



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DE RIGIDEZ
EM PLACAS, ATRAVÉS DA METODOLOGIA DOS
OBSERVADORES DE ESTADOS***

Alisson Teixeira Zacarias

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Orientador: PROF. DR. GILBERTO PECHOTO DE MELO

Ilha Solteira, abril de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

- | | |
|------|---|
| Z13d | <p>Zacarias, Alisson Teixeira.
Determinação da variação de rigidez em placas, através da metodologia dos observadores de estados / Alisson Teixeira Zacarias. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008
101 f. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008</p> <p>Orientador: Gilberto Pechoto de Melo
Bibliografia: p. 97-101</p> <p>1. Observadores de estado. 2. Modelo de falha. 3. Detecção e localização de falhas. 4. Trincas. 5. Sistemas contínuos.</p> |
|------|---|

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Determinação da Variação de Rigidez em Placas, através da Metodologia dos Observadores de Estados

AUTOR: ALISSON TEIXEIRA ZACARIAS

ORIENTADOR: Prof. Dr. GILBERTO PECHOTO DE MELO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GILBERTO PECHOTO DE MELO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. RAQUEL SANTINI LEANDRO RADE

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia

Data da realização: 19 de abril de 2008.

Gilberto Pechoto de Melo

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. GILBERTO PECHOTO DE MELO

**À Deus, aos meus pais Silvio Zacarias
e Eliana Teixeira dos Santos Zacarias e a mim mesmo.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilberto Pechoto de Melo, pelo apoio, incentivo, amizade e pela indispensável orientação;

Ao Prof. Dr. Amarildo T. Paschoalini, pela amizade e idéias construtivas;

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Facundo Sanches, pela amizade e ensinamentos;

Aos técnicos e secretárias do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira;

A todos os funcionários da Biblioteca da FEIS, pela amizade, ajuda e paciência;

Aos colegas de pós-graduação e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA.....	15
1.1 INTRODUÇÃO.....	16
1.2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	24
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	26
2.1 SISTEMAS DE CONTROLE.....	27
2.2 REPRESENTAÇÃO EM ESPAÇO DE ESTADO.....	30
2.3 CONTROLABILIDADE E OBSERVABILIDADE.....	31
2.3.1 Matriz de Observabilidade.....	33
2.3.2 A Matriz Graminiano de Observabilidade W_o	34
2.4 METODOLOGIA DOS OBSERVADORES DE ESTADO.....	35
2.4.1 Conceito de Observador de Estado (Lemos, 2004).....	36
2.4.2 Observador Trivial (Lemos, 2004).....	37
2.4.3 Observadores do tipo Identidade (Lemos, 2004).....	38
2.4.4 Observador de Ordem Reduzida (Lemos 2004).....	39
2.4.5 Observadores de Estado Global e Robusto.....	43
2.5 PROJETO DOS OBSERVADORES DE ESTADO.....	46
2.6 ELEMENTO FINITO DE PLACA COM TRINCA.....	49
2.6.1 Matriz Rigidez.....	49
2.6.1.1 Matriz de Flexibilidade do Elemento sem presença de trinca.....	51
2.6.1.2 Matriz de Flexibilidade do Elemento com trinca.....	52
2.6.2 Matriz de Massa.....	60

2.6.3	Matriz de Amortecimento.....	61
2.6.4	Equação do Movimento.....	62
3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL, ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....	64
3.1	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	64
3.1.1	APLICAÇÃO I – Sistema massa-mola-amortecedor – 3 GDL.....	65
3.1.2	APLICAÇÃO II – Modelo de falha.....	72
3.1.2.1	Placa Engastada com uma Trinca.....	72
3.1.2.2	Placa Engastada com duas Trincas Simultâneas.....	79
3.2	ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....	81
3.2.1	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	82
3.2.1.1	Materiais Utilizados.....	82
3.2.1.2	Equipamentos Utilizados.....	83
3.2.2	ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA UMA EXCITAÇÃO IMPULSIVA.....	85
3.2.2.1	Placa Engastada com uma Trinca.....	85
3.2.2.1.1	Tabela de Tendência para outros percentuais de falha.....	91
3.2.2.2	Placa Engastada com duas Trinca Simultâneas.....	92
3.2.2.2.1	Tabela de Tendência para outros percentuais de falha.....	93
4	DISCUSSÃO, CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....	95
	REFERÊNCIAS	98

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 2.1 - Sistema de controle com malha aberta.....	29
Figura 2.2 - Sistema de controle com malha fechada e retroação.....	29
Figura 2.3 - Divisões possíveis de um sistema.....	35
Figura 2.4 - Definição do Observador de Estado.....	36
Figura 2.5 - Sistema de dois graus de liberdade.....	44
Figura 2.6 – Sistema de Observação, Marano (2002).....	48
Figura 2.7 – Elemento de placa com uma trinca central, com sistema de forças nodais independentes.....	50
Figura 2.8 – Sistema de forças nodais independentes.....	50
Figura 2.9 – Zona plástica ao redor da ponta da trinca.....	54
Figura 2.10 – Funções de correção Φ_I e Φ_{II}	57
Figura 2.11 - Flexibilidade não dimensional devido a trinca em função do comprimento relativo $2a/H$ e razão plástica σ_x/σ_y	59
Figura 3.1 - Sistema massa-mola-amortecedor com 3 graus de liberdade.....	65
Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia desenvolvida para detecção e localização de falhas.....	67
Figura 3.3 - Sistema real simulado sem falha x Observador Global (condições iniciais)	68
Figura 3.4 - Sistema real simulado falho x Observador Global (condições iniciais).....	68
Figura 3.5 - Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de k_1 (condições iniciais).....	69
Figura 3.6 - Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de k_2	70

(condições iniciais).....	
Figura 3.7 - Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de k_3 (condições iniciais).....	70
Figura 3.8 - Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de C_1 (condições iniciais).....	71
Figura 3.9 - Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de C_2 (condições iniciais).....	71
Figura 3.10 - Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de C_3 (condições iniciais).....	72
Figura 3.11 - Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.....	73
Figura 3.12 - Sistema real simulado sem falha x Observador Global (condições iniciais).....	74
Figura 3.13 – Sistema real simulado falho x Observador Global (condições iniciais).....	75
Figura 3.14 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	76
Figura 3.15 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 20% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	76
Figura 3.16 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 30% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	77
Figura 3.17 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 40% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	77
Figura 3.18 – Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.....	79
Figura 3.19 – Bancada de testes.....	82
Figura 3.20 – Esquema do sistema mecânico montado.....	83
Figura 3.21 – Fluxograma para a aquisição de sinais e análise de frequência.....	85

Figura 3.22 – Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.....	86
Figura 3.23 – Sistema real sem falha x Observador Global (condições iniciais).....	87
Figura 3.24 – Sistema real falho x Observador Global (condições iniciais).....	88
Figura 3.25 – Sistema real falho x Observador Robusto a 10% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	88
Figura 3.26 – Sistema real falho x Observador Robusto a 20% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	89
Figura 3.27 – Sistema real falho x Observador Robusto a 30% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	89
Figura 3.28 – Sistema real falho x Observador Robusto a 40% de comprimento de trinca (condições iniciais).....	90
Figura 3.29 – Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.....	92
Tabela 3.1 - Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$, falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$	78
Tabela 3.2 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$, falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$	80
Tabela 3.3 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$, falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$	80
Tabela 3.4 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$, falhas de $2a=0.10L$ até $2a=0.40L$...	91
Tabela 3.5 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$, falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$	93
Tabela 3.6 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$, falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$	94

LISTA DE SÍMBOLOS

[A]	<i>Matriz dinâmica do sistema</i>
[B]	<i>Matriz de entradas</i>
[M]	<i>Matriz de massa</i>
[M] _e	<i>Matriz de massa do elemento</i>
[K _u - γΔK]	<i>Matriz de rigidez no modelo de trincas</i>
[K _u]	<i>Matriz de rigidez do elemento sem trinca</i>
[K _e]	<i>Matriz de rigidez do elemento trincado</i>
[C]	<i>Matriz de amortecimento / Matriz de Flexibilidade</i>
[T]	<i>Matriz de transformação</i>
[I]	<i>Matriz identidade</i>
[D]	<i>Matriz de transmissão direta</i>

[O]	<i>Matriz observabilidade</i>
[W ₀]	<i>Matriz Graminiano de observabilidade</i>
[C _{me}]	<i>Matriz de medidas</i>
[L]	<i>Matriz do observador</i>
[Φ]	<i>Matriz de transição de estado do sistema</i>
Φ	<i>Função de correção</i>
c	<i>Coeficiente de flexibilidade não dimensional</i>
n	<i>Ordem do sistema</i>
α	<i>Coeficiente de avaliação da matriz de rigidez para condição de trinca aberta.</i>
K _I	<i>Fator de intensidade de deformação devido à flexão</i>
K _{II}	<i>Fator de intensidade de deformação devido à cortante</i>
K _{III}	<i>Fator de intensidade de deformação devido à torção</i>

$\{x(t)\}$ *Vetor de estado do sistema*

$\{y(t)\}$ *Vetor de saída*

$\{u(t)\}$ *Vetor de entrada*

$\{\hat{x}(t)\}$ *Vetor de estado do observador de estado*

$\{\hat{y}(t)\}$ *Vetor de saída do observador*

$\{f(t)\}$ *Vetor força de excitação*

$(\neq \text{RMS})$ *Diferença dos valores RMS*

ω *Frequência de excitação (rad/s)*

Zacarias, A.T., *“Determinação da Variação de Rigidez em Placas, através da Metodologia dos Observadores de Estado”*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEIS/UNESP/DEM), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

RESUMO

Hoje em dia um dos fatores de interesse das indústrias no desenvolvimento de novas técnicas de detecção e localização de falhas é a preocupação com a segurança de seus sistemas, tendo-se a necessidade de supervisão e monitoramento de modo que as falhas sejam detectadas e corrigidas o mais rápido possível.

Verifica-se na prática que determinados parâmetros dos sistemas podem variar durante o processo, devido a características específicas ou o desgaste natural de seus componentes. Sabe-se também que, mesmo nos sistemas bem projetados, a ocorrência de trincas em alguns componentes pode provocar perdas econômicas ou conduzir a situações perigosas. Os observadores de estado podem reconstruir os estados não medidos do sistema, desde que os mesmos sejam observáveis, tornando possível, desta forma, estimar as medidas nos pontos de difícil acesso. A técnica dos observadores de estado consiste em desenvolver um modelo para o sistema em análise e comparar a estimativa da saída com a saída medida, a diferença entre os dois sinais presentes resulta em um resíduo que é utilizado para análise.

Neste trabalho foi montado um banco de observadores associado a um modelo de trinca de modo a acompanhar o progresso da mesma. Os resultados obtidos através de simulações computacionais em uma placa engastada discretizada pela técnica dos elementos finitos e as análises experimentais realizadas foram bastante satisfatórios, validando a metodologia desenvolvida.

PALAVRAS-CHAVE: Observadores de estado, modelo de falha, detecção e localização de falhas, trincas, sistemas contínuos.

Zacarias, A.T., “*Determination of the Stiffness Variation in Plates, by State Observers Methodology*”, Master Dissertation, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEIS/UNESP/DEM), Ilha Solteira, São Paulo, Brazil.

ABSTRACT

Nowadays a main factor of interest in industries in the development of new techniques for detection and localization of faults is the concern with the security of its systems. There is the need of supervising and monitoring the machines to detect and correct the fault as soon as possible.

In practice it is verified that some determined parameters of the systems can vary during the process, due to the specific characteristics or the natural wearing of its components. It is known that even in well-designed systems the occurrence of cracks in some components can induce economic losses or lead to dangerous situations. The state observers methodology can reconstruct the unmeasured states of the system, since they are observable, becoming possible in this way to estimate the measures at points of difficult access. The technique of state observers consists of developing a model for the system under analysis and to compare the estimated with the measured exit, and the difference between these two signals results in a residue that is used for analysis.

In this work was set up a bank of observers associated to a model of crack in order to follow its progress. The results obtained through computational simulations in a cantilever plate discretized by using the finite elements technique and the accomplished experimental analysis were sufficiently satisfactory, validating the developed methodology.

KEYWORDS: State observers, fault model, faults detection and location, crack, continuous systems.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

1.1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico verificado nas últimas décadas exige das máquinas e estruturas mecânicas maiores capacidades de trabalho e velocidade de operação. Além disso, atualmente, uma das maiores preocupações da indústria é a de manter seus equipamentos em funcionamento sem que ocorram paradas repentinas.

Com a finalidade de garantir o funcionamento dos sistemas mecânicos com segurança, os mesmos devem ser supervisionados e monitorados para que as falhas sejam identificadas. Assim, pode-se acompanhar o progresso das mesmas e programar uma manutenção corretiva programada, executando-a no momento mais apropriado. Dessa forma, evitam-se distúrbios inerentes à operação destes sistemas, o que poderia levá-los a uma deterioração de seu desempenho.

Um observador de estado estima as variáveis de estado com base nas medições das variáveis de saída e de controle. Esta técnica consiste em um método capaz de reconstruir os estados em que sua medição torna-se difícil ou até mesmo impossível.

Deste modo, podem-se detectar falhas nestes pontos sem o conhecimento de suas medidas. Pode-se também monitorá-las através das reconstruções de seus estados.

Esta técnica consiste em desenvolver um modelo para o sistema em análise e comparar a saída estimada pelo observador com a saída do sistema.

Neste trabalho, a metodologia desenvolvida utiliza dois tipos de observadores de estado de ordem plena do tipo identidade. O primeiro detecta a falha no sistema (observador de estado global) e, o segundo, é responsável pela localização da mesma (observador de estado robusto).

Tanto o observador global, que analisa todo o sistema e consegue somente detectar algum tipo de irregularidade, quanto o observador robusto a um determinado parâmetro sujeito a falhas, que consegue localizar estas irregularidades, são determinados através das rotinas computacionais desenvolvidas para estes fins.

1.2 REVISÃO DA LITERATURA

Luenberger (1964). Afirmou que a maior parte da teoria de projeto de controle moderno está baseada na suposição de que o vetor de estado do sistema a ser controlado está disponível por medição direta. Mas em muitas situações práticas, somente poucas quantidades de saída estão disponíveis. O autor demonstra como as entradas e saídas disponíveis de um sistema podem ser usadas para construir uma estimativa do vetor de estado do sistema, no qual o dispositivo responsável por essa reconstrução do vetor de estado é chamado de observador de Luenberger, ou somente, observador. Este trabalho deu início a teoria dos observadores de estado.

Luenberger (1964). Demonstrou que se um sistema é linear, seu vetor de estado pode ser aproximadamente reconstruído através do projeto de um observador.

O vetor de estado de ordem “ n ” e com “ m ” saídas independentes pode ser reconstruído com um observador de ordem “ $n-m$ ”, reconstruindo o restante dos estados a partir de equações diferenciais. Também mostrou que o projeto de um observador para um sistema com “ m ” saídas pode ser reduzido a um projeto de “ m ” observadores como se fossem subsistemas com saídas simples, reduzindo sua complexidade.

Lynn e Kumbasar (1967). Foram os primeiros a investigar as vibrações de uma placa retangular trincada usando funções de Green aproximadas para obter a integral de Fredholm do primeiro tipo.

Luenberger (1971). Discutiu os elementos básicos do projeto de observador e apresentou de forma introdutória uma metodologia desenvolvida para a reconstrução de estados através de observadores. Este trabalho traz ainda tópicos a respeito do observador identidade, observador de ordem reduzida e das propriedades de estabilidade.

Stahl e Keer (1972). Determinaram as frequências naturais de placas trincadas simplesmente apoiadas usando a integral homogênea de Fredholm de segundo tipo.

Clark (1978). Introduziu o esquema de observadores dedicados para a detecção de falhas em instrumentos por redundância funcional aplicando-o na simulação de um sistema de controle de eixos laterais de um barco hidrofólio. O termo redundância funcional, redundância interna e redundância analítica são usados para descrever os métodos de detecção de avaria de instrumento que usam técnicas de processamento de dados on-line para gerar sinais redundantes a partir de um único conjunto de instrumentos. Estes esquemas apresentam melhor proposta em relação aos

métodos redundantes convencionais (hardware), que requerem múltiplos conjuntos de instrumentos para gerar sinais redundantes.

Cawley e Adams (1979). Modelou placas trincadas através da redução do coeficiente de elasticidade de um elemento finito na região da trinca. Esse método apresenta a desvantagem de que o coeficiente de elasticidade reduzido não relata a real dimensão e formato da trinca.

Hirano e Okazaki (1980). Aplicaram a transformada de Fourier nas equações diferenciais que governam o problema. Eles obtiveram um sistema de equações integrais possuindo descontinuidades desconhecidas de deflexão e inclinações através da trinca.

Markstrom e Storakers (1980). São os primeiros a aplicar o método baseado na separação dos nós do elemento finito ao longo da face da trinca. Este método exigia uma malha densa de elementos ao redor da face da ponta da trinca e conseqüentemente o tempo para a realização dos cálculos era alto, especialmente em sistemas dinâmicos.

Watanabe e Himmelblau (1982). Apresentam um método para detectar falha de instrumentos em processos não lineares variando no tempo, incluindo incertezas tais como erro de modelagem, ambigüidade de parâmetros e ruídos na entrada e saída. O principal objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de filtros de estimação de estado com sensibilidade mínima para as incertezas e sensibilidade máxima para falhas do instrumento, como aquelas correspondentes a deteriorações leves ou alterações graduais, ao invés de falhas catastróficas ou abruptas. Os autores utilizaram o conceito de observador robusto, apresentado inicialmente por Clark (1978), ao projetar filtros estimadores de estado para a detecção de falhas de instrumentos, tal que fossem robustos às incertezas do sistema. A estratégia usada para o projeto destes filtros foi

baseada na separação dos efeitos ocasionados por falhas de instrumentos e dos efeitos de incertezas do sistema. O filtro projetado é um filtro linear e invariante no tempo, mas que pode, de acordo com o autor, ser aplicado em sistemas não-lineares e variáveis no tempo. Com a finalidade de ilustrar e comprovar a estratégia de projeto do filtro estimador de estado aplicou-se o método em um reator químico com troca de calor, na qual as condições de operação e as falhas de instrumentos foram simuladas e os resultados apresentados se mostraram satisfatórios para a detecção de falhas de instrumentos. Apesar da atenção ter sido voltada para o problema de detecção de falhas de instrumentos e não para o problema de detecção de falhas do sistema de um modo geral, os autores afirmam que o filtro discutido neste trabalho está inerentemente relacionado com a estrutura do sistema e, portanto, pode ser aplicado efetivamente na detecção de falhas de sistemas.

Wang, Kuo e Hsu (1987). Apresentam uma técnica de projeto para a síntese de observadores robustos para sistemas dinâmicos lineares com parâmetros incertos. Uma aproximação foi desenvolvida para formular o problema do projeto de um observador ótimo, onde as condições necessárias e suficientes para este projeto ótimo foram apresentadas a fim de estabelecer a estabilidade do observador, sendo que o critério ótimo introduzido neste trabalho é a minimização do tamanho do erro de estimação. Um algoritmo de busca através do gradiente foi proposto a fim de se encontrar uma solução ótima para o caso, quando um parâmetro livre é incluído no procedimento de otimização. Apesar dos resultados mostrados serem para um caso particular, os autores presumiram que o observador ótimo iria também se comportar melhor do que o observador não-ótimo quando os parâmetros do sistema observado estivessem sujeitos a pequenas variações.

Ge e Fang (1987). Propuseram uma nova idéia de isolamento de defeito via observação robusta, por meio do qual uma lei de diagnose de defeito foi encontrada de forma a monitorar os componentes de um sistema. Neste mesmo trabalho, um sistema de diagnose é projetado por um procedimento sistemático, que consiste em um modelo matemático de um sistema (identificado ou teoricamente deduzido) consistindo de n componentes, os quais podem ser acoplados por estados não disponíveis, projeta-se um sistema de diagnose para monitorar o funcionamento desses componentes e detectar componentes defeituosos, enquanto nenhum conhecimento anterior em possíveis defeitos está disponível. Sendo assim, os autores encontraram uma estrutura geral de observadores de detecção a partir de uma estrutura do observador de Luenberger, e em seguida propuseram a idéia de isolamento de defeitos via observação robusta, seguida por lógica de diagnose de falhas de defeito. Os resultados das aplicações desta técnica em uma planta piloto mostraram que o uso da aproximação robusta para componentes defeituosos, os quais estão acoplados por estados não disponíveis, podem ser detectadas efetivamente.

Ge e Fang (1988). Descrevem uma nova concepção para a detecção de componentes sujeitos a falhas via Observação Robusta. Dado um modelo matemático consistindo de “ n ” componentes no qual podem ser acoplados pelos estados não estimados, determinam o projeto de sistemas para monitorar a operação destes “ n ” componentes e detecção de falhas. Para um sistema observável, alguns componentes de primeira ordem ou ordem superior podem ser monitorados para diagnose sem informação sobre possíveis modos de falhas. Devido à robustez dos observadores, os autores analisam alguns fatores como erros de linearização, erros de medida, presença de ruídos, erros numéricos, etc.

Frank e Seliger (1991). Apresentam duas aproximações para detecção e isolamento de falhas em processos mecânicos:

- a) Aproximação por redundância física (ou Hardware) que fornecia informação sobre o tempo de ocorrência, na qual a localização de falhas de instrumentos foi dada por meio de sensores redundantes;
- b) Aproximação por redundância analítica (ou Software) usada para descrever métodos de detecção de avaria de instrumento usando técnicas de processamento de dados on-line para gerar sinais redundantes a partir de um único conjunto de instrumentos. Aqui, as capacidades da tecnologia moderna de computação não foram somente utilizadas para controlar um processo, mas também para diagnose de falhas.

Porém, o trabalho dá maior ênfase na aproximação por redundância analítica para a detecção e isolamento de falhas em processos automáticos, onde os autores descreveram brevemente várias técnicas utilizadas e realizaram algumas simulações, mostrando que os desenvolvimentos destas técnicas atingiram um estágio na qual aplicações práticas devem ser realizadas a fim de que sejam aceitas na indústria.

Lee (1992). Usou o método baseado no princípio de Rayleigh e o método dos subdomínios para determinar a frequência fundamental de placas anulares trincadas.

Krawczuk (1993). Desenvolveu um elemento finito trincado, eliminando a necessidade de uma malha densa ao redor da ponta da trinca.

Chen e Patton (1996). Estudaram um filtro otimizado e robusto para problemas de diagnose de falhas em sistemas randômicos com distúrbios desconhecidos. Foi apresentado um tipo de observador, o qual poderia produzir variância mínima em sistemas com ruídos e distúrbios desconhecidos. Um teste estatístico foi aplicado para examinar o resíduo na diagnose de falhas.

Wang e Daley (1996) apresentaram uma aproximação moderna para detecção de falhas em atuadores (em sistemas dinâmicos determinísticos conhecidos), usando uma técnica ajustada de observadores. Foram considerados sistemas com incertezas nos modelos e sistemas com perturbações aleatórias. Um algoritmo de diagnose ajustado foi desenvolvido para a detecção das falhas.

Yu e Shields (1996). Propuseram um observador para detecção de falhas em sistemas bidimensionais com entradas desconhecidas. O vetor residual no projeto do observador estava relacionado com as entradas desconhecidas e sob certas condições, tornava-se sensível a todas as falhas. Uma aplicação a um sistema de direção hidráulica foi mostrada.

Hou e Patton (1998). Discutiram os problemas de observabilidade e reconstrução das entradas do sistema, sendo este linear e invariante no tempo. Uma aproximação simples para o projeto de reconstrução das entradas foi apresentada.

Melo (1998). Desenvolveu uma metodologia para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando observadores de estado de ordem reduzida. Mostrou como se pode realizar a reconstrução de estados não medidos. Através de observadores de estado robustos proporcionou a localização de falhas, com um banco de vários observadores de estado robustos a

cada parâmetro do sistema, provou que é possível quantificar a falha no sistema. Apresentou simulações computacionais e experiências laboratoriais para a validação das teorias apresentadas.

Shen e Hsu (1998). Descreveram que a diagnose robusta tinha se destacado em aplicações reais. Além disso, o não conhecimento das entradas na detecção de falhas por observadores robustos (UIFDO) era de grande interesse. Apresentaram uma experiência real realizada em um motor automotivo.

Krawczuk (2001). Desenvolveu um elemento finito com uma trinca simples, sem propagação e aberta, levando em consideração a influência da zona plástica na frente da ponta da trinca, para a obtenção da matriz de flexibilidade do elemento.

Chiesa (2002). Desenvolveu superfícies de campo unívocas que contivessem uma informação mais exata sobre o comportamento geral de espécimes de trincas de bordas simples (SEC – Simple Edge Cracking) rasas como também profundas. Estas superfícies de campo foram comparadas com a forma aproximada quadrática de Rice e com as superfícies de rendimento derivadas da linha de campo de deslizamento. Uma das funções de campo propostas foi, além disso, implementada na linha de mola inelástica, a fim melhorar a exatidão da solução finita do elemento da linha de mola para trincas rasas. A implementação do esquema inverso da integração de Euler na integração inelástica por pontos do elemento da linha de mola foi apresentada.

Marano (2002). Utilizando observadores de estado como ferramenta, desenvolveu uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas discretos com variações de parâmetros.

Lemos (2004). Apresentou a metodologia dos observadores de estado para a detecção e localização de falhas em sistemas rotativos, considerando as fundações dos mesmos. Segundo Lemos, a metodologia dos observadores de estado poderia reconstruir os estados não medidos ou estimar valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Desta forma, falhas nestes pontos poderiam ser detectadas sem que houvesse a necessidade da realização de medidas diretas.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Desde que a teoria do observador de estado foi introduzida por Luenberger (1964), observa-se a partir da revisão levantada neste trabalho que muitas metodologias foram propostas para o monitoramento de máquinas utilizando a técnica dos observadores de estado (GE; FANG, 1987). Porém, a maioria das metodologias utilizando observadores de estado é destinada a resolver problemas de controle e detecção de possíveis falhas em sensores e instrumentos (CLARK, 1978, WATANABE; HIMMELBLAU, 1982). Além disso, muitos trabalhos são teóricos, sem nenhuma comprovação experimental das metodologias desenvolvidas (FRANK; SELIGER, 1991).

Devido à grande necessidade das indústrias em manter seus equipamentos em funcionamento sem paradas abruptas, nota-se, ultimamente, uma evolução no desenvolvimento

de novas técnicas de detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos submetidos a carregamentos dinâmicos.

Para garantir este funcionamento com segurança, os sistemas mecânicos devem ser supervisionados, caso contrário, alguns distúrbios de operação podem levar a uma deterioração do desempenho do sistema ou até mesmo a situações perigosas.

Embora as ferramentas para análise teórica dos sistemas dinâmicos atuais sejam sofisticadas, existe uma grande dificuldade na predição do comportamento dinâmico de certos componentes estruturais e na diagnose de falhas, seja pela inexatidão do modelo teórico ou mesmo pela dificuldade de medição de algumas variáveis de estado.

A técnica de detecção de falhas utilizando observadores de estado pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Neste caso, podem-se detectar falhas nestes pontos sem o conhecimento de suas medidas, podendo monitorá-los através da reconstrução de seus estados. Esta técnica consiste em desenvolver um modelo para o sistema em análise e comparar a saída estimada com a saída medida.

Nesta dissertação o objetivo é utilizar a metodologia dos observadores de estado combinada com um modelo de elemento finito de placa com trinca, para construir um banco de observadores capaz detectar e localizar falhas em sistemas contínuos, bem como monitorar o crescimento dessa falha. Deste modo, foi considerado apenas o caso em que a trinca está em processo de abertura, uma vez que a placa trincada quando submetida a esforços alternados ou a uma condição inicial, provoca aberturas e fechamentos dessas falhas, provocando alterações na matriz de rigidez do elemento somente quando a trinca está aberta.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para o estudo dos observadores de estado um conhecimento prévio da teoria dos sistemas de controle é necessário. Neste primeiro momento será feito um breve levantamento histórico desta teoria, onde os principais conceitos envolvidos são enfatizados.

De acordo com Ogata (1998), James Watt no século XVIII realizou o primeiro trabalho significativo em controle automático. Construindo um controlador centrífugo que podia controlar a velocidade de uma máquina a vapor. Destaca-se ainda Minorsky em 1922 que trabalhou na construção de controladores automáticos para pilotar navios e mostrando como poderia, através de equações diferenciais, determinar sua estabilidade. Cita ainda Hazen e Nyquist por realizarem trabalhos importantes nos primeiros estágios de desenvolvimento na teoria de controle.

Durante a década de 1940, os engenheiros podiam, através dos métodos de respostas em frequência, projetar sistema de controles utilizando malhas fechadas, onde os requisitos de desempenho eram satisfeitos. Entre as décadas de 40 e 50 o método de posicionamento das raízes foi completamente desenvolvido por Evans, fortalecendo a análise de controladores quanto aos possíveis ganhos e estabilidade dos mesmos.

A teoria de controle desenvolvida até o final dos anos 50 era classificada como teoria de controle convencional ou clássica, onde eram tratados somente os sistemas com uma única entrada e uma única saída, o que a tornava insuficiente para lidar com sistemas de entradas e saídas múltiplas.

Portanto, a partir dos anos 60, com o advento dos computadores digitais, foi possível a análise de sistemas mais complexos e com multivariáveis. Foi o início do desenvolvimento da moderna teoria de controle baseada nas técnicas de análise e síntese através de variáveis de estado. O objetivo do desenvolvimento dessa teoria era de tratar com a complexidade crescente dos sistemas modernos e atender às exigências rigorosas quanto a peso, exatidão e custos de projetos relativos às aplicações militares, espaciais e industriais.

Segundo Meirovitch (1990), o controle moderno é fundamentalmente uma aproximação no domínio do tempo, onde se baseia na descrição de espaço de estados do comportamento dos sistemas dinâmicos.

Há uma diferença entre as teorias de controle moderno e as teorias convencionais. A primeira trata de sistemas com múltiplas entradas e saídas, lineares ou não lineares, variantes ou invariantes no tempo. A última trata apenas dos sistemas mono-variáveis (uma única entrada e uma única saída), lineares e invariantes no tempo.

2.1 SISTEMAS DE CONTROLE

O problema de controle de sistemas dinâmicos hoje é uma área bastante interessante e atrativa para pesquisas. Durante as duas últimas décadas, grandes avanços importantes foram feitos nesta área.

O principal objetivo em um projeto de controle é determinar uma lei para o sinal de entrada a um sistema dinâmico (planta) que permita que este se comporte da maneira desejada guardando certas propriedades tais como estabilidade, desempenho e robustez.

Estabilidade se refere à propriedade onde, para todo sinal de amplitude limitada aplicado em sua entrada, o sinal de saída é também limitado. Em algumas ocasiões esta propriedade já é própria do sistema sem controle. Neste caso, a missão do controle é melhorar o desempenho.

Sistemas com um bom **desempenho** significa ter uma boa velocidade de resposta, baixo erro entre a resposta desejada e a resposta obtida e é também controlado facilmente (com baixo sinal de controle). Essas duas propriedades são as mais procuradas num projeto de controle porém, há uma terceira que é fundamental: a robustez.

Robustez é à capacidade de um sistema de manter suas propriedades (estabilidade e desempenho) frente a incertezas tais como: erros no modelo, distúrbios (entradas não conhecidas) e ruídos no sensor.

Na terminologia de análise de sistemas, os sistemas são comumente referidos como plantas ou processos. A excitação é conhecida como sinal de entrada ou apenas entrada. A resposta é conhecida como sinal de saída ou simplesmente saída.

Em muitas aplicações é preciso assegurar que o sistema tenha um desempenho desejado. Assim, é preciso que se faça o projeto de um sistema de controle. Portanto, em sistemas controlados o objetivo é conseguir uma resposta satisfatória através do uso de um controlador cuja saída, chamada de sinal de controle, atua como entrada para o sistema a controlar.

Se o modelo matemático do sistema é completamente conhecido, pode-se saber qual é a saída que uma determinada entrada provocará no sistema. Desta forma a entrada, ou sinal de controle, poderá ser encontrada, a qual produzirá uma saída desejada. Este tipo de controle é chamado de controle em malha aberta (figura 2.1), pois segundo este esquema a entrada do sistema não depende da resposta que ela provoca, assim qualquer perturbação não esperada conduzirá a resultados inesperados.

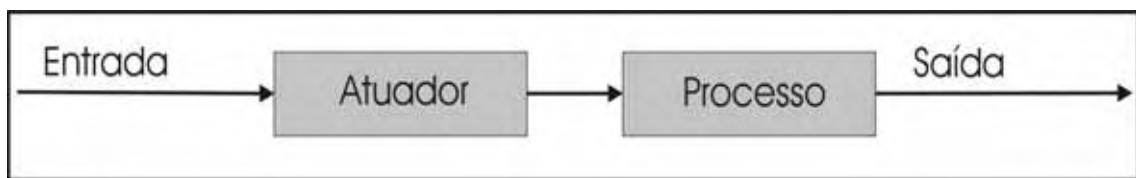


Figura 2.1 - Sistema de controle com malha aberta

Um sistema dinâmico pode ser mais efetivamente controlado através do chamado controle por realimentação ou controle em malha fechada, onde o sinal de controle depende do erro entre a resposta real do sistema e a resposta desejada. Este erro serve como um fator de correção no sistema de controle. Na figura 2.2 é mostrado um esquema básico de sistema de controle por realimentação.

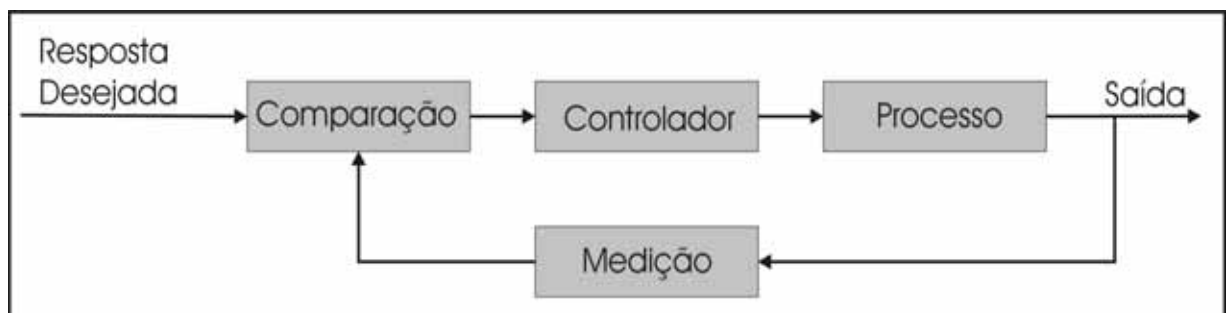


Figura 2.2 – Sistema de controle com malha fechada e retroação

2.2 REPRESENTAÇÃO EM ESPAÇO DE ESTADO

Um conjunto de variáveis tais que o conhecimento dos valores destas variáveis e das funções de entrada, com as equações que descrevem a dinâmica, que forneça os estados futuros e a saída futura do sistema é conhecido como estado de um sistema (DORF; BISHOP, 1980). Esse estado de um sistema é amplamente utilizado nos projetos de um sistema de controle no domínio do tempo.

Num instante t , pode-se descrever o estado de um sistema em termos de um conjunto de valores das variáveis de estado $[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ de um sistema.

Um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem escrita em função das variáveis de estado descrevem o estado de um sistema, equação (2.1), onde $\{\dot{x}(t)\}$ é dado por (2.2)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + \dots + a_{1n}x_n(t) + b_{11}u_1(t) + \dots + b_{1m}u_m(t) \\ \dot{x}_2(t) &= a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + \dots + a_{2n}x_n(t) + b_{21}u_1(t) + \dots + b_{2m}u_m(t) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n(t) &= a_{n1}x_1(t) + a_{n2}x_2(t) + \dots + a_{nn}x_n(t) + b_{n1}u_1(t) + \dots + b_{nm}u_m(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\{\dot{x}(t)\} = dx/dt \quad (2.2)$$

Pode-se apresentar esse sistema de equações diferenciais na forma matricial de acordo com a equação (2.3), onde o vetor de estado $\{x(t)\}$ é dado por (2.4) sendo $\{u(t)\}$ o vetor dos sinais de entrada.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \Lambda & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \Lambda & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \Lambda & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \Lambda & b_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & \Lambda & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Na qual

$$\{x(t)\} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Assim, a equação de estado pode ser representada de acordo com a equação (2.5), onde [A] é uma matriz quadrada n x n chamada de matriz de estado ou matriz dinâmica e [B] é uma matriz n x m, chamada de matriz de entradas.

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2.5)$$

Podem-se relacionar as saídas de um sistema linear com as variáveis de estado e com os sinais de entrada através da equação de saída (2.6), onde {y(t)} é o conjunto dos sinais de saída, [C] é a matriz de saída e [D] é a matriz de transmissão direta.

$$\{y(t)\} = [C]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (2.6)$$

Neste estudo será considerado [D] = 0 devido às características do sistema.

2.3 CONTROLABILIDADE E OBSERVABILIDADE

Controlabilidade e observabilidade são conceitos importantes no estudo de controle e na estimação de sistemas dinâmicos. O conceito de controlabilidade está relacionado à existência de

uma possível lei de controle. Isto porque nem sempre é possível encontrar uma lei em que o sistema em malha fechada seja estável com relação a uma desejada trajetória. De maneira similar, o conceito de observabilidade está relacionado à existência de um algoritmo possível para estimar as variáveis de estado a partir das variáveis disponíveis.

Um sistema é dito ser controlável no instante t_0 se for possível por meio de uma entrada $\{u(t)\}$ não restrita, transferir o sistema do estado inicial $\{x(t_0)\}$ para qualquer outro estado $\{x(t_f)\}$ em um tempo finito $t_f > t_0$. Além disso, se o sistema for controlável em qualquer instante t_0 e estado inicial $\{x(t_0)\}$, então o sistema é dito ser completamente controlável (MEIROVITCH, 1990).

Um vetor de excitação que não apresenta limitação quanto a sua amplitude é dito ser não restrito. Assim, pode-se concluir que cada uma das variáveis de estado na equação (2.7) pode ser influenciada por $\{u(t)\}$, onde $[\Phi]$ é a matriz de transição de estado do sistema e τ é o período.

$$\{x(t)\} = [\Phi(t - t_0)]\{x(t_0)\} + \int_0^t [\Phi(t - \tau)][B]\{u(\tau)\}d\tau \quad (2.7)$$

Isto exige que:

$$\text{Posto } [M] = \text{Posto de } [[B] \quad [A][B] \dots \dots \dots [A]_{n-1}[B]] = n \quad (2.8)$$

Onde o posto da matriz $[M]$ é dado pela maior ordem possível das submatrizes de $[M]$ com determinantes diferentes de zero.

Da equação (2.8) a matriz $[A]$ é a matriz dinâmica do sistema, $[B]$ é a matriz de entradas do sistema e n é a ordem do sistema.

Um sistema é dito ser observável no instante t_0 se e somente se for possível determinar o estado inicial $\{x(t_0)\}$ a partir da resposta $\{y(t)\}$ do sistema durante um intervalo de tempo $t_0 \leq t \leq t_f$ (MEIROVITCH, 1990). Isto implica que todas as variáveis de $\{x(t)\}$ influenciam a resposta $\{y(t)\}$, equação (2.3) onde $[C_{me}]$ é a matriz de medidas e o estado inicial $\{x(t_0)\}$ é o resultado das excitações de controle aplicadas antes de t_0 .

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \{x(t)\} = [C_{me}] [\Phi(t - t_0)] \{x(t_0)\} + [C_{me}] \int_{t_0}^t [\Phi(t - \tau)] [B] \{u(\tau)\} d\tau \quad (2.9)$$

Para determinar se um sistema é controlável e observável existem diferentes critérios, tais como, os testes de posto de Popov, Belevitch e Hautus (Testes PBH) que avaliam a controlabilidade e observabilidade modal do sistema (VALER, 1999).

Se pelo menos uma das seguintes condições é satisfeita, o sistema é completamente observável.

2.3.1 Matriz de observabilidade

Um sistema linear com r saídas é completamente observável se e somente se a matriz de observabilidade, equação (2.10), possui rank n .

$$[O] = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ M \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.3.2 A Matriz Graminiano de observabilidade W_0

O teste (PBH) citado anteriormente funciona adequadamente para sistemas com dimensões pequenas. Para sistemas com ordens superiores, recorre-se à formulação em termos de gramianos de observabilidade, (GAWRONSKI, 1998), equação (2.11), sendo definido positiva para todo $t > 0$.

$$[W_0] = \int_0^{\infty} e^{[A]^T \lambda} [C_{me}]^T [C_{me}] e^{[A]\lambda} d\lambda \quad (2.11)$$

A figura 2.3 apresenta os conceitos de observabilidade e controlabilidade, onde:

S_{co} = Subsistema completamente controlável e observável;

S_o = Subsistema completamente observável e não controlável;

S_c = Subsistema completamente controlável e não-observável;

S_u = Subsistema não-controlável e não-observável.

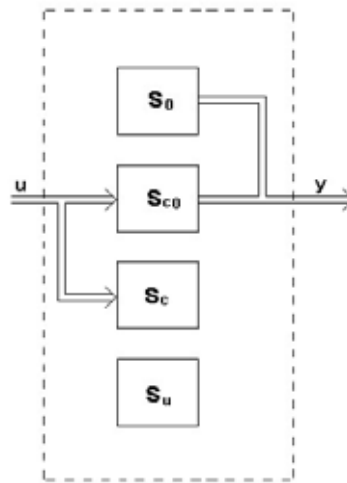


Figura 2.3 - Divisões possíveis de um sistema

2.4 METODOLOGIA DOS OBSERVADORES DE ESTADO

Sistemas dinâmicos desenvolvidos no domínio do tempo com os métodos modernos disponíveis, apresentam características superiores aos métodos no domínio da frequência, sendo uma característica comum a suposição de que o vetor de estado completo está disponível para realimentação, mas apenas quando a dinâmica do sistema que se quer controlar é descrita com um pequeno número de equações diferenciais. Assim, todas as variáveis de estado devem ser medidas em tempo real e implementadas na lei de controle. Entretanto, se o número de variáveis de estado é grande, a quantidade de sensores também é, inviabilizando a sua implementação.

Em situações práticas, o que ocorre é ter disponível um número pequeno de variáveis. Assim, o observador provê uma solução prática e interessante para o problema de se obter o vetor de estado completo a partir das componentes que estão disponíveis.

O objetivo do observador é a construção de um vetor de estado a partir das variáveis disponíveis do sistema o qual se aproxima assintoticamente do vetor de estado real, o qual é inacessível. Deste modo, o algoritmo de controle é dividido em duas partes. A primeira supõe que todas as variáveis de estado são mensuráveis. A segunda é o projeto do observador de estado. Essa propriedade de poder separar o projeto de controle por realimentação em duas partes é conhecida como Princípio da Separação, apresentando uma rigorosa validade para sistemas lineares e para uma classe limitada de sistemas não lineares.

2.4.1 Conceito de Observador de Estado (Lemos 2004)

Um observador de estado para um sistema dinâmico original com estado $\{x(t)\}$, saída $\{y(t)\}$ e entrada $\{u(t)\}$ é um sistema dinâmico auxiliar. Ou seja, uma cópia do sistema original que possui a mesma entrada deste sistema e que tem a capacidade de estimar os estados desconhecidos do sistema a partir de estados conhecidos. Na figura (2.4) tem-se esta definição, onde $[L]$ é a matriz do Observador de Estado.

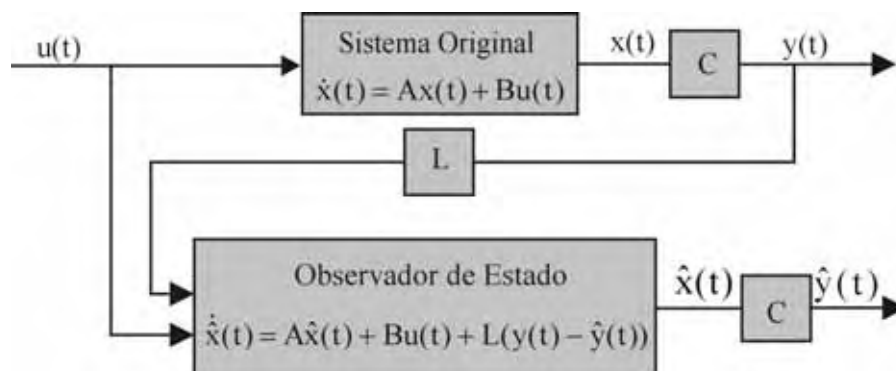


Figura 2.4 – Definição de Observador de Estado

A construção deste observador só é possível se o sistema original é observável ou pelo menos detectável. Diferente do sistema $\{x(t)\}$, que é em geral algo físico, o sistema $\{\hat{x}(t)\}$ é abstrato e é implementado por um programa de computador.

2.4.2 Observador Trivial (Lemos 2004)

Uma solução trivial para o problema de estimação de estado de um sistema é construir uma cópia do sistema original. Por exemplo, se o sistema original é dado por (2.12), o observador deveria ser dado por (2.13).

$$\{x(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2.12)$$

$$\{\hat{x}(t)\} = [A]\{\hat{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2.13)$$

onde $[A] \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $[B] \in \mathbb{R}^{n \times p}$, sendo n a ordem do sistema, p o número de entradas $\{u(t)\}$

Se $\{x(0)\} = \{\hat{x}(0)\}$, o modelo seguirá exatamente o sistema original. O problema com esta técnica é que o erro não reduz rapidamente, equação (2.14).

$$\{[\hat{x}(t)] - [x(t)]\} = [A]\{[\hat{x}(t)] - [x(t)]\} \quad (2.14)$$

Através da equação (2.14), verifica-se que o erro somente tende a zero se o sistema original é assintoticamente estável e na velocidade determinada pelos autovalores do sistema original, limitando seriamente a metodologia empregada (MELO, 1998).

2.4.3 Observadores do tipo Identidade (Lemos 2004)

Para descrição do observador identidade, considera-se o sistema linear e invariante no tempo apresentado pela equação (2.12).

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2.15)$$

Definindo as saídas por:

$$\{y(t)\} = [C_{me}]\{x(t)\} \quad (2.16)$$

onde $[C_{me}] \in \mathbb{R}^{k \times n}$, sendo n a ordem do sistema e k o número de saídas de $\{y(t)\}$.

Para um sistema assumido como totalmente observável, seu observador é dado pelas equações (2.17) e (2.18), onde $[L]$ representa a matriz do Observador de Estado.

$$\{\dot{\hat{x}}(t)\} = [A]\{\hat{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L](\{y(t)\} - \hat{y}(t)) \quad (2.17)$$

$$\{\hat{y}(t)\} = [C_{me}]\{\hat{x}(t)\} \quad (2.18)$$

O erro de estimação de estado é dado pela equação (2.19) e o erro de estimação na saída (resíduo) é dado pela equação (2.20).

$$\{e(t)\} = \{\hat{x}(t)\} - \{x(t)\} \quad (2.19)$$

$$\{\varepsilon(t)\} = \{\hat{y}(t)\} - \{y(t)\} \quad (2.20)$$

Substituindo as equações (2.15), (2.16), (2.17) e (2.18) em (2.19) e (2.20) obtém-se as equações (2.21) e (2.22), onde $\{\dot{e}(t)\} = d\{e(t)\}/dt$ representa a evolução do erro do observador.

$$\{\dot{e}(t)\} = ([A] - [L][C_{me}])\{e(t)\} \quad (2.21)$$

$$\{\varepsilon(t)\} = [C_{me}]\{e(t)\} \quad (2.22)$$

Os autovalores da matriz do observador $([A] - [L][C_{me}])$ são usualmente escolhidos à esquerda dos autovalores da matriz dinâmica $[A]$. Isto garante a estabilidade do sistema e sua rápida convergência.

2.4.4 Observador de Ordem Reduzida (Lemos 2004)

Pode-se verificar que o observador identidade descrito anteriormente apresenta um certo grau de redundância. Ele reconstrói todas as n variáveis do sistema original, mesmo que algumas

delas já sejam conhecidas. O objetivo é construir um observador que tenha $(n - k)$ variáveis de estado, onde k é o número de medidas.

Considera-se novamente o sistema totalmente observável apresentado pelas equações (2.23) e (2.24):

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2.23)$$

$$\{y(t)\} = [C_{me}]\{x(t)\} \quad (2.24)$$

Assume-se agora que a matriz de medidas $[C_{me}]$ de ordem $(k \times n)$ tem posto k , correspondendo à condição de que k medidas são linearmente independentes.

Seja $[V]$ uma matriz de ordem $\{(n - k) \times (n)\}$, onde k é a dimensão de $\{y(t)\}$ e

$$[PT] = \begin{bmatrix} [V] \\ [C_{me}] \end{bmatrix} \text{ não singular.}$$

Introduzindo uma mudança de variáveis, tem-se:

$$\{\alpha(t)\} = [PT] \{x(t)\} \quad (2.25)$$

Este novo vetor de estado $\{\alpha(t)\}$ pode ser subdividido como:

$$\{\alpha(t)\} = \begin{bmatrix} \{w(t)\} \\ \{y(t)\} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

onde $\{w(t)\}$ é de dimensão $(n - k)$ e $\{y(t)\}$ é o vetor de saída com dimensão (k) .

Após a transformação de variável, o sistema de matrizes pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \{w(t)\} \\ \{y(t)\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{11}] & [A_{12}] \\ [A_{21}] & [A_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{w(t)\} \\ \{y(t)\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B]_1 \\ [B]_2 \end{bmatrix} \{u(t)\} \quad (2.27)$$

Pode-se extrair deste sistema, um subsistema de ordem $(n - k)$ que tem como entradas as quantidades conhecidas $\{u(t)\}$ e $\{y(t)\}$. Neste caso, um subsistema com características polinomiais arbitradas pode ser selecionado, multiplicando-se a parte inferior da equação (2.27) por uma matriz arbitrária $[E]$ de ordem $[(n - k) \times k]$ e subtraindo da parte superior:

$$\begin{aligned} \{w(t)\} - [E] \{y(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{w(t)\} + \\ &+ ([A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B]_1 - [E] [B]_2) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.28)$$

A equação (2.28) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \{w(t)\} - [E] \{y(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) (\{w(t)\} - [E] \{y(t)\}) + \\ &+ ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B]_1 - [E] [B]_2) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Chamando $\{g(t)\} = \{w(t)\} - [E] \{y(t)\}$, tem-se:

$$\begin{aligned} \{g(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{g(t)\} + \\ &+ ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B]_1 - [E] [B]_2) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Nesta equação $\{g(t)\}$ é desconhecido, enquanto $\{y(t)\}$ e $\{u(t)\}$ caracterizam as entradas conhecidas. O observador de estado de dimensão $(n - k)$ para a equação (2.28) é formado através da equação (2.23). Tem-se, portanto:

$$\begin{aligned} \{\bar{x}(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{\bar{x}(t)\} + \\ &+ ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B]_1 - [E] [B]_2) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Subtraindo a equação (2.31) de (2.30), tem-se:

$$\{\bar{x}(t)\} - \{g(t)\} = ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) (\{\bar{x}(t)\} - \{g(t)\}) \quad (2.32)$$

O estado $\{\bar{x}(t)\}$ do Observador tende a $\{g(t)\}$ na velocidade determinada pelos autovalores da matriz $([A_{11}] - [E] [A_{21}])$.

A partir do vetor de estado $\{\bar{x}(t)\}$ do observador, o estado original da equação (2.23) é estimado por $\{\bar{w}(t)\}$ e $\{\bar{y}(t)\}$, determinados por:

$$\{\bar{w}(t)\} = \{\bar{x}(t)\} + [E] \{y(t)\} \quad (2.33)$$

$$\{\bar{y}(t)\} = \{y(t)\} \quad (2.34)$$

O vetor de estado $\{\bar{x}(t)\}$, juntamente com as medidas originais de $\{y(t)\}$ fornecem informações suficientes para construção de uma aproximação para o estado do sistema original.

2.4.5 Observadores de Estado Global e Robusto (Lemos 2004)

A análise teórica de cálculo, tanto para o observador global quanto para o observador robusto dedicado a um parâmetro sujeito à falha, é a mesma. A diferença básica entre os dois tipos de observadores ocorre na montagem da matriz dinâmica do sistema. A matriz dinâmica do observador global é uma cópia fiel do sistema original, e analisa todo o sistema detectando possíveis falhas no mesmo. A matriz dinâmica de cada observador robusto é montada considerando uma possível falha no sistema, podendo detectar a falha caso esta ocorra no parâmetro para o qual ele foi projetado. Deste modo, a montagem de um banco de observadores robustos para cada parâmetro do sistema, torna possível um bom diagnóstico e localização do problema.

Quando o sistema está funcionando adequadamente, sem indícios de falhas, o observador de estado global responde exatamente como o sinal do sistema real. O observador de estado global é um conjunto de equações diferenciais ordinárias.

Será apresentada uma seqüência preliminar de etapas através de um exemplo, utilizando-se o sistema mecânico de 2 graus de liberdade apresentado na Figura 2.5, somente para visualização da montagem do observador robusto.

O sistema possui as seguintes matrizes de massa [M], rigidez [K] e amortecimento [C]:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix}, \text{ e } [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix}$$

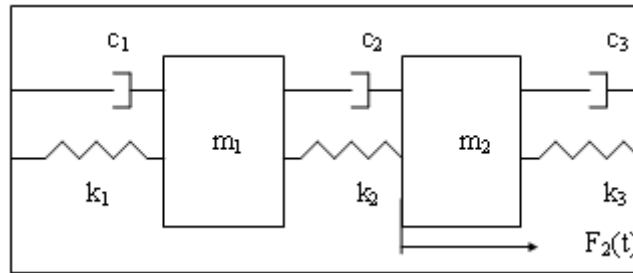


Figura 2.5 - Sistema de dois graus de liberdade

A matriz dinâmica do sistema fica:

$$[A]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & M & [J]_{n \times n} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ -([M]^{-1}[K])_{n \times n} & M & -([M]^{-1}[C])_{n \times n} \end{bmatrix} \text{ e } [B]_{2n \times n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} \\ [M]^{-1}_{n \times n} \end{bmatrix}.$$

Tem-se, portanto:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(k_1 + k_2)/m_1 & k_2/m_1 & -(c_1 + c_2)/m_1 & c_2/m_1 \\ k_2/m_2 & -(k_2 + k_3)/m_2 & c_2/m_2 & -(c_2 + c_3)/m_2 \end{bmatrix}$$

Esta matriz dinâmica $[A]$ é utilizada no projeto do observador de estado global, que somente detecta possíveis falhas no sistema a ser analisado, sendo que no projeto dos observadores de estado robustos, exclui-se estes parâmetros sujeitos a falhas da matriz dinâmica. Supondo-se que a rigidez k_1 possa falhar durante o processo, a matriz dinâmica utilizada para o projeto do observador robusto não conterá o parâmetro k_1 . Desta forma, tem-se:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(k_2)/m_1 & k_2/m_1 & -(c_1+c_2)/m_1 & c_2/m_1 \\ k_2/m_2 & -(k_2+k_3)/m_2 & c_2/m_2 & -(c_2+c_3)/m_2 \end{bmatrix}$$

Verifica-se que o parâmetro k_1 já não faz parte da matriz dinâmica $[A_1]$.

O observador de estado robusto a k_1 é projetado e otimizado através da matriz dinâmica $[A_1]$ e a matriz de medidas é $[C_{me}] = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, medindo-se somente $x_1(t)$ e reconstruindo $x_2(t)$.

Isto deve ser confirmado através do “rank” da matriz de observabilidade, que deve resultar em um valor igual a ordem do sistema. Se o observador de estado é de ordem reduzida, o “rank” deve resultar em um valor igual a ordem do sistema menos os valores medidos.

A seguir são calculados os autovalores da matriz dinâmica $[A_1]$, pois os autovalores impostos no projeto dos observadores de estado devem estar a esquerda dos autovalores de $[A_1]$ para garantir estabilidade e rápida convergência. Deve-se analisar o autovalor de maior parte real negativa, em módulo, e utilizar autovalores a partir deste valor, pois se os autovalores são impostos aleatoriamente e com valores elevados, podem resultar em problemas de ordem numérica na resolução do sistema de equações diferenciais.

Pelas equações (2.21) e (2.22), verifica-se a necessidade do cálculo da matriz $[L]$ do observador robusto ao parâmetro k_1 .

O resultado final é um conjunto de equações diferenciais ordinárias:

$$\{\dot{\bar{x}}(t)\} = [A] \{\bar{x}(t)\} + [B] \{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \{\bar{y}(t)\}) \quad (2.35)$$

e

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}] \{\bar{x}(t)\} \quad (2.36)$$

Neste momento calcula-se o índice de performance, que analisa de forma quantitativa o condicionamento da matriz do observador ($[A] - [L][C_{me}]$) para verificação da necessidade ou não da realização de um novo projeto.

2.5 PROJETO DOS OBSERVADORES DE ESTADO

Quando um determinado componente começa a falhar em um sistema mecânico, um observador de estado montado para este sistema é capaz de sentir a influência desta falha de maneira bastante rápida, devido a alta sensibilidade do observador a qualquer irregularidade que começar a surgir no sistema.

O observador de estado é um conjunto de equações diferenciais ordinárias que apresenta a mesma resposta do sistema real, partindo do princípio de que este esteja funcionando de maneira adequada.

O objetivo é utilizar este efeito sentido pelo observador de estado para detectar e localizar uma possível falha em um sistema mecânico com variações de parâmetros.

Partindo desta proposição, o projeto dos observadores de estado é dividido em duas partes:

- ✓ Montagem do Observador Global;
- ✓ Montagem dos Observadores Robustos aos possíveis parâmetros sujeitos a falhas.

Na montagem do observador global da primeira etapa, utiliza-se a mesma matriz dinâmica do sistema mecânico em questão. Deste modo, quando o sistema está funcionando adequadamente sem indícios de falhas, o observador global responderá exatamente como o sistema real. Caso contrário, a resposta do observador não será igual, detectando assim uma possível falha ou irregularidade no sistema.

De acordo com Clark (1978) e Melo (1998), após haver descartado a existência de falhas nos parâmetros físicos do sistema através dos observadores robustos, este observador também pode ser utilizado para a verificação de possíveis falhas em sensores.

Na segunda etapa, antes da montagem dos observadores robustos aos possíveis parâmetros do sistema sujeitos a falhas, de cada observador robusto é retirado o parâmetro sujeito à falha ou uma variação percentual de perda deste parâmetro. Assim, a resposta do observador robusto que se aproximar da resposta do sistema com indício de falha será o observador responsável pela localização desta possível falha do sistema.

Ainda existe a possibilidade de um ou mais parâmetros falharem ao mesmo tempo. Neste caso, a solução, de acordo com Melo (1998), seria projetar observadores de estado robustos a todos os parâmetros sujeitos a falhas.

Na figura 2.6, apresenta-se o esquema montado para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros utilizando a técnica dos observadores de estado. Este sistema de observação é composto por um sistema real, um vetor força de excitação $\{u(t)\}$, um vetor resposta do sistema $\{y(t)\}$, um banco de observadores, uma unidade de decisão lógica e um sistema de alarme.

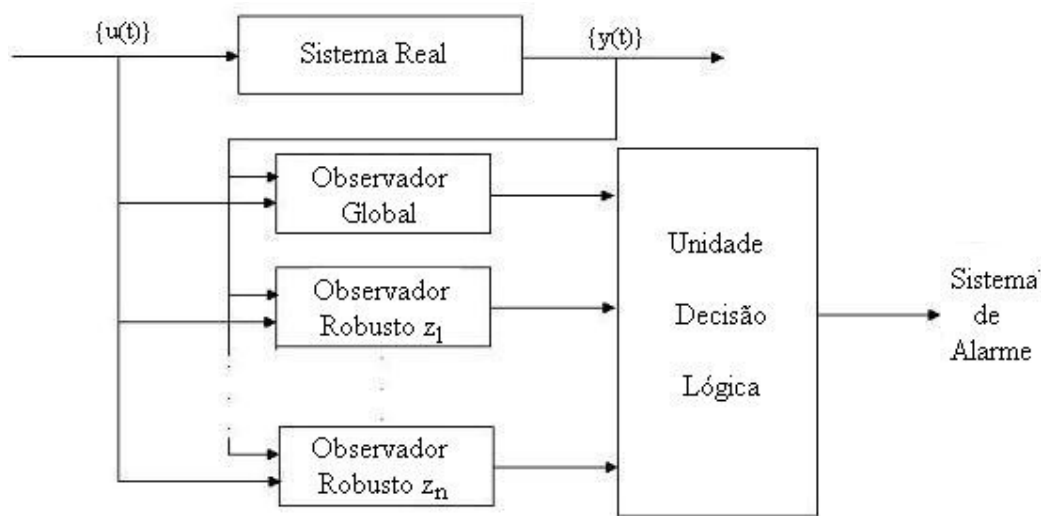


Figura 2.6 - Sistema de Observação, Marano (2002)

O banco de observadores é composto pelo observador global e pelos observadores robustos (sujeitos a falhas z_1, \dots, z_n). Tanto o observador global quanto os observadores robustos recebem os valores da excitação e da resposta do sistema real. A unidade de decisão lógica coleta e analisa a diferença entre a resposta do sistema real e dos observadores de estado montados, sendo seu objetivo detectar e localizar falhas ou irregularidades no sistema.

Esta unidade analisa também a tendência da progressão de possíveis falhas do sistema, e aciona, quando necessário, um sistema de alarme. Este sistema de alarme pode estar pronto para ser acionado quando ocorrer uma variação percentual em um determinado parâmetro.

Em 1984, Janssen e Frank basearam-se numa idéia semelhante à apresentada aqui, sendo que eles desenvolveram um banco de observadores composto pelo observador global e pelos observadores locais com o propósito de detectar e isolar sensores defeituosos em um sistema mecânico.

Neste trabalho utiliza-se a técnica dos observadores de estado para identificar e localizar a presença de trincas em estruturas dinâmicas. Na metodologia desenvolvida, o programa detecta e localiza a ocorrência de duas ou mais trincas simultâneas, desde que sejam projetados os observadores de estado adequado a esta finalidade.

2.6 ELEMENTO FINITO DE PLACA COM TRINCA

Como nas simulações se utilizou o método dos elementos finitos, os testes foram realizados em uma placa engastada submetida às trincas. A seguir, é apresentada a metodologia para obtenção do elemento finito de placa trincado, utilizado para a discretização do sistema.

2.6.1 Matriz de Rigidez

Um elemento finito retangular com uma trinca central, com 4 nós e 3 graus de liberdade, duas rotações e um deslocamento, é mostrado na figura 2.7. As tensões, normal e de cisalhamento, são assumidas como sendo constantes nesse elemento. Os nós do elemento estão sujeitos as forças nodais S_1 - S_{12} , as quais são linearmente dependentes.

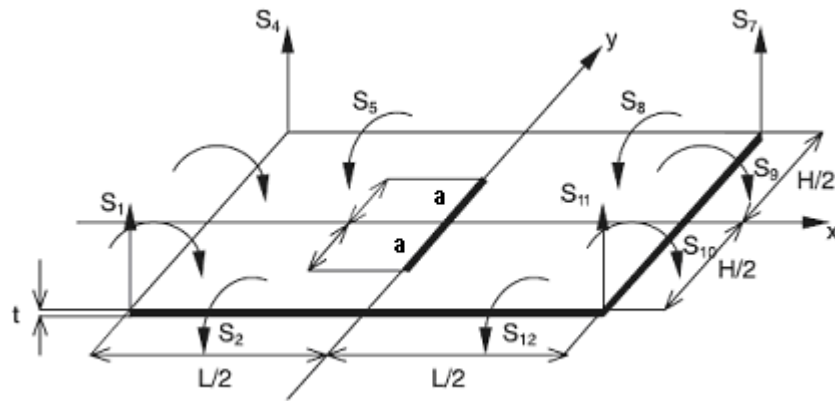


Figura 2.7 – Elemento de placa com uma trinca central, com sistema de forças nodais dependentes.

Usando as equações de equilíbrio no nós, essas forças podem ser expressas por um sistema de 9 forças nodais independentes F_1 - F_9 , conforme mostra a figura 2.8.

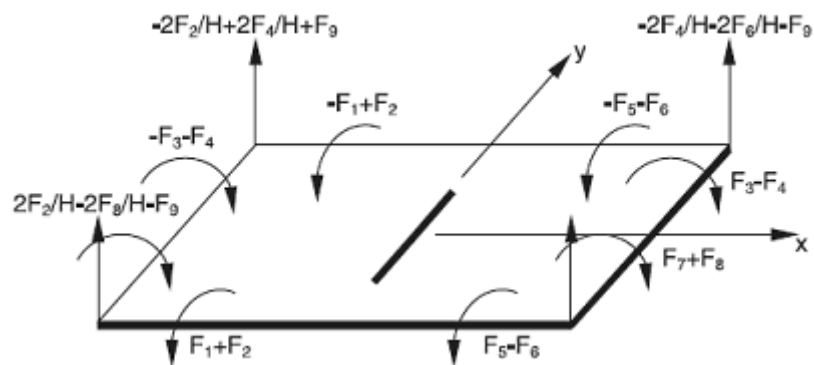


Figura 2.8 – Sistema de forças nodais independentes.

A matriz de rigidez K_c do elemento analisado pode ser escrita da seguinte forma:

$$K_c = TC^{-1}T^T \quad (2.37)$$

onde $[C]^l$ representa a inversa da soma da matriz de flexibilidade do elemento não trincado $[C^0]$ com a matriz de flexibilidade do elemento com a presença da trinca $[C^1]$. A matriz $[T]$ transforma as forças nodais $S_1 - S_{12}$ para as forças nodais independentes $F_1 - F_9$, sendo da seguinte forma:

$$[T] = \begin{bmatrix} 0 & 2/H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2/L & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -2/H & 0 & 2/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2/L & 0 & 2/H & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2/H & 0 & 2/L & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

onde H , L e t são as dimensões do elemento finito de placa mostrado na figura 2.7.

2.6.1.1 Matriz de flexibilidade do elemento sem presença de trinca

A matriz de flexibilidade do elemento analisado sem a presença de trinca é dada da seguinte forma:

Para tensões planas, a energia de deformação do elemento considerado pode ser escrita da seguinte forma:

$$U^1 = \frac{1}{E} \int_A \left(\sum_{i=1}^{i=9} K_{I,i}^2 + \sum_{i=1}^{i=9} K_{II,i}^2 \right) dA \quad (2.41)$$

onde $K_{j,i}$ ($j = I, II$; $i = 1, 9$) são fatores intensificadores de tensão correspondentes a dois modos de evolução da trinca, tração ($j=I$) e cisalhamento ($j=II$) no plano, e forças nodais independentes ($i=1, 9$), sendo A a área da trinca.

De acordo com o modelo de Krawczuk (2001), para uma trinca passante, o fator de concentração de tensão para o primeiro modo de evolução da trinca elasto-plástica pode ser expresso como:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{2a + 2r_p} \quad (2.42)$$

onde $2a$ é o comprimento da trinca, Y é a função de correção que leva em consideração o corpo e a geometria da trinca, σ é a tensão nominal aplicada e r_p é o raio da zona plástica ao redor da ponta da trinca.

Como dado na equação (2.42), é possível modelar o efeito do aumento da flexibilidade, devido ao escoamento na ponta da trinca, por uma extensão hipotética na ponta da trinca, r_p (figura 2.9). O valor de r_p para o primeiro modo de deformação da trinca elasto-plástica pode ser calculado pela seguinte relação:

$$d_p = 2r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ie}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (2.43)$$

onde K_{Ie} é o fator de intensidade de tensão calculado para o primeiro modo de deformação da trinca puramente elástica e σ_Y é a tensão de escoamento do material.

Substituindo a equação (2.43) na equação (2.42) obtém-se a seguinte equação:

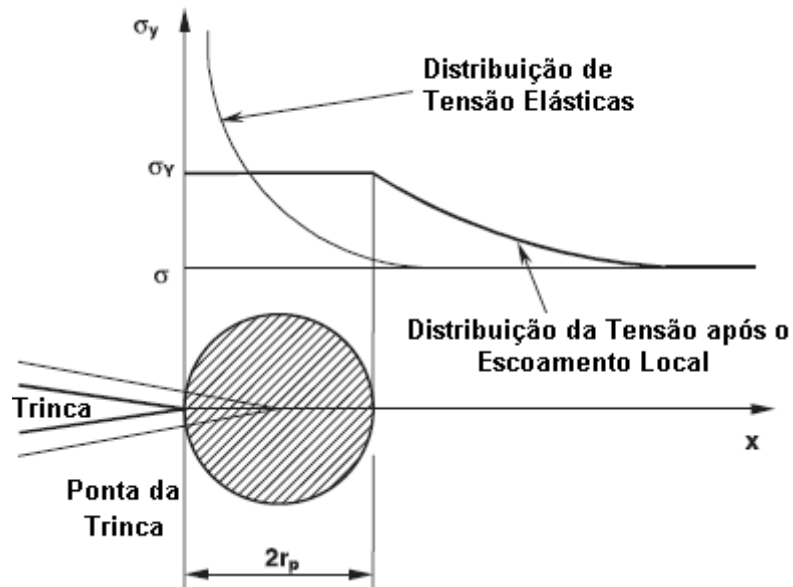


Figura 2.9 - Zona plástica ao redor da ponta da trinca.

$$K_I = Y\sigma \sqrt{2a + \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ie}}{\sigma_Y} \right)^2} = K_{Ie} \sqrt{1 + \frac{Y^2}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^2} \quad (2.44)$$

a qual permite calcular o fator de concentração de tensão para a trinca elasto-plástica.

De modo similar, os fatores de intensidade de tensão para os modos II e III da deformação elasto-plástica da trinca podem ser determinados.

Esses fatores de intensidade de tensão para trincas elásticas passantes, localizadas no elemento sob investigação, podem ser escritos da seguinte forma:

$$K_{Ie} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_x(0, y) \sqrt{\frac{a+y}{a-y}} dy$$

$$K_{IIe} = \frac{-1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \tau_{xy}(0, y) \sqrt{\frac{a+y}{a-y}} dy$$
(2.45)

onde a representa metade do comprimento da trinca, $\sigma_x(0, y)$, $\tau_{xy}(0, y)$ são as tensões normal e de cisalhamento atuantes na face da trinca. Estas tensões podem ser expressas pelas forças nodais independentes.

$$\sigma_x(0, y) = \frac{24z}{Ht^3} \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{3y}{H} \right) F_3 + \left(\frac{1}{2} - \frac{3y}{H} \right) F_7 \right]$$

$$\tau_{xy}(0, y) = \frac{12z}{t^3} F_9$$
(2.46)

Substituindo as equações (2.46) nas equações (2.45) e considerando o elemento com dimensões finitas, os fatores de intensidade de tensão para uma trinca puramente elástica podem ser determinados como uma função das forças nodais independentes da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
K_{Ie,3} &= \frac{24z}{Ht^3} \left[F_3 \left(\frac{1}{2} + \frac{3a}{2H} \right) \right] \sqrt{\pi a} Y(g) \\
K_{Ie,7} &= \frac{24z}{Ht^3} \left[F_7 \left(\frac{1}{2} - \frac{3a}{2H} \right) \right] \sqrt{\pi a} Y(g) \\
K_{IIe,9} &= -\frac{12z}{t^3} F_9 \sqrt{\pi a} Y(g)
\end{aligned} \tag{2.47}$$

onde $Y(g)$ é a função de correção que leva em conta as dimensões finitas do elemento:

$$Y(g) = 1.0 + 0.01876 \left(\frac{2a}{H} \right) + 0.1825 \left(\frac{2a}{H} \right)^2 + 2.024 \left(\frac{2a}{H} \right)^3 - 2.4316 \left(\frac{2a}{H} \right)^4 \tag{2.48}$$

As relações obtidas nas equações (2.47) foram estimadas baseando-se na clássica teoria de Kirchhoff. Esta teoria não descreve corretamente a natureza singular do campo de deformação ao redor da borda da trinca desde que a deformação de cisalhamento seja desconsiderada nela. Estas inconsistências podem ser facilmente omitidas uma vez que as funções de correção podem transformar a solução obtida e adequá-las à teoria de Reissner,

$$K_{j,i,R} = \Phi_j K_{j,i,e} \quad j = I, II; \quad i = 3, 7, 9 \tag{2.49}$$

onde $K_{j,i,R}$ são os fatores de intensidade de tensão que satisfazem a teoria de Reissner, e Φ_j são as funções de correção (figura 2.10).

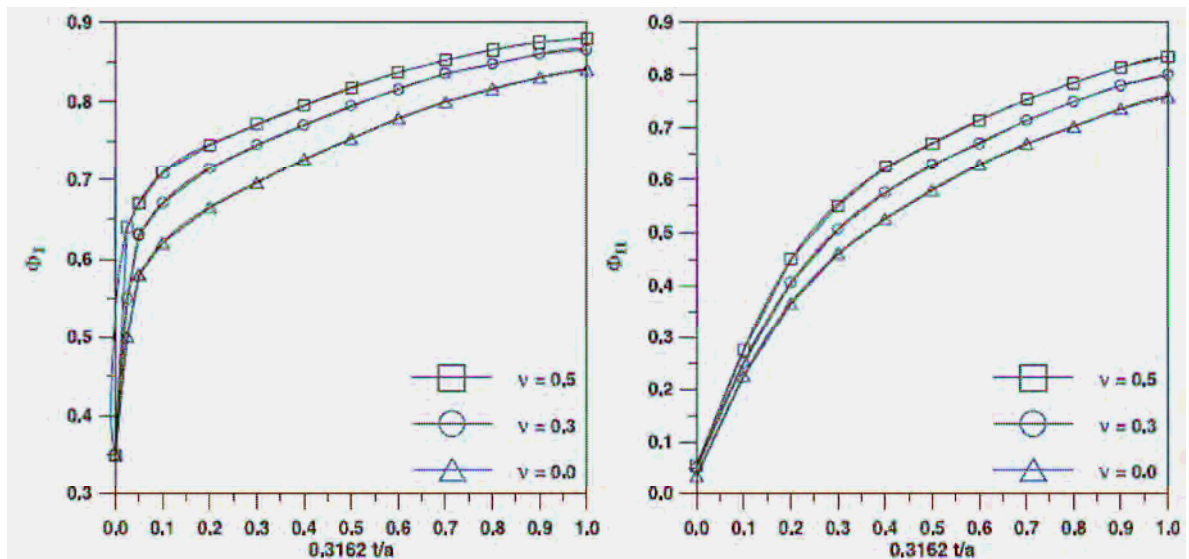


Figura 2.10 - Funções de correção Φ_I e Φ_{II}

Levando em consideração as relações nas equações (2.44) e (2.47 - 2.49), os fatores de intensidade de tensão, para uma trinca elasto-plástica localizada no elemento considerado, podem ser expressa como:

$$K_{I,3} = \Phi_I \frac{24z}{Ht^3} \left[F_3 \left(\frac{1}{2} + \frac{3a}{2H} \right) \right] \sqrt{\pi a} Y(g) \sqrt{1 + \frac{Y(g)^2}{\pi} \left(\frac{\sigma_x(0,a)}{\sigma_Y} \right)^2}$$

$$K_{I,7} = \Phi_I \frac{24z}{Ht^3} \left[F_7 \left(\frac{1}{2} - \frac{3a}{2H} \right) \right] \sqrt{\pi a} Y(g) \sqrt{1 + \frac{Y(g)^2}{\pi} \left(\frac{\sigma_x(0,a)}{\sigma_Y} \right)^2} \quad (2.50)$$

$$K_{II,9} = -\Phi_{II} \frac{12z}{t^3} F_9 \sqrt{\pi a} Y(g) \sqrt{1 + \frac{Y(g)^2}{\pi} \left(\frac{\tau_{xy}(0,a)}{\sigma_Y} \right)^2}$$

Aplicando as relações (2.40), (2.41) e (2.50), a matriz de flexibilidade do elemento finito de placa retangular, elasto-plástica, com trinca aberta e não propagante pode ser determinada e apresentada como:

$$[C^I] = \frac{6\pi}{Et^3} \begin{bmatrix} 0 & & & & & & & & & sim. \\ 0 & 0 & & & & & & & & \\ 0 & 0 & c_{33} & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & c_{73} & 0 & 0 & 0 & c_{77} & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{99} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

onde os termos diferentes de zero são escritos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} c_{33} &= 4\Phi_I^2 \left[\int_{-g_k}^{g_k} g \left(\frac{1}{2} + \frac{3g}{4} \right)^2 Y^2(g) dg + \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_x(0,a)}{\sigma_Y} \right)^2 \int_{-g_k}^{g_k} g Y^4(g) dg \right] \\ c_{37} &= 2\Phi_I^2 \left[\int_{-g_k}^{g_k} g \left(\frac{1}{2} + \frac{3g}{4} \right)^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{3g}{4} \right) Y^2(g) dg + \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_x(0,a)}{\sigma_Y} \right)^2 \int_{-g_k}^{g_k} g Y^4(g) dg \right] \\ c_{77} &= 4\Phi_I^2 \left[\int_{-g_k}^{g_k} g \left(\frac{1}{2} - \frac{3g}{4} \right)^2 Y^2(g) dg + \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_x(0,a)}{\sigma_Y} \right)^2 \int_{-g_k}^{g_k} g Y^4(g) dg \right] \\ c_{99} &= H^2 \Phi_{II}^2 \left[\int_{-g_k}^{g_k} g Y^2(g) dg + \frac{1}{\pi} \left(\frac{\tau_{xy}(0,a)}{\sigma_Y} \right)^2 \int_{-g_k}^{g_k} g Y^4(g) dg \right] \end{aligned} \quad (2.52)$$

onde $g_k = \frac{2a_k}{H}$ é o comprimento relativo da trinca.

Mudanças das integrais (2.52), as quais denotam a flexibilidade não dimensional do elemento devido à trinca elasto-plástica como uma função do comprimento não-dimensional da trinca, são apresentados na figura 2.11.

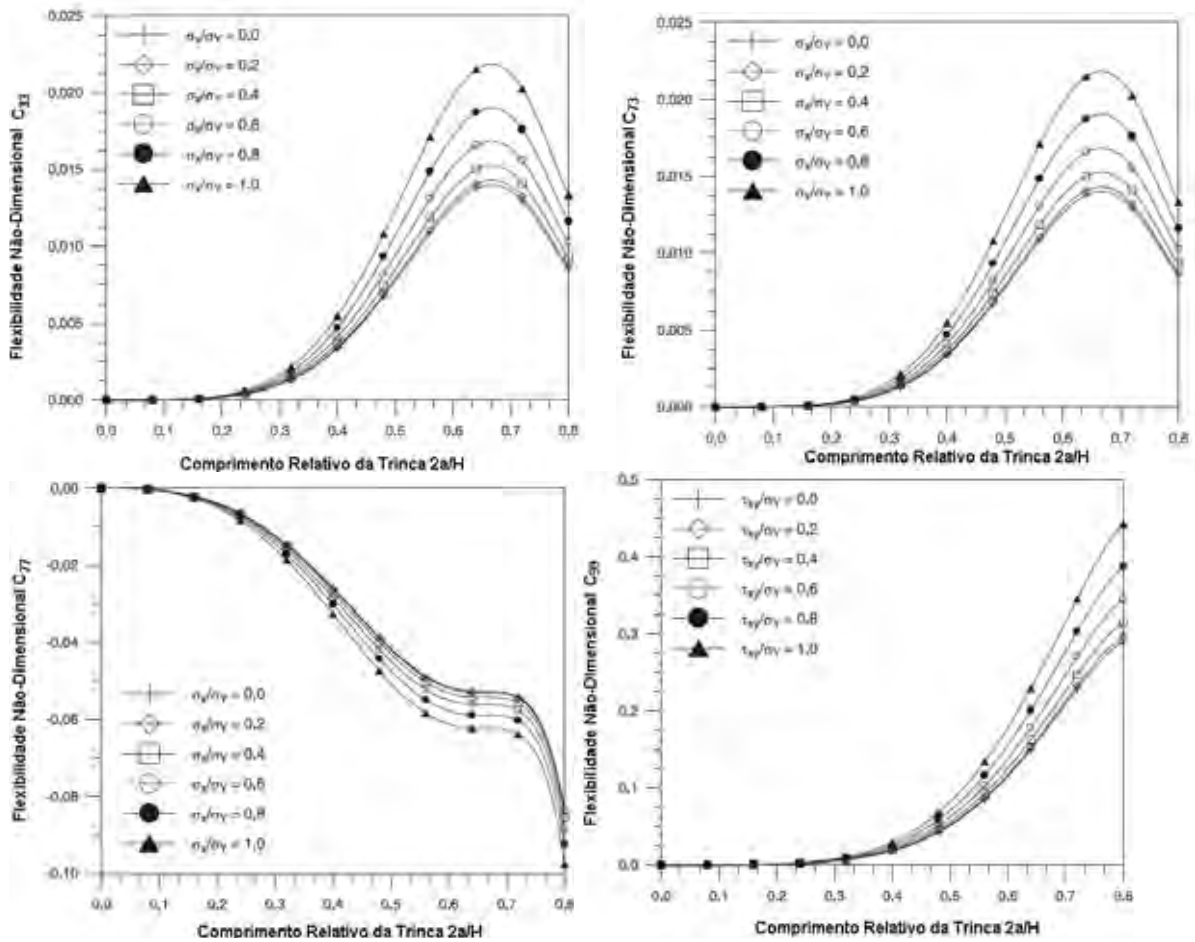


Figura 2.11 – Flexibilidade não dimensional devido a trinca em função do comprimento relativo

$$\frac{2a}{H} \text{ e razão plástica } \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$$

A matriz de flexibilidade do elemento sem trinca (2.39) é somada com a matriz de flexibilidade do elemento trincado (2.51). Usando as relações (2.37) e (2.38), a matriz de rigidez

$$M_{22} = \begin{bmatrix} 24,178 & & & & & & sim. \\ -3,227.H & 0,560.H^2 & & & & & \\ 3,227.L & -0,441.H.L & 0,560.L^2 & & & & \\ 8,582 & -1,918.H & 1,393.L & 27,178 & & & \\ 1,918.H & -0,420.H^2 & 0,294.H.L & 3,227.H & 0,560.H^2 & & \\ 1,393.L & -0,294.H.L & 0,280.L^2 & 3,227.L & 0,441.H.L & 0,560.L^2 & \end{bmatrix}$$

2.6.3 Matriz de Amortecimento

O amortecimento considerado foi estrutural, determinado experimentalmente. Esse amortecimento é determinado considerando a placa como um único elemento com um grau de liberdade.

Determina-se o decremento logaritmo (ξ), que é a relação entre duas amplitudes consecutivas quaisquer, através da equação (2.55), onde x_0 e x_n são, respectivamente, as alturas do pico inicial e final e N é o número de picos entre x_0 e x_n .

$$\frac{1}{2\pi N} \cdot \ln \frac{x_0}{x_n} = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.55)$$

Através da frequência natural amortecida (f_a) obtida pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), calcula-se a frequência natural (f_n) pela equação (2.56). O amortecimento equivalente (C_{eq}) é obtido através da equação (2.57), onde m é a massa da placa, w_n é a frequência natural do sistema que é obtido pela equação (2.58).

$$f_n = \frac{f_a}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.56)$$

$$C_{eq} = 2.m.w_n.\xi \quad (2.57)$$

$$w_n = 2\pi \cdot f_n \quad (2.58)$$

A matriz de amortecimento foi estabelecida através do produto do amortecimento equivalente C_{eq} pela matriz identidade, equação (2.59).

$$[C_e] = [C_{eq}] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [C_{eq}] \cdot [I] \quad (2.59)$$

2.6.4 Equação do Movimento

A resposta dinâmica da placa nos intervalos de tempo em que a trinca está fechada pode ser considerada como a de uma placa sem trinca. Isto porque as interfaces de trinca interagem completamente entre si.

A equação do movimento da placa trincada discretizada para N_e elementos finitos e submetida a um vetor de excitação externo $f(t)$ pode ser escrita por (2.60), onde $[M]$ é a matriz de massa, $[C_e]$ é a matriz de amortecimento, $(K_u - \gamma\Delta K)$ é a matriz de rigidez, $\Delta K = K_u - K_c$ e $\gamma = 1$ quando a trinca está aberta e $\gamma = 0$ quando a trinca está fechada.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + (K_u - \gamma\Delta K)u(t) = f(t) \quad (2.60)$$

$$u(0) = u^0; \dot{u}(0) = \dot{u}^0$$

Considerou-se $\gamma=1$, pois durante o período em que a trinca permanece fechada ($\gamma=0$) a matriz rigidez é composta apenas pela parcela em que não se considera a trinca. Portanto, neste momento não há existência de falha.

CAPÍTULO 3

3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL, ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS

3.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional é essencial quando se pretende prever o comportamento dinâmico de máquinas em serviço, facilitando o desenvolvimento tecnológico e reduzindo os custos das pesquisas, principalmente na redução dos protótipos de sistemas mecânicos. Esta ferramenta, além de apresentar resultados bastante satisfatórios, pode ainda ser usada como uma pré-etape da análise experimental. Através dela, é possível fazer os ajustes que antes só seriam possíveis durante a etapa propriamente dita. Isto reduz o tempo de trabalho e o custo.

Na utilização da simulação computacional é necessário obter um modelo matemático que melhor represente o sistema em estudo. Para isto, são feitas algumas simplificações que reproduzam o sistema real no sistema analítico.

Neste capítulo é apresentada uma série de simulações computacionais realizadas em dois diferentes tipos de estruturas, listadas abaixo:

- Sistema discreto de três graus de liberdade, onde será aplicada a metodologia dos observadores de estado, para condições iniciais (exemplo já simulado por Lemos, 2004);

- Sistema contínuo, representado por uma placa engastada, onde será aplicada a metodologia dos observadores de estado utilizando um modelo de falha para detecção de trincas. Será analisada a resposta no transiente, através da excitação com condições iniciais.

3.1.1 APLICAÇÃO I – Sistema massa-mola-amortecedor – 3 GDL

Condições Iniciais.

Para ambos os casos, serão utilizados o esquema do sistema massa-mola-amortecedor de três graus de liberdade, apresentado na figura 3.1.

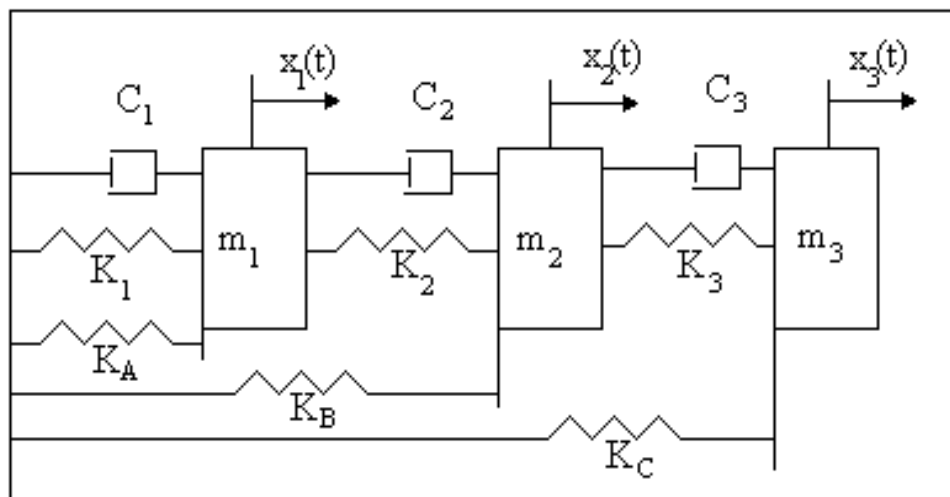


Figura 3.1 – Sistema massa-mola-amortecedor com 3 graus de liberdade.

Para o sistema da figura 3.1 tem-se as equações de movimento:

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{x}_1(t) + (C_1 + C_2) \dot{x}_1(t) + C_2 x_2(t) + (k_A + k_1 + k_2)x_1(t) - k_2 x_2(t) &= 0 \\
m_2 \ddot{x}_2(t) - C_2 \dot{x}_1(t) + (C_2 + C_3) \dot{x}_2(t) - C_3 \dot{x}_3(t) - k_2 x_1(t) + (k_B + k_2 + k_3)x_2(t) - k_3 x_3(t) &= 0 \\
m_3 \ddot{x}_3(t) - k_3 x_2(t) - C_3 \dot{x}_2(t) - C_3 \dot{x}_3(t) + k_3 x_3(t) + k_c x_3(t) &= 0
\end{aligned} \quad (3.1)$$

Considera-se os valores numéricos abaixo:

$$m_1 = 3 \text{ Kg}; \quad k_1 = 35877 \text{ N/m}; \quad k_A = 12000 \text{ N/m}; \quad C_1 = 40 \text{ Ns/m};$$

$$m_2 = 2 \text{ Kg}; \quad k_2 = 49711 \text{ N/m}; \quad k_B = 10000 \text{ N/m}; \quad C_2 = 70 \text{ Ns/m};$$

$$m_3 = 1 \text{ Kg}; \quad k_3 = 56628 \text{ N/m}; \quad k_C = 12000 \text{ N/m}; \quad C_3 = 30 \text{ Ns/m}.$$

O sistema foi excitado com as seguintes condições iniciais de velocidade e de deslocamento:

$$x_1(0) = 0.025 \text{ m}; \quad \dot{x}_1(0) = 3.0 \text{ m/s};$$

$$x_2(0) = 0.000 \text{ m}; \quad \dot{x}_2(0) = 0.0 \text{ m/s};$$

$$x_3(0) = 0.000 \text{ m}; \quad \dot{x}_3(0) = 0.0 \text{ m/s}.$$

O intervalo de tempo usado para a simulação foi de 0 a 0.4 segundos, discretizados em 1024 pontos.

Na figura 3.2 tem-se o fluxograma da metodologia desenvolvida para detecção e localização de falhas em sistema mecânicos com variações de parâmetros utilizando a técnica dos observadores de estado.

As etapas deste fluxograma vão desde a modelagem matemática de um sistema mecânico até o cálculo dos observadores de estado utilizados para a detecção e localização de falhas.

As rotinas computacionais empregadas no desenvolvimento da metodologia apresentada na figura 3.2 foram desenvolvidas utilizando os softwares Matlab 6.5 for Windows.

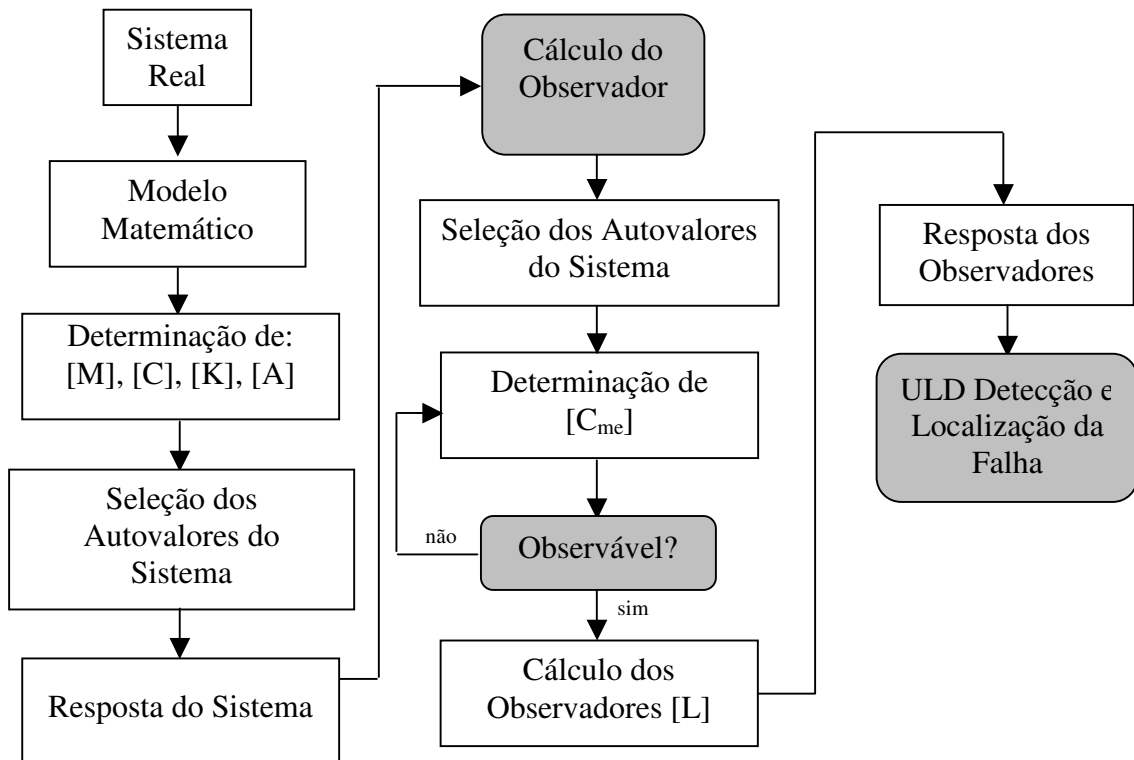


Figura 3.2 – Fluxograma da metodologia desenvolvida para detecção e localização de falhas.

Nas figuras 3.3 a 3.10 são apresentadas as curvas obtidas, sendo que na ordenada têm-se os deslocamentos simulados de $\{x_3(t)\}$ do sistema e os valores reconstruídos de $\{x_3(t)\}$ para o observador de estado, e nas abscissas, o tempo em segundos. É importante ressaltar que apenas $x_1(t)$ é utilizado da resposta simulada do sistema, sendo $x_2(t)$ e $x_3(t)$ reconstruídos através dos observadores de estado.

Os observadores robustos foram construídos considerando falhas em k_1 , k_2 , k_3 , C_1 , C_2 e C_3 . Uma falha em k_2 foi provocada através de uma diminuição de 10% de sua rigidez, observando os resultados nas figuras 3.3 a 3.10.

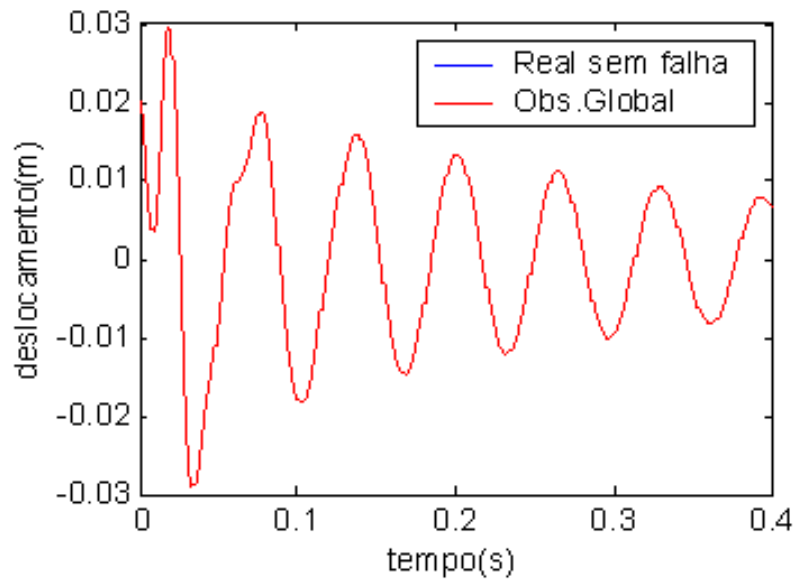


Figura 3.3 – Sistema real simulado sem falha x Observador Global (condições iniciais).

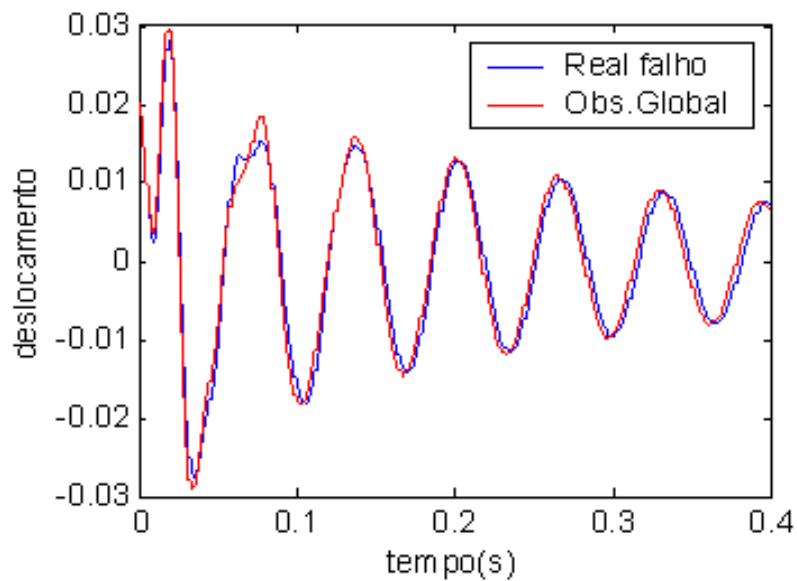


Figura 3.4 – Sistema real simulado falho x Observador Global (condições iniciais).

Primeiramente, pode-se observar na figura 3.3, que as curvas são coincidentes. O observador global não detectou nenhuma irregularidade no sistema mecânico simulado, uma vez que o mesmo é considerado “sem falha”.

Na figura 3.4 apresentam-se as curvas de resposta do sistema real global, quando 10% da rigidez k_2 é retirada do sistema para simular uma possível falha, e a curva de resposta do observador global. Como as curvas se distanciaram, pode-se detectar uma possível falha, mas sem condições de localizar a mesma.

A localização da falha é obtida através da análise das curvas dos observadores robustos, figuras 3.5 a 3.10. Verifica-se que, apenas na figura 3.6, as curvas coincidem. Isto é, o observador robusto montado com falha em k_2 localizou uma falha no sistema simulado.

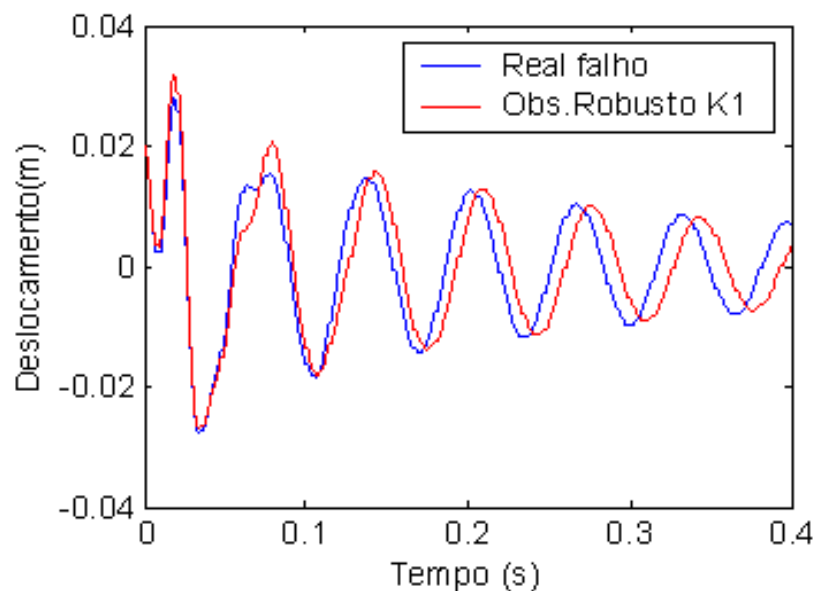


Figura 3.5 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de k_1 (condições iniciais).

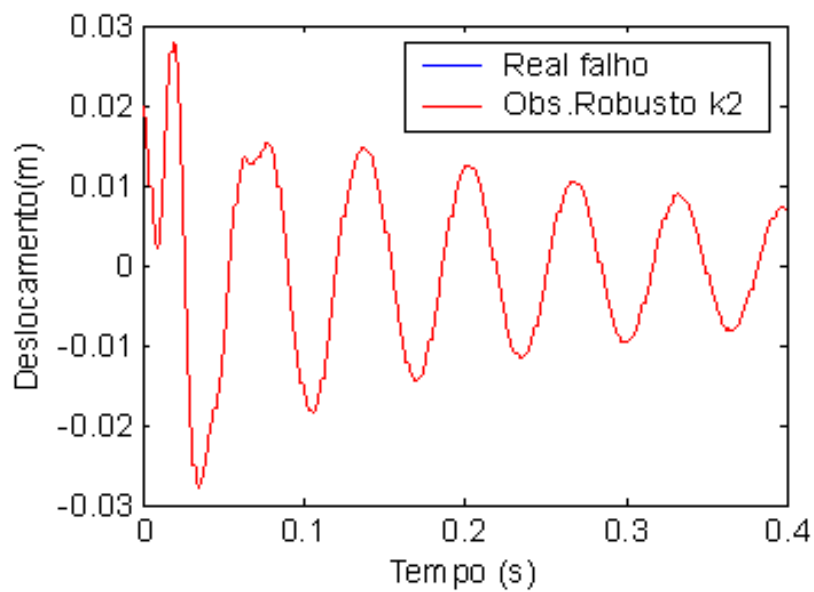


Figura 3.6 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de k_2 (condições iniciais).

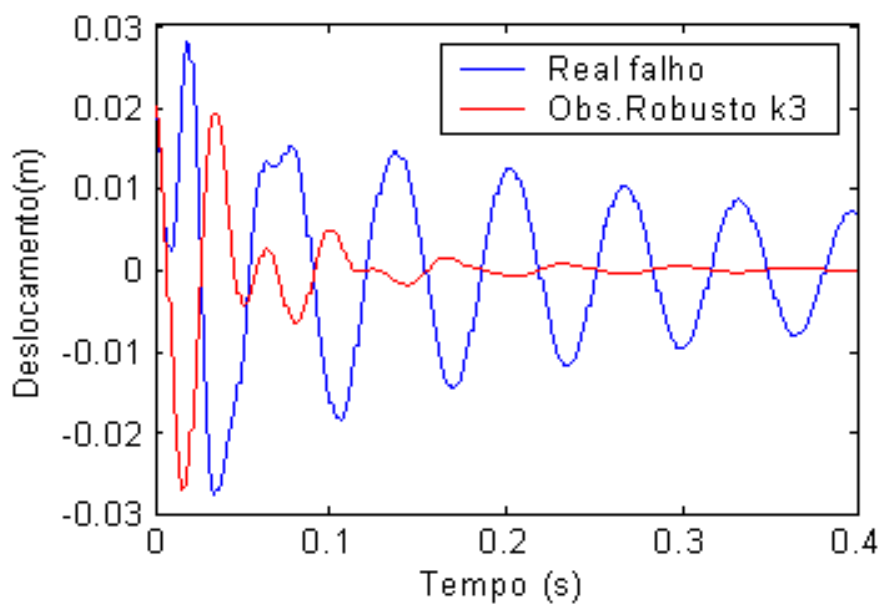


Figura 3.7 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de k_3 (condições iniciais).

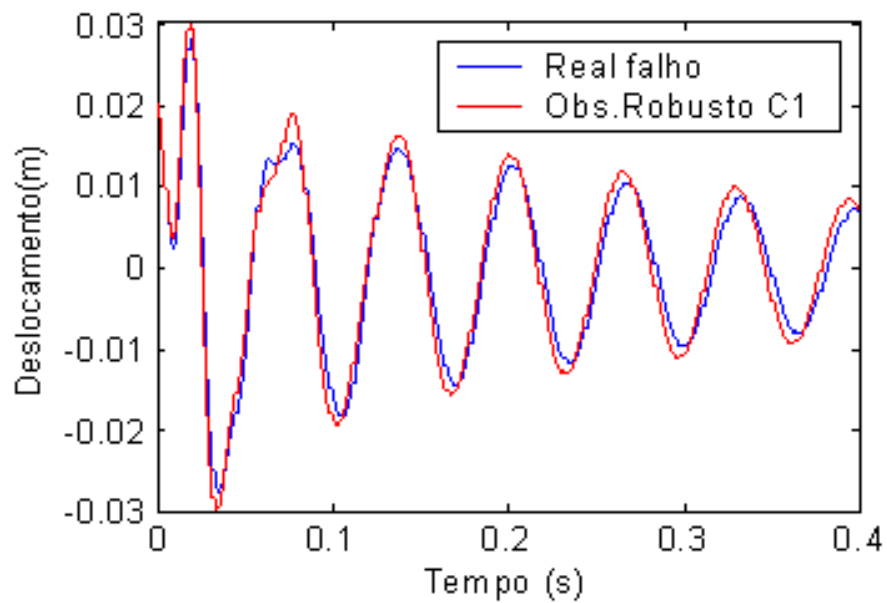


Figura 3.8 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de C_1 (condições iniciais).

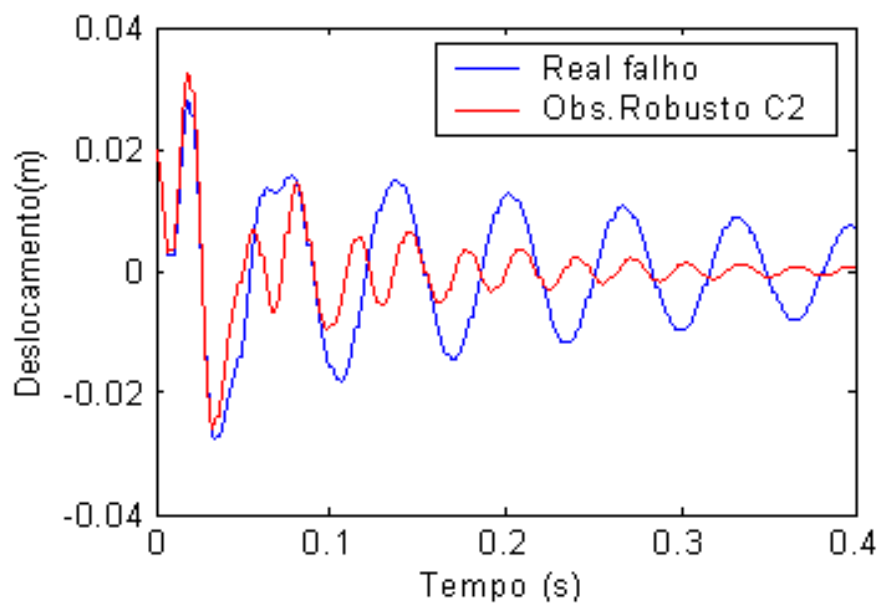


Figura 3.9 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de C_2 (condições iniciais).

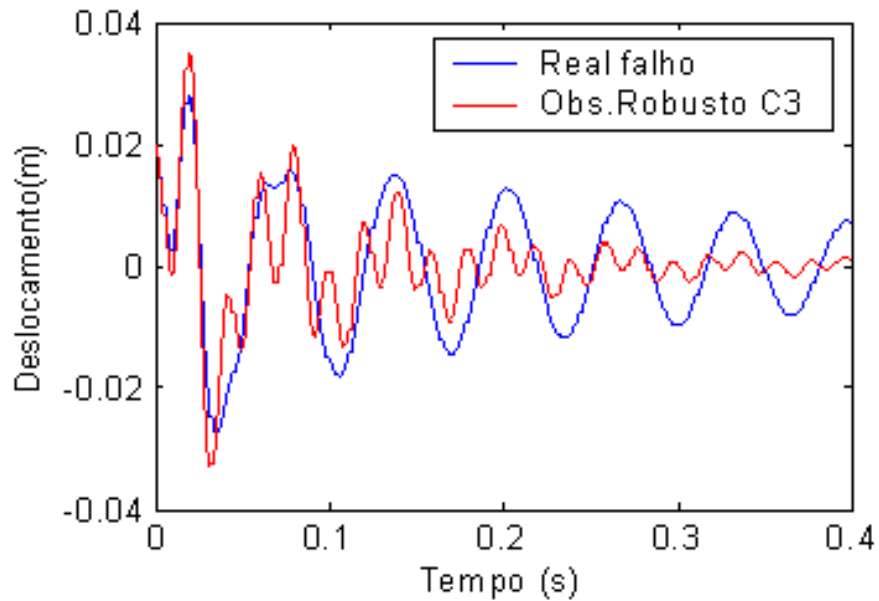


Figura 3.10 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de perda de C_3 (condições iniciais).

Observe que as figuras 3.7, 3.9 e 3.10 apresentam uma maior discrepância entre as curvas, isto ocorre devido à posição dos parâmetros k_3 , C_2 e C_3 , respectivamente, na matriz de rigidez amortecimento. Deste modo, uma vez retirado da matriz aumenta-se o número de zeros modificando fortemente a resposta do sistema.

3.1.2 APLICAÇÃO II – Modelo de falha

3.1.2.1 Placa engastada com uma trinca.

Nesta aplicação, considera-se uma placa engastada em um dos lados na direção x , com 3 graus de liberdade por nó, modelada pela técnica dos elementos finitos usando elementos de

placa, como mostrado na figura 3.11. Note que $2a$ é o comprimento da trinca localizada no elemento 73. Como descrito anteriormente, será considerado a condição de trinca aberta ($\gamma = 1$).

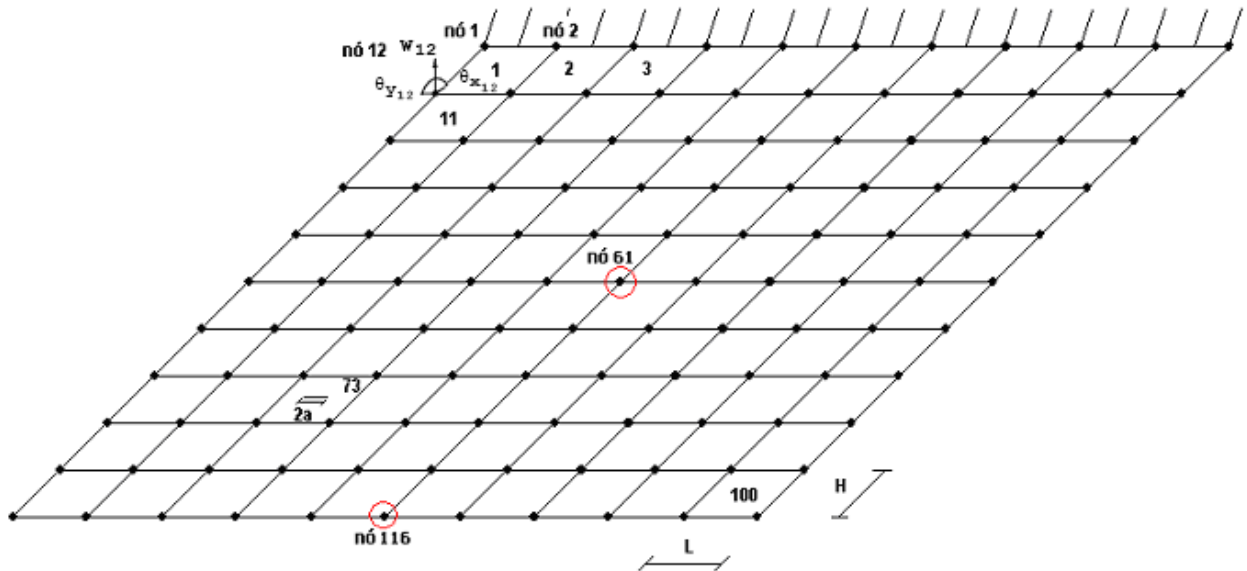


Figura 3.11 – Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.

Para esta simulação, considera-se $L=0,0325\text{m}$, $H=0,0325\text{m}$, $t=0,0025\text{m}$ (espessura), $E=2,07 \cdot 10^{11}\text{N/m}^2$ e $\rho=7850\text{ kg/m}^3$, sendo a condição inicial de velocidade de $2,5\text{m/s}$ aplicado no nó 116. Utilizou-se o intervalo de tempo de 0 a 0.4 segundos, discretizados em 1024 pontos. No sistema simulado, considerou-se o amortecimento estrutural, verificado experimentalmente. Inseriu-se uma matriz diagonal com o valor de amortecimento detectado através do método do decremento logarítmico, considerando a placa como um sistema de um grau de liberdade.

Nas figuras 3.12 a 3.17 têm-se os resultados desta simulação. Nas ordenadas são apresentados os valores gerados de $\{w_{61}(t)\}$ do sistema (simulado) e os valores reconstruídos de $\{\hat{w}_{61}(t)\}$ para o observador de estado, e nas abscissas, o tempo em segundos.

Note que $\{w_{61}(t)\}$ é o deslocamento na direção vertical do nó 61. Escolheu-se esta posição, após realizar alguns testes em outras posições, visto que a massa do sensor interfere nas medidas, assim a posição central do sensor gera uma condição de simetria, resultando em uma resposta de melhor interpretação.

Foi simulada uma falha causada por uma trinca de $2a=0,3.L$ de comprimento no elemento 73, ou seja, 30% de comprimento do elemento, onde os resultados podem ser visualizados nas figuras 3.13 a 3.17.

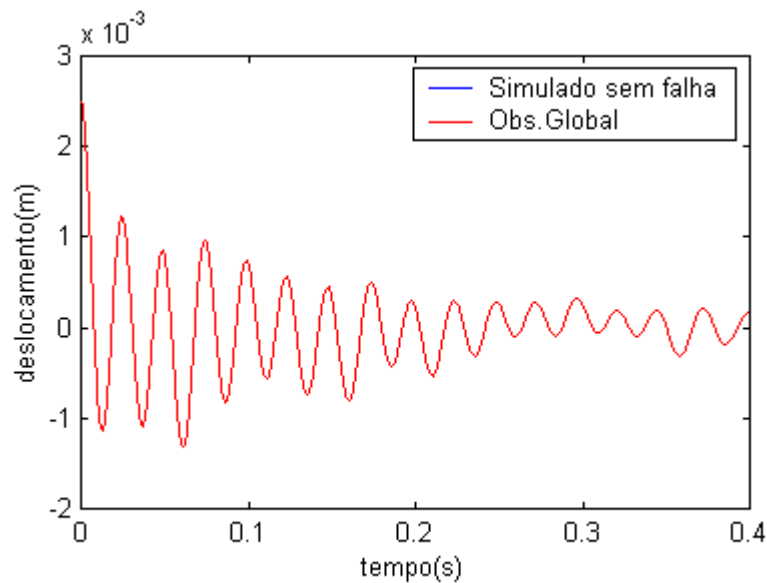


Figura 3.12 – Sistema real simulado sem falha x Observador Global (condições iniciais).

Na figura 3.12, observa-se que as curvas são coincidentes, significando que o observador global não detectou nenhuma irregularidade no sistema mecânico simulado, uma vez que o mesmo é considerado “sem falha”.

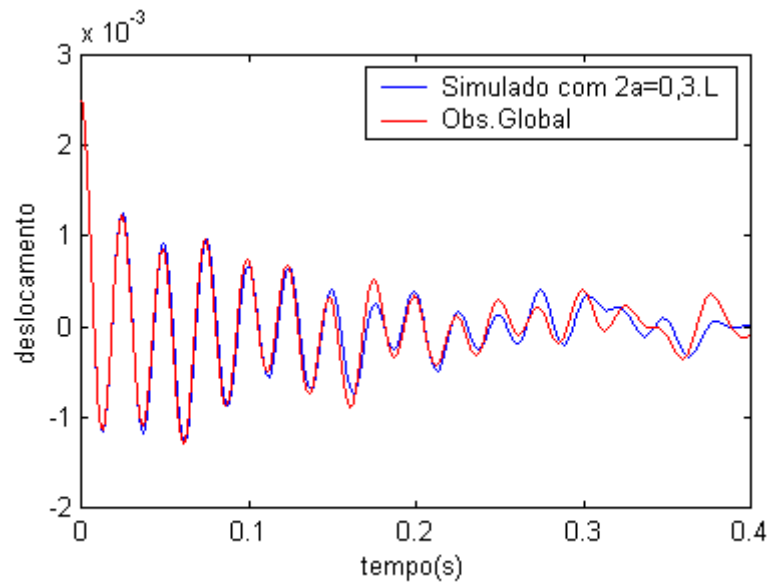


Figura 3.13 – Sistema real simulado falho x Observador Global (condições iniciais).

Na figura 3.13, apesar da pouca diferença, pode-se ver como as curvas de resposta do sistema real global se distanciam, mostrando que o observador global detectou a presença de uma possível falha no sistema.

A localização da falha é obtida através da montagem de um banco de observadores robustos a possíveis parâmetros do sistema sujeito à falhas. Nas figuras 3.14 a 3.17 têm-se os resultados obtidos de cada observador. Pode-se verificar que apenas na figura 3.16 as curvas coincidem. O observador robusto montado com $2a=0,30.L$ localizou uma falha no sistema simulado.

Note que as curvas dos observadores robustos apresentadas são referentes ao elemento 73, uma vez que, tendo um sistema discretizado com 100 elementos, a quantidade de curvas geradas é grande. Assim, somente as curvas referentes ao elemento trincado são apresentadas para a compreensão do método de localização via gráficos.

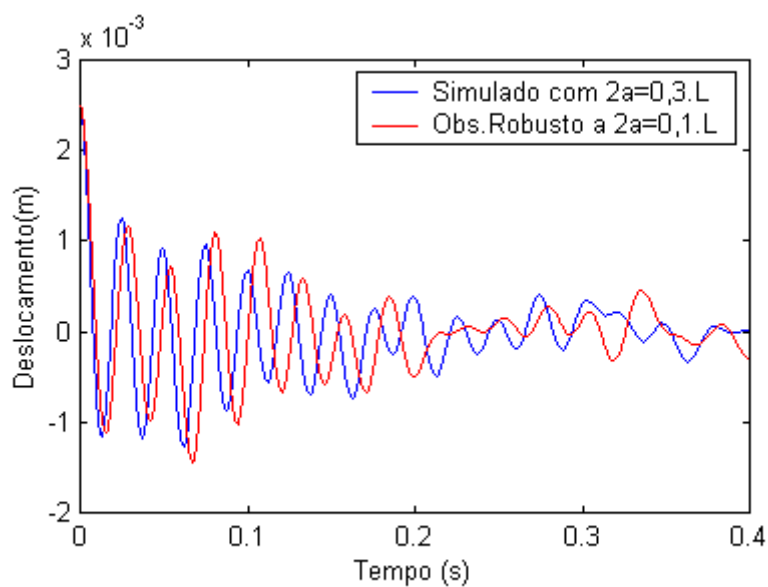


Figura 3.14 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 10% de comprimento de trinca (condições iniciais).

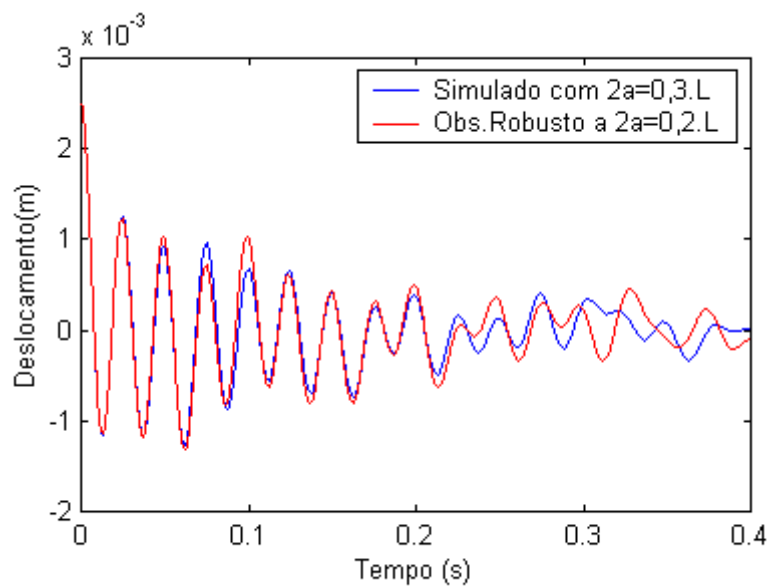


Figura 3.15 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 20% de comprimento de trinca (condições iniciais).

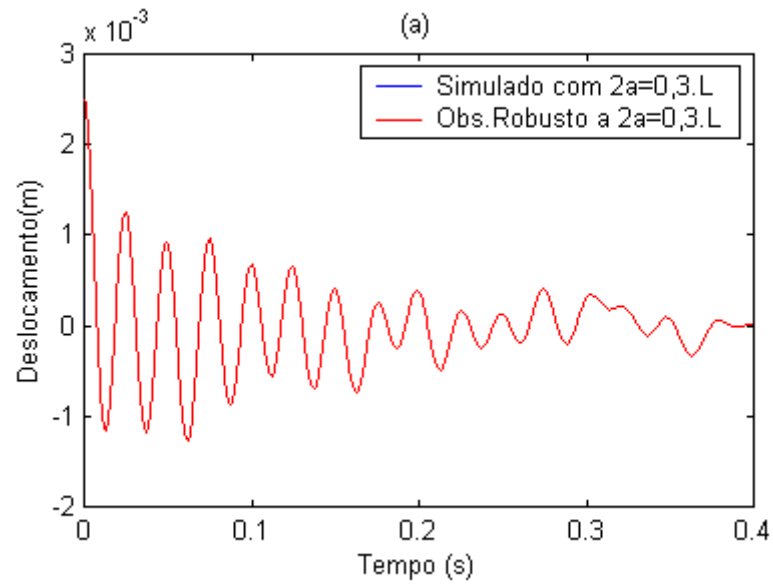


Figura 3.16 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 30% de comprimento de trinca (condições iniciais).

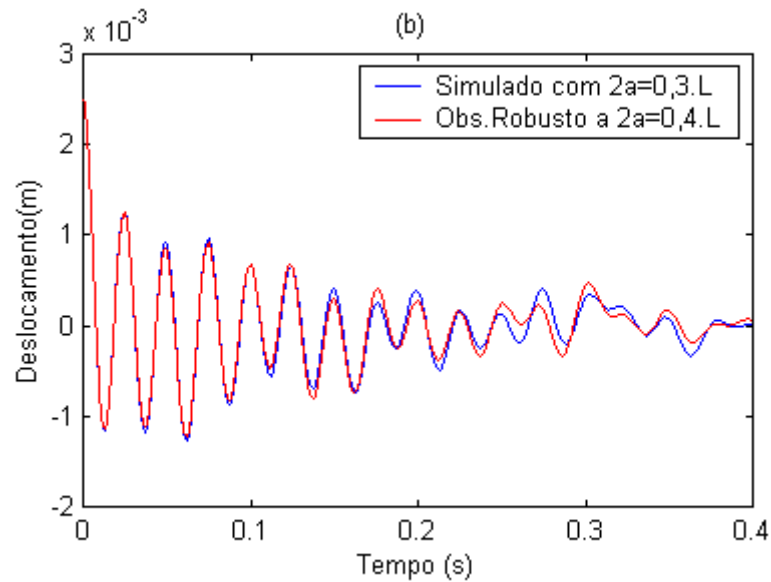


Figura 3.17 – Sistema real simulado falho x Observador Robusto a 40% de comprimento de trinca (condições iniciais).

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3.1. Nela são mostradas as diferenças RMS (Root Mean Square) dos valores entre o sistema real com e sem falha e o observador global. Também são mostrados os observadores robustos sujeitos à falhas específicas nos parâmetros.

Tabela 3.1 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$, falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$.

	Simulado Sem Falha (\neqRMS)	Simulado $2a_1=0.10L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_2=0.20L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_3=0.3L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_4=0.4L$ (\neqRMS)
Obs. Gl.	7.5506e-15	3.3775e-05	2.7673e-03	6.6308e-03	2.1905e-02
Obs.Rob. a_1	4.248e-04	8.5642e-15	8.8510e-04	5.1548e-03	9.3481e-03
Obs.Rob. a_2	4.3345e-03	2.8554e-03	7.7412e-14	2.4875e-03	6.1347e-03
Obs.Rob. a_3	8.4521e-03	6.5984e-03	2.6548e-03	6.5647e-15	2.2145e-03
Obs.Rob. a_4	2.2015e-02	2.0047e-02	6.4587e-03	2.9521e-03	6.6879e-4

Na Tabela 3.1, pode-se verificar a detecção e localização das falhas comparando o sistema global sem falha com o observador global (segunda linha com a segunda coluna da Tabela 3.3). Pode-se notar que a diferença RMS de $10e-15$ mostra uma coincidência das curvas. Isto é, o sistema real permanece praticamente igual ao observador global sem falha, porém não há existência de falha no sistema.

Uma vez inserida a falha, ela é detectada verificando a não coincidência entre as curvas verificadas anteriormente e através dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falha. Exemplificando, na quinta linha e quinta coluna da Tabela 3.1 pode-se verificar uma detecção de 30% de falha. Ou seja, a trinca atingiu 30% do comprimento total do elemento ($6.5647e-15$).

3.1.2.2 Placa engastada com duas trincas simultâneas.

Várias trincas simultâneas na estrutura podem ser simuladas com o método apresentado. Entretanto, para um funcionamento adequado, um banco de observadores deve ser montado.

Nesta seção apresenta-se um caso onde ocorrem duas trincas simultaneamente em elementos diferentes.

Nesta aplicação considera-se a mesma placa descrita no item 3.1.2.1. Note que $2a$ é o comprimento das trincas localizadas nos elementos 73 e 74. Como descrito anteriormente, será considerado a condição de trinca aberta ($\gamma = 1$).

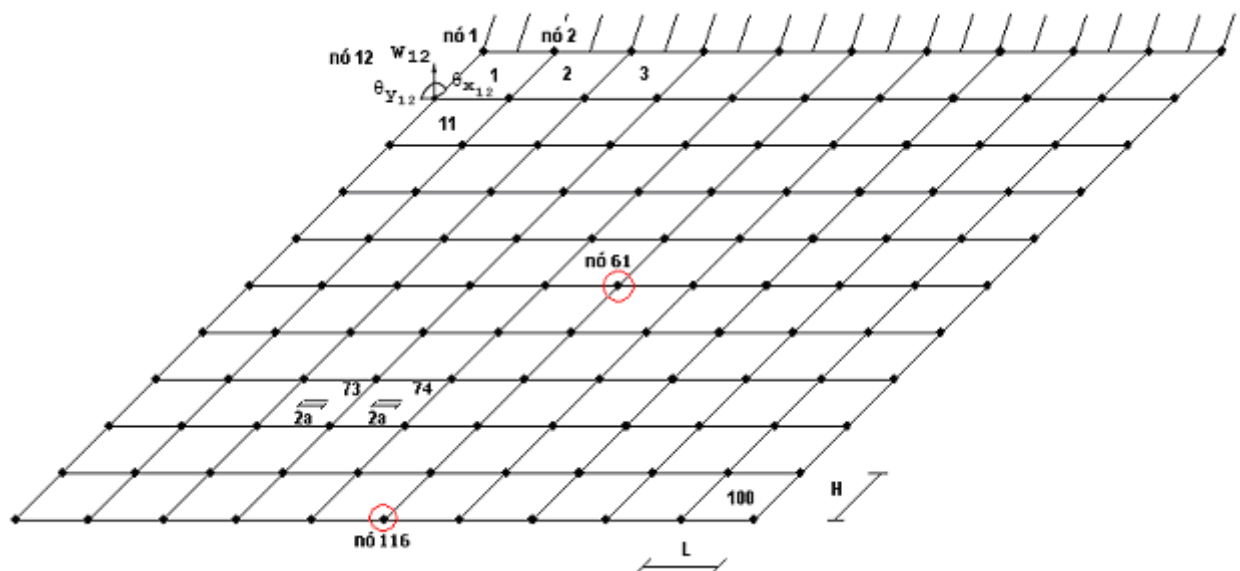


Figura 3.18 – Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.

A matriz de rigidez da placa é montada a partir das matrizes de rigidez de cada elemento. Os elementos 73 e 74 possuem uma trinca, provocando alterações em suas matrizes, como já foi descrito no caso 1.

Os valores obtidos para o deslocamento vertical do nó 61, $w_{61}(t)$, são apresentados na Tabela 3.2 para o elemento 73 e na Tabela 3.3 para o elemento 74. Nelas são mostradas as diferenças RMS (Root Mean Square) dos valores entre o sistema real e o observador global. Também são mostrados os observadores robustos sujeitos à falhas específicas nos parâmetros.

Tabela 3.2 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$ falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$.

	Simulado Sem Falha (≠RMS)	Simulado $2a_1=0.10h$ (≠RMS)	Simulado $2a_2=0.20h$ (≠RMS)	Simulado $2a_3=0.30h$ (≠RMS)	Simulado $2a_4=0.40h$ (≠RMS)
Obs. Gl.	7.5506e-15	4.3545e-05	2.6598e-03	5.5487e-03	3.2154e-02
Obs.Rob. a_1	5.1548e-04	7.5487e-15	7.1587e-4	4.1548e-03	8.4879e-03
Obs.Rob. a_2	5.2548e-03	3.4879e-03	3.1326e-14	3.1457e-03	7.1357e-03
Obs.Rob. a_3	7.1548e-03	5.1326e-03	3.1548e-03	6.4879e-15	4.2356e-03
Obs.Rob. a_4	3.1548e-02	3.1054e-02	7.32677e-03	3.1329e-03	7.7894e-4

Tabela 3.3 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$ falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$.

	Simulado Sem Falha (≠RMS)	Simulado $2a_1=0.10h$ (≠RMS)	Simulado $2a_2=0.20h$ (≠RMS)	Simulado $2a_3=0.30h$ (≠RMS)	Simulado $2a_4=0.40h$ (≠RMS)
Obs. Gl.	7.5506e-15	4.3545e-05	2.6598e-03	5.5487e-03	3.2154e-02
Obs.Rob. a_1	5.1548e-04	7.5487e-15	7.1587e04	4.1548e-03	8.4879e-03
Obs.Rob. a_2	5.2548e-03	3.4879e-03	3.1326e-14	3.1457e-03	7.1357e-03
Obs.Rob. a_3	7.1548e-03	5.1326e-03	3.1548e-03	5.4879e-15	4.2356e-03
Obs.Rob. a_4	3.1548e-02	3.1054e-02	7.32677e-03	3.1329e-03	7.7894e-3

Nas Tabelas 3.2 e 3.3, pode-se verificar a detecção e localização das falhas comparando o sistema global sem falha com o observador global (segunda linha com a segunda coluna das Tabelas 3.2 e 3.3. Pode-se notar que a diferença RMS de $10e-15$ mostra uma coincidência das curvas. Isto é, o sistema real permanece praticamente igual ao observador global sem falhas, porém não há existência de falhas no sistema).

Uma vez inseridas as falhas no sistema, elas são detectadas verificando-se a não coincidência entre as curvas descritas anteriormente e através dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas. Exemplificando, na quarta linha e quarta coluna da Tabela 3.2 pode-se verificar uma detecção de 20% de falha, ou seja, a trinca atingiu 20% do comprimento total do elemento. Na quinta linha e quinta coluna da Tabela 3.2 pode-se verificar uma detecção de 30% de falhas, indicando que a trinca atingiu 30% do comprimento total do elemento.

Note que as falhas inseridas foram variando de 10 em 10% até atingir 40% do comprimento. Nota-se a eficácia do banco de observadores nas Tabelas 3.2 e 3.3.

3.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Para a verificação e validade da metodologia desenvolvida montou-se, no Laboratório de Vibrações e Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica (LVI/DEM/FEIS), uma placa engastada, constituída de uma chapa de aço carbono em base rígida de aço carbono, figura 3.19.

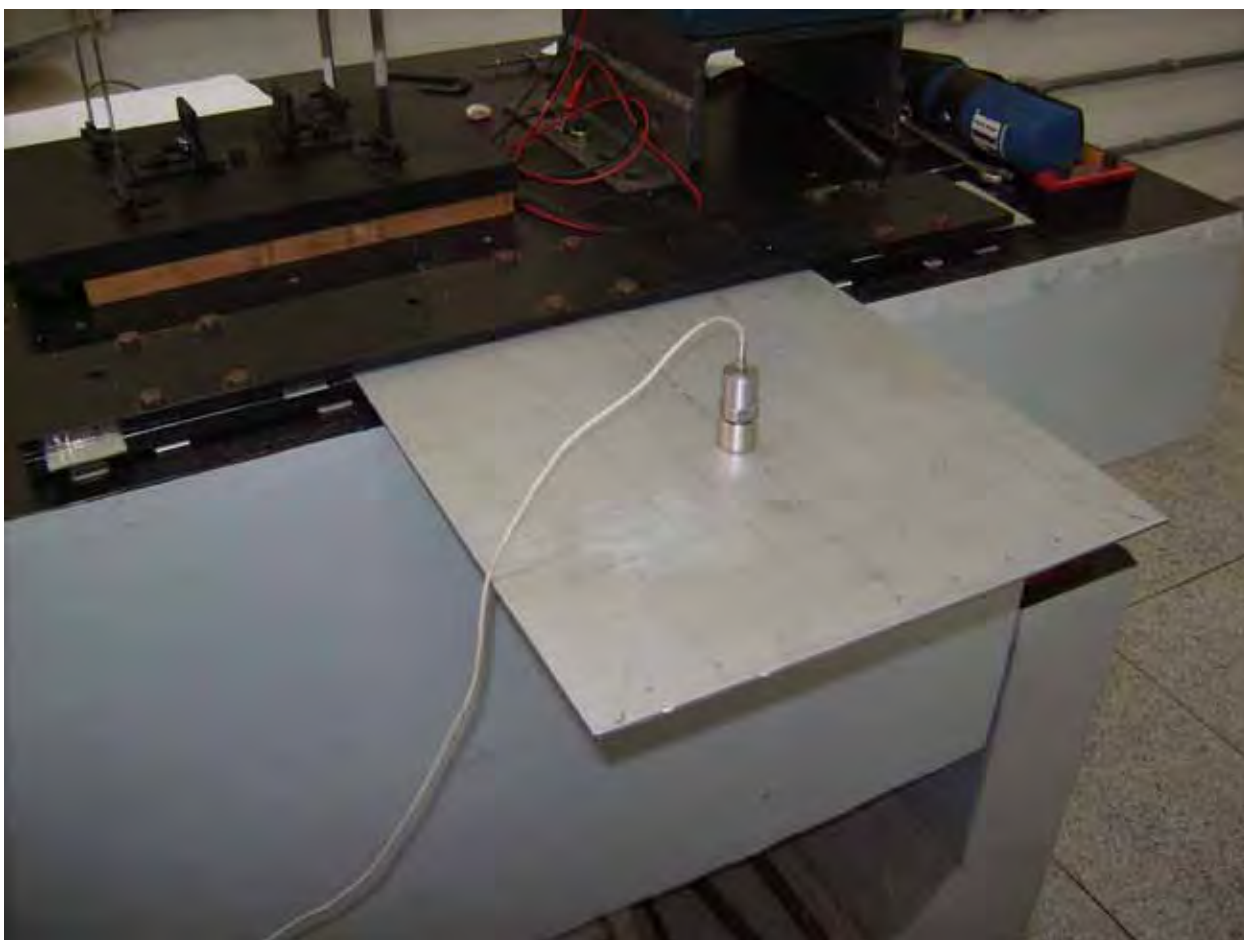


Figura 3.19 – Bancada de Testes.

3.2.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

3.2.1.1 Materiais Utilizados

A bancada de testes montada é constituída dos seguintes materiais:

- (1) Mesa inercial de sustentação da bancada de testes;
- (2) Chapa de aço de dimensões: 0,325 x 0,325 x 0,0025 m;

(3) Barras de aço carbono de dimensões: $0,2 \times 0,0172 \times 0,0125$ m e $0,2 \times 0,0155 \times 0,0155$ m;

(4) Parafusos para acoplamento da base e do engaste;

O esquema do sistema mecânico montado para a realização das análises experimentais está representado na figura 3.20.

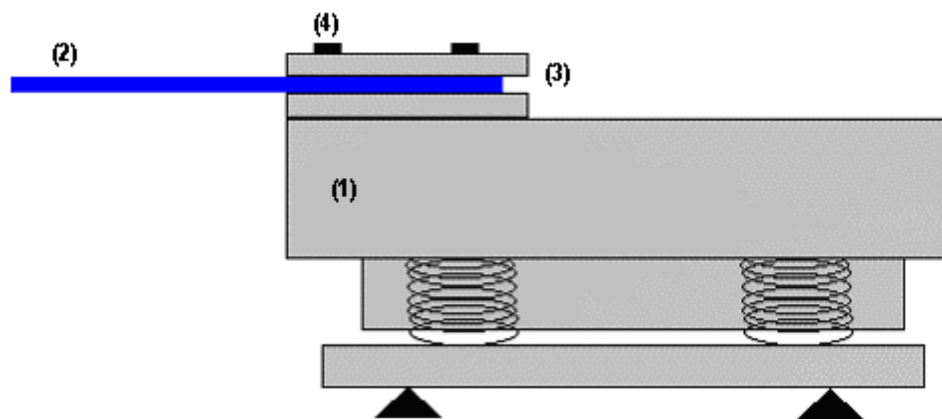


Figura 3.20 – Esquema do sistema mecânico montado.

3.2.1.2 Equipamentos Utilizados

Para a aquisição de sinais provenientes do sistema mecânico montado, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Sistema de aquisição de dados A/D Iotech DaqBook/112 de 12-bit (corrente: 360mA), placa DBK17 com 4 canais de entrada;

- Software de aquisição e análise de dados DasyLab 4.0 for Windows;
- Condicionador/Amplificador de sinais Nexus Conditioning Amplifier Z6 0400 da Bruel & Kjaer com 4 canais de entrada e 4 de saída;
- Acelerômetro Piezoelétrico da Brüel & Kjaer do tipo 4384V (sensibilidade 0,979 pC/ms⁻², range 0,1 – 12600 Hz).
- Transdutor de força da Bruel & Kjaer do tipo 8200 (sensibilidade: 3.93 pC/N, range de força: 1000N, tensão a compressão: 5000 N [-1000N a +5000N]) ;
- Amplificador de sinal MMF-LV103 (100 VA, 3Ω, 3 Hz, ..., 20kHz) .
- Oscilador eletrodinâmico VEB ROBOTRON – MESSELEKTRONIK modelo ESE 211 tipo 11076 (diafragma rígido, viga oscilante, 3 bolachas de fixação e 1 tubo de refrigeração).

O diagrama de blocos montado para a aquisição de sinais e análise de frequências é mostrado na figura 3.21.

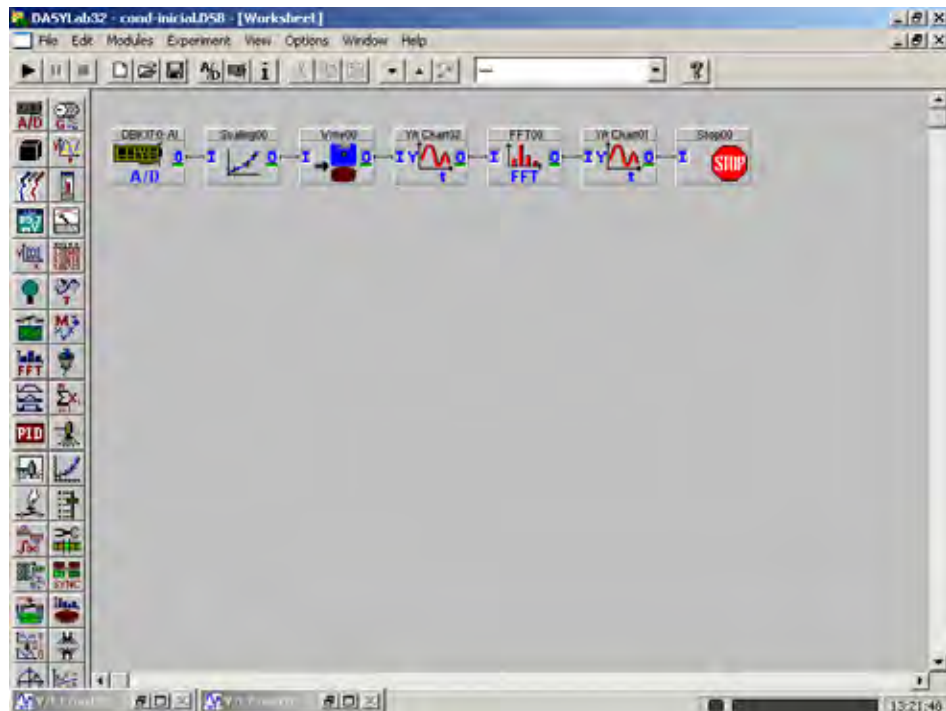


Figura 3.21 – Fluxograma para a aquisição de sinais e análise de frequência.

O sistema de equações diferenciais, na forma matricial, que descreve o movimento deste sistema mecânico é dado pela equação (2.60) no capítulo 2.

3.2.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA UMA EXCITAÇÃO IMPULSIVA

3.2.2.1 Placa engastada com uma trinca.

A placa descrita no item 3.1.2.1 foi submetida a um ensaio onde se excitou o sistema com uma força impulsiva de velocidade inicial de 2,5 m/s aplicado no nó 116. Determinou-se o valor desta velocidade através de uma conversão de unidades, considerando a sensibilidade do martelo de impedância e a duração do impacto.

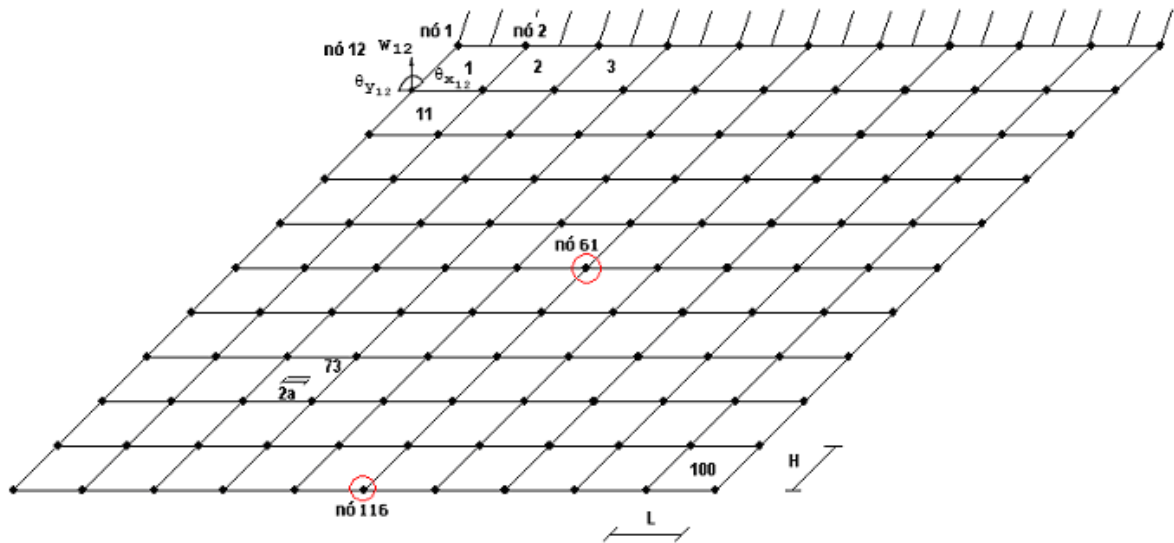


Figura 3.22 – Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.

Excitou-se o sistema com uma força impulsiva de velocidade inicial de 2,5 m/s aplicado no nó 116. Determina-se o valor desta velocidade através de uma conversão de unidades, considerando a sensibilidade do martelo de impedância e a duração do impacto.

No sistema simulado, considerou-se o amortecimento estrutural, verificado experimentalmente, como descrito anteriormente. Adquiriu-se 1024 pontos para os sinais experimentais de deslocamento no nó 61 em um intervalo de tempo de 0,4 segundos.

Nas figuras 3.23 a 3.28 têm-se os resultados desta simulação. Nas ordenadas apresenta-se os valores medidos de $\{w_{61}(t)\}$, que representa o deslocamento na direção vertical do nó 61 do sistema e os valores reconstruídos de $\{\hat{w}_{61}(t)\}$ para o observador de estado, e nas abscissas, o tempo em segundos.

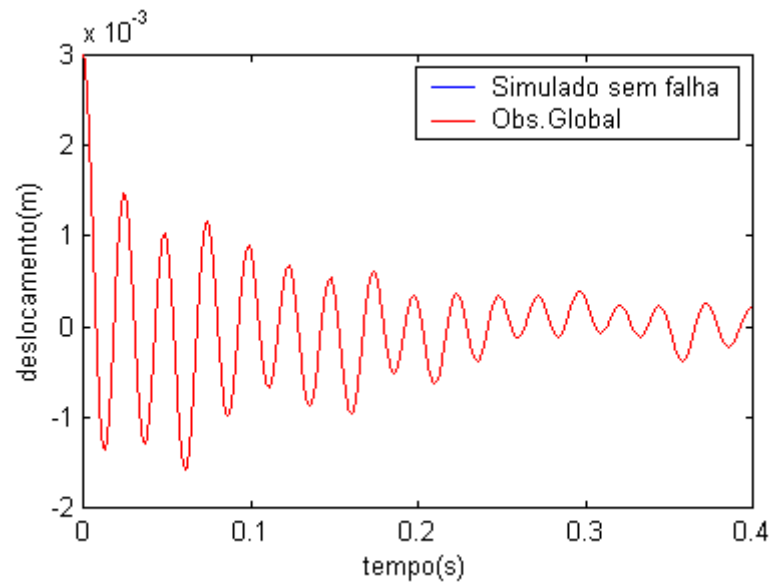


Figura 3.23 – Sistema real sem falha x Observador Global (condições iniciais).

Na figura 3.23 tem-se a curva de resposta do sistema real sem falhas. Foram adquiridos os pontos através de uma aquisição de sinais e a curva de resposta do observador global. A fim de detectar uma possível irregularidade no sistema.

Nota-se que as curvas são praticamente coincidentes, comprovando assim o fato de não haver nenhuma irregularidade com o sistema.

Na seqüência objetivando a simulação de uma falha, fez-se um corte com $2a=0.30L$ no elemento 73, ou seja, 30% de comprimento da trinca no elemento. Na figura 3.24 tem-se a curva da resposta do sistema real trincado (simulando 30% de comprimento da trinca) e a resposta do observador global. Nota-se que as curvas não são coincidentes, ou seja, o observador global conseguiu detectar uma possível falha no sistema.

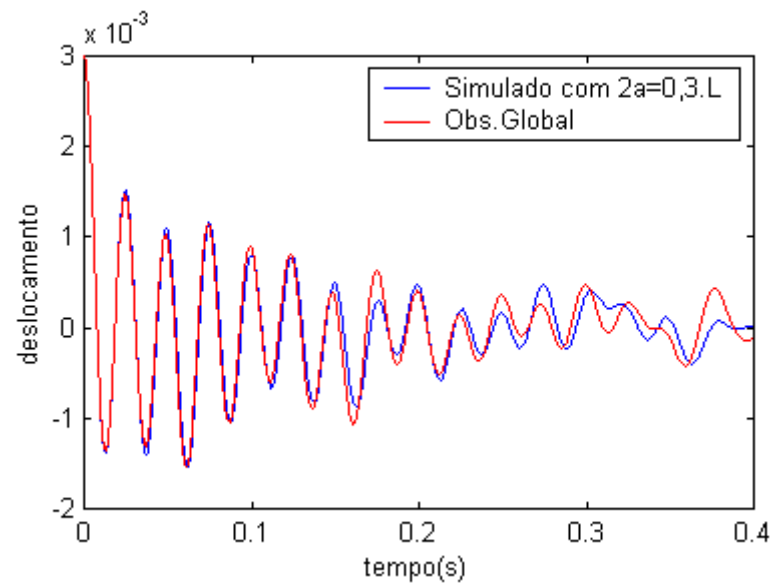


Figura 3.24 – Sistema real falho x Observador Global (condições iniciais).

Com o objetivo de localizar tal falha, fez-se uma análise através das figuras 3.25 e 3.28. Estas figuras apresentam as respostas dos observadores robustos com as seguintes perdas: $2a=0.1L$, $2a=0.2L$, $2a=0.3L$, $2a=0.4L$, respectivamente.

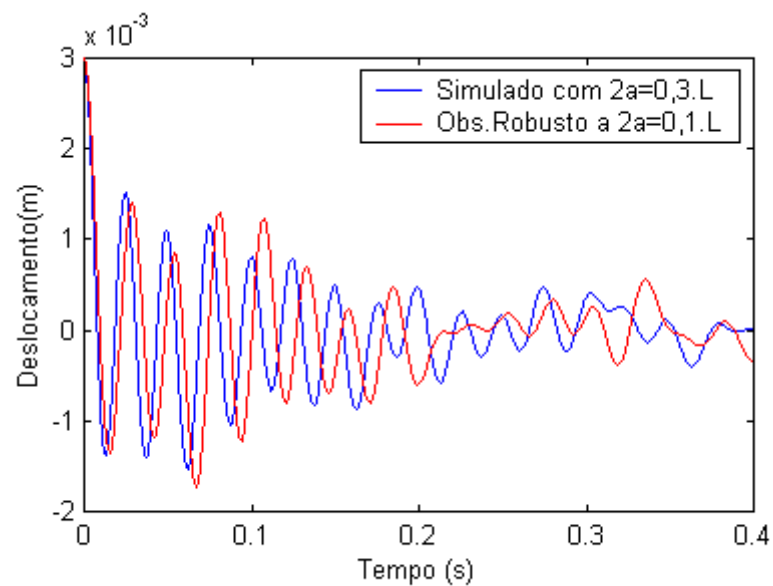


Figura 3.25 – Sistema real falho x Observador Robusto a 10% de comprimento de trinca (condições iniciais).

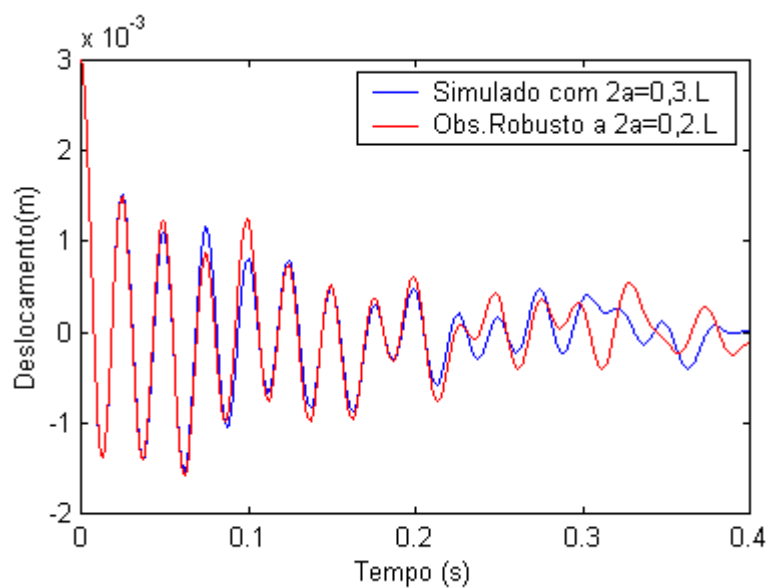


Figura 3.26 – Sistema real falho x Observador Robusto a 20% de comprimento de trinca (condições iniciais).

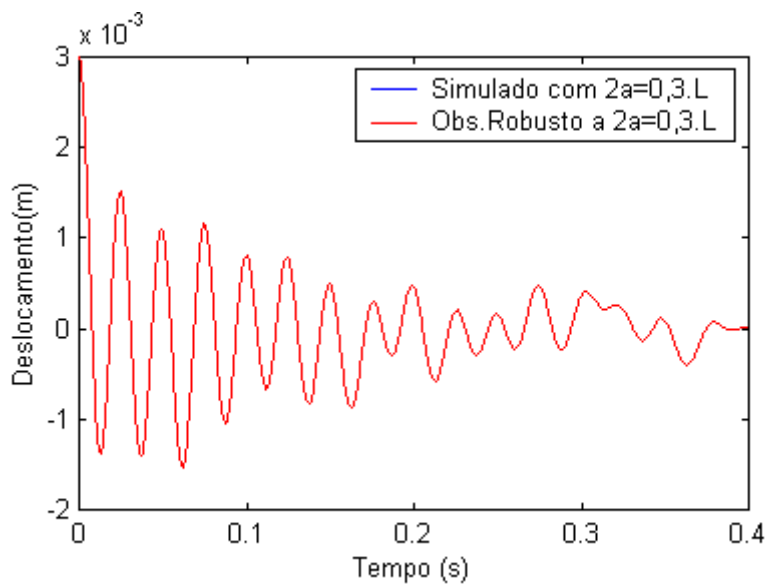


Figura 3.27 – Sistema real falho x Observador Robusto a 30% de comprimento de trinca (condições iniciais).

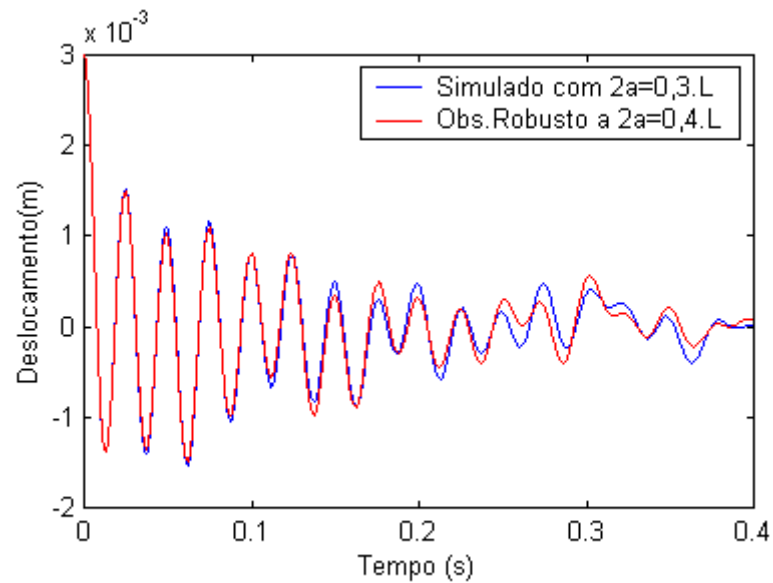


Figura 3.28 – Sistema real falho x Observador Robusto a 40% de comprimento de trinca (condições iniciais).

Nota-se que, somente na figura 3.27, houve uma maior coincidência entre as curvas. Ou seja, o observador robusto montado com $2a=0,30L$ (30% de comprimento de trinca no elemento 73) foi aquele que conseguiu localizar a falha do sistema. Portanto pode-se verificar a validade do método.

Observe que, tendo uma discretização com 100 elementos, a quantidade de curvas dos observadores robustos geradas são alta. Assim, as curvas apresentadas são referentes ao deslocamento vertical do nó 61, de modo que para os outros nós foram geradas curvas semelhantes, com observadores robustos para cada tamanho de trinca.

3.2.2.1.1 Tabela de Tendência para outros percentuais de falha

Com o objetivo de ampliar a validade do método, realizou-se o procedimento para outros percentuais de tamanho da trinca.

Na Tabela 3.4 pode-se verificar a detecção e localização das falhas, comparando o sistema global sem falha com o observador global (segunda linha com a segunda coluna da Tabela 3.4). Pode-se notar que a diferença RMS de $10e-6$ mostra que uma das curvas praticamente coincide. Isto é, o sistema real permanece praticamente igual ao observador global sem falha. Porém, não há existência de falha no sistema.

Uma vez inserida a falha ela é detectada através dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falha. Exemplificando, na terceira linha e terceira coluna da Tabela 3.4 verifica-se uma detecção de 10% de falha. Ou seja, a trinca atingiu 10% do comprimento total do elemento. Na seqüência inseriu-se falhas variando de 10 em 10% até atingir 40% do comprimento. Verifica-se a eficácia do banco de observadores através dos dados da Tabela 4.1.

Tabela 3.4 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$ – Falhas de $2a=0.10L$ até $2a=0.40L$.

	Real sem Falha (\neq RMS)	Real Falho $2a_1=0.10L$ (\neq RMS)	Real Falho $2a_2=0.20L$ (\neq RMS)	Real Falho $2a_3=0.30L$ (\neq RMS)	Real Falho $2a_4=0.40L$ (\neq RMS)
Obs. Gl.	7.0176e-06	9.8519e-03	2.5354e-02	5.6255e-03	3.8046e-02
Obs.Rob. a_1	3.0251e-03	3.3036e-06	2.1542e-02	3.1987e-03	2.9611e-02
Obs.Rob. a_2	7.7278e-03	7.6312e-03	7.8883e-06	5.4834e-03	3.2055e-02
Obs.Rob. a_3	9.5672e-03	3.4449e-03	2.1638e-02	7.6661e-06	3.2539e-02
Obs.Rob. a_4	2.5404e-02	4.0214e-03	6.8309e-03	2.4956e-03	8.7216e-06

3.2.2.2 Placa engastada com duas trincas simultâneas.

O mesmo ensaio realizado no item 4.2.1 foi repetido, com a diferença que agora duas trincas simultâneas foram feitas, no elemento 73 e 74. Na figura 3.29 tem-se a placa engastada e discretizada, mostrando a posição da nova trinca.

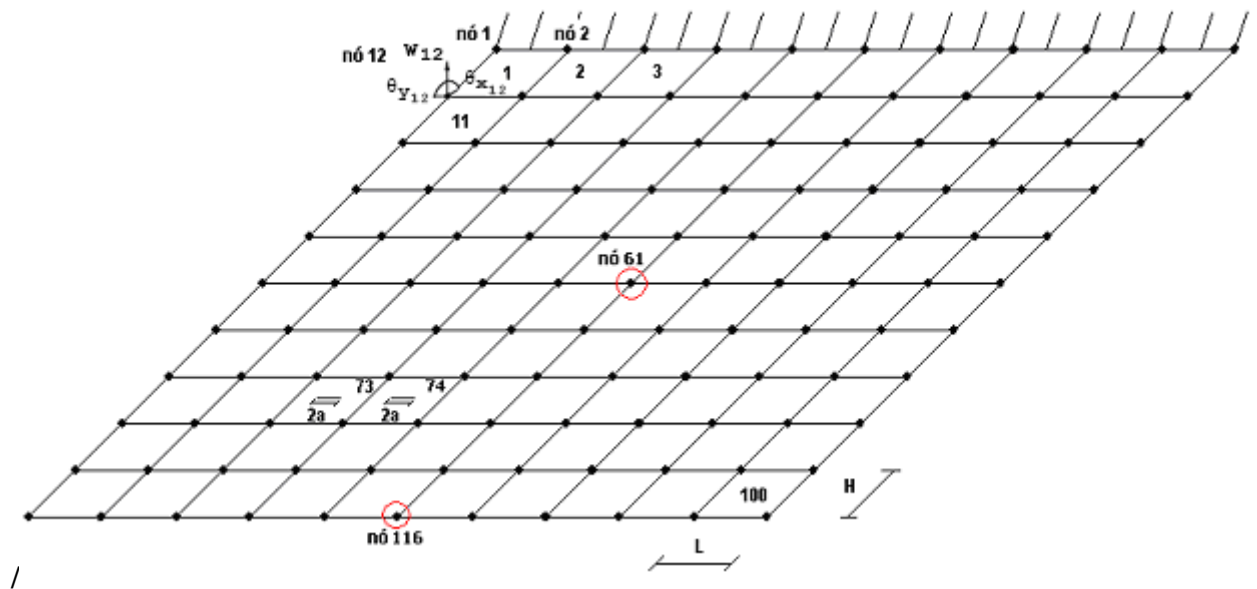


Figura 3.29 – Placa engastada e discretizada para aplicação numérica.

Da mesma forma anteriormente, o sistema foi excitado com uma força impulsiva de velocidade inicial de 2,5 m/s aplicado no nó 116. Determina-se o valor desta velocidade através de uma conversão de unidades, considerando a sensibilidade do martelo de impedância e a duração do impacto. Foi considerado o amortecimento estrutural no sistema simulado, verificado experimentalmente. Adquiriu-se 1024 pontos para os sinais experimentais de deslocamento no nó 61 em um intervalo de tempo de 0,4 segundos.

3.2.2.2.1 Tabela de Tendência para outros percentuais de falha

Nas Tabelas 3.5 e 3.6, pode-se verificar a detecção e localização das falhas, comparando o sistema global sem falha com o observador global (segunda linha com a segunda coluna da Tabela 3.5 e 3.6). Pode-se notar que a diferença RMS de $10e-6$ mostra que uma das curvas praticamente coincide. Isto é, o sistema real permanece praticamente igual ao observador global sem falha. Porém, não há existência de falha no sistema.

Uma vez inserida a falha ela é detectada através dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas. Exemplificando, na quarta linha e quarta coluna da Tabela 3.5 pode-se verificar uma detecção de 20% de falha, ou seja, a trinca atingiu 20% do comprimento total do elemento. Na quinta linha e quinta coluna da Tabela 3.6 pode-se verificar uma detecção de 30% de falhas, indicando que a trinca atingiu 30% do comprimento total do elemento.

Tabela 3.5 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$ falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$.

	Simulado Sem Falha (\neqRMS)	Simulado $2a_1=0.10L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_2=0.20L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_3=0.30L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_4=0.40L$ (\neqRMS)
Obs. Gl.	7.0106e-6	5.1948e-05	3.4679e-03	6.1314e-03	4.1648e-02
Obs.Rob. a_1	6.1647e-04	8.2548e-6	8.13478e-04	5.4678e-03	9.4979e-03
Obs.Rob. a_2	6.2478e-03	4.7979e-03	4.1476e-5	4.1787e-03	8.1348e-03
Obs.Rob. a_3	8.7548e-03	6.2354e-03	4.1973e-03	4.37919e-6	5.8264e-03
Obs.Rob. a_4	4.1204e-02	4.1475e-02	6.3487e-03	4.5468e-03	8.4682e-3

Tabela 3.6 – Diferença RMS dos valores de $w_{61}(t)$ falhas de $2a=0.1L$ até $2a=0.4L$.

	Simulado Sem Falha (\neqRMS)	Simulado $2a_1=0.10L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_2=0.20L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_3=0.30L$ (\neqRMS)	Simulado $2a_4=0.40L$ (\neqRMS)
Obs. Gl.	7.0176e-6	5.4679e-05	3.7548e-03	6.45689e-03	4.5248e-02
Obs.Rob. a_1	6.4879e-04	8.1326e-6	8.3245e-04	5.1245e-03	9.4527e-03
Obs.Rob. a_2	6.2156e-03	4.4212e-03	4.1745e-5	4.1657e-03	8.5246e-03
Obs.Rob. a_3	8.4478e-03	6.1224e-03	4.5264e-03	4.4879e-6	5.5246e-03
Obs.Rob. a_4	4.2347e-02	4.0154e-02	8.5240e-03	4.2344e-03	8.2246e-3

CAPÍTULO 4

4 DISCUSSÃO, CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

Inicialmente, o trabalho foi dividido em 4 etapas: levantamento bibliográfico, implementação computacional, comprovação experimental e confecção da dissertação.

No levantamento bibliográfico, realizou-se uma pesquisa sobre a metodologia dos observadores de estado aplicado à detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos, observando suas diversas aplicações na área de projetos de sistemas de controle com retroalimentação. Também foi realizado um levantamento sobre artigos publicados com a utilização de modelos de trincas, entre os quais destacam-se artigos publicados por Krawczuk em 2000, onde se utilizou um modelo de trinca modelado por elementos finitos.

Este trabalho teve como proposta o desenvolvimento de uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas contínuos utilizando modelos de trincas através da teoria dos observadores de estado.

Notou-se que nos estudos realizados para sistemas contínuos com falhas, a localização da mesma só é possível através de um grande número de medidas realizadas sobre a estrutura. A técnica dos observadores de estado utiliza um número reduzido de medidas, pois reconstruem os demais estados.

No sistema mecânico discreto de três graus de liberdade, com condições iniciais (item 3.1.1), a metodologia dos observadores de estado provou ser muito eficiente. Ou seja, mesmo com uma pequena alteração na rigidez de k_2 o método observou as alterações, como pode ser visto na figura 3.6.

A eficiência da metodologia dos observadores de estado pode ser comprovada através da simulação do sistema mecânico discreto de três graus de liberdade, com condições iniciais, onde uma pequena alteração da rigidez de k_2 pode ser observada, conforme visto na figura 3.6.

Na terceira etapa (item 3.1.2), a metodologia dos observadores de estado foi desenvolvida para um modelo de falha objetivando a detecção e localização de trincas. Para este sistema, considerou-se a ocorrência de duas trincas. Primeiramente, considerou-se uma trinca no elemento 73, acompanhando seu progresso a cada 10% de aumento de comprimento, em seguida, foi considerada a ocorrência de duas trincas simultâneas, nos elementos 73 e 74, onde também foi avaliado o progresso das mesmas a cada 10% de aumento de comprimento.

Na comprovação experimental, fez-se também uma análise gráfica e uma análise numérica. A análise gráfica foi realizada para o caso onde havia uma trinca no sistema, sendo possível detectar e localizar sua presença no sistema (30% de comprimento de trinca). Esta análise pode ser visualizada nas figuras 3.23 a 3.28 para excitação impulsiva. Nelas, verifica-se que somente o observador de estado robusto dedicado ao percentual de falha consegue detectar a irregularidade presente.

Para quantidades maiores de trincas e de elementos no sistema, a análise numérica se torna mais útil, tendo em vista uma melhor maneira de se obter os resultados para comparação. A

análise numérica foi realizada para o caso de duas trincas simultâneas, onde pode ser visualizada pelas Tabelas 3.2 e 3.3.

Portanto, analisando os resultados obtidos através de simulações computacionais e através da análise experimental, pode-se dizer que a metodologia desenvolvida para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos contínuos utilizando modelos de falhas obteve resultados bastante satisfatórios, mostrando desta forma a eficácia da metodologia desenvolvida.

PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

- ✓ Utilização de modelos de falhas em sistemas rotativos considerando-se efeitos de fadiga.
- ✓ Desenvolvimento da metodologia dos observadores de estado em rotores com entradas desconhecidas.
- ✓ Utilização de modelos considerando a não linearidades na propagação de trincas.

REFERÊNCIAS

CAWLEY P.; ADAMS R. D. The Location of defects in structures from measurement of natural frequencies. **J. Strain Anal**, London, v. 14, n. 5, p. 49-57, 1979

CHEN, J.; PATTON, R. J. Optimal filtering and robust fault diagnosis of stochastic systems with unknown disturbances. **IEE Process and Control: theory and application**, China, v. 143, n. 2, p. 31-36, 1996.

CHIESA, M.; SKALLERUD, B.; Gross, D. Closed form line spring yield surfaces for deep and shallow cracks: formulation and numerical performance. **Computers & Structures**, Great Britain, v. 80, n. 7-8, p 553-545, 2002.

CLARK, R. N. Instrument fault detection. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, USA, v. AES-14, n. 3, p.456-465, 1978.

DORF, R.C.; BISHOP, R.H. **Modern control systems**. USA: LTC , 1980. 493 p.

FRANK, P.M.; SELIGER, R. **Fault detection and isolation in automatic processes, control and dynamics systems**. USA: Elsevier, 1991. p. 241-287.

GAWRONSKI, W. **Dynamics and control of structures**. USA: Springer, 1998 p. (Mechanical Engineering Series).

GE, W.; FANG, C. Z. **Detection of faulty components via robust observation**. Beijing: Department of Automation, 1987. p. 582-599.

GE, W.; FANG, C. Z. Detection of faulty components via robust observation. **International Journal of Control**, Beijing, v. 47, n. 2, p. 581-599, 1988.

HOU, M.; PATTON, R. J. Input observability and input reconstruction. **Automatica**, USA, v. 34, n. 6, p. 789-794, 1998.

JANSSEN, K.; FRANK, P. M. Component failure detection via state estimator. **Preprints of IFAC**, Korea, v. 1, n. 3, p.147-152, 1984.

KRAWCZUK, M. A rectangular plate finite element with an open crack. **Computers & Structures**, Great Britain , v. 46, n. 3, p. 487-493, 1993.

KRAWCZUK, M.; ZAK, A.; Ostachowicz, W. Finite element model of plate with elasto-plastic through crack. **Computers & Structures**, Great Britain , v. 79, n. 3, p 519-532, 2001.

LEMOS, G.F. **Detecção de falhas via observadores de estado em sistemas rotativos**. 2004.112f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

LUENBERGER, D. G. Observing the State of a Linear System. **IEEE Military Electronics**, USA, v. MIL-8, n. 1, p. 74-80, 1964.

LUENBERGER, D.G. Observers for multivariable systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, USA, v. AC11, n. 2, p. 190-197, 1966.

LUENBERGER, D. G. An introduction to observers. **IEEE Transactions on Automatic Control**, USA, v. AC16, n. 6, p. 596-602, 1971.

MARANO, J. H. **Localização de Falhas Via Observadores de Estado em Sistemas com Variação de Parâmetros**. 2002. 130f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

MEIROVITCH, L. **Dynamics and control of structures**. Blacksburg: Department of Engineering Science and Mechanics, 1990. 193 p.

MELO, G.P. **Detecção e localização de falhas via observadores de estado de ordem reduzida**. 1998 125f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Brasil: Prentice-Hall do Brasil, 1998. 813 p.

SCHWARZENBACH, J.; GILL, K. F. **System modelling and control**. UK: Mechanical Engineering Department University of Leeds, 1978. 368 p.

SHEN, L.C.; HSU, P.L. Robust design of fault isolation observers. **Pergamon Automática**, Beijing, v. 34, n. 11, p. 1421-1429, 1998.

VALER, C. E. I. **Uma introdução ao controle robusto com aplicações a estruturas flexíveis.**

1994. 115 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1999.

WANG, S.D.; KUO, T. S.; HSU, C. F. Optimal-observer design for linear dynamical systems with uncertain parameters. **Int. J. Control**, France, v. 45, n. 2, p. 701-711, 1987.

WANG, H.; DALEY, S. Actuator fault diagnosis: an adaptative observer-based technique. **IEEE Transactions on automatic control**, France, v. 1.41, n. 7, p. 1073-1078, 1996.

WATANABE, K.; HIMMELBLAU D. M. Instrument fault detection in systems with uncertainties. **International Journal of Systems Science**, USA, v. 13, n. 2, p.137-158, 1982.

YU, D.; SHIELDS; D.N. A bilinear fault detection observer. **Pergamon**, Beijing, v. 32, n. 11, p.1597-1602, 1996.

YUEN, M. M. F. A numerical study of the eigenparameters of a damaged cantilever. **Journal of Sound and Vibration**, UK, v. 103, n. 3, pp. 301-310, 1985.