

**Ricardo Sant'Anna**

**Análise de Acidente com Rotor**

Modelagem e Simulação

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro  
dezembro de 2007

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Ricardo Sant'Anna**

## **Análise de Acidente com Rotor**

**Modelagem e Simulação**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Rubens Sampaio

Rio de Janeiro  
dezembro de 2007



**Ricardo Sant'Anna**

## **Análise de Acidente com Rotor**

### **Modelagem e Simulação**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC–Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Rubens Sampaio, Ph.D.**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC–Rio

**Professor Hans Ingo Weber, Dr. Ing.**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Professor Edson Cataldo, Ph.D.**

Universidade Federal Fluminense

**José Eugênio Leal, Ph.D.**

Coordenador Setorial de Pós-graduação e Pesquisa do Centro Técnico Científico – PUC–Rio

Rio de Janeiro, 10 de dezembro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Ricardo Sant'Anna**

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza, em 1986. Ingressou em 1987 na PETROBRAS, através do Curso de Engenharia de Equipamentos, em 1987, em Salvador, Bahia. Trabalhou na então Região de Produção da Bahia, de 1988 a 1995, na Divisão de Suprimento e na função de Chefe de Setor de Instalações Industriais e Estradas. Em 1995 passou a trabalhar na Refinaria de Mataripe, RLAM, no Setor de Equipamentos Dinâmicos. Atualmente trabalha na Gerência de Engenharia, na Coordenação de Confiabilidade, na manutenção e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, como compressores, turbinas, turbo-expansores e bombas.

### Ficha Catalográfica

Sant'Anna, Ricardo

Análise de Acidente com Rotor: Modelagem e Simulação / Ricardo Sant'Anna; orientador: Rubens Sampaio . — 2007.

143 f: il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Rotores 3. Análise Modal. 4. Método de Elementos Finitos. 5. Mancais. I. Sampaio, Rubens. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

À minha Mulher, Simone, e à minha filha, Carolina.

## Agradecimentos

Ao Professor Rubens Sampaio, cujos despreendimento e senso de urgência anteciparam os frutos deste trabalho e a ele deram forma final.

Ao Professor Hans I. Weber, que sempre esteve à disposição para ajudar e esclarecer.

Àqueles Gerentes da PETROBRAS que entendem que realmente a evolução da empresa é reflexo do crescimento dos seus empregados, entre os quais os Engenheiros Claudio Schlosser, Ney Argolo e Wilson Carvalho.

Aos colegas do Laboratório de Vibrações da PUC-Rio, em especial a Thiago Ritto e Rômulo Aguiar por compartilharem seus conhecimentos e por suas sugestões.

Ao Engenheiro Writon Matos pela disponibilidade de dados relativos ao problema industrial apresentado nesta Dissertação.

## Resumo

Sant'Anna, Ricardo; Sampaio, Rubens. **Análise de Acidente com Rotor: Modelagem e Simulação**. Rio de Janeiro, 2007. 143p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A Dissertação aqui apresentada descreve um acidente em um rotor de máquina de grande porte (compressor de ar) de uma fábrica de fertilizante cujas conseqüências foram perdas financeiras de alta monta tanto para a empresa quanto para o Estado, pela importância econômica onde a fábrica é situada. O objetivo da Dissertação foi simular matematicamente o acidente ocorrido e esclarecer o mesmo. Para se chegar ao diagnóstico do problema se modelou o rotor e o discretizou pelo Método de Elementos Finitos. As técnicas de investigação do problema e a sua seqüência de investigação podem ser tomadas como base em investigação de eventuais acidentes envolvendo rotores futuramente. O capítulo relativo a Análise Modal será extraído como base de apostila para curso envolvendo pessoal da área de Manutenção Mecânica.

## Palavras-chave

Rotores, Análise Modal, Método de Elementos Finitos, Mancais.

## Abstract

Sant'Anna, Ricardo; Sampaio, Rubens. **Rotor Accident Analysis - Modelling and Simulation**. Rio de Janeiro, 2007. 143p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A problem related with an air compressor gave birth to the MSc Thesis. Problems related with rotative machines are usual in the industrial field. Difficulties come from the data gathering in order to analyze, and propose a theory of failure in order to explain and avoid the recurrence of such problem. Modelling a rotor with a Timoshenko beam element and the discretization by finite element method permit the dynamical analysis and the modal analysis of the rotor considering its interaction with the radial and thrust bearings (assuming stiffness and rigidity). The work is divided in seven chapters: chapter one introduces the work and gives the overview of it; chapter two describes the industrial problem; chapter three is a brief explanation of bearing types and the fundamental principle of lubrication; chapter four introduces vibration theory and modal analysis; chapter five introduces the finite element method; chapter six is the simulation of the problem, using tailor-made MATLAB® programs to reconstruct the problem and to compare the test field results with the here mentioned formulation; chapter seven discusses the results and proposes future works. Appendix shows the kinetic theory and the beam deformation model used in the program and the Laval simple rotor as a limited description of the dynamic of a rotor with distributed mass, rigidity and stiffness. The aim of this work is to help understand and avoid the recurrence of the failure described and to ease the understanding of modal analysis for new engineers and technicians which will deal with rotor dynamics.

## Keywords

Rotors, modal analysis, finite element method, bearings.



## Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos da Dissertação	17
1.2	Organização da Dissertação	17
2	O Problema Industrial	19
2.1	Histórico das Falhas	19
2.2	Dados Operacionais do Trem de Compressão de Ar	23
2.3	Investigação do Problema	24
2.4	Vibrações Axiais - outros casos	40
3	Mancais	42
3.1	Introdução	42
3.2	Classificação de Mancais	42
4	Análise Modal	47
4.1	Introdução	47
4.2	Análise Modal de um Sistema de Múltiplos Graus de Liberdade Não-Amortecido	57
4.3	Análise Modal de Um Sistema com Múltiplos Graus de Liberdade Amortecido	68
5	Método de Elementos Finitos	88
5.1	Introdução	88
5.2	Formulação Fraca	88
5.3	Método de Galerkin	90
5.4	Problemas de Barras	91
5.5	Problemas de Vigas	91
5.6	Problema de uma viga engastada-mola	92
5.7	Formulação Fraca: Viga engastada-mola	93
5.8	Método de Elementos Finitos	94
5.9	Modos de Vibração: Viga engastada-mola	94
5.10	Modelo reduzido: Viga engastada-mola	95
5.11	Aproximação da dinâmica: Viga engastada-mola	95
6	Modelagem, Discretização e Simulação	99
6.1	Modelagem do Rotor	99
6.2	Discretização por Elementos Finitos	104
6.3	Simulação	111
7	Conclusão e Discussão dos Resultados	122
7.1	Discussão dos Resultados	122
7.2	Conclusão	124
	Anexos	130

A	Anexos	130
A.1	Energia Cinética Devido à Rotação	130
A.2	Funções de Forma - Modelo da Viga de Timoshenko	133
A.3	Modelo Simplificado de Rotor	137

## Lista de Figuras

2.1	Esquema de trem de compressão	19
2.2	Trem de compressão	20
2.3	Compressor <i>bp</i> e turbina em evidência	20
2.4	Vista Lateral Compressores <i>bp</i> (a esq.) e <i>ap</i>	20
2.5	Sapata Danificada	21
2.6	Pinos Normal e Danificados pela Vibração	21
2.7	Caixa de Mancal Danificada	22
2.8	Placa de Encosto Martelada	22
2.9	Caixa de Mancal com sapatas e mancal radial novos	22
2.10	Esquema do trem de compressão	24
2.11	Leituras próximas a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , tomadas no ponto 4 da figura 2.10, na axial	25
2.12	Variação da Carga axial com a Vazão do Compressor <i>bp</i>	29
2.13	Linha de contato (ao invés de ponto) aumenta rigidez do mancal	30
2.14	Compressor <i>bp</i> <b>acoplado</b> com o <i>ap</i> com $N_2$ presente no espectro	31
2.15	Compressor <i>bp</i> <b>desacoplado</b> do <i>ap</i> com $N_2$ presente no espectro	31
2.16	Rotação @ 7426rpm, $2 \times N_{c1}$ , excita $N_{c1}$ @ $249.16\mu m$ pico-a-pico	32
2.17	Rotação @ 4950rpm, $3 \times N_{c1}$ , excita $N_{c1}$ @ $67.3\mu m$ pico-a-pico	32
2.18	Máximo valor de $N_{c1}$ é $240.2\mu m$	33
2.19	Rotação $N_1$ @ 4751RPM, amplitude @ $59.41\mu m$ pico-a-pico, $N_{c1}$ @ $10\mu m$ pico-a-pico	34
2.20	Rotação $N_1$ @ 4967.3RPM, $3 \times N_{c1}$ , excita $N_{c1}$ @ $36.48\mu m$ pico-a-pico	34
2.21	Modo de Vibrar Um-diâmetro	35
2.22	Modo de Vibrar Guarda-chuva	35
2.23	Vista dos Impelidores	35
2.24	Ressonância um Diâmetro - vista 1	35
2.25	Ressonância um Diâmetro - vista 2	35
2.26	Ressonância Dois Diâmetros	36
2.27	Ressonância Guarda-chuva	36
2.28	Corte do Compressor <i>bp</i> com Pontos de Medição de Pulsação	37
2.29	Medidas de Pressão no Compressor <i>bp</i> @ 8305 RPM	38
2.30	Medidas de Pressão no Compressor <i>bp</i> @ 8101 RPM	39
2.31	Medição de Vibração com $N_1$ @ 8300RPM e nova $N_{c1}$ @ 14160RPM	40
3.1	Mancal Radial Hidrodinâmico de Sapatas Oscilantes	43
3.2	Esquema de Mancal Radial e de Escora	45
3.3	Cunha de Óleo	46
4.1	Magnitude versus Frequência	52
4.2	Fase versus Frequência para Diferentes Coeficientes de Amortecimento	53
4.3	Locus de Raízes de Pólos e Zeros para Função de Transferência	54

4.4	FRF da mobilidade $Y_{11}(\omega)$ para sistema com 4 graus de liberdade	79
4.5	FRF da receptância $\alpha_{11}(\omega)$ para sistema com 4 graus de liberdade	79
4.6	FRF para sistema com 4 graus de liberdade em dB	80
4.7	Gráfico log-log para o primeiro ponto de FRF para sistema com 4 graus de liberdade em formas de receptância, mobilidade e aceleração	81
4.8	Parte real da FRF da receptância de um sistema com 4 graus de liberdade	82
4.9	Parte imaginária da FRF da receptância para sistema com 4 graus de liberdade	82
4.10	Gráfico de Nyquist para uma FRF de um sistema amortecido com quatro graus de liberdade	83
4.11	Parte real da rigidez dinâmica $1/\alpha_{11}(\omega)$ para um sistema de quatro graus de liberdade	83
5.1	Blevis: Viga Engastada-livre com apoios intermediários	98
5.2	Blevis: Viga bi-apoiada com apoios intermediários	98
6.1	Modelo de um sistema rotor-mancal	100
6.2	Ordem dos graus de liberdade do nó	102
6.3	Ordem dos graus de liberdade do nó	104
6.4	Graus de Liberdade	106
6.5	Diagrama de Campbell	110
6.6	Rotor do Compressor $bp$ e seções	112
6.7	Modos e Frequências Naturais do Rotor do Compressor $bp$	112
6.8	Modos nas Frequências Medidas - Interpolação da Curva 6.3	113
6.9	1º Modo na Frequência Lateral	114
6.10	2º Modo na Frequência Lateral	114
6.11	3º Modo na Frequência Lateral	115
6.12	Modos nas Frequências Laterais	115
6.13	Diagrama de Campbell do rotor do compressor $cbp$	116
6.14	Orbita Tridimensional do Rotor do Compressor $bp$	116
6.15	Orbita do Rotor do Compressor $bp$	116
6.16	Bode (sem a fase) do Compressor $bp$ na axial	117
6.17	Deslocamentos @1000 RPM do eixo do Compressor $bp$	117
6.18	Deslocamentos @1000 RPM do eixo do Compressor $bp$	118
6.19	Simulação @ $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	118
6.20	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	119
6.21	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	119
6.22	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	120
6.23	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	120
6.24	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	121
6.25	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	121
7.1	Leituras próximas a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , tomadas no ponto 4 da figura 2.10, na axial	123
7.2	Simulação @ $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	124
7.3	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	125
7.4	Simulação a $N_1$ e a $1.8251 \times N_1 \approx N_2$ , na axial	125

7.5	Campbell do Rotor do Compressor $bp$ na axial	126
A.1	Sistemas de Referências	130
A.2	Graus de liberdade de um elemento de viga	133
A.3	Funções de forma para um elemento de viga de Timoshenko.	136
A.4	Referencial Móvel $\xi \times \eta$	137
A.5	Sistema de coordenadas estacionário e móvel	140
A.6	Simulação do Rotor de Laval	141

## Lista de Tabelas

2.1	Dados Operacionais do Compressor <i>bp</i>	23
2.2	Dados Operacionais do Compressor <i>ap</i>	23
2.3	Dados Operacionais do Multiplicador	23
2.4	Faixa de Operação do Compressor <i>bp</i> ao longo do Tempo	27
2.5	Frequências Naturais (CPM), medida na ponta do eixo do compressor <i>bp</i> para modo Guarda-chuva	36
2.6	Medição de Pulsação com Analisador de 16 Canais	38
2.7	Tabela com Cronologia de Ações e Resultados Obtidos	41

## Lista de símbolos

$\sin$	Seno.
$\cos$	Cosseno.
$L, l$	Comprimento.
$x$	Posição.
$v$	Velocidade.
$t$	Tempo.
$E$	Módulo de elasticidade.
$A$	Área da seção reta.
$I$	Inércia.
$u$	Deslocamento axial.
$\gamma, c$	Coeficiente de amortecimento.
$\rho$	Densidade.
$g$	Aceleração da gravidade ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).
$\omega$	Frequência de excitação (Hz).
$N$	Velocidade de rotação do eixo (rpm).
$[K], k$	Matriz de Rigidez, rigidez.
$[M], m$	Matriz de Massa, Massa.
$\xi$	Fator de amortecimento.
$[F], F, f$	Matriz de Força, Força.
$F_0$	Força de excitação.
$\delta$	Deformação.
$\lambda$	Coeficiente de proporcionalidade.
$n$	Expoente no linear.
$h$	Altura.
$T$	Período.
$\psi$	Decremento logarítmico.
$[\alpha(\omega)]$	Matriz de receptância.
$[Z(\omega)]$	Matriz de rigidez dinâmica.

*Schwierigkeit und Möglichkeit sind nebeneinander.*

**Anonymus.**