UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
1994

1110000234

Diagnose e Análise de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibrações

André Luis de Paula Marques

31

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ - FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE MECANICA

DIAGNOSE E ANÁLISE DE FALHAS EM ROLAMENTOS POR ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

ANDRÉ LUIS DE PAULA MARQUES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá e aprovada pela Banca Examinadora, para obtenção do título de " MESTRE EM ENGENHARIA MECANICA - Área de Projetos e Materiais.

GUARATINGUETÁ - FEVEREIRO 1994

UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Campus de Guaratinguetá

"DIAGNOSE E ANÁLISE DE FALHAS EM ROLAMENTOS POR ANÁLISE DE VIBRAÇÕES"

ANDRÉ LUIS DE PAULA MARQUES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Tamotsu Hirata
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO
Orientador

Prof. Dr. ARAILDO LIMA DA SILVA

Prof. Dr. OSAMU SAOTOME

T534.1(043)
M357d

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

000234 - T. 234

Fevereiro de 1994

A minha mãe e sobrinha.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Nazem Nascimento, pela orientação recebida.

Ao Professor Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald pelo apoio e sugestões recebidas.

Ao Departamento de Mecânica, na pessoa do Professor Dr. Araildo Lima da Silva pelo apoio e sugestões recebidas.

Ao S.A.A.E.G. pelo empréstimo de equipamentos para o desenvolvimento do trabalho.

À Srta Lucia Helena de Paula pela confecção dos desenhos.

Ao analista de sistemas Wagner Valentini Vieira de Souza da UNESP - Campus de Guaratinguetá.

À FUNDUNESP e ao CNPq pela contribuição na confecção das bancadas e pelo auxílio bolsa.

À todos, que direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise dos tipos de falhas em rolamentos por análise das vibrações mecânicas, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, sendo este um dos principais tipos de manutenção preditiva.

O estudo é composto de uma parte teórica e outra experimental.

A parte teórica faz uma modelagem matemática do rolamento de esferas, mostrando os principais tipos de defeitos e os vários parâmetros para detecção de falhas.

Para um melhor entendimento do estudo fazemos nesta parte uma introdução mostrando os vários tipos de manutenção, seu funcionamento e sua utilidade, bem como uma descrição dos rolamentos em geral e suas características.

A parte experimental descreve as bancadas de testes e os ensaios realizados, bem como os equipamentos de coleta, aquisição e análise de dados.

Após a parte de testes é feita uma comparação dos valores experimentais com os teóricos e na conclusão é apresentada uma análise dos melhores parâmetros para detecção de falhas em rolamentos.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the types of defects in bearings by the analysis of mechanical vibrations, both as respects time and frequency. This is a principal type of maintenance predictive.

The study is composed of theoretical part and an experimental part.

The theoretical part make a mathematical model of the spherical bearings, explaining the principal types of defects and various parameters to detect defects.

For better understading of study, we make in this part a introduction explaining the various types of maintenance, its operated and utility, as a description of general of bearings and its characteristics.

The experimental part describes the batteries of tests and the experiments realized utilising, as the equipaments of collect, acquisition and analysis of results.

After the part of tests is made a comparison of experimental values with the theoretical and in the conclusion, there is presented an analysis of the better parameters for detecting defects in bearing.

INDICE

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Importância da Manutenção.....01
1.2. Objetivos do Trabalho.....03
1.3. Pesquisa Bibliográfica.....03
1.4. Resumo dos Capítulos.....05

CAPITULO 2 - TIPOS DE MANUTENÇÃO

2.1. Manutenção Corretiva.....07
2.2. Manutenção Preventiva.....08
2.3. Manutenção Preditiva.....09
2.3.1. Tipos de Preditiva.....13

CAPITULO 3 - MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANALISE DE VIBRAÇÕES

3.1. Introdução.....27
3.2. Parâmetros de Vibração.....29
3.3. Principais Causas de Vibrações.....31
3.4. Instrumentação.....34
3.5. Análise Espectral.....46

CAPITULO 4 - ROLAMENTOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

4.1. Introdução.....48
4.2. Tipos de Rolamentos.....48
4.3. Características Gerais.....50
4.4. Principais Características Individuais e Aplicações.....58
4.5. Rolamentos Rígidos de Esferas.....68

CAPITULO 5 - PRINCIPAIS PROBLEMAS EM ROLAMENTOS

5.1. Introdução.....71

5.2. Principais Tipos de Irregularidades de Operação em Rolamentos e Possíveis Causas.....76

5.3. Falhas em Rolamentos e Causas Prováveis.....78

CAPITULO 6 - TIPOS DE ANÁLISES EM ROLAMENTOS

6.1. Introdução.....83

6.2. Análise no Domínio do Tempo.....83

6.2.1. Valores Característicos.....84

6.3. Análise de Falhas em Rolamentos no Domínio da Frequencia.....87

6.3.1. Equacionamento da Cinemática dos Rolamentos.....88

6.3.2. Aplicação das Equações Desenvolvidas no no ítem 6.3.1. para a Determinação das Frequências Características.....95

CAPITULO 7 - PARTE EXPERIMENTAL

7.1. Parte Experimental.....97

7.2. Bancada de Testes.....99

7.3. Instrumentação Utilizada.....104

7.3.1. Descrição da Parte Experimental.....104

7.3.2. Sensores.....106

7.3.3. Condicionador de Sinais.....106

7.3.4. Coleta e Análise de Dados.....106

7.3.5. Calibração de Sinais.....107

CAPÍTULO 8 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

8.1. Método de Coleta de Dados.....108

8.2. Valores Característicos Obtidos.....109

8.3. Gráfico dos Valores Característicos Obtidos.....114

8.4. Frequências Características Teóricas.....120

8.5. Frequências Características Obtidas.....123

8.6. Calibração dos Acelerômetros.....124

8.7. Caracterização dos Aspectos dos Rolamentos.....125

CAPÍTULO 9 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....127

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....130

APÊNDICES

A. Softwares Utilizados.....134

B. Desenhos das Bancadas.....146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Manutenção Preventiva x Preditiva.....09
Figura 2.2 - Inspeção por Líquido Penetrante.....13
Figura 2.3 - Ensaio Magnético.....14
Figura 2.4 - Ensaio Elétrico.....15
Figura 2.5 - Ensaio Eletromagnético.....16
Figura 2.6 - Ensaio por Ultra-Som.....17
Figura 2.7 - Ensaio por Raio-X.....18
Figura 2.8 - Princípios da Emissão Acústica.....24
Figura 2.9 - Vida de Máquina: Curva da Banheira.....25
Figura 3.1 - Manutenção Preditiva por Análise de Vibrações....27
Figura 3.2 - Onda Harmônica.....29
Figura 3.3 - Curvas de Amplitude-Tempo.....30
Fluxograma 1 - Medição Tipo 1 34
Fluxograma 2 - Medição Tipo 2.....35
Fluxograma 3 - Medição Tipo 3.....35
Fluxograma 4 - Medição Tipo 4.....35
Figura 3.4 - Ação Piezoelétrica.....37
Figura 3.5 - Acelerômetro Piezoelétrico.....38
Figura 3.6 - Acelerômetro de Compressão.....38
Figura 3.7 - Acelerômetro de Compressão.....39
Figura 3.8 - Sistema Piezoelétrico Sísmico (Tipo Flexão).....39
Figura 3.9 - Acelerômetro Tipo Fletor com Duas Saídas.....40
Figura 3.10 - Acelerômetro da Baixa Impedância.....40
Figura 3.11 - Fixação de Acelerômetro por Prisioneiro.....41
Figura 3.12 - Fixação de Acelerômetro por Cimento Adesivo.....42
Figura 3.13 - Fixação de Acelerômetro por Base Magnética.....42
Figura 3.14 - Fixação do Acelerômetro com a Mão.....42
Figura 3.15 - Gravador Portátil.....43
Figura 3.16 - Filtro.....44

Figura 3.17 - Amplificador.....44
Figura 3.18 - Analisador de Espectro.....44
Figura 3.19 - Computador.....45
Figura 3.20 - Análise Espectral.....46
Figura 4.1 - Rolamentos.....48
Figura 4.2 - Rolamentos: Dimensões Principais.....50
Figura 4.3 - Exemplos de Montagem.....53
Figura 4.4 - Exemplos de Desmontagem.....54
Figura 4.5 - Exemplos de Lascamento.....57
Figura 4.6 - Probabilidade de Falha na Vida de um Rolamento...57
Figura 4.7 - Rolamentos Tipos Magnéticos.....58
Figura 4.8 - Rolamentos de Contato Angular de Uma Carreira de Esferas.....59
Figura 4.9 - Rolamentos Autocompensador de Esferas.....59
Figura 4.10 - Rolamentos de Contato Angular de Duas Carreiras de Esferas.....60
Figura 4.11 - Rolamentos de Rolos Cilíndricos.....61
Figura 4.12 - Rolamentos de Rolos Cônicos.....62
Figura 4.13 - Rolamentos Autocompensadores de Rolos.....63
Figura 4.14 - Rolamentos de Rolos de Agulhas.....64
Figura 4.15 - Rolamentos Axial de Rolos Cilíndricos.....65
Figura 4.16 - Rolamentos Axial de Rolos Cônicos.....65
Figura 4.17 - Rolamentos Axial Autocompensador de Rolos.....66
Figura 4.18 - Rolamentos Axial de Esferas.....66
Figura 4.19 - Rolamento Duplex.....67
Figura 4.20 - Rolamento Rígido de Esferas.....68
Figura 5.1 - Desgaste por Deficiência de Lubrificação.....71
Figura 5.2 - Desgaste por Partículas Abrasivas.....72
Figura 5.3 - Desgaste por Patinação.....72
Figura 5.4 - Desgaste por " Falso Brinelamento".....72

Figura 5.5 - Desgaste por Corrosão ou Ferrugem.....73
Figura 5.6 - Fadiga.....73
Figura 5.7 - Desgaste por Lascamento.....74
Figura 5.8 - Goivagem.....74
Figura 5.9 - Sulcamento.....74
Figura 5.10 - Queima por Corrente Elétrica.....75
Figura 5.11 - Desgaste por Brinelamento.....75
Figura 5.12 - Rachaduras e Fraturas.....75
Figura 6.1 - Análise no Domínio do Tempo de um Rolamento.....84
Figura 6.2 - Dimensões Básicas de um Rolamento.....88
Figura 6.3 - Dimensões Internas de um Rolamento incluindo o Angulo de Contato.....89
Figura 7.1 - Esquema da Bancada de Testes de Rolamentos.....97
Figura 7.2 - Foto da Bancada de Testes de Rolamentos.....99
Figura 7.3 - Foto da Bancada de Testes de Rolamentos.....101
Figura 7.4 - Foto da Bancada de Testes de Rolamentos.....102
Figura 7.5 - Esquema da Instrumentação Utilizada.....105
Figura 8.1 - Gráfico de Tendência - Rolamento sem Lubrificação - Valor de pico e Valor Pico a Pico.....115
Figura 8.2 - Gráfico de Tendência - Rolamento com areia Valor de pico e Valor pico a pico.....115
Figura 8.3 - Gráfico de Tendência - Rolamento sem Lubrificação - Rms e Desvio padrão.....116
Figura 8.4 - Gráfico de Tendência - Rolamento com areia Rms e Desvio padrão.....117
Figura 8.5 - Gráfico de Tendência - Rolamento sem Lubrificação - Fator de Crista e Curtosis.....118
Figura 8.6 - Gráfico de Tendência - Rolamento com areia Fator de Crista e Curtosis.....119

Figura 8.7 - Gráfico de Tendência - Rolamento sem Lubrificação - Valor médio e Fator de Forma....119

Figura 8.8 - Gráfico de Tendência - Rolamento com areia Valor médio e Fator de Forma.....119

Figura 8.9 - Foto do Rolamento sem Lubrificação.....125

Figura 8.10 - Foto do Rolamento sem Lubrificação.....126

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Classificação dos Rolamentos 48

Tabela 4.2 - Folgas dos Rolamentos.....52

Tabela 5.1 - Caracterização de Irregularidades.....76

Tabela 5.2 - Caracterização de Irregularidades.....77

Tabela 5.3 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....78

Tabela 5.4 - Caracterização de Falhas em roalmentos.....79

Tabela 5.5 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....80

Tabela 5.6 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....80

Tabela 5.7 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....81

Tabela 5.8 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....81

Tabela 5.9 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....82

Tabela 5.10 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....82

Tabela 5.11 - Caracterização de Falhas em Rolamentos.....82

Tabela 8.1 - Valores Característicos do Rolamento 6205.....110

Tabela 8.2 - Valores Característicos do Rolamento 6205.....111

Tabela 8.3 - Valores Característicos do Rolamento 6205.....112

Tabela 8.4 - Valores Característicos do Rolamento 6205.....113

Tabela 8.5 - Valores Característicos do Rolamento 6205.....114

Tabela 8.6 - Frequências Características do Rolamento 6205...123

Tabela 8.7 - Massa dos Acelerômetros.....124

NOMENCLATURA

H..... .....Fluxo magnético
C1,C2,C3 e C4 .....Eletrodos
U .....Diferença de Potencial
A e B.....Bobinas Concêntricas
R1,R2 e R3 .....Receptores de Utra-som
T1,T2 e T3 .....Transdutores de Ultra-som
I0,I1 e I2 .....Intensidade de Feixe de Raios-X
A.....Amplitude de Deslocamento de uma Função
T.....Período de uma Função
ω.....Frequência Angular da Função
x.....Deslocamento no Domínio do Tempo
v.....Velocidade no Domínio do Tempo
a.....Aceleração no Domínio do Tempo
C.....Capacitância
F.....Força Mecânica
d.....Constante Piezoelétrica
e.....Tensão entre Eletrôdos
f(t).....Transformada Inversa de Fourier
F(ω).....Transformada Direta de Fourier
D.....Diâmetro da Esfera
di.....Diâmetro da Pista Interna do Rolamento
de.....Diâmetro da Pista Externa do Rolamento
dm.....Diâmetro Médio do Rolamento
H.....Altura do Rolamento
B.....Largura do Rolamento
T.....Largura Toatal do Rolamento
ni.....Rotação da Pista Interna
ne.....Rotação da Pista Externa

nm.....Rotação do Diâmetro Médio

nr.....Rotação da Gaiola

n.....Velocidade de Rotação

P.....Carga Dinâmica Equivalente

p.....Constante de Rolamentos

C.....Capacidade de Carga Dinâmica

fpi.....Frequência de Defeitos na Pista Interna

fpe.....Frequência de Defeitos na Pista Externa

fg.....Frequência da Gaiola

Fr.....Spin da Esfera

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTANCIA DA MANUTENÇÃO

Chama-se de atividades de manutenção àquelas decorrentes de qualquer ação direta necessária para se manter sistemas operando corretamente , de acordo com as respectivas concepções de projeto e necessidades do sistema de produção.

Pela própria definição que damos à manutenção vemos a necessidade dos setores de produção e manutenção se entenderem perfeitamente e se ajudarem mutuamente.

Isso não foi sempre assim, pois o setor de manutenção era um setor de extrema importância , já que os equipamentos nunca são perfeitos e dia menos dia mais irão falhar ; desta forma a mesma era tolerada como um mal necessário.

Com o passar dos anos , com a necessidade do aumento de produção , como os equipamentos não podiam parar em momentos inoportunos , esta visão foi se alterando.

Desta forma era necessário transformá-la em algo racional , que garantisse maior disponibilidade das máquinas, prolongasse sua vida e reduzisse suas despesas.

" IMPORTANTE LEMBRAR QUE SOMENTE COM MAIOR DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS É POSSIVEL AUMENTAR A PRODUÇÃO. "

Após este período a manutenção saltou para uma nova era, ganhando importância e desenvolvendo-se cada dia.

A manutenção pode ser classificada da seguinte forma:

- deixar quebrar para consertar;
- fazer revisões e trocas após tempo pré-determinado;

- fazer medições com instrumentos apropriados a fim de se descobrir o momento exato em que será necessário o reparo.

Esta classificação deu origem às classificações atuais, corretiva ou de emergência , preventiva ou periódica , preditiva ou condicional.

A manutenção corretiva é a mais antiga de todas e existe desde o tempo da pedra lascada até os dias de hoje.

A manutenção preventiva ou periódica surgiu em meados do século XX , como solução para aumentar a produção , evitando paradas inoportunas.

Baseia-se na suposição de que a vida útil dos componentes de uma máquina podem ser conhecida mediante um registro prolongado de ocorrências de problemas na própria máquina ou máquinas similiares.

Devido às tolerâncias de fabricação do processo industrial , não há equipamentos idênticos ; isto faz com que modifique as interações internas sendo necessário assim margens de tolerâncias para estimativas de vida . Outros fatores como problemas de manutenção e operação tornam as estimativas de vida pouco confiáveis exigindo assim para se evitar falhas , grande antecipações nas revisões , onerando os custos de produção e manutenção.

Com o desenvolvimento tecnológico , principalmente no campo da eletrônica, surgiram equipamentos que possibilitaram uma inspeção sensorial para a verificação da confiabilidade das máquinas e através destes equipamentos foi possível a realização de diagnósticos precisos que resultou no aparecimento a partir da segunda metade do século, manutenção preditiva.

Hoje, somente com a cooperação dos setores de produção e manutenção , com a formação de pessoal de manutenção especializado , montagem de laboratórios de análise , maior familiarização do pessoal de produção com o equipamento é que se conseguirá melhorar o desempenho global , reduzindo custos , facilitando a diagnose das falhas do processo e máquinas , aumentando assim a segurança operacional do sistema.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo mostrar melhores parâmetros para análise de falhas em rolamentos através de análise de vibrações mecânicas,

O estudo foi baseado em dois tipos de análises:

No Domínio do Tempo:

- Determinações dos valores característicos para os principais tipos de falhas em rolamentos;
- O acompanhamento da evolução destes valores com o crescimento da falha no rolamento.

No Domínio da Frequência:

- Determinação das frequências características teóricas do rolamento;
- Determinação das frequências características padrões do rolamento;
- Relação entre as frequências características teóricas e padrões.

1.3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A manutenção preditiva por análise de vibrações vem se tornando um campo de estudos importante nos meios industriais, pois praticamente toda máquina vibra, e este tipo de manutenção fornece um retrato das condições de funcionamento e a predição de possíveis falhas que estejam para ocorrer.

Mesmo havendo uma farta bibliografia na área de manutenção no Brasil, nota-se uma escassez bastante acentuada de trabalhos utilizando análise de vibrações mecânicas.

O estudo de novas formas de manutenção por vibrações mecânicas iniciou-se em outros países nos anos 60; um dos primeiros trabalhos publicados foi de Blake (B1) em 1964, onde se mostra um novo método de manutenção por vibrações mecânicas, embora nestes anos já existisse a VDI 2056 (V2), definindo normas para avaliação de vibrações mecânicas em equipamentos.

Também nesta época os métodos analíticos de análise de vibrações eram conhecidos, como mostrado por Meirovitch (M1), por exemplo.

Com o desenvolvimento da técnica, varios outros importantes trabalhos foram surgindo nos anos 70 como Mitchell (M4), que faz um trabalho de monitoramento de máquinas de corte por análise de vibrações, e o trabalho da empresa especialista no estudo de vibrações como Brüel & Kjaer (B7), sobre as aplicaçõesde análise de vibrações.

No Brasil, apenas nos anos 80 surgem trabalhos importantes como o de Matos (M6), por exemplo, onde se discute a possibilidade de novos métodos para redução de custos na área de manutenção e os trabalhos de Nepomuceno (N1), (N2) e (N3), onde se faz uma discussão das técnicas de manutenção preditiva industrial.

Nos anos 80, o desenvolvimento da técnica foi ainda maior, podendo-se citar os trabalhos de Finley (F2), onde são mostrados os métodos de detecção de falhas em máquinas rotativas, de Braun (B2), sobre a teoria e análise de sinais vibratórios mecânicos e Bendat (B3), com o trabalho análise e procedimento de medidas mecânicas.

Também fizemos uma pesquisa detalhada sobre os mais variados tipos de rolamentos, em catálogos, livros e revistas podendo citar as referências de (S1) a (S8) do SKF Depto Técnico e FAG rolamentos (F1), bem como os principais tipos de falhas em rolamentos que são descritos em K. K. Nippon (K1).

Especificamente nos trabalhos de Dyer (D1) e Enviroments Equipaments Ltd. (E1) vemos a detecção de falhas baseado em dados estatísticos; nestes dois trabalhos é dado enfâse no valor rms e curtosis respectivamente, fazendo-se apenas um estudo destes valores e sua evolução no domínio do tempo.

No presente trabalho fazemos uma análise de falhas em rolamentos por análise de vibrações mecânicas através de valores estatísticos, pelo acompanhamento dos mesmos no domínio do tempo e uma comparação entre os mesmos.

Estes valores são: valor de pico, valor pico a pico, valor médio, valor rms, fator de forma, fator de crista, desvio padrão, e curtosis.

Nosso objetivo é ampliar os trabalhos que discutem apenas alguns tipos de valores, e assim encontrar qual o melhor parâmetro (valor) para detectar e avaliar um determinado tipo de falha.

Neste trabalho também é feito todo o equacionamento das frequências características de falhas em rolamentos, fazendo nesta etapa uma comparação destes valores teóricos com os experimentais.

1.4 RESUMO DOS CAPITULOS

O trabalho consta de 09 capítulos divididos da seguinte forma:

capítulo 1.....introdução;
capitulos 2,3,4,5,6.....parte teórica;
capítulos 7,8,9.....parte experimental;

O conteúdo de cada um se resume da seguinte forma:

CAPITULO 1

Discutimos a importância da manutenção e seus rumos para o futuro , mostrando a evolução da mesma com o passar dos anos e fazendo um posicionamento do nosso trabalho.

CAPITULO 2

Mostramos os tipos de manutenção, estabelecendo as principais diferenças entre as mesmas , havendo um destaque especial para a manutenção preditiva.

CAPITULO 3

Descrevemos a manutenção preditiva por análise de vibrações , mostrando seus princípios, instrumentação necessária , grandezas medidas e principais causas de vibrações.

CAPITULO 4

Fazemos uma introdução aos rolamentos, estabelecendo sua importância, principais tipos, características e aplicações , dando um destaque especial ao rolamento rígido de esferas , o qual é utilizado em nosso trabalho.

CAPITULO 5

Discutimos os mais diversos tipos de defeitos em rolamentos mostrando as causas de vibrações e as possíveis soluções para as mesmas.

CAPITULO 6

Mostramos a forma de avaliação dos defeitos em rolamentos, seus métodos de avaliação tanto no domínio do tempo através dos valores característicos (definição das fórmulas) como no domínio da frequencia através da frequencias características (equacionamento dos rolamentos).

CAPITULO 7

Descrevemos a parte experimental , mostrando o cálculo das forças atuantes nas bancadas e a vida útil do mesmo, bem como toda a instrumentação necessária para realização dos testes.

CAPITULO 8

Mostramos o método de coleta de dados, os resultados obtidos (valores característicos e frequências características), bem como os gráficos dos mesmos

CAPITULO 9

Fazemos comentários e discussões a respeito do trabalho e dos resultados obtidos. Também são feitas sugestões de futuros trabalhos.

CAPITULO 2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

2.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

A manutenção corretiva é também conhecida como manutenção de nível I.

Este tipo de manutenção existe desde os primórdios dos tempos até os dias de hoje.

Como exemplo atual podemos citar um simples furo do pneu de um carro , cujo defeito é corrigido após a ocorrência.

A regra básica deste tipo de manutenção é

"FUNCIONAR ATÉ QUEBRAR".

O diagrama abaixo mostra como funciona esta manutenção:

EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO
!
QUEBRA
!
PARA
!
TROCA OU CONSERTA
!
EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO

Este tipo de manutenção sempre vai existir , principalmente em indústrias de pequeno porte.

Tenta-se evitar cada vez mais este tipo de manutenção em máquinas de produção , pois uma quebra num momento inoportuno gera uma grande perda de produção.

Com o aumento da tecnologia tenta-se não utilizar a manutenção de nível I , nos processos industriais.

2.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A manutenção preventiva é também conhecida como Manutenção de Nivel II.

Este tipo de manutenção surgiu com a Revolução Industrial , ou seja , com a criação de novas máquinas com a finalidade de se produzir em massa , as quais não podem estar sujeitas a paradas imprevistas , sob pena de graves perdas de produção e das decorrentes consequências para os negócios da empresa.

Baseia-se na suposição que a vida útil dos componentes de uma máquina podem ser conhecidas mediante um registro prolongado de ocorrências de problemas na própria máquina ou máquinas similares.

Em decorrência das tolerâncias de fabricação do processo industrial , não há máquinas ou componentes idênticos. Isto modifica o efeito das interações internas, de forma que é necessário admitir margens de tolerância para estimativas de vida.

Outros fatores , como procedimentos de operação e manutenção, também podem ser variáveis , e as estimativas de vida se tornam pouco confiáveis , exigindo para evitar falhas , grande antecipação das revisões , onerando a produção e a manutenção feita estatisticamente , ou seja , os fabricantes das máquinas determinam os tempos de paradas das máquinas , nas quais são substituídas aquelas partes do equipamento que possivelmente estão com problemas.

Normalmente estes períodos de paradas são determinados pelo fator tempo , ou outros fatores derivados do tempo.

A regra básica deste tipo de manutenção é :

"PARAR ANTES DE QUEBRAR" .

O Diagrama abaixo mostra como funciona este tipo de Manutenção:

EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO
!
PARADA
!
TROCA OU REPARO
!
EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO

Este tempo de parada da máquina antes de uma quebra para troca ou reparos é variável de acordo com o equipamento.

A engenharia de manutenção , sempre questionou o esquema tempo; racionalmente a máquina só deveria parar quando absolutamente necessário, por estar próximo o perigo de uma falha e essa não ocorre somente em função do tempo.

Assim, surgiu um novo tipo de manutenção, descrita a seguir.

2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A Manutenção Preditiva também conhecida como Manutenção de Nível III.

Este tipo de manutenção foi uma evolução natural da manutenção preventiva, mas esta não elimina os níveis I e II, apenas tende a minimizá-los de maneira prática.

A regra básica deste tipo de manutenção é:

"PARAR NO MOMENTO NECESSARIO".

Principalmente no caso de máquinas de produção (centrais elétricas, refinarias, indústrias químicas, etc), em particular, os tempos de parada causam perdas importantes e uma manutenção preventiva em intervalos regulares pode não ser satisfatória, sendo necessária a manutenção preditiva em função das condições momentâneas da máquina.

A figura 2.1 faz uma comparação bem prática dos dois diferentes tipos de manutenção:

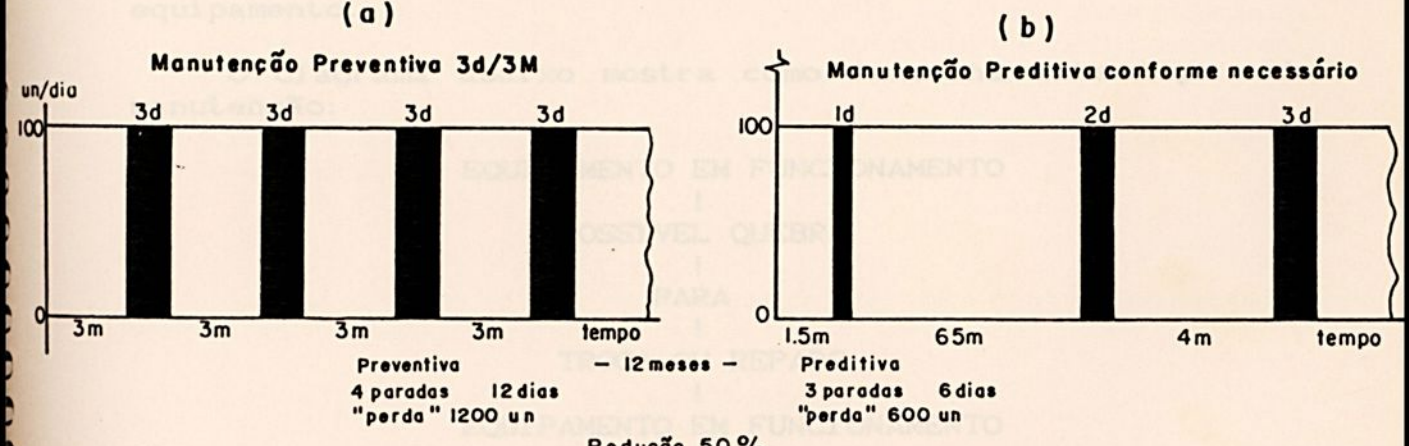


FIGURA 2.1 - MANUTENÇÃO PREVENTIVA X PREDITIVA

A figura 2.1(a) mostra uma operação contínua, interrompida a intervalos regulares por paradas preventivas de duração uniforme.

Não se considerou haver paradas acidentais. A figura 2.1(b) representa a mesma operação contínua, com períodos de funcionamento e paradas de duração variável, conforme a extensão dos serviços preventivos e corretivos indicados pela manutenção preditiva. A diferença do número de unidades produzidas mostra a inconveniência das paradas desnecessárias.

O problema vem se tornando cada vez mais importante à medida que se aumentam as exigências de produção e consequentemente o desempenho das máquinas (velocidade de rotação mais elevada, esforços dinâmicos mais acentuados, etc) e ao mesmo tempo almeja-se uma economia sempre maior de materiais de construção mecânica.

A resposta a esse problema surgiu apenas na segunda metadedo século XX. Paralelamente com o desenvolvimento da tecnologia e o processamento de dados, que permitem dignósticos precisos e confiáveis, indicando o que está falhando e quando deverá ser substituído ou reparado.

Uma máquina em funcionamento emite numerosos sinais sintomáticos de suas condições de funcionamento e operação como por exemplo: calor emitido, potência absorvida, ruídos, vibrações, etc.

Assim acompanhando os sinais sintomáticos da máquina, a evolução do mesmo indica o início de uma falha, e usando os microprocessadores, os dados são analisados e projetados podendo-se determinar quando deve ser feita a parada do equipamento.

O diagrama abaixo mostra como funciona este tipo de manutenção:

EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO
!
POSSIVEL QUEBRA
!
PARA
!
TROCA OU REPARO
!
EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO

Os princípios básicos da manutenção preditiva são mostrados no Arruda(A1) e descritos abaixo:

- Registros de variação dos parâmetros de forma periódica, análise dos mesmos e predição do momento de falha, através de equipamentos eletrônicos.

- Após estabelecido o momento de falha, fixar os tempos de parada.

Vantagens da manutenção preditiva:

- Permite consertos programados que custam menos e evitam quebra de produção.

- Proporciona diminuição de problemas porque as máquinas e equipamentos são sempre mantidos dentro de tolerâncias recomendadas.

- Diminui ou elimina os equipamentos em "stand-by", reserva e estoque de peças sobressalentes, ou ainda o ativo fixo.

- Oferece dados seguros sôbre as frequências de falhas e as partes envolvidas, dando margem para o dimensionamento mais perfeito do almoxarifado da manutenção.

- Incentiva e fornece dados para a procura de equipamentos de melhor qualidade.

- Proporciona ao setor produtivo um conhecimento periódico da situação das máquinas e equipamentos, passando também a participar da manutenção.

- Reduz de 15% a 20% o custo comparado com a manutenção preventiva.

A implementação de um programa de manutenção preditiva necessita de normalmente:

- Pessoal experiente em manutenção.

- Avaliação do binômio custo x benefício.

- Identificação das máquinas ou equipamentos-chaves cuja parada inviabiliza de imediato as operações.

- Inventário de todos os sinais mensuráveis por cada máquina ou equipamento-chave.

- Determinação dos sinais que serão acompanhados e periódicamente registrados.

- Contratação e compra de equipamentos e serviços, em função da frequência dos registros e custos.

O procedimento, tem início pelo levantamento dos padrões para cada parâmetro em cada máquina, o que pode exigir inclusive o seu recondicionamento se,não estiver em bom estado.

Somente após estas providências pode-se reduzir as paradas em função do tempo e redução de paradas acidentais.

2.3.1 TIPOS DE PREDITIVA

Mostramos neste ítem os principais tipos de manutenção preditiva existente, sendo estes:

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

A maioria das falhas decorre da evolução de trincas a partir de pontos de concentração de tensões ou de um defeito do material.

Essas trincas normalmente não são visíveis em inspeções visuais.

Para superar esta dificuldade tem sido desenvolvidas inúmeras técnicas de detecção de trincas, conhecidas como ensaios não destrutivos, que consiste em métodos para medição e detecção de propriedades, capacidade de desempenho de materiais metálicos, peças de equipamentos e estruturas por meio de energias físicas que não lesam as mesmas, sendo os mesmos descritos a seguir:

Inspeção por Líquido Penetrante

É um dos métodos mais simples que existem.

Suponhamos que a peça mostrada na figura 2.2 possua uma fissura de pequena largura que é muitas vezes impossível de ser detectada numa inspeção visual.

O método de líquidos penetrantes só permite a detecção de descontinuidades superficiais.

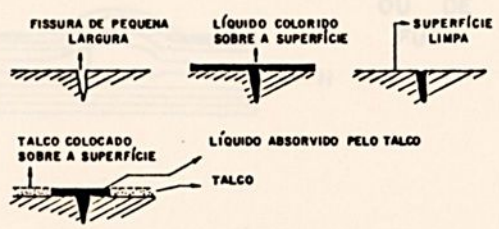


FIGURA 2.2 - INSPEÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE.

Para a detecção da fissura, a superfície da peça deve ser totalmente limpa para a aplicação do penetrante. O mesmo deve ficar sobre a peça por algum tempo. Após isso faz-se a remoção do excesso do penetrante.

Terminadas estas etapas iniciais, aplica-se o revelador, normalmente usado um talco, o qual penetra na fissura revelando a sua existência e localização. A etapa final é a inspeção e interpretação.

Como exemplo de líquidos penetrantes podemos citar : água, álcool etílico e benzeno; normalmente usados com corantes.

Ensaio Magnético

No método de inspeção dos metais ferro-magnéticos, pode ser utilizado como detetor partículas magnéticas ou pós magnéticos.

As partículas magnéticas funcionam como detetores ou reveladores de descontinuidades.

Na figura 2.3.(a) é mostrado uma barra de aço desmagnetizada, tendo nas proximidades da superfície uma descontinuidade.

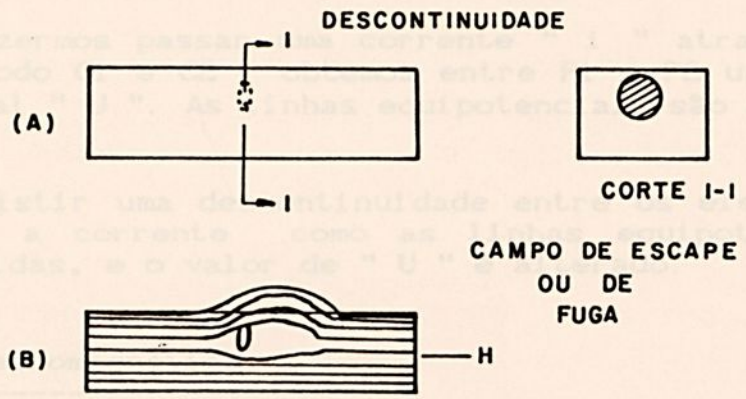


FIGURA 2.3 – ENSAIO MAGNÉTICO.

Ao se passar um forte fluxo magnético (H) pela barra, mostrado na figura 2.3.(b) observamos por meio de detetores que o " campo magnético escapa " do interior da barra, para o exterior, atraindo para esta região partículas magnéticas, permitindo constatar a presença de descontinuidades metalúrgicas nas peças metálicas.

Ensaio Elétrico

A passagem de corrente elétrica através de peças, e através das diferenças de potencial existente em certas partes da peça, podem revelar uma série de descontinuidades presentes.

Suponhamos a superfície metálica mostrada na figura 2.4. onde encostamos quatro eletrodos C1, C2, P1, P2.

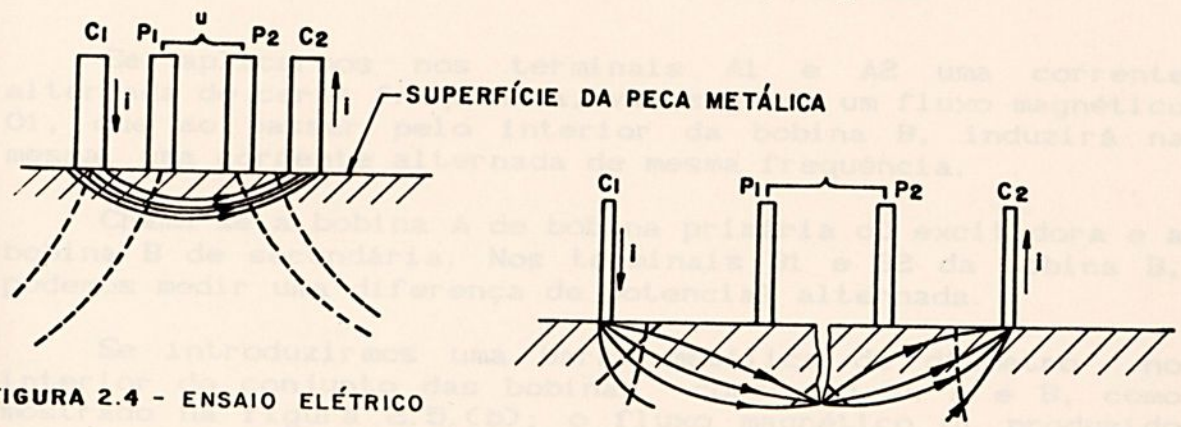


FIGURA 2.4 - ENSAIO ELÉTRICO

Se fizermos passar uma corrente " i " através da peça pelo eletrodo C1 e C2 , obtemos entre P1 e P2 uma diferença de potencial " U ". As linhas equipotenciais são mostradas na figura.

Se existir uma descontinuidade entre os eletrodos P1 e P2 tanto a corrente como as linhas equipotenciais são redistribuidas, e o valor de " U " é alterado.

Ensaio Eletromagnético

O método é bastante aplicado para determinação de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em peças metálicas.

Este baseia-se nas correntes geradas nas partes metálicas conhecidas como correntes parasitas ou correntes de "Foucault".

Para compreendermos o método eletromagnético, vamos supor duas bobinas A e B concêntricas, mostrado na figura 2.5.(a).

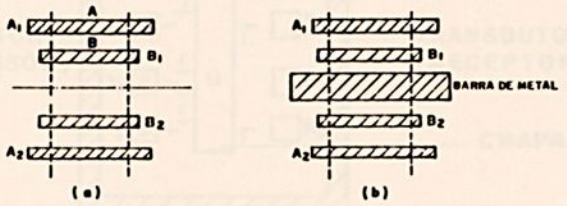


FIGURA 2.5 - ENSAIO ELETROMAGNÉTICO

Se aplicarmos nos terminais A1 e A2 uma corrente alternada de certa frequência, vamos gerar um fluxo magnético 01, que ao passar pelo interior da bobina B, induzirá na mesma, uma corrente alternada de mesma frequência.

Chama-se a bobina A de bobina primária ou excitadora e a bobina B de secundária. Nos terminais B1 e B2 da bobina B, podemos medir uma diferença de potencial alternada.

Se introduzirmos uma barra metálica de diâmetro no interior do conjunto das bobinas concêntricas A e B, como mostrado na figura 2.5.(b); o fluxo magnético 01 produzido pela bobina primária vai induzir nas barras correntes de "Foucault". Estas correntes de "Foucault", da barra produzirão um fluxo magnético 02 no sentido oposto a 01.

Tal fenômeno acarretará uma redução de corrente da bobina secundária B, e todas as barras idênticas deverão provocar a mesma redução de corrente.

Certamente esta redução é motivada por uma série de fatores como: variações geométricas, variações de condutibilidade, variações de permeabilidade e descontinuidade.

Ensaio por Ultra-Sons

Os ultra sons são utilizados como meio de ensaios não destrutivos.

As descontinuidades nos metais são interfaces de reflexão, deste modo se dirigirmos um feixe de ultra-sons para o interior dos metais haverá reflexões motivadas pelas descontinuidades existentes.

Na figura 2.6 uma chapa metálica contendo uma descontinuidade é colocada no interior de um tanque com água.

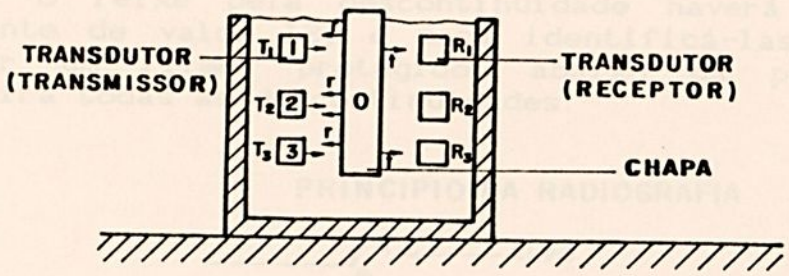


FIGURA 2.6 – ENSAIO POR ULTRA-SOM.

Essa chapa imersa no tanque recebe dos transdutores T1, T2, T3 (o mesmo em diferentes posições), um feixe de ultra-sons.

Os receptores R1, R2, R3 (o mesmo em diferentes posições), recebem ondas ultrasônicas emitidas pelos transmissores.

Quando o transdutor está colocado na posição T1, a chapa não tendo descontinuidade transmitirá a energia ao receptor R1.

Na posição T2 como há uma descontinuidade que refletirá a energia o receptor R2 não receberá energia.

Ensaios por Raios-X

Este método, usado para detectar descontinuidades e heterogeneidades é conhecido como radiografia. Trata-se de um ensaio não destrutivo que utiliza a radiação penetrante, sendo este um dos mais utilizados.

A intensidade das radiações incidentes, é modificada pela passagem através das descontinuidades e pela absorção da peça. Se a peça contém descontinuidades ou heterogeneidades haverá variação a radiação emergente.

Para compreendermos melhor, mostramos a figura 2.7 em que um feixe de raios-x de intensidade I0 ao passar pela peça sai com intensidade I1 devido a absorção normal da peça. Ao passar o feixe pela descontinuidade haverá uma absorção diferente de valor I2, e para identificá-las é necessário colocar um filme, protegido, abaixo da peça, onde se refletirá todas as descontinuidades.

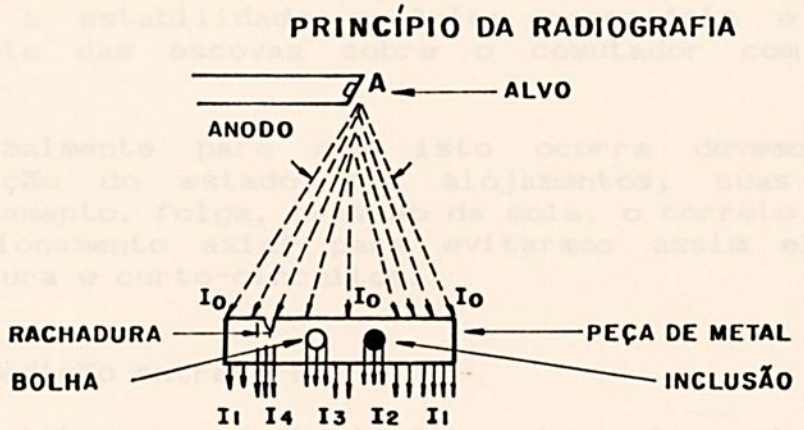


FIGURA 2.7 – ENSAIO POR RAIO-X.

MEDIDAS DE GRANDEZAS ELÊTRICAS

A análise através de medidas elétricas é muito utilizada devido ao grande número de equipamentos elétricos existentes na indústria.

Cada componente elétrico produz um sinal característico, que através de aparelhos podem ser detectados, qualificados, registrados e analisados de modo a programar sua reforma.

Uma manutenção simples e prática em equipamentos elétricos é a medição de corrente e tensão, pois um dos principais problemas das máquinas é a variação de tensões.

Para análise de máquinas elétricas (transformadores, geradores, motores, etc) podemos realizar ensaios estáticos e dinâmicos.

Os principais tipos são :

Ensaios Estáticos

- Exame no porta escovas

Componente de vital importância, pois devem conferir as escovas a estabilidade mecânica necessária e o contato deslizante das escovas sobre o comutador com a pressão adequada.

Normalmente para que isto ocorra devemos fazer a verificação do estado dos alojamentos, suas dimensões, posicionamento, folga, pressão da mola, o correto alinhamento e posicionamento axial para evitarmos assim elevações de temperatura e curto-circuitos.

- Medição entreferro

Consiste na medição da folga dos polos principais, que deve ser feita para a montagem correta dos polos, um possível deslocamento do mancal ou do rotor em relação ao estator pode levar ao surgimento de um faiscamento ou um desequilíbrio de tensões.

- Medição da resistência ohmica da armadura

Levantamento dos valores das resistências ohmicas entre as lâminas adjacentes para verificar o equilíbrio das resistências entre as bobinas da armadura, importante para reduziro faiscamento e queima localizada de lâminas.

- Medição e análise da isolação dos enrolamentos

A isolação é sujeita a variações que dependem das condições de operação, como umidade e impurezas que são indicadores do empobrecimento dos materiais isolantes. A análise dos valores de testes de resistência de isolação proporciona informações para o acompanhamento de problemas futuros.

Ensaios Dinâmicos

Devem ser feitos no comutador e o seu exame consiste nas seguintes verificações:

- Nível de comutação ou aspecto de comutação

É feito com o objetivo de avaliar problemas, tais como desbalanceamento magnético e influência da fonte de alimentação; esta avaliação é feita através de testes de tensão aplicada no equipamento em vazio e em carga normal sendo estes observados através das curvas traçadas dos testes.

- Nível de faiscamento

Consiste na observação do nível de faiscamento, levando em consideração seu volume e sua coloração, de acordo com as suas características podem indicar problemas como: danos nas escovas, danos no comutador, sobrecargas, etc..

MEDIDAS DE TEMPERATURA

O acompanhamento da temperatura de um componente é adotado por um dos seguintes aspectos:

- Detectar um acréscimo de geração de calor causado por algum defeito;

- Detectar uma alteração de calor transmitido ao meio pelo equipamento;

Isto pode ser feito por um controle manual de temperatura.

Locais de Aplicação de medição de Temperatura

Este acompanhamento pode ser efetuado de uma forma global, a exemplo da temperatura da água de uma caldeira medido na superfície de um componente.

As medições superficiais fornecem indicações sobre a geração de calor em um equipamento e sua transição até a superfície ou seu fluxo em direção a permutadores de calor.

As medições de temperatura superficiais são bem mais difíceis que as de temperatura de imersão, em razão da descontinuidade aguda do perfil de temperatura medidas pela instalação de um sensor.

Dispositivos de indicação de temperatura

- Sensores de contato

Estes dispositivos de uso assumem a temperatura do corpo com o qual estão em contato e transmitem o valor correspondente.

- Sensores de expansão líquida

Estes são os dispositivos geralmente mais empregados.

São os termômetros de vidro com mercúrio ou álcool, precisos e frágeis.

- Sensores de termopar

Estes são menores e mais versáteis. Quando dois fios de metais diferentes se unem, gera-se um potencial termoelétrico na junção proporcional a temperatura.

- Sensores de resistência

Estes se utilizam da variação da resistência de um elemento com a temperatura. Este elemento pode ser um fio ou uma película sobre a superfície.

- Tintas, lápis e papéis indicadores de temperatura

Consiste no emprego de tintas, lápis e papéis que mudam de cor em determinadas temperaturas.

- Sensores de contato

A energia radiante de um corpo varia com sua temperatura absoluta e a emissividade da superfície, isto permite a avaliação.

ANÁLISE DE LUBRIFICANTES

As condições de lubrificação de um equipamento é um dos fatores mais importantes que o setor de manutenção deve observar.

Isto se deve ao fato que a preservação de um equipamento depende, e muito, da lubrificação, pois os fatores mais destrutivos são decorrentes da falta da mesma, como: o atrito, a abrasão e a corrosão.

A contaminação de lubrificantes e a lubrificação incorreta tornam imprevisíveis a expectativa de vida dos equipamentos.

A técnica mais utilizada para análise de lubrificantes é a ferrografia.

Ferrografia

Consiste na contagem e na observação visual das partículas existentes em uma amostra de lubrificante.

Baseia-se nos princípios de que:

A maior parte dos sistemas mecânicos se desgasta antes de falhar, o desgaste gera partículas, a natureza e quantidade depende da severidade do desgaste. Sendo assim, analisar as partículas é o mesmo que análisar as superfícies de desgaste.

Existem dois tipos de ferrografia:

- quantitativa: fornece indicação da severidade do desgaste;

- qualitativa: conhecimento das causas.

Ferrografia quantitativa

Para se fazer a análise das condições do lubrificante é necessário um método de coletar, analisar e contar as partículas suspensas no lubrificante.

Fazendo-se fluir o óleo através de um fluido capilar ou de uma lâmina de vidro, cercada por um forte campo magnético, as partículas ferrosas de maior tamanho precipitam primeiro na entrada do substrato, aglomerando-se em um local bem definido, onde são encontradas as partículas maiores de desgaste mais severo.

Alguns milímetros adiante precipitam-se partículas resultantes do desgaste normal, elas se depositam em qualquer lugar devido ao fraco magnetismo.

Após a lavagem do depósito, através de um solvente para eliminação do óleo, as partículas estão prontas para a contagem ou observação visual. Normalmente são usadas fontes de luz para a contagem das mesmas.

Ferrografia qualitativa

Requer a utilização de microscópios de pesquisa, além de outros equipamentos para observação da amostra. A natureza das partículas fornece uma indicação precisa das causas do desgaste.

A amostra levada ao microscópio em lâminas de vidro, é análoga a um espectro que segundo as suas características tem relação com as causas.

A análise da forma, tamanho, cor das partículas, permite detectar as causas como: sobrecarga, fadiga, corrosão, abrasão, etc..

A ferrografia é indicada para qualquer equipamento que utilize óleo ou graxa.

NÍVEL DE EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica trata-se de um ensaio que além da detecção e localização da falha permite avaliar a atividade manifestada pela descontinuidade das condições de operação.

É o fenômeno que ocorre quando uma descontinuidade é submetida à uma solicitação mecânica ou térmica. Uma área que possua defeitos é uma área de concentração de tensões que, uma vez estimulada, origina uma redistribuição de tensões localizadas.

O método consiste em captar esta onda de tensão, através de transdutores piezoelétricos distribuidos sobre a estrutura. Estes transdutores, estimulados pelas ondas, transformam a energia mecânica em elétrica e após isto os sinais são digitalizados e analisados, como pode ser visto na figura 2.8.

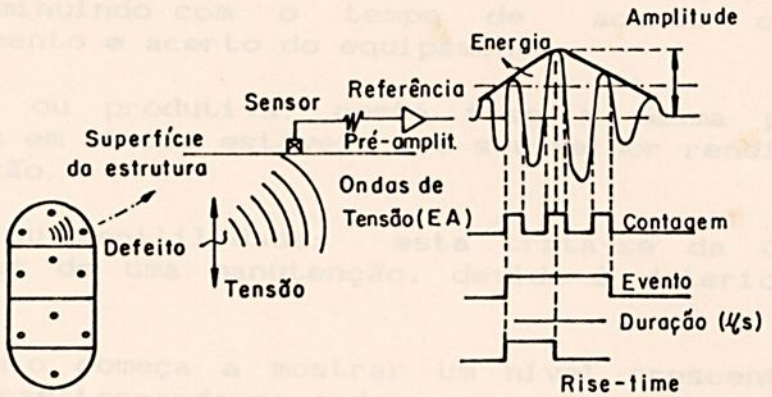


FIGURA 2.8 – PRINCIPIOS DA EMISSÃO ACÚSTICA.

As principais vantagens do método são:

- A realização sem retirar o equipamento de operação.

- A instrumentação baseada em microprocessadores emprega softwares com a finalidade de localizar a área portadora de descontinuidades.

Sua principal desvantagem que podemos citar é:

- Não fornecem uma caracterização da descontinuidade; para isto é necessário uma análise posterior.

MEDIDA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

A medida de vibrações é uma das formas mais importantes, no entanto menos utilizadas pela engenharia para verificação do estado do equipamento.

Isto se deve ao fato que toda máquina vibra, sendo assim as vibrações mecânicas são uma fonte de informações de importância fundamental para a verificação do estado e condições de funcionamento do equipamento.

As vibrações mecânicas na vida de um equipamento pode ser dividida em três fases:

- infância ou amaciamento: nesta fase as vibrações são altas devido a um ajuste do equipamento e vão diminuindo com o tempo de acordo com o funcionamento e acerto do equipamento.

- adulta ou produtiva: nesta fase a mesma possui vibrações em níveis estáveis e o seu melhor rendimento na produção.

- velhice ou senililidade: esta trata-se da última fase antes de uma manutenção, devido à deterioração mecânica.

O equipamento começa a mostrar um nível crescente de vibrações mecânicas tornando-se cada vez menos produtivo como visto na figura 2.9.

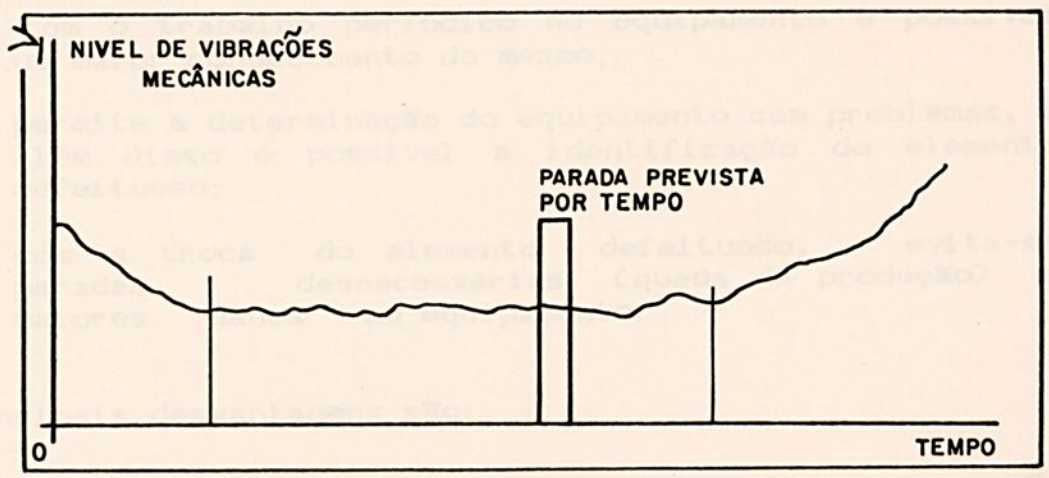


FIGURA 2.9 - VIDA DE MÁQUINA: CURVA DE BANHEIRA.

Os parâmetros de vibração usados para a medição do nível de vibrações são a aceleração, velocidade e deslocamento, dependendo do tipo de análise que é feita.

A análise dos equipamentos é feita do seguinte modo:

- estabelece-se os equipamentos a serem monitorados por análise de vibrações;

- fixa-se os pontos no equipamento a serem monitorados, e se possível os limites de vibrações dos mesmos;

- faz-se registros periódicos dos níveis de vibrações nos equipamentos;

- acompanha-se as variações destes níveis e fazer uma análise dos mesmos;

- faz-se a predição da falha, para a parada e troca do elemento defeituoso.

Para a medição das condições dos equipamentos a manutenção tem a seu lado um forte aliado, a eletrônica.

Desta forma pode ser feito todo um planejamento da parada do equipamento de acordo com a necessidade de produção.

As principais vantagens deste método são:

- praticamente toda máquina vibra, por isso toda máquina permite uma análise de vibrações;

- com o trabalho periódico no equipamento é possível um maior conhecimento do mesmo;

- permite a determinação do equipamento com problemas, e além disso é possível a identificação do elemento defeituoso;

- com a troca do elemento defeituoso, evita-se paradas desnecessárias (queda da produção) e maiores danos ao equipamento.

As principais desvantagens são:

- necessidade de pessoal que conheça o equipamento a ser monitorado;

- pessoal com conhecimentos na área de vibrações mecânicas;

- compra de equipamentos de medição e consequentemente a análise do binômio custo / benefício;

- de acordo com número de equipamentos a serem monitorados, tem-se a necessidade da montagem de um laboratório;

- estabelecimento de valores limites de vibração de cada equipamento.

CAPITULO 3 MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANALISE DE VIBRAÇÕES

3.1 INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva por análise de vibrações se desenvolveu com o crescimento da complexidade e a sofisticação dos equipamentos.

Os equipamentos, hoje, já possuem no próprio projeto técnicas de redução e isolação de vibrações, desta forma é necessária uma medição e análise exata das medidas de vibrações.

Por este motivo, uma nova tecnologia de medição foi criada, permitindo as medições, através do desenvolvimento de novos aparelhos eletrônicos.

Para uma maior compreensão deste tipo de manutenção vejamos a figura 3.1..

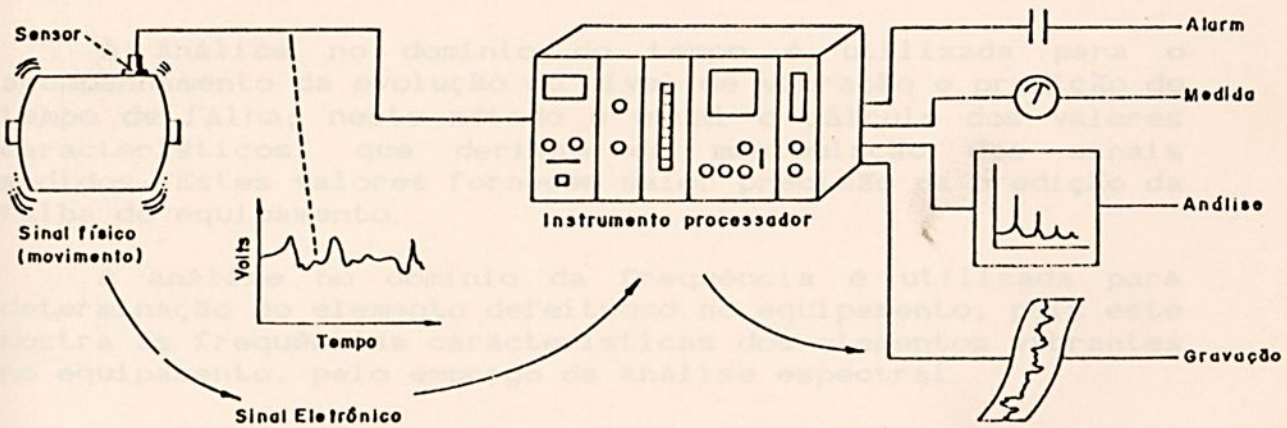


FIGURA 3.1 – MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÕES.

O movimento mecânico instantâneo (vibração) é coletado através de um sensor, que converte um sinal mecânico em um sinal elétrico: este passa por um instrumento processador, no qual o mesmo pode ser filtrado, amplificado para posteriormente ser analisado ou manipulado de qualquer outra forma, podendo assim de acordo com os valores obtidos ser feita uma predição da parada do equipamento e troca do elemento defeituoso.

O sensor de coleta de dados mais utilizado é o acelerômetro piezoelétrico (faz diretamente a medida de aceleração), mas também podem ser utilizados sensores de deslocamento e velocidade.

A medida pode ser feita com qualquer um dos sensores, e através de um integrador ou derivador obtem-se os outros.

Normalmente faz-se uma amplificação, e filtragem do sinal para se evitar interférencias externas.

A análise do sinal pode ser feita diretamente no campo ou em laboratório (o sinal é gravado e analisado posteriormente) de acordo com as necessidades.

Os sinais coletados podem ser analisados no domínio do tempo (os sinais coletados pelo sensor estão no domínio do tempo), ou no domínio da frequência, onde é necessário fazer uma transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência através da transformada de FOURIER.

A saída dos sinais pode ser feita através de um registrador gráfico ou uma impressora.

A análise no domínio do tempo é utilizada para o acompanhamento da evolução do nível de vibração e predição do tempo de falha; neste método é usual o cálculo dos valores característicos, que derivam da manipulação dos sinais medidos. Estes valores fornecem maior precisão na predição da falha do equipamento.

A análise no domínio da frequência é utilizada para determinação do elemento defeituoso no equipamento, pois este mostra as frequências características dos elementos vibrantes no equipamento, pelo emprego da análise espectral.

Cada equipamento deve ser analisado separadamente pois cada um trabalha sob condições diferentes e sofrem desgastes diferentes.

3.2 PARAMETROS DE VIBRAÇÃO

Basicamente, são três estes parâmetros de vibrações: deslocamento, velocidade e aceleração.

Para definir estes três parâmetros exemplificamos um movimento harmonico (movimento periódico) mostrada na figura 3.2 que represente o deslocamento de qualquer máquina ou estrutura.

Este movimento harmonico é muitas vezes representado como a projeção numa linha reta, de um ponto que se move numa circunferência a velocidade constante. Designada por ω a velocidade angular da linha op, A a amplitude de oscilação e T o período de oscilação (tempo em que a função se repete), o deslocamento x é expresso pela equação:

$$x = A \operatorname{sen} \omega t \qquad \text{(deslocamento)} \qquad (3.1)$$

A quantidade ω é geralmente medida em radianos por segundo e denominada de frequência angular.

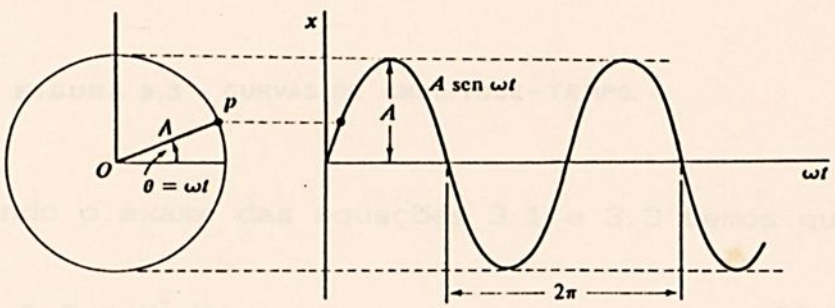


FIGURA 3.2 - ONDA HARMÔNICA.

Uma vez que o movimento se repete a cada 2π radianos, temos a relação:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

onde o período T é expresso em segundos e frequência f em ciclos por segundos.

A velocidade e a aceleração do movimento harmonico podem ser determinadas simplesmente pela diferenciação da equação 3.1., onde obtemos:

$$v = \omega A \cos \omega t = \omega A \operatorname{sen} (\omega t + \pi/2) \qquad (3.2)$$

$$a = - \omega^2 A \operatorname{sen} \omega t = \omega^2 A \operatorname{sen} (\omega t + \pi) \qquad (3.3)$$

Assim, a velocidade e a aceleração são também harmonicas, com a mesma freqüência de oscilação, mas à frente do deslocamento por $\pi/2$ e π radianos, respectivamente, como mostrado na figura 3.3..

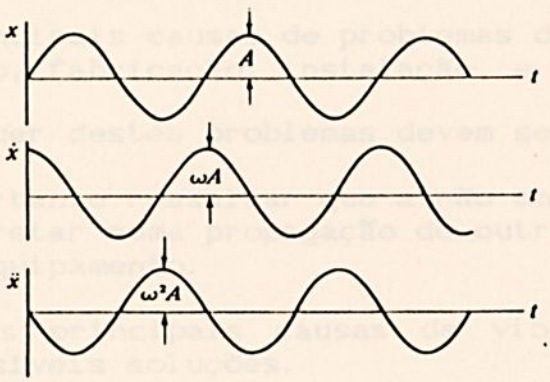


FIGURA 3.3 - CURVAS DE AMPLITUDE-TEMPO.

Fazendo o exame das equações 3.1 e 3.3 temos que:

$$a = - \omega^2 x \qquad (3.5)$$

de modo que no movimento harmonico a aceleração é proporcional ao deslocamento e dirigida para origem.

3.3 PRINCIPAIS CAUSAS DE VIBRAÇÕES

INTRODUÇÃO

As correções dos problemas de vibrações através de manutenção preditiva (monitoramento) requer conhecimentos de vibrações, características do equipamento, dos instrumentos eletronicos de medição, conhecimentos das fontes de excitação e das frequências naturais do equipamento.

Medidas cuidadosas e dados para a análise das vibrações dos equipamentos devem ser coletadas e os sintomas observados para o diagnóstico da falha.

As principais causas de problemas de vibrações mecânicas são: projeto, fabricação, instalação, e operação.

Quaisquer destes problemas devem ser corrigidos.

É importante ressaltar que a não correção destas falhas, poderá acarretar numa propagação de outros defeitos, a outras partes do equipamento.

Para as principais causas de vibrações são mostradas algumas possíveis soluções.

VIBRAÇÕES CAUSADAS POR FALHAS DE PROJETO

Rigidez desigual no mancal: horizontal x vertical difícil de se balancear, pode excitar ressonancia. Para a solução do problema devemos aumentar a rigidez ou a massa do suporte do mancal.

Processos que induzem vibrações: são os processos que envolvem para o seu acionamento, elementos como pás, forças alternativas, dentes de engrenagens. Para a correção do problema devem ser analisados os efeitos causadores devido a problemas de eficiência.

Vibração em fluidos: causados por erros de projeto como cálculos de diâmetro de tubulação, restrições abruptas e velocidades limites. Para a solução do problema devemos observar as normas de hidráulica.

Golpes e cavitação: causados por erro de projeto, como o cálculo do NPSH. Para a solução do problema os mesmos devem ser previstos em projeto, após a instalação da tubulação e o aparecimento do problema deve-se eliminar a entrada de ar e alterar a tubulação de sucção.

VIBRAÇÕES CAUSADAS POR FALHAS DE FABRICAÇÃO, INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO

Desalinhamento: causado por deformação excessiva da fundação, montagem inadequada e forças de encanamento. Para a correção do problema devemos alinhar a quente ou a frio e eliminar erros de montagem.

Distorção da fundação: causado por problema de má qualidade do material sob a fundação, "stress térmico" ou contração desigual. Para a correção do problema podemos fazer uma ancoragem da fundação através de braços de ferro, melhorar o controle de qualidade do material utilizado e correção de massas através de enchimento da fundação.

Forças de encanamento: causados por problemas no suporte do encanamento das tubulações, problemas em juntas de expansão e linhas de encanamento deficientes. Para a correção dos problemas devemos verificar os suportes dos tubos, conectores e isoladores, bem como, procurar caminho mais viável da tubulação.

Excentricidade do mancal e do suporte: causados pela excessiva exposição ao calor. Para a solução do problema devemos verificar os contatos dos invólucros, mancais e protegê-los contra expansão térmica e em último caso instalar uma couraça térmica.

Desbalanceamento: causado em máquinas com excesso de velocidade que causam problemas de fixação e deflexões responsáveis pelo desbalanceamento. Para a solução do problema devemos fazer o balanceamento em um, dois ou três planos e verificar a velocidade de operação.

Problemas no acoplamento: causado por um travamento do acoplamento ou um defeito de fabricação do mesmo. Para a solução do problema devemos, rever a lubrificação, erros de montagem e uma possível sobrecarga devido a um desalinhamento.

Vibrações eletricamente excitadas: causadas pelas frequências vindas dos rotores e campos geradores. Para a verificação do problema, é necessário desligar a fonte, deve-se verificar se não existe nenhum componente ressonante com esta frequência.

Arqueamento do rotor: causado por corrosão, fadiga, ressonância e operações fora das especificações de projeto. Para a solução do problema, devemos desempenar o rotor ou substituí-lo, e em casos mais simples, providenciar o balanceamento do mesmo.

Folgas: causados pelo uso dos equipamentos,observar se a folga utilizada está correta, se há algum erro de projeto, pode causar erros de desalinhamento ou desbalanceamento. Para a solução do problema, devemos fazer a manutenção necessária no equipamento.

Problemas operacionais: causados pelos desgastes de componentes mecânicos como engrenagens, mancais, selos e eixos. Para a solução destes problemas, devemos fazer constantes revisões nestes componentes pois os mesmos podem gerar sérios problemas, e até perda do equipamento.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos aparelhos eletrônicos se confunde com o próprio desenvolvimento da manutenção preditiva.

As análises dos equipamentos podem ser feitas diretamente no campo ou em laboratório dependendo do número de equipamentos monitorados, da importância do equipamento e da viabilidade econômica.

Os equipamentos de medição são de custo considerável, mas deve ser vista a relação custo x benefício que cada um propicia.

Existem equipamentos de medição dos mais variados tipos e níveis de complexidade, desde equipamentos manuais de campo para medições simples como equipamentos complexos de campo que já fazem uma melhor análise das condições do equipamento.

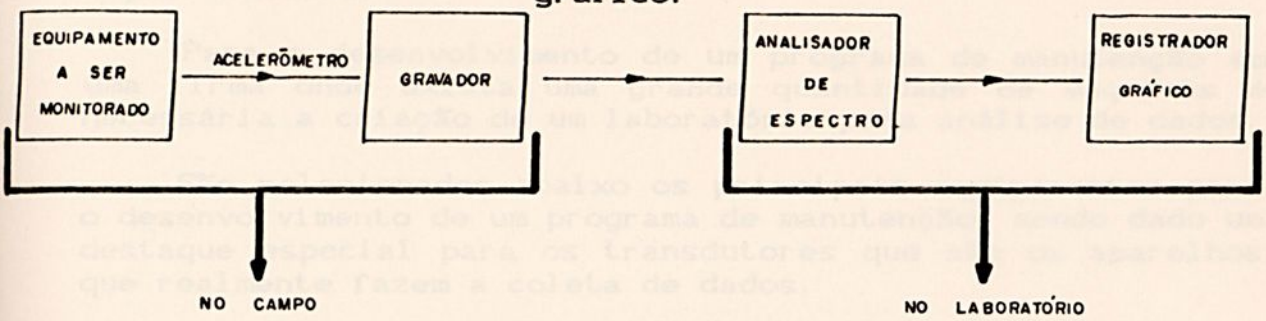
As medições podem ser classificadas de acordo com os tipos de equipamentos utilizados.

TIPO 1: feita diretamente no campo: acelerômetro + medidor portátil de nível global de vibrações.



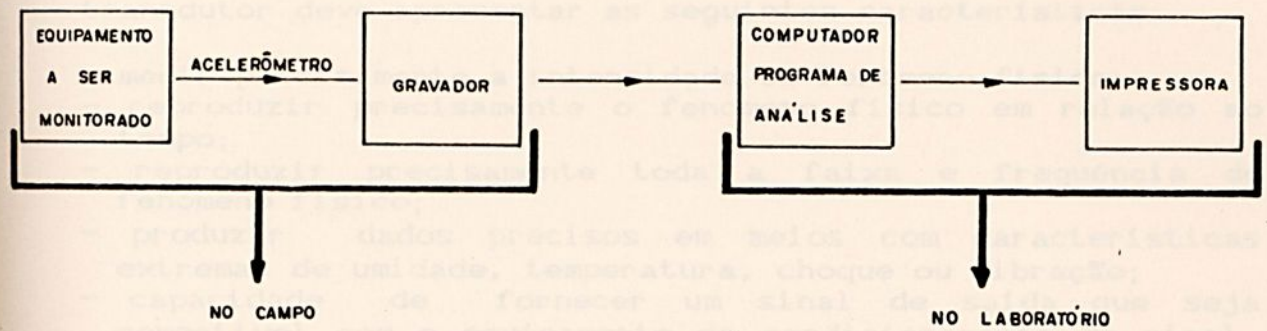
FLUXOGRAMA 1 : MEDIÇÃO TIPO 1

TIPO 2: no campo - acelerômetro + gravador
no laboratório - analisador de espectro + registrador gráfico.



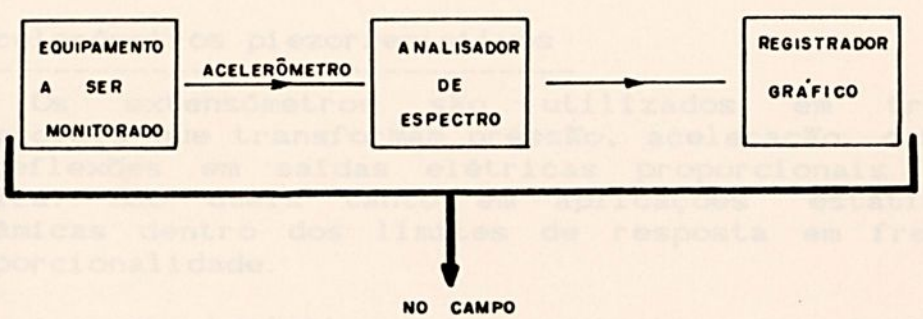
FLUXOGRAMA 2 : MEDIÇÃO TIPO 2

TIPO 3: no campo - acelerômetro + gravador
no laboratório - computador (faz diretamente a análise de espectro) + impressora.



FLUXOGRAMA 3 : MEDIÇÃO TIPO 3

TIPO 4: no campo - acelerômetro + analisador de espectro + registrador gráfico.



FLUXOGRAMA 4 : MEDIÇÃO TIPO 4

Podem ser usados de acordo com a necessidade: filtros e amplificadores.

Para o desenvolvimento de um programa de manutenção em uma firma onde exista uma grande quantidade de máquinas é necessária a criação de um laboratório para análise de dados.

São relacionados abaixo os principais equipamentos para o desenvolvimento de um programa de manutenção, sendo dado um destaque especial para os transdutores que são os aparelhos que realmente fazem a coleta de dados.

TRANSDUTORES

É definido como um dispositivo que converte energia de uma forma em outra. Em termos de instrumentação, um transdutor deve apresentar as seguintes características:

- medir precisamente a intensidade do fenomeno físico;
- reproduzir precisamente o fenomeno físico em relação ao tempo;
- reproduzir precisamente toda a faixa e frequência do fenomeno físico;
- produzir dados precisos em meios com características extremas de umidade, temperatura, choque ou vibração;
- capacidade de fornecer um sinal de saída que seja compatível com o equipamento de condicionamento do sinal, sem modificações das características do mesmo e
- deve ter uma constituição robusta e de fácil operação.

Os principais tipos de transdutores, de interesse para a análise de vibrações, são os piezorresistivos e os piezoelétricos sendo que o mais importante para o nosso tipo de manutenção é o último citado.

- Acelerômetros piezorresistivos

Os extensômetros são utilizados em transdutores comerciais que transformam pressão, aceleração, carga, força e deflexões em saídas elétricas proporcionais à entrada física. São úteis tanto em aplicações estáticas como dinâmicas dentro dos limites de resposta em frequência e proporcionalidade.

A característica de resposta em frequência é relativamente baixa por causa das limitações mecânicas dos mecanismos empregados.

Há limitações de temperatura impostas pelos materiais que unem os extensometros aos mecanismos empregados.

Os transdutores piezorresistivos são úteis em medições estáticas.

- Acelerômetros piezoelétricos

Certos materiais em estado sólido que respondem eletricamente a uma força mecânica são utilizados como dispositivos transdutores de choque, vibração e pressão.

Os materiais piezoelétricos geram uma força eletromotriz quando sujeito a um movimento mecânico, e não geram em condições estáticas. Sendo assim estes são úteis em medições dinâmicas.

Os materiais piezoelétricos tem um alcance elástico linear em que produzem uma força eletromotriz (fem) proporcional ao esforço dinâmico que recebem.

A ação piezoelétrica descrita em termos elétricos da carga "q" , capacitância "c" e da tensão "l" de circuito aberto "e" mostrado na figura 3.4..

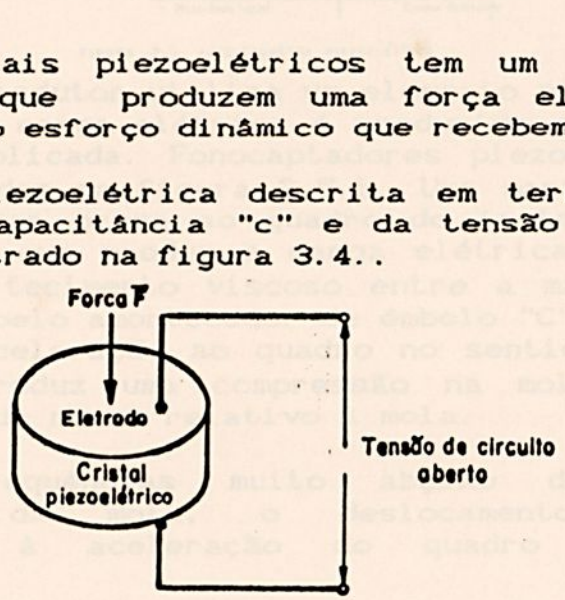


FIGURA 3.4 - AÇÃO PIEZOELÉTRICA.

Quando uma força mecânica "F" é exercida sobre o cristal piezoelétrico, é gerada uma carga "q" . Através da incorporação de uma massa "m" em contato direto com o cristal, tem-se os componentes essenciais de um transdutor de aceleração. Aplicando-se uma aceleração variável ao conjunto massa cristal, o cristal experimenta uma força variável (F=ma) que gera uma carga variável "q" no cristal:

$$q = d \times F = d \times M \times a \qquad (3.6)$$

onde "d" é uma constante piezoelétrica e a carga elétrica "q" é diretamente proporcional à aceleração experimentada pelo transdutor. Devido a uma capacitância "c" do cristal, desenvolveu-se uma tensão "e" entre os eletrodos.

$$e = \frac{q}{c} = \frac{d \times F}{c} \qquad (3.7)$$

Um acelerômetro piezoelétrico sísmico linear típico é mostrado na figura 3.5.

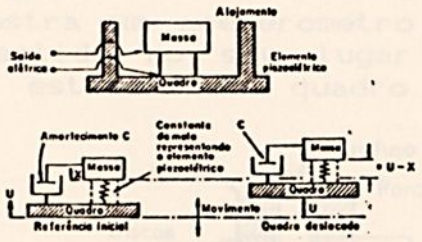


FIGURA 3.5 - ACELEROMETRO PIEZOELÉTRICO.

Este transdutor utiliza um elemento piezoelétrico de tal forma que uma carga elétrica é produzida proporcionalmente à uma tensão aplicada. Fonocaptadores piezoelétricos sísmicos ideais mostrados na figura 3.5.b. Uma massa é apoiada sobre uma mola linear presa ao quadro do instrumento. O cristal piezoelétrico que produz a carga elétrica se comporta como mola. Um amortecimento viscoso entre a massa e o quadro é representado pelo amortecedor de émbolo "C" . Na figura 3.5.c é dada uma aceleração ao quadro no sentido do deslocamento "U" , que produz uma compressão na mola igual a "S" , deslocamento de massa relativo à mola.

Para frequências muito abaixo da frequência de ressonancia da mola, o deslocamento é diretamente proporcional à aceleração do quadro e independe da frequência.

Formas de Construção de um Acelerômetro

Um acelerômetro de compressão, na sua forma mais simples, consiste em um disco de material piezoelétrico e uma massa colocada sobre um quadro, como se vê na figura 3.6.

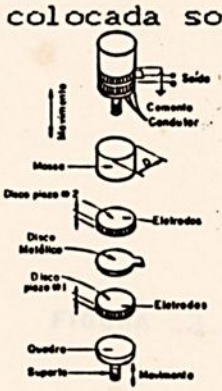


FIGURA 3.6 - ACELEROMETRO DE COMPRESSÃO.

Um movimento na posição indicada provoca forças compressivas que agem no elemento piezoelétrico, produzindo uma saída elétrica proporcional à aceleração. Nesta unidade, a massa está cementada ao elemento piezoelétrico com um material condutor, e este por sua vez está cementado ao quadro. Os componentes devem ser cementados firmemente para que não sejam separados pela aceleração aplicada.

A figura 3.7 mostra um acelerometro de compressão no qual a massa é mantida no seu lugar por um parafuso prisioneiro que se estende do quadro até o material piezoelétrico.

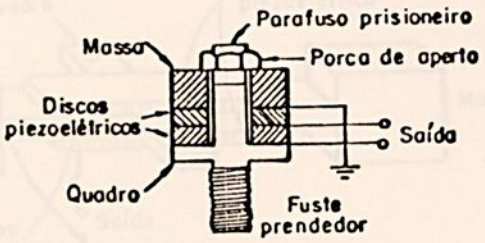


FIGURA 3.7 - ACELEROMETRO DE COMPRESSÃO.

A figura 3.8. mostra um sistema piezoelétrico sísmico típico operando sob o princípio de flexão. A construção vista consiste em um quadro no qual uma massa é ligada a um balanço. A intensidade da deflexão depende da rigidez da massa e do balanço. Em frequências bem abaixo da frequência de ressonância, a deformação de flexão é proporcional à aceleração aplicada ao quadro. Uma tira de eletrodos piezoelétricos com eletrodos na parte superior e inferior é ligada ao balanço. A curvatura para cima causa uma compressão no comprimento da cerâmica e uma curvatura para baixo provoca tração. A deformação resultante na tira piezoelétrica gera uma tensão na saída elétrica proporcional à aceleração aplicada.

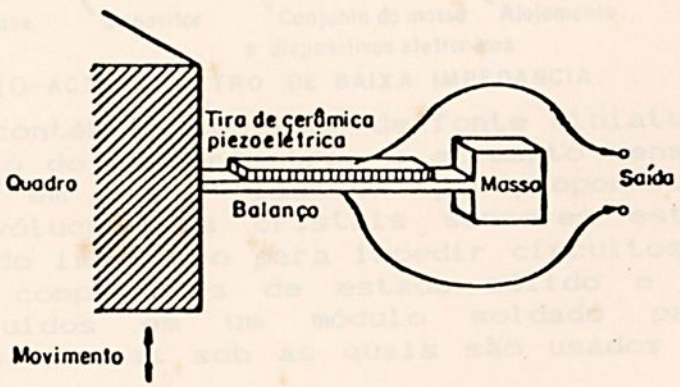


FIGURA 3.8 - SISTEMA PIEZOELÉTRICO SISMICO (TIPO FLEXÃO).

A figura 3.9. mostra um acelerômetro do tipo fletor com duas saídas. Este acelerometro está apoiado em seu centro e possui uma massa ligada em cada uma das extremidades da tira metálica. Uma tira piezoelétrica é ligada em cada lado da tira metálica entre as massas. O apoio metálico para o elemento é ligado à saída. As duas tiras piezoelétricas externas são recobertas de prata e reunidas no alto da saída. As duas tiras de cerâmica são reunidas de modo a gerarem cargas elétricas de mesma polaridade quando uma está em compressão e outra está tracionada, de modo que as cargas geradas se somam. Quando a aceleração é aplicada ao quadro, são produzidos simultaneamente esforços de compressão em uma das cerâmicas e de tração na outra.

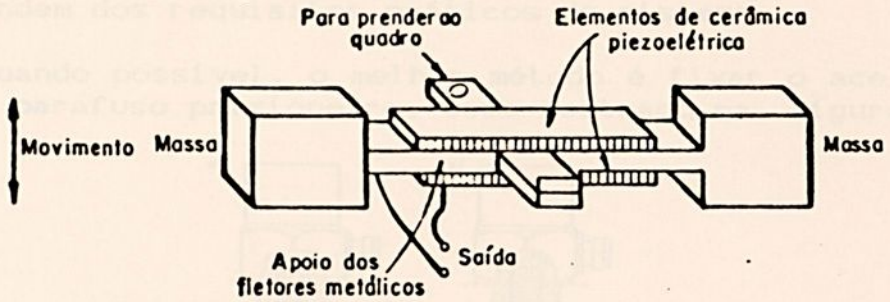


FIGURA 3.9 -ACELEROMETRO TIPO FLETOR COM DUAS SAÍDAS.

Uma outra característica deste tipo de acelerômetro é que as saídas podem ser ligadas em série em vez de paralelo. Isto dobra a sensibilidade e reduz a capacitância de um fator igual a 4.

Na figura 3.10 mostra-se um acelerômetro de baixa impedância

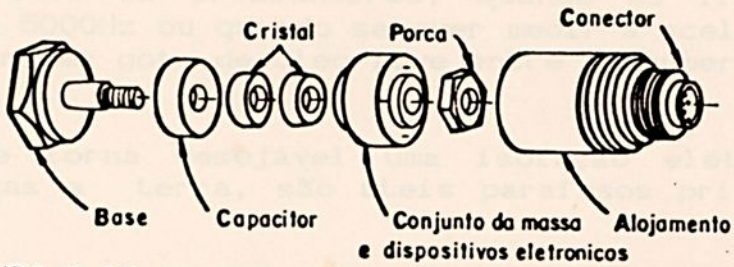


FIGURA 3.10-ACELEROMETRO DE BAIXA IMPEDANCIA.

Este acelerômetro contém um seguidor de fonte miniatura no interior do invólucro do acelerômetro; o elemento sensor utiliza uma construção em haste elástica que proporciona isolação máxima ao invólucro. Os cristais sensores estão eletricamente isolados do invólucro para impedir circuitos à terra. São utilizados componentes de estado sólido e os circuitos são constituídos em um módulo soldado para suportarem as condições severas sob as quais são usados os acelerometros.

Deve-se notar que cada material piezoelétrico tem uma temperatura característica chamada " Ponto Curie " . Quando um elemento piezoelétrico é aquecido acima deste ponto está pomanentemente danificado e perde completamente sua ação piezoelétrica.

TÊCNICAS DE MONTAGEM DE ACELERÔMETROS

Para que um acelerômetro gere dados exatos e úteis, o mesmo deve ser acoplado adequadamente aos corpos de prova. O método de ligação não deve introduzir distorções. Isto exige que a estrutura do acelerometro seja robusta em todas as faixas de frequêcias de interesse. Na prática, muitos métodos de fixação são adequados a uma grande variedade de aplicações e dependem dos requisitos práticos do sistema.

Quando possível, o melhor método é fixar o acelerômetro com um parafuso prisioneiro, como mostrado na figura 3.11..

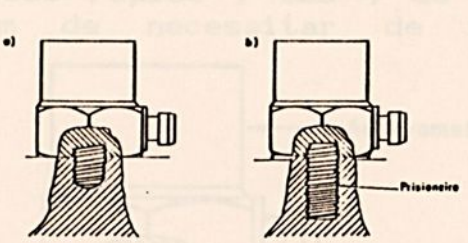


FIGURA 3.11- FIXAÇÃO DE ACELEROMETRO POR PRISIONEIRO.

De modo que toda a base do acelerômetro faça bom contato. Deve-se tomar cuidado para garantir que uma de suas superfícies faça contato com uma superfície horizontal lisa. Normalmente um torque de 15 a 22 cm.kgf é adequado. Uma boa técnica com todos os prisioneiros, quando as frequéncias estão acima de 5000Hz ou quando se quer medir a aceleração de choques, é usar uma gota de óleo leve entre as superfícies de contato.

Quando se torna desejável uma isolação elétrica que impeça descargas a terra, são úteis parafusos prisioneiros isolados.

O torque utilizado para montar um acelerometro é importante e deve ser controlado. Um torque excessivo pode estragar as roscas ou quebrar os prisioneiros. Deve-se usar o mesmo tipo de fixação e o mesmo torque em cada aplicação para se obter dados reproduzíveis e precisos.

Nas superfícies que não podem ser perfuradas para acomodar os prisioneiros roscados, são usados outros métodos; entre os principais temos :

Fixação por cimento (adesivo) mostrado na figura 3.12. que fornece boas características de medida de vibração, mas apresenta as desvantagens como: tempo de secagem, dificuldade de retirar o acelerometro e o limite de temperatura.

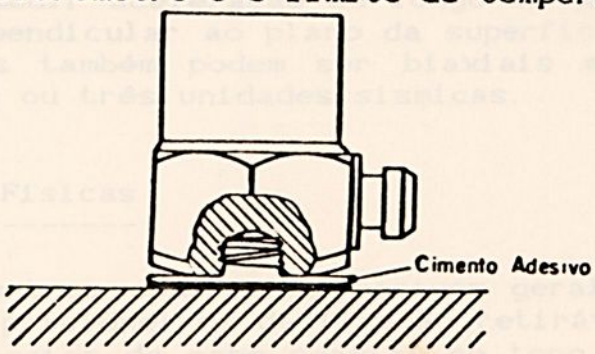


FIGURA 3.12- FIXAÇÃO DE ACELEROMETRO POR CIMENTO ADESIVO.

Fixação por base magnética mostrado na figura 3.13. que se trata de um método rápido , mas , de pouca precisão e repetibilidade além de necessitar de materiais ferro-magnéticos.

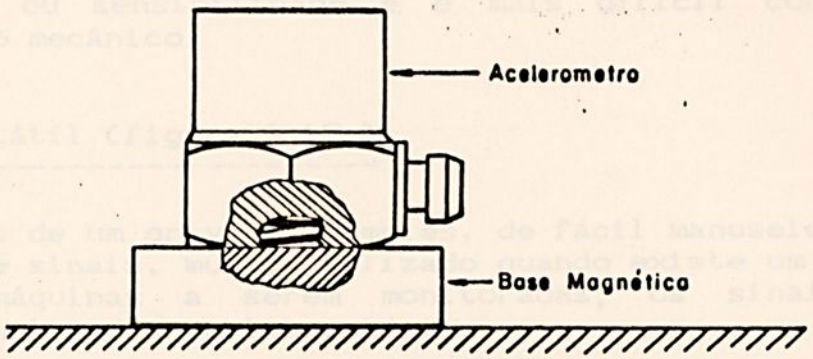


FIGURA 3.13- FIXAÇÃO DE ACELEROMETRO POR BASE MAGNÉTICA.

Outro método é a fixação do acelerometro com a mão, mostrado na figura 3.14 é muito conveniente para se fazer uma medição rápida, mas devido à pouca estabilidade pode gerar erros graves.

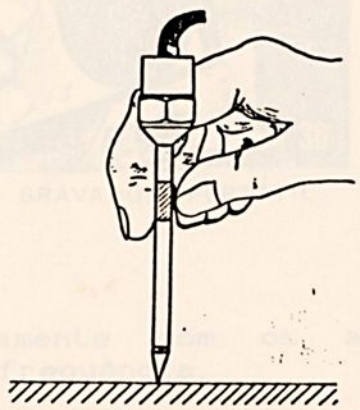


FIGURA 3.14- FIXAÇÃO DO ACELERÔMETRO COM A MÃO.

SENSIBILIDADE DIRECIONAL

A maioria dos acelerômetros piezoeletricos são do tipo uniaxial, para medir aceleração ao longo de um único eixo. Este eixo é perpendicular ao plano da superfície de fixação. Os acelerometros também podem ser biaxiais e triaxiais ou seja contém duas ou três unidades sísmicas.

Características Físicas

Os acelerômetros comerciais possuem geralmente a forma cilíndrica, com prisioneiros de fixação retiráveis ou não. É fornecido um conector de cabo coaxial no topo ou na lateral do sensor. A maioria dos suportes de fixação dos acelerômetros são de peso leve. De 0.5 a 60 g. Em geral quanto maior o acelerometro maior sua sensibilidade e menor a frequência de ressonância. Quanto maior a frequência de ressonância menor a capacitância ou sensibilidade e é mais difícil conseguir amortecimento mecânico.

Gravador Portátil (figura 3.15.)

Trata-se de um gravador simples, de fácil manuseio, para a gravação de sinais, muito utilizado quando existe um grande número de máquinas a serem monitoradas; os sinais são gravados e analisados em laboratório.

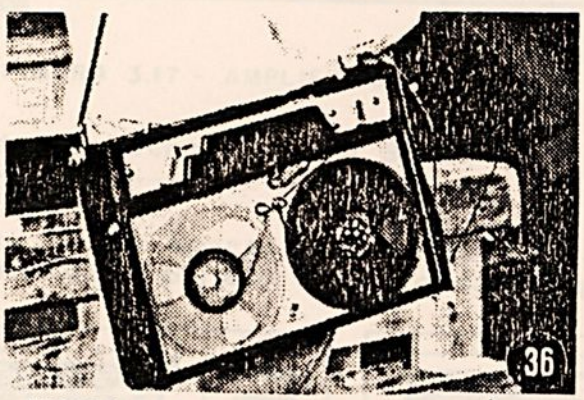


FIGURA 3.15 - GRAVADOR PORTÁTIL.

Filtros (figura 3.16.)

São usados juntamente com os amplificadores para facilitar a análise de frequência.

Utilizados para eliminar a interferência de sinais externos ao sinal desejado.

Os tipos mais comuns são: passa baixo, passa alto, passa banda, e rejeita banda.

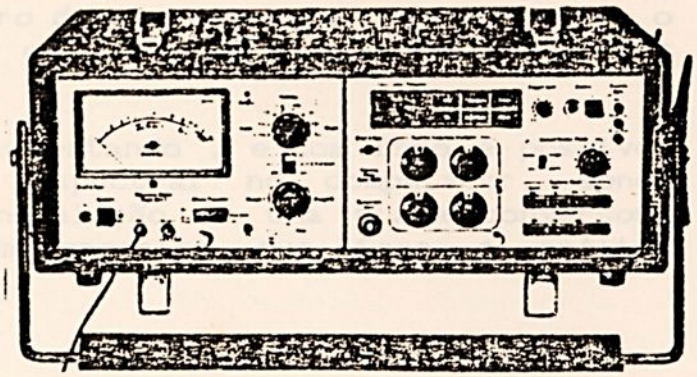


FIGURA 3.16 - FILTRO.

Amplificador (figura 3.17)

Converte o sinal de alta impedância do acelerômetro em um sinal conveniente para a transmissão aos aparelhos de medição.

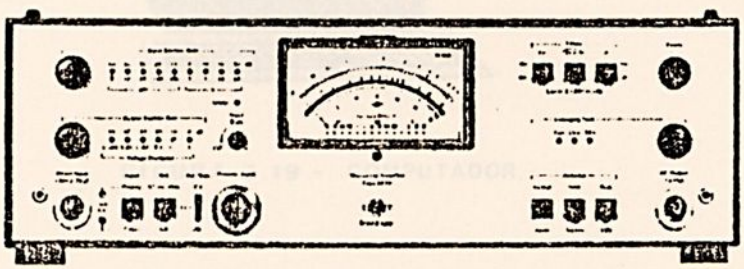


FIGURA 3.17 - AMPLIFICADOR.

Analisador de Espectro (figura 3.18)

Trata-se de um aparelho que faz a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência.

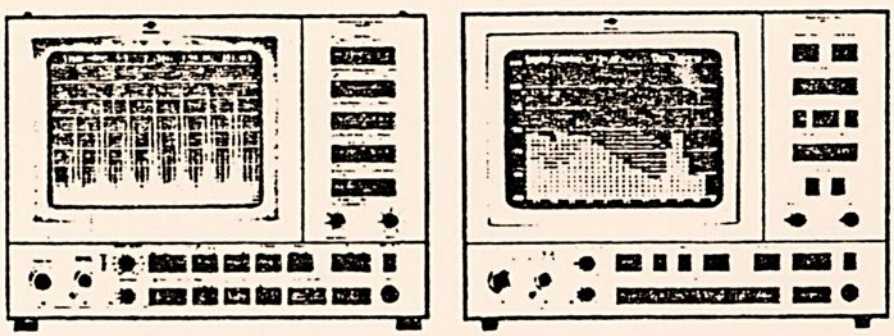


FIGURA 3.18 - ANALISADOR DE ESPECTRO.

Computador (figura 3.19)

Nos locais onde esse tipo de manutenção vai ser empregado a um grande número de equipamentos , é necessário o uso de um computador (XT ou AT) para o gerenciamento dos dados.

A sofisticação está aumentando , e com isso é possível fazer a própria análise espectral no computador, sendo necessário para isso a instalação de uma placa conversora analógica digital e um programa que faça a análise espectral.

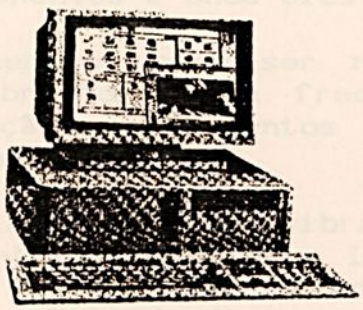


FIGURA 3.19 - COMPUTADOR.

3.5 ANÁLISE ESPECTRAL

INTRODUÇÃO

O movimento vibratório de um equipamento pode consistir num único componente ocorrendo numa única frequência, como acontece em um diapasão, ou várias componentes que ocorrem em frequências diferentes, como acontece num motor de combustão interna.

Na prática, os sinais de vibração compoem-se geralmente de inúmeras frequências, as quais ocorrem simultaneamente, de modo que não podemos identificá-las somente observando a respostas das amplitudes em relação ao tempo, nem determinar o número de componentes e onde eles ocorrem.

Tais componentes podem ser revelados comparando-se a amplitude da vibração à sua frequência. A subdivisão de sinais de vibração em elementos de frequência é chamada "Análise Espectral".

Quando analisamos as vibrações de uma máquina, normalmente encontramos um número importante de elementos de frequência, os quais estão diretamente relacionados aos movimentos fundamentais de diversas partes das máquinas.

O importante é o conceito de que a análise espectral apenas representa uma função de outra forma, não mais no decorrer do tempo , mas em função das frequências predominantes. Como mostrado na figura 3.20.

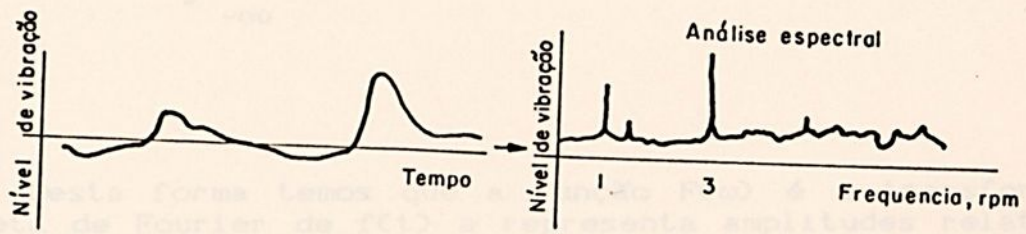


FIGURA 3.20 - ANÁLISE ESPECTRAL.

Esta transformação de uma função do domínio do tempo para o domínio da frequência é feita pela transformada de Fourier para funções não periódicas e pelas séries de Fourier para funções periódicas.

TRANSFORMADA DE FOURIER

A transformada de Fourier é uma ferramenta que decompõe um determinado sinal nas suas componentes exponenciais.

As equações 3.8 e 3.9 representam o par de transformadas de Fourier. A equação 3.9 é conhecida como transformada direta de Fourier de f(t) e a equação 3.8 como a transformada inversa de Fourier de F(ω).

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w)\, e^{j\omega t}\, d\omega \qquad (3.8)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, e^{-j\omega t}\, dt \qquad (3.9)$$

Desta forma temos que a função F(ω) é a transformada direta de Fourier de f(t) e representa amplitudes relativas das varias componentes de frequencia. Portanto, F(ω) é a representação de f(t) no domínio da frequencia. A representação no domínio do tempo especifica uma função, em cada instante de tempo, enquanto que a representação no domínio da frequencia especifica as amplitudes relativas dos componentes de frequencia da função. Qualquer uma das representações especifica univocamente a função.

CAPITULO 4 - ROLAMENTOS E SUAS APLICAÇÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aperfeiçoamento das máquinas e equipamentos, visando uma maior produção e melhor qualidade de seus produtos, os rolamentos sendo parte fundamental de quase todas as máquinas, estes também se aperfeiçoaram nas suas capacidades tais como : alta resistividade, alta velocidade, alta carga, etc.

Um projeto adequado e criterioso, aliado as qualidades metalúrgicas e de usinagem, resulta e um produto final de alta confiabilidade, longa vida útil e baixos níveis de ruído e vibração.

Mostramos nesse capítulo informações importantes sobre rolamentos para uma maior compreensão do nosso trabalho.

4.2 TIPOS DE ROLAMENTOS

Os rolamentos são compostos por anéis (interno e externo), roletes (rolos ou esferas) e gaiola mostrado na figura 4.1.

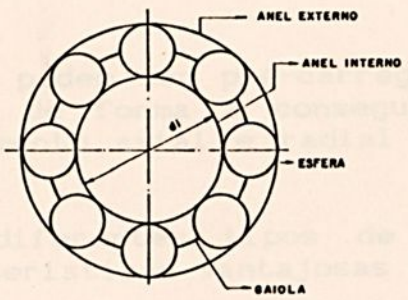


FIGURA 4.1 - ROLAMENTOS : COMPOSIÇÃO

Estes são divididos primeiramente em "Rolamentos Radiais" e "Rolamentos Axiais" dependendo da direção da carga aplicada, e ainda são divididos em rolamentos de esferas ou rolamentos de rolos dependendo do elemento rolante no seu interior que podem ser esferas ou rolos.

A tabela 4.1 mostra uma classificação dos rolamentos dependendo do elemento rolante.

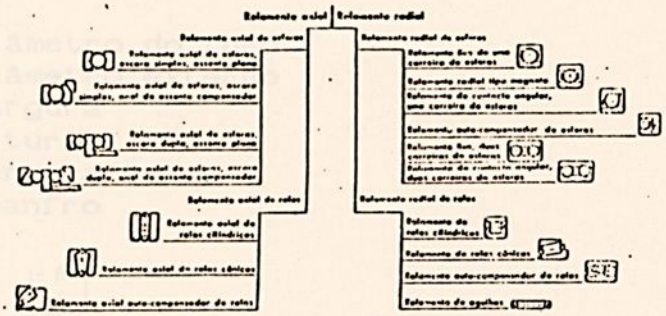


TABELA 4.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS ROLAMENTOS.

VANTAGENS DO USO DE ROLAMENTOS

* Com o avanço da padronização mundial, os rolamentos são internacionalmente disponíveis e intercambiáveis.

* Manutenção, reposição e inspeção são facilitados porque a estrutura do rolamento é de construção simplificada.

* Alguns rolamentos são capazes de receber tanto carga axial como radial simultânea ou independentemente.

* Os rolamentos podem ser usados sob uma grande variação de temperatura.

* Os rolamentos podem ser pré-carregados para produzir uma folga negativa de forma a conseguir maior rigidez para impedir o movimento axial e radial do eixo em relação ao alojamento.

* Além disso, diferentes tipos de rolamentos tem suas próprias características vantajosas individuais.

4.3 CARACTERISTICAS GERAIS

DIMENSÕES PRINCIPAIS E DENOMINAÇÃO DO ROLAMENTO

Dimensões principais

As dimensões principais mostrada na figura 4.2 de um rolamento são :

d = diâmetro do furo
D = diâmetro externo
B = largura
H = altura
T = largura total
r = chanfro

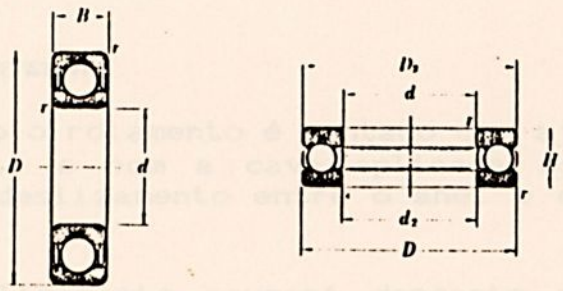


FIGURA 4.2 - ROLAMENTOS : DIMENSÕES PRINCIPAIS.

Estas dimensões são padronizadas pelas normas ISO (International Standard Organization e JIS (Japan Industry Standard)

Define-se série dimensional como sendo a combinação da série largura e série diâmetro externo que indica respectivamente o modelo de grandeza de largura e do diâmetro externo.

Denominaçäö do Rolamento

O número de denominação de um rolamento indica o tipo do rolamento, série dimensional, precisão de acabamento e de giro, folga interna e outros detalhes.

Exemplos:

```
        5  1  2  15
        :  :  :  :- diâmetro do furo: 5x15=75 mm
        :  :  :- série externa: 2
        :  :- série largura: 1
        :- tipo: rolamento axial de esferas

MN  3  0  17  K  CC1  P4
:   :  :  :   :   :    :- precisão de acabamento , classe P4
:   :  :  :   :   :- folga radial CC1 anél não intercambiável
:   :  :  :   :- furo conico (conicidade 1)
:   :  :  :- diâmetro do furo: 5x17=85 mm
:   :  :- série externa "0"
:   :- série largura "3"
:- tipo de rolamento de rolos cilíndricos dupla largura  MN
```

AJUSTE E FOLGA INTERNA

Quando o rolamento é montado com ajuste de interferência insuficiente e com a cava aplicada no anel interno, pode sofrer um deslizamento entre o anél e o eixo, danificando o rolamento.

O deslizamento causará desgaste prematuro da área de contato, danificando o eixo ou mancal, as limalhas criadas podem gerar no interior do rolamento superaquecimento e vibração.

Assim deve-se aplicar um aperto adequado ao anél girante que suporta a carga, fixando devidamente no eixo ou no mancal evitando o deslizamento durante o funcionamento.

O ajuste é decidido em função da área e da condição de rotação.

Folga Interna

A folga interna dos rolamentos em operação influência a vida por fadiga, ruídos, aquecimento, etc. Consequentemente, a seleção da folga interna apropriada é muito importante. A folga interna do rolamento é um espaço livre entre os anéis e o elemento rolante. A folga radial e axial são definidas como o deslocamento total entre um anél e o outro tanto axial como radialmente.

A folga geralmente é medida aplicando uma carga específica no rolamento, deste modo a medida da folga é sempre um pouco mais larga do que a folga interna atual devido a deformação elástica causada pela carga.

Na tabela 4.2 mostramos uma tabela de folgas:

Fatores de cálculo X e Y para rolamentos rígidos de esferas

	Folga Normal					Folga C3					Folga C4				
		$F_a/F_r \leq e$		$F_a/F_r > e$			$F_a/F_r \leq e$		$F_a/F_r > e$			$F_a/F_r \leq e$		$F_a/F_r > e$	
F_a/C_0	e	X	Y	X	Y	e	X	Y	X	Y	e	X	Y	X	Y
0,025	0,22	1	0	0,56	2	0,31	1	0	0,46	1,75	0,4	1	0	0,44	1,42
0,04	0,24	1	0	0,56	1,8	0,33	1	0	0,46	1,62	0,42	1	0	0,44	1,36
0,07	0,27	1	0	0,56	1,6	0,36	1	0	0,46	1,46	0,44	1	0	0,44	1,27
0,13	0,31	1	0	0,56	1,4	0,41	1	0	0,46	1,3	0,48	1	0	0,44	1,16
0,25	0,37	1	0	0,56	1,2	0,46	1	0	0,46	1,14	0,53	1	0	0,44	1,05
0,5	0,44	1	0	0,56	1	0,54	1	0	0,46	1	0,56	1	0	0,44	1

TABELA 4.2 - FOLGAS DOS ROLAMENTOS.

NÚMERO DE ROTAÇÕES

O número de rotações é importante no cálculo da vida estimada até a fadiga.

De acordo com o número de rotações deve-se optar pelo tipo do rolamento que seja mais adequado, importante para altas rotações.

O número de rotações de serviço é limitado pelo aumento da temperatura interna e tipo de lubrificação, assim sendo o grau de temperatura afeta diretamente a sua velocidade.

MONTAGEM E DESMONTAGEM

Montagem

Os rolamentos são muito precisos e sua montagem merece cuidado e atenção. Suas características devem ser completamente estudadas, e sua montagem deve ser feita da maneira apropriada. É recomendado que o procedimento de montagem para rolamentos seja obedecido todas as normas de engenharia e respeitados os ítens mostrados a seguir:

1- Limpeza dos rolamentos e suas partes;
2- Verificação das dimensões;
3- Procedimento de montagem;
4- Inspeção após montagem;
5- Perfeita lubrificação.

Os rolamentos devem ser desembalados apenas no momento da montagem.

Quando se usar graxa esta deve ser acondicionada no rolamento sem lavagem do mesmo.

Igualmente no caso de óleo lubrificante, lavagem do rolamento não é requerida. De qualquer modo, no caso de rolamentos para instrumentos e altas velocidades de operação, o rolamento deve ser lavado com óleo filtrado para se evitar agentes corrosivos. Depois do rolamento ter sido lavado com óleo filtrado, ele pode ser protegido na sequência contra a corrosão.

Pré lubrificação dos rolamentos é feita sem lavagem.

O método de montagem do rolamento depende do tipo de rolamento e tipo de ajuste. Por exemplo, nos rolamentos usados para eixos rotativos, os anéis requerem ajuste fino.

Rolamentos com furos cilíndricos são usualmente montados por pressão no eixo (ajuste) ou aquecidos para expansão do seu diâmetro.

Rolamentos com furos conicos podem ser montados diretamente no eixo conico ou nos eixos cilíndricos usando buchas conicas.

Rolamentos são usualmente montados nos alojamentos com ajuste livre. De qualquer modo nos casos onde o anél interno tem uma interferência, a pressão pode ser usada. Rolamentos com interferência podem ser montados com resfriamento através de gelo seco. Neste caso, um tratamento preventivo para ferrugem deve ser feito devido à condensação do ar na superfície.

A figura 4.3. (a, b, c) mostram alguns exemplos de montagem :

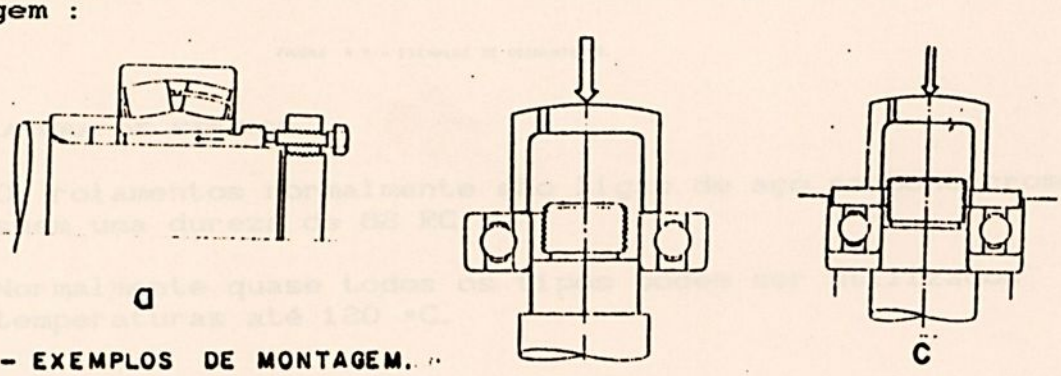


FIGURA 4.3 - EXEMPLOS DE MONTAGEM.

Desmontagem

Os rolamentos devem ser removidos para inspeções periódicas ou por outras razões.

Se o rolamento removido é para ser usado novamente ou se ele é removido apenas para inspeção, a sua remoção deve ser cuidadosa como a montagem.

Se o rolamento possui um ajuste sua remoção pode ser dificultada.

O meio de remoção deve ser considerado no modelo original das partes adjacentes da máquina.

Quando desmontado , o procedimento e a sequência de remoção devem ser estudados usando o desenho da máquina e considerando o tipo de ajuste de montagem.

As figuras 4.4.(a, b, c, d) mostram alguns exemplos de desmontagem:

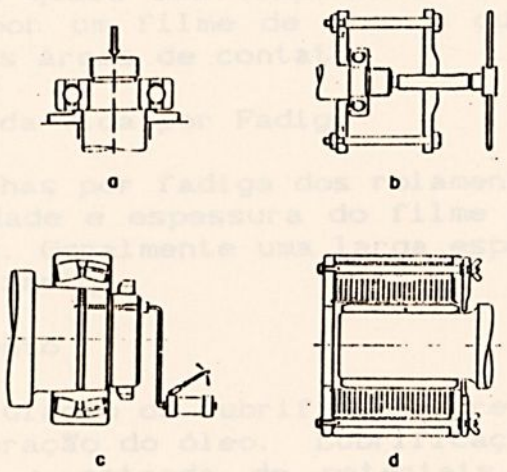


FIGURA 4.4 - EXEMPLOS DE DESMONTAGEM.

TEMPERATURA DE SERVIÇO

Os rolamentos normalmente são ligas de aço carbono cromo e possuem uma dureza de 62 RC.

Normalmente quase todos os tipos podem ser utilizados para temperaturas até 120 °C.

Para temperaturas mais elevadas pode se alterar a estrutura molecular do aço causando modificações de medidas.

Quando são utilizados em altas temperaturas eles devem estar estabilizados, tendo como consequência a diminuição da dureza e capacidade de carga.

Nos casos de altas temperaturas deve-se também ser dada uma atenção especial aos lubrificantes e vedações.

LUBRIFICAÇÃO

Propósito da lubrificação

Os propósitos da lubrificação são reduzir a fricção e desgaste interno do rolamento a qual pode causar prematuras falhas no rolamento. Os efeitos da lubrificação são mostrados resumidamente e seguir :

- Redução da Fricção e Desgaste

Contato metálico entre os anéis, elementos rolantes e gaiolas, os quais são componentes básicos dos rolamentos, é prevenido por um filme de óleo o qual reduz a fricção e o desgaste das áreas de contato.

- Extensão da Vida por Fadiga

As falhas por fadiga dos rolamentos dependem grandemente da viscosidade e espessura do filme para evitar contato das superfícies. Geralmente uma larga espessura do filme prolonga a vida por fadiga.

- Resfriamento

A circulação do lubrificante previne o super aquecimento e a deterioração do óleo. Lubrificação adequada também ajuda a prevenir a entrada de materiais estranhos e combate a corrosão e ferrugem.

Os lubrificantes são divididos em dois tipos : graxa e óleo lubrificante. O desempenho do rolamento pode melhorar conseguindo-se adaptar o método de lubrificação mais adequado para a aplicação particular e condições de operação. O óleo lubrificante é superior em eficiência lubrificante; de qualquer modo, a lubrificação por graxa permite uma simples estrutura em torno dos rolamentos.

VIDA DO ROLAMENTO

A vida do rolamento, no sentido amplo do termo, é o período de duração, no qual os rolamentos continuam em operação e dentro de suas características.

Esta vida do rolamento pode ser definida igualmente como vida por ruído, vida por atrito, vida por lubrificação, ou a vida por fadiga, depende de qual fator causa a falha do rolamento.

Os tipos de falha mais comuns dos rolamentos são: corrosão, lascamento, fratura, desgaste, entalhe, sulcamento e queimadura.

Estas condições não são interpretadas como uma falha normal do rolamento, apenas elas ocorrem devido a resultados de erros que são classificados como:

1) projeto :
tipo de rolamento indevido, ajuste e folga insuficiente, temperatura de serviço inadequada, rotação indevida, desalinhamento, desbalanceamento e carga excessiva ou irregular.

2) manufatura :
defeito metalúrgico do material e erro de fabricação.

3) estocagem :
local indevido e acondicionamento incorreto.

4) emprego :
montagem e desmontagem incorretos, queimadura elétrica, lubrificante indevido e falta ou excesso de lubrificante.

5) fadiga :
vida estimada em catálogo,fim da vida útil

Vida por Fadiga e Razão da Vida por Fadiga

Quando os rolamentos são operados com carga inferior, as cavas internas e externas dos rolamentos são sujeitas ao "stress" por um ciclo repetitivo.

Com a fadiga dos metais nas superfícies de contato das cavas e elementos rolantes, partículas (escamas) podem se separar do material do rolamento. Este fenomeno é chamado " lascamento ".

Mostrado na figura 4.5.:



FIGURA 4.5 - EXEMPLOS DE LASCAMENTO.

Vida por fadiga é representada pelo número total de revoluções no tempo com o qual a superfície do rolamento inicia um lascamento pela força cíclica. Por ser a fadiga o mais importante fator que contribui para a falha do rolamento e um fenomeno natural, este é igual a vida do rolamento, as outras causas são normalmente negligenciadas.

A figura 4.6. mostra os valores da vida por fadiga dos rolamentos, considerando que rolamentos do mesmo número de série, tipo, construção e material são sujeitos ao mesmo tipo de tratamento, mesmo processo e operando sobre as mesmas condições:

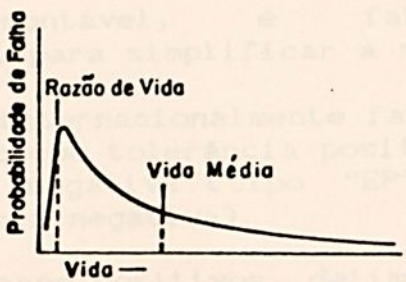


FIGURA 4.6 - PROBABILIDADE DE FALHA NA VIDA DE UM ROLAMENTO.

Estas variações mostradas são devido as condições dos materiais de sofrerem lascamento (escamação) devido a fadiga estarem sujeitas a outras variáveis.

A determinação da vida por fadiga de um rolamento é um valor estatístico.

Supondo que um número de rolamentos do mesmo tipo e operando individualmente sob as mesmas condições. Depois de um certo período de tempo, 10% deles começam a ficar fora de operação devido a escamação causada pela fadiga.

O número total de horas de operação completadas quando 10% dos rolamentos comaçam a ficar inoperantes pela escamação é chamado vida estimada por fadiga.

4.4 PRINCIPAIS CARACTERISTICAS INDIVIDUAIS E APLICAÇÕES

ROLAMENTOS TIPO MAGNÉTICOS (figura 4.7.)

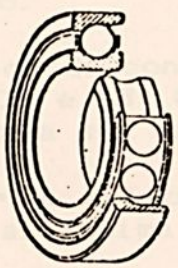


FIGURA 4.7 - ROLAMENTOS TIPO MAGNÉTICOS

Este nome foi atribuido por ser destinados a pequenos geradores elétricos, chamados de "magneto". Suas características são :

- A sua constituição permite a desmontagem do anel externo.
- Por ser desmontável, é fabricado de maneira intercambiável, para simplificar a montagem.
- Apesar de ser internacionalmente fabricado com o diâmetro do anel externo com tolerância positiva, é produzido também com tolerância negativa (tipo "EP" = tolerância positiva "EN" = tolerância negativa).
- É montado em pares positivos, delimitando a folga axial no momento em que efetuar a sua montagem.
- Como a profundidade da ranhura da pista interna é menor em comparação ao fixo das esferas, a capacidade de carga axial é menor.

Principais aplicações: geradores pequenos.

ROLAMENTOS DE CONTATO ANGULAR DE UMA CARREIRA DE ESFERAS (FIGURA 4.8)

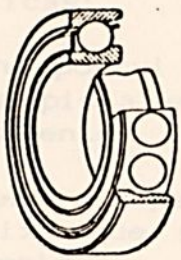


FIGURA 4.8 - ROLAMENTOS DE CONTATO ANGULAR DE UMA CARREIRA DE ESFERAS.

Suas características:

- Este rolamento é capaz de receber cargas axiais e radiais num único sentido.
- Dispõe com ângulos de contato: 30° (leva sufixo "A"), 40° (leva sufixo "B"), e 15° (leva sufixo"C") e quanto maior o seu ângulo, maior a sua capacidade de carga axial.
- O ângulo de 15° é aplicado, geralmente, para locais de alta precisão e altíssima rotação.
- Devido a sua própria fabricação deverá sempre ser aplicado aos pares.
- Mediante a aplicação de precarga, poderá controlar o nível de rigidez do funcionamento do rolamento.
- Normalmente são utilizados as gaiolas de aço prensado, no entanto, para os tamanhos grandes ou para alta rotação e precisão, são utilizados as gaiolas de bronze usinado.

Principais aplicações: eixos dos rebolos de retífica, centrifugadores, turbinas a gás, eixos automotivos, rodas dianteiras, redutores pequenos, bombas verticais.

ROLAMEMTOS AUTO COMPENSADOR DE ESFERAS (FIGURA 4.9)

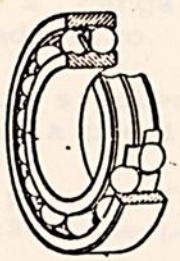


FIGURA 4.9 - ROLAMENTOS AUTOCOMPENSADOR DE ESFERAS.

Suas características:

- O anel interno possui 2(duas) pistas, e o anél externo é dotado de uma pista esférica e seu centro se alinha ao centro do rolamento.

- Consequentemente, pequenos deslocamentos do eixo em relação à caixa que são auto-alinhados, não prejudicam nenhum componente.

- Devido ao perfil quase plano da pista externa, a capacidade de carga axial é pequena.

- É aplicável também com uma bucha no anel interno.

- Devido ao efeito autocompensante, é ideal nos locais de difícil precisão de montagem ou onde houver desalinhamento do eixo.

Principais aplicações: eixos de transmissão, implementos agrícolas, e outros equipamentos que não exigem alta precisão.

ROLAMENTOS DE CONTATO ANGULAR DE DUAS CARREIRAS DE ESFERAS (FIGURA 4.10)

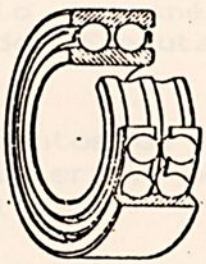


FIGURA 4.10 – ROLAMENTOS DE CONTATO ANGULAR DE DUAS CARREIRAS DE ESFERAS.

Suas características:

- Por suportar a carga axial em ambos os sentidos é utilizado no lado fixo.

- Em relação ao de simples carreira, não é muito utilizado nos locais de alta precisão e rotação.

- Dispõe-se de tipos sem furo de colocação de esferas, e com o furo de locação, que permite maior capacidade.

Principais aplicações: redutores, impressores.

ROLAMENTOS DE ROLOS CILÍNDRICOS (FIGURA 4.11)

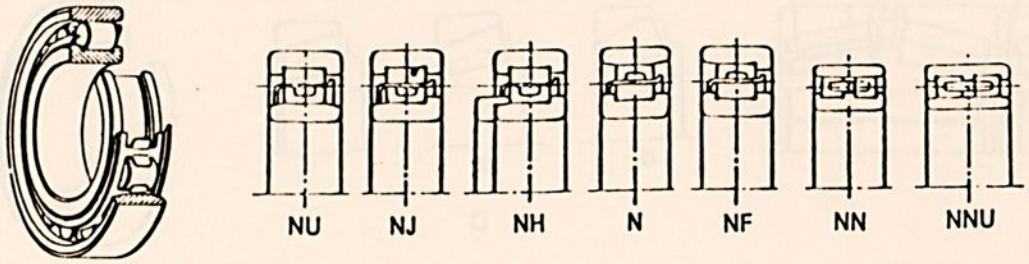


FIGURA 4.11 - ROLAMENTOS DE ROLOS CILINDRICOS.

Suas características:

- Devido os rolos estarem em contato linear com as pistas, a capacidade de carga é bem maior que o de esferas que tem contato em pontos.

- Compõe-se de vários tipos (figura 4.11a), diferindo, com a existência ou não de borda no anel interno e externo.

- Nos tipos "N" e "NU" , a sua construção permite deslizamento axial em ambos os lados, e, assim, são aplicados no lado livre.

- Neste rolamento os anéis são desmontáveis, havendo intercambialidade. Executam-se alguns tipos que não são intercambiáveis.

- Dentre os rolamentos de rolos, este é o tipo que tem o menor atrito interno, permitindo, assim, uma rotação relativamente alta.

- Com as bordas laterais, pode receber razoável carga axial.

- Os tipos "NU" e "NNU" de dupla carreira de rolos, resistem a alta carga radial, mantendo grande rigidez, sendo assim, aplicados nos eixos principais de máquinas operatrizes.

- Geralmente é de gaiola de aço prensado, porém, nos de grande porte ou de alta rotação, é utilizado a gaiola de bronze usinado.

- Além dos acima citados, há os de 4(quatro) carreiras para grande porte, utilizados em equipamentos siderúrgicos.

Principais aplicações: motores elétricos de porte médio e grande, motores elétricos de tração locomotiva, geradores elétricos, rodas de vagão, máquinas operatrizes, peneiras vibratóris e britadores, equipamentos siderúrgicos.

ROLAMENTOS DE ROLOS CONICOS(FIGURA 4.12)

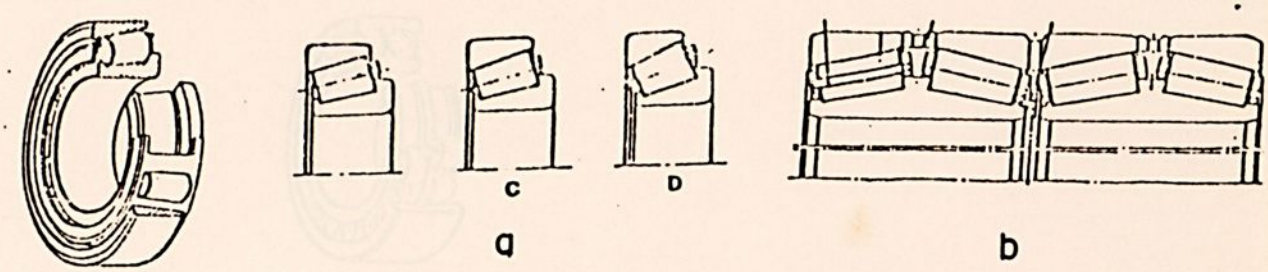


FIGURA 4.12 - ROLAMENTOS DE ROLOS CÔNICOS.

Suas características:

- Devido aos rolos estarem em contato linear, a sua capacidade de carga é bem maior que o de esferas.
- O fator de atrito é bem maior que no de rolos cilíndricos, devido a borda maior do cone suportar a força axial criada pela carga radial nele aplicada.
- Devido a sua construção, é usado em pares ou em montagens múltiplas, similar ao de contato angular.
- Existem 3(três) tipos de ângulos: normal agudo (leva sufixo "C") e bastante aguda (leva sufixo "D") (figura 4.12a).
- Além das milimétricas (série ISO), é também amplamente utilizado a série polegada.
- Além da carga radial, suporta a axial em sentido único.

Principais aplicações: rodas automotivas, diferenciais, máquinas operatrizes, mecanismos de transmissão dos locomotivas, rodas ferroviárias, redutores de velocidade, rolos de laminadores siderúrgicos.

A figura 4.12b mostra o rolamento de rolos conicos de 4(quatro) carreiras, utilizados nos rolos de laminadores siderúrgicos, com características especiais tanto no material como na sua construção, para suportar altas cargas, alta rotação.

ROLAMENTOS AUTO COMPENSADOR DE ROLOS (FIGURA 4.13)

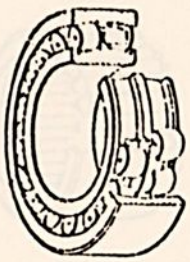


FIGURA 4.13 - ROLAMENTOS AUTOCOMPENSADOR DE ROLOS.

Suas características:

- O anel interno possui 2 (duas) pistas, e o externo é dotado de uma pista esférica, seu centro se alinha com o centro do rolamento.

- Consequentemente, pequenos desalinhamentos no eixo em relação a caixa, são auto-alinhados, não prejudicando nenhum componente.

- Por ter alta capacidade de carga é adequado na aplicação de grande carga radial e de choque.

- Além da carga radial, suporta relativamente grande carga axial noa 2 (dois) sentidos.

- É amplamente utilizados com buchas adaptadoras e de desmontagem.

- Há os tipos com gaiolas de aço prensado e de bronze usinado.

Principais aplicações: rolos de máquinas de papéis, redutores de velocidade, mesas de rolos, peneiras vibratórias, máquinas para madeira, etc.

ROLAMENTOS DE ROLOS AGULHAS (FIGURA 4.14)

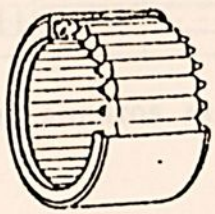


FIGURA 4.14 - ROLAMENTOS DE ROLOS DE AGULHAS.

É denominado rolamentos de rolos de agulhas, quando o diâmetro "DA" do rolo em relação ao seu comprimento "Lr", encontra-se na seguinte proporção: Da < 5 mm e 3 < Da/Lr < 10.

Suas características:

- Devido a sua pequena espessura, pode-se projetar em equipamento leve e compacto.
- Apesar da alta capacidade de carga radial, não é aplicável a axial, utilizado apenas como lado livre.
- É frequente o uso do rolamento sem o anel interno, diretamente no eixo tratado termicamente.
- Devido o seu comprimento ser grande em relação ao seu diâmetro e também a ausência de bordas laterais, a sua precisão não é elevada em comparação ao de rolos cilíndricos.
- Há tipos com anéis de chapas prensadas no material especial, tipos usinados e tipos sem anéis, compostos apenas de gaiola e rolos.
- Os munidos com gaiola são de aço prensado.

Principais aplicações: transmissão automotiva, juntas universais, eixos virabrequim de motores pequenos, bombas de ar, equipamentos de prensa hidráulica, aeronaves, redutores de engrenagem, etc.

ROLAMENTO AXIAL DE ROLOS CILÍNDRICOS (FIGURA 4.15)

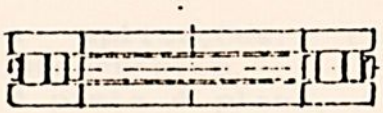


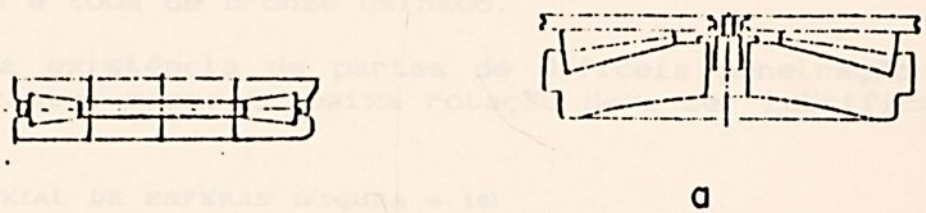
FIGURA 4.15 - ROLAMENTOS AXIAL DE ROLOS CILÍNDRICOS.

Suas características:

- Devido ao seu contato linear de rolos, é ideal para grandes cargas puramente axiais ou de choque.
- Devido ao seu aspecto constitucional, é ideal para elevada precisão.
- Há grande rigidez axial.
- O limite de rotação é relativamente baixo.
- É frequente a utilização, num único furo de gaiola, de vários rolos de pequenos comprimentos, para minimizar o atrito deslizante.

Principais aplicações: injetores de plástico, mesas de tornos verticais, moitões de guindastes.

ROLAMENTO AXIAL DE ROLOS CONICOS (FIGURA 4.16)



a

FIGURA 4.16 - ROLAMENTOS AXIAL DE ROLOS CÔNICOS.

Suas características:

- Suporta , além de carga axial, a carga de choque.
- Há grande rigidez axial.
- Por acorrer deslizamento lateral nas bordas do rolete, é aplicada em local de baixa velocidade.

- Geralmente é apenas de rolos, sem a gaiola.

Principais aplicações: comandos de cilíndros de laminador siderúrgico. A figura 4.16a mostra essa aplicação. A pista é plana. A superfície externa do anél superior é feita na forma concava para receber a extremidade convexa do eixo de comando.

ROLAMENTO AXIAL AUTOCOMPENSADOR DE ROLOS (FIGURA 4.17)

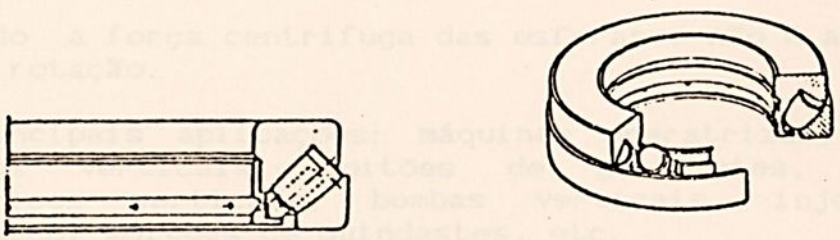


FIGURA 4.17 - ROLAMENTOS AXIAL AUTOCOMPENSADOR DE ROLOS.

Suas características:

- Devido ao efeito autocompensante, não sofre a consequência da montagem deficiente, ou abaulamento do eixo.
- Quando está aplicada carga axial, suporta razoável carga radial, Fr/Fa<0,55.
- A gaiola é toda de bronze usinado.
- Devido a existência de partes de difíceis penetração do lubrificante, mesmo na baixa rotação deve ser lubrificado a óleo.

ROLAMENTO AXIAL DE ESFERAS (FIGURA 4.18)

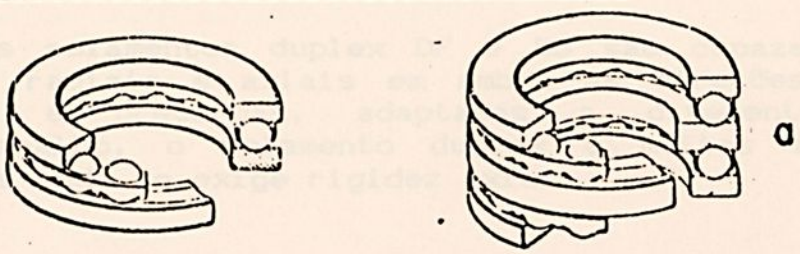


FIGURA 4.18 - ROLAMENTOS AXIAL DE ESFERAS.

Suas características:

- Suporta apenas a carga axial.
- O de simples carreira, suporta a carga apenas num único sentido, enquanto que o de dupla carreira , suporta em ambos os sentidos (figura 4.18a).
- Para eliminar a falha de montagem, há o tipo que utiliza o anél de autocompensador.
- Dentre os de esferas é o que apresenta maior rigidez axial.
- Devido a força centrífuga das esferas , não é aplicável a alta rotação.

Principais aplicações: máquinas operatrizes, mesas de tornos verticais, moitões de guindastes, geradores elétricos verticais, bombas verticais, injetores de plástico, moitões de guindastes, etc.

ROLAMENTO DUPLEX (FIGURA 4.19)

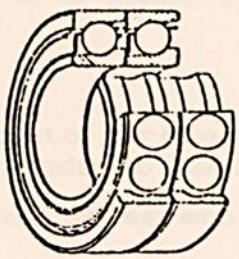


FIGURA 4.19 - ROLAMENTO DUPLEX.

O rolamento duplex é um conjunto de dois rolamentos radiais combinados. É muitas vezes uma combinação de rolamentos de esferas de contato angular, ou rolamentos de rolos cônicos. Pode ser uma combinação de rolamentos de esferas de contato angular, colocadas face a face (tipo DF), ou encosto a encosto (tipo DB), ou em série (tipo DT)

Os rolamentos duplex DF e DB são capazes de receber cargas radiais e axiais em ambas as direções. Dotados de folgas e precargas, adaptadas a diferentes condições de trabalho, o rolamento duplex é muitas ultilizado em lugares onde se exige rigidez axial.

O tipo DT é usado quando há uma grande carga axial, na mesma direção. Este rolamento não pode, contudo, suportar carga axial em direção oposta.

Os rolamentos DF, DB e DT devem ser sempre usados aos pares, não podendo se misturar com outros tipos de rolamentos duplex, sem o necessário ajuste.

4.5 ROLAMENTOS RIGIDOS DE ESFERAS(FIGURA 4.20)

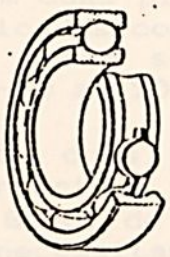


FIGURA 4.20 - ROLAMENTO RIGIDO DE ESFERAS.

Este tipo de rolamento merece um destaque especial pois trata do rolamento de estudo do nosso trabalho.

Os rolamento rigídos de esferas podem ser de uma ou de duas carreiras.

O rolamento rigído de uma carreira de esferas é de construção simples, não separável, adequado para operar em altas rotações e em geral requer poucas atenções em serviço. A profundidade dos canais das pistas e o alto grau de oscilação entre as esferas e os mesmos, tornam possível a estes rolamentos suportar carga axiais consideráveis em ambos os sentidos, inclusive em altas rotações. Essas características, aliadas a um preço vantajoso , fazem do rolamento rígido de esferas o mais popular e todos os rolamentos.

Os rolamentos rigídos de duas carreiras de esferas são similares, na construção, aos rolamentos rigídos de uma carreira.

Recentemente, a construção com sufixo A substitui a construção anterior com rasgos de entrada, fazendo com que estes rolamentos , agora possam suportar cargas axiais em ambos os sentidos.

ROLAMENTOS RÍGIDOS DE ESFERAS PROTEGIDOS E VEDADOS

Os rolamentos rígidos de uma carreira de esferas são também fabricados com placas de proteção (sem contato) ou placas de vedação (com contato) em um ou ambos os lados. As placas de proteção, feitas de aço, mantêm uma pequena fresta radial com o anel interno, enquanto que as placas de vedação, feitas de borracha sintética resistente ao desgaste e ao óleo deslizam num rebaixo existente no anél interno.

Os rolamentos com duas placas de proteção ou de vedação são fornecidos lubrificados com a quantidade correta de graxa a base de lítio, e podem ser usados em temperaturas de trabalho na faixa de -30 a 110°C.

Os rolamentos com duas placas de proteção ou vedação podem também ser fornecidos com graxa para as faixas de temperatura de -50 a 80°C, de -20 a 130°C e de -40 a 140°C. Estes rolamentos não necessitam relubrificação, e não se deve lavá-los ou aquecê-los antes da montagem. Os rolamentos vedados são adequados particularmente para longos períodos de uso sem necessidade de manutenção.

Em princípio, os rolamentos blindados destinam-se a serem usados em aplicações onde o anél interno gira. Nos casos em que o anél externo é que gira, existe o perigo de que , em certas rotações, o lubrificante escape dos rolamentos.

ROLAMENTOS RÍGIDOS DE ESFERAS COM RANHURA PARA ANÉL DE RETENÇÃO

Os rolamentos com ranhura para anél de retenção, providas deste último, permitem uma fixação axial muito simples em seus alojamentos ocupando pouco espaço.

Dimensões

As dimensões principais dos rolamentos rígidos de uma ou de duas carreiras de esferas dados nas tabelas correspondentes, estão em conformidade com recomendação da norma 150/R 15. As dimensões dos anéis de retenção e das ranhuras para os mesmos satisfazem à recomendação da norma 150 464-1976.

Desalinhamento

Os rolamentos rígidos de uma carreira de esferas possuem capacidade muito limitada para absorver erros de alinhamento.

O desalinhamento angular admissível entre os anéis interno e externo, o qual não deverá produzir tensões adicionais inadmissíveis no rolamento em funcionamento, de seu tamanho, de sua construção interna e da forças e momentos que atuam sobre o mesmo.

Devido à complicada relação existente entre esses fatores não é possível darem-se valores exatos ao desalinhamento permissível, porém, em condições normais de funcionamento, pode-se dizer que está compreendido geralmente entre 2 e 10 minutos angulares. Deverá ser notado que o desalinhamento entre os anéis de um rolamento, causarão um aumento apreciável do ruído quando o rolamento estiver girando.

Os rolamentos rígidos de duas carreiras de esferas não podem, absorver desalinhamentos angulares, pois estes fariam que as esferas e as pistas fossem submetidas a intensas e inaceitáveis cargas, encurtando a vida do rolamento.

Tolerância e Folga Interna

Os rolamentos rígidos de uma carreira de esferas são fabricados regularmente com tolerâncias normais e folga interna radial normal. Alguns rolamentos, principalmente nos tamanhos pequenos, são fabricados também com folga interna radial maior ou menor que a normal e/ou com uma precisão de giro maior.

Gaiolas

Os rolametos rígidos de esferas são normalmente equipados com gaiolas prensadas de aço ou latão. Certos rolamentos possuem gaiolas usinadas de latão. Os rolamentos rígidos de duas carreiras de esferas possuem normalmente gaiolas de poliamido reforçadas com fibras de vidro.

Quando forem usados rolamentos com gaiolas plásticas, as temperaturas de trabalho não devem exceder 120°C.

CAPITULO 5 PRINCIPAIS PROBLEMAS EM ROLAMENTOS

5.1 INTRODUÇÃO

Como vimos no capítulo anterior se os rolamentos são corretamente usados, eles sobrevivem geralmente até sua vida estimada pela fábrica, mas que também existem vários fatores que causam falhas em rolamentos.

Deste modo, muitas vezes é difícil se determinar a real causa de falhas prematuras.

Para se determinar a real causa de falha prematura de um rolamento deve-se fazer um estudo das condições de operação, funcionamento, ambiente e aspecto das superfícies rolantes para que falhas similiares possam ser reduzidas.

Baseado nestas informações, mostramos os aspectos das superfícies rolantes de alguns tipos de falhas típicas de rolamentos.

Por deficiência de lubrificação: é caracterizado pelo aspecto das superfícies rolantes, que ficam opacas, sedosas ou reluzentes mostrado na figura 5.1.



FIGURA 5.1 – DESGASTE POR DEFICIÊNCIA DE LUBRIFICAÇÃO.

Desgastes por partículas abrasivas: é caracterizado pela remoção de material nas pistas rolantes, bem como um desgaste mais pronunciado nas pontas dos rolos e separadores. As partes rolantes tem depressões nos lugares de passagens das partículas entre os roletes ou esferas e pistas rolantes mostrado na figura 5.2.

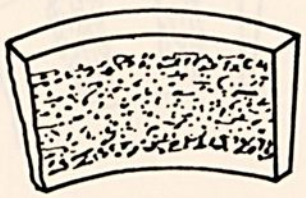


FIGURA 5.2- DESGASTES POR PARTÍCULAS ABRASIVAS

Desgaste por patinação: é caracterizado por sulco no exterior do rolamento. É provocado pela patinação do anel externo no seu alojamento, ou patinação do anel interno ou cone sobre eixo mostrado na figura 5.3.



FIGURA 5.3 - DESGASTE POR PATINAÇÃO.

Falso brinelamento: é caracterizado na fase inicial pelo aparecimento de canaletas, sem arestas levantadas, na pista rolante mostrado na figura 5.4.



FIGURA 5.4 -DESGASTE POR "FALSO BRINELAMENTO".

Corrosão ou Ferrugem: na fase inicial é caracterizado pelo aparecimento de nódoas regularmente espaçadas e na fase final por áreas descascadas, igualmente espaçadas mostrado na figura 5.5.

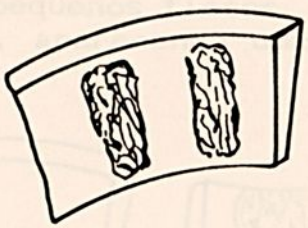


FIGURA 5.5 – DESGASTE POR CORROSÃO OU FERRUGEM.

Fadiga: conhecido como descascamento, pois é o resultado de fadiga superficial. Aparecem minúsculas trincas abaixo da superfície do material, laminado pela ação das esferas ou roletes. O material levanta ligeiramente e, na fase inicial, aparecem pequenas pontas esbranquiçadas. Com o tempo, as trincas atingem a superfície e desprendem-se em pequenos flocos. Com o progresso do dano os flocos unem-se, aparecendo a área descascada, que em certas circunstâncias pode abranger a pista rolante inteira ou somente parte dela como mostrado na figura 5.6.

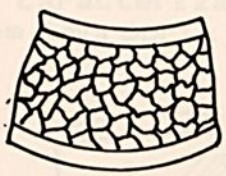


FIGURA 5.6 – FADIGA.

Lascamento: é o resultado da fadiga superficial. Aparecem minúsculas trincas abaixo da superfície do material, laminado pela ação das esferas ou roletes; o material levanta ligeiramente e, na fase inicial, aparecem pequenas pontas esbranquiçadas. Com o decorrer do tempo, as trincas aingem a superfície e desprenden-se pequenos flocos. Com o aumento do dano, ao flocos unem-se, aparecendo uma área descascada mostrado na figura 5.7.

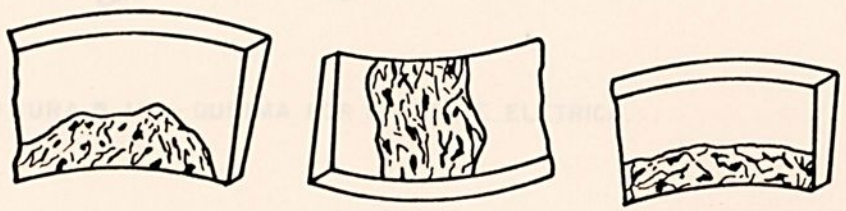


FIGURA 5.7 – DESGASTE POR LASCAMENTO.

Goivagem: caracterizado por riscos nas pistas, dos mais variados possíveis, provocados por partículas estranhas prensadas entre as esferas e roletes como mostrado na figura 5.8.

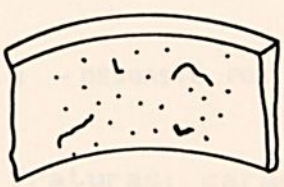


FIGURA 5.8 – GOIVAGEM ("gouging").

Sulcamento: é caracterizado por riscos nas pistas causado por montagem imprópria mostrado na figura 5.9.



FIGURA 5.9 – SULCAMENTO

Queima por corrente elétrica: caracterizado por crateras, pontos ou estrias sobre as pistas rolantes e roletes ou esferas, normalmente inicia-se por um descascamento mostrado na figura 5.10.



FIGURA 5.10 - QUEIMA POR CORRENTE ELÉTRICA.

Brinelamento: é caracterizado por depressões correspondentes aos roletes ou esferas, nas pistas rolantes mostrado na figura 5.11.

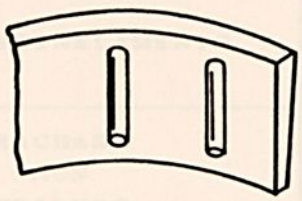


FIGURA 5.11 - DESGASTE POR BRINELAMENTO.

Rachaduras e fraturas: caracterizado por uma trinca ou quebra da pista mostrado na figura 5.12.

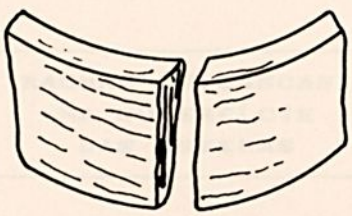


FIGURA 5.12 - RACHADURAS E FRATURAS.

Vemos no próximo ítem, os mais frequentes tipos de irregularidades de operação e falhas em rolamentos, bem como suas causas e ações corretivas.

5.2 PRINCIPAIS TIPOS DE IRREGULARIDADES DE OPERAÇÃO EM ROLAMENTOS E POSSIVEIS CAUSAS

TABELA 5.1- CARACTERIZAÇÃO DE IRREGULARIDADES

IRREGULARIDADES	POSSIVEIS CAUSAS	CONTRA MEDIDAS
SOM BARULHO IRREGULAR	RACHAS, CORROSÃO RASPAS NAS PISTAS	REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO, LIMPEZA, MELHORA DOS SELOS, USO DE LUBRIFICANTES DE LIMPEZA
	BRINELAMENTO	REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO E MANUSEIO CUIDADOSO
	RACHAS NOS TRILHOS	REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO
	LIMPEZA EXCESSIVA	CORREÇÃO DO AJUSTE, DESOBSTRUÇÃO E CORREÇÃO DA PRECARGA
	PENETRAÇÃO DE PARTÍCULAS ESTRANHAS	REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO, LIMPEZA, MELHORA DOS SELOS, RELUBRIFICAÇÃO COM LUBRIFICANTE LIMPO
	RACHAS OU LASCAS NA SUPERFÍCIE DAS ESFERAS	REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO

TABELA 5.2 CARACTERIZAÇÃO DE IRREGULARIDADES

IRREGULARIDADES	POSSÍVEIS CAUSAS	CONTRA MEDIDAS
VIBRAÇÕES	BRINELAMENTO	TROCA DO ROLAMENTO E MANUSEIO CUIDADOSO
	LASCAMENTO	REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO
	MONTAGEM INCORRETA	CORREÇÃO DO ESQUADRO ENTRE O EIXO E O ALOJAMENTO OU DO ESPAÇADOR
	PENETRAÇÃO POR PARTICULAS ESTRANHAS	REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO, LIMPEZA, CORREÇÃO DOS SELOS
VAZAMENTO OU DESLOCAMENTO DO LUBRIFICANTE	MUITA LUBRIFICAÇÃO PENETRAÇÃO POR PARTÍCULAS ESTRANHAS OU ABRASIVAS	REDUZIR A LUBRIFICAÇÃO, SELECIONAR GRAXA MAIS VISCOSA, TROCAR O ROLAMENTO. LIMPAR O ENVOLTÓRIO E PARTES ADJACENTES
CRESCIMENTO IRREGULAR DA TEMPERATURA	EXCESSO DE LUBRIFICANTE	REDUZIR QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE SELECIONAR GRAXA MAIS VISCOSA
	LUBRIFICANTE IMPROPRIO OU INSUFICIENTE	COMPLETAR OU SELECIONAR O LUBRIFICANTE PROPRIO
	CARGA IRREGULAR	CORREÇÃO DO AJUSTE DESOBSTRUÇÃO INTERNA PRE- CARGA, POSIÇÃO DO ENVOLTÓRIO
	MONTAGEM INCORRETA	CORREÇÃO DO ALINHAMENTO DO EIXO E ENVOLTÓRIO EXATIDÃO NO MÉTODO DE MONTAGEM
	ARRASTAMENTO DE SUPERFÍCIES AJUSTADAS, FRICÇÃO EXCESSIVA DO SELO	CORREÇÃO DOS SELOS, REPOSIÇÃO DO ROLAMENTO, CORREÇÃO AJUSTE OU MONTAGEM

5.3 FALHAS EM ROLAMNETOS E CAUSAS PROVÁVEIS

TABELA 5.3 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
LASCAS EM UM LADO DO TRILHO DE ROLAMENTOS RADIAIS LASCAS EM UM DOS TRILHOS DE DUPLA FILA	CARGA AXIAL IRREGULAR	UM AJUSTE LIVRE DEVE SER USADO QUANDO SE MONTAR O ANÉL EXTERNO DE ROLAMENTOS LIVRES PARA PERMITIR EXPANSÃO AXIAL DO EIXO
LASCAS NO TRILHO DE FORMA SIMÉTRICA	EXCENTRICIDADE DO FURO NO ENVOLTÓRIO	CORRIGIR O ENVOLTÓRIO COM DEFEITO
LASCAS INCLINADAS RELATIVAMENTE AO TRILHOS EM ROLAMENTOS DE ESFERAS RADIAIS LASCAS PERTO DO CANTO DO TRILHO E SUPERFÍCIES ROLANTEE EM ROLAMENTOS DE ROLOS	MONTAGEM IMPRÓPRIA DEFLEXÃO DO EIXO CENTRAGEM E TOLERÂNCIAS INADEQUADAS PARA O EIXO E ENVOLTÓRIO	CUIDADOS NA MONTAGEM E CENTRAGEM, SELEÇÃO DE ROLAMENTOS COM MAIOR TOLERÂNCIA E CORRIGIR O ALINHAMENTO ENTRE O EIXO E O MANCAL

TABELA 5.4 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
LASCAS NOS TRILHOS COM O MESMO ESPAÇAMENTO DOS ELEMENTOS ROLANTES	GRANDE CARGA DE CHOQUE DURANTE A MONTAGEM, FERRUGEM ENQUANTO O ROLAMENTO ESTÁ FORA DE OPERAÇÃO POR UM PERIODO PROLONGADO	SER CUIDADOSO NA MONTAGEM E APLICAR ANTI-FERRUGEM QUANDO A OPERAÇÃO DA MÁQUINA É SUSPENSA POR UM LONGO PERÍODO
LASCAMENTO PREMATURO TRILHOS E ELEMENOS ROLANTES	DESOBSTRUÇÃO INSUFICIENTE, CARGA EXCESSIVA LUBRIFICANTE IMPRÓPRIO, FERRUGEM, ETC	SELECIONAR AJUSTE PRÓPRIO, DESOBSTRUIR O ROLAMENTO, USAR LUBRIFICANTE PRÓPRIO
LASCAMENTO PREMATURO DO ROLAMENTO TIPO DUPLEX	PRE-CARGA EXCESSIVA	AJUSTAR A PRE-CARGA

TABELA 5.5 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
MATERIAL ESTRANHO SUJEIRA ENTRE O TRILHO E A SUPERFÍCIE DO ELEMENTO ROLANTE	LUBRIFICAÇÃO INICIAL INADEQUADA GRAXA VISCOSA ACELERAÇÃO RÁPIDA	USAR GRAXA MENOS VISCOSA E EVITAR A ACELERAÇÃO RÁPIDA
MATERIAL ESTRANHO ESPIRAL OU SUJEIRA NA SUPERFÍCIE NAS ESFERAS	ANÉIS DO TRILHO NÃO ESTÃO PARALELOS E HÁ VELOCIDADE EXCESSIVA	CORRIGIR A MONTAGEM APLICAR UMA PRE-CARGA OU SELECIONAR OUTRO TIPO DE ROLAMENTO
MATERIAL ESTRANHO SUJEIRA ENTRE FACE DOS ROLETES E A NERVURA-GUIA	LUBRIFICAÇÃO INADEQUADA, MONTAGEM INCORRETA CARGA AXIAL EXCESSIVA	SELECIONAR LUBRIFICANTES PRÓPRIOS MODIFICAR A MONTAGEM

TABELA 5.6 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
QUEBRA DO ANÉL INTERNO OU EXTERNO	CARGA EXCESSIVA DE CHOQUE, INTERFERENCIA EXCESSIVA DE AJUSTE, CILINDRICIDADE DO EIXO INCORRETA APERTO EXCESSIVO DA BUCHA CONICA, TEMPERATURA EXCESSIVA,	EXAMINAR CONDIÇÕES DE CARGA, MODIFICAR O AJUSTE DO ROLAMENTO E DA BUCHA
QUEBRA DO ELEMENTO ROLANTE RUPTURA DA NERVURA	AVANÇO DAS LASCAS CHOQUE APLICADO EM DIREÇÃO A NERVURA DURANTE A MONTAGEM MANUAL	CUIDADO NO MANUSEIO E MONTAGEM
FRATURA DA GAIOLA	CARGA ANORMAL DA GAIOLA NA MONTAGEM OU LUBRIFICAÇÃO INCORRETA	REDUÇÃO DO ERRO DE MONTAGEM E INSPEÇÃO DA LUBRIFICAÇÃO E DO LUBRIFICANTE

TABELA 5.7 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

ENTALHE		
TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
ENTALHES NAS CAVAS COM O MESMO ESPAÇAMENTO DOS ELEMENTOS ROLANTES	ÁREA DE CHOQUE DURANTE A MONTAGEM OU EXCESSIVA CARGA COM O EQUIPAMENTO PARADO	CUIDADO NO MANUSEIO
ENTALHES NAS CAVAS E ELEMENTOS ROLANTES	MATERIAL ESTRANHO TIPO FRAGMENTOS	LIMPAR O ALOJAMENTO, MELHORAR O LACRE, USAR UM LUBRIFICANTE LIMPO

TABELA 5.8 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

	DESGASTE ANORMAL	
TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
FALSO BRINELAMENTO	VIBRAÇÕES DO ROLAMENTO SEM ROTAÇÃO, DURANTE TRANSPORTE OU MOVIMENTO OSCILANTE DE PEQUENA AMPLITUDE	PROTEGER O EIXO E O ALOJAMENTO USAR ÓLEO COMO LUBRIFICANTE E REDUZIR A VIBRAÇÃO PELA APLICAÇÃO DE UMA PRE-CARGA
FRICÇÃO	LEVE DESGASTE NO AJUSTE DE SUPERFÍCIE	AUMENTO DE INTERFERÊNCIA E APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTE
DESGASTE DA CAVA ELEMENTOS ROLANTE, NERVURA GAIOLA	PENETRAÇÃO DE MATERIAL ESTRANHO LUBRIFICAÇÃO INCORRETA, FERRUGEM	MELHORAR A SELAGEM, LIMPAR ALOJAMENTO E LUBRIFICANTE
DEFORMAÇÃO	INTERFERÊNCIA INSUFICIENTE EXCESSIVO APERTO DA BUCHA	MODIFICAR O AJUSTE OU APERTO DA BUCHA

TABELA 5.9 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

DESMONTAGEM		
TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
DESCOLORAÇÃO E SOLDAGEM DAS CAVAS E ELEMENTOS ROLANTES, NERVURAS E GAIOLAS	FOLGA INSUFICIENTE INCORRETA LUBRIFICAÇÃO OU MONTAGEM IMPRÓPRIA	REVISÃO DA FOLGA INTERNA E O AJUSTE DO ROLAMENTO, ESTOQUE ADEQUADO DO LUBRIFICANTE MELHORAR O MÉTODO DE MONTAGEM E SUAS PARTES

TABELA 5.10 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

QUEIMADURA ELÉTRICA		
TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
ESFRIAMENTO OU ONDULAÇÃO	FUSÃO POR ARCO ELÉTRICO	INSTALAR UM ARAME PARA CORTAR O FLUXO DE ELETRICIDADE OU ISOLAR O ROLAMENTO

TABELA 5.11 - CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

CORROSÃO OU FERRUGEM		
TIPOS DE FALHAS	CAUSAS PROVÁVEIS	CONTRA MEDIDAS
FERRUGEM E CORROSÃO DAS SUPRFÍCIES DE MONTAGEM E INTERIOR DOS ROLAMENTOS	CONDENSAÇÃO DA ÁGUA DE ORIGEM DO AR, FRICÇÃO OU PENETRAÇÃO POR SUBSTANCIAS CORROSIVAS	CUIDADO NA ESTOCAGEM, EVITAR ALTA TEMPERATURA ALTA UMIDADE, TRATAMENTO PARA PREVENÇÃO DE FERRUGEM é NECESSÁRIO QUANDO A OPERAÇÃO é SUSPENDIDA POR UM LONGO PERÍODO

CAPITULO 6 TIPOS DE ANALISES EM ROLAMENTOS

6.1 INTRODUÇÃO

Para analisar as condições dos rolamentos podemos fazer uma análise no domínio do tempo ou uma análise no domínio da frequência. Os dois tipos de análises podem ser utilizados para análise de defeitos em rolamentos.

A análise no domínio do tempo é importante para o acompanhamento da falha ou a detecção de falhas tendo como principal vantagem o custo e a facilidade de análise. A análise no domínio da frequência é importante para determinar qual componente do rolamento está com problema. Tendo como principal desvantagem o custo e a necessidade de pessoal especializado.

O melhor é usar os dois métodos para análise de falhas em rolamentos, visto que estes são partes fundamentais em quase todas as máquinas e que uma falha no rolamento pode comprometer todo o equipamento, desta forma torna-se de extrema importância a predição da falha no mesmo.

6.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

A análise no domínio do tempo constitui um método de medir vibrações mecânicas em um mancal de rolamentos.

Feita as medições, este método consiste na plotagem dos valores de vibrações medidos no decorrer do tempo , estes são acompanhados e extrapolados, desta forma comparando-os com valores padrões ou com valores de referência estabelecidos para cada rolamento, podemos fazer a predição de quando o rolamento necessita de ser substituído antes de ocorrer a falha.

A figura 6.1 mostra um registro utilizado para a análise no domínio do tempo de um rolamento.

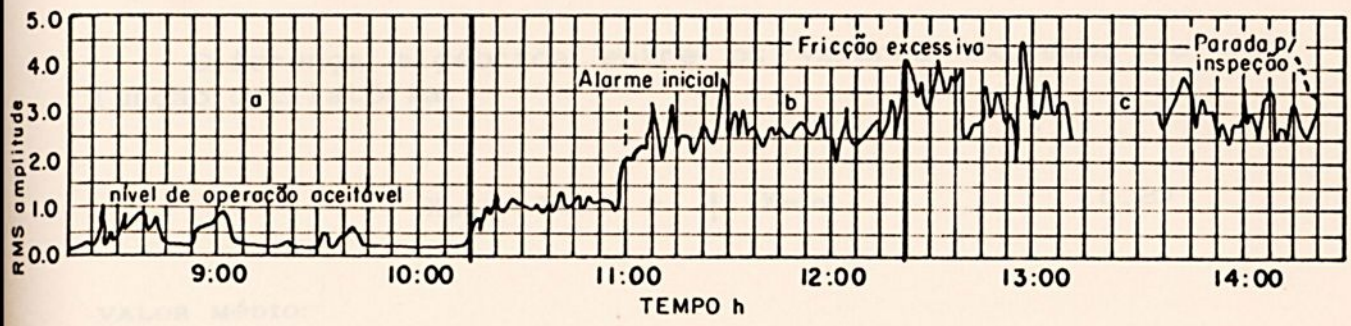


FIGURA 6.1 - A ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO DE UM ROLAMENTO.

A figura pode ser dividida em três partes:

a) nível de vibração aceitável;
o rolamento não apresenta defeito.

b) início de variação dos níveis de vibrações;
início de defeito no rolamento.

c) grandes valores nos níveis de vibrações;
níveis de vibrações maiores que os níveis de referência;
o rolamento apresenta um defeito.
" PARADA PARA INSPEÇÃO "

6.2.1 VALORES CARACTERÍSTICOS

Estes valores de vibrações medidos em função do tempo são conhecidos como valores característicos e o valor mais usual deste é o RMS (valor médio quadrático), mas dependendo do tipo de falha outros valores são indicados para a detecção de falhas em rolamentos. Os valores característicos no domínio do tempo tem como referências os trabalhos de Dyer (D1), Brüel & Kjaer (B7) e Enviroments (E1) e são descritos abaixo:

VALOR DE PICO:

É o valor máximo de uma função oscilatória durante um intervalo.

$$X_{max} \qquad (6.1)$$

VALOR DE PICO A PICO:

Diferença algébrica entre os valores extremos de uma função oscilatória.

$$X_{pp} = X_{max} + | X_{min} | \qquad (6.2)$$

VALOR MÉDIO:

É a soma de diversos pontos numa função dividido pelo número de pontos nela contida.

$$X_{med} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} | X_i | \qquad (6.3)$$

VALOR RMS

Trata-se do valor médio quadrático.

Se cada valor de uma função for elevado ao quadrado, computada a média aritmética desses quadrados e extraída a raiz quadrada dessa média teremos a média quadrática dos valores.

Trata-se de um dos valores mais usuais na medida de vibrações por ser rápido, simples, de pequeno custo e resultados simples, mas para a detecção de falhas em rolamentos este método detecta poucas falhas e muito tarde.

$$RMS = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| \, dt = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |X_i|^2} \qquad (6.4)$$

FATOR DE FORMA:

Relação do valor médio quadrático pelo valor médio.

$$F_f = \frac{RMS}{X_{med}} \qquad (6.5)$$

FATOR DE CRISTA:

Relação do valor de pico pelo valor médio quadrático.

Trata-se de um valor importante pois detecta falhas precoces em rolamentos, sendo uma forma simples, rápida e de pequeno custo, tendo como grande desvantagem a interferência de outras vibrações envolvidas no processo.

$$C = \frac{|X|_{med}}{RMS} \qquad (6.6)$$

DESVIO PADRÃO:

O desvio padrão pode ser obtido em quatro etapas: 1) calcule o desvio de cada valor medido a partir do valor médio, 2) eleve ao quadrado cada desvio, 3) some todos os desvios dos n valores medidos e divida por N-1, 4) extraia a raiz quadrada desse valor.

$$\sigma = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N} (X_i - X_{med})^2 \right]^{1/2}}{(N - 1)^{1/2}} \qquad (6.7)$$

CURTOSIS:

Pode ser obtido em duas etapas: 1) calcule o desvio de cada valor medido a partir do valor médio, eleve a quarta potência cada desvio, some todos os desvios dos n valores medidos e divida pelo número desses valores, 2) calcule o desvio de cada valor medido a partir do valor médio, eleve ao quadrado cada desvio, some todos os desvios dos n valores medidos e divida por n valores, eleve ao quadrado o valor obtido.

Para se obter o valor curtosis divida o valor obtido em 1 pelo valor obtido em 2.

É um dos valores que está tendo maior desenvolvimento na análise de falhas em rolamentos pois a curtosis é muito sensitiva na detecção da falha.

Possuindo a vantagem de pequeno custo e fácil utilização.

$$\beta = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Xi - Xmed)^4}{\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Xi - Xmed)^2\right]^2} \qquad (6.8)$$

6.3 ANÁLISE DE FALHAS EM ROLAMENTOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Para a identificação do elemento defeituoso do rolamento a transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência faz-se necessário.

Os rolamentos possuem quatro partes passíveis de movimento:

- a pista interna, normalmente presa a um eixo;
- a pista externa, na maioria das vezes presa a estrutura de um mancal;
- os elementos rolantes, esferas, rolos ou agulhas;
- o espaçador dos elementos rolantes, chamado de gaiola, grade ou trem.

Para o estudo dos rolamentos torna-se necessária a determinação das frequências características de cada componente do rolamento.

Para o estudo dos movimentos das partes do rolamento são importantes as seguintes medidas nos rolamentos como:

- o diâmetro da pista interna (di);
- o diâmetro da pista externa (de);
- o diâmetro do elemento rolante (D);
- o ângulo de contato das esferas com as pistas (α);
- os raios de curvatura dos sulcos das pistas interna e externa (ρ).

As dimensões externas são úteis à especificação, instalação e montagem do rolamento. As medidas internas necessárias aos cálculos cinemáticos estão mostradas na figura 6.2.

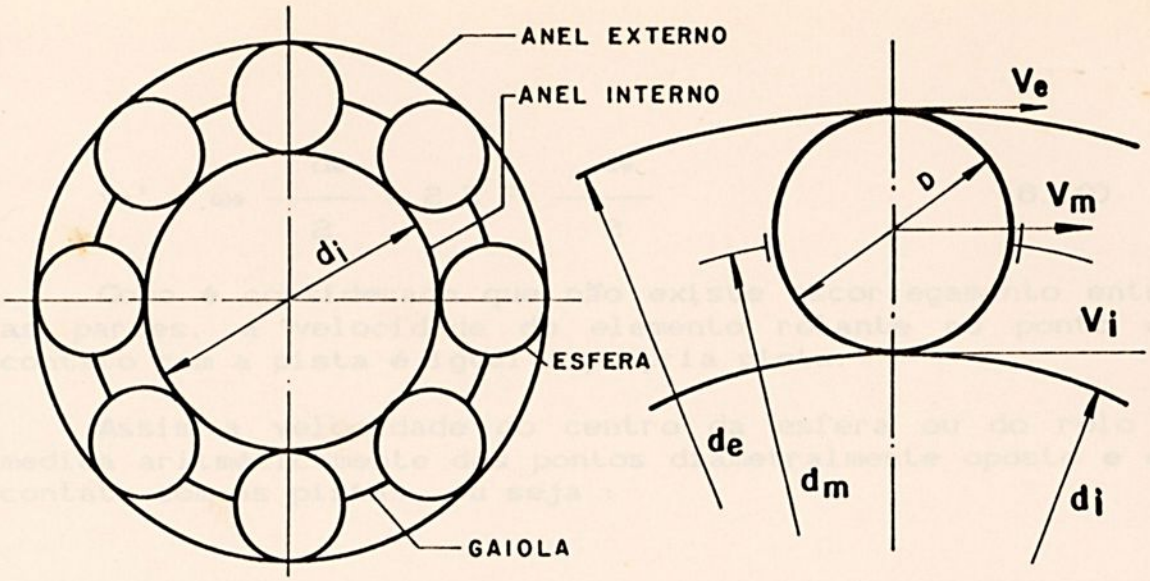


FIGURA 6.2 - DIMENSÕES BÁSICAS DE UM ROLAMENTO.

As frequências características das diversas partes do rolamento são :

Pista Externa	w_e rd/s ou F_e Hz ou n_e (RPM)	
Pista Interna	w_i rd/s ou F_i Hz ou n_i (RPM)	
Gaiola	$F_g = \frac{1}{2} F_i (1 - \gamma) + F_e (1 + \gamma)$ (Hz)	
Esfera	$F_r = \frac{1}{2} \frac{d_m}{D} (F_e - F_i)(1 - \gamma^2)$ (Hz)	

6.3.1 EQUACIONAMENTO DA CINEMÁTICA DOS ROLAMENTOS

Considerando que o eixo gira a ω_i (rd/s), a velocidade tangencial da pista interna v_i', é dado por:

$$v_i' = \omega_i \frac{d_i}{2} = 2 \Pi F_i \frac{d_i}{2} \qquad (6.9)$$

se a pista externa gira a ω_e (rd/s), sua velocidade tangencial é :

$$v_e' = \omega_e \frac{d_e}{2} = 2 \Pi F_e \frac{d_e}{2} \qquad (6.10)$$

Como é considerado que não existe escorregamento entre as partes, a velocidade do elemento rolante no ponto de contato com a pista é igual à própria pista.

Assim a velocidade do centro da esfera ou do rolo é medida aritméticamente dos pontos diametralmente oposto e em contato com as pistas, ou seja :

$$v_m' = \frac{1}{2} (v_i' + v_e') \qquad (6.11)$$

Na figura 6.2 não foi considerado o ângulo de contato do rolamento, porém nos diâmetros reais das pistas onde ocorre o contato com as esferas estes são alterados: o da pista externa fica reduzido e o da interna aumentado.

Para a devida correção, é conveniente trabalhar com o diâmetro primitivo do rolamento, aqui denominado de dm ou de "Pitch Diameter" na literatura estrangeira, diâmetro que passa pelo centro das esferas.

Com o ângulo de contato (α), a linha de contato entre esferas e pistas é alterada com base no cosseno de (α), como ilustrado na Fig.6.3. Os parâmetros são:

di = diâmetro da pista interna
de = diâmetro da pista externa
dm = diâmetro médio (Pitch) (centro das esferas)
D = diâmetro da esfera
(α) = ângulo de contato
ni = rotação da pista interna
ne = rotação da pista externa
nm = rotação do diâmetro médio

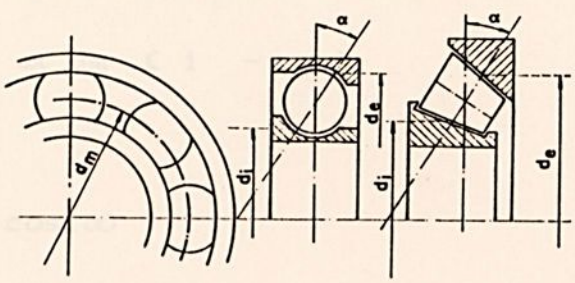


FIGURA 6.3 – DIMENSÕES INTERNAS DE UM ROLAMENTO INCLUINDO O ÂNGULO DE CONTATO.

MOVIMENTOS SIMPLES DO ROLAMENTO

No caso de baixas rotações e/ou altas cargas aplicadas, o rolamento pode ser analisado desprezando os efeitos dinâmicos.

O caso mais geral é assumir que o rolamento é de contato angular e que tanto a pista interna quanto a externa estão em movimento.

A velocidade tangencial na esfera no ponto de contato com a pista externa é então :

$$v_e = \omega_e \left(\frac{dm}{2} + \frac{D}{2} \cos(\alpha) \right) \qquad (6.12)$$

e na pista interna :

$$v_i = \omega_i \left(\frac{dm}{2} - \frac{dm}{2} \cos(\alpha) \right) \qquad (6.13)$$

Simplificando a escrita, tem-se :

$$v_e = \left(\frac{1}{2} \omega_e \, dm \left(1 + \frac{D}{dm} \cos(\alpha) \right) \right.$$

$$v_i = \left(\frac{1}{2} \omega_i \, dm \left(1 - \frac{D}{dm} \cos(\alpha) \right) \right. \qquad \text{ou}$$

$$v_e = \frac{1}{2} \omega_e \, dm \left(1 + y \right) \qquad (6.14)$$

$$v_i = \frac{1}{2} \omega_i \, dm \left(1 - y \right) \qquad (6.15)$$

onde

$$y = \frac{D}{dm} \cos(\alpha) \qquad (6.16)$$

A velocidade do centro da esfera, que é a mesma da gaiola, é e média aritmética das velocidades tangenciais da esfera nos pontos de contato com as pistas, que é :

$$v_g = v_m = \frac{1}{2} (v_i + v_e) \qquad (6.17)$$

ou usando as expressões (6.14) e (6.15) :

$$v_g = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (\omega_i \, d_m (1 - y) + \frac{1}{2} \omega_e \, d_m (1 + y) \right)$$

ou

$$v_g = \frac{d_m}{4} (\omega_i (1 - y) + \omega_e (1 + y))$$

$$v_g = \frac{\Pi}{2} d_m (f_i (1 - y) + f_e (1 + y)) \qquad (6.18)$$

Se for interesse trabalhar com as frequências em rotações por minuto, vem que :

$$v_g = \frac{\Pi}{120} d_m (n_i (1 - y) + n_e (1 + y)) \qquad (6.19)$$

da mesma forma, a velocidade do centro da esfera ou da gaiola, pode ser escrita como :

$$v_g = v_m = w_m \frac{d_m}{2} = \frac{2\Pi}{60} n_m \frac{d_m}{2}$$

ou

$$v_g = \frac{\pi}{60} d_m n_m \qquad (6.20)$$

que levada à expressão (6.19), fornece :

$$n_g = \frac{1}{2} (n_i (1 - y) + n_e (1 + y)) \quad rpm \qquad (6.21)$$

ou

$$f_g = \frac{1}{2} (f_i (1 - y) + f_e (1 + y)) \quad Hz \qquad (6.22)$$

- Determinação da Rotação (SPIN) da Esfera

Para a determinação da rotação absoluta do elemento rolante é preciso considerar com atenção os movimentos cinemáticos que ocorrem simultâneamente na esfera (ou rolo).

Devido às velocidades tangenciais das pistas interna e externa (v_i e v_e), a esfera ou rolo adquire dois tipos de movimento :

1 - uma rotação do elemento rolante devido à diferença das velocidades tangenciais das pistas;

2 - uma translação do elemento rolante em torno do diâmetro primitivo (d_m) em função da velocidade v_g da gaiola.

O spin da esfera, ou sua rotação absoluta deve ser determinada através do conceito de Centro Instântaneo de Rotação ou da diferença vetorial das rotações da esfera, que são :

1 - rotação da esfera como corpo rígido em torno do centro geométrico do rolamento;

2 - rotação da esfera devido ao contato com as pistas interna e externa.

O spin da esfera será determinado utilizando o conceito de movimento relativo entre a pista interna e a gaiola, que é semelhante ao método da diferença vetorial de rotações.

Considerando o movimento relativo entre a gaiola e a pista interna, a velocidade relativa é dada por :

$$\left.\begin{aligned} n_{mi} &= n_g - n_i \quad \text{RPM} \\ \text{ou} & \\ f_{mi} &= f_g - f_i \quad \text{Hz} \end{aligned}\right\} \qquad (6.23)$$

Como a rotação da pista interna é maior do que a da gaiola, um observador instalado na gaiola "vê" a pista interna passar pela gaiola.

É assumido que não ocorre escorregamento entre as partes, daí :

$$v_{mi} = \omega_{mi}\left(\frac{d_m}{2} - \frac{D}{2}\cos(\alpha)\right) = \omega_r \frac{D}{2} \qquad (6.24)$$

ou

$$\omega_{mi}\, d_m (1 - y) = \omega_r D$$

ou

$$n_{mi}\frac{2\pi}{60} d_m (1 - y) = n_r \frac{2\pi}{60} D$$

$$\left.\begin{aligned} n_r &= n_{mi}\frac{d_m}{D}(1 - y) \quad \text{RPM} \\ \text{ou} & \\ f_r &= f_{mi}\frac{d_m}{D}(1 - y) \quad \text{Hz} \end{aligned}\right\} \qquad (6.25)$$

Nestas equações ωr (rd/s), nr (RPM) e fr (Hz), são representações da rotação absoluta do elemento rolante, ou seja, do "spin".

Usando as expressões (6.23) em (6.25), tem-se :

$$nr = (ng - ni)\frac{dm}{D}(1 - y)$$

ou

$$fr = (fg - fi)\frac{dm}{D}(1 - y) \qquad (6.26)$$

Usando as expressões (6.21) e (6.22) em (6.25), pode-se expressar a rotação da esfera em função das rotações das pistas interna e externa (eliminando a rotação da gaiola). Daí então, vem que :

$$nr = \left(\left(\frac{1}{2}(ni(1 - y) + ne(1 + y)) - ni\right)\frac{dm}{D}(1 - y)\right)$$

que após simplificações se apresenta como :

$$nr = \frac{1}{2}\frac{dm}{D}(ne - ni)(1 - y^2) \quad (RPM)$$

$$fr = \frac{1}{2}\frac{dm}{D}(fe - fi)(1 - y^2) \quad (Hz) \qquad (6.27)$$

6.3.2 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DESENVOLVIDAS NO ITEM 6.3.1 PARA A DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS

Determinação das frequências geradas pelo rolamento durante seu serviço e condições de carga.

Durante o funcionamento, a gaiola mantém um movimento relativo constante, tanto em relação à pista interna quanto à externa. As expressões correspondentes são :

$$f_{pgi} = f_i - f_g \qquad (6.28)$$

$$f_{pge} = f_e - f_g \qquad (6.29)$$

Como a gaiola transporta um número N de esferas ou rolos, existirá uma frequência determinada de passagem de esferas pela pista interna e uma outra frequência de passagem de esferas pela pista externa.

Denotando f_{pi} e f_{pe} como sendo as frequências de passagem das esferas pelas pistas internas e externas respectivamente, pode-se escrever que :

$$f_{pi} = N (f_i - f_g) \qquad (6.30)$$

e

$$f_{pe} = N (f_e - f_g) \qquad (6.31)$$

Utilizando a expressão (6.22) para substituir o valor de f_g tem-se :

$$f_{pi} = \frac{1}{2} N (f_i - f_e) (1 + y) \qquad (6.32)$$

$$f_{pe} = \frac{1}{2} N (f_e - f_i) (1 - y) \qquad (6.33)$$

Se no rolamento existir apenas um leve arranhado na pista externa, aparecerá um sinal de vibração na máquina na forma de uma série de pulsos na frequência de passagem das esferas naquela pista. Como o sinal é do tipo trem de pulsos, existirão também uma série de harmônicos daquela frequência.

Similarmente, aparecerá um sinal de vibração com frequência de passagem das esferas na pista interna e seus harmônicos se existir apenas um leve arranhado na pista interna.

As frequências se tornarão múltiplas se existirem muitos arranhados nas pistas.

Quando há imperfeições nas esferas, o elemento modulador é a rotação absoluta da esfera, ou spin.

Se existir apenas um defeito em uma das esferas, aparecerá uma frequência igual ao dobro da rotação da esfera, pois a cada giro o defeito atingirá a pista interna e externa. Aqui também o sinal é do tipo trem de pulsos, a formação de série de harmônicos irá depender do nível liberado de energia pela sequência de impactos.

As frequências se tornarão múltiplas se existirem múltiplos defeitos em uma ou em várias esferas.

Outra fonte de frequências vindas de um rolamento é devida a irregularidades no movimento da gaiola. Pequenos danos, deformações, quebras de partes ou amassamentos, irão gerar esforços dinâmicos que se manifestarão como vibração no mancal do rolamento na frequência da gaiola. A geração da série de harmônicos irá depender da quantidade de energia liberada pelo dano na gaiola.

CAPITULO 7 PARTE EXPERIMENTAL

7.1 PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental da presente dissertação foi desenvolvida no laboratório do Departamento de Mecânica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

O projeto das bancadas de testes foram desenvolvidas por nós e a confecção das mesmas foi feita com o auxílio financeiro da FUNDUNESP.

A figura 7.1 representa um esquema simplificado de uma das bancadas de testes de rolamentos que foi utilizada neste trabalho. O conjunto é composto basicamente de um eixo de aço 1045 com 25 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento fixo, através de dois mancais de rolamento e ligado a um motor através de um acoplamento elástico. Todos estes componentes estão fixos ao solo através de uma base de ferro.

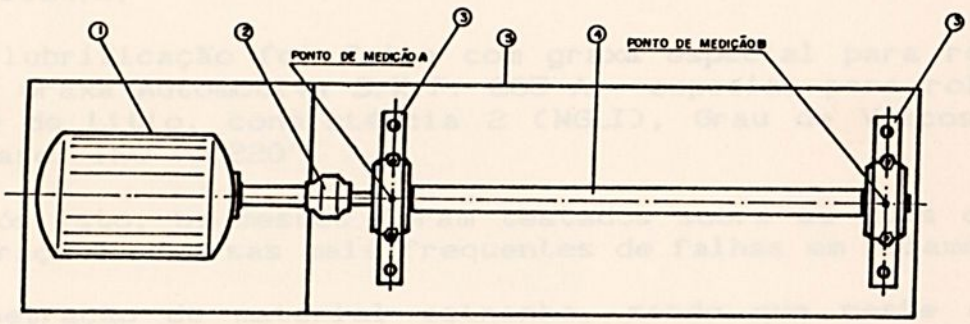


FIG. 7.1. ESQUEMA DA BANCADA DE TESTES

LEGENDA

ITEM	PEÇA
①	MOTOR
②	ACOPLAMENTO
③	MANCAL DE ROLAMENTO
④	EIXO
⑤	BASE DE FERRO

Os pontos de medições das vibrações mecânicas A (mancal próximo ao motor) e B (mancal mais distante do motor) são mostrados na figura e se localizam na parte superior do mancal de rolamentos, que foi usinado para a colocação dos acelerometros.

Não existe praticamente diferença entre medidas de vibrações obtidas no mancal A e mancal B, desta forma todas as nossas medidas foram feitas no ponto de medição B.

As diferenças entre as bancadas de testes foram os pesos das cargas aplicadas nos rolamentos e potência dos motores de acionamento vistos em detalhe no ítem 7.2.

Como pode ser visto também no ítem 7.2 as diferenças de peso existente entre as bancadas não produzem interferência nos testes, pois nestas condições a vida do rolamento estimada por fadiga tende ao infinito.

A parte experimental pode ser dividida em duas etapas:

- **DETERMINAÇÃO DOS VALORES CARACTERÍSTICOS PADRÕES E ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DOS MESMOS NO DOMÍNIO DO TEMPO, DESCRITA A SEGUIR:**

Os rolamentos primeiramente foram testados com as condições ideais de funcionamento para determinação dos valores característicos padrões, estando todos alinhados, balanceados e lubrificados.

A lubrificação foi feita com graxa especial para rolamentos tipo " Graxa Automotiva S.K.F. 265 A - especial para rolamentos, a base de Lítio, consistência 2 (NGLI), Grau de Viscosidade do Oleo base: ISO VG 220".

Após isto, os mesmos foram testados sobre as duas condições de operações adversas mais frequentes de falhas em rolamentos:

a) Penetração de material estranho, sendo que neste caso foi utilizado areia média com tamanho efetivo variável de 0.90 a 1.05 mm e Coeficiente de Uniformidade <= 2.5.

b) Falta de lubrificação, os rolamentos estavam quase sem graxa (quantidade mínima).

Os sinais foram coletados pelo programa AQDADOS no domínio do tempo (ver apêndice A), sendo que os valores característicos foram calculados pelo programa TESTE (ver apêndice A) que possui uma gama maior destes valores característicos.

- DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS PARA FALHAS PROVOCADAS NOS COMPONENTES DOS ROLAMENTOS, DESCRITA A SEGUIR:

Nesta etapa foram provocadas falhas nos diversos componentes dos rolamentos: gaiola, pista interna, pista externa e esfera.

Estes rolamentos foram colocados em funcionanemto para a determinação das frequências características dos diversos componentes com falhas.

Estes sinais foram coletados pelo programa AQDADOS (ver apêndice A) , no domínio do tempo e analisados pelo programa SISDIN (ver apêndice A), no domínio da frequência.

Através do programa ANÁLISE (ver apêndice A) foram feitos os cálculos das frequências características teóricas (Cap. 8, ítem 8.3).

7.2 BANCADA DE TESTES

As bancadas de testes de rolamentos foram projetadas utilizando todos os conceitos de engenharia, ver no apêndice B o projeto de materiais e construção detalhado das mesmas. Mostramos abaixo uma descrição detalhada das bancadas mostrando a caracterísica de cada componente, os cálculos das forças atuantes nos rolamentos e sua vida estimada por fadiga.

BANCADA DE TESTES N. 01

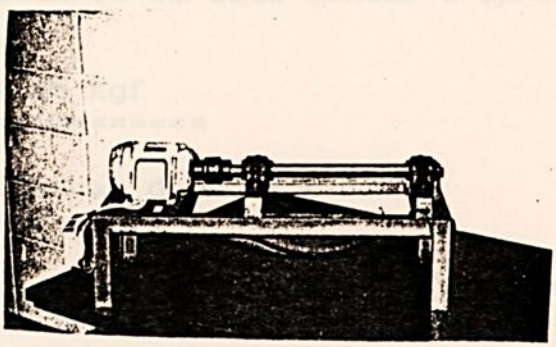


FIGURA 7.2- BANCADA DE TESTES DE ROLAMENTOS

Composição
---

01 eixo (aço 1045) (500 x ϕ 30 x ϕ 25) mm
01 motor elétrico WEG potencia 0.5 CV
01 acoplamento elástico UNIFLEX E-12
02 caixa p/ rolamento SNA 505 TC
02 rolamento rígidos de esferas 6205
01 base eixo motor

Cálculo das Massas Reais e Teóricas

Valor real: 2744 g

Valor calculado:

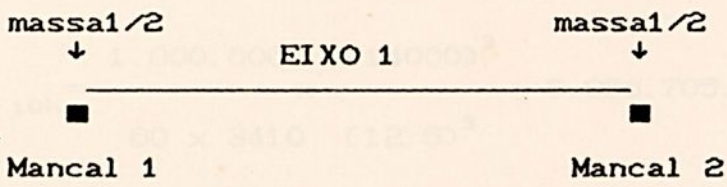
Volume = 321.68 cm^3, o volume foi calculado considerando-se as diferenças de diâmetro existentes no eixo 1.

Densidade = 7.8 g/cm^3, trata-se de um valor aproximado para a densidade do aço 1045

Massa = Densidade x Volume

Massa teórica = 321.68 x 7.8 = 2509.1 g

Força Atuante no Rolamento:



A força atuante em cada mancal é aproximadamente a metade do peso do eixo.

Força = 1.25 Kgf

Características do Rolamento:

Estes dados descritos dos rolamentos foram retirados de página 118 catálogo SKF (Ver ref. S9).

DESIGNAÇÃO: 6205

DIMENSÕES PRINCIPAIS:
diâmetro interno:(d).....25 mm
diâmetro externo:(D).....52 mm
largura:(B).....15 mm

CAPACIDADE DE CARGA:
dinâmica:(C).....14000 N
estática:(C_o).....6950N

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

000234

LIMITE DE LUBRIFICAÇÃO:
graxa:.....12000r/min
óleo:.....15000 r/min

PESO: 0.13 Kg

Vida de um Rolamento: página 28 catálogo SKF (ver ref. S9)

$$L_{10h} = \frac{1.000.000}{60 \times n} \times \frac{(C)^p}{(P)^p}$$

L_{10h} = vida nominal em horas de trabalho
n = velocidade de rotação em r/min
C = capacidade de carga dinâmica em N
P = carga dinâmica equivalente, em N
p = 3 para rolamentos de esferas

$$L_{10h} = \frac{1.000.000}{60 \times 3410} \times \frac{(14000)^3}{(12.5)^3} = 6.866.705.762$$

BANCADAS DE TESTES N.02

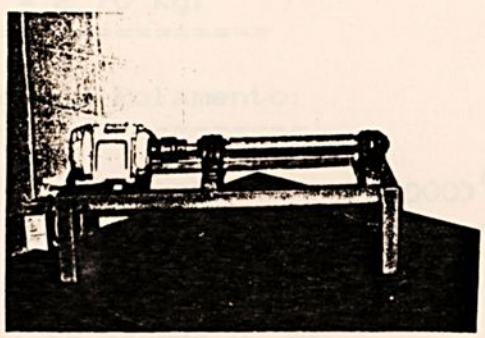


FIGURA 7.3 - BANCADA DE TESTES DE ROLAMENTOS

Composição
---
01 eixo (aço 1045) (500 x ϕ 50 x ϕ 30) mm
01 motor elétrico potência 0.5 CV
01 acoplamento elástico UNIFLEX E-12
02 caixas de rolamento SNA 505 TC
02 rolamentos rígidos de esferas 6205
01 base eixo-motor

Cálculo das Massas Reais e Teóricas

Massa real: 5444 g

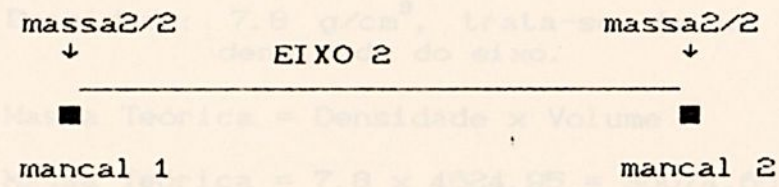
Volume: 698.87 cm^3, o volume foi calculado considerando-se as diferenças existentes no eixo.

Densidade: 7.8 g/cm^3, trata-se de um valor aproximado para a densidade do aço.

Massa Teórica = Densidade x Volume

Massa Teórica = 7.8 g/cm^3 x 688.87 cm^3 = 5381.02 g

Força Atuante no Rolamento



A força atuante em cada mancal é aproximadamente a metade do peso do eixo.

Força = 2.70 Kgf

Vida de um Rolamento:

$$L_{10h} = \frac{1.000.000}{60 \times 3410} \times \frac{(14000)^3}{(27)^3} = 681.718.996$$

BANCADA DE TESTES N. 03

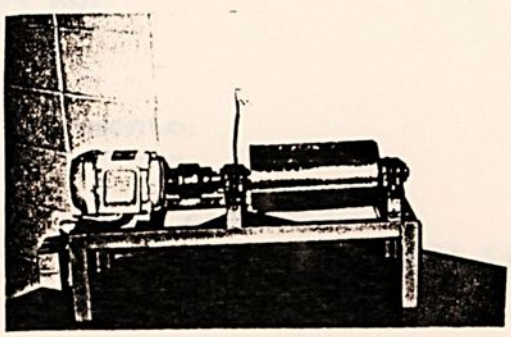


FIGURA 7.4 - BANCADA DE TESTES DE ROLAMENTOS

Composição
---

01 eixo (aço 1045) (500 x ϕ 140 x ϕ 30) mm
01 motor elétrico poténcia 1 C.V.
01 acoplamento elástico UNIFLEX E-12
02 caixas de rolamentos SNA 505 TC
02 rolamentos rígidos 6205
01 base eixo-motor

Cálculo das Massas Reais e Teóricas

Massa Real: 36744 g

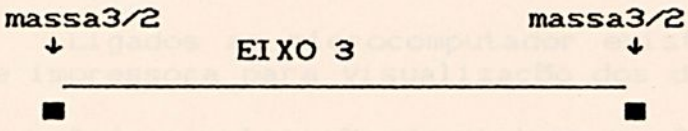
Volume: 4624.95 m^3, o volume foi calculado considerando-se as diferenças existentes no eixo.

Densidade: 7.8 g/cm^3, trata-se de um valor aproximado para a densidade do eixo.

Massa Teórica = Densidade x Volume

Massa Teórica = 7.8 x 4624.95 = 36074,65 g

Força Atuante no Rolamento:



mancal 1 mancal 2

A força atuante em cada mancal é aproximadamente metade do peso do eixo.

Força= 18.04 Kgf
==========

Vida de um Rolamento:

$$L_{10h} = \frac{1.000.000}{60 \times 3450} \times \frac{(14000)^3}{(180.4)^3} = 2.254.146$$

As cargas aplicadas nos rolamentos são muito pequenas, desta forma, a vida estimada por fadiga destes rolamentos praticamente é infinita.

7.3 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

A figura 7.5 mostra um esquema simplificado do sistema de medição, utilizado neste trabalho, dividido em três partes. A primeira parte representa os sensores,sendo que os utilizando foram os acelerômetros piezoelétricos. A segunda parte representa o condicionador de sinais, utilizado como elo de ligação entre a terceira e a primeira parte. A terceira representa o sistema de coleta e análise de dados.

7.3.1. Descrição da parte experimental

Coloca-se o acelerômetro piezoelétrico tipo KD 35 no ponto de medição B da bancada de testes mostrado, parte superior do mancal, na figura 7.1 e este é ligado ao condicionador de sinais através de um cabo coaxial.

Este condicionador de sinais é ligado ao microcomputador PC XT 286, que contém uma placa A/D que transforma os sinais analógicos em digitais.

Ligados ao microcomputador existem dois periféricos, monitor e impressora para visualização dos dados.

Após a colocação do sistema em funcioanamento faz-se a coleta dos dados através do software AQDADOS, este tempo de coleta é de 10 s, estes dados coletados ficam armazenados para serem analisasdos posteriormente pelos softwares ANALISE, SISDIN e TESTE.

A bancada de testes não pode funcionar initerruptamente pois o laboratório era usado constantemente para outra atividades escolares.

A repetibilidade dos valores obtidos garantiu a validade dos testes.

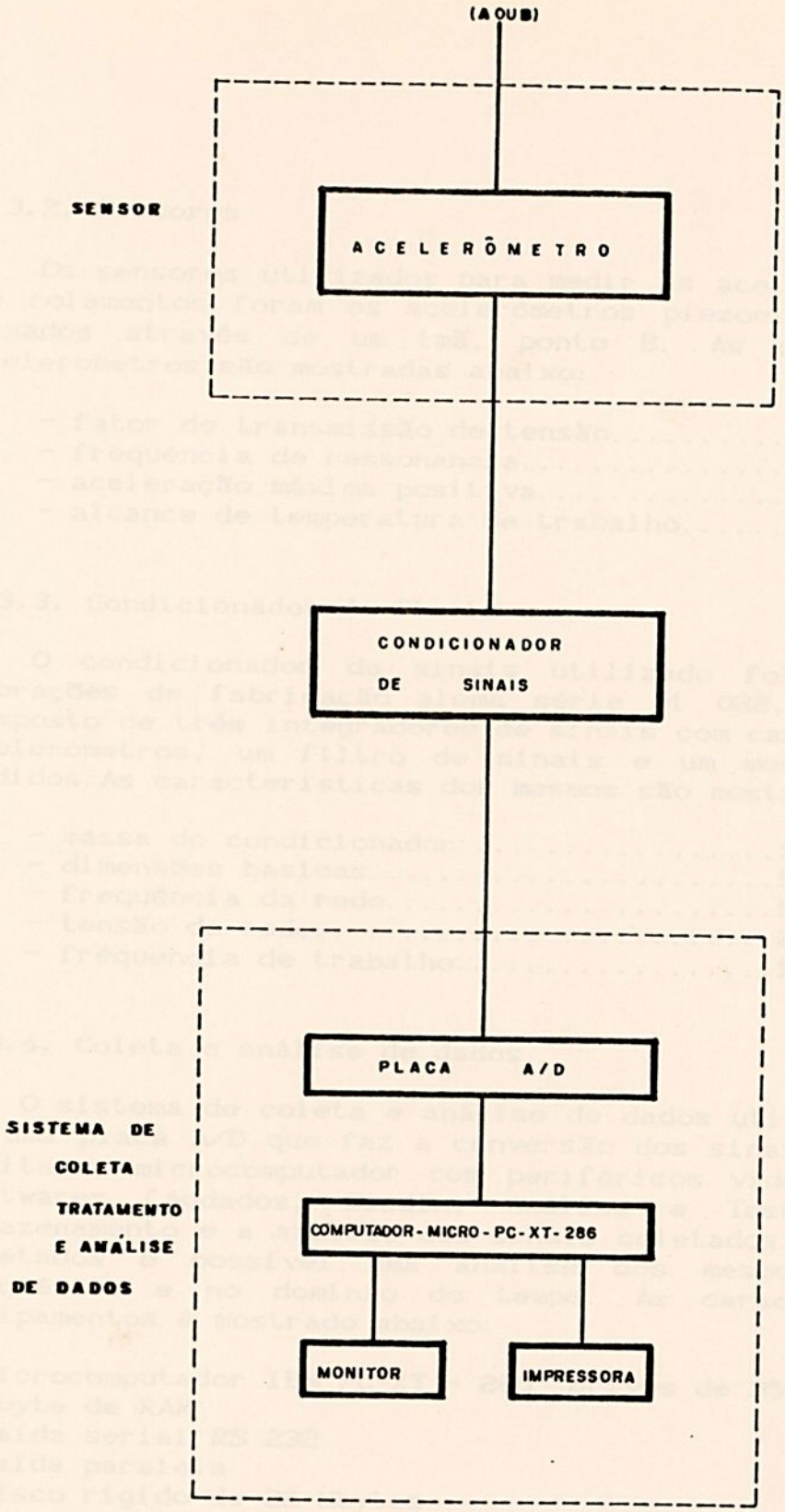


FIG. 7.5 - ESQUEMA DA INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

7.3.2. Sensores

Os sensores utilizados para medir as acelerações nos mancais de rolamentos foram os acelerômetros piezoelétricos tipo KD 35 fixados através de um imã, ponto B. As características dos acelerometros são mostradas abaixo:

- fator de transmissão de tensão.....5 +- 2% mV/ms^{-2}
- frequência de ressonancia.....20 KHz
- aceleração máxima positiva.....3000 m/s^2
- alcance de temperatura de trabalho.....-35 a 150 °C

7.3.3. Condicionador de Sinais

O condicionador de sinais utilizado foi o analisador de vibrações de fabricação alemã série 01 022, número 578 200.4 composto de três integradores de sinais com canais de entrada para acelerometros, um filtro de sinais e um mostrador de valores medidos. As características dos mesmos são mostradas abaixo:

- massa do condicionador.....17 Kg
- dimensões basicas.....540 x 182 x 310 mm
- frequência da rede.....50 - 60 Hz
- tensão da rede.....220 V
- fréquencia de trabalho.....1Hz -10Kz +- 1dB

7.3.4. Coleta e análise de dados

O sistema de coleta e análise de dados utilizados é composto de uma placa A/D que faz a conversão dos sinais analógicos para digitais, microcomputador com periféricos video e impressora e softwares (Aqdados, Sisdin, Análise e Teste) que fazem o armazenamento e a análise dos sinais coletados. Com estes sinais coletados é possível uma análise dos mesmos no domínio da frequência e no domínio do tempo. As características destes equipamentos é mostrado abaixo:

- Microcomputador IBM PC-XT - 286 drives de 360 Kbytes
  Mbyte de RAM
  saída serial RS 232
  saída paralela
  disco rígido de 32 Mbytes

- Video monitor CGA

- Impressora matricial de 9 pinos com 250 cps

- Placa conversora analógica - digital
  modelo LINX CAD 10/26

- Softwares (ver apêndice A e B)

7.3.5. Calibração de sinais

Todos os acelerômetros devem ser calibrados antes de serem utilizados. Os acelerometros utlizados foram calibrados com a mesa de calibração série 11 032, número 560 600.6, de fabricação alemã e com as características descritas abaixo:

- mesa de calibração
  carga admissível..... 1Kg
  aceleração..... 10 m/s^2
  frequência.....79.0 Hz
  limites de erro.....+-5%
  massa.....450 g
  dimensões básicas.....140 x 55 x 55 mm

CAPITULO 8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

8.1 METODO DE COLETA DE DADOS

As coletas de dados foram feitas no período de cinco meses, de maio à setembro de 1993, totalizando dezenove semanas de medição.

O intervalo das coletas foi definido como:

- diário no início dos testes, quando o rolamento estava em perfeitas condições de funcionamento, para determinação dos valores e frequências características padrões;

- semanal na fase intermediária, quando o rolamento sob a condição adversa, falta de lubrificação ou penetração de material estranho, sofreu danos. Desta forma fizemos um acompanhamento da evolução da falha;

- diário na fase final, com o acompanhamento da falha na fase intermediária, observamos que os niveis de evoluções dos valores começaram a crescer de maneira rápida, assim diminuimos o intervalo de coleta de dados.

Nas semanas 17 à 19 foram provocadas falhas nos componentes dos rolamentos: pista externa, pista interna, gaiola e esfera para se fazer um comparação das frequências características teóricas com as frequências características em condições de operação.

Os valores medidos nas bancadas 02 e 03 foram muito próximos da bancada 01, pois como vimos no capítulo 07 as cargas aplicadas nos rolamentos são muito pequenas comparadas com a capacidade do mesmo, por isto são mostrados aqui apenas os valores obtidos na bancada 01.

8.2. VALORES CARACTERÍSTICOS OBTIDOS

Com a bancada de testes em funcionamento no inicio do mês de maio iniciamos a coleta de dados, estes foram coletados através do software AQDADOS e o cálculo dos valores característicos foram feitos pelo software TESTE (ver apêndice A).

Os valores característicos coletados e calculados, com as suas respectivas unidades foram:

- valor de pico.....m/s^2
- valor pico à pico.....m/s^2
- valor médio.....m/s^2
- desvio padrão.....m/s^2
- fator de crista.....adimensional
- fator de forma.....adimensional
- rms.....m/s^2
- curtosis.....m/s^2

Nas tabelas 8.1 á 8.5 mostramos os valores característicos obtidos na bancadas de testes de rolamentos número 01, sendo esta acionada por um motor de 0.5 C.V. e tendo um eixo de ligação entre os mancais de rolamentos de peso aproximado de 2744 g.

Na tabela 8.1, mostrada a seguir os rolamentos estão em funcionamento sob as condições ideais de funcionamento. As medidas (MED 01 à MED 05) dos valores característicos foram feitas diáriamente após o funcionamento ininterrupto de 3 (três) horas da bancada de testes.

Na tabela os valores estão expressos em mV e para a conversão dos mesmos em m/s^2 ver ítem 8.6..

Os resultados obtidos tiveram uma boa repetibilidade, com excessão do fator de forma e valor médio. que apresentaram um crescimento muito irregular.

Estes valores característicos são denominados valores padrões.

TABELA 8.1 - VALORES CARACTERÍSTICOS DO ROLAMENTO 6205

BANCADA N.01	MOTOR: 0.5 CV		MASSA: 2744 G		
CONDIÇÃO ADVERSA: ROLAMENTO EM CONDIÇÕES IDEAIS					
VALOR CARACTERÍSTICO	MED 01	MED 02	MED 03	MED 04	MED 05
VALOR DE PICO	1.8262	1.5729	2.4532	2.4942	1.9564
VALOR PICO A PICO	3.4009	3.0615	3.3545	3.3642	3.5950
VALOR MÉDIO	0.0027	0.0250	0.0041	0.0290	0.0156
DESVIO PADRÃO	0.4286	0.4100	0.4130	0.4323	0.4451
FATOR DE CRISTA	4.2595	3.8646	5.9399	5.4935	4.5255
FATOR DE FORMA	158.7778	16.2720	100.8385	19.2652	27.7115
RMS	0.4287	0.4068	0.4130	0.4431	0.4323
CURTOSIS	3.4682	3.2196	3.4259	3.3420	3.3250

Na tabela 8.2, mostrada a seguir,os rolamentos estão em funcionamento sob a condição adversa falta de lubrificação, ou seja, o rolamento está em funcionamento praticamente sem lubrificação, quantidade mínima exigida. As medidas (MED 06 à MED 10) foram feitas semanalmente após o funcionamento ininterrupto de 3 (três) horas das bancadas de testes.

Na tabela os valores estão expressos em mV e para a conversão dos mesmos em m/s^2 ver ítem 8.6..

Fazemos pela tabela um acompanhamento da evolução dos valores característicos no domínio do tempo.

TABELA 8.2 - VALORES CARACTERÍSTICOS DO ROLAMENTO 6205

BANCADA N.01	MOTOR: 0.5 CV		MASSA: 2744 G		
CONDIÇÃO ADVERSA: FALTA DE LUBRIFICAÇÃO					
VALOR CARACTERÍSTICO	MED 06	MED 07	MED 08	MED 09	MED 10
VALOR DE PICO	2.5090	2.9650	3.4259	2.0294	2.3657
VALOR PICO A PICO	4.9872	3.9819	5.6972	4.4897	4.6973
VALOR MÉDIO	0.0044	0.0069	0.0040	0.0244	0.0117
DESVIO PADRÃO	0.5000	0.5520	0.5644	0.5538	0.5909
FATOR DE CRISTA	5.0296	5.3772	6.0797	3.6543	4.0507
FATOR DE FORMA	113.4090	79.9130	140.8517	22.1926	49.9145
RMS	0.4990	0.5514	0.5634	0.5597	0.5840
CURTOSIS	3.2047	4.9830	5.0253	3.5938	3.1328

Na tabela 8.3, mostrada a seguir, os rolamentos estão em funcionamento sob a condição adversa falta de lubrificação, ou seja, o rolamento está em funcionamento praticamente sem lubrificação, quantidade mínima exigida. As medidas (MED 11 à MED 15) que foram feitas diáriamente após o funcionamento ininterrupto de 3 (três) horas das bancadas de testes.

Na tabela os valores estão expressos em mV e para a conversão dos mesmos em m/s^2 ver ítem 8.6.

Nesta tabela, observamos um aumento entre 50% a 100% nos valores rms e valor de pico que nos obrigraram a parar o equipamento com uma suspeita de falha no rolamento.

TABELA 8.3 - VALORES CARACTERÍSTICOS DO ROLAMENTO 6205

BANCADA N.01	MOTOR: 0.5 CV		MASSA: 2744 G		
CONDIÇÃO ADVERSA: FALTA DE LUBRIFICAÇÃO					
VALOR CARACTERÍSTICO	MED 11	MED 12	MED 13	MED 14	MED 15
VALOR DE PICO	2.6763	3.4567	3.6568	3.9876	3.8945
VALOR PICO A PICO	4.9365	4.8995	4.5996	4.6094	6.1646
VALOR MÉDIO	0.0019	0.0025	0.0030	0.0020	0.0059
DESVIO PADRÃO	0.5950	0.6170	0.6978	0.7287	0.8980
FATOR DE CRISTA	4.5055	5.6097	5.7307	5.4729	4.6457
FATOR DE FORMA	312.6315	246.4800	212.7933	364.9000	158.1698
RMS	0.5940	0.6162	0.6981	0.7286	0.8983
CURTOSIS	3.0051	3.0020	3.1208	3.1264	2.8426

Na tabela 8.4, mostrada a seguir, os rolamentos estão em funcionamento sob a condição adversa penetração de material estranho, o rolamento está em funcionamento com partículas de areia em seu interior. As medidas (MED 06 à MED 10) que foram feitas semanalmente após o funcionamento ininterrupto de 3 (três) horas das bancadas de testes.

Nesta tabela os valores estão expressos em mV e para a conversão dos mesmos em m/s^2 ver ítem 8.6..

Com esta tabela podemos acompanhar a evolução dos valores característicos no domínio do tempo.

TABELA 8.4 - VALORES CARACTERÍSTICOS DO ROLAMENTO 6205

BANCADA N.01	MOTOR: 0.5 CV		MASSA: 2744 G		
CONDIÇÃO ADVERSA: PENETRAÇÃO DE MATERIAL ESTRANHO (AREIA)					
VALOR CARACTERÍSTICO	MED 06	MED 07	MED 08	MED 09	MED 10
VALOR DE PICO	1.4069	2.7739	2.8026	2.9199	2.1069
VALOR PICO A PICO	3.9331	6.0425	5.9857	5.9296	4.5654
VALOR MÉDIO	0.0017	0.0026	0.0135	0.0118	0.0185
DESVIO PADRÃO	0.2597	0.2458	0.2910	0.3128	0.3250
FATOR DE CRISTA	9.7321	11.7712	9.6342	9.3607	6.4867
FATOR DE FORMA	152.7058	90.6154	21.5481	26.4322	17.5567
RMS	0.2596	0.2356	0.2909	0.3119	0.3248
CURTOSIS	9.0141	10.7275	11.9502	9.5137	7.1968

Na tabela 8.5, mostrada a seguir, os rolamentos estão em funcioamento sob a condição adversa penetração de material estranho, ou seja, o rolamento está em funcionamento com partículas de areia. As medidas (MED 11 à MED 15) que foram feitas diáriamente após o funcionamento ininterrupto de 3 (três) horas das bancadas de testes.

Na tabela os valores estão expressos em mV e para a conversão dos mesmos em m/s^2 ver ítem 8.6.

Nesta tabela, observamos um aumento entre 50% a 100% nos valores rms e valor de pico que nos obrigraram a parar o equipamento com uma suspeita de falha no rolamento.

TABELA 8.5 - VALORES CARACTERÍSTICOS DO ROLAMENTO 6205

BANCADA N.01 MOTOR: 0.5 CV MASSA: 2744 G					
CONDIÇÃO ADVERSA: PENETRAÇÃO DE MATERIAL ESTRANHO (AREIA)					
VALOR CARACTERÍSTICO	MED 11	MED 12	MED 13	MED 14	MED 15
VALOR DE PICO	3.3813	3.4351	3.4448	3.4521	4.5592
VALOR PICO A PICO	5.8765	7.0142	6.9995	7.0142	7.0225
VALOR MÉDIO	0.0104	0.0300	0.0124	0.0296	0.0999
DESVIO PADRÃO	0.4982	0.4859	0.5630	0.7009	0.9320
FATOR DE CRISTA	7.7187	7.0789	6.1290	4.9301	4.8864
FATOR DE FORMA	42.1250	16.1766	45.9709	29.6554	27.9819
RMS	0.4981	0.4859	0.5626	0.7002	0.9918
CURTOSIS	7.9621	8.7965	5.7555	5.1945	5.8934

8.3. GRÁFICO DOS VALORES CARACTERÍSTICOS OBTIDOS

Mostramos neste ítem os gráficos dos valores característicos com os seus respectivos significados.

A figura 8.1 e 8.2 mostra os gráficos da evolução dos valores característicos valor de pico e valor pico à pico para o rolamento sob as condições adversas falta de lubrificação e penetração de material estranho conhecidos como "Gráficos de Tendências ".

A figura 8.1, pode ser dividido em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa falta de lubrificação.

A figura 8.2 pode também ser dividido em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa penetração de material estranho.

Como podemos observar nos gráficos, no início dos testes com o rolamento em condições ideais apresentam praticamente valores constantes e que sob condições adversas estes valores tendem a crescer com o passar do tempo e crescimento da falha, mas ainda apresentando um crescimento praticamente linear. Sendo estes, desta forma valores importantes para o acompanhamento de falhas em rolamentos.

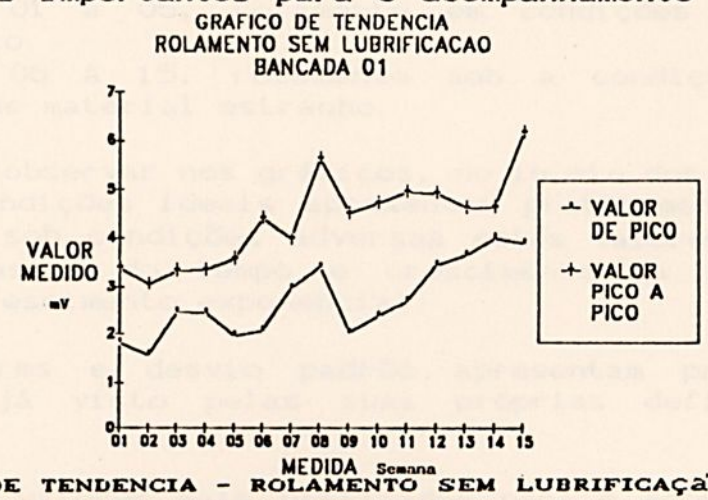


FIGURA 8.1 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO
VALOR DE PICO E VALOR PICO A PICO

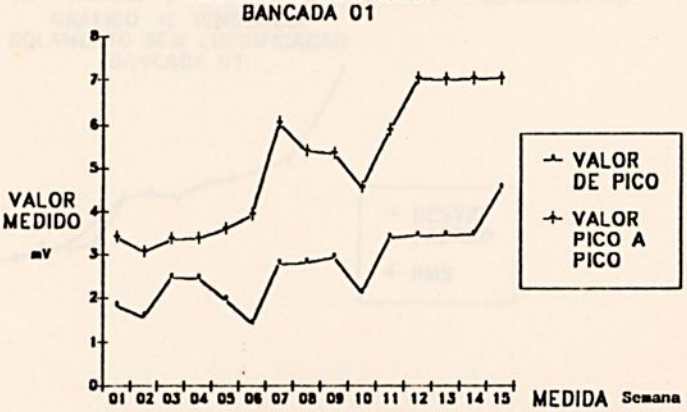


FIGURA 8.2 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO COM AREIA
VALOR DE PICO E VALOR PICO A PICO

A figura 8.3 e 8.4 mostra os gráficos da evolução dos valores característicos rms e desvio padrão para o rolamento sob as condições adversas falta de lubrificação e penetração de material estranho conhecidos como "Gráficos de Tendências ".

A figura 8.3, pode ser dividido em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa falta de lubrificação.

A figura 8.4 pode também ser dividido em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa penetração de material estranho.

Como podemos observar nos gráficos, no ínicio dos testes com o rolamento em condições ideais apresentam praticamente valores constantes e que sob condições adversas estes valores tendem a crescer com o passar do tempo e crescimento da falha, mas apresentando um crescimento exponencial.

Os valores rms e desvio padrão apresentam praticamente valores iguais, já visto pelas suas próprias definições no capítulo 6.

Estes são os valores mais utilizados para o acompanhamento de falhas em rolamentos, devido ao fato que o mesmo possui um grande crescimento próximo falha total do rolamento.

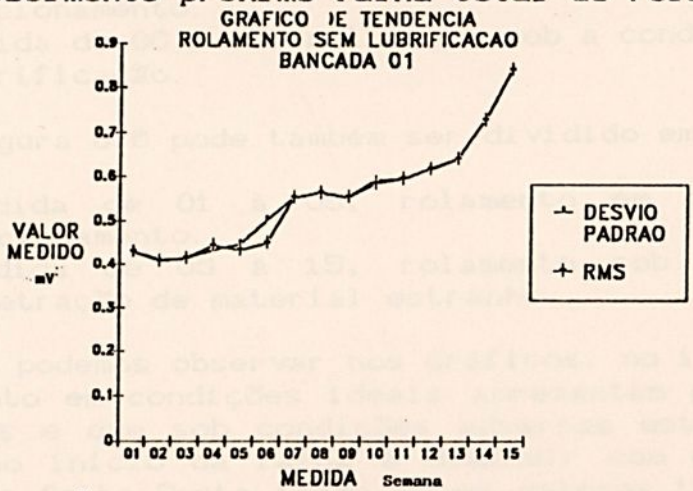


FIGURA 8.3 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO RMS E DESVIO PADRÃO



FIGURA 8.4 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO COM AREIA
RMS E DESVIO PADRÃO

A figura 8.5 e 8.6 mostra os gráficos da evolução dos valores característicos fator de crista e curtosis para o rolamento sob as condições adversas falta de lubrificação e penetração de material estranho conhecidos como "Gráficos de Tendências ".

A figura 8.5, pode ser dividido em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa falta de lubrificação.

A figura 8.6 pode também ser dividido em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa penetração de material estranho.

Como podemos observar nos gráficos, no início dos testes com o rolamento em condições ideais apresentam praticamente valores constantes e que sob condições adversas estes valores tendem a crescer no início da falha e diminuir com o passar do tempo e aumento da falha. Desta forma estes valores tornam-se importantes para a detecção precoce de falhas em rolamentos.

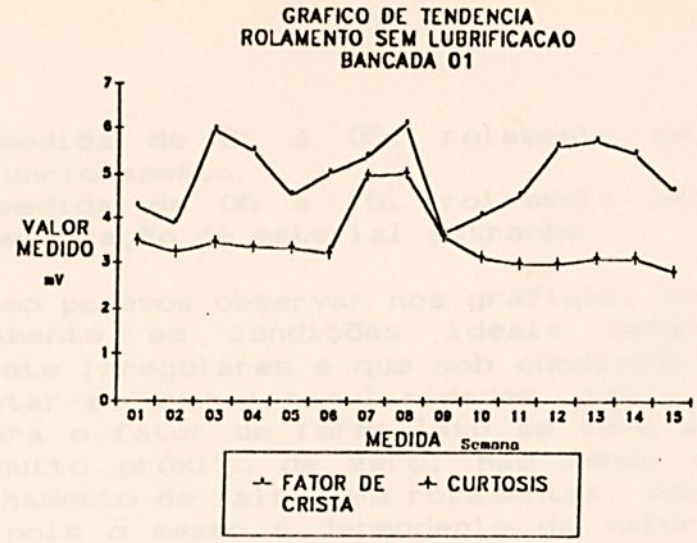


FIGURA 8.5 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO FATOR DE CRISTA E CURTOSIS

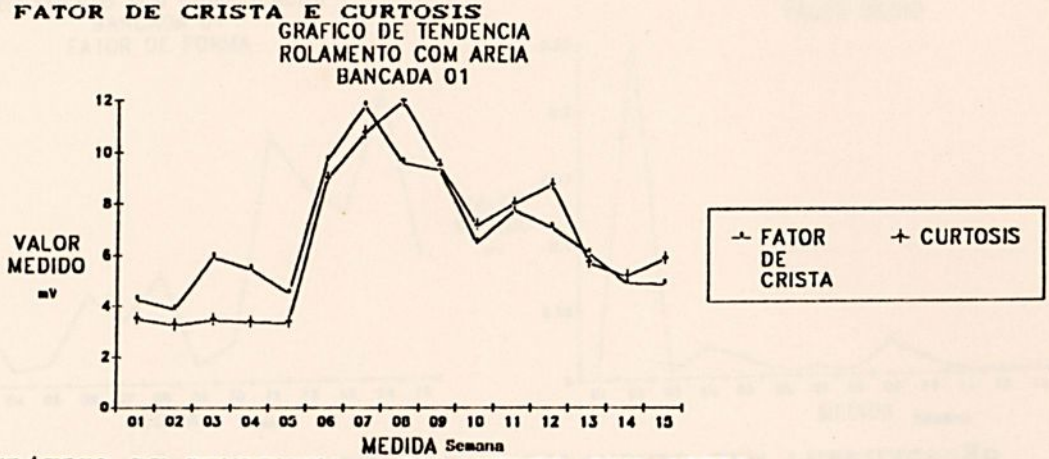


FIGURA 8.6 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO COM AREIA FATOR DE CRISTA E CURTOSIS

A figura 8.7 e 8.8 mostra os gráficos da evolução dos valores característicos fator de forma e valor médio para o rolamento sob as condições adversas falta de lubrificação e penetração de material estranho conhecidos como "Gráficos de Tendências ".

A figura 8.7, pode ser dividida em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa falta de lubrificação.

A figura 8.8 pode também ser dividido em duas partes:

- medida de 01 à 05, rolamento em condições ideais de funcionamento.
- medida de 06 à 15, rolamento sob a condição adversa penetração de material estranho.

Como podemos observar nos gráficos, no início dos testes com o rolamento em condições ideais estes apresentam valores totalmente irregulares e que sob condições adversas estes tendem a aumentar as suas irregularidades tanto para o valor médio, como para o fator de forma. Isto se deve ao fato do valor médio estar muito próximo de zero, não sendo assim indicado para o acompanhamento de falhas em rolamentos, juntamente com o fator de forma, pois o mesmo é dependente do valor médio em denominador como visto no capítulo 6.

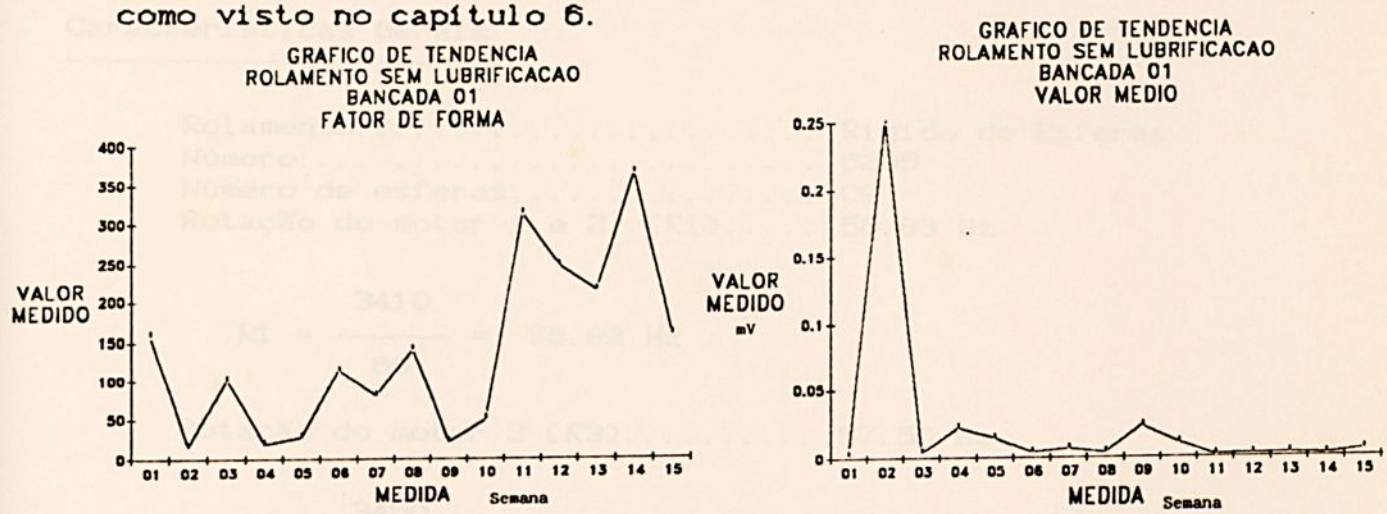


FIGURA 8.7 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO VALOR MÉDIO E FATOR DE FORMA

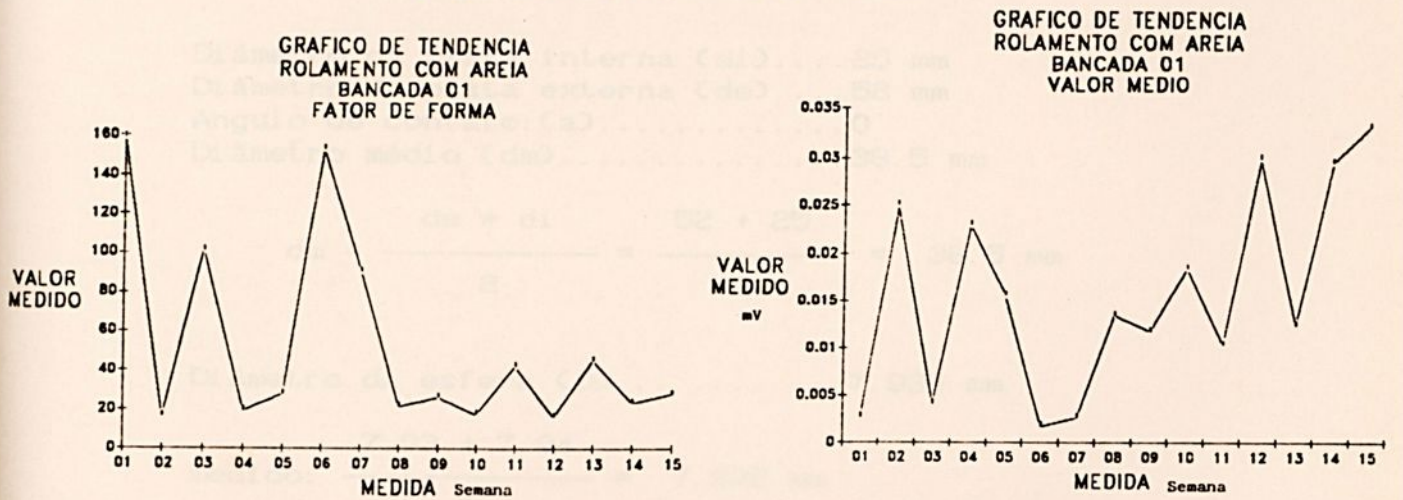


FIGURA 8.8 - GRÁFICO DE TENDENCIA - ROLAMENTO COM AREIA VALOR MEDIO E FATOR DE FORMA

8.4. FREQUENCIAS CARACTERÍSTICAS TEÓRICAS

Mostramos o cálculo das frequências características teóricas baseadas nas fórmulas desenvolvidas no capítulo 6.

Estas frequências podem ser calculadas mais rapidamente através do software TESTE.EXE (ver apêndice A)

CÁLCULO DAS FREQUENCIAS CARACTERÍSTICAS

Características Gerais

Rolamento:..... Rígido de Esferas
Número:..... 6205
Número de esferas..... 09
Rotação do motor 1 e 2..(R1)..... 56.83 Hz

$$R1 = \frac{3410}{60} = 56.83 \text{ Hz}$$

Rotação do motor 3 (R3)..... 57.50 Hz

$$R3 = \frac{3450}{60} = 57.5 \text{ Hz}$$

Diâmetro da pista interna (di)....25 mm
Diâmetro da pista externa (de) ...52 mm
Angulo de contato:(a).....0
Diâmetro médio (dm).....38.5 mm

$$dm = \frac{de + di}{2} = \frac{52 + 25}{2} = 38.5 \text{ mm}$$

Diâmetro da esfera (D).....7.935 mm

$$\text{medido: } \frac{7.93 + 7.94}{2} = 7.935 \text{ mm}$$

$$\text{calculado: } \frac{(de - di)}{2} - 2 \times h_{mim} = \frac{(52 - 25)}{2} - 2 \times 2.8$$

calculado = 13.5 - 5.6 = 7.9 mm

Do Catálogo Geral SKF de rolamentos (S9) temos:

r_s = 1 mm

para r_s = 1 mm → h_{min} = 2.8 mm

Fator multiplicativo (Y).....0.2061

$$Y = \frac{D}{dm} \times \cos(a) = \frac{7.935}{38.5} \times \cos(0) = 0.2061$$

Frequência do anel externo (Fe)...0 Hz (anel fixo)

Frequência do anel interno (Fi)...57.16 Hz
(valor médio das frequências)

$$\text{eixo 1, 2 e 3} \quad Fi = \frac{R1 + R2}{2} = \frac{56.83 + 57.5}{2} = 57.16 \text{ Hz}$$

Eixo 1, 2 e 3

Rotação da gaiola (Fg).....22.69 Hz

$$Fg = \frac{1}{2} \times (Fi (1-Y) + Fe (1+Y))$$

$$Fg = \frac{1}{2} \times (57.16 \times (1- 0.2061)) = 22.69 \text{ Hz}$$

Spin da esfera (Fr).....132.78 Hz

$$Fr = \left| \frac{1}{2} \times \frac{dm}{D} \times (Fe - Fi) (1 - Y^2) \right|$$

$$Fr = \left| \frac{1}{2} \times \frac{38.5}{7.935} \times (0 - 57.16)(1 - 0.2061^2) \right| = 132.78$$

Frequências características de defeitos

Frequência de defeitos na esfera (Fde).....265.56 Hz

$$Fde = 2 \times Fr = 2 \times 132.78 = 265.56$$

Frequência de defeitos na pista interna (Fpi)....310.23 Hz

$$Fpi = \frac{1}{2} \times N \times (Fi - Fe)(1 + Y)$$

$$Fpi = \left| \frac{1}{2} \times 9 \times (57.16 - 0)(1 + 0.2061) \right| = 310.23 \text{ Hz}$$

Frequência de defeitos na pista externa (Fpe)....204.21 Hz

$$Fpe = \frac{1}{2} \times N \times (Fe - Fi)(1 - Y)$$

$$Fpe = \left| \frac{1}{2} \times 9 \times (0 - 57.16)(1 - 0.2061) \right| = 204.21 \text{ Hz}$$

As harmônicas destas frequências são calculados simplesmente por seus multiplos.

8.5. FREQUENCIAS CARACTERISTICAS OBTIDAS

Na tabela 8.6 temos uma comparação entre as frequências características obtidas e teóricas com os respectivos desvios percentuais para falhas nos diversos componentes dos rolamentos. Estes componentes são gaiola, pista interna, pista externa e esfera.

Como pode ser visto as fórmulas para cálculos das frequências características fornecem bons resultados com baixos desvios percentuais em comparação com as frequências obtidas.

TABELA 8.6 - FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS DO ROLAMENTO 6205

BANCADA N.01	MOTOR: 0.5 CV	MASSA: 2744 G	
CONDIÇÃO ADVERSA: FALHA PROVOCADA NA ...			
FREQU. CARACTERÍSTICA	TEORICA	MEDIDA	DESVIO PERCENTUAL
PISTA EXTERNA	204.21	190.90	6.52 %
PISTA INTERNA	310.29	310.08	0.05 %
ESFERA	265.56	264.25	0.49 %
GAIOLA	4x(22.69)	89.36	1.54 %

8.6. CALIBRAÇÃO DOS ACELERÔMETROS

Foram utilizados dois acelerômetros tipo KD 35, suas características estão descritas no capítulo 7.

Os acelerômetros foram pesados por uma balança analítica, tendo seus pesos decritos a seguir:

TABELA 8.7 - MASSA DOS ACELERÔMETROS

MASSA DOS ACELEROMETROS (GRAMA)				
NÚMERO DO ACELEROMETRO	MASSA DO ACELEROMETRO	MASSA DO IMÃ	MASSA DO FIO	TOTAL
71823	26.00	40.80	25.50	92.30
61141	26.00	41.40	25.80	93.20

As massas utilizadas para a calibração dos acelerômetros foram as massas totais do conjunto (acelerômetro + fio + base magnética), pois como vemos na tabela 8.1, nenhum destes valores são desprezíveis.

Para a calibração do acelerômetro foi utilizada a mesa de calibração mostrada no capítulo 7, onde temos de acordo com a massa total do acelerômetro uma aceleração característica do mesmo, desta forma para a massa do acelerômetro utilizado temos:

$$92.30\ g \longrightarrow 9.15\ m/s^2$$

Fazendo uma análise deste sinal pelo PROGRAMA AQDADOS fornecido pela mesa temos:

$$1.329\ mV \longrightarrow 9.15\ m/s^2$$

ou seja,

$$1.000\ mV \longrightarrow 6.88\ m/s^2$$

8.7. CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS DOS ROLAMENTOS

Mostramos nas figuras 8.9 e 8.10 as fotos dos rolamentos sob as duas condições adversas: falta de lubrificação e penetração de material estranho. Sendo estes os principais tipos de falhas em rolamentos.

Podemos descrever estes dois tipos como:

- rolamento sem lubrificação está caracterizado pelas suas superfícies reluzentes, normalmente este tipo de falha ocorre devido a um erro no uso do lubrificante ou uma falha na especificação do mesmo.

- rolamento com penetração de material estranho (areia) está caracterizado por riscos nas superfícies, normalmente este tipo de falha ocorre devido a falhas de montagem e desmontagem.



FIGURA 8.9 - FOTO DO ROLAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO

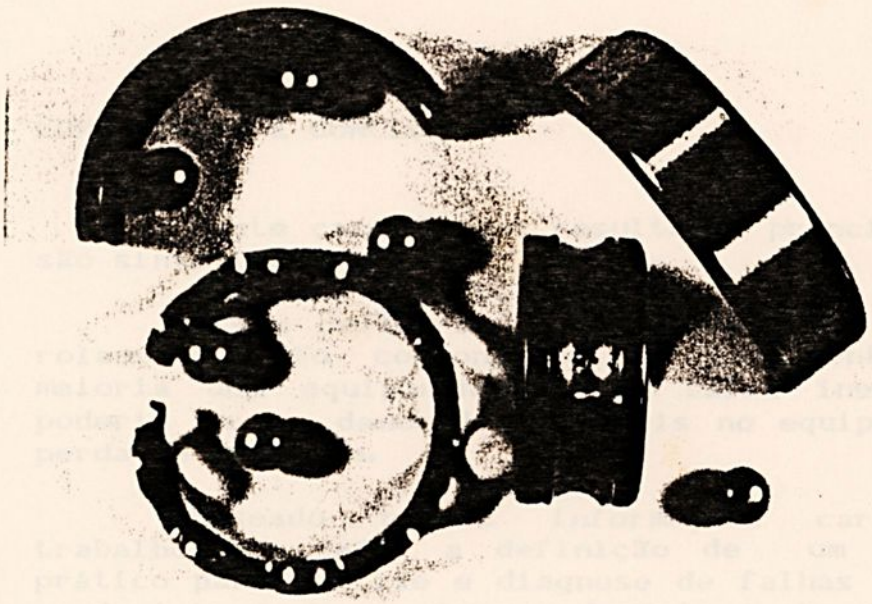


FIGURA 8.10 - FOTO DO ROLAMENTO COM AREIA

COMENTARIOS E CONCLUSOES

Neste capítulo os resultados principais da dissertação são sintetizados.

Assim define-se a importância de nosso trabalho, os rolamentos são componentes de fundamental importância na maioria dos equipamentos, uma falha inesperada dos mesmos poderia causar danos irreparáveis no equipamento e uma grande perda de produção.

Baseado nestas informações caracterizou-se nosso trabalho, ou seja, a definição de um método eficiente e prático para análise e diagnose de falhas em rolamentos tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

- Análise de falhas em rolamentos no domínio do tempo

Definição dos melhores valores característicos para detecção e acompanhamento da evolução de falhas em rolamentos.

valor de pico e valor pico a pico, rms e desvio padrão para o acompanhamento da falha ao longo do tempo; e preferencialmente devemos utilizar o valor rms ou desvio padrão que apresentam um crescimento maior com o aumento da falha.

fator de crista e curtosis apresentam um grande crescimento no início da falha desta forma devem ser usados na detecção inicial da falha no rolamento.

valor médio e fator de forma preferencialmente recomendamos não utilizar por serem valores muito inconstantes.

Desenvolvimento de um programa computacional completo para os cálculos dos valores característicos:

Desenvolvemos um programa computacional chamado TESTE (ver apêndice A) que através dos dados coletados pelo programa AQDADOS (ver apêndice A) calcula uma gama maior de valores estatísticos como: valor de pico, valor pico a pico, valor médio, valor rms, curtosis, fator de forma, fator de crista e desvio padrão.

- Análise de falhas em rolamentos no domínio da frequência

Definição das fórmulas das frequências características

Como podemos ver no Cap.8, as frequências características teóricas calculadas estão muito próximas das frequências obtidas pelo programa SISDIN (ver apêndice A) o que comprova a validade do equacionamento dos rolamentos, sendo assim aceitável até 10% de diferença entre os mesmos quando de um monitoramento em um equipamento.

Desenvolvimento de um programa computacional para os cálculos das frequências características para qualquer tipo de rolamento.

Baseado na validade do equacionamento, Capítulo 6, dos rolamentos foi desenvolvido o programa ANÁlISE (ver apêndice A), onde se pode calcular as frequências características de todos os componentes dos rolamentos, bem como as frequências de falha nos mesmos.

Estabelece um novo procedimento para o monitoramento de falhas em rolamentos:

Todo equipamento importante num complexo industrial em que se deseje fazer um monitoramento do mesmo na parte de rolamentos deve-se proceder da seguinte forma:

Avaliação das condições do equipamento a ser monitorado, quando necessário fazer manutenção completa do mesmo ou até o seu recondicionamento;

Identificação de todos os rolamentos existentes no equipamento cuja a quebra do mesmo inviabiliza de imediato as operações;

Determinação de todos as frequências características teóricas de falhas dos rolamentos existentes no equipamento através do programa ANÁLISE;

Os valores característicos mais recomendáveis para monitoramento do equipamento são: valor pico à pico, valor de pico, valor rms, curtosis e fator de crista;

Colocação do equipamento (novo ou recondicionado) em funcionamento para determinação dos valores característicos padrões através do programa AQDADOS e TESTE (ou similar) e das frequências caracterísicas padrões pelo programa SISDIN (ou similar);

É recomendado que após toda coleta de dados, além da análise no domínio do tempo feita para determinação dos valores característicos, seja feita também uma análise no domínio da frequência, onde se pode determinar o componente defeituoso (comparação do valor obtido com o calculado).

Uma outra etapa dos testes que poderia ser estudada mais profundamente seria a relação da variação de carga nos rolamentos e a influencia destes tanto nos valores característicos como nas frequências caracterísicas, que é deixado como sugestão para outros trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(A1) Arruda, J.R.F., Manutenção Preditiva de Máquinas pela Análise de Vibrações Mecânicas, Mundo Mecânico, 25 - 32, julho, 1982.

(A2) Associação Brasileira de Normas Técnicas, Vibração Mecânica de Máquinas com Velocidades de Operação de 600 a 12000 rpm base para especificação e padrões de avaliação. Norma NBR-10082.

(B1) Blake, Michael P., New Vibrations for Maintenance, Hidrocarbon Processing, junho, 1964.

(B2) Braun, S. , Mechanical Signatures Analysis Theory and Apllications. New York, Academis Press, 1986.

(B3) Bendat, J.S.& Piersol, G. Randon Data - Analysis and Meassurement Procedures. London, Wiley - Interscience, Ven Vor, John Wiley and Sons Inc, 1986.

(B4) Brüel & Kjaer, Depto Técnico, Balanceamento por Meio de Equipamento de Medição Portátil I. Mundo mecânico, 16 - 21, abril 1980.

B(5) Brüel & Kjaer, Depto Técnico, Balanceamento por Meio de Equipamento de Medição Portátil II, Mundo Mecânico, 22 - 25, maio, 1980.

(B6) Brüel & Kjaer, Depto Técnico, Balanceamento por Meio de Equipamento de Medição Portátil. Mundo Mecânico, 28-32, junho,1980.

(B7) Brüel & Kjaer, The Application of Vibration Measurement and Analysis in Machine Maintenance. Aplication Note,1978.

(C1) Champeney, D.C., Fourier Transforms and Their Physical Aplications, Unwin BrothersLimited, London, 1973.

(D1) Dyer, D. & Stewart, R. M., Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis, Journal of Mechanical, p 229, april, 1978.

(D2) Drapinski, Janusz, Manual de Manutenção Mecânica, Mc Graw Hill do Brasil, São Paulo, 1976.

(E1) Enviroments Equipaments Ltd., Workingham Berkshire, The KurtosisMethod of Bearing Damage Detection, Technical Bulletin, 1980.

(E2) Esso Brasileira de Petróleo, Noções Básicas de Lubrificação em Manutenção e Projeto I, Mundo Mecânico, 10 - 15, março, 1978.

(E3) Esso Brasileira de Petróleo, Noções Básicas de Lubrificação em Manutenção e Projeto II, Mundo Mecânico, 10 - 15, abril 1978.

(F1) FAG, Rolamentos, Catálogo WL 41510/2 PB de Rolamentos, Weppert GmbH & Co Kg, Alemanha Ocidental, 1987.

(F2) Finley, R. L., Incipient Failure Detection in Rotating Machinery, Chemical Engineering, 104-112, julho, 1980.

(K1) K., K. Nippon Seiko, Ball and Roller Bearings, Pr N2125a, Japan, 1982.

(K2) Kelly, A. & Harris, M. J., Administração da Manutenção Industrial, Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, 1980.

(L1) Lathi, B.P., Sistemas de Comunicação, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1979.

(N1) Nepomuceno, L.X., Manutenção Preditiva em Instalações Industriais, Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1985.

(N2) Nepomuceno, L.X., Técnicas de Manutenção Preditiva Industrial e Diagnósticos de Falhas, Mundo Mecânico, 31-37, novembro, 1984.

(N3) Nepomuceno, L.X., Técnicas de Manutenção Preditiva Industrial e Diagnósticos de Falhas, Mundo Mecânico, 14-23, dezembro, 1984.

(N4) Nascimento, N., Manutenção Preditiva por Análise de Vibração, (Apostila), Núcleo Tecnologia Ltda, Itájuba, 1989.

(M1) Meirovitch, L., Analytical Methods in Vibrations, Mc Milan, London, 1967.

(M2) Meirovitch, L., Elements of Vibrations Analysis, Mc Graw-Hill, Singapore, 1986.

(M4) Mitchell, J. S., Monitoring The Complex Vibration Characteristics of Bladed Machinery, Instrumentation and turbines and Diesels Power, 38-42, Julho, 1977.

(M5) Mitchell, J.S., An Introduction to Machinery Analysis and Monitoring, Penwell Publishing Co., Tulsa Oklahoma, 1981.

(M6) Matos, W. S., Redução de Custos em Manutenção de Equipamentos Mecânicos, Mundo Mecânico, 24-27, julho,1980.

(P1) Paula Leite, Paulo G. Ensaios Não Destrutivos, Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1979.

(S1) SKF, Depto Técnico, Aspectos Práticos da Seleção de Rolamentos, Mundo Mecânico, 24-30, julho, 1980.

(S2) SKF, Dpto Técnico, Aspectos Práticos da Seleção de Rolamentos II, Mundo Mecânico, 35-37, agosto, 1980.

(S3) SKF, Depto Técnico, Aspectos Práticos de Seleção de Rolamentos III, Mundo Mecânico, 25-29, setembro, 1980.

(S4) SKF, Depto Técnico, Aspectos Práticos da Seleção de Rolamentos IV, Mundo Mecânico, 24-28, outubro, 1980.

(S5) SKF, Depto Técnico, Aspectos Práticos da Seleção de Rolamentos V, Mundo Mecânico, 44-49, novembro, 1980.

(S6) SKF, Depto Técnico, Aspectos Práticos da Seleção de Rolamentos VI, Mundo Mecânico, 30-34, dezembro, 1980.

(S7) SKF, Depto Técnico, Aspectos Práticos da Seleção de Rolamentos , Mundo Mecânico, 14-18, janeiro, 1981.

(S8) SKF, Depto Técnico, Rolamentos e Suas Aplicações, Mundo Mecânico, 30-33, fevereiro, 1980.

(S9) SKF, Catálogo geral, Copyright SKF, Depto Mecânico, Pancrom, 1982.

(S10) Sturm, Dr. Prof.Adolf, Wälzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen, Verlag TÜV Rheiland GmbH, Köln.

(V1) Vianna, L.P., A Manutenção entra na Era da Tecnologia, guia de Manutenção (Alcool & Açúcar), 12-14, dezembro, 1986.

(V2) VDI 2056, Normas para Avaliação de Vibrações Mecânicas em Máquinas, VDI - Fachgruppe Schwingungstechnic, Köln und Berlin, outubro, 1964.

APÊNDICES

APÊNDICE A - SOFTWARES UTILIZADOS

Mostramos a descrição dos softwares utilizados para os testes da bancadas de rolamentos.

PROGRAMA AQDADOS

Este é um programa adquirido pela UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - CAMPUS DE GUARATINGUETÁ, que permite a aquisição de sinais provenientes da fonte de sinal recebidos pela CAD10/26, é possível também uma análise dos sinais no domínio do tempo.

Estas análises são: histograma de estatísticas, gráficos temporais (linear e logarítmicos), cálculos estatísticos (valor médio, desvio padrão, valor RMS, valor Máximo e valor Mínimo).

PROGRAMA SISDIN

Este é um programa adquirido pela UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - CAMPUS DE GUARATINGUETÁ, que com os dados adquiridos pelo programa AQDADOS faz a transformação dos sinais do domínio do tempo para o domínio na frequência, permitindo desta forma uma análise destes sinais no domínio da frequência.

Estas análises são: gráficos de frêquencia e gráficos de amplitude e fase (linear e logarítmica)

PROGRAMA ANÁLISE

Este é um programa feito para cálculo das frequências características e seus harmonicos, a partir das dimensões básicas dos rolamentos. Desenvolvido para o nosso trabalho.

PROGRAMA TESTE

Este é um programa feito para cálculo dos valores característicos (valor de pico, valor de pico a pico, valor médio, desvio padrão, fator de crista, fator de forma, rms e curtosis). Estes valores são calculados a partir dos dados adquiridos e armazenados pelo programa AQDADOS.

Em anexo a listagem dos programas TESTE e ANÁLISE.

Programa analise

```
Program Calculo_de_frequencia_caracteristica;
Uses Crt, Graph;

Var
  Sai : Text;

  Max,
  De,
  Di,
  Dm,
  D,
  Ne,
  Npe,
  Alfa  : Real;

  C : Char;

  x1, y1,
  x0, y0,
  gm, gd, I, N : Integer;

  Tipo : String;

Const
  Pi = 3.1415629;

Function Gama : Real;
Begin
  Gama := D / Dm * cos (Alfa * 180 / Pi);
End;

Function Fi : real;
Begin
  Fi := Ne / 60;   ( Hz )
End;

Function Fe : Real;
Begin
  Fe := Npe / 60;   ( Hz )
End;

Function Fg : Real;
Begin
  Fg := Abs (1/2 * ( Fi * (1 - Gama) + Fe * (1 + Gama)));   ( Hz )
End;

Function Fr : Real;
Begin
  Fr := Abs (1/2 * Dm / D * (Fe - Fi) * (1 - Gama*Gama));
End;
```

```
Function Fpi : Real;
Begin
  Fpi := Abs (1/2 * N * (Fi - Fe) * (1 + Gama));
End;

Function Fpe : Real;
Begin
  Fpe := Abs (1/2 * N * (Fe - Fi) * (1 - Gama));
End;


Procedure Dados;
Begin
  ClrScr;
  Writeln ('DADOS DE ENTRADA');
  Writeln ('---------------');
  Writeln;
  WriteLn ('  Dimensoes do Rolamento :');
  Writeln;
  Write   ('  - Diametro da pista externa ......: '); ReadLn (De);
  Write   ('  - Diametro da pista interna ......: '); Readln (Di);
  Write   ('  - Diametro primitivo .............: '); ReadLn (Dm);
  Write   ('  - Diametro da Esfera .............: '); ReadLn (D);
  Write   ('  - Angulo de Contato ..............: '); Readln (Alfa);
  Write   ('  - Numero de Esferas ..............: '); Readln (N);
  Write   ('  - Tipo do Rolamento ..............: '); Readln (Tipo);
  Write   ('  - Rotacao do Eixo ................: '); Readln (Ne);
  Write   ('  - Rotacao da pista externa .......: '); ReadLn (Npe);
  Writeln;
End;

Procedure Onda (I : Integer);
Var J, Ax, Ay : Integer;
    S : String;
Begin
  Ax := Getx;
  Ay := Gety;
  x1 := 635 - I * 60;
  y1 := 20 + 160 - I * 16;
  Str ((Fg*(11-I)):5:2, S);
  OutTextXY (X1+10,188, S);
  MoveTo (Ax, Ay);
  If GetX = 0 Then
     MoveTo (x1-5,180);
  LineTo (x1,y1);
  LineTo (x1+5,175);
  For J := 1 To 50 Do
    LineTo (x1+5+J,180-5+Random(5));
End;
```

```
Begin
  Randomize;
  Dados;
  Writeln ('Escolha a saida : (V = Video,  I = Impressora) : ');
  ReadLn (C);
  If UpCase (C) = 'I' Then Assign (Sai,'PRN')
                      Else AssignCrt (Sai);

  ReWrite (Sai);
  ClrScr;
  Writeln (Sai,'Analise de Vibracoes em Mancais de Rolamento');
  Writeln (Sai);
  Writeln (Sai,'          Rolamento : ',Tipo);
  Writeln (Sai);
  Writeln (Sai,'Rotacao do Eixo    = ',Nc:10:4,' [RPM]');
  Writeln (Sai,'Frequencia do Eixo = ',Fi:10:4,' [Hz]');
  Writeln (Sai);
  Writeln (Sai);
  Writeln (Sai,'          Frequencia dos Elementos');
  Writeln (Sai);
  Writeln (Sai,'Frequencia de Rotacao da Gaiola        = ',Fg:10:4,' [Hz]');
  Writeln (Sai,'Frequencia de Spin do Elemento Rolante = ',Fr:10:4,' [Hz]');
  Writeln (Sai,'Frequencia de defeitos na Esfera       = ',(2*Fr):10:4,' [Hz]');
  Writeln (Sai);
  Writeln (Sai,'          Frequencia de Passagem dos Elementos Rolantes');
  Writeln (Sai);
  Writeln (Sai,'Pela pista interna   = ',Fpi:10:4,' [Hz]');
  Writeln (Sai,'Pela pista externa   = ',Fpe:10:4,' [Hz]');
  Writeln (Sai);
  If C () 'I' Then
  Begin
    Writeln;
    Writeln ('Tecle algo para continuar ... ');
    C := ReadKey;
  End;
  Writeln (Sai,'+------------+-----------+-----------+-----------+-----------+');
  Writeln (Sai,'| Numero de  |  Gaiola   | Elemento  | Pista     | Pista     |');
  Writeln (Sai,'| Harmonica  |           | Rolante   | Interna   | Externa   |');
  Writeln (Sai,'+------------+-----------+-----------+-----------+-----------+');
  For I := 1 To 10 Do
    Writeln (Sai,'|     ',I:3,'    | ',(Fg*I):8:2,' | ',(2*Fr*I):8:2,' | ',(Fpi*I*N):8:2,' | ',(Fpe*I*N):8:2,' |');
  Writeln (Sai,'+------------+-----------+-----------+-----------+-----------+');
  Close (Sai);
  Writeln;
  Writeln ('Tecle algo para continuar ... ');
  C := ReadKey;
  Gd := detect;
  InitGraph (Gd, Gm, '');
  SetTextJustify (CenterText, TopText);
```

```
  OutTextXY (320,1,'Frequencia de Defeitos da Gaiola');
  SetTextJustify (RightText,TopText);
  Line (4,20,4,187);
  Line (2,185,630,185);
  Max := Fg/I;
  MoveTo (0,0);
  For I := 10 DownTo 1 Do
    Onda (I);
  C := ReadKey;
{   CloseGraph;  }
End.
```

Programa teste

```
Program AnaliseDeFalhas;
(*N+,E+)
Uses Crt;

const
  NomeDoSistema = 'Analise de Falhas - Calculo de Valores Caracteristicos - FEG/UPD - Jan '

type

  TpDtHr = record
             Dia,Mes,Ano,HH,Mn,Sg,MS: integer;
           end;

  TpEventos  = array [1..32] of longint;

type
  { ---------------------------------- }
    -- Configuracao de arquivos *.TEM -- }
  { ---------------------------------- }

  ConfCanaisTypeTEM = record
    Nome     : string[15];      { Denominacao do canal  }
    Unidade  : string[ 7];      { Unidade do canal      }
    LimMax   : single;          { Lim. maximo da escala }
    LimMin   : single;          { Lim. minimo da escala }
    Usado    : boolean;         { Indica se ativo       }
    Janela   : word             { Indica Tamanho Janela }
  end;

  CanaisEntradaTEM = array [0..31] of ConfCanaisTypeTEM;

  TpTemDadosAD = record
    DtHr        : TpDtHr;                    { Data e hora do inicio do ensaio   }
    Comentario  : string[30];                { Comentario do ensaio              }
    CnAD        : CanaisEntradaTEM;          { Configuracao dos canais           }
    NoCnAtivos  : integer;                   { Numero de canais ativos           }
    RangeAD     : longint;                   { Range do conversor A/D (ex. 1024) }
    FreqAmostr  : single;                    { Frequencia de amostragem          }
    NoAmostras  : longint;                   { Numero de amostras por canal      }
    TipoAq      : byte;                      { Tipo de aquisicao: DMA ou CPU     }
    Origem      : byte;                      { Origem da serie: Aquis., etc.     }
    ArqOrigem1  : string[79];                { Nome do arquivo de origem 1       }
    ComOrigem1  : string[30];                { Comentario do arquivo de origem 1 }
    DtHr1       : TpDtHr;                    { Data e hora do arq. origem 1      }
    ArqOrigem2  : string[79];                { Nome do arquivo de origem 2       }
    ComOrigem2  : string[30];                { Comentario do arquivo de origem 2 }
    DtHr2       : TpDtHr;                    { Data e hora do arq. origem 2      }
    ExCom       : array [1..6] of string[30]; { Outros comentarios               }
    NoEve       : integer;
    Event       : TpEventos;
  end;
```

```
  TpReg = TpTemDadosAD;

  TpBfAD = Array [0..4095] Of Integer;

Var
  BufferAD      : TpBfAD;

  Reg           : TpTemDadosAD;
var s : string;
begin
  Str (i, s);
  While Length(s) < 2 do
    s := '0' + s;
  Str0 := s;
end;

Procedure Mostra (r : TpReg);
Var
  i : integer;
begin
  Cor (LightCyan, Black);
  Escreve (1,3,'Inicio do ensaio -> Data:             Hora:');
  Escreve (1,4,'Comentario : ');
  Escreve (1,5,'Cn. Nome            Un.     Lmax  Lmin Ativo');ClrEol;

  With r Do
  begin

    Cor (White, Black);
    s := Str0(DtHr.Dia)+'/'+Str0(DtHr.Mes)+'/'+Str0(DtHr.Ano);
    Escreve (27, 3, s);
    s := Str0(DtHr.HH)+':'+Str0(DtHR.Mn)+':'+Str0(DtHr.Sg)+'.'+Str0(DtHr.Ms);
    Escreve (45, 3, s);
    Escreve (20,4, Comentario);
    For i := 0 to NoCnAtivos-1 Do
    begin
      str (i:2,s);
      Escreve (1,6+i,s);
      Escreve (5,6+i,CnAD[i].Nome);
      Escreve (21,6+i,CnAD[i].Unidade);
      str (CnAD[i].LimMax:4:0, s);
      Escreve (29,6+i,s);
      str (CnAD[i].LimMin:4:0, s);
      Escreve (35,6+i, s);
      If CnAD[i].Usado Then Escreve (41,6+i, 'SIM')
                       Else Escreve (41,6+i, 'NAO');
      ClrEol;
    end;

  end;
```

```
    Procedure Calcula (i : word);
    Var Nc,
        Xi : integer;
        X  : real;
    begin
      Inc (Tot);
      Dec (i);

   if (i ) 0) And (i mod 4 = 0) Then tr := tr + 1/Reg.FreqAmostr;

   if (tr ( t0) Or (tr ) t1) then exit;

   Nc := (Tot-1) Mod Reg.NoCnAtivos;
   Xi := BufferAD[i];
   With Reg.CnAd[Nc] Do
     X := LimMin + (Xi+32768) * (LimMax-LimMin) / 65536;

(  GotoXY (Nc*8+1, 23); write (X:8:2); )

   If Nc = 0 then
   begin

     Writeln (saida);
     Write (saida,(i div Reg.NoCnAtivos) : 5,' = ');
   end;

   Write (saida,X:8:2);

   If X ) Xmax[Nc] Then Xmax[Nc] := X;                 ( calculo do Xmax )
   If X ( Xmin[Nc] Then Xmin[Nc] := X;                 ( calculo do Xmin )
   If Abs(X) ) MXmax[Nc] Then MXmax[Nc] := Abs(X);     ( calculo do modulo maximo de X )
   Inc (N[Nc]);                                        ( calculo do N    )
   Sx[Nc]  := Sx[Nc] + X;                              ( calculo da Sx   )
   Sx2[Nc] := Sx2[Nc] + X*X;                           ( calculo da Sx2  )
end;

Procedure CurtosisDp (i : word);
Var Nc : integer;
    X2,
    X4,
    X  : Dpuble;
    Xi : integer;
begin
  Inc (Tot);
  Dec (i);

  .f (i ) 0) And (i mod 4 = 0) Then tr := tr + 1/Reg.FreqAmostr;

  if (tr ( t0) Or (tr ) t1) then exit;

  Nc := (Tot-1) Mod Reg.NoCnAtivos;
  Xi := BufferAD[i];
  With Reg.CnAd[Nc] Do
    X := LimMin + (Xi+32768) * (LimMax-LimMin) / 65536;

  X2 := Sqr(X - Xmed[Nc]);
  X4 := Sqr(X2);
```

```
  B1[Nc] := B1[Nc] + X4;
  B2[Nc] := B2[Nc] + X2;
end;

begin

  Cor (White, Black);
  ClrScr;

  Cor (LightCyan, Blue);
  Limpa (1);
  Escreve (1,1,'    '+NomeDoSistema);

  Cor (LightCyan, Black);
  Escreve (1,5,'Nome do arquivo de entrada : ');

  Cor (White, Black);
  Readln (Nome);

  {$I-}
  Assign (Arq,Nome);
  Reset (Arq, 1);
  {$I+}

  If IOResult <> 0 then
  begin
     Cor (Yellow, LightRed);
     Escreve (1, 7, 'Arquivo nao encontrado.'+#7);
     Fim.(1);
  end;

  Cor (LightCyan, Black);
  Escreve (1,7,'Tempo inicial : ');

  Cor (White, Black);
  Readln (t0);

  Cor (LightCyan, Black);
  Escreve (1,8,'Tempo final   : ');

  Cor (White, Black);
  Readln (t1);

  GotoXY (1,7); ClrEol;
  GotoXY (1,8); ClrEol;

  BlockRead (Arq, Reg, SizeOf(TpReg));
  Mostra (Reg);

  Cor (LightCyan, Black);
  Writeln;
  Writeln ('Aguarde...');
```

```
  For i := 0 To Reg.NoCnAtivos - 1 Do
  begin
    XmaxC[i]  := -MaxInt;
    XminC[i]  := +MaxInt;
    MXmaxC[i] := 0;
    XppC[i]   := 0;
    XmedC[i]  := 0;
    DpC[i]    := 0;
    CrC[i]    := 0;
    FfC[i]    := 0;
    SxC[i]    := 0;
    Sx2C[i]   := 0;
    RMSC[i]   := 0;
    B1C[i]    := 0;
    B2C[i]    := 0;
    BC[i]     := 0;
    NC[i]     := 0;
{     GotoXY (i*8+4,22); Write ('Cn. ',i); }
  end;

  Assign (saida,'Estati.doc');
  ReWrite (saida);

  i := 0;
  tot := 0;
  tr := 0;

  While Not Eof (Arq) And (tr <= t1) Do
  Begin

    Seek (Arq, SeekBufTem(i));
    BlockRead (Arq, BufferAD, SizeOf(TpBfAD), TamLido);

    For j := 1 To TamLido Div 2 Do
        Calcula (j);

    Inc (i);

  End;

  Writeln;

  For i := 0 To Reg.NoCnAtivos - 1 Do
  begin
    XppC[i]  := XmaxC[i] - XminC[i];
    XmedC[i] := 1/NC[i] * SxC[i];
    RMSC[i]  := Sqrt (1/NC[i] * Sx2C[i]);
    CrC[i]   := MXmaxC[i] / RMSC[i];
    FfC[i]   := RMSC[i] / XmedC[i];
  end;

  Seek (Arq, 0);

  i := 0;
  tot := 0;
  tr := 0;

  While Not Eof (Arq) And (tr <= t1) Do
  Begin
```

```
    Seek (Arq, SeekBufTem(i));
    BlockRead (Arq, BufferAD, SizeOf(TpBfAD), TamLido);

    For j := 1 To TamLido Div 2 Do
        CurtosisDp (j);

    Inc (i);

  End;

  For i := 0 To Reg.NoCnAtivos - 1 Do
  begin
    B[i]  := (1/N[i] * B1[i]) / Sqr(Abs(1/N[i] * B2[i]));
    Dp[i] := Sqrt (B2[i] / (N[i] - 1));
  end;

  For i := 0 to Reg.NoCnAtivos - 1 Do
  begin
    GotoXY (1,12);
    Cor (LightCyan, Black); Write   ('CANAL                 : ');
    Cor (White,     Black); Writeln (i:2,' - ',Reg.CnAd[i].Nome);
    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Numero de Amostras    : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (N[i]:7,'.0000');

    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Valor de Pico         : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (Xmax[i]:12:4);

    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Valor de Pico a Pico  : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (Xpp[i]:12:4);

    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Valor Medio           : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (Xmed[i]:12:4);

    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Desvio Padrao         : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (Dp[i]:12:4);

    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Fator de Crista       : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (Cr[i]:12:4);

    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Fator de Forma        : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (Ff[i]:12:4);

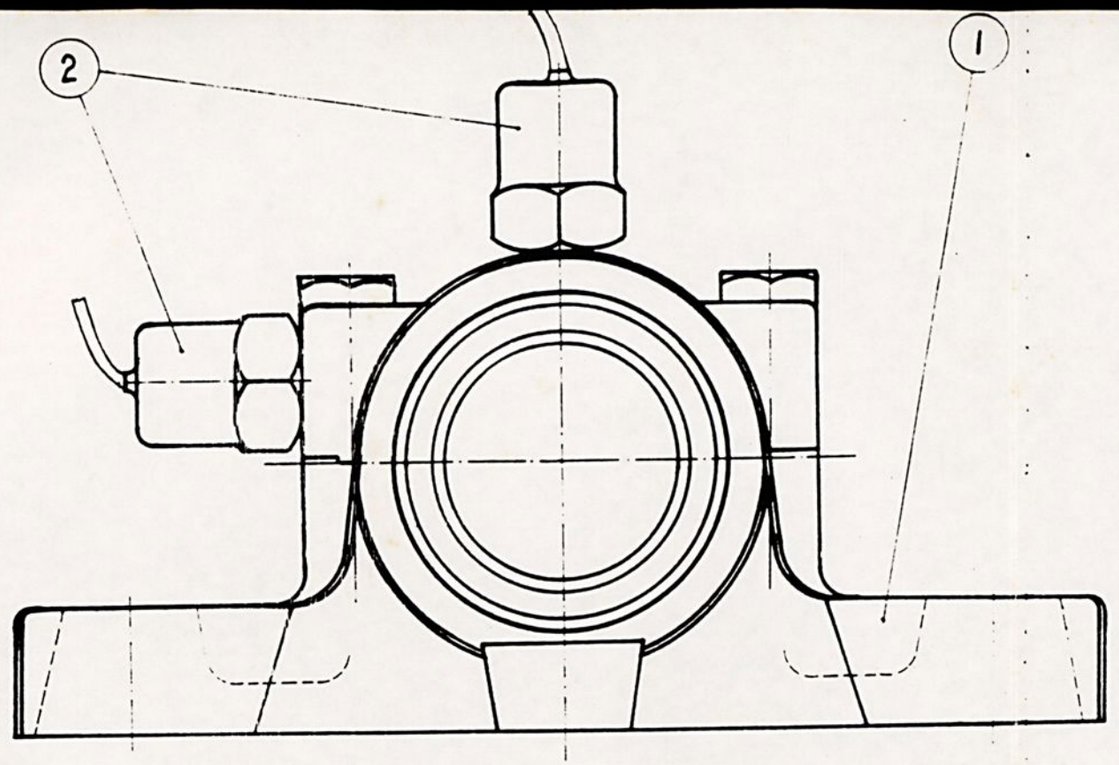
    Cor (LightCyan, Black); Write   ('RMS                   : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (RMS[i]:12:4);

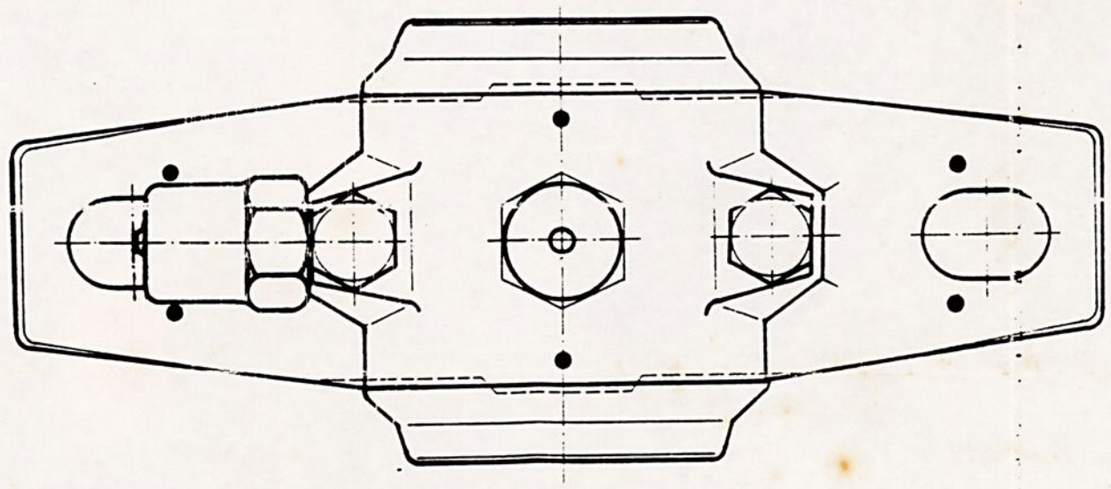
    Cor (LightCyan, Black); Write   ('Curtosis              : ');
    Cor (White    , Black); Writeln (B[i]:12:4);

    Repeat

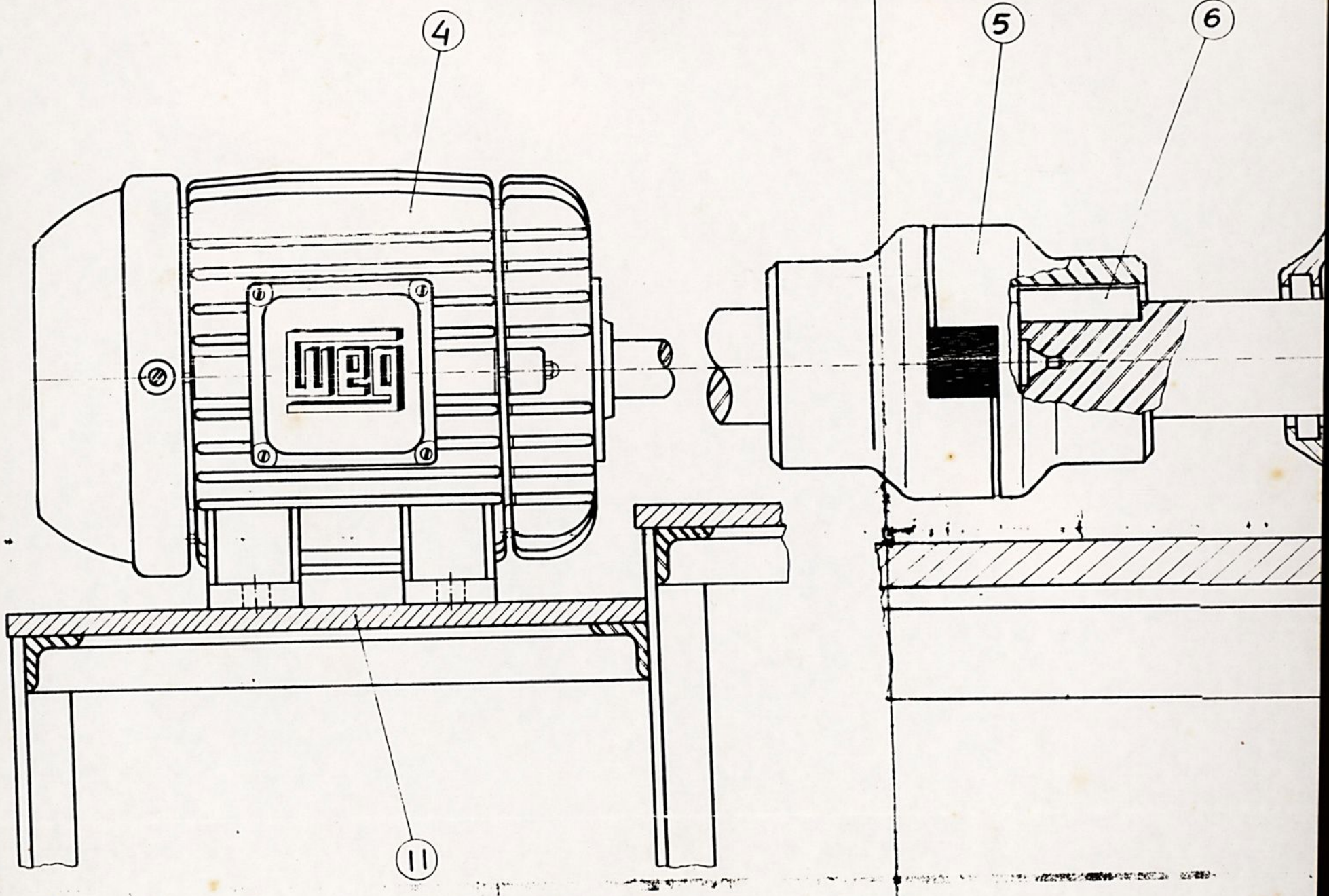
s,
Nome          : string;

Saida         : text;
Arq           : file;
```

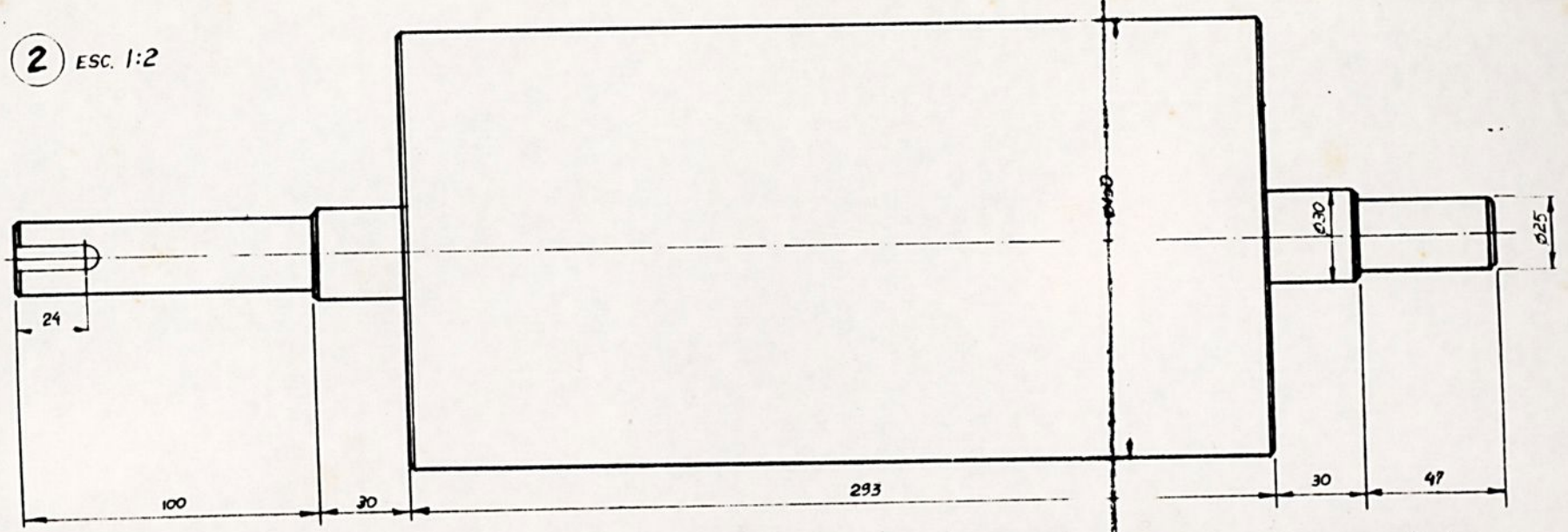




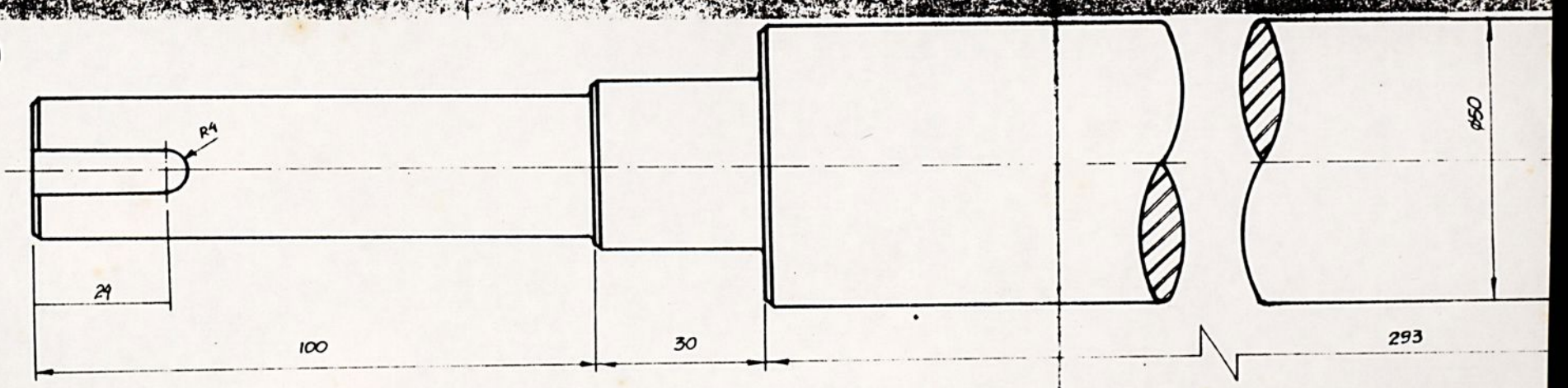
CAIXA PARA ROLAMENTO COM ACELERÔMETROS		VISTO
ANDRÉ LUIS DE PAULA MARQUES		
ESC. 1:1	1	CAIXA PARA ROLAMENTO (MANCAL)
	2	ACELERÔMETROS



(2) ESC. 1:2



(3)



```
    TamLido,
    i, j          : integer;

    t0, t1, tr    : Single;

    tot           : Longint;

    N             : Array [0..31] of LongInt;

    Xmax,
    Xmin,
    MXmax,
    Sx,
    Sx2,
    Xpp,
    Xmed,
    Dp,
    Cr,
    Ff,
    RMS           : Array [0..31] of Real;
    B1,
    B2,
    B             : Array [0..31] of Double;

function SeekBufTem (NumBuffer : word) : longint;
begin
  SeekBufTem := SizeOf(TpTemDadosAD)+(longint(NumBuffer)*SizeOf(TpBfAD));
end;

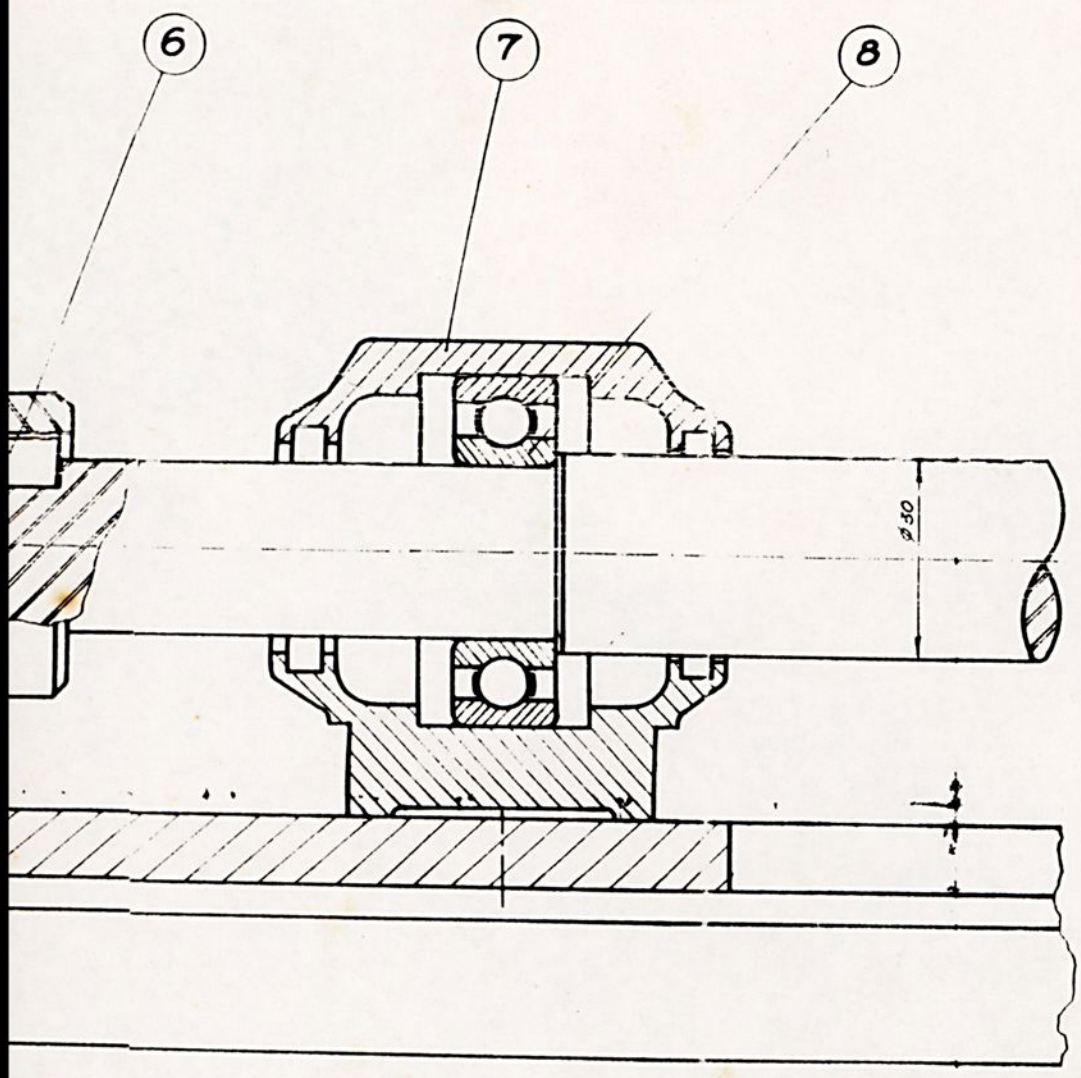

Procedure Cor (c, f : byte);
begin
  TextColor (c);
  TextBackGround (f);

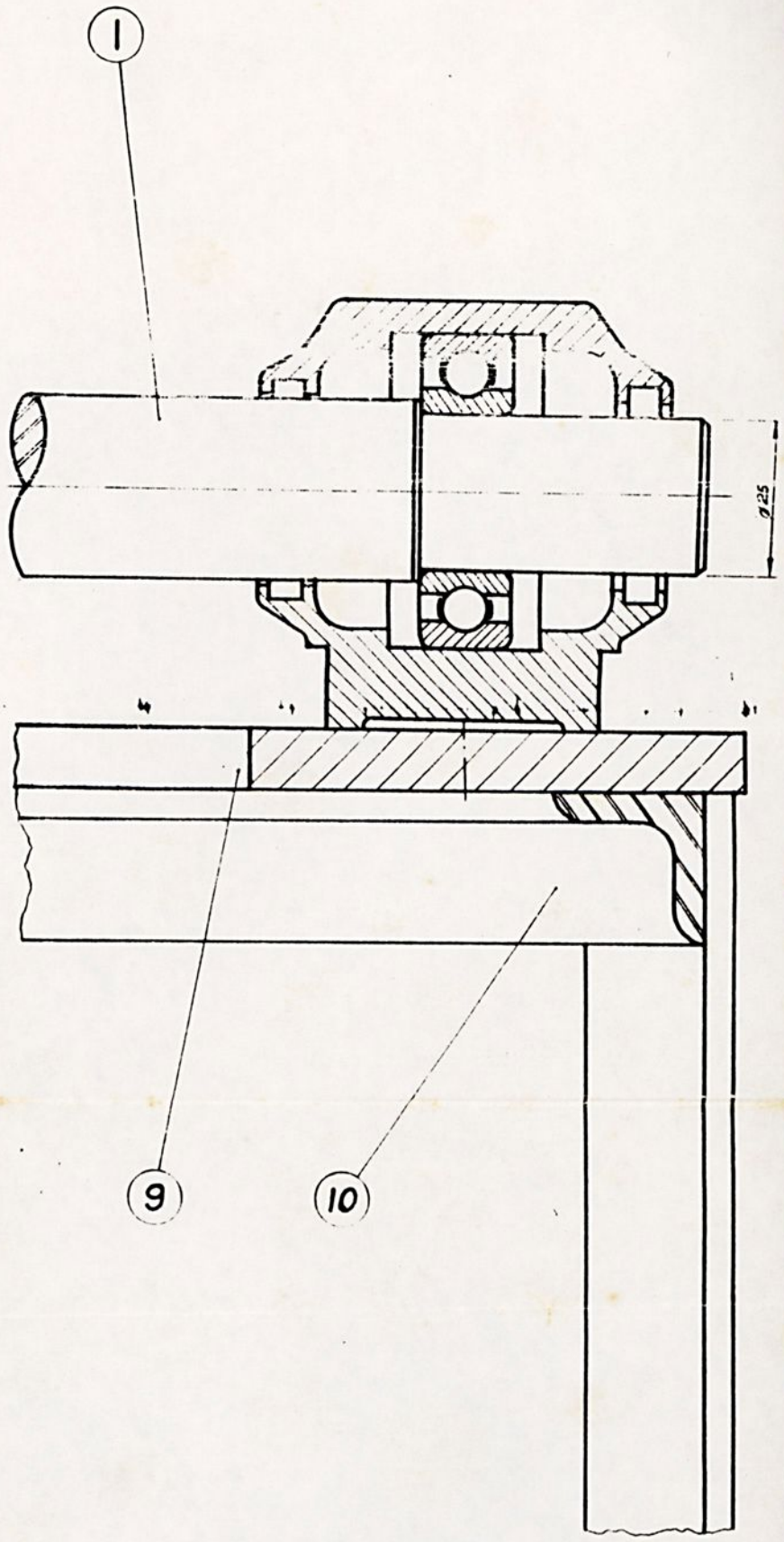

Procedure Limpa (n : integer);
begin
 GotoXY (1, n);
 ClrEol;
end;

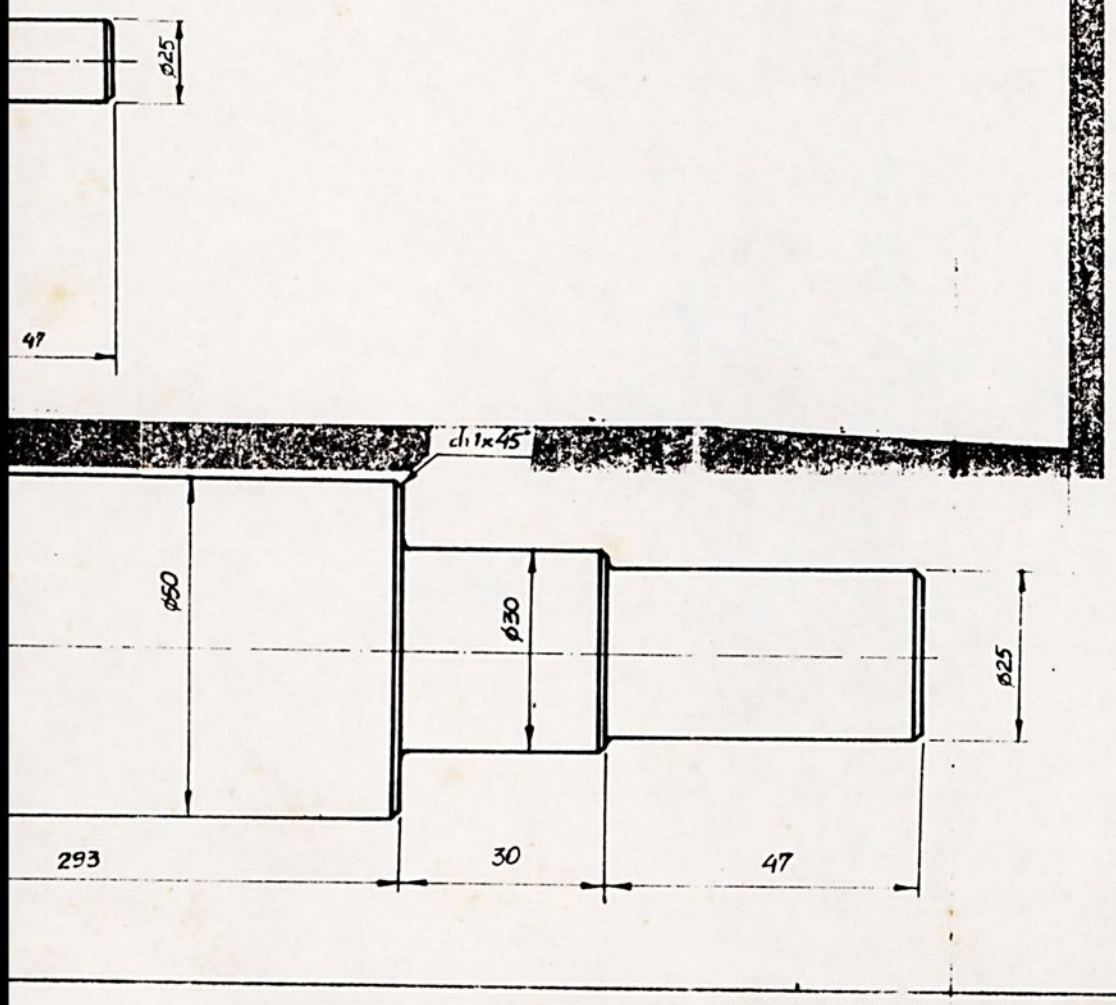
Procedure Escreve (x, y : integer; s : string);
begin
  GotoXY (x, y);
  Write (s);
end;

Procedure Fim (n : integer);
begin
  Cor (White, Black);
  Writeln;
  Writeln;
  Writeln ('Fim do '+NomeDoSistema+'.');
  Halt(n);
end;

Function Str0 (i : integer) : string;
```







n:	DENOMINAÇÃO	QT.	OBSERV.
11	CHAPA DE AÇO (BASE-MOTOR)	03	350x300x10mm
10	VIGA "L" (6m)	03	25x25x5mm
9	CHAPA DE AÇO (BASE)	03	750x300x10 m
8	ROLAMENTO RÍGIDO DE ESFERAS	06	SKF 6205
7	CAIXA P/ ROLAMENTO	06	SNA505 TC
6	CHAVETA PLANA	06	8x7x28mm
5	ACOPLAMENTO ELÁSTICO	03	UNIFLEX E-12
4	MOTOR ELÉTRICO WEG	03	POT.(0.75a1.5)cv
3	EIXO (AÇO 1045)	01	500 x Ø50 x Ø3
2	EIXO (AÇO 1045)	01	500 x Ø150 x Ø3
1	EIXO (AÇO 1045)	01	500 x Ø30 x Ø2

BANCADA DE TESTES DE ROLAMENTOS

ALUNO: ANDRÉ LUIS DE PAULA MARQUES

ESC. 1:1

ÁREA: PROJETO E MATERIAIS

PÓS-GRADUAÇÃO

25/SET./89

OB

ESC MO 1:

APÊNDICE B - DESENHOS DAS BANCADAS

Mostra o projeto das bancadas de testes de rolamentos com suas respestivas dimensões e materiais necessários para a construção das mesmas.