

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Ramiro Germán Díaz Chávez**

## **Dinâmica de um Rotor Horizontal em Apoios Elásticos**

### **Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Hans Ingo Weber

Rio de Janeiro

Julho de 2003



**Ramiro Germán Díaz Chávez**

## **Dinâmica de um Rotor Horizontal em Apoios Elásticos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Hans Ingo Weber**

Orientador

Departamento de Eng. Mecânica - PUC-Rio

**Prof. José João de Espíndola**

Departamento de Eng. Mecânica - UFSC

**Prof. Moysés Zindeluk**

Departamento de Eng. Mecânica - UFRJ

**Prof. Rubens Sampaio**

Departamento de Eng. Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de julho de 2003

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

### **Ramiro Germán Díaz Chávez**

Graduou-se em Engenharia Mecânica (Facultad de Ingeniería Mecânica – Universidad Nacional de Ingeniería – Lima - Perú) em 1998. Áreas de Pesquisa: Dinâmica de Rotação e Vibrações. Áreas de interesse: Controle das Vibrações. Desempenhou o cargo de Assistente do Departamento de Engenharia no Grupo SINDICATO PESQUERO DEL PERU (2000-2001), Encarregado da Manutenção da Seção de Telhars da Têxtil TECNOLOGIA TEXTIL (1999), Assistente do Departamento de Manutenção da Mina HUARON - GRUPO HOSCHILD (1998)

#### Ficha Catalográfica

Díaz Chávez, Ramiro Germán

Dinâmica de um rotor horizontal em apoios elásticos / Ramiro Germán Díaz Chávez; orientador: Hans Ingo Weber. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.

[17], 126 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Apoios elásticos. 3. Dinâmica de rotação. 4. Controle de vibrações. 5. Elastômetro. I. Weber, Hans Ingo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para minha esposa Cecília e aos meus pais  
Antonio e Melania, pelo apoio e estímulo.

## **Agradecimentos**

Ao Professor Hans Weber, pela orientação, os conselhos e estímulo para a realização deste trabalho.

Ao Professor Espíndola, pelo apoio nesta pesquisa.

À CAPES pelo incentivo concedido para o desenvolvimento de esta pesquisa.

À minha família pelos incentivos durante todo este tempo.

## Resumo

Díaz Chávez, Ramiro Germán. **Dinâmica de um Rotor Horizontal em Apoios Elásticos**. Rio de Janeiro, 2003. xxxp. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dentro do campo dos controladores passivos, um dos dispositivos usados pelas suas propriedades de amortecimento são os Apoios Elásticos, que constituem uma solução econômica e efetiva na supressão ou atenuação das vibrações em sistemas dinâmicos com problemas de ressonância ou instabilidade, freqüentemente pela falta de amortecimento suficiente. Este trabalho envolve o estudo de um rotor horizontal com apoios elásticos (silicone), adaptado a partir de um rotor existente, o estudo de diversos efeitos sobre a sua operação, a medição de seu movimento, a identificação dos parâmetros do problema, a medição e validação a partir de resultados simulados em um modelo numérico. Os fenômenos incluídos no estudo são o efeito giroscópio (rotor descentrado com respeito do vão), desbalanceamento do rotor e empenamento do eixo. Neste trabalho os parâmetros do sistema foram determinados usando técnicas de identificação, análise modal e otimização não linear devido à anisotropia do sistema.

## Palavras-chave

Apoios elásticos, dinâmica de rotação, Controle de vibrações, elastômero

## **Abstract**

Díaz Chávez, Ramiro German; Weber, Hans Ingo. Dynamics of an Horizontal Rotor on Elastomeric Bearing Supports. Rio de Janeiro, 2003.100p. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Viscoelastic Passive Controllers are an important field of technological research due to the development of new materials and design techniques. Damping properties allow an easy retrofit of existing machines with excessive vibration problems, developing Elastomeric Bearing Supports. They are an economic and effective solution in the suppression or attenuation of vibrations in dynamic systems suffering from instability or resonance problems, which often lack of sufficient damping. This work involves the study of an horizontal rotor with elastomeric bearing supports, adapted of another one, the study of several effects on his operation, the measurement of his motion, the identification of the problem's parameters, the measurement and validation from the simulated results in a numeric model. Phenomena included in the study are the gyroscopic effect (rotor out of the middle), rotor unbalance and shaft bow. In this work the system's parameters were determined using identification, modal analysis and nonlinear optimization techniques due to the anisotropy of the system.

## **Keywords**

Elastomeric bearing supports, Rotordynamics, Vibration control, Elastomer.

## Sumário

1.	Introdução	18
1.1	Objetivos	19
1.2.	Considerações na Modelagem	19
1.3.	Organização do Trabalho	22
2.	Modelo do Sistema sem Apoios Elásticos	24
2.1.	Equações de Movimento	24
2.2.	Determinação das Matrizes de Amortecimento e Rigidez (Identificação – Análise Modal – Otimização Não Linear)	30
2.3.	Identificação do Sistema sem Rotação	30
2.4.	Cálculo da Matriz de Amortecimento C a partir da Identificação dos Parâmetros Modais	40
2.5.	Cálculo dos Parâmetros Ótimos na Matriz de Rigidez e Amortecimento – Otimização Não Linear	41
2.6.	Determinação dos Parâmetros das Excitações	43
2.7.	Solução das Equações de Movimento	47
3.	Modelo Viscoelástico dos Apoios	56
3.1.	Propriedades Dinâmicas dos Materiais Viscoelásticos	56
3.2.	Determinação do Módulo Complexo em Materiais Viscoelásticos	58
3.3.	Determinação da Rigidez e o Amortecimento dos Apoios a partir do Módulo Complexo	58
3.4.	Modelo ADF ( <i>Anelastics Displacements Field</i> )	60
3.5.	Levantamento Direto da Rigidez e o Amortecimento dos Apoios	63
3.6.	Aproximação do Módulo Complexo–Funções de Ajuste	70

4.	Modelo do Sistema com Apoios Elásticos	72
4.1.	Inclusão de Apoios Elásticos	72
4.2.	Equações de Movimento	73
4.3.	Solução das Equações de Movimento	81
4.4.	Discussão sobre o Diagrama de Campbell	86
5.	Metodologia Experimental	88
5.1.	Aspectos Teóricos	88
5.2.	Descrição da Bancada de Rotação	89
5.3.	Aquisição e Processamento dos Sinais	90
5.4.	Ajuste Mecânico do Equipamento	92
5.5.	Influência do Acoplamento	93
5.6.	Ensaio Realizados	93
6.	Análise Numérica e Experimental, Validação	97
6.1.	Sistema sem Apoios Elásticos	97
6.1.1.	Parâmetros do Sistema	97
6.1.2.	Comparação entre os Resultados Numéricos e Experimentais	101
6.2.	Características Dinâmicas dos Apoios Elásticos	111
6.3.	Sistema com Apoios Elásticos	116
6.3.1.	Parâmetros do Sistema	116
6.3.2.	Comparação entre os Resultados Numéricos e Experimentais	119
6.4.	Resposta para Apoios com Distintos Materiais Viscoelásticos	125
7.	Conclusões e Recomendações	130
7.1.	Conclusões	130
7.2.	Recomendações	132
7.3.	Trabalhos Futuros	132
	Referências Bibliográficas	134

A.	Determinação da Matriz de Rigidez	137
A.1.	Sistemas sem Apoios Elásticos	137
A.2.	Sistemas com Apoios Elásticos	139

## Lista de Figuras

2.1	Modelo do Rotor sem Apoios Elásticos	24
2.2	Ângulo de Inclinação do Disco (má montagem)	28
2.3	Processo de Deconvolução	37
2.4	Cálculo do Parâmetro de Regularização	37
2.5	a) Largura de Banda de Meia Potência, b) Decaimento Logarítmico	40
2.6	Disco com furos para fixação de massas	43
2.7	a) Fase da Excentricidade com Respeito ao Sistema Inercial, $\beta$ , b) Fase do disco montado incorretamente com respeito ao sistema inercial, $\eta$	44
2.8	Cone de Nutação	45
2.9	a) Desbalanceamento e Empenamento em fase ( $\gamma=0^\circ$ ), b) Desbalanceamento e empenamento em defasagem ( $\gamma=180^\circ$ )	45
2.10	Fixação do disco	46
2.11	$\alpha$ e $\eta$ , a) desbalanceamento e empenamento em fase, b) desbalanceamento e empenamento em defasagem de $180^\circ$	47
2.12	Diagrama Campbell (parte imaginária dos autovalores vs. frequência)	50
3.1	Deformações dos Materiais Elásticos	57
3.2	a) Geometria dos anéis elastoméricos, b) Modelo de Rigidez dos anéis	59
3.3	a) Modelo do Rotor sem Apoios Elásticos, b) Modelo Equivalente	64
3.4	a) Modelo do Rotor com Apoios Elásticos, b) Modelo Equivalente	65
4.1	Modelo do Rotor com Apoios Elásticos	72
4.2	Desenho dos Apoios Elásticos	73
5.1	a) Montagem dos Sensores de Deslocamento, b) Curva de Calibração dos sensores de deslocamento	90
5.2	Desbalanceamento Residual e Induzido	93

5.3	a) Testes - Translação, b) Testes – Rotação	95
6.1	Resultados da Identificação, a) Translação, b) Rotação	98
6.2	Cálculo do Empenamento do Eixo	99
6.3	Forma da Orbita e Sentido da Precessão em função da Fase	102
6.4	a) Resposta em $y$ , b) Resposta em $z$ , c) Fase entre $y$ e $z$ , Comparação entre os dois Casos	103
6.5	Testes para obter autovalores: a) Modos de Translação, b) Modos de Rotação	104
6.6	Validação do Diagrama de Campbell (Parte Imaginária dos Autovalores)	104
6.7	Validação – Orbitas para o Primeiro Caso	106
6.8	Validação – Orbitas para o Segundo Caso	108
6.9	Resposta em Frequência para o Primeiro Caso, a) Direção Horizontal ( $y$ ), b) Direção Vertical ( $z$ )	109
6.10	Resposta em Frequência para o Segundo Caso, a) Direção Horizontal ( $y$ ), b) Direção Vertical ( $z$ )	110
6.11	Módulo Complexo do Dyac 601	113
6.12	Módulo Complexo do Silicone (RJ)	114
6.13	Módulo Complexo do Silicone (SC)	115
6.14	Comparação de Técnicas diferentes: Módulo Complexo do Silicone na faixa dos testes	116
6.15	Diagrama de Campbell para o Silicone (Parte Imaginária dos Autovalores)	120
6.16	Orbitas para o Silicone	122
6.17	Resposta em Frequência para o Silicone	124
6.18	Módulo Complexo para o Dyac 601 e o Silicone	125
6.19	Diagrama de Campbell para o Dyac 601, o Silicone e para os apoios rígidos	126
6.20	Resposta em Frequência para o Dyac 601, para o Silicone e para os apoios rígidos	128

A.1	Plano Horizontal	137
A.2	Configurações de Deformação do Eixo no Plano Horizontal	138
A.3	Plano Vertical	138
A.4	Configurações de Deformação do Eixo no Plano Vertical	138
A.5	Deflexão numa Viga Engastada	139
A.6	Plano Horizontal	140
A.7	Primeira Configuração do Eixo Deformado no Plano Horizontal	140
A.8.	Segunda Configuração do Eixo Deformado no Plano Horizontal	140
A.9	Terça Configuração do Eixo Deformado no Plano Horizontal	141
A.10	Quarta Configuração do Eixo Deformado no Plano Horizontal	141
A.11	Plano Vertical	142
A.12	Primeira Configuração do Eixo Deformado no Plano Vertical	142
A.13	Segunda Configuração do Eixo Deformado no Plano Vertical	142
A.14	Terça Configuração do Eixo Deformado no Plano Vertical	143
A.15	Quarta Configuração do Eixo Deformado no Plano Vertical	143

## Lista de Símbolos

$U$	Desbalanceamento
$\epsilon$	Excentricidade do desbalanceamento
$m$	Massa do disco
$\Omega$	Frequência de rotação
$t$	Tempo
$\mathbf{x}$	Vector deslocamento no sistema inercial
$\mathbf{x}_w$	Vector deslocamento do centro geométrico do disco
$\mathbf{x}_s$	Vector deslocamento da localização do desbalanceamento
$\mathbf{M}$	Matriz de Massa
$\mathbf{C}$	Matriz de Amortecimento
$\mathbf{K}$	Matriz de Rigidez
$\mathbf{H}$	Matriz de resposta em frequência
$g$	Gravidade
$r_o$	Empenamento
$\beta$	Fase do desbalanceamento
$\omega_o$	Frequência natural
$\omega_a$	Frequência natural amortecida
$\omega_c$	Frequência crítica
$\xi$	Coefficiente de amortecimento
$I_a$	Momento de Inércia diametral do disco
$I_p$	Momento de Inércia polar do disco
$\sigma$	Tensão
$\epsilon$	Deformação
$E$	Módulo de Young
$G^*$	Módulo Complexo (referente ao cisalhamento)
$G$	Módulo de cisalhamento (Storage Modulus)
$\eta$	Fator de perda (Loss Factor)
$i$	Valor imaginário $(-1)^{1/2}$

$\mathbf{e}$	Vetor de excentricidade do desbalanceamento
$\mathbf{F}_{\text{desb}}$	Forças devidas ao desbalanceamento
$\mathbf{F}_{\text{mm}}$	Forças devidas à má montagem do disco
$\mathbf{F}_{\text{emp}}$	Forças devidas ao empenamento do eixo
$\mathbf{X}$	Vetor de estado
$\mathbf{A}$	Matriz de estado
$\mathbf{I}$	Matriz de identidade
$\mathbf{y}$	Vetor de saída
$\mathbf{D}$	Matriz de transmissão direta
$\Phi$	Matriz de transição
$h$	Função de resposta ao impulso unitário
$\mathbf{T}_L$	Matriz de Toeplitz
$M_R$	Parâmetro de regularização
$\mathbf{H}_a$	Matriz de Hankel
$\tilde{\Phi}$	Matriz modal ponderada
$\xi$	Matriz de amortecimento modal
$\tilde{\mathbf{M}}$	Matriz de massa modal
$\tilde{\mathbf{K}}$	Matriz de rigidez modal
$\mathbf{LB}$	Vetor de restrição inferior
$\mathbf{UB}$	Vetor de restrição superior
$\mathbf{v}_r$	Autovetor à direita
$\mathbf{v}_l$	Autovetor à esquerda
$B$	Módulo volumétrico (Bulk Modulus)
$\nu$	Módulo de Poisson
$\mathbf{D}_{CG}$	Soma das matrizes de amortecimento e giroscópicas
$\mathbf{K}_c$	Representa a inclusão dos apoios elásticos
$G_o, \Delta_j, \psi_j$	Parâmetros do modelo ADF
$\mathbf{x}^d$	Vetor dos graus de liberdade dissipativos
$G_o$	Valor estático do módulo complexo
$G_\infty$	Valor instantâneo do módulo complexo
$\bar{\mathbf{x}}$	Vetor de deslocamentos do sistema aumentado no modelo ADF
$\bar{\mathbf{M}}$	Matriz de massa do sistema aumentado

$\bar{\mathbf{D}}$	Matriz de massa de amortecimento e giroscópica do sistema aumentado
$\bar{\mathbf{K}}$	Matriz de massa de rigidez do sistema aumentado
$\bar{\mathbf{F}}$	Vetor das forças do sistema aumentado
$\Lambda$	Matriz de autovalores
$f$	Fator que relaciona ao módulo complexo e o amortecimento e rigidez dos apoios
$c_l$	amortecimento dos apoios
$k_l$	rigidez dos apoios
$\underline{\mathbf{M}}$	Matriz de massa em notação complexa
$\underline{\mathbf{K}}$	Matriz de rigidez em notação complexa
$\underline{\mathbf{C}}$	Matriz de amortecimento em notação complexa
$f_a$	Frequência de amostragem
$f_{obj}$	Função objetivo
$\mathbf{H}^E$	Matriz Hessiana

**El hombre nunca sabe de lo que es capaz hasta que lo intenta**

**Charles Dickens**