



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



PAULO VICTOR DA SILVA OLINDA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA NA DETECÇÃO DE
FALHA POR DESALINHAMENTO PARALELO VERTICAL EM
ACOPLAMENTO FLEXÍVEL**

Campina Grande - PB

2018

PAULO VICTOR DA SILVA OLINDA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA NA DETECÇÃO DE
FALHA POR DESALINHAMENTO PARALELO VERTICAL EM
ACOPLAMENTO FLEXÍVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de pesquisa: Análise e projeto de sistemas termomecânicos

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior.

Orientador: Prof. Dr. Juscelino de Farias Maribondo.

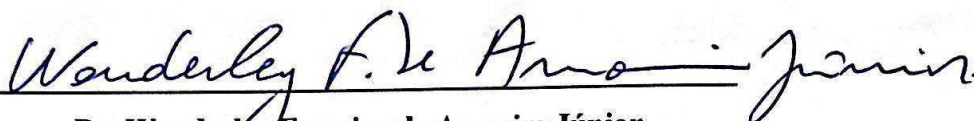
Campina Grande - PB

2018

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA NA DETECÇÃO DE FALHA POR
DESALINHAMENTO PARALELO VERTICAL EM ACOPLAMENTO FLEXÍVEL.**

PAULO VICTOR DA SILVA OLINDA

Dissertação Aprovada em 21/02/2018 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

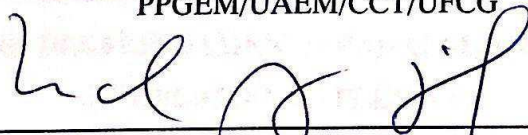
Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG

Dr. Juscelino de Farias Maribondo

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marcelo Bezerra Grilo

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Cícero da Rocha Souto

Examinador Externo

CEAR/DEE/UFPB

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela oportunidade e pela força para realizar este trabalho.

Agradeço a minha família, meus pais Ademar e Helena e meu irmão Lucas, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFCG, seus professores, em especial a meu orientador Dr. Juscelino de Farias Maribondo, por sempre estar disposto a ajudar sempre que precisei e a secretária Wanda por todo o apoio dado aos alunos do mestrado.

Aos profissionais da oficina mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, principalmente ao técnico Mário que sempre esteve disponível para me auxiliar.

Agradeço também a meus colegas mestrandos que sempre estiveram ao meu lado, apoiando e colaborando de alguma forma para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a CAPES, pelo suporte fornecido na forma de bolsa de estudos para que a pesquisa pudesse ser realizada.

OLINDA, Paulo Victor da Silva. **ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA NA DETECÇÃO DE FALHA POR DESALINHAMENTO PARALELO VERTICAL EM ACOPLAMENTO FLEXÍVEL**. 2018. 120 p. Dissertação. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2018.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo termográfico visando constatar falha de montagem por desalinhamento em acoplamento flexível do tipo garra, modelo GR 50. A metodologia da pesquisa pode ser caracterizada como do tipo aplicada, quantitativa, explicativa, bibliográfica e experimental. Para tanto, montou-se uma bancada experimental contendo um motor trifásico, eixos, rolamentos e o acoplamento flexível, sem a presença de cargas, destinado a solidarizar dois eixos contendo desalinhamentos entre eles de 0,5; 0,74 e 1,18 mm. Como resultado dos testes efetuados, foi possível perceber que a temperatura do acoplamento aumenta à mesma proporção dos desalinhamentos inseridos, ou seja, quanto maior o desalinhamento, maior a temperatura registrada. Este fato é melhor observado nos primeiros 20 minutos dos testes. Diante destes resultados é possível afirmar que a Termografia pode ser utilizada como técnica de detecção de falhas de montagem por desalinhamento nos primeiros minutos de funcionamento do sistema.

Palavras-chave: Acoplamento de eixos. Falhas em acoplamento. Desalinhamento de eixos. Radiação térmica. Termografia.

OLINDA, Paulo Victor da Silva. **STUDY OF THE THERMOGRAPHY FEASIBILITY IN THE DETECTION OF THE VERTICAL PARALLEL MISALIGNMENT FAILURE IN FLEXIBLE COUPLING.** 2018. 120 p. Dissertation. (Master's degree in Mechanical Engineering). Federal University of Campina Grande, Paraiba, 2018.

ABSTRACT

The aim of this work is to perform a thermographic study aiming to verify assembly failure by mounting in flexible claw type coupling, model GR 50. A research methodology can be characterized as applied, quantitative, explanatory, bibliographic and experimental type. For this, an experimental bench was built, containing a three-phase motor, shafts, bearings and the flexible coupling, without a load presence, to join two shafts with misalignments between them; 0.5, 0.74 and 1.18 mm. As a result of the tests performed, it was possible to notice that the temperature of the coupling increases the same proportion of the misalignments inserted, that is, the greater the misalignment, the higher the temperature recorded. This fact is best observed in the first 20 minutes of the tests. In view of these results, it is possible to affirm that the thermography can be used as a technique for detecting mounting faults by misalignment in the first minutes of the system operation.

Keyword: *Shaft coupling. Coupling failures. Shaft misalignment. Thermal radiation. Thermography.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema motor-bomba	20
Figura 2 - Juntas articuladas	21
Figura 3 - Acoplamento rígido de flanges parafusadas	22
Figura 4 - Acoplamento com luva de compressão ou de Aperto.....	22
Figura 5 - Acoplamento de discos ou pratos	23
Figura 6 - Acoplamento de corrente	24
Figura 7 - Acoplamento de engrenagem.....	24
Figura 8 - Acoplamento de dentes arqueados.....	25
Figura 9 - Acoplamento elástico de pinos	25
Figura 10 - Acoplamento elástico de garra.....	26
Figura 11 - Acoplamento elástico de grade	26
Figura 12 - Acoplamento flex.....	27
Figura 13 - Acoplamento de fole.....	27
Figura 14 - Sistema Alinhado	30
Figura 15 - Desalinhamento Paralelo	31
Figura 16 - Desalinhamento Angular	31
Figura 17 - Desalinhamento Axial.....	32
Figura 18 - Régua e Calibrador de Folga	33
Figura 19 - Alinhamento com relógio comparador	33
Figura 20 - Alinhamento a laser	34
Figura 21 - Experimento realizado por Herschel.....	36
Figura 22 - Imagem térmica de um acoplamento de máquina	36
Figura 23 - Espectro eletromagnético.....	37
Figura 24 - Espectro eletromagnético.....	38
Figura 25 - Espectro infravermelho.....	39
Figura 26 - Emissão de radiação.....	40
Figura 27 - Distribuição Espectral e Direcional	41
Figura 28 - Emissão de radiação.....	42
Figura 29 - Projeção de área	43
Figura 30 - Emissão de radiação de corpo negro e corpo real.....	44
Figura 31 - Exemplo de corpo negro	45
Figura 32 - Representação gráfica da Distribuição de Planck.....	47
Figura 33 - Representação gráfica do Poder Emissivo Total	49
Figura 34 - Comportamento de corpo real	50
Figura 35 - Refletividade dos corpos.....	53
Figura 36 - Refletividade dos materiais.....	54
Figura 37 - Transmissividade dos materiais	55
Figura 38 - Transmissividade da atmosfera.....	56
Figura 39 - Transmissividade do ar	57
Figura 40 - Emissividade de corpo negro e corpo real	58
Figura 41 - Emissividade para diferentes superfícies	60
Figura 42 - Emissividade dos materiais para diferentes comprimentos de onda.....	61
Figura 43 - Emissividade de materiais diferentes temperaturas	61

Figura 44 - Câmera Termográfica	63
Figura 45 - Termografia qualitativa e quantitativa.....	63
Figura 46 - Funcionamento da câmera termográfica.....	65
Figura 47 - Método refletor	69
Figura 48 - Método direto.....	70
Figura 49 - Ilustração da bancada de teste.....	79
Figura 50 - Relógio Termo-Higrômetro	80
Figura 51 - Pontos de medição	83
Figura 52 - Peças da bancada e cabine de isolamento.....	86
Figura 53 - Tratamento da superfície do acoplamento	87
Figura 54 - Bancada experimental.....	87
Figura 55 - Laboratório utilizado e posicionamento para o registro termográfico.....	88
Figura 56 - Velocidade do ar.	89
Figura 57 - Nível de alinhamento do experimento de referência	91
Figura 58 - Registro de temperatura e umidade	92
Figura 59 - Termogramas do experimento de referência	93
Figura 60 - Nível de alinhamento do primeiro experimento desalinhado	95
Figura 61 - Registro de temperatura e umidade	95
Figura 62 - Primeira comparação de termogramas.....	97
Figura 63 - Nível de alinhamento do segundo experimento desalinhado.....	99
Figura 64 - Registro de temperatura e umidade	100
Figura 65 - Segunda comparação de termogramas.....	101
Figura 66 - Nível de alinhamento do terceiro experimento desalinhado.....	104
Figura 67 - Registro de temperatura e umidade	104
Figura 68 - Terceira comparação de Termogramas.....	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores de frequência do espectro eletromagnético.....	38
Quadro 2 - Comprimento de onda no espectro infravermelho	40
Quadro 3 - Normas sobre Termografia.....	64
Quadro 4 - Informações pesquisadas	85
Quadro 5 - Comparação das temperaturas.....	90
Quadro 6 - Temperaturas nos pontos do acoplamento	94
Quadro 7 - Temperaturas nos pontos do acoplamento	97
Quadro 8 - Temperaturas nos pontos do acoplamento	102
Quadro 9 - Comparação das temperaturas em cada ponto do acoplamento.....	106

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 - Fluxograma do trabalho	76
Fluxograma 2 - FASE 1	77
Fluxograma 3 - FASE 2.....	78
Fluxograma 4 - FASE 3.....	78
Fluxograma 5 - FASE 4.....	79
Fluxograma 6 - FASE 5.....	80
Fluxograma 7 - FASE 6.....	81
Fluxograma 8 - Metodologia para ensaios termográficos	82
Fluxograma 9 - FASE 7.....	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico comparativo do sistema ligado e desligado	90
Gráfico 2 - Gráfico do experimento de referência.....	92
Gráfico 3 - Gráfico do primeiro experimento desalinhado.....	96
Gráfico 4 - Gráfico comparativo 1	98
Gráfico 5 - Gráfico do segundo experimento desalinhado	100
Gráfico 6 - Gráfico comparativo 2	103
Gráfico 7 - Gráfico do terceiro experimento desalinhado	105
Gráfico 8 - Gráfico comparativo 3	108

LISTA DE SÍMBOLOS

- ν - Frequência de onda
- λ - Comprimento de onda
- c - Velocidade da luz
- c_0 - Velocidade da luz no vácuo
- dS - Elemento infinitesimal de área percorrida pela radiação
- dA - Elemento infinitesimal da área da superfície emissora
- I - Intensidade de radiação
- I_λ - Intensidade espectral de radiação
- I_b - Intensidade de radiação de um corpo negro
- E - Poder emissivo
- E_λ - Poder emissivo espectral
- E_b - Poder emissivo do corpo negro
- h - Constante de Planck
- K_b - Constante de Boltzmann
- T - Temperatura
- σ - Constante de Stefan-Boltzmann
- α - Absortividade
- α_λ - Absortividade espectral
- $\alpha_{\lambda,\theta}$ - Absortividade espectral direcional
- ρ - Refletividade
- ρ_λ - Refletividade espectral
- $\rho_{\lambda,\theta}$ - Refletividade espectral direcional
- τ - Transmissividade
- τ_λ - Transmissividade espectral
- $\tau_{\lambda,\theta}$ - Transmissividade espectral direcional
- G - Radiação incidente
- G_{abs} - Radiação absorvida
- G_{ref} - Radiação refletida
- G_{trans} - Radiação transmitida
- ε - Emissividade
- ε_λ - Emissividade espectral
- $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ - Emissividade espectral direcional

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
CAPÍTULO II.....	18
2 MANUTENÇÃO E O ACOPLAMENTO DE EIXO.....	18
2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL.....	18
2.2	
ACOPLAMENTOS.....	20
2.2.1 TIPOS DE ACOPLAMENTOS DE EIXO.....	20
2.2.1.1 Juntas articuladas.....	20
2.2.1.2 Acoplamentos permanentes.....	21
2.3 FALHAS EM ACOPLAMENTOS.....	28
2.4 ALINHAMENTO DE EIXO.....	29
2.4.1 Tipos de desalinhamento.....	30
2.4.2 Formas de corrigir o desalinhamento.....	32
CAPÍTULO III.....	35
3 RADIAÇÃO TÉRMICA E TERMOGRAFIA.....	35
3.1 HISTÓRICO.....	35
3.2 RADIAÇÃO TÉRMICA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	37
3.3 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO.....	44
3.3.1 Lei de Planck.....	45
3.3.2 Lei de Wien.....	47
3.3.3 Lei de Stefan-Boltzmann.....	48
3.4 PROPRIEDADES RADIATIVAS DOS CORPOS REAIS.....	49
3.4.1 Absortividade.....	51
3.4.2 Refletividade.....	52
3.4.3 Transmissividade.....	54
3.4.4 Emissividade.....	57
3.5 LEI DE KIRCHHOFF.....	62
3.6 TERMOGRAFIA.....	62
3.6.1 Funcionamento do termovisor.....	65
3.6.2 Aplicações.....	71
3.7 TERMOGRAFIA E O ESTUDO DE FALHAS MECÂNICAS.....	72
CAPÍTULO IV.....	75
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	75

CAPÍTULO V.....	85
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
5.1 INTERFERÊNCIA DA CONVECÇÃO DO AR.....	89
5.2 EXPERIMENTO DE REFERÊNCIA.....	91
5.3 PRIMEIRO NÍVEL DE DESALINHAMENTO.....	94
5.4 SEGUNDO NÍVEL DE DESALINHAMENTO.....	99
5.5 TERCEIRO NÍVEL DE DESALINHAMENTO.....	103
CAPÍTULO VI.....	109
6 CONCLUSÕES.....	109
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE.....	115
ANEXO.....	117

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

As atividades industriais possuem diversos segmentos e em vários deles as máquinas rotativas participam de forma significativa na execução das atividades no campo fabril. Sendo assim, faz-se necessário realizar manutenções periódicas para que seja possível garantir o funcionamento adequado, pois quando esta atividade não é realizada de forma efetiva, pode levar a desgastes acelerados de seus componentes, a geração de falhas prematuras e acarretar prejuízo às empresas. Por conta disso, e devido à grande competitividade existente no mercado, é preciso assegurar o funcionamento adequado de todo o sistema mecânico.

Os sistemas mecânicos possuem componentes denominados elementos de máquina tais como rolamentos, eixos, engrenagens, correntes, correias, acoplamentos etc. Nas máquinas rotativas, os acoplamentos são componentes de grande importância visto que são utilizados na união de eixos e transmissão de rotação, torque e potência. Sua estrutura e funcionamento podem ser prejudicadas devido a fatores como o desalinhamento de eixos e o aumento de cargas vibratórias e de alto impacto, o que pode levar ao desgaste prematuro. Por conta disto, são utilizadas na indústria algumas técnicas de avaliação, reconhecimento e correção destes problemas como, por exemplo, a análise de vibração e a utilização de procedimentos de realinhamento, buscando garantir condições adequadas de funcionamento.

Grande parte das falhas em acoplamentos são causadas pelo desalinhamento de eixos. Com isso, a realização de sua correção torna-se de extrema importância nas atividades de manutenções pois, quando ela não ocorre mesmo com a manifestação de sinais como vibrações, temperatura ou ruído, as falhas dos equipamentos serão mais danosas.

Como o desgaste acelerado de elementos mecânicos vem, geralmente, acompanhado de um maior atrito durante seu funcionamento, podendo gerar um aumento anormal de temperatura, estudos utilizando a Termografia como técnica de detecção de falhas destes componentes têm sido cada vez mais realizados. Muito disso se dá pelo fato deste se tratar de um processo onde não há a necessidade de contato do operador com o equipamento analisado, a obtenção de dados ocorre de forma rápida e segura além de não ser necessária a parada e desmontagem de máquinas, ou seja, não prejudica o andamento das atividades da indústria.

Conforme estudos feitos por Bomfim (2013), existe uma correlação entre o aumento de temperatura e perdas de energia por conta do desalinhamento do equipamento. Entretanto, como os resultados obtidos ainda não são completamente conclusivos para o uso da análise termográfica como ferramenta única de análise, são necessários, ainda, estudos mais aprofundados para estabelecer os critérios e protocolos de análise mais confiáveis. Diante disto, este trabalho procura contribuir na área da manutenção industrial buscando evidenciar as falhas em um acoplamento utilizando a técnica da Termografia por meio da análise do calor gerado pelo desalinhamento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar se a Termografia pode constatar a falha por montagem de desalinhamento paralelo vertical em acoplamento flexível e em que momento essa detecção se mostra mais evidente.

1.1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, faz-se necessário desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Inserir desalinhamentos e constatar se há aumento de temperatura;
- Observar se a convecção do ar pode levar a erros na determinação das temperaturas;

- Constatar se este aumento de temperatura é significativo a ponto de auxiliar na tomada de decisão e em que período de tempo ela é mais evidente;
- Caso não seja, explicar o fenômeno;

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica por diversos aspectos, mas destacar-se-á a segurança do mantenedor e da aplicação da técnica em uma nova área.

Com relação à segurança do mantenedor, a Termografia pode evitar a ocorrência de muitos acidentes devido a sua capacidade de obtenção de dados sem a necessidade do contato direto do operador com o equipamento a ser analisado. Já com relação à aplicação da técnica, a Termografia, além da possibilidade de obtenção de um diagnóstico de forma fácil e rápida, pode se tornar uma técnica muito importante para a manutenção industrial por possibilitar a redução no número de paradas e no custo de manutenção pelo fato de que esse tipo de análise pode ser feita com o equipamento em funcionamento.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho destina-se a avaliar a capacidade da Termografia em constatar uma falha por montagem de desalinhamento do tipo paralelo vertical por meio da comparação da variação térmica entre um acoplamento sem a presença e com a presença de tal falha. Para tanto, delimitou-se este trabalho quanto ao tipo de acoplamento, quanto ao tipo de falha e quanto ao ambiente onde os ensaios seriam realizados.

Dentre o grande número de acoplamentos existentes no mercado e aos diversos tipos de falhas que os mesmos podem ser acometidos, optou-se por um acoplamento elástico do tipo garras da marca MADEMIL modelo MADEFLEX GR 50. Este tipo de acoplamento foi escolhido devido a sua facilidade de obtenção no mercado e a escolha do modelo se deu de acordo com os critérios de seleção do catálogo da empresa. Quanto ao tipo de falha de montagem, optou-se pelo desalinhamento paralelo vertical, onde seriam feitas as inspeções térmicas com o sistema dentro e fora das tolerâncias especificadas pelo fabricante do acoplamento. Já quanto ao ambiente onde os ensaios seriam realizados, determinou-se um laboratório onde as variáveis ambientais podem ser medidas e controladas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 6 (seis) capítulos, a saber:

No Capítulo I se contextualiza e apresenta o problema de estudo, seus objetivos geral e específicos, as justificativas, a delimitação do trabalho e como o texto foi estruturado.

No Capítulo II apresenta-se a revisão da literatura onde são apresentadas a fundamentação teórica sobre a manutenção de máquinas, acoplamentos de eixo e o desalinhamento de eixos.

No Capítulo III apresenta-se a radiação térmica e seus princípios como, radiação infravermelha, o conceito de corpo negro, emissividade, a Termografia, suas variáveis, aplicações da técnica e trabalhos já realizados a respeito da utilização da Termografia na detecção de falhas mecânicas.

No Capítulo IV apresentam-se os materiais e métodos empregados para a realização desta pesquisa.

No Capítulo V apresentam-se os resultados e suas discussões.

No Capítulo VI apresentam-se as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2 MANUTENÇÃO E ACOPLAMENTOS DE EIXO

Este capítulo trata de uma revisão da literatura a respeito da manutenção de sistemas mecânicos, os tipos de acoplamentos de eixos existentes e suas falhas, o desalinhamento de eixos e suas formas de correção.

2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

A manutenção industrial pode ser definida como sendo a soma do planejamento e execução de procedimentos para preservar e recompor sistemas mecânicos para garantir o seu funcionamento e ampliar ao máximo sua vida útil. De acordo com a NBR 5462:1994, manutenção é definida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

Historicamente as atividades de manutenção nas indústrias vem evoluindo constantemente conforme o crescente aumento do número de máquinas e equipamentos existentes, da complexidade dos projetos e criação de novas técnicas de manutenção. Conforme Kardec e Nascif (2010), desde os anos 30 até os dias de hoje, o desenvolvimento da manutenção pode ser dividido em quatro gerações.

A Primeira Geração da manutenção ocorre desde antes da Segunda Guerra mundial até o início dos anos 1950, onde não havia uma priorização da produtividade. As atividades realizadas eram basicamente de limpeza, lubrificação e reparo de falhas, denominada como manutenção corretiva não planejada.

Na Segunda Geração, entre os anos de 1950 e 1970, ocorreu um grande aumento da complexidade e mecanização das instalações industriais devido ao aumento da

demanda de todos os tipos de produtos. Com isso, necessitou-se buscar uma maior produtividade das indústrias e reduzir o número de falhas nos equipamentos. Dessa forma, gerou-se a ideia de manutenção preventiva.

A Terceira Geração da manutenção ocorreu entre os anos de 1970 até meados de 1990. Por conta do aumento dos custos de operação devido ao elevado gasto com manutenção, paralização de máquinas devido à falhas e realização de manutenções, além da preocupação com a qualidade dos produtos. Nessa fase foi impulsionado o conceito de manutenção preditiva.

Na Quarta Geração da manutenção, entre o final dos anos de 1990 até os dias de hoje, há uma grande preocupação com a disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos. Essa atenção estabelece e fortifica as atividades da Engenharia de Manutenção.

Atualmente, a manutenção industrial pode ser dividida em vários modelos diferentes. Estes modelos são denominados como:

Manutenção Corretiva, que é o reparo do equipamento ou de um de seus componentes quando o mesmo apresenta certa redução do seu desempenho ou falha durante seu uso e pode ser realizada de forma planejada ou não planejada;

Manutenção Preventiva, onde são realizadas atividades básicas de inspeção, ajustes e conservação de sistemas mecânicos baseado em intervalos de tempo predeterminados, buscando garantir um melhor desempenho do equipamento, diminuir a degradação de certos elementos e reduzir a probabilidade de paradas indesejadas;

Manutenção Preditiva, que é baseada no acompanhamento constante da variação de parâmetros dos equipamentos por meio de técnicas de análise de condição ou desempenho de forma sistemática;

Manutenção Detectiva, que é a atividade executada em sistemas de proteção, comando e controle, que busca constatar falhas ocultas, ou imperceptíveis para os responsáveis da produção ou manutenção industrial;

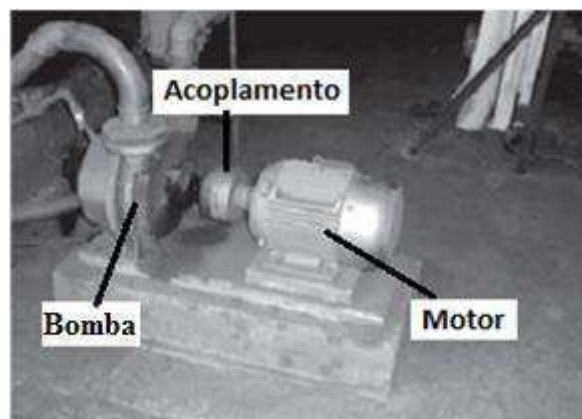
Engenharia de Manutenção, que é um conjunto de ações que busca otimizar a manutenção do maquinário de forma a identificar as causas básicas de falhas, sanar as ocorrências de mau funcionamento (KARDEC E NASCIF, 2010).

2.2 ACOPLAMENTOS DE EIXO

2.2.1 TIPOS DE ACOPLAMENTOS

Acoplamentos são dispositivos de conexão de conjuntos de eixos ou árvores de sistemas rotativos. Também podem ser definidos como elementos projetados para fornecer transmissão de potência de torque entre uma fonte motora e uma movida. Estes elementos mecânicos apresentam diversas funções tais como: transmissão de potência, absorção de choques em um dos eixos, absorção de desalinhamento de eixos, amortecimento de vibrações torcionais e proteção de máquinas exercendo a função de fusível. A Figura 1 apresenta uma imagem de um acoplamento instalado em um sistema motor-bomba.

Figura 1 - Sistema motor-bomba



Fonte –Adaptado de Procel Indústria (2009)

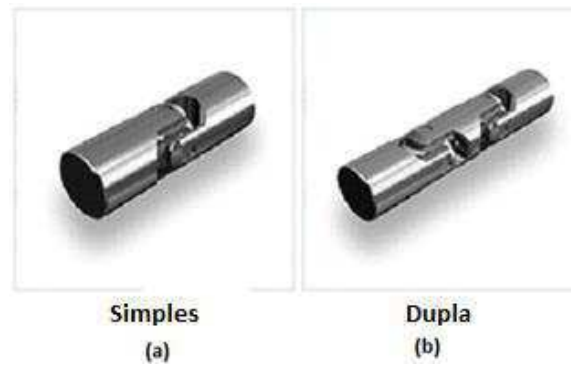
Os acoplamentos de eixo podem ser divididos em duas categorias, são elas as juntas articuladas e os acoplamentos permanentes. Além disso, estas podem ser subdivididas em tipos e modelos diferentes.

2.2.1.1 Juntas articuladas

As juntas articuladas são normalmente utilizadas quando se necessita unir eixos que não vão operar de forma alinhada, ou seja, trabalham com variação angular. Este tipo

de acoplamento é muito utilizado em automóveis. A Figura 2 apresenta este tipo de acoplamento.

Figura 2 - Juntas articuladas



Fonte - SKF (2017)

2.2.1.2 Acoplamentos permanentes

Os acoplamentos permanentes são divididos em dois tipos diferentes: rígidos e flexíveis.

Acoplamentos rígidos

Os acoplamentos rígidos são, geralmente, utilizados em aplicações verticais como nas bombas verticais. Estes elementos não toleram nenhum nível de desalinhamento entre os eixos e, quando conectados, operam como um eixo único. Alguns modelos de acoplamentos rígidos existentes no mercado são: acoplamentos de flanges parafusadas, luvas de compressão ou de aperto e discos ou pratos.

Acoplamentos rígidos de flanges parafusadas:

Os acoplamentos rígidos de flanges parafusadas são constituídos por duas partes instaladas uma no eixo acionador e outra no acionado, sendo parafusadas entre si e permitindo a transferência do torque. O uso deste tipo de acoplamento está normalmente ligado à eixos verticais de bombas. O modelo pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Acoplamento rígido de flanges parafusadas

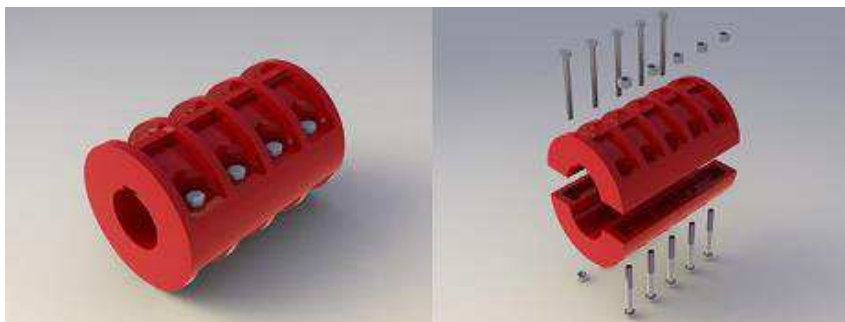


Fonte - SKF (2017)

Acoplamento com luva de compressão ou de aperto:

Os acoplamentos com luva de compressão ou de aperto tratam-se de uma manga ou luva dividida horizontalmente e unida por parafusos. Este modelo não interfere no posicionamento das árvores e eixos, podendo ser montado e removido sem problemas de alinhamento. A Figura 4 apresenta uma ilustração do modelo.

Figura 4 - Acoplamento com luva de compressão ou de Aperto



Fonte - Acionac (2017)

Acoplamento de discos ou pratos:

Os acoplamento de discos ou pratos são normalmente utilizados na transmissão de grandes potências, como em turbinas, e podem possuir superfícies de contato lisas ou dentadas. A Figura 5 apresenta uma imagem deste modelo de acoplamento.

Figura 5 - Acoplamento de discos ou pratos



Fonte - Siemens (2017)

Acoplamentos flexíveis

Os acoplamentos flexíveis oferecem uma união adaptável aos eixos e árvores, permitindo que se movam um em relação ao outro, possibilitando certo nível de desalinhamento. Este tipo de elemento de ligação torna a transmissão de movimento mais suave e dá ao mecanismo limites de tolerância que não são conseguidos com os acoplamentos rígidos, ou seja apenas ampliam a capacidade de transmissão para certos limites de tolerância. Entretanto, os acoplamentos flexíveis não podem ser considerados a solução para grandes desalinhamentos nas máquinas rotativas. Esta capacidade de flexão pode ser proporcionada por uma flexão mecânica, pelo material flexível ou uma combinação dos dois. Alguns modelos deste tipo de acoplamento serão vistos a seguir.

Acoplamentos de corrente:

O acoplamento de corrente é constituído por dois cubos com dentes de engrenagem que são conectados por correntes. O desalinhamento existente é compensado pelos espaços entre os dentes das correstes e a roda dentada. Este modelo possibilita uma boa transmissão de torque elevado em baixas velocidades. A Figura 6 apresenta uma ilustração do acoplamento.

Figura 6 - Acoplamento de corrente



Fonte - Wegcestar (2017)

Acoplamento de engrenagem:

No acoplamento de engrenagem, a transmissão do torque é feita por meio dos dentes de engrenagem, sendo os modelos mais comuns consistindo-se de dois cubos com dentes externos e uma luva ou tampa com dentes internos. Este modelo de acoplamento é capaz de transmitir torque em velocidades altas e baixas e o desalinhamento de eixo é compensado pela folga entre os dentes. Contudo, seja qual for o grau de desalinhamento presente, a vida útil do elemento é reduzida e pode causar danos a outros componentes do sistema como os rolamentos. A Figura 7 apresenta uma imagem ilustrativa deste modelo.

Figura 7 - Acoplamento de engrenagem



Fonte - Metalflex (2017)

Uma variação do acoplamento de engrenagem é o de dentes arqueados (Figura 8). Neste, a luva é feita de poliamida e seus dentes internos são levemente curvadas no sentido axial, permitindo um desalinhamento angular de, geralmente, 2 a 3 graus.

Figura 8 - Acoplamento de dentes arqueados



Fonte - Mademil (2017)

Acoplamento elástico de pinos:

Nos acoplamentos elásticos de pinos, os elementos de transmissão são os cubos de aço com pinos recobertos com luvas de borracha. A Figura 9 mostra um exemplo deste acoplamento.

Figura 9 - Acoplamento elástico de pinos



Fonte - Mademil (2017)

Acoplamento elástico de garra:

Os acoplamentos elásticos de garra são normalmente constituídos por cubos de ferro fundido onde são encaixadas estruturas de borracha em suas aberturas para transmissão do torque. O acoplamento compensa certos desalinhamento devido à capacidade de deformação do elastômero presente. Existem vários modelos deste tipo de

acoplamento, tanto com relação ao número de dentes presentes, quanto a natureza e rigidez do material. A Figura 10 apresenta um exemplo deste modelo.

Figura 10 - Acoplamento elástico de garra



Fonte – Adaptado de Mademil (2017)

Acoplamento elástico de grade:

O acoplamento elástico de grade é constituído por dois cubos com flange ranhurada que são ligados por uma grade elástica em forma de serpentina. Além disso, são instalados, junto aos cubos, duas tampas com junta de encosto e retentor elástico. O espaço entre os cabos e as tampas são lubrificadas com graxa. A Figura 11 mostra uma imagem deste modelo.

Figura 11 - Acoplamento elástico de grade



Fonte - SKF (2017)

A combinação da flexão mecânica e material da mola no conjunto proporciona uma resistência torcional ao sistema mecânico, absorve o desalinhamento, choques e vibrações existentes e podem transmitir alto torque em velocidades moderadas.

Acoplamento flex:

O acoplamento flex é formado por duas flanges unidas por um elemento de borracha e fixadas por parafusos. Este componente torna a transmissão de movimento mais suave e tem a capacidade de absorver desalinhamento angular e paralelo, além de amortecer ruído, vibração, choques e são os mais utilizados em equipamentos de motor elétrico. A Figura 12 apresenta uma imagem do modelo. .

Figura 12 - Acoplamento flex



Fonte - SKF (2017)

Acoplamento de fole:

Os acoplamentos de fole são constituídos por dois cubos conectados a um fole flexível e são utilizados em aplicações que requerem precisão. Este modelos são geralmente utilizados quando se tem velocidade e torque moderado e proporciona flexibilidade para compensar desalinhamentos gerados pela expansão térmica dos componentes do sistema. A Figura 13 ilustra este tipo de acoplamento.

Figura 13 - Acoplamento de fole



Fonte - Ringfeder (2017)

2.3 FALHAS EM ACOPLAMENTOS

Quando um acoplamento é exposto a torque, desalinhamento e velocidade, ele sofre reações que afetam não só sua vida útil como também o sistema mecânico. Para o melhor funcionamento do elemento, este deve ser devidamente projetado, selecionado e passar por manutenções frequentes. Pakale e Tuljapure (2015) citam alguns fatores, como erros humanos, corrosão, desgaste, fadiga e falha do eixo, que influenciam o funcionamento e a durabilidade desses elementos de ligação.

Os erros humanos podem ocorrer de várias formas diferentes como uma seleção inadequada de acoplamentos, fabricação imprópria, realização de instalação incorreta e falta de manutenção periódica. No trabalho de Tonks e Wang (2016), foi afirmado que os acoplamentos são escolhidos com base em alguns requisitos, tais como: rigidez, vibração e até mesmo o ambiente. A escolha inadequada de seu modelo e tamanho durante situações que não atendem às exigências do sistema mecânico pode levar a muitas falhas que, geralmente, são bastante caras. Outro problema existente trata-se da ocorrência de fabricação imprópria, ou seja, um erro que ocorre durante o projeto e o processo de fabricação do elemento e que afeta seu desempenho, qualidade e durabilidade.

A ocorrência de erros como apertos inadequados de parafusos, uso de parafusos de baixa qualidade, espaçamento e instalação incorreta do cubo e vedação imprópria de acoplamento são algumas das falhas relacionadas à instalação incorreta do acoplamento. Esses erros são, normalmente, gerados pela falta de um procedimento de instalação e alinhamento adequado. Um dos problemas causados por este tipo de falha é vibração excessiva, que pode levar a desgastes prematuros ou até mesmo a colapso do acoplamento e de outros componentes do mecanismo.

A falta de atividades de manutenção periódica como a realização de inspeção visual, verificação de características de operação como a presença incomum de ruído, temperatura, vibração e sinais de desgaste ou fadiga de peças. Além disso, o alinhamento de eixo é de sumária importância na realização da manutenção. Geralmente, a falta destas atividades pode ser tratada como um problema simples, mas caso não sejam realizadas, podem levar a falhas mais onerosas para o mecanismo.

Durante sua utilização, todos os tipos de acoplamentos podem ser afetados pela corrosão. Os componentes ferrosos são afetados por substâncias como sais, cloretos e

hidrogênios e os de alumínio podem sofrer por sais e álcalis. Já os componentes de borracha, podem ser afetados, entre outros elementos, por óleos hidráulicos.

De acordo com Pakale e Tuljapure (2015), em todos os sistemas que sofrem desalinhamento, o elemento de ligação sofre um maior atrito durante seu funcionamento e, com isso, acarreta em desgaste por abrasão. Nos casos em que há a necessidade de lubrificação, as partículas liberadas são agregadas aos lubrificantes, gerando uma substância abrasiva, tornando cada vez maior a taxa de desgaste.

A falha por fadiga é natural e gradual para qualquer componente dos sistemas mecânicos. Quando uma peça sofre uma exigência maior que o natural, a fadiga poderá ocorrer prematuramente. Em acoplamentos, este tipo de falha pode ser gerado, também, por um desalinhamento excessivo.

As falhas dos eixos dos equipamentos podem ser causadas durante o uso de acoplamentos em aplicações onde há um certo nível de desalinhamento. A instalação incorreta do cubo ou até mesmo o acabamento inadequado de sua superfície pode afetar a posição da linha de centro do eixo e desenvolver movimentos e forças periódicas no eixo e afetar a sua vida útil.

De acordo com a literatura, o desalinhamento de eixos é a principal fonte de vibração em máquinas e, ainda, uma das maiores causadoras de falhas prematuras em equipamentos rotativos. As vibrações geradas criam forças de rotação com impulsos de excitação que estão relacionados com a quantidade de desalinhamento e velocidade de rotação, acelerando o desgaste de componentes.

2.4 ALINHAMENTO DE EIXO

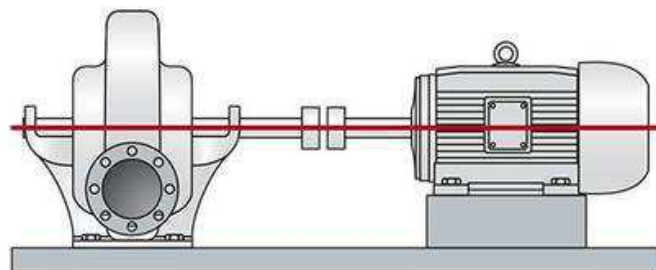
O alinhamento de eixo é definido como o posicionamento correto das linhas imaginárias centrais das partes motoras e movidas, garantindo a obtenção de um eixo único de rotação a partir de sua união. Pode-se dizer também que o equipamento encontra-se alinhando quando as linhas de eixo estão colineares no ponto do acoplamento. Qualquer desvio nesta condição pode levar a um desgaste anormal de componentes como rolamentos, vedações de eixo e acoplamentos.

Com o desalinhamento de eixos, são geradas forças de reação e momentos nos acoplamentos instalados nas máquinas rotativas. Essas forças variam de acordo com o

desalinhamento gerado por meio dos elementos de transmissão. Segundo Reddy e Sekha (2015), o desalinhamento de eixo é uma fonte significativa de vibração e muito frequente em sistemas de rolamento de rotor como eixos de turbinas. Um desalinhamento significativo cria movimentos incomuns aos eixos, adiciona empuxo a eixos e rolamentos, provoca vibrações axiais e radiais, ruído, aumento no consumo de energia (em torno de 2 a 12%) e gera temperaturas excessivas em elementos mesmo que sejam lubrificados, levando ao desgaste prematuro, pois podem causar ressecamento em partes de borracha ou até mesmo a falha do equipamento. Além disso, sabe-se que o desbalanceamento e desalinhamento são as maiores causas de vibração e preocupação com máquinas rotativas.

O alinhamento entre eixos ligados por meio de acoplamentos, mesmo sendo flexíveis, é muito importante para obter uma vida útil elevada e menores custos de manutenção. Um melhor alinhamento inicial do acoplamento aumenta a sua chance de sobrevivência e a dos equipamentos de condução e conduzido. A Figura 14 apresenta uma ilustração de um sistema alinhado.

Figura 14 - Sistema Alinhado



Fonte: Abecom (2017)

2.4.1 Tipos de desalinhamento

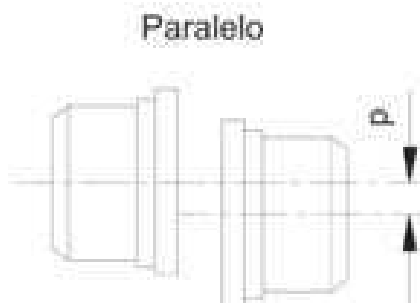
O desalinhamento de eixo é dividido em três tipos, desalinhamento paralelo (radial), angular e axial, podendo ocorrer tanto de forma individual quanto combinada.

Desalinhamento paralelo ou radial:

O desalinhamento paralelo ocorre quando as linhas de centro dos eixos se apresentam com uma discordância paralela. Sua presença pode ocorrer tanto no sentido

vertical quanto no horizontal, ou seja, há uma diferença de gradiente de altura ou distância lateral. A Figura 15 apresenta uma imagem deste tipo de desalinhamento.

Figura 15 - Desalinhamento Paralelo

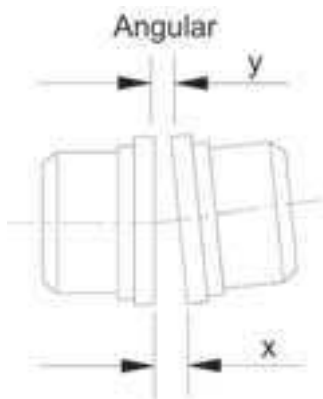


Fonte: Procel (2009)

Desalinhamento angular:

O desalinhamento angular ocorre quando há uma inclinação entre as linhas de centro dos eixos, apresentando uma discordância angular entre elas. Esta divergência pode ser na vertical ou horizontal. A Figura 16 apresenta uma imagem deste tipo de desalinhamento.

Figura 16 - Desalinhamento Angular

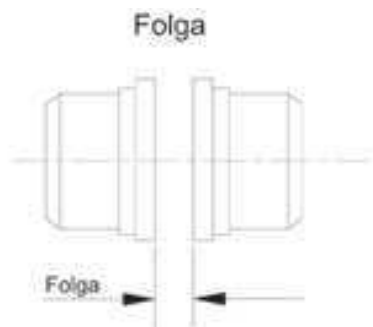


Fonte: Procel (2009)

Desalinhamento Axial:

Este tipo de desalinhamento trata-se de um afastamento axial entre os eixos conectados. A Figura 17 apresenta uma ilustração desta falha.

Figura 17 - Desalinhamento Axial



Fonte – Procel (2009)

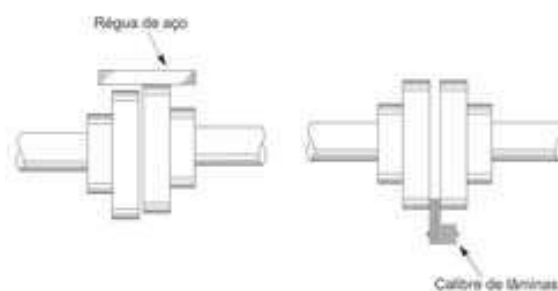
2.4.2 Formas de corrigir o desalinhamento

Existem diversas técnicas de alinhamento que são utilizadas no setor industrial. Dentre elas, algumas são mais grosseiras e menos precisas, como o método com régua e calibrador de folga e outros mais precisos como o métodos com relógio comparador e até mesmo utilizando alinhador a laser.

Régua/Calibrador de folga:

Este método utiliza uma régua para avaliar o nivelamento dos eixos e acoplamentos e trata-se de um método bastante simples e menos preciso. O alinhamento paralelo é alcançado quando quatro posições que são defasadas em 90° (0° , 90° , 180° e 270°) encontram-se niveladas. Já o alinhamento angular é obtido quando o medidor de folga indicar a mesma distância para os quatro pontos. A Figura 18 apresenta uma ilustração de como é posicionadas as ferramentas para este método.

Figura 18 - Régua e Calibrador de Folga

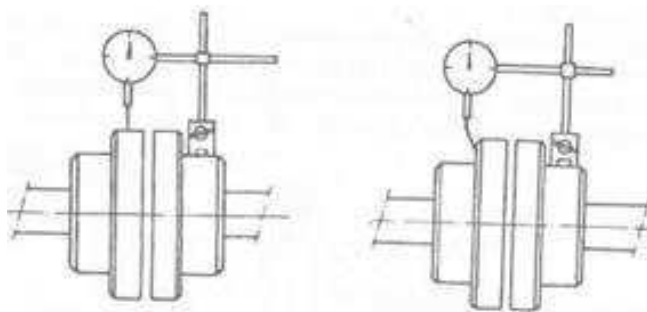


Fonte – Procel (2009)

Relógio comparador:

Quando se utiliza o relógio comparador, se consegue uma certa precisão já bastante efetiva para a realização dos alinhamentos quando se compara com a régua e o calibre de folga. Em média, as mensurações feitas com o esse equipamento são realizadas o instalando em um suporte e, a partir do posicionando da haste de medição dos acoplamentos, identifica-se a diferença de alinhamento existente. A Figura 19 apresenta uma ilustração da utilização do relógio comparador para detectar o desalinhamento.

Figura 19 – Alinhamento com relógio comparador



Fonte - Procel (2009)

Alinhamento a *laser*:

Este método é o mais preciso quando comparado aos outros já citados. Por meio da emissão um *laser* de uma parte fixa (transdutor) para uma parte móvel (prisma), é feita a avaliação, com o auxílio de um *software*. Sendo assim, este é o método mais confiável,

rápido e melhor para distâncias maiores mas que, ainda sim, pode ser afetado pela luz e por partículas que possam estar suspensas no ar. A Figura 20 apresenta uma ilustração deste método.

Figura 20 - Alinhamento a *laser*



Fonte – Pruftechnik (2017)

O alinhamento a *laser* possui maior rapidez e confiabilidade que os outros métodos tradicionais. Sua precisão pode chegar a ser dez vezes maior que os relógios comparadores. Além disso, a sua montagem é mais fácil e não ocorrem as deflexões que podem acontecer nos suportes mecânicos.

CAPÍTULO III

3 RADIAÇÃO TÉRMICA E TERMOGRAFIA

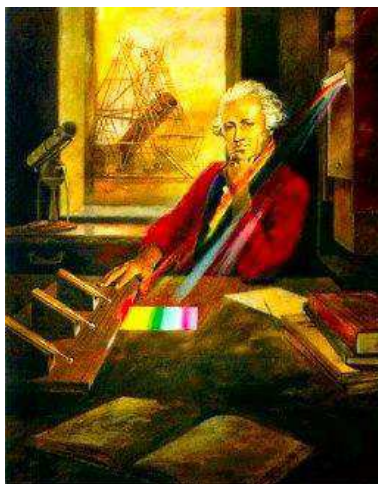
Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos básicos relativos à radiação térmica, o espectro eletromagnético, conceito de corpo negro, fatores que influenciam a irradiação térmica, a Termografia, suas principais influências e aplicações. Além disso, também serão apresentados alguns trabalhos de pesquisa sobre a Termografia e o estudo de falhas mecânicas.

3.1 HISTÓRICO

Em 1800, o astrônomo real inglês, Sir William Herschel percebeu variações na transmissão de calor em várias amostras de vidro de cores diferentes. Desta forma, ao repetir o experimento de Newton, ao fazer passar a luz solar através de um prisma, percebeu um aumento contínuo de temperatura ao longo das cores do espectro desde a cor violeta até o vermelho. Este resultado foi parecido com experimentos realizados pelo cientista italiano Marsilio Landriani, (CARAMALHO, 2012).

Herschel reconheceu que deveria existir uma área onde a mensuração da temperatura atingiria um valor máximo e ao medi-la na região além da extremidade vermelha, confirmou que o calor continuava a aumentar. Ele denominou o calor desta região como “calor escuro” ou “raios invisíveis”. Hoje em dia, estes são conhecidos como uma parte do espectro eletromagnético, sendo denominado espectro infravermelho. A Figura 21 apresenta uma ilustração do experimento realizado por Herschel.

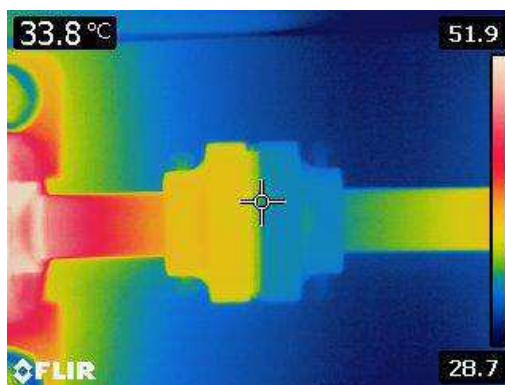
Figura 21 - Experimento realizado por Herschel



Fonte – Caramalho (2012)

Sir John, filho de Sir William Herschel, produziu a primeira imagem infravermelha em 1840, mediante a evaporação diferencial de uma fina camada de óleo. Esta imagem podia ser vista por meio da luz refletida pela película e foi chamada de “termógrafo”. Já no período entre a Primeira Guerra Mundial e nas décadas de 1960 e 1970, houve grandes avanços principalmente pelas aplicações militares e, a partir de então, começou a ser amplamente usada na indústria, inspeção de construções e na área médica (HELLIER, 2003). A Figura 22 apresenta uma imagem térmica, também chamada de termograma, de um sistema mecânico.

Figura 22 - Imagem térmica de um acoplamento de máquina



Fonte: Autoria própria.

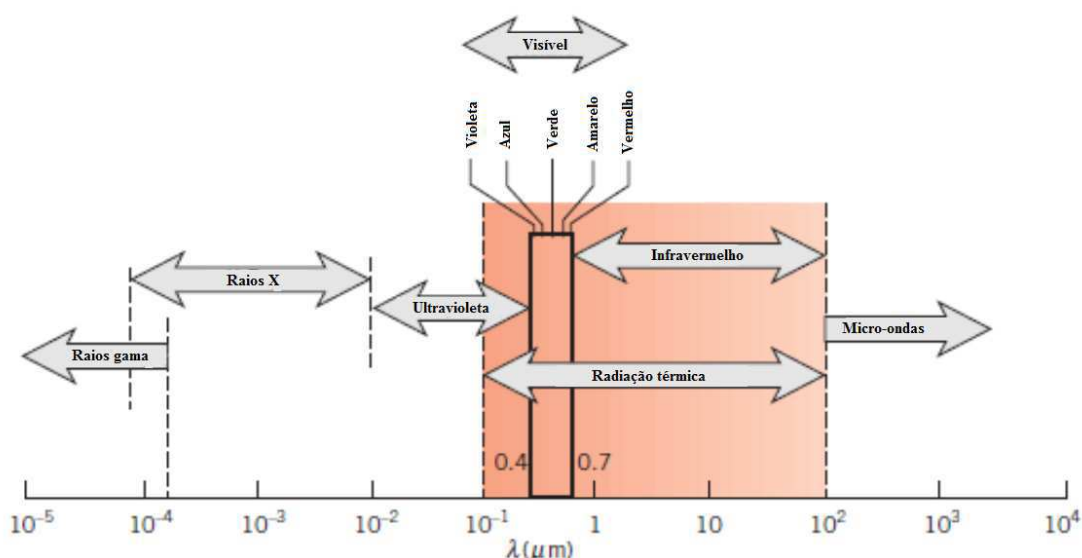
3.2 RADIAÇÃO TÉRMICA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A radiação térmica é o modo de transferência de calor onde a energia é emitida na forma de radiação eletromagnética pela matéria quando a mesma possui temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin). Diferente dos outros mecanismos de transferência de calor (condução e convecção), esta transmissão é realizada sem a necessidade de um meio material ou seja, não há a necessidade do contato de seus átomos, podendo ocorrer no vácuo.

Conforme Incropera (2011) e Howell *et al* (2016), a irradiação térmica ocorre sob dois pontos de vista, a mecânica quântica e a teoria clássica das ondas eletromagnéticas. No primeiro, a propagação ocorre na forma de um conjunto de partículas conhecidas como *fótons* ou *quanta*, já no segundo, essa propagação é descrita na forma das ondas eletromagnéticas. Estas ondas são formadas por componentes de campo elétrico e magnético que são perpendiculares entre si e oscilam em determinadas frequências, ocupando uma faixa do espectro eletromagnético.

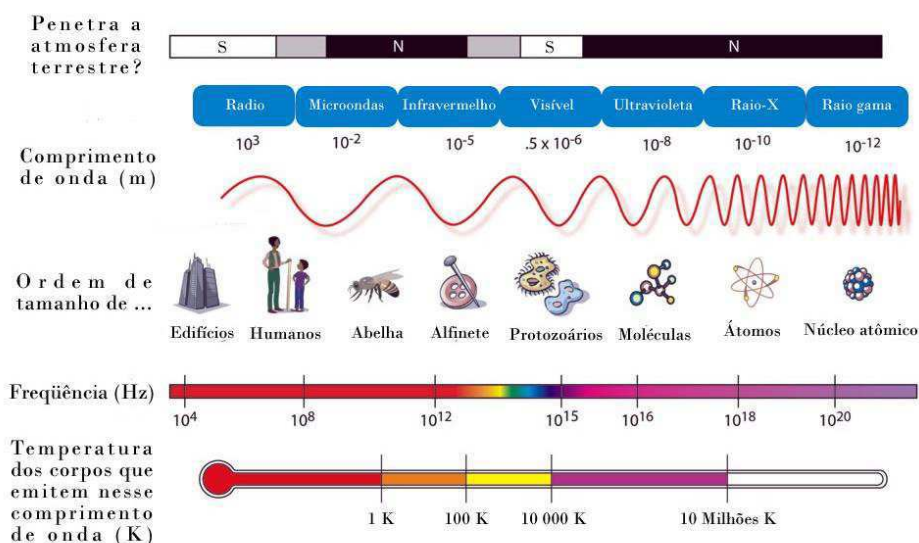
O espectro eletromagnético divide-se em diversas faixas com diferentes comprimentos de onda e frequência, conforme pode ser visto nas Figura 23 e Figura 24. Dentre as regiões existentes, estão presentes a luz visível, infravermelho, ultravioleta, micro-ondas, raios-x e raios gama.

Figura 23 - Espectro eletromagnético



Fonte - Traduzido de Incropera (2011)

Figura 24 - Espectro eletromagnético



Fonte – USP (2018)

De acordo com Cengel e Ghajar (2015), a radiação térmica encontra-se na faixa entre 0,1 a 100 μm do espectro eletromagnético. Sua extensão abrange parte da radiação ultravioleta (0,1 a 0,4 μm), da radiação visível (0,4 a 0,76 μm) e da radiação infravermelha (0,76 a 100 μm). Nessas várias faixas, para os diferentes comprimentos de onda, o espectro eletromagnético apresenta valores de frequência de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 - Valores de frequência do espectro eletromagnético

FAIXA DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	FREQUÊNCIA DO ESPECTRO (Hz)
Muito Baixa Frequência	$<30 \times 10^3$
Baixa Frequência	$30 \times 10^3 - 650 \times 10^3$
Média Frequência	$650 \times 10^3 - 1700 \times 10^3$
Onda Curta	$1,7 \times 10^6 - 30 \times 10^6$
Muito Alta Frequência	$30 \times 10^6 - 300 \times 10^6$
Ultra Alta frequência	$300 \times 10^6 - 3000 \times 10^6$
Micro-ondas	$3 \times 10^9 - 300 \times 10^9$
Infravermelho Longe	$300 \times 10^9 - 6 \times 10^{12}$

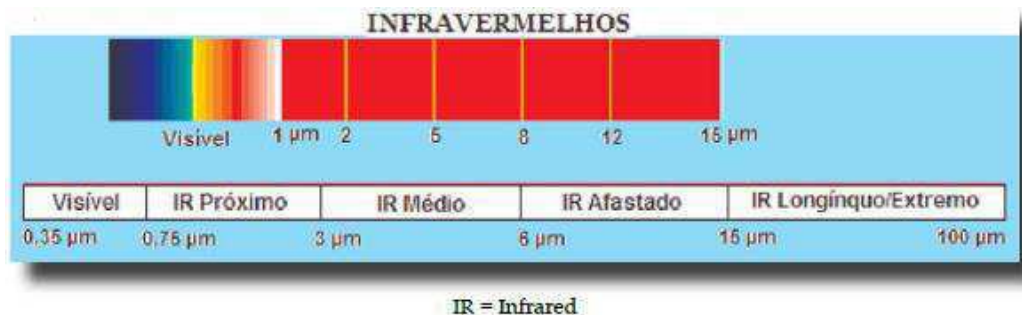
Continuação do Quadro 1

Infravermelho Médio	$6 \times 10^{12} - 120 \times 10^{12}$
Infravermelho Perto	$120 \times 10^{12} - 384 \times 10^{12}$
Luz Visível	$384 \times 10^{12} - 789 \times 10^{12}$
Ultra Violeta	$789 \times 10^{12} - 30 \times 10^{15}$
Raios X	$30 \times 10^{15} - 30 \times 10^{18}$
Raios Gama	$> 30 \times 10^{18}$

Fonte – Adaptado de Caramalho (2012)

Para a maior parte das temperaturas trabalhadas (entre 200 e 3000 K), quase toda radiação térmica é emitida pela faixa infravermelha (SILVA JR, 2017). Por conta disso, trabalha-se na Termografia com essa banda do espectro. Segundo Caramalho (2012), com relação ao comprimento de onda, a faixa infravermelha é dividida em 4 (quatro) bandas, próximo, médio, afastado e extremo (Figura 25).

Figura 25 - Espectro infravermelho



Fonte – CARAMALHO (2012)

Já de acordo com Chrzanowski (2001), a faixa infravermelha pode ser dividida em 5 (cinco). São elas muito próxima, próxima, média, longe e muito longe. O Quadro 2 apresenta estas bandas e seus comprimentos de onda.

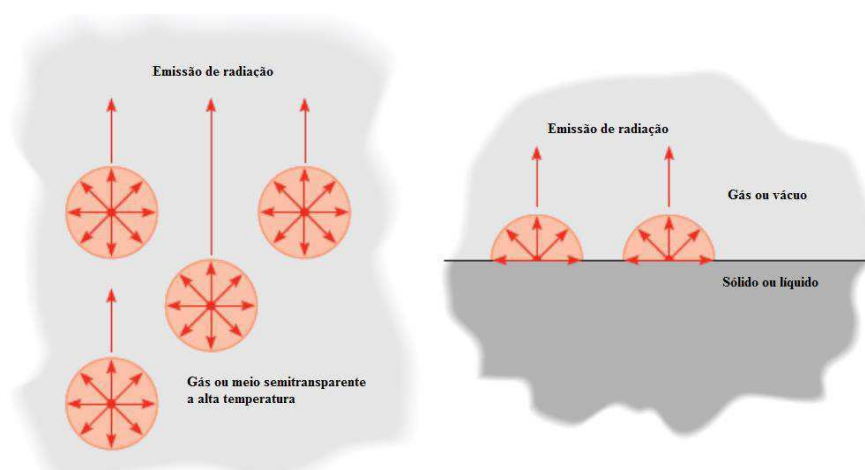
Quadro 2 - Comprimento de onda no espectro infravermelho

NOME DA BANDA	INTERVALO DE COMPRIMENTO DE ONDA (μm)
Infravermelho muito próximo	0,76 – 1,1
Infravermelho próximo	1,1 – 3
Infravermelho médio	3 – 6
Infravermelho longe	6 – 15
Infravermelho muito longe	15 – 100

Fonte – Adaptado de Chrzanowski (2001)

A radiação pode ser emitida por todas as configurações da matéria (gases, líquidos e sólidos), ocorrendo de forma volumétrica para gases e sólidos semitransparentes (como o vidro) e de modo superficial para a maior parte dos sólidos e líquidos (Figura 26). Isto ocorre porque a radiação que é emitida no interior destes corpos é absorvida pelas moléculas próximas. Já a parte propagada para o ambiente ocorre até aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de sua superfície. (CENGEL E GHAJAR, 2015)

Figura 26 - Emissão de radiação



Fonte - Traduzido de Incropera (2011)

A propagação da radiação está ligada à propriedades de onda como padrões de frequência ν (em Hz) e o comprimento de onda λ (em μm), além da velocidade da luz (c) no meio que é emitido. Quando se está no vácuo, esta velocidade é $c_0 = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s.

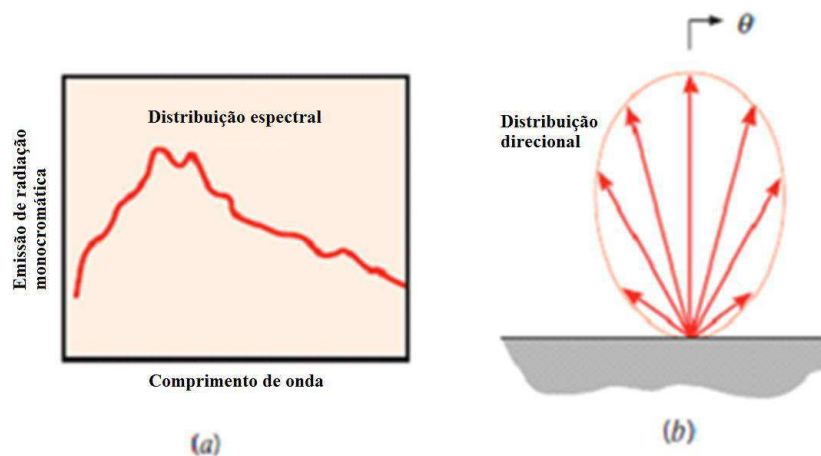
Assim, em um determinado ambiente, essas propriedades relacionam-se de acordo com a Equação 1.

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (1)$$

A radiação térmica engloba uma faixa de comprimentos de onda e, conforme dito em Incropera (2011), sua emissão varia para cada comprimento. É dito, também, que a magnitude da radiação emitida, para qualquer comprimento de onda, e sua distribuição espectral (Figura 27 a) variam de acordo com a temperatura e características da superfície do corpo.

Além da distribuição espectral da radiação térmica, as superfícies podem variar a intensidade da radiação emitida de acordo sua direção, não havendo uma uniformidade de irradiação. Esta característica é chamada distribuição direcional (Figura 27 b). Os efeitos destas duas distribuições são de grande importância na quantificação da transferência do calor radiativo.

Figura 27 - Distribuição Espectral e Direcional

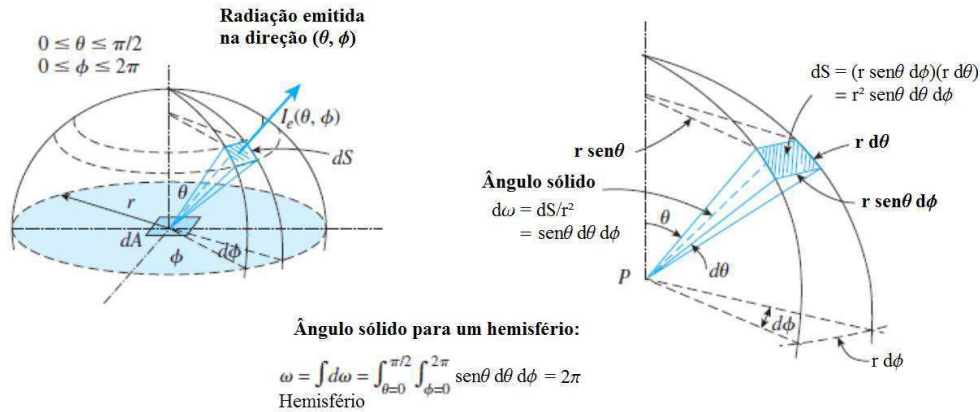


Fonte - Traduzido de Incropera (2011)

A partir da distribuição direcional, entende-se que todos os corpos emitem radiação em todas as direções com intensidades diferentes. Com isso, para um fragmento

da superfície de um objeto emitindo radiação em uma certa direção, têm-se a imagem da Figura 28.

Figura 28 - Emissão de radiação



Fonte - Traduzido de Cengel (2015)

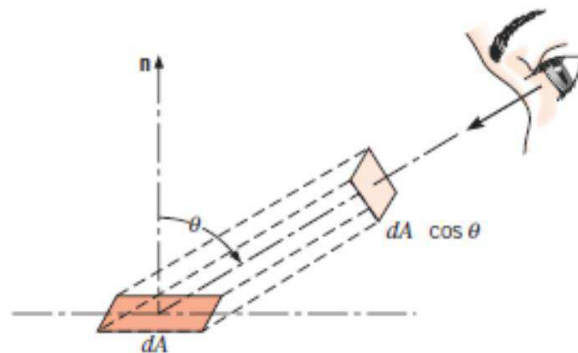
A imagem apresenta algumas definições matemáticas com relação à emissão de radiação. Considerando uma semiesfera de raio r e área superficial S , tem-se um fragmento de área dA na qual a radiação é emitida e dS onde a mesma percorre. Com isso, obtêm-se a formação de um ângulo sólido $d\omega$ que corresponde a passagem desta radiação.

A amplitude da radiação emitida pela área dA e que passa por dS pode ser apresentada como Intensidade espectral $I_{\lambda,e}$. Segundo Incropera (2011), a intensidade espectral pode ser definida como:

A taxa na qual a energia radiante é emitida no comprimento de onda na direção (θ, ϕ) , por unidade de área da superfície emissora normal a essa direção, por unidade de ângulo sólido no entorno desta direção e por unidade de intervalo de comprimento $d\lambda$ no entorno de λ .

Visto que a direção da radiação emitida para determinar sua intensidade é perpendicular à superfície emissora, para uma determinada área dA , há uma projeção quando se posiciona um observador na região percorrida pela radiação (Figura 29). A intensidade espectral pode ser definida pela Equação 2

Figura 29 - Projeção de área



Fonte - Adaptado de Incropera (2011)

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos \theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (2)$$

Onde

$\frac{d\dot{Q}_e}{d\lambda}$ (Em $W/\mu m$) é a taxa onde a radiação emitida em um certo comprimento de onda percorre dS ;

$dA \cos \theta$ (Em m^2) é a área projetada de dA a partir de um observados em dS

Quando se tem definida a Intensidade espectral, pode-se determinar o fluxo térmico ligado à emissão radiativa para quaisquer ângulo sólido e intervalo de comprimento de onda. Incropera (2011) define o Poder Emissivo Espectral E_λ ($W/m^2\mu m$) como “a taxa na qual a radiação é emitida em todas as direções de uma superfície por unidade de intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ no entorno de λ e por área superficial.”. O Poder Emissivo Espectral é apresentado pela Equação 3.

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (3)$$

Já o Poder Emissivo Hemisférico Total, ou apenas Poder Emissivo Total, é determinado pela Equação 4.

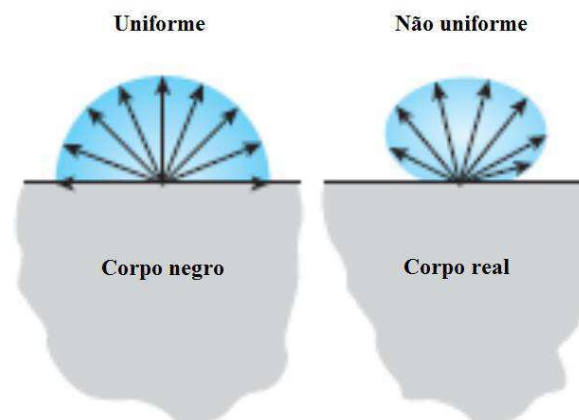
$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) \quad (4)$$

3.3 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Para o entendimento das características da radiação dos corpos, é necessário, primeiramente, entender a definição de corpo negro. Este é um corpo ideal, capaz de absorver toda radiação que incide na sua superfície além do fato de que nenhum corpo emite mais radiação que um corpo negro em uma dada temperatura e comprimento de onda. Ou seja, sua emissão radiativa será sempre maior que a capacidade dos corpos reais.

Quando encontra-se em equilíbrio térmico, as taxas de emissão e absorção de radiação do corpo negro são iguais visto que, para manter a mesma temperatura, ao absorver toda radiação incidente em sua superfície, este precisa emitir a mesma quantidade de radiação térmica (Lei de Kirchhoff). Desta forma, entende-se que o mesmo pode ser definido como um absorvedor e emissor perfeito, absorvendo 100% da radiação incidente independentemente de seu comprimento de onda e direção e emitindo uniformemente, ou seja de forma difusa, 100% desta radiação. Neste caso, a intensidade para uma emissão difusa apresenta-se como $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = I_{\lambda,e}(\lambda)$. A Figura 30 apresenta a diferença de emissão de um corpo negro e um corpo real.

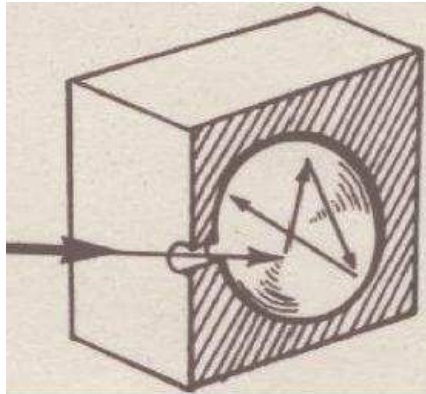
Figura 30 - Emissão de radiação de corpo negro e corpo real



Fonte - Traduzido de Cengel (2015)

Por ser um corpo idealizado, entende-se que não existe na natureza nenhuma superfície que possua as características de um corpo negro. Conforme dito em Caramalho (2012), a forma mais aproximada para simular este corpo é quando se utiliza um objeto que possui uma cavidade e sua superfície interna se encontra em uma temperatura uniforme. Neste caso, a radiação emitida por uma fonte entra por meio de um pequeno orifício e, após várias reflexões da radiação em seu interior, ela é quase que totalmente absorvida, deixando apenas uma ínfima parte sair pela mesma abertura que entrou. A Figura 31 apresenta exemplos deste funcionamento.

Figura 31 - Exemplo de corpo negro



Fonte –Caramalho (2012)

3.3.1 Lei de Planck

A intensidade espectral de um corpo negro foi determinada primeiro por Planck. Sua resolução possui dependência tanto do comprimento de onda quanto da temperatura na qual a radiação é emitida. A determinação desta intensidade é apresentada pela Equação 5.

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5 \left[\exp \frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k_B \cdot T} - 1 \right]} \quad (5)$$

Onde

$h = 6,626069 \times 10^{-34}$ J.s é Constante de Planck;

$k_b = 1,38065 \times 10^{-23}$ J/K é a Constante de Boltzmann;

$C_0 = 2,9979 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo;

T = Temperatura absoluta do corpo negro (Em Kelvin);

λ = Comprimento de onda da radiação emitida (Em μm).

O Poder Emissivo Espectral de um corpo negro é independente de sua direção. Por conta disso, $I_{\lambda,e}(\lambda)$ não participa da integração apresentada pela Eq 3 e a resposta da integral resulta em π . Com isso, a definição obtida por Planck em 1901, também chamado de Distribuição de Planck ou Lei de Planck, pode ser vista na Equação 6.

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi \cdot I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp \frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1 \right]} \quad (6)$$

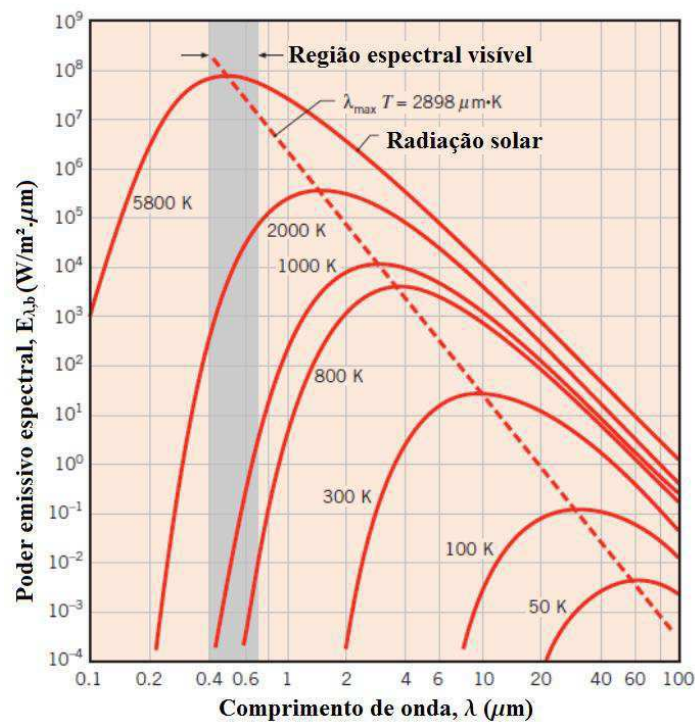
Onde

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_0^2 = 3,74177 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2;$$

$$C_2 = \frac{h \cdot c_0}{k_B} = 1,43878 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K};$$

A representação gráfica da Distribuição de Planck e sua dependência tanto do comprimento de onda quanto de sua temperatura pode ser vistas na Figura 32.

Figura 32 – Representação gráfica da Distribuição de Planck



Fonte - Traduzido de Incropera (2011)

Conforme apresentado, o Poder Emissivo Espectral varia com o comprimento de onda e para um determinado comprimento, sua intensidade aumenta conforme se eleva a temperatura da superfície emissora. Além disso, percebe-se, também, que existe um valor máximo para a esta Distribuição Espectral e que o comprimento de onda condizente a este valor é dependente da temperatura. Conforme dito em Caramalho (2012), isto pode ser constatado uma vez que quanto mais alta a temperatura, mais curto será o comprimento de onda o qual essa máxima radiância é determinada. Esta relação pode ser alcançada por meio da Lei do deslocamento de Wien.

3.3.2 Lei de Wien

A Lei do deslocamento de Wien (Equação. 7) é obtida por meio da derivação, em função do comprimento de onda, da Lei de Planck (Equação. 6) e igualando sua resolução a zero. Esta Lei estabelece a dependência do comprimento de onda λ_{max} , correspondente ao valor máximo da distribuição espectral, e a temperatura do corpo negro.

$$\lambda_{max} = \frac{C_3}{T} \quad (7)$$

Onde:

$C_3 = 2897,8 \mu\text{m.K}$ é a Constante de proporcionalidade;

λ_{max} (em μm) é o comprimento de onda correspondente ao máximo Poder Emissivo Espectral;

T (em Kelvin) é a temperatura do corpo negro.

A Constante de proporcionalidade $C_3 = \lambda_{max} T = 2897,8 \mu\text{mK}$ é o máximo valor obtido na extremidade da curva de distribuição. Seu comportamento pode ser visto por meio da linha tracejada na Fig 32.

3.3.3 Lei de Stefan-Boltzmann

A Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 8) é obtida por meio da integração, para todos os comprimentos de onda, da Distribuição Espectral de Planck (Equação 6). Desta forma, é possível obter o valor do Poder Emissivo Total de um corpo negro, sendo de grande importância para a determinação da emissividade em corpos reais.

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (8)$$

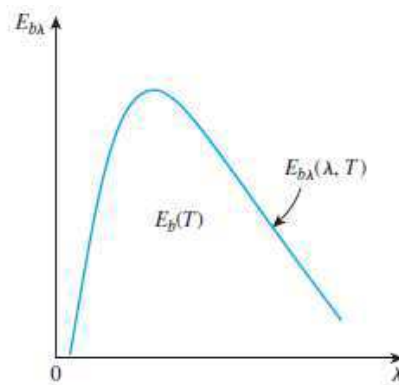
Onde:

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/ m}^2\text{K}^4$ é a Constante de Stefan-Boltzmann.

T (Em Kelvin) é a Temperatura do corpo.

A Lei de Stefan-Boltzmann torna possível o cálculo da radiação total emitida pelo corpo negro para todas as direções e ao longo de todos os comprimentos de onda. Sua representação gráfica, pode demonstrada como a área abaixo da curva de Planck, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 - Representação gráfica do Poder Emissivo Total



Fonte – Cengel (2015)

Por se tratar de uma emissão difusa, a intensidade total da radiação emitida pelo corpo negro pode ser apresentada conforme a Equação 9.

$$I_b = \frac{E_b}{\pi} \quad (9)$$

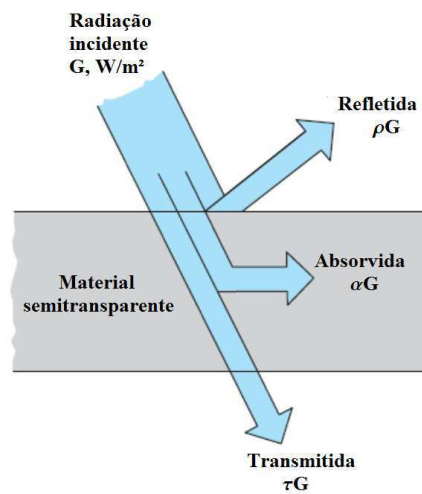
Onde:

E_b é o Poder Emissivo do corpo negro.

3.4 PROPRIEDADES RADIATIVAS DOS CORPOS REAIS

Diferente do corpo negro, os corpos reais não absorvem toda radiação que incide sua superfície. Parte desta radiação é absorvida pelo corpo porém outra parte pode ser refletida e transmitida através do objeto (Figura 34). Com isso, a radiação emitida pelo corpo real em equilíbrio térmico será sempre menor que quantidade emitida por um corpo negro a uma mesma temperatura.

Figura 34 - Comportamento de corpo real



Fonte - Traduzido de Cengel (2015)

Conforme mostrado, os materiais semitransparentes, como no caso do vidro, possibilitam uma grande transmissão da radiação visível antes desta ser absorvida. Entretanto, estes materiais podem ser considerados opacos para a radiação infravermelha, onde apresentam comportamentos diferentes para comprimentos de onda variados.

O fluxo de radiação que incide a superfície de um corpo é chamado de irradiação (G), sua fração absorvida pela superfície é chamada de absortividade (α), a fração refletida pela superfície é chamada de refletividade (ρ), e a transmitida, transmissividade (τ). Elas podem ser vistas nas Equações 10, 11 e 12.

$$\text{Absortividade: } \alpha = \frac{G_{abs}}{G}, 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

$$\text{Refletividade: } \rho = \frac{G_{ref}}{G}, 0 < \rho < 1 \quad (11)$$

$$\text{Transmissividade: } \tau = \frac{G_{trans}}{G}, 0 < \tau < 1 \quad (12)$$

Onde:

G é a radiação incidente;

G_{abs} é a radiação absorvida;

G_{ref} é a radiação refletida;

G_{trans} é a radiação transmitida.

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, tem-se que a radiação total incidente é igual a soma das radiações absorvida, refletida e transmitida, conforme é mostrado pela Equação 13.

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{trans} = G \quad (13)$$

Assim sendo, a soma dos parâmetros absorptividade, refletividade e transmissividade segue conforme apresentado pela Equação 14.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (14)$$

Para os corpos reais, a radiação nunca é totalmente absorvida, refletida ou transmitida, ou seja, sempre ocorre mais de um destes fenômenos. No caso de materiais opacos (onde $\tau=0$), a parcela da radiação que incide a superfície que não é absorvida, é apenas refletida. Neste caso, a soma dos parâmetros são apresentados na forma da Equação 15.

$$\alpha + \rho = 1 \quad (15)$$

3.4.1 Absortividade

A absorptividade é a característica na qual uma parcela da radiação que incide a superfície de um corpo que é absorvida. Esta propriedade pode ser caracterizada por possuir dependência direcional e espectral. A absorptividade espectral direcional, definida como $\alpha_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi)$, é obtida por meio da razão entre a intensidade espectral absorvida e a incidente nas direções θ e ϕ . Desta forma, a Equação 16 apresenta esta relação.

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (16)$$

Segundo Howell *et al* (2016), a distribuição espectral da radiação incidente em um objeto é praticamente independente da temperatura e das características superficiais do corpo. Com isso, a dependência da absorção de radiação está relacionada ao comprimento de onda e à direção da radiação incidente. Entretanto, para a realização de cálculos de engenharia, considera-se propriedades superficiais que correspondam à médias direcionais, sendo dependentes apenas do comprimento de onda. Assim, a absorvidade espectral pode ser definida pela Equação 17.

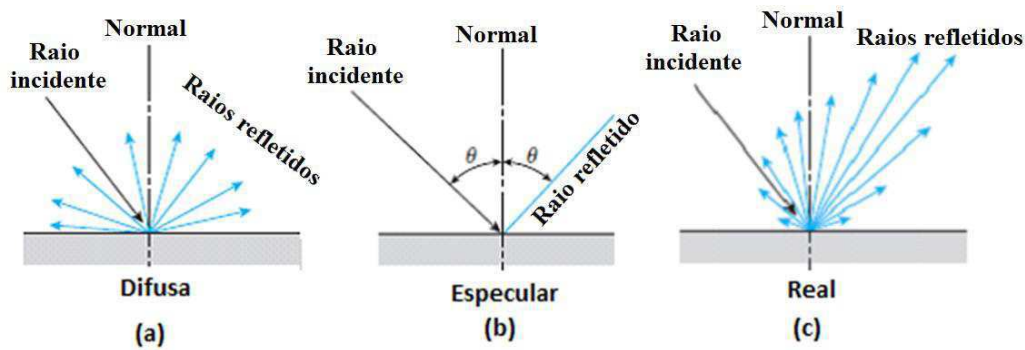
$$\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (17)$$

Já a absorvidade total α , conforme já pôde ser mostrado pela Equação 10, corresponde à média ligada à direção e ao comprimento de onda incidente. Sendo assim, esta propriedade é dependente da distribuição espectral, direcional e das características da superfície absorvedora.

3.4.2 Refletividade

A refletividade é uma propriedade na qual se define a parcela da radiação que é refletida pela superfície do objeto. De acordo com Howell *et al* (2016), esta propriedade possui caráter bidirecional, ou seja, a energia refletida não depende apenas do ângulo de incidência, mas também do ângulo de reflexão da radiação. As Figuras 35 (a), (b) e (c) apresentam ilustrações para a refletividade de um corpo.

Figura 35 - Refletividade dos corpos



Fonte - Adaptado de Cengel (2015)

A reflexão da radiação divide-se em difusa ou especular. Como não existe superfície real capaz de refletir totalmente a energia de nenhum desses dois modos, pode-se considerar que quanto mais polidas as superfícies são, sua reflexão torna-se mais especular. E para uma superfície mais irregular (rugosa), mais difusa ela ocorre. De acordo com a literatura, a consideração de reflexão difusa é a mais aceitável para aplicações de engenharia.

Para facilitação dos cálculos em aplicações práticas, considera-se as situações ideais de reflexão. Para isso, durante os estudos de radiação, diz-se que uma superfície não será irregular caso as dimensões de rugosidade da superfície sejam muito menores que o comprimento de onda da radiação incidente.

Assim como a absorvidade espectral direcional, a refletividade espectral direcional, definida por $\rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)$, é a razão da intensidade espectral refletida pela incidente nas direções θ e ϕ (Equação 18).

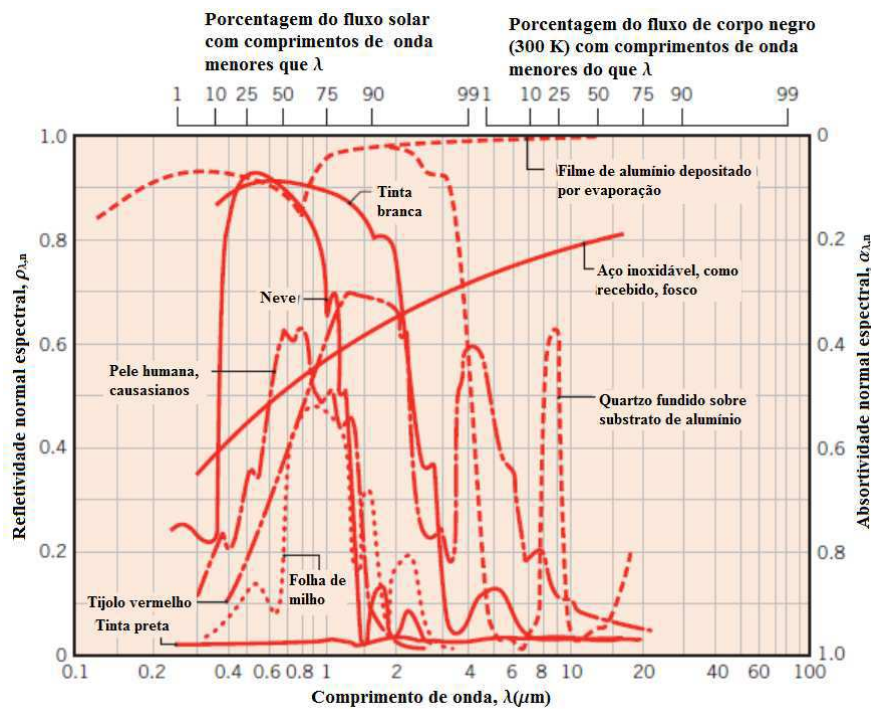
$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) = \frac{I_{\lambda,\theta ref}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)} \quad (18)$$

A refletividade espectral $\rho_{\lambda}(\lambda)$, é definida pela razão entre a radiação espectral refletida e a incidente (Equação 19). Já a refletividade total, pode ser vista pela Equação 11.

$$\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (19)$$

Para corpos opacos, onde o balanço de energia segue conforme a Equação 15, há uma dependência entre a absortividade e a refletividade onde, para este caso, a determinação de uma das propriedades acarreta na definição da outra. Além disso, há, também, uma dependência espectral tanto da absortividade α_{λ} quanto da refletividade ρ_{λ} para diferentes tipos de materiais (Figura 36).

Figura 36 - Refletividade dos materiais



Fonte - Traduzido de Incropera (2011)

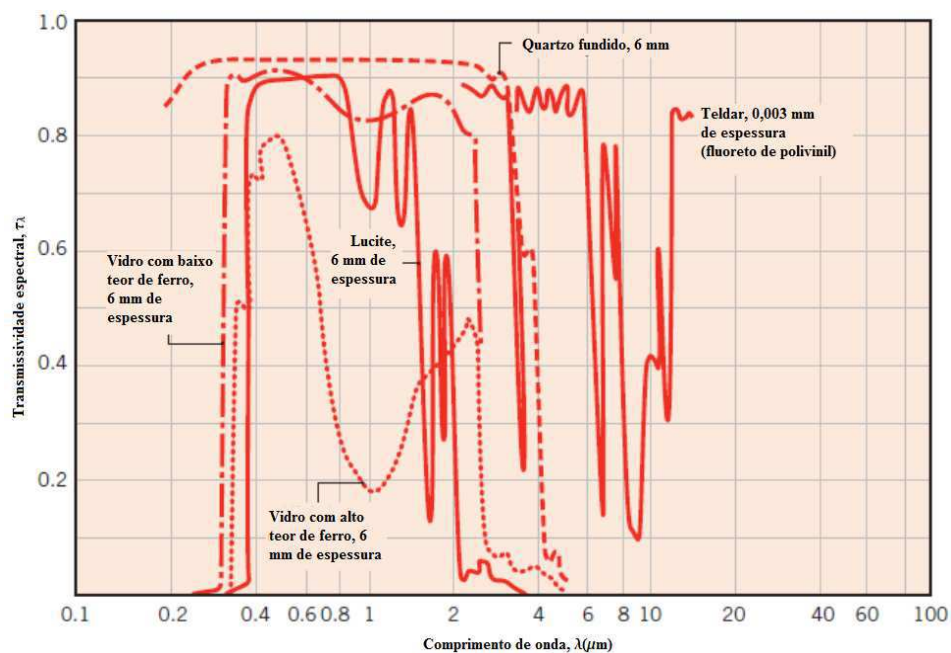
3.4.3 Transmissividade

Conforme dito anteriormente, os materiais opacos não possuem a característica de transmissividade, ou seja apenas ocorre a absorção e a reflexão da irradiação. Já para os materiais semitransparentes, esta propriedade, para determinados comprimentos de onda, pode ser determinada pela razão entre a radiação transmitida e a total incidente, conforme mostrado na Equação 20. Para a determinação de sua capacidade total, ou seja para todo o espectro, desta propriedade, é utilizado a Equação 12.

$$\tau_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,trans}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (20)$$

A capacidade dos corpos de transmitir a radiação varia para determinados comprimentos de onda. Conforme pode ser visto na Figura 37 a transmissividade comporta-se de maneira diferente para determinados materiais quando há uma variação do comprimento de onda da radiação incidente.

Figura 37 - Transmissividade dos materiais



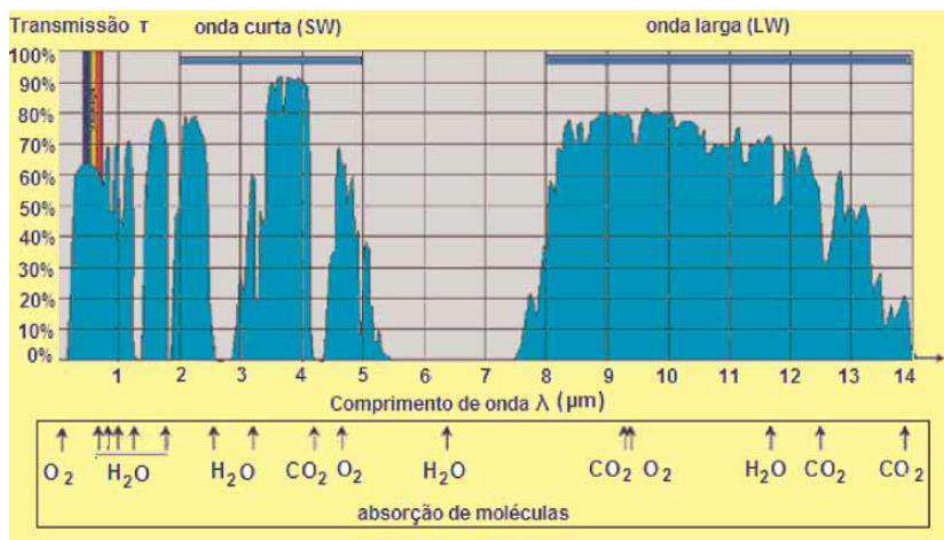
Fonte - Traduzido de Incropera (2011)

Com relação à radiação térmica, a atmosfera é quase que totalmente transparente à radiação visível. Porém, para a radiação infravermelha, há uma variação na sua capacidade de transmissão pois parte desta radiação pode ser absorvida pelo ar. Além disso, este pode apresentar transmissividade diferente para comprimentos de onda variados.

De acordo com Hellier (2003), a faixa de comprimento de onda da radiação infravermelha que normalmente é detectada pelas câmeras térmicas durante as inspeções termográficas encontra-se aproximadamente entre 2 e 15 μm . Além disso, por conta da capacidade de absorção do ar, tem-se 2 duas bandas onde a transmissão desta radiação

torna-se maior. Elas são aproximadamente entre 2 à 6 μm e 8 à 15 μm . A Figura 38 apresenta a variação dessa transmissividade da atmosfera com relação ao comprimento de onda.

Figura 38 - Transmissividade da atmosfera

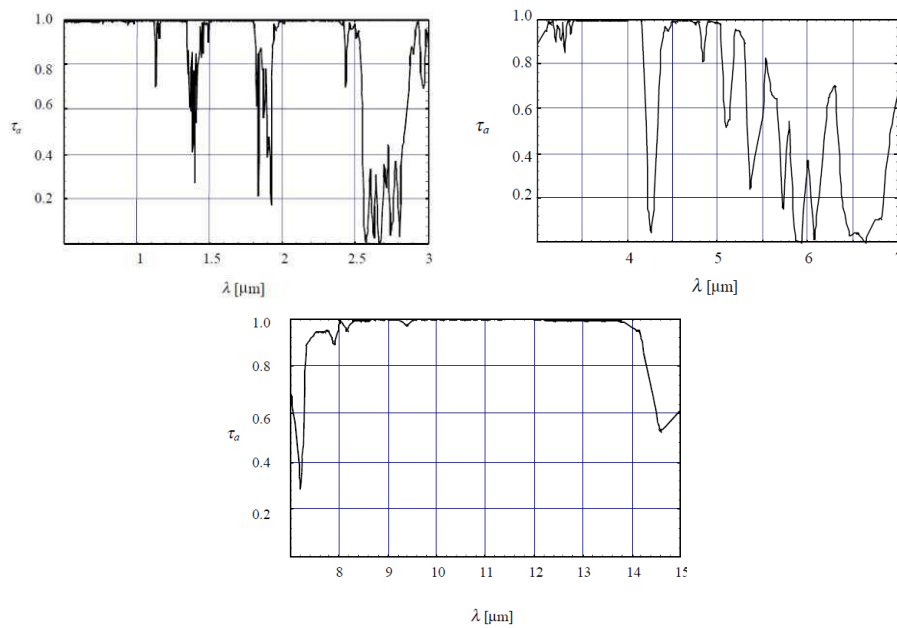


Fonte – Caramalho (2012)

De acordo com Caramalho (2012), essas bandas do espectro podem ser subdivididas em 3 (três): Onda curta (0,9 a 2,5 μm), onda média (2,5 a 5 μm) e onda larga (7 a 14 μm).

Para curtas distâncias, a capacidade do ar de transmissão da radiação infravermelha é geralmente alta (CHRZANOWSKI, 2001). As faixas espectrais, também chamadas “janelas de transmitância atmosférica”, para uma distância de 10 (dez) metros podem ser vistas na Figura 39.

Figura 39 - Transmissividade do ar



Fonte – Chrzanowski (2001)

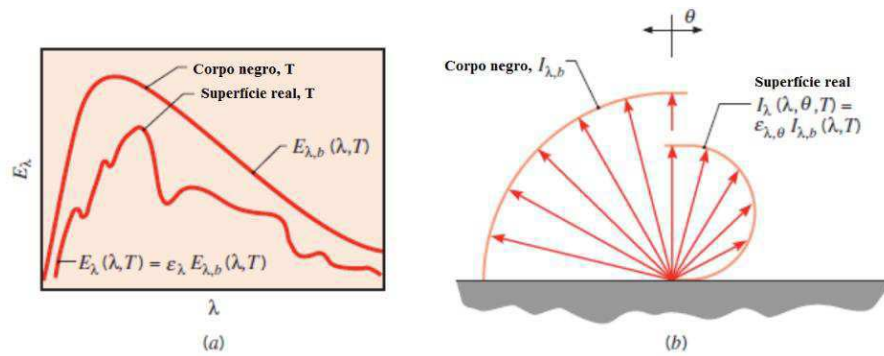
Conforme pode ser visto, para comprimentos de onda entre 8 e 14 μm há uma maior transmissividade da radiação infravermelha no ar.

3.4.4 Emissividade

A emissividade de uma superfície real pode ser denotada como uma relação de proporção entre a radiação emitida em relação à emitida pelo corpo negro (ideal) a uma mesma temperatura. Assim sendo, um corpo real jamais possuirá emissividade unitária, ou seja, seu valor será sempre inferior a 1 (um).

Diferente do corpo negro, os corpos reais não possuem emissividade constante, ou seja, seu valor pode ser alterado quando variado o comprimento de onda e a direção da radiação emitida (Figura 40).

Figura 40 - Emissividade de corpo negro e corpo real



Fonte - Traduzido de Incropera (2011)

As propriedades emissivas dos corpos podem ser representadas como Emissividade direcional espectral, Emissividade direcional total, Emissividade hemisférica espectral e Emissividade hemisférica total.

A Emissividade direcional espectral é definida pela razão entre a intensidade da radiação emitida para um determinado comprimento de onda λ nas direções θ e ϕ e a emitida pelo corpo negro à mesma temperatura. Esta relação pode ser vista pela Equação 21

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (21)$$

Onde

$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)$ é a Intensidade da radiação emitida pela superfície;

$I_{\lambda,b}(\lambda, T)$ é a Intensidade da radiação emitida pelo corpo negro.

A Emissividade direcional total descreve a média da Emissividade direcional espectral com relação ao comprimento de onda emitido. Conforme dito em Cengel e Ghajar (2015), esta propriedade é determinada da mesma forma que a emissividade direcional espectral, porém, considera-se a intensidade de radiação emitida para todos os comprimentos de onda a uma dada temperatura. A Equação 22 apresenta a definição desta propriedade.

$$\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) = \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_b(T)} \quad (22)$$

Onde:

$I_e(\theta, \phi, T)$ é a Intensidade de radiação emitida pela superfície para todos os comprimentos de onda;

$I_b(T)$ é a Intensidade de radiação emitida pelo corpo negro para todos os comprimentos de onda.

A Emissividade hemisférica espectral trata-se de uma característica onde define-se a emissividade espectral média do corpo para todas as direções. Esta é a mais utilizada na engenharia e sua definição se dá pela razão entre a o poder emissivo da superfície emissora e do corpo negro a uma mesma temperatura. A Equação 23 apresenta a definição desta propriedade.

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (23)$$

Onde

$E_{\lambda}(\lambda, T)$ é o Poder emissivo da superfície emissora;

$E_{\lambda,b}(\lambda, T)$ é o poder emissivo do corpo negro.

Emissividade hemisférica total, ou emissividade média, descreve a média da emissividade para todas as direções e comprimentos de onda. Definida como a razão entre o Poder emissivo total de uma superfície e o do corpo negro, conforme Equação 24, esta propriedade trata-se de um parâmetro de o quanto a superfície emissora se assemelha ao corpo negro.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (24)$$

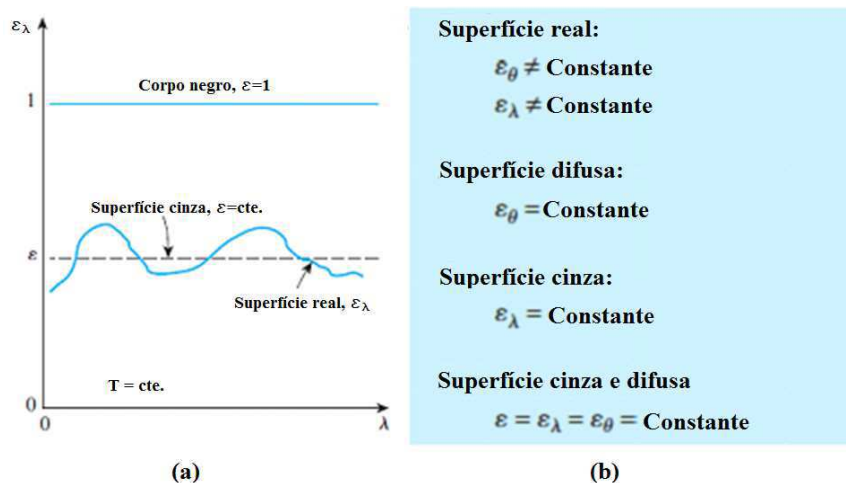
Onde:

$E(T)$ é o poder emissivo total da superfície;

$E_b(T)$ é o poder emissivo total do corpo negro.

A Emissividade hemisférica total trata-se de uma característica independente tanto da direção quanto do comprimento de onda. Conforme dito anteriormente, quando o corpo emite radiação de forma uniforme para todas as direções, ou seja, a emissividade é independente da direção, trata-se de uma superfície difusa. Já quando a emissividade possui independência do comprimento de onda, de acordo com Cengel e Ghajar (2015), trata-se de uma superfície cinza. Com isso, entende-se que a Emissividade hemisférica total descreve a emissividade para uma superfície difusa e cinza. A Figura 41 (a) e (b) apresenta um esquema simplificado da emissividade para os diferentes tipos de superfícies.

Figura 41 - Emissividade para diferentes superfícies



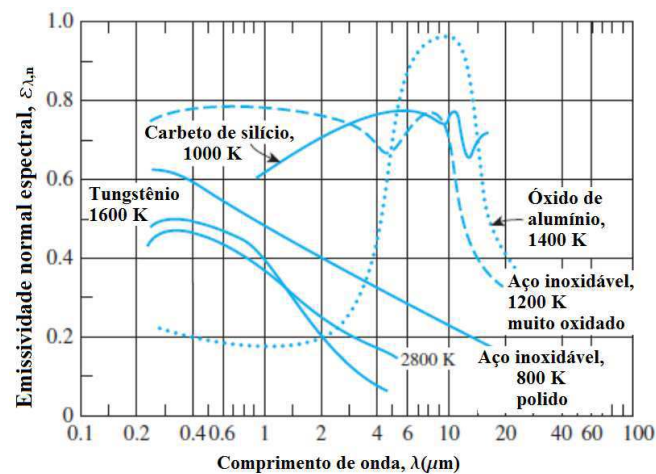
Fonte - Adaptado de Cengel (2015)

Não existe superfície perfeitamente difusa na natureza e mesmo que o corpo seja considerado difuso, esta será apenas uma aproximação do seu real comportamento. Para materiais com características diferentes, podem haver variações dessa aproximação. Os

materiais condutores e não condutores elétricos apresentam difusividade diferente onde, a depender do ângulo de emissão, não há grande variação da emissividade. No caso dos condutores, a emissividade direcional é aproximadamente constante quando o $\theta < 40^\circ$. Já para os não condutores, este valor torna-se aproximadamente constante para $\theta < 70^\circ$.

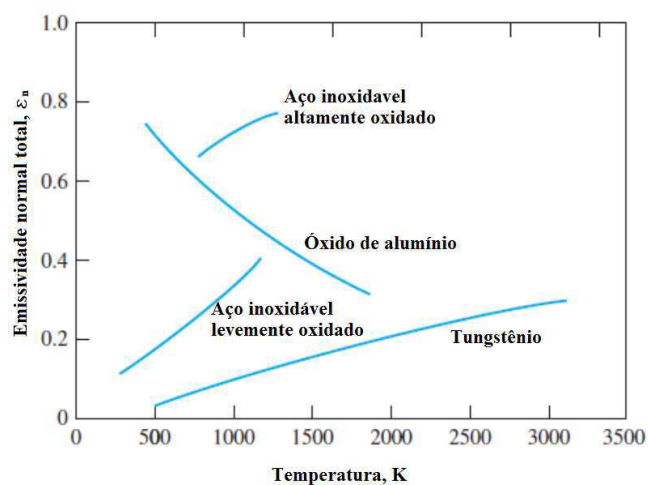
A emissividade de materiais condutores, como no caso dos metais, é geralmente pequena, entretanto quando há oxidação ela pode se elevar. Já os não condutores geralmente possuem emissividade maior. As Figura 42 e Figura 43 apresentam as variações da emissão dos materiais com relação à temperatura e ao comprimento de onda.

Figura 42 - Emissividade dos materiais para diferentes comprimentos de onda



Fonte – Traduzido de Cengel (2015)

Figura 43 - Emissividade de materiais diferentes temperaturas



Fonte - Traduzido de Cengel (2015)

Como pode ser visto, materiais condutores elevam sua emissividade com o aumento da temperatura enquanto que a emissividade dos materiais não condutores pode tanto aumentar quanto diminuir.

Além do tipo de material, comprimento de onda, temperatura da superfície e ângulo de emissão, de acordo com Howell *et al* (2016), a emissividade é dependente também, das características da superfície, tais como o método de fabricação, presença de oxidação, rugosidade, acabamento superficial e presença de impurezas. Isto se dá pelo fato da emissão da radiação se tratar de um fenômeno de superfície.

3.5 LEI DE KIRCHHOFF

De acordo com a Lei de Kirchhoff, um corpo que encontra-se em uma certa temperatura apresentará emissividade (ε) e absorvidade (α) iguais, garantindo o equilíbrio térmico. Com isso, tem-se que $\varepsilon = \alpha$ e, por consequência, a soma dos parâmetros apresentado pela Eq. 14 pode ser apresentada de acordo com a Equação 25.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (25)$$

3.6 TERMOGRAFIA

A Termografia é uma técnica de mensuração da temperatura de um corpo por meio da detecção da radiação térmica emitida pela sua superfície. Este é um método não invasivo no qual torna-se possível realizar as medições sem a necessidade de contato físico, de forma não invasiva e garantindo a segurança para o operador.

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios termográficos são chamados termovisores ou câmeras termográficas. Elas geram as imagens térmicas, também chamadas de termogramas, que evidenciam a radiação infravermelha emitida pelo objeto em análise e, desta forma, determina sua temperatura. A Figura 44 apresenta uma imagem de um modelo de câmera térmica.

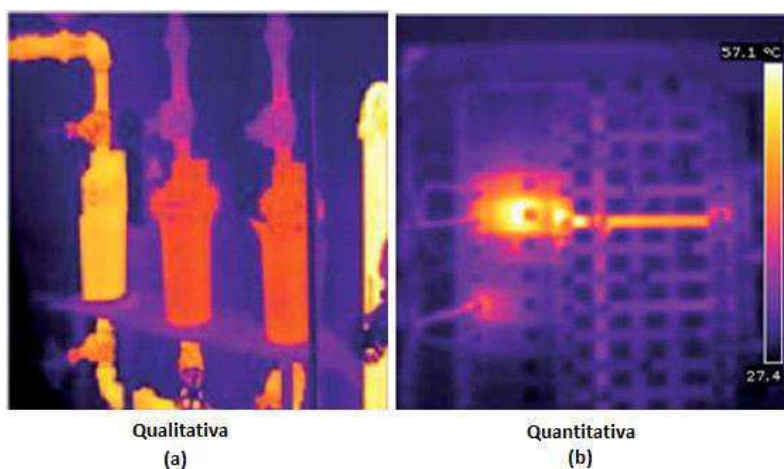
Figura 44 - Câmera Termográfica



Fonte – FLIR (2017)

O estudo termográfico pode ser realizado de dois modos diferentes, são eles a forma qualitativa ou quantitativa. A diferença entre estes dois modelos de avaliação trata-se da necessidade ou não de valores de temperatura. Na inspeção qualitativa são realizadas análises dos padrões térmicos sem determinar valores específicos de temperatura. Ou seja, busca-se encontrar diferenças ou anomalias térmicas nos corpos. Já na inspeção quantitativa, são determinados os valores de temperatura. Neste tipo, é determinada a magnitude e severidade da anomalia encontrada por meio do modelo qualitativo. As Figura 45 (a) e (b) apresentam imagens de inspeções termográficas qualitativa e quantitativa, respectivamente.

Figura 45 - Termografia qualitativa e quantitativa



Fonte – Navega (2012)

Nas figuras apresentadas tem-se uma imagem de uma inspeção qualitativa (a) no qual são identificadas diferenças térmicas em dutos por meio do espectro de cores. Já na quantitativa (b), tem-se o nível de aquecimento apresentado pelo equipamento analisado, ou seja, além da imagem térmica qualitativa, há a determinação da temperatura do objeto.

Para que as análises termográficas sejam feitas de forma segura e com resultados confiáveis, foram publicadas várias normas com relação à realização deste procedimento. Algumas das normas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) podem ser vistas na Quadro 3.

Quadro 3 - Normas sobre Termografia

NORMA	TÍTULO	OBJETIVO
15424:2016	Ensaaios não destrutivos - Termografia – Terminologia	Esta norma define os termos utilizados no método de ensaio não destrutivo de Termografia.
15572:2013	Ensaaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos	Esta Norma constitui um guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos, indicando as responsabilidades do usuário final e do inspetor termografista.
15718:2009	Ensaaios não destrutivos — Termografia — Guia para verificação de termovisores	Esta Norma fornece diretrizes para garantir a confiabilidade das medições dos termovisores, através de procedimentos seguidos pelo usuário final para a verificação dos termovisores durante o intervalo da validade da calibração definido pelo próprio usuário.
15763:2009	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência	Esta Norma prescreve os critérios para definição de periodicidade de inspeção por Termografia de sistemas elétricos de potência.
15866:2010	Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos	Esta Norma se destina a orientar a metodologia de avaliação térmica, qualitativa e/ou quantitativa, a ser realizada pelo responsável da análise termográfica, de acordo com as diversas situações e contextos em que os diferentes equipamentos elétricos estão submetidos.

Continuação do Quadro 3

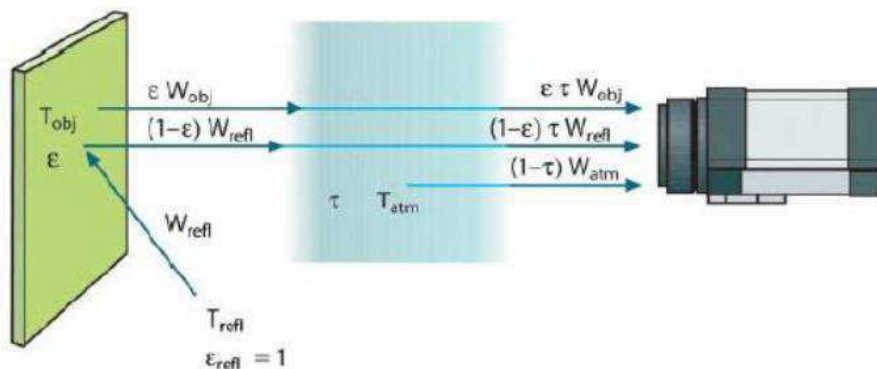
16292:2014	Ensaio não destrutivo — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas	Esta Norma descreve os procedimentos para medição e compensação da temperatura aparente refletida quando da medição da temperatura da superfície de um objeto utilizando câmeras termográficas.
16485:2016	Ensaio não destrutivo - Termografia - Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros	Esta Norma descreve os métodos para realizar a medição e compensação da emissividade da temperatura da superfície de um objeto utilizando câmeras termográficas ou radiômetros.
16554:2016	Ensaio não destrutivo - Termografia - Medição e compensação da transmitância de um meio atenuante utilizando câmeras termográficas	Esta Norma estabelece o procedimento para realizar a medição e compensação da transmitância utilizando uma câmera termográfica com a finalidade de medir a temperatura de um objeto por um meio atenuante, como, janela de infravermelho, filtro ou atmosfera.

Fonte – Autoria própria

3.6.1 Funcionamento do termovisor

As câmeras térmicas captam a radiação emitida pelo objeto em estudo, porém há também outras radiações que são detectadas e influenciam os resultados. Estas são as radiações refletidas pelo próprio objeto, as emitidas e refletidas pelos corpos próximos e a influência da atmosfera. A Figura 46 apresenta o funcionamento da câmera.

Figura 46 - Funcionamento da câmera termográfica



Fonte – Caramalho (2012)

A câmara térmica capta a radiação emitida e refletida pelo objeto em foco e a emitida refletida pela atmosfera e, de acordo com Caramalho (2012), gera um sinal de saída da câmara pode ser descrito pela Equação 26.

$$U_{fonte} = CW(T_{fonte}) \quad (26)$$

Onde,

U_{fonte} é o sinal de saída da câmara;

W é a potência de radiação recebida a partir de um corpo negro a uma temperatura T_{fonte} ;

C é uma constante de proporção.

A quantidade total de radiação recebida pela câmara W_T decorre da parte emitida pelo objeto em foco εW_{obj} , da parcela refletida $(1 - \varepsilon)W_{ref}$ e a emitida e refletida pela atmosfera $(1 - \tau)W_{atm}$. A Equação 27 apresenta o somatório do total de radiação recebida pela câmara, entretanto não contempla a radiação emitida pela vizinhança, considerando que a câmara está focada apenas no objeto em estudo.

$$W_T = \varepsilon\tau W_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau W_{ref} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (27)$$

Onde,

$\varepsilon\tau W_{obj}$ trata-se da parcela de radiação emitida pelo objeto e transmitida pela atmosfera;

$(1 - \varepsilon)\tau W_{ref}$, com $(1 - \varepsilon) = \rho$, trata-se da parcela refletida pelo objeto e transmitida pela atmosfera;

$(1 - \tau)W_{atm}$ trata-se da parcela emitida mais a refletida pela atmosfera.

Com algumas manipulações matemáticas, tem-se a Equação 28.

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau U_{ref} + (1 - \tau)U_{atm} \quad (28)$$

Por fim, isolando-se U_{obj} , obtém-se a Equação 29 na qual é a equação geral utilizada para os equipamentos termográficos da FLIR Systems.

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{ref} - \frac{1-\tau}{\tau} U_{atm} \quad (29)$$

Onde,

U_{obj} é a tensão de saída calculada da câmera para o corpo negro com temperatura T_{obj} ;

U_{tot} é a tensão de saída medida da câmera para um caso real;

U_{ref} é a tensão de saída da câmera para um corpo negro de temperatura T_{ref} ;

U_{atm} é a tensão de saída da câmera para um corpo negro de temperatura T_{atm} .

A Equação 29 demonstra a grande importância da emissividade do corpo, sendo esta variável a de maior influência nas análises termográficas. Conforme já citado, a emissividade pode ser influenciada pelo tipo de material, temperatura do corpo, comprimento de onda, ângulo de observação e características da superfície, como rugosidade, presença de impurezas e acabamento superficial. Além desta, existem diversas outras variáveis que influenciam o resultado das análises e, conforme Hellier (2003), elas podem ser divididas em 3 (três) classes: Objeto alvo, condições ambientais do local e do instrumento.

Do objeto alvo tem-se a emissividade, comprimento da onda da radiação emitida, a temperatura, capacitância térmica do material, entre outros. Para estes, a emissividade é a de maior importância.

Entre as variáveis ambientais encontram-se algumas como a velocidade e direção do ar, a presença de chuva, distância entre a câmera e o objeto alvo, umidade relativa do ar e a temperatura ambiente e da vizinhança. Com relação ao efeito da convecção gerada pelo vento, conforme Hellier (2003), é sugerido que para uma velocidade de 16 km/h (4,5 m/s) teoricamente se pode reduzir a temperatura em cerca de 50%, entretanto, é dito que esse foi um estudo muito simples e para uma situação real seria muito mais complexo e difícil de prever qual seria o resultado. Já segundo a NBR 15572:2013, não se deve realizar um ensaio termográfico quando o ar possuir velocidade acima de 6m/s pois pode haver influência nos resultados.

Durante as inspeções, de acordo com a NBR 15572:2013, deve-se evitar influências de reflexos e do carregamento solar e não realizar os ensaios sob chuva ou neblina devido ao resfriamento gerado e a redução da transmissão da radiação emitida. Além disso, após cessar a chuva, deve-se esperar pelo menos 1 (uma) hora para realizar os trabalhos.

A umidade do ar influencia na transmitância radiativa da atmosfera. Quanto maior a presença de água no ar, maior a atenuação das ondas eletromagnéticas. De acordo com a NBR 15572:2013, não deve-se realizar inspeções quando a umidade estiver acima de 90% e para distâncias curtas, a umidade pode ser predefinida como 50%.

O ângulo de observação da câmera deve ser o mais perpendicular possível à superfície analisada. Isto se faz necessário pois quanto mais perpendicular o termovisor estiver do plano que se deseja analisar, menor será a redução da emissividade.

Com relação às variáveis ligadas ao instrumento, ou seja, ao termovisor, podem ser citadas a detecção da banda infravermelha, sensibilidade térmica do equipamento, faixa de temperatura, resolução térmica, medição e calibração do sistema, campo de visão do termovisor e taxa de aquisição de dados.

As principais variáveis que devem ser introduzidas no termovisor e que podem afetar o resultado apresentado são: a distância do objeto, umidade do ar, temperatura ambiente atmosférica e a temperatura refletida.

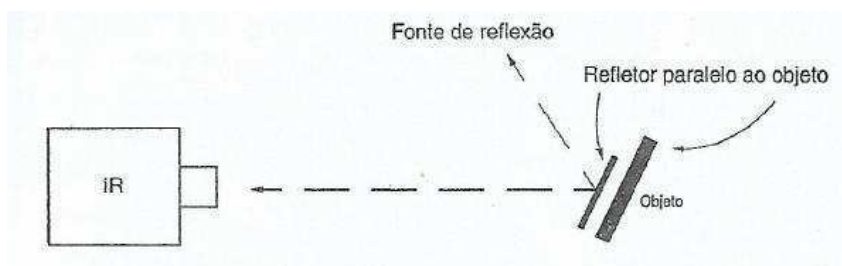
A distância do objeto trata-se do espaço entre a lente da câmera térmica e o objeto em estudo. Este parâmetro é bastante significativo devido ao fato de que a radiação é

atenuada pela atmosfera e que quanto maior este distanciamento, há uma menor transmitância radiativa.

A temperatura ambiente atmosférica trata-se da temperatura do ar durante a realização dos ensaios. Já a temperatura refletida é o parâmetro que trata da radiação refletida pelo objeto e da emitida pela atmosfera e pela vizinhança. Esta variável é significativa devido ao fato de que quanto maior a temperatura refletida, menos confiável será o ensaio. Além disso, caso a emissividade tenha valores baixos, a distância entre o objeto e a câmera seja muito grande ou a temperatura ambiente próxima do objeto, torna-se necessário compensar a temperatura ambiente. A NBR 16292:2014, apresenta dois métodos para estipular a temperatura refletida: Direto e Indireto.

O método indireto (ou refletor), segue o seguinte procedimento: Primeiramente ajusta-se a emissividade da câmera térmica em 1 (um) e então a posiciona, ajustando seu foco, da mesma maneira como se realizará a medição da temperatura do objeto desejado. Em seguida, posiciona-se o refletor (podendo ser papel alumínio amassado) em frente ao objeto e então realiza-se a medição da temperatura. O resultado encontrado será a temperatura refletida. Por fim, o procedimento deve ser realizado ao menos 3 (três) vezes e calcular sua média para melhor precisão. A Figura 47 apresenta uma ilustração deste método.

Figura 47 - Método refletor

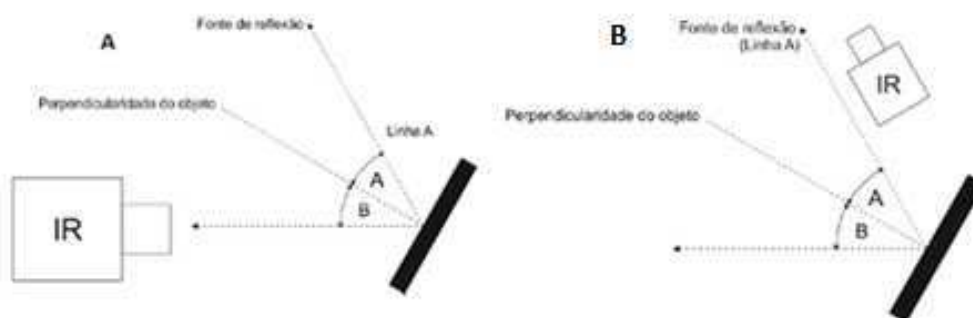


Fonte – ABNT NBR 16292 (2014)

O método direto segue o seguinte procedimento: Ajusta-se, primeiramente, a emissividade da câmera térmica em 1 (um) e a posiciona do mesmo modo que será feito o experimento. Após ajustar o foco, determina-se o ângulo de emissão e incidência da radiação a partir da câmera conforme Figura 48 (A), direciona-se a câmera sentido a fonte de reflexão, conforme Figura 48 (B), ou em várias direções caso a superfície do objeto

em estudo seja difusa, e então, é feita a medição da temperatura aparente refletida do objeto. O procedimento deve ser repetido no mínimo 3 (três) vezes, e realizar o cálculo da média.

Figura 48 - Método direto



Fonte – ABNT NBR 16292 (2014)

O método direto não considera o aquecimento do corpo do termografista como fonte de temperatura aparente refletida. Ou seja, considera o operador com um corpo negro.

3.6.2 Aplicações

Aproveitando a capacidade de emissão de radiação térmica infravermelha de todas as superfícies, a Termografia utiliza disto para analisar as condições dos corpos. E como quase toda superfície pode ser verificada termicamente, esta técnica apresenta possibilidade de aplicação em diversas áreas, tais como manutenção de sistemas mecânicos e elétricos, em atividades industriais, na construção civil, medicina, medicina veterinária, em aplicações militares, de vigilância e salvamento.

A Termografia possui aplicabilidade na manutenção de sistemas mecânicos devido à capacidade de detecção do aquecimento. Em geral, os componentes mais inspecionados são motores, bombas, rolamentos e caixas de embreagem. O aquecimento anormal que é detectado é geralmente causado por conta da fricção dos elementos mecânicos, falhas de montagem, lubrificação ineficiente, desalinhamento ou até mesmo o desgaste natural das peças. Em Louvian, Cabral e Gomes (2010), é dito que como

equipamentos rotativos apresentam um aquecimento natural e equilíbrio térmico com relação à sua pressão de trabalho, velocidade, coeficiente de atrito e lubrificação, quando há um aquecimento anormal, esta técnica pode identificar o ponto de geração desse calor, ajudando no diagnóstico do problema.

Em sistemas elétricos, a Termografia pode ser aplicada, por exemplo, na averiguação de curtos-circuitos e sobrecargas, analisando a distribuição de temperatura em linhas de transmissão, grupos geradores, transformadores, disjuntores, quadros de energia em geral e placas de circuitos etc. Como exemplo para este tipo de aplicação pode ser citado Nogueira e Reis (2010), onde realizou-se uma análise termográfica para a detecção de falhas em conectores elétricos. Neste estudo, identificou-se um aquecimento anormal gerado por mau contato que, apesar de estar dentro de uma faixa segura de temperatura, poderia ser agravar até a falha total do equipamento.

A Termografia também pode ser bastante utilizada na construção civil para a verificação de presença umidade, infiltração em paredes, detecção de fugas de calor em ambientes fechados e qualidade do isolamento. Como exemplo de aplicação nesta área, pode-se citar um trabalho realizado por Sousa (2010), onde a Termografia foi aplicada no estudo de isolamento térmico de edifícios.

Existem diversos trabalhos utilizando a Termografia tanto na medicina quanto na veterinária. A detecção, tanto em animais quanto em seres humanos, de certas patologias, tais como problemas circulatórios, musculares e a identificação de inflamações utilizando esta técnica torna-se bastante interessante por se tratar de um modo de diagnóstico não invasivo, indolor, rápido e seguro. Uma aplicação nesta área pode ser vista em Araujo (2009), onde buscou-se obter imagens termográficas de pacientes com suspeita de câncer ou outras patologias nas mamas.

Em aplicações militares, de monitoramento e de salvamento, esta técnica é muito necessária visto que, tanto de dia quanto de noite, ela pode ser utilizada para a realização de ações como vigilância e detecção de pessoas desaparecidas.

De acordo com Scroubelos e Tatakis (2013), a utilização da Termografia proporciona algumas vantagens, como:

- Redução de 50% no custo de manutenção;

- Redução de 55% das falhas inesperadas;
- Tempo de revisão e reparo abaixo dos 60%;
- Redução de 30% na quantidade de peças sobressalentes no estoque;
- Aumento de 30% do período entre falhas dos equipamentos,
- Aumento de 30% no tempo de funcionamento dos equipamentos.

Já algumas das desvantagens deste tipo de análise são:

- Custo relativamente alto do equipamento;
- Incapacidade de detectar temperatura interna dos objetos;
- Necessita de capacitação do funcionário para avaliação dos resultados.

3.7 TERMOGRAFIA E O ESTUDO DE FALHAS MECÂNICAS

Em Pacholok (2004), além da revisão da literatura sobre a avaliação do desalinhamento de máquinas, analisou-se a viabilidade da Termografia como técnica auxiliar à análise de vibrações para manutenção preditiva em máquinas. Com isso, obteve-se uma relação entre a geração de calor no acoplamento e o grau desalinhamento de eixos. Apesar do estudo não obter uma escala confiável visto que a mesma só pôde ser observada em condições controladas, como partida a frio e obtenção dos termogramas nos primeiros dez minutos, para grandes valores de desalinhamento obteve-se resultados satisfatórios.

Younus e Yang (2012) apresentaram um sistema para diagnóstico de classificação de condições de máquinas por meio da Termografia infravermelha. O sistema é constituído algumas etapas, são eles: decomposição da imagem térmica por meio da transformada de Wavelet, seleção de recursos para realizar os cálculos de característica da máquina e realização do diagnóstico. As condições foram divididas em quatro tipos: normal, desalinhamento, desbalanceamento e falha de rolamento. A partir dos resultados obtidos durante a pesquisa, o sistema pode ser utilizado para monitoramento e diagnóstico de falhas nas máquinas.

Com a Termografia sendo um método onde há um crescente uso nas inspeções industriais, Bagavaphipan *et al* (2013) fizeram uma revisão da literatura sobre os

avanços desta técnica como método de monitoramento em máquinas, equipamentos e processos. Neste trabalho, foram vistos os diversos campos de atuação, como o monitoramento em estruturas da construção civil, componentes eletrônicos, deformação de material, inspeção de máquinas, monitoramento de corrosão, indústria nuclear, indústria aeroespacial, indústria alimentícia etc. Além disso, a pesquisa também apresenta noções básicas da Termografia, procedimentos experimentais e técnicas de análise de dados.

Bomfim (2013) apresentou um estudo experimental sobre a aplicação da Termografia como uma técnica auxiliar para avaliar o desalinhamento de eixos. Além das análises térmicas, também foi realizada análise de vibração do sistema para comparação dos resultados. Como resultado, constatou-se uma relação direta entre o desalinhamento e o aumento de temperatura nos acoplamentos. Além disso, o autor também buscou analisar as perdas de energia geradas pelo desalinhamento, onde viu-se uma correlação entre o aumento de temperatura dos acoplamentos e a energia perdida. Entretanto, o autor também destaca que os resultados não são completamente conclusivos e que são necessários mais estudos.

Em Anthanasopoulos e Botsaris (2013), realizou-se uma análise comparativa para obtenção de uma melhor compreensão de como surge a falha nos rolamentos. No trabalho, foram comparados três métodos, Termografia infravermelha, análise de vibração e transmissão sonora. O mesmo ainda cita que a análise de vibração é o método mais comum e preciso para detecção de falhas nos rolamentos mas que, mesmo assim, pode ser substituído por outros métodos menos precisos porém de menor dificuldade de operação. Por fim, o experimento indica que a comparação é viável visto que os resultados de cada método são significativos.

Mohanty e Fatima (2015) realizaram um estudo onde foi proposto um método experimental de monitoramento e detecção de desalinhamento do rotor. No trabalho, os autores puderam identificar o desalinhamento de sistemas mecânicos por meio da mensuração e monitoramento do aumento de temperatura dos acoplamentos de eixos. As análises são realizadas através das análises das imagens térmicas e, além disso, foram realizadas medições de vibração para serem comparadas com os termogramas.

Visto que na Termografia os padrões termográficos variam de acordo com o estado ou o tipo de falha do componente mecânico avaliado, Janssens *et al* (2015)

propuseram um sistema para detecção de falhas em rolamentos por meio das imagens termográficas. No trabalho, foram apresentadas duas grandes novidades sobre a detecção das falhas. Na primeira, com a utilização de diferentes estados de lubrificação, os termogramas puderam identificar os diferentes níveis de lubrificação e a falha da pista externa do rolamento. Já na segunda, são utilizados novos recursos relativos às imagens termográficas onde diferentes falhas podem ser classificadas.

Sendo a temperatura um grande indicador a ser avaliado na manutenção de sistemas mecânicos, Tonks e Wang (2016) apresentaram um trabalho que demonstra uma potencial técnica de monitoramento de temperatura a ser usada no monitoramento e na detecção de falhas em pontos críticos de turbinas eólicas. Neste trabalho, foram gerados desalinhamentos que implicaram em aumentos de temperatura nos pontos médios dos acoplamentos e, com isso, identificaram que houve um aumento de temperatura de até 5% em diversos experimentos e de mais de 10% em experimentos crescentes. Entretanto, foi dito que esta técnica exige mais desenvolvimento e pesquisa.

Cabral (2017) fez um estudo sobre a possibilidade da Termografia auxiliar na detecção de falhas por desgaste nas pistas de rolamentos compensadores de duas carreiras de esferas. A partir dos resultados obtidos nos experimentos, identificou-se variações significativas na temperatura do elemento em estudo quando este apresentava falha do tipo sulco. Já nas falhas por desgaste por abrasão não foram detectadas variações significativas. Por fim, o autor concluiu que a capacidade de detecção da Termografia foi parcialmente confirmada, visto que, a partir da hipótese de que os impactos devido a falhas geradas levariam a um aquecimento do elemento, apenas um dos tipos de falha esta técnica torna-se válida.

Visto que a aplicação da Termografia na detecção de falhas mecânicas tem sido bastante estudada nos últimos anos, percebe-se que, diante dos trabalhos apresentados, tal técnica possui potencialidade para ajudar na identificação de falhas mecânicas, como as falhas em rolamentos e por desalinhamento, e auxiliar na manutenção de sistemas mecânicos. Entretanto, ainda são exigidas mais pesquisas sobre esse tema nas diversas áreas de atuação para que esta possa ser aplicada de forma prática e confiável.

CAPÍTULO IV

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a realização da pesquisa. Para isto, faz-se necessário, primeiramente, classificar a pesquisa de acordo com o ponto de vista de sua natureza, da forma de abordagem do problema, seus objetivos e procedimentos técnicos.

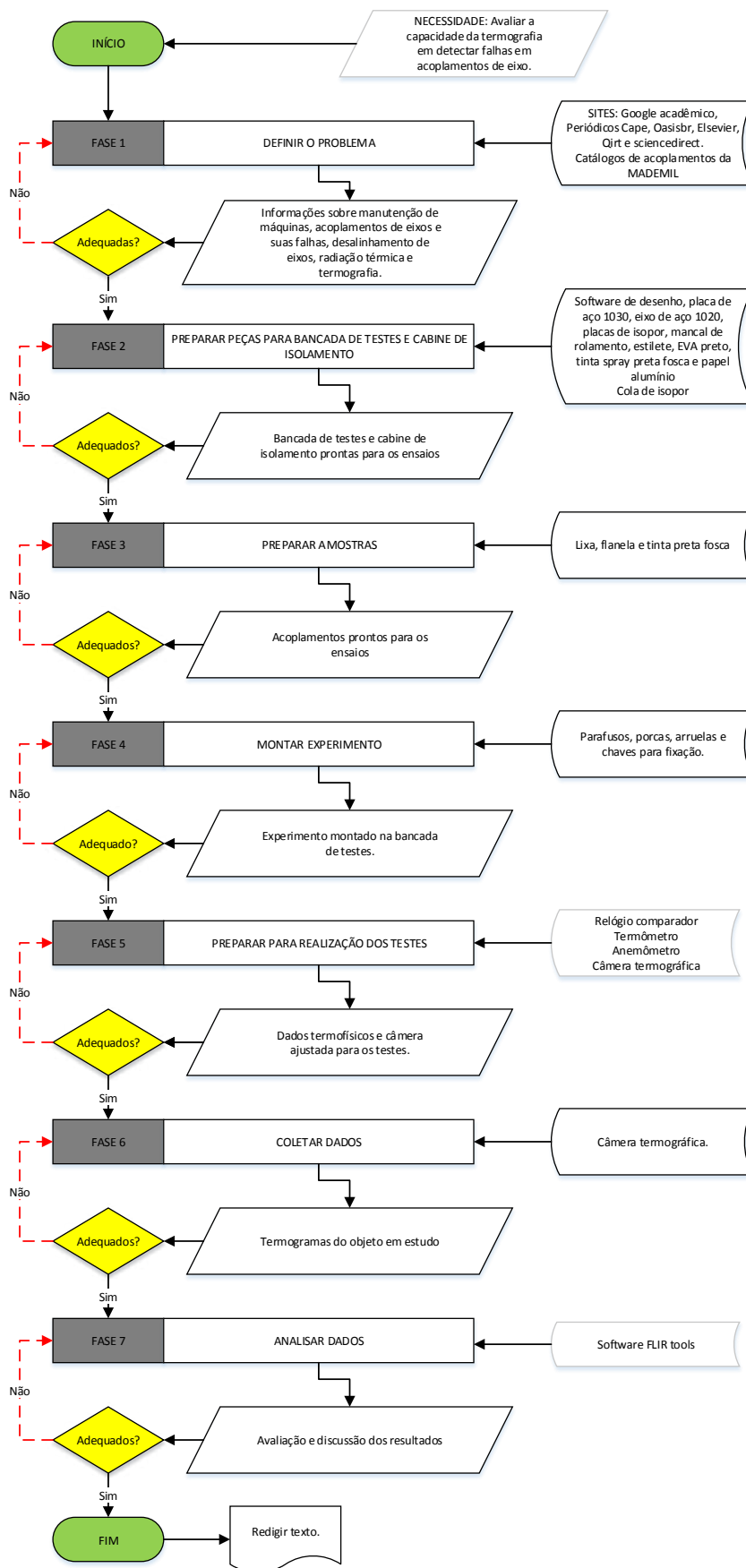
Segundo Silva e Menezes (2005), a natureza dessa pesquisa se classifica como do tipo aplicada em função de ter como objetivo gerar conhecimento para uma aplicação prática e buscar a solução do problema em questão. Neste caso, trata-se da avaliação da capacidade da técnica da Termografia detectar a presença de desalinhamento. Por sua vez, quanto a forma de abordagem do problema, trata-se de uma pesquisa quantitativa, ou seja, as informações são expressas em valores numéricos, onde serão então classificadas e analisadas para a obtenção dos resultados. Para este trabalho, são obtidos valores de temperatura que indicam a presença do desalinhamento a partir da temperatura do acoplamento.

Id. Ibid, com relação ao ponto de vista dos objetivos da pesquisa, trata-se de uma pesquisa explicativa devido a identificação dos fatores definitivos que constata a ocorrência de um determinado fenômeno. Neste caso, trata-se do aquecimento do acoplamento de eixo devido ao desalinhamento. Já com relação aos procedimentos técnicos, este estudo trata-se de uma pesquisa experimental. Isto se dá visto que a partir da determinação de um objeto de estudo, como a detecção do aquecimento do acoplamento de eixo, são selecionadas as variáveis que as influenciam, suas formas de controle e observados seus efeitos gerados. Além disso, trata-se também de uma pesquisa bibliográfica, onde há a apuração de material já publicado, na forma de livros, artigos e dissertações.

4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

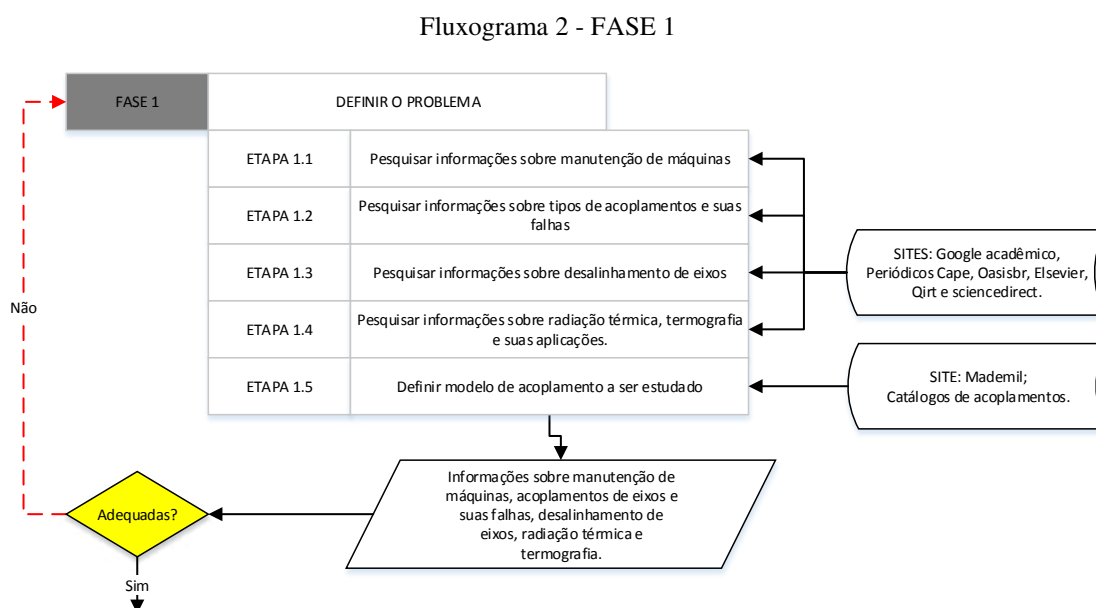
Todas as fases de realização deste trabalho estão apresentadas em um fluxograma único (Fluxograma 1) e sendo detalhada em seguida.

Fluxograma 1 - Fluxograma do trabalho



Fonte – Baseado em Maribondo (2000)

Na FASE 1, se esclarece a necessidade que levou a realização da pesquisa. Para tanto, aprofunda-se os conhecimentos sobre informações relacionadas ao tema em estudo, a saber: manutenção de máquinas (ETAPA 1.1), tipos de acoplamentos e suas falhas (ETAPA 1.2), causas e efeitos dos desalinhamento de eixos (ETAPA 1.3) e a radiação térmica, Termografia e suas aplicações (ETAPA 1.4). Além disso, define-se o modelo de acoplamento a ser estudado (ETAPA 1.5). As etapas citadas podem ser vistas no Fluxograma 2.

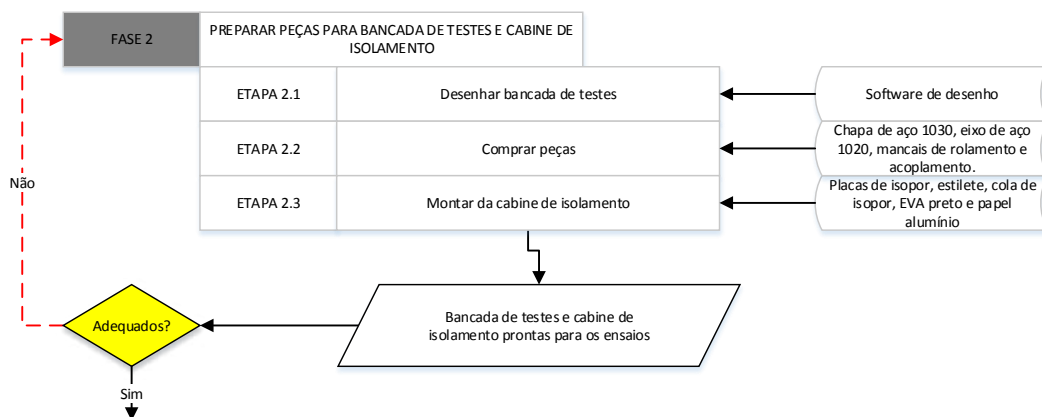


Fonte – Autoria própria

As pesquisas são realizadas por meio de livros e em materiais encontrados em sítios como Google Acadêmicos, Periódicos Capes, Elsevier, Qirt, Oasisbr e Scindirect. Para a seleção do acoplamento, utiliza-se o site da Mademil e seus catálogos. Ao definir qual tipo de acoplamento seria utilizado, seu modelo é escolhido de acordo com o método de seleção do catálogo em ANEXO.

Na FASE 2 é destinada à preparação da bancada e da cabine de isolamento do objeto em estudo para a realização dos experimentos. Nesta fase faz-se o desenho do suporte para instalação do sistema durante a ETAPA 2.1. Já a compra das peças necessárias para a realização do ensaio é feita na ETAPA 2.2. A preparação da cabine de proteção é feita durante a ETAPA 2.3. Tais etapas podem ser vistas no Fluxograma 3.

Fluxograma 3 - FASE 2

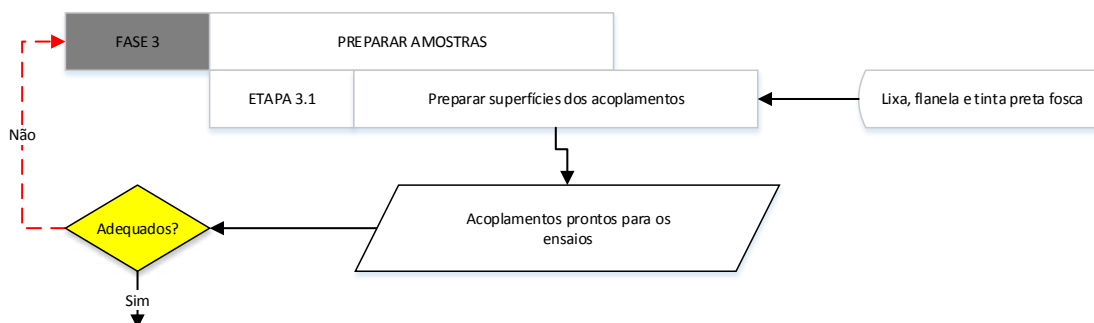


Fonte – Autoria própria

O desenho do suporte feito na ETAPA 2.1 é feito utilizando um *software* de desenho. Durante a ETAPA 2.2, serão compradas peças para a realização do experimento, como o suporte, eixos, o acoplamento e mancais de rolamento. Na ETAPA 2.3, a cabine de isolamento será produzida.

Na FASE 3, prepara-se a peça a ser ensaiada (ETAPA 3.1), conforme indicado no Fluxograma 4.

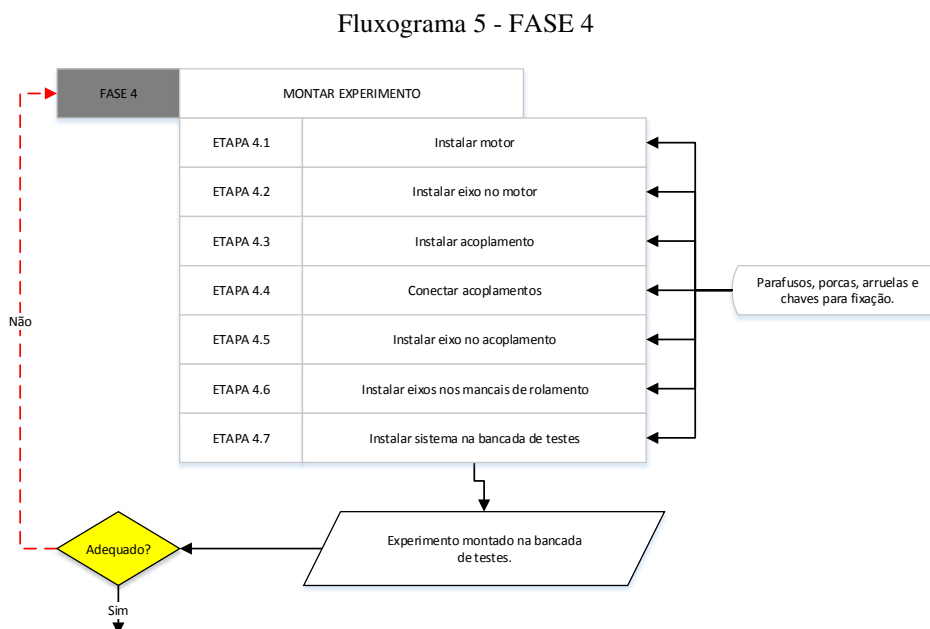
Fluxograma 4 - FASE 3



Fonte – Autoria própria

Nesta fase, a superfície dos acoplamentos é lixada e pintada com uma tinta de emissividade alta e conhecida para reduzir a refletividade e facilitar os registros das emissões de calor.

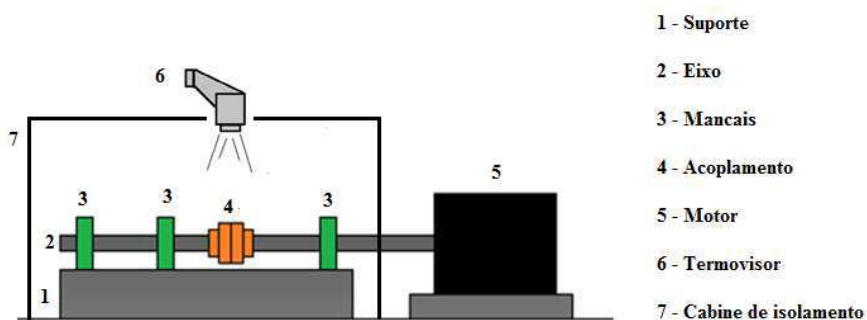
Na FASE 4 busca-se montar o experimento na bancada de testes, instalando motor, eixos, mancais e acoplamento. As etapas podem ser vistas no Fluxograma 5.



Fonte – Autoria própria

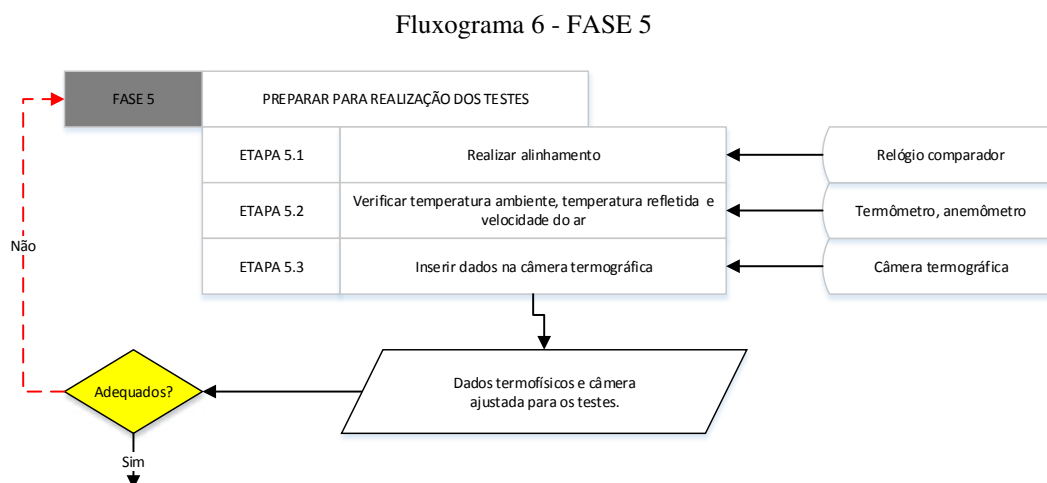
Nas ETAPAS 4.1 à 4.6, monta-se o sistema no suporte do experimento. Para isso, se faz uso de um motor destinado ao acionamento do sistema, de um suporte para auxiliar nos apoios dos mancais, eixos e acoplamentos, objeto de estudo deste trabalho. Após isso, realiza-se a fixação no suporte durante a ETAPA 4.7. O termovisor ficará posicionado a uma distância fixa acima do objeto estudado. Uma imagem ilustrativa da montagem do sistema pode ser vista na Figura 49.

Figura 49 - Ilustração da bancada de teste



Fonte – Autoria própria.

Na FASE 5 é feita a medição do desalinhamento do sistema e obtenção de variáveis ambientais as quais são necessárias para a realização do experimento, tais como temperatura atmosférica, temperatura refletida, umidade e velocidade do ar. Além disso, estes dados podem ser inseridos tanto no termovisor como no *software* dedicado à análise das imagens. O Fluxograma 6 mostra estas etapas.



Fonte – Autoria própria

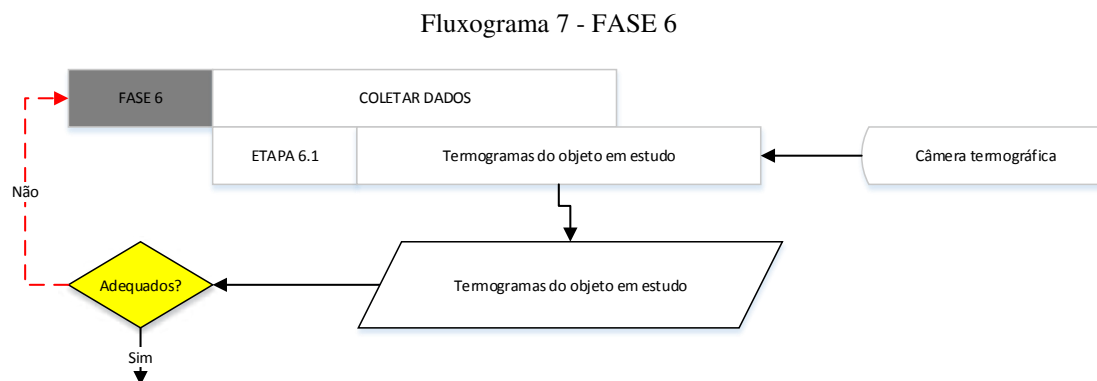
Para a medição da temperatura ambiente e umidade relativa do ar, se faz uso do relógio termo-higrômetro MT-241 (Figura 50). A temperatura refletida é medida utilizando o método refletor indicado na NBR 16292:2014. Já a velocidade do ar é medida utilizando um anemômetro de fio quente da Instrutemp.

Figura 50 - Relógio Termo-Higrômetro



Fonte – Autoria própria

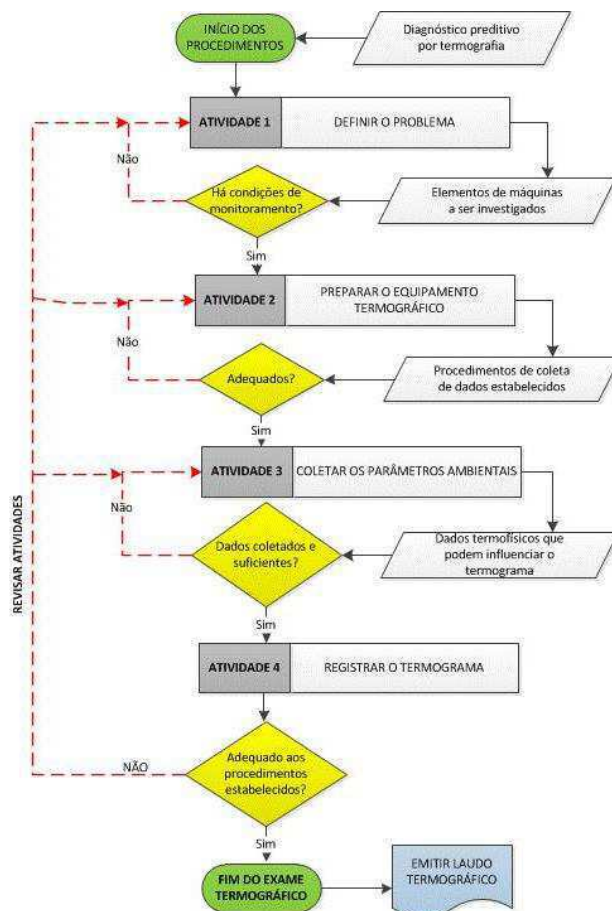
Na FASE 6 (Fluxograma 7), é feita a coleta dos dados em uma fase única. Nesta etapa, realiza-se a obtenção dos termogramas do objeto estudado.



Fonte – Autoria própria

Os procedimentos para a realização do teste e obtenção dos termogramas segue a metodologia desenvolvida no Laboratório de Desenvolvimento e Aplicação de Metodologia de Projetos (Lab. DAMP), que está apresentado no Fluxograma 8. Além disso, segue-se, também, as Normas técnicas da ABNT.

Fluxograma 8 – Metodologia para ensaios termográficos



Fonte – Laboratório de Desenvolvimento e Aplicação de Metodologia de Projetos (2017)

Como não há circulação de ar no laboratório e a cabine de isolamento também impede que qualquer movimentação do ar ambiente chegue ao elemento estudado, sua velocidade será zero. Entretanto, a rotação do eixo leva a um deslocamento do ar em torno do acoplamento, tornando-se necessário medir sua velocidade com o anemômetro de fio quente e realizar experimentos para avaliar a possível influência da convecção do ar. A aferição da velocidade do ar é feita o mais próximo possível, sendo a uma distância de até 5 mm.

Após a determinação da influência do ar, são realizados ensaios com diferentes níveis de desalinhamento para avaliar sua capacidade de detecção por meio da Termografia. Tais níveis de desalinhamento são:

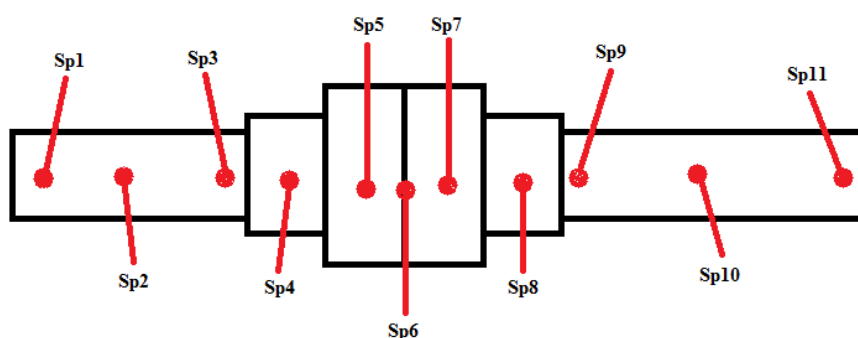
- O sistema encontrando-se o mais próximo possível de um alinhamento mais ideal (sendo este o ensaio de referência).

- Desalinhamento próximo ao limite de tolerância especificada pelo fabricante do acoplamento (Primeiro nível de desalinhamento).
- Desalinhamento acima do limite de tolerância especificado (Segundo nível de desalinhamento)
- Desalinhamento acima do dobro do limite de tolerância especificado (Terceiro nível de desalinhamento).

Os registros são obtidos em laboratório, com temperatura controlada, com a entrada de luz no ambiente reduzida, medindo-se a umidade do ar e temperatura refletida do sistema no momento do experimento.

Os ensaios ocorrem durante cerca de 40 minutos, obtendo-se o registro termográfico a cada 5 minutos para determinação da influência da convecção do ar e a cada 1 minuto para avaliação dos níveis de desalinhamento. São medidos 11 pontos específicos utilizando a função *spot* do *software* do fabricante do termovisor. Tais pontos encontram-se desde o eixo movido, passando pelo acoplamento, até o eixo motor. A Figura 51 apresenta uma ilustração do posicionamento desses pontos. Além disso, utiliza-se a função *Box* para medir os valores de temperatura médio do acoplamento.

Figura 51 – Pontos de medição

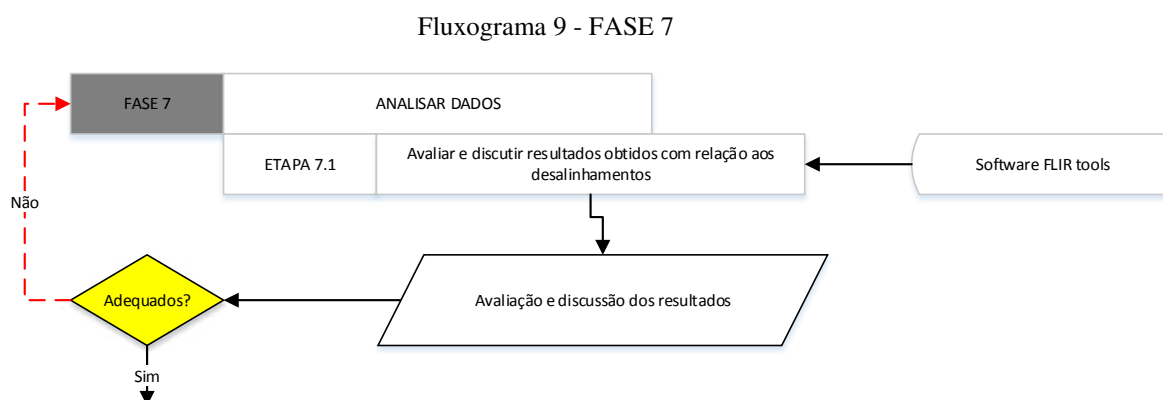


Fonte – Autoria própria

Conforme pode ser visto na imagem apresentada, nos pontos Sp4, Sp5, Sp6, Sp7 e Sp8 identifica-se a distribuição de temperatura ao longo dos dois cubos do acoplamento e sua área de contato. Os pontos Sp1, Sp2 e Sp3, encontram-se ao longo do eixo movido, a uma distância próxima do mancal movido, intermediária do eixo e perto do acoplamento

estudado, respectivamente. Já os pontos Sp9, Sp10 e Sp11 encontram-se no eixo motor, posicionados próximo ao acoplamento, a uma distância intermediária do eixo e próximo do mancal de rolamento ligado ao motor, respectivamente.

Na FASE 7 (Fluxograma 9), procura-se conferir, utilizando o *software FLIR tools* e gráficos por meio do *Microsoft Excel*, os dados obtidos com os parâmetros de referência para o estudo a fim de verificara existência de anomalias durante o acionamento do sistema.



Fonte – Autoria própria

Após a FASE 7, segue-se para a redação da dissertação.

CAPÍTULO V

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados a partir da metodologia descrita no capítulo anterior. A ênfase maior será dada no tocante aos desalinhamentos estabelecidos e no efeito da convecção do ar. São apresentados termogramas dos ensaios, tabelas e gráficos com os valores de temperatura em pontos do acoplamento.

Na FASE 1 foram obtidas informações a respeito do acoplamento de eixo, suas falhas, o desalinhamento, radiação térmica e Termografia. O Quadro 4 apresenta sítios pesquisados, as palavras-chaves utilizadas, o número de respostas obtidas e os principais trabalhos encontrados para integrar a pesquisa.

Quadro 4 – Informações pesquisadas

SÍTIOS PESQUISADOS	PALAVRAS-CHAVE	NÚMERO DE RESPOSTAS OBTIDAS	PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS
Google Acadêmicos, Periódicos Capes Oasisbr Sciencedirect	Manutenção de máquinas; Acoplamentos de eixo; Falhas em acoplamentos; Desalinhamento de eixos; Radiação térmica; Radiação infravermelha; Termografia.	244	(CHRZANOWSKI, 2001), (BOMFIM, 2013), (PACHOLOK, 2004), (SILVA JR, 2017), (CABRAL, 2017), (HELLIER, 2003), (BAGAVATHIAPPAN, 2013), (JARDINE, 2006), (PAKALE, 2015), (MOBLEY, 2004), (JANSSENS, 2015), (DUAN, 2016), (YOUNUS, 2012), (MOHANTY, 2015), (TONKS, 2016), (ANTHANASOPOULUS, 2013)

Fonte – Autoria própria

A partir das informações obtidas por meio das pesquisas, determinou-se as variáveis que são necessárias para a realização dos ensaios termográficos, tais como: emissividade da superfície do objeto próxima a de um corpo negro, temperatura ambiente controlada, umidade do ar, temperatura refletida de acordo com a NBR 16292:2014, distância do objeto, foco, enquadramento e velocidade do ar menor que 6m/s.

Para a determinar o acoplamento a ser estudado, de acordo com o MÉTODO DE SELEÇÃO 1 do catálogo em ANEXO, para o motor utilizado durante os experimentos (motor elétrico de ½ CV), considerando sua utilização com uma carga leve, operando até 24 (vinte e quatro) horas e com menos de 5 (cinco) partidas por hora, o menor acoplamento utilizado é o GR 50. Sendo esse o modelo utilizado neste estudo.

Como na FASE 2 da metodologia estipulada buscou-se preparar as peças para a bancada e a cabine de isolamento. Para isso, foi desenhado o suporte em um *software* de desenho (APÊNDICE) e obtidos no mercado alguns itens, tais como: suporte feito de aço 1030, eixos de aço 1020 com 20mm de diâmetro, o acoplamento de eixo modelo GR 50 da Mademil, 3 (três) rolamentos UC 204 da TRS e 3 (três) mancais de rolamento P204 da GTOP. Já a cabine de isolamento foi produzida com placas de isopor, com seu interior revestido com EVA preto e seu exterior com papel alumínio para uma menor interferência da radiação ambiente no momento da detecção. O mancal de rolamento, o eixo, o acoplamento e a cabine de isolamento podem ser vistos na Figura 52 (a), (b), (c) e (d).

Figura 52 - Peças da bancada e cabine de isolamento



Fonte - Autoria própria

Na FASE 3, foi necessário preparar a superfície do elemento estudado para a realização dos ensaios. Assim sendo, foi feito o lixamento e a pintura da superfície do acoplamento com uma tinta preta fosca Dialine da Iquine de emissividade conhecida igual a 0,98. Isto se fez necessário para garantir que os dados termográficos fossem fidedignos às leituras efetuadas. As Figuras 53 (a), (b) e (c) mostram o acoplamento antes da preparação, após o lixamento e após a pintura respectivamente.

Figura 53 - Tratamento da superfície do acoplamento



Fonte – Autoria própria

Na FASE 4 foi realizada a montagem da bancada experimental. A estrutura montada e com a cabine de isolamento podem ser vistos nas Figuras 54 (a) e (b).

Figura 54 - Bancada experimental



Fonte – Autoria própria

Durante o experimento, foi utilizado um motor de indução trifásico Weg de potência $\frac{1}{2}$ CV, 3410 rpm e 60 Hz já presente no laboratório. A fixação do motor e das peças no suporte foi realizada utilizando parafusos allen de $\frac{3}{8}$ polegadas, arruelas e porcas. Já o termovisor foi posicionado a 40 centímetros do objeto estudado, sendo essa a menor distância para a câmera garantir o foco do registro termográfico.

Para a realização da FASE 5, preparação para a realização dos testes, a temperatura ambiente adotada segue a literatura especializada, ficando em cerca de 20°C , sendo medida também a umidade do ar, determinada a temperatura refletida por meio do método refletor apresentado na NBR 16292:2014 e realizados os alinhamentos e desalinhamentos necessários para cada ensaio utilizando calços.

O ambiente de realização dos ensaios foi o Laboratório de Vibração e Instrumentação (LVI), localizado no bloco BI da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Campina Grande, Paraíba. Tal laboratório possui paredes e teto na cor branca, com luz de teto e janelas de vidro com persianas.

Por conta da luz ambiente poder influenciar os resultados dos experimentos, foi necessário desligar as luzes do local e fechar as persianas das janelas para evitar possíveis interferências tanto da luz natural quanto da artificial. Para uma maior redução dos reflexos no ambiente, o ideal seria que as paredes e o teto fossem pintados com uma tinta preta fosca, entretanto esta mudança não pôde ser realizada. As Figuras 55 (a) e (b) apresentam imagens do laboratório utilizado para os ensaios e uma reprodução do posicionamento para o registro dos termogramas.

Figura 55 – Laboratório utilizado e posicionamento para o registro termográfico



Laboratório utilizado

(a)

Fonte – UFCG (2018)



Posicionamento para o registro

(b)

Fonte – Autoria própria

De acordo com o modelo de acoplamento determinado (GR 50), os níveis de desalinhamento estipulados foram:

- Até 0,10 mm para o Ensaio de referência.
- Aproximadamente 0,50 mm para o Primeiro nível de desalinhamento.
- Entre 0,50 e 1 mm, para o segundo nível de desalinhamento. (Em 0,74 mm).
- Acima de 1 mm para o Terceiro nível de desalinhamento. (Em 1,18 mm).

Já na FASE 6 foram feitos os registros termográficos para determinar a influência do deslocamento de ar devido à rotação do sistema e a análise para detectar os níveis de desalinhamento por meio da Termografia. Os ensaios foram realizados durante 40 minutos, fazendo os registros a cada 5 minutos para o avaliação do deslocamento de ar na medição e a cada 1 minuto para a detecção dos níveis de desalinhamento.

Na FASE 7, é feita a análise dos dados obtidos. Os resultados obtidos em cada experimento podem ser vistos nos tópicos a seguir.

5.1 INTERFERÊNCIA DA CONVECÇÃO DO AR

Apesar de não haver ventilação no ambiente durante a realização do experimento, a rotação do sistema acarreta em um deslocamento do ar em torno do eixo e do acoplamento. Utilizando um anemômetro de fio quente, foi medida a velocidade do ar próximo ao elemento em estudo. A Figura 56 apresenta a velocidade encontrada.

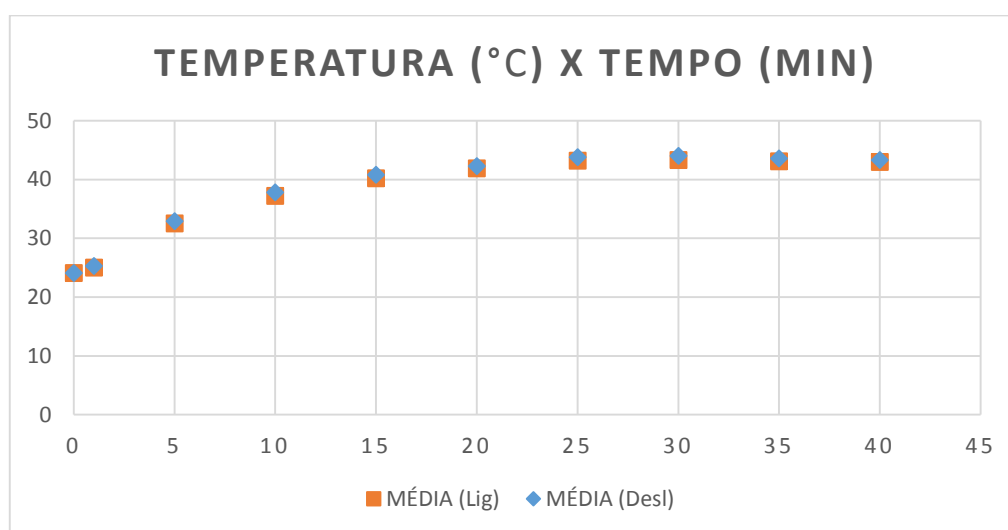
Figura 56 -Velocidade do ar.



Fonte – Autoria própria

Conforme pode ser visto na Figura 56, o deslocamento do ar devido à rotação do sistema é de 0,22 m/s. Fez-se um experimento para avaliar se a convecção do ar provocada durante a rotação do sistema pode influenciar nos resultados obtidos por meio da Termografia. O Gráfico 1 e o Quadro 5 apresentam as temperaturas médias obtidas com sistema ligado e desligado e comparam tais resultados.

Gráfico 1 – Gráfico comparativo do sistema ligado e desligado



Fonte – Autoria própria

Quadro 5 - Comparação das temperaturas

TEMPO DE OPERAÇÃO	SISTEMA LIGADO	SISTEMA DESLIGADO
1 Minuto	25 °C	25,3 °C
5 Minutos	32,5 °C	32,9 °C
10 Minutos	37,2 °C	37,8 °C
15 Minutos	40,2 °C	40,8 °C
20 Minutos	41,9 °C	42,3 °C
25 Minutos	43,2 °C	43,8 °C
30 Minutos	43,3 °C	44 °C
35 Minutos	43,1 °C	43,6 °C
40 Minutos	43 °C	43,3 °C

Fonte – Autoria própria.

Os valores de temperatura obtidos na comparação indicam que a convecção gerada pelo fluxo de ar sobre sua superfície do acoplamento não acarreta variações significativas dos resultados obtidos na análise termográfica. Por conta disso, não há a necessidade de se considerar perdas de calor devido à convecção do ar.

5.2 EXPERIMENTO DE REFERÊNCIA

Fez-se o experimento com o equipamento estando na condição mais alinhada (Figura 57 a e b) para se obter uma situação de referência.

Figura 57 – Nível de alinhamento do experimento de referência



Fonte – Autoria própria

Neste ensaio, o nível de desalinhamento no acoplamento chega a no máximo 0,10 mm. As variáveis introduzidas na câmera termográfica foram: emissividade e a temperatura refletida, além da temperatura ambiente e umidade do ar, que foram obtidas por meio do relógio Termo-Higrômetro apresentado na Figura 58.

Figura 58 - Registro de temperatura e umidade



Fonte – Autoria própria

Durante a realização do experimento, as variáveis apresentavam os seguintes valores:

Temperatura ambiente: 20,1°C

Umidade do ar: 53%

Temperatura refletida medida: 21,6°C

As temperaturas médias que mostram o aquecimento do acoplamento durante o experimento de referência podem ser vistas no Gráfico 2.

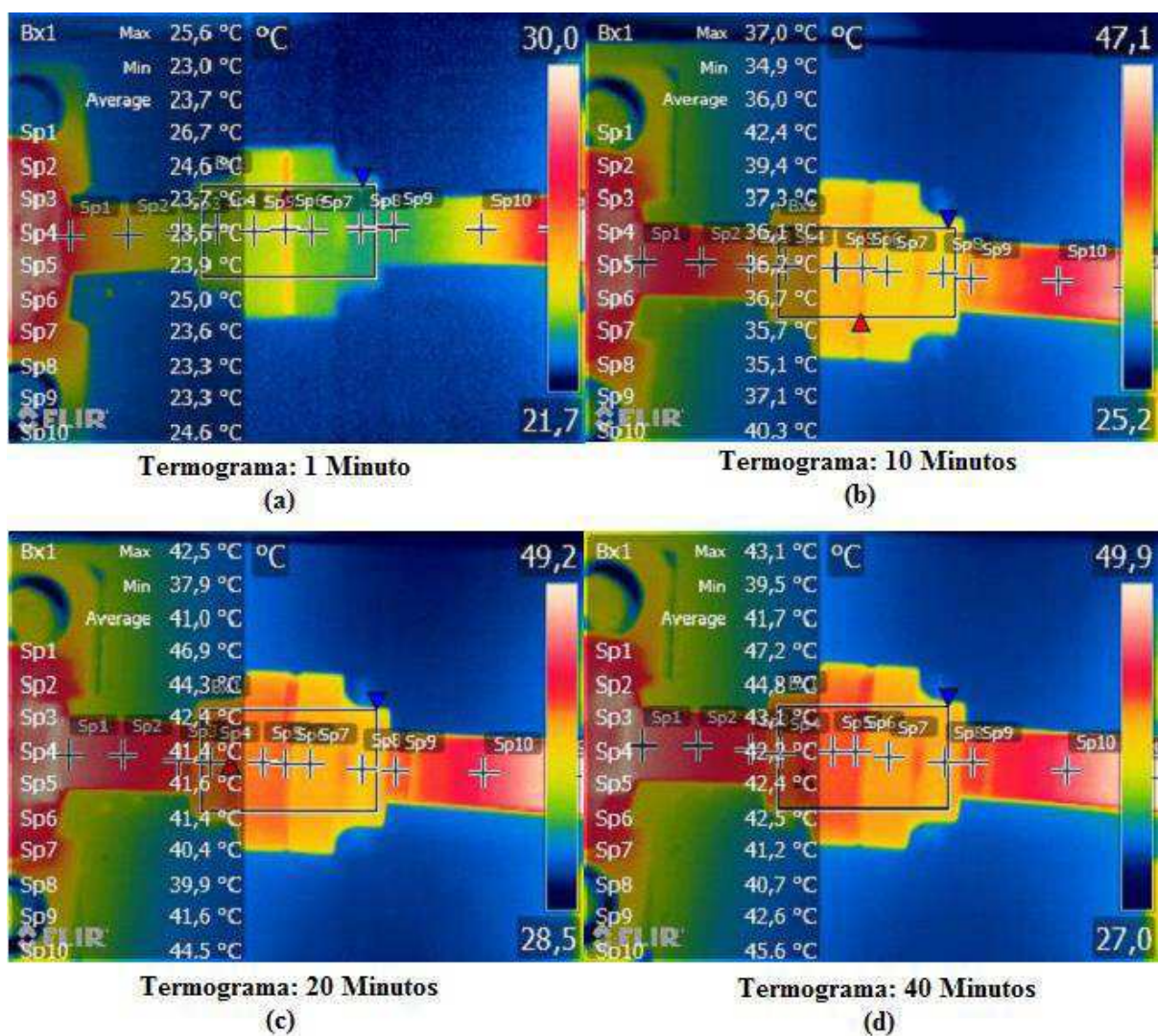
Gráfico 2 - Gráfico do experimento de referência



Fonte – Autoria própria.

Conforme pode ser visto no gráfico 2, a temperatura média do acoplamento iniciou-se em cerca de 22°C e eleva sua temperatura acima dos 40°C em cerca de 20 minutos. Após isso, não há uma variação significativa da temperatura, ocorrendo um equilíbrio da mesma durante o tempo restante do experimento. Nas Figuras 59 (a), (b), (c) e (d) são apresentados os termogramas do experimento de referência nos períodos de 1, 10, 20 e 40 minutos. Nelas pode-se ver a evolução do aquecimento de cada ponto do acoplamento durante todo o procedimento.

Figura 59 – Termogramas do experimento de referência



Fonte – Autoria própria.

O Quadro 6 apresenta os valores das temperaturas nos pontos do acoplamento e a temperatura média do mesmo durante o ensaio de referência.

Quadro 6 – Temperaturas nos pontos do acoplamento

PONTOS	TEMPERATURAS (°C)			
	1 min	10 min	20 min	40 min
Sp4 (Ref)	23,6	36,1	41,4	42,2
Sp5 (Ref)	23,9	36,2	41,6	42,4
Sp6 (Ref)	25	36,7	41,4	42,5
Sp7 (Ref)	23,6	35,7	40,4	41,2
Sp8 (Ref)	23,3	35,1	39,9	40,7
Média (Ref)	23,7	36	41	41,7

Fonte – Autoria própria

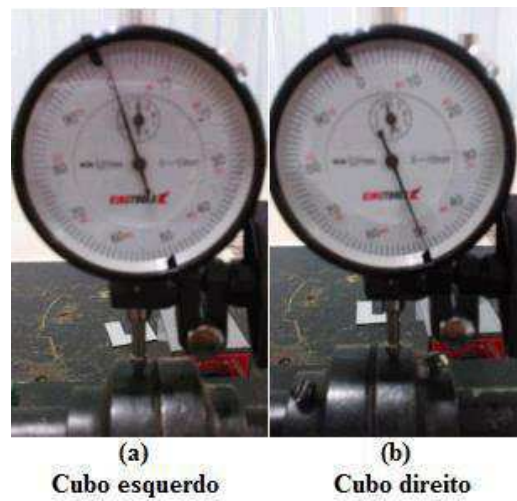
É constatado nos termogramas que, durante o primeiro minuto, houve um aquecimento levemente maior na área de contato do acoplamento (ponto Sp6), de cerca de 2°C. Isso se deve ao fato dessa ser uma área onde há a transmissão de movimento dos eixos, acarretando em um atrito levemente maior. Entretanto, alguns minutos depois, já se percebe que o calor proveniente dos mancais de rolamento é transmitido pelos eixos e já interfere na mensuração da temperatura do elemento de ligação.

Além disso, pode-se notar que houve uma elevação ligeiramente maior da temperatura do cubo esquerdo do acoplamento durante o experimento. Isso se dá por conta da maior proximidade do lado esquerdo do elemento em estudo com o mancal de rolamento por conta de seu eixo de ligação ser menor que o que se encontra ligado ao lado direito. Porém, é possível observar tal diferença de temperatura não é muito expressiva visto que, ao final do ensaio, as duas partes apresentam uma diferença média de menos de 2°C.

5.3 PRIMEIRO NÍVEL DE DESALINHAMENTO

Neste tópico é apresentado e discutido o ensaio com o sistema apresentando o primeiro nível de desalinhamento. O experimento foi feito com o acoplamento estando em seu limite de desalinhamento (0,50 mm). As Figuras 60 (a) e (b) mostram a diferença do nível de alinhamento do sistema.

Figura 60 - Nível de alinhamento do primeiro experimento desalinhado



Fonte – Autoria própria

Conforme pode ser visto, os acoplamento encontram-se a um desalinhamento vertical de aproximadamente 0,50 mm. Já na Figura 61, algumas das variáveis ambientais introduzidas na câmera termográfica para a realização dos experimentos podem ser vistas.

Figura 61 - Registro de temperatura e umidade



Fonte – Autoria própria

Durante a realização do experimento, as variáveis apresentavam os seguintes valores:

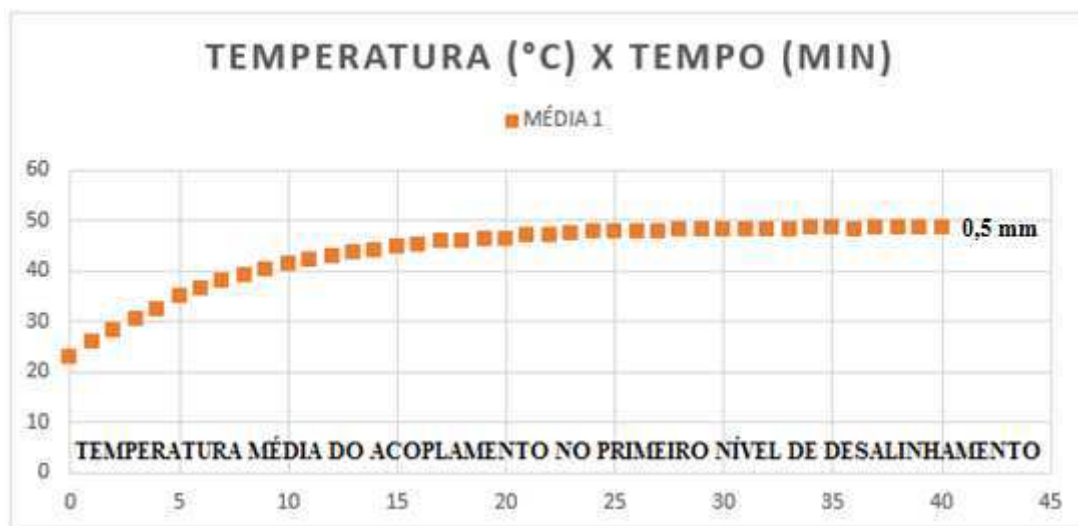
Temperatura ambiente: 20,1°C

Umidade do ar: 49%

Temperatura refletida medida: 22°C

O Gráfico 3 apresenta o aquecimento médio do acoplamento durante o experimento. O experimento foi iniciado com o acoplamento a uma temperatura em cerca de 23°C e, assim como apresentado no gráfico do experimento de referência, o acoplamento se aquece mais nos primeiros 20 minutos e após isso, há uma menor variação da temperatura, indicando que o sistema entrou em equilíbrio térmico.

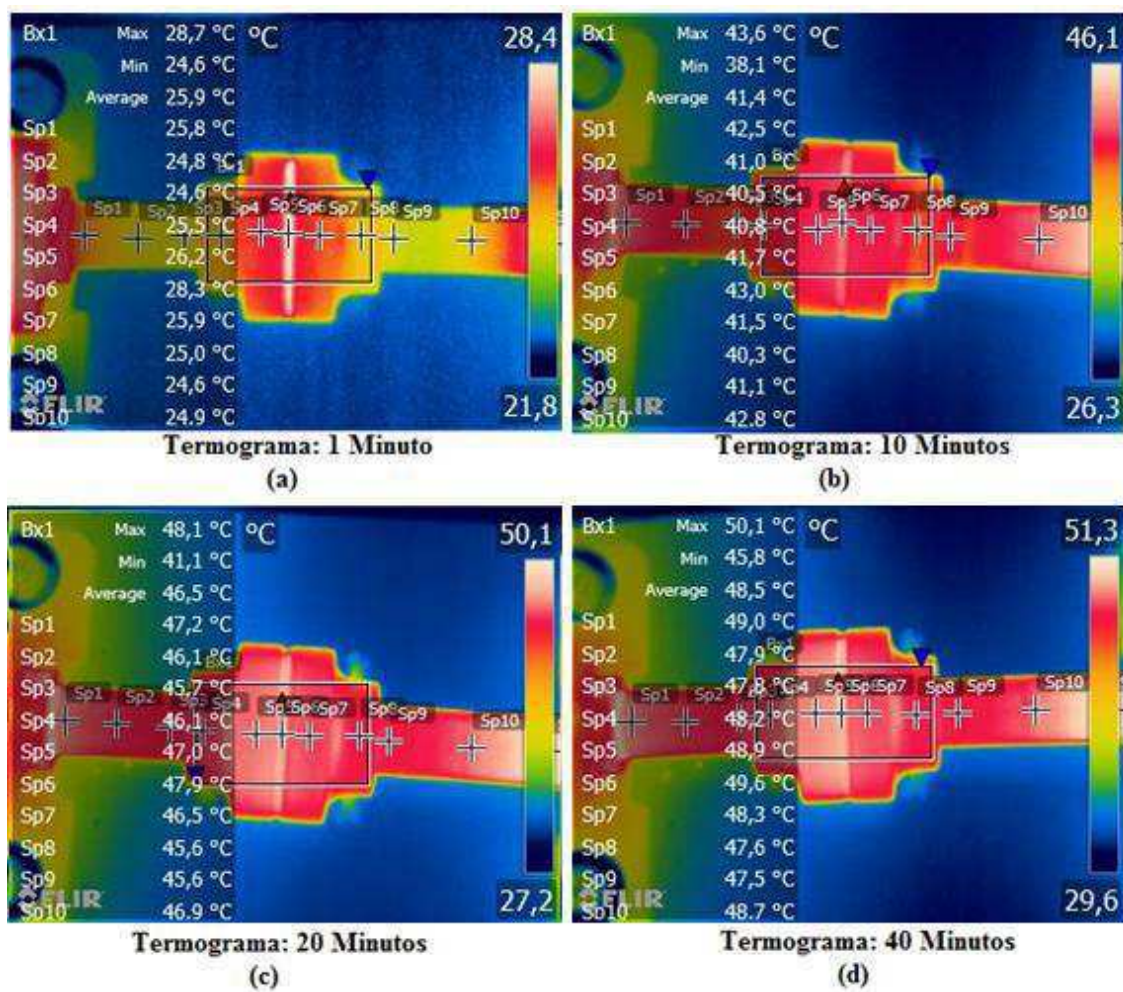
Gráfico 3 - Gráfico do primeiro experimento desalinhado



Fonte – Autoria própria.

Nas Figuras 62 (a), (b), (c) e (d) podem ser vistos os termogramas do acoplamento durante o ensaio com o primeiro nível de desalinhamento nos tempos 1, 10, 20 e 40 minutos. Já o Quadro 7 indica as temperaturas média e dos pontos do acoplamento apresentadas nos termogramas.

Figura 62 – Primeira comparação de termogramas



Fonte – Autoria própria.

Quadro 7 - Temperaturas nos pontos do acoplamento

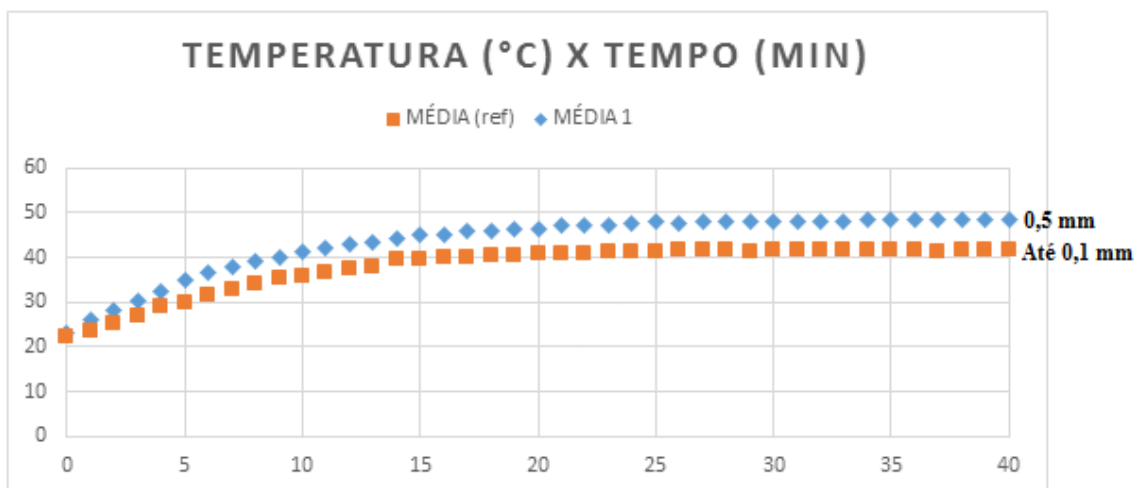
PONTOS	TEMPERATURAS (°C)			
	1 min	10 min	20 min	40 min
Sp4 (Des 1)	25,5	40,8	46,1	48,2
Sp5 (Des 1)	26,2	41,7	47	48,9
Sp6 (Des 1)	28,3	43	47,9	49,6
Sp7 (Des 1)	25,9	41,5	46,5	48,3
Sp8 (Des 1)	25	40,3	45,6	47,6
Média (Des 1)	25,9	41,4	46,5	48,5

Fonte – Autoria própria

No primeiro minuto, o experimento desalinhado encontra-se com uma temperatura levemente maior na área de contato dos cubos do acoplamento quando comparado ao ensaio anterior. Isso indica que há um maior atrito neste ponto, gerando esse aquecimento. Já aos 10 minutos, pode-se notar que em todo o sistema já há interferência do calor advindo dos mancais por meio da condução térmica assim como ocorreu no experimento de referência, apesar dos valores para o experimento desalinhado serem mais elevados. Em todos os instantes de tempo, o ensaio com a presença de desalinhamento apresenta maior aquecimento que no ensaio de referência. Apesar dessa diferença de temperatura entre os cubos ser semelhante, sendo inferior a 2°C em ambos os casos.

Quando se observa este ensaio em seus instantes finais, nota-se que a sua temperatura média final chega a cerca de 6 a 7°C maior que o de referência. Entretanto, apesar desse leve aquecimento, esse calor, assim como no ensaio de referência, é proveniente dos mancais de rolamento e não essencialmente do atrito interno do acoplamento. A comparação entre o aquecimento médio do experimento de referência e o com a falha no limite de tolerância pode ser vista no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Gráfico comparativo 1



Fonte – Autoria própria.

Conforme pode ser visto, ambos elevam sua temperatura até cerca de 20 minutos e a partir desse momento não há variações muito significativas. Além disso, as curvas dos ensaios que são apresentadas no gráfico possuem uma característica uniforme, porém,

quando o acoplamento possui um nível de desalinhamento maior, há um aquecimento mais elevado do elemento de transmissão estudado.

5.4 SEGUNDO NÍVEL DE DESALINHAMENTO

Foi realizado outro ensaio com nível de desalinhamento maior que o experimento anterior. Neste, o experimento ocorreu com o sistema um pouco acima do limite de tolerância de 0,50 mm especificado pelo fabricante. As Figuras 63 (a) e (b) apresentam o nível de desalinhamento do acoplamento.

Figura 63 - Nível de alinhamento do segundo experimento desalinhado



Fonte – Autoria própria.

Conforme a Figura 63, o desalinhamento vertical apresentado no acoplamento é de cerca de 0,74 mm, estando acima do limite de tolerância estabelecido. Algumas variáveis ambientais que foram determinadas e inseridas na câmera termográfica durante o ensaio podem ser vistas na Figura 64.

Figura 64 – Registro de temperatura e umidade



Fonte – Autoria própria.

O experimento apresentava os seguintes valores:

Temperatura ambiente: 19,9°C

Umidade do ar: 53%

Temperatura refletida medida: 21,7°C

Com o sistema acima dos limites de tolerância de desalinhamento, os registros termográficos indicaram que houve um aquecimento um pouco acima do apresentado no ensaio com primeiro nível de desalinhamento. Esse aquecimento pode ser visto no Gráfico 5.

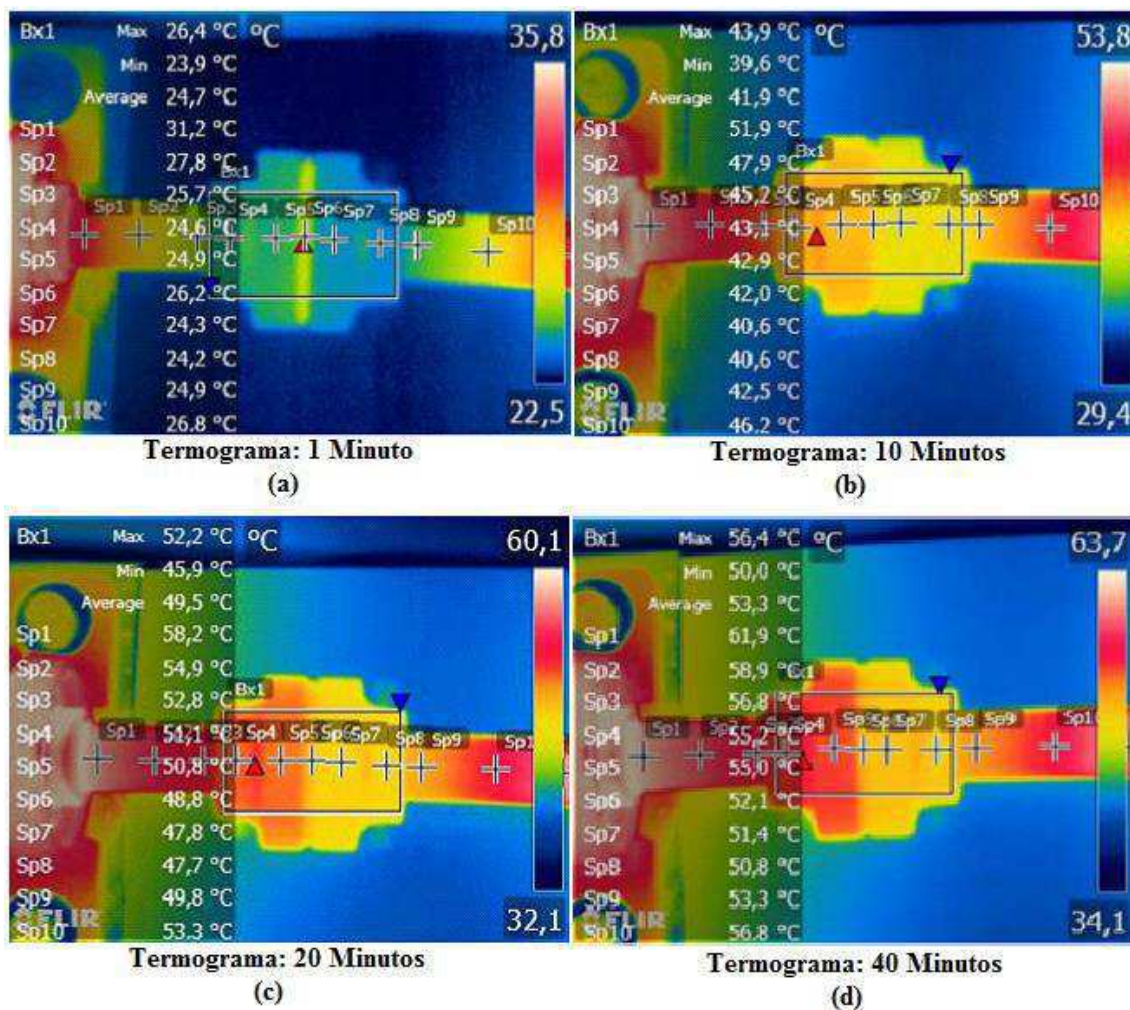
Gráfico 5 - Gráfico do segundo experimento desalinhado



Fonte – Autoria própria.

O experimento se iniciou a uma temperatura de cerca de 22°C, chegando, ao final, em cerca de 53,3°C. Com a maior parte do aquecimento ocorrendo durante a primeira metade do ensaio. As imagens termográficas do elemento em estudo durante os tempos de 1, 10, 20 e 40 minutos para esse nível de desalinhamento podem ser vistas nas Figuras 65 (a), (b), (c) e (d).

Figura 65 – Segunda comparação de termogramas



Fonte – Autoria própria.

O Quadro 8 apresenta os valores de temperatura dos pontos medidos durante o ensaio.

Quadro 8 - Temperaturas nos pontos do acoplamento

PONTOS	TEMPERATURAS (°C)			
	1 min	10 min	20 min	40 min
Sp4 (Des 2)	24,6	43,1	51,1	55,2
Sp5 (Des 2)	24,9	42,9	50,8	55
Sp6 (Des 2)	26,2	42	48,8	52,1
Sp7 (Des 2)	24,3	40,6	47,8	51,4
Sp8 (Des 2)	24,2	40,6	47,7	50,8
Média (Des 2)	24,7	41,9	49,5	53,3

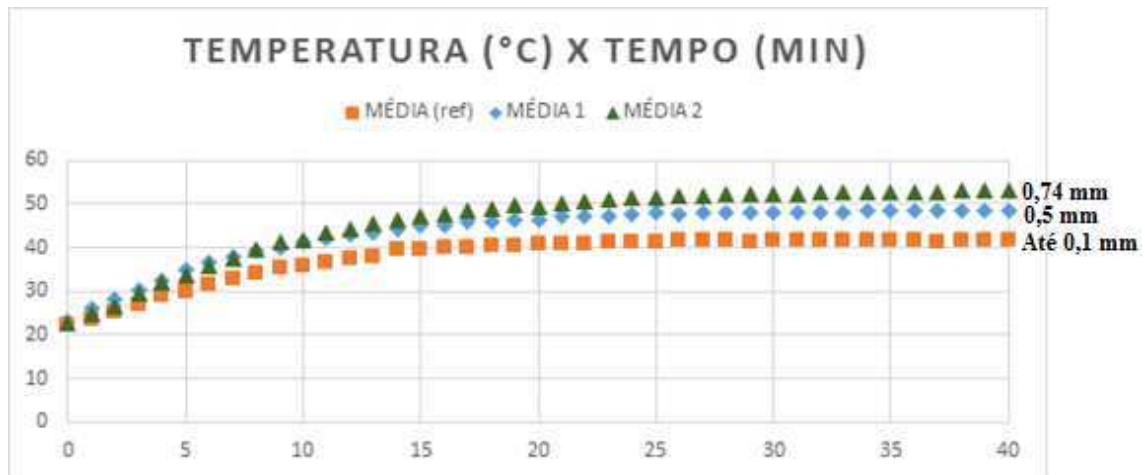
Fonte – Autoria própria

Assim como nos demais experimentos, inicialmente houve uma leve geração de calor na área de contato do acoplamento (ponto Sp6). Além disso, assim como nos anteriores, ele logo foi afetado pelo calor conduzido através dos eixos. Contudo, quando se compara sua temperatura média final com a dos termogramas anteriores, pode-se perceber que quando comparado com o ensaio de referência, a diferença média final chega a 11,6°C, sendo sensivelmente maior que o experimento com o primeiro nível de desalinhamento.

Além disso, o lado esquerdo do acoplamento, assim como nos demais ensaios, sofreu um aquecimento maior devido à condução do calor por conta de sua maior proximidade com mancais de rolamento. Entretanto, a diferença de temperatura entre os cubos foi maior para este nível de desalinhamento, indicando uma maior condução de calor pelo eixo. Em média, a diferença de temperatura entre as duas partes do acoplamento no ensaio com o segundo nível de desalinhamento foi de cerca de 4°C, uma diferença mais relevante que a dos ensaios anteriores.

Quando comparado aos outros experimentos, a temperatura final obtida indica que o aumento de temperatura é proporcional ao nível de desalinhamento presente no acoplamento. O Gráfico 6 apresenta essa comparação.

Gráfico 6 - Gráfico comparativo 2



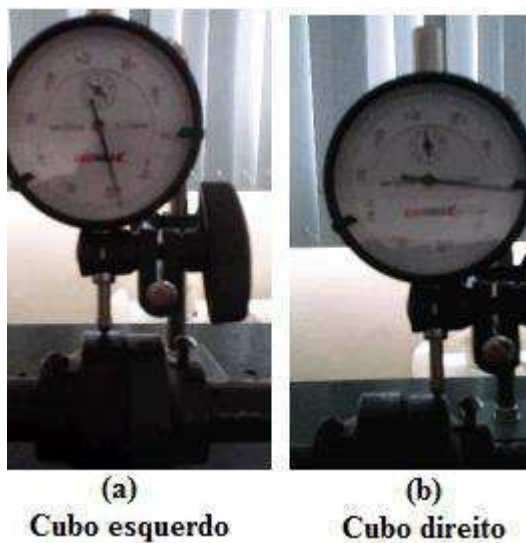
Fonte – Autoria própria.

Conforme pode ser visto, para todos os experimentos, o acoplamento se aqueceu de forma mais vertiginosa durante os primeiros 20 minutos e a partir de então, houve uma variação menor da temperatura. Além disso, pôde-se perceber que mesmo o aquecimento sendo uniforme em todos os ensaios, a presença de um desalinhamento maior levou a um aquecimento final mais elevado.

5.5 TERCEIRO NÍVEL DE DESALINHAMENTO

Foi realizado outro ensaio com o sistema apresentando mais uma falha de desalinhamento. Neste caso, o experimento foi feito com o acoplamento estando muito acima do limite estabelecido pelo fabricante. A Figura 66 (a), e (b) mostra a diferença do nível de alinhamento do sistema.

Figura 66 - Nível de alinhamento do terceiro experimento desalinhado



Fonte – Autoria própria.

Conforme as imagens, o acoplamento encontra-se com um desalinhamento vertical de 1,18 mm, estando muito acima do limite de 0,50 mm. As variáveis temperatura e umidade do ar utilizadas para a realização dos experimentos podem ser vistas na Figura 67.

Figura 67 – Registro de temperatura e umidade



Fonte – Autoria própria.

Durante a realização do experimento, as variáveis apresentavam os seguintes valores:

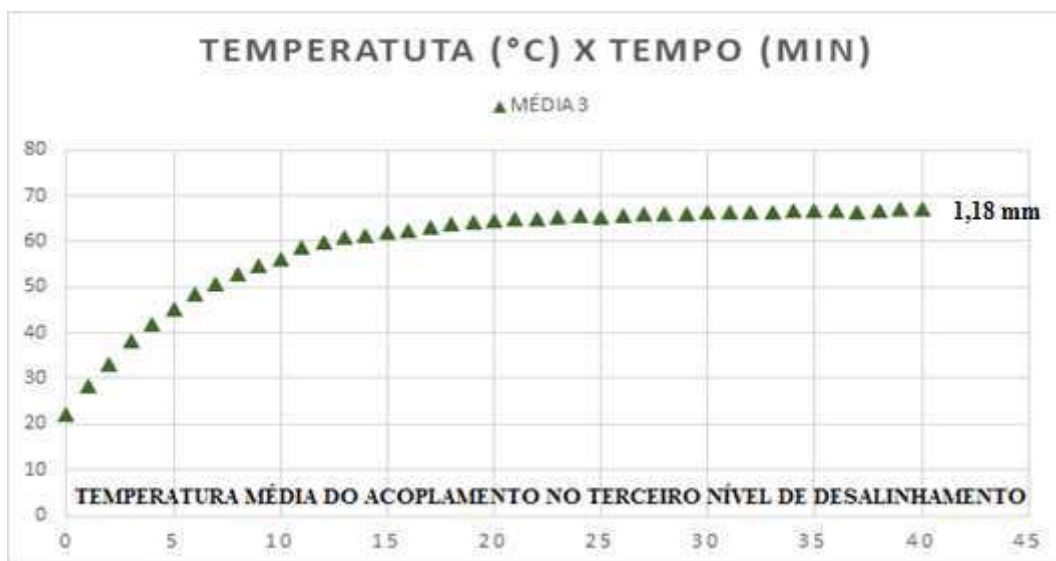
Temperatura ambiente: 20,4°C

Umidade do ar: 57%

Temperatura refletida medida: 21,3°C

O aquecimento médio do acoplamento pode ser visto no Gráfico 7. Neste ensaio, há um maior aquecimento quando comparado aos demais ensaios realizados.

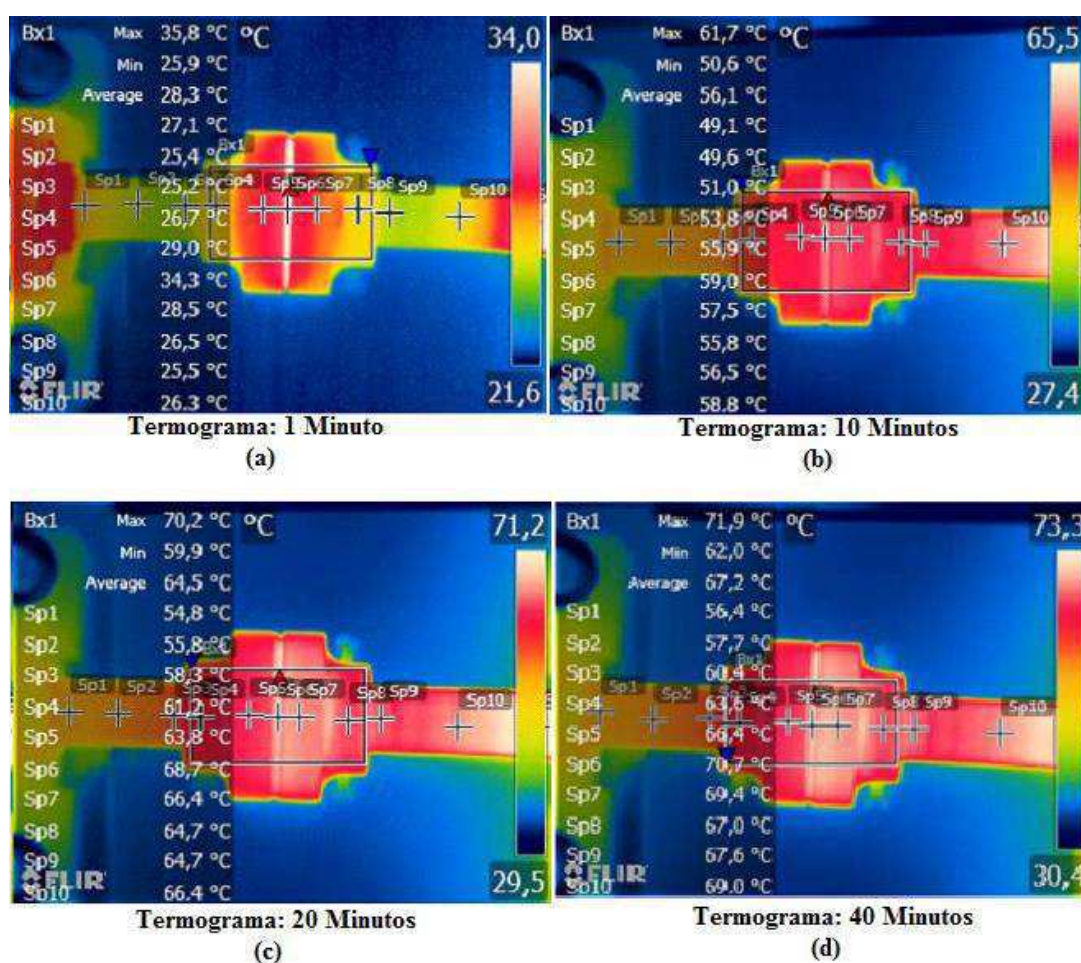
Gráfico 7 - Gráfico do terceiro experimento desalinhado



Fonte – Autoria própria.

Durante o experimento, a temperatura do acoplamento se iniciou em torno de 22°C e chegou, ao final, a uma temperatura média de 67,2°C. O elemento, neste caso, também se aqueceu de forma mais elevada até cerca de 20 minutos e após esse período de tempo não houve uma grande variação da temperatura. Nas Figuras 68 (a), (b), (c) e (d) podem ser vistos os termogramas do experimento apresentando a falha.

Figura 68 – Terceira comparação de Termogramas



Fonte – Autoria própria.

Os Quadros 9 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) apresentam as comparações das temperaturas em cada ponto do acoplamento para todos os ensaios realizados.

Quadro 9 - Comparação das temperaturas em cada ponto do acoplamento

PONTOS	TEMPERATURAS (°C)				PONTOS	TEMPERATURAS (°C)			
	1 min	10 min	20 min	40 min		1 min	10 min	20 min	40 min
Sp4 (Ref)	23,6	36,1	41,4	42,2	Sp5 (Ref)	23,9	36,2	41,6	42,4
Sp4 (Des 1)	25,5	40,8	46,1	48,2	Sp5 (Des 1)	26,2	41,7	47	48,9
Sp4 (Des 2)	24,6	43,1	51,1	55,2	Sp5 (Des 2)	24,9	42,9	50,8	55
Sp4 (Des 3)	26,7	53,8	61,2	63,6	Sp5 (Des 3)	29	55,9	63,8	66,4

(a) (b)

	TEMPERATURAS (°C)					TEMPERATURAS (°C)			
PONTOS	1 min	10 min	20 min	40 min	PONTOS	1 min	10 min	20 min	40 min
Sp6 (Ref)	25	36,7	41,4	42,5	Sp7 (Ref)	23,6	35,7	40,4	41,2
Sp6 (Des 1)	28,3	43	47,9	49,6	Sp7 (Des 1)	25,9	41,5	46,5	48,3
Sp6 (Des 2)	26,2	42	48,8	52,1	Sp7 (Des 2)	24,3	40,6	47,8	51,4
Sp6 (Des 3)	34,3	59	68,7	70,7	Sp7 (Des 3)	28,5	57,5	66,4	69,4

(c)

(d)

	TEMPERATURAS (°C)					TEMPERATURAS (°C)			
PONTOS	1 min	10 min	20 min	40 min	PONTOS	1 min	10 min	20 min	40 min
Sp8 (Ref)	23,3	35,1	39,9	40,7	Média (Ref)	23,7	36	41	41,7
Sp8 (Des 1)	25	40,3	45,6	47,6	Média (Des 1)	25,9	41,4	46,5	48,5
Sp8 (Des 2)	24,2	40,6	47,7	50,8	Média (Des 2)	24,7	41,9	49,5	53,3
Sp8 (Des 3)	26,5	55,8	64,7	67	Média (Des 3)	28,3	56,1	64,5	67,2

(e)

(f)

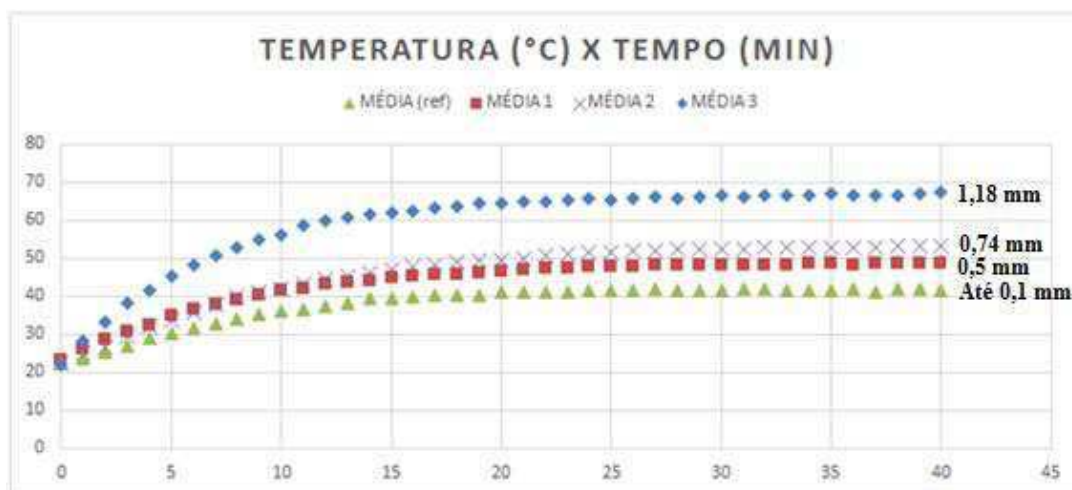
Fonte – Autoria própria

Durante o ensaio, percebe-se que no primeiro minuto do experimento que apresenta a falha muito acima do limite de tolerância de desalinhamento já há um aquecimento bem mais elevado da área de contato do acoplamento visto que este chega a mais de 34°C, estando bem acima dos demais ensaios. Além disso, percebe-se também que este calor já se expande para as demais partes do acoplamento de forma bem mais evidente, diferente dos outros ensaios. Indicando a maior relevância da geração de calor no acoplamento.

A temperatura da área de contato do acoplamento encontra-se bem mais elevada que nos demais ensaios, chegando a mais de 70°C ao final do experimento, indicando uma elevação do atrito no local e conseqüentemente maior geração de calor. Há também o aquecimento por conta da condução do calor pelo eixo, entretanto, a geração de calor acarretada pelo atrito no próprio acoplamento é bem mais significativa quando comparada aos ensaios anteriores já que a temperatura do acoplamento se encontra bem mais elevada antes mesmo da condução que ocorre pelos eixos.

No Gráfico 8, pode ser vista a comparação entre o aquecimento médio do acoplamento durante os ensaios realizados.

Gráfico 8 - Gráfico comparativo 3



Fonte – Autoria própria.

Conforme pode ser visto no Gráfico 8, quanto maior o desalinhamento presente no acoplamento, o seu aquecimento torna-se mais elevado apesar de todos apresentarem características semelhantes.

Ao se comparar todos os ensaios, é possível notar a existência de uma correlação entre o nível de desalinhamento do sistema e seu aquecimento. Contudo, este aquecimento apenas se torna mais evidente quando o desalinhamento se encontra em níveis bem mais elevados que o tolerado, havendo uma geração de calor bem maior na área de contato do acoplamento que nos demais ensaios. Esta observação condiz com um resultado apresentado em Pacholok (2004), onde é indicado que o aquecimento do elemento flexível do acoplamento estudado por ele somente se torna evidente para níveis de desalinhamento muito acima dos limites de tolerância.

É notado que, para baixos níveis de desalinhamento, o aquecimento do acoplamento não é muito significativo quando se compara a níveis mais elevados visto sua menor geração de calor no acoplamento, menor diferença de temperatura com relação ao ensaio de referência e a influência da condução de calor proveniente dos eixos.

Para todos os experimentos, foi percebido, também, que a partir de 20 a 25 minutos há uma estabilização da temperatura do acoplamento. Semelhante ao que ocorreu em Cabral (2017), onde foi observado que os rolamentos estudados estabilizavam sua temperatura na faixa dos 25 a 40 minutos e mantinham-se até os 60 minutos. Isto se dá pela similaridade de massa entre os experimentos.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar se a técnica da Termografia pode auxiliar a detectar falhas de montagem causada por desalinhamento paralelo vertical em acoplamento do tipo garra modelo GR 50. Para tanto, foi realizada revisão da literatura envolvendo os seguintes temas: manutenção industrial, acoplamentos de eixos, falhas em acoplamentos, desalinhamentos de eixos, radiação térmica e Termografia. Em seguida, foi elaborada a metodologia do trabalho para obtenção dos dados e após obtê-los e discutí-los é possível concluir que:

- A temperatura do acoplamento aumenta na mesma proporção dos níveis de desalinhamento inseridos.
- A rotação do acoplamento e do eixo causa deslocamento de ar, mas estes deslocamentos não alteram as temperaturas registradas, não levando a erros de medição.
- O aumento de temperatura observado é significativo para níveis de desalinhamentos superiores aos estabelecidos pelo fabricante a ponto de auxiliar na detecção de falhas por montagem somente nos vinte primeiros minutos do acionamento do sistema. Após isto a temperatura se distribui de forma uniforme dificultando tal detecção.

Diante do exposto, é possível concluir que a técnica da Termografia pode ser usada na detecção de falhas por montagem em acoplamentos flexíveis do tipo garra, modelo GR 50, nos momentos iniciais de seu funcionamento ou nas fases iniciais de testes antes da operação do sistema.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como o trabalho não termina neste presente estudo, faz-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Realizar os experimentos com a presença de cargas fixas e variáveis;
- Realizar experimentos com desalinhamento paralelo horizontal, angular vertical e/ou angular horizontal;
- Realizar experimentos com tipos variados de acoplamentos;
- Realizar estudos com relação a perda de eficiência energética ocasionada pelo desalinhamento.

REFERÊNCIAS

- ABECOM. **Alinhamento de eixos**. Disponível em: < <http://www.abecom.com.br/servicos/manutencao-preditiva/alinhamento-de-eixos/> > Acesso em: 15 Ago, 2017, 21:30.
- ACIONAC. **Catálogo de acoplamentos**. Disponível em: < <http://www.acionac.com.br/2011/Produtos/Acoplamentos/> > Acesso em: 15 Ago. 2017, 20:00.
- ANTHANASOPOULOS, N. G. BOTSARIS, P. N. A comparative analysis of Bearing Fault, Using Infrared Thermography, Vibration Analysis and Air-borne Sound. Democritus University of Thrace, Grecia, 2013
- ARAUJO, M. C. **Utilização de câmeras por infravermelho para avaliação de diferentes patologias em clima tropical e uso conjunto de sistemas de banco de dados para detecção de câncer de mama**. 68 f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- BAGAVATHIAPPAN, S. et al. Infrared thermography for condition monitoring - A review. **Infrared Physics and Technology**, v. 60, p. 35–55, 2013.
- BOMFIM, P. R. S. **Estudo experimental da potencialidade do uso da termografia para avaliação do desalinhamento de máquinas na indústria**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.
- CARAMALHO, A. **25 anos em Termografia**. 1. ed. Portugal, Bubok, 2012.
- CABRAL, A. S. **Estudo Termográfico de auxílio à detecção de falhas por desgaste mecânico em rolamento autocompensador de esferas**. 2017. 113 p. dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Estado da Paraíba, 2017.
- CENGEL, Y. A.; GAHJAR, A. J. **Heat and mass transfer : fundamentals e applications**. 5. ed. McGraw-Hill Education, Nova York, 2015.
- CHRZANOWSKI, K. **Non-Contact Thermometry: Measurement Errors**. v. 7. SPIE-PL, Polônia, 2001.
- DUAN, L. et al. Segmented infrared image analysis for rotating machinery fault

diagnosis. **Infrared Physics & Technology**, v. 77, p. 267–276, 2016.

FLIR. **Modelos da série Exx da Flir**. Disponível em <<http://www.flir.com.br/instruments/e75-e85-e95/>> Acesso em 24 Ago, 2017, 19:30.

HELLIER, C. J. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. McGraw-Hill Companies: Estados Unidos, 2003.

HOWELL, J. R.; MENGUÇ, M. P.; SIEGEL, R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 6. ed. CRC Press, 2016.

INCROPERA, F. P.; DEWWITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7 ed. 2011.

JANSSENS, O. et al. Thermal image based fault diagnosis for rotating machinery. **Infrared Physics & Technology**, v. 73, p. 78–87, 2015.

JARDINE, A. K. S. LIN, D. BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483–1510, 2006.

KARDEC, A. NASCIF, J. **Manutenção função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: 2010.

LOUVAIN, C. L. CABRAL, L. C. GOMES, K. R. Aplicação da Termografia na Manutenção preditiva. **Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 1, p. 109–112, 2010.

MADMIL. **Acoplamentos**. Disponível em <<http://www.mademil.com.br/produtos/acoplamentos-6>> Acesso em: 15 Ago, 2017, 20:20.

MARIBONDO, J. F. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares**. 2000, 301 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2000.

METALFLEX. **Acoplamento de engrenagem**. Disponível em <<http://acoplamentosmetalflex.com.br/produtos/acoplamentos-de-engrenagem-metalflex-gm.php>> Acesso em: 15 Ago, 2017, 20:40.

MINKINA, W. DUDZIK, S. **Infrared Thermography: Erros and Uncertainties**. Reino Unido, 2009.

MOBLEY, R. K. **Maintenance Fundamentals**. 2. ed. 2004.

MOHANTY, A. R. FATIMA, S. Shaft misalignment detection by thermal imaging of support bearings. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 21, p. 554–559, 2015.

NAVEGA, M. B. J. JÚNIOR, O. E. F. D. Manutenção Preditiva em bombas. **Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, p. 173–177, 2012.

NOGUEIRA, J. C. B. REIS, V. P. Emprego da termografia na inspeção preditiva. **Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 1, p. 29–35, 2010.

PACHOLOK, M. **Uso Da Termografia Para Avaliação Do Desalinhamento De Eixos De Máquinas Rotativas: Uma ferramenta Auxiliar à Análise de Vibrações**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Católica do Paraná, 2004.

PAKALE, M. S. S. TULJAPURE, M. S. B. Causes of Coupling Failures and preventive Actions. **Pumps Valves and Systems**, v. 3, n. Viii, p. 412–415, 2015.

PIOTROWSKI, J. **Shaft misalignment**. 3 ed. CRC Press, 2007.

PROCEL INDÚSTRIA. **Acoplamento motor de carga: Guia básico**. Edição seriada. 142 p. Brasília, DF, 2009.

PRUFTECHNIK . **Alinhamento de eixos**. Disponível em < <https://www.pruftechnik.com/br/solucoes/aplicacoes/alinhamento-de-eixos.html>> Acesso em: Jul, 2017.

RINGFEDER. **Acoplamento de fole**. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/ringfeder-power-transmission/product-14629-1661871.html>> Acesso em: 15 Ago, 2017, 20:30

SCROUBELOS, G. TATAKIS, A. **Ir thermography maintenance**. Disponível em < [http://www.maintworld.com/Applications/IR-Thermography-in-Maintenance/\(offset\)/7](http://www.maintworld.com/Applications/IR-Thermography-in-Maintenance/(offset)/7)> Acesso em 10 Mai, 2017.

SIEMENS. **Acoplamento de disco**. Disponível em < <http://www.directindustry.com/pt/prod/siemens-ag-pd-mechanical-drives/product-7015-1297641.html>> Acesso em: 15 Ago, 2017, 19:30

SILVA, E. L. MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração da dissertação**. 4^a ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005

SILVA JR, José Jorge da. **Análise de óleos lubrificantes sob a ótica da Termografia em ensaios de atrito cisalhante**. 2017, 166 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2017.

SKS. **SKF Power transmission products catalogue: Coupling**. Disponível em < <http://www.skfpt.com/CategorySearch/Index/5> > Acesso em: 05 Agosto, 2017. 22:00

SOUSA, L. F. R. **Aplicação te Termografia no estudo do isolamento térmico de edifícios**. Universidade de Aveiro, 2010.

TONKS, O. WANG, Q. The detection of wind turbine shaft misalignment using temperature monitoring. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 17, p. 71–79, 2016.

UFCG. **Laboratório de Vibração e Instrumentação** (2018). Disponível em: <http://dem.ufcg.edu.br/?page_id=650> Acesso em: 11 Jan, 2018.

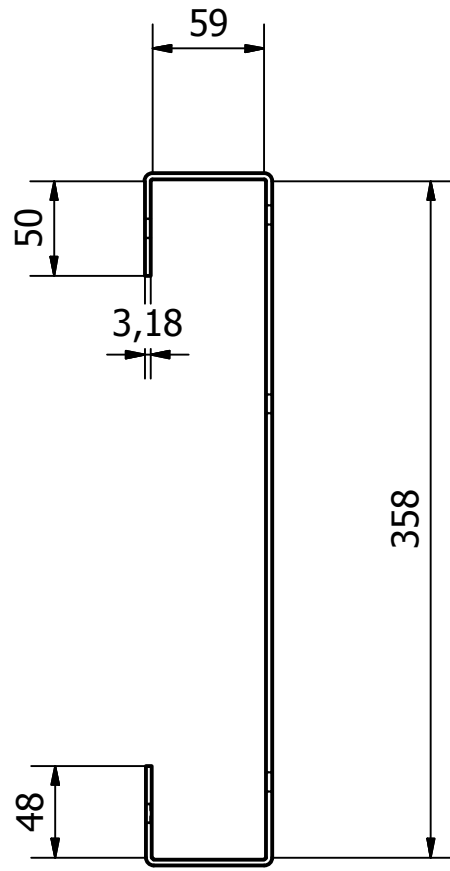
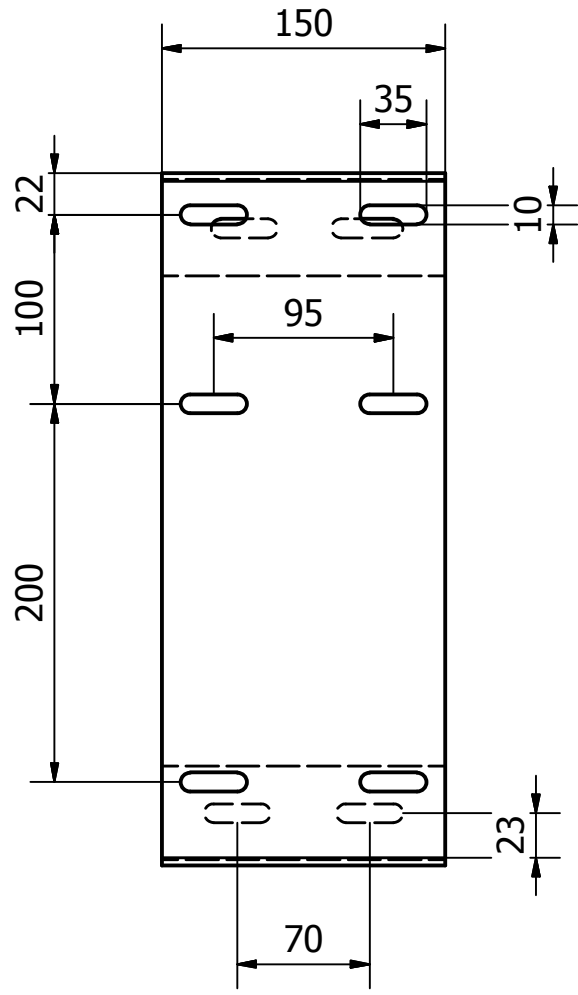
USP. **Espectro eletromagnético** (2018). Disponível em: <<http://stoa.usp.br/rafaelrubim/weblog/98168.html>> Acesso em: 11 Jan, 2018.

WEGCESTARI. **Acoplamento de corrente**. Disponível em: <<http://www.wegcestari.com.br/index.php/pt/produtos/acoplamentos/lc>> Acesso em: 15 Ago, 2017, 21:00

WIDODO, A. et al. Confirmation of thermal images and vibration signals for intelligent machine fault diagnostics. **International Journal of Rotating Machinery**, 2012.

YOUNUS, A. M. D. YANG, B. S. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 2, p. 2082–2091, 2012.

APÊNDICE



ANEXO

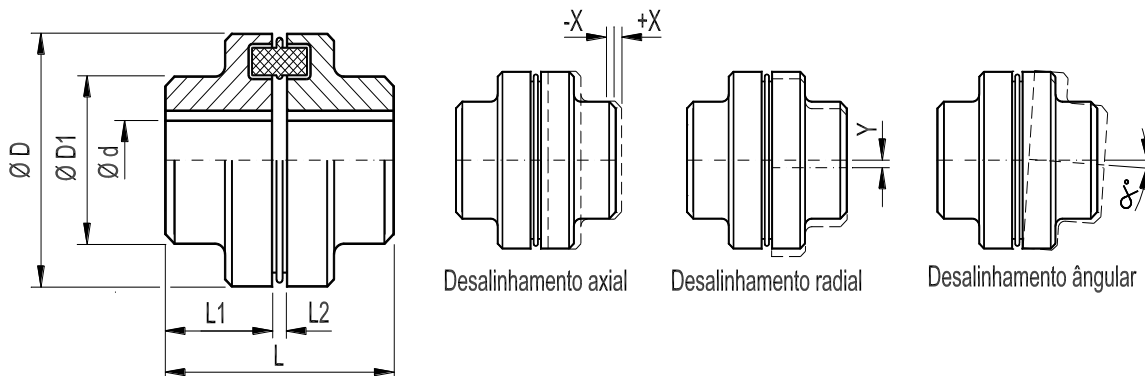


► **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

- Os acoplamentos MADEFLEX GR são compostos por dois cubos simétricos de ferro fundido cinzento, e um elemento elástico alojado entre eles, de borracha sintética de elevada resistência a abrasão.
- Esta configuração torna apto ao acoplamento MADEFLEX GR ser torcionalmente elástico e flexível em todas as direções, absorvendo vibrações, choques, desalinhamentos radiais, axiais e angulares; protegendo desta forma os equipamentos acoplados.
- Estes acoplamentos permitem trabalho em posição horizontal e vertical, desde que corretamente fixados, e aceitam reversões de movimentos. Podem ser usados em temperaturas de -20 a 80C° .
- Em função de sua forma construtiva simples, dispensam cuidados e ferramentas especiais para sua montagem, tornando este trabalho rápido e fácil.
- Não necessitam manutenção e nem lubrificação.
- Os acoplamentos são fornecidos na cor alaranjado (Esmalte Epóxi HB Munsell 2,5 YR 6/14 Laranja Segurança).
- São compactos, possuem baixo peso, e conseqüentemente um baixo momento de inércia J.
- Os acoplamentos são fornecidos com o cubo sem furo, sob pedido podem ser fornecidos os furos na configuração desejada pelo cliente ou o padrão que consiste de um furo e canal de chaveta conforme DIN 6885, tolerância ISO H7 e dois furos roscados a 90° com parafusos DIN 916 para fixação axial.
- Para altas rotações recomendamos balanceamento dinâmico segundo ISO 1940-1, Q 6,3 no mínimo.

Tabela 1 Características técnicas dos Acoplamentos MADEFLEX GR

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	D	D1	Ø máx	L	L1	L2	Torque Nominal kgf·m	rpm máx.	J Kg·m ²	Peso total	Desalinhamento		
												Axial ± X	Radial Y	Angular α°
9.15	GR 050	50	33	22	54	26	2,0 ± 0,5	2,3	12500	0,0002	0,47	0,5	0,5	1,5
9.16	GR 067	67	46	30	64,5	31	2,5 ± 0,5	4,0	10000	0,0004	0,96	0,5	0,5	1,5
9.17	GR 082	82	57	38	85	41	3,0 ± 1,0	9,0	8000	0,0012	1,92	1,0	0,5	1,5
9.18	GR 097	97	68	45	105	51	3,0 ± 1,0	18,9	7000	0,0028	3,60	1,0	0,5	1,5
9.19	GR 112	112	79	50	125,5	61	3,5 ± 1,0	30,0	6000	0,0052	5,30	1,0	0,5	1,2
9.20	GR 128	128	90	60	145,5	71	3,5 ± 1,0	48,2	5000	0,0112	8,06	1,0	0,6	1,2
9.21	GR 148	148	107	70	165,5	81	3,5 ± 1,0	75,0	4500	0,0190	12,56	1,0	0,6	1,2
9.22	GR 168	168	124	80	185,5	91	3,5 ± 1,5	125	4000	0,0460	18,82	1,5	0,6	1,2
9.23	GR 194	194	140	90	205,5	101	3,5 ± 1,5	200	3500	0,0950	27,29	1,5	0,7	1,2
9.24	GR 214	214	157	98	224	110	4,0 ± 2,0	304	3000	0,1506	36,62	2,0	0,7	1,2
9.25	GR 240	240	180	112	247	121,5	4,0 ± 2,0	485	2750	0,2506	52,62	2,0	0,7	1,2
9.26	GR 265	265	198	125	285,5	140	5,5 ± 2,5	592	2500	0,4306	68,00	2,5	0,7	1,2
9.27	GR 295	295	214	135	308	150	8,0 ± 2,5	770	2250	0,6856	88,90	2,5	0,8	1,2
9.28	GR 330	330	248	160	330	161	8,0 ± 2,5	1009	2000	1,2606	128,0	2,5	0,8	1,0



Fundição Mademil Ltda.

Rua Giacomo Milanez, 708- CEP. 88868-000 – Caravaggio – Nova Veneza – SC
Fone Indústria: 0**48 3436-6441 / e-mail:vendas1@mademil.com.br
Fone Revenda: 0**48 3436-6404 / e-mail:vendas@mademil.com.br
Home page: www.mademil.com.br



SELEÇÃO DE ACOPLAMENTOS ELÁSTICO MADEFLEX GR (COM GARRAS)

Tabela 2 Seleção de Acoplamentos tipo MADEFLEX GR

Motor 860 rpm – 8 Pólos						Motor 1160 rpm – 6 Pólos					
Menor acoplamento para acomodar o eixo do motor						Menor acoplamento para acomodar o eixo do motor					
Motor Cv	Fator de serviço Fc					Motor Cv	Fator de serviço Fc				
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5		1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
0,25	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	0,25	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
0,33	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	0,33	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
0,50	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	0,50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
0,75	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	0,75	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
1,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	1,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67
1,50	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 82	1,50	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67
2,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 82	GR 82	2,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 82
3,00	GR 82	GR 82	GR 82	GR 82	GR 82	3,00	GR 67	GR 67	GR 82	GR 82	GR 82
4,00	GR 82	GR 82	GR 82	GR 97	GR 97	4,00	GR 67	GR 82	GR 82	GR 82	GR 82
5,00	GR 82	GR 82	GR 97	GR 97	GR 97	5,00	GR 82	GR 82	GR 82	GR 97	GR 97
6,00	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	6,00	GR 82	GR 82	GR 97	GR 97	GR 97
7,50	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	GR 112	7,50	GR 82	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97
10,0	GR 97	GR 97	GR 112	GR 112	GR 112	10,0	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	GR 112
12,5	GR 112	GR 112	GR 112	GR 112	GR 128	12,5	GR 97	GR 97	GR 97	GR 112	GR 112
15,0	GR 112	GR 112	GR 112	GR 128	GR 128	15,0	GR 97	GR 97	GR 112	GR 112	GR 128
20,0	GR 112	GR 128	GR 128	GR 128	GR 148	20,0	GR 97	GR 112	GR 112	GR 128	GR 128
25,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 148	GR 148	25,0	GR 112	GR 112	GR 128	GR 128	GR 148
30,0	GR 128	GR 128	GR 148	GR 148	GR 168	30,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 148	GR 148
40,0	GR 128	GR 148	GR 168	GR 168	GR 168	40,0	GR 128	GR 148	GR 148	GR 148	GR 168
50,0	GR 148	GR 168	GR 168	GR 168	GR 194	50,0	GR 148	GR 148	GR 168	GR 168	GR 168
60,0	GR 148	GR 168	GR 168	GR 194	GR 194	60,0	GR 148	GR 148	GR 168	GR 168	GR 194
75,0	GR 168	GR 168	GR 194	GR 194	GR 214	75,0	GR 148	GR 168	GR 168	GR 194	GR 194
100	GR 168	GR 194	GR 194	GR 214	GR 214	100	GR 168	GR 168	GR 194	GR 194	GR 214
125	GR 194	GR 194	GR 214	GR 240	GR 240	125	GR 168	GR 194	GR 194	GR 214	GR 214
150	GR 194	GR 214	GR 240	GR 240	GR 240	150	GR 194	GR 194	GR 214	GR 214	GR 240
175	GR 240	GR 240	GR 240	GR 240	GR 265	175	GR 194	GR 214	GR 214	GR 240	GR 240
200	GR 240	GR 240	GR 240	GR 265	GR 265	200	GR 194	GR 214	GR 240	GR 240	GR 240
Motor 1750 rpm – 4 Pólos						Motor 3500 rpm – 2 Pólos					
Menor acoplamento para acomodar o eixo do motor						Menor acoplamento para acomodar o eixo do motor					
Motor Cv	Fator de serviço Fc					Motor Cv	Fator de serviço Fc				
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5		1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
0,25	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	0,25	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
0,33	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	0,33	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
0,50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	0,50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
0,75	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	0,75	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
1,00	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	1,00	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
1,50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	1,50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
2,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	2,00	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50	GR 50
3,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 82	3,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67
4,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 82	GR 82	4,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67
5,00	GR 67	GR 67	GR 82	GR 82	GR 82	5,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67
6,00	GR 67	GR 82	GR 82	GR 82	GR 82	6,00	GR 67	GR 67	GR 67	GR 67	GR 82
7,50	GR 82	GR 82	GR 82	GR 97	GR 97	7,50	GR 67	GR 67	GR 67	GR 82	GR 82
10,0	GR 82	GR 82	GR 97	GR 97	GR 97	10,0	GR 82	GR 82	GR 82	GR 82	GR 82
12,5	GR 82	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	12,5	GR 82	GR 82	GR 82	GR 82	GR 97
15,0	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	GR 112	15,0	GR 82	GR 82	GR 82	GR 97	GR 97
20,0	GR 97	GR 97	GR 112	GR 112	GR 112	20,0	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97
25,0	GR 97	GR 112	GR 112	GR 112	GR 128	25,0	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97
30,0	GR 112	GR 112	GR 112	GR 128	GR 128	30,0	GR 97	GR 97	GR 97	GR 97	GR 112
40,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 128	GR 148	40,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 128	GR 112
50,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 148	GR 148	50,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 128	GR 128
60,0	GR 128	GR 128	GR 148	GR 148	GR 168	60,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 128	GR 128
75,0	GR 128	GR 148	GR 148	GR 168	GR 168	75,0	GR 128	GR 128	GR 128	GR 128	GR 148
100	GR 148	GR 168	GR 168	GR 168	GR 194	100	GR 128	GR 128	GR 148	GR 148	GR 148
125	GR 168	GR 168	GR 168	GR 194	GR 194	125	GR 148	GR 148	GR 148	GR 148	GR 168
150	GR 168	GR 168	GR 194	GR 194	GR 214	150	GR 148	GR 148	GR 148	GR 168	GR 168
175	GR 168	GR 194	GR 194	GR 214	GR 214	175	GR 148	GR 148	GR 168	GR 168	GR 194
200	GR 168	GR 194	GR 194	GR 214	GR 214	200	GR 148	GR 168	GR 168	GR 168	GR 194
250	GR 194	GR 194	GR 214	GR 240	GR 240	250	GR 168	GR 168	GR 194	GR 194	GR 194

► DADOS NECESSÁRIOS PARA SELECIONAR UM ACOPLAMENTO

Máquina acionadora (Fs)?	Dimensões dos eixos da máquina acionadora e acionada?
Máquina acionada (Fs)?	Número de horas de trabalho por dia (Ft)?
Potência necessária (Cv)?	Número de partidas por hora (Fp)?
Rotação de operação (rpm)?	Condições ambientais?

► COMO SELECIONAR UM ACOPLAMENTO?

▪ MÉTODO DE SELEÇÃO 1

1. Selecionar o fator de serviço **F_s** em função do tipo de máquina acionadora e a máquina acionada na **Tabela 3**;
2. Selecionar o fator de serviço **F_t** em função do número de horas que a máquina trabalha por dia na **Tabela 4**;
3. Selecionar o fator de serviço **F_p** em função do número de partidas por hora que a máquina na **Tabela 5**;
4. O fator de serviço **F_c** usado nos cálculos e nas tabelas de seleção é: **F_c = F_s · F_t · F_p** (Se o valor de **F_c** for maior que 3,5, usar o **método de seleção 2**);
5. Na **Tabela 2** seleção de acoplamento tipo MADEFLEX GR, seleciona-se o tamanho do acoplamento na interseção da potência (**Cv**) com o fator de serviço (**F_c**).
6. Na tabela 2 os acoplamentos estão selecionados para uso em eixos de motores elétricos, para uso com outros tipos de motores, e para a parte movida deve-se observar que o diâmetro do eixo **Ø_d**, seja menor ou igual ao diâmetro máximo **Ø_{d máx.}** do acoplamento, ver tabela 1 nas características técnicas do acoplamento.

▪ MÉTODO DE SELEÇÃO 2

1. Para fatores de serviço **F_c** maiores que 3,5, e velocidades diferentes daquelas encontradas na tabela 2 devemos selecionar o tamanho do acoplamento de forma que o **torque (kgfm)** calculado pela fórmula abaixo seja menor ou igual ao **torque kgfm** da tabela 1.

$$\text{Torque} = 716,2 \cdot \frac{N \cdot F_c}{n} \text{ (kgfm)}$$

Onde: **N** = Potência (Cv)
n = Rotação de trabalho do acoplamento (rpm)
F_c = F_s · F_t · F_p Fator de serviço

2. Observar que a velocidade máxima **rpm máx.** do acoplamento seja menor ou igual aos valores na tabela 1.
3. Os diâmetros **Ø_d**, dos eixos das partes motoras e movidas devem ser iguais ou menores que os valores de **Ø_{d máx.}** dos acoplamentos, tabela 1.

Tabela 3 FATORES DE SERVIÇO (Fs)

Máquina acionadora, motor de combustão interna, 1 a 3 cilindros
Máquina acionadora, motor de combustão interna, 4 a 6 cilindros
Máquina acionadora, motor elétrico, turbina a gás e turbina vapor

TIPO DE CARGA	TIPO DE MÁQUINA ACIONADA	F _s	F _s	F _s
Leve	Alimentadores, Agitadores, Bombas centrífugas, Compressor de parafuso, Cortadoras de metais, Decantadores, Classificadores, Clarificadores, Dinamômetros, Geradores, Filtros de ar, Máquinas de engarrafar, Ventiladores centrífugos,	1	1,5	2
Moderado	Agitadores, Betoneiras, Bobinadeiras, Compressor de lóbulos, Correias transportadoras, Cozinhadores de cereais, Desbobinadeiras, Eixos de transmissão, Elevadores de carga e canecas, Escadas rolantes, Esticadores, Filtros rotativos e de prensa, Fornos rotativos, Impressoras, Máquinas Ferramentas, Máquinas para madeira, Máquinas para massas, Máquinas Têxteis, Mesa de transferência, Misturadores, Secadores, Puxador de carros, Ventiladores de minas,	1,5	2	2,5
Pesado	Aeradores, Bomba de poço profundo, Bomba para petróleo, Calandras, Cortadora de papel, Descascadores, Desfibradeiras, Desempenadeiras, Dragas, Elevadores de passageiros, Extrusoras, Fornos rotativos, Guinchos, Guindastes, Impressoras, Lavadoras, Moinhos, Máquinas de lavanderia, Moendas, Pontes Rolantes, Prensas, Secadores, Trefiladores, Torres de resfriamento, Transportadores,	2	2,5	3
Muito pesado Alta inércia Inversão de rotação	Basculadores de vagões, Britadores, Bombas alternativas ou reciprocas, Compressores alternativos ou reciprocas, Geradores para solda, Laminadoras, Máquina de fabricação de pneus, Misturadores de borracha, Peneira vibradora, Trituradores,	2,5	3	3,5

Nº de horas de trabalho por dia	F _t
≤ 2	0,9
3 - 12	1
13 - 16	1,1
17 - 24	1,2

Tabela 4
Fator de serviço

Nº de partidas por hora	F _p
≤ 5	1,0
5 - 20	1,2
20 - 40	1,3

Tabela 5
Fator de serviço

- ▶ Para selecionar um acoplamento para um puxador de carros acionado por motor elétrico de 10 Cv, 1750 rpm, que opera 16 horas por dia, e possui 15 partidas por hora, temos que seguir os seguintes passos:
- 1º Localizar o fator de serviço F_s , na tabela 3, o tipo de carga da máquina acionada, neste caso puxador de carros, é carga moderada, localizada na segunda linha. Na parte superior desta tabela localizamos o tipo de máquina acionadora, que é um motor elétrico, terceira linha. Na interseção destas duas linhas achamos o fator de serviço $F_s = 1,5$.
 - 2º Localizar o fator de serviço F_t em função do número de horas de trabalho por dia, ver tabela 4, neste caso como são 16 h/dia $F_t = 1,1$.
 - 3º Localizar o fator de serviço F_p em função do número de partidas por hora, ver tabela 5, neste caso são 15 partidas por hora então $F_p = 1,2$.
 - 4º O fator de serviço $F_c = F_s \cdot F_t \cdot F_p$; substituindo os valores tem-se $F_c = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,2$; então $F_c = 1,98$, para efeito de cálculo adotamos $F_c = 2$.
 - 5º Agora para selecionar-mos um acoplamento MADEFLEX GR, vamos até a tabela 2, escolhemos o quadro que indica 1750 rpm, pois esta é a velocidade do motor. Com o fator de serviço $F_c = 2$, segunda coluna deste quadro, e com a potência do motor 10 Cv, décima terceira linha, teremos uma interseção que indica **GR 82**. Este é o acoplamento indicado neste caso, para conhecer as dimensões deste acoplamento ver tabela 1, características técnicas do acoplamento MADEFLEX GR.

- ▶ Para selecionar um acoplamento para um triturador acionado por um motor de combustão 4 cilindros com 50 Cv e 2500 rpm, que opera 15 horas por dia, temos que seguir os seguintes passos:
- 1º Primeiro achamos os fatores de serviço da mesma forma que no exemplo anterior, neste caso da tabela 3 para triturador acionado por motor de combustão com 4 cilindros $F_s = 3$. Da tabela 4 obtemos o fator de serviço para o número de horas de trabalho por dia, assim para 15 h/dia $F_t = 1,1$. Como o triturador parte menos que 5 vezes por hora localizamos $F_p = 1$ na tabela 5,.
 - 2º Com os valores dos fatores de serviço calculamos o fator de serviço $F_c = F_s \cdot F_t \cdot F_p$; adotando os valores achados $F_c = 3,0 \cdot 1,1 \cdot 1$; então $F_c = 3,3$.
 - 3º Como podemos observar o fator de serviço $F_c = 3,3$ não é tabelado, além disto, este valor de velocidade 2500 rpm também não é tabelado, assim sendo devemos usar o método de seleção 2.
 - 4º Este método consiste em calcular o torque com a seguinte fórmula:

$$\text{Torque} = 716,2 \cdot \frac{N \cdot F_c}{n} \text{ (kgfm)}$$



Neste caso: N é a potência do motor, 50 Cv; e n é a rotação do motor 2500 rpm.
Obs.: Nesta fórmula N deve ser sempre em Cv, e n em rpm.

Substituindo os valores:

$$\text{Torque} = 716,2 \cdot \frac{50 \cdot 3,3}{2500} ; \text{Então Torque} = 47,27 \text{ kgf}\cdot\text{m}$$

- 5º Com o valor de torque devemos ir para a tabela 1 caso desejarmos escolher um acoplamento do tipo MADEFLEX GR. Na coluna que indica o Torque escolhemos um valor imediatamente superior ao valor calculado, que é 47,27 kgf•m. Na tabela o valor que atende esta solicitação é 48,2 kgf•m, que é o valor que o acoplamento GR128 suporta; portanto o acoplamento selecionado é: **GR 128**.

Obs.: Sempre deve ser observado se os diâmetros dos eixos onde o acoplamento será montado é compatível com o diâmetro máximo que o mesmo comporta, segunda coluna onde se lê $\varnothing d \text{ máx.}$ na tabela 1. Também deve ser observada a máxima rotação admissível para o acoplamento **rpm máx.**

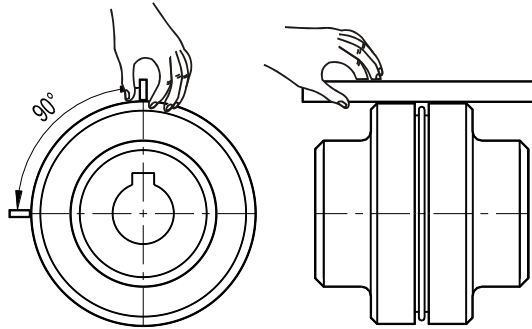
Na seleção de um acoplamento deve-se sempre usar $F_c \geq 1,5$.

Fundação Mademil Ltda

Rua Giacomo Milanez, 708- CEP 88868-000 – Caravaggio – Nova Veneza – SC
Fone Indústria: 0**48 3436-6441 / e-mail:vendas1@mademil.com.br
Fone Revenda: 0**48 3436-6404 / e-mail:vendas@mademil.com.br
Home page: www.mademil.com.br

1. Verificar se os eixos e os cubos dos acoplamentos estão limpos e sem rebarbas;
2. Montar os dois cubos nos eixos a serem acoplados e fixa-los axialmente;
3. Montar o elemento elástico em um dos cubos;
4. Acoplar as máquinas;
5. Alinhar as máquinas com o auxílio de uma régua, este procedimento deve ser realizado em duas posições a 90° uma da outra, conforme figura abaixo.

Atenção: devem ser respeitados os valores de desalinhamentos máximos admissíveis que são encontrados na tabela 1. O correto alinhamento aumenta a vida útil do elemento elástico e evita esforços sobre os mancais das máquinas acopladas.



► TROCA DO ELEMENTO ELÁSTICO

1. Deslocar axialmente uma das máquinas acopladas;
2. Substituir o elemento elástico;
3. Acoplar as máquinas observando os mesmos procedimentos de montagem, principalmente respeitando os valores de desalinhamentos máximos admissíveis.

ACOPLAMENTO COMPLETO*			CUBOS SEM ELEMENTO (PAR)	ELEMENTO DE BORRACHA**
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	COMPATÍVEL	CÓDIGO	CÓDIGO
9.15	Acoplamento GR 050	VULKAN E50	9.15/1	9.15B
9.16	Acoplamento GR 067	VULKAN E67	9.16/1	9.16B
9.17	Acoplamento GR 082	VULKAN E82	9.17/1	9.17B
9.18	Acoplamento GR 097	VULKAN E97	9.18/1	9.18B
9.19	Acoplamento GR 112	VULKAN E112	9.19/1	9.19B
9.20	Acoplamento GR 128	VULKAN E128	9.20/1	9.20B
9.21	Acoplamento GR 148	VULKAN E148	9.21/1	9.21B
9.22	Acoplamento GR 168	VULKAN E168	9.22/1	9.22B
9.23	Acoplamento GR 194	VULKAN E194	9.23/1	9.23B
9.24	Acoplamento GR 214	VULKAN E214	9.24/1	9.24B
9.25	Acoplamento GR 240	VULKAN E240	9.25/1	9.25B
9.26	Acoplamento GR 265	VULKAN E265	9.26/1	9.26B
9.27	Acoplamento GR 295	VULKAN E295	9.27/1	9.27B
9.28	Acoplamento GR 330	VULKAN E330	9.28/1	9.28B

*IPI DO CONJUNTO – 0% **IPI DO ELEMENTO – 8%

Acoplamentos sem acessórios são vendidos em par.

Fundição Mademil Ltda.

Rua Giacomo Milanez, 708 - CEP. 88868-000 – Caravaggio – Nova Veneza – SC
 Fone Indústria: 0**48 3436-6441 / e-mail: vendas1@mademil.com.br
 Fone Revenda: 0**48 3436 6404 / e-mail: vendas@mademil.com.br
 Home page: www.mademil.com.br