

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

**USO DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DO DESALINHAMENTO DE EIXOS
DE MÁQUINAS ROTATIVAS
*UMA FERRAMENTA AUXILIAR À ANÁLISE DE VIBRAÇÕES***

CURITIBA

2004

Pacholok, Mariano
P116u 2004 Uso da termografia para avaliação do desalinhamento de eixos de
máquinas rotativas : uma ferramenta auxiliar à análise de vibrações /
Mariano Pacholok ; orientador, Nilson Barbieri; co-orientador, Renato
Barbieri. -- 2004.
xiii, 98 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2004
Inclui bibliografia

1. Máquinas – Manutenção e reparos. 2. Termografia. I. Barbieri,
Nilson. II. Barbieri, Renato. III. Pontifícia Universidade Católica do
Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Título.

CDD 21. ed. – 621.816
620.1

MARIANO PACHOLOK

**USO DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DO DESALINHAMENTO DE EIXOS
DE MÁQUINAS ROTATIVAS
*UMA FERRAMENTA AUXILIAR À ANÁLISE DE VIBRAÇÕES***

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Professor Doutor Nilson Barbieri
Co-orientador: Professor Doutor Renato Barbieri

CURITIBA

2004

TERMO DE APROVAÇÃO

MARIANO PACHOLOK

“USO DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DO DESALINHAMENTO DE EIXOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS: UMA FERRAMENTA AUXILIAR À ANÁLISE DE VIBRAÇÕES”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Presidente: 
Prof. Dr. Nilson Barbieri (Orientador)
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)


Prof. Dr. Renato Barbieri (Co-orientador)
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)


Prof. Dr. Osvaldo Herek
Departamento de Engenharia Mecânica (UFPR - aposentado)


Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

Curitiba, 30 de junho de 2004.



DEDICATÓRIA

À Inspiração Divina que me permite sonhar e superar os obstáculos.

AGRADECIMENTOS

À(o)

Prof. Dr. Nilson Barbieri,
Pela orientação.

Prof. Dr. Renato Barbieri,
Pela co-orientação.

Eng. Hebert Sprung,
Pela liberdade e apoio.

Esposa Sandra,
Pela compreensão.

Funcionários da PETROBRAS UN REPAR
Mario Nunes, Andrei Voloschen, Sergio
Carpinski, Jaime Furman e Julio Fadel.

Funcionário da COPEL
Oldair Marinho.

Funcionário da PUC-PR
Wagner

Funcionários do UNICENP
Marcelo Pereira e Alexandre

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 DELIMITAÇÕES	2
1.3 JUSTIFICATIVA	2
2 PROBLEMATIZAÇÃO E METODOLOGIA	4
2.1 PROBLEMAS	4
2.1.1 Problema Central	4
2.1.2 Problemas Corolários	4
2.2 HIPÓTESES	4
2.2.1 Hipótese Central	5
2.2.2 Hipóteses Corolárias	5
2.3 O MÉTODO	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4 ELEMENTOS DE MÁQUINAS LIGADOS AO ALINHAMENTO DE EIXOS	9
4.1 ACOPLAMENTOS	9
4.1.1 Acoplamentos para Transmissão de Potência e Sincronismo de Velocidade Angular	9
4.2 PROTEÇÃO DOS ACOPLAMENTOS	15
4.3 MANCAIS	15
4.4 POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO DAS MÁQUINAS	17
4.5 TUBULAÇÕES	20
5 CONCEITUAÇÃO DO ALINHAMENTO DE EIXOS	21
5.1 TIPOS DE DESALINHAMENTOS	23

5.2 IMPORTÂNCIA DO ALINHAMENTO	25
5.3 CONSEQÜÊNCIAS DO DESALINHAMENTO	25
6 MÉTODOS DE ALINHAMENTO DE EIXOS	30
6.1 ALINHAMENTO PELO MÉTODO REVERSO	31
6.2 ALINHAMENTO PELO MÉTODO PERIFÉRICO DIRETO	34
6.3 ALINHAMENTO A LASER	35
6.4 CORREÇÃO DE PÉ-MANCO	36
6.5 CORREÇÃO DO DESALINHAMENTO AXIAL	36
7 TOLERÂNCIA PARA ALINHAMENTO DE EIXOS	38
7.1 EXEMPLOS DE CÁLCULO FINAL DA TOLERÂNCIA	39
7.1.1 Acoplamento sem Espaçador	39
7.1.2 Acoplamento com Espaçador	39
7.2 TOLERÂNCIA PARA DESALINHAMENTO AXIAL	40
8 DIAGNÓSTICO DO DESALINHAMENTO DE EIXOS COMO FALHA	41
8.1 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	41
8.1.1 Análise de vibrações	41
8.1.2 Análise térmica do acoplamento	47
9 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	48
9.1 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO	48
9.2 EMISSIVIDADE	50
9.3 EFEITO TERMOELÉTRICO	51
9.4 SENSORES PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	52
9.4.1 Sensores De Contato	52
9.4.2 Sensores Sem Contato	53
9.5 TERMOGRAFIA	53
9.5.1 Princípio Físico	54
9.5.2 Aplicações	55
10 LEVANTAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS	56
10.1 BANCADA DE TESTES	56
10.2 TESTES DE LABORATÓRIO NA BANCADA DE TESTES	61
10.3 TESTES DE CAMPO EM APLICAÇÕES REAIS	61
11 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
11.1 LIMITAÇÕES	76

11.2 RECOMENDAÇÕES	77
12 CONCLUSÃO	78
GLOSSÁRIO	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
DOCUMENTOS CONSULTADOS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - ACOPLAMENTO DE GRADE	11
Figura 4.2 - ACOPLAMENTO DE ENGRENAGEM	11
Figura 4.3 - ACOPLAMENTO DE LÂMINAS	12
Figura 4.4 - ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO	13
Figura 4.5 - ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO	13
Figura 4.6 - ACOPLAMENTO DE PINOS	14
Figura 4.7 - ACOPLAMENTO MAGNÉTICO	14
Figura 4.8 – PROTEÇÃO DE ACOPLAMENTO	15
Figura 4.9 – MANCAL DE ROLAMENTO	16
Figura 4.10 – MANCAL DE DESLIZAMENTO	16
Figura 4.11 – MANCAL SUSTENTADO NA CARCAÇA.....	17
Figura 4.12 – MANCAL SUSTENTADO EM PEDESTAL	17
Figura 4.13 - BASE	18
Figura 4.14 – PEDESTAL	18
Figura 4.15 – CHUMBADOR.....	19
Figura 4.16 – CALÇO	19
Figura 4.17 – TUBULAÇÕES, TURBINA A VAPOR.....	20
Figura 5.1 – SISTEMA GENERALIZADO PARA ALINHAMENTO DE EIXOS.....	22
Figura 5.2 – MOTOR ELÉTRICO ACIONANDO BOMBA CENTRÍFUGA	22
Figura 5.3 - SISTEMA ALINHADO.....	23
Figura 5.4 - DESALINHAMENTO PARALELO	23
Figura 5.5 - DESALINHAMENTO ANGULAR	24
Figura 5.6 - DESALINHAMENTO MISTO	24
Figura 5.7 - DESALINHAMENTO AXIAL	25
Figura 5.8 – FORÇAS DE REAÇÃO NOS MANCAIS.....	26
Figura 5.9 – VARIAÇÃO DAS FORÇAS DE REAÇÃO	26
Figura 5.10 – CONSUMO DE ENERGIA PARA ACOPLAMENTO	27
Figura 5.11 – CONSUMO DE ENERGIA PARA ACOPLAMENTO	27
Figura 5.12 – MANCAL DANIFICADO POR DESALINHAMENTO	28
Figura 5.13 – ACOPLAMENTO DANIFICADO POR DESALINHAMENTO.....	28
Figura 6.1 - DESLOCAMENTOS PARA CORREÇÃO DO DESALINHAMENTO	30
Figura 6.2 - PEDESTAIS FIXADOS NOS CUBOS DO ACOPLAMENTO	31
Figura 6.3 - MÉTODO REVERSO.....	32
Figura 6.4 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO DESALINHAMENTO.....	33
Figura 6.5 – DEFLEXÃO DA HASTE	34
Figura 6.6 - ESQUEMA BÁSICO DO MÉTODO PERIFÉRICO DIRETO	35

Figura 6.7 - MÉTODO A LASER.....	35
Figura 8.1 - COLETOR PORTÁTIL.....	43
Figura 8.2 - PONTOS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO.....	43
Figura 8.3 - VISÃO GLOBAL DO ESTADO MÁQUINA.....	44
Figura 8.4 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO.....	45
Figura 8.5 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS.....	46
Figura 8.6 - ESPECTRO TÉRMICO.....	47
Figura 9.1 – RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO.....	49
Figura 9.2 – EFEITO TERMOELÉTRICO.....	51
Figura 9.3 – MEDIDOR DE TEMPERATURA COM TERMOPAR.....	52
Figura 9.4 - MEDIDOR DE TEMPERATURA SEM CONTATO.....	53
Figura 9.5 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM TERMOVISOR.....	54
Figura 9.6 – TERMOVISOR.....	55
Figura 10.1 – BANCADA DE TESTES.....	57
Figura 10.2 – BANCADA DE TESTES, ALINHADOR A LASER.....	57
Figura 10.3 - TERMOVISOR.....	58
Figura 10.4 – COLETOR ANALISADOR DE VIBRAÇÕES.....	58
Figura 10.5 – BANCADA DE TESTES, CONTROLE DO DESALINHAMENTO.....	59
Figura 10.6 – BANCADA DE TESTES, ACOPLAMENTO FLEXÍVEL DE ELASTÔMERO.....	59
Figura 10.7 – BANCADA DE TESTES, ACOPLAMENTO FLEXÍVEL DE LÂMINAS.....	60
Figura 10.8 – BANCADA DE TESTES, PROTEÇÃO DO ACOPLAMENTO.....	60
Figura 10.9 – APLICAÇÃO REAL, ELASTÔMERO.....	62
Figura 10.10 – APLICAÇÃO REAL, ACOPLAMENTO DE LÂMINAS.....	62
Figura 10.11 – PROTEÇÃO MODIFICADA PARA CHAPA EXPANDIDA.....	63
Figura 10.12 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS VERIFICADO PARA O DESALINHAMENTO.....	63
Figura 11.1 – ESTUDO DE CASO 1.....	65
Figura 11.2 – VARIAÇÃO TÉRMICA NO ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO.....	66
Figura 11.3 – ENSAIO, IMAGEM ANTES DA PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm.....	67
Figura 11.4 – ENSAIO, DOIS MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm.....	68
Figura 11.5 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm.....	68
Figura 11.6 – ENSAIO, TRINTA MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm.....	69
Figura 11.7 – ENSAIO, UM MINUTO APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 250/100 mm.....	69
Figura 11.8 – ENSAIO, TRÊS MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 250/100 mm.....	70
Figura 11.9 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 250/100 mm.....	70
Figura 11.10 – ENSAIO, DEZESETE MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 250/100 mm.....	71

Figura 11.11 – ESTUDO DE CASO 2.....	72
Figura 11.12 – ESTUDO DE CASO 2 – IMAGEM TÉRMICA.....	72
Figura 11.13 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 0/100 mm..	73
Figura 11.14 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 50/100 mm	74
Figura 11.15 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm	74
Figura 11.16 – PROTEÇÃO DO ACOPLAMENTO COM POLICARBONATO	75
Figura 11.17 – INFLUÊNCIA DE UM CORPO QUENTE PRÓXIMO A UM CORPO FRIO.....	75
Figura 11.18 – ÂNGULOS DE TOMADA DE IMAGENS	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – FORÇAS DE REAÇÃO POR DESALINHAMENTO – MODELO TSK.....	29
Tabela 7.1 - FATOR PARA CÁLCULO DAS TOLERÂNCIAS DE ALINHAMENTO PARA 3600 rpm..	38
Tabela 11.1 – VARIAÇÃO TÉRMICA PARA O ESTUDO DE CASO 1	65
Tabela 11.2 – VARIAÇÃO TÉRMICA PARA O ESTUDO DE CASO 1	65

RESUMO

O uso da termografia para avaliação do desalinhamento de eixos de máquinas rotativas pode ser uma ferramenta auxiliar à análise de vibrações se forem observadas as suas limitações. Este trabalho investiga, através de experimentos em laboratório e em planta industrial e revisão de literatura, a viabilidade dessa técnica ser empregada na indústria como ferramenta de manutenção preditiva. Foram empregados acoplamentos flexíveis de lâminas metálicas e de elastômero. O objetivo principal foi o estudo da relação de escala entre a geração de calor no elemento flexível do acoplamento e a amplitude de desalinhamento. Concluiu-se não ser possível estabelecer uma escala confiável devido a vários fatores limitantes. Observou-se também que ocorre geração de calor, decorrente do desalinhamento, nos diferentes modelos de elementos flexíveis e que o espectro térmico não é influenciado pelo ângulo de tomada da imagem. Observou-se, como grande limitação para uso na indústria, que o acoplamento recebe mais calor do motor elétrico do que da geração devido ao desalinhamento dos eixos e que se consegue resultados satisfatórios somente para valores de desalinhamento muito elevados se comparados com as recomendações de tolerâncias.

ABSTRACT

The use of the infrared thermography for evaluation of the misalignment of shafts of rotative machines might be an auxiliary tool for the analysis of vibrations if limitations considered. This work investigates, through experiments in laboratory and in industrial plant and literature review, the viability of that technique to be used in industry a tool for predictive maintenance. Two kinds of flexible couplings were employed, namely; one made of metallic sheets and other of an elastomer. The main objective is the study of the scale relationship among the generation of heat in the flexible element of the coupling and the misalignment width. Was concluded not to be possible to establish a reliable scale due to several restricts. It was also observed that it heat generation occur due to the misalignment, in the different models of flexible elements, and that the thermal spectrum is not influenced by the angle used to capture the image. It was observed, a great limitation for the use in industry, that the coupling receives more heat from the electric motor than from the generation due to the misalignment of the shafts. Thus, satisfactory results were obtained values of very high misalignment when compared to tolerances recommendations.

CAPÍTULO 1

Neste capítulo apresenta-se a introdução, os objetivos, as delimitações, a justificativa, a relevância, o interesse e a viabilidade do tema.

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de manutenção preditiva vêm avançando, impulsionadas pela disponibilidade de sofisticados recursos de software, hardware. São técnicas que monitoram a condição de funcionamento e trabalham com a probabilidade de descoberta dos agentes causadores de falhas em equipamentos e, portanto, podem ocorrer situações em que o percentual de acerto pode ser insatisfatório. É fato que, quanto maior for índice de acertos no diagnóstico de falhas menor será o custo da manutenção de uma planta industrial.

Para aumento do percentual de acerto dos diagnósticos de falha pode-se associar duas ou mais técnicas. Este trabalho propõe o estudo da associação da análise de vibrações com termografia para reduzir as dúvidas no diagnóstico do desalinhamento de eixos.

1.1 OBJETIVOS

Estudo de metodologia para avaliação do desalinhamento de eixos de máquinas rotativas através de análise da distribuição do calor gerado no elemento flexível de acoplamentos com lâminas flexíveis e acoplamentos com elastômero.

Pesquisa de técnicas para verificação e análise da distribuição do calor gerado no elemento flexível do acoplamento de eixos de máquinas rotativas visando estabelecer uma relação de escala entre o espectro da distribuição do calor e a amplitude de desalinhamento.

Pesquisa bibliografia sobre conceituação de desalinhamento, conseqüências do desalinhamento em máquinas rotativas, métodos quantitativos e qualitativos para avaliação de desalinhamento de eixos de máquinas rotativas e suas limitações de uso.

1.2 DELIMITAÇÕES

Nas aplicações industriais, na maioria dos casos, os equipamentos rotativos são compostos por um conjunto de duas máquinas, sendo uma chamada de acionadora e outra de acionada. Os principais acionadores são motores elétricos e turbinas a vapor. As máquinas acionadas mais importantes são bombas, compressores, sopradores, ventiladores, misturadores, picadores, entre outros. Em alguns casos usam-se redutores ou multiplicadores de velocidade entre o acionador e o acionado.

A posição de montagem preferencialmente é horizontal, podendo ser também vertical e, em poucos casos, oblíqua.

Cada máquina possui um eixo, sustentado por dois mancais, e quando a operação ocorre abaixo da primeira frequência natural é denominado eixo rígido.

A ligação entre os eixos é feita por um elemento de máquina chamado de acoplamento, podendo ser rígido ou flexível e ter várias tecnologias construtivas.

Este trabalho limitou seu campo de pesquisa em máquinas de eixos rígidos horizontais com acoplamentos flexíveis de lâminas e de elastômero. Porém, no estudo de casos, foi considerada uma máquina com eixo vertical. Também se limitou o estudo em máquinas com velocidade angular nominal de 3600 rpm.

1.3 JUSTIFICATIVA

A manutenção em unidades industriais é considerada função estratégica de competitividade e pode influenciar, significativamente, o lucro de empresas. O gerenciamento da atividade de manutenção, geralmente, é feito através de indicadores de desempenho dentre os quais se destacam o tempo médio entre falhas, o tempo de reparo e o custo da manutenção.

O tempo médio entre falhas é influenciado por vários fatores como operação, projeto do equipamento e qualidade de manutenção. Um dos fatores que tem influência na qualidade de manutenção é o adequado alinhamento de eixos de máquinas rotativas, o qual influencia a vida útil de componentes como mancais e elementos flexíveis dos acoplamentos.

O tempo de reparo e o custo da intervenção podem ser reduzidos,

significativamente, através do correto diagnóstico de falhas. O grau de certeza no diagnóstico de falhas é dependente da disponibilidade e do domínio de técnicas computacionais de análise e de recursos de hardware.

Com a oferta crescente de hardware e software para aquisição e processamento de ondas eletromagnéticas da radiação do corpo negro torna-se possível desenvolver aplicações específicas, como por exemplo, avaliação do desalinhamento de eixos de máquinas rotativas. Dessa forma, o estudo procurou investigar um método complementar à análise de vibrações.

Como relevância científica a pesquisa visa estabelecer subsídios para a ampliação do uso da termografia, analisar limitações e também ser útil para futuras pesquisas.

Como relevância social o estudo visa promover o aumento da confiabilidade na avaliação de desalinhamento de eixos de máquinas rotativas e, conseqüentemente, a redução do tempo de reparo e do custo da intervenção.

A opção pelo tema se deu nos últimos dez anos, período em que se presenciou diversos problemas referentes à avaliação e correção do desalinhamento de eixos de máquinas rotativas.

A pesquisa utilizou as instalações da PUCPR e da PETROBRAS UN REPAR. Para a obtenção de dados, usou-se uma bancada construída especificamente para esta finalidade, podendo ter diferentes aplicações posteriores. Também se obteve dados em máquinas, em plena operação, da PETROBRAS UN REPAR. A orientação foi dada pelo Corpo Docente da PUCPR. Então, dessa forma, assegurou-se a viabilidade desse projeto.

CAPÍTULO 2

Neste capítulo descrevem-se os problemas que o presente trabalho procura resolver, são estabelecidas as hipóteses de solução para os problemas descritos, podendo estas, serem ou não confirmadas após a conclusão do presente trabalho e define-se a metodologia que será usada.

2 PROBLEMATIZAÇÃO E METODOLOGIA

2.1 PROBLEMAS

A partir do problema central, decorrerão quatro problemas corolários.

2.1.1 Problema Central

Existe relação de escala entre a geração de calor no elemento flexível do acoplamento e a amplitude de desalinhamento?

2.1.2 Problemas Corolários

1. Para os diferentes modelos de elementos flexíveis é possível avaliar a geração de calor decorrente do desalinhamento?
2. Que alterações de projeto serão necessárias nas proteções dos acoplamentos para poder usar a termografia?
3. Qual a influência do ângulo de tomada do espectro térmico na definição da escala de relação com a amplitude?
4. Quais os fatores limitantes na aplicação do método proposto?

2.2 HIPÓTESES

Conforme os problemas apresentados, propõe-se a seguinte hipótese central, decorrendo quatro hipóteses corolárias.

2.2.1 Hipótese Central

Existe alguma relação de escala entre a geração de calor no elemento flexível do acoplamento e a amplitude de desalinhamento.

2.2.2 Hipóteses Corolárias

É possível avaliar a geração de calor decorrente do desalinhamento para os diferentes modelos de elementos flexíveis tipo lâmina flexível e elastômero.

Serão necessárias alterações de projeto nas proteções dos acoplamentos, transformando-as de fixas em articuladas ou usando-se material transparente ou usando-se material vazado.

O ângulo transversal de tomada do espectro térmico não influencia na definição da escala de relação com a amplitude. Há influência do ângulo longitudinal.

O principal fator limitante na aplicação do método proposto é a condução de calor pelo eixo tendo como fonte quente a máquina acionada ou acionadora.

2.3 O MÉTODO

A pesquisa será conduzida segundo um modelo de estudo de casos e também análise bibliográfica, ou seja, empírica e teórica.

O método utilizado será o hipotético-dedutivo.

CAPÍTULO 3

Neste capítulo mostra-se a revisão bibliográfica localizada durante a pesquisa, organizada cronologicamente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil o alinhamento de eixos foi muito pouco explorado na literatura técnica, tendo alguns poucos artigos publicados e nenhum livro específico.

No Exterior, principalmente nos Estados Unidos da América, o alinhamento de eixos é assunto de livros com dedicação exclusiva ao assunto, além de artigos publicados.

Os livros de projetos de máquinas ainda não contemplam os esforços decorrentes do desalinhamento residual de eixos.

Os fabricantes de equipamentos para o alinhamento de eixos promovem algumas literaturas técnicas para sustentação dos seus produtos. Destacam-se, nesse caso, os fabricantes de origem alemã.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1986) publica norma sobre acoplamentos flexíveis contemplando definições e dimensionamento estático e dinâmico.

MITCHELL (1990) apresenta estudo, de forma objetiva, porém completa sobre vários tópicos do assunto. Apresenta os cuidados a serem tomados para o correto posicionamento e fixação de máquinas nas suas bases, explana os métodos de alinhamento destacando-se o detalhamento esquemático do sistema a laser. O grande destaque do seu trabalho está nas recomendações para diagnóstico do desalinhamento por análise de vibrações, considerando as frequências geradas pelos componentes do acoplamento.

CHARLES JACKSON (1990) sugere procedimentos para alinhamento de eixos a frio e a quente e justifica sua proposição através do estudo de casos.

LORENC (1991) faz estudo detalhado sobre a relação da amplitude da velocidade de vibração, em polegadas pico, com a amplitude de desalinhamento paralelo para diferentes tipos de acoplamentos flexíveis.

DUFOUR (1992) apresenta estudo, de forma objetiva, sobre tópicos básicos do assunto. Apresenta parcialmente os métodos de alinhamento, conceituação do desalinhamento de eixos, tolerâncias e acoplamentos. Destaca-se, no seu estudo, a análise do erro causado pela deflexão dos suportes dos relógios.

WOWK (1992) faz um estudo sobre vários tópicos do assunto. Faz menção à definição de alinhamento de eixos, formas de diagnóstico e de medição do desalinhamento, preparação de máquinas e pré-alinhamento, métodos para alinhamento, tolerâncias, análise de ressonância, modificações nas instalações e análise de dilatações térmicas. No caso de diagnóstico do desalinhamento em regime de trabalho, ou seja, com o equipamento operando.

XU e MARANGONI (1994) fazem a modelagem pelo método dos elementos finitos de um sistema motor+acoplamento-flexível+conjunto rotativo com rotor genérico entre mancais e conseguem fazer comprovações experimentais, validando este modelo. Destaca-se no estudo deles o equacionamento do movimento vibratório considerando as forças do desalinhamento dos eixos e do desbalanceamento em um plano.

SEKHAR e PRABHU (1995) fazem estudo dos efeitos do desalinhamento de eixos na vibração de máquinas rotativas através da modelagem pelo método dos elementos finitos de um sistema acionador+acoplamento-flexível+acionado e, com isso, conseguem mostrar de forma clara o efeito do desalinhamento nas frequências 1x e 2x. Destaca-se no estudo deles o equacionamento das forças de reação nos mancais decorrentes do desalinhamento de eixos,.

PIOTROWSKI (1995) faz um estudo completo sobre o assunto. Faz menção à definição de alinhamento de eixos, formas de diagnóstico e de medição do desalinhamento, fundações, bases e tubulações de máquinas, métodos para alinhamento, tolerâncias, projeto de suportes para medição do desalinhamento, acoplamentos rígidos e flexíveis, verificações prévias ao alinhamento, modelagem gráfica, alinhamento de trens de máquinas, considerações para máquinas específicas como turbinas a vapor, compressores, entre outros e análise de dilatações térmicas em máquinas. No caso de diagnóstico do desalinhamento em regime de trabalho, ou seja, com o equipamento operando, esse autor, cita o uso de termografia, além de vibrações. O estudo termográfico citado trata de experimentos realizados no *Infraspection Institute*, nos EUA, sob condições devidamente

controladas para cada tipo de acoplamento utilizado.

BLOCH (1998) discute o método de alinhamento a laser, tolerâncias, economia de energia através da correção do alinhamento de eixos, redução de custos de manutenção, pelo aumento do tempo médio entre falhas, através do correto alinhamento de eixos e acoplamentos. Destaca-se, no seu estudo, a análise comparativa entre os diferentes tipos de acoplamentos.

TADEO e CAVALCA (2001) fazem análise e comparação dos modelos propostos por Kramer e por Nelson.

DAINTITH e GLATT (2001) estudam a economia de energia através da correção do alinhamento de eixos para acoplamentos de pinos e de elastômero.

GRAF (2001) estuda o custo da precisão de correção do alinhamento e os benefícios que podem ser obtidos pelo correto alinhamento.

NSK (2003) divulga estudo sobre diagnóstico de falhas em rolamentos o qual contempla o desalinhamento como agente causador.

CAPÍTULO 4

Neste capítulo apresentam-se os elementos de máquinas que afetam o alinhamento de eixos. Serão abordados acoplamentos, proteção dos acoplamentos, mancais, elementos de fixação das máquinas à base e tubulações ligadas às máquinas em estudo.

4 ELEMENTOS DE MÁQUINAS LIGADOS AO ALINHAMENTO DE EIXOS

O alinhamento de eixos é influenciado pelo comportamento no tempo dos elementos de interface direta ou indireta que sustentam os eixos, conforme descrito nos próximos subitens.

4.1 ACOPLAMENTOS

O acoplamento faz a ligação entre eixos de equipamentos acionadores e acionados e tem como função principal transmitir energia.

4.1.1 Acoplamentos para Transmissão de Potência e Sincronismo de Velocidade Angular

Os acoplamentos rígidos, geralmente usados em conjunto de máquinas verticais, promovem a ligação entre os eixos do equipamento acionador e acionado de forma que se pode considerar um único eixo. Com isso é possível dispensar parcialmente os mancais no equipamento acionado. Como não existe qualquer movimento relativo entre as partes desse acoplamento, não é necessário lubrificá-lo ou substituir elementos por desgaste ou quebra.

Os acoplamentos flexíveis promovem a ligação entre os eixos do equipamento acionador e acionado de forma que ambos os eixos continuam com liberdade de movimento, exceto liberdade de movimento relativo angular, ou seja, têm o movimento de rotação sincronizado. Isso implica na necessidade de mancais radiais e axiais tanto no equipamento acionado quanto no acionador, exceto em

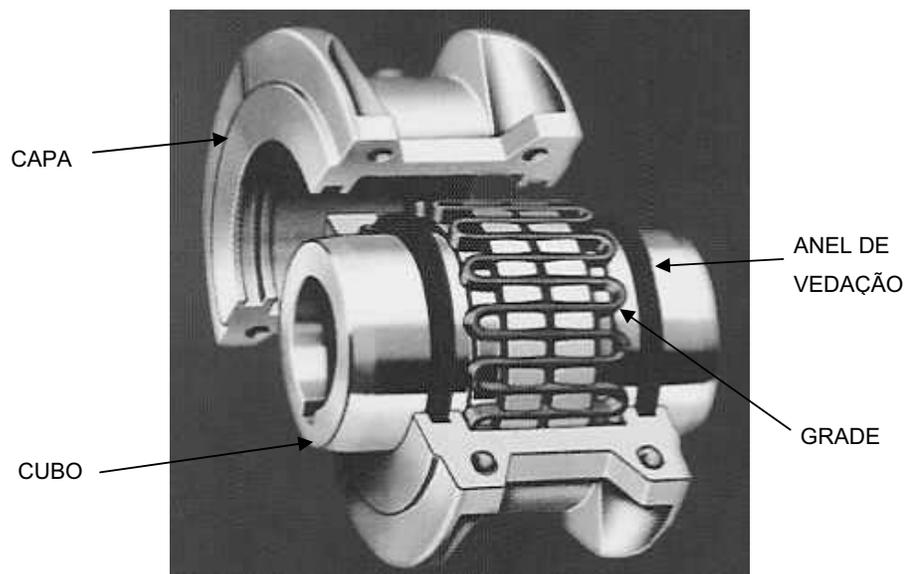
motores elétricos com mancais de deslizamento onde forças magnéticas suportam o conjunto rotativo axialmente. Devido a um inevitável desalinhamento residual entre os eixos ocorre movimento relativo entre as partes desse acoplamento e, com isso, é necessário lubrificá-lo ou substituir elementos por desgaste ou quebra.

Os acoplamentos flexíveis são os mais usados em equipamentos dinâmicos. Com exceção ao tipo magnético, existirão dois cubos, feitos de aço carbono SAE 1045, sendo um unido ao eixo acionador e outro ao eixo acionado. As uniões dos cubos com os eixos são feitas por ajuste com interferência e chaveta. Os acoplamentos flexíveis podem ser classificados como:

- **lubrificados:**

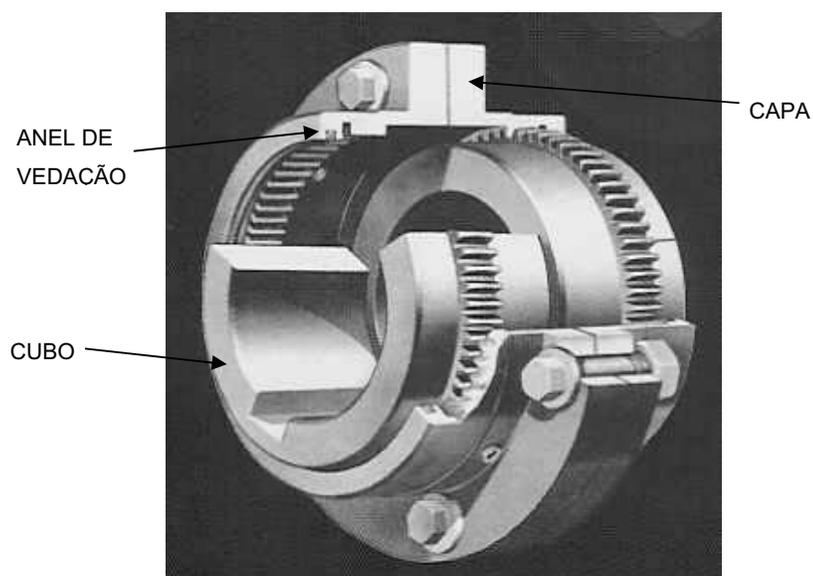
- grade – o elemento flexível é uma grade de aço-mola acomodada em ranhuras nos cubos. As ranhuras têm uma curvatura que acomoda a parte da grade em deformação no caso de desalinhamento dos eixos. A capa bipartida tem a finalidade de proteger e armazenar a graxa lubrificante e é feita em aço SAE 1020. Os anéis de vedação, de borracha natural, impedem fuga do lubrificante. Este modelo de acoplamento se aplica geralmente para casos em que a distância entre as pontas dos eixos da máquina acionadora e acionada é pequena, entre dois e dez milímetros. Ver Figura 4.1;
- engrenagem - a flexibilidade é dada pelo engrenamento dos dentes internos das capas com os dentes externos dos cubos. Os dentes têm uma curvatura que permite desalinhamento dos eixos. As capas têm a finalidade de proteger e armazenar a graxa lubrificante e são feitas em aço SAE 1045. Os anéis de vedação, de borracha natural, impedem fuga do lubrificante. Este modelo de acoplamento se aplica para qualquer distância entre as pontas dos eixos da máquina acionadora e acionada. Quando essa distância se torna grande, entre setenta e quinhentos milímetros, é usado um espaçador para fazer a ligação entre as. Essa distância é limitada, pelos fabricantes, quando o peso próprio do espaçador se torna significativo. Ver Figura 4.2.

Figura 4.1 - ACOPLAMENTO DE GRADE



Fonte: POWERFLEX, 2000.

Figura 4.2 - ACOPLAMENTO DE ENGRENAGEM



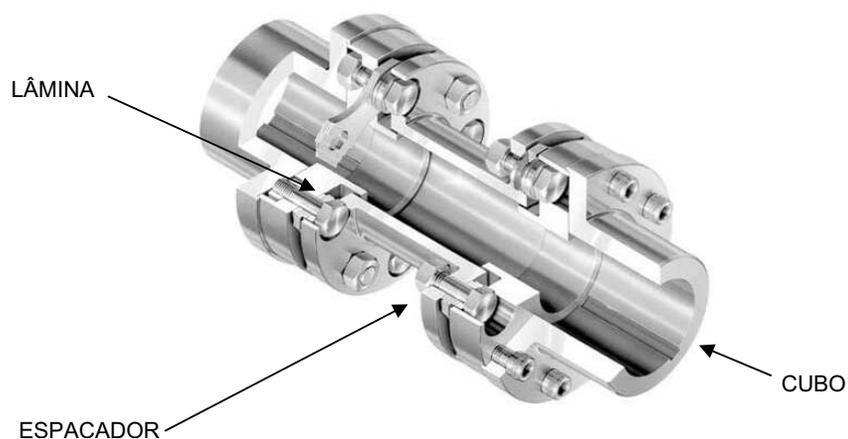
Fonte: POWERFLEX, 2000.

- **não lubrificados:**

- lâminas - a flexibilidade é dada por um par de feixe de lâminas. O feixe de lâminas é feito com chapas de aço inoxidável AISI 309 sobrepostas e rebitadas. O rebite é vazado tornando-se ponto de

fixação. Os pontos de fixação são em número par, sendo metade fixados alternadamente no cubo e a outra metade fixados no espaçador. Devido à essa fixação alternada através dos pontos de fixação do feixe de lâminas o desalinhamento dos eixos é absorvido pela deformação do feixe de lâminas. Este modelo de acoplamento se aplica para qualquer distância entre as pontas dos eixos da máquina acionadora e acionada. Quando essa distância se torna grande, entre setenta e quinhentos milímetros, é usado um espaçador para fazer a ligação entre os cubos. Essa distância é limitada, pelos fabricantes, quando o peso próprio do espaçador se torna significativo. O espaçador é feito em aço carbono SAE 1045 ou em fibra de carbono. Ver Figura 4.3;

Figura 4.3 - ACOPLAMENTO DE LÂMINAS

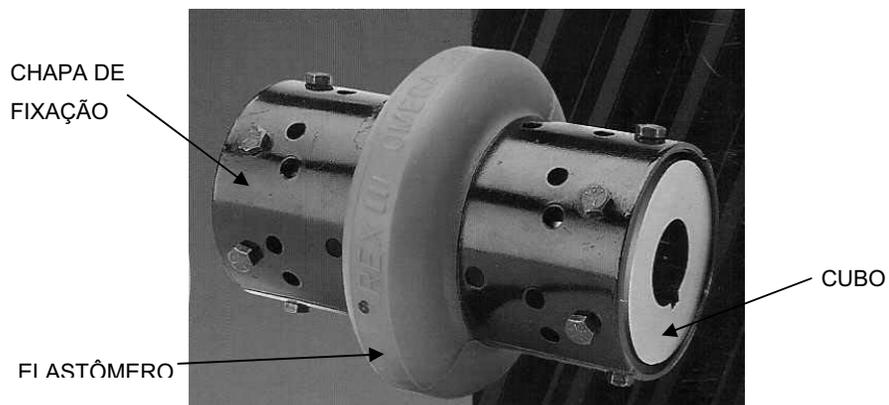


Fonte: JOHN CRANE, 2004.

- elastômero - o elemento flexível de ligação entre os cubos é feito com elastômero, que é uma borracha sintética, vulcanizado à chapas de aço carbono SAE 1020 pintadas. O desalinhamento dos eixos é absorvido pela deformação do elastômero. Este modelo de acoplamento se aplica para qualquer distância entre as pontas dos eixos da máquina acionadora e acionada. Quando essa distância se torna grande, acima de trinta milímetros, é usado um espaçador para fazer a ligação entre os cubos ou é aumentada a largura das chapas

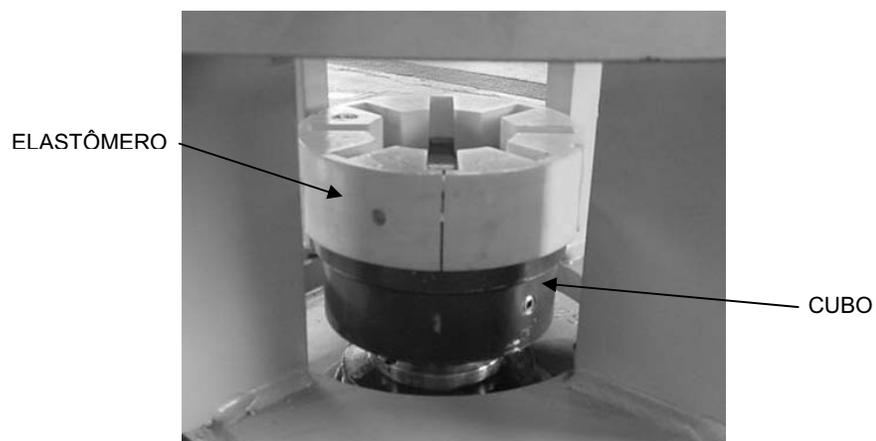
de fixação. Essa distância é limitada, pelos fabricantes, quando o peso próprio do espaçador se torna significativo. O espaçador e os cubos são feitos em aço carbono SAE 1020. Ver Figura 4.4 e Figura 4.5. No caso da Figura 4.5 existe um anel rígido que é fixado ao elastômero para evitar a sua centrifugação.

Figura 4.4 - ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO



Fonte: REXNORD, 1997.

Figura 4.5 - ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO

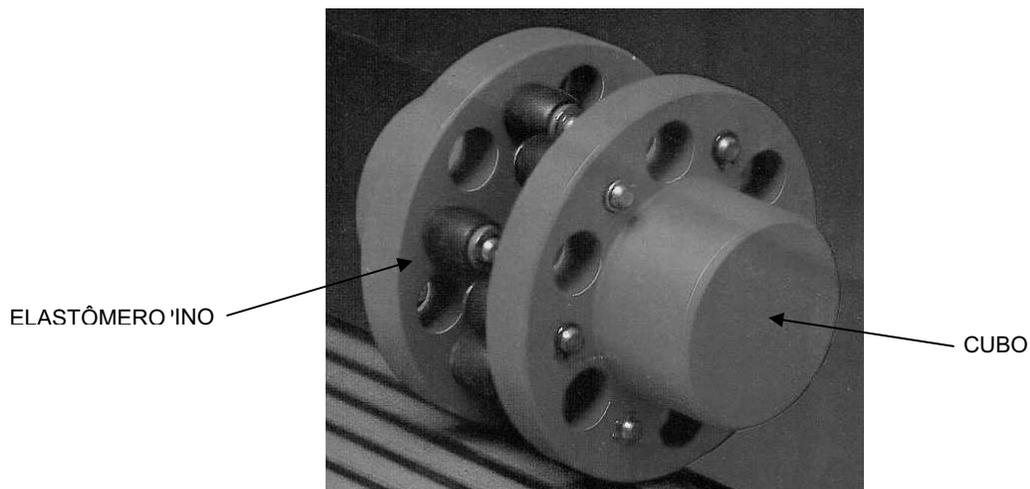


Fonte: O AUTOR.

- pinos - o elemento flexível de ligação entre os cubos é feito com uma bucha de elastômero inserida em um pino de aço inoxidável AISI 304. As buchas encaixam em furos dos cubos, formando pares invertidos. O desalinhamento dos eixos é absorvido pela deformação das buchas elastômero que possuem uma curvatura específica para

isso. Este modelo de acoplamento se aplica para pequenas distâncias entre as pontas dos eixos da máquina acionadora e acionada. Ver Figura 4.6;

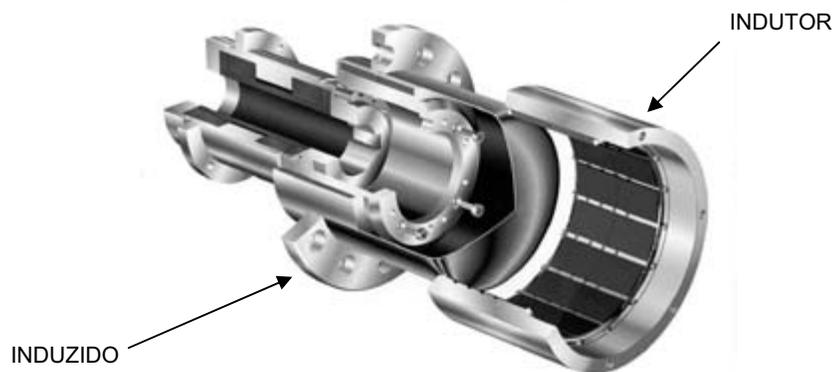
Figura 4.6 - ACOPLAMENTO DE PINOS



Fonte: TRANSMOTÉCNICA, 1998.

- magnético - a ligação entre os cubos é feita por onde forças magnéticas. Não ocorre contato entre o indutor e o induzido. O desalinhamento dos eixos é absorvido pela folga entre o indutor e o induzido. Este modelo de acoplamento é usado em aplicações especiais. Ver Figura 4.7;

Figura 4.7 - ACOPLAMENTO MAGNÉTICO



Fonte: BURGMANN, 2004.

- correias - o acoplamento por correias normalmente é tratado como transmissão mecânica e não como acoplamento.

4.2 PROTEÇÃO DOS ACOPLAMENTOS

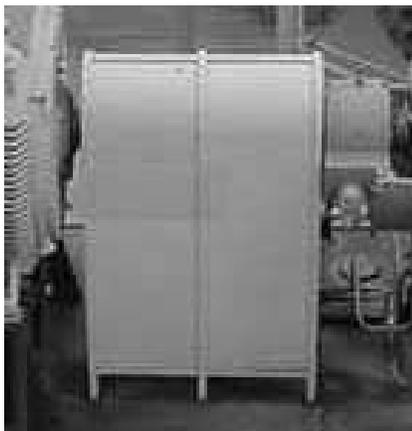
Os acoplamentos ficam expostos, ou seja, fora das carcaças das máquinas e possuem movimento de rotação oferecendo perigo às pessoas. Para reduzir o risco de acidentes por contato acidental ou pela soltura de algum componente são usadas proteções fabricadas em aço, conforme exemplo na Figura 4.8.

As proteções oferecem dificuldade para a inspeção visual com o equipamento parado, inspeção com pistola estroboscópica, medição da temperatura e tomada de imagem térmica com o equipamento operando.

4.3 MANCAIS

Os mancais têm a função de sustentação do eixo de máquinas, permitindo liberdade de rotação e compensação da dilatação térmica axial e da deflexão radial. A classificação básica para os mancais é em rolamento, Figura 4.9, e deslizamento, Figura 4.10.

Figura 4.8 – PROTEÇÃO DE ACOPLAMENTO



Fonte: O AUTOR.

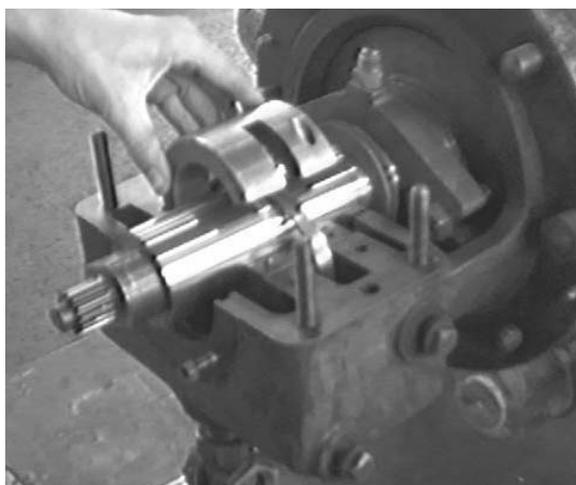
A liberdade de movimento do eixo ou da parte móvel do mancal em relação à parte fixa é chamada de folga e geralmente varia de 0,04 mm até 0,20 mm. A separação da parte móvel da fixa é feita pelo filme de lubrificante. Todas cargas atuantes no eixo provocam pressão no filme de lubrificante. Caso ocorra qualquer falha no filme de lubrificante a consequência imediata será a avaria do mancal.

Figura 4.9 – MANCAL DE ROLAMENTO



Fonte: O AUTOR.

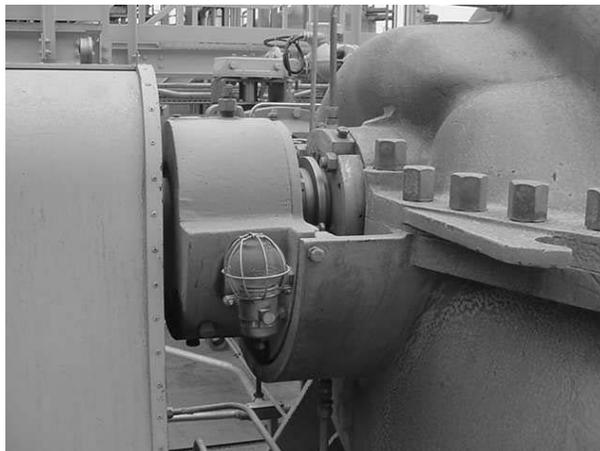
Figura 4.10 – MANCAL DE DESLIZAMENTO



Fonte: O AUTOR.

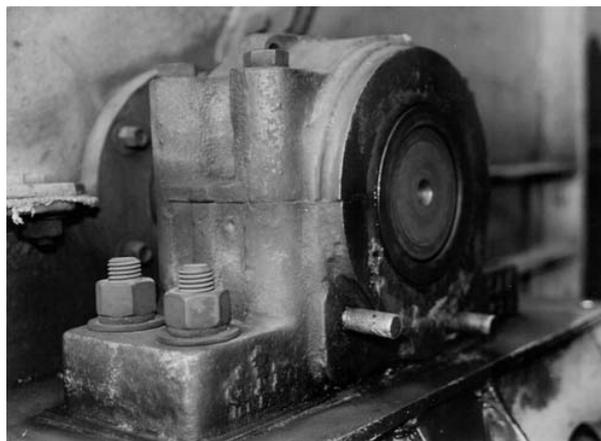
Os mancais ficam alojados ou sustentados na carcaça das máquinas, conforme Figura 4.11, ou em pedestais independentes, conforme Figura 4.12.

Figura 4.11 – MANCAL SUSTENTADO NA CARÇAÇA



Fonte: O AUTOR.

Figura 4.12 – MANCAL SUSTENTADO EM PEDESTAL

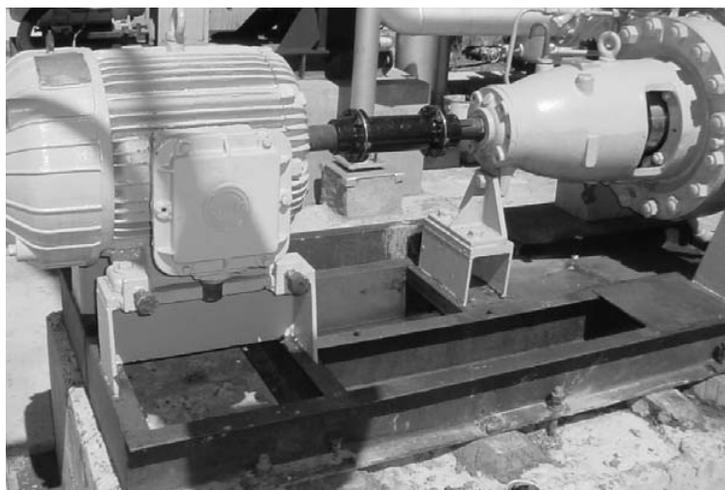


Fonte: O AUTOR

4.4 POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO DAS MÁQUINAS

Tanto a carcaça quanto os pedestais são fixados na base, sendo esta um bloco estrutural em concreto e aço devidamente apoiado no solo, conforme pode ser observado na Figura 4.13.

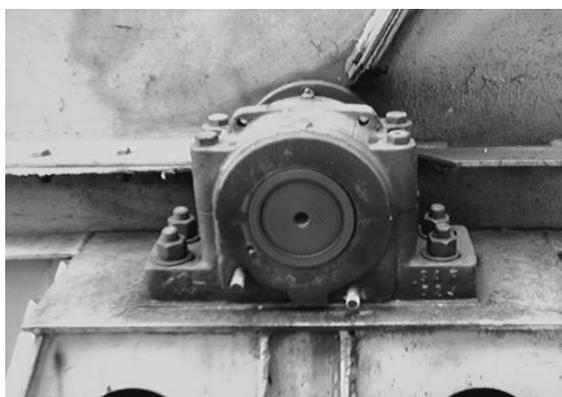
Figura 4.13 - BASE



Fonte: O AUTOR

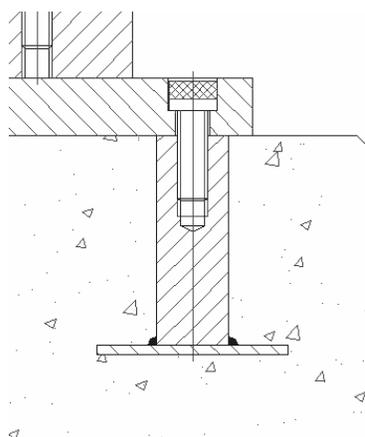
A fixação das carcaças e pedestais independentes, conforme Figura 4.14, às bases é feita por meio de parafusos. Estes parafusos podem ser roscados diretamente à base por meio de chumbadores, Figura 4.15, ou em estruturas metálicas fixadas ao concreto, conforme Figura 4.13.

Figura 4.14 – PEDESTAL



Fonte: O AUTOR

Figura 4.15 – CHUMBADOR



Fonte: O AUTOR

Para a correção do posicionamento vertical de um eixo usam-se calços, normalmente em latão ou aço inoxidável devido a resistência à oxidação. Observar Figura 4.16.

Figura 4.16 – CALÇO

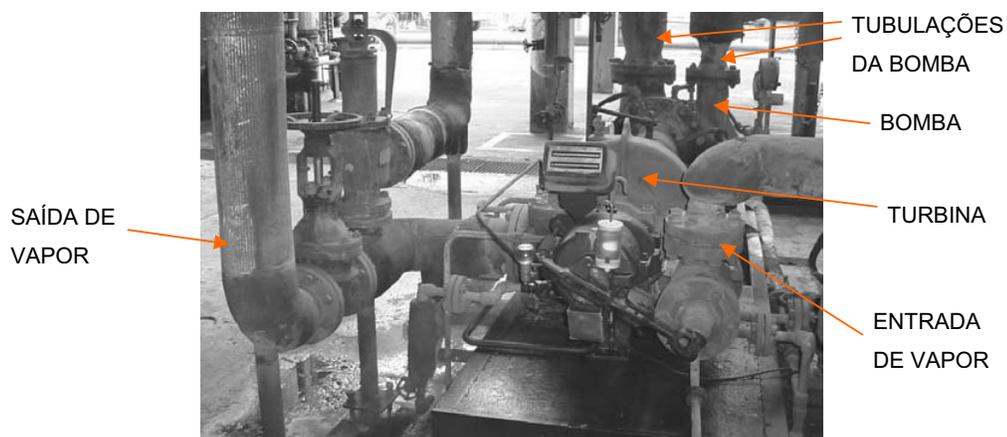


Fonte: PRUFTECHNIK, 2003.

4.5 TUBULAÇÕES

As tubulações são ligadas à carcaça das máquinas movidas na direção radial e ou axial, como, por exemplo, bombas e compressores. No caso de máquinas acionadoras são ligadas na direção radial, como, por exemplo, turbinas a vapor. Ambos os casos podem ser vistos na Figura 4.17. As tubulações podem sofrer dilatações ou contrações térmicas e, com isso, provocar elevados esforços sobre a carcaça das máquinas, alterando o seu posicionamento.

Figura 4.17 – TUBULAÇÕES, TURBINA A VAPOR



Fonte: O AUTOR

CAPÍTULO 5

Neste capítulo apresenta-se o conceito de alinhamento de eixos, abordando tipos de desalinhamentos, importância do alinhamento e consequências do desalinhamento.

5 CONCEITUAÇÃO DO ALINHAMENTO DE EIXOS

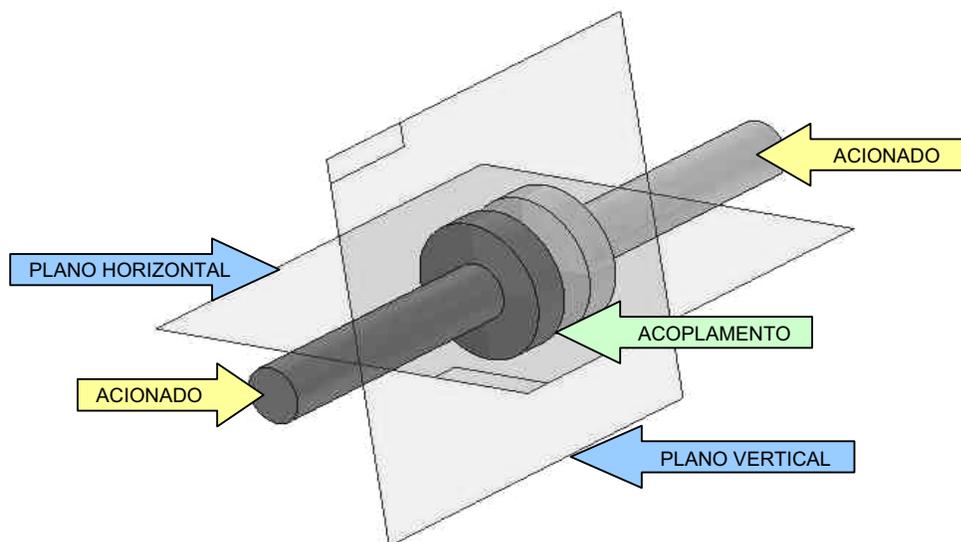
A terminologia adotada para alinhamento de eixos ou desalinhamento de eixos será apenas alinhamento e desalinhamento. Para a caracterização de um sistema para a conceituação de alinhamento considera-se a posição relativa dos eixos em dois planos imaginários horizontal e verticalmente, conforme Figura 5.1. O sistema generalizado da Figura 5.1 representa o caso real da Figura 5.2, onde um motor elétrico é o acionador e uma bomba centrífuga é o acionado.

Estabelece-se um dos eixos como fixo, denominado de máquina estacionária, e outro como móvel, denominado de máquina móvel. A escolha do eixo móvel é determinada pela facilidade de mobilidade da máquina, por exemplo, um motor elétrico tem maior facilidade de mobilidade do que uma bomba centrífuga devido ao fato de não ter tubulações conectadas, somente a fiação elétrica, conforme ilustrado na Figura 5.2. Por outro lado, uma turbina a vapor tem maior dificuldade de mobilidade do que uma bomba centrífuga, devido à alta rigidez das suas tubulações de entrada e saída de vapor, conforme Figura 4.17.

As ações de medição e de correção do desalinhamento, que serão especificados no Capítulo 6, sempre estarão referenciadas a estes dois planos.

Considera-se que um conjunto de máquinas acionador-acionado está alinhado quando o desvio de concentricidade dos eixos, em todo o seu comprimento e com uma revolução completa, está com valores de desvio dentro dos limites de tolerância. A Figura 5.3 ilustra um sistema perfeitamente alinhado, o qual deve ser considerado nos planos horizontal e vertical.

Figura 5.1 – SISTEMA GENERALIZADO PARA ALINHAMENTO DE EIXOS



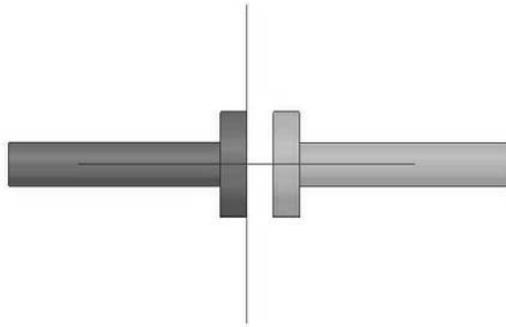
Fonte: O AUTOR

Figura 5.2 – MOTOR ELÉTRICO ACIONANDO BOMBA CENTRÍFUGA



Fonte: O AUTOR

Figura 5.3 - SISTEMA ALINHADO

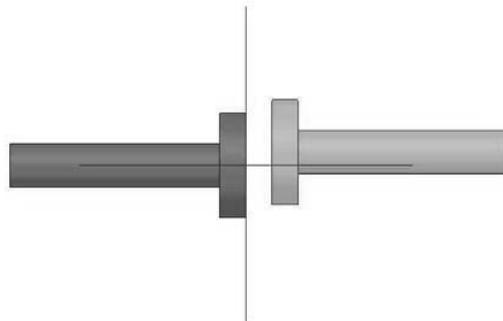


Fonte: O AUTOR

5.1 TIPOS DE DESALINHAMENTOS

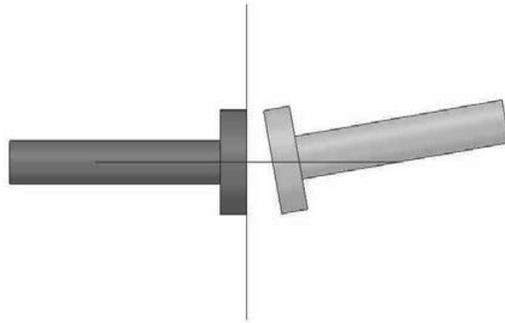
Um desalinhamento de eixos pode ser puramente paralelo, conforme Figura 5.4 ou puramente angular, conforme Figura 5.5. Comumente, tem-se a mistura dos dois tipos, conforme Figura 5.6. Independentemente da direção ou tipo do desalinhamento, faz-se a projeção para os planos de referência horizontal e ou vertical.

Figura 5.4 - DESALINHAMENTO PARALELO



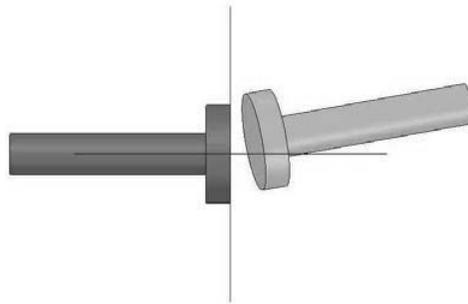
Fonte: O AUTOR

Figura 5.5 - DESALINHAMENTO ANGULAR



Fonte: O AUTOR

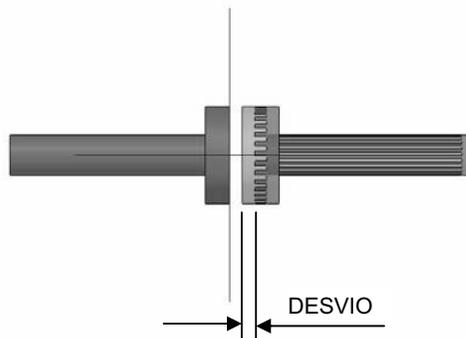
Figura 5.6 - DESALINHAMENTO MISTO



Fonte: O AUTOR

Também é importante considerar o desalinhamento axial dos eixos, conforme Figura 5.7. Esse tipo de desalinhamento corresponde ao desvio de posição axial dos eixos em relação a uma posição de referência. A posição de referência é a posição central da faixa de escorregamento para acoplamentos de grade, engrenagem e pinos e a posição de indeformação do elemento elástico do acoplamento para acoplamentos de lâminas e elastômero.

Figura 5.7 - DESALINHAMENTO AXIAL



Fonte: O AUTOR

5.2 IMPORTÂNCIA DO ALINHAMENTO

O alinhamento entre eixos de equipamentos dinâmicos ligados com acoplamentos flexíveis é muito importante para a obtenção de altos valores de tempo médio entre falhas e, conseqüentemente, baixos custos de manutenção.

5.3 CONSEQÜÊNCIAS DO DESALINHAMENTO

O desalinhamento de eixos de máquinas dinâmicas provoca forças de reação nos mancais, conforme ilustrado na Figura 5.8. Essa carga é proporcional à rigidez do acoplamento flexível, conforme Figura 5.9.

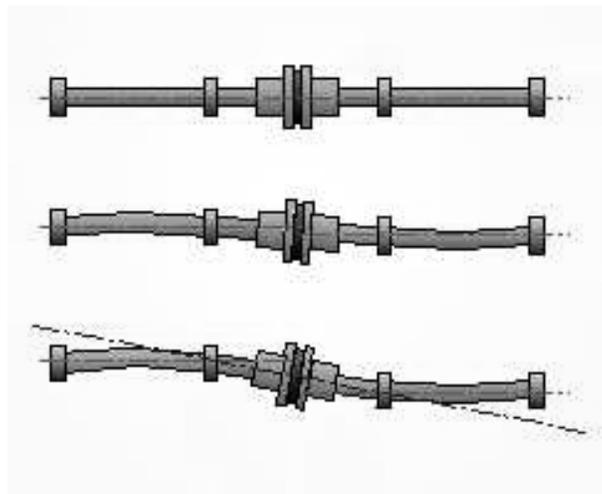
As conseqüências de alta carga nos mancais são o aumento do consumo de energia fornecida pelo acionador, Figura 5.10 e Figura 5.11.

Ocorre redução do tempo médio entre falhas, ou seja, quebra mais freqüente dos equipamentos, principalmente de mancais e acoplamentos. Com isso, ocorre redução da confiabilidade dos equipamentos, podendo afetar a qualidade quanto a capacidade dos processos.

Um exemplo típico de dano em mancal está ilustrado na Figura 5.12.

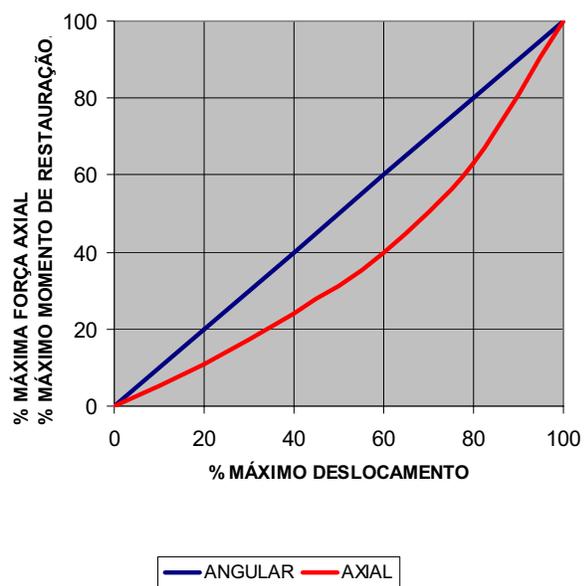
Um exemplo típico de dano no acoplamento está ilustrado na Figura 5.13.

Figura 5.8 – FORÇAS DE REAÇÃO NOS MANCAIS



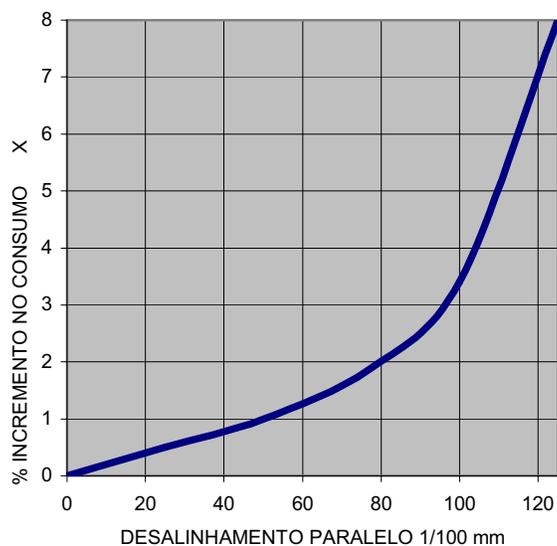
Fonte: PIOTROWSKI, 1995.

Figura 5.9 – VARIÇÃO DAS FORÇAS DE REAÇÃO



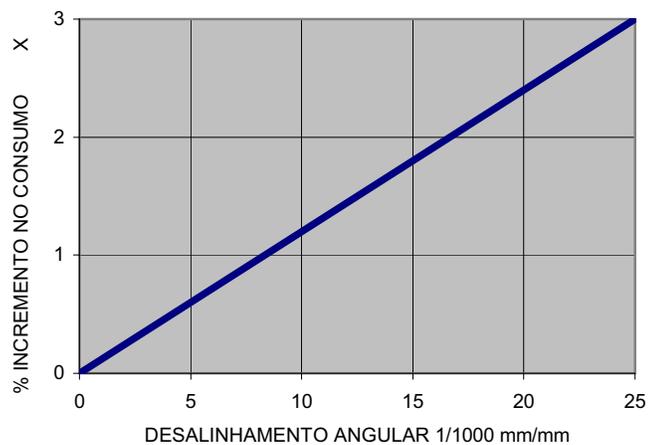
Fonte: JOHN CRANE, 2004

Figura 5.10 – CONSUMO DE ENERGIA PARA ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO



Fonte: DAINTITH, 2001

Figura 5.11 – CONSUMO DE ENERGIA PARA ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO



Fonte: DAINTITH, 2001

Figura 5.12 – MANCAL DANIFICADO POR DESALINHAMENTO

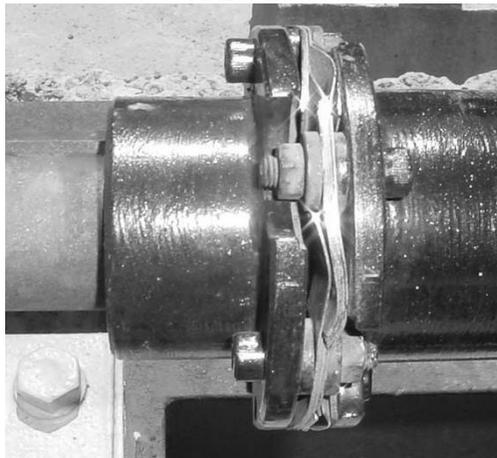


Fonte: NSK, 2003.

Ainda é necessário evidenciar que as cargas decorrentes do desalinhamento têm variações cíclicas devido à rotação dos eixos acoplados. Isso resulta no aparecimento de vibrações indesejadas que serão discutidas no Capítulo 8.

Haverá aquecimento no acoplamento, proporcionalmente ao desalinhamento que será tratado nos Capítulo 10 e 11.

Figura 5.13 – ACOPLAMENTO DANIFICADO POR DESALINHAMENTO



Fonte: O AUTOR

As forças atuantes nos mancais decorrentes do desalinhamento são significativas, principalmente no sentido axial, conforme pode-se observar na Tabela 5.1. O modelo TSK citado nessa tabela está ilustrado na Figura 4.3.

Tabela 5.1 – FORÇAS DE REAÇÃO POR DESALINHAMENTO – MODELO TSK

TAMANHO DO ACOPLAMENTO	MÁX. DESALINHAMENTO AXIAL		MÁX. DESALINHAMENTO PARALELO	
	± mm	FORÇA kN	mm	MOMENTO DE RESTAURAÇÃO Nm
13	1,00	210	0,30	4,1
33	1,25	280	0,36	6,1
75	1,50	360	0,45	8,8
135	2,00	560	0,55	11,8
230	2,50	740	0,60	14,7
350	2,75	780	0,64	34,3
500	3,25	1080	0,65	40,7
740	3,75	1270	0,68	47,6
930	4,25	1470	0,72	53,9
1400	5,00	2700	0,83	61,3

Fonte: JOHN CRANE, 2004

CAPÍTULO 6

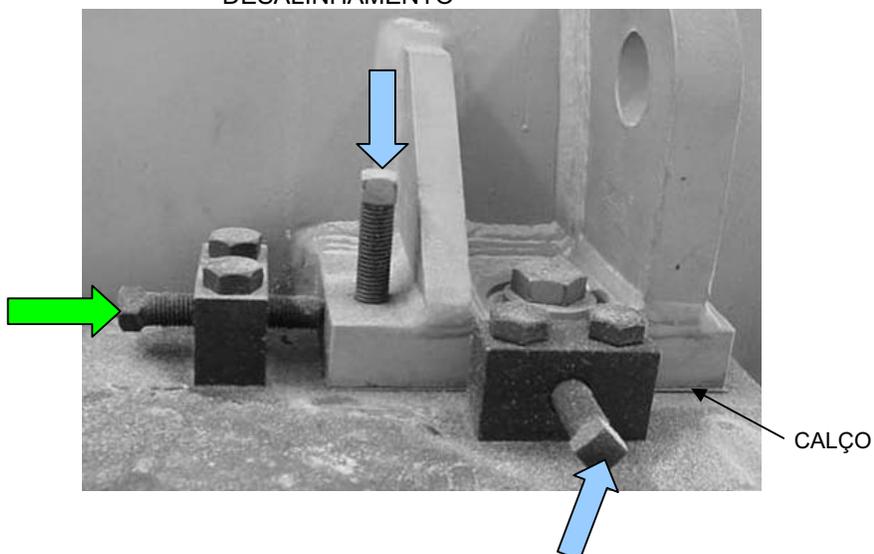
Neste capítulo apresenta-se os métodos de alinhamentos de eixos descrevendo-se o princípio de funcionamento e as limitações existentes.

6 MÉTODOS DE ALINHAMENTO DE EIXOS

Os principais métodos para alinhamento de eixos são reverso, periférico direto e a laser. O alinhamento de eixos exige medição de precisão, pois suas tolerâncias estão dentro de uma faixa estreita de valores. Não será mencionado o método de alinhamento de eixos que usa régua e calibres de lâmina devido ao fato de não atender os requisitos de tolerância estabelecidos no Capítulo 7.

Todos os métodos para a quantificação de desalinhamento se baseiam na medição em dois planos horizontal e verticalmente, conforme Figura 5.1. Isso, assim é feito, devido ao fato que a correção do desalinhamento é feita por deslocamento lateral com o uso de parafusos (plano horizontal) e por deslocamento vertical com o uso de parafusos e calços (plano vertical), conforme indicado na Figura 6.1.

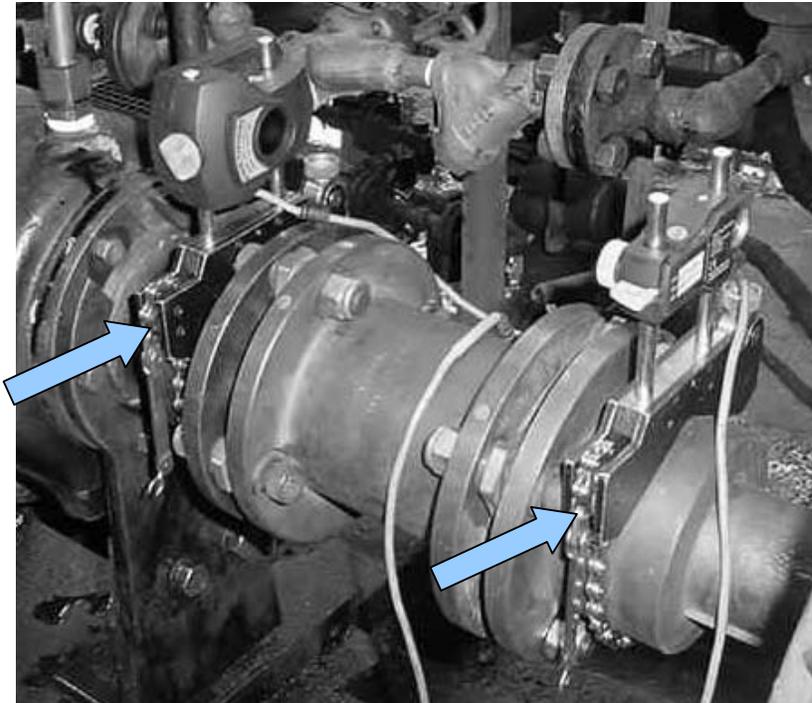
Figura 6.1 - DESLOCAMENTOS PARA CORREÇÃO DO DESALINHAMENTO



Fonte: O AUTOR

Também todos os métodos fixam pedestais rígidos nas extremidades dos eixos, geralmente sobre a parte rígida dos cubos do acoplamento, conforme ilustrado na Figura 6.2. Os pedestais fixam o sistema de medição, independentemente de qual seja.

Figura 6.2 - PEDESTAIS FIXADOS NOS CUBOS DO ACOPLAMENTO



Fonte: O AUTOR

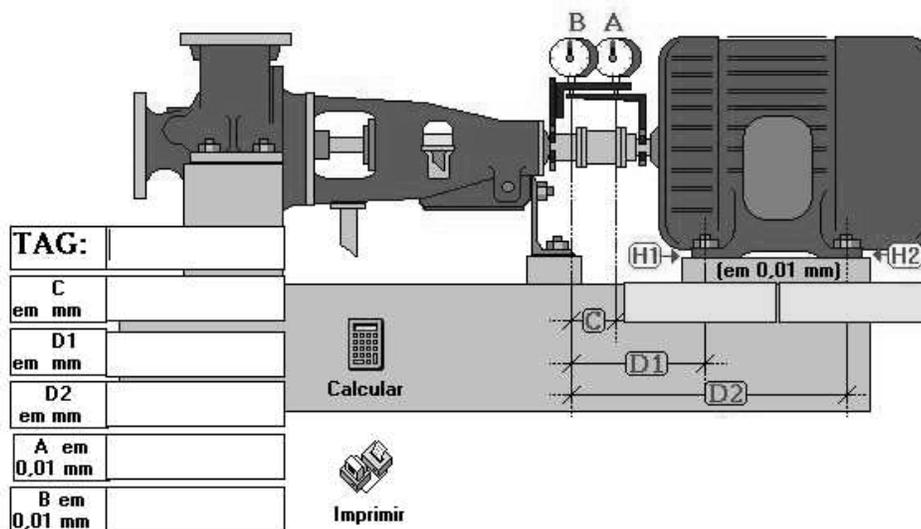
6.1 ALINHAMENTO PELO MÉTODO REVERSO

Método que se baseia em fixar pedestais rigidamente aos eixos ou cubos do acoplamento e fixar relógios comparadores rigidamente em uma das barras e encostar as pontas das hastes dos relógios na outra barra, conforme Figura 6.3. O desalinhamento é medido nos relógios ao girar o conjunto. Para definir a correção do desalinhamento, há necessidade de cálculos manuais ou em programa de computador.

Devem ser conhecidas as distâncias C , $D1$ e $D2$, considerando a máquina movida, entre os pés de fixação e o relógio oposto ao acoplamento e a distância entre os dois relógios comparadores, como ilustrado na Figura 6.3. Nesse caso,

programa de computador, a partir da entrada de valores, calcula os valores de correção em cada pé de fixação da máquina movida em uma vez para o plano horizontal e em outra vez para o plano vertical. Os valores de entrada, para o plano vertical, são obtidos posicionando-se o conjunto de medição em 0° , parte superior, zerando-se os relógios, e girando-o para 180° , parte inferior, junto com os eixos das máquinas, quando se faz a leitura dos dois relógios A e B. Os valores de entrada, para o plano horizontal, são obtidos posicionando-se o conjunto de medição em -90° , lado direito de quem olha da máquina estacionária, zerando-se os relógios, e girando-o para $+90^\circ$, lado esquerdo, junto com os eixos das máquinas, quando se faz a leitura dos dois relógios A e B.

Figura 6.3 - MÉTODO REVERSO



Fonte: O AUTOR, CORTESIA PETROBRAS

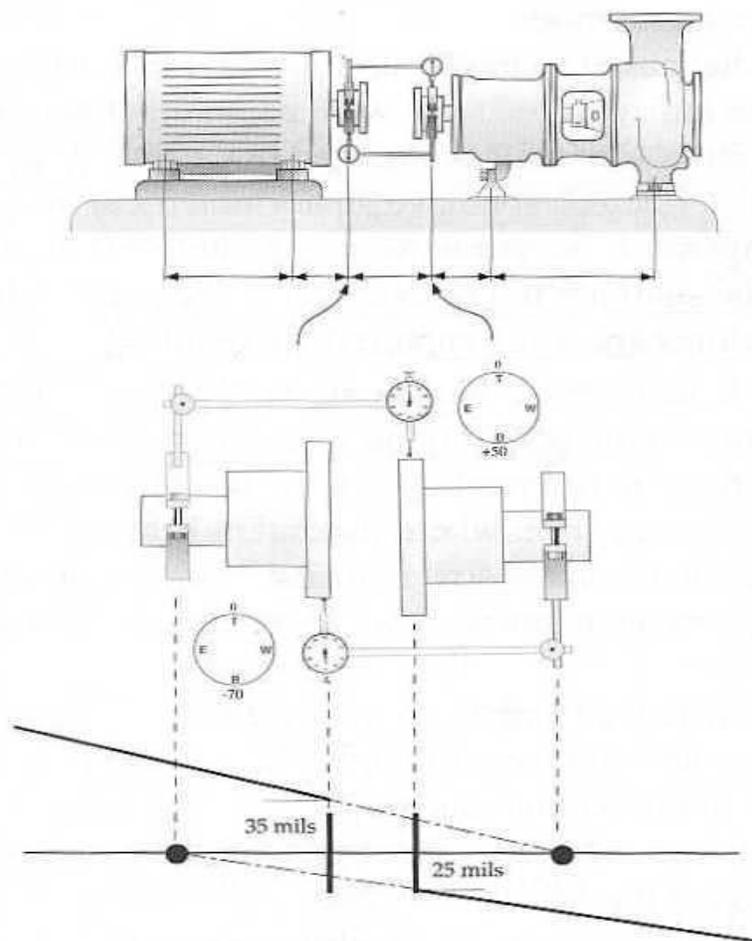
Os valores calculados pelo programa, para o plano vertical, irão indicar quanto a máquina móvel deverá ser deslocada para cima ou para baixo, conforme os valores forem positivos ou negativos, respectivamente. Para o posicionamento vertical da máquina móvel na posição desejada usa-se calços conforme ilustrado na Figura 6.1. Quando se considera o plano vertical as variáveis H1 e H2 se referem a espessura dos calços a serem colocados em cada para de pés do acionador e seus valores serão indicados nos campos em amarelo da Figura 6.3..

Os valores calculados pelo programa, para o plano horizontal, irão indicar quanto a máquina móvel deverá ser deslocada para direita ou para esquerda,

conforme os valores forem positivos ou negativos, respectivamente. Para o posicionamento horizontal da máquina móvel na posição desejada usa-se parafusos conforme ilustrado na Figura 6.1. Quando se considera o plano horizontal as variáveis H1 e H2 se referem ao deslocamento para os pés do acionador e seus valores serão indicados nos campos em amarelo da Figura 6.3

Caso os valores sejam calculados manualmente é recomendável fazer-se uma modelagem gráfica e utilizar-se das equações clássicas de trigonometria e semelhança de triângulos, como ilustrado na Figura 6.4.

Figura 6.4 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO DESALINHAMENTO

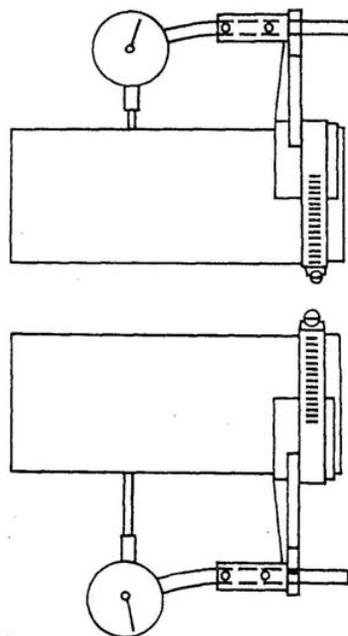


Fonte: PIOTROWSKI, 1995.

O método reverso apresenta boa confiabilidade para pequenas distâncias entre pontas de eixos. No caso de grandes distâncias entre pontas de eixos ocorre

deflexão significativa das hastes horizontais por peso próprio e peso dos relógios comparadores, conforme Figura 6.5, provocando erro acentuado. O tempo para execução do alinhamento é alto devido aos cálculos que necessitam serem executados.

Figura 6.5 – DEFLEXÃO DA HASTE



Fonte: DUFOUR, 1992.

6.2 ALINHAMENTO PELO MÉTODO PERIFÉRICO DIRETO

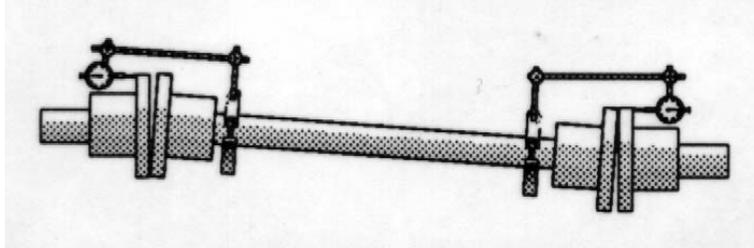
Método que se baseia em fixar barras rigidamente aos eixos ou no espaçador do acoplamento, fixar relógios comparadores rigidamente nas barras e encostar as pontas das hastes dos relógios na face dos cubos do acoplamento, conforme Figura 6.6.

O desalinhamento é medido nos relógios ao girar o conjunto. Para definir a correção do desalinhamento há necessidade de cálculos manuais ou em programa de computador. Usam-se os mesmos princípios descritos no método reverso, porém é importante observar que o raio de medição é necessário para os cálculos.

Também, o método periférico direto, apresenta as mesmas limitações

descritas no item 6.1.

Figura 6.6 - ESQUEMA BÁSICO DO MÉTODO PERIFÉRICO DIRETO



Fonte: PIOTROWSKI, 1995.

6.3 ALINHAMENTO A LASER

Método que se baseia em emissor/receptor de feixe laser. Os sensores são ligados a um microcomputador portátil da classe *palmtop*, por meio de cabos ou por rádio frequência, que realiza os cálculos e orientações para correção do desalinhamento. Com isso, torna-se um método versátil e prático.

Figura 6.7 - MÉTODO A LASER



Fonte: PRUFTECHNIK, 2003.

Este método apresenta apenas a limitação de uso em ambiente com nuvens de condensado, por exemplo proximidades de uma turbina a vapor, que irão provocar refração no feixe do laser.

Requer alto investimento para sua implementação.

6.4 CORREÇÃO DE PÉ-MANCO

A maioria das máquinas possui quatro superfícies de apoio na sua respectiva base de fixação. A base de fixação também possui quatro superfícies de apoio. O efeito denominado pé-manco ocorre quando uma ou mais superfícies de apoio não estão no mesmo plano, tanto do lado da máquina quanto do lado da base de fixação. Com isso a máquina não fica apoiada totalmente em uma das superfícies de apoio, salvo se a carcaça for deformada pelo aperto dos parafusos de fixação.

O pé-manco provoca deformação da carcaça da máquina e dificulta ou impede a execução do alinhamento dos eixos.

A verificação de pé-manco é feita soltando-se cada pé de fixação da máquina e fazendo-se a leitura diretamente com relógio comparador ou com o sistema de alinhamento a laser. O valor deve se encontrar dentro da tolerância estabelecida na Tabela 7.1, caso contrário requer correção.

A correção pode ser feita usando-se calços ou, se possível, usinando-se a base de fixação e ou a base da máquina.

6.5 CORREÇÃO DO DESALINHAMENTO AXIAL

A maioria das máquinas não dispõe de parafuso para o deslocamento axial da máquina móvel, conforme ilustrado com a seta verde na Figura 6.1, então desloca-se a máquina com alavancas.

O desalinhamento axial não pode ser medido por nenhum dos métodos aqui citados. Para garantir um correto alinhamento axial, deve-se posicionar os cubos de acordo com as cotas especificadas no desenho de montagem. Ainda, para o caso de motores elétricos com mancais de deslizamento deve-se observar o correto posicionamento do seu eixo no ponto de equilíbrio do centro magnético. Adotando-se esse procedimento, garante-se a montagem na posição central da faixa de escorregamento ou posição de indeformação do elemento elástico do acoplamento, minimizando a força de reação ilustrada na Figura 5.9.

É importante considerar que o alinhamento axial será afetado pelas

dilatações térmicas dos eixos, se houverem. Caso necessário deverá ser calculada ou medida a dilatação dos eixos e feito as devidas compensações.

CAPÍTULO 7

Neste capítulo apresenta-se valores de referência para tolerância de desalinhamento de eixos e exemplos de aplicação.

7 TOLERÂNCIA PARA ALINHAMENTO DE EIXOS

As tolerâncias para o desalinhamento paralelo e angular são determinadas por variáveis que consideram indiretamente a velocidade relativa de escorregamento ou deformação do elemento elástico ou móvel do acoplamento.

A tolerância de desalinhamento depende da velocidade angular da máquina. Nesse estudo, usou-se como referência a velocidade angular, ou seja, rotação de 3600 rpm.

O valor final da tolerância de desalinhamento é calculado. Para quaisquer dos métodos descritos, define-se um fator para cálculo. Esse fator não é o valor final da tolerância. Veja Tabela 7.1.

As tolerâncias calculadas indicam valores máximos permitidos para os desvios de desalinhamento.

Tabela 7.1 - FATOR PARA CÁLCULO DAS TOLERÂNCIAS DE ALINHAMENTO PARA 3600 rpm

		ACEITÁVEL (mm)	EXCELENTE (mm)
ACOPLAMENTO SEM ESPAÇADOR	PARALELO	0,04 ¹⁾	0,02 ¹⁾
	ANGULAR	0,04	0,03
ACOPLAMENTO COM ESPAÇADOR	ANGULAR	0,06	0,03
PÉ MÁNCO		0,06	0,00

Fonte: BLOCK, 1998.

Nota: ¹⁾ PARA OS MÉTODOS REVERSO E PERIFÉRICO DIRETO MULTIPLICAR POR 2.

Para os casos de alinhamento de eixos de máquinas cuja temperatura de trabalho não pode ser alcançada e ou mantida estável durante o trabalho de alinhamento, a tolerância não deve ser considerada tal qual como descrita nesse Capítulo.

7.1 EXEMPLOS DE CÁLCULO FINAL DA TOLERÂNCIA

7.1.1 Acoplamento sem Espaçador

Faz-se a medição, em mm, do diâmetro médio do elemento elástico ou móvel do acoplamento, ou seja, engrenagem, dentes para grade ou furação de fixação da unidade de membrana.

Calcula-se a tolerância final tomando o fator da Tabela 7.1 e aplica-se na equação 6.1.

$$\text{Tolerância} = \text{fator} * (\text{diâmetro médio} / 100) \quad (6.1)$$

Exemplo: Para uma máquina com acoplamento sem espaçador e diâmetro médio do elemento elástico do acoplamento igual a 166 mm.

$$\text{Tolerância (paralelo)} = 0,04 * (166 / 100) = 0,07 \text{ mm (aceitável).}$$

$$\text{Tolerância (paralelo)} = 0,02 * (166 / 100) = 0,03 \text{ mm (excelente).}$$

$$\text{Tolerância (angular)} = 0,04 * (166 / 100) = 0,07 \text{ mm (aceitável).}$$

$$\text{Tolerância (angular)} = 0,03 * (166 / 100) = 0,05 \text{ mm (excelente).}$$

7.1.2 Acoplamento com Espaçador

Faz-se a medição, em mm, do espaço médio entre elementos elásticos ou móveis do acoplamento, ou seja, engrenagem, dentes para grade fixação da unidade de membrana.

Calcula-se a tolerância final tomando o fator da tabela 1 e aplica-se na equação 6.2.

$$\text{Tolerância} = \text{fator} * (\text{espaço médio} / 100) \quad (6.2)$$

Exemplo: Para uma máquina com acoplamento com espaçador e espaço médio entre elementos elásticos do acoplamento igual a 178 mm.

$$\text{Tolerância (angular)} = 0,06 * (178 / 100) = 0,11 \text{ mm (aceitável).}$$

Tolerância (angular) = $0,03^* (178 / 100) = 0,05$ mm (excelente).

7.2 TOLERÂNCIA PARA DESALINHAMENTO AXIAL

Para o desalinhamento axial deve-se observar a capacidade do mancal instalado e recalculer a carga, explicitando-se um valor de carga aceitável para o desalinhamento com base na força restauradora do acoplamento. Como exemplo observa-se a Tabela 5.1 e a Figura 5.9.

CAPÍTULO 8

Neste capítulo apresenta-se a análise de vibrações como técnica de manutenção preditiva para diagnóstico de falhas. Também é apresentada a análise termográfica do acoplamento como técnica auxiliar à análise de vibrações.

8 DIAGNÓSTICO DO DESALINHAMENTO DE EIXOS COMO FALHA

Quando ocorre a reinstalação de uma das máquinas, de um conjunto acionadora e acionada, após intervenção de manutenção, ou no caso de instalação nova, é feito o alinhamento dos eixos por um dos métodos descritos no Capítulo 6 e aplicando-se tolerâncias descritas no Capítulo 7.

Muitas vezes, em qualquer tempo posterior, pode-se detectar a ocorrência de desalinhamento de eixos. Os seguintes fatores geram desalinhamento de eixos:

- Dilatação térmica das carcaças e pedestais das máquinas;
- Dilatações e contrações de tubulações ligadas às máquinas;
- Oxidação excessiva das bases das máquinas;
- Falta de aperto nas fixações das carcaças.

Para a detecção do desalinhamento de eixos é necessário dispor de recursos que operem nas conseqüências do fenômeno. As principais conseqüências são vibração alta de carcaça, vibração torcional e aquecimento do acoplamento

8.1 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

As principais técnicas de manutenção preditiva usadas para o monitoramento da condição de máquinas rotativas são a análise de vibrações e a análise de óleo. Vibrações torcional e termografia muito poucas vezes são usadas.

8.1.1 Análise de vibrações

A metodologia de análise de vibrações baseia-se na observação do módulo

e frequência de atuação das forças em pontos pré-definidos nas máquinas. As forças atuantes em um conjunto de eixos rígidos acoplados flexivelmente são decorrentes dos agentes causadores de vibrações, sendo que os principais são: desbalanceamento, desalinhamento de eixos, folgas excessivas, falhas em componentes de rolamentos e falhas elétricas, entre outros.

A estratégia adotada para equipamentos de eixo rígido é a medição periódica de carcaça, com coletores portáteis e acelerômetros, conforme Figura 8.1, em pontos específicos. Os pontos são definidos em cada plano de mancal e nas direções horizontal, vertical e axial. Essas três direções permitem que o acelerômetro seja excitado pelas forças decorrentes dos diferentes agentes causadores de vibração. Esses pontos são nomeados de acordo com o plano de mancal, iniciando pelo lado oposto ao acoplamento da máquina acionadora, e com a direção de medição. Dessa forma, por exemplo, para um conjunto de máquinas acoplado flexivelmente e composto por motor elétrico, como máquina acionadora, e uma bomba centrífuga horizontal, como máquina acionada, ficam estabelecidos seis pontos, conforme Figura 8.2 e identificados por:

- 01H – acionador, lado oposto ao acoplamento, horizontal,
- 01V – acionador, lado oposto ao acoplamento, vertical,
- 01A – acionador, lado oposto ao acoplamento, axial,
- 02H – acionador, lado do acoplamento, horizontal,
- 02V – acionador, lado do acoplamento, vertical,
- 02A – acionador, lado do acoplamento, axial,
- 03H – acionado, lado oposto ao acoplamento, horizontal,
- 03V – acionado, lado oposto ao acoplamento, vertical,
- 03A – acionado, lado oposto ao acoplamento, axial,
- 04H – acionado, lado do acoplamento, horizontal,
- 04V – acionado, lado do acoplamento, vertical,
- 04A – acionado, lado do acoplamento, axial,

As medições efetuadas são tratadas por um sistema gerenciador que detecta os pontos com valores de vibração acima dos valores de referência. Esses pontos são listados em um relatório e deverão ser analisados para que seja identificado qual é o agente causador da vibração excessiva. Os valores de

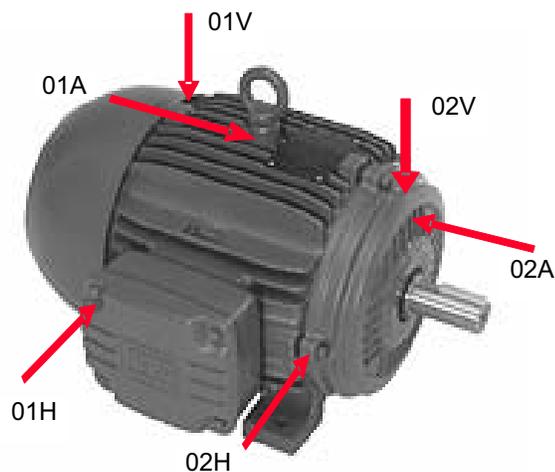
referência são também chamados de níveis de alarme, podendo ser alarme de atenção, alerta e falha, entre outros, e com valores definidos por norma ou por consultor.

Figura 8.1 - COLETOR PORTÁTIL



Fonte: O AUTOR

Figura 8.2 - PONTOS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO

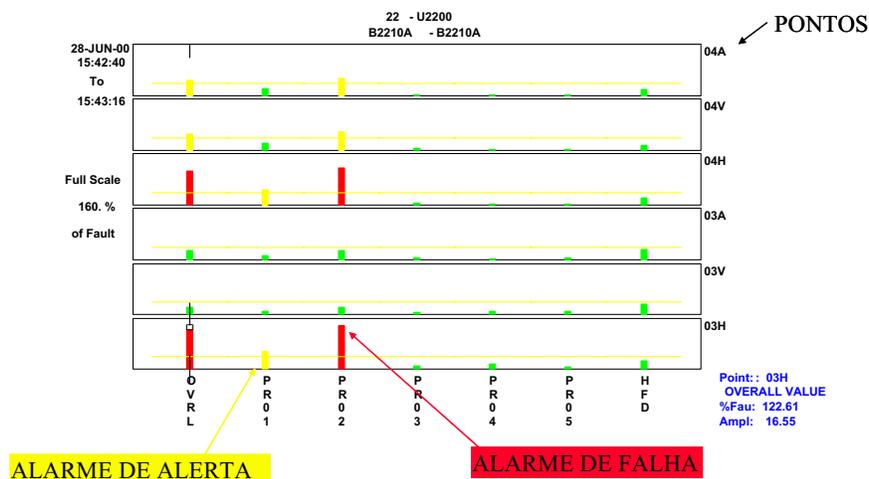


Fonte: O AUTOR

Em seguida, observa-se o estado geral da máquina, ou seja, os níveis de vibração de todos os pontos a esta pertencentes, conforme Figura 8.3. Essa figura se refere a uma bomba centrífuga horizontal, semelhante a da Figura 4.13, com seis

pontos medidos: 03H, 03V, 03A, 04H, 04V, 04A. Cada ponto possui uma indicação de amplitude por faixa de freqüências identificada por OVRL, PR01, PR02, PR03, PR04, PR05 e HFD. OVRL se refere à faixa total medida pelo acelerômetro, ou seja, representa um somatório ponderado de todas as amplitudes em todas as freqüências medidas. PR01 e as demais faixas de freqüências representam um somatório ponderado de todas as amplitudes numa faixa de freqüências selecionada. A seleção de cada faixa de freqüências é feita em função da natureza física dos agentes causadores de vibração, por exemplo, sabe-se que o desalinhamento de eixos ocorre em 1x e 2x a rotação da máquina, então define-se o PR02 entre 0.8x e 1.2x e PR03 entre 1.8x e 2.2x. Isso permite uma fácil visualização se existe amplitude significativa em cada uma dessas faixas de freqüências. O programa de computador, que gera a figura, pode usar cores para destacar amplitudes acima dos valores de referência, identificados, nesse exemplo, como alarme de alerta e falha.

Figura 8.3 - VISÃO GLOBAL DO ESTADO MÁQUINA

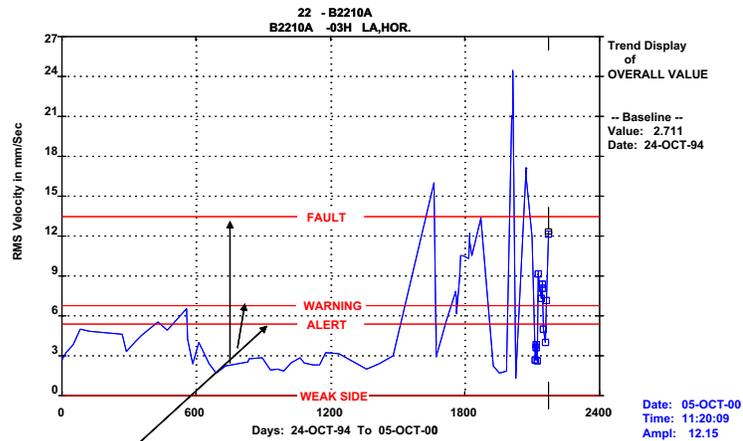


Fonte: O AUTOR

Verificam-se quais pontos estão acima de níveis previamente estabelecidos, ou seja, com alarme de alerta ou de falha e a qual faixa de freqüências se enquadram. Uma vez visualizados os pontos em alarme, verifica-se a sua tendência no tempo, conforme Figura 8.4. Nessa figura está sendo mostrado o nível de vibração em velocidade expresso em mm/s rms, para o ponto 03H da Figura 8.3,

para a faixa total de freqüências (OVRL que é a abreviatura de overall e que significa global). Este histórico é muito importante para mostrar se houve modificação no comportamento da máquina. Tendo isso sido confirmado, então é certo que existe algum agente causando o alto nível de vibrações.

Figura 8.4 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO



Fonte: O AUTOR

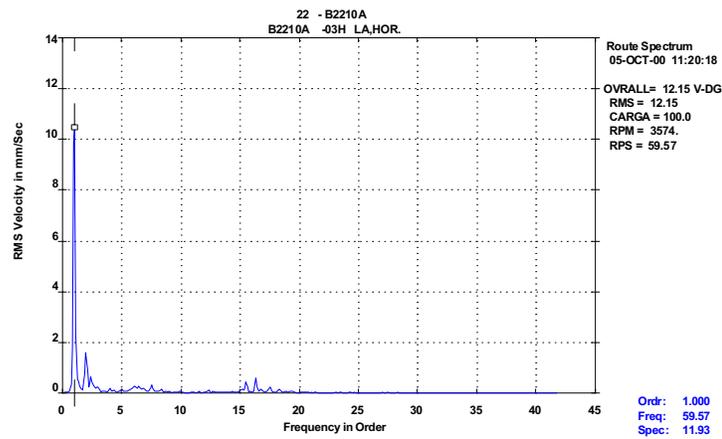
Para identificar qual a origem da vibração excessiva, ou seja, identificar qual é o agente causador tem que se observar as características das forças atuantes. A primeira característica a ser observada é a direção que pode ser radial horizontal, radial vertical ou axial, conforme Figura 8.2. A segunda característica é a freqüência que é decorrente do ciclo de pulsação ou de choque na posição do sensor de medição (acelerômetro).

Quando uma máquina está em rotação e com carga ocorre a atuação de várias forças, com diferentes intensidades e em diferentes freqüências de pulsação, em referência ao sensor. As forças de grande intensidade provocam os altos níveis de vibração. A forma mais eficaz de visualizar os módulos e freqüências dessas forças é através de um espectro de freqüências, como exemplificado na Figura 8.5. Essa figura é um espectro de freqüências do tipo FFT. Nessa figura estão sendo mostradas as amplitudes de vibração em velocidade expressas em mm/s rms para cada freqüência expressa em order (o mesmo que x a rotação da máquina), para o

ponto 03H da Figura 8.3.

Nesse exemplo, observa-se uma amplitude entre 10 e 12 mm/s rms para a frequência 1x a rotação da máquina. Como a medição se refere ao ponto 03H, sabe-se que a força do agente causador da vibração tem direção radial. Considerando-se essas observações e as referências de literatura, descritas no próximo parágrafo, conclui-se que o agente causador da vibração excessiva é desbalanceamento.

Figura 8.5 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS



Fonte: O AUTOR

Muitas frequências estão sempre associadas à rotação da máquina e algumas, absolutamente, não. As frequências dependentes da rotação de trabalho são expressas de forma relativa e não absoluta como 1x (uma vez a rotação da máquina), 2x, 3x, nx. Os principais agentes causadores de vibrações são: desbalanceamento, desalinhamento de eixos, folgas mecânicas, falhas em rolamentos, eixo empenado, entre outras. Segundo MITCHELL (1990) alguns dos agentes causadores de elevados níveis de vibrações ocorrem da seguinte forma:

- desalinhamento paralelo – frequências 1x e 2x, no sentido radial;
- desalinhamento angular – frequências 1x, 2x e 3x, no sentido axial;
- desbalanceamento – frequência 1x, no sentido radial;
- eixo empenado – frequências 1x e 2x, no sentido axial;
- rolamento desalinhado – frequências 1x, 2x e 3x, no sentido axial.

A grande dificuldade é que diminui o grau de acerto em um diagnóstico de falha é fato de existirem agentes causadores de vibração com a mesma

característica de frequência, conforme observa-se para desalinhamento angular e rolamento desalinhado. Nesse caso, uma técnica auxiliar, que não por análise de vibrações, pode eliminar a dúvida.

8.1.2 Análise térmica do acoplamento

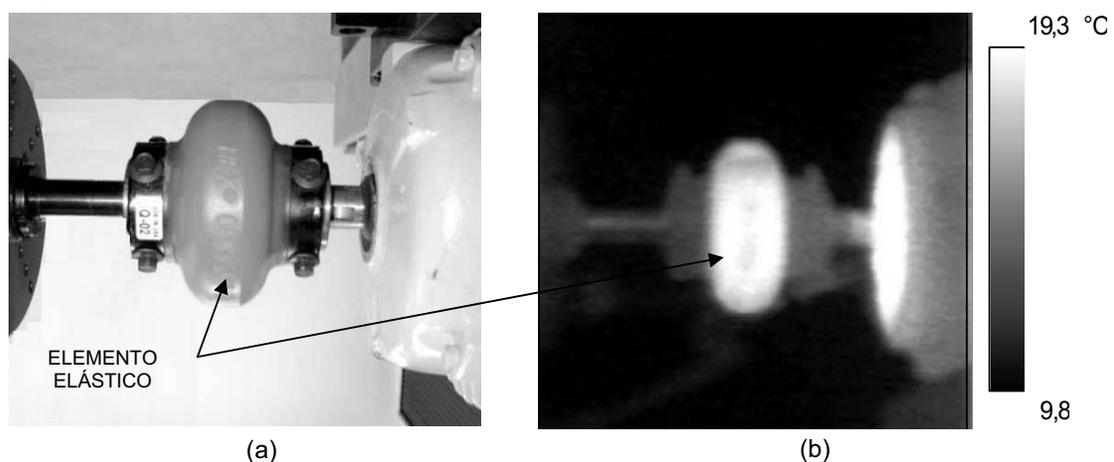
Todo acoplamento flexível é projetado para absorver desalinhamento entre os dois eixos a serem ligados. Todos os fabricantes apresentam os valores do máximo desalinhamento, em ângulo, expresso em graus.

Qualquer desalinhamento imposto aos acoplamentos do tipo de lâminas flexíveis ou de elastômero provocará deformação cíclica dos elementos flexíveis e conseqüente geração de calor proporcional à amplitude e frequência da deformação. Neste estudo, será desprezada a influência da geração de calor imposta por vibrações torcionais.

Qualquer desalinhamento imposto aos acoplamentos do tipo de grade ou de engrenagens provocará deslizamento relativo cíclico entre as partes e conseqüente geração de calor proporcional à amplitude e frequência do deslizamento.

Através de uma imagem termográfica podemos verificar o aquecimento de um acoplamento, conforme Figura 8.6.

Figura 8.6 - ESPECTRO TÉRMICO



Fonte: O AUTOR.

CAPÍTULO 9

Neste capítulo apresenta-se as técnicas de medição de temperatura como fundamentação para o entendimento do princípio de funcionamento de uma câmara termográfica.

9 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A temperatura de um corpo é um indicativo da sua energia que se manifesta com a emissão de ondas eletromagnéticas, princípio este estabelecido por Maxwell.

9.1 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

A ondas eletromagnéticas, incluindo as freqüências de raios X, ultravioleta, luz visível, infravermelha e microondas, formam o chamado espectro eletromagnético. Todos os componentes desse espectro seguem as leis da reflexão, refração, difração e polarização.

A emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo chama-se radiação. Kirchhoff, citado por DOEBELIN (1990), estabeleceu uma lei que relaciona a capacidade de um corpo absorver e emitir energia radiante. Ainda, Kirchhoff estabeleceu o conceito de **corpo negro** para designar um objeto que absorve toda a energia radiante que sobre ele incide.

A temperatura de um corpo está relacionada com a energia irradiada. Essa relação foi estabelecida por Planck, citado por DOEBELIN (1990) e está na equação 8.1, a freqüência de pico está na equação 8.2 e a energia total está na equação 8.3.

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (8.1)$$

onde:

$W_\lambda = \text{Intensidade de radiação espectral hemisférica} [W / (cm^2 \mu m)]$

$C_1 = 37,413 [W \mu m^4 / cm^2]$

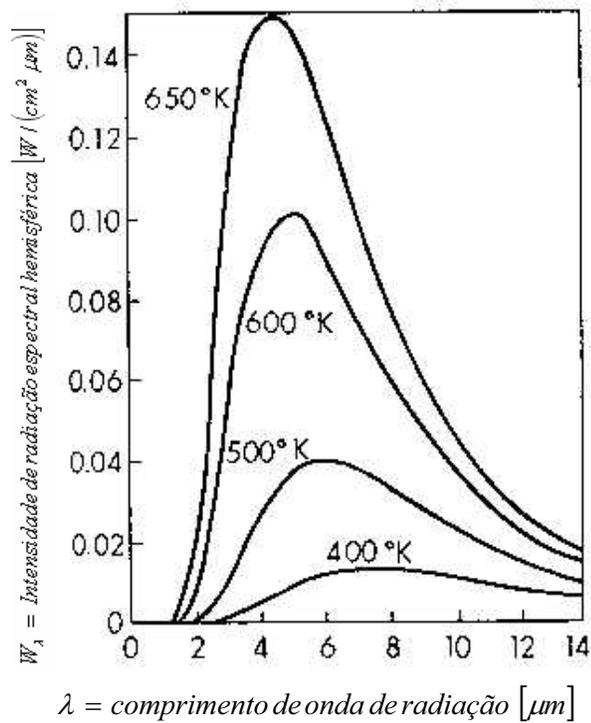
$C_2 = 14,388 [\mu m K]$

$\lambda = \text{Comprimento de onda de radiação} [\mu m]$

$T = \text{Temperatura absoluta do corpo negro} [K]$

A plotagem da equação 8.1 resulta na Figura 9.1, DOEBELIN (1990). Essa figura mostra a variação do comprimento de onda emitido por um corpo para diferentes temperaturas deste.

Figura 9.1 – RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO



Fonte: DOEBELIN, 1990

$$\lambda_p = \frac{2,891}{T} \quad (8.2)$$

onde:

$\lambda_p =$ Comprimento de onda de radiação no pico [μm]

$$W_t = 5,67 \cdot 10^{-12} T^4 \quad (8.3)$$

onde:

$W_t =$ Intensidade de radiação espectral hemisférica total [W / cm^2]

9.2 EMISSIVIDADE

Os objetos reais nunca se comportam puramente como um corpo negro, ou seja, não absorvem totalmente a radiação incidente, refletindo e ou transmitindo o restante. Por exemplo, um corpo de aço carbono pode ter variações na apresentação da sua superfície externa, podendo, por exemplo, ser uma superfície sem tratamento, oxidada naturalmente, oxidada artificialmente, pintada, niquelada, oleada, entre outras. Cada uma dessas superfícies apresentará variações de emissividade.

Kirchhoff definiu emissividade pela relação entre a capacidade de um corpo absorver a energia incidente e a capacidade de reemití-la.

A emissividade é a relação entre a energia irradiada por um corpo qualquer e um corpo negro, a uma determinada temperatura e comprimento de onda, conforme equação 8.4.

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{W_{\lambda a}}{W_{\lambda}} \quad (8.4)$$

onde:

$\varepsilon_{\lambda,T} =$ Emissividade

$W_{\lambda a} =$ Intensidade de radiação – corpo qualquer [$W / (\text{cm}^2 \mu\text{m})$]

$W_{\lambda} =$ Intensidade de radiação – corpo negro [$W / (\text{cm}^2 \mu\text{m})$]

Há necessidade de corrigir as equações 8.1 e 8.3, inserindo a emissividade,

obtendo-se as equações 8.5 e 8.6.

$$W_{\lambda a} = \frac{C_1 \varepsilon_{\lambda, T}}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (8.5)$$

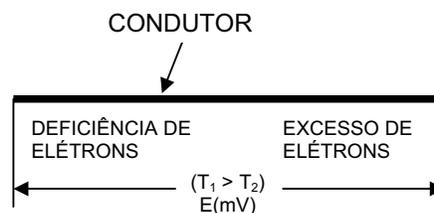
$$W_{ta} = 5,67 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\lambda, T} T^4 \quad (8.6)$$

Os valores resultantes para a emissividade sempre estarão entre zero e um.

9.3 EFEITO TERMOELÉTRICO

O efeito termoelétrico ocorre quando um condutor metálico é submetido a uma diferença de temperatura entre suas extremidades. Surge uma força eletromotriz, cujo valor não excede usualmente a ordem de grandeza de milivolts, em decorrência da redistribuição dos elétrons no condutor, quando os mesmos são submetidos a um gradiente de temperatura. A Figura 9.2 representa esquematicamente o fenômeno.

Figura 9.2 – EFEITO TERMOELÉTRICO



Fonte: O AUTOR

O valor da força eletromotriz depende da natureza do material e do gradiente de temperatura entre suas extremidades. No caso de um material homogêneo o valor da força eletromotriz não depende da distribuição de temperatura ao longo do condutor, mas sim, como dito anteriormente, da diferença de temperatura entre suas extremidades.

9.4 SENSORES PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A medição de temperatura num corpo extenso pode ser feita de duas formas distintas, com sensor de contato e com sensor sem contato.

9.4.1 Sensores De Contato

Os sensores de contato normalmente são termopares e seu princípio de funcionamento se dá pelo efeito termoelétrico.

O termopar é formado por termoelementos homogêneos, o valor da força eletromotriz gerada depende somente da diferença de temperatura entre a junção de medição e a junção de referência.

A grande limitação desse método é a necessidade do corpo em medição estar estático. Outra limitação é que a medição é pontual, ou seja, no ponto onde o sensor está acoplado. Também a dificuldade de acoplamento do sensor ao corpo implica em grandes erros na medição. A Figura 9.3 mostra um exemplo de instrumento portátil com sensor de contato tipo termopar.

Figura 9.3 – MEDIDOR DE TEMPERATURA COM TERMOPAR



Fonte: O AUTOR

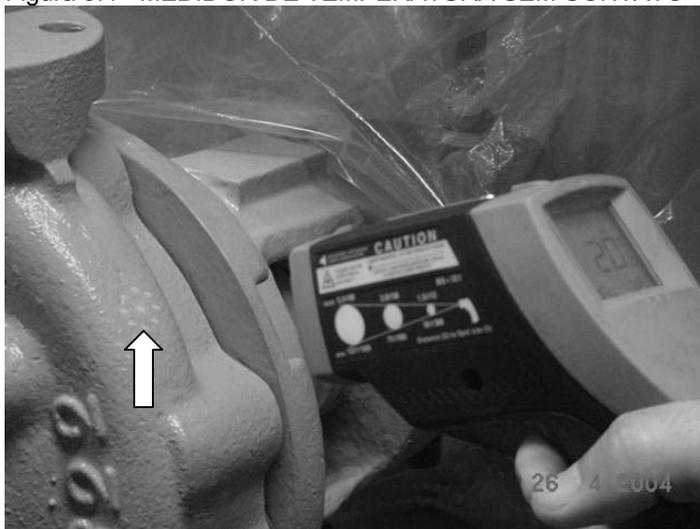
9.4.2 Sensores Sem Contato

Os sensores sem contato têm seu princípio de funcionamento baseado na radiação do corpo negro.

Esse método permite a medição de corpo em movimento. Isso é de grande importância nos equipamentos de processos contínuos, onde qualquer parada implica na capacidade do sistema, ou seja, aumenta o custo. A Figura 9.4 mostra um exemplo de instrumento portátil com sensor sem contato.

A limitação desse método é a dependência direta da emissividade da superfície. Para uma correta medição é necessário fazer a compensação da emissividade para cada superfície. Outra limitação é que o sensor faz a captação de uma área da superfície do corpo e o valor da temperatura é médio, conforme Figura 9.4, e caso haja heterogeneidade da superfície o erro de medição aumenta.

Figura 9.4 - MEDIDOR DE TEMPERATURA SEM CONTATO



Fonte: O AUTOR

9.5 TERMOGRAFIA

A necessidade de verificar o espectro térmico inteiro de um corpo ou um sistema inteiro de forma simultânea, ou seja, todos os pontos na mesma base de tempo, promoveu o desenvolvimento de uma tecnologia chamada de termografia.

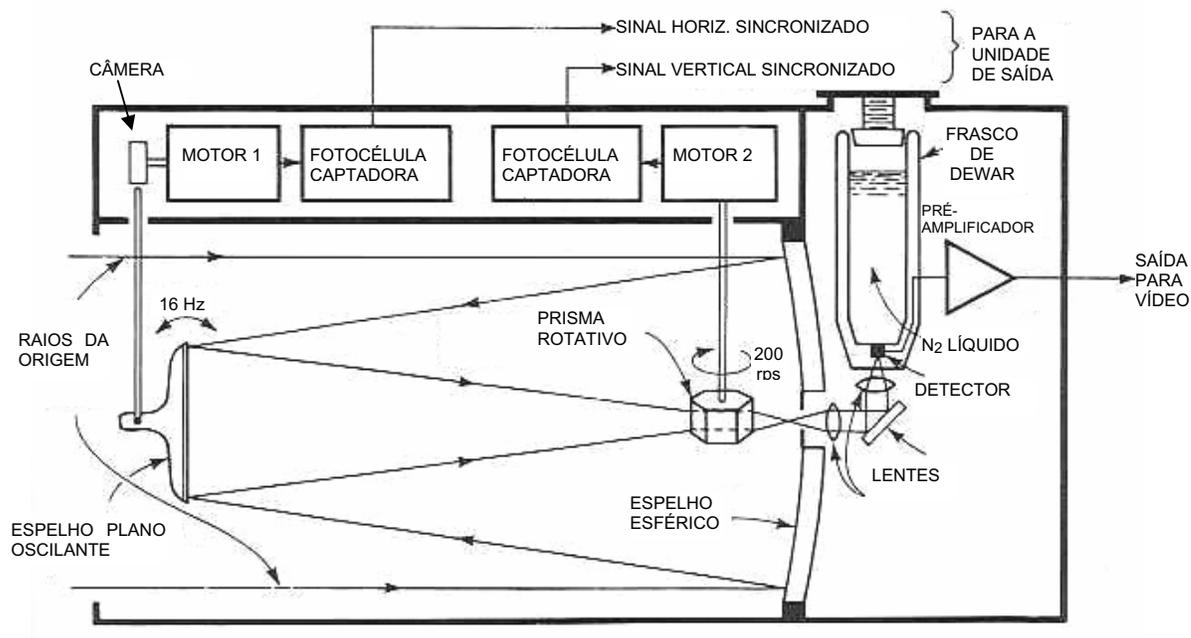
O equivalente desse processo seria medir a temperatura de um corpo com vários medidores sem contato apontados, simultaneamente, para uma malha de pontos previamente estabelecida. Em seguida, haveria necessidade de fazer uma tabela com a definição de cores por faixa de temperatura, compatível com as cores padrões de espectro térmico. Também, haveria necessidade de desenhar o contorno do corpo com a malha e pintar cada segmento desta com a respectiva cor da tabela. Obviamente, isso inviabilizaria as aplicações práticas sob o aspecto econômico e principalmente pela imprecisão dos resultados.

9.5.1 Princípio Físico

A termografia funciona com base na radiação eletromagnética, especificamente radiação do corpo negro corrigida a sua respectiva emissividade.

A Figura 9.5 mostra o esquema básico de funcionamento de um termovisor.

Figura 9.5 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM TERMOVISOR



Fonte: DOEBELIN, 1990.

A termografia requer hardware próprio chamado termovisor, ilustrado na Figura 9.6, e software próprio para gerenciamento e análise dos espectros térmicos.

Figura 9.6 – TERMOVISOR



Fonte: FLIR THERMOGRAPHY, 2004

9.5.2 Aplicações

Atualmente a termografia vem sendo aplicada fortemente na manutenção preditiva em sistemas elétricos diversos e na verificação da integridade e eficiência de isolamentos térmicos internos de chaminés e vasos de pressão diversos. Ainda pouco aplicada em equipamentos dinâmicos, não localizou-se referências de aplicações em uso industrial.

CAPÍTULO 10

Neste capítulo é descrito como foi efetuado o levantamento dos dados experimentais da presente pesquisa.

10 LEVANTAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS

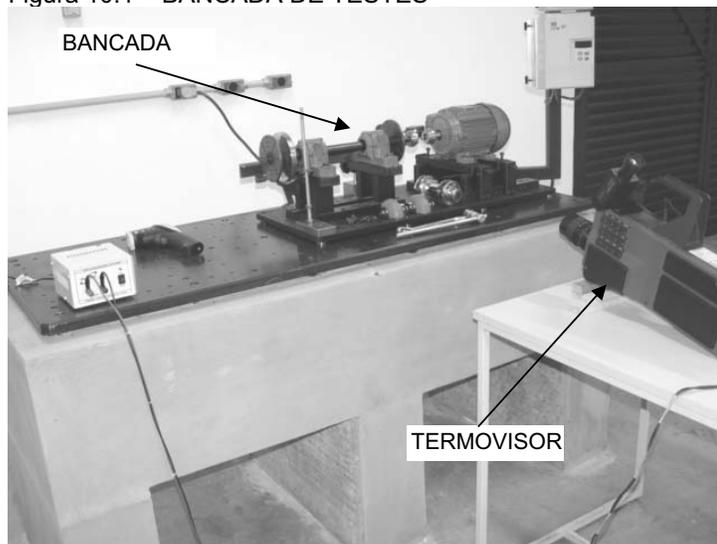
Os dados experimentais foram obtidos de duas formas diferentes, em laboratório usando-se uma bancada específica e em equipamentos reais que operam na PETROBRAS UN REPAR.

10.1 BANCADA DE TESTES

Construiu-se uma bancada exclusiva para os ensaios necessários para o presente trabalho. A bancada compõe-se de um conjunto de máquinas que representa uma situação real, sendo que o acionador é um motor elétrico trifásico, 220 V, 3380 rpm, comandado por um variador de frequência, e o acionado é um conjunto rotativo montado em dois mancais de rolamento, com um freio eletromagnético. A função do freio é proporcionar torque reativo no sistema, ou seja, simular carga. A Figura 10.1 e a Figura 10.2 mostram a bancada montada sobre uma base de concreto perfeitamente rígida e isolada.

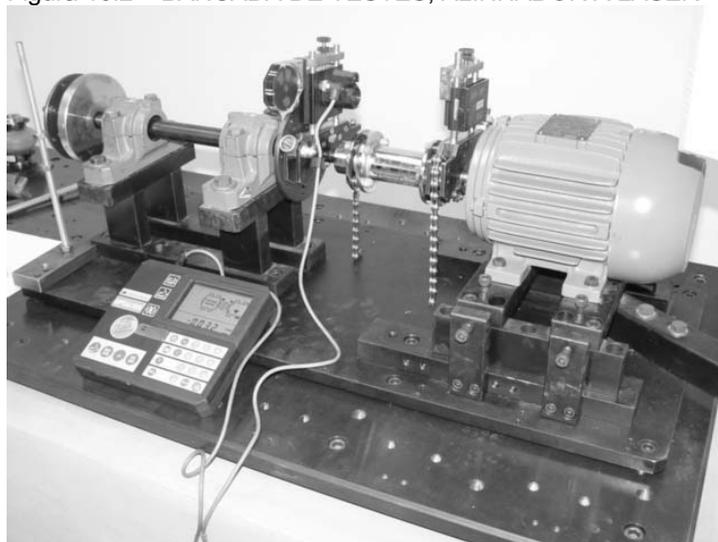
Para a medição do desalinhamento usou-se um alinhador a laser marca PRUFTECHNIK modelo OPTALIGN, conforme ilustrado na Figura 10.2.

Figura 10.1 – BANCADA DE TESTES



Fonte: O AUTOR.

Figura 10.2 – BANCADA DE TESTES, ALINHADOR A LASER



Fonte: O AUTOR.

Para a obtenção das imagens termográficas usou-se um termovisor marca AGEMA modelo 470 PRO, conforme ilustrado na Figura 10.3.

Figura 10.3 - TERMOVISOR



Fonte: O AUTOR

Para a obtenção dos dados de vibração usou-se um coletor-analisador marca CSI modelo 2115 e softwares MASTERTREND e RBM SILVER, conforme ilustrado na Figura 10.4.

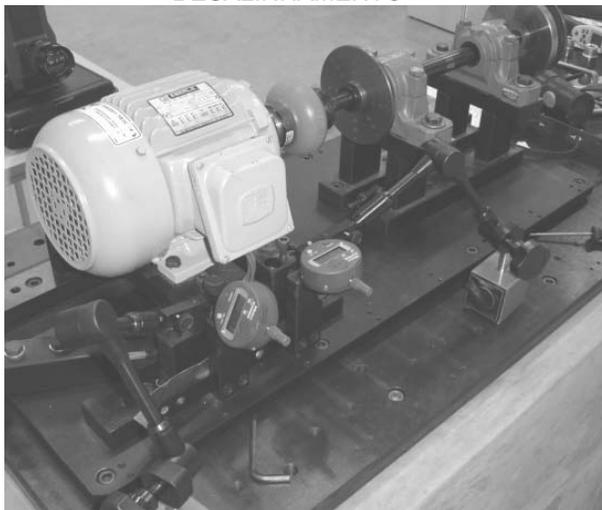
Figura 10.4 – COLETOR ANALISADOR DE VIBRAÇÕES



Fonte: O AUTOR.

O controle do desalinhamento foi feito com relógios comparadores e base magnética marca MITUTOYO modelo 543-601-5 e 7019, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 10.5.

Figura 10.5 – BANCADA DE TESTES, CONTROLE DO DESALINHAMENTO



Fonte: O AUTOR.

A medição de temperatura foi efetuada com termômetro sem contato marca RAYTEK.

Os acoplamentos usados para os ensaios foram acoplamentos flexíveis sendo um do tipo elastômero marca REXNORD modelo OMEGA E2-M, conforme ilustrado na Figura 10.6, e outro do tipo lâminas marca POWERFLEX modelo PWFS-0004-0PP-100, conforme ilustrado na Figura 10.7.

Figura 10.6 – BANCADA DE TESTES, ACOPLAMENTO FLEXÍVEL DE ELASTÔMERO



Fonte: O AUTOR

Figura 10.7 – BANCADA DE TESTES, ACOPLAMENTO FLEXÍVEL DE LÂMINAS



Fonte: O AUTOR

Para ensaio sobre proteção do acoplamento foi usada uma placa de policarbonato, conforme Figura 10.8. A escolha desse material se deu pelo fato de ser transparente e com resistência mecânica adequada.

Figura 10.8 – BANCADA DE TESTES, PROTEÇÃO DO ACOPLAMENTO



Fonte: O AUTOR.

10.2 TESTES DE LABORATÓRIO NA BANCADA DE TESTES

Os ensaios foram realizados usando-se a bancada ilustrada na Figura 10.1. Fez-se o alinhamento dos eixos usando-se o alinhador a laser ilustrado na Figura 10.1 e depois provocou-se desalinhamentos paralelos controlados entre 0/100 e 250/100 mm, ou seja, entre 0,00 e 0,25 mm, sendo que estes foram medidos pelo próprio alinhador a laser ou por relógios comparadores ilustrados na Figura 10.5. Nas mesmas circunstâncias, fez ensaios para dois tipos tipos de acoplamentos conforme ilustrados na Figura 10.1. e na Figura 10.1. Cada ensaio foi realizado duas vezes e sempre partindo-se com a bancada a frio.

Os dados obtidos são sempre espectros térmicos conforme figuras do Capítulo 11. Para o caso do acoplamento de elastômero fez também a medição de temperatura com termômetro sem contato.

10.3 TESTES DE CAMPO EM APLICAÇÕES REAIS

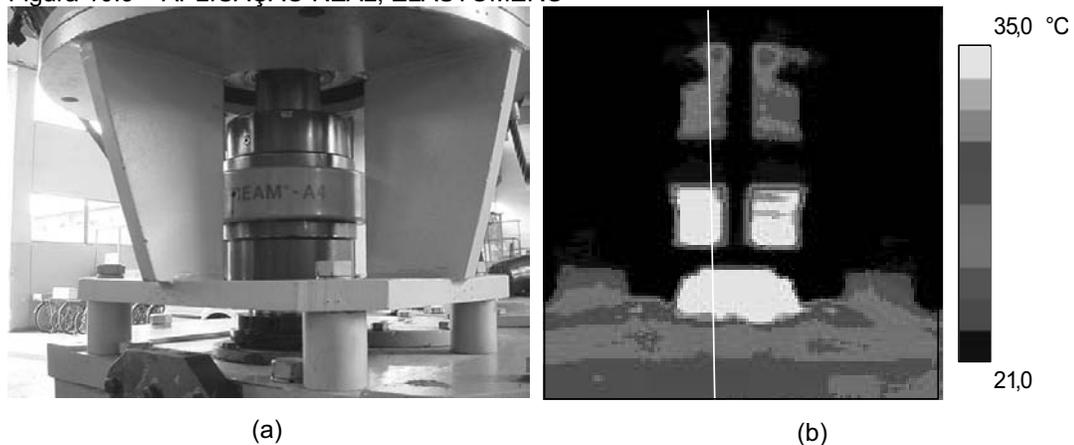
Para os ensaios em aplicações reais foi usado o mesmo termovisor, descrito no Item 10.1, para obtenção das imagens termográficas e um alinhador a laser equivalente ao descrito no Item 10.1. Também foi usado o mesmo analisador-coletor de dados de vibração descrito no Item 10.1.

Foram escolhidos dois casos. O primeiro é um conjunto de máquinas, motor acionando um redutor, com acoplamento flexível de elastômero marca JOHN CRANE modelo METASTREAM A4, conforme Figura 10.9a. O segundo é um conjunto de máquinas, motor acionando uma bomba centrífuga horizontal, com acoplamento flexível de lâminas marca POWERFLEX modelo PWFS-0110-1PP-178, conforme Figura 10.10a

Obteve-se os espectros térmicos ilustrados nas Figura 10.9b e na Figura 10.10b.

Pode-se observar a evidência de desalinhamento através do espectro de vibrações, Figura 10.12, obtido durante os ensaios. Essa afirmação fundamenta-se no que foi descrito no final capítulo 7, considerando-se a Figura 10.12 se refere a um ponto 02H.

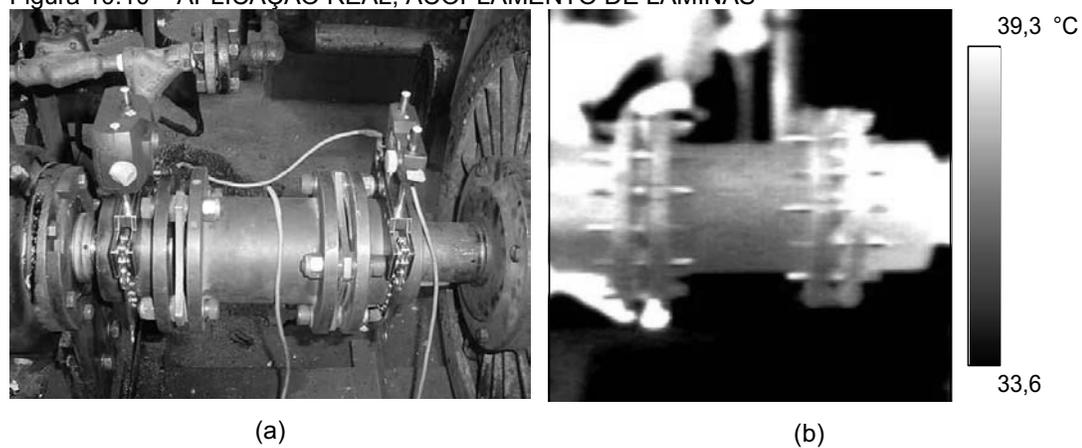
Figura 10.9 – APLICAÇÃO REAL, ELASTÔMERO



Fonte: O AUTOR.

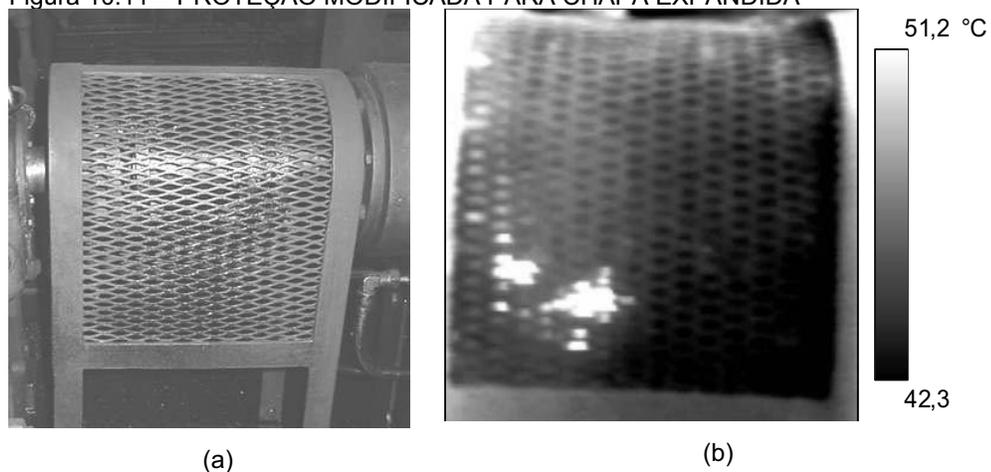
Ainda para ensaios sobre proteções dos acoplamentos foi escolhido um conjunto de máquinas, motor acionando uma bomba centrífuga horizontal, com acoplamento flexível de lâminas marca POWERFLEX modelo PWES-0310-1PP-229. A proteção foi construída em chapa expandida conforme Figura 10.11a.

Figura 10.10 – APLICAÇÃO REAL, ACOPLAMENTO DE LÂMINAS



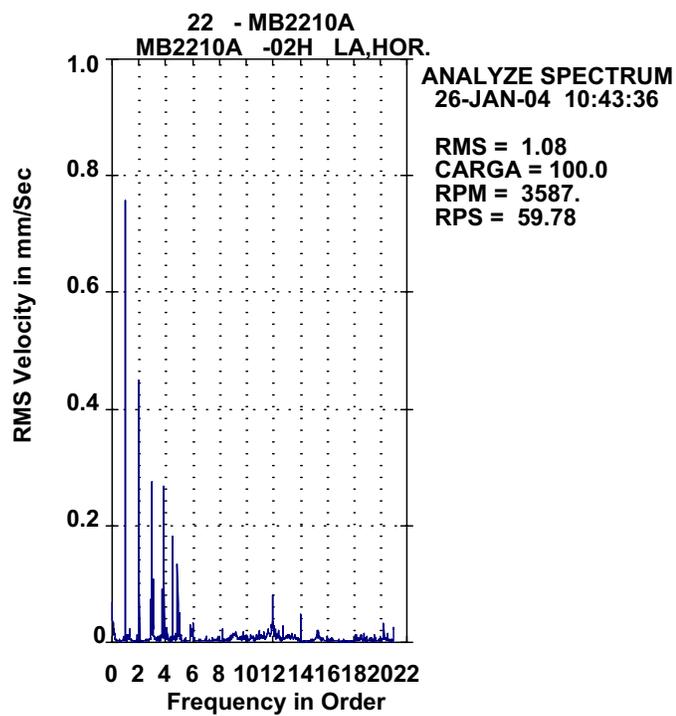
Fonte: O AUTOR.

Figura 10.11 – PROTEÇÃO MODIFICADA PARA CHAPA EXPANDIDA



Fonte: O AUTOR.

Figura 10.12 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS VERIFICADO PARA O DESALINHAMENTO



Fonte: O AUTOR

CAPÍTULO 11

Neste capítulo é feita a discussão dos resultados e comparação com resultados de outros autores. São discutidas as limitações do uso da termografia como técnica auxiliar à análise de vibrações. Também são feitas recomendações para futuras pesquisas.

11 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados experimentais obtidos permitem uma variedade de pontos a serem discutidos. A princípio, o principal objetivo seria discutir respostas aos problemas estabelecidos no Capítulo 2, porém o que acabou chamando a atenção foi a divergência entre os dados obtidos experimentalmente e as afirmações presentes na literatura.

O único autor a fazer estudo da geração de calor em acoplamentos em decorrência do desalinhamento é PIOTROWSKI (1995). No caso de diagnóstico do desalinhamento em regime de trabalho, ou seja, com o equipamento operando, esse autor, cita o uso de termografia, além de vibrações. O estudo termográfico citado trata de experimentos realizados no *Infraspection Institute*, nos EUA, sob condições devidamente controladas para cada tipo de acoplamento utilizado. Dos seis casos estudados por Piotrowski selecionou-se dois, para discussão, sendo que um possui características semelhantes ao modelo adotado para este estudo.

O primeiro caso é o modelo de acoplamento do tipo de elastômero ilustrado na Figura 11.1 cujo modelo semelhante adotado está ilustrado na Figura 10.6. Na Figura 11.1 observa-se a vista real da montagem usada, a imagem térmica para uma situação sem desalinhamento, um gráfico de colunas relacionando o aquecimento em função do desalinhamento e a imagem térmica para uma situação com desalinhamento. Os dados do gráfico foram reescritos na Tabela 11.1 convertendo-se as unidades das grandezas para a unidades usadas no Brasil, ou seja, temperature [deg F] para temperatura [°C], misalignment [mils] para desalinhamento [1/100 mm], leia-se centésimos de milímetro.

Tabela 11.1 – VARIACÃO TÉRMICA PARA O ESTUDO DE CASO 1

TEMPERATURA (°C)	DESALINHAMENTO (1/100 mm)
26,7	0
32,2	25
35,0	50
40,6	75
43,3	100

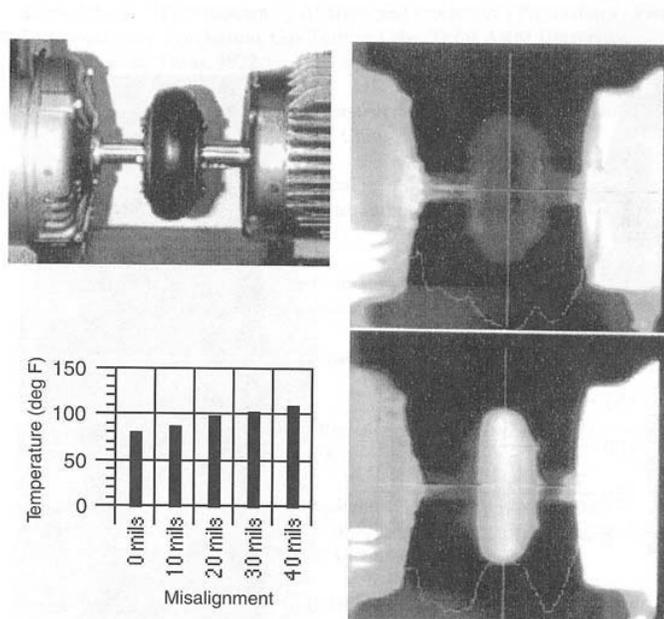
Fonte: PIOTROWSKI, 1995

Tabela 11.2 – VARIACÃO TÉRMICA PARA O ESTUDO DE CASO 1 (AUTOR)

TEMPERATURA (°C)	DESALINHAMENTO (1/100 mm)
23,0	0
23,4	25
23,4	50
23,6	75
24,1	100

Fonte: O AUTOR

Figura 11.1 – ESTUDO DE CASO 1

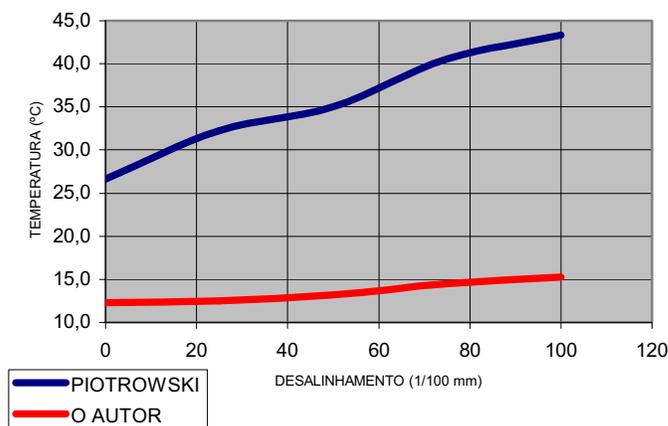


Fonte: PIOTROWSKI, 1995.

Na Figura 11.2, construída com dados da Tabela 11.1 e com dados

experimentais obtidos neste trabalho, Tabela 11.1, observa-se uma variação linear, com ascendência significativa, nos dados obtidos por Piotrowski. Essa ascendência significativa não foi observada nos dados deste trabalho.

Figura 11.2 – VARIÇÃO TÉRMICA NO ACOPLAMENTO DE ELASTÔMERO



Fonte: O AUTOR

O levantamento de dados de Piotrowski foi feito em uma bancada com acionador cinco vezes mais potente do que o do presente trabalho e com sistema de torque reativo usando-se um gerador elétrico, o que pode ter levado à geração de calor no elemento elástico do acoplamento através da deformação cíclica decorrente de vibração torcional.

Para a obtenção dos dados deste trabalho todas as partidas foram executadas com o motor da bancada na temperatura ambiente.

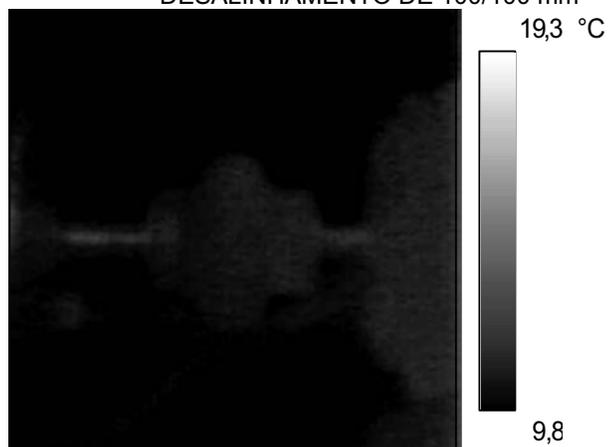
A Figura 11.3 mostra o estado térmico do acoplamento antes da partida, ou seja, a frio.

A Figura 11.4 mostra o estado térmico do motor elétrico, dois minutos após a partida. Observa-se que na região do mancal ocorre uma rápida geração de calor.

Dois fatos importantes que diferem da experiência de Piotrowski são o tempo de tomada da imagem térmica e valor do desalinhamento. Piotrowski afirma que as imagens foram obtidas após dez minutos da partida e o desalinhamento

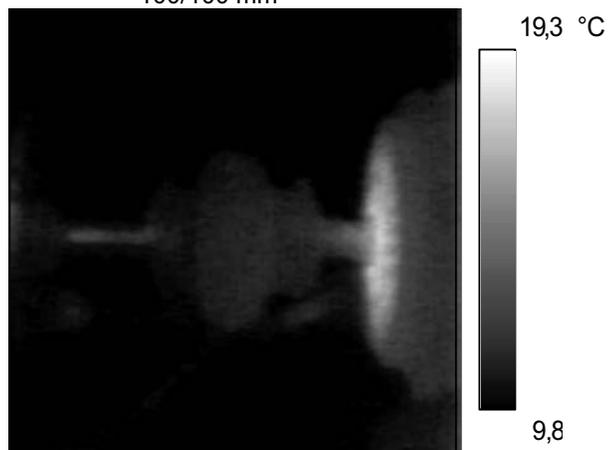
máximo experimentado foi de 100/100 mm. Para um desalinhamento de 100/100 mm e tempo de dez minutos obteve-se a imagem da Figura 11.5 onde não se percebe evidência de aquecimento do elemento elástico do acoplamento. Para um tempo maior, nota-se que há condução térmica do motor para o cubo do acoplamento através do eixo. Observando-se atentamente a Figura 11.1, de Piotrowski, nota-se uma ruptura no gradiente térmico na região do eixo entre o motor e o cubo do acoplamento, ou seja, a imagem térmica foi obtida, estrategicamente, antes que houvesse condução térmica do motor para o cubo do acoplamento através do eixo. Para um desalinhamento de 250/100 mm e tempo de dez minutos obteve-se a imagem da Figura 11.9 onde percebe-se evidência de aquecimento do elemento elástico do acoplamento, imagem semelhante a obtida por Piotrowski. Porém, observou-se que o aquecimento do elemento elástico já se torna evidente para tempo menores que dez minutos da partida, conforme Figura 11.7 e Figura 11.8 e, para tempos maiores que dezessete minutos, conforme Figura 11.10, nota-se que há condução térmica do motor para o cubo do acoplamento através do eixo, impossibilitando afirmar se houve ou não aquecimento do elemento elástico por desalinhamento.

Figura 11.3 – ENSAIO, IMAGEM ANTES DA PARTIDA
– DESALINHAMENTO DE 100/100 mm



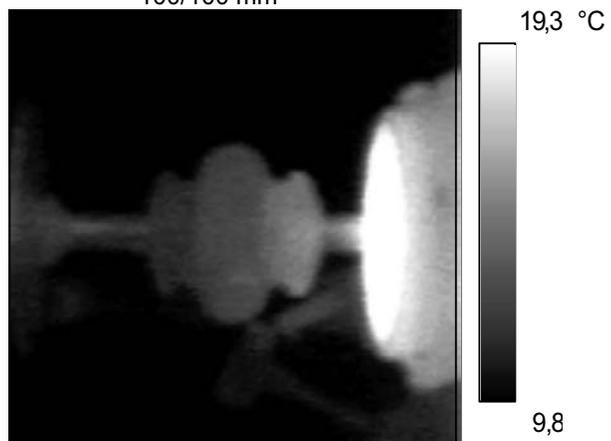
Fonte: O AUTOR

Figura 11.4 – ENSAIO, DOIS MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm



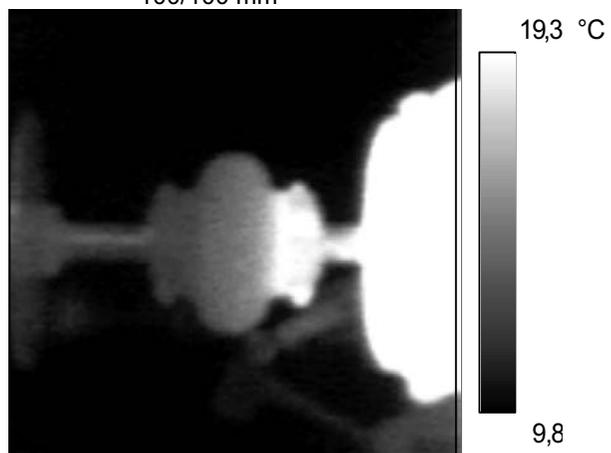
Fonte: O AUTOR

Figura 11.5 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm



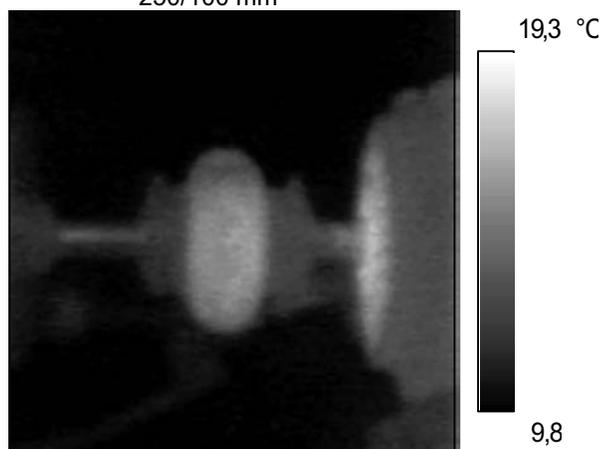
Fonte: O AUTOR

Figura 11.6 – ENSAIO, TRINTA MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm



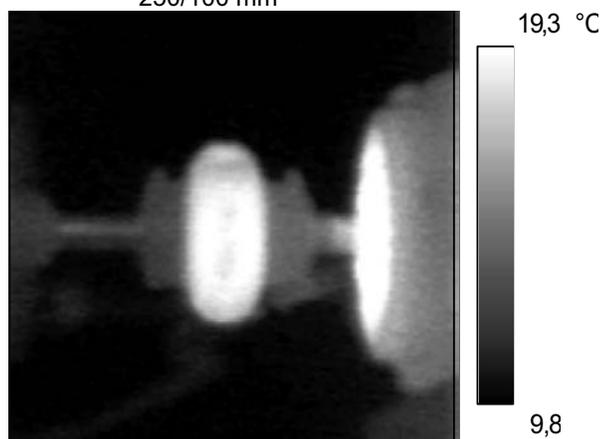
Fonte: O AUTOR

Figura 11.7 – ENSAIO, UM MINUTO APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 250/100 mm



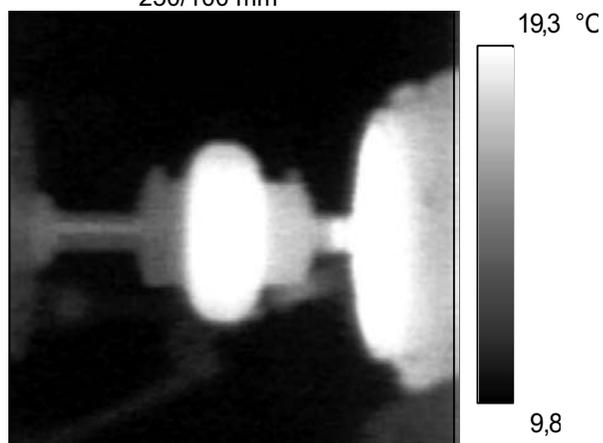
Fonte: O AUTOR

Figura 11.8 – ENSAIO, TRÊS MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 250/100 mm



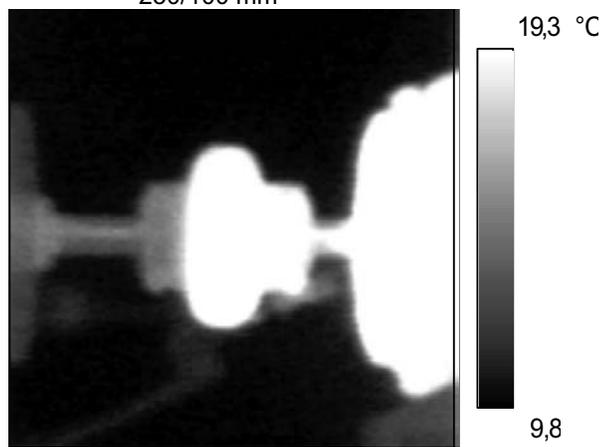
Fonte: O AUTOR

Figura 11.9 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 250/100 mm



Fonte: O AUTOR

Figura 11.10 – ENSAIO, DEZESETE MINUTOS APÓS
A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE
250/100 mm



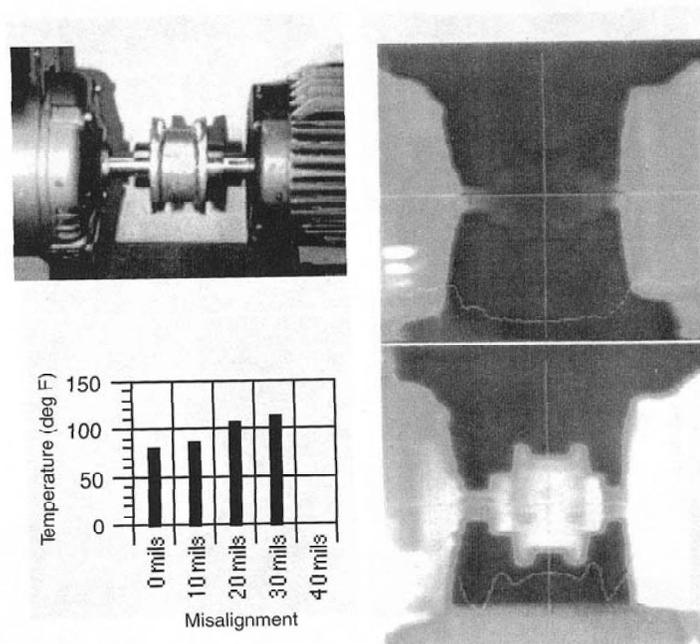
Fonte: O AUTOR

Nota-se que o aquecimento do elemento flexível do acoplamento somente fica evidente para valores muito acima dos limites de tolerância estabelecidos no Capítulo 7.

O segundo caso é o modelo de acoplamento do tipo de elastômero mesclado com partes metálicas, ilustrado na Figura 11.11, cujo modelo semelhante adotado está ilustrado na Figura 10.9a. Na Figura 11.11 observa-se a vista real da montagem usada, a imagem térmica para uma situação sem desalinhamento, um gráfico de colunas relacionando o aquecimento em função do desalinhamento e a imagem térmica para uma situação com desalinhamento. Os dados do gráfico, de forma análoga ao caso 1, mostram uma variação linear ascendente para a temperatura.

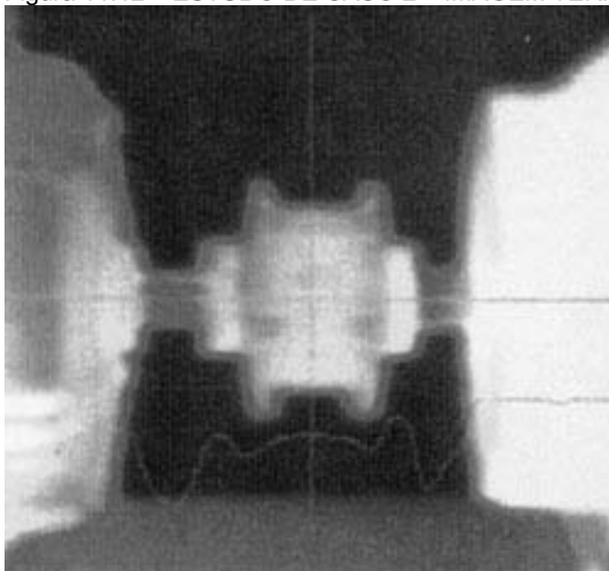
Nesse caso também não é possível concordar, a princípio, com os dados obtidos. A Figura 11.12 mostra a cores em melhor resolução a mesma imagem térmica da Figura 11.11. Dada a temperatura do motor, quanto mais branca a imagem mais quente, o esperado era haver condução térmica pelo eixo do motor, conforme observado nos dados obtidos no presente trabalho, numa aplicação real, conforme imagem da Figura 10.9b, onde o calor está indo do redutor para o cubo acoplamento. A imagem publicada por Piotrowski foi obtida, possivelmente, num tempo estrategicamente curto.

Figura 11.11 – ESTUDO DE CASO 2



Fonte: PIOTROWSKI, 1995.

Figura 11.12 – ESTUDO DE CASO 2 – IMAGEM TÉRMICA

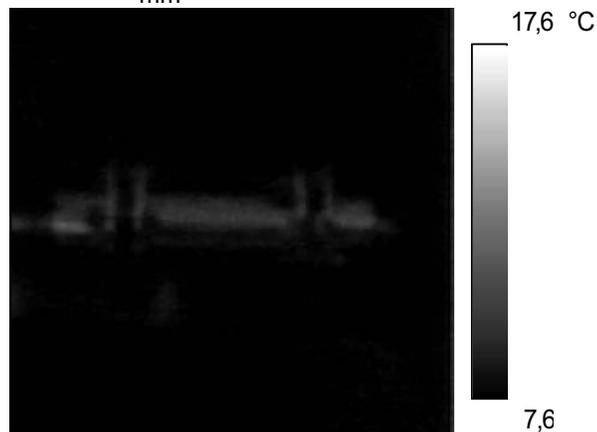


Fonte: PIOTROWSKI, 1995.

Neste trabalho foi estudado um modelo de acoplamento de lâminas

metálicas, conforme Figura 10.7. Este modelo não foi estudado por Piotrowski. As imagens térmicas da Figura 11.13, Figura 11.14 e Figura 11.15 confirmam que há uma relação escala entre a geração de calor no elemento flexível do acoplamento e o valor do desalinhamento.

Figura 11.13 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 0/100 mm



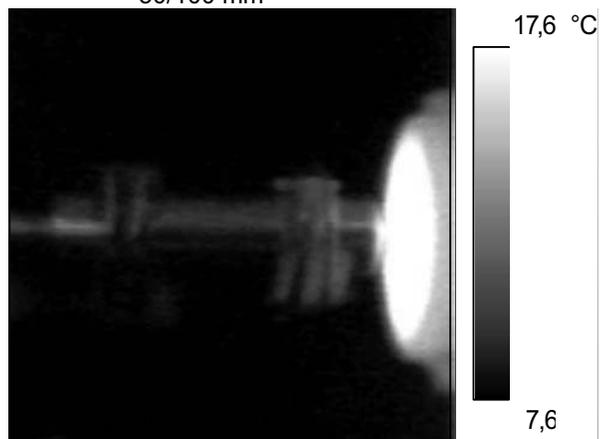
Fonte: O AUTOR

Nesse experimento mediu-se a temperatura do elemento flexível e obteve-se para o maior desalinhamento, 100/100 mm, um aquecimento de 3,1 °C acima da temperatura ambiente. Devido essa variação ser pequena torna-se difícil estabelecer uma relação escala confiável entre a geração de calor no elemento flexível do acoplamento e o valor do desalinhamento.

Nos casos estudados, verificou-se acréscimo de até 24°C na temperatura do motor elétrico.

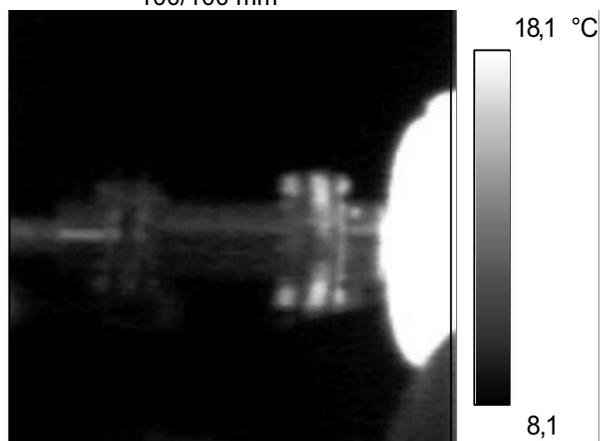
Fez-se ensaio em material para proteção do acoplamento usando-se uma placa de policarbonato, conforme Figura 10.8. O material é transparente, porém, conforme observa-se na Figura 11.16 a e b, impede totalmente a obtenção do espectro térmico.

Figura 11.14 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 50/100 mm



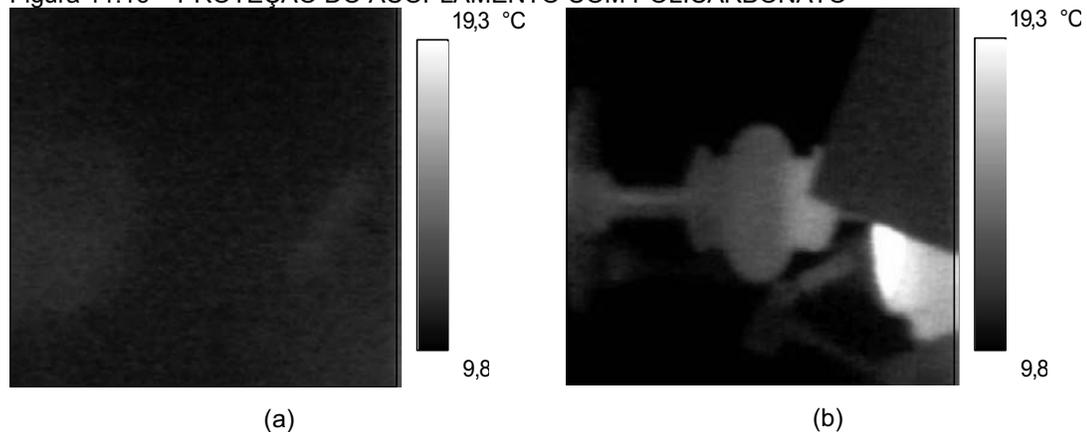
Fonte: O AUTOR

Figura 11.15 – ENSAIO, DEZ MINUTOS APÓS A PARTIDA – DESALINHAMENTO DE 100/100 mm



Fonte: O AUTOR

Figura 11.16 – PROTEÇÃO DO ACOPLAMENTO COM POLICARBONATO

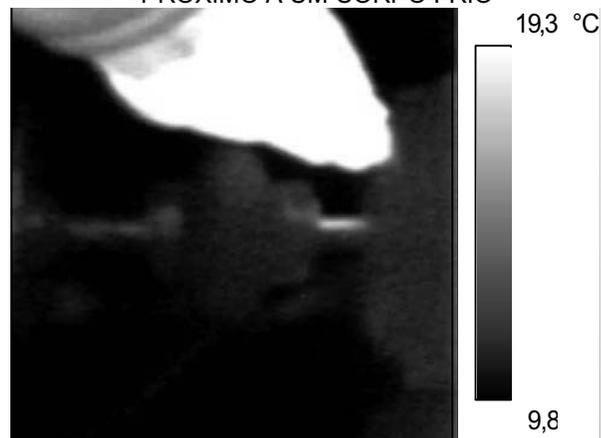


Fonte: O AUTOR.

Também, tratando-se de obtenção de espectro térmico, durante os experimentos, descobriu-se haver influência de um corpo quente sobre um corpo frio. Algo semelhante à reflexão no caso da luz, ilustrado na Figura 11.17.

Fez a verificação, isolando-se com papel, se o calor da caixa de mancal do motor estava diferenciando a imagem térmica do acoplamento e observou-se que não era significativo.

Figura 11.17 – INFLUÊNCIA DE UM CORPO QUENTE PRÓXIMO A UM CORPO FRIO

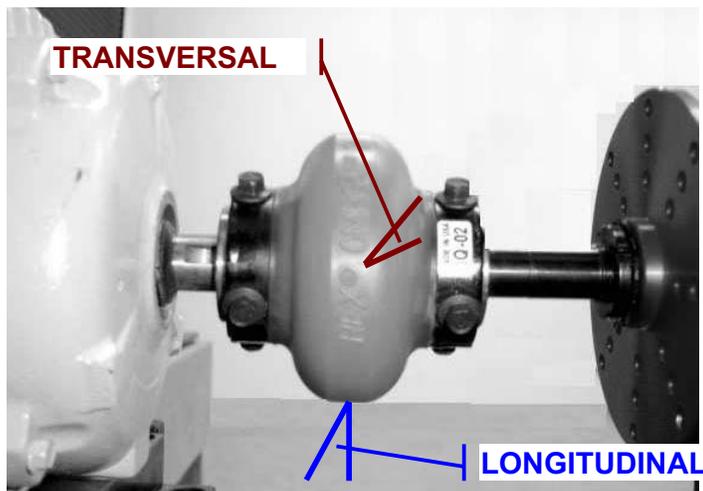


Fonte: O AUTOR

Fez-se verificação com o termovisor e observou-se que o espectro térmico

não sofre qualquer alteração em função da variação dos ângulos transversal e longitudinal de tomada. A Figura 11.18 define os ângulos.

Figura 11.18 – ÂNGULOS DE TOMADA DE IMAGENS



Fonte: O AUTOR

Para os ensaios em aplicações reais, conforme descrito no Item 10.3, obteve-se imagens com as máquinas operando em regime de carga e com desalinhamento de 25/100 mm. As imagens termográficas obtidas conforme Figura 10.9b e Figura 10.10b mostram o acoplamento aquecido, porém não é possível afirmar se a origem do calor é do acionador ou do elemento flexível do acoplamento.

11.1 LIMITAÇÕES

O experimento usou motor de baixa potência, mas na indústria, geralmente, os motores são de alta potência e aquecem significativamente o eixo.

Ficou claro que para equipamentos que operam de forma contínua esse método não poderá ser usado devido ao fato do motor elétrico fornecer mais calor do que o elemento elástico do acoplamento.

11.2 RECOMENDAÇÕES

No estudo de alinhamento de eixos ainda não se estudou a influência do empeno de eixos. Sugere-se fazer estudo sobre isso.

Geralmente os projetistas de máquinas rotativas ignoram as forças atuantes nos mancais decorrentes do desalinhamento. Na Tabela 5.1 observa-se que essas forças são significativas, principalmente no sentido axial. As recomendações sobre carregamentos em eixos e mancais devem ser revistas nos livros de elementos de máquinas e de dinâmica de máquinas. Até o momento o equacionamento proposto por XU e MARANGONI (1994) pode ser útil para projetos de máquinas, embora o seu modelo despreze o amortecimento.

CAPÍTULO 12

Neste capítulo faz-se a conclusão tendo-se como referência a problematização e as hipóteses descritas no Capítulo 2.

12 CONCLUSÃO

Observando-se o problema central estabelecido, como sendo a investigação da existência de relação de escala entre a geração de calor no elemento flexível do acoplamento e a amplitude de desalinhamento, pode-se confirmar a hipótese central estabelecida, que existe relação de escala linear entre a geração de calor no elemento flexível do acoplamento e a amplitude de desalinhamento. Porém a escala somente pode ser observada sob condições controladas e isso acarreta em inviabilidade do uso da termografia como técnica auxiliar para o diagnóstico do desalinhamento de eixos nas aplicações industriais em geral. As condições a serem controladas são partida a frio com tomada de imagem em até dez minutos e altos valores de desalinhamento, muitas vezes acima dos limites de tolerância. Então, pode-se afirmar que para valores levemente acima dos limites de tolerância, essa técnica não funciona.

Caso tivesse ficado evidente a vantagem do uso da termografia como técnica auxiliar para o diagnóstico do desalinhamento de eixos seria necessário alterações de projeto nas proteções dos acoplamentos, transformando-as de fixas em articuladas ou deslizantes. O uso de material transparente como o policarbonato impede totalmente a tomada da imagem. A chapa expandida reduz sensivelmente a qualidade da imagem.

O ângulo transversal de tomada do espectro térmico não influencia na definição da escala de relação com a amplitude. Também não há influência do ângulo longitudinal. Para se ter facilidade na interpretação das imagens é recomendável que se faça a tomada perpendicularmente.

Verificou-se que o principal fator limitante na aplicação do método proposto é a condução de calor pelo eixo tendo como fonte quente o motor elétrico. Pode-se generalizar para qualquer máquina acionada ou acionadora com fonte quente. Nos

casos estudados, verificou-se acréscimo de no máximo 3,1°C no elemento flexível do acoplamento enquanto que no motor elétrico o incremento foi de até 24°C.

GLOSSÁRIO

CAPABILIDADE – Termo apresentado em norma ABNT de qualidade. Significa capacidade efetiva de produção de um processo industrial.

CONSULTOR – Profissional especializado e acreditado numa área específica.

MILS – Corresponde ao valor de um milésimo de polegada.

PALMTOP - Computador portátil que pode ser operado com as mãos e sem apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLOCH, Heinz P.. *Improving machinery reliability*. 3. ed. Houston: Gulf, 1998. Practical machinery management for process plants. V.1.
- BURGMANN. **Magnetic couplings (MAK)**. [on line], GERMANY. Disponível: <http://www.burgmann.com> [capturado em 25 abr. 2004].
- CHARLES JACKSON, P. E.. Considerations in hot and cold alignment and couplings. *Proceedings of the Seventh International Pump Users Symposium*, EUA, p. 27-38, 1990.
- CONSISTEC. **Informações técnicas**. [on line], São Paulo. Disponível: <http://www.consistec.com.br> [capturado em 25 abr. 2004].
- DAINTITH, E.; GLATT, P.. Reduce costs with laser shaft alignment. Germany, **Technotes...** Disponível: <http://www.pruftechnik.com> [capturado em 27 nov. 2001].
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 740-1: **Power transmission engineering; flexible shaft couplings; technical delivery conditions**, 1986.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 740-2: **Power transmission engineering; flexible shaft couplings; parameters and design principles**, 1986.
- DOEBELIN, Ernest O. *Measurement systems – application and design*. 4. ed. Singapoure : McGraw-Hill, 1990.
- DUFOUR, John W.. Alignment. In: _____. *Centrifugal pump sourcebook*. EUA: McGraw-Hill, 1992. P. 223-241.
- FLIR. **Informações técnicas**. [on line], EUA. Disponível: <http://www.flirthermography.com/brazil> [capturado em 25 abr. 2004].
- GRAF, S.. The reliability impact of laser-optic alignment techniques. Germany, **Technotes**. Disponível: <http://www.pruftechnik.com> [capturado em 27 nov. 2001].
- JOHN CRANE. **Power Transmission Couplings - TSK**. [on line], England. Disponível: <http://www.johncrane.com/amer/english> [capturado em 25 abr. 2004].
- LORENC, J. A. Changes in pump vibration levels caused by the misalignment of different style couplings. *Proceedings of the Eighth International Pump Users Symposium*, EUA, p. 63-70, 1991.
- MITCHELL, John S.. *Introducion to machinery analysis and monitoring*. 2. ed. Oklahoma : PennWell, 1990.
- MOBLEY, R. Keith. Shaft alignment. In: _____. *Maintenance fundamentals*. EUA: Butterworth-Heinemann, 1999. P. 1-43.

MOBLEY, R. Keith. Couplings and clutches. In: _____. **Maintenance fundamentals**. EUA: Butterworth-Heinemann, 1999. P. 123-151.

NSK. **Nsk bearing doctor – diagnóstico rápido de ocorrências em rolamentos**. São Paulo, 2003. Catálogo B08.

PIOTROWSKI, John. **Shaft alignment handbook**. 2. ed. New York: Dekker, 1995.

POWERFLEX. **Acoplamentos flexíveis**. São Paulo, 2000. Catálogo.

PRUFTECHNIK. **Informações técnicas**. [on line], EUA. Disponível: <http://www.pruftechnik.com> [capturado em 02 jan. 2003].

REXNORD. **Fácil manutenção**. EUA, 1997. Catálogo 4012BR.

SEKHAR, A. S.; PRABHU, B. S.. Effects of coupling misalignment on vibrations of rotating machinery. **Journal of Sound and Vibration**, EUA, n. 185, p. 655-671, 1995.

TRANSMOTÉCNICA. **Acoplamentos elásticos teteflex e uniflex**. São Paulo, 1998. Catálogo.

TADEO, A. T.; CAVALCA, K. L.. Efeito da modelagem dos acoplamentos flexíveis nos sistemas mecânicos. **XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Curitiba, anais, 2001.

WEG. **Produtos**. [on line], Jaraguá do Sul. Disponível: <http://www.weg.com.br> [capturado em 25 abr. 2004].

WOWK, Victor. **Machinery vibration - Alignment**. EUA: McGraw-Hill, 2000.

XU, M.; MARANGONI, R. D.. Vibration analysis of a motor-flexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance, part I: theoretical model and analysis. **Journal of Sound and Vibration**, EUA, n. 176, p. 663-679, 1994.

DOCUMENTOS CONSULTADOS

HEWLETT PACKARD. **Informações Técnicas**. [on line], EUA. Disponível: <http://www.hp.com> [capturado em 27 nov. 2003].

MABIE, Hamilton. **Mechanisms And Dynamics Of Machinery**. 4. ed. EUA: le-Wiley, 1987.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de máquinas**. São Paulo : Edgard Blücher, 1971.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre : Bookamn, 2004.

PRODONOFF, Victor. **Vibrações mecânicas: Simulação e Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro : Maity, 1990.

RAO, Singiresu S.. **Mechanical vibrations**. 3. ed. New York : Addison-Wesleyl, 1990.

SANTOS, Ilmar Ferreira. **Dinâmica de sistemas mecânicos**. São Paulo: Makron, 2000.