

Identificação de Danos em Plataformas Fixas de Petróleo

Carlos Magluta¹, Anderson de Souza Matos Gadéa², Ney Roitman³

¹ PEC/COPPE/UFRJ, magluta@labest.coc.ufrj.br

² PEC/COPPE/UFRJ, gadea@labest.coc.ufrj.br

³ PEC/COPPE/UFRJ, roitman@labest.coc.ufrj.br

Resumo – As metodologias para localizar danos em grandes estruturas podem ser aplicáveis na indústria petrolífera, pois ferramentas com capacidade de indicar possíveis danos e até mesmo quantificar o nível de avaria, reduziriam os custos das inspeções *in loco* e os riscos envolvidos nas inspeções de áreas de difíceis acessos. Através de um monitoramento de longo prazo, é possível observar-se variações das características dinâmicas e utilizando-se técnicas de ajuste apropriadas é possível determinar-se possíveis regiões danificadas e seu nível de comprometimento.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de identificação de danos em estruturas através de um método indireto e iterativo de correlação, via técnica de programação não-linear denominada Goal Programming (SID-G). O SID-G utiliza não só funções de resposta em frequência (FRF) de aceleração, mas também de esforços de flexão, como complementação no processo de identificação de danos. Foram realizadas simulações numéricas para um modelo reduzido de plataforma fixa de petróleo para averiguar a eficiência do método. Os resultados indicam que o método é eficiente, desde que os danos estejam contidos no conjunto de variáveis utilizadas no processo de otimização.

Palavras-Chave: Identificação de Danos; Plataformas Fixas; FRF.

Abstract – The methodologies to locate damages in great structures could be applicable in the oil industry, since tools with capacity to indicate possible damages and even to quantify the level of damage could reduce the costs of the *in loco* inspections and the involved risks in inspections of difficult accesses areas. Through a long term monitoring, it is possible to observe changes in the dynamic characteristics and by using appropriated model updating methods, it is possible to determine damaged regions and its level.

This work shows an indirect and iterative structural damage detection method, using a nonlinear technique called Goal Programming (SID-G). The SID-G does not use only acceleration frequency response function (FRF), but also bending moment FRF's to improve the damage identification process. Some numerical simulations were performed on a simple structure and on a fixed oil platform in order to verify the efficiency of the method. The results show that such method is efficient when damages are restricted to a set of optimization variables.

Keywords - Damage Identification, Fixed Platforms, FRF

1. Introdução

Os primeiros trabalhos que visam determinar a existência de danos em plataformas offshore de petróleo datam dos anos 70 como em Vandiver (1975). A idéia geral era descobrir a existência de danos através da análise das frequências naturais, provenientes de teste experimentais. Infelizmente, a simples análise das frequências naturais não se mostrariam eficazes para determinar a existência de danos, pois, freqüentemente as variações provocadas pelas avarias em elementos podem ser inferior às variações existente em situações normais de operação das plataformas Duggan et al. (1980).

Apesar dos esforços empreendidos e das inúmeras variantes que surgiram desde as primeiras publicações, ainda não existe nenhuma metodologia capaz de indicar danos com precisão e confiabilidade em estruturas complexas. As tentativas de se identificar avarias são normalmente em estruturas muito simples, tipicamente em vigas.

A metodologia proposta permite a identificação dos danos através de um método iterativo que minimiza a diferença entre as respostas experimentais de uma estrutura e as de seu modelo numérico correspondente, garantindo a coerência física através da inclusão de restrições para as variáveis que representam os parâmetros físicos e geométricos da estrutura. Foi desenvolvido um sistema de detecção de danos (SID-G - Sistema de Identificação de Danos via Goal Programming), que permite através da minimização das diferenças entre as funções de resposta em frequência (FRF) de esforço, deslocamento ou aceleração localizar e quantificar os danos existentes.

2. Metodologia proposta para identificação de danos

O sistema proposto baseia-se na minimização do erro entre as FRF experimentais e numéricas. A minimização dos erros é efetuada através da técnica de otimização denominada Goal Programming, que foi acoplada a um sistema desenvolvido em Fortran, cuja finalidade é calcular as FRF para modelos numéricos. Assim, as características físicas e geométricas do modelo numérico representam as variáveis do processo de decisão.

Dada uma função objetivo ou função erro e duas FRF, sendo um experimental e outra numérica, o sistema irá procurar o melhor conjunto de variáveis que minimizem a diferença e obedeça às restrições impostas. Para tanto, é necessária a definição das variáveis de decisão ou de controle, que representam as características físicas a serem otimizadas. A Figura 1 apresenta um esquema do funcionamento do sistema de identificação de danos desenvolvido.

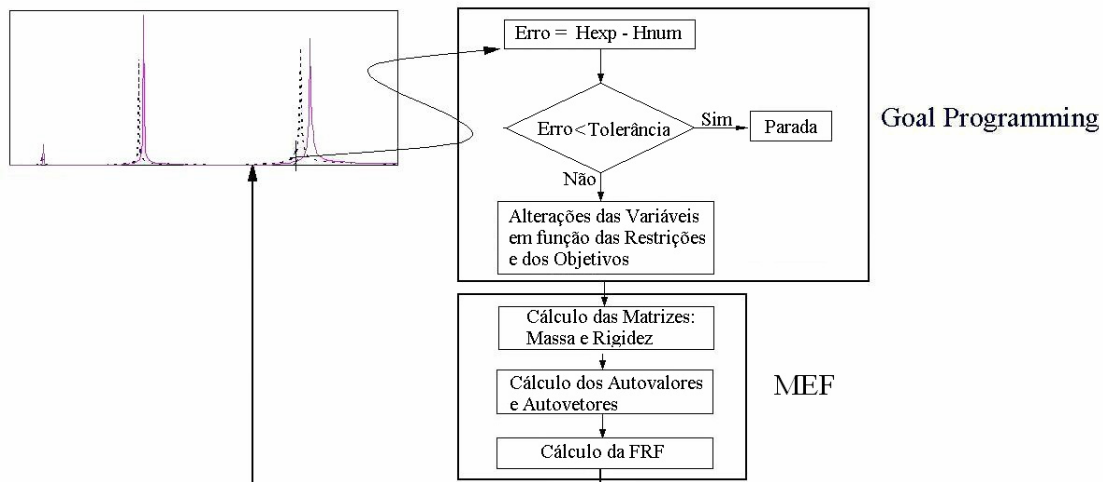


Figura 1. Esquema de Funcionamento do Sistema de Identificação de Danos.

2.1. Função Objetivo

A função objetivo é calculada através de uma sub-rotina que possui um programa de elementos finitos. Assim, sempre que a rotina de otimização gera um novo conjunto de variáveis de decisão, é chamada a rotina da função objetivo, retornando para o Goal Programming o erro calculado e é com base neste erro que são definidos os novos valores das variáveis. Este processo iterativo prossegue até que os critérios de convergência determinados tenham sido atingidos.

A função erro adotada é obtida somando-se as diferenças relativas entre as amplitudes dos picos das FRF, com as diferenças relativas entre as frequências naturais associadas a estes picos, para os modos analisados, conforme é mostrado na Equação 1.

$$E_{pq} = \sum_{r=1}^m \left(\frac{A_{pqr}^e - A_{pqr}^n}{A_{pqr}^e} \right) + \sum_{r=1}^m \left(\frac{F_{pqr}^e - F_{pqr}^n}{F_{pqr}^e} \right) \quad (1)$$

onde:

- E - erro estimado entre as FRF;
- A^e - amplitude do pico da FRF experimental;
- A^n - amplitude do pico da FRF numérica;
- F^e - frequência de pico da FRF experimental;
- F^n - frequência de pico FRF numérica;
- p - ponto de medida da excitação;
- q - ponto de medida da resposta;
- m - número de modos.
- r - índice de modo.

2.2. Formulação Proposta

O desenvolvimento da equação analítica para FRF de esforço pode ser observado com mais detalhe em Gadea (2002) e Roitman et al. (2002). Ela foi desenvolvida com base na formulação analítica para FRF de translação e apresentam informações semelhantes conforme pode ser observado em Komrower e Pakstys (1984), onde são analisadas FRF de aceleração e de deformação em viga engastada e livre submetida a impactos.

Para uma dada estrutura linear e invariável ao longo do tempo, submetida a uma excitação localizada em um ponto (p) e instrumentada com um transdutor na posição (q), as FRF para N modos pode ser escrita como exposto na Equação 2.

$$H_{pq} = \sum_{r=1}^n \left(\frac{R_{pqr}}{(i\omega - \lambda_r)} + \frac{\bar{R}_{pqr}}{(i\omega - \bar{\lambda}_r)} \right) \quad (2)$$

onde:

- H_{pq} - FRF estimada para excitação em (p) resposta em (q);
- R_{pq} - resíduo complexo do modo r (excitação em p resposta em q);
- p - índice que indica o ponto de aplicação da força;
- q - índice que indica o ponto de medição da resposta;
- r - índice que indica o modo;
- λ_r - pólo do sistema para o modo r;
- ω - variável no domínio da frequência;

A diferenciação entre as duas formulações é basicamente limitada aos resíduos modais que em se tratando de translações, é representado por um escalar (Equação 3), enquanto que no caso de esforços, deve levar em consideração os graus de liberdade do elemento e sua matriz de rigidez, apresentando-se sob forma matricial (Equação 4).

$$R_r = \left[\frac{\Phi_{p,r} \cdot \Phi_{q,r}}{2 \cdot m \cdot i \cdot \omega_{p,r}} \right] \quad (3)$$

onde:

- R_r - resíduo do modo r;
- $\Phi_{p,r}$ - amplitude do modo r, para o ponto de excitação (p);
- $\Phi_{q,r}$ - amplitude do modo r, para o ponto de resposta (q);
- m - massa modal;
- ω_r - frequência natural não amortecida para o modo r;
- r - índice de modo.

$$R_{i,r} = \left([K_i] \cdot [\theta_i] \cdot [\Phi_{i,r}] \right) \cdot \Phi_{p,r} \quad (4)$$

onde:

- $R_{i,r}$ - matriz de resíduo de esforços para o elemento i, modo (r);
- K_i - matriz de rigidez de elemento i;
- θ_i - matriz de rotação de elemento i;
- $\Phi_{i,r}$ - amplitude do modo r, para o ponto de excitação (p) no elemento i;
- $\Phi_{p,r}$ - matriz que contém as amplitudes do modo (r), associadas aos graus de liberdade do elemento (i);
- p - índice que indica o ponto de aplicação da força;
- i - índice que indica o elemento de medição da resposta;
- r - índice que indica o modo.

3. Identificação de Danos Simulados em Modelo Numérico

A estrutura de referência utilizada nas simulações de danos foi um modelo reduzido em escala geométrica 1/45 da plataforma de petróleo Carapeba 3, instalada na bacia de Campo-RJ, numa lâmina de água de 80 m. e cuja ilustração pode ser vista na Figura 2. a partir desse estrutura, criou-se um modelo numérico que foi utilizado para teste do sistema de identificação de danos.

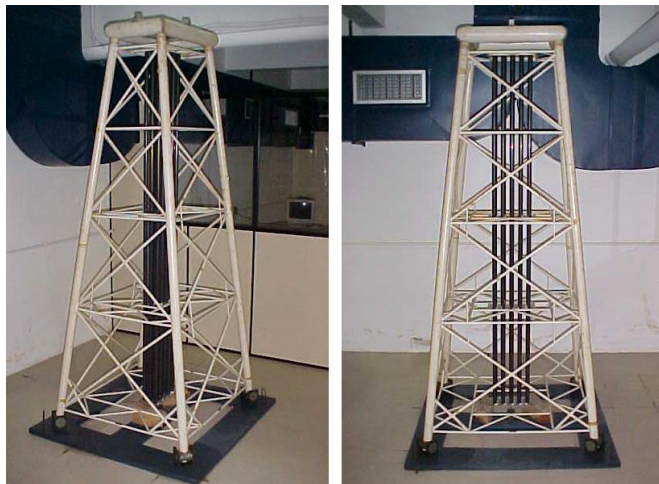


Figura 2. Estrutura a ser Analisada.

3.1. Os Tipos de Danos Simulados

Inicialmente, os danos utilizados foram os mesmo descritos por Viero (1991), isto é, um único dano por vez nos elementos E1, E2 e E3, que podem ser vistos na Figura 4, e que foram utilizados para um estudo de sensibilidade, o qual revelou que independentemente do tipo de FRF que se utilize, as respostas são semelhantes; isto é, haverá pouca variação entre as FRF para danos inferiores a 75%, nos modos globais. Isto se deve à pequena influência das barras de travamento na rigidez global da estrutura. Posteriormente, simulou-se a existência de danos simultâneos nos elementos E3 e E6, para que se observasse o comportamento do SID-G frente a um problema de maior complexidade.

Viero (1991) simulou dois tipos de danos: rompimento total da barra mantendo atrito e fissuras. Devido ao tipo de elemento utilizado para a modelagem numérica (Elemento de pórtico espacial), não é possível este tipo de simulação, a não ser que se utilize elemento de conexão que aumentaria em muito a complexidade do problema. Com o intuito de simplificar a resolução, reduzindo o número de variáveis, adotou-se como variável o módulo de elasticidade, pois este é capaz de atender às necessidades de redução das rigidezes dos elementos, mantendo-se área e inércia inalteradas.

Para desenvolver-se o a identificação dos possíveis danos, o sistema necessita de uma indicação dos elementos que supostamente estariam avariados. É possível que se defina a busca em todos os elementos, no entanto, com esta definição, o processo de busca pode ficar comprometido, pois dificilmente um modo global tem suas características alteradas com base nas mudanças de todas as barras da estruturas. Neste caso, seria necessária uma instrumentação voltada para monitoração de modos locais, e que não seria adotada de maneira indiscriminada devido aos custos.

3.2. Os Parâmetros da Simulação

Esta simulação tem por objetivo avaliar o sistema frente a um problema de múltiplas possibilidades de dano, que eleva o grau de dificuldade do processo de identificação. Conforme dito anteriormente, os danos foram impostos nos elementos E3 e E6 (Figura 3), e foram representados pela redução em 50% nas rigidezes destes. Foram calculadas FRF de aceleração e de esforços de flexão, a partir das quais o processo de ajuste do modelo foi controlado. O conjunto dos elementos supostamente danificados é composto por 7 elementos (E1, E2,...,E7) cujas localizações são expostas na Figura 3.

Adotou-se como ponto de partida para o processo iterativo a estrutura íntegra e as FRF de aceleração e de esforço foram tomadas a partir dos pontos Ac e ERR, respectivamente, que simulam um acelerômetro e um extensômetro elétrico de resistência e que também podem ser observados na Figura 3.

Optou-se conforme mencionado anteriormente, por considerar variável o módulo de elasticidade do material, mantendo constantes a inércia e a área da seção. Isto significa que uma redução em 50% no módulo de elasticidade de uma barra (fato fictício e não observado em condições normais de operação das estruturas), apresentaria resposta semelhante a uma barra que tivesse reduzida sua secção transversal e inércia. Para a situação inicial adotou-se o módulo de elasticidade das barras igual a $E = 3,139 \text{ GPa}$.

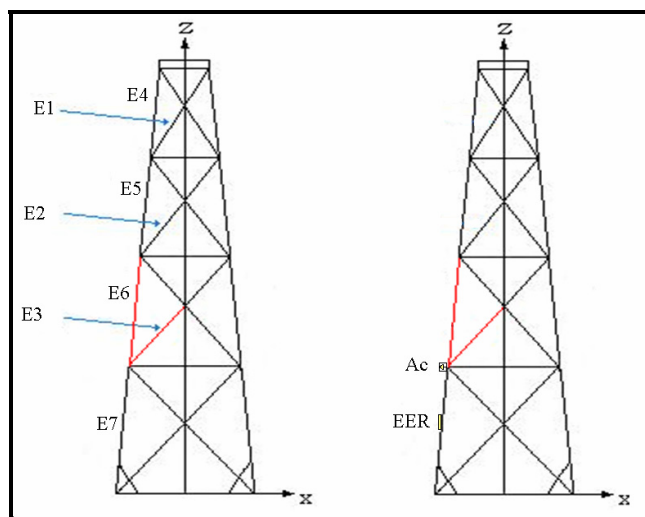


Figura 3. “Instrumentação” adotada e elementos a serem analisados.

3.3. Resultados Encontrados

As Figuras 4 e 5 apresentam comparações das FRF de referência, que foram calculadas com a redução das rigidezes dos elementos com o intuito de se induzir avarias, e as FRF correlatas encontradas pelo sistema, a partir da situação inicial (íntegra) através de processo iterativo.

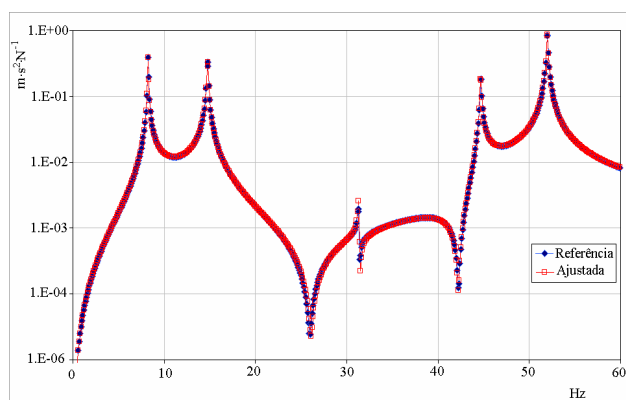


Figura 4. FRF de Aceleração para o ponto Ac.

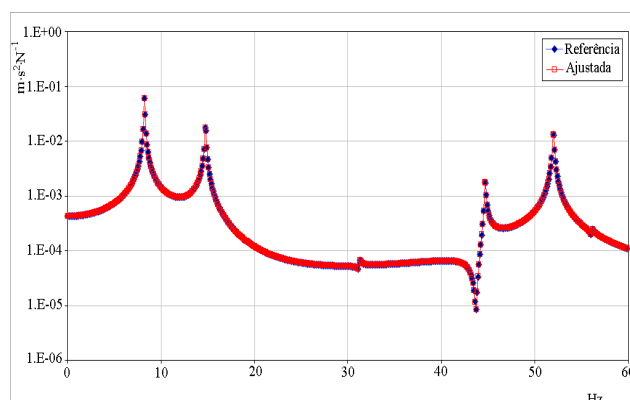


Figura 5. FRF de Esforço para o elemento EER.

Com base na observação destas figuras, nota-se que as FRF referência e as íntegras são praticamente iguais. Isto indica que ao confrontarmos os valores esperados para as variáveis e os encontrados pelo sistema, torna-se possível afirmar se existem danos e, em caso afirmativo, indicar quais são os elementos e o nível de comprometimento. A Tabela 1 apresenta um quadro comparativo para as variáveis de controle do processo.

Tabela 1. Comparação das Variáveis Encontradas pelo Sistema.

Elemento	Valor esperado	Valores Encontrados para busca com FRF de Aceleração (GPa)	Valores Encontrados para busca com FRF de Esforço (GPa)
E1	3,139	3,139	3,139
E2	3,139	2,701	3,139
E3	1.569	2,139	1,576
E4	3,139	3,139	3,139
E5	3,139	3,139	3,139
E6	1.569	1,467	1,560
E7	3,139	2,170	3,139

Esse problema específico de identificação exemplifica bem as várias possibilidades que se apresentam em um problema de identificação de danos dessa magnitude. Apesar de ter encontrado FRF semelhantes, nota-se que a

abordagem via aceleração não conseguiu restringir os danos aos elementos E3 e E6, como no caso da abordagem via esforço. Isto pode ser explicado pelo fato do desenvolvido ter como pressuposto básico que cada variação em uma propriedade física ou geométrica provoque uma distorção da resposta do sistema. Nestas circunstâncias ele consegue definir um espaço de busca onde cada variável de controle tem um mínimo bem definido; contudo, no momento em que causas distintas apresentem efeitos semelhantes, o sistema tende a compartilhar a responsabilidade das mudanças a todas as variáveis envolvidas no processo de busca, como de fato ocorreu nesta simulação.

Para este caso específico de simulação, os esforços apresentaram-se melhores que as acelerações. No entanto, este fator pode ser apenas consequência do ponto tomado como leitura da aceleração, pois a combinação dos elementos E2, E3, E6 e E7 levou a uma resposta semelhante àquela encontrada com a variação somente dos elementos E3 e E6. Cabe neste ponto a adoção de uma metodologia que forneça ao sistema subsídios para que este consiga estabelecer um caminho preferencial de busca, que leve à solução que minimiza globalmente o problema. Uma boa opção para o desenvolvimento das análises consiste em efetuar diversos ajustes, partindo de diferentes pontos de resposta e FRF de aceleração e de esforço.

A convergência para mínimos locais em problemas complexos é comum para o algoritmo de otimização utilizado, fazendo-se necessária diversas análises, com diversos pontos de resposta, tamanho do incremento, e condição inicial da estrutura. Somente com o aumento da redundância das respostas, simplificação do número de variáveis e aliados ao conhecimento do comportamento estrutural é que se pode facilitar o processo de identificação de danos e é com esse intuito que a abordagem via FRF de esforços foi implementada.

4. Considerações Finais

A identificação de danos em estruturas complexas é um problema de difícil solução e que quase sempre depende de um grande conhecimento da estrutura, principalmente em casos como o aqui abordado, onde as barras de travamento não interferem de maneira significativa nos modos globais; contudo, o objetivo principal ao qual este trabalho se propunha foi atingido, demonstrando a capacidade do sistema de localizar avarias.

O método não só pode ser usado em processos de localização de danos, como também pode ser utilizado com intuito de permitir o ajuste de modelos numéricos. Neste sentido, é necessária análise em diversas situações de ajuste variando os pontos de resposta e os tipos de FRF na estrutura construída e na projetada. Com base nestas informações torna-se possível definir o conjunto de variáveis que melhor expressa as características da estrutura, permitindo o correto ajuste com indicação de possíveis anomalias durante a construção da estrutura e indicação do grau de avaria.

Uma outra dificuldade surge em consequência da forma seqüenciada que o Goal Programming utiliza para atender aos vários objetivos do problema. Uma seqüência errada de objetivos pode gerar como resposta uma solução que, apesar de atender aos objetivos, não minimiza globalmente o problema. Tornam-se necessárias diversas análises com alterações nos parâmetros do problema (valores iniciais das variáveis, tamanho do passo e prioridade) permitindo assim expressar uma solução que melhor representa a solução almejada, a partir das diversas soluções que podem ser encontradas.

5. Agradecimentos

Os Autores agradecem ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo -ANP e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás Natural – PRH-ANP/MME/MCT.

6. Referências

- DUGGAN, D.M., WALLACE, E.R., CALDWELL, S.R. Measured and Predicted Vibrational Behavior of Gulf of Mexico Platforms, Proc. 12th Annual Offshore Technology Conference, OTC 2267, Texas, USA, 1975.
- GADÉA, A. S. M. Identificação de Danos Estruturais a Partir das Funções de Resposta em Frequência (FRF), Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- KOMROWER, J. M., PAKSTYS, M. P. Use of Strain Gauges in Force Determination and Frequency Response Function Measurements, Proc. 2th, IMAC, 1984.
- ROITMAN, N., MAGLUTA, C., GADÉA, A. S. M. Identificação de Danos Estruturais via Funções de Resposta em Frequência (FRF) de Esforços, Anais das XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, Brasil, 2002.
- VANDIVER, J.K. Detection of Structural Failure on Fixed Platforms by Measurement of Dynamic Response, Proc. 7th Annual Offshore Technology Conference, OTC 2267, Texas, USA, 1975.
- VIERO, P. F. Verificação da Influência dos Danos nos Parâmetros Modais de Estruturas Offshore Fixas, Tese de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.