

**Javã Atayde Pedreira**

**Dinâmica de Máquinas Rotativas  
em Mancais Hidrodinâmicos**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro  
dezembro de 2006



**Javã Atayde Pedreira**

**Dinâmica de Máquinas Rotativas em  
Mancais Hidrodinâmicos**

**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. Hans Ingo Weber

Rio de Janeiro  
dezembro de 2006



**Javã Atayde Pedreira**

**Dinâmica de Máquinas Rotativas em  
Mancais Hidrodinâmicos**

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

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Ilmar Ferreira Santos, Dr.-Ing.**

Denmark University of Technology

**Prof. Moysés Zindeluk, Dr.-Eng.**

Departamento de Engenharia Mecânica – COPPE-UFRJ

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

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de dezembro de 2006

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

### **Javã Atayde Pedreira**

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Bahia. Trabalha na Petrobras desde 1987 na área de Engenharia de Manutenção de turbomáquinas

#### Ficha Catalográfica

Pedreira, Javã Atayde

Dinâmica de máquinas rotativas em mancais hidrodinâmicos / Javã Atayde Pedreira ; orientador: Hans Ingo Weber. — 2006.

113 f.: il.; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro , 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica — Teses. 2. Rotodinâmica. 3. Mancal de deslizamento 4. Rotor de Jeffcott 5. Velocidade crítica. I. Weber, Hans Ingo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, Antônio Jaques e Anelita.

A Liliana, minha esposa, e Henrique, meu filho, que sempre me apoiaram com muita paciência e compreensão pela privação dos momentos de lazer e do convívio familiar.

## Agradecimentos

Aos meus pais, Antônio Jaques Pedreira e Anelita Atayde Pedreira, pelo amor e carinho durante toda a minha formação.

Ao professor Hans I. Weber pela sua competência, dedicação, paciência e grandeza na condução deste trabalho que será de grande valia à minha formação profissional.

À PUC-Rio pela oportunidade concedida de desenvolver este trabalho.

À Petrobras, empresa que muito nos orgulha, pelo incentivo e pela sua visão estratégica da importância de investir na formação dos seus funcionários.

Aos colegas da Petrobrás pela experiência e grande conhecimento de rotodinâmica, com os quais tive a oportunidade de discutir e aprender muito.

Aos colegas do Laboratório de Vibrações da PUC-Rio, sempre muito solícitos no apoio à superação das minhas dificuldades, contribuindo assim para o enriquecimento deste trabalho.

Ao técnico Wagner Epifânio da Cruz pelo seu empenho, prestimosidade e criatividade na solução das dificuldades na construção e montagem do rotor e seu sistema hidráulico.

## Resumo

Pedreira, Javã Atayde ; Weber, Hans Ingo. **Dinâmica de Máquinas Rotativas em Mancais Hidrodinâmicos**. Rio de Janeiro, 2006. 113p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho analisa a influência dos mancais hidrodinâmicos no comportamento rotodinâmico das turbomáquinas, no que diz respeito à resposta ao desbalanceamento, modos de vibrar e, principalmente, à instabilidade, que tende a manifestar-se em rotações elevadas ou baixas cargas. As propriedades de rigidez e amortecimento do mancal são determinadas a partir da solução analítica da Equação de Reynolds, usando a aproximação do mancal curto. Um procedimento é apresentado para modelagem dinâmica do sistema rotor-mancal. O modelo de elementos finitos inclui a influência da ação giroscópica. A análise rotodinâmica completa de um rotor concebido e projetado para apresentar o fenômeno da instabilidade é feita com auxílio do programa ROMAC da University of Virginia. O programa calcula as propriedades do mancal a partir da solução numérica completa da Equação de Reynolds e o cálculo das velocidades críticas, dos modos e da análise de estabilidade é feito pelo Método dos Elementos Finitos. Finalmente, documenta-se o projeto do protótipo, o estudo realizado e os ensaios desenvolvidos. A partir das medições realizadas, valida-se a solução numérica.

## Palavras-chave

rotodinâmica, rotor, mancal cilíndrico, jeffcott.

## Abstract

Pedreira, Javã Atayde ; Weber, Hans Ingo. **Dynamics of Rotating Machinery in Fluid-film Bearing**. Rio de Janeiro, 2006. 113p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work analyses the effect of fluid-film bearings on the dynamics of turbomachinery with respect to unbalance response, vibration mode shapes and, specially, instability that tends to occur, mainly, at high speeds or light loads. The bearing stiffness and damping bearing properties are calculated using the analytical solution of the Reynolds Equation, based in a short bearing approach. Following, a procedure is presented for the dynamic modelling of rotor-bearing systems based in the Finite Element Method, including the gyroscopic effect. The complete rotordynamic analysis of a rotor designed to undergo instability problem is performed by software ROMAC from University of Virginia. The software predicts the bearing properties by complete numerical solution of Reynolds Equation and critical speeds, mode shapes and stability analysis is performed using the Finite Element Method. Finally, it is presented the design of the rotor kit, accomplished studies and performed tests. The numerical solution is validated by measurements that were made.

## Keywords

rotor rotordynamics, journal bearing, jeffcott, vibration, bearing stability.

## Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	16
2	CONCEITOS BÁSICOS DE ROTODINÂMICA	20
2.1	Introdução	20
2.2	O Rotor de Jeffcott	21
3	OS MANCAIS HIDRODINÂMICOS	35
3.1	Introdução	35
3.2	A Teoria da Lubrificação	35
3.3	A Equação de Reynolds	37
3.4	Mancais Radiais	40
3.5	Rotor montado em mancais hidrodinâmicos	55
3.6	“Oil Whirl” e “oil whip”	61
3.7	Tipos de Mancais Radiais	64
4	O SISTEMA CONTÍNUO ROTOR-MANCAL	69
4.1	Introdução	69
4.2	Equações de Movimento	69
4.3	O Método dos Elementos Finitos	74
4.4	Solução da Equação de Movimento	81
4.5	Análise Rotodinâmica	85
5	Concepção e Projeto da Bancada	94
5.1	Introdução	94
5.2	Descrição do Rotor	94
5.3	Analisador de Vibração	95
5.4	Resultados Experimentais	97
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	103
	Bibliografia	105
	Anexos	108
A	Análise de Estabilidade	108
B	Propriedades do mancal para 4.100 rpm	111
C	Detalhamento do mancal	113

## Lista de Figuras

1.1	Simulação do diagrama de Bode	17
1.2	Diagrama de Bode obtido no teste mecânico	17
1.3	Espectro de vibração	18
2.1	Rotor rígido e rotor flexível	21
2.2	a) Rotor em repouso; b) Rotor girando com velocidade $\Omega$ .	22
2.3	Rotor de Jeffcott em coordenadas cartesianas	22
2.4	Resposta em função da razão de frequências	23
2.5	Posição relativa de $C$ e $G$	23
2.6	Sistemas de referência	24
2.7	Rotor de Jeffcott em mancais flexíveis	27
2.8	resposta em função da razão de frequências	27
2.9	a) Resposta sem amortecimento; b) Resposta amortecida	28
2.10	precessões direta e retrógrada	30
2.11	Sistemas de referência para um disco em balanço	31
2.12	Frequências naturais em função da velocidade $\Omega$	34
3.1	Cisalhamento do filme de óleo	36
3.2	Sapata deslizante inclinada	36
3.3	Equilíbrio de um elemento infinitesimal	37
3.4	Mancal curto $B \ll L$	39
3.5	Funcionamento do mancal radial	40
3.6	Geometria do mancal radial	41
3.7	Erro da aproximação da espessura do filme	42
3.8	Desenvolvimento do filme de óleo	42
3.9	Cinemática para definição de $U$ e $V$	43
3.10	Distribuição de pressão no mancal radial	46
3.11	Forças sobre o eixo	46
3.12	Número de Sommerfeld	49
3.13	Lugar geométrico da posição de equilíbrio do munhão	49
3.14	Modelo massa-mola para o filme fluido	50
3.15	Variação da força de reação com o deslocamento	50
3.16	Perturbações em torno da posição de equilíbrio	51
3.17	Pequena perturbação em torno da posição de equilíbrio	52
3.18	Rigidez e amortecimento adimensionalizados	55
3.19	Rotor rígido em mancais hidrodinâmicos	56
3.20	Rotor rígido em mancais hidrodinâmicos	56
3.21	Mapa de estabilidade em função do Número de Sommerfeld	59
3.22	Rotor de Jeffcott em mancal hidrodinâmico	59
3.23	Mapa de estabilidade do rotor de Jeffcott em mancal hidrodinâmico	61
3.24	Espectro em cascata de vibração de um rotor experimental	62
3.25	Ciclo limite da órbita do eixo	63
3.26	Gráfico da velocidade e vibração	64
3.27	Espectro de vibração durante a partida	65

3.28	Tipos de mancal	65
3.29	Conceito de precarga de um mancal	66
3.30	Oscilação da sapata e “offset” de um mancal	66
3.31	Precarga de um mancal de sapatas oscilantes	67
3.32	Mapa de estabilidade para diferentes projetos de mancal	67
3.33	Mancal pressure-dam	68
4.1	Oscilação do rotor com 4 graus de liberdade	70
4.2	Condição de equilíbrio de um elemento infinitesimal	70
4.3	Elemento finito simples em flexão	75
4.4	Viga com dois elementos finitos	79
4.5	Mapa de críticas com dados da figura 4.6	87
4.6	Propriedades do mancal	88
4.7	Modos de vibrar para mancal flexível e rígido	89
4.8	Modos de vibrar não amortecidos	90
4.9	Fator de amplificação e margem de separação	91
4.10	Diagrama de Bode	92
4.11	1º modo e vibrar	92
4.12	2º modo de vibrar	93
4.13	3º modo de vibrar	93
5.1	Rotor experimental conforme construído	95
5.2	Sistema de lubrificação do mancal	95
5.3	Sistema de lubrificação do mancal	96
5.4	Painel frontal do 208 DAIU	96
5.5	Fluxo de dados do analisador	97
5.6	Diagrama de Bode obtido experimentalmente	98
5.7	Espectro e órbita nas vizinhanças da velocidade crítica	99
5.8	Fenômeno do oil whirl	100
5.9	Fenômeno do oil whip	101
5.10	Forma de onda	102

## Lista de símbolos

$A$	Área da seção reta.
$A$	Constante de integração.
$A_o$	Constante.
$A_1$	Constante.
$A_2$	Constante.
$A_3$	Constante.
$A_4$	Constante.
$AF$	Fator de amplificação.
$a$	Aceleração.
$B$	Largura do mancal.
$B$	Constante de integração.
$C$	Matriz de amortecimento.
$\bar{C}$	Matriz de amortecimento adimensionalizada.
$c$	Coefficiente de amortecimento.
$c_{xx}$	Amortecimento principal na direção horizontal.
$c_{yy}$	Amortecimento principal na direção vertical.
$c_{xy}$	Amortecimento cruzado .
$c_{yx}$	Amortecimento cruzado.
$E$	Módulo de elasticidade.
$e$	Excentricidade do mancal.
$F$	Força sobre o mancal.
$F_r$	Força radial sobre o munhão.
$F_{ro}$	Força radial sobre o munhão na condição de equilíbrio.
$F_t$	Força tangencial sobre o munhão.
$F_{to}$	Força tangencial sobre o munhão na condição de equilíbrio.
$f$	Folga radial do mancal.
$f$	Força externa sobre o rotor.
$G$	Matriz giroscópica.
$g$	Aceleração da gravidade.
$H$	Momento angular.
$h$	Espessura aproximada do filme lubrificante.
$h_e$	Espessura exata do filme lubrificante.
$I$	Momento de inércia de área.
$J$	Momento de inércia de massa.
$J$	Momento de inércia de massa transversal.
$J_p$	Momento de inércia de massa polar.
$K$	Matriz de rigidez.
$k$	Rigidez efetiva.
$k_b$	Rigidez do mancal.
$k_e$	Rigidez do eixo.
$k_{xx}$	Rigidez principal na direção horizontal.
$k_{yy}$	Rigidez principal na direção vertical.
$k_{xy}$	Rigidez cruzada .
$k_{yx}$	Rigidez principal na direção horizontal.
$L$	Comprimento do mancal.
$L_v$	Limite de vibração.
$l$	Comprimento do rotor ou do elemento finito.

$M$	Torque.
$m$	Massa do do rotor.
$m$	Precarga do mancal.
$N$	Velocidade de rotação do rotor (rpm).
$N$	Número de funções de modo.
$P$	Força.
$p$	Pressão.
$p$	Número de elementos finitos.
$Q$	Variável auxiliar para uma expressão de $\varepsilon$ .
$q$	Vazão.
$r$	Vetor deflexão do centro geométrico do disco.
$S$	Número de Sommerfeld.
$s$	Expressão para avaliação do sentido da precessão.
$SM$	Margem de separação.
$R$	Raio do mancal.
$Re$	Parte real de um número complexo.
$t$	Tempo.
$T$	Matriz de transformação de coordenadas.
$U$	Velocidade na direção X.
$U$	Matriz dos autovetores a direita.
$u$	Vetor excentricidade devido ao desbalanceamento (m).
$u$	Desbalanceamento residual (g.m).
$u$	Vetor de estado na direção. X
$V$	Esforço cortante.
$V$	Velocidade na direção Y.
$V$	Matriz dos autovetores a esquerda.
$v$	Vetor de deslocamento na direção. Y.
$v$	Velocidade.
$x$	Deflexão na direção X.
$y$	Deflexão na direção Y.
$w$	Peso.
$\bar{w}$	Carga distribuída.
$W$	Velocidade na direção Z.
$Z(t)$	Vetor força modal.
$\alpha$	ângulo (rad).
$\delta$	Constante.
$\varepsilon$	Razão de excentricidade do mancal.
$\varepsilon_o$	Razão de excentricidade do mancal na condição de equilíbrio.
$\mu$	Viscosidade.
$\rho$	Vetor deslocamento do centro de gravidade do disco.
$\rho$	Densidade.
$\Omega$	Velocidade angular do rotor (rad/s).
$\omega$	Frequência natural (rad/s).
$\Omega_l$	Velocidade limite de estabilidade (rad/s).
$\omega_l$	Frequência natural na velocidade limite (rad/s).
$\theta$	ângulo (rad).

$\beta$  ângulo (rad).  
 $\psi$  ângulo (rad).  
 $\lambda$  Autovalores do polinômio característico.

$\beta$  ângulo de fase(rad).  
 $\xi$  Razão de amortecimento.  
 $\gamma$  ângulo (rad).  
 $\eta$  Razão de frequência.  
 $\tau$  Tensão de cisalhamento.  
 $\phi$  ângulo de atitude(rad).  
 $\phi_o$  ângulo de atitude na condição de equilíbrio (rad).  
 $\phi$  Função de modo.  
 $\zeta(t)$  Vetor das cordenadas modais.

*Caminhante, não há caminho. O caminho se faz ao caminhar.*

**Autor desconhecido.**