

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE HASTES DE BOMBEIO POR CAVIDADE PROGRESSIVA (BCP) PARA POÇOS TERRESTRES UTILIZANDO ANÁLISE MODAL E ELEMENTOS FINITOS

Marcelo Cavalcanti Rodrigues¹, José Felício da Silva²

¹ Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Automação e Controle de Sistemas Mecânicos, Campus I, João Pessoa-PB, e-mail: celo_cr@hotmail.com

² Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Automação e Controle de Sistemas Mecânicos, Campus I, João Pessoa-PB, e-mail: jfelicio@superig.com.br

Resumo – Apresenta-se nesse trabalho uma análise da integridade estrutural de hastes de bombeio para poços de petróleo terrestre. Essas hastes de bombeio são submetidas a grandes esforços de tração e a esforços de torção quando estão em produção efetiva. A motivação deve ao grande número de intervenção nos poços devido à presença de falhas estruturais, corrosão, montagem, etc. A análise dos parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração) é utilizada para identificar a presença de falha e/ou defeitos nas hastes. Apresenta-se uma técnica de identificar e localizar a presença de falhas nestas hastes por análise modal, onde se correlaciona às mudanças das frequências naturais e seus respectivos modos de vibração sem a presença de falha com a presença da falha. Os resultados dos parâmetros modais para as vibrações longitudinais e transversais das hastes são obtidos usando um software de Elementos Finitos (ANSYS 5.5). Os parâmetros são calculados sem a presença de falha e depois com a presença de falha. Os resultados são comparados para os 10 primeiros modos de vibrações. Este trabalho é o início de trabalho de tese onde se propõem uma solução para monitorar e avaliar a integridade estrutural dos poços de petróleo terrestres utilizando sensores piezolétricos.

Palavras-Chave: parâmetros modais, haste, simulação, identificação de falha.

Abstract – This paper presents a structural health analysis in stem of pump for oil well onshore. This stems of pump are submit to great loads of traction and torsion in production. Exist a larger number of intervention in oil wells because to structural damage like manufacture, corrosion, installation, etc. Presents damage detection and identification techniques in structures (stems). The modal analysis (natural frequencies, modes shapes) is used for identify the presence of damage correlating the changes in natural frequencies at the first modes with the corresponding mode shapes of undamaged structure. The results of modal parameters for longitudinal and bending vibration are obtained from FE model of undamaged structure. Numerical investigations of the proposed method are presented and a solution to monitoring the onshore oils well using smart piezo-transducers.

Keywords: modal parameters, stem, simulation, damage location identification.

1. Introdução

Os métodos para identificar falhas como a Análise Modal, tem recebido grande atenção nas comunidades de pesquisadores nas últimas décadas. O princípio do método é que o defeito (falha) na estrutura resulta em mudanças nas propriedades de massa, amortecimento e rigidez. Consequentemente, as frequências naturais e os modos de vibração também mudam. Detectando essas mudanças nos parâmetros modais, a presença, localização e severidade das falhas podem ser conhecidas.

O desenvolvimento em tempo real para detectar a integridade estrutural de estruturas em serviço e as técnicas de detecção de falhas tem atraído pesquisadores acadêmicos e industriais em todo o mundo. O objetivo das pesquisas é permitir que um sistema e estruturas monitorem sua própria integridade em operação para prevenir grandes falhas e reduzir custos minimizando a manutenção e os ciclos de inspeção. Os poços terrestres que possuem método de elevação por Bombeio de Cavidades Progressivas (BCP) apresentam uma quantidade de intervenção muito alta devido à ruptura dos materiais (hastes) que formam o sistema de elevação e produção do poço.

A finalidade é dimensionar uma haste de bombeio com seção vazada para injeção de fluidos e analisar a sensibilidade dinâmica dos parâmetros modais (análise modal) para uma eventual falha presente na estrutura da haste. O objetivo deste trabalho é diagnosticar a presença de falha na estrutura da haste utilizando métodos de vibração e dimensionar as hastes para diminuir a quantidade de material, neste caso, vazas as hastes para injetar lubrificante e anti-corrosivo.

Uma das causas mais freqüentes de intervenção em poços é a troca de hastes partida, a haste partida causa o não funcionamento do método de elevação (BCP) que interrompe a produção do poço e consequentemente necessita de manutenção e troca de todos os materiais que compõe o sistema BCP. A inspeção visual dos poços é feita com periodicidade, mas às vezes o poço fica parado por algum tempo ocasionando uma perda de produção.

O objetivo desse trabalho é analisar o comportamento estático e dinâmico e prever até que ponto as hastes suportam as cargas submetidas, assim como apresentar uma solução mais econômica para monitorar esses poços.

2 Bombeio por Cavidade Progressiva (BCP)

O bombeio por cavidades progressivas é uma bomba de deslocamento positivo que trabalha imersa em poço de petróleo, constituída de rotor e estator. O rotor ao girar no interior do estator origina um movimento axial das cavidades, progressivamente, no sentido da sucção da descarga, realizando a ação de bombeio. O acionamento da bomba pode ser originado da superfície, por meio de coluna de hastes e um cabeçote de acionamento.

A utilização de bombas de cavidades progressivas para elevação artificial no Brasil teve início em 1984 em fase experimental. Devido a simplicidade do método e da eficiência na produção de fluidos viscosos, o número de instalações com esse tipo de equipamento tem se difundido rapidamente.

Um sistema BCP consta de uma bomba de subsuperfície composta de uma camisa estacionária e um rotor com forma helicoidal acionada por uma coluna de hastes. Um motor elétrico instalado na superfície aciona a coluna de hastes.

A coluna de hastes deve ser dimensionada para suportar uma combinação de esforços: carga axial e torque. “Os diâmetros de hastes mais utilizados são: 5/8”, 3/4”, 7/8” e 1”.

A carga axial máxima ocorre na haste polida e corresponde à soma do peso da coluna de haste no fluido mais a carga atuando sobre o rotor referente ao diferencial de pressão sobre a bomba. Esta carga depende do diâmetro nominal do rotor, da excentricidade da bomba e do diâmetro da coluna de hastes.

O torque máximo ocorre também na haste polida, e corresponde à soma do torque hidráulico e de fricção na bomba mais o torque resistente da coluna de hastes. O torque hidráulico (T_H) corresponde à energia para deslocar o fluido pela bomba, considerando o diferencial de pressão. O torque de fricção (T_F) corresponde às perdas por fricção no interior da bomba entre estator e o rotor. O torque resistente (T_R) da coluna de hastes corresponde à dificuldade de girar as hastes no interior do fluido, principalmente quando fluido bombeado possui alta viscosidade (acima de 1000cp) (Thomas, 2001). Na Figura 1 apresenta-se a configuração dos equipamentos de superfície para o bombeio de cavidade progressiva (BCP).

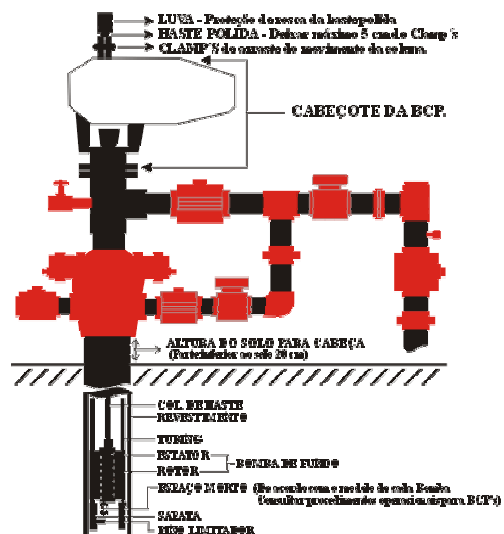


Figura 1. Equipamentos de superfície para método BCP (Fonte: Perbras)

O acompanhamento de um poço que está produzindo por BCP é feito através de testes de produção, verificação de vibrações no cabeçote e registros de *sonolog*. Vibrações no cabeçote ou ruído anormal podem significar rolamento defeituoso, falta de óleo lubrificante no cabeçote ou choque das hastes contra a coluna de produção. A verificação constante da pressão na cabeça do poço é importante no acompanhamento de poços que produzem por este método. O aumento gradativo da pressão pode significar parafinação da linha de produção (Thomas, 2001).

3. Análise Modal (Frequências Naturais e Modos de Vibração)

O cálculo dos parâmetros modais da haste é desenvolvido na simulação utilizando o Método dos Elementos Finitos no ANSYS 5.3. Os resultados são obtidos separadamente para as vibrações longitudinais, transversais e de rotação. Na Figura 2 apresenta-se a configuração dos equipamentos instalados num poço para BCP.

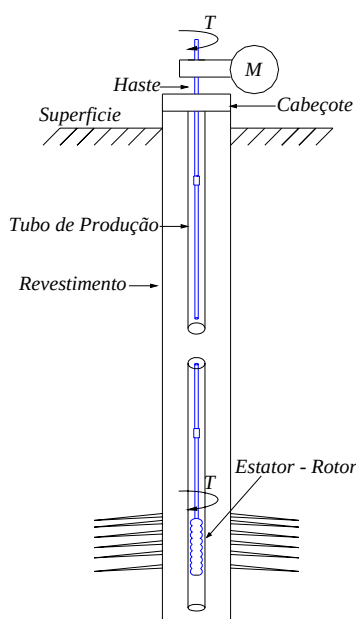


Figura 2. Configuração dos equipamentos de subsuperfície do poço.

Na Tabela 1 apresenta-se as propriedades mecânicas das hastes de bombeio adotadas atualmente nos campos terrestres de Sergipe e da Bahia, diâmetro escolhido para análise foi de 1" (25,4mm).

Tabela 1. Dados de simulação.

Propriedade	Valor (unidade)
Densidade ρ	7860 Kg/m ³
Módulo de Elasticidade Longitudinal E_L	210 GPa
Módulo de Elasticidade Transversal E_T	79 GPa
Material	Aço C 1040
Comprimento	100mm
Diâmetro	1"

3.1 Simulação

As técnicas de identificação de falhas por respostas de vibração é um método não destrutivo que se baseia no exame das mudanças nos parâmetros modais nas medidas das respostas de vibração da estrutura. Esta análise tem sido feita atualmente integrando o uso de materiais inteligentes (sensores e atuadores piezelétricos) para monitorar estruturas (Inman, 1998).

Procura-se apresentar uma análise dos parâmetros modais (frequências naturais e modos de vibração) para identificar e localizar a presença de falha na estrutura. A haste é modelada com o elemento 2D-elastic pipe16 com uma malha de 15 elementos, engastado numa extremidade no ANSYS 5.5 (ANSYS, Inc., 1998).

Apresenta-se na Figura 3 os resultados das frequências naturais para as vibrações longitudinais e transversais.

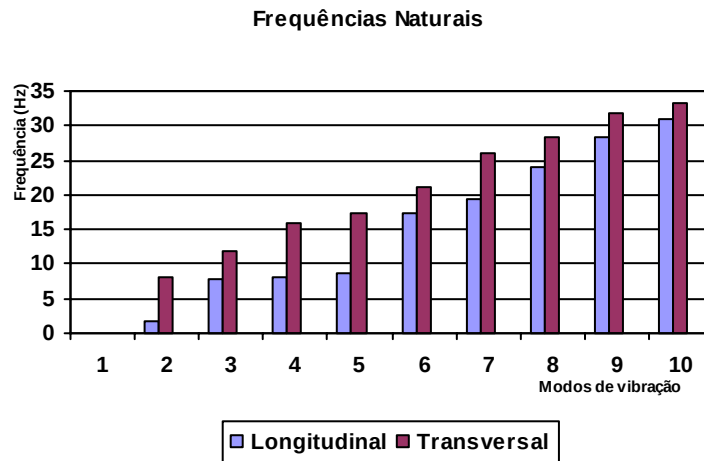


Figura 3. Frequências naturais para as vibrações longitudinais e transversais (Hz)

O gráfico acima apresenta os parâmetros modais para as vibrações longitudinais e transversais para os dez primeiros modos de vibração da estrutura.

3.2 Identificação e Localização de Falha

A equação que governa o movimento para um sistema dinâmico é

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

Onde $[M]$ é a matriz de massa, $[C]$ é a matriz de amortecimento, $[K]$ é a matriz de rigidez, $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ e $\{x\}$ são os vetores aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente, $\{F(t)\}$ é vetor força.

Considere os autovalores e autovetores (frequências naturais e modos de vibração) de um sistema dinâmico como:

$$\{\omega\} = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_j, \dots, \omega_n\} \quad (2)$$

$$[\Phi] = [\{\phi_1\}, \{\phi_2\}, \{\phi_3\}, \dots, \{\phi_j\}, \dots, \{\phi_n\}] \quad (3)$$

A frequência angular, ω , pode ser substituída por f como a frequência cíclica em Hertz, onde a seguinte inequação para n modos de vibração é

$$f_1 < f_2 < f_3 < \dots < f_j < \dots < f_n \quad (4)$$

Para induzir um defeito, a rigidez de um elemento é reduzida. A diminuição na rigidez da haste significa uma suposta falha ou defeito devido à corrosão, fadiga do material, ou defeito de fabricação, etc.

A rigidez do material relaciona o módulo de elasticidade do material da haste e o momento de inércia. Qualquer mudança nesses parâmetros significa mudança na rigidez da haste. As mudanças associadas a cada frequência são:

$$\{\Delta f\} = \{\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \dots, \Delta f_j, \dots, \Delta f_n\} \quad (5)$$

Considera-se uma diminuição de 50% na rigidez do material. A falha na haste é representada por uma redução na área da seção transversal indicando uma diminuição da rigidez. A falha é inserida no Elemento 3 numa malha de 15 Elementos para cálculo dos 10 modos de vibração como apresentado na Figura 4. A análise modal é desenvolvida usando o ANSYS 5.5 para obter as frequências naturais antes e depois de inserido a falha.

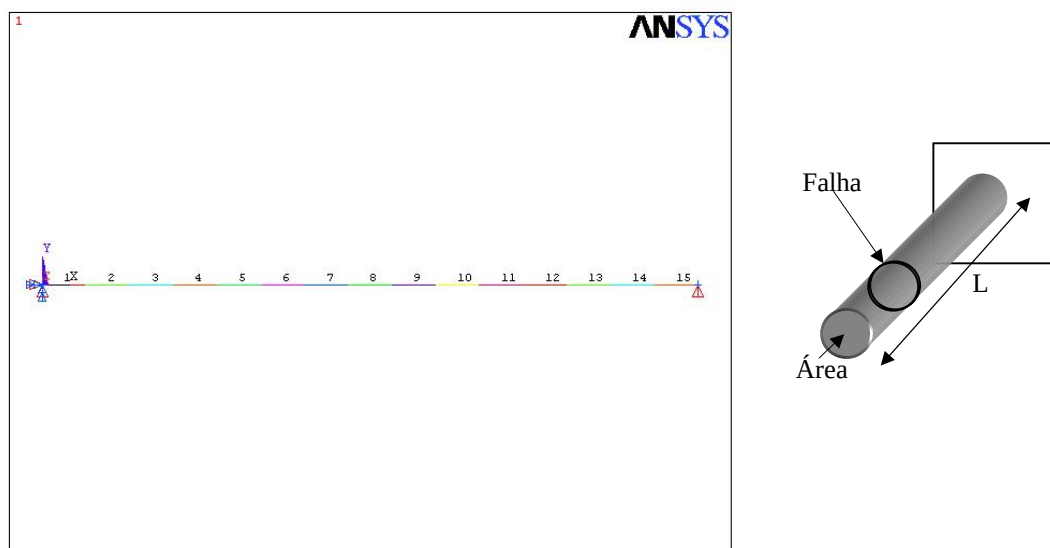


Figura 4. Malha dos elementos e configuração da falha

Os movimentos longitudinais e transversais são obtidos separadamente. As frequências naturais dos movimentos longitudinais e transversais sem falha e com falha são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Frequências naturais e erro (%) para as vibrações longitudinais e transversais.

Modos	Frequência Natural Longitudinal		Frequência Natural (Hz) Transversal		Erro (%) Longitudinal - Transversal	
	Sem falha – Com falha		Sem falha – Com falha			
1	0	0	0	0	0	0
2	1.7337	8.0769	8.0769	8.0769	365.87	0
3	7.9294	8.0769	11.800	15.881	1.86	34.58
4	8.0769	15.881	15.881	17.317	96.62	9.04
5	8.5478	17.426	17.426	17.318	103.86	-0.62
6	17.426	17.426	20.983	24.735	0	17.881
7	19.323	28.441	25.892	27.056	47.18	4.50
8	23.875	28.441	28.441	28.105	19.12	-1.18
9	28.441	31.935	31.935	31.935	12.28	0
10	30.958	38.218	33.322	39.918	23.45	19.80

Analisando os resultados da Tabela 4, observa-se que a presença de falha na estrutura muda os valores dos parâmetros modais (frequência natural), isto significa que esses parâmetros mostram uma alta sensibilidade para identificação de falhas.

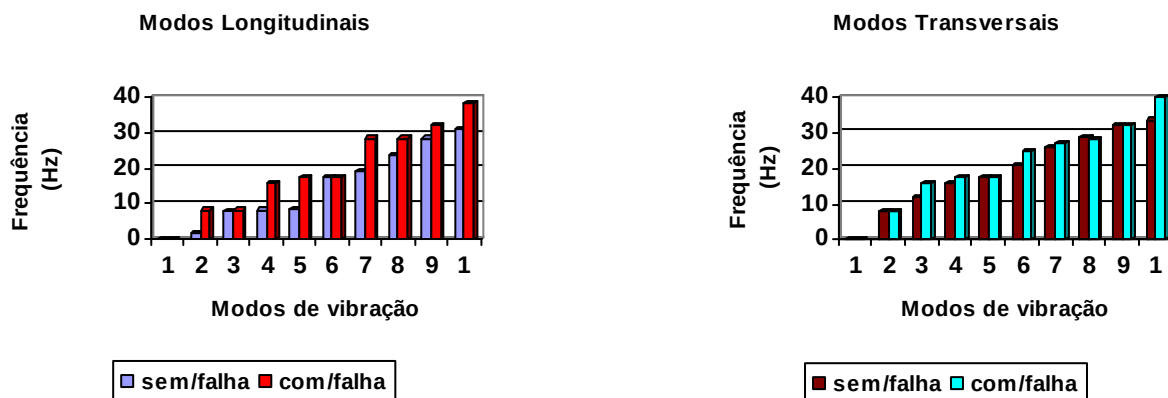


Figura 5. Frequências naturais para as vibrações longitudinais e transversais.

Na Figura 5, para os modos longitudinais as variações nas frequências naturais são maiores, tornando claro que existe a presença de algum tipo de falha e/ou defeito na estrutura. Para os modos transversais, as variações nas frequências naturais são menores, necessitando uma análise para um número de modos maiores (altos modos). Observa-se claramente que a presença de defeito ocasiona uma variação nos parâmetros modais da estrutura, mostrando uma sensibilidade para identificar a presença de falhas na estrutura. À medida que os modos de vibração aumentam, as variações nas frequências naturais respectivas tornam-se maiores.

Para avaliar a integridade estrutural da haste, utiliza-se um identificador de falha que correlaciona as mudanças das frequências naturais sem a falha e com a falha com os deslocamentos dos seus respectivos modos de vibração.

$$Id = \frac{\sum_{i=1}^{10} |\Delta d| \Delta f_i}{\sum_{i=1}^{10} \Delta f_i} \quad (6)$$

Onde Δd - é a variação do valor do deslocamento do elemento; Δf_i é a variação da frequência natural em Hertz para os respectivos modos de vibração. Na Figura 6 apresenta-se um gráfico da identificação do defeito para o elemento 3, considerando os modos de vibração longitudinais e a variação relativa das frequências associadas para os 10 modos de vibração da haste.

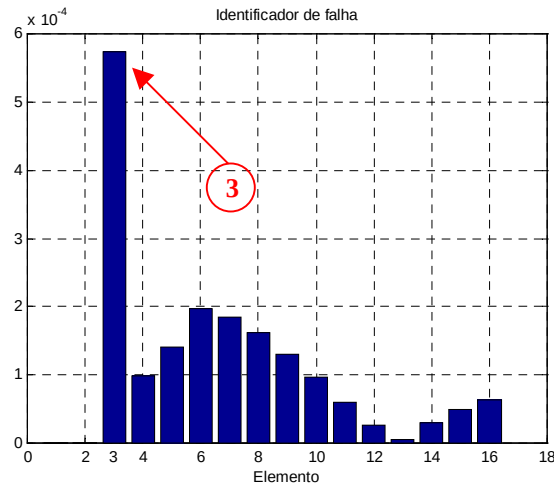


Figura 6. Identificação da falha no Elemento 3 para os movimentos longitudinais

Observa-se que a variação relativa dos parâmetros modais para o Elemento 3 apresentou maior índice relativo de mudança, indicando presença de defeito. Na prática, o uso de sensores piezelétricos para monitorar essas estruturas será desenvolvido, analisando tanto os baixos modos de vibração quanto os altos modos. Os sensores são importantes para obter resultados experimentais dos parâmetros modais da estrutura e assim poder aplicar a técnica.

Assim pode-se implementar sensores PZT na estrutura, utilizando técnicas de medidas de impedância para calcular as frequências naturais da haste.

4. Discussões e Conclusões

Este trabalho é o início do trabalho de tese de doutorado que tem como objetivos analisar o comportamento dinâmico e a integridade estrutural de hastes de bombeio utilizando análise modal (Frequências naturais e modos de vibração) para os baixos e altos modos de vibração, Identificando, localizando e quantificando a presença de falhas.

O método da análise modal calcula parâmetros modais (frequência natural e modos de vibração) de uma haste de bombeio. Esses parâmetros apresentam uma sensibilidade para identificar a presença de falhas e/ou defeitos, pois causam variações devido a mudança na rigidez da estrutura. As variações relativas para cada frequência natural associada ao modo respectivo analisado por cada elemento da malha de elementos finitos possibilitam localizar a falha. O uso de sensores piezelétricos em conjunto com o método da impedância eletromecânica possibilita a análise de estruturas para identificar e localizar falhas, diminuindo os custos com inspeção e manutenção nos poços de petróleo terrestres.

A intenção é monitorar (identificando, avaliando e localizando a presença de defeitos) sistemas de poços terrestres que possuem o método de elevação artificial BCP (bombeio por cavidades progressivas) utilizando sensores

piezelétricos colados nas hastes de bombeio. Os sensores devem suportar condições de ambiente de produção como altas temperaturas, viscosidade do óleo (petróleo), presença de gases, e substâncias corrosivas comuns nesses ambientes.

O sistema de monitoração estaria acoplado, e interligado on-line no cabeçote do poço BCP para detectar possíveis presenças de falhas estruturais nas hastes ou mesmo uma desconexão, e acionar um sistema de alerta para a base mais próxima para o pessoal de apoio, além disso o sistema pode avaliar a vida útil da haste e assim prever uma futura intervenção. Isso diminuiria a perda de produção de óleo até a equipe de manutenção (sonda SPT) chegar ao local e efetuar a devida intervenção.

5. Referências

- INMAN, D. J., Smart Structures Solutions to Vibration Problems, *Proceeding International Conference on Noise and Vibration Engineering*. Leuven, Belgium 1-12, 1998.
- THOMAS, J. E., Fundamentos de Engenharia de Petróleo, Editora Interciência Ltda, Rio de Janeiro, 2001.
- ANSYS Inc., ANSYS Basic Analysis Procedures Guide 5.5, Canonsburg, PA, 1998.
- ANSYS Inc., ANSYS Modelling and Meshing Guide 5.5, Canonsburg, PA, 1998.
- ANSYS Inc., ANSYS Structural Analysis Guide 5.5, Canonsburg, PA, 1998.