

ALGUNS ASPECTOS E APLICAÇÕES DA METODOLOGIA DOS OBSERVADORES DE ESTADO NA DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE TRINCAS EM SISTEMAS MECÂNICOS CONTÍNUOS

Edson Luiz Valverde Castilho Filho, edsluflil@aluno.feis.unesp.br¹
Vinícius Fernandes, viniciusfer@aluno.feis.unesp.br¹
Gilberto Pechoto de Melo, gilberto@dem.feis.unesp.br¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, nº56, Ilha Solteira – SP, Brasil.

Resumo: *Mesmo sendo sofisticadas, as ferramentas de análise de sistemas dinâmicos ainda apresentam grande dificuldade de prever o comportamento dinâmico de alguns componentes estruturais e elementos de máquinas, seja pela inadequação ou imprecisão do modelo teórico, ou pela dificuldade de se realizar medidas de algumas variáveis de estado. A Metodologia dos Observadores de Estado se insere perfeitamente nesta realidade por sua capacidade de estimar variáveis de estado de todo o sistema baseado em medidas realizadas e variáveis de controle, apresentando a possibilidade de reconstrução dos vetores de estado em componentes onde a medição é difícil ou mesmo impossível, detectando assim falhas em pontos que não podem ter suas medidas realizadas. Devido à magnitude dos seus efeitos, a nucleação de trincas, ou sua propagação, necessitam de uma atenção especial em sistemas mecânicos. Sabendo que este tipo de avaria pode aparecer pela deterioração do sistema causada por vibrações e condições de excitação dinâmicas, é um excelente objeto de estudo da aplicação da Metodologia dos Observadores de Estado na detecção, localização e avaliação das condições da trinca. Para o sistema aplicado neste estudo, uma viga engastada, o Método dos Elementos Finitos foi empregado para realizar a sua discretização, utilizando elementos de viga com fundação elástica, obedecendo ainda um modelo de trinca proposto. Um sistema de observação completo, com um Observador Global do processo e Observadores Robustos a cada parâmetro, foi montado com o intuito de acompanhar a variação da rigidez de cada elemento discretizado, localizando a falha e avaliando a porcentagem de penetração da trinca na viga. Para validação experimental do processo proposto, foi montado um sistema idêntico ao referido anteriormente e às suas medições foi adicionado um sistema de observação montado em ambiente SIMULINK (MATLAB®) que forneceu os resultados graficamente e através das diferenças RMS.*

Palavras-chave: *Observadores de Estado, Trincas, Sistemas Mecânicos*

1. OBJETIVOS

O trabalho tem como propósito o estudo de novas modelagens matemáticas para discretização de trincas em sistemas contínuos realizando ainda o projeto de Observadores de Estado (Observadores Identidade) para a problemática retratada, envolvendo o desenvolvimento de rotinas computacionais no software MATLAB para discretização de vigas pelo Método dos Elementos Finitos, simulando condições de trinca e sua previsão utilizando os Observadores projetados, bem como a validação experimental em uma viga engastada sujeita a carregamentos dinâmicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Basicamente 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, podendo-se detectar falhas nestes pontos sem o conhecimento de suas medidas, Melo et al (1995). 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. Em 1966, Luenberger demonstrou em seu trabalho que se um sistema é linear, seu vetor de estado pode ser aproximadamente reconstruído através do projeto de um observador. Em 1971, o mesmo autor introduz os conceitos de diversos tipos de observadores de estado, como por exemplo, o Observador Identidade, Marano et al (2002) que utiliza uma transformação linear a partir do sinal obtido das medições do sistema para comparar com os

resultados fornecidos pelos observadores. Apesar de o conceito ser relativamente antigo, os observadores propostos são, ainda hoje utilizados, sendo tema de estudos e aprofundamento.

Em 1990 a matriz de rigidez do elemento e a equação de movimento de uma viga trincada foram determinadas Qian et al, (1990), utilizando o equacionamento proveniente da mecânica da fratura, fazendo com que fosse possível assim discretizar um sistema trincado. Em 1995 foi criado um modelo de viga utilizando o Método dos Elementos Finitos, que pode aplicar o modelo de Qian para a trinca, tornando possível o estudo de novas formas para detectar este tipo de problema. O modelo empregado na pesquisa simplifica o melhor modelo de trinca que se pode obter, que deve considerara propagação e crescimento lateral da trinca, as características dinâmicas do elemento trincado e da própria trinca e a influencia da trinca sobre o campo de tensão próximo aos elementos subseqüentes.

Hoje, o estudo da detecção de trincas em sistemas mecânicos repousa sobre o estudo de novos observadores e na construção de modelos mais atuais para trincas tornando assim mais precisas as previsões que as simulações podem trazer.

2.1. Observadores de Estado

Desde 1964, os observadores de estado têm sido empregados em numerosos projetos de sistemas de controle, dos quais uma parcela muito pequena vem sendo explicitada. A simplicidade de seu projeto e resolução faz do Observador de Estado uma metodologia muito atrativa, principalmente se levar em conta a possibilidade que o mesmo oferece de reconstruir estados não mensurados do sistema.

Um Observador de Estado para um sistema dinâmico proposto, que possui como variáveis de estado $\{x(t)\}$, $\{y(t)\}$, sendo as variáveis de saída e $\{u(t)\}$ sendo a variável de entrada, é um sistema dinâmico auxiliar. Em outras palavras, o observador é uma cópia do modelo do sistema original que possui as mesmas entradas que este sistema e tem a capacidade de estimar os estados desconhecidos do sistema original a partir dos estados conhecidos. A Figura (1) elucida a definição exposta, considerando que $[L]$ é a Matriz dos Observadores de Estado.

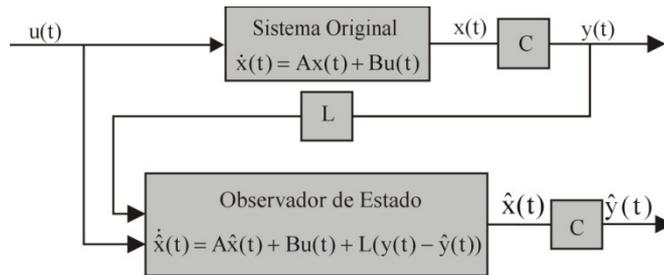


Figura 1. Definição de um Observador de Estados

A construção de um observador só é possível se o sistema original é observável ou, no pior dos casos, detectável. Diferentemente do sistema dinâmico, que é físico, o sistema de observação é abstrato e gerado por rotinas computacionais. Existem vários tipos de observadores de estado, contudo o Observador Identidade foi escolhido para a realização da pesquisa devido a sua boa convergência e facilidade de implementação.

2.1.1. Observador Identidade

Para descrição de um Observador do tipo Identidade segue inicialmente a formulação fornecida por sistema linear e invariante no tempo mostrado pela equação (1):

$$\begin{aligned} \{\dot{x}(t)\} &= [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \\ \{y(t)\} &= [C_{me}]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde $[A] \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $[B] \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $[C_{me}] \in \mathbb{R}^{k \times n}$, $[D] \in \mathbb{R}^{k \times p}$, n é a ordem do sistema, p é o numero de entradas do tipo $\{u(t)\}$ e k é o número de saídas do tipo $\{y(t)\}$. Assumindo que este sistema seja completamente observável, Melo et al (1995), tem-se que o sistema de observação para o mesmo é:

$$\{\dot{\bar{x}}(t)\} = [A]\{\bar{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L]\{\{y(t)\} - \bar{y}(t)\} \quad (2)$$

E

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}]\{\bar{x}(t)\} \quad (3)$$

Onde $[L]$ e a Matriz Identidade do Observador de Estado. Segue ainda que a estimativa para o erro do estado é:

$$\{e(t)\} = \{\bar{x}(t)\} - \{x(t)\} \quad (4)$$

E a estimativa do erro de saída (resíduo) é dada por:

$$\{\mathcal{E}(t)\} = \{\bar{y}(t)\} - \{y(t)\} \quad (5)$$

Substituindo as equações (1), (2) e (3) em (4) e (5), o resultado obtido é:

$$\{\dot{e}(t)\} = ([A] - [L][C_{me}])\{e(t)\} + [L][D]\{u(t)\} \quad (6)$$

E

$$\{\mathcal{E}(t)\} = [C_{me}]\{e(t)\} - [D]\{u(t)\} \quad (7)$$

Onde a expressão $\{\dot{e}(t)\} = d\{e(t)\} / dt$ representa a evolução do erro do observador de estado.

2.1.2. Observadores Global e Robustos

Dois tipos de observadores são utilizados na detecção e localização de falhas em sistemas dinâmicos. O Observador Global é o responsável pela detecção de uma possível fonte de falha no sistema, enquanto que o Observador Robusto é capaz de localizar e avaliar o parâmetro em falha, Marano et al (2002). A construção matemática destes dois tipos de observadores é a mesma, ambos serão aplicados como Observadores do tipo Identidade, eles somente diferem entre si na função desempenhada e nas alterações realizadas em seus parâmetros próprios de construção que são inerentes a função de cada um.

O Observador Global não é nada mais do que uma cópia fiel do modelo do sistema original. Assim, é possível se realizar uma comparação entre os parâmetros coletados com os parâmetros obtidos com a construção do Observador Global. Essa comparação se dá através da comparação das curvas do comportamento dinâmico da variável medida, se alguma diferença é encontrada entre as duas pode-se concluir que o sistema real possui algum ponto de variação dos seus parâmetros.

A partir desta informação, o novo foco é a busca do parâmetro em falha, que é realizada com a construção de Observadores Robustos a todos os parâmetros passíveis de falha. Estes observadores são construídos com uma alteração gradual na sua matriz dinâmica aos respectivos parâmetros observados. Desta forma, a operação de localização de falha deste observador se completa quando a comparação entre as curvas da variável medida e a curva construída pelo observador resultar numa diferença que tende a zero.

Esta metodologia pode ser aplicável a qualquer sistema mecânico que se pretenda controlar desde que o mesmo seja observável. A idéia básica é a construção de um banco de Observadores Robustos a cada parâmetro do sistema, porque assim, este banco pode enviar em tempo real a diferença RMS, entre o sinal obtido com a medição e a curva gerada pelo observador, a uma unidade de decisão lógica que localizará o parâmetro em falha e decidirá através de níveis de tolerância se é necessário o acionamento de um sistema de segurança Lemos et al (2004). A figura abaixo mostra o funcionamento da unidade de decisão lógica baseada na informação fornecida pelos observadores.

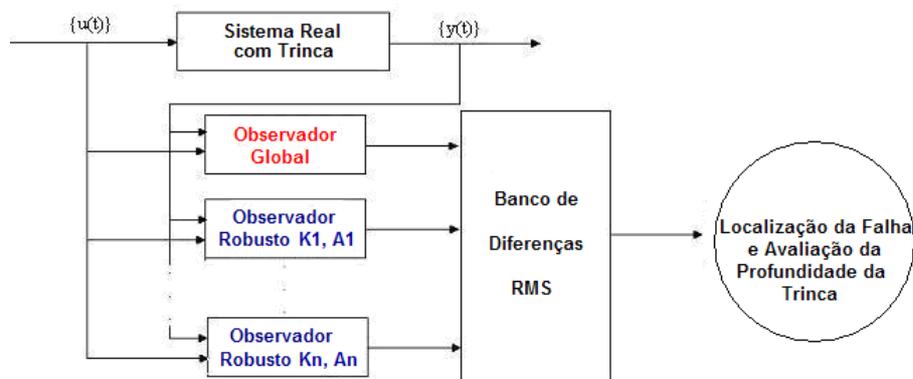


Figure 2. Princípio do Monitoramento de um Sistema com Observadores Robustos

2.2. Trincas em Vigas

Sabendo do risco que uma trinca apresenta dentro de um sistema mecânico, faz-se necessária a identificação da ocorrência desse tipo de falha e a análise do comprometimento da estrutura em estudo. A posição da trinca e seu tamanho, podem ser detectados por alterações na frequência natural e nos modos de vibrar. Quando uma viga é submetida a situações dinâmicas a trinca abre e fecha alternadamente, dependendo da direção da vibração, causando variações dos parâmetros físicos do sistema tais como a rigidez.

A presença de uma trinca na viga, de acordo com o princípio de Saint-Venant, causa uma perturbação na distribuição das tensões nesta região por ser uma variação de secção transversal. Esta perturbação é especialmente relevante quando a trinca é aberta e determina uma redução local de rigidez, o que trás uma aproximação satisfatória de que quando a trinca está fechada não há distúrbios no sistema. Quando este tipo de sistema é modelado por elementos finitos, é necessário se acercar de cuidados especiais na construção das matrizes de massa, e rigidez. Considerando que a perda de massa em uma trinca é mínima, conclui-se que a matriz de massa global não sofre nenhuma alteração com a presença da trinca, até mesmo porque o próprio elemento trincado mantém sua matriz de massa [M] inalterada:

$$[M] = \frac{mL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & 54 & -3l^2 & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde m é a massa do elemento e L é o comprimento total da viga.

A matriz de amortecimento não se obtém com facilidade de uma modelagem teórica, e por este motivo se considera o amortecimento estrutural. A sua determinação se dá com a simplificação da viga como um modelo de apenas um grau de liberdade, em que se aplicando os parâmetros da viga pode-se determinar o decremento logarítmico (ξ) da curva de deslocamento da viga e empregando a frequência natural do sistema simplificado, uma equação do amortecimento equivalente pode ser encontrada:

$$C_{eq} = 4\pi \cdot m \cdot f_n \cdot \xi \quad (9)$$

Onde C_{eq} é o amortecimento equivalente, m é a massa total da viga e f_n é a frequência natural do sistema simplificado. Aplicando este resultado em uma matriz identidade da ordem de um elemento de viga (4x4), obtém-se então a matriz de amortecimento do elemento:

$$[C] = C_{eq} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2.1. Matriz de Rigidez do Elemento Trincado

O maior inconveniente em se determinar como um sistema trincado pode ser descrito é a construção de sua matriz de rigidez. Todas as aproximações para que isto pudesse ser feito resultaram de uma complexa teoria de resistência dos materiais aliada à mecânica da fratura aplicada a métodos numéricos. De acordo com o princípio de Saint-Venant, o campo de tensões da trinca é somente afetado na região adjacente a trinca, então, a matriz de rigidez pode ter sua alteração realizada somente nos parâmetros relacionados ao elemento trincado, levando em conta a limitação do tamanho do elemento, que em sua construção normal se insere na Teoria de Euler Bernoulli com função hermitiana:

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{Ebh^3}{l^3} & \frac{Ebh^3}{2l^2} & -\frac{Ebh^3}{l^3} & \frac{Ebh^3}{2l^2} \\ \frac{Ebh^3}{2l^2} & \frac{Ebh^3}{3l} & -\frac{Ebh^3}{2l^2} & \frac{6l}{Ebh^3} \\ -\frac{Ebh^3}{l^3} & -\frac{Ebh^3}{2l^2} & \frac{Ebh^3}{l^3} & -\frac{2l^2}{Ebh^3} \\ \frac{Ebh^3}{2l^2} & \frac{Ebh^3}{6l} & -\frac{Ebh^3}{2l^2} & \frac{3l}{Ebh^3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material da viga, b é a largura e h a altura da seção da viga.

Devido à descontinuidade causada pela deformação do elemento trincado, é muito difícil encontrar uma função apropriada que expresse com uma boa aproximação a energia potencial elástica do elemento, e por este motivo que o cálculo da energia adicional de tensão vem sendo profundamente estudada para este tipo de caso através das teorias de mecânica da fratura.

Desta forma, a expressão para a matriz de rigidez do elemento trincado (k_{trinca}) é uma função explícita de vários parâmetros, tais como coeficientes flexibilidade e dimensões da trinca. Contudo uma simplificação obtida foi à realização da descrição da matriz, alterada por coeficientes de avaliação da trinca, onde o coeficiente para a trinca aberta (α) é tabelado. Este coeficiente é função da profundidade da trinca e da relação entre altura e comprimento de cada elemento, e este valor possui influência direta na matriz de rigidez do elemento trincado:

$$k_{\text{Crack}} = \alpha_1 \begin{bmatrix} k_{11}\alpha_2 & k_{12}\alpha_2 & k_{13}\alpha_2 & k_{14}\alpha_2 \\ k_{12}\alpha_2 & k_{22}\alpha_3 & k_{23}\alpha_2 & k_{24}\alpha_4 \\ k_{13}\alpha_2 & k_{23}\alpha_2 & k_{33}\alpha_2 & k_{34}\alpha_2 \\ k_{14}\alpha_2 & k_{24}\alpha_4 & k_{34}\alpha_2 & k_{44}\alpha_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Desta forma, para cada observador robusto projetado, há uma alteração na matriz de rigidez global na posição do elemento trincado, reduzindo os valores dos seus termos de acordo com a constante proporcional. Então, a cada matriz dinâmica construída, Eq.(13), deve-se recalcular o quadrante da mesma relacionada à matriz de rigidez (o terceiro quadrante):

$$[A]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & \vdots & [I]_{n \times n} \\ \dots & \dots & \dots \\ -([M]^{-1}[K])_{n \times n} & \vdots & -([M]^{-1}[C])_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde [A] é a Matriz Dinâmica, [0] é uma matriz de zeros, [I] é uma matriz Identidade, [M] é a Matriz Global de Massa, [C] é a Matriz Global de Amortecimento e [K] é a Matriz Global de Rigidez.

2.2.2. Equação do Movimento do Elemento Trincado

A resposta dinâmica da viga em intervalos de tempo em que a trinca está fechada, pode ser considerada, para simplificação, como uma viga sem trinca. Isto se desprende do fato de que as interfaces da trinca interagem entre si completamente. Sob ação da força de excitação, o abrir e fechar da trinca se alternará em função do tempo.

A equação de movimento de uma viga trincada discretizada em N elementos finitos e sujeita a uma excitação externa $f(t)$ pode ser descrita pela Eq. (14), onde M é a matriz de massa, C é a matriz de amortecimento, $(K_u - \gamma \Delta K)$ é a matriz de rigidez e $\Delta K = K_u - K_c$. Por definição $\gamma = 1$ quando a trinca está aberta e $\gamma = 0$ quando fechada.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + (K_u - \gamma \Delta K)u(t) = f(t) \quad (14)$$

Foi considerado $\gamma = 1$, porque ao passo que a trinca se mantém fechada ($\gamma = 0$) a matriz de rigidez é composta somente pelas partes em que a trinca não é considerada, então neste instante de tempo não há falha. Esta consideração é realizada também para evitar o aparecimento de não linearidades relacionadas ao movimento oscilatório da trinca Na matriz dinâmica do sistema.

3. METODOLOGIA

3.1. Simulações Computacionais

Para o sistema sugerido, uma viga engastada, foi utilizada uma modelagem pela técnica dos Elementos Finitos utilizando elementos de viga suportados por uma fundação elástica, como proposto por Choy em 1995, obedecendo a modelagem proposta por Qian (1990) para a trinca. A viga é discretizada em cinco elementos sendo que em um deles está presente a trinca. O elemento trincado foi modelado como trinca aberta durante todo o período de excitação da viga.

Para esse sistema foram simuladas condições de impacto impulsivo e excitação harmônica e analisados os resultados fornecidos pelos observadores de estado através de diferenças RMS entre as duas funções. Utilizou-se um sistema de observação completo com um Observador Global do Processo e Observadores Robustos dedicados ao acompanhamento da variação da rigidez de cada elemento de viga, realizando a localização da falha e a avaliação da porcentagem de penetração da trinca na viga.

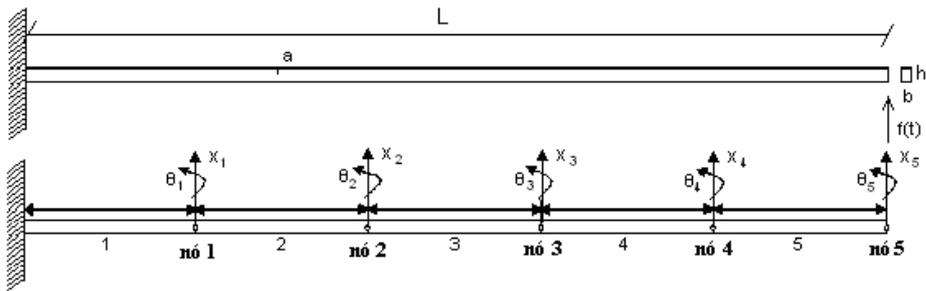


Figura 3. Esquematização da viga discretizada com a trinca presente no segundo elemento.

As simulações foram desenvolvidas computacionalmente no software MATLAB® em duas etapas: Inicialmente construiu-se um algoritmo de criação de matrizes de rigidez através do estudo dos parâmetros da viga e posteriormente desenvolveu-se um algoritmo que realiza graficamente e numericamente a função de detecção e localização das trincas.

3.2. Etapa Experimental

Na etapa experimental complementou-se o desenvolvimento de rotinas computacionais com a criação de uma rotina em ambiente SIMULINK (MATLAB®) que executa a leitura em tempo real dos sinais provenientes do sistema de aquisição e os processa realizando a localização da falha.

A rotina engloba a detecção, localização e avaliação da falha em seu estado de medida, apresentando como resultado final uma compilação de todos os resultados possíveis da análise do sistema como resultado da reconstrução dos estados pelos Observadores.

O foco do estudo experimental foi incidido sob as Excitações Harmônicas, para a análise, no domínio do tempo, da validade do método. Para isso, utilizou-se uma viga de aço engastada em um suporte, fixado sob uma mesa inercial, montada de forma a receber a excitação direta de um excitador eletromecânico em sua extremidade livre. As medidas foram realizadas através de uma cadeia de medição com um sensor piezelétrico.

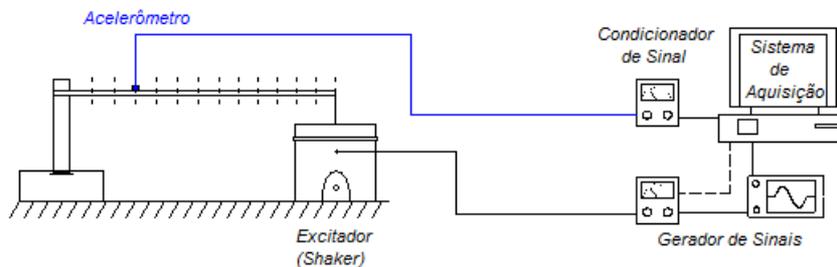


Figura 4. Montagem Experimental de Excitação Harmônica.

As Excitações Impulsivas foram realizadas por intermédio de deslocamentos iniciais na extremidade livre da viga de forma a garantir uma uniformidade nos resultados, devido à precisão fornecida pela medida de deslocamento, para avaliação uniforme das diversas profundidades de trinca. A grandeza deslocamento foi escolhida não só pela precisão, mas também por impor ao sistema uma força de função do tipo degrau, que se aproxima muito a função impulso unitário se for analisada no período após impulso. Além disso, o sistema de aquisição de sinais para geração de uma função impulso com um martelo, por exemplo, seria muito mais sofisticado, sendo que se consegue reproduzir com certa precisão, resultados à partir da técnica do deslocamento inicial.

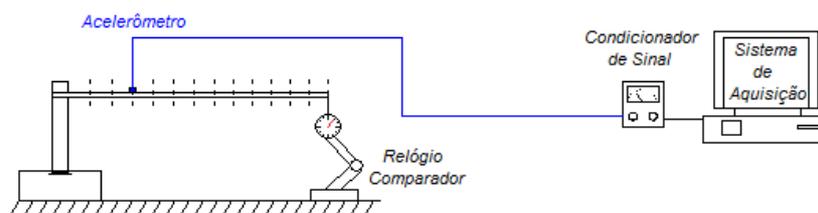


Figura 5. Montagem Experimental de Excitação Impulsiva.

4. RESULTADOS

Para as simulações computacionais realizadas pode-se verificar a detecção e localização das falhas comparando o sistema global sem falha com o observador global. Nota-se que em média a diferença RMS de $10E-10$ mostra uma coincidência das curvas. Isto é, se o sistema real permanece praticamente igual ao observador global sem falha, não há existência de falhas no sistema.

Uma vez inseridas as falhas elas são detectadas verificando-se a não coincidência entre as curvas citadas anteriormente e através dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos as falhas. Exemplificando, na terceira linha e terceira coluna da Tab. (1) pode-se verificar uma detecção de 5% de falha. Ou seja, as trincas atingiram 5% da profundidade total dos elementos. Na seqüência, inseriram-se falhas variando de 5% em 5% até atingir 30% da profundidade da trinca, como apresenta a Tabela (1).

Tabela 1. Resultado das diferenças RMS para o elemento trincado em uma simulação de força impactante.

	<i>Sistema Simulado sem Falhas</i>	<i>Simulado com 5% de Falha</i>	<i>Simulado com 10% de Falha</i>	<i>Simulado com 15% de Falha</i>	<i>Simulado com 20% de Falha</i>	<i>Simulado com 25% de Falha</i>	<i>Simulado com 30% de Falha</i>
<i>Obs. Global</i>	9.0647e-12	1.6981e-03	1.9302e-02	5.4116e-02	1.2969e-01	9.5743e-01	6.4212e-01
<i>Obs. 5%</i>	2.0342e-03	1.1934e-11	1.5669e-02	5.3738e-02	9.3116e-02	5.3219e-01	2.1573e-01
<i>Obs. 10%</i>	6.1713e-03	9.2233e-03	2.0736e-11	3.4128e-02	7.5412e-02	1.7304e-01	1.4032e-01
<i>Obs. 15%</i>	2.5082e-02	2.7802e-02	2.0286e-02	8.8463e-10	3.7926e-02	7.0362e-02	8.7683e-02
<i>Obs. 20%</i>	5.1826e-02	5.4075e-02	4.3481e-02	2.3017e-02	4.0250e-10	1.5121e-02	4.2123e-02
<i>Obs. 25%</i>	2.8913e-02	4.0293e-01	3.1792e-02	3.6572e-02	5.8342e-02	2.3452e-10	3.0682e-02
<i>Obs. 30%</i>	7.4712e-01	2.1742e-01	7.9165e-01	6.9023e-02	8.7931e-02	3.0329e-02	1.9643e-10

Como pode ser observado, houve a coincidência dos valores para o sistema simulado e dos observadores referentes às respectivas profundidades da trinca (representados pelos elementos hachurados da tabela), o que comprova a eficácia do banco de observadores utilizado. A figura a seguir representa a evolução dos observadores para uma porcentagem máxima de trinca admissível de 30%.

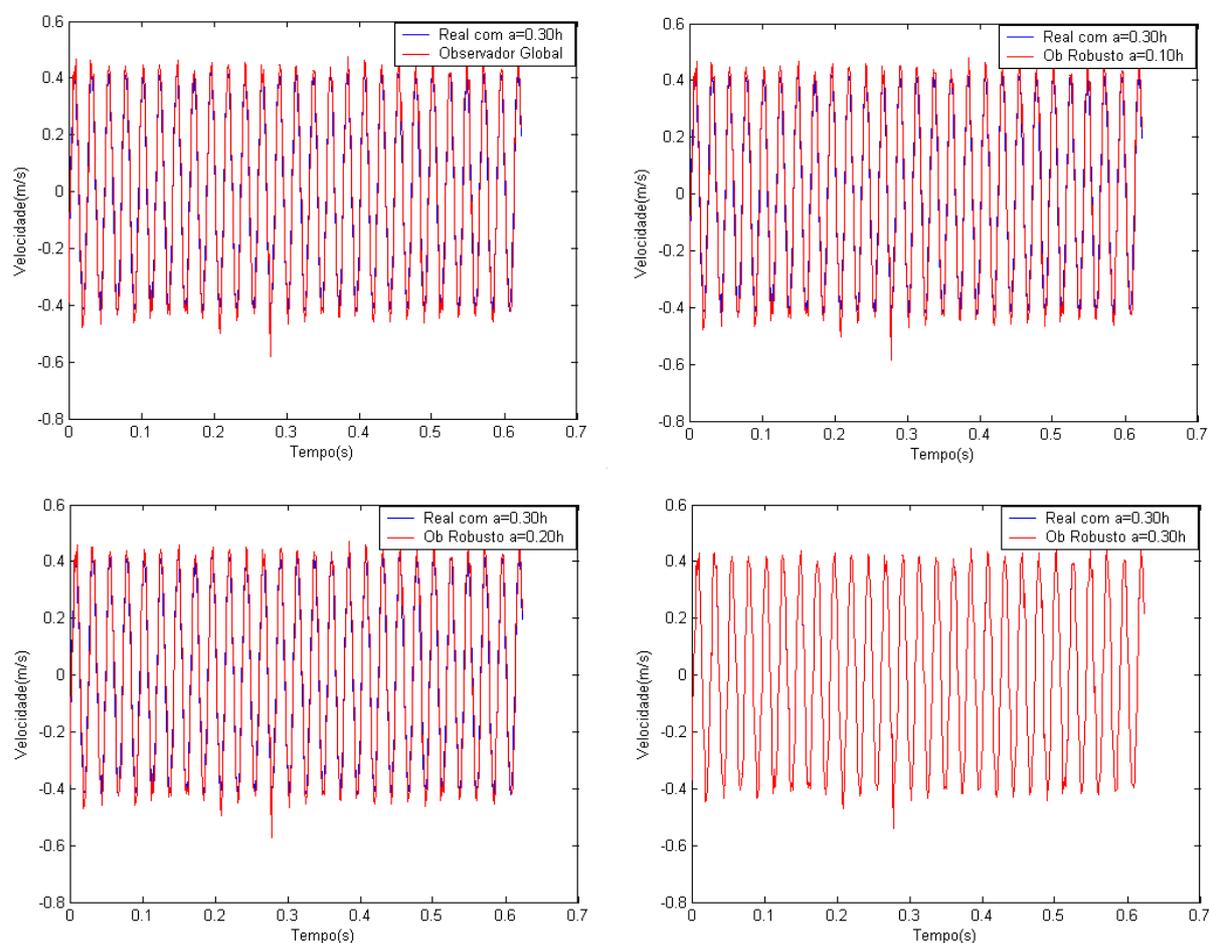


Figura 6. Gráficos das comparações com os valores Simulados e os valores dos Observadores de Estado.

Para a análise experimental de excitação harmônica, analisou-se uma viga engastada discretizada conforme mostrado na Figura (3). Excitou-se o sistema através de uma força harmônica dada pela função $F(t)=A.seno(\varphi + \omega(t))$, aplicado no nó 3. Foram experimentadas situações de diferentes frequências de excitação, 5Hz, 10Hz, 20Hz, 50Hz, 100Hz e 200Hz, e também impostas as condições da falha controlando a profundidade do entalhe realizado. Operou-se com um sistema de observação em tempo real construído em ambiente SIMULINK (MATLAB[®]).

Experimentalmente os bons resultados foram obtidos para médias e altas frequências. O método se mostrou ineficaz em baixas frequências, pois há uma influência negativa da resposta mecânica da estrutura que provoca uma oscilação mais lenta que a imposta, o que faz com que o estado previsto pelos observadores não sejam coincidentes com os valores obtidos na estrutura, dificultando a obtenção de valores da diferença das funções capazes de indicar a falha e realizar sua avaliação. O mesmo foi observado nas frequências naturais da estrutura. Podem-se comprovar estas conclusões nas tabelas abaixo.

Tabela 2. Resultado das diferenças RMS para o elemento trincado no experimento com uma Força Periódica de 5Hz (Baixa Frequência).

	<i>Sistema Excitado sem Falhas</i>	<i>Sistema com 10% de Profundidade</i>	<i>Sistema com 20% de Profundidade</i>	<i>Sistema com 30% de Profundidade</i>
<i>Obsv. Global</i>	3.4531e-03	4.3212e-01	3.2345e-02	2.4354e-01
<i>Obsv. 10%</i>	2.5673e-01	1.5342e-02	1.2356e-02	1.2252e-01
<i>Obsv. 20%</i>	9.4313e-02	3.5432e-01	1.5421e-01	2.3425e-01
<i>Obsv. 30%</i>	2.3342e-01	8.4532e-02	3.4546e-01	1.6342e-01

Tabela 3. Resultado das diferenças RMS para o elemento trincado no experimento com uma Força Periódica de 20Hz (Média Frequência).

	<i>Sistema Excitado sem Falhas</i>	<i>Sistema com 10% de Profundidade</i>	<i>Sistema com 20% de Profundidade</i>	<i>Sistema com 30% de Profundidade</i>
<i>Obsv. Global</i>	9.4321e-03	1.5432e-01	2.3531e-01	6.4221e-02
<i>Obsv. 10%</i>	3.4456e-01	1.1134e-03	8.6321e-02	5.5341e-02
<i>Obsv. 20%</i>	4.3456e-02	9.9852e-02	1.3421 e-03	3.7641e-01
<i>Obsv. 30%</i>	2.4321e-01	2.5421e-01	2.3421 e-01	8.8463e-03

Como podem ser observados, na primeira tabela, os valores experimentados para baixas frequências e menores porcentagens de trinca não apresentaram diferenças suficientemente grandes para que se constatasse a falha. Graficamente, pode-se observar o tipo de divergência que se ocorre, ao se comparar os valores obtidos com o sistema simulado a 5Hz e a 20Hz analisando para uma mesma profundidade de trinca. Os casos explicitados são para a menor profundidade de trinca detectável que apresenta a forma mais visível este tipo de ocorrência.

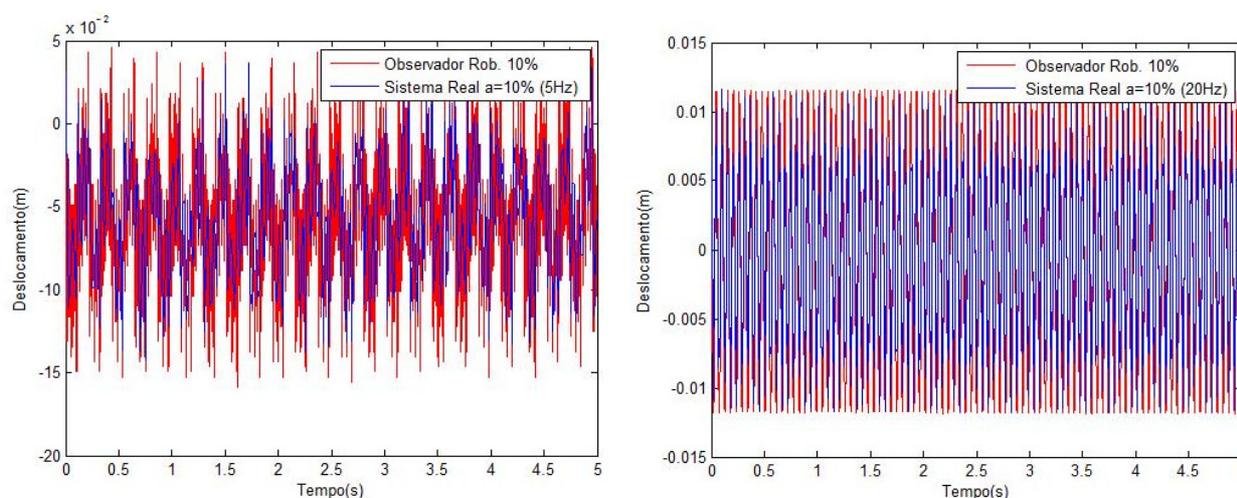


Figura 6. Gráfico Comparativo do Observador Robusto a porcentagem de 10% de Profundidade com o Sistema Real a uma excitação de 5Hz e 20Hz.

Conclui-se por próprio contato visual com os gráficos que a interferência entre as funções é muito maior no segundo caso, o que comprova as conclusões anteriores.

Este defeito não é somente causado pelo efeito da baixa frequência, mas também pelo fato dos valores pertinentes a matriz dinâmica serem muito próximos aos valores de um sistema sem falha, devido à baixa percentagem de profundidade da trinca, fazendo com que a somatória dos efeitos seja prejudicial ao funcionamento dos observadores.

Em geral os problemas que possam ser modelados por este tipo de método apresentam a frequência de excitação maior que 10 Hz, considerando que o alvo do trabalho são aplicações industriais. Portanto não se considera que este seja um empecilho tão grande para a aplicação da metodologia. Para se comprovar este limiar, a seguir são colocados os resultados experimentais para o sistema excitado a 10Hz com uma profundidade de trinca de 10%.

Tabela 4. Resultado das diferenças RMS para o elemento trincado no experimento com uma Força Periódica de 10Hz.

	<i>Sistema Excitado sem Falhas</i>	<i>Sistema com 10% de Profundidade</i>	<i>Sistema com 20% de Profundidade</i>	<i>Sistema com 30% de Profundidade</i>
<i>Obsv. Global</i>	9.5124e-02	3.3209e-01	2.0976e-01	5.8347e-02
<i>Obsv. 10%</i>	2.6179e-01	8.7218e-03	1.2986e-02	3.4231e-02

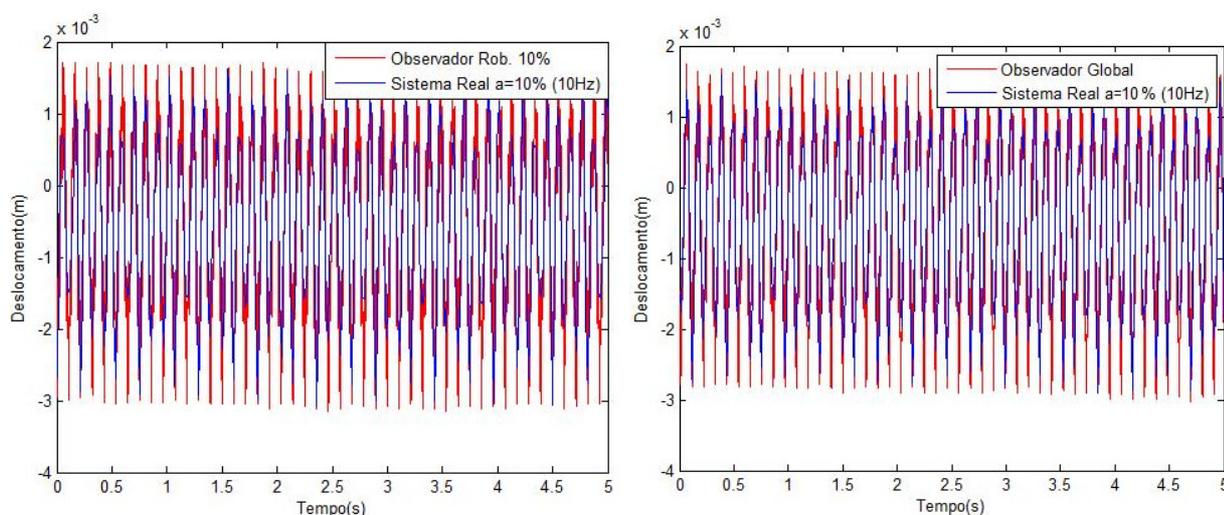


Figura 7. Resultado da Observação do Sistema Excitado a 10Hz com uma profundidade de trinca de 10%. A esquerda o observador robusto que detectou a falha e a direita o observador global do processo.

5. CONCLUSÕES

Através desta pesquisa notou-se que nos estudos realizados para sistemas contínuos com falhas, a localização da mesma é obtida com um grande número de medidas realizadas sobre a estrutura. A técnica dos observadores de estado utiliza um número reduzido de medidas com a reconstrução dos demais estados.

A análise computacional para o método desenvolvido apresentou bons resultados para o sistema simulado com uma trinca, o que evidencia que a abordagem matemática utilizada para modelagem dos observadores de estado gerou bons resultados aplicáveis a um sistema real.

Na comprovação experimental, a partir de uma análise gráfica e uma análise numérica foi possível detectar e localizar uma trinca presente no sistema. Nelas, verifica-se que somente o observador de estado robusto dedicado ao percentual de falha consegue detectar a irregularidade presente, comprovando que além de detectar a irregularidade e localizá-la, o observador pode ainda avaliar a significância do problema. Contudo, devem-se levar em conta as restrições quanto à frequência de excitação, pois os resultados podem conduzir a conclusões incorretas sobre a localização da falha e a porcentagem de trinca a ser detectada.

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.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos professores e técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP/FEIS pelo material cedido e colaboração com o projeto, ao Professor Gilberto Pechoto de Melo, pelas idéias construtivas e incondicional apoio, e ao CNPq pelo incentivo à esse projeto.

7. REFERÊNCIAS

- Alves, A. F. "Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE", 1ª Edição. São Paulo. Editora Érica, 2005.
- Cacciola, P., Muscolino, G., "Dynamic Response of a Rectangular Beam with a Known Non-Propagating Crack of Certain or Uncertain Depth", Computers & Structures, Vol. 80, n° 27-30, pp 2387-2396, 2002.
- Choy, F. K., Liang, R., Xu, P., "Fault Identification of Beams on Elastic Foundation", Computers and Geotechnics, vol. 17, pp. 157-176, 1995.
- Lemos, G.F., "Detecção de Falhas via Observadores de Estado em Sistemas Rotativos". Master Thesis, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2004.
- Luenberger, D.G., Observing the state of a linear system. IEEE Military Electronics, MIL-8, pp. 74-80, 1964.
- Marano, J. H., "Localização de Falhas Via Observadores de Estado em Sistemas com Variação de Parâmetros". Master Thesis. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2002.
- MatLab, The language of technical computing, Version 6.5, Copyright 1984-1998, The MathWorks Inc. All rights reserved.
- Meirovitch, L., "Dynamics and Control of Structures", Department of Engineering Science and Mechanics Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1990.
- Melo, G.P., "Detecção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida", Doctor Thesis. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 1995.
- Morais, T.S. "Diagnóstico de Falhas Via Observadores de Estado com Excitações Desconhecidas, Identificadas Via Funções Ortogonais". Master Thesis, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2006.
- Qian, G.-L., Gu, S.-N and Jiang, J.-S., "The Dynamic Behaviour and Crack Detection of a Beam with a Crack", Journal of Sound and Vibrating, 1990.
- Thomson, W. L., Dahleh, M. D., "Theory of Vibration with applications", 5ª Edition Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

SOME ASPECTS AND APPLICATIONS OF STATE OBSERVERS METHODOLOGY FOR CRACK DETECTION, LOCALIZATION AND EVALUATION IN MECHANICAL CONTINUOUS SYSTEMS

Edson Luiz Valverde Castilho Filho, edsluflil@aluno.feis.unesp.br

Vinicius Fernandes, viniciusfer@aluno.feis.unesp.br

Gilberto Pechoto de Melo, gilberto@dem.feis.unesp.br

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, nº56, Ilha Solteira – SP, Brasil.

Abstract. *Even the tools for theoretical analysis of dynamic systems being sophisticated, there are great difficulties at the prediction of the dynamic behavior of some structural components and at the fault diagnosis, caused by the inaccuracy of the theoretical model, or caused by the difficulty on measuring some state variables. The methodology of state observers is perfectly inserted on this reality, because its capability of estimate the state variables of a system based on the measurement of the output and control variables, allowing the reconstruction of the states where the measurement is hard or just impossible, detecting failures at points that are not available to be measured. Because of the magnitude of its effects, the crack nucleation or propagation demands essential care at mechanical systems. Knowing that this kind of fault can appear with the deterioration caused by vibrations and dynamical conditions, it becomes an excellent object for studying the use of the State Observers methodology to detect, locate and evaluate cracks conditions. For the suggested system, a coupled cantilever beam, a Finite Element Model was used, with beam elements at an elastic foundation, obeying a crack model. A complete observation system with a Global Observer of the process and Robust Observers, dedicated to accompany the stiffness variation of each element, was used, locating the fault and evaluating the percentage of penetration of the crack in the beam. To validate experimentally the proposed process, an identical system was assembled with the condition of the simulated one and to its measurements an observation system built at SIMULINK (MATLAB®) environment was added, providing the difference between the response curves graphically and through RMS differences.*

Keywords: State Observer, Crack, Mechanical Systems.