimo global com eficiência e não ficar preso em regiões de ótimo local, possibilitando localizar apropriadamente o dano, além da não necessidade de avaliação de derivadas da função objetivo, o que pode se tornar um problema para casos onde descontinuidades possam estar presentes (MITCHELL, 1999).

As rotinas de otimização de detecção de danos foram feitas com auxílio de um programa comercial de engenharia trabalhando em paralelo com um programa comercial de elementos finitos para resolução dos problemas tanto direto quanto inverso. Resultados dos testes numéricos e experimentais foram empregados no processo de prever o dano no material estudado.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cawley & Adams (1979) perceberam que um determinado estado de dano pode ser ocasionado por uma redução da rigidez dinâmica ou por um aumento no amortecimento estrutural. Mudanças de rigidez, sejam elas locais ou distribuídas, levam a mudanças nas frequências naturais da estrutura em questão. Além disso, uma vez que a distribuição da tensão através de uma estrutura em vibração é não uniforme e é diferente para cada uma das frequências naturais (modos), qualquer dano localizado afetaria cada modo diferentemente, dependendo da localização particular do dano. Assim, a medição das frequências naturais de uma estrutura em duas ou mais etapas da sua vida oferece a possibilidade de localizar danos na estrutura bem como a sua severidade. Se um conjunto de frequências foram medidas antes que a estrutura esteja em serviço, medições dessas frequências em uma etapa posterior poderiam ser usadas para determinar se a estrutura ainda atende determinados critérios de operacionalidade. O presente trabalho desenvolvido pelos autores descreve a extensão do uso de frequências naturais aplicada a estruturas bidimensionais e os resultados dos ensaios mostraram que o método proposto pode ser utilizado para detectar, localizar e quantificar a presença de danos em qualquer tipo de estrutura que seja passível de análise por elementos finitos.

O uso de técnicas convencionais de otimização foi apresentado por Hwu & Liang em 1997, cujos autores desenvolveram um método especial de elementos de contorno para o caso de uma estrutura bidimensional de material compósito considerando um dano elíptico. Lançando mão dessas técnicas de otimização não lineares por meio de métodos inversos de detecção de danos, o tamanho, localização e orientação dos furos elípticos foram identificados. Os autores tiveram como propósito principal explorar a viabilidade da identificação do dano usando somente dados de deformação estática por meio de método de otimização não-linear, onde o resultado ótimo de cada iteração era ponto de partida de uma próxima até que determinado critério de parada fosse satisfeito. Apesar de não se tratar de um método de otimização baseado em heurísticas, os autores obtiveram bons resultados, mas concluíram que o melhor resultado possível dependia fortemente do ponto inicial de partida.

A fim de evitar esse problema de convergência do método de detecção devido à dependência do ponto inicial, o uso de heurísticas de otimização foi apresentado por Friswell *et al.* (1998), cujo autores empregaram os algoritmos genéticos (AGs) para determinar a localização de um ou dois elementos danificados numa estrutura, uma vez que métodos heurísticos são excelentes estratégias para encontrar um ótimo global por não se tratarem de técnicas baseadas em

derivadas. A função objetivo utilizada pelos autores foi baseada em uma combinação da variação das frequências naturais juntamente ao critério MAC (*Modal Assurance Criterion*) que se compõe de um conjunto de modos de vibração da estrutura. A formulação utilizada pelos autores ajudou a reduzir o efeito de erros na modelagem, porém requer que as frequências iniciais experimentais estejam disponíveis. Os autores estudaram o caso de uma viga discretizada em 15 elementos e uma placa em 12 elementos, onde 4 cenários de danos foram estudados. Os resultados mostraram que para um único elemento danificado, o algoritmo proposto conseguia detectar o dano, mas para o caso de dois elementos danificados, o algoritmo só conseguiu encontrar elementos danificados próximos aos reais.

Ainda seguindo a ideia de detecção de danos a partir de parâmetros dinâmicos, Xia & Xao (2001) propuseram um método de identificação de danos em uma viga baseando-se no comportamento dinâmico (vibratório) da mesma, por meio da minimização de uma função objetivo composta por dados referentes à estrutura antes e após a inserção do dano. Três funções objetivo foram analisadas neste estudo: uma função composta por frequências naturais, uma função composta por modos de vibração e uma terceira função objetivo composta por frequências e modos. Segundo os autores, na prática a aquisição de modos de vibração usualmente possui erros relativamente grandes em relação às frequências naturais, por isso foi salientado que não seria interessante trabalhar com uma função objetivo composta somente por modos de vibração. O dano estrutural foi modelado como uma variação da seção transversal da viga em determinado comprimento e a estrutura foi dividida em um dado número de elementos. Os autores observaram uma pequena taxa de variação nas frequências naturais da estrutura devido ao dano imposto, sendo necessário então um dano relativamente grande para que houvesse uma variação perceptível nas frequências naturais da estrutura em questão.

Um das grandes vantagens do método de detecção de danos abordado neste trabalho é a possibilidade do mesmo ser aplicado em tempo real (*on-line*), permitindo que assim que haja um dano estrutural a resposta seja imediatamente enviada a determinado meio receptor, como abordado por Liang & Chyanbin (2001). Os autores trabalharam em um método *on-line* de identificação de danos em estruturas do tipo placas de material compósito, utilizando redes neurais artificiais (RNAs). O dano estrutural em questão foi modelado como furos circulares, elipses e trincas. As condições de contorno aplicadas na estrutura foram carregamentos uniaxiais, tensões cisalhantes e modos de flexão. Os autores optaram pela utilização de 12 sensores simetricamente distribuídos em relação ao centro da placa e obteve-se boas aproximações para a localização do dano estrutural com o uso do método das RNAs. Apesar deste método ter uma lenta fase de treinamento, a sua convergência se torna rápida após esta etapa. Este método possui

grande aplicabilidade no setor aeroespacial, por se tratar de um método de identificação de danos relativamente rápido e com aplicação em materiais compósitos.

Para se verificar a robustez de determinado método numérico, é imprescindível que se trabalhe com a inserção de ruídos na medição, ou seja, que dados de entrada ou saída sejam afetados por determinado fator externo aleatório. Com isso, Au *et al.* (2003), descreveram um procedimento para detecção de danos estruturais com uso de algoritmo genético a partir de dados modais como entrada, sendo estes de caráter incompleto e com presença de ruídos. O estudo dos autores cobriu o uso de apenas frequências naturais e do uso combinado de ambas as frequências e modos de vibração da estrutura vigente. O método proposto foi aplicado a uma viga simplesmente apoiada com vários locais de danos simulados numericamente utilizando o método dos elementos finitos. Os erros de medição dos dados modais de entrada foram simulados por meio da sobreposição de um ruído gaussiano branco aleatório e os resultados numéricos mostraram que os dados modais incompletos e ruidosos tem efeito adverso sobre a precisão da detecção de danos. A eficácia do uso de frequências e ambos as frequências e os modos de vibração combinados para uma quantificação da extensão de danos foram examinados e concluiu-se que o uso de uma função objetivo composta por modos de vibração poluídos com ruídos juntamente com as frequências pode ter efeitos favoráveis e desfavoráveis sobre a precisão da detecção de danos.

Continuando com os métodos de detecção de danos baseados em características dinâmicas, Liskai (2003) abordou o problema da detecção de danos estruturais utilizando informações de vibrações por meio de funções de resposta em frequência (FRF). O método de identificação de danos estruturais foi indicado como um problema de otimização irrestrita com uso de algoritmos genéticos. Ruídos também foram incluídos nas simulações para investigar o seu efeito sobre a precisão da detecção de danos. Resultados mostraram que o método de identificação de danos proposto é robusto, mesmo em ambientes ruidosos de medição.

Outra metodologia baseando-se na FRF foi apresentada por Gadéa (2005), determinando a localização e quantificação de danos em grandes estruturas civis, expressando o nível de avaria de uma estrutura por meio da minimização das diferenças entre funções de resposta em frequência experimentais e numéricas. Para isso, o autor desenvolveu dois sistemas de identificação de danos: um baseado na técnica otimização *Goal Programming* e o outro fundamentado nos algoritmos genéticos. Foram executadas diversas simulações numéricas e testes reais em estruturas simplificadas e em um modelo reduzido de uma plataforma fixa de petróleo para avaliar a eficiência dos sistemas. O uso da FRF demonstrou ter um grande potencial para identificação de danos. Os resultados indicam que o método é eficiente, tanto para

ajustar modelos quanto para identificar, localizar e quantificar danos, desde que o modelo numérico esteja bem ajustado e que permita a diferenciação das distintas condições de dano.

Já Borges *et al.*, (2006) consideraram um problema de identificação de danos em estruturas mecânicas utilizando dados de vibração cujo problema de identificação foi modelado como um problema inverso de otimização na utilização das frequências naturais da estrutura, bem como informações dos modos de vibração na construção da função objetivo. A avaliação dos danos em estruturas por meio de dados de vibração tem recebido considerável atenção devido às suas aplicações práticas. Dada uma estrutura real, é frequentemente interessado na determinação de uma ou mais das suas propriedades desconhecidas, por meio de dados experimentais. Tais problemas de identificação podem ser colocados como a minimização de uma medida do desvio entre o comportamento previsto por um modelo e aquilo que realmente é observada em uma estrutura real. Na prática, as alterações em frequências naturais de vibração representam apenas um indicativo global dos efeitos de danos. No entanto, os modos de vibração também podem ser incluídos para fins de identificação de danos. Numa primeira tentativa, um algoritmo genético padrão mostrou-se ineficaz na obtenção da distribuição correta dos danos simulados.

Uma metodologia em duas etapas para determinar a localização e a extensão de múltiplos danos estruturais utilizando algoritmo genético foi apresentado por Guo & Li (2009). Primeiro, a estratégia de detecção de danos se baseou na localização do dano usando uma teoria de evidências, que integra informações de identificação de danos provenientes de frequências naturais e modos de vibração. Em seguida, um algoritmo de busca genética foi proposto para determinar a extensão dos danos. Os autores analisaram uma viga em balanço como um exemplo numérico para comparar o desempenho do método proposto com os vários critérios de detecção de danos. Os resultados das simulações computacionais mostraram que ambos métodos MDLAC (*Multiple Damage Location Assurance Criterion*) baseados em frequências naturais e modos de vibração foram satisfatórios e a análise em duas etapas revelou-se eficiente para a identificação de múltiplos danos estruturais.

Lopes (2010a) trabalhou em um problema inverso de identificação e localização de danos utilizando-se técnicas independentes, para o modelo inverso. O dano foi caracterizado por um orifício circular na estrutura, que induziu a uma modificação nos campos de temperatura e tensão existentes. Modelos diretos para o problema térmico (condução) e problema estático foram necessários para a obtenção da distribuição destas quantidades no domínio analisado para uma configuração particular. O método dos elementos de contorno foi empregado como problema direto, e duas técnicas independentes foram utilizadas para o problema inverso, com a finalidade de localizar um dano numa estrutura. A primeira técnica adotada foi a otimização usando

algoritmos genéticos e para uma segunda abordagem empregou-se uma técnica de identificação de parâmetros utilizando as RNAs. Em suma, o dano pode ser caracterizado por uma mudança na estrutura, tal qual a presença de furos e trincas. O conhecimento da mudança nas propriedades do material correspondente ao dano depende do tipo de material e da configuração estrutural. Uma avaliação apropriada do dano em uma estrutura pode ser útil para inferir sobre a vida útil remanescente da estrutura. Esta avaliação do dano estrutural pode ser realizada por meio de uma comparação entre dados medidos e simulados. Lopes *et al.* (2010b) propuseram uma técnica de otimização global, baseando-se na busca do mínimo global de uma função objetivo composta por diferenças entre as tensões de um caso sem danos e outro com danos chegando a resultados satisfatórios mesmo simulando dados com ruídos de até 10%, o que pode ser considerado elevado.

O monitoramento da integridade estrutural por meio de utilização de técnicas de elementos finitos trabalhando em conjunto com algoritmos de otimização têm desempenho promissor na solução de problemas de otimização global recebendo atenção considerável nos últimos anos segundo Jafarkhani & Masri (2011). Em seus estudos, os autores investigaram o desempenho de uma estratégia evolutiva na abordagem de detecção de danos em uma ponte de concreto como estudo de caso. Parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal) foram utilizados na investigação. O problema direto foi modelado com base no método dos elementos finitos e a identificação de parâmetros foi obtida por meio do método do Filtro de Kalman. Os autores concluíram que o algoritmo de detecção de danos operando em conjunto com um modelo de elementos finitos mostrou-se robusto e preciso para detectar, localizar e quantificar os danos nas colunas da ponte estudada. No entanto, os resultados experimentais poderiam não ser completamente validados. A confiabilidade dos resultados depende da precisão das propriedades modais obtidas na estrutura danificada em diferentes fases experimentais.

Outro problema inverso de detecção de danos modelados como furos circulares foi proposto por Vieira (2011), com o uso de um modelo de filtro de Kalman para determinar a localização e identificação de parâmetros de dano em uma estrutura bidimensional. Alguns aspectos da aplicação da metodologia de otimização para problemas inversos foram discutidos pelo autor. Com o auxílio do método dos elementos de contorno formulou-se o modelo do problema direto. A formulação matemática e o procedimento para a obtenção do modelo numérico foram descritos. O problema inverso de detecção de danos, utilizando o filtro de Kalman, se mostrou muito eficiente desde que seus parâmetros estejam ajustados para o problema em questão. Esta necessidade de adequação de parâmetros ao problema faz com que o método não seja robusto a ponto de se alterar o problema, ou o modelo, mantendo-se as características e parâmetros do

filtro de Kalman utilizados em um problema inicial. Para uma melhor adequação destes parâmetros, o autor sugere realizar uma análise de sensibilidade dos mesmos, a fim de se obter uma relação de interferência sobre o método por parte de cada parâmetro.

Diversas outras técnicas heurísticas de otimização podem ser aplicadas em problemas inversos de detecção de danos estruturais, assim como apresentado por Nanda *et al.* (2012), apresentando uma metodologia para determinar a localização e a quantidade de trincas em uma viga utilizando técnica de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*). A função objetivo foi formulada utilizando dados relativos às frequências naturais da estrutura intacta e da estrutura simulada por meio de elementos finitos. Segundo os autores, frequências naturais são mais fáceis de se obter do que modos de vibração e os erros de medição são relativamente menores. Utilizou-se a raiz quadrada média das frequências da estrutura inicial e da estrutura simulada a partir do método de elementos finitos como função objetivo, tomando as primeiras frequências naturais para a otimização. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que seu método desenvolvido utilizando PSO é capaz de detectar e estimar o grau de severidade do dano com uma precisão satisfatória mesmo com moderados níveis de ruídos na medição, porém o caso de estudo foi tratado somente para uma estrutura unidimensional do tipo viga, sabe-se a localização do dano em relação ao comprimento da viga, mas não em relação às outras coordenadas cartesianas.

Abordando o interesse sobre o monitoramento da integridade estrutural em materiais compósitos, Rezaiee-Pajand *et al.* (2012) trabalharam no desenvolvimento de um método de detecção de danos em uma placa laminada de fibra de carbono usando elementos finitos como formulação direta do problema e otimização utilizando-se algoritmo genético para detecção do dano estrutural, sendo a delaminação estudada como o dano proposto, pois este tipo de dano é um importante mecanismo de falha em certos tipos de estruturas compostas e de enorme interesse para a comunidade de monitoramento de integridade estrutural. O procedimento de detecção de danos proposto pelos autores foi aplicado para detecção de delaminação em vigas laminadas por meio da minimização de uma função objetivo. A delaminação foi descrita em termos da sua localização e tamanho. Esta técnica limita o grau de intervenção humana necessária em métodos de detecções experimentais, acarretando em uma diminuição de tempo e custos para realização do monitoramento de danos e manutenção preditiva.

Em seu trabalho, Zhang *et al.* (2003) examinaram diferentes algoritmos de otimização para o problema inverso afim de prever a localização e tamanho da delaminação em uma viga simplesmente apoiada, baseando-se em funções objetivos compostas por parâmetros dinâmicos. Segundo os autores, um dos desafios da utilização de uma função objetivo baseada em

frequências naturais para a detecção de danos é que, enquanto a presença de danos é facilmente identificada por uma mudança na frequência, as determinações da localização e a gravidade do dano (geometria) não são fáceis de obter. As variáveis de decisão dos autores são compostas pelo tamanho da delaminação, localização axial e localização da interface laminar. Apesar dos inconvenientes, os algoritmos estudados foram capazes de prever os parâmetros de delaminação com precisão usando casos de teste gerados a partir do modelo de elementos finitos, que é utilizado para gerar o banco de dados para os algoritmos.

Diversas outras geometrias e modelos de danos são abordados na literatura, bem como no trabalho de Suveges (2014), onde o autor modela um problema inverso de detecção usando o método de elementos de contorno (MEC) associado à heurística de otimização global evolução diferencial (ED). O primeiro foi utilizado para obter a tensão normal em alguns pontos da estrutura e o segundo para minimizar um funcional relacionado ao quadrado dos resíduos entre as tensões medidas e as calculadas para uma estimativa de um determinado modelo de dano. A estrutura estudada pelo autor se constituiu de uma placa fina quadrada com três modelos de danos adotados: furos circulares, furos elípticos além de um modelo para pontas de trincas. Em suas simulações numéricas, o autor considerou a presença de ruídos de medição a fim de simular falhas nos sensores acoplados ao sistema. Os parâmetros geométricos do dano foram identificados com precisão considerável em diferentes posições da placa mostrando a eficiência e robustez da estratégia adotada. Dificuldades naturais foram observadas pelo autor quando se introduziu ruídos de medição, mas os resultados finais foram satisfatórios.

Recentemente, Cha & Buyukozturk (2015) fizeram uso da energia de deformação modal (*Modal Strain Energy* - MSE), que se trata de uma propriedade física sensível, que pode ser utilizada como um índice de danos no monitoramento de integridade estrutural. Os autores salientaram que métodos baseados em somente uma função objetivo são promissores, porém a investigação para integração destes é limitada e pode conduzir a erros relativamente altos. Uma técnica de otimização multiobjetivo foi empregada utilizando o critério de MSE em estruturas de aço tridimensionais. Os autores empregaram um algoritmo genético multiobjetivo de modo a detectar os locais exatos e extensões de pequenos danos induzidos na estrutura. Além disso, o método apresentou certo nível de robustez pela adição de 5% de ruído gaussiano branco aleatório como um efeito de ruído vindo do sistema de aquisição de sinais de vibração, que são utilizados no cálculo do método.

Por fim, objetivou-se nesta revisão bibliográfica decorrer sobre alguns trabalhos da literatura relacionados com o tema aqui estudado, a fim de se fundamentar e ressaltar a relevância deste trabalho que tem como objetivo o estudo do método de detecção de danos em materiais

compósitos a partir de parâmetros dinâmicos, como frequências naturais e acelerações. Para isto, técnicas heurísticas de otimização como os algoritmos genéticos serão empregadas, dando continuidade às contribuições já existentes por diversos pesquisadores da área.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo e foco principal deste trabalho é o desenvolvimento de modelos numéricos para o tratamento de um problema inverso de dano estrutural em um material compósito usando métodos heurísticos de otimização, lançando mão de funções objetivo compostas por parâmetros puramente dinâmicos.

O objetivo principal deste estudo pode ser dividido em vários objetivos específicos:

- Compreender a funcionalidade do método de otimização para identificação de parâmetros no problema de detecção de danos;
- A detecção de dano, sendo este modelado como um furo circular em uma placa laminada de material compósito sujeita a vibrações mecânicas;
- Detecção de múltiplos danos (furos circulares) presentes em uma mesma estrutura;
- Detecção de danos de menor extensão, como trincas;
- Acréscimo de ruído nas medições visando estudar a robustez do método para os modelos de danos estudados;
- Aplicação do método em uma estrutura real com dano previamente imposto.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em seis capítulos além das referências bibliográficas e apêndices, conforme será exposto a seguir.

No Capítulo 1, faz-se uma introdução a respeito do trabalho elaborado apresentando uma breve revisão literária das relevantes contribuições de pesquisadores na área. Os principais objetivos de pesquisa são ainda inclusos neste capítulo.

No Capítulo 2, será feita uma breve abordagem sobre os materiais compostos, além de alguns exemplos de defeitos estruturais, dando ênfase aos laminados de fibra de carbono. Uma

abordagem analítica para o cálculo de frequências naturais em laminados ainda é comentada neste capítulo.

Noções sobre técnicas heurísticas de otimização global, bem como algoritmos genéticos serão discutidas no Capítulo 3.

No Capítulo 4, discorre-se sobre a importância do método inverso de detecção de danos como monitoramento da integridade estrutural e as metodologias utilizadas neste trabalho para modelagem numérica do problema direto e inverso.

No Capítulo 5, os principais resultados serão discutidos, levando em consideração os modelos de danos e o acréscimo de ruído nas medições.

Por fim, no Capítulo 6, apresentar-se-á as conclusões oriundas a partir dos resultados obtidos e uma sugestão de trabalhos futuros e os apêndices fornecerão detalhes relevantes a este trabalho.

Capítulo 2

MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1 INTRODUÇÃO

O grupo de materiais que podem ser definidos como materiais compósitos é extremamente grande. Na definição mais geral pode-se considerar um compósito como qualquer material que seja uma combinação (composição) de dois ou mais materiais e que tenham suas propriedades derivadas de seus materiais constituintes de maneira individual. Esta definição geral de compósitos inclui materiais naturais como madeira, materiais estruturais tradicionais como concreto, bem como modernos compósitos sintéticos, tais como as fibras de carbono/epóxi, que são agora um importante grupo de materiais de engenharia, onde seu baixo peso em combinação com alta resistência e rigidez são amplamente benéficos em projetos estruturais. Em geral, um material compósito é composto por um material descontínuo, denominado de reforço e um outro material com característica de menor resistência mecânica e menos rígida, mas distribuído continuamente, denominando matriz (ALTENBACH, 2005).

Em um sentido menos restritivo, um compósito estrutural pode consistir em duas ou mais fases ao nível macroscópico. O comportamento mecânico e as propriedades dos materiais compósitos são superiores aos dos seus componentes ou materiais constituintes tomados separadamente. A concentração da fase de reforço é um parâmetro de determinação das propriedades do material, a sua distribuição determina a homogeneidade ou a heterogeneidade na escala macroscópica. O aspecto mais importante dos materiais compósitos é a anisotropia causada pela orientação das fibras. O componente de reforço pode ser descrito como fibroso ou

em partículas, sendo as fibras, podendo assumir formas contínuas ou descontínuas. Fibras contínuas são organizadas, geralmente de maneira uni ou bidirecional, mas também reforços irregulares por fibras contínuas são possíveis. A orientação preferida no caso dos compósitos de fibra contínua é unidirecional para cada camada ou lâmina (VASILIEV & MOROZOV, 2001).

De acordo com Daniel & Ishai (1994), os materiais compósitos consistem em dois ou mais constituintes e a sua modelagem, análise e dimensionamento estrutural, são diferentes dos materiais convencionais, como aço. Adotando-se as ferramentas clássicas de análise estrutural de estruturas elásticas anisotrópicas a análise de estruturas simples, como vigas ou placas pode ser obtida por métodos analíticos, mas para outras condições de contorno e para estruturas complexas, são utilizados métodos numéricos. Para compósitos laminados, como por exemplo, as fibras de carbono/epóxi, alguns conceitos devem ser tomados para que ocorra uma modelagem matemática correta, ou seja, as diferentes escalas de modelagem mecânica de elementos da estrutura do composto. Ainda segundo os autores, deve-se notar que, independentemente das diferentes possibilidades de formular uma placa ou uma teoria de casca, três níveis de modelagem devem ser considerados (Figura 2.1):

- A nível microscópico, onde as características mecânicas médias de uma lâmina tem que ser calculada a partir das características conhecidas das fibras e do material da matriz, tendo em conta o volume de fibra e o arranjo das mesmas. A modelagem micromecânica leva a uma correlação entre propriedades constituintes e propriedades compostas;
- O nível macroscópico, onde as características (média) de um laminado têm que ser estimadas a partir das características médias de um conjunto de lâminas, tendo em conta a sua sequência de empilhamento. No nível macro mecânico, um laminado é geralmente considerado como um elemento de camada única equivalente com um comportamento de material anisotrópico *quasi-homogêneo*;
- A nível estrutural, onde a resposta mecânica dos elementos estruturais, como vigas, placas e cascas deve ser analisada levando-se em conta as possibilidades de formular teorias estruturais de ordem diferente.

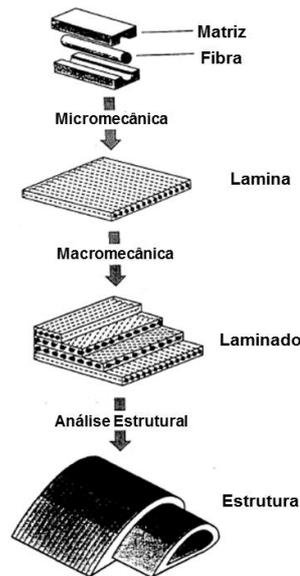


Figura 2.1 - Níveis de modelagem de material compósito (Adaptado de DANIEL & ISHAI, 1994).

Segundo Balasubramanian (2013), existe uma estimativa indicando que existem mais de 60.000 produtos feitos de materiais compósitos disponíveis no mercado. Um estudo feito pelo mesmo autor, prevê que no ano 2030, 50% dos produtos de engenharia vão ser constituídos de materiais compósitos, já com uma taxa de crescimento anual de 4% a 7% do uso destes materiais atualmente. O setor de construção civil é o principal consumidor de compósitos. Automóveis, elétrica/eletrônica e indústrias mecânicas são os outros grandes consumidores desses materiais. Para além destes setores, compósitos também são encontrados em aplicações na indústria aeroespacial, naval, esportiva e setores médicos. Ainda segundo o autor, a alta rigidez e resistência específica são as propriedades importantes que levaram à ampla utilização de materiais compósitos no setor aeroespacial. Compósitos poliméricos são mais adequados para navios e estruturas petrolíferas, devido à sua melhor resistência a intempéries.

Segundo Gay *et al.* (2003), a utilização de compósitos poliméricos avançados em partes estruturais de aeronaves cresce a cada ano, devido às excelentes propriedades mecânicas que este material confere ao componente que está sendo projetado e por permitir flexibilidade no projeto de peças complexas e com propriedades locais específicas, como mostrado na Figura 2.2. A tendência mundial mostra que a indústria automotiva a médio e longo prazo será a maior usuária dos compósitos poliméricos. No entanto, esta lucrativa oportunidade só se firmará quando os compósitos reforçados com fibras de vidro e carbono apresentarem preço competitivo com o alumínio e o aço. Na indústria petrolífera, os materiais compósitos oferecem uma série de vantagens, como alta resistência ao desgaste e à corrosão, bom isolamento térmico, bom amortecimento, boa resistência mecânica e à fadiga. Uma razão adicional para a utilização destes

materiais relaciona-se ao fato que os *risers* de aço utilizados em plataformas normalmente não são convenientes em águas profundas (Figura 2.3). Isso porque, em geral, os aços não podem ser estendidos por mais de 1500 metros. Em grandes profundidades tornam-se pesados e requerem um mecanismo que suporte uma grande solicitação axial, requerendo uma estrutura mais robusta, ou seja, uma plataforma maior. Então, a utilização de *risers* produzidos com materiais compostos (Figura 2.3) proporciona uma redução em torno de 37% dos custos totais de instalação (OCHOA & SALAMA, 2005).

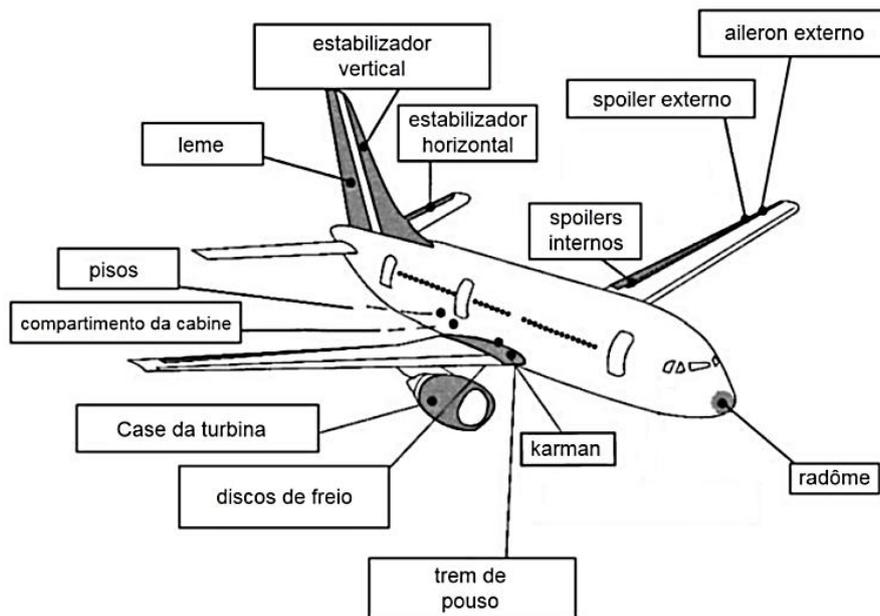


Figura 2.2 – Um exemplo de aeronave comercial. A porcentagem de massa compósito é de 21,5% da massa da estrutural total (Adaptado de GAY *et al.*, 2003).

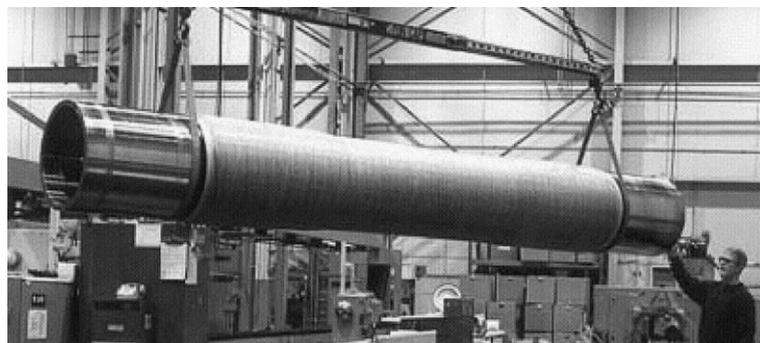


Figura 2.3 - *Riser* de perfuração em uma plataforma de petróleo (retirado de OCHOA & SALAMA, 2005).

Em síntese, a principal vantagem de compósitos é a sua elevada rigidez e resistência específica. Por consequência, o peso dos componentes, pode ser drasticamente reduzido pelo uso de materiais compósitos. A redução de peso é uma grande preocupação nos setores aeroespacial

e automobilístico. Assim, os materiais compósitos terão uma clara vantagem sobre os outros materiais convencionais nestes setores. A segunda vantagem de compósitos é a sua eficiência energética. A maior parte dos compostos atualmente utilizados são compostos à base de polímero, que pode ser produzido à temperatura ambiente, necessitando de pouca energia para sua produção (BAKER *et al.*, 2004).

Em contrapartida, os compósitos são mais caros do que os materiais convencionais. Os compósitos são aproximadamente 5 e 20 vezes mais caros do que o alumínio e o aço, respectivamente (BALASUBRAMANIAN, 2014). No entanto, os níveis de desempenho dos materiais compósitos são elevados, contudo, as possibilidades de formação de defeitos na interface são altas, a menos que um grande cuidado seja exercido durante o processamento, defeitos são inevitáveis.

2.2 DANOS E DEFEITOS ESTRUTURAIS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

A aplicação de materiais avançados em componentes e estruturas evoluiu devido à necessidade de reduzir o peso e melhorar o desempenho estrutural. Outros atributos de materiais compósitos, como a resistência à corrosão, perfis de excelente acabamento superficial, a elevada resistência à fadiga e desempenho, também têm sido contribuições significativas para o rápido aumento da aplicação destes materiais. Como resultado, precisa-se adequar estes novos materiais a corretos níveis de tensão e ao mesmo tempo proporcionar níveis adequados de tolerância ao dano (BALASUBRAMANIAN, 2013).

Quando os componentes em materiais compósitos estão danificados ou defeituosos, de alguma forma, o engenheiro ou técnico precisa determinar o tamanho, forma, profundidade, tipo e extensão da abordagem da anomalia e sua restituição. Um procedimento típico de reparação é mostrado na Tabela 2.1. De importância imediata é a capacidade de identificar os danos e determinar a sua extensão por técnicas de inspeção não destrutiva (*Non Destructive Inspection - NDI*). A maioria das técnicas NDI utilizadas, se não todas, exigem elevados níveis de experiência do operador para uma aplicação com sucesso e interpretação de resultados confiáveis (HERLEUST, 2014).

Tabela 2.1 - Procedimento típico de reparação de danos compósitos (HERLEUST, 2014).

Nº	Descrição	Nº	Descrição
1	Localizar a região danificada	6	Fabricar e preparar o esquema de reparo
2	Avaliar a extensão dos danos	7	Aplicar o reparo
3	Avaliar o estado de tensão da área danificada	8	Realizar verificações de qualidade de pós-reparo
4	Projetar o esquema de reparo	9	Procedimentos documentados de reparo
5	Remover os danos e preparar a estrutura para reparação	10	Monitorar a região reparada

A heterogeneidade da microestrutura, bem como a anisotropia de propriedades fornecem características significativamente diferentes para os materiais compósitos na forma como se deformar e falhar quando comparadas com os metais ou as cerâmicas. Algumas definições básicas de danos e falhas, segundo Talreja & Singh (2012), são apresentadas:

- *Fratura*: convencionalmente, a fratura é entendida como "quebra" de material, ou a um nível mais fundamental, a quebra de ligações atômicas, manifestando-se na formação de superfícies internas. Exemplos de fratura em compósitos são a quebra de fibra, rachaduras na matriz, descolamento de fibra/matriz e separação de camadas (delaminação);
- *Danos*: danos, por outro lado, refere-se a uma coleção de todas as mudanças irreversíveis provocadas em um material por um conjunto de processos físicos ou químicos, resultantes da aplicação de cargas termomecânicas. Os danos podem ser inerentemente manifestados por quebra dos vínculos atômicos. A menos que especificado de maneira diferente, o dano é entendido para se referir a alterações distribuídas;
- *Falha*: definida como a incapacidade de um dado sistema material para executar sua função estrutural. Fratura é um exemplo de uma possível falha, mas geralmente, um material pode fraturar (localmente) e ainda desempenhar a sua função mecânica previamente projetada.

2.2.1. Danos e Defeitos Estruturais em Laminados

Defeitos e danos em componentes estruturais são ocorrências comuns, eles podem surgir durante o processamento do material, a fabricação de componentes ou mesmo em serviço. O efeito do defeito ou danos na integridade estrutural em componentes compostos é essencial para a compreensão da criticidade do defeito. Os defeitos podem ser agrupados em categorias específicas de acordo com o surgimento durante a vida da estrutura compósita, a sua dimensão relativa, a sua localização ou origem dentro da estrutura do material. Alguns exemplos de danos em compósitos são mostrados na Figura 2.4. Os componentes em serviço terão defeitos que ocorrem por meio da ação mecânica ou contato com ambientes hostis, tais como o impacto, sobrecarga local, aquecimento local, ataques químicos, radiação ultravioleta, vibração acústica, fadiga ou inadequada ação de reparação. O tamanho de um defeito tem influência significativa sobre a sua criticidade, podendo estar presente isoladamente proveniente de características estruturais, tais como entalhes e juntas parafusadas, ou mesmo em uma acumulação aleatória resultante da interação entre outros defeitos (TALREJA & SINGH, 2012).

(Intencionalmente deixado em branco)

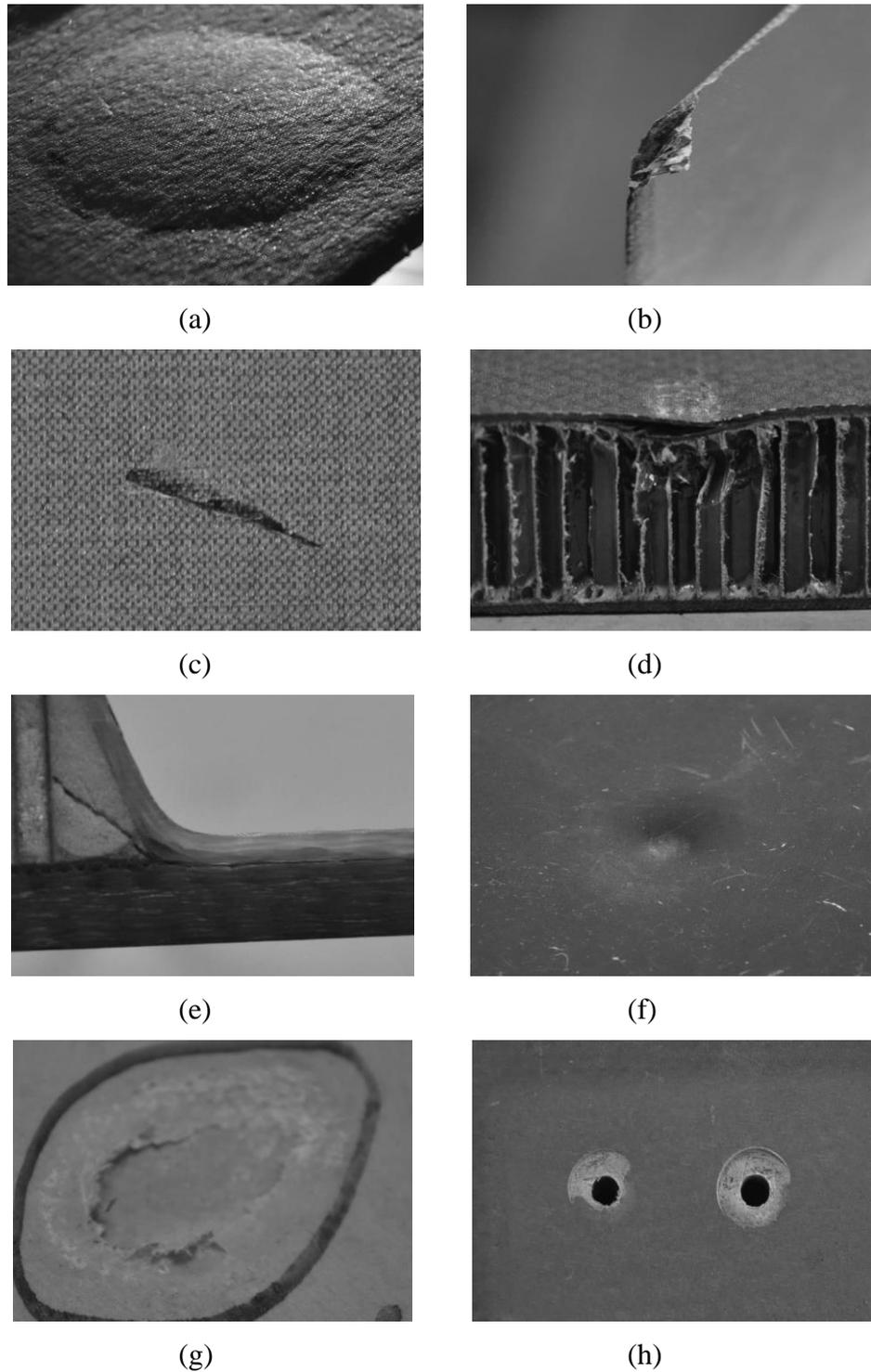


Figura 2.4 - Alguns danos característicos em materiais compósitos. Bolha localizada na superfície (a), rachaduras de canto (b), corte superficial (c), esmagamento em um painel sanduíche (d), delaminação em um laminado (e), dano gerado por impacto (f), erosão superficial (g) e dano superficial gerado por excesso de aperto de fixadores (h) (Retirado de HESLEHUST, 2014).

Capítulo 3

MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

3.1 CONCEITOS GERAIS

Segundo Rao (2009), otimização consiste em encontrar uma solução ou um conjunto de soluções ótimas para uma determinada função ou conjunto de funções. O conceito de solução ótima é inerente do problema que se deseja otimizar. Por exemplo, em uma situação A modelada matematicamente por uma única função F_A , há a necessidade de determinar um valor (valor ótimo) tal que F_A seja mínimo, ou ainda, uma situação B cujo modelo matemático seja expresso por n funções F_{Bn} ($n = 1, 2, 3, \dots, m$) onde se pretende maximizar algumas e minimizar as demais. Neste caso, pode-se ter uma única solução, um conjunto de soluções ou ainda não haver solução que satisfaça todas as funções. À medida que o número de funções e o número de variáveis aumentam, a dificuldade em se determinar o conjunto de soluções ótimas também aumenta. É neste contexto que surge a necessidade de desenvolver técnicas matemáticas e computacionais que refinem o processo de otimização, dado que este é amplamente utilizado para resolver problemas de engenharia.

Na concepção, construção e manutenção de qualquer sistema de engenharia, os engenheiros têm de tomar decisões multivariadas e gerencia-las em várias fases. O objetivo final de todas estas decisões ou é para minimizar o esforço necessário ou para maximizar o benefício desejado. Uma vez que o esforço requerido ou o benefício desejado em qualquer situação prática pode ser expressa como uma função de certas variáveis de decisão, a otimização pode ser definida como o

processo de encontrar as condições que dão o valor máximo ou mínimo de uma função. Pode ser visto a partir da Figura 3.1 que se um ponto x^* corresponde ao valor mínimo da função $f(x)$, o mesmo ponto também corresponde ao valor máximo do negativo da função, $-f(x)$ (RAO, 2009).

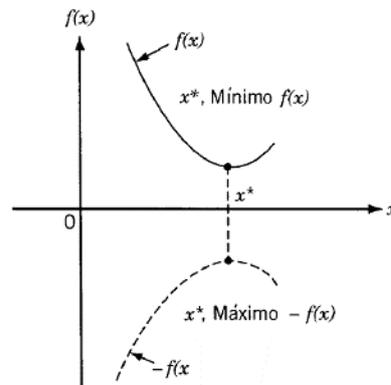


Figura 3.1 - Problema de máximo e mínimo de uma função no processo de otimização (Retirado de RAO, 2009).

Ainda de acordo com o autor, um problema geral de otimização pode ser definido como:

$$\text{Encontrar } X = \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{cases}, \text{ tal que minimize } f(X) \quad (3.1)$$

Sujeito a restrições

$$g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (3.2)$$

$$l_j(X) = 0, j = 1, 2, \dots, p \quad (3.3)$$

sendo X conhecido como um vetor n -dimensional chamado o vetor de projeto, composto por variáveis de projeto. As variáveis de projeto são classificadas em variáveis contínuas e discretas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor, já as variáveis discretas estão limitadas a valores isolados. A função objetivo $f(X)$ deve quantificar o que se deseja otimizar e será função das variáveis de projeto escolhidas. A função objetivo deve ser usada como uma medida da eficiência do projeto. A função objetivo pode ser classificada em simples ou multiobjetivo (ou multicritério). A função é dita simples quando tem-se apenas um objetivo e é denominada multiobjetivo quando deseja-se otimizar vários objetivos de uma só vez. O sucesso da otimização vai depender também da formulação da função objetivo. Assim, é importante

reservar um tempo significativo do projeto para encontrar uma expressão matemática (deslocamento, frequência de ressonância, rigidez, etc.) adequada que quantifique corretamente a eficiência do projeto. Os termos $g_j(X)$ e $l_j(X)$ são conhecidos como restrições de desigualdade e de igualdade, respectivamente. O número de variáveis n e o número de restrições m e/ou p não necessitam ser relacionados diretamente entre si.

3.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Em engenharia, os problemas geralmente são complexos, não lineares, de difícil representação e descritos por funções nem sempre diferenciáveis, necessitando de métodos numéricos para sua solução. Os métodos determinísticos, baseados no cálculo de derivadas ou em aproximações destas e no gradiente, produzem bons resultados quando as funções são contínuas, convexas e unimodais. No entanto, na maioria das vezes, são ineficientes quando aplicados a problemas que apresentam problemas de descontinuidade (YANG, 2010). Segundo o autor, as principais dificuldades em métodos determinísticos são:

- A convergência a uma solução ótima depende da escolha da solução inicial;
- Muitos algoritmos tendem a ficarem “presos” em uma solução sub-ótima (mínimos locais);
- Um algoritmo eficiente na solução de um problema de otimização pode não ser eficiente na solução de outro;
- Não são eficientes em tratar problemas onde o espaço de busca é discreto.

Os métodos heurísticos podem reduzir algumas das dificuldades apresentadas anteriormente, justificando o fato de que cada vez mais estão sendo desenvolvidas pesquisas com estes métodos, visando comparar seus resultados com os métodos clássicos na solução de problemas de otimização. Os métodos heurísticos, também conhecidos como métodos naturais, se caracterizam pela busca da melhor solução por meio de regras de probabilidade, trabalhando de maneira “aleatória orientada”. Tais métodos utilizam apenas as informações da função de otimização, não requerendo informações sobre suas derivadas ou possíveis descontinuidades (MITCHELL, 1999).

Segundo Back (1996), as técnicas heurísticas requerem um número elevado de avaliações do problema. Isto é necessário para que se dê chance ao método de explorar devidamente toda a região do espaço de busca em que está contida a solução ótima, resultando em um grande número de avaliações da função para encontrar a solução. Ainda de acordo com o autor, os métodos naturais são procedimentos iterativos que tentam simular os processos usados na natureza para resolver problemas difíceis. Entre as técnicas mais conhecidas pode-se citar recozimento simulado, busca tabu e um grupo de métodos baseados em população. Neste último grupo, destacam-se os algoritmos evolutivos ou evolucionários (Algoritmos Genéticos, Estratégias de Evolução, Evolução Diferencial, etc.) e os algoritmos baseados na inteligência coletiva (otimização por enxame de partículas, colônias de formigas, etc.). Estes algoritmos se baseiam em população de indivíduos, onde cada indivíduo representa um ponto de busca no espaço de soluções potenciais de um dado problema e imitam os princípios da natureza para criar procedimentos de otimização. Os Algoritmos Evolutivos possuem alguns procedimentos de seleção baseados na aptidão dos indivíduos e em operadores de cruzamento e mutação.

Como exposto nos parágrafos anteriores, a grande vantagem na utilização de métodos evolutivos está relacionada ao excelente comportamento em encontrar pontos de ótimos de uma determinada função objetivo, não se prendendo a mínimos locais. A Figura 3.2 exemplifica um problema clássico de otimização, introduzindo a função de *Ackley*, amplamente utilizada para testar algoritmos de otimização. Na sua forma bidimensional, como se encontra na figura, caracteriza-se por uma região externa repleta por pontos de mínimos (locais), e um grande orifício no centro representando o ponto de mínimo global (BACK, 1996).

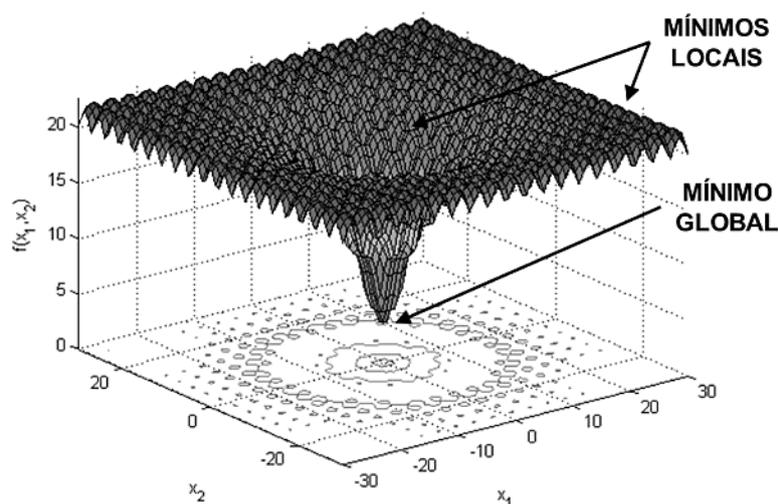


Figura 3.2 - Função de *Ackley* com inúmeros mínimos locais nas regiões periféricas e um mínimo global ao centro (Retirada de BACK, 1996).

3.2.1 Algoritmos Genéticos

Segundo Yang (2010), os algoritmos genéticos (AGs) são uma técnica de busca amplamente utilizada para encontrar soluções aproximadas em problemas de otimização. Os AGs são uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e cruzamento. As estratégias de identificação utilizadas nos AGs são inspiradas pela teoria da seleção natural e sobrevivência do mais apto de Darwin. Segundo observou Darwin, indivíduos com características mais adequadas para a sobrevivência em determinado ambiente teria melhores chances de sobreviver e de se reproduzir e seus genes seriam passados para as próximas gerações. Por meio de mutações, seleção natural e reprodução, as espécies poderiam evoluir e se adaptar às mudanças no ambiente. De um modo semelhante é possível evoluir soluções para um problema por meio de operações matemáticas, que imitam os processos de seleção natural presentes na natureza.

Segundo Mitchell (1999), muitos problemas práticos de otimização são caracterizados por variáveis discretas e espaços de busca descontínuos e não convexos. Se forem utilizadas técnicas de programação não lineares padrões para este tipo de problema, a solução será ineficaz, dispendiosa, e na maioria dos casos, encontra-se uma solução ótima que está fortemente ligada com o ponto de partida da busca. Algoritmos genéticos são adequados para resolver tais problemas e na maioria dos casos eles podem encontrar a melhor solução global com uma alta probabilidade.

Os algoritmos genéticos diferem dos algoritmos tradicionais de otimização em alguns aspectos: baseiam-se em uma codificação do conjunto das soluções possíveis, e não nos parâmetros da otimização em si, os resultados são apresentados como uma população de soluções e não como uma solução única, não necessita de nenhum conhecimento prévio sobre a derivada da função objetivo e usam transições probabilísticas e não regras determinísticas (MITCHELL, 1999).

3.3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Segundo Rao (2009), um problema de otimização multiobjetivo é inserido quando se deseja minimizar ou maximizar várias funções objetivo simultaneamente, sendo que, em vários casos, uma função está em conflito com outra. Este problema pode estar sujeito a restrições e todas as funções envolvidas podem ser não-lineares. Várias técnicas estão disponíveis e podem ser

consideradas para resolver este complexo problema de otimização. Alguns métodos clássicos são baseados em escalonar as funções, sendo que o vetor função objetivo é transformado em uma função escalar, enquanto que outros métodos tratam as funções objetivo como restrições adicionais.

Ainda segundo o presente autor, um problema de otimização multiobjetivo com restrições de desigualdade (restrições de igualdade, se existirem, também pode ser incluído na formulação do problema) pode ser declarado como:

$$\text{Encontrar } X = \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\text{Que minimiza } f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X) \quad (3.5)$$

sendo k o indicador do número de funções objetivo a serem minimizadas. Qualquer uma ou todas as funções $f_i(X)$ podem ser não lineares.

Em geral, não existe um vetor solução X que minimize todas as k funções objetivos simultaneamente. Assim, um novo conceito, conhecido como a melhor solução de Pareto, é utilizado em problemas de otimização multiobjetivo. Uma solução viável X é chamada de solução ótima de Pareto se não existe nenhuma outra solução viável Y tal que $f_i(Y) \leq f_i(X)$ para $i = 1, 2, \dots, k$ com $f_j(Y) < f_j(X)$ pelo menos para um j . Em outras palavras, um vetor X viável é chamada Pareto ótimo, se não houver outra solução viável Y que reduziria alguma função objetivo sem causar um aumento simultâneo pelo menos em uma outra função objetivo (RAO, 2009).

O conjunto de soluções ótimas de uma otimização multiobjetivo leva à formação de uma fronteira de soluções viáveis, denominada de frente de Pareto. A Figura 3.5 mostra uma representação para uma frente de Pareto, onde ambas as funções f_1 e f_2 são minimizadas. Quando não há diferenciação de importância entre os objetivos a serem atendidos, todos os pontos na frente de Pareto são soluções ótimas viáveis para o problema. Para um problema de otimização mostrado na Figura 3.5a, com objetivos duplos f_1 e f_2 , todos os valores correspondidos entre os pontos P e Q (pontos sobre o segmento de linha PQ) denotam soluções ótimas de Pareto.

O propósito da otimização multiobjetivo é determinar um conjunto de soluções, denominado conjunto de Pareto ou conjunto Pareto-ótimo, que representa as soluções do problema. Este conceito foi elaborado por Vilfredo Pareto em 1896, que enunciou a relação Pareto-Ótima que diz: “não é possível melhorar uma característica do problema sem piorar outra”, o que caracteriza a relação conflitante entre os objetivos na otimização multiobjetivo (SCOLA, 2014).

Vários métodos têm sido desenvolvidos para resolver um problema de otimização multiobjetivo. A maioria destes métodos geram basicamente um conjunto de soluções ótimas de Pareto e usam critérios adicionais ou regras para selecionar uma determinada solução ótima de Pareto como a solução do problema de otimização multiobjetivo.

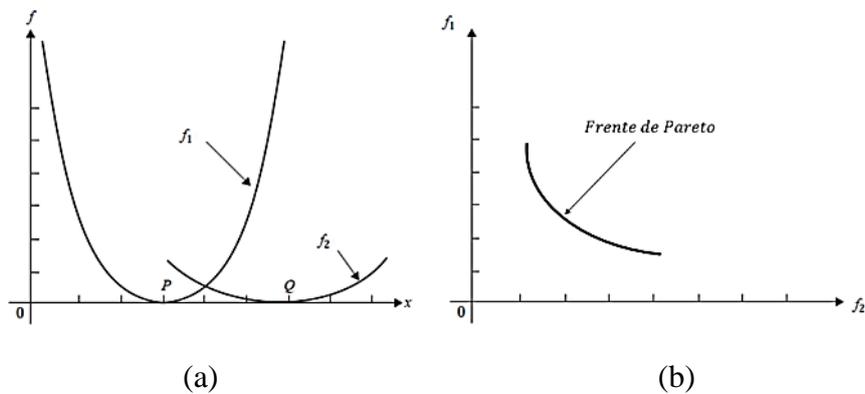


Figura 3.3 - Otimização multiobjetivo considerando duas funções (a) e a formação de uma Frente de Pareto de soluções ótimas (b) (Adaptado de RAO, 2009).

Outro método utilizado para otimização multiobjetivo é o método da soma ponderada, que visa transformar múltiplos objetivos em uma única função objetivo agregada pela multiplicação de cada função objetivo por um fator de ponderação e somando-se todas as funções objetivo ponderadas (RAO, 2009):

$$J(X) = \sum_{i=1}^m w_i J_i(X) \quad (3.6)$$

sendo w_i ($i = 1, \dots, m$) um peso para a i -ésima função objetivo, relando uma importância específica para cada função. Para uma combinação convexa, de praxe tem-se que a soma dos pesos deve ser igual a um, conforme a Equação 3.7.

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (3.7)$$

Diferentes valores de w_i são escolhidos, diferentes aproximações ou soluções para o mesmo problema são obtidas. Contudo, este método possui algumas limitações, uma distribuição uniforme e equidistante dos pesos atribuídos a cada função objetivo individual não garantem sempre soluções igualmente espaçadas na Fronteira de Pareto. As abordagens de somas ponderadas podem conduzir a soluções em regiões não convexas da Fronteira de Pareto, embora todas as soluções sejam não-dominadas (Pareto ótimas). Isto se deve ao fato de que as somas ponderadas são implementações sempre feitas com combinações convexas dos vários objetivos (KIM & WECK, 2006).

A presença de múltiplos objetivos em um problema de otimização, em princípio, dá origem a um conjunto de soluções ótimas (conhecidas como soluções Pareto-ótimas), em vez de uma única solução ideal. Na ausência de qualquer informação adicional, uma destas soluções de Pareto-ótimas não pode dizer que seja melhor do que outras. Isso exige encontrar tantas soluções Pareto-ótimas quanto possível. Métodos clássicos de otimização sugerem converter o problema de otimização multiobjetivo em um problema de otimização mono-objetivo, enfatizando uma solução Pareto-ótima. Quando um tal método é aplicado a fim de encontrar múltiplas soluções, o mesmo deve ser aplicado diversas vezes, esperando encontrar uma solução diferente em cada rodada do algoritmo (WANG *et al.*, 2010).

Na tentativa de contornar estes inconvenientes, algoritmos evolucionários veem sendo utilizados em otimização multiobjetivo, pois permitem que um conjunto de soluções ótimas de Pareto sejam encontradas com maior eficiência. Um exemplo clássico é o algoritmo genético elaborado por Deb *et al.* (2002), conhecido como NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*), que implementa o conceito de dominância, ou seja, classificar a população total em *fronts* de acordo com o grau de sua dominância. Segundo o NSGA-II, os indivíduos que estão localizados no primeiro *front* são considerados as melhores soluções daquela geração, enquanto que no último *front* encontram-se as piores. Segundo o autor, usando esse conceito, pode-se encontrar resultados mais consistentes (pontos mais próximos da região de Pareto) e que se adaptam melhor ao tipo do problema.

Capítulo 4

MÉTODO DE DETECÇÃO DE DANOS

Neste capítulo, serão discutidos os métodos de detecção de danos como ferramenta para monitoramento da integridade estrutural. Dar-se-á foco principal a parâmetros dinâmicos para tal monitoramento de integridade, como frequências naturais, acelerações e combinações destas. A metodologia empregada para o método de detecção desenvolvido neste trabalho será abordada na segunda parte deste capítulo.

4.1 DETECÇÃO DE DANOS COMO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

O monitoramento da integridade estrutural ou *Structural Health Monitoring* (SHM) tem como objetivo dar, a cada momento durante a vida de uma estrutura, um diagnóstico do "estado" de seus constituintes, das diferentes partes e do conjunto completo dessas peças que constituem a estrutura como um todo. O monitoramento estrutural é uma maneira nova e melhorada para fazer uma avaliação não destrutiva, envolvendo a integração de sensores, possivelmente materiais inteligentes, transmissão de dados de poder computacional e capacidade de processamento dentro das estruturas. Isso torna possível a reconsideração da concepção da estrutura e a gestão integral da própria como uma parte de sistemas mais amplos (BALAGEAS *et al.*, 2006)

Segundo Sohn *et al.* (2004), ter o acompanhamento da integridade estrutural de estruturas em serviço em uma base contínua de tempo real é um objetivo muito importante para os fabricantes, usuários finais, bem como equipes de manutenção. Com efeito, o SHM:

- Permite uma utilização ótima da estrutura, um tempo de inatividade minimizado, e a prevenção de falhas catastróficas;
- Dá ao engenheiro/projetista uma melhoria em seus produtos;
- Melhora a organização do trabalho dos serviços de manutenção.

Como um exemplo da importância do estudo da integridade estrutural de sistemas mecânicos, tem-se o acidente do voo da *Aloha Airlines* em abril de 1988 onde a falha estrutural ocorreu por problemas devidos à corrosão da fuselagem como mostra a Figura 4.1.



Figura 4.1 - Acidente do voo *Aloha Airlines* 243, em 29 de abril de 1988, devido à corrosão, insuficientemente controlada por manutenção (BALAGEAS, 2006).

Uma das alternativas para contornar esse problema do monitoramento da integridade estrutural consiste no uso de métodos inversos para detecção de danos. O método de detecção de dano estrutural baseando-se em métodos inversos combina um modelo inicial de estrutura e dados experimentais, sejam para melhorar o modelo ou testar uma hipótese. Uma abordagem bastante utilizada, segundo Friswell (2008), tem-se um modelo baseado na análise por elementos finitos e os dados experimentais são dados normalmente na forma de acelerações e forças, muitas vezes sob a forma de uma base de dados modal, embora a função de resposta em frequência (FRF) também é utilizada.

De acordo com Lopes (2010a), o problema inverso de detecção de danos envolve a modelagem de três problemas: *i*) a modelagem de um problema direto para o levantamento dos

parâmetros e variáveis do problema, *ii*) a modelagem de um problema inverso para resolver o problema de detecção de danos e *iii*) a modelagem de incertezas (modelagem estocástica) presentes em cada um dos problemas (na peça sob estudo, nos defeitos presentes e na própria modelagem numérica).

Segundo Rytter (1993), existem quatro níveis da estimativa de danos: *i*) detecção, *ii*) localização, *iii*) quantificação e *iv*) prognóstico. A detecção é prontamente realizada por meio de métodos de reconhecimento de padrões ou detecção de mudanças estruturais. A questão-chave para os métodos inversos é a localização, o que equivale à localização de erro no modelo. Uma vez que o dano é localizado, ele pode ser parametrizado com um conjunto limitado de parâmetros e quantificado.

Lopes (2010b) informa que a avaliação do dano estrutural pode ser realizada por meio de uma comparação entre os dados medidos (dados reais) e os simulados. Para fornecer os dados simulados, um código numérico é necessário no qual um modelo do problema é usado por um algoritmo de problema inverso. Para o problema direto, um modelo é necessário para se obter informações sobre a distribuição da quantidade de interesse em toda estrutura com dano, para isto, as condições de contorno e o posicionamento do dano são considerados. Para o problema inverso, um modelo é requerido para o procedimento de localizar o dano na estrutura, fornecendo algumas informações (parciais) sobre a quantidade de interesse em algumas localizações específicas.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DE DANOS BASEADO EM PARÂMETROS DINÂMICOS

Um dano estrutural pode ser definido como sendo a modificação da rigidez ou massa de um elemento. Uma das principais formas de se avaliar a presença de um dano local é se basear na variação dos parâmetros dinâmicos estruturais. Essa metodologia parte do pressuposto de que os danos acarretam alterações nas propriedades da estrutura, ou seja, podem acarretar a uma variação nas matrizes de massa, amortecimento e/ou rigidez de um determinado sistema, o que consequentemente acarretará em modificações nas respostas dinâmicas do mesmo (MORASSI & VESTRONI, 2008).

Segundo Doebling *et al.* (1996), variações nas frequências de vibrações possuem limitações práticas significativas para aplicações dependendo do tipo de estrutura analisada e as baixas sensibilidades de variação das frequências naturais exigem medidas muito precisas ou grandes níveis de danos para detecção. Por outro lado, o estudo acerca da variação nas frequências do

sistema possui como vantagem a facilidade de medição destas grandezas tanto numérica quanto experimentalmente o que encoraja o estudo contínuo.

De acordo com Sinou (2009), outra vantagem do uso de vibrações na detecção de danos se dá pelo fato da facilidade de desenvolvimentos analíticos ou mesmo modelos em elementos finitos das estruturas estudadas, permitindo assim, que os pontos de medição (sensores) sejam adequadamente escolhidos para que haja não só uma detecção rápida e eficiente das alterações em frequências, mas também a identificação da localização e gravidade dos danos.

Sohn (2004) aborda o uso do DLAC (*Damage Location Assurance Criterion*), como um critério para a detecção de danos empregando vibrações mecânicas. Este critério baseia-se na comparação das frequências naturais obtidas experimentalmente com um modelo de elementos finitos para localizar e quantificar um dano. Este procedimento é dado pela Equação (4.1):

$$DLAC = \frac{|\{\Delta\omega\}^T \{\delta\omega\}|}{\left(\{\Delta\omega\}^T \{\Delta\omega\}\right)\left(\{\delta\omega\}^T \{\delta\omega\}\right)} \quad (4.1)$$

sendo $\{\Delta\omega\}$ é o vetor de frequências, prevista a partir do modelo numérico (MEF) e as mudanças reais $\{\delta\omega\}$, obtidas a partir de procedimentos experimentais.

Ainda de acordo com Ewins (2000), o DLAC assume o valor de 1 para uma correspondência exata entre os conjuntos de frequências naturais e 0 para os padrões não correlacionados. Uma vantagem deste método é que o mesmo somente exige a medição de algumas frequências entre os estados não danificados e danificados da estrutura. A precisão das previsões de danos pode ser ainda melhorada pela inclusão das frequências de antirressonâncias no critério.

Assim como as frequências naturais, os modos de vibração vêm sendo utilizados na detecção de danos em estruturas mecânicas. De acordo com Sinou (2009), um dano local pode provocar alterações nos modos de vibração e a evolução da descrição espacial da amplitude de cada ressonância pode ser usada como um indicador de danos. Como desvantagem do uso de modos de vibração como técnica de avaliação dos danos é o número de medições efetuadas em cada um dos pontos das estruturas e a duração de cada medição, a fim de estimar a forma do modo de vibração.

4.3 MÉTODO DIRETO: ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Neste trabalho, o problema direto foi modelado como uma placa quadrada de lado igual a 1 metro. A estrutura se constitui de um laminado simétrico de material compósito constituída de 4 camadas de diferentes orientações. As orientações das fibras e espessuras de cada camada são mostradas na Tabela 4.1 e na Figura 4.2. Salienta-se que este trabalho visa exclusivamente o estudo do método de detecção de danos em laminados de material compósito, não dando ênfase nos parâmetros geométricos e características específicas do material laminado em questão.

Tabela 4.1 - Configurações das camadas do material compósito.

	Espessura (m)	Orientação (°)
Camada 1	0,0025	0
Camada 2	0,0025	90
Camada 3	0,0025	90
Camada 4	0,0025	0

Uma vez que o laminado compósito tenha sido definido, é necessário determinar a configuração dos elementos dentro do método de elementos finitos afim de se ter uma estrutura próxima de um laminado real. De uma maneira geral, as seguintes hipóteses são assumidas com relação ao modelamento de materiais compósitos: i) há uma união perfeita entre as camadas do laminado, o que implica que as lâminas não podem deslizar uma em relação às outras; ii) o campo de deslocamento apresenta ao menos continuidade de curvatura através da espessura dos laminados.

A teoria clássica dos laminados (CLT – *Classical Laminate Theory*) e a teoria de deformação cisalhante de primeira ordem (FSDT – *First Order Shear Deformation Theory*) foram levadas em conta para as simulações em elementos finitos.

Neste trabalho utilizou-se um elemento com as seguintes características:

- Tipo de elemento: casca (*shell*);
- Oito nós com seis graus de liberdade em cada: translação e rotação nos eixos x , y e z .

No tocante à malha utilizada nas análises decidiu-se em particionar a estrutura em 20 elementos laterais para os casos de furos circulares passantes, totalizando 400 elementos (20x20) e 10 elementos laterais para as trincas com refinamento na região do dano, gerados de maneira livre na superfície da estrutura estudada. A Figura 4.2 mostra a modelagem do laminado de

geometria quadrada, com malha livre (neste caso sem presença de dano, a malha foi uniforme devido à simetria e simplicidade da estrutura) e com condições de contorno de simplesmente apoiado.

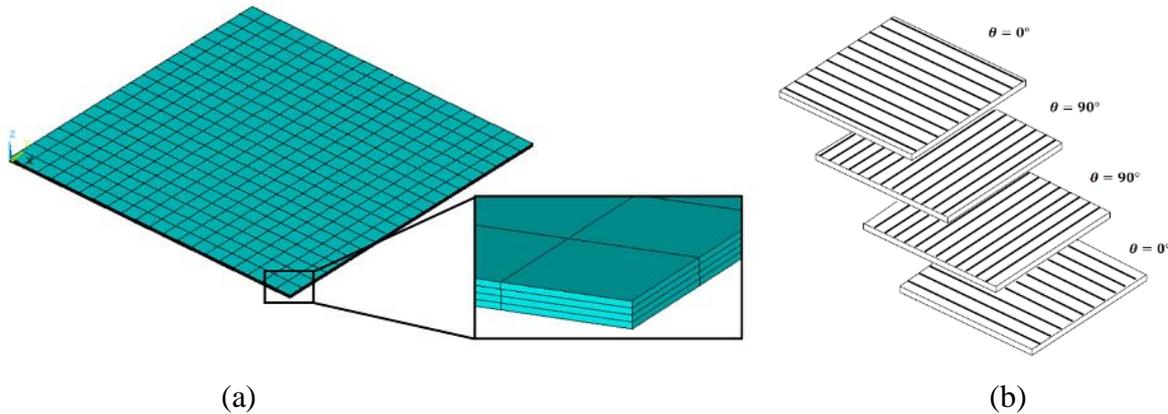


Figura 4.2 - Modelagem do laminado em elementos finitos com condições de contorno de simplesmente apoiado (a) e a orientação de suas camadas (b).

4.3.1 Modelos de Danos Adotados

Dois modelos de danos são abordados neste estudo. A saber:

1. Furo circular: presença de um único furo e de múltiplos furos passantes;
2. Trincas estruturais na placa.

4.3.1.1 Furo Circular

O dano tipo furo circular é parametrizado pelas suas posições cartesianas x e y na placa e pelo raio r do mesmo. A Figura 4.3 mostra as variáveis de parametrização do furo.

Neste trabalho realizou-se um estudo para este modelo de dano em duas posições diferentes na estrutura teste, como mostra a Figura 4.4, e em ambos se utilizou um furo circular de 2 centímetros de raio. Cabe observar que o valor utilizado para o raio do furo é bastante aceitável quando se comparado a outros trabalhos que usaram o mesmo tipo de dano como mostra a Tabela 4.2.

É importante salientar que este modelo de dano é robusto, podendo ser interpretado como um furo por si só ou por corrosão, erosão, dente, etc., onde houve perda localizada de material e de rigidez. Outras interpretações podem ser dadas para este modelo, mas o objetivo do modelo

adotado é de intervir sobre as características físicas estruturais (massa, rigidez e amortecimento) do compósito em questão.

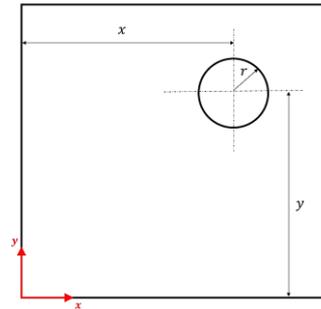


Figura 4.3 - Variáveis de parametrização do dano para furo circular.

Tabela 4.2 – Razão entre área danificada e área total da placa.

	$A^* = \frac{A_{danificada}}{A_{total}}$
HWU e LIANG (1997)	1,0469 %
SUN <i>et al.</i> (2013)	0,5027 %
LOPES (2010a)	0,1257 %
Presente Trabalho (furos)	0,1257 %

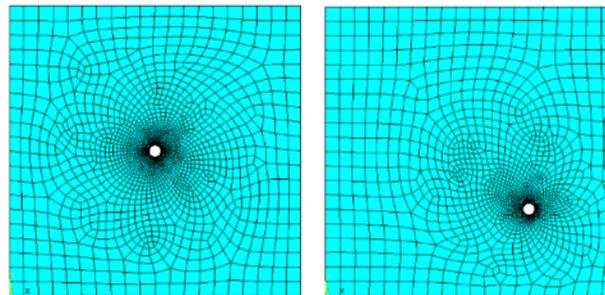


Figura 4.4 - Modelagem em elementos finitos dos modelos de danos como furos circulares.

Neste trabalho, restringiu-se a busca pelo dano ao longo da estrutura teste de forma a evitar os chamados danos de borda como mostrado na Figura 4.5. A Equação 4.2 introduz as equações de restrição implementadas, orientando o algoritmo para a geração de danos aleatórios (população inicial aleatória de indivíduos) no interior da estrutura em questão.

$$\begin{cases} g_1(\alpha): x+r < a \\ g_2(\alpha): x-r > 0 \\ g_3(\alpha): y+r < b \\ g_4(\alpha): y-r > 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

sendo a e b as dimensões da placa, ou seja, $a = b = 1\text{m}$.

Aqui, o dano será considerado de modo passante através de todas as camadas da estrutura, não sendo simulado entre camadas do laminado ou nas laterais do mesmo. Definiu-se também limites laterais tanto para a posição dos furos quanto para seus raios. Assim: $0 < x < 1$, $0 < y < 1$ e $0,005 < r < 0,1$, de modo a limitar a região de busca das variáveis somente na região estrutural e impondo um limite para a extensão do dano.

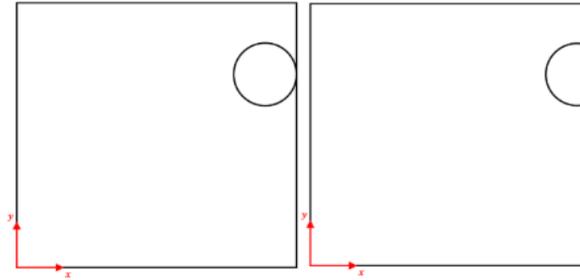


Figura 4.5 - Danos de borda evitados pelas equações de restrição (dano em escala Ampliada).

Este trabalho também prevê a presença de múltiplos furos circulares (Figura 4.6). Assim como para um único furo, a parametrização do dano se dá pela sua posição em relação aos eixos cartesianos x e y e pelo seu raio. Logo, as variáveis de projeto se agrupam em um vetor $X = \{x_1, y_1, r_1, x_2, y_2, r_2\}$, sendo os índices 1 e 2 referentes ao dano 1 e 2, respectivamente (Figura 4.7).

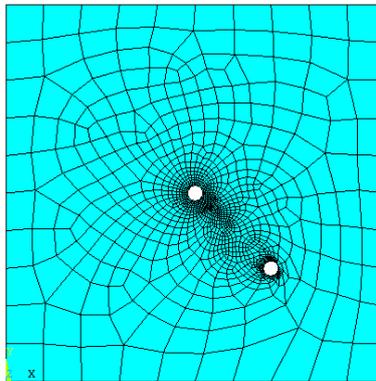


Figura 4.6 - Modelagem de dois furos circulares.

Cabe ressaltar que para dois furos simultâneos, necessitou-se acrescentar uma restrição que orienta o algoritmo de otimização a não gerar furos aleatórios de mesma concentricidade e/ou sobrepostos, ou seja, permitindo então a busca por múltiplos danos distantes entre si. Logo, a equação de restrição não-linear que se encaixa neste contexto pode ser definida como:

$$g(\alpha): \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} > (r_1 + r_2) + \varepsilon \quad (4.3)$$

A equação de restrição 4.3 permite que uma distância d (Figura 4.7) entre a posição central dos furos seja estabelecida, evitando-se sobreposição entre eles, assim como mostrado na Figura 4.8. Adicionou-se um termo ε ($\varepsilon = 10^{-6}$) ao lado direito da equação de restrição para que os furos não tenham contato tangente em suas bordas, assumindo então uma distância mínima entre eles (Figura 4.8c). De modo similar a um único furo, criou-se limites laterais para dois furos simultâneos: $0 < x_1, x_2 < 1$, $0 < y_1, y_2 < 1$ e $0,005 < r_1, r_2 < 0,1$ visando o cumprimento dos objetivos esperados no processo de detecção de dano estrutural e atendendo em conjunto as equações de restrição já especificadas.

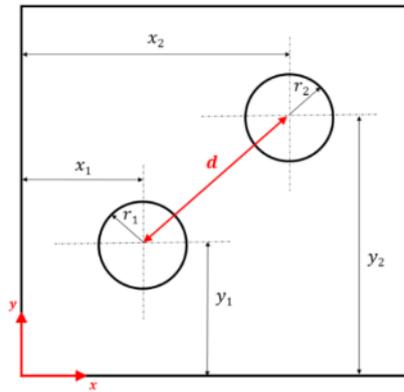


Figura 4.7 - Modelagem dos danos para identificação de parâmetros.

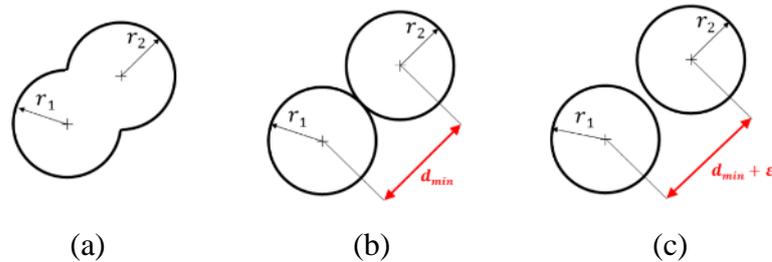


Figura 4.8 - Problemas ocasionados na detecção de múltiplos furos. Furos sobrepostos (a), furos com contato tangente (b) e furos em posições distintas no espaço.

4.3.1.2 Trincas

Este dano foi modelado segundo um hexágono com seus lados periféricos prolongados, conforme mostrado na Figura 4.9 e Figura 4.10. Fixou-se uma espessura constante de 1 milímetro para a trinca, sendo de maior interesse a busca pela localização, extensão e orientação de tal dano na estrutura em estudo. No modelo de elementos finitos, fixou-se em 10 o número de

elementos nas bordas, inserindo um refinamento na malha na região da trinca, visando melhor precisão dos resultados, por se tratar de um dano muito pequeno presente na estrutura.

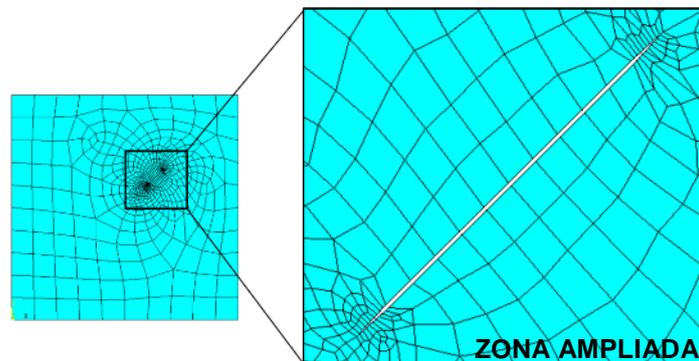


Figura 4.9 – Modelagem de dano como trinca.

A trinca estrutural foi parametrizada pela posição x e y (relativa à origem dos eixos cartesianos), o comprimento total L da trinca bem como a orientação θ da mesma, como mostrado na Figura 4.10. Manteve-se a espessura da trinca constante, pois é comum se ter modelos de trincas que não possuem espessuras sensivelmente grandes para serem consideradas.

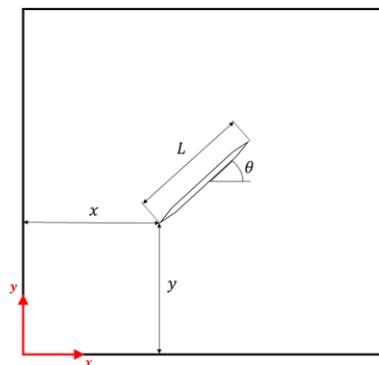


Figura 4.10 - Modelagem das variáveis de projeto para o modelo de trinca.

Limitou-se a busca de trincas somente no interior da estrutura, evitando-se as chamadas trincas de bordas. Assim, usou-se as seguintes restrições:

$$\begin{cases} g_1(\alpha): x + L\cos\theta < a \\ g_2(\alpha): y + L\sin\theta < b \end{cases} \quad (4.4)$$

Assim como no dano furo circular, limitou-se a busca aos parâmetros da trinca dentro de limites laterais sendo eles: $0 < x < 1$; $0 < y < 1$; $0,05 < L < 0,2$ e $-90 < \theta < 90$. O parâmetro θ teve sua variação segundo números inteiros no processo de busca pelo dano da seguinte forma: $\theta = \{-90, -89, \dots, -1, 0, 1, \dots, 89, 90\}$.

4.4 MÉTODO INVERSO: OTIMIZAÇÃO

Encontrar a melhor solução para um determinado problema é uma importante área de pesquisa e possui aplicação em diversos campos da engenharia tais como aeronáutica, automobilismo, naval, transporte, fabricação, dentre outros.

Como visto anteriormente, pretende-se neste trabalho utilizar respostas dinâmicas (frequências naturais e acelerações) para a solução de problemas de detecção de danos visto que são grandezas de fácil obtenção e que já tiveram resultados satisfatórios em outros trabalhos. Pretende-se ainda utilizar futuramente a metodologia aqui proposta dentro de um modelo com unidade de processamento como mostra a Figura 4.11 de forma que ensaios experimentais possam ser feitos sem maiores dificuldades no que se diz respeito à aquisição de sinais, instrumentação e operacionalidade, por exemplo.

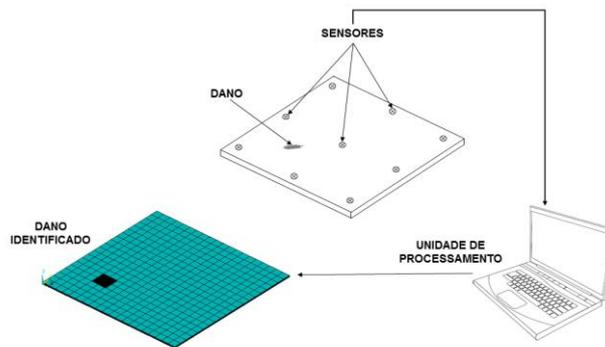


Figura 4.11 - Detecção de danos baseado em modelo com unidade de processamento.

Contudo, para que o processo de detecção de danos proposto seja efetivado, faz-se necessário a determinação de funções, que uma vez minimizadas, conduzem a resultados que mostrem claramente além da localização, a natureza do dano.

Em uma primeira abordagem, será utilizada uma função objetivo J_1 dada pela Equação 4.5.

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{\omega_i^{\text{real}}}{\omega(\alpha)_i^{\text{modelo}}} \right)^2} \quad (4.5)$$

sendo n é o número de frequências naturais obtidas, c_i o escalar de ponderação para frequências naturais de ordem mais alta, ω_i^{real} as frequências naturais correspondente à estrutura danificada real e $\omega(\alpha)_i^{\text{modelo}}$ as frequências naturais da estrutura modelada em elementos finitos, composta por um ou mais danos, parametrizados segundo um vetor de variáveis de projeto α ($\alpha = X$).

Esta primeira função objetivo baseia-se na raiz do erro médio quadrado (*Root Mean Square Error* – RMSE) das primeiras n frequências naturais da placa. A minimização desta função objetivo sugere que as frequências naturais da placa danificada real serão iguais às frequências obtidas pela otimização, ou seja, o seu valor mínimo será igual zero ($J_1 = 0$). Contudo, visando uma melhoria do processo de detecção de danos, é imprescindível que se trabalhe com uma função objetivo adequada, visando menor tempo computacional e melhor identificação. Segundo Jafarkhani & Masri (2011), seleção de parâmetros é uma questão-chave nos processos de otimização. A confiança em diferentes valores de teste de medição de parâmetros e estimativas iniciais pode ser expressa por meio de ponderações na função objetivo. Fatores de ponderação (pesos) adequados podem melhorar a resultados de otimização de forma significativa. No entanto, isso requer uma boa dose de conhecimento sobre as premissas utilizadas na modelagem de elementos finitos do sistema, bem como as possíveis fontes de erro na análise. Segundo os autores, os métodos de detecção de danos, que levam em consideração frequências naturais de ordem mais altas são mais confiáveis. Portanto, na função objetivo J_1 , toma-se um vetor peso C composto por escalares c_i de ordem crescente, $C = \{1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\}$, com o intuito de dar maior importância a frequências de ordem mais altas.

Segundo Xia & Xao (2001), uma desvantagem com o uso somente de frequências naturais é que danos simétricos na estrutura não podem ser distinguidos dependendo do tipo de estrutura avaliada e frequências naturais não são sensíveis suficientemente para detecção de danos. Por estas razões o uso de modos de vibração pode ser incorporado para solucionar este inconveniente. Contudo, na prática a aquisição de modos de vibração possui erros maiores em relação às frequências naturais, podendo não ser satisfatório considerar o uso de modos de vibração no método de detecção de danos estruturais. Para superar esse inconveniente, uma alternativa é combinar frequências naturais com modos de vibração na análise.

Com o intuito de evitar os problemas de se utilizar somente as frequências naturais e a dificuldade de aquisição dos modos de vibração, tomou-se como complementação das frequências naturais na função objetivo J_1 o acréscimo de uma parcela de acelerações para tentar contornar o problema de indicativo global de danos para se obter a identificação com precisão considerável (ao menos que os furos estejam sobrepostos entre si) na estrutura de material compósito. Logo, uma segunda função objetivo J_2 é constituída de duas parcelas. Utilizou-se as ponderações w_1 e w_2 a cada parcela a fim de se obter uma melhor sensibilidade no processo de otimização, ou seja, sensores espalhados na estrutura captam a vibração referentes à deformação modal em determinada frequência natural.

$$J_2 = w_1 \left[\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{\omega_i^{real}}{\omega(\alpha)_i^{modelo}} \right)^2} \right] + w_2 \left[\sum_{i=1}^n \left(\ddot{x}_i^{real} - \ddot{x}(\alpha)_i^{modelo} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

sendo $\ddot{x}(\alpha)_i^{modelo}$ as acelerações captadas em determinados pontos da estrutura, corresponde à i -ésima frequência natural da estrutura modelada em elementos finitos, composta por um ou mais danos, parametrizados segundo um vetor de variáveis de projeto α , \ddot{x}_i^{real} as acelerações da estrutura real danificada, w_1 e w_2 as ponderações para cada parcela da função objetivo.

A disposição dos sensores na placa é mostrada na Figura 4.12 e melhor detalhada na Tabela 4.3. Ressalta-se que não foi feito um estudo prévio sobre a localização e quantidade de sensores na placa, deixando-os espalhados de forma uniforme sobre a mesma.

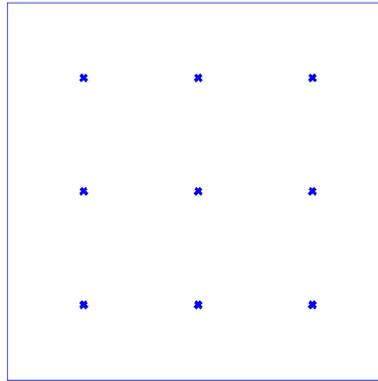


Figura 4.12 - Configuração dos sensores na estrutura.

Tabela 4.3 – Posição dos sensores ao longo da superfícies da placa.

	Posição x (m)	Posição y (m)
Sensor 1	0,2	0,2
Sensor 2	0,5	0,2
Sensor 3	0,5	0,8
Sensor 4	0,5	0,2
Sensor 5	0,5	0,5
Sensor 6	0,8	0,5
Sensor 7	0,2	0,8
Sensor 8	0,5	0,8
Sensor 9	0,8	0,8

Segundo Cha & Buyukozturk (2015), danos pequenos não afetam significativamente as alterações nas respostas que regem o comportamento estrutural e, portanto, com tais danos em vários locais de uma estrutura são difíceis de detectar utilizando métodos de detecção de danos tradicionais com base em propriedades modais. Um método de detecção com maior eficiência

para detecção de múltiplos danos é o uso de otimização. Segundo os autores, uma das desvantagens de otimização tradicional para detectar danos estruturais com base em parâmetros modais é que não há um bom desempenho usando vários índices de dano. Quando frequências naturais ou modos de vibração são usados como os índices de danos na função objetivo a ser minimizada, são escolhidos diferentes fatores de ponderação para cada modo ou frequência natural. No entanto, quando se minimiza a função objetivo, não é fácil escolher tais fatores de ponderação razoáveis para cada membro da função, porque não se sabe a importância relativa da frequência e dos modos para o problema de detecção de dano específico.

Desta forma, uma terceira função objetivo J_3 é abordada neste trabalho com objetivo principal de contornar estes problemas relatados, adotando-se otimização multiobjetivo com formação de uma frente de Pareto.

$$J_3 = \min \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{\omega_i^{\text{real}}}{\omega(\alpha)_i^{\text{modelo}}} \right)^2} \\ \sum_{i=1}^n \left(\ddot{x}_i^{\text{real}} - \ddot{x}(\alpha)_i^{\text{modelo}} \right)^2 \end{array} \right. \quad (4.7)$$

O método de detecção elaborado neste trabalho, de maneira sucinta, será realizado em dois passos: *i*) a detecção de danos combinará dados de uma estrutura modelada, via elementos finitos, sem danos e uma estrutura modelada com dano previamente conhecido, que simulará o caso de uma estrutura real danificada. Este primeiro passo empregará o critério DLAC para detectar se existe ou não a presença de um dano; *ii*) em seguida tem-se o processo de identificação de dano. Nesta rotina de identificação, o algoritmo de otimização é introduzido para efetuar a busca do dano na geometria da estrutura. Aqui, o modelo da estrutura é adaptado para receber as variáveis de projeto.

A Figura 4.13 exhibe passos a serem realizados durante a busca pelo dano. O método de detecção de danos neste estudo atende três dos quatro critérios proposto por Rytter (1993) que são: *i*) a detecção, *ii*) localização e *iii*) a quantificação do dano (modelos de danos estudados). Não se levou em consideração o passo *iv* sobre o prognóstico de vida remanescente da estrutura neste trabalho pois não seria o foco do mesmo.

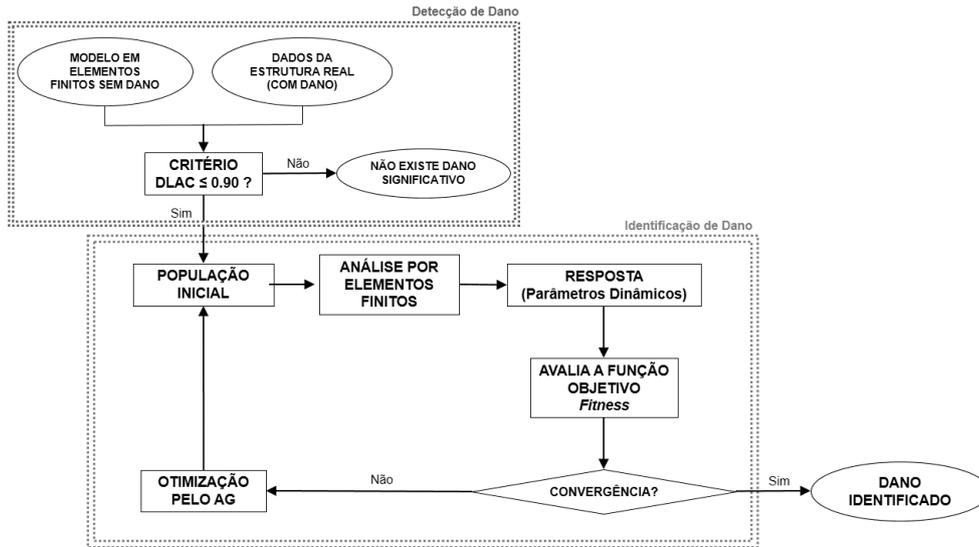


Figura 4.13 - Fluxograma do processo de detecção de danos.

Afim de se verificar a robustez da metodologia adotada, propõe-se aqui a adição de ruídos no processo de otimização afim de se considerar principalmente erros de medida como já elaborado nos trabalhos de Lopes (2010) e Suveges (2014).

Considere Ω como sendo a resposta gerada pelo método de elementos finitos e composta exclusivamente de parâmetros dinâmicos (frequências naturais e acelerações). Acrescenta-se um ruído gaussiano branco na saída de dados Ω com intuito de simular um ruído ambiente oriundo de um erro de medição dos sensores, um erro de aquisição ou até mesmo erros associados com a fatores ambientais externos (Figura 4.14). A modelagem matemática do ruído pode ser dada pela equação 4.11.

$$\Omega_{\text{ruído}} = \Omega_{\text{normal}} + n(\text{rand} \times \Omega_{\text{normal}}) \quad (4.8)$$

sendo n o nível de ruído estipulado e rand a variável aleatória gaussiana. Para este estudo específico, fez-se uso de dados com níveis de ruído de 1%, 5% e de 10%.

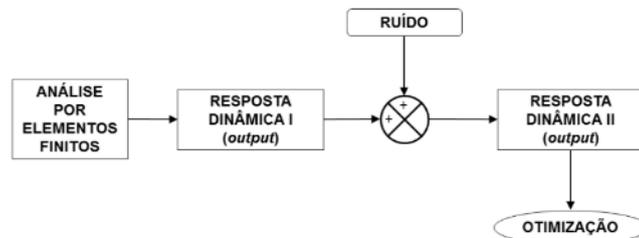


Figura 4.14 - Fluxograma do processo de inserção de ruídos ao modelo adotado (Adaptado de LOPES, 2010).

Para as simulações numéricas e ensaio experimental, fez-se um estudo acerca da definição dos parâmetros do otimizador, neste caso os algoritmos genéticos, de forma que estes pudessem fornecer resultados satisfatórios. A configuração dos AGs foi escolhida após a realização de vários processos de detecção, até que um conjunto de valores mais satisfatórios fossem obtidos. A Tabela 4.4 mostra a configuração utilizada para os AGs neste trabalho. Maiores detalhes sobre os operadores genéticos e sobre a implementação dos AGs são discutidos no Apêndice C.

Tabela 4.4 - Parâmetros dos algoritmos genéticos.

Operador	Valor
População	300 indivíduos
Cruzamento	60%
Mutação	2%
Elitismo	2 indivíduos
Gerações	100

Neste trabalho, o número de gerações, exclusivamente, foi adotado como critério de parada para os casos estudados.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os principais resultados do trabalho, abordados em ordem cronológica a saber: *i*) resultados referentes à detecção de dano modelado como um único furo circular em duas posições distintas na estrutura, *ii*) resultados de detecção de dois furos circulares simultâneos e *iii*) detecção de uma trinca linear. Para todos os casos, incluíram-se ruídos nas medições visando estudar a robustez da metodologia adotada.

5.1 RESULTADOS PRELIMINARES

Para a parte inicial do problema inverso de detecção de danos, necessitou-se de um estudo correto da modelagem do problema direto por meio do método de elementos finitos para que se tenha confiança adequada nos resultados gerados pelo método, não apenas efetuando um tratamento de dados para o problema inverso de otimização, tendo como motivação a aplicação futura deste método como monitoramento real de estruturas em serviço.

A modelagem feita por MEF visou a obtenção das frequências naturais e acelerações pontuais para uma placa laminada de material compósito abordado neste estudo. Uma abordagem analítica para o cálculo de frequências naturais de uma placa laminada de material compósito com condições de contorno de simplesmente apoiada é exibida com maiores detalhes no Apêndice B. O objetivo principal do cálculo analítico das frequências naturais do laminado

visa o estudo de malha, uma vez que uma estrutura em elementos finitos é influenciada pela qualidade (tipo) e quantidade de seus elementos.

Fez-se variar a quantidade de elementos para a placa a fim de avaliar a variação das frequências em função destes. Observou-se que a partir de 100 elementos (10x10 elementos nas bordas) a convergência já passa a ser satisfeita (erros menores de 5%) mas para garantir uma modelagem ainda mais precisa, adotou-se 20 elementos laterais (400 elementos). Então, fez-se uso de um número mínimo de elementos para que se poupe esforço computacional no MEF juntamente ao problema de otimização. Para alguns casos neste trabalho, uma quantidade diferente de elementos será utilizada na formulação do problema direto e será discutido nos parágrafos seguintes.

A Tabela 5.1 exibe os valores calculados a partir da equação analítica e os valores numéricos obtidos por meio do método de elementos finitos com 20x20 elementos. Observa-se que há uma boa credibilidade nos resultados para a quantidade de elementos escolhidos, sendo um erro global aceitável (menores de 5%) para este estudo. Uma comparação das frequências naturais adimensionais com Reddy (2003) (Tabela 5.2) ainda acrescenta uma boa confiança na modelagem proposta, sendo o erro calculado tomando-se apenas as frequências analíticas adimensionais e as frequências obtidas pelo MEF. O apêndice B trata com maiores detalhes o procedimento analítico para obtenção de frequências naturais para uma placa laminada utilizada neste trabalho. Em síntese, o cálculo analítico e numérico exibe uma boa modelagem do modelo direto em MEF.

Tabela 5.1 - Comparação entre frequências analíticas e numéricas correspondentes aos 4 primeiros modos de vibração.

Frequências Analíticas	Frequências por MEF (20 elem.)	Erro [%]
41,7635	41,7760	0,03
82,6514	83,1490	0,60
141,1552	141,9200	0,54
162,1783	165,5000	2,05

Tabela 5.2 - Comparação entre frequências adimensionais analíticas, numéricas.

Frequências Analíticas Adimensionais	Frequências Adimensionais (REDDY, 2003, p.284)	Frequências Adimensionais por MEF (20 elem.)	Erro [%]
2,5193	2,5190	2,5200	0,0134
4,98589	4,9860	5,0159	0,0028
8,5150	8,5150	8,5612	0,0005
9,7832	10,0770	9,9836	3,0027

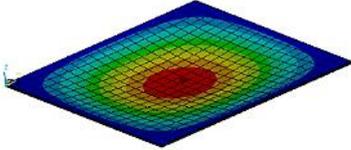
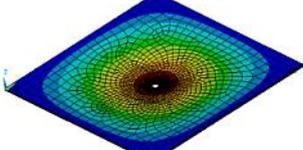
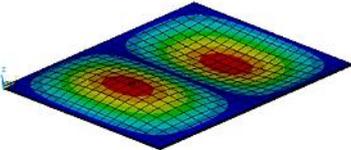
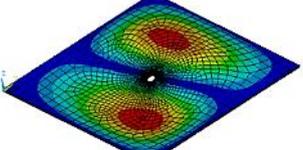
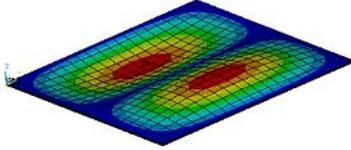
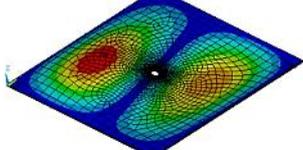
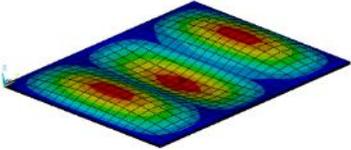
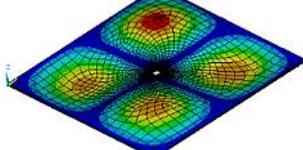
A Tabela 5.3 exibe os primeiros modos de vibração correspondes as frequências naturais obtidas. A condição de contorno da placa de simplesmente apoiadas nas bordas, resultado em modos de vibração de diferentes aspectos: flexão, torção e tração/compressão.

A principal hipótese levantada neste trabalho é que a presença de um dano estrutural, seja ele modelado como um furo, múltiplos furos ou uma trinca, gera uma variação das matrizes de massa, rigidez e amortecimento. Respostas dinâmicas estruturais, como frequências naturais, modos de vibração e aceleração são diretamente dependentes de tais matrizes.

A Tabela 5.3 exibe os resultados numéricos obtidos em uma placa intacta e com um dano modelado como um orifício circular no centro da placa, sendo possível notar a diferença de repostas quando se insere um dano, resultado da interferência destes nas matrizes estruturais.

(Intencionalmente deixado em branco)

Tabela 5.3 – Variação das frequências naturais com a presença de um dano estrutural correspondentes aos 4 primeiros modos de vibração.

Modo	Placa Sem Dano	Placa Com Dano
1°	 41,7760 Hz	 37,1599 Hz
2°	 83,1490 Hz	 109,00 Hz
3°	 141,92 Hz	 113,36 Hz
4°	 165,50 Hz	 159,45 Hz

Pode-se observar que o segundo e terceiro modos de vibração foram notavelmente afetados pela presença do furo circular (Figura 5.1). Constata-se ainda que tal fenômeno ainda sobrevém para danos em posições distintas, mostrando que danos estruturais em diferentes posições geram respostas distintas entre si. O grau de distinção da resposta em função da posição do dano dependerá sobretudo do tipo do dano estudado e da condição de contorno em que se encontra a estrutura, gerando maior ou menor sensibilidade na função objetivo em que se deseja trabalhar.

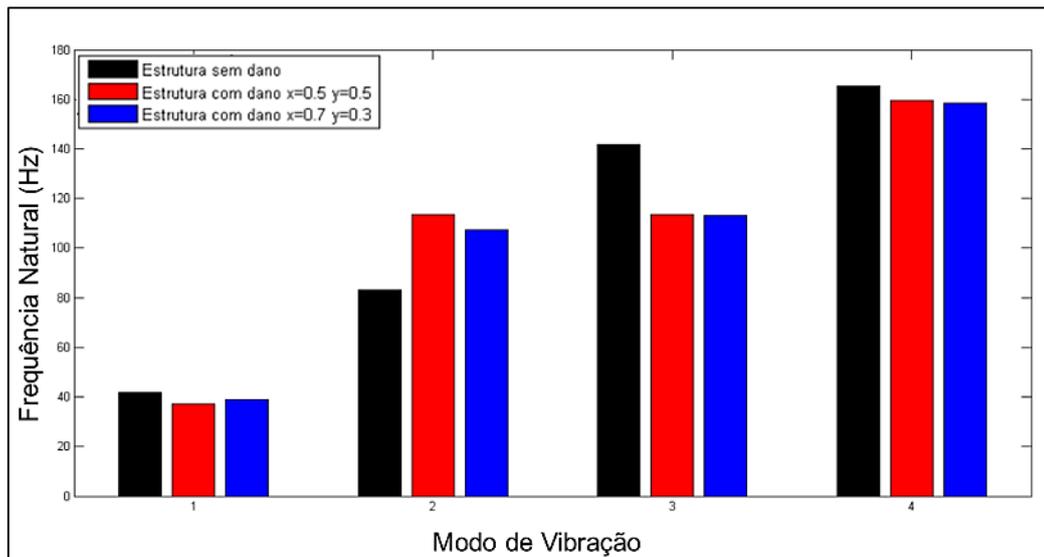


Figura 5.1 – Variação das frequências naturais em função da posição do dano.

5.2 CASO 1: UM FURO CIRCULAR

O primeiro modelo de estudo consiste na detecção de um único furo circular em duas posições distintas na placa: *i*) posição central e *ii*) posição não central. Deseja-se assim, verificar a capacidade da metodologia em detectar danos em posição não simétrica, ou seja, em uma localização fora do eixo de simetria da estrutura.

Para este primeiro caso, o modelo do dano foi parametrizado segundo três variáveis de projeto sendo elas:

- a posição em relação aos eixos cartesianos: (x,y)
- o raio do furo: r

A seguir serão apresentadas as simulações com e sem ruído nas medições.

5.2.1 Detecção de Dano sem Ruído de Medição

Aqui, o dano foi modelado como sendo um furo circular de 2 centímetros de raio, dano com área bastante reduzida quando comparada com a área total da placa quadrada (1m^2).

5.2.1.1 Furo na região central da placa

A Tabela 5.4 mostra os valores obtidos para três simulações simultaneamente realizadas para detecção de um dano centralizado, ou seja, na posição $x = 0,5\text{m}$, $y = 0,5\text{m}$ e $r = 0,02\text{ m}$.

Pelo fato da técnica de otimização utilizada se tratar de um método heurístico, é interessante que se obtenha uma média de várias simulações, pois o método se baseia em um sistema de buscas aleatórias (probabilísticas), por isso realizou-se uma média de ao menos 3 valores obtidos no processo de otimização. Ressalta-se também que para todos os processos de otimização estudados utilizou-se uma população inicial totalmente aleatória, gerado de acordo com os critérios do próprio AG. Pode-se observar que o método detectou com eficácia o dano com um erro relativamente baixo e de caráter completamente aceitável, exceto pelo valor do raio que apresentou os maiores valores de erro. Para todos os casos simulados notou-se que o raio é a variável de projeto com menor sensibilidade na busca, o que pode ser explicado pelos itens discutidos nos Capítulos 1 e 4, que de fato frequências naturais como critério de detecção de danos são bons parâmetros para verificar a presença de um dano, mas ainda possui limitações em quantificar e prever a extensão do dano estrutural. Contudo, os resultados das simulações numéricas mostram que a metodologia empregada obteve boa precisão em identificar a presença de um furo circular relativamente pequeno na estrutura em questão.

Tabela 5.4 - Resultados para um furo circular na posição central, sem ruído.

	$x (m)$	$y (m)$	$r (m)$
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,5029	0,5091	0,0194
Busca 2	0,5132	0,5179	0,0234
Busca 3	0,4768	0,4991	0,0215
Média	0,4976	0,5087	0,0214
Desvio	0,0187	0,0094	0,0020
Erro [%]	0,4733	1,7400	7,1677

Um resultado gráfico do dano na placa obtido pelo algoritmo de busca é mostrado na Figura 5.2. Pode-se notar que o furo estimado se encontra bem próximo ao furo real, com quase total

concentricidade e raios bem próximos. Observa-se na figura os diferentes resultados obtidos ao longo das gerações (furos em vermelho) do algoritmo genético ressaltando o melhor indivíduo até que se tenha satisfeito o critério de parada de n gerações preestabelecido.

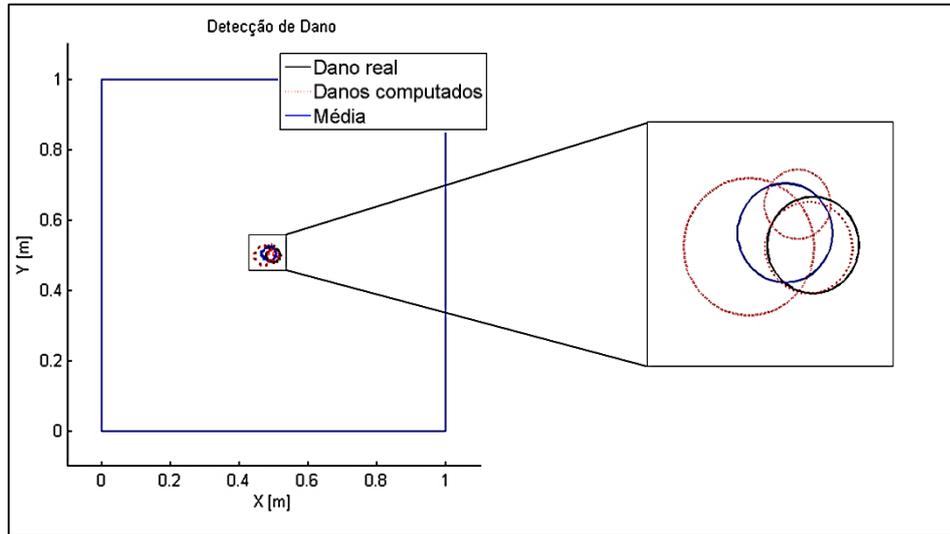


Figura 5.2 - Detecção de um furo central sem adição de ruído.

A Figura 5.3 mostra a distribuição de indivíduos da população final dos AGs. Observa-se que a população final se mantém bem próxima na região do dano, exibindo a evolução e melhoria do material genético dos indivíduos conforme as gerações.

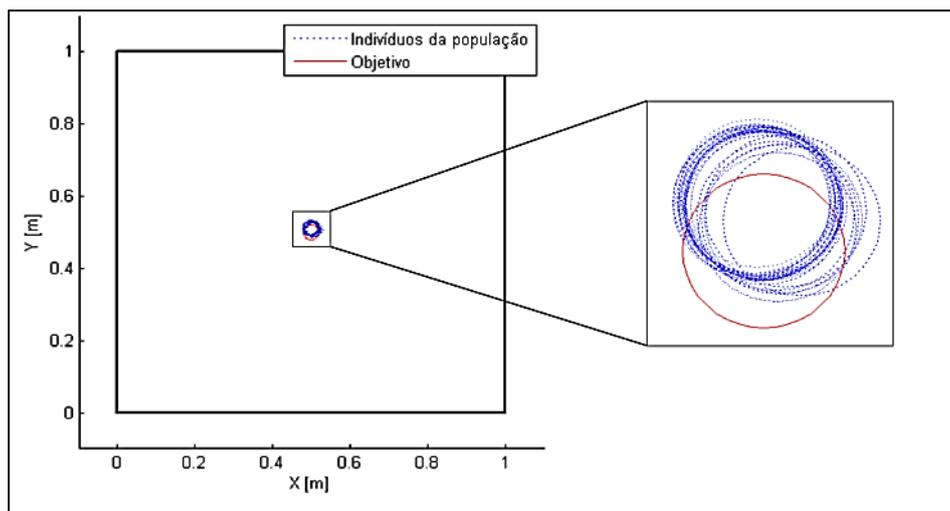


Figura 5.3 - Distribuição da população final de indivíduos.

5.2.1.2 Furo fora da região central da placa

Aqui tem-se um dano não centralizado na placa sendo $x = 0,7\text{m}$, $y = 0,2\text{m}$ e $r = 0,02\text{ m}$. Similarmente ao caso anterior, o dano não simétrico em relação aos eixos cartesianos foi detectado com grande precisão como mostram a Tabela 5.5 e a Figura 5.4. De maneira idêntica ao furo central, a terceira variável de projeto (raio do furo) demonstrou-se como a menos propensa à identificação, assumindo os maiores erros (12,8%), mas não afetando o resultado geral na busca pelo dano. Tal fato mostra que o algoritmo possui uma maior eficiência em identificar a posição do dano (x, y) do que identificar a extensão/intensidade do mesmo (raio r do furo)

Tabela 5.5 – Resultados para um furo circular na posição não central, sem ruído.

	x (m)	y (m)	r (m)
Objetivo	0,7000	0,2000	0,0200
Busca 1	0,6991	0,3050	0,0177
Busca 2	0,6729	0,2861	0,0172
Busca 3	0,6704	0,2998	0,0174
Média	0,6808	0,2969	0,0174
Desvio	0,0159	0,0097	0,0002
Erro [%]	2,7429	1,0111	12,8333

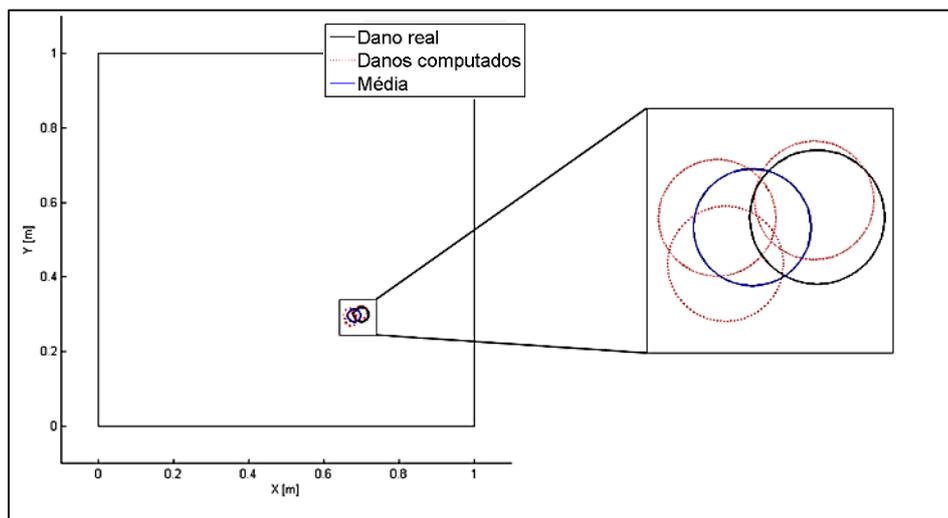


Figura 5.4 – Detecção de um furo não central sem adição de ruído.

A título de informação, a Figura 5.5 mostra os melhores indivíduos ao longo de algumas gerações mostrando a evolução da otimização na busca pelo dano.

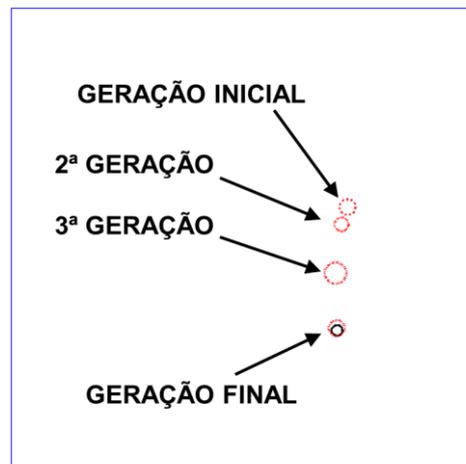


Figura 5.5 - Melhores resultados ao longo das geração para detecção de um furo não central sem adição de ruído.

A Figura 5.6 mostra todas as respostas obtidas ao longo do processo de otimização.

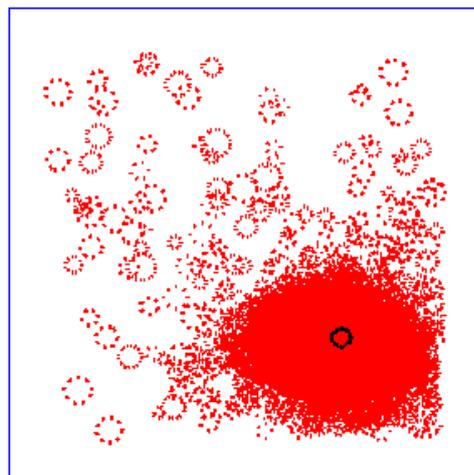


Figura 5.6 - População total de indivíduos gerados. Concentração de indivíduos próximos ao dano real.

5.2.2 Detecção de Danos com Ruídos de Medição

Dados obtidos por meio de qualquer medição são geralmente contaminados por ruídos oriundos de diferentes origens (fatores ambientais, erros humanos, precisão dos dispositivos de medição, sistemática de erros, dentre outros), afetando de maneira direta os dados medidos. Por estas razões acrescentou ruídos em três níveis distintos com intuito de se avaliar a robustez da metodologia adotada. Inicialmente acrescentou-se um nível de ruído de 1% nas leituras dos sensores e em seguida aumentou-se para 5% e 10%.

A Tabela 5.6 mostra os resultados quando se adicionou 1% de ruído nas medidas dos sensores. Obteve-se valores satisfatórios para a detecção do furo circular central. Ainda o raio do furo se apresenta como variável de projeto de maior variabilidade e com erros de maiores proporções. Não se obteve uma concentricidade relevante para este caso, porém a média calculada projeta-se bem próxima ao furo real, como mostrado na Figura 5.7.

Tabela 5.6 - Valores obtidos pelo acréscimo de 1% de ruído.

	x (m)	y (m)	r (m)
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,4933	0,5168	0,0144
Busca 2	0,4722	0,4992	0,0284
Busca 3	0,4982	0,4989	0,0197
Média	0,4879	0,5050	0,0208
Desvio	0,0138	0,0102	0,0071
Erro	2,4200%	0,9933%	4,1667%

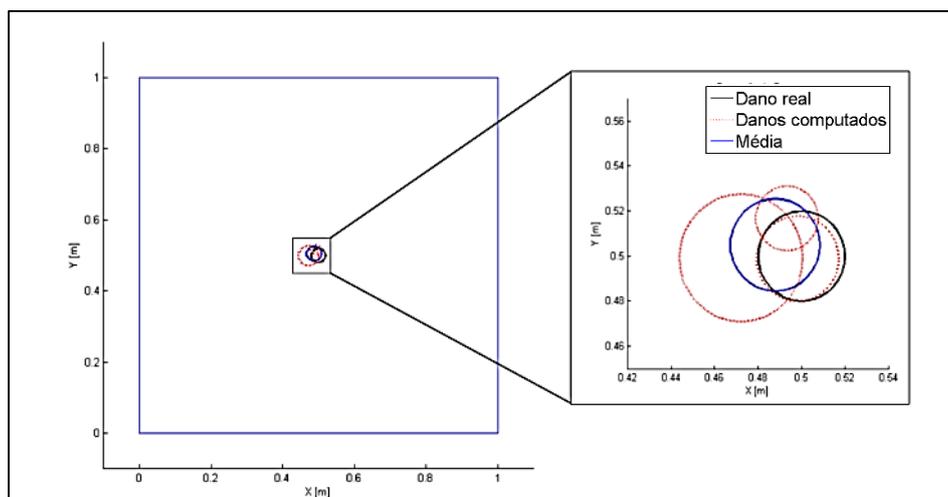


Figura 5.7 - Detecção de um furo circular com acréscimo de 1% de ruído.

Aumentou-se o nível de ruído gaussiano na saída da resposta para 5% e 10%. Como mostrado na Tabela 5.7 e Figura 5.8, mesmo com valores de ruídos aleatórios na ordem de 5% a metodologia foi capaz de detectar o furo com boa precisão.

Ao se aumentar o nível de ruído para 10%, valor relativamente grande, observa-se que a resposta média ainda se situou nas proximidades da resposta conhecida o que mostra robustez na metodologia no que se refere em detectar a posição do dano. A Tabela 5.8 e Figura 5.9 mostram os resultados para 10% de ruído nas medidas.

Observa-se que com e sem a presença de ruído, o raio do furo é a variável de projeto com maior dificuldade de precisão.

Tabela 5.7 – Valores obtidos pelo acréscimo de 5% de ruído nas medições.

	x (m)	y (m)	r (m)
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,4830	0,5131	0,0281
Busca 2	0,5413	0,5256	0,0120
Busca 3	0,5093	0,4875	0,0165
Média	0,5112	0,5087	0,0189
Desvio	0,0292	0,0194	0,0083
Erro [%]	2,2400	1,7467	5,6667

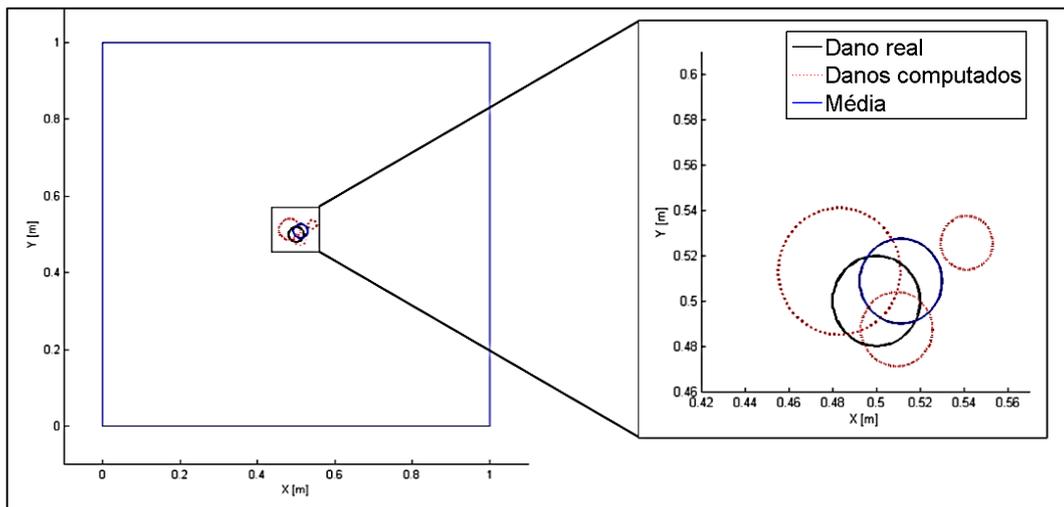


Figura 5.8 - Detecção de um furo circular com acréscimo de 5% de ruído nas medições.

Tabela 5.8 - Valores obtidos pelo acréscimo de 10% de ruído nas medições.

	x (m)	y (m)	r (m)
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,4335	0,4967	0,0226
Busca 2	0,5093	0,4828	0,0329
Busca 3	0,5056	0,5531	0,0326
Média	0,4828	0,5109	0,0294
Desvio	0,0427	0,0372	0,0059
Erro [%]	3,4400	2,1733	46,8333

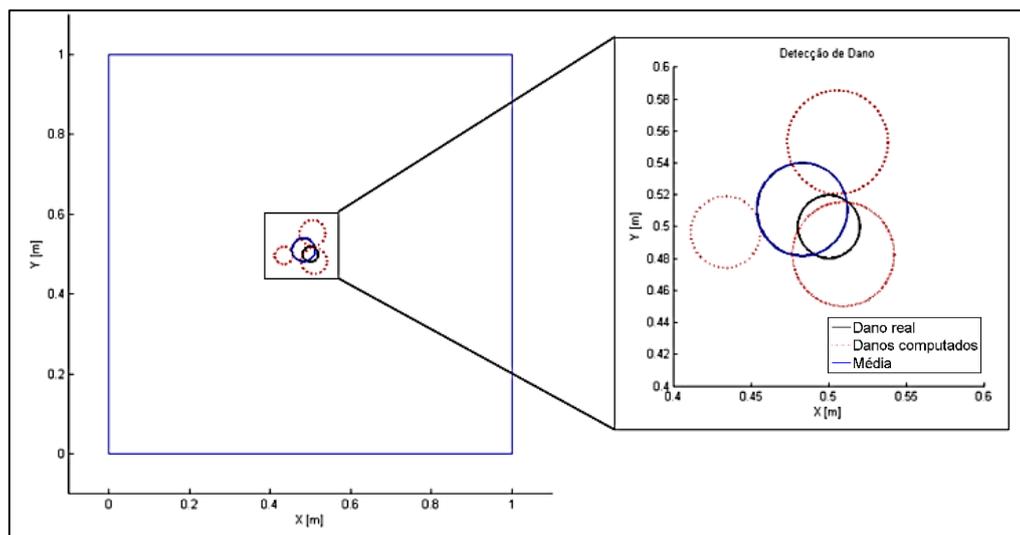


Figura 5.9 - Detecção de um furo circular com acréscimo de 10% de ruído nas medições.

A boa performance do método em detectar danos na presença de ruídos pode ser explicada pelo fato da função objetivo utilizada (J_1) ser baseada puramente em frequências naturais, pois essa função tomada é pouco sensível a variações. Como dito no capítulo anterior, frequências naturais são um bom indicativo para presença do dano estrutural, mas não possuem bom desempenho em quantificá-lo, fato que se pode observar pelos erros maiores em encontrar a extensão correta do dano real simulado (raio do furo). Essa característica da função objetivo, mostrou-se por outro lado benéfica quando se implementa ruído nas medidas. Acrescenta-se ainda que neste caso o uso da função J_1 foi suficientemente eficaz para detectar um único furo circular e as funções J_2 e J_3 foram acrescentadas devido aos problemas de detecção de múltiplos danos e será discutido na próxima seção.

A Figura 5.10 mostra um resumo dos resultados para todos os níveis de ruído simulados. Observa-se que mesmo na presença de ruído, a metodologia foi capaz de detectar com boa precisão a localização do furo, ou seja, mesmo na presença de ruídos elevados (10%) o dano foi

localizado sobreposto sobre o dano real, sendo o raio do furo a variável com maior discrepância em relação ao valor real.

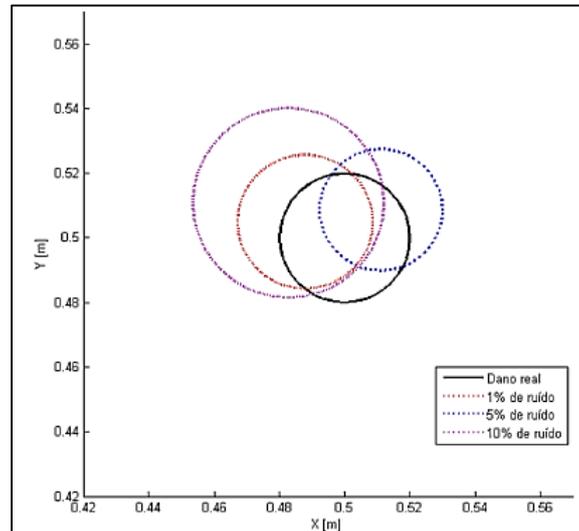


Figura 5.10 - Resultados para diferentes níveis de ruído (região ampliada).

5.3 CASO 2: MÚLTIPLOS FUROS CIRCULARES

Um dos desafios enfrentados de relevância neste trabalho é a detecção de múltiplos danos, modelados como furos circulares, parametrizados de modo semelhante ao modelo anterior. A inserção de mais um furo dobra o número das variáveis de projeto utilizadas, portanto, trabalhando-se com dois furos, seis variáveis de projeto entrarão em jogo a fim de serem otimizadas pelo algoritmo genético. Um grande esforço computacional foi necessário para esta parte do trabalho, manteve-se todos as constantes dos operadores e parâmetros do algoritmo genético como de praxe do caso anterior, porém reduziu-se o critério de parada de 100 gerações para 30 gerações para esta parte do trabalho, reduzindo tempo de simulação, pois a dificuldade nesta parte é maior e demanda maior esforço computacional para obtenção das respostas.

Resultados para funções objetivo compostas puramente por frequências naturais, combinações de frequências e acelerações e otimização multiobjetivo serão abordados nos tópicos seguintes do trabalho.

5.3.1 Detecção de Danos sem Ruídos de Medição

5.3.1.1 Otimização com Função Objetivo J_1

Como pode ser visto tanto pela Tabela 5.9 quanto pela Figura 5.11, com o acréscimo de mais um dano, os resultados obtidos pela otimização da função J_1 não foram satisfatórios, assumindo erros da ordem de até 20%. Pode-se observar que há uma discrepância alta nas posições dos furos em cada simulação, principalmente pelo furo deslocado da posição central. A média obtida não condiz com o valor esperado, que pode ser justificado pela pouca sensibilidade da função objetivo composta em sua integralidade por frequências naturais. Contudo, para a existência de um único dano, ela se demonstrou robusta, mesmo na presença de ruídos.

Tabela 5.9 - Resultados para dois furos usando J_1 .

	x_1 (m)	y_1 (m)	r_1 (m)	x_2 (m)	y_2 (m)	r_2 (m)
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200	0,7000	0,3000	0,0200
Busca 1	0,4810	0,4770	0,0110	0,6370	0,3250	0,0201
Busca 2	0,511	0,524	0,0122	0,728	0,1518	0,0202
Busca 3	0,4486	0,2088	0,0248	0,4893	0,5232	0,0111
Média	0,4802	0,4033	0,0160	0,6181	0,3333	0,0171
Desvio	0,0312	0,1700	0,0076	0,1205	0,1858	0,0052
Erro [%]	3,9600	19,3467	20,0000	11,7000	11,1111	14,3333

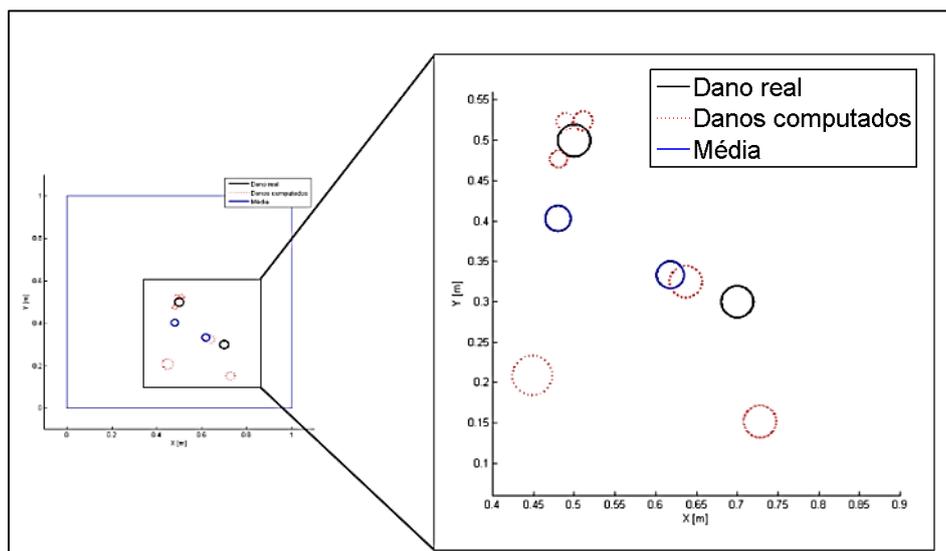


Figura 5.11 - Detecção de múltiplos danos usando J_1 .

5.3.1.2 Otimização com Função Objetivo J_2

É conhecido da literatura que vários autores (DOEBLING *et al.*, 1996; FRISWELL, 2006; CHANG & KIM, 2016) trabalham com modos de vibração como parâmetro de detecção de danos estruturais, sejam critério específicos, como por exemplo o MAC (*Modal Assurance Criterion*) ou critério composto por frequências e modos, sendo estes últimos, normalizados. Contudo, segundo Doebling *et al.* (1996), na prática a aquisição dos modos de vibração pode ser difícil de se obter e erros associados a estes dados normalmente estão presentes na aquisição dos sinais.

Neste ponto optou-se em utilizar a função objetivo J_2 composta por frequências naturais de vibração e acelerações associadas à vibração estrutural a estas frequências. Para tal, foram tomadas acelerações em determinadas posições, onde fixou-se sensores na estrutura em nove posições distribuídas de modo uniforme. Cabe salientar que nenhum estudo prévio foi feito tanto em relação à posição quanto ao número de sensores utilizado como já discutido no capítulo anterior.

A função J_2 então concebida por duas parcelas modais distintas (frequências e acelerações) é uma tentativa de minimizar, em caráter multiobjetivo, uma só função, dando pesos específicos para cada uma dessas parcelas. Nesta tentativa de verificar qual parcela possui relevância maior na identificação dos danos, combinou-se valores para as ponderações w_1 e w_2 para três casos distintos, como mostrado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Ponderações para a função J_2 .

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
w_1	0,5	0,7	0,3
w_2	0,5	0,3	0,7

As simulações numéricas para o **caso 1** são mostradas na Tabela 5.11, revelando uma melhora significativa no processo de detecção ao se trabalhar com uma segunda parcela composta por acelerações na função objetivo. Pode-se atentar na Figura 5.12 que o resultado obtido teve uma melhora significativa em relação à função J_1 , assumindo um erro global (\bar{E}) de aproximadamente 8%, calculado a partir da média de todos os erros relacionados a cada variável de projeto, dado pela Equação 5.1.

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n erro_i}{n} \quad (5.1)$$

sendo o erro definido conforme a equação 5.2.

$$erro = \left| \frac{X_{real} - X_{calculado}}{X_{real}} \right| \quad (5.2)$$

sendo X_{real} o vetor composto por variáveis de projeto conhecidas no problema inverso e $X_{calculado}$ o conjunto de escalares calculados no processo de otimização. Tomou-se para o cálculo, cada componente do vetor separadamente.

Tabela 5.11 - Resultado obtido pela função J_2 com pesos iguais ($w_1 = 0,5$ e $w_2 = 0,5$).

	x_1 (m)	y_1 (m)	r_1 (m)	x_2 (m)	y_2 (m)	r_2 (m)
Objetivo	0,7000	0,3000	0,0200	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,7319	0,2890	0,0169	0,4893	0,4541	0,0145
Busca 2	0,7225	0,2175	0,0186	0,4895	0,4523	0,0123
Busca 3	0,7070	0,3629	0,0234	0,4297	0,5098	0,0163
Média	0,7205	0,2898	0,0196	0,4695	0,4721	0,0144
Desvio	0,0126	0,0727	0,0034	0,0345	0,0327	0,0020
Erro [%]	2,9238	3,4000	1,8333	6,1000	5,5867	28,1667

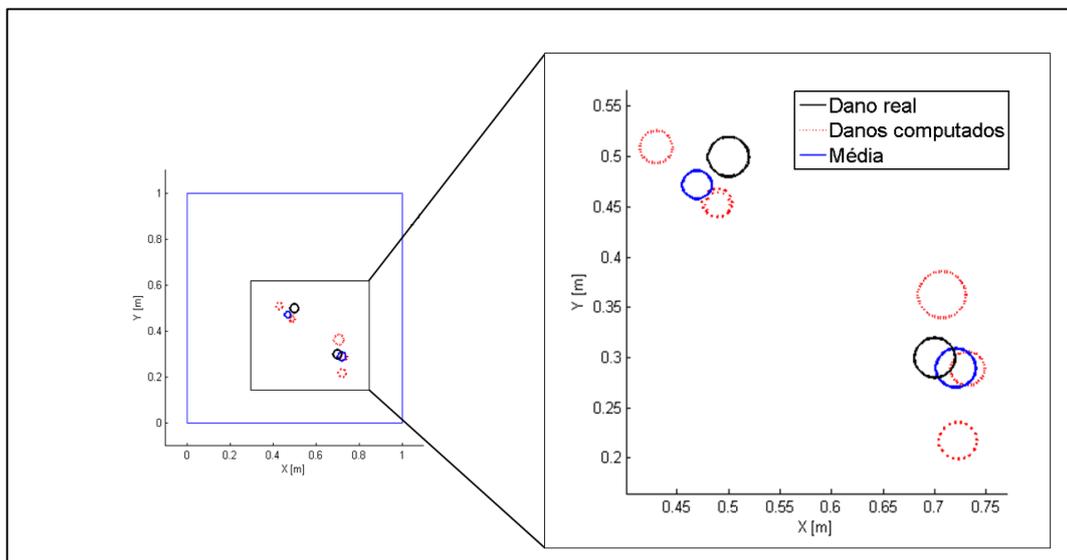


Figura 5.12 - Detecção de múltiplos danos usando J_2 , com $w_1 = w_2 = 0,5$.

Para o **caso 2**, os resultados são mostrados na Tabela 5.12. Observam-se erros maiores quando comparado ao caso simulado com pesos iguais nas parcelas da função. Assim como simulado com a função J_1 , este caso revela que a busca de múltiplos danos baseando-se

basicamente em frequências não apresenta um caráter satisfatório, como mostrado na Figura 5.13, havendo uma dispersão relativamente grande para os três casos simulados e assumindo erro global maior, na ordem de 12%. Mesmo com o peso maior para a parcela de frequências, notou-se uma sensível melhora em relação à função objetivo J_1 .

Tabela 5.12 - Resultado de J_2 com peso maior para frequências ($w_1 = 0,7$ e $w_2 = 0,3$).

	x_1 (m)	y_1 (m)	r_1 (m)	x_2 (m)	y_2 (m)	r_2 (m)
Objetivo	0,7000	0,3000	0,0200	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,7834	0,3219	0,0225	0,4360	0,3996	0,0182
Busca 2	0,6998	0,3689	0,0133	0,4520	0,5649	0,0208
Busca 3	0,7760	0,3673	0,0180	0,4371	0,5956	0,0114
Média	0,7531	0,3527	0,0179	0,4417	0,5200	0,0168
Desvio	0,0463	0,0267	0,0046	0,0089	0,1054	0,0049
Erro [%]	7,5810	17,5667	10,3333	11,6600	4,0067	16,0000

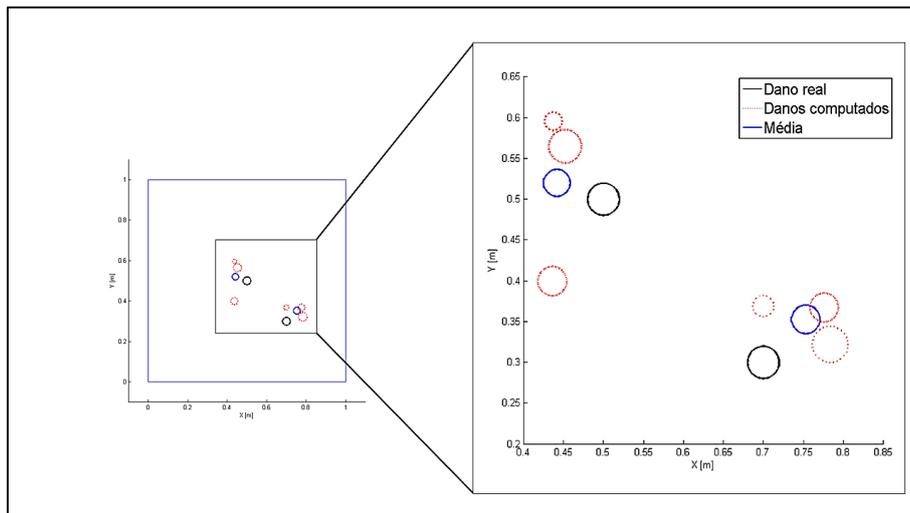
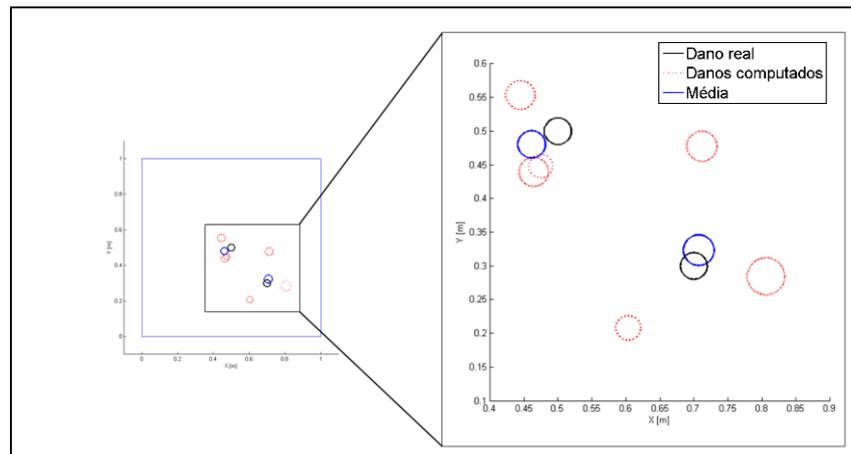


Figura 5.13 - Detecção de múltiplos danos usando J_2 , com $w_1 = 0,7$ e $w_2 = 0,3$.

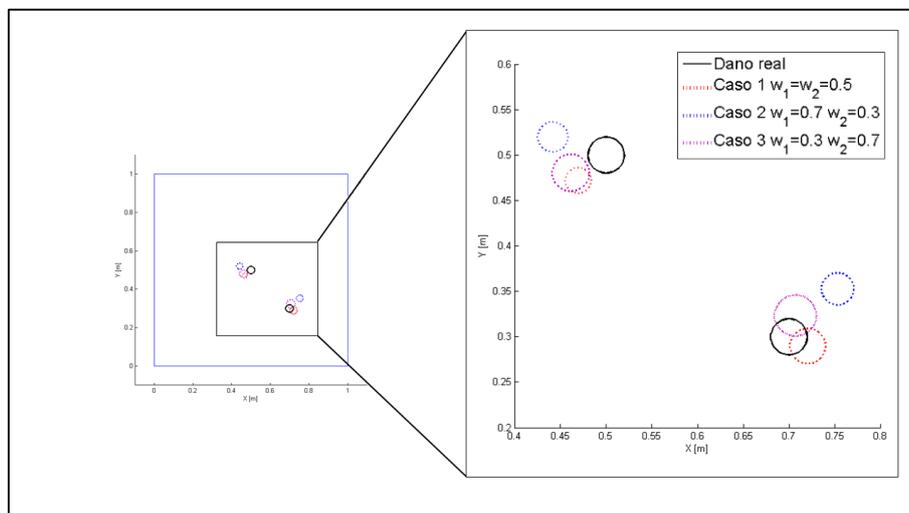
Por fim, para o **caso 3**, com maior ponderação para as acelerações, observa-se um melhor desempenho da metodologia na detecção, resultando em um resultado com menor erro global dentro todos os três casos estudados (6,3%) como mostram a Tabela 5.13 e a Figura 5.14. Observa-se ainda que os erros referentes ao raio do furo foram sensivelmente melhorados com a inserção das acelerações captadas nos 9 sensores espalhados pela placa, pois esta estratégia eleva o número de respostas aquisitadas a serem usadas no problema inverso de detecção.

Tabela 5.13 - Resultado de J_2 com peso maior para acelerações ($w_1 = 0,3$ e $w_2 = 0,7$).

	x_1	y_1	r_1	x_2	y_2	r_2
Objetivo	0,7000	0,3000	0,0200	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,6035	0,208	0,0184	0,4746	0,4481	0,0179
Busca 2	0,7118	0,4776	0,0226	0,445	0,5536	0,0217
Busca 3	0,8061	0,2846	0,0278	0,4645	0,4396	0,0219
Média	0,7071	0,3234	0,0229	0,4614	0,4804	0,0205
Desvio	0,1014	0,1389	0,0047	0,0150	0,0635	0,0023
Erro [%]	1,0190	7,8000	14,6667	7,7267	3,9133	2,5000

Figura 5.14 - Detecção de múltiplos danos usando J_2 , com $w_1 = 0,3$ e $w_2 = 0,7$.

Fica evidente que a utilização de uma parcela pontual de acelerações tem importância relativa maior do que aquela composta somente por frequências, devido ao fato de se empregar nove sensores espalhados uniformemente pela superfície da placa. A Figura 5.15 a seguir exibe de modo geral os três casos estudados para diferentes pesos para a função J_2 .

Figura 5.15 - Detecção de múltiplos danos com diferentes ponderações para J_2 .

5.3.2 Otimização Multiobjetivo para Detecção de Múltiplos Danos

Segundo Cha & Buyukozturk (2015), uma abordagem multiobjetivo possibilita um desempenho significativamente melhor do que a abordagem tradicional com um único objetivo na detecção de vários danos. Desta forma, propõe-se uma outra abordagem multiobjetivo (Frente de Pareto) considerando-se as propriedades modais estudadas neste trabalho a fim de encontrar as melhores configurações para detecção de múltiplos danos simultâneos.

Aqui, as simulações numéricas serão realizadas utilizando a função J_3 , ou seja, uma minimização simultânea de uma função composta puramente por frequências naturais e uma segunda, por acelerações exclusivamente. Os resultados obtidos para esta abordagem apresentaram um erro global inferior ao apresentado no caso onde a ponderação de uma única função objetivo foi feita dando-se pesos aos componentes de frequência e aceleração. A Tabela 5.14 exibe resultados obtidos de três buscas realizadas e a média calculada a partir destes, mostrados na Figura 5.18. Observe que graficamente a Figura 5.16 exibe tal melhora e o erro global agrega ainda que esta estratégia de otimização obteve melhor performance numérica.

Tabela 5.14 - Resultado obtido pela otimização de J_3 .

	x_1	y_1	r_1	x_2	y_2	r_2
Objetivo	0,7000	0,3000	0,0200	0,5000	0,5000	0,0200
Busca 1	0,7429	0,3873	0,0251	0,4472	0,522	0,0269
Busca 2	0,7578	0,3368	0,0221	0,494	0,4801	0,0172
Busca 3	0,7228	0,2826	0,0241	0,4907	0,4641	0,0171
Média	0,7412	0,3356	0,0238	0,4773	0,4887	0,0204
Desvio	0,0176	0,0524	0,0015	0,0261	0,0299	0,0056
Erro [%]	5,8810	11,8556	18,8333	4,5400	2,2533	2,0000

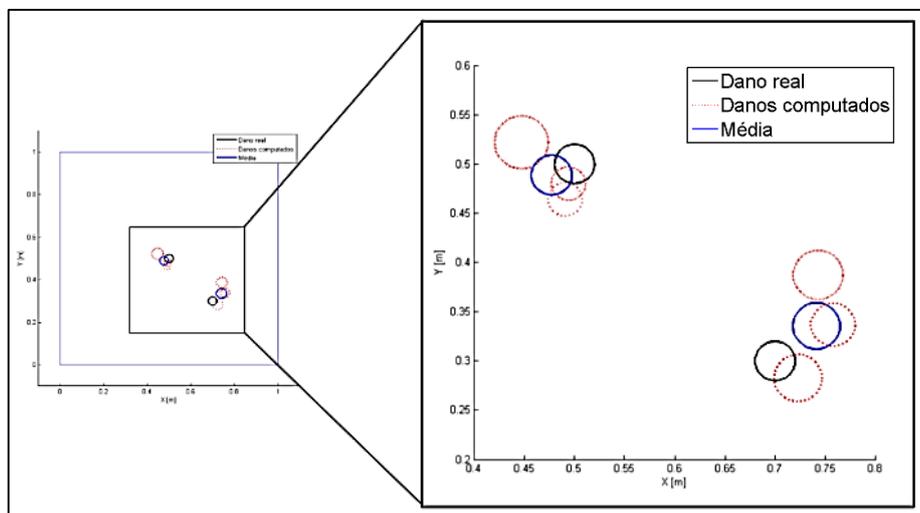


Figura 5.16 - Detecção de múltiplos danos utilizando J_3 .

A Figura 5.17 mostra a Fronteira de Pareto, ou o conjunto de soluções ótimas de Pareto. Para o problema avaliado, dois furos simultâneos e usando J_3 , obteve-se oito soluções ótimas para o problema.

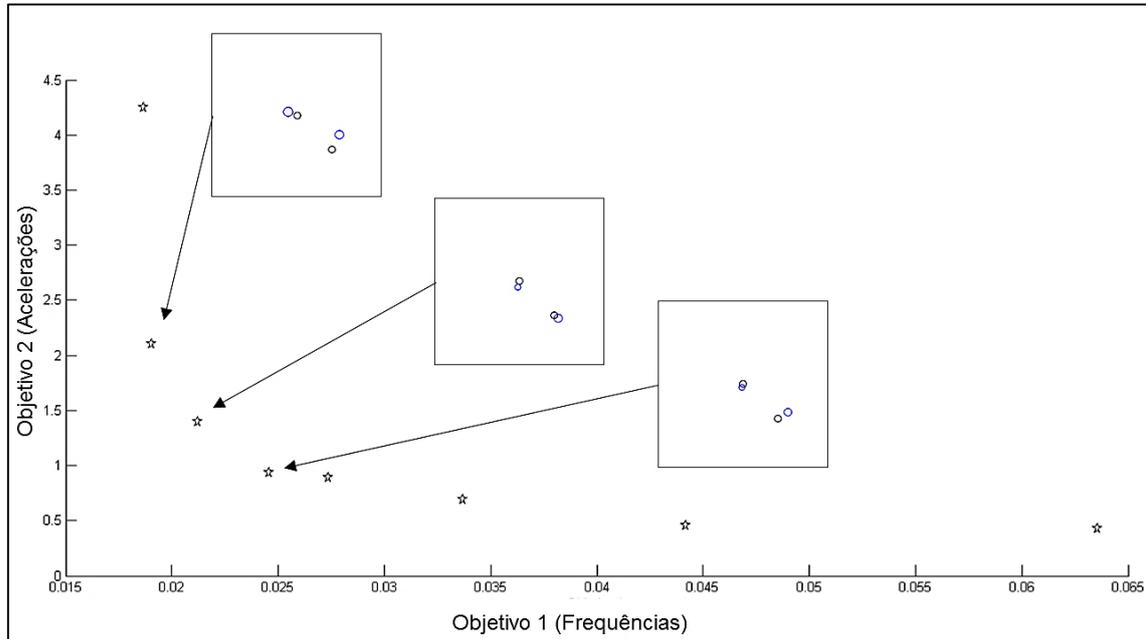


Figura 5.17 - Conjunto de soluções ótimas viáveis com formação da Frente de Pareto.

Entende-se que danos de pequenas dimensões não afetam significativamente os parâmetros modais de uma estrutura, portanto, vários danos em uma estrutura são difíceis de detectar usando métodos de detecção de danos tradicionais com base nas propriedades modais (CHA, 2015). Contudo, o método elaborado, apesar de não conseguir detectar os furos com concentricidade, conseguiu alcançar bons resultados, sendo levado em consideração em ordem de importância, que o conhecimento da localização do dano estrutural é mais significativo do que sua extensão ou forma geométrica, pois o furo consegue simular bem uma alteração das propriedades físicas de um dano arbitrário, pela perda de rigidez e massa.

Notou-se uma melhora na detecção dos múltiplos danos com a formação da Frente de Pareto em relação ao método das somas ponderada, pois o método ponderado pode conduzir a soluções em regiões não convexas da Fronteira de Pareto, embora todas as soluções sejam não-dominadas (Pareto ótimas). Isto se deve ao fato de que as somas ponderadas são implementações sempre feitas com combinações convexas dos vários objetivos de sua composição (CARAMIA & DELL'OLMO, 2008).

5.3.3 Detecção de Danos com Ruídos de Medição

Assim como na seção anterior, utilizou-se aqui a função objetivo, J_3 , otimizada segundo critérios multiobjetivo com formação de frente de Pareto e acrescentaram-se ruídos de diferentes ordens (1%, 5% e 10%), com intuito de apurar a robustez da metodologia na presença destes dados gaussianos aleatórios controlados.

Resultados referentes aos níveis mais baixos de ruído (1%) apresentados na Tabela 5.15 e na Figura 5.18 mostram que apesar de haver uma dispersão significativa entre as três simulações feitas, a média geral apresentou-se satisfatória, ou seja, os danos estão bem próximos entre si. Todavia, a variável r_2 sendo um indicativo de maior discrepância de resultados, como já evocado anteriormente, sendo complexa a otimização de uma função objetivo baseado em parâmetros dinâmicos para busca de danos estruturais.

Tabela 5.15 - Resultados para detecção de múltiplos danos com 1% de ruído.

	x_1	y_1	r_1	x_2	y_2	r_2
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200	0,7000	0,3000	0,0200
Busca 1	0,4972	0,4981	0,0226	0,6367	0,2366	0,0282
Busca 2	0,5322	0,4703	0,0228	0,6703	0,31	0,0229
Busca 3	0,5078	0,4431	0,0186	0,8778	0,2426	0,0272
Média	0,5124	0,4705	0,0213	0,7283	0,2631	0,0261
Desvio	0,0179	0,0275	0,0024	0,1306	0,0408	0,0028
Erro [%]	2,4800	5,9000	6,6667	4,0381	12,3111	30,5000

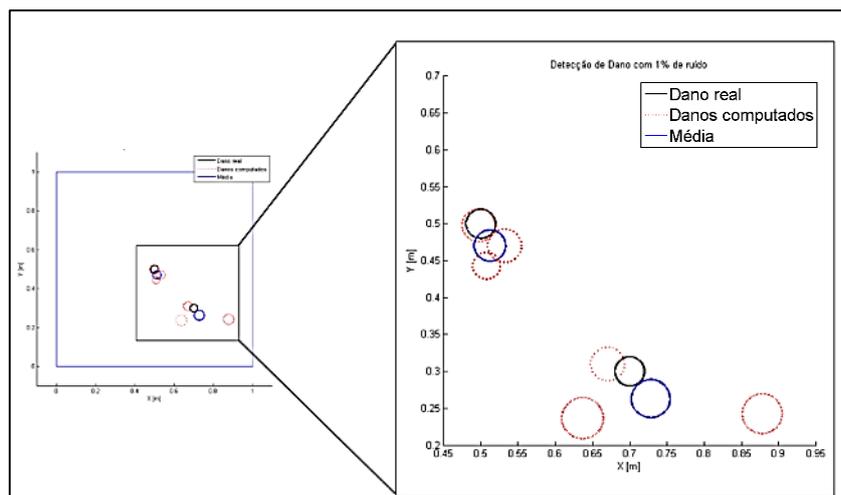


Figura 5.18 - Detecção de múltiplos danos com adição de 1% de ruído gaussiano.

Com níveis de ruído em 5%, não apresentaram mudança significativa quando comparados aos de 1%, como mostram a Tabela 5.16 e a Figura 5.19.

Tabela 5.16 - Resultados para detecção de múltiplos danos com 5% de ruído.

	x_1	y_1	r_1	x_2	y_2	r_2
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200	0,7000	0,3000	0,0200
Busca 1	0,3159	0,4405	0,0209	0,7221	0,3318	0,028
Busca 2	0,5086	0,4694	0,0113	0,8317	0,3489	0,0265
Busca 3	0,4432	0,4575	0,0241	0,5841	0,2342	0,0248
Média	0,4226	0,4558	0,0188	0,7126	0,3050	0,0264
Desvio	0,0980	0,0145	0,0067	0,1241	0,0619	0,0016
Erro [%]	15,4867	8,8400	6,1667	1,8048	1,6556	32,1667

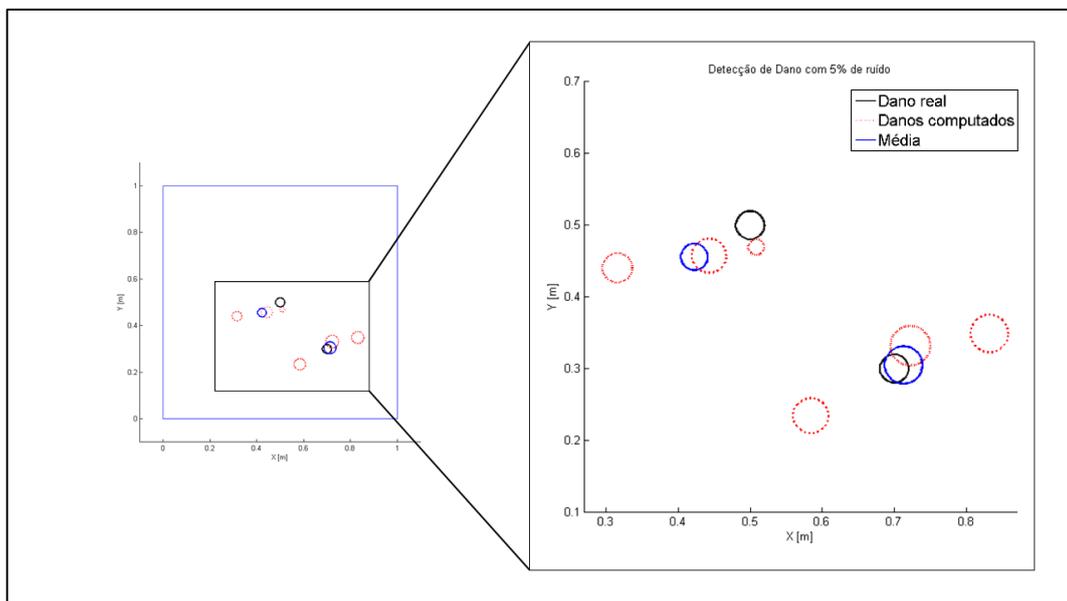


Figura 5.19 - Detecção de múltiplos danos com adição de 5% de ruído gaussiano.

Como esperado, resultados mais discrepantes foram obtidos com a inserção de ruídos na ordem de 10% na resposta, gerando um erro global de 13%. Observa-se pela Tabela 5.17 que o raio do furo é a variável com maior erro dentre todas, principalmente para o furo que não se encontra na posição central da placa. A Figura 5.20 exibe a média de três simulações feitas para este caso específico. Um sumário de todos os resultados obtidos pela inserção de ruído gaussiano na detecção de múltiplos furos é exibido por meio da Figura 5.21, ficando evidente a aproximação dos resultados ao resultado real conhecido quando se diminui o nível de ruídos no sinal obtido.

Tabela 5.17 - Resultados para detecção de múltiplos danos com 10% de ruído.

	x_1	y_1	r_1	x_2	y_2	r_2
Objetivo	0,5000	0,5000	0,0200	0,7000	0,3000	0,0200
Busca 1	0,5271	0,5016	0,0168	0,8443	0,3804	0,0294
Busca 2	0,4598	0,4386	0,0144	0,6895	0,4441	0,0274
Busca 3	0,4893	0,4313	0,0229	0,5778	0,2035	0,0277
Média	0,4921	0,4572	0,0180	0,7039	0,3427	0,0282
Desvio	0,0337	0,0386	0,0044	0,1338	0,1246	0,0011
Erro [%]	1,5867	8,5667	9,8333	0,5524	14,2222	40,8333

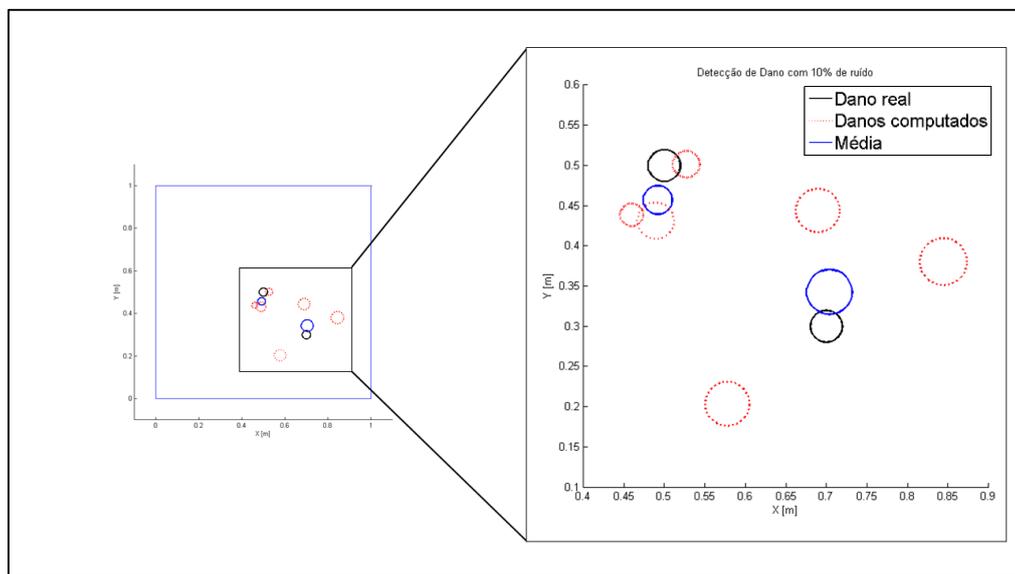


Figura 5.20 - Detecção de múltiplos danos com adição de 10% de ruído gaussiano.

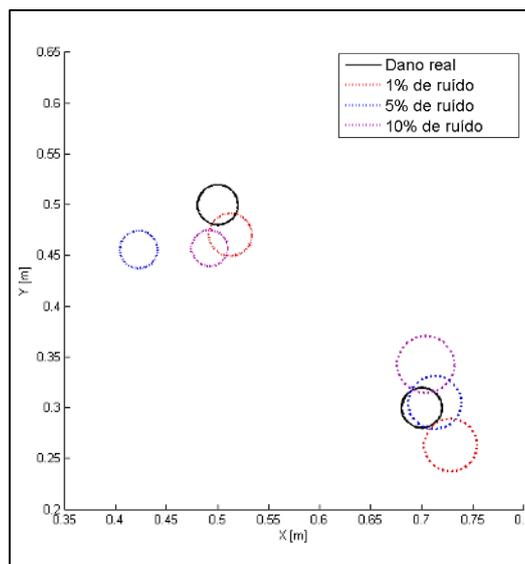


Figura 5.21 - Resultado de detecção de múltiplos danos com presença ruído gaussiano em diferentes níveis.

5.4 CASO 3: DETECÇÃO DE TRINCAS

Segundo Israr (2011), máquinas e componentes estruturais requerem monitoramento contínuo para a detecção de trincas, assegurando um serviço ininterrupto em instalações críticas. Trincas podem estar presentes em estruturas devido a várias razões, tais como fadiga, impacto, corrosão e fatores externos e ambientais, como temperatura, umidade relativa e precipitação. A presença de uma fissura não só causa uma variação local na rigidez, mas pode afetar o comportamento mecânico de toda a estrutura em uma extensão considerável. As trincas presentes em componentes sob efeito de vibração podem levar a uma falha catastrófica. Por estas razões, há uma necessidade de compreender a dinâmica das estruturas com tal dano e as características das estruturas sob vibrações podem ser úteis para sua detecção.

Por esta importância dada a este tipo de dano, elaborou-se um algoritmo de otimização visando a detecção e quantificação, atendendo aos três primeiros critérios de Rytter (1993), além de permitir que intervenções estruturais sejam tomadas, pois pretende-se conhecer a direção em que a trinca linear irá se propagar (θ), evitando futuros acidentes e garantindo a integridade estrutural de máquinas e equipamentos.

Para este caso, o modelo de trinca linear foi parametrizado segundo quatro variáveis de projeto sendo elas:

- A posição em relação aos eixos cartesianos: (x,y)
- O comprimento da trinca: L
- A direção de propagação da trinca: θ

Em um estudo prévio, estudou-se o número máximo de gerações como critério de parada para a detecção de trincas, por se tratar de um dano estrutural menor quando comparado aos modelos de danos anteriores. Manteve-se constante os operadores genéticos para este modelo, com 300 indivíduos constituindo a população. Os resultados obtidos mostram que inicialmente 30 gerações não foram suficientemente grandes para detectar o dano com precisão (Figura 5.22). Contudo, quando incrementou as gerações até 100, a trinca detectada aproximou-se bem do valor conhecido no problema inverso (Figura 5.23), diminuindo o erro global na ordem de 10% (Tabela 5.18). Para ambos os casos, ficou evidente, que a extensão da trinca (comprimento L) é a variável de projeto de maior dispersão em relação ao valor conhecido real (objetivo). Novamente o método de detecção de danos baseado somente em frequências naturais mostrou que possui grande eficácia na detecção e localização de determinado dano, porém o terceiro passo, definido

como a quantificação do dano, não são bem rastreadas por esse critério como nos outros modelos de danos abordados.

Tabela 5.18 - Detecção de trincas em 30 e 100 gerações.

	30 gerações				100 gerações			
	x (m)	y (m)	L (m)	θ (°)	x (m)	y (m)	L (m)	θ (°)
Objetivo	0,6000	0,6000	0,1000	45	0,6000	0,6000	0,1000	45
Busca 1	0,6774	0,6933	0,0666	31,0000	0,6561	0,6398	0,0541	55,0000
Busca 2	0,6413	0,6759	0,054	30,0000	0,5983	0,6045	0,0578	50,0000
Busca 3	0,6687	0,66	0,0537	28,0000	0,6204	0,6289	0,0608	41,0000
Média	0,6625	0,6764	0,0581	29,6667	0,6249	0,6244	0,0576	48,6667
Desvio	0,0188	0,0167	0,0074	1,5275	0,0292	0,0181	0,0034	7,0946
Erro [%]	10,4111	12,7333	41,9000	34,0741	4,1556	4,0667	42,4333	8,1481
Erro Global [%]		24,6098				14,7009		

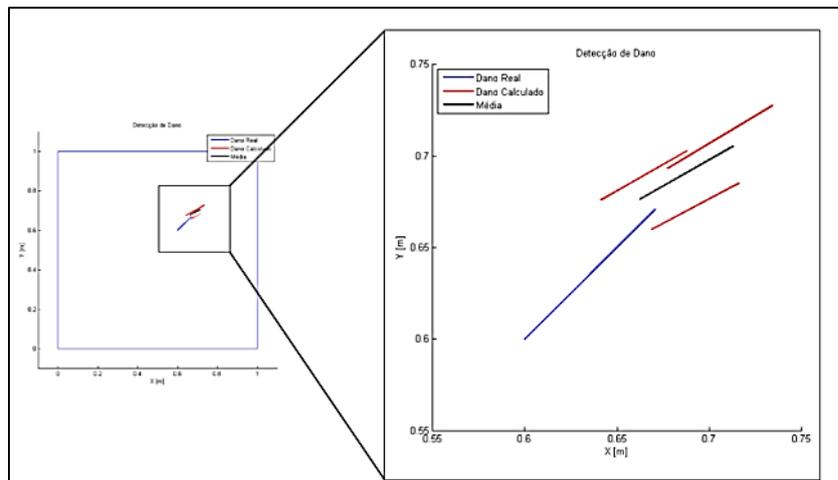


Figura 5.22 - Detecção de trinca com critério de parada de 30 gerações.

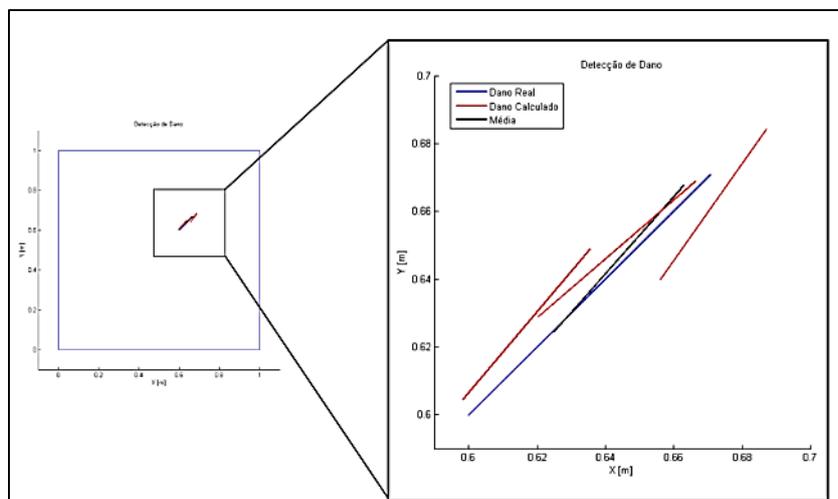


Figura 5.23 - Detecção de trinca com critério de parada de 100 gerações.

Como no modelo de dano tipo furo circular, ruídos aleatórios foram adicionados ao processo para detecção de trincas lineares, contudo limitou-se em 50 o número de gerações usadas como critério de parada, pois percebeu-se que a partir desse valor a convergência já é garantida, assim economizando esforço e tempo computacional para obtenção dos resultados.

Os resultados obtidos para detecção de trincas considerando ruídos aleatórios são exibidos na Tabela 5.19, mostrando que houve um acréscimo esperado do erro global quando há um incremento dos níveis de ruídos. Simularam-se ruídos com níveis de até 10% pois foi suficiente para obter resultados discrepantes em relação aos valores objetivos. Tratando-se de um modelo de dano mais complexo e menor, a inserção de dados incompletos (ruidosos) afetaram sensivelmente a resposta obtida pelos AGs (Figura 5.24, Figura 5.25), quando comparado ao modelo anterior de dano (furo circular). Pelos valores obtidos no processo de otimização, observou-se que a variável θ apresentou maiores níveis de variação, bem como seu erro, dificultando de modo direto a obtenção de um prognóstico de danos, pois esta variável permite um estudo relevante sobre a integridade estrutural, dando previsão de futuras falhas e direção de crescimento da trinca.

Tabela 5.19 – Detecção de trincas com acréscimo de 1% e 5% de ruído.

Ruído	1%				5%			
	$x (m)$	$y (m)$	$L (m)$	$\theta (^\circ)$	$x (m)$	$y (m)$	$L (m)$	$\theta (^\circ)$
Objetivo	0,6000	0,6000	0,1000	45,0000	0,6000	0,6000	0,1000	45,0000
Busca 1	0,7039	0,6823	0,1052	47,0000	0,6492	0,5638	0,0844	-67,0000
Busca 2	0,6949	0,6746	0,0668	71,0000	0,6291	0,5669	0,0506	50,0000
Busca 3	0,6089	0,6795	0,0742	32,0000	0,6879	0,6675	0,0641	53,0000
Média	0,6692	0,6788	0,0821	50,0000	0,6554	0,5994	0,0664	12,0000
Desvio	0,0524	0,0039	0,0204	19,6723	0,0299	0,0590	0,0170	68,4324
Erro [%]	11,5389	13,1333	17,9333	11,1111	9,2333	0,1000	33,6333	73,3333
Erro Global [%]	13,4292				29,0750			

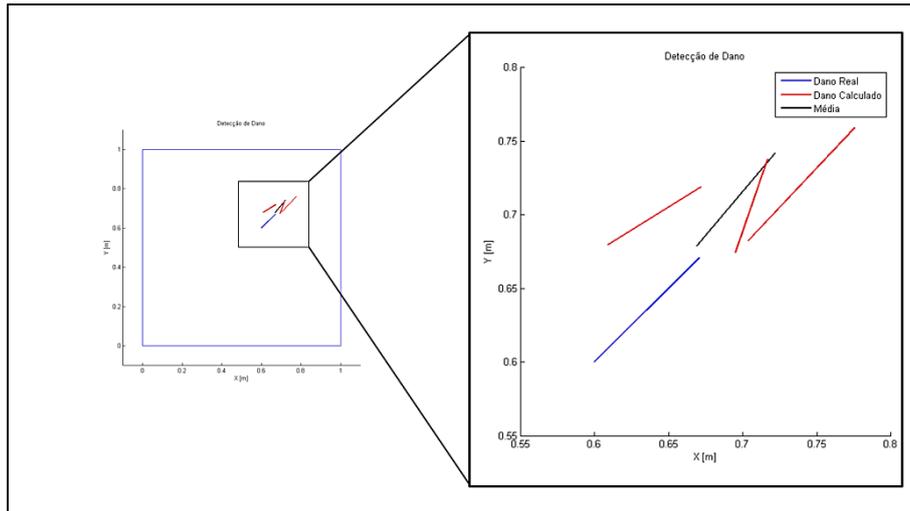


Figura 5.24 - Detecção de trincas com acréscimo de 1% de ruído aleatório.

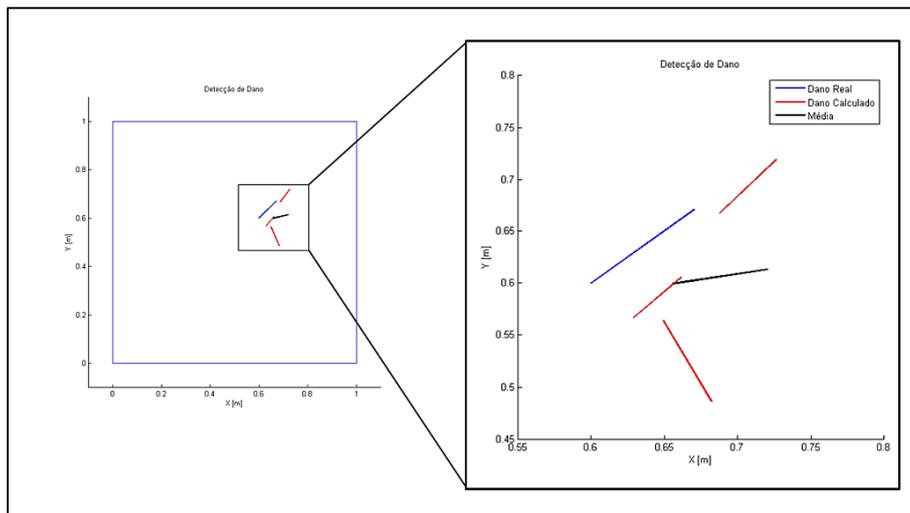


Figura 5.25 - Detecção de trincas com acréscimo de 5% de ruído aleatório.

Quando se elevou os níveis de ruído a patamares considerados altos (10%), os resultados caracterizaram o método de detecção elaborado neste trabalho como ineficaz, ou seja, o dano encontrado foi muito distante da posição real, sendo encontrado quase em uma posição oposta em relação aos eixos de simetria da placa. A Tabela 5.20 e a Figura 5.26 exibem os resultados obtidos para este caso específico. Pode-se observar que o resultado final do processo de busca por métodos de otimização ocorreu em uma região bem distante da que se conhecia previamente (posição real do dano). Contudo, dados sem ruídos, ou até mesmo dados considerando um baixo valor de ruídos (1%, neste estudo) conseguem detectar a trinca linear com eficácia relevante quando se almeja obter a região estrutural onde existe um dano real (Figura 5.27).

Tabela 5.20 - Detecção de trincas com acréscimo de 10% de ruído.

Variáveis	x	y	L	θ
Objetivo	0,6000	0,6000	0,1000	45,0000
Busca 1	0,2786	0,2590	0,1481	53,0000
Busca 2	0,2505	0,2505	0,1498	-78,0000
Busca 3	0,2874	0,2640	0,1438	-80,0000
Média	0,2721	0,2578	0,1472	-35,0000
Desvio	0,0193	0,0068	0,0031	76,2168
Erro [%]	54,6444	57,0278	47,2333	177,7778
Erro Global [%]				84,1708

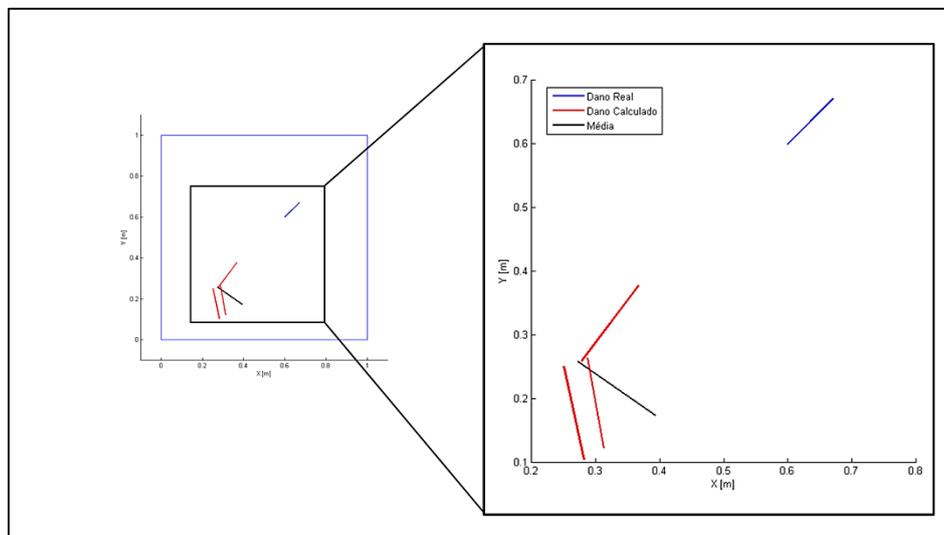


Figura 5.26 - Detecção de trincas com acréscimo de 10% de ruído aleatório.

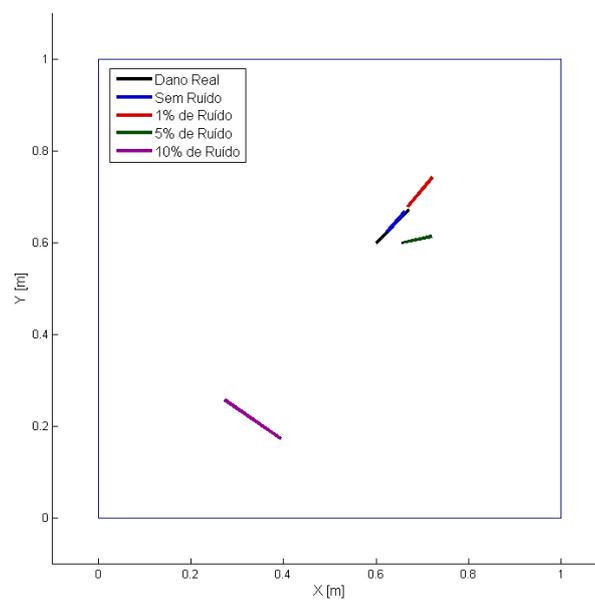


Figura 5.27 - Detecção de trincas com acréscimo de ruídos aleatórios.

5.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Estruturas compósitas têm um excelente desempenho, embora este se deteriore significativamente com a presença danos. Infelizmente danos devido ao impacto de eventos, por exemplo, é difícil de detectar visualmente e, portanto, necessita-se de métodos não destrutivos de ensaios destas estruturas.

De acordo com Friswell (2006), apesar destes materiais apresentarem outros modos de falha, tais como trincas na matriz, ruptura da fibra ou delaminação, estes mecanismos de danos produzem alterações semelhantes na resposta vibratória a uma estrutura metálica, quando existe um dano.

Pelos motivos explicados nos capítulos anteriores deste trabalho, dar-se-á uma importância significativa na aplicação da metodologia avaliada na detecção de danos em uma estrutura real. Para tal, fabricou-se uma placa laminada de material compósito de fibra de carbono/epóxi. A fibra de carbono é do tipo AS4, unidirecional, GA45 e a resina epóxi 5052 (*Huntsman*). A placa foi produzida pelo processo VARTM - Moldagem por transferência de resina assistida a vácuo, de maneira simétrica de 12 camadas segundo a orientação de 0 e 90 graus, isto é, $[0/90]_{3S}$. Cada camada do laminado por sua vez possui 0,1824 milímetros, totalizando uma estrutura final com 2,1886 milímetros de espessura. A orientação das fibras deste composto é estruturada simetricamente sobre o plano médio do laminado, o que significa que cada camada acima do plano médio tem uma camada idêntica à distância similar abaixo do plano médio. Por questões operacionais laboratoriais, o laminado foi fabricado segundo um quadrado de 30 centímetros de aresta e posteriormente um dano foi inserido ao meio, sendo este um furo circular de 8 milímetros de raio, localizado na posição central da placa ($x = 0,15$ cm e $y = 0,15$ cm), como exibido na Figura 5.28.

As propriedades mecânicas do laminado, usadas na concepção do modelo numérico, são exibidas na Tabela 5.21. Estes valores são fruto de um estudo acerca da estimação das propriedades do material para fins de ajuste do modelo. O Apêndice D exibe todo o processo realizado para este fim.

Tabela 5.21 - Propriedades mecânicas do material laminado.

Propriedade	Valor
E_1 (MPa)	83,01
E_2 (MPa)	5,13
G_{12} (MPa)	8,37
ν_{12}	0,32
ρ (kg/m ³)	1408,80

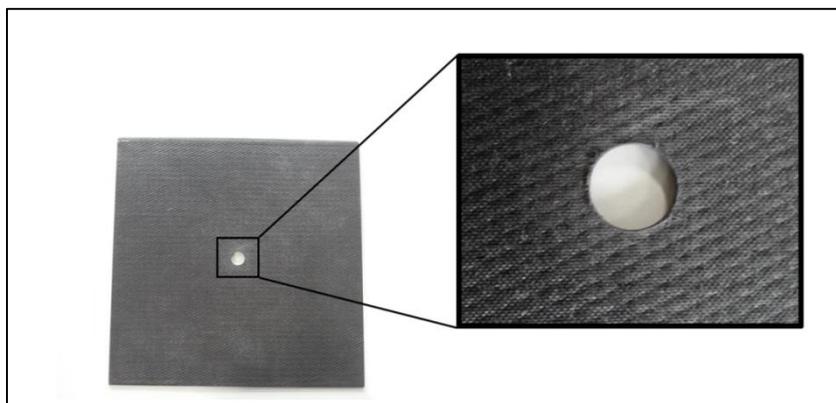


Figura 5.28 - Placa laminada de fibra de carbono com dano no centro.

Por razões operacionais de bancada, simulou-se a estrutura em condições de contorno livre, sendo a mesma pendurada em uma estrutura metálica por meio de fios de *nylon*. O ensaio então foi realizado com auxílio de um vibrômetro laser (Marca: Ometron, Modelo: VQ-500-D), a fim de evitar o contato de sensores como acelerômetros e utilizou-se um sistema portátil de aquisição de dados. A Figura 5.29 mostra o esquema experimental utilizado neste trabalho.



Figura 5.29 - Montagem experimental para obtenção da resposta em frequência da placa.

Toda a metodologia, em suma, é exemplificada por meio da Figura 5.30, onde dados oriundos da aquisição de sinais de uma estrutura real, combinado a um modelo em elementos finitos permite que se detecte e identifique dano por meio de algoritmos de otimização, que em nosso caso algoritmos genéticos são lançados mão. Diversos pontos de aquisição foram ensaiados com o vibrômetro e não se percebeu discrepâncias nos resultados. Sendo assim, conseguiu obter uma curva da resposta vibratória do laminado oriunda de uma mediana de resultados, a partir do esquema experimental elaborado.

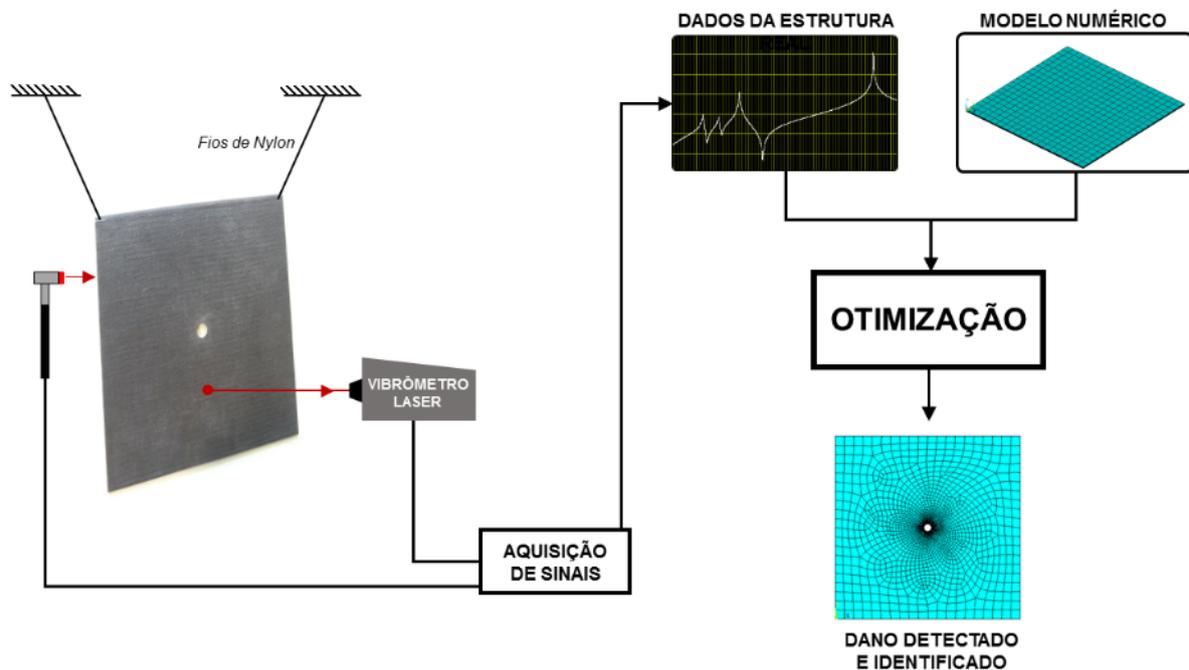


Figura 5.30 - Esquema do ensaio de vibração composto ao método de detecção de danos usando modelos em elementos finitos.

O método elaborado nesta parte do trabalho leva em consideração a otimização da função objetivo J_1 , composta pelas três primeiras frequências naturais. Logo, faz-se necessário obter as 10 primeiras frequências naturais da estrutura analisada, pois as seis primeiras frequências neste caso serão nulas, devido às condições de contorno da placa ser livre-livre, ou seja, não há restrições deslocamentos nos eixos x , y e z , tão pouco rotações em relação aos mesmos eixos, totalizando 6 graus de liberdade somando-se ao fato de que a sétimo modo de vibração não foi captado nos ensaios experimentais, ou seja, utilizou-se as frequências correspondentes aos modos de nº 8 a 10. Segundo Rao (2011), existe uma faixa de frequência de excitação útil limitada por uma frequência de corte, que significa que a estrutura não recebeu energia suficiente para excitar os modos além desta frequência. Se o martelo de impacto selecionado (*input*) não for capaz de

excitar todas as frequências, tanto a coerência quanto a função resposta em frequência obtidas na medição são deterioradas, ou seja, alguns modos de vibração não são devidamente excitados, não sendo então possível sua aquisição.

Os resultados obtidos para as frequências naturais associadas aos primeiros 10 modos são mostrados na Tabela 5.22. Os resultados numéricos obtidos exibem a qualidade da modelagem pelo MEF, com erros pequenos entre os resultados experimentais, garantindo a confiança no uso de tal ferramenta e nota-se que o 7º modo não foi obtido experimentalmente devido aos argumentos fornecidos no parágrafo anterior.

Tabela 5.22 - Frequências naturais obtidas para a estrutura real e numérica (sem dano).

Modo	ω_n numérico (Hz)	ω_n experimental (Hz)	Erro (%)
1 – 6	0	-	-
7	62,363	-	-
8	123,85	123,5	0,2826
9	154,81	155,0	0,1227
10	175,98	176,0	0,0114

Observa-se tanto pela Tabela 5.23 quanto pela Figura 5.31 que há uma pequena alteração nas frequências naturais de placa de fibra de carbono para a mesma com e sem o dano inserido. A mesma figura exhibe ainda os modos de vibração correspondentes à cada frequência natural para a estrutura sem dano.

De fato, como já dito neste trabalho, a mudança das frequências naturais de uma estrutura representa um bom indício de um dano em caráter global. Em adição, a presença do furo circular não alterou de modo significativo o comportamento dinâmico da estrutura, apresentando uma variação de no máximo 2 Hz para o modo 9.

Tabela 5.23 - Frequências naturais para a estrutura com e sem dano.

Modo	ω_n sem dano (Hz)	ω_n com dano (Hz)
8	123,5	122,5
9	155,0	153,0
10	176,0	175,0

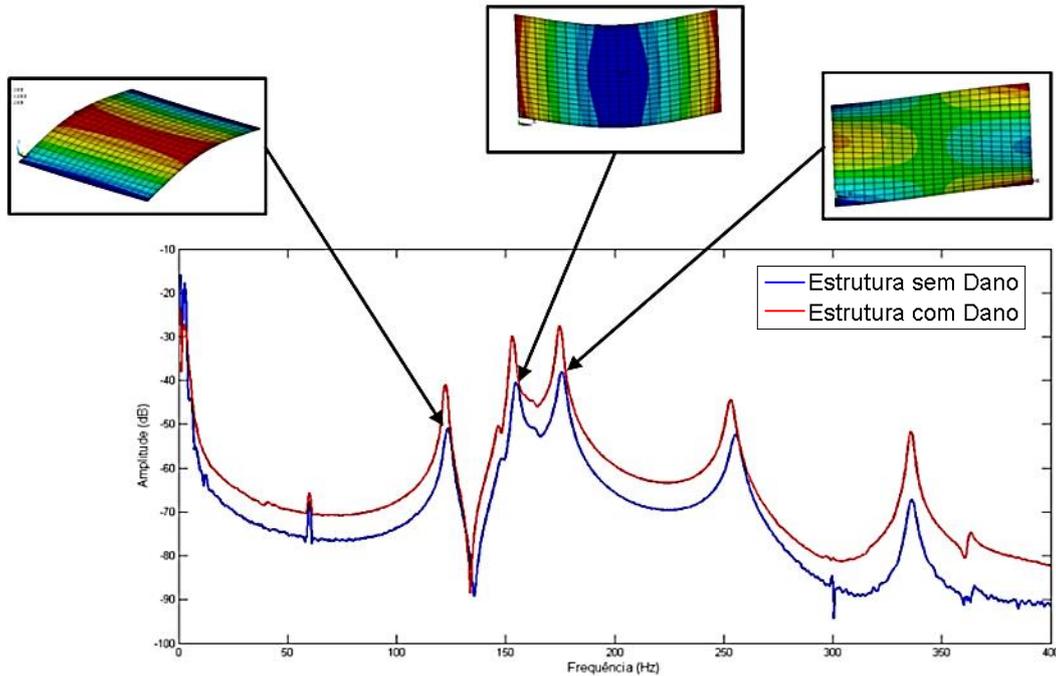


Figura 5.31 – Função Resposta em Frequência para a placa com e sem dano inserido.

Após a obtenção experimental dos dados da placa, iniciou-se o processo de busca pelo dano usando os AGs. Para tal, usou-se uma combinação de dados oriundos tanto do ensaio experimental quanto do modelo numérico em elementos finitos. Os parâmetros dos AGs foram mantidos os mesmos, semelhante a todos os outros casos tratados neste trabalho. O resultado obtido ao final do processo de detecção de danos é exibido na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 - Resultados para detecção de danos em estrutura real.

	$x_1 (m)$	$y_1 (m)$	$r_1 (mm)$
Objetivo	0,1500	0,1500	8,0000
Busca 1	0,1483	0,1933	0,8220
Busca 2	0,1538	0,1884	0,7092
Busca 3	0,1481	0,1974	2,2314
Busca 4	0,1506	0,1993	1,3229
Busca 5	0,1557	0,1965	1,0931
Média	0,1513	0,1949	1,2357
Desvio	0,0033	0,0042	0,6057
Erro (%)	0,8667	29,9867	84,5535

A Figura 5.35 mostra o resultado da busca realizada pelo algoritmo de otimização pelo dano estrutural imposto no laminado. Observa-se que a metodologia não foi capaz de detectar com grande precisão a presença do furo. Isto se dá principalmente pelo fato do dano estrutural

inserido não ser suficientemente grande ao ponto de ocasionar uma mudança significativa nas propriedades modais, neste caso as frequências naturais, do laminado. Contudo, o dano detectado se localiza em uma região não tão distante do furo real o que leva, por exemplo, em casos de inspeção em estruturas de grande porte (fuselagem de aeronaves, casco de submarinos, dentre outras), a uma procura pelo dano em uma região relativamente pequena da estrutura facilitando e muito a detecção do mesmo. Seguindo a ideia de que a placa possui uma área total de 900 cm^2 e que uma região imaginária retangular (linha tracejada vermelha na Figura 5.32) pode ser formada em uma zona englobando ambos os danos real e médio, isso acarreta à obtenção de uma área possivelmente danificada de $8,66 \text{ cm}^2$, ou seja, o método promove uma redução de uma área total desconhecida a ser monitorada para uma área já conhecida com um possível dano, bem menor que a inicial, promovendo uma redução de cerca de 99% de região de busca no processo de manutenção, reparo, identificação, etc. Observa-se ainda que o método encontrou com eficácia a posição do dano ao longo do eixo x , com erro de apenas 0,86%.

Espera-se que acrescentando novos dados na função objetivo, tais como acelerações e modos de vibrar se possa ter uma maior precisão na detecção do dano.

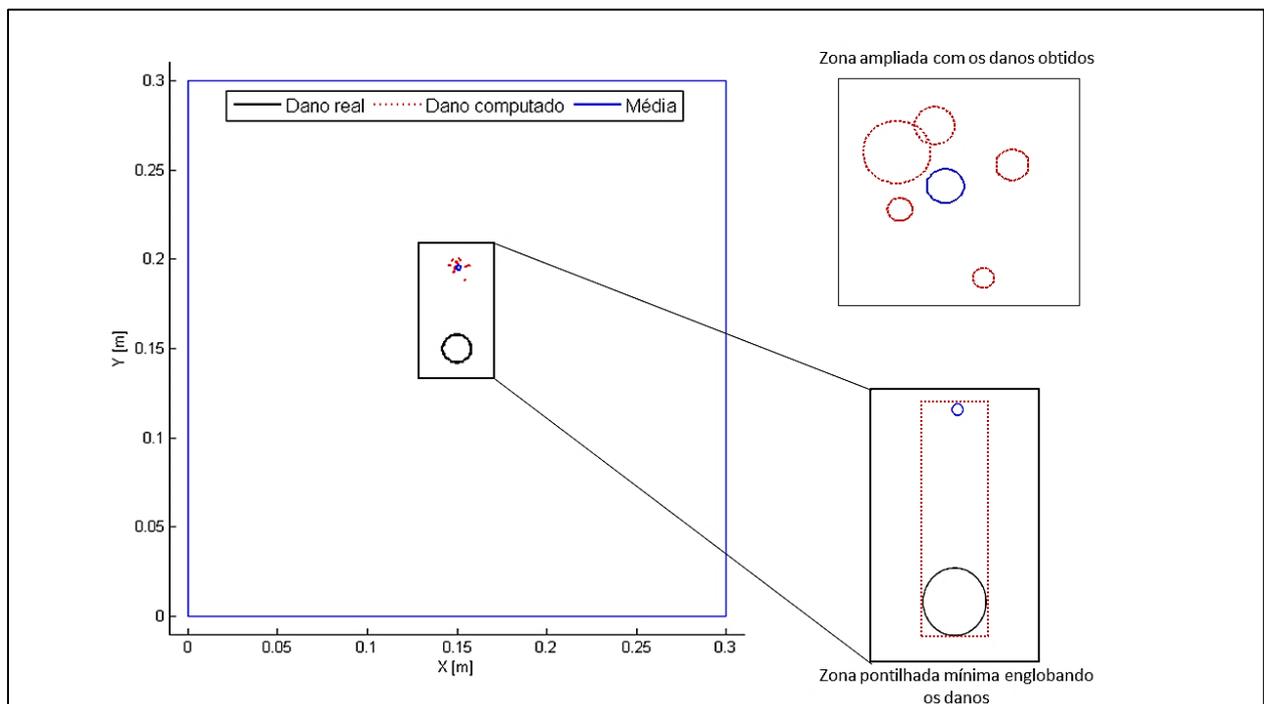


Figura 5.32 - Resultado do processo de busca pelo dano em uma placa laminada de fibra de carbono/epóxi.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

O estudo foi focado na detecção e identificação de danos estruturais baseando-se em parâmetros dinâmicos de vibração de uma placa quadrada de material compósito, incluindo modelagem numérica por elementos finitos e programação para o problema inverso de detecção com o uso de algoritmo genético.

Numericamente o problema de vibração de um laminado de material compósito foi validado pela ferramenta de elementos finitos, permitindo uma escolha de parâmetros correta para a modelagem do problema inverso.

Deu-se início ao problema de detecção de um dano modelado como um furo circular parametrizado segundo três variáveis de projeto (x , y , r), tendo como análise a otimização de uma função objetivo baseada somente num conjunto das primeiras frequências naturais de vibração, ponderadas segundo escalares específicos. Seguente a esse estudo, investigou-se a presença de múltiplos danos, considerando dois furos circulares, agora com o dobro de variáveis de projeto em relação ao caso anterior (x_1 , y_1 , r_1 , x_2 , y_2 , r_2), tendo como critério de otimização, a minimização de funções objetivos compostas por frequências, acelerações e uma combinação entre elas. Neste caso foi abordado uma otimização multiobjetivo, permitindo então a construção de uma frente de Pareto ótima para o problema de detecção de danos. Para ambos casos estudados acrescentou-se ruídos gaussianos brancos aleatórios, visando estudar a robustez do método proposto, além de se aproximar de um caso real onde erros, incertezas e condições adversas se fazem presentes.

O método dos elementos finitos demonstrou ser uma ferramenta poderosa em solucionar problemas que por muitas das vezes não possuem soluções triviais. A modelagem do problema direto pelo MEF, quando comparado ao caso analítico conhecido, apresentou erros pequenos, devidos à precisão numérica.

O algoritmo genético usado para solucionar o problema inverso de detecção de danos conseguiu avaliar com eficiência o problema proposto, porém, estes algoritmos são complexos e necessitam ter conhecimento dos valores da função objetivo em questão em diversos pontos, para que não percam seu rendimento na busca por valores ótimos. Este inconveniente pode ser solucionado pela inserção de uma técnica de identificação de parâmetros, por exemplo, as redes neurais artificiais, diminuindo consideravelmente o tempo total de simulação para identificação dos parâmetros do dano.

Para os modelos de danos modelados como furos circulares, o raio do furo demonstrou-se ser a variável de maior dificuldade a ser identificada com precisão. O valor do raio representa neste caso, a extensão do dano estrutural presente no meio (estrutura).

No que se trata de parâmetros investigados, deu-se preferência neste estudo somente para estudos envolvendo critérios dinâmicos. As funções objetivo introduzidas foram compostas de frequências naturais, uma combinação de frequências naturais e acelerações pontuais com diferentes pesos e uma otimização multiobjetivo de duas funções: uma função baseada em frequências naturais e uma segunda composta somente por acelerações. Frequências naturais puramente mostraram ser um bom critério para detectar a existência de um dano estrutural arbitrário, porém, possuem limitações na quantificação deste dano (localização e extensão). Para a detecção de um furo circular, frequências naturais conseguiram realizar a detecção com eficiência, apesar do raio ser um parâmetro com um maior erro em relação ao valor real previamente conhecido.

Na presença de múltiplos danos estruturais, a detecção feita puramente por frequências naturais exprimiu-se ser defeituosa, não conseguindo identificar a localização tão pouco a extensão dos dois furos circulares. Neste mesmo contexto, preferiu-se abordar outra função objetivo, composta por uma combinação de frequências e acelerações estruturais, sendo ponderada com diferentes pesos para cada uma das parcelas da função. Quando deu-se maior importância para a parcela de frequências, o resultado ainda apresentou baixa eficiência, contudo, obteve-se uma pequena melhora quando comparado com o uso somente de frequências, fato devido pela contribuição da parcela de aceleração na minimização da função objetivo. Pesos maiores para a parcela de aceleração demonstrou ser mais interessante, tendo uma sensível

melhora na detecção dos múltiplos danos, pois frequências naturais somente não possuem eficiência relevante para identificar múltiplos danos estruturais.

Seguindo a linha de raciocínio, uma frente de Pareto foi construída por meio da minimização de duas funções objetivos, compostas de parâmetros exclusivamente dinâmicos. Este tipo de otimização constatou ser o melhor método para detecção de múltiplos danos, pois a mesma oferece um conjunto de soluções ótimas viáveis para solucionar o problema inserido, sendo o de nossa escolha aquele de menor distância em relação à origem (zero). O critério de otimização multiobjetivo para formação da frente de Pareto levou em consideração elitismo controlado, o que se mostrou superior à técnica de ponderação de objetivos.

Dificuldades normais aparecem no momento da inserção de ruídos de medição no processo de detecção de danos. Ruídos acrescentados no algoritmo de detecção de apenas um furo circular não modificaram sensivelmente a resposta obtida, devido à pouca sensibilidade da função objetivo composta apenas por frequências naturais. Ruídos da ordem de 10% foram acrescentados e a detecção de apenas um furo foi satisfatória, sendo então considerado um método robusto a detecção por meio de frequências naturais, exclusivamente. Quando abordado a presença de múltiplos danos estruturais, a presença do ruído alterou diretamente a resposta esperada. O acréscimo do nível de ruído alterou a resposta, afastando o dano detectado do dano conhecido (objetivo) em caráter diretamente proporcional.

Quando se levou em consideração a modelagem de danos menores, como trincas, o algoritmo genético conseguiu detectá-los, contudo precisou-se elevar o número de avaliações da função objetivo. A inserção de um ruído Gaussiano branco neste modelo afetou com maior significância em relação a todos os outros modelos de danos tratados neste estudo. Apesar das dificuldades enfrentadas pela modelagem de danos menores e tratamento de variáveis com dados ruidosos, obteve-se uma detecção de dano com considerável eficácia, quando pretende-se obter uma região estrutural danificada, pois esta, em muitos casos possui relevância maior do que a geometria do dano propriamente dita.

A aplicação do método em uma estrutura real confirmou o uso de frequências naturais com um caráter mais qualitativo do que quantitativo para a detecção de danos. Os ensaios experimentais mostraram que existe sim a variação de determinadas frequências na presença de um dano estrutural, porém o grau de severidade do dano não foi suficientemente grande para acarretar amplas faixas de variação deste conjunto de parâmetros modais. Então, observa-se que frequências naturais são bons parâmetros para se obter um critério global de detecção de danos.

6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Alguns tópicos são relevantes para a sequência deste trabalho, dentre eles, destacam-se:

- Um estudo sobre o posicionamento dos sensores para aquisição dos sinais, de forma a detectar com maior eficiência danos estruturais em posições arbitrárias na estrutura;
- O uso de técnicas de identificação de parâmetros (redes neurais artificiais), permitindo diminuir o tempo de simulação computacional no processo inverso de otimização;
- Fazer um estudo de detecção de danos para diferentes condições de contorno de uma placa, especialmente para detecção de múltiplos danos;
- Estudar outras técnicas heurísticas de otimização, como por exemplo, Colônias de Formigas e Enxame de Partículas, e comparar os resultados obtidos com os Algoritmos Genéticos;
- Fazer uso de outros parâmetros ou critérios para detecção de danos, como por exemplo, tratar o dano somente em elementos da matriz de rigidez e incorporar ensaios experimentais de emissão acústica ao método de otimização para que além da identificação da localização do dano possa então qualifica-lo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTENBACH, H., **Modelling of Anisotropic behavior in fiber and particle reinforced composites. Multiscale Modelling of Damage and Fracture processes in Composite Materials.** International Centre for Mechanical Sciences, v. 474, pp. 1-62, 2005.
- AU, F. T. K., CHENG, Y. S., THAM, L. G., BAI, Z. Z., **Structural Damage Detection Based On a Micro-Genetic Algorithm Using Incomplete and Noisy Modal Test Data.** Journal of Sound and Vibration, v. 259, pp. 1081-1094, 2003.
- BACK, T., **Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms.** Oxford University Press on Demand. 1996.
- BAKER, A., DUTTON, S., KELLY, D., **Composite Materials for Aircraft Structures.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2004.
- BALAGEAS, D., FRITZEN, C., GUEMES, A., **Structural Health Monitoring.** ISTE Ltd., ISBN 978-1905209-01-9, 2006.
- BALASUBRAMANIAN, M., **Composite Materials and Processing.** CRC Press, ISBN 9781439879351, 2013.
- BLEDZKI, A. K., KESSLER, A., RIKARDS, R., CHATE, A., **Determination of Elastic Constants of Glass/Epoxy Unidirectional Laminates by the Vibration Testing of Plates,** Composites Science and Technology, v. 59, pp. 2015-2024, 1999.
- BORGES, C. C. H.; BARBOSA, H. J. C.; LEMONGE, A. C. C., **A Structural Damage identification Method Based on Genetic Algorithm and Vibrational Data.** International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 69, pp. 2663-2686, 2006
- BORGES, C. C.; BARBOSA, F. S.; CURY, A. A., **Detecção de Dano em Estruturas Usando Dados Modais Incompletos.** NUMEC. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2009.

- CARAMIA, M.; DELL'OLMO, P., **Multi-Objective Management in Freight Logistics: Increasing Capacity, Service Level and Safety with Optimization Algorithms**. Springer-Verlag London Limited, 2008.
- CAWLEY, P.; ADAMS, R. D., **The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies**. Journal of Strain Analysis, v. 14, No 2, pp. 49-67, 1979.
- CHA, Y.J.; BUYUKOZTURK, O., **Modal strain energy based damage detection using multi-objective optimization, in Structural Health Monitoring**. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Springer. 2014.
- CHA, Y.; BUYUKOZTURK, O., **Structural Damage Detection Using Modal Strain Energy and Hybrid Multiobjective Optimization**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, v. 30, pp. 347-358, 2015.
- CHANG, K. C.; KIM, C. W., **Modal-parameter Identification and Vibration-based Damage Detection of a Damaged Steel Truss Bridge**. Engineering Structures, v. 122, pp. 156-173, 2016.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O., **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford University Press. 1994.
- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T., **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. v. 6, No. 2, 2002.
- 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.
- EWINS, D., **Modal Testing theory, practice, and application**. Hertfordshire: Research Studies Press LTD. 2000.
- FRISWELL, M.; PENNY, J.; GARVEY, S., **A combined genetic eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures**. Computers and Structures v. 69, pp. 547-556. 1998.
- FRISWELL, M. I., **Damage Identification Using Inverse Methods**. Philosophical Transaction of the Royal Society, v. 365, pp. 393-410, 2006.
- FRISWELL, M. I.; **Damage Identification using Inverse Methods**. Dynamic Methods for Damage Detection in Structures, v. 499, p. 13-66, 2008.

- GADEA, A. S. M., **Identificação de Danos Estruturais a partir da Minimização dos Erros das Funções de Respostas em Frequência via Métodos de Otimização**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.
- GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W., **Composite Materials: Design and Applications**. CRC Press. 2003.
- GUO, H. Y.; LI, Z. L., **A Two-Stage Method to Identify Structural Damage Sites and Extents by Using Evidence Theory and Micro-Search Genetic Algorithm**. Mechanical Systems and Signal Processing, v.23, pp.769-782, 2009
- HESLEHURST, R. B., **Defects and Damage in Composite Materials and Structures**. CRC Press. 2014.
- HWANG, S. F.; HE, R. S., **A hybrid realparameter genetic algorithm for function optimization**. Adv. Eng. Inform., v. 20, pp. 7–21, 2006.
- HWU, C.; LIANG, Y. C.; **Hole Identification in Composite Structures Using Boundary Data from Multiple Loading Modes**. Proceedings of ICCM-11, v. 6, pp. 639-647, 1997.
- ISRAR, A., **Model for Vibration of Crack Plates for the with Damage Detection Methodologies**. Journal of Space Technology, v. 1, No. 1, 2011.
- JAKHARFANI, R.; MASRI, S. F., **Finite Element Model Updating Using Evolutionary Strategy for Damage Detection**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, v. 26, pp. 207-224, 2011.
- JONES, R. M., **Mechanics of Composite Materials**. Taylor & Francis. 2ed. 1999.
- KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. Taylor & Francis, 2ed. 2006.
- KIM, I. Y.; WECK, O., **Adaptive Weighted Sum Method for Multiobjective Optimization**. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 31, pp. 105-116, 2006.
- LIANG, Y. C.; CHYANBIN, H., **On-line identification of holes/cracks in composite structures**. Smart Materials and Structures, v. 10, pp. 599-609, 2001.
- LISKAI, T. R., **Modern Heuristics in Structural Damage Detection Using Frequency Response Functions**. Doctor of Philosophy Dissertation, A&M University, 2003.
- LOPES, P. S.; **Modelagem de problema inverso de detecção de danos por técnicas de identificação de parâmetros e de otimização**, Itajubá, 135p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 2010a.
- LOPES, P.S.; JORGE, A.B.; CUNHA, S.S.; **Detection of holes in a plate using global optimization and parameter identification techniques**. Inverse Problems in Science and Engineering, v. 18, No. 4, pp. 439-463, 2010b.

- MITCHELL, M., **An Introduction to Genetic Algorithms**. MIT Press, 5ed, 1999.
- MORASSI, A.; VESTRONI, F., **Dynamic Methods for Damage Detection in Structures**, Springer-Verlag, ISBN 3211787763, 2008.
- NANDA, B.; MAITY, D.; MAITI, D. K., **Vibration-Based Structural Damage Detection Technique using Particle Swarm Optimization with Incremental Swarm Size**. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, v. 13, pp. 323-331, 2012.
- OCHOA, O. O.; SALAMA, M. M., **Offshore Composites: Transitions Barriers to an Enabling Technology**. Composites Science and Technology, v. 65, pp. 2588-2596, 2005.
- PINFOLD, M., **Composite Mechanical Properties for Use in Structural Analysis**. Doctor of Philosophy Thesis. University of Warwick. 1995
- QATU, M. S., **Vibration of Laminated Shells and Plates**. Elsevier Academic Press. 2004
- RAGAUSKAS, P., BELEVIČIUS, R., **Identification of material properties of composite materials**, Aviation, v. 13(4), pp. 109-115. 2009.
- RAO, S. S., **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 4ed. John Wiley & Sons. 2009.
- RAO, S. S., **Mechanical Vibrations**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 5ª Edição. 2011.
- REDDY, J. N.; **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**. CRC Press. 2ed. 2003
- REZAIIEE-PAJAND, M.; SHAHABIAN, F.; TAVAKOLI, F. H., **Delamination Detection in Laminated Composite Beam Using Hybrid Elements**. Composite Structures, v. 94, pp. 2777-2792, 2012.
- RYTTER, A., **Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures**. Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark. 1993.
- SCOLA, L. A., **Otimização Multiobjetivo Evolutiva da Operação de Sistemas de Reservatórios Multiusos**. Universidade Federal de Minas Gerais (Tese de Doutorado), 2014.
- SINOUE, J. J., **A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations**. Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control, Nova Science Publishers, Inc., pp. 643-702, 2009.
- SOHN, H.; FARRAR, C. R.; HEMEZ, F. M., SHUNK, D. D., STINEMATES, D. W., NADLER, B. R., CZARNECKI, J. J., **A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001**. Los Alamos National Laboratory. 2004.

- SUN, H.; WAISMAN, H.; BETTI, R.; **Nondestructive Identification of Multiple Flaws Using XFEM and a Topologically Adapting Artificial Bee Colony Algorithm**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v 95(10), pp. 871-900, 2013.
- SUVEGES, J. M. C., **Estudo Acerca de Detecção de Danos em Estruturas via Método de Otimização**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá. 2014.
- TALREJA, R.; SINGH, C. V., **Damage and Failure of Composite Materials**. Cambridge University Press. 2012.
- VASILIEV, V. V., & MOROZOV, E., **Mechanics and Analysis of Composite Materials**. Elsevier Science Ltd, Oxford, 2001.
- VIEIRA, B. A. D. B.; **Aplicação de Filtro De Kalman Para um Problema Inverso e Localização e Detecção de Dano em Problema 2-D**. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 2011.
- XIA, Y.; XAO, H.; **A Genetic Algorithm for Structural Damage Detection Based on Vibration Data**. 19th International Modal Analysis Conference. 2001.
- YANG, X. S., **Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications**. John Wiley & Sons. 2010.
- WANG, H., HE, C., LIU, Y, **Pareto Optimization of Power System Reconstruction Using NSGA-II Algorithm**. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chendgu, IEEE, 2010.
- ZHANG, Z.; SHANKAR, K.; RAY T.; MOROZOV, E.; TAHTILI, M., **Vibration-based inverse algorithms for detection of delamination in composites**. Composite Structures, v. 102, pp. 226-236, 2013.

Apêndice A

CÁLCULO MATRICIAL DE UM LAMINADO DE MATERIAL COMPÓSITO

Assumindo comportamento linear elástico para um material compósito, segundo Gay (2003) e Kaw (2006), aplicando a lei de Hooke, introduz-se a matriz de flexibilidade S . Em termos de constantes de engenharia, pode escrevê-la segundo exibido na Equação A.1.

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{31}}{E_3} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Logo, a matriz de rigidez obtêm-se tomando a inversa de S como exibida na Equação A.2.

$$C = S^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{31}-\nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{32}-\nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31}-\nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{32}-\nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Sendo } \Delta = (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}) / (E_1 E_2 E_3)$$

Apesar de nove constantes elásticas independentes estarem presentes na matriz de flexibilidade [S] e, correspondentemente, na matriz [C] para materiais ortotrópicos, restrições sobre os valores destas constantes existem. Ainda segundo os autores citados, essas matrizes devem ser positivas definidas, sendo assim, obtêm-se a matriz de rigidez reduzida Q pela equação A.3 e A.4.

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Sendo então:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} & -\frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} & 0 \\ -\frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} & \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{S_{66}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Note-se que os elementos da matriz de rigidez reduzida, Q_{ij} , não são os mesmos como os elementos da matriz de rigidez, C_{ij} . Para obter a matriz de rigidez Q transformada (\bar{Q}), toma-se a Equação A.5.

$$\bar{Q} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \quad (\text{A.5})$$

Sendo $[T]$ a matriz de transformação definida por meio da equação A.6.

$$T = \begin{bmatrix} (\cos \theta)^2 & (\text{sen} \theta)^2 & 2(\text{sen} \theta)(\cos \theta) \\ (\text{sen} \theta)^2 & (\cos \theta)^2 & -2(\text{sen} \theta)(\cos \theta) \\ -(\text{sen} \theta)(\cos \theta) & (\text{sen} \theta)(\cos \theta) & (\cos \theta)^2 - (\text{sen} \theta)^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

E a matriz $[R]$ (Equação A.7) conhecida como a matriz de *Reuter*.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Sendo assim, para obterem-se as matrizes de rigidez, tomando-se a orientação das camadas em uma placa laminada como mostrada na Figura A.1, basta que:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}] (h_k - h_{k-1}), i = 1,2,6; j = 1,2,6 \quad (\text{A.8})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}] (h_k^2 - h_{k-1}^2), i = 1,2,6; j = 1,2,6 \quad (\text{A.9})$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\overline{Q}_{ij}] (h_k^3 - h_{k-1}^3), i = 1,2,6; j = 1,2,6 \quad (\text{A.10})$$

As matrizes $[A]$, $[B]$ e $[D]$ são conhecidas como matrizes de rigidez extensional, acoplamento e flexão, respectivamente.

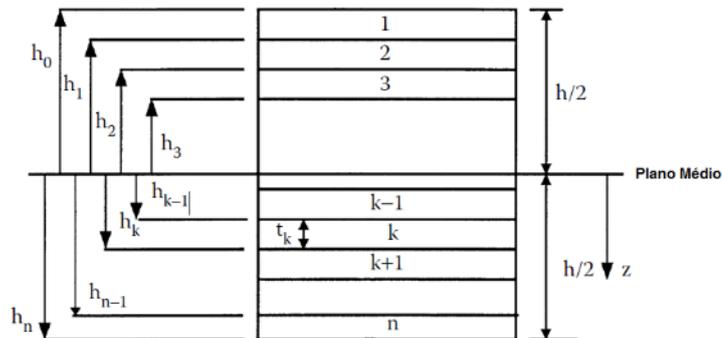


Figura A.1 - Localização das camadas em um compósito laminado. (Adaptado de KAW, 2006)

Apêndice B

VIBRAÇÕES EM PLACAS LAMINADAS

Considerando o caso de uma placa retangular com condições de contorno de simplesmente apoiada como mostrado na Figura B.1. A natureza das vibrações livres, bem como as configurações estruturais, é tomada com base em equações diferenciais governantes.

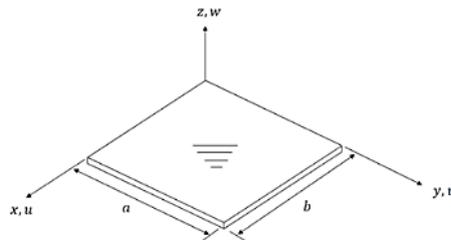


Figura B.1 - Vibração de uma placa laminada retangular (Adaptado JONES, 1999).

Segundo Jones (1999), a rigidez do laminado consiste unicamente de A_{11} , A_{12} , A_{22} , A_{66} , D_{11} , D_{12} , D_{22} e D_{66} . Isto é, cisalhamento, momentos e rotação existem. Então, para problemas de placas, as frequências de vibração e modos são determinados pela solução de uma única equação diferencial, dada pela equação B.1.

$$D_{11}\delta w_{xxxx} + 2(D_{12} + D_{66})\delta\delta_{xxyy} + D_{22}\delta w_{yyyy} + \rho\delta w_{tt} = 0 \quad (\text{B.1})$$

com w fazendo referência aos deslocamentos em relação ao eixo z e ρ definido como a massa específica do laminado.

Neste estudo específico, sendo o laminado sujeito as condições de contorno de simplesmente apoiada, tem-se:

$$x = 0, a: \delta w = 0 \quad \delta M_x = -D_{11}\delta w_{xx} - D_{12}\delta w_{yy} \quad (\text{B.2a})$$

$$x = 0, b: \delta w = 0 \quad \delta M_y = -D_{12}\delta w_{xx} - D_{22}\delta w_{yy} \quad (\text{B.2b})$$

A solução harmônica de um meio contínuo elástico pode ser definida como:

$$\delta w(x, y, t) = (A \cos \omega t + B \sin \omega t) \delta w(x, y) \quad (\text{B.3})$$

Observa-se agora que o problema pode ser separado em variações espaciais e temporais. O resultado da equação diferencial e condições de contorno são satisfeitas com a variação espacial do deslocamento lateral:

$$\delta w(x, y) = \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (\text{B.4})$$

Então as frequências naturais são:

$$\omega^2 = \frac{\pi}{4} \left[D_{11} \left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2(D_{12} + D_{66}) \left(\frac{m}{a}\right)^4 \left(\frac{n}{b}\right)^4 + D_{22} \left(\frac{n}{b}\right)^4 \right] \quad (\text{B.5})$$

sendo as várias frequências naturais ω , correspondentes aos diferentes modos de vibração (diferentes valores de m e n). Logo, a frequência fundamental de vibração (frequência de ordem mais baixa) é obtida quando m e n são ambas iguais a 1. Para uma placa ortotrópica quadrada com $a = b$, as frequências adimensionalizadas são definidas como:

$$\lambda = \left(\frac{a}{\pi}\right)^2 \sqrt{\frac{D_{22}}{\rho}} \quad (\text{B.6})$$

Para um placa isotrópica, $D_{22} = D$. Uma observação significativa é que para o caso de uma placa ortotrópica sujeita à vibrações livres possui um diferente conjunto de frequências naturais do que uma placa isotrópica. As relações matriciais para a obtenção da matriz de rigidez [D] estão apresentadas no Apêndice A.

Apêndice C

ALGORITMOS GENÉTICOS

Segundo Mitchell (1999), uma implementação de um algoritmo genético começa com uma população aleatória de cromossomos. Essas estruturas são avaliadas e associadas a uma probabilidade de reprodução de tal forma que as maiores probabilidades são associadas aos cromossomos que representam uma melhor solução para o problema de otimização do que àqueles que representam uma solução pior. A função objetivo ou aptidão (*fitness*) da solução é tipicamente definida com relação à população corrente. A função objetivo de um problema de otimização é construída a partir dos parâmetros envolvidos no problema, fornecendo uma medida da proximidade da solução em relação a um conjunto de parâmetros, que podem ser conflitantes entre si, ou seja, quando um aumenta o outro diminui. A função objetivo permite o cálculo da aptidão bruta de cada indivíduo, que fornecerá o valor a ser usado para o cálculo de sua probabilidade de ser selecionado para reprodução.

Ainda segundo Mitchell (1999), o indivíduo é meramente um portador do seu código genético, que é uma representação do espaço de busca do problema a ser resolvido, em geral na forma de sequências de *bits*. A seleção também é outra parte chave do algoritmo. Em geral, usa-se o algoritmo de seleção por "roleta", onde os indivíduos são ordenados de acordo com a função-objetivo e lhes são atribuídas probabilidades decrescentes de serem escolhidas.

A reprodução, tradicionalmente, é dividida em três etapas: cruzamento, recombinação e mutação. O acasalamento é a escolha de dois indivíduos para se reproduzirem (geralmente

gerando dois descendentes para manter o tamanho populacional). O cruzamento, ou *crossing-over* é um processo que imita o processo biológico homônimo na reprodução: os descendentes recebem em seu código genético parte do código genético do pai e parte do código da mãe. Esta recombinação garante que os melhores indivíduos sejam capazes de trocar entre si as informações que os levam a ser mais aptos a sobreviver, e assim gerar descendentes ainda mais aptos. Por último vem as mutações, que são feitas com probabilidade a mais baixa possível, e tem como objetivo permitir maior variabilidade genética na população, impedindo que a busca fique estagnada em um mínimo local.

De acordo com Yang (2010), os passos para o processo de otimização dos AGs são sintetizados no fluxograma da Figura C.1, considerando o número máximo de gerações como critério de parada.

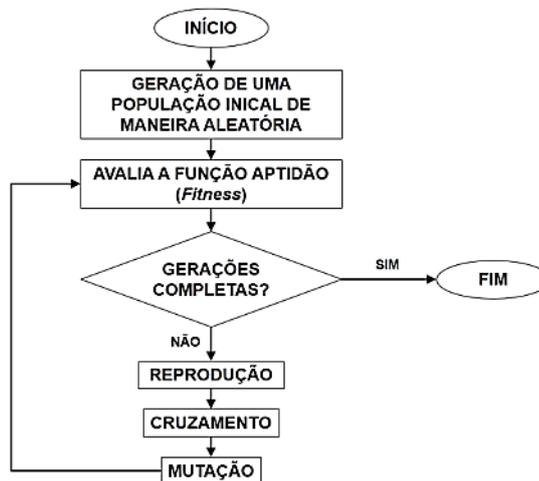


Figura C.1 - Fluxograma básico do funcionamento de um algoritmo genético (Adaptada de YANG, 2010).

Segundo Yang (2010), a essência de algoritmos genéticos envolve a codificação das variáveis de projeto como matrizes de *bits* ou cadeias de caracteres para representar os cromossomos, as operações de manipulação de cadeias de operadores genéticos, e a seleção de acordo com a sua aptidão, com o objetivo de encontrar uma solução para o problema em causa. Isso geralmente é feito por meio do seguinte procedimento: *i*) codificação dos objetivos ou funções de otimização; *ii*) definição de uma função aptidão (*fitness*) ou critério de seleção; *iii*) inicializar uma população de indivíduos; *iv*) avaliar a adequação de todos os indivíduos da população; *v*) criação de uma nova população por cruzamento realizando mutação, avaliando a função fitness e reprodução; *vi*) evolução da população até que se cumpram determinados

critérios de parada e por fim, *vii*) decodificar os resultados para obter a solução para o problema.

Ainda segundo Yang (2010), o processo iterativo de criação de uma nova população é chamado uma geração. A codificação da função objetivo é geralmente sob a forma de matrizes binárias ou matrizes de reais de valor nos algoritmos genéticos adaptativos. Por se tratar de um método heurístico, os algoritmos genéticos são métodos que não dependem da escolha de um ponto inicial, aumentando as chances de se obter o ótimo global do sistema. Para que a população se diversifique e mantenha determinadas características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores, lança-se mão dos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação.

O operador seleção é uma versão artificial do processo de seleção natural. Neste tipo de operador há a seleção dos indivíduos mais aptos da geração atual que são escolhidos para a próxima geração. A função que calcula a aptidão de cada indivíduo na população é conhecida como função de avaliação ou função *fitness*. Cada indivíduo da população atual de cromossomos é avaliado quanto sua aptidão e um subconjunto de cromossomos é selecionado para ser usado como pais das próximas gerações. Intrínseco ao processo de seleção, existe a estratégia de elitismo que auxilia na melhora da convergência do AG. O elitismo consiste em manter um dado número de indivíduos em cada geração e estes indivíduos são passados diretamente à próxima geração, garantindo a preservação dos melhores. O cruzamento é considerado o operador genético dominante, é utilizado para gerar uma nova população por meio da recombinação de soluções. Um par de indivíduos é dividido em locais escolhidos aleatoriamente e seus materiais genéticos são recombinados formando novos indivíduos, que novamente são avaliados e recebem um novo valor de aptidão individual (Figura C.2). O terceiro operador é a mutação, que é utilizado para fornecer novas informações para as populações, ou seja, o operador mutação promove uma diversidade genética.

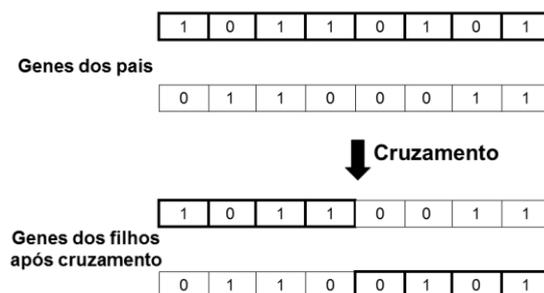


Figura C.2 - Cruzamento de indivíduos e recombinação de código genético (Adaptado de YANG, 2010).

Apêndice D

PROBLEMA INVERSO PARA ESTIMAÇÃO DE PROPRIEDADES

Os métodos numérico-experimentais são sensíveis a erros, pois o modelo numérico é sempre baseado em uma série de hipóteses. Se a estrutura real não satisfizer uma ou mais destas hipóteses, o modelo estrutural não é, evidentemente, conveniente. Desde o desenvolvimento de técnicas numérico-experimentais mistas para a identificação de material é destinado a obter um método prático que produz resultados rápidos e confiáveis, muita pesquisa tem sido feita no sentido de minimizar esses erros de modelo (BLEDZKI *et al.*, 1999).

Neste trabalho, o método numérico-experimental proposto para a identificação das constantes elásticas a partir dos ensaios de vibração consiste nas seguintes fases. Na primeira etapa ensaios experimentais são realizados a fim de se obter as frequências naturais da placa laminada. Na segunda fase, o método dos elementos finitos é utilizado para modelar a resposta da estrutura sob as condições previamente conhecidas e por fim, na terceira fase, os dados numéricos obtidos pela solução em elementos finitos são utilizados para se construir o método inverso de atualização de modelos, onde a identificação das propriedades elásticas é realizada, pois, segundo Hwang *et al.* (2006), testes de vibração combinado com um método numérico é uma potencial estratégia alternativa para determinar as constantes elásticas de materiais por causa de seu caráter não destrutivo, um único teste, e capacidade de produzir propriedades médias.

Para isto uma função objetivo deve ser minimizada (Equação D.1), baseada nos modos de vibração 8 ao 10, efetuando o cálculo entre a diferença numérica e experimental, ou seja, uma função erro. A otimização foi realizada com o mesmo algoritmo genético elaborado neste trabalho, mantendo-se fixos todos os parâmetros dos operadores genéticos.

$$J_4 = \sum_{i=8}^{10} (\omega_i^{real} - \omega_i^{calculado})_{semdano}^2 \quad (D.1)$$

A aproximação numérica-experimental proposta é utilizada para a identificação das propriedades elásticas da placa laminada. Assume-se que as dimensões da placa quadrada de 30 cm de lado, massa específica constante de $\rho = 1408,8 \text{ kg/m}^3$ (dado obtido por meio de ensaio experimental laboratorial), e sequência de camada de empilhamento conhecido de $[0/90]_3s$. Os parâmetros a serem identificados são compostos por quatro constantes elásticas:

- Dois módulos de elasticidade: E_1 e E_2
- Módulo de Cisalhamento: G_{12}
- Coeficiente de Poisson: ν_{12}

Em que a direção longitudinal é indicada por 1 e as duas direções transversais são indicados por 2 e 3. Normalmente, tendo em conta a fraca precisão da identificação de coeficientes de Poisson e para simplificar o problema de identificação tridimensional para um bidimensional, suposições sobre a paridade adicional de constantes elásticas são introduzidas (Equação D.2) (RAGAUSKAS & BELEVICIUS, 2009).

$$\left\{ \begin{array}{l} E_3 = E_2 \\ \nu_{13} = \nu_{23} = \nu_{12} \\ G_{13} = G_{12} \\ G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \end{array} \right. \quad (D.2)$$

Faz-se necessário ainda restringir o problema de otimização adicionando equações de restrição (Eq. D.3) para que designem uma matriz de elasticidade definida positiva (BLEDZKI *et al.*, 1999).

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1(x): \frac{E_2}{E_1} > 0 \\ g_2(x): \frac{G_{12}}{E_1} > 0 \\ g_3(x): \frac{G_{23}}{E_1} > 0 \\ g_4(x): \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} - |v_{12}| > 0 \end{array} \right. \quad (\text{D.3})$$

Segundo Pinfold (1995), uma precisão na estimação de propriedades na ordem de 10% dos dados experimentais é suficientemente aceitável para a modelagem de materiais compósitos para fins de projeto inicial, visto que geralmente não se é possível projetar em tolerâncias estritamente apertadas na maioria dos casos. Sendo assim, definiu-se como os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto com uma banda de 10%, ou seja, $0,9\alpha_0 < \alpha = \{E_1, E_2, v_{12}, G_{12}\} < 1,1\alpha_0$, sendo expostos na Tabela D.1.

Os resultados do processo de busca pelas propriedades ótimas para o ajuste de modelo são exibidos na Tabela D.1. Nota-se que neste caso, não tomou-se a média, mas sim do melhor conjunto de valores que geraram o menor *Fitness*, ou seja, um menor erro entre o modelo numérico e experimental. Logo, o resultado da Busca 4, como destacado na Tabela E.1 foi utilizado como propriedades no modelo numérico a fim de correlacionar os modelos.

Tabela D.1 – Resultados de estimação de propriedades elásticas do laminado

	E₁	E₂	v₁₂	G₁₂	Fitness
Inicial (α_0)	88,8	6,3	0,29	7,56	-
Busca 1	83,5267	5,6959	0,3174	8,3157	0,1674
Busca 2	82,849	5,2761	0,3172	8,3626	0,0366
Busca 3	82,4769	5,6745	0,3183	8,3159	0,1590
Busca 4	83,0151	5,1308	0,3208	8,3696	0,0131
Média	82,966925	5,444325	0,318425	8,34095	-
Desvio	0,435775052	0,28452773	0,001654	0,029181101	-
Melhor	83,0151	5,1308	0,3208	8,3696	0,0131
Variação	7%	19%	11%	11%	-

Seguinte ao processo de otimização, fez-se uso das propriedades que melhor relacionam os modelos, obteve-se os resultados para as frequências numéricas (Tabela D.2) com um erro muito pequeno. A Figura D.1 exhibe bem o comportamento das frequências em caráter experimental e numérico, antes e depois do processo de otimização de propriedades (resposta ajustada). Nota-se ainda que a estrutura real possui um leve amortecimento estrutural, o que não foi levado em consideração na formulação numérica do problema.

Tabela D.2 – Frequências naturais numéricas antes e depois do ajuste.

Modo	Experimental	Num. Inicial	Num. Ajustado	Erro
1 ao 6	0	0	0	-
7	-	60	62,363	-
8	123,5	129,31	123,85	0,2826 %
9	155	161,43	154,81	0,1227 %
10	176	176,74	175,98	0,0114 %

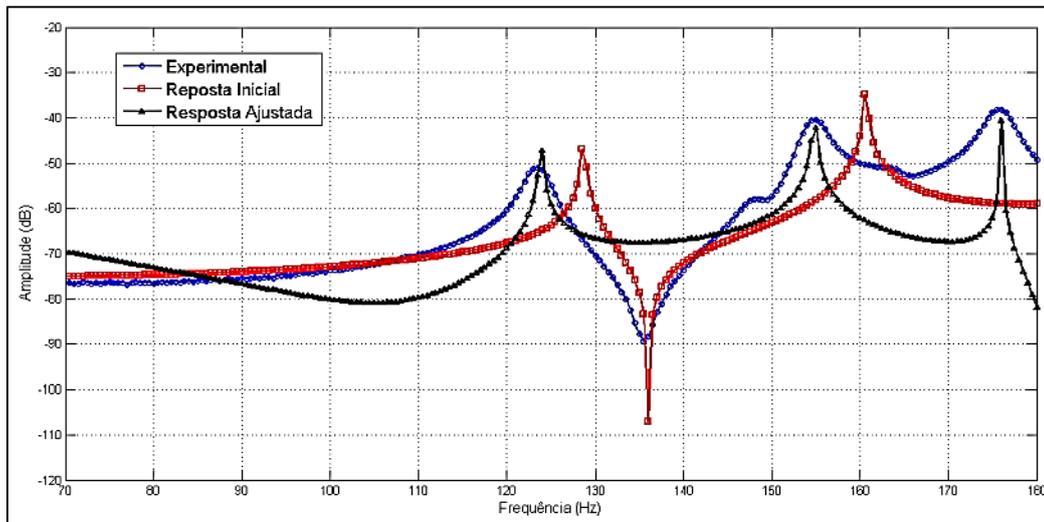


Figura D.1 - Ajustes de modelos usando método inverso para estimar propriedades do material com base nas frequências naturais.