

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Francisca Cibele da Silva

**ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO AO DIAGNOSTICO DE FALHAS MECÂNICAS
EM PISTAS DE ROLAMENTO: o caso dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem
blindagem**

Campina Grande, PB

2016

Francisca Cibele da Silva

**ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO AO DIAGNOSTICO DE FALHAS MECÂNICAS
EM PISTAS DE ROLAMENTO: o caso dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem
blindagem**

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

Área de concentração: Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

Orientador: Juscelino de Farias Maribondo – Dr.

Campina Grande, PB.

2016

Francisca Cibele da Silva

**ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO AO DIAGNOSTICO DE FALHAS MECÂNICAS
EM PISTAS DE ROLAMENTO: o caso dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem
blindagem**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica.

Aprovada em 31 de agosto de 2016.

Bancada Examinadora

Prof^{or}. Juscelino de Farias Maribondo - Dr. PPGEM – UFCG.

Orientador

Prof^{or}. Cícero de Souto – Dr. PPGEM – UFPB.

Membro externo

Prof^{or}. Enivaldo Santos Barbosa – Dr. PPGEM – UFCG.

Membro externo

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586e

Silva, Francisca Cíbele da.

Estudo termográfico de auxílio ao diagnóstico de falhas mecânicas em pistas de rolamento: o caso dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem blindagem / Francisca Cíbele da Silva. – Campina Grande, 2016.

122 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Juscelino de Farias Maribondo.

Referências.

1. Elementos de Máquina. 2. Termografia. 3. Sistemas Mecânicos.
 4. Rolamentos. 5. Vibrações Mecânicas. I. Maribondo, Juscelino de Farias.
- II. Título.

CDU 621.81(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida por manter-me firme em fé e nas promessas alcançadas.

Agradeço acima de tudo, a minha família, em especial minha mãe (Lúcia) e avó (Severina), que diante de todas as dificuldades estiveram presentes incansavelmente, sempre perseverantes em todas as angústias e alegrias.

Agradeço ao meu orientador e professor Dr. Juscelino de Farias Maribondo, por aceitar orientar-me tendo em vista a minha formação em Design. Ressaltando a sua infinita paciência, os conselhos acadêmicos e pessoais, como também as advertências quando necessárias a fim de aperfeiçoar os procedimentos metodológicos e experimentais e conclusão desta pesquisa.

Agradeço também a todos os professores e servidores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFCG, aos meus colegas de pesquisa, as novas amizades formadas em especial à Verônica Pinto, Débora da Silva, Kalina Brito, à Morgana Vasconcelos pelas inúmeras aulas e estudos em cálculos para engenharia e ao Richard Senko pela ajuda nos experimentos.

Agradeço em especial ao Tadeu Castro da Silva, pesquisador da UNB, pela enorme contribuição acadêmica, co-orientação na montagem dos experimentos e estudos voltados a área de Termografia e a incrível disponibilidade em ajudar-me na análise de resultados termográficos.

Agradeço aos meus ciclos de amizades que entenderam a minha ausência em várias ocasiões, a Adriana Martins, Valdileide Barbosa e todos que compreenderam esse afastamento para meu crescimento profissional e intelectual, e preencher uma pequena lacuna no vasto conhecimento a que somos expostos.

À CAPES pelo suporte financeiro para o custeio e auxílio a esta pesquisa, bem como todos os que colaboraram diretamente e indiretamente para a conclusão deste trabalho e aos que apoiaram-me indiretamente e diretamente.

MUITO OBRIGADA!!

SILVA, Francisca Cibele da. **ESTUDO DE FALHAS MECÂNICAS EM ELEMENTO DE MÁQUINA POR MEIO DA TERMOGRAFIA: o caso dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem blindagem.** 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Estado da Paraíba, 2016.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar falhas mecânicas em elementos de máquina por meio da Termografia. O caso pesquisado foi o dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem blindagem. Quanto aos objetivos a pesquisa é explicativa e quanto aos procedimentos técnicos é de carácter experimental. A metodologia utilizada, neste trabalho, fez uso de uma bancada de teste constituída por motor, rolamento e mancal, montada em mesa inercial, monitorada por meio de sensores de vibração e câmera térmica. Nas amostras de rolamentos foram inseridas falhas mecânicas por meio de uma micro retífica e sob condições de controle de rotação, carga, temperaturas, ventilação e umidade foram realizados os testes. Como resultado pôde-se perceber alterações térmicas em determinadas regiões dos rolamentos, as quais coincidiram com picos de frequência oscilatória do espectro de vibração em função do tempo da FFT. Outro aspecto importante é que as detecções térmicas são melhor evidenciadas nos primeiros minutos de acionamento do sistema observado. Como conclusão pode-se afirmar que é possível utilizar a técnica da Termografia para detectar falhas mecânicas em rolamentos desde que a análise termográfica seja realizada nos instantes iniciais de aquecimento do objeto, com atenção para se manter as condições ambientais e demais variáveis de estudo sob controle.

Palavras-chaves: Termografia. Sistemas mecânicos. Elementos de máquina. Rolamentos. Vibrações mecânicas.

SILVA, Francisca Cibele da. **STUDY IN MECHANICAL FAULT ELEMENT THERMOGRAPHY THROUGH THE MACHINE: The case of a rigid bearing an unshielded ball bearings**. 2016. 122 f. Dissertation (Master's degree in mechanical engineering)-Federal University of Campina Grande, Campina Grande, State of Paraíba, 2016.

Abstract:

The objective of this work was to study mechanical failures in machine elements through Thermography. The case investigated was that of the rigid bearings of a sphere race without shielding. Regarding the objectives, the research is explanatory and technical procedures are experimental. The methodology used, in this work, made use of a test bench constituted by motor, bearing and bearing, mounted in inertial table, monitored by means of vibration sensors and thermal camera. In the samples of bearings mechanical faults were inserted through a micro grinding and under conditions of control of rotation, load, temperatures, ventilation and humidity were carried out the tests. As a result, it was possible to observe thermal changes in certain regions of the bearings, which coincided with oscillatory frequency peaks of the vibration spectrum as a function of FFT time. Another important aspect is that the thermal detections are better evidenced in the first few minutes of the observed system activation. It can be concluded that it is possible to use the Thermography technique to detect mechanical failures in bearings as long as thermographic analysis is performed in the initial instants of heating the object, with attention to maintain the environmental conditions and other variables of study under control.

Keywords: Thermography. Mechanical systems. Machine Elements. Bearings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura do rolamento	20
Figura 2- Precipitação e choque das esferas na pista	22
Figura 3 - Distribuição de tensões em superfície.	23
Figura- 4: Exemplo de uma falha nas pistas internas de um rolamentos proveniente de má lubrificação	26
Figura 5 - Desgaste na pista e esfera de um rolamento causado por problemas de lubrificação	27
Figura 6- Falhas nas pistas do rolamento	27
Figura 7- Excesso de lubrificação	28
Figura 8 - Técnicas de manutenção e evolução	29
Figura 9- Fases da manutenção preditiva	32
Figura 10- Experimento de Herschel	34
Figura 11- Radiação emitida, refletida, absorvida e transmitida.....	36
Figura 12- Espectro de radiação eletromagnética	37
Figura 13 - Comportamento da intensidade da radiação	38
Figura 14: a) ângulo do plano, b) ângulo sólido, c) Emissão da radiação a partir de A, d) Sistema de coordenadas esféricas	39
Figura 15 - Modelo de absorção e emissão do corpo negro	41
Figura 16 - Poder emissivo do corpo negro	42
Figura 17 - Relação entre energia absorvida, refletiva e transmitida	45
Figura 18: Ângulo de incidência e refletivo	47
Figura 19 - a) Distribuição espectral, b) Distribuição espectral.....	50
Figura 20 - Tipos de Termovisores	54
Figura 21 – a) Termografia qualitativa; b) Termografia quantitativa	55
Figura 22 - Normas sobre Termografia publicadas pela ABNT	56
Figura 23 - Método refletor (ângulo de reflexão e ângulo de incidência).....	57
Figura 24 - Método direto	58
Figura 25- Representação esquemática da situação da medição termográfica geral	60
Figura 26 - Exemplo de ficha de avaliação termográfica.....	62
Figura 27 - Layout do software Flir Systems	63
Figura 28- Surgimento e comportamento de uma falha e os meios de planejar seu diagnóstico	65
Figura 29 - Espectro de Fourier módulo “Cn”	67
Figura 30 - Fase φ_n	67
Figura 31- Sinal registrado	68
Figura 32 - Onda e respectivo espectro de rolamento com falha	69

Figura 33- Exemplo Sinal de rolamento defeituoso.....	70
Figura 34 - Procedimento adotado na técnica do envelope.....	70
Figura 35 - Registro de sinais (acelerômetro)	72
Figura 36 - Analisador de sinais dinâmicos (Lab. Vibrações e instrumentação – UFCG)	73
Figura 37- Fluxograma metodológico.....	75
Figura 38 - Procedimento metodológico para a Fase 1	77
Figura 39 - Procedimentos metodológico para Fase 2	78
Figura 40- Vista da ponta abrasiva utilizada para inserir as falhas nos rolamentos.....	79
Figura 41 - Rolamentos pintados com tinta preta fosca de emissividade conhecida	80
Figura 42 - Procedimento metodológico referente a Fase 3.....	80
Figura 43 - Cabine de proteção	81
Figura 44 - Procedimento metodológico da Fase 4.....	81
Figura 45 - Montagem do sistema de estudo.....	82
Figura 46- Procedimento metodológico referente a Etapa 5	82
Figura 47 - Fixação e montagem da base na mesa inercial.....	83
Figura 48 - Procedimento metodológico Fase 6.....	83
Figura 49 - Sensores para aquisição de dados.....	84
Figura 50 - Procedimento metodológico Fase 7.....	84
Figura 51 – Posicionamento do equipamento utilizado nas medições de temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar	85
Figura 52- Registro dos termogramas por meio de câmera termográfica modelo E60 da FLIR SYSTEMS.....	85
Figura 53 - Procedimento metodológico da Fase 8.....	86
Figura 54 - Esquema experimental.....	86
Figura 55 - Registro de termogramas	87
Figura 56 - Registro de termogramas e FRF	87
Figura 57- . Excitação do Sistema (esquerda). <i>Impulse force test Hamme</i> (direita).....	88
Figura 58 - Procedimento metodológico Fase 9.....	89
Figura 59- Termograma de rolamento sem falhas (a) e com falhas (b)	92
Figura 60 - Esquema de registro termográfico	92
Figura 61 - Esquema de aquisição de sinais dinâmicos	93
Figura 62- Termograma da amostra A SP1 e SP2 respectivamente (Amostra A1 pista interna).....	94
Figura 63 - Gráfico das Amostras A (Zona SP1)	95
Figura 64 - Termogramas da Amostra A1	96
Figura 65 - Gráfico das Amostras A (Zona SP2).....	97

Figura 66- Termograma das Amostras B	98
Figura 67 – Termograma da amostra B1	98
Figura 68 - Rolamentos sem defeito Amostra C1	99
Figura 69- Gráfico das Amostras B (Zona SP1)	100
Figura 70 - Gráfico das Amostras B (Zona SP2)	101
Figura 71 - Sinal simulado da pista externa (esquerda), pista interna (direita).....	102
Figura 72 - Sinal (esquerda) e espectro de vibração (direita) da Amostra A1	103
Figura 73 - Espectro de vibração Amostra B1	104
Figura 74 - Espectro simulado pista interna.....	105
Figura 75 - Espectro de vibração Amostra A1	105
Figura 76 - Espectro simulado pista externa	106
Figura 77 - Espectro de vibração Amostra B1	106
Figura 78 - Envelope da amostra C1	107
Figura 79- Espectro de vibração Amostra A1	108
Figura 80- Envelope da Amostra B1	108

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Valores de Frequência.....	37
Tabela 2- Espectro infravermelho.....	38
Tabela 3 - Dados para cálculo das frequências	88
Tabela 4 - Dados do experimento	91
Tabela 5 - Resultado dos cálculos de frequência93

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Denominação	Unidade
C_0	Velocidade da luz no vácuo	$2,998 \times 10^8$ [m/s]
C_1	Primeira constante de radiação	$2 \times \pi \times h \times c_0^2 = 3,742 \times 10^8$ [W. $\mu\text{m}^4/\text{m}^2$]
C_2	Segunda constante de radiação	$= h \times c_0 / k = 1,439 \times 10^4$ [$\mu\text{m} \cdot \text{K}$]
$E_b(T)$	Radiação total emitida pelo corpo negro	[W/m ²]
$E_g(T)$	Radiação total emitida por um corpo cinzento	[W/m ²]
E_i	Radiação incidente	
$E_{real}(T)$	Radiação total emitida por uma qualquer superfície real	[W/m ²]
E_α	Radiação absorvida	
$E_{\lambda,b}(\lambda, T)$	Emitância espectral do corpo negro à temperatura absoluta T	[W/m ² . μm]
E_ρ	Radiação refletida	
E_τ	Radiação transmitida	
h	Constante de Planck	$= 6,6256 \times 10^{-34}$ [J.s]
k	Constante de Boltzmann	$= 1,3805 \times 10^{-23}$ [J/K]
q''	Fluxo de calor	[W/m ²]
R_{si}	Resistência térmica superficial interior	[m ² .°C/W]
T	Temperatura absoluta do corpo negro	[K]
U	Coefficiente de transmissão térmica	[W/m ² .°C]
α	Coefficiente de absorção de uma superfície	
ε	Emissividade	
ε_g	Emissividade de um corpo cinzento	
Θ_e	Temperatura do ar exterior	[°C]
Θ_i	Temperatura do ar interior	[°C]
Θ_{si}	Temperatura superficial interior	[°C]
λ	Comprimento de onda	[μm]
ρ	Coefficiente de reflexão de uma superfície	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$= 5,670 \times 10^{-8}$ [W/m ² .K]
τ	Coefficiente de transmissão de uma superfície	

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	16
1.1	INTRODUÇÃO	16
1.2	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	18
1.5	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	19

CAPÍTULO II

2	ELEMENTOS MECÂNICOS DE BAIXA ROTAÇÃO: definição, tipos de falhas e manutenções.	20
2.1	O ELEMENTO DE ESTUDO: o rolamento de uma carreira de esfera sem blindagem.....	20
2.2	ROLAMENTOS E SUAS FALHAS	22
2.3	TIPOS DE MANUTENÇÃO	28
2.4	Considerações finais	33

CAPÍTULO III

3	RADIAÇÃO TÉRMICA E A TÉCNICA DA TERMOGRAFIA.....	34
3.1	RAIO INFRAVERMELHO	34
3.2	PRINCÍPIOS DA RADIAÇÃO TÉRMICA.....	35
3.3	RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO	40
3.3.1	Lei ou distribuição de Planck	41
3.3.2	Lei do deslocamento de Wien.....	42
3.3.3	Lei de Stefan-Boltzmann	43
3.3.4	Emissão em superfícies.....	44
3.3.5	Absorvidade.....	46
3.3.5	Refletividade.....	47

3.3.6	Transmissividade	48
3.4	Emissividade	49
3.4.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.	53

CAPÍTULO IV

4	TERMOGRÁFICA E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	54
4.1	TERMOGRAFIA	54
4.2	MÉTODOS E APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA.	57
4.3	VARIÁVEIS A SEREM MANIPULADAS EM ENSAIOS.....	58
4.4	EQUIPAMENTOS TERMOGRÁFICOS OU TERMOVISÓRES.	60
4.5	COMPOSIÇÃO DE LAUDOS.....	62
4.6	CONCEITOS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	64
4.6.1	DOMÍNIO DO TEMPO.	66
4.6.2	DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	67
4.6.3	TÉCNICA DO ENVELOPE.....	69
4.6.4	DOMÍNIO TEMPO-FREQUÊNCIA	71
4.6.5	REGISTRO E AQUISIÇÃO DE SINAIS	72
4.6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.	74

CAPÍTULO V

5	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	75
5.1	A Fase 1 – Definição do problema.	77
5.2	Fase 2 - Preparar as amostras.....	78
5.3	Fase 3 - Confeccionar base do experimento e cabine de proteção	80
5.4	Fase 4 - Montar componentes do experimento na base.	81
5.5	Fase 5- Instalar sistema na Mesa Inercial	82
5.6	Fase 6 - Instalar sensores e cabine	83
5.7	Fase 7: Preparar o ambiente e configurar Termovisor.....	84
5.8	Fase 8 - Coleta de dados	86
5.9	Fase 9 - Analisar dados	89

CAPÍTULO VI

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
6.3	RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	102
6.3.1	Comparação dos resultados experimentais e simulados	104

CAPÍTULO VII

7	CONCLUSÕES FINAIS	110
7.1	CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERENCIAS	112
	APENDICES	118

CAPITULO I

1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

1.1 INTRODUÇÃO

O rolamento é um dispositivo que permite o movimento controlado entre duas partes, com a finalidade de sustentar um sistema de transmissão de torque, a qual suporta inúmeros esforços simples ou combinados (ANDRADE, 2015, p.102). Esses elementos de máquinas são sucessíveis a falhas, pois, trabalham sob condições severas, tais como choques mecânicos gerado pelo atrito entre os metais, altas temperaturas, erros de montagem e inúmera outras situações adversas, que podem vir a contribuir para o desgaste do rolamento.

Um dos desgastes mais comuns nos rolamentos decorrentes destas condições severas são as falhas nas pistas do anel interno e/ou do anel externo (ALMEIDA, 1999, p. 38-63; AFFONSO, 2002, p. 107-139; GEITNER, FRED K. 2015, p. 73-103). Isso ocorre em virtude dos choques mecânicos entre as esferas e as pistas, que atrimam durante o movimento cinético e, conseqüentemente, há a geração de energia térmica. O calor incidente na região de atrito propaga-se incessantemente na superfície da pista, alterando as propriedades termomecânicas do material causando o aparecimento de falhas no rolamento.

Com o calor presente, devido à fricção, é possível que técnicas como a Termografia possa servir para detectá-las. A questão é: a Termografia pode ser utilizada como técnica complementar destinada a verificar e fornecer dados suficientes e necessários para a tomada de decisão sobre o estado de funcionamento de um rolamento? Se sim, quais seriam as variáveis a manipular e em que instante o termografista poderia registrar os melhores dados para a tomada de decisão?

Buscar a resposta para tais questões é oferecer ao campo da manutenção industrial uma ferramenta de apoio e de inspeção rápida, eficiente e segura operacionalmente para o dia a dia da manutenção industrial.

A hipótese para o desenvolvimento deste trabalho surgiu em razão do atrito gerado por uma falha mecânica emitir calor em maior intensidade numa determinada região se comparada com outras áreas do rolamento ausentes de falhas. Se isso se confirma busca-se, então, que variáveis a manipular e qual o melhor instante para obter tais dados.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar se a técnica da Termografia pode auxiliar no diagnóstico de falhas mecânicas previamente inseridas nas pistas internas e externas dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem blindagem.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja atingido se faz necessário, o desenvolvimento dos seguintes objetivos específicos:

- Inserir falhas na pista interna e externa do rolamento escolhido;
- Monitorar a falha do rolamento por meio da análise termográfica;
- Monitorar falha em rolamento pela análise de vibrações;
- Comprovar a existência de falhas nas pistas internas e externas dos rolamentos por meio da Termografia e compará-los aos resultados de vibrações.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se faz importante por diversos aspectos, mas destacar-se-ão três aspectos à saber: 1) Redução dos custos de manutenção; 2) Rapidez no diagnóstico de falhas mecânicas e, 3) segurança dos operadores.

Com relação a redução de custos de manutenção pode-se afirmar que o uso de câmeras termográficas é menores dispendiosa em diagnostico quando comparado com outras técnicas, aja vista que o seu diagnostico se faz por meio de imagens obtidas de forma similar a obtenção de fotografias. A quantidade de registros termográficos e o baixo tempo de obtenção dos mesmos facilitam as tomadas de decisão e, conseqüentemente na redução dos custos envolvidos na manutenção industrial.

Quanto a segurança dos operadores, o registro termográfico não necessita contato físico entre o termografista e o objeto em análise, reduzindo, portanto, o perigo de acidente nos locais de trabalho.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.

Para a realização desta pesquisa se fez necessário delimitar os seguintes aspectos: o tipo de rolamento, os tipos de falhas, a caracterização do ambiente, os equipamentos de coleta de dados, a montagem do sistema e o comparativo dos resultados entre os termogramas e as análises de vibração.

Com relação ao tipo de rolamento foi adotado o rolamento rígido de uma carreira de esferas sem blindagem, modelo C4DDUC4 da NSK. A escolha deste tipo de rolamento se deu em função do trabalho de outro pesquisador que realizou trabalho semelhante ao que se desenvolveu nesta pesquisa, servindo de parâmetro para comparação dos resultados obtidos. (Ver ALEGRANZI, 2012, p. 37).

Quanto às falhas adotou-se as mesmas do trabalho de referência, a saber: raspagem das pistas dos anéis internos e externos dos rolamentos com dimensões de 35 mm, 30 mm, 20mm e 10 mm (Ver ALEGRANZI, 2012, p. 37).

O ambiente onde foram realizadas as experiências compreende uma área de 32 m², com pé direito de 2.50 m, contendo bancadas inercial, janelas em vidro nas laterais, climatizado e bem iluminado.

Quanto aos equipamentos utilizados para a coleta de dados se fez uso de um termovisor, modelo FLIR E 60, com leitura na faixa espectral de 7.5 a 13 µm, a sonda AMIR 300 da Instrutemp contendo sonda de fio quente e anemômetro de pás, uma bancada inercial, uma bancada de ensaio, martelo de impacto (impulse force test Hammer) modelo 086C03, os sensores de vibração (acelerômetros) modelo 352B10, modelo 352C68, o medidor de vibrações modelo GK291D (ICP) e softwares MATLAB® para análise de vibrações e FLIR TOOS® para a análise dos termogramas.

Para a montagem do sistema se fez uso da mesa inercial, da bancada experimental, dos rolamentos, dos sensores de vibração e do termovisor. As amostras foram montadas no mancal interligado ao motor de indução de ½ CV de 1.740 rpm de 60 Hz, por um eixo, todos posicionados sobre a mesa inercial, alinhados horizontalmente e isolados termicamente por invólucro.

Por fim, o comparativo entre os termogramas e os envelopes de vibração foram realizados observando o registro de frequência e a amplitude no tempo, os quais geraram as TTF's que auxiliaram a confirmar as temperaturas obtidas nos termogramas.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.

Este trabalho de pesquisa está estruturado em **sete** capítulos, a saber:

No Capítulo I contextualiza-se o problema, apresentam-se os objetivos geral e específicos, as justificativas, a delimitação e a estruturação do mesmo.

Nos Capítulos II e III se faz a revisão da literatura. O Capítulo II é composto por informações relacionadas ao elemento de estudo, o rolamento, abordando os temas referentes as suas características, mecanismos de falhas e tipo de manutenções.

No Capítulo III comenta-se sobre a ciência da radiação térmica dando ênfase aos seus princípios básicos, estudo do corpo negro, superfícies cinza e emissividade.

No Capítulo IV aborda-se contempla a técnica da Termografia, os tipos de ensaios termográficos e as principais variáveis envolvidas na obtenção dos termogramas e por fim, os princípios básicos da análise de vibrações.

No Capítulo V apresentam-se os procedimentos metodológicos utilizados para a realização dos experimentos termográficos e de análise de vibrações, como também o detalhamento de manipulação dos instrumentos utilizados para o ensaio.

No capítulo VI apresentam-se os resultados e as sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo VII apresentam-se as conclusões. Por fim, apresentam-se as referências, os Apêndices e os Anexos.

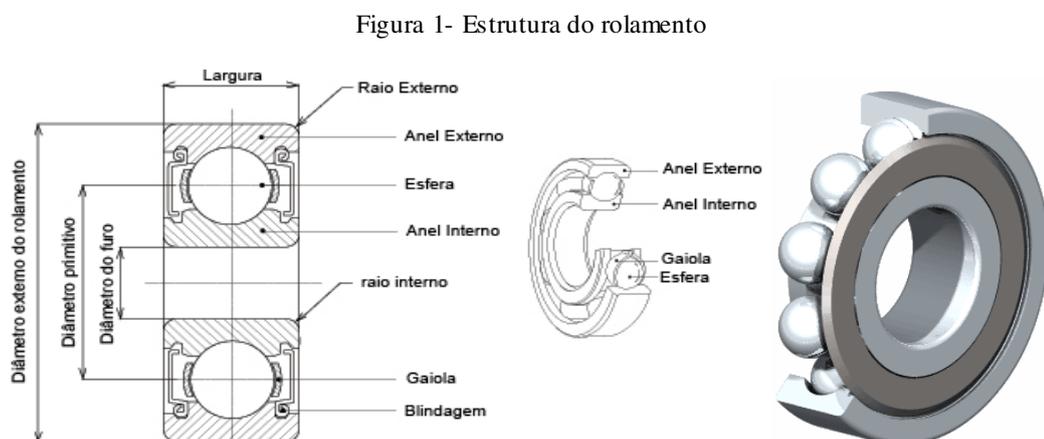
CAPITULO II

2 ELEMENTOS MECÂNICOS DE BAIXA ROTAÇÃO: definição, tipos de falhas e manutenções.

O objetivo desse Capítulo foi efetuar uma revisão da literatura destacando os tópicos sobre o rolamento utilizado neste estudo, em especial o rolamento de uma carreira de esfera, suas principais falhas e os principais tipos de manutenção atualmente existente no mercado.

2.1 O ELEMENTO DE ESTUDO: o rolamento de uma carreira de esfera sem blindagem.

Segundo a SKF (2016) e Silva (2016, p. 21), os rolamentos são elementos de máquina de precisão, sendo assim, precisam ser tratados com cuidado. Já Alegranzi (2012, p. 11), define rolamento como um dispositivo que permite o movimento relativo controlado entre duas ou mais partes, suportando cargas estáticas, dinâmicas em diversas aplicações. A Fig. 1 ilustra os elementos que compõem um rolamento de uma carreira de esfera sem blindagem. O termo “sem blindagem” está relacionado a possibilidade de retirar a tampa que protege as esferas e as pistas dos anéis interno e externo do rolamento, com facilidade.



Fonte - Ctkbrasil (2016)

Geitner e Block (2015, p.74), são de acordo que, os rolamentos estão entre os componentes de máquina mais importantes. No que tanger a elementos transitórios os rolamentos suportam movimentos de transmissão, desalinhamentos, altas cargas e forças mecânicas, que em excesso contribuem para alterações termomecânicas no material.

O material utilizado na fabricação dos rolamentos são aços ligados. Estes devem possuir alta dureza e elevada resistência ao desgaste para suportar os esforços aos quais estes elementos de máquinas são submetidos. Entre os materiais comumente utilizados no mercado cita-se o aço martensítico AISI 440C. No entanto, para algumas indústrias este material apresenta alguns problemas relacionados à resistência, corrosão e desempenho e por essa razão utilizam o aço ES1¹, o qual possui propriedades melhores para a fabricação de rolamentos. (NSK, 2003, p. 8).

Já os rolamentos da SKF por sua vez, são confeccionados em aço, cuja composição martensítica ou bainita² é obtida por meio de tratamento térmico o que proporciona aos metais dureza da superfície, ductilidade e tenacidade do núcleo. (SKF, 2005 e MASSOTI, 2011, p.24-25). Segundo Tschiptschin, (2014, p. 24- 26), os tratamentos térmicos influenciam na longevidade dos elementos de máquina fazendo com que a vida útil do rolamento seja maior.

Outro aspecto importante a destacar é que os rolamentos são confeccionados em material de extrema difusibilidade térmica e tendem a ter sua resistência alterada em função da temperatura, a exemplo do aço, que facilita a propagação de calor, devido as suas propriedades altamente condutoras. (HARRIS, KOTZALAS, 1984, p. 197 - 200 e NORTON, 2000, p. 40-45).

A alta condutividade térmica desses materiais pode ser percebida durante o funcionamento através da emissão de calor pela superfície. O aumento ou redução da temperatura seguida de choques mecânicos e fricções poderão reduzir a resistência do material, pois afeta diretamente as suas propriedades mecânicas. (SMITH e HASHEMI, 2012, p. 260-280). Para Athanasopoulos e Botsaris (2014, p. 172) há a possibilidade de utilizar diferentes métodos a fim de detectar e diagnosticar os defeitos em rolamento; eles podem ser percebidos nas vibração e medições acústicas, desgaste análise de resíduos e medições de temperatura.

Por exemplo, se um sistema mecânico em operação aquece demasiadamente há um princípio de instabilidade que é preciso quantificar e qualificá-lo. No caso de aquecimentos em

¹ Liga de aço acrescida de nitrogênio para garantir resistência à corrosão, fadiga na pista de rolagem. Em testes o ES1 apresentou um rendimento superior aos aço AISI 440C. O ES1 demonstrou superioridade em ambientes aquosos a 5% de cloreto de sódio, testes com spray de solução salina, solução de ácido sulfúrico e ácido clorídrico em testes de imersão, além de teste de vida em ambientes submersos em água, apresentando uma vida até 5 vezes superior ao aços convencionais. (NSK, p.8, 2003).

² Martensítica Transformação por difusão, por cisalhamento e uma expansão da rede da austenita (estrutura em forma de agulhas obtidas no resfriamento no metal durante a austenita entre a faixa de temperaturas entre 200 e 540°C).

rolamentos o contato das camadas superficiais e adjacentes da pista com outros componentes internos do mesmo pode nuclear trincas, que correspondem as tensões de cisalhamento cíclico comuns nestes tipos de elementos de máquina. (HARRIS, KOTZALAS, 1984, p. 197 – 248, e MASSOTI, 2012, p. 24 - 32).

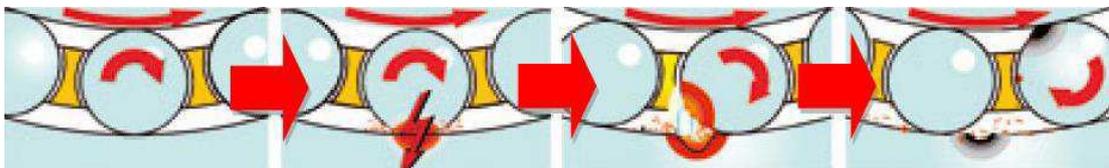
No entanto, é preciso perceber quais situações realmente contribuem para o surgimento dessas falhas, a saber: falha de manutenção, desgaste das partes e componente do rolamento, regime cíclico de carregamento, excesso de carga para rolagem estática ou dinâmica, falha de lubrificação ou ainda impurezas no interior dos rolamentos. Todos esses fatores contribuem para o surgimento de falhas e, conseqüentemente, superaquecimento, podendo gerar as falhas. (ARAÚJO, 2011, p.29-34; SKF, 2014, p.7-9; WEIDLICH, 2009, p. 46-51).

2.2 ROLAMENTOS E SUAS FALHAS

As falhas em pistas de rolamentos são estudadas na engenharia mecânica com a finalidade de detectar, minimizar e reduzir sua nucleação. No entanto, há uma gama significativa de anomalias causadas por fatores internos e externos. Os primeiros estudos e análises de falhas em rolamentos foram realizados por Harris e Kotzalas (1984), com o intuito de indicar e prever o comportamento de uma falha por fadiga.

O contato de rolagem puro e a tensão de cisalhamento causam o que o autor nomeia de fadiga sub-superficial, pois o fenômeno inicia-se de uma trinca e amplia-se em decorrência da rotação, esforço e carregamento, o que dá origem as *fretting*, (fricção - tradução nossa) termo utilizado pelas literaturas especializadas que abordam o assunto, ver Fig. 2.

Figura 2- Precipitação e choque das esferas na pista



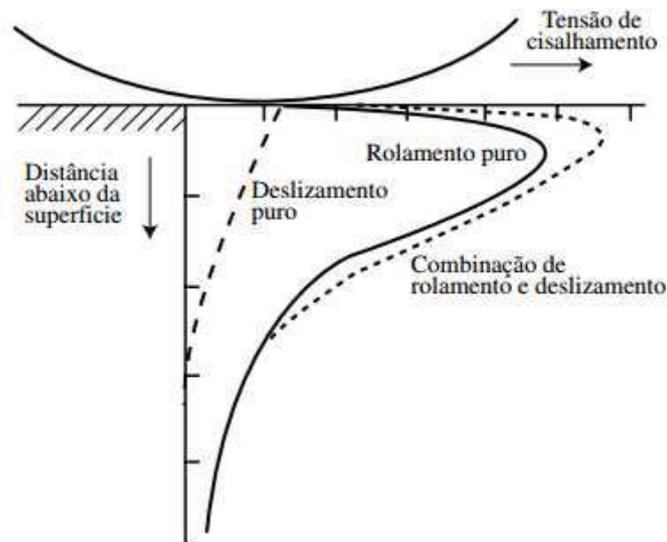
Fonte - Elétrica suas dúvidas (2015)

A Figura 2, exemplifica o surgimento de falhas mecânicas, devido a concentração de energia e contato entre as esferas e a pista. Mediante o funcionamento a Fig. 2, mostra o acúmulo de forças e tensões na região onde se inicia a falha. Esse contato gera calor e em consequência alteram as características mecânicas da superfície do material e dá-se início ao surgimento das primeiras e minúsculas deformações.

Medeiros, Tanaka e Sinatora (2000, p. 8-9), afirmam que as trincas são ativadas devido as tensões térmicas cíclicas atuando em regiões mecanicamente confinadas tais como aquela apresentada na Fig. 2. Isso explica como as falhas ou defeitos do material induzem a um acúmulo local de discordâncias nos corpos em contato, provocando o início de micro trincas, que pode surgir na superfície ou na subsuperfície, a uma profundidade rasa ou profunda. (MEDEIROS, TANAKA e SINATORA, 2000, p. 8-9).

Nos casos mais comuns essas trincas vão se propagando abaixo da superfície até causarem as primeiras raspagens ou cisalhamento nas pistas, internas ou externas dos anéis dos rolamentos, ver Fig. 3.

Figura 3 - Distribuição de tensões em superfície.



Fonte - INGENIARE (2009, p. 444)

Este tipo de defeito mostrado na Figura - 3, pode reduzir a vida de um rolamento de 4 a 5 vezes, e nos casos de maior severidade tais como sobrecarga e/ou pequenos resíduos, a durabilidade desse elemento pode vir a cair de 8 a 10 vezes no seu tempo médio de uso. Em resumo, as falhas descritas propiciam uma redução total de até 20 vezes a vida útil do rolamento. (AFFONSO, 2002, p. 114-115).

O surgimento de defeitos e falhas em rolamentos são problemas constantes na manutenção de uma máquina, muitos são também provenientes da lubrificação. Sabe-se que o rolamento é um componente vital para o funcionamento das máquinas e deve operar sob condições e lubrificação adequadas para a produção fabril. (AFFONSO, 2002, p. 46-47; HARRIS e KOTZALAS, 2007, p. 173 -180; GEITNER, 2015, p. 75-137).

Em rolamentos os lubrificantes tem um papel fundamental, pois os mesmos trabalham em contato com as superfícies das pistas internas e externas e com as esferas que desempenham o papel de facilitar o movimento de um das pistas. A lubrificação deve evitar o contato metal-metal, o qual eleva a temperatura na zona de fricção.

Segundo a SKF (2015), a lubrificação em excesso, ou a sua falta, assim como a contaminação do lubrificante são responsáveis por até 36% das falhas prematuras em rolamentos. Se esses elementos estiverem presentes iniciam-se uma zona de acúmulo de energia, gerando calor afetando as estruturas mecânicas dos rolamentos originando os processos de trincas.

Segundo Amaral (2002, p. 1-10), as falhas em rolamentos e elementos de máquina ocorrem durante o processo de concepção. A falta de critérios durante as etapas do processo de projeto termina por formular um produto que pode contribuir para o surgimento de falhas durante o processo de fabricação, montagem, teste e uso.

No Quadro -1 apresentam-se as etapas de projeto definidas por Amaral que são indispensáveis para a concepção de um rolamento.

Quadro 1 - Tipos de anomalias decorrentes da concepção de projeto

<p>Falhas de projeto</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compreendem os entalhes mecânicos que originam as fraturas e fadigas, as mudanças de projeto muitas vezes feitas sem os devidos cuidados técnicos e critérios de projeto inadequado devido há imprecisões não previstas no projeto.
<p>Falha por seleção de material</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compreendem os entalhes inadequação na seleção do material na construção devido a alguma imprecisão física.
<p>Imperfeição do material</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relacionado às falhas internas e externas a qual reduzem a resistência mecânica do material.
<p>Deficiência de fabricação</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oriundas do processo de fabricação dos componentes, má injeção, má conformação, má usinagem entre outros.
<p>Erros de montagem ou instalação</p> <ul style="list-style-type: none"> • Comuns de ocorrer, pois trata-se muitas vezes de erros humanos decorrentes da má instalações.

Continuação do Quadro 1.

Condições de operação ou manutenção inadequadas.

- Está relacionada às mais variadas condições, que vão da má lubrificação, falta de inspeção, erros de operação e etc.

Fonte - Autoria própria

As condições citadas por Amaral são abrangentes e podem ser observadas em qualquer elemento de máquinas. Todas as incertezas decorrentes da concepção de um projeto são refletidas no produto final e contribui para reduzir a sua vida útil do equipamento.

Apesar de falhas projetuais, quando se tratar de rolamentos se tem inúmeras possibilidade de falhas que vão desde a lubrificação até a instalação. No manual da SKF (2015) estão listadas 26 defeitos e anomalias que podem ser encontrada nos rolamentos. Para este trabalho listam-se 14. Vide Quadro - 2.

Quadro 2 - Tipos de falhas em rolamentos

Tipo da falha	Rep. esquemática
Carga radial unidirecional (pista externa fixa e interna girando).	
Carga radial unidirecional (pista externa fixa e interna girando).	
Carga radial girante em fase com o anel interno (pista externa fixa e interna girando).	
Carga radial girante em fase com o anel externo (pista externa girando e interna fixa).	
Carga unidirecional axial (pista externa fixa interna girando).	
Combinação de cargas radiais e axiais (pista interna girando).	
Carga unidirecional radial anel de vedação do eixo girante.	
Carregamento radial + desbalanceamento	

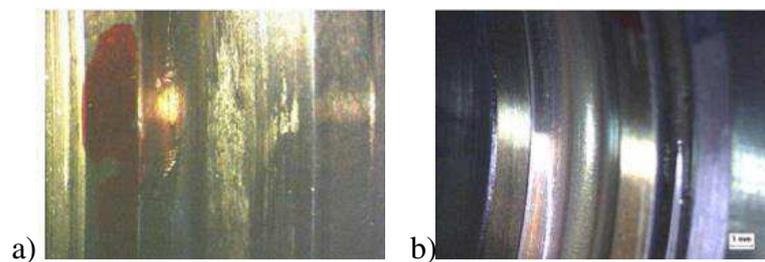
Continuação do Quadro 2.

Pré-carrega anel interno, interferência excessiva (pista externa fixa interna girando).	
Compensação oval do anel externo (pista externa fixa interna girando).	
Desalinhamento do anel externo (pista externa fixa interna girando).	
Desalinhamento do anel externo (pista externa fixa interna girando).	
Desalinhamento do anel de vedação posicionado excentricamente em relação ao anel do eixo.	
Desalinhamento anéis de vedação externos.	

Fonte - Adaptado de SKF (2005, p. 1-2) e ALEGRANZI (2012, p. 16)

Há também casos de falhas prematuras dos rolamentos ligadas a procedimentos de instalação, lubrificação e vedação inadequados (HAND, 2015 p. 198). As Figs. 4 e 5 mostram as ocorrências de falhas reais provenientes de má instalação.

Figura- 4: Exemplo de uma falha nas pistas internas de um rolamentos proveniente de má lubrificação



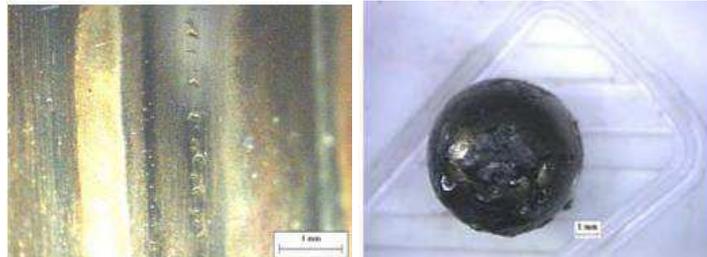
Fonte – Bezerra (2004, p.109)

Na Figura 4(a), à esquerda percebem-se o desgaste na pista interna com presença de desgaste em todo o perímetro circunferencial da pista causado pelo atrito das esferas, devido à defeitos e má lubrificação (ARAÚJO, 2004, p.109).

Esse desgaste é caracterizado como falha do tipo intermediária sofridas das alterações termomecânicas dos rolamentos, em alguns casos as falhas são leves e ocasionam pequenos pontos na superfície das pistas. No caso do defeito ser na pista externa Fig. 4(b) a presença de marca significativa de desgaste são percebidas conforme podem ser observadas na imagem, a deterioração ocorrida é devido à fricção dos metais e as variações térmicas existentes entre as partes.

Quando ocorre a fricção desses metais a energia dissipada é em forma de calor, isso ajuda a alterar as propriedades do material proporcionando degradação nas pistas e nas esferas como mostra a Fig. 5. As falhas presentes podem aparecer na forma de desgaste na pista interna e nos seus elementos rolantes. Bezerra (2004) apresenta um experimento realizado que comprova esta afirmação.

Figura 5 - Desgaste na pista e esfera de um rolamento causado por problemas de lubrificação



Fonte - Bezerra (2004, p.113-114)

Hand (2015,p. 33), Heinz e Geitner (2013, p.73-76), SKF (2005, p.1-2), NSK (2015, p.14-15), em seus trabalhos e estudos citam a fadiga superficial como uma deformidade comum aos rolamentos devido às marcas de trabalho (Vide Fig. 6). Nas situações onde observa-se marcas de degradação no perímetro das pistas do rolamento, é provável que as esferas estejam danificadas, com isso, as tensões e acúmulos de energia se ampliam e terminam por propagar as trincas e imperfeições iniciadas.

Figura 6- Falhas nas pistas do rolamento

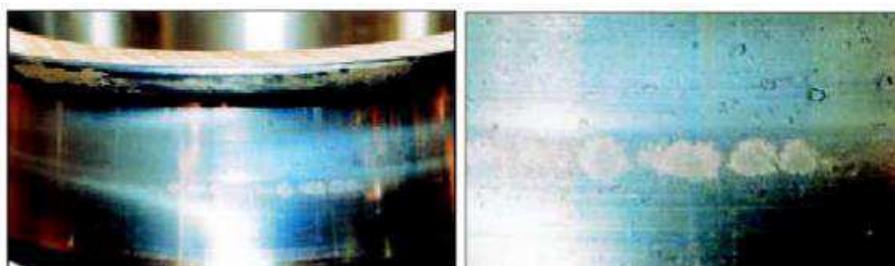


Fonte - NENNA (2007, p.41)

Estes fatos associados a outros tipos de falhas, tais como: falhas nas pistas, nas esferas ou decorrentes de assentamentos defeituosos no eixo ou caixa de rotação, desalinhamentos, procedimentos de montagens incorretos, ajustes incorretos no eixo ou na caixa, aquecimentos térmicos, lubrificação inadequada, selagem ineficaz, também contribui para ocasionar o surgimento e potencializar os defeitos.

Para as ocasiões em que ocorrem falhas devido à lubrificação seja por falta ou excesso, o primeiro sinal é o aumento da rugosidade da superfície das pistas (Ver Figs. 6 e 7). Em teoria a função da lubrificação é de promover um filme de óleo entre as superfícies em atrito do lubrificante e reduzir o contato metal-metal, removendo o calor gerado pela rotação. (AMARAL, 2002, p.70-80).

Figura 7- Excesso de lubrificação



Fonte - Adaptado de NENNA (2007, p.44)

Nestes casos, a aplicação de uma manutenção atuante, pode reduzir estas falhas e ampliar a vida útil dos equipamentos contribuindo para o aumento da produção fabril. Entre as manutenções existentes e comentadas na literatura especializada destaca-se, a manutenção corretiva e a preventiva. No tópico, que se segue, comentar-se-á sobre elas.

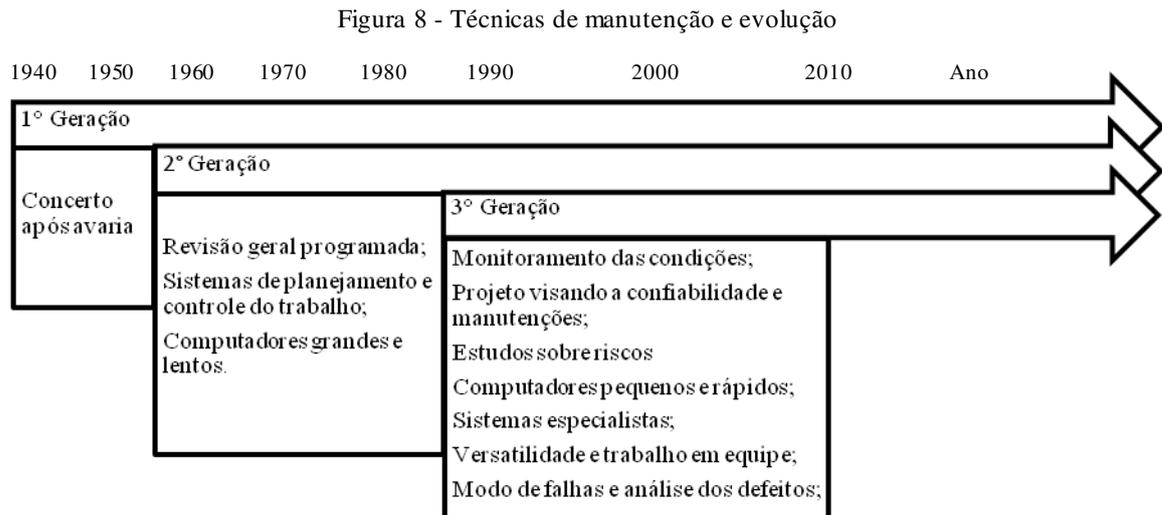
2.3 TIPOS DE MANUTENÇÃO

A palavra manutenção vem do latim *manus terene*, e significa “manter o que se tem”. Atualizando o termo para os dias atuais, a manutenção é um método de prevenir “doenças” em maquinários industriais. É através da mesma que se tornam possível um planejamento e gestão de como se deve proceder para manter a confiabilidade e a eficiência dos sistemas mecânicos operantes.

A manutenção tem como definição, o melhor estudo em firmar as combinações em ações de gestão, técnicas de economia aplicada aos bens, como também o intuito de aperfeiçoar os

ciclos de vida dos elementos de máquinas e garantir seu funcionamento (PARREIRA, 2011, p.5-13). Os tipos de manutenção foram definidas e caracterizadas seguindo as suas aplicações e atribuições, conforme a evolução dos defeitos e paradas bruscas dos equipamentos.

Moubray (1997, p. 3) historiou evolução das etapas da manutenção, e com base na demanda ocorrida no processo fabril. A evolução defendida por Moubray é dividida em três gerações e apresenta-se segundo as necessidades industriais de cada época, vide Fig. 8.



Fonte - Adaptado de Moubray (1997, p. 3-6) e Trojan (2013, p.345-356)

Os conceitos e as novas terminologias para solucionar problemas de ordem mecânica em manutenção são expressos na Fig. 8. A primeira geração era focada em corrigir a anomalia durante uma parada brusca inviabilizando a produção. Em meados da década de 60 a 80, deu-se início a sistematização e aos primeiros controles e registros de falhas de um equipamento. E no ano de 1990 até os dias atuais, estudos e pesquisas são voltados aos tipos e características da manutenção e ao controle da sua gestão, a fim de garantir a longevidade do parque fabril.

Tojan, Marçal e Baran (2013, p. 345 -346), ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção), (2015); Parreira (2011, p.10); Fernandes (2015, p. 2-4), Couto (2011, p. 41) listam os tipos de manutenção com base em suas características e terminologia a serem aplicadas em sistemas mecânicos, a saber:

a) *Manutenção corretiva:*

Manutenção corretiva não planejada: é caracterizada pela atuação das equipes de manutenção em fatos que já ocorreram, sejam estes fatos desempenhos inferiores ao almejado ou uma falha. Não há tempo para a preparação de componentes e nem de planejar o serviço; isto é, manutenção corretiva não planejada é a correção da falha

de modo aleatório a fim de evitar outras consequências. (WILLIAMS, 1994 apud CASTELLA, 2001).

Manutenção corretiva planejada: A falha ou condição anormal de operação do equipamento e a correção depende de decisão gerencial, em função de acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a quebra. (FERNANDES, 2015 p.5).

b) Manutenção preventiva:

Trata-se de atuação realizada de maneira a reduzir ou evitar a falha ou a queda no desempenho do equipamento, obedecendo a um plano de manutenção preventiva previamente elaborada, baseado em intervalos definidos de tempo, isso é, manutenção baseada no tempo. (FERNANDES, 2015, p.5).

c) Manutenção preditiva:

Esse tipo de manutenção caracteriza-se pela previsibilidade da deterioração do equipamento, é a manutenção preditiva é a execução da manutenção no momento adequado, antes que o equipamento apresente falha, e tem a finalidade de evitar a falha funcional ou evitar as consequências desta. (MOUBRAY, 1997, p. 133-134).

d) Manutenção detectiva:

É um tipo de manutenção efetuada em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis às equipes de operação e manutenção (PINTO, 2001 apud CASTELLA, 2001).

Dos cinco tipos de manutenção expostos anteriormente, Tojan, Marçal e Baran (2013, p. 345 -346) fizeram um comparativo para melhor identifica-las e delimitá-la. Entre os pontos apresentados destacam-se a divergência de conceitos. Vide Qdr. 2.

Em estudo publicado por Tojan, Marçal e Baran (2013, p. 344 -347) há nomenclaturas e tipologias defendidas por vários autores com a finalidade de caracterizar cada tipo de manutenção. Em seu trabalho, fez-se um comparativo entre os períodos de publicações, classificação da ação adotada para correção do defeito e uso de tecnologias como o uso do software o ELECTRE TRI 2.0a, disponibilizado pela Lamsade (Paris-Dauphine University, Paris, France) onde mesmo expõe os resultados conforme medidas de decisões tomadas pelos operadores.

Quadro 3 - Tipos de Manutenção

Autores	Classificação conforme ação adotada			
	Não Planejar	Planejar	Monitorar	Destinar
ONU, (1975)	Quebra	Corretiva; Preventiva;		
AFNOR, (1985)	Corretiva			
MONCHY, (1989)	Corretiva Curativa;	Preventiva Sistemática;		

	Corretiva Paliativa;	Preventiva de Condição;		
MIRSHAWKA, (1993)	Corretiva; Melhoramento;	Preventiva Sistemática; Preventiva de Condição; Preditiva		
ABNT, (1994)	Corretiva Não-Programada	Preventiva Programada	Preditiva	No campo Fora do Local Remota Automática
VIANA, (2002)	Corretiva; Planejada; Não-Planejada;	Preventiva TPM Autônoma MCC	Preditiva	
ABRAMAN, (2005)	Corretiva; Preventiva Não-Programada.	Preventiva; Sistemática; Reconstruções; Oportunidade; Reparos; Lubrificação.	Preditiva; Acompanhada; Monitoração; Medição; Inspeção;	
PINTO & XAVIER, (2007)	Corretiva; Planejada; Não-Planejada;	Preventiva	Preditiva; Detectiva;	Engenharia e manutenção.

Fonte - Adaptado de Tojan, Marçal e Baran (2013, p. 352)

As informações presentes no Quadro -3 e Figura - 8, mostram uma síntese dos tipos de manutenção. Percebe-se que a partir da década de 90, iniciou-se os cuidados com relação a prevenção das falhas de equipamentos e deu-se o início das manutenções preditiva e detectiva. Manutenções essas, aplicadas aos sistemas ainda vivo, sem a ocorrência de paradas indesejadas.

Couto (2011, p. 14) informa que:

Esta política de manutenção é adequada para componentes cujo desempenho possa ser monitorizado pela análise dos atributos do produto resultante da sua operação ou pela sua análise por parte do seu operador. Desta forma, com o recurso a uma política de Manutenção Preditiva, o tempo de vida útil de componentes cuja substituição seja muito dispendiosa pode ser prolongado, resultando numa minimização dos custos com manutenção.

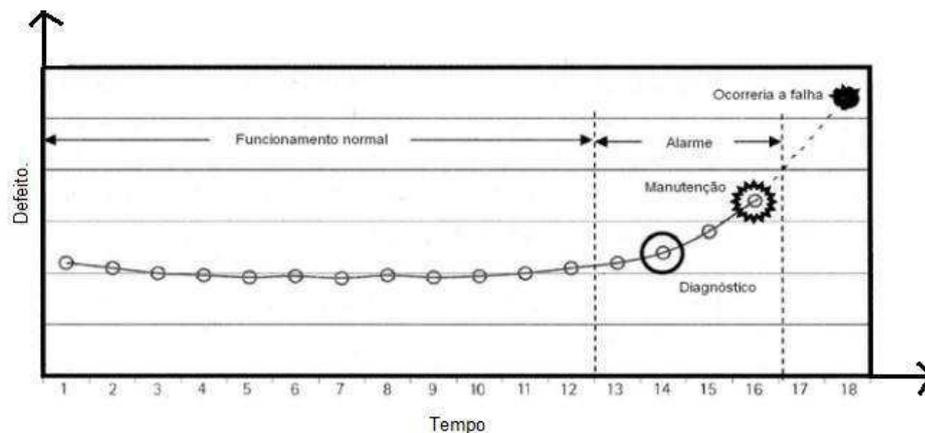
Ao diferenciar os tipos de manutenção e como elas evoluíram no decorrer dos anos, percebe-se, também, a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias para a gestão da mesma. Nos casos que envolvem a manutenção preditiva, as técnicas de inspeção END (ensaios

não destrutíveis), tornaram-se viável e valiosa para o auxílio ao diagnóstico de análise de falhas mecânicas.

Para Sousa (2008, p. 15), a periodicidade da prática da manutenção preditiva, é condicionada a três etapas; a primeira está relacionada à detecção do defeito, ou seja, avaliar e observar se os valores medidos nos parâmetro de controle do equipamento registram desgaste acelerado em relação à degradação normal dos elementos de máquina.

A segunda etapa visa estabelecer um diagnóstico, um resultado qualitativo e quantitativo da severidade do desgaste decorrente no equipamento. Tendo como base levantamentos de dados e informações pertinentes ao comportamento do equipamento. Por fim, a terceira etapa tem como objetivo um prognóstico a prever o período para a troca do elemento defeituoso, tomando como base cálculos estatísticos e medidas preventivas que determinam se o equipamento poderá falhar (vide Fig. 9), com isso, a indústria ganha mais confiança para produzir.

Figura 9- Fases da manutenção preditiva



Fonte – Sousa (2008, p.16)

Na Figura 9, mostra como é feita a distribuição das etapas da manutenção preditiva. O objetivo dessa manutenção é tornar viável e confiável os reparos dos equipamentos prezando sempre pela segurança, menor custo e maior produtividade. É importante destacar que este tipo de monitoramento faz uso de equipamentos e técnicas para o auxílio a inspeção e assim garantir a eficiência final dos elementos de máquina.

A manutenção preditiva é realizada por técnicas não destrutíveis a exemplo da análise de Vibração e Ferrografia. Atualmente, a técnica da Termografia vem sendo empregada para a manutenção devido a sua rapidez no auxílio ao diagnóstico das anomalias. A mesma baseia-se na leitura da radiação térmica emitida através de ondas eletromagnéticas pela superfície do ob-

jeto. Estas ondas eletromagnéticas são então captadas pelo equipamento, a câmera termográfica, a qual converte o calor em temperatura e a forma de visualizá-la se dá por meio de paletas de cores, as quais auxiliam a distinguir as variações térmicas presentes na superfície do objeto em análise. No próximo capítulo maiores informações serão apresentadas sobre este assunto.

2.4 Considerações finais

O fato do rolamento ser um elemento de baixa rotação, componente chave em inúmeros maquinário e ter de receber, transmitir movimentos e suportar cargas os torna de fácil sucessão a defeitos, principalmente nas pistas internas e externas. Este componente precisa ser monitorado constantemente e a periodicidade de suas inspeções devem ser contínuas com diagnósticos rápidos e imediatos, a fim de auxiliar na tomada de decisões durante a manutenção, já que o mesmo quando está com falhas aquece excessivamente e altera suas propriedades mecânicas.

Quando um sistema apresenta alterações térmicas isso indica uma provável instabilidade, sendo necessário o uso de técnicas apropriadas que registrem e tornem possível diagnosticar as falhas presente no objeto em estudo. Diante do que foi exposto percebe-se, claramente, a emissão de calor pelos elementos girantes do rolamento, principalmente, quando uma falha está presente. E se há calor e calor em desequilíbrio é possível por meio da técnica da Termografia visualizá-lo. Para tanto, se faz necessário desenvolver o método que melhor auxilie a efetuar tal diagnóstico a fim de obter dados confiáveis para a tomada de decisão na gestão da manutenção do sistema mecânico.

CAPITULO III

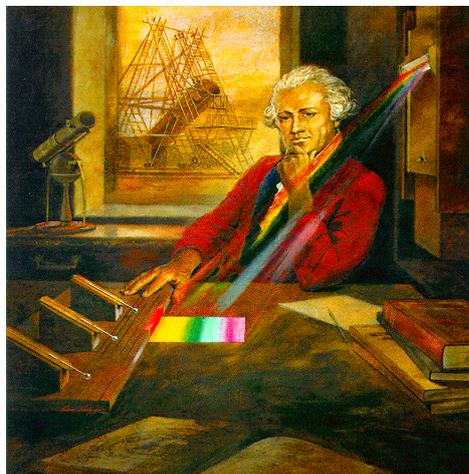
3 RADIAÇÃO TÉRMICA E A TÉCNICA DA TERMOGRAFIA

O objetivo desse Capítulo é destacar aspectos relacionados à ciência da radiação térmica e sua aplicação tecnológica por meio da Termografia. Estas informações ajudam a fundamentar a compreensão e a interpretação dos termogramas. Para tanto, estrutura-se este capítulo nos seguintes tópicos: Raios infravermelhos, princípios da radiação térmica, radiação do corpo negro, emissividade e superfícies cinza.

3.1 RAIOS INFRAVERMELHO

O raio infravermelho foi descoberto em 1.800, pelo astrônomo britânico Friedrich Wilhelm Herschel. Sua descoberta ocorreu ao observar filtros de diferentes cores deixando passar quantidades distintas de calor (Vide Fig. 10). Em experimento, Herschel observou o comportamento da luz solar, o mesmo, percebeu variações térmicas entre os filtros, pois o calor nas faixas espectrais variam do violeta até o vermelho com respectivo aumento da temperatura. (CARRAMALHO, 2012, p. 8-9).

Figura 10- Experimento de Herschel



Fonte – CARRAMALHO (2012, p. 20)

Percebendo a variação de cor entre os filtros Herschel, quis calcular a quantidade de calor presente em cada filtro buscando indicar um ponto onde o efeito térmico atingia um valor máximo durante o experimento, mas por falta de avanços tecnológicos suas medições ficaram limitadas à porção visível do espectro humano.

Só em 1840, foi possível registrar as primeiras imagens térmicas, a qual se baseava na evaporação de uma película fina de petróleo exposta a um padrão térmico. Mesmo sendo um registro rudimentar a imagem foi chamada de Termógrafo por Sir John Herschel. (CARRAMALHO, 2012, p.8-9).

Até os dias de hoje, os avanços científicos tornaram o infravermelho uma fonte de informação térmica para diversas atividades. Primeiramente o IR (radiação infravermelho) foi utilizado como instrumento de defesa por militares, de 1900 a 1920. Após duas décadas e meia, percebeu-se avanços significativos nos instrumentos de registros infravermelhos, estudos e investigações passando a ser comuns nas áreas da engenharia, saúde, indústria, veterinária entre outros.

A aplicação da Termografia consiste em registro de imagens térmicas, denominada termogramas. Para melhor compreender como tais equipamentos registram as “fotografias”, comentar-se-á no próximo tópico sobre os princípios da radiação térmica.

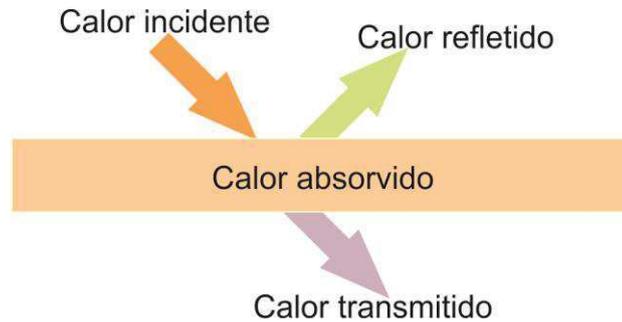
3.2 PRINCÍPIOS DA RADIAÇÃO TÉRMICA.

A radiação térmica é um fenômeno do meio. Ela se propaga a partir da emissão pela matéria e seu transporte não requer a presença de nenhum meio físico e não sofre interferência no vácuo. A propagação da radiação consiste de um conjunto de partículas denominada fótons ou quanta.

Vários autores ao comentarem sobre o tema concentram seus estudos nos fenômenos de superfícies. Isto se dá devido aos termogramas serem obtidos a partir da emissão dos raios infravermelhos que saem de uma dada superfície acima do zero absoluto e emitem radiação térmica, seja ela refletida, absorvida e/ou transmitida. (Vide. Fig. 11).

Este fenômeno é assim considerado de superfície em virtude da radiação emitida pelas moléculas internas serem fortemente absorvida pelas moléculas adjacentes. Assim sendo, a radiação emitida de um sólido se origina das moléculas e encontram-se a uma distância não superior a 1µm metro da superfície exposta. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 494).

Figura 11- Radiação emitida, refletida, absorvida e transmitida



Fonte – Autoria própria

A Figura 11 mostra o processo de propagação da radiação, ela é emitida pela fonte geradora, exemplo o sol, ou outra fonte de calor. Esta onda eletromagnética irá propaga-se no vácuo sem qualquer interferência e chegará a superfície. Seja o material metal, madeira, rocha ou vitral irá emitir, refletir, absorver e transmitir o infravermelho de maneira diferente devido às características termofísicas de cada material.

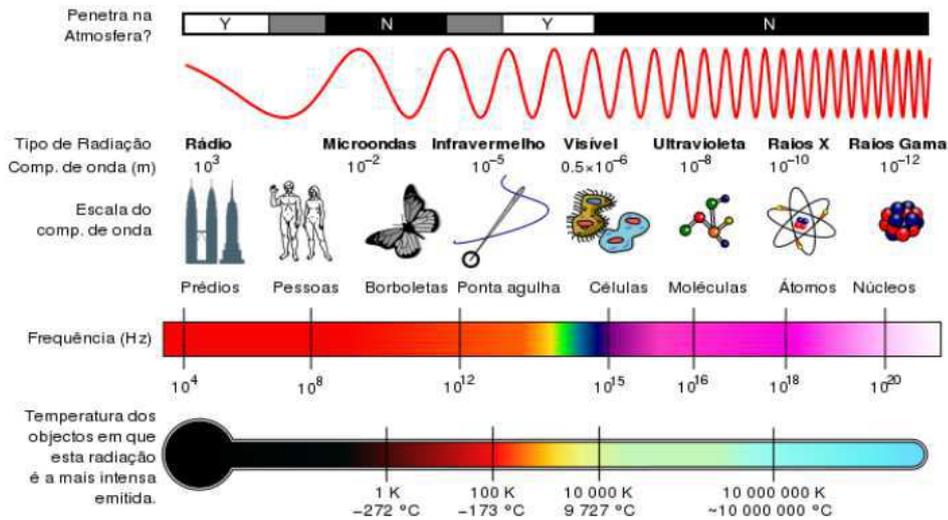
Outro aspecto importante a destacar é a propagação da radiação. Para esta se propagar faz-se necessário compreender a relação entre duas propriedades, a saber: a frequência (ν) e o comprimento da onda (λ), ver Eq.1 e C representa a velocidade da luz no meio.

Para a propagação no vácuo, $C_0 = 2,998 \times 10^8$ m/s, por sua vez o comprimento de onda eletromagnética é definida pela grandeza física, micrão (μm), onde $1\mu\text{m} = 10^{-6}$ mm. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 495).

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

As ondas eletromagnéticas são divididas em regiões distintas. A banda intermediária que vai de 0,1 a 100 μm e inclui o UV (ultra-violeta) e as faixas visíveis e infravermelha IV, são denominadas áreas de estudo da transferência de calor, Fig.12. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p, 495; ÇENGEL e GHAJA, 2013, p.600-773).

Figura 12- Espectro de radiação eletromagnética



Fonte - CEA, (2015)

Na Figura 12 o comprimento de onda para o estudo da radiação térmica está entre as ondas do espectro eletromagnético da luz visível a micro-ondas. Essa radiação incide sobre uma superfície, parte é absorvida α , outra refletida ρ , e a restante é transmitida τ . Portanto, a radiação emitida consiste em uma distribuição contínua e não-uniforme de componentes monocromáticos em um comprimento de onda único, a qual são divididas em várias frequências, ver Tab. 1.

Tabela 1 - Valores de Frequência

Muito baixa Frequência	< 30 KHZ
Baixa Frequência	< 30 KHZ – 650 KHZ
Média Frequência	650 KHZ – 1700KHZ
Onda Curta	1,7KHZ – 30MHZ
Muito Alta Frequência	30MHZ -300MHZ
Ultra Alta Frequência	300MHZ – 3000MHZ
Micro Ondas	3GHZ – GHZ

Fonte - Adaptado de CARAMALHO (2012, p.16)

As bandas de radiação infravermelha são energias eletromagnéticas idênticas à radiação visível, ondas rádio e raios-X. Elas se deslocam na velocidade da luz sob a forma de onda sinusoidal diferindo apenas no comprimento de onda, ou seja, λ será diferente em todas as divisões do espectro infravermelho (ver Tab. 3), pois, todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto emitem e absorvem calor. (CHRZANOWSKI, 2001, p.20, INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 495, SOUSA, 2010, p.28-31, CARAMALHO, 2012, p.17, CARUSO e OGURI, 2006 p. 310, DA SILVA, 2014, p.17).

Tabela 2- Espectro infravermelho

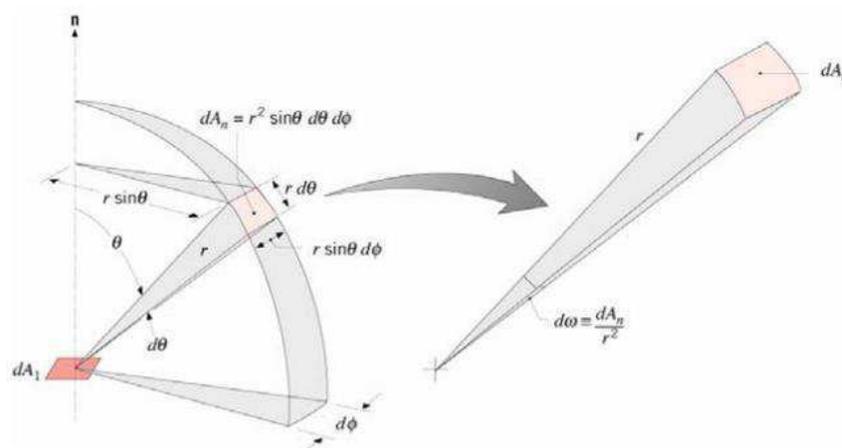
Banda de Infravermelho	Faixa de λ
Infravermelho muito próximo	0,75 μm – 1,1 μm
Infravermelho próximo	1,1 μm – 3 μm
Infravermelho médio	3 μm - 6 μm
Infravermelho distante	6 μm - 15 μm
Infravermelho longínquo/ muito distante.	15 μm - 100 μm

Fonte - Adaptado de CHRZANOWSKI (2001, p.20)

A Tabela- 2 apresenta as faixas do infravermelho médio a distante, elas são definidas como regiões de interesse, em particular, para as tarefas de detecção e reconhecimento de alterações térmicas por possuírem condições de propagação mais favorável. Esses tipos de comprimento de ondas são empregados nos equipamentos termográficos por encontrar o pico de emissão de radiação infravermelha de qualquer corpo com uma temperatura compreendida entre - 50 °C e 50 °C (Sousa, 2010, p. 5). Vale salientar que a temperatura aferida em termômetros sem contato depende do tipo de onda eletromagnética captada pelo equipamento. (CHRZANOWSKI, 2001, p.20).

O comprimento de onda é dado em λ e a sua frequência em ν , sabendo essas variáveis é possível definir como a onda eletromagnética se propaga e o comportamento da radiação térmica em uma superfície. Pois, a radiação incide no vácuo e a mesma irá difundir-se em todas as direções variando a sua intensidade (ver Fig.13).

Figura 13 - Comportamento da intensidade da radiação



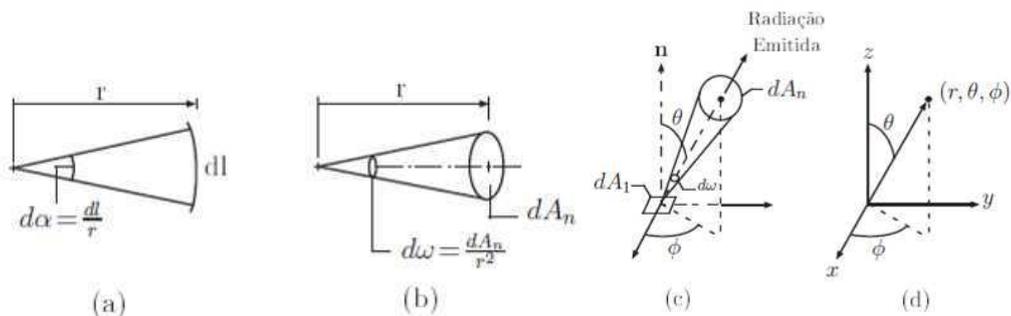
Fonte - Adaptado de INCROPERA e DEWITT (2003, p. 495)

A Figura 13 é a exemplificação do comportamento da radiação no espaço tridimensional. Sua representação matemática é feita por coordenadas esféricas, onde dA_1 é o pequeno ângulo sólido formado com a superfície direcional dA_n é nele que a radiação passa e é representada por $d\omega$. dA_1 tem um ângulo paralelo ao plano que juntos formam uma razão e da será o plano direcional que irá corresponder a dA_1 (ver Fig. 14(a)).

Se uma pequena superfície diferencial no espaço dA_n , passa a submeter o ângulo do sólido $d\omega$, quando visto por um ponto dA_1 , então o ângulo do plano diferencial da definido pela região entre o raio de um círculo é medido pela razão do comprimento do arco dl no círculo e o raio r do círculo. Fig. 14. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 496-497).

Então, quando uma área dA e suas direções pertencem aos ângulos zênite (0 a $\pi/2$) e azimutal (0 a 2π), o ângulo sólido associado com todo o hemisférico pode ser obtido pela integração nos limites de θ e ϕ . (CHRZANOWSKI, 2001, p. 20; INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 495; ÇENGEL e GHAJA, 2013, p. 85-86 e 773-774).

Figura 14: a) ângulo do plano, b) ângulo sólido, c) Emissão da radiação a partir de A, d) Sistema de coordenadas esféricas



Fonte- Adaptado de Castro (2013, p. 10)

A radiação emitida está relacionada a vários fluxos e a emissão ocorre a partir de qualquer superfície que se encontra em *temperatura finita*. É denominado poder emissivo, a quantidade de radiação emitida por uma unidade de área da superfície, onde o poder emissivo hemisférico espectral é dado por: E_λ em $W/m^2 \cdot \mu m$, (ver Eq. 2).

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

Conforme a Eq. 2 e a Figura 13, $d\omega$ é a região entre os raios e uma esfera são medido como a razão entre a área $dA_n = r^2 \cdot \sin\theta d\theta \cdot d\phi$ (dA_n é a direção θ, ϕ), dada pela Eq.3.

$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2} \quad (3)$$

E a mesma equação pode ser reescrita para uma superfície esférica na forma apresentada na Eq. 4.

$$d\omega = \text{sen } \theta . d\theta . d\phi \quad (4)$$

O termo dA_I é utilizado para definir a intensidade da radiação perpendicular em dA_n , então dA_I é normal a direção de $dA_I \cos\theta$ e a intensidade espectral é dada por $\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$, a qual irá resultar na Eq. 5.

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{dq}{dA_1 \cos\theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (5)$$

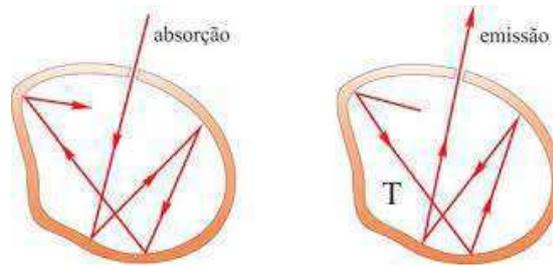
Com a intensidade da radiação definida, o próximo passo é relacionar a superfície cinza com as características da radiação do corpo negro. Tal comparativo descreve como seria o comportamento de um objeto real e o conceito de corpo negro, mas para isso é preciso entender as propriedades do mesmo no item a seguir.

3.3 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

A definição de corpo negro está relacionada ao seu equilíbrio térmico. É uma aceitação matemática que descreve o comportamento ideal de absorção da radiação incidente nele, em qualquer comprimento de onda eletromagnética. Por possuir a capacidade de absorver toda a radiação incidente e ser emissor perfeito, o corpo negro serve como padrão, para os estudos em superfícies reais, devido as suas propriedades radioativas (INCROPERA e DEWITT 2003, p. 501).

O corpo negro tem como propriedades adsorver toda a radiação incidente, Figura 14, desprezando o comprimento e direção da onda eletromagnética, independente da temperatura e comprimento de onda. Nenhuma superfície emite mais energia que o mesmo. Embora, a radiação emitida seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Então, o corpo negro é um emissor difuso. (INCROPERA e DEWITT 2003, p. 501, NINKIRA e DUDZIK 2009, p. 16).

Figura 15 - Modelo de absorção e emissão do corpo negro



Fonte – LIMA (2013, p. 8)

A Figura 14 mostra a radiação térmica absorvida e emitida sobre a superfície de um corpo negro, independente da sua espessura o coeficiente de absorção será $\alpha = 1$; Enquanto o de transmissividade (t) e reflexão (ρ) serão iguais a 0. Isso ocorre devido a radiação existente no interior do corpo negro ser inteiramente absorvida pelas concavidades e a emissão será difusa.

Para os estudos em radiação tomam-se como base leis físicas, entre elas, a Lei de Planck (distribuição espectral), Lei do deslocamento de Wien (deslocamento do poder emissivo espectral) e a Lei de Stefan-Boltzmann (poder emissivo total integrado a sua Temperatura), dão base para compreender a radiação térmica e como a mesma se propaga. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 502-503, NINKIRA e DUDZIK, 2009, p. 17-20 e CHRZANOWSKI, 2001, p. 22-26).

3.3.1 Lei ou distribuição de Planck

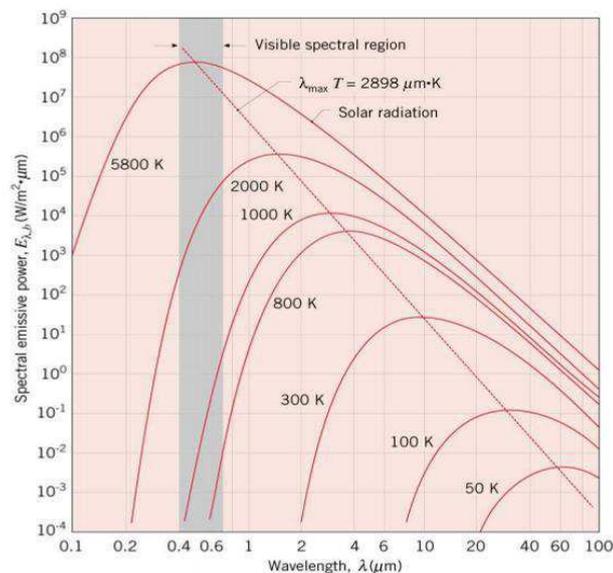
A distribuição espectral da radiação emitida pelo corpo negro foi definida por Max Planck em 1.900, através de interpolação, cujos limites eram da expressão de Rayleinh para baixas frequências e Wien para altas potências. A fórmula de Planck para a densidade espectral de energia sintetizou todas as leis e fórmulas previamente estabelecidas para a radiação do corpo negro, ver Eq. 6. (CARUSO e OGURI, 2007, p.321- 329; INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 502 e CARAMALHO, 2012, p. 19).

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

Na equação de Planck, definida pela Equação 6 a primeira constante $C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3,742 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 / m^2$ e a segunda constante é $C_2 = \left(\frac{hc_0}{k}\right) = 1,439 \times 10^4 \mu m^4 K$. T é a temperatura absoluta da superfície, λ é o comprimento de onda da radiação emitida, $K = 1,38065 \times$

10^{-23} J/k é a constante de Planck. Quando representada graficamente para várias temperaturas, produz várias curvas (Fig.16). Segundo Planck a emitância do espectral do corpo negro têm diversas características, ao serem observadas, uma delas é a variação emitida continuamente com o comprimento de onda, isso indica que a cada aumento de temperatura, qualquer onda eletromagnética será mais intensa e conseqüentemente emitirá mais radiação, conforme a região espectral. Observa-se na Figura 16 a distribuição espectral do poder emissivo da radiação em relação a onda eletromagnética. Sabe-se que a radiância dependente de valores térmicos, ou seja, quanto maior a temperatura ($^{\circ}$ K) menor o comprimento de onda e assim o inverso. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 502).

Figura 16 - Poder emissivo do corpo negro



Fonte - INCROPERA e DEWITT (2003 p. 502)

A faixa cinza variante de 0,4 a 0,6 são as faixas espectrais visíveis ao olho humano é uma fração significativa da radiação emitida pelo sol, fora desse intervalo não se percebe os corpos. Outra característica a destacar é o comprimento de onda e a sua intensidade da radiação emitida que irá aumentar com a elevação da temperatura e a mesma irá variar continuamente com o comprimento de onda. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 502).

3.3.2 Lei do deslocamento de Wien

Segundo a Lei do deslocamento de Wien, a distribuição espectral do corpo negro está relacionada ao comprimento de onda máxima (λ_{max}). Quando a temperatura em Kelvin sobe, o comprimento de onda da radiação máxima emitida diminui, na mesma proporção e quando a

temperatura em Kelvin diminui, o comprimento de onda da radiação máxima emitida aumenta, também, na mesma proporção. (ALMEIDA 2012, p.1).

Segundo Almeida (2012, p. 1-2) e Incropera e Dewitt (2003, p. 502) ao analisar a Lei de Wien, no comprimento de onda da radiação máxima emitida $\lambda_{m\acute{a}x}$, se tem a constante de Dispersão de Wien representa por um valor constante, resultado do produto da Temperatura em Kelvin pelo comprimento de onda da radiação máxima emitida pelo corpo negro. Assim, a temperatura de um corpo negro, em Kelvin, multiplicada pelo comprimento de onda da radiação máxima emitida, em metros, o valor será constante e igual a 2.897,768 $\mu\text{m K}$ valor esse que corresponde a Constante de Dispersão de Wien e formula a Eq. (7)

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

Onde, λ_{max} é o comprimento de onda máximo correspondente ao corpo negro; T é a temperatura e C_3 a terceira constante de radiação = 2.897,8 $\mu\text{m K}$. Na Figura 16 a linha tracejada em diagonal é o resultado encontrado quando aplica-se a Eq. 7. Veja que o poder emissivo espectral máximo é deslocado para menores comprimentos de onda devido ao aumento da temperatura em casos de ondas menores se tornam mais proeminentes, até a emissão ocorrer sobre o espectro visível. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 503).

3.3.3 Lei de Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann afirma que a densidade de energia total de um corpo negro é proporcional a quarta potência da temperatura: $u = \alpha T^4$. A constante α não é determinada por argumentos clássicos. Ao integrar a fórmula de Planck (Eq. 6) em $\lambda = 0$ a $\lambda = \infty$, obtém-se a emitância radiante total para o corpo negro, expressa na Eq. 8

$$E_\lambda = \sigma T^4 \quad (8)$$

Onde: E_λ : Radiação total emitida pelo corpo negro [W/m²]; σ – constante de Stefan-Boltzmann = 5,670x10⁸ [W\m². K⁴]; T^4 – temperatura absoluta do corpo negro [K] e o termo σ é uma constante, que permite o cálculo da quantidade de radiação emitida.

O simples resultado da integração da Eq. 6, resulta na definição matematicamente para a Lei de Stefan-Boltzmann. Empregada para calcular qualquer radiação total emitida em diferentes direções e comprimentos de onda a partir do conhecimento da temperatura do corpo

negro. Por essa emissão ser difusa o corpo negro tem a intensidade da sua radiação medida e definida pela Eq. 9.

$$I_b = E_b/\pi \quad (9)$$

Em que E_b é a energia total radiada pelo corpo negro dividido pelo ângulo de incidência. O conceito de corpo negro é utilizado como base para os estudos da radiação térmica e desempenha papel fundamental para as medições termográficas. No entanto, todas as superfícies emitem menor quantidade de radiação quando comparadas aos corpos negros, mesmo assim existem corpos, cujo comportamento se assemelha aos mesmos, devido a sua superfície de emissão e são chamados de corpos cinzentos ou superfícies emissoras (MINKINA, 2009, p. 20 e FILHO, 2004, p. 306-307).

3.3.4 Emissão em superfícies.

Por definição a emissividade do corpo negro é igual a 1, isso ocorre devido ao princípio da Lei da conservação de energia e o balanço energético radiante, a Eq. 10 mostra a existência de três possibilidades de interação para uma onda eletromagnética incidir sobre uma superfície. (CHRZANOWSKI, 2001, p. 31 e CARUSO, 2012, p.21-22).

$$\alpha\lambda + \rho\lambda + \tau\lambda = 1 \quad (10)$$

Onde; $\alpha\lambda$ = É a radiação espectral absorvida pelo meio; $\rho\lambda$ = É a reflexão espectral, ou seja, a energia refletida por um objeto que incide sobre si; $\tau\lambda$ = É a radiação transmitida dada pela energia radiante transmitida através de um objeto cujo incide sobre si.

Uma superfície real jamais terá emissividade igual a 1 (um) pois, esse valor de emissividade é o conceito referencial para o corpo negro. Nos estudos para a superfície a emissividade é denotada por \mathcal{E} , e pode variar entre zero e um, $0 \leq \mathcal{E} \leq 1$, mas nunca igual a 1. Afinal a emissividade é um valor de quanto uma superfície real pode se aproximar as propriedades do corpo negro. (ÇENGEL, 2009, p. 285).

A emissividade um material está correlacionada com a capacidade de absorção da superfície. De acordo com a lei de Kirchhoff (Eq.11), a emissividade (ϵ) de uma superfície a uma temperatura T é igual a sua absortividade (α) para uma radiação incidente originada de um

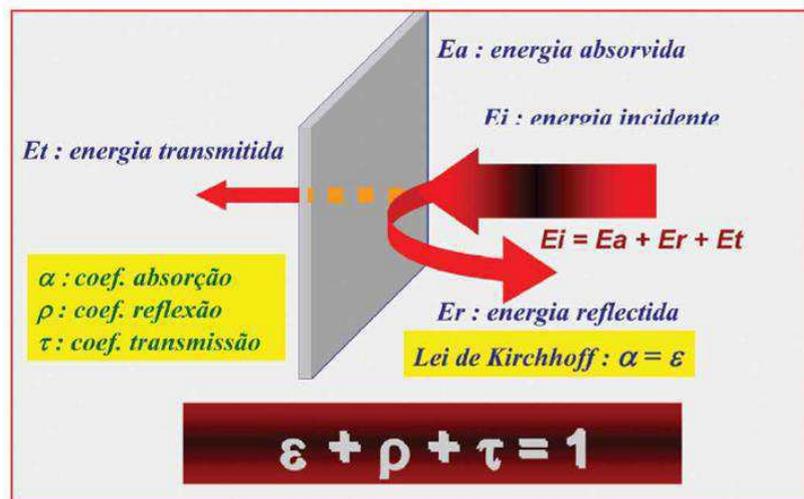
corpo à mesma temperatura, ou seja, toda a energia que o material absorveu será emitida para o ambiente. Então, para qualquer material de quaisquer temperatura e comprimento de onda especificada, (ver Fig.18) será percebida na Eq. 12. (NENNA, BITENCOURT, TIBA, SILVA, 2014, p. 22-23, INCROPERA e DEWITT, 2003 p. 502 e CARAMALHO, 2012, p. 22).

$$\varepsilon = \alpha\lambda \quad (11)$$

$$\varepsilon + \rho\lambda + \tau\lambda = 1 \quad (12)$$

Para as situações em que os materiais forem opacos onde $\tau\lambda=0$, pois o corpo opaco não transmite radiação, isso indica que nenhuma parte de energia incidente irá passar pelo objeto. Para materiais polidos ε aproximar-se de zero, de maneira que esse material seja perfeitamente refletor, então $\rho\lambda = 1$.

Figura 17 - Relação entre energia absorvida, refletiva e transmitida



Fonte – CARRAMALHO (2012, p.22)

Na Figura 17, observa-se que a emissividade depende das características da superfície do material. Tendo em vista que a mesma irá variar com os tipos de acabamentos e tratamentos superficiais, tais como; pinturas, reação química com o ambiente, superfícies polidas, espelhadas, rugosas entre outras inúmeras situações, além da temperatura. Por essa razão é preciso saber quais as propriedades de cada superfície, se ela absorve, reflete e/ou transmite muita ou pouca radiação.

3.3.5 Absorvidade.

A absorção em superfícies está relacionada à interação da radiação eletromagnética com partículas eletricamente carregadas nos átomos e ligações dentro de um retículo cristalino ou moléculas. A radiação absorvida torna-se energia térmica no interior do material e poderá ser reemitida posteriormente por outro comprimento de onda. (NETO, 2009, p. 12).

A radiação incidida depende das fontes de energia incidente. Pode-se dizer que a direção espectral da radiação independe da temperatura ou natureza física da superfície absorvente. Então, só haverá dependência da radiação emitida se a mesma for refletida por igual em uma superfície. Em termos de absorvidade hemisférica total onde α_λ é definida como fração da irradiação total absorvida, em uma superfície total, é preciso definir a absorção e irradiação do objeto de estudo e o corpo negro. A Eq. 13 define essa totalidade de absorção nas diferentes radiações (λ, θ, ϕ) .

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)} \quad (13)$$

Onde, os termos empregados na equação 13, $\alpha_{\lambda,\theta}$ é a intensidade total absorvida e para a intensidade de radiação espectral incidente o termo correspondente é $I_{\lambda,i}$. Segundo Incropera e Dewitt (2003, p. 512) é possível desprezar a relação de dependência da absorção em relação a temperatura da superfície. Na engenharia, entretanto, o foco é trabalhar com propriedades superficiais que representam médias direcionais com o foco de definir a absorção hemisférica espectral, Eq. 14.

$$\alpha_\lambda(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (14)$$

A absorção hemisférica espectral total α , representa a média integrada para a direção e o comprimento de onda, definida como uma fração de irradiação absorvida pela superfície, Eq.15.

$$\alpha_\lambda(\lambda) \equiv \frac{G_{abs}}{G} \quad (15)$$

Sendo α dependente da distribuição espectral da radiação incidente, assim como a sua distribuição direcional e natureza da superfície absorvida.

3.3.5 Refletividade.

A refletividade é uma propriedade que determina a fração incidente refletida por uma superfície, nos casos de refletividade, o primeiro passo é compreender como é definida a fração de energia incidente. Segundo Perin (2009, p. 89), a refletividade é a radiação incidente na superfície do objeto refletida uniformemente em ângulo oposto da radiação refletida Fig. 18.

Figura 18: Ângulo de incidência e refletivo



Fonte - INCROPERA E DEWITT (2003, p. 523)

A Figura 18 apresenta a representação esquemática da reflexão difusa e especular. Observe que a radiação incidente em θ_1 , tem a mesma intensidade que ao ser projetada em θ_2 . A refletividade de uma superfície $\rho_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi)$ é a fração da radiação espectral incidente nas direções θ e Φ . Esta relação é expressa em termos matemáticos pela Eq. 15. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 512-513).

$$\frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (15)$$

Onde o termo, $I_{\lambda,i,ref}$ corresponde à radiação espectral na direção de θ e Φ que é refletida. Já a refletividade hemisférica espectral $\rho_{\lambda}(\lambda)$ é dada como uma parte da radiação e é definida pela Eq. 16.

$$\rho_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (16)$$

O termo $G_{\lambda,ref}$, refere-se a parte da irradiação hemisférica espectral refletida pela superfície. E a refletividade total ρ_t é uma parcela da energia irradiante definida pela eq. 17.

$$\rho_T \equiv \frac{G_{ref}}{G} \quad (17)$$

Pode-se idealizar superfícies difusas ou especulares devido ao método de como elas refletem a radiação, tomando como base a reflexibilidade do corpo negro igual a 0, (ÇENGEL, 2009, p. 285.). No caso dos metais a refletividade incidente é igual a refletida, e não é possível perceber a variação térmica real, devido aos tratamentos superficiais polidos ou espelhados, no caso de leituras termográficas pode-se fazer um acabamento superficial com tinta preta fosca tornando o objeto de estudo um corpo cinza.

3.3.6 Transmissividade

A Transmissividade ocorre em materiais semitransparentes devido a incidência de radiação que atravessa o material, isso quer dizer $0 < \tau < 1$, diferente dos materiais opacos que possuem $\tau = 0$ e quando $\tau=1$, os corpos serão transparentes. CARAMALHO (2012, p. 22-23).

Os materiais semitransparentes à radiação incidente é um problema complicado, devido a materiais como o vidro e água serem semitransparentes em pequenos comprimentos de onda, e se torna opaco em comprimentos de ondas maiores. Mas, segundo Segundo Incropera e Dewitt (2003, p. 513) resultados razoáveis pode-se ser frequentemente obtidos através do uso da equação da transmitância hemisférica Eq. 18 e 19.

$$T_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,tra}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (18)$$

$$T_T \equiv \frac{G_{tra}}{G} \quad (19)$$

Onde, a transmissividade total T_T , é relacionada a componente espectral T_{λ} dado pela Eq. 20.

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} G_{\lambda tr}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\tau_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (20)$$

Sabendo das propriedades da radiação fica fácil compreender os fenômenos que ocorrem quando se precisa fazer estudos envolvendo a radiação térmica. Afinal, cada analisada possui propriedades diferentes, tratamentos e acabamentos superficiais distintos, por essa razão, as características superficiais de cada material irão influenciar nos resultados obtidos, tendo em vista o aumento ou redução da temperatura.

3.4 Emissividade

A emissividade (ε) é definida como uma razão entre a radiação emitida pela superfície do objeto e a radiação emitida pelo corpo negro. Essa relação busca equalizar os parâmetros de medição de uma superfície real em termos de valores quantitativos, ou seja, o quanto de radiação pode ser emitida pela superfície do objeto. No entanto, o corpo negro é uma referência devido ao limite máximo de radiação que um corpo real pode emitir em um determinado comprimento de onda, para uma dada temperatura.

Essa relação de emissão do objeto (superfície real) e o corpo negro é dado pela equação da emissividade hemisférica total, Eq. 21.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (21)$$

Onde, os termos E = poder emissivo (energia) da superfície real e E_b = poder emissivo (energia) total do corpo negro. Ninkira e Dudzik (2009, p. 21-25), descrevem a emissividade real como monocromática (ε_λ) e define-a como uma relação da radiação emitida $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ de um determinado comprimento de onda λ para emitâncias de radiação monocromáticas $\varepsilon_{\lambda b}(\lambda, T)$ de um corpo negro, ao mesmo comprimento de onda, à mesma temperatura e observada pelo mesmo ângulo. A equação que satisfaz essa afirmativa é a Eq. 22, da emissividade espectral hemisférica.

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{\varepsilon^T(\lambda, T)}{\varepsilon_{b,\lambda}(\lambda, T)} \quad (22)$$

No entanto, a radiação é um fenômeno de superfície e corpos físicos e têm propriedades emissivas distintas, para Minkina, Sawicki e Sosiński (2002, p. 15) e Minkina e Dudzik (2009, p. 21) em termos de propriedades relacionadas a radiação em superfície, os corpos físicos são divididos da seguinte forma: (et al. Kreith 2000, Minkina 2004).

- Nas situações em $\varepsilon_b(\alpha) = 1$, $\varepsilon_b(\lambda, T) = 1$, será definido como corpos negros, se α for o ângulo de observação.
- Para os corpos $0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$, os objetos são definidos como corpo não-negros
- Se $\varepsilon(\alpha) = \text{constante}$, e $\varepsilon(\alpha) < 1$, os corpos são dissipativos.

E para os corpos não-negros a sua divisão é assim apresentada:

- $0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$, $\varepsilon(\lambda, T) = \text{constante}$ $\varepsilon(\alpha) = a$ uma variável dos corpos cinzentos.

- $0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$, $\varepsilon(\lambda, T) = \text{variável}$ $\varepsilon(\alpha) = \text{variável}$ os corpos serão não- cinza (ou seja, corpos emissores seletivos).

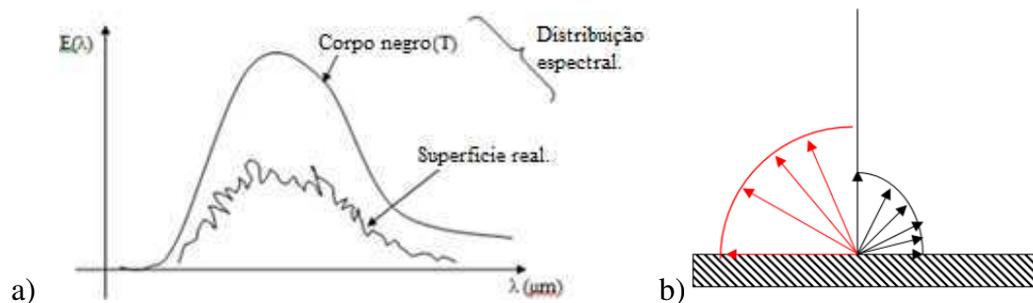
Sendo assim, um corpo de dissipação cuja emissividade seja independente do ângulo de observação α , a sua superfície irá satisfazer as condições da lei de Lambert. Em contexto geral, pode-se definir a refletividade do objeto como um corpo cujo poder emissivo R seja independente do ângulo de observação α . Para isso, a lei de Lambert determina a intensidade da radiação emitida por um elemento de superfície de um corpo negro versus o ângulo de distribuição α (Ver Eq. 23). (MINKINA e DUDZIK, 2009, p. 21).

$$I_{b\alpha} = I_{b\perp} \cos\alpha, W \cdot rs^{-1} \quad (23)$$

Onde, o termo $I_{b\perp}$ corresponde a radiação emitida na direção normal de uma superfície e $I_{b\alpha}$ é a intensidade da radiação emitida pelo ângulo em relação a superfície normal. Esta equação indica que a emissividade de uma superfície radiante Lambertiana é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo α , entre a linha de visão do observador e a normal à superfície. Então, a intensidade da radiação de uma superfície de corpo negro em direção normal à uma superfície $I_{b\perp}$ é π vezes menor do que a intensidade de radiação total de I_b emitida a partir dessa superfície. (MICHALSKI, *et al.* 1991).

Nos casos que a emissão de uma superfície for conhecida, é possível calcular a sua emissão, se e somente se, $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ for conhecido, então, utilizará a equação de Planck (Eq. 6), já para os cálculos de poder emissivo espectral de quaisquer comprimento de onda e temperatura a Eq. 22 atenderá essas ocorrências. Contudo, é preciso perceber de maneira geral, a radiação emitida entre as superfícies reais e o corpo negro (Fig.-19 (a)).

Figura 19 - a) Distribuição espectral, b) Distribuição espectral



A figura 18(a) mostra a relação emissiva entre a radiação do corpo negro e da superfície real. Onde, T corresponde a $\varepsilon_{b,\lambda}(\lambda, T)$, e para a superfície real ou cinza têm-se $\varepsilon_{b,\lambda}(\lambda, T) = \varepsilon_{\lambda} \varepsilon_{b,\lambda}(\lambda, T)$. A diferença da distribuição da emissão isso ocorre devido a superfície real diferenciar da distribuição de Planck, devido a distribuição dos ângulos direcional ser diferente, Fig. 19(b).

Além do ângulo de observação, a emissividade de uma superfície também depende do tempo de observação. Principalmente em estruturas metálicas que tentem a variar sua emissividade em decorrência da variação da temperatura e acabamentos superficiais. Para os materiais condutores em que ε_b apresenta-se aproximadamente constante em faixas de temperatura de $\theta \sim < 40^\circ$, e pode crescer com o aumento de θ e pode decair a zero. Já os materiais não-condutores ε_b a emissividade é aproximadamente constante para $\theta \sim <$ e perto de 70° abaixo do α descrece e acentua quando o mesmo aumenta o α . Isto ocorre devido às variações da emissividade ao longo do tempo em relação à temperatura. (MADURA et al, 2001).

A emissividade de uma superfície corporal, administrada é uma função do ângulo de observação α , de comprimento de onda λ , a temperatura corporal T e o tempo t está relacionada conforme Eq. 24. (INCROPERA e DEWITT, 2003, p. 507).

$$\varepsilon = f(\alpha, \lambda, T, \tau) \quad (24)$$

Não só os termos α , λ , T, τ são variáveis a serem observadas para estipular a emissividade. Avaliar a condição de uma superfície ou objeto, considerada a sua homogeneidade, em outras palavras, suas características estruturais e a composição. Portanto com relação à avaliação de uma dada superfície deve-se ser o mais preciso possível na determinação da emissividade para garantir dados confiáveis nas etapas de medições termográficas. (CARAMALHO, 2012, p. 67 - 68, MINKINA e DUDZIK, 2009, p. 22 e CHRZANOWSKI, 2001, p. 30 - 40).

Orlove (1982, p. 72-81) propõe vários métodos para a medição da emissividade em superfícies reais. Alguns desses métodos serão listados e apresentados a seguir.

- a) Um dos primeiros procedimentos consiste em abrir um orifício na superfície do objeto e comparar com um material (fita adesiva) de alta emissividade ($\varepsilon = 0.95$) e de boa condutividade térmica, ou parte do objeto ser pintada com uma tinta especial de emissividade conhecida e alta.
- b) Aquecer o objeto a uma temperatura pelo menos 50°C , superior à temperatura ambiente. Segundo Orlove, fica mais perceptível a emissividade do próprio objeto, se levado em

consideração o ponto de vista da câmera (SP) por parte do objeto com uso de adesivo (ou previamente pintadas).

- c) Definir o tipo de configuração do equipamento (Termovisor), a emissividade conhecida, no caso de uso de etiquetas (ou tintas) e os valores das medições de temperatura atmosférica, temperatura refletida, a distância da câmera com o objeto e umidade atmosférica e aferir a temperatura do ponto de vista da área de emissividade conhecida.
- d) Alterar o ponto de foco fora da área de emissividade conhecida para alterar os parâmetros da emissividade na câmera para a do objeto, ler a temperatura no ponto observado, até que o mesmo seja a área "limpa" de emissividade conhecida.

Também é apresentada na NBR 15572:2013, a mesma lista vários parâmetros a serem seguidos para realização de medições termográficas. Além da NBR existem normas para a medição da emissividade em metais, a exemplo da ASTM E1933 – 99 (americana) e a A1423-1983 de origem japonesa onde, especifica os cuidados e atenções para a medição da emissividade, principalmente em estruturas metálicas, com base e uso da Eq. 25.

$$\varepsilon = k \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} \quad (25)$$

Onde $K= 0,365\Omega^{-1/2}$ é uma constante e ρ é a resistividade (Ωm). A emissividade de uma superfície de metal perfeitamente lisa e dada em uma função do comprimento de onda λ (a relação é válida para $\lambda > 2\mu\text{m}$) e a emissividade de uma superfície metálica real e dada em função do comprimento da onda λ , conforme Eq. 26.

$$\varepsilon = \frac{1}{b_1\sqrt{\lambda}+b_2} \quad (26)$$

Onde o termo b_1 corresponde a $\mu\text{m}^{1/2}$ e b_2 são coeficientes constantes. Diante de todas as notações listadas, é importante saber o valor real da emissividade para a análise Termográfica a fim de melhor obter os resultados, tanto qualitativo como quantitativo em experimentos e ambientes de produção industrial.

Verificando os fenômenos térmicos ultra-rápidos, os mesmos são acompanhados por mudanças significativas de emissividade. Este efeito pode resultar na deterioração da precisão dos métodos da Termografia aplicadas a esses processos térmicos, como por exemplo: a Termografia dinâmica (ativa). (MINKINA e DUDZIK, 2009, p. 22).

3.4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Diante das informações apresentadas, sobre a radiação térmica e seu comportamento é preciso compreender o balanço da radiação e suas características, tais como: a transmissividade, absorvidade e refletividade. Pois, as mesmas influenciam nas medições dos objetos estudados, afinal a emissividade dos materiais estudados depende de dessas variáveis e do comportamento das superfícies analisadas e das equações que descrevem esse fenômeno.

Mediante este foco, a radiação térmica se faz necessária para compreender o funcionamento de sistemas de medição térmica, e saber comumente empregados na técnica da Termografia.

CAPITULO IV

4 TERMOGRÁFICA E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.

O objetivo deste Capítulo é destacar aspectos relacionados a aplicação da técnica da Termografia, os requisitos e parâmetros para melhor otimizá-la na manutenção preditiva em falhas de rolamentos com uma carreira de esfera. Como também, listar os tipos de análises termográficas e comentar sobre a técnica de Análise de Vibrações, pois a mesma servirá para validar os resultados termográficos comprovando a existência de falhas nas pistas do rolamento.

4.1 TERMOGRAFIA

A Termografia é uma técnica de ensaio não destrutivo que registra a radiação infravermelha emitida pela superfície de um corpo por meio da conversão de calor em temperatura. Permitindo aferir medidas à distância, sem contato com o objeto inspecionado. Os equipamentos destinados a este fim são denominados: câmeras térmicas, termográficas ou termovisores, exemplificados na Fig. 20.

Figura 20 - Tipos de Termovisores



Fonte - FLIR SYSTEMS (2016)

Para obter registros de radiação térmica se faz necessário que o objeto de análise tenha temperatura superior ao zero absoluto, ou seja, $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. A partir deste ponto o objeto tanto

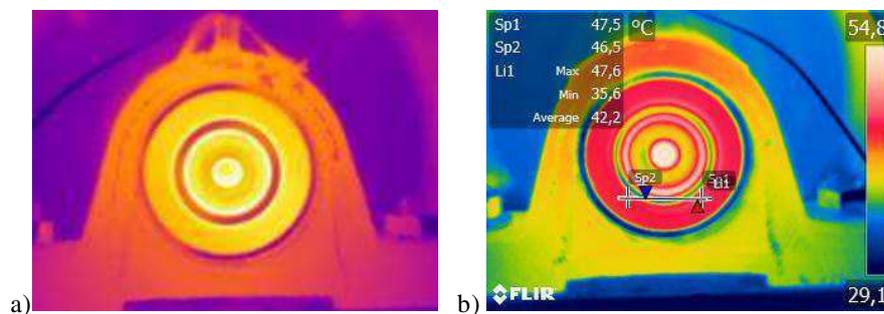
pode absorver como emitir radiação térmica, a qual capta-se pelo Termovisor. (FLIR, 2015, p. 73-88, CARRAMALHO, 2012, p. 13; NINKIRA e DUDZIK, 2009, p. 41).

Os dados obtidos por este equipamento podem auxiliar no diagnóstico de falhas em elementos mecânicos por descontinuidade térmica. Em outras palavras, pode-se fazer uso dessas informações em questões que envolvam desde a área de saúde, veterinária até os campos de estudo passando das engenharias. (OLARTE, 2011, p.253-255 e OLIVEIRA, 2012, p. 50-55).

Também é possível destacar a aplicação da Termografia para ensaios de calorimetria e validação em testes experimentais, tais como ligas de SMA (Shape Memory Alloys), auxiliar na caracterização de materiais metálicos e compósitos, perdas térmicas de energia, simulação, inspeção de soldas, engenharia aeroespacial entre outros estudos. (QIRT, 2015, 2016).

Em quaisquer dessas situações há de se perguntar sobre a qualidade da informação a ser avaliada, ou seja, se deseja uma informação qualitativa ou quantitativa, Fig. 21. É importante fazer tal questionamento, pois quando a Termografia é qualitativa se examinam, por comparação de paletas de cores, as imagens dos termogramas, a Termografia quantitativa, deve fornecer um número confiável para a tomada de decisão.

Figura 21 – a) Termografia qualitativa; b) Termografia quantitativa



Fonte – Acervo próprio

Por exemplo, o termografista pode visualizar dois rolamentos, Figura 21, a fim de verificar se existe algum problema de alteração térmica em uma área específica. Caso exista, é possível perceber por comparação e variação da coloração da paleta de cores, entre os elementos, que um deles precisa ser reparado e assim, sanar o problema.

Com relação a Figura 21(b) deseja-se saber se determinada temperatura foi ultrapassada, nesta situação o rigor da análise exigirá a obtenção de outros dados, a exemplo da velocidade do ar e da umidade, para ser inserido no termovisor a fim do termografista efetue um diagnóstico seguro e confiável. Para auxiliar nos procedimentos das ações em busca de um diagnóstico

confiável foram publicadas normas na área. A ABNT, por exemplo, publicou as seguintes normas: NBR 15718, NBR 15572, NBR 16292, NBR 15424, NBR 15866 (Vide Fig. 22). Por meio delas é possível efetuar levantamento de dados mais confiáveis.

Figura 22 - Normas sobre Termografia publicadas pela ABNT

ABNT NBR 15424:2016	ABNT NBR 15572:2013	ABNT NBR 15718:2009	ABNT NBR 15763:2009
Ensaio não destrutivo - Termografia - Terminologia.	Ensaio não destrutivo - Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos.	Ensaio não destrutivo - Termografia – Guia de verificação de termovisores.	Ensaio não destrutivo - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência.
Esta norma define os termos utilizados no método de ensaio não destrutivo de termografia.	Esta norma constitui um guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos, indicando as responsabilidades do usuário final e do inspetor termografista.	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 calibração definido pelo próprio usuário.	Ensaio não destrutivo - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência.
ABNT NBR 15866:2010	ABNT NBR 16292:2014	ABNT NBR 16485:2016	
Ensaio não destrutivo - Termografia – Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos.	Ensaio não destrutivo - Termografia – Medição e compensação da temperatura aparente utilizando câmeras termográficas.	Ensaio não destrutivo - Termografia - Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros	
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.	Esta norma descreve os procedimentos para a medição e compensação da temperatura aparente refletida quando da medição da temperatura da superfície de um objeto utilizando câmeras termográficas.	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.	

Fonte – LEEST- UFCG (2016)

Outro aspecto importante na análise termográfica é com relação à fonte de emissão de calor. Explica-se: pode o objeto emitir calor ou ser induzido calor na superfície do objeto. No primeiro caso, se tem caracterizada a análise termográfica do tipo passiva e, no segundo caso, caracteriza-se a análise termográfica do tipo ativa. Para autores como, Oliveira (2010, p. 28-29), Santos (2010, p. 21), Ninkira e Dudzik (2009, p. 20), Chrzanowski (2001, p.30-40) essas são as melhor tipologia para a análise Termografica.

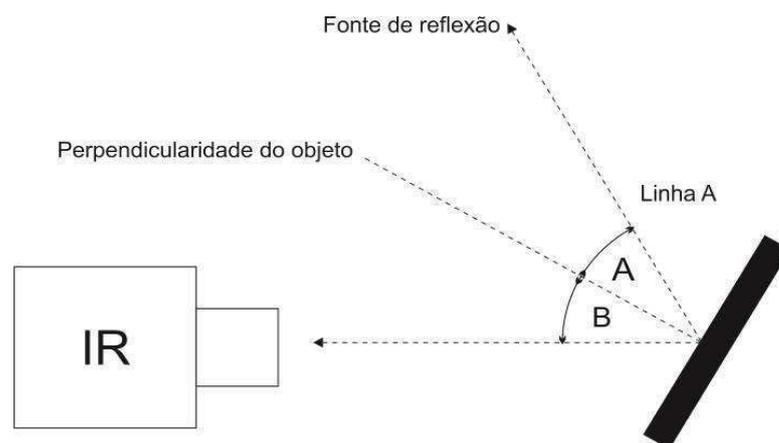
Por sua vez, existem dois tipos de métodos de coleta de dados: o método direto e o método indireto (refletor). No método direto posiciona-se o termovisor com sua lente voltada para a superfície do objeto em estudo. Já no método indireto o termovisor é posicionado de forma que a sua lente fique oposta ao objeto em análise. A coleta de dados, neste caso, se dá por meio da leitura da reflexão da radiação térmica do objeto num anteparo de emissividade conhecida. Além desses aspectos é de suma importância conhecer as variáveis a serem manipuladas para auxiliar no diagnóstico termográfico quantitativo. No tópico a seguir comentar-se-á em maiores detalhes sobre as mesmas.

4.2 MÉTODOS E APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA.

O método de ensaio aplicados a Termografia estão relacionados a medição da temperatura aparente refletida de uma superfície. Pois a temperatura refletida é igual a intensidade da radiação emitida em onda eletromagnética (ver Eq. 7). Então, a NBR 16292 (2014, p. 1-5) e Caramalho (2013, p.71 – 73), descrevem dois métodos o indireto e o direto.

O método Indireto assume que a refletância do refletor de infravermelho utilizado é igual a 1, ou seja, a refletância do corpo negro. A Fig. 23 mostra o esquema de como deve-se estimar ou medir o ângulo de reflexão e o ângulo de incidência a partir da posição da qual a câmara termográfica visualiza o objeto.

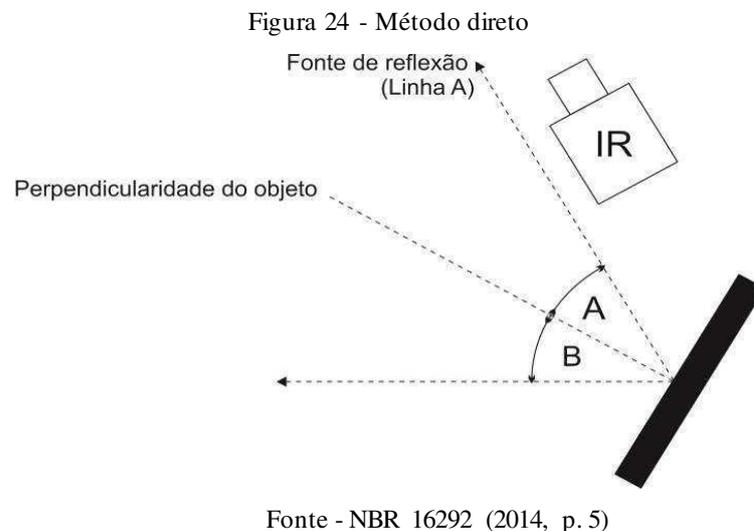
Figura 23 - Método refletor (ângulo de reflexão e ângulo de incidência)



Fonte - NBR 16292 (2014, p.4)

Onde, A é o ângulo de reflexão; B o ângulo de incidência; Ângulo A é igual ao ângulo B. Para os ensaios com o método direto, deve-se posicionar a câmara contrária ao objeto e na mesma direção do ângulo da fonte de reflexão e utilizar uma função de medição apropriada

como área, para notar a temperatura aparente da fonte de reflexão, conforme esquema na Fig. 21.



Onde, A é o ângulo de reflexão, B o ângulo de incidência e o Ângulo A é igual ao ângulo B. A escolha do método pode influenciar no registro termográfico, pois as emissividades dos materiais podem não serem registradas com veracidade e ocorrer acúmulo de erros em conjunto com o uso de variáveis.

4.3 VARIÁVEIS A SEREM MANIPULADAS EM ENSAIOS.

Quando se está para desenvolver um ensaio seja em laboratório ou no campo é necessário definir que variáveis são importantes manusear para a obtenção dos dados. Em Termografia as principais variáveis são: Emissividade, temperatura atmosférica, umidade relativa do ar, velocidade do ar, distância do termovisor ao objeto em estudo, temperatura refletida, ambiente de coleta dos dados e as especificações técnicas do termovisor. (CARAMALHO, 2012, p. 53-69, NBR 15572:2013, p. 20, AHMADIPOUR e NEMATOLLAHI, 2015, p. 1-7).

A emissividade (ϵ) é a variável mais importante na obtenção de dados termográficos quantitativos. Depende do tipo de material e da qualidade da superfície analisada. Quanto mais brilhante for a superfície do objeto maior será a sua refletância e menor será a sua emissividade. Nestes casos, deve-se preparar a superfície com um material de emissividade conhecida a exemplo de pintá-lo com tinta a óleo fosca, cuja emissividade é 0,95. Não ter conhecimento desta variável impossibilita a leitura quantitativa do objeto em estudo. (CARAMALHO, 2012, p. 53 - 69, AHMADIPOUR e NEMATOLLAHI, 2015, p. 1-7).

A temperatura ambiente (T_{amb}) corresponde ao grau de aquecimento do ar da atmosfera. Geralmente esta variável é obtida através de sondas específicas posicionadas próximas ao objeto de estudo.

A umidade relativa do ar (UR%) compreende a quantidade de vapor de água contida no ar, pode-se afirmar que é porcentagem de água que está formulando os gases no ambiente. Ou seja, quanto mais saturado de vapor de água o ambiente estiver mais ele amortecerá as ondas eletromagnética emitidas pelo corpo em estudo. Em outras palavras, ambientes com alta umidade relativa influenciam nos dados termográficos, e podem tornar os dados imprecisos.

A velocidade do ar (V_{ar}) compreende o deslocamento de uma massa de gases em repouso. Nos ensaios termográficos com velocidades do ar acima de 20 km/h tornam os mesmos inviáveis com relação a sua coleta de dados, em função do fluxo de ar facilitar a troca de calor entre o objeto e o ambiente. Em ambientes construídos e controlados deseja-se velocidades menores não superiores a 0,2 m/s, a fim de minimizar os problemas de convecção promovidos por tal velocidade. (NBR 15572 2013, p. 20).

A distância do objeto (d) compreende o comprimento entre a lente do termovisor e o objeto em estudo. Quanto menor a distância mais precisa são as medições. Nestes casos a menor distância depende das especificações técnicas do equipamento.

A temperatura refletiva (T_{ref}) compreende as diversas emissões de calor proveniente de outros objetos ou superfícies presentes no local do ensaio que não pertencem à superfície do objeto em estudo. Quanto maior a presença de temperatura refletida nos ensaios menos confiáveis são os resultados obtidos. Portanto, quando se está para coletar dados termográficos quantitativos deve-se proteger o objeto deste tipo de temperatura por meio de enclausuramento ou anteparos das temperaturas refletidas do ambiente.

As especificações do termovisor compreendem aquelas relacionadas às características comuns e das imagens do equipamento: faixa de temperatura que o termovisor opera, sensibilidade térmica, resolução infravermelha, campo de visão por distância de foco, tipo de foco, tipo do detector (faixa espectral), frequência da imagem, precisão do termovisor, correção de medição, ferramentas de análise.

O ambiente de coleta de dados compreende o lugar onde são registrados os termogramas. Caso o ambiente seja um laboratório há necessidade da área construída ser livre de janelas, a fim de isolar as radiações térmicas proveniente das mesmas e de outras fontes de emissão térmica além de controlar as demais variáveis já mencionadas. Caso o ambiente seja externo há necessidade de preparar a superfície do objeto a ser analisado, enclausurando-o com o intuito

de minimizar a influência das temperaturas refletidas do ambiente. Além disso as demais variáveis devem ser manipuladas e obtidas por meio de equipamentos adequados e calibrados.

Para que esse processo de obtenção dos termogramas seja melhor compreendido comentar-se-á, no próximo tópico, sobre a forma como o equipamento capta as ondas eletromagnéticas e apresentam suas imagens térmicas.

4.4 EQUIPAMENTOS TERMOGRÁFICOS OU TERMOVISÓRES.

Os equipamentos termográficos, termovisores também conhecidos como câmeras de infravermelho, captam a radiação que resulta em uma dada temperatura e possibilita a câmera de calcular e mostrar determinado coeficiente térmico do objeto.

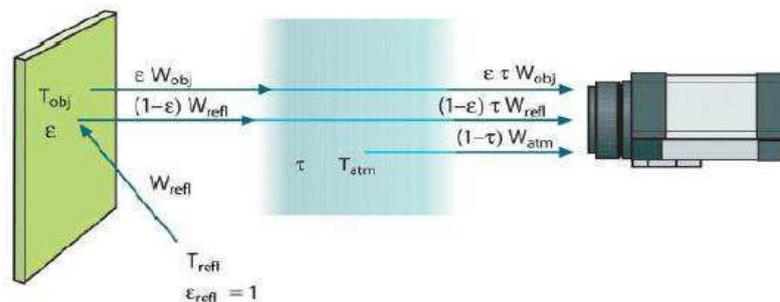
Quando um termovisor é direcionado para o objeto de estudo a energia infravermelha é focada por um conjunto de lentes sobre um detector de IR que envia a informação eletrônica para um sensor processar e gerar a imagem em aproximadamente 5 μ s para os equipamentos de sistemas de varrimento e de 15ms para os sistemas FPA (*Focal Plane Array – Matriz de plano focal*).

Caramalho (2012, p. 33), descreve uma equação com base na potência da radiação recebida (W) da fonte de temperatura do corpo negro (T_{fonte}) a uma distância curta de sinal de saída (U_{fonte}) proporcional a entrada da potência. (Ver Eq. 27).

$$U_{\text{fonte}} = CW (T_{\text{fonte}}) \quad (27)$$

Onde, U_{fonte} será igual a CW_{fonte} e C é uma constante. A captação da imagem ocorre da seguinte forma (Ver Fig. 25):

Figura 25- Representação esquemática da situação da medição termográfica geral



Fonte – FLIR SYSTEMS (1999, p.13)

Na Figura 25, apresenta-se o esquema de como são captados e convertidos os dados do ambiente para o termovisor. Cada termo expresso tem uma relação matemática, onde $\varepsilon\tau W_{obj}$ é a emissão a partir do objeto, sendo ε a emitância e τ a transmitância da atmosfera e T_{obj} a temperatura do objeto.

Para a emissão refletida = $(1-\varepsilon)\tau W_{refl}$, sendo $(1-\varepsilon)$ a reflexão do objeto e T_{refl} são as fontes ambientais de temperatura; a emissão a partir da atmosfera = $(1-\tau)\tau W_{atm}$, sendo $(1-\tau)$ a emitância da atmosfera e T_{atm} a temperatura da atmosfera. Sobre posse desses dados é formulada a Eq. 28.

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

Com algumas manipulações matemáticas, pode-se multiplicar a Equação 29, por C e substituir os produtos pelo U correspondente a qual, ficará:

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

Resolvendo a Equação 30 em função de U_{obj} , é possível obter a fórmula de medição geral utilizada em equipamentos termográficos da empresa Flir Systems.

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} U_{atm} \quad (30)$$

Onde, os termos da equação U_{obj} é a tensão de saída calculada pela câmera para o corpo negro em temperatura T_{obj} ; U_{tot} é a tensão de saída medida do equipamento para o caso real, U_{refl} é a tensão de saída teórica da câmera para corpo negro de temperatura T_{ref} conforme calibragem e U_{atm} corresponde a tensão de saída teórica da câmera o corpo negro de temperatura T_{atm} segundo sua calibração.

O modelo matemático descrito na Equação 30, representa como são geradas as imagens térmicas utilizadas para a inspeção termográfica. Contudo, os testes que envolvem Termografia devem seguir inúmeros cuidados e restrições para uma leitura realmente confiável do espectro da radiação.

4.5 COMPOSIÇÃO DE LAUDOS

A composição de laudos se faz após a análise de uma determinada situação a qual é preciso diagnosticar as verdadeiras condições de determinados equipamentos ou situações. Os laudos são relatórios emitidos que traduzem as constatações captadas pelo técnico ou especialista em torno do objeto analisado, por meios dos conhecimentos específicos de quem o relatou e analisou.

Em resumo, o laudo trata-se de um relatório que propõe e reportam falhas, melhorias e intervenções, sejam elas imediatas, meio ou longo prazo. Nele também deve está descrito uma breve introdução constando as datas, locais e identificação da empresa onde o trabalho foi realizado, membros responsáveis internos (funcionários) e externos (especialistas contratados para gerenciar e analisar as situações problema). Além dos objetivos, metodologia, descrição da atividade a ser realizadas, bem como organograma e ferramental necessário para a inspeção e aquisição dos dados e realização do laudo.

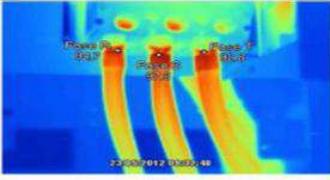
Os laudos são aplicados em vários momentos, cada qual se destina para uma determinada finalidade. Alguns laudos mais comuns são os de ergonomia, normativos, perícias, laudos de vibração, manutenções, inspeções, termográficos entre outros. Cada relatório redigido é fundamentado com base em normas e conhecimento específico por determinada área e especialista.

Em análises de manutenções é comum ao término de uma inspeção a formulação de um relatório que estipule os níveis de severidade dos equipamentos. Principalmente os comportamentos térmicos. Na análise termográfica, o intuito principal é a possibilidade de recolher informações referentes ao aquecimento das máquinas e indicar com maior confiabilidade os reparos necessários.

Para tanto, em casos de uso da Termografia o registro e o processo de fundamentação fornece o laudo, e o mesmo depende de vários fatores, entre eles, estipular qual o tipo da inspeção termográfica qualitativa ou qualitativa, variáveis ambientais, conhecimento prévio do equipamento inspecionado, atenção as normas, limitação do equipamento e conhecimento do software Flir Systems. A Fig. 26 tem um exemplo de uma ficha de inspeção para a montagem do laudo termográfico utilizando a Termografia (passiva).

Cliente	:		Anomalia
Local/ Setor	:	CCM Torre da fabrica	
Equipamento	:	IR000088 Bomba de agua N2 CCM Torre da fabrica	
Componente	:	Ligação Baixa Tensão	Relatório RT01-001
Termografista	:	AC. Cliente	Termograma 68

Problema	:	Sobreaquecimento nos terminais de saída do disjuntor. Fase R, S e T
Obs	:	

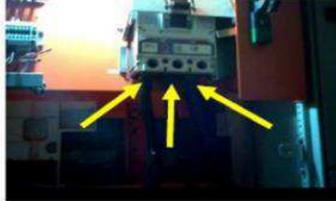


Parâmetros do Termograma	
Data e Hora	23/05/2012 09:37
Quantitativa	x
Emissividade	e 0,95
Temperatura Refleida	°C 22
Temperatura Ambiente	°C 27
Velocidade do Vento	m/s 0
Temperatura Corrigida	°C 97,6
Delta T (ΔT = P1 - P2)	°C 4,6
Carga (Usual = 100 %)	% 100
Comente Fase: R S T	

TIPO DE FALHA	
<input type="checkbox"/>	Iminente
<input checked="" type="checkbox"/>	Certa
<input type="checkbox"/>	Provável
	Informação
	Evolução de Temperatura
	Reincidente

RECOMENDAÇÕES	
<input checked="" type="checkbox"/>	Manutenções e Reparos
<input checked="" type="checkbox"/>	Avaliar os Componentes
<input checked="" type="checkbox"/>	Verificar Sobrecarga
<input type="checkbox"/>	Substituir Componentes
<input type="checkbox"/>	Refazer Ligações
<input type="checkbox"/>	Verificar Circuito, Adequar Componentes
<input checked="" type="checkbox"/>	Reapertar todas as Conexões

INTERVENÇÃO :	<input type="checkbox"/> Imediata	<input checked="" type="checkbox"/> Programar Serviço	<input type="checkbox"/> Urgente	<input type="checkbox"/> Rotina
---------------	-----------------------------------	---	----------------------------------	---------------------------------

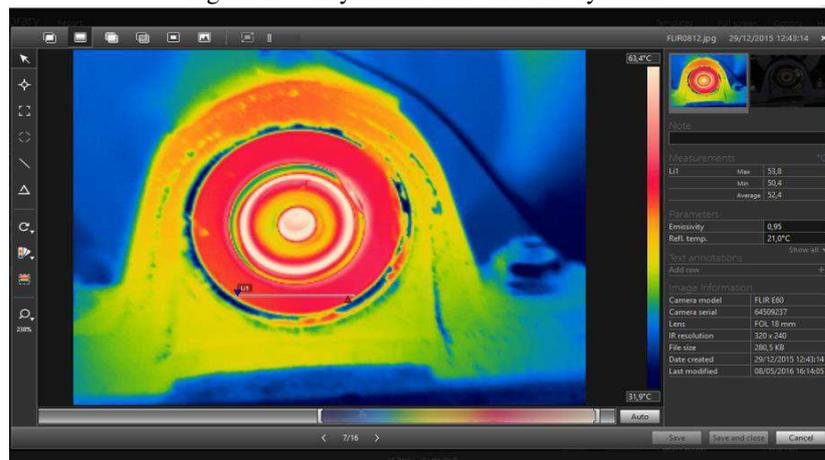


O.S. nº	SERVIÇO EXECUTADO	REPARADOR	DATA

Fonte - OLIVEIRA (2012, p.31)

A Figura 26 mostra no quadro *parâmetros do termograma*, a especificação das variáveis, tipo da inspeção termográfica, a quantitativa, e fornece um pequeno resumo informando o tipo da falha e as recomendações necessárias. Os laudos técnicos termográficos são montados com o auxílio do software (vide Fig. 27) do fabricante do equipamento, nesta pesquisa fez-se uso do Termovisor E - 60 fabricado pela Flir Systems.

Figura 27 - Layout do software Flir Systems



Fonte - Acervo próprio

A partir do registro de informações é aceitável a importação de imagens da câmera para a área de trabalho do software, a Fig. 27 dá um exemplo. A esquerda está a barra de ferramenta para edição de regiões térmicas, na parte superior as edições de imagens e a direita a régua

térmica e a caixa de diálogo contendo todas as informações referentes às vistorias e as variáveis a serem inseridas durante o experimento.

Diante das argumentações pré-escritas, nesta pesquisa se fez a análise de 8 (oito) amostras com o uso da Termografia respeitando as normas e variáveis citadas e em seguida a análise de dados juntamente com os espectros de vibração, a qual é também e necessário atenção as rotinas registradas para cada rolamento estudado. Por esse motivo o item a seguir traz informações pertinentes aos registros de vibração.

4.6 CONCEITOS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

A análise de vibração é dita como um processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento, são descobertas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas, onde são registradas a leitura da frequência espectral e amplitude do defeito (NBR 10273:2013).

Para alguns pesquisadores como Harris e Kotzalas (2007, p. 198), Barilli (2013, p. 20), Athanasopoulos e Botsaris (2014, p. 171), a análise de vibração é uma das principais técnicas aplicadas para detectar falhas em elementos rotativos, como por exemplo, os rolamentos.

O uso da vibração em mancais de rolamentos parte a princípio do registo das frequências de defeitos percebidas e repetidas ao longo do tempo. Cada falha de um componente do rolamento têm uma frequência característica que pode ser modulada no espectro, com base na amplitude da frequência oscilatória. Essa variação de picos percebida ao longo do tempo e frequência pode identificar qual componente está defeituoso.

No entanto, quando se monitora os componentes dos rolamentos os quais são têm a seguinte nomenclatura: a BPFI (*Ball Pass Frequency Inner Race*) que refere-se aos termos para cada componente de cada frequência de passagem dos elementos rolantes por um ponto da pista interna associada a defeitos na pista interna. BPFO (*Ball Pass Frequency Outer Race*) é a frequência de passagem dos elementos rolantes por um ponto ou defeitos da pista externa. BSF (*Ball Spin Frequency*) são as frequências de giros dos elementos, associada a defeitos nos componentes rolantes os rolos e/ou esferas e a FTF (*Fundamental Train Frequency*) estão relacionados às frequências de giro da gaiola ou do conjunto de elementos rolantes, associada a defeitos na gaiola e a outros elementos rolantes.

Cada componente citado detém uma equação tomada como base para encontrar a frequência de um possível defeito. Para este estudo, deteve-se atenção as falhas incipientes que ocorrem nas pistas internas e externas, as quais pela análise de vibrações se faz uso das Eq(s). 31 e 32 para modelar os defeitos na pista interna e pista externa, respectivamente.

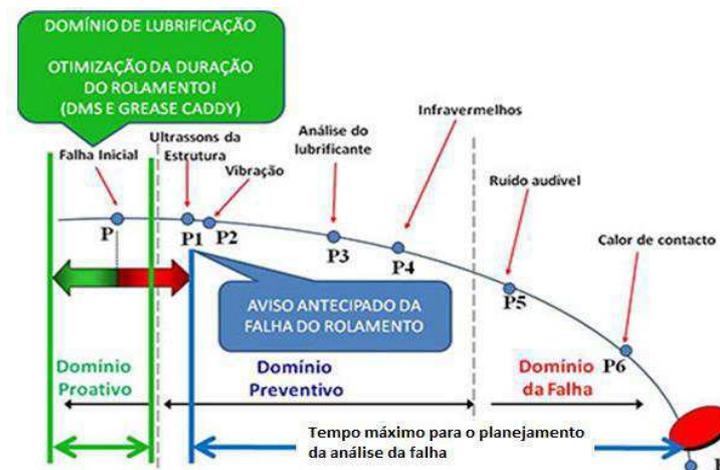
$$DPFI = \frac{n \cdot fr}{120} \left(1 + \frac{B}{DP} \cos \theta \right) \quad (31)$$

$$DPFO = \frac{n \cdot fr}{120} \left(1 - \frac{B}{DP} \cos \theta \right) \quad (32)$$

Onde, DP é o diâmetro “pitch”, B será o diâmetro da esfera, fr é a frequência de rotação, θ o ângulo de contato, n corresponde ao número de esferas e o termo DPFI e BPFO (são equações para as frequências características de defeito).

A análise de vibração pode ser empregada para diagnosticar a falha, como por exemplo, situações que envolvam o atrito causado pelo contato metal-metal gerado pelas esferas em rolamento na pista com defeito. Esta fricção produz energia que se acumula com o movimento e terminam por dissipar calor e ruído. A Fig. 28 mostra um exemplo de uma falha causada por meio de lubrificação inadequada e as formas de planejamento para detectá-la.

Figura 28- Surgimento e comportamento de uma falha e os meios de planejar seu diagnóstico



Fonte – EU Systems (2015)

Na Figura 28 percebem-se os melhores momentos de se fazer uso da análise de vibração (ponto P2) e da Termografia (ponto P4). O uso regular de uma ou ambas as técnicas no campo pode contribuir para reduzir gastos com manutenções corretivas em função do diagnóstico precoce da falha, quando a falha está presente, no momento inicial. (ATHANASOPOULOS e BOTSARIS, 2014, p. 171 - 172).

A sua detecção se faz de acordo com a grandeza física usada para aquisição de sinais, segundo Tandon (1999, p. 469 - 480), elas são medidas a partir da vibração, pressão acústica,

temperatura e análise de desgaste e essas medições relacionadas à vibração são realizadas por meio de três métodos: o domínio do tempo, frequência e domínio tempo-frequência.

4.6.1 DOMÍNIO DO TEMPO.

O domínio do tempo é um método de detecção de falhas por sinal, nele é mostrado as mudanças de amplitude em relação ao tempo, onde consiste em comparar os níveis de RMS (*Root Mean Square*) potência eficaz ou média quadrática do fator de crista, em razão aos picos e valores de RMS da aceleração (ALEGRANZI, 2013, p.28; BEZERRA, 2004, p. 2 - 6).

Neste método trata-se de uma descrição a fim de analisar funções matemáticas com relação ao tempo. Isso quer dizer que, a variável tempo (t) é conhecida em cada instante de um tempo contínuo, ou em situações de vários instantes separados (quando o tempo é discretizado). (THOMAS, p. 201).

Uma das transformações matemáticas que auxiliam a definir o domínio do tempo é a Transformada de Fourier. Segundo o francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1.768 - 1.830) um movimento periódico desde que se limitasse por uma série de senos e cossenos tidos como movimentos harmônicos poderiam ser facilmente representados, como mostra a Eq. 33.

Uma das transformações matemáticas que auxiliam a definir o domínio do tempo é a Transformada de Fourier. Segundo o francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1.768 - 1.830) um movimento periódico desde que se limitasse por uma série de senos e cossenos tidos como movimentos harmônicos poderiam ser facilmente representados, como mostra a Eq. 33.

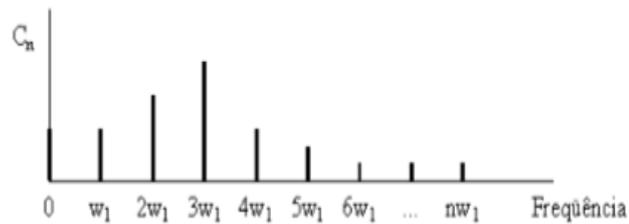
$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (an \cos(\frac{n\pi}{L}X) + bn \sin(\frac{n\pi}{L}X)) \quad (33)$$

Onde, o termo $(\frac{n\pi}{L}X)$ pode ser a frequência angular w sendo uma função do período ou frequência, substituindo w na Eq. 33 obtém-se a Eq. 34.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (an \cos(wx) + bn \sin(wx)) \quad (34)$$

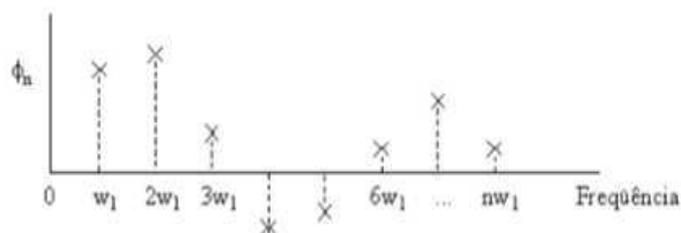
Ao expandir a equação para n termos cada valor encontrado terá a sua derivada correspondente a cada $w1, w2, w3, w4...$ e suas respectivas amplitudes apropriadas aos coeficientes $a1$ e $b1, a2$ e $b2, a3$ e $b3, a4$ e $b4...$ e assim infinitamente, o que mostrará ao final um gráfico denominado espectro de Fourier.

Figura 29 - Espectro de Fourier módulo “Cn”



Fonte – Vieira (p. 1-5)

As Figuras 29 e 30 mostram os tipos harmônicos de frequência registrada. Quando um sistema rotativo apresenta alguma falha, seja defeito de fabricação e ou instalação essas frequências apresentaram oscilações ao longo do espectro. (SENKO, 2013, p. 24; ALMEIDA, 1999, p. 38-63 e VIEIRA, p.1- 5).

Figura 30 - Fase ϕ_n 

Fonte - Vieira (p.1-5)

Após a montagem do espectro de Fourier, Segundo Vieira (2016, p. 4 - 5) a análise harmônica de qualquer tipo de sinal tornou-se fácil. E após a formulação da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) os sinais são filtrados em faixas de frequência em acordo com o tipo de análise a ser feita, tais como a de deslocamento, velocidade ou aceleração. (ALMEIDA, 1999, p. 24-25; ATHANASOPOULOS e BOTSARIS, 2014, p. 172).

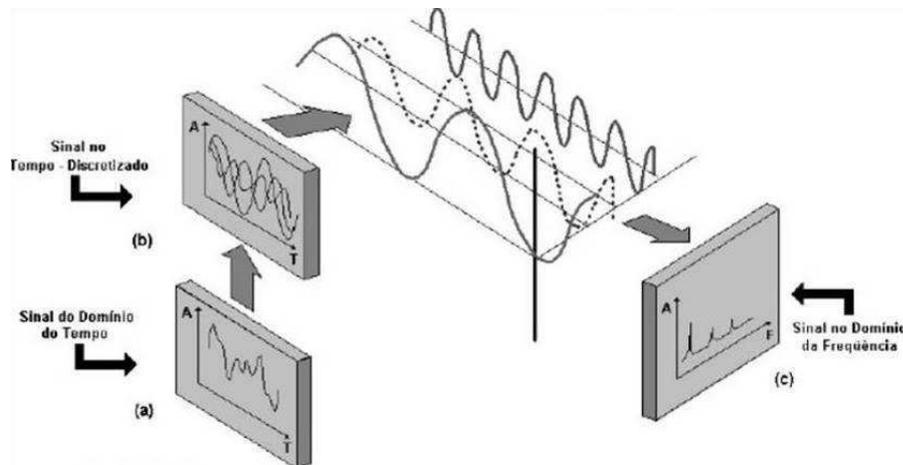
4.6.2 DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

No domínio da frequência são aplicados os algoritmos da FFT que após sua aplicação são separados conceitualmente todas as senóides, ou seja, a amplitude de cada frequência é a mesma amplitude em forma de onda em função do tempo, para cada termo da frequência. Com

isso, é possível representar o domínio da frequência em termos dos seus componentes individuais dados pelo sinal, a aplicação do mesmo, irá mostrar apenas o valor máximo de cada frequência, ver Fig. 31. (ALMEIDA, 1999, p. 24 – 25; ALEGRANZI, 2012, p. 20 - 25).

A Figura 31 mostra o que ocorre quando se aplica a FFT na análise de um sinal. Em a) é percebido o registro no domínio do tempo, a qual os picos registrados mostram apenas as mudanças de amplitude da frequência, e b) é uma parte do sinal discretizado, já em c) nota-se apenas as ondas de frequência máxima obtida após a aplicação da FFT.

Figura 31- Sinal registrado



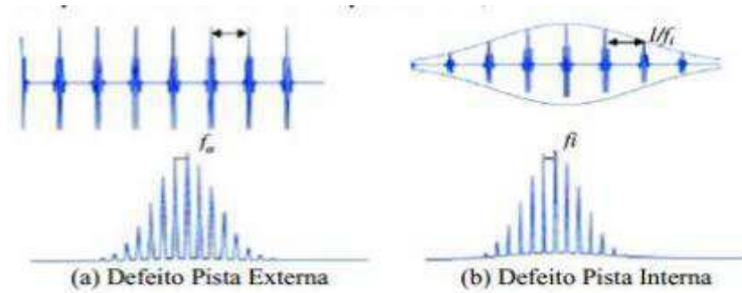
Fonte - Adaptado de Rolim (2015, p. 25)

Contudo, a representação do domínio da frequência fornece mais detalhes sobre o sinal do sistema analisado a partir do qual foi gerado. Isso ocorre devido à comparação dos espectros. Nos casos de estudos com rolamentos é obtido um espectro quando o mesmo encontra-se em boas condições e comparado com os espectros tirados posteriormente. (BARILLI, 2013, p. 21).

Na ocorrência de defeitos, seja ele ocorra na pista externa, os sinais gerados por vibração têm amplitudes e direções com níveis constantes. Isso se deve ao fato da posição do defeito manter-se constante em relação ao acelerômetro utilizado para a detecção dos dados. (BARILLI, 2013, p.20).

Para as situações de defeitos localizados na pista interna ou elementos rolantes esses apresentam uma tendência de geração de sinais de vibração mais complexos, com modulações quando comparados com os sinais referentes à pista externa, ver Fig. 32. (ALMEIDA 1999, p.24, BARILLI, 2013, p.20, HARRIS e KOTZALAS, 2007, p. 195 – 249).

Figura 32 - Onda e respectivo espectro de rolamento com falha



Fonte - Barilli (2013, p. 13)

A Figura 32 ilustra o sinal obtido quando um rolamento está com defeito em suas pistas externa ou interna. Seja um defeito existente no rolamento, onde a passagem dos elementos defeituosos pelas zonas de carregamento irá causar uma mudança contínua na carga de transmissão dos impactos gerados durante a fricção dos componentes, a exemplo, a esfera passará sobre as falhas na pista e será gerado um pico oscilatório captado pelo sensor durante a análise.

Esses sinais registrados no espectro muitas vezes precisam de uma melhor percepção, pois segundo Barilli (2013, p.14), Almeida (1999, p.24), Osuagwu e Thomas (1982, p. 109) em seus estudos questionam as dificuldades para captarem falhas em rolamentos com apenas o uso do espectro direto da FFT principalmente quando os defeitos são na pista interna, gaiola e/ou elementos rolantes devido às frequências relacionadas aos defeitos ocorrerem em baixas frequências, geralmente até 500 Hz e por essa razão se faz uso da técnica de detecção por envelope.

4.6.3 TÉCNICA DO ENVELOPE

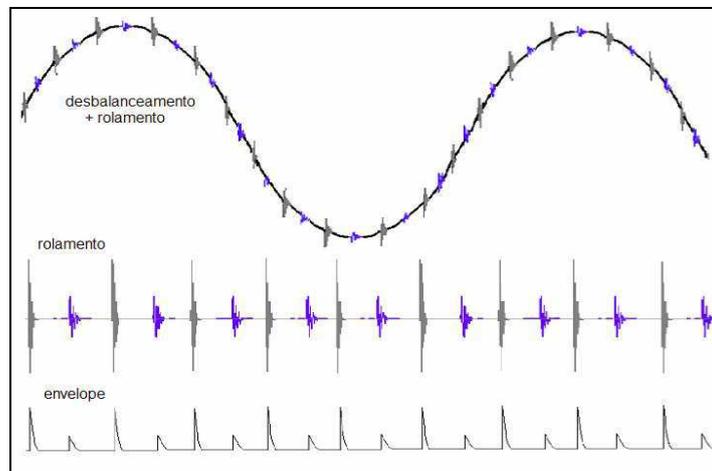
A detecção por envelope HFRT (*High Frequency Resonance Technique*) comprova a identificação de falhas em pistas de rolamentos, através da extração das frequências características de cada defeito com base no sinal vibratório medido por um analisador de sinais dinâmicos, com registros na faixa de altas frequências de aproximadamente 5 kHz a 20 kHz. (ALMEIDA 1999, p. 24).

A filtragem dos sinais para o envelope pode ser feita pela transformada de Hilbert, ela realiza uma demodulação em amplitude de sinais e faz gerar uma resposta causada pelos picos das amplitudes do sinal modulado. Esses sinais são os impulsos de vibração gerados pelos defeitos excitados periodicamente nas ressonâncias dos elementos rotativos, como o rolamento. Cada pico registrado no espectro é proveniente da passagem dos elementos rolantes sobre a

falha, tendo as amplitudes dos sinais moduladas pelas frequências características relacionadas aos defeitos. (ALMEIDA, 1999, p.24, ALEGRANZI, 2013, p.24).

É através da demodulação de um sinal, na ressonância, que surge as primeiras indicações da condição do rolamento. Um sinal portador transporta as variações em sua amplitude e frequência com o tempo. As oscilações de defeitos são percebidas nas frequências características de uma falha, onde as informações das colisões são contidas na frequência de repetição dos impactos, modulada no sinal ao redor das frequências ressonantes do sistema excitadas pelos defeitos no rolamento, ver Fig. 33. (FILHO, 2016, p. 2).

Figura 33- Exemplo Sinal de rolamento defeituoso



Fonte - Filho (2016, p. 12)

Ao aplicar o envelope HFRT, em uma faixa de ressonância encontrada experimentalmente o sinal registrado será filtrado (Alegranzi 2013, p.25). A Fig. 33 exemplifica uma frequência portadora de dois defeitos, o desbalanceamento e a falha no rolamento. Apesar da ilustração não especificar as frequências características de cada defeito, observa-se as oscilações periódicas ao longo do registro do sinal, evidenciada pela aplicação do envelope. Este tipo de análise auxilia a caracterizar qual o defeito de um rolamento Fig. 34.

Figura 34 - Procedimento adotado na técnica do envelope



Fonte - Bezerra (2004, p. 43)

No procedimento de “envelopamento,” o sinal irá passar pelo filtro passa banda (ver Fig. 34), boa parte do ruído captado será eliminado, mas para não perder informações pertinentes referentes ao sinal experimental, o sinal pode ser minimizado e filtrando mais uma vez antes da aplicação da transformada de Hilbert e assim obter a frequência do defeito. (BEZERRA, 2004, p. 44).

4.6.4 DOMÍNIO TEMPO-FREQUÊNCIA

O método do domínio tempo-frequência é uma análise conjunta entre o tempo-frequência-amplitude, aplicada nas situações onde o sinal captado não é estacionário, é o caso dos rolamentos. Para Boashash (1992, p. 70) as distribuições para este método vêm sendo desenvolvidas, com melhores resultado da escolha de uma função arbitrária denominada Kernel.

O sinal dos elementos rotativos em casos que ocorrem deslizamento, fricção nos elementos rolantes, inicia-se o surgimento de componentes não estacionárias no sinal. Então, os registros dos espectros captam sinais transientes, esses sinais obtidos em detecções de máquinas rotativas com rotação variável, torna-se mais adequada a análise da variação das componentes presentes no espectro, no do domínio do tempo. (BARILLI, 2013, p. 21).

Alguns autores como Barilli (2013, p. 21) e Silva (1999, p. 27) questionam como melhor perceber o registro de defeitos em elementos rotativos envolvendo apenas o emprego de técnicas como a FFT, que para muitos pesquisadores a FFT conduz o desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais capazes de fornecer representações tempo-frequência do sinal experimental.

A distribuição tempo-frequência pode ser expressa a partir da equação deduzida por Cohen (Eq. 35), foram criadas novas distribuição com propriedades desejáveis para perceber com maior facilidade as falhas em elementos rotativos. Então, se fez o uso de distribuições como por exemplo Choi-Williams, Zao-Atlas-Marks e Cohen Posch. (LOUGHLIN, BERNARD, 1997, p. 562 – 570).

$$\rho = (n, k) = \sum_{m=-M}^M \sum_{p=-M}^M G(p, m) z(n + p + m) Z^*(n + p - m) e^{-j4\pi m k / N} \quad (35)$$

Onde, o termo n e k serão as variáveis tempo e frequência, m e p serão os intervalos de $-M$ a M dos pontos discretizados e a mesma equação pode ser reduzida para Eq. 36.

$$\rho = (n, k) = F_{m \rightarrow M}[G(n, m) * K = (n, m)] \quad (36)$$

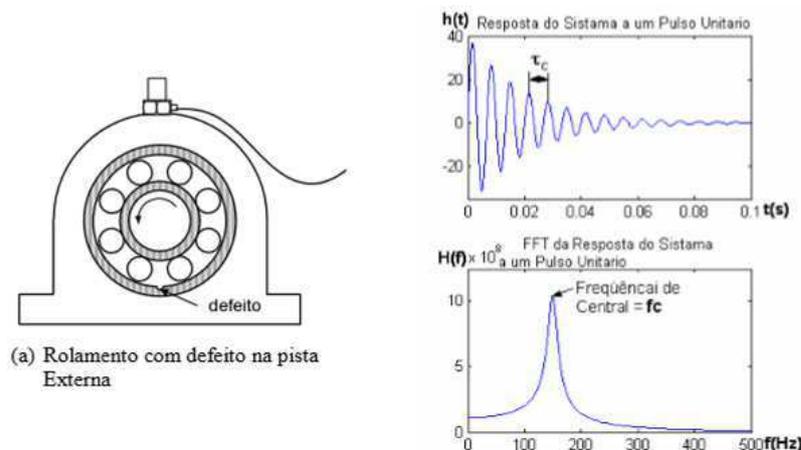
O termo $F_{m \rightarrow M}$ corresponde à transformada de Fourier discreta no instante de tempo m para a frequência k , e o símbolo $*$ denota a convolução discreta no tempo. (SILVA e MUCHE- RONI 2000, p. 4).

No entanto, também é possível aplicar a transformada de Fourier de curta duração (STFT) para os sinais não estacionários. A STFT irá fracionar o sinal em intervalos pequenos, visando reduzir suas características não estacionárias. Sendo assim, o sinal filtrado assume a estacionalidade em cada intervalo da aplicação da FFT. Com isso, novos espectros são obtidos e os sinais adquiridos aparecem as frequências do sinal variando com o tempo. (BARILLI, 2013, p. 22).

4.6.5 REGISTRO E AQUISIÇÃO DE SINAIS

A aquisição dos sinais é feita por sensores de aceleração “acelerômetro” que é um dos instrumentos para medir a aceleração de um corpo vibratório. Pelo registro dos mesmos conseguimos obter as velocidades e os deslocamentos por integração, ver Fig. 35. (RAO 2009, p. 349).

Figura 35 - Registro de sinais (acelerômetro)



Fonte - Bezerra (2004, p 71)

A imagem 35(a) mostra como é o esquema para a aquisição de sinais em um rolamento. Como a frequência de cada defeito tem suas características (f_c = Frequência central no espectro), ao percorrer o diâmetro da pista do rolamento, os elementos rolantes irão excitar a estrutura e

consequentemente irá provocar uma diferença na frequência que está relacionada ao defeito captado pelo sensor.

O funcionamento dos sensores de vibração que utilizam acelerômetros está relacionado ao uso de discos cerâmicos piezoelétricos, que por sua vez possuem a propriedade física de gerarem tensões elétricas quando solicitados a esforços. (BEZERRA 2004, p.71).

Quando um sensor é projetado, os elementos piezoelétricos são arranjados de tal forma que sejam submetidos a uma carga na forma de massa em uma mola pré-tensionada (sistema massa-mola), e um amortecedor onde todo este conjunto é montado fixado em uma base. Com esse arranjo as extremidades inferiores da mola e do amortecedor terão o mesmo movimento sendo que o sistema fica preso no topo e protegido por um invólucro resistente. (RAO, 2009, p. 349 e BEZERRA, 2004, p. 72). São através desses componentes que as informações são passadas para coletores ou analisadores de vibração.

Os Analisadores de Vibração ou sinais dinâmicos são equipamentos de uso simplificado que recebe os dados de vibrações do tipo deslocamento, velocidade e aceleração (ver Fig. 36), e permite uma pré-análise nos espectros obtidos. (BEZERRA, 2004, p.73).

Figura 36 - Analisador de sinais dinâmicos (Lab. Vibrações e instrumentação – UFCG)



Fonte - Senko (2013, p.45)

O analisador de sinais dinâmicos registra as medições de espectros de sinais provenientes de vibrações mecânicas ou elétricas, pela análise de sinais por FFT. Há também o uso de software para simular e analisar as frequências dos espectros de vibração, tais como MASTER-TREND, ANYS e MATLAB são empregados para auxiliar nos registros de sinais. Dos programas citados para este trabalho teve como ferramenta a aplicação do Matlab e uma rotina experimental montada para comparar os espectro experimentais com os simulados.

4.6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Diante do exposto, percebe-se que para analisar anomalias em objetos por meio da Termografia se faz necessária a manipulação de variáveis de forma criteriosas a fim de obter um diagnóstico confiável. Sob este aspecto a escolha do equipamento, o controle do ambiente onde será realizada a análise, assim como o tratamento da superfície do objeto é de suma importância para este diagnóstico e a elaboração do laudo termográfico. Nos casos de pesquisa é também importante ter outra técnica que auxilie a comprovar os dados obtidos por meio da Termografia. Fazer isso é garantir a veracidade das informações obtidas.

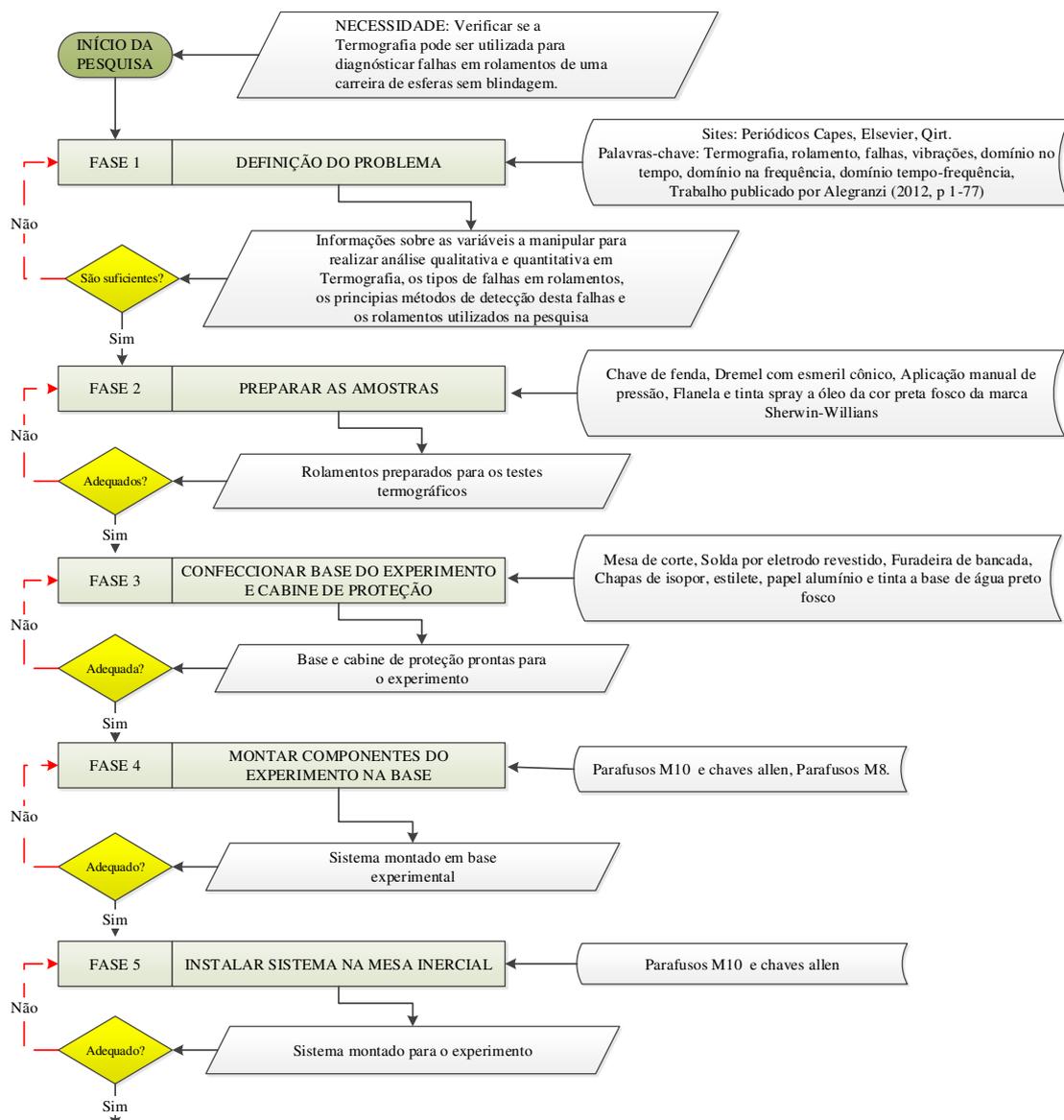
Por essa razão na análise de vibração os métodos e equipamentos são cruciais para a aquisição de sinais. Como também entender como se comporta um sinal estacionário ou não, quais suas influencias e diferenças para serem percebidos em um ensaio. A junção de vários métodos para registrar o desgaste e as medições relacionadas a vibração é preciso relacionar a oscilação presente no sinal com os métodos do domínio do tempo, frequência e domínio tempo-frequência, que irá nortear um caminho a ser seguido para a leitura dos espectros.

CAPITULO V

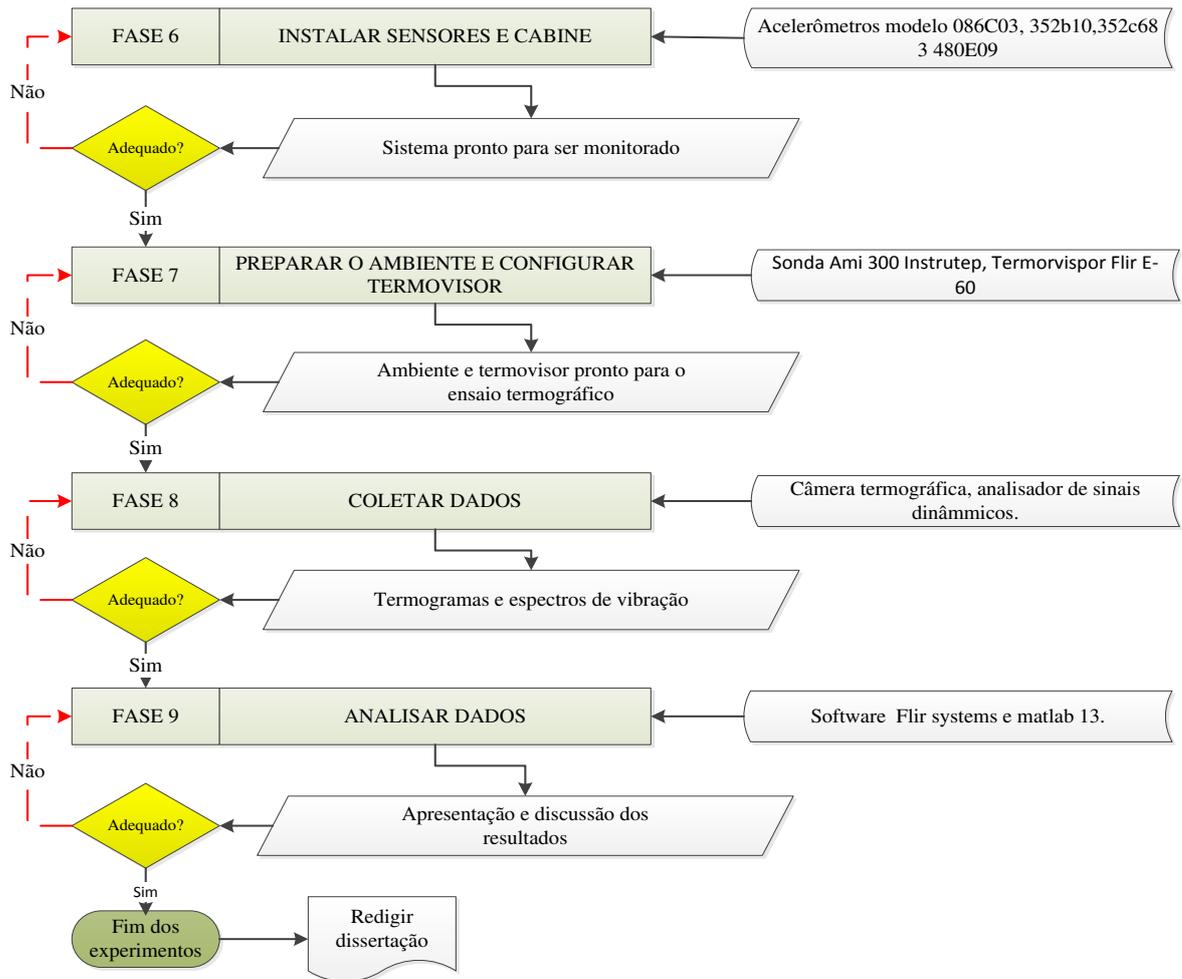
5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O objetivo deste capítulo é apresentar ao leitor as atividades e os meios utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Para tanto, elaborou-se o fluxograma mostrado na Fig. 37.

Figura 37- Fluxograma metodológico



Continuação do Fluxograma 1.



Fonte – Autoria própria

A necessidade que norteou esta pesquisa foi a de verificar se a técnica da Termografia pode auxiliar no diagnóstico de falhas mecânicas em rolamentos de uma carreira de esferas sem blindagem. A partir deste ponto deu-se início as atividades de pesquisa.

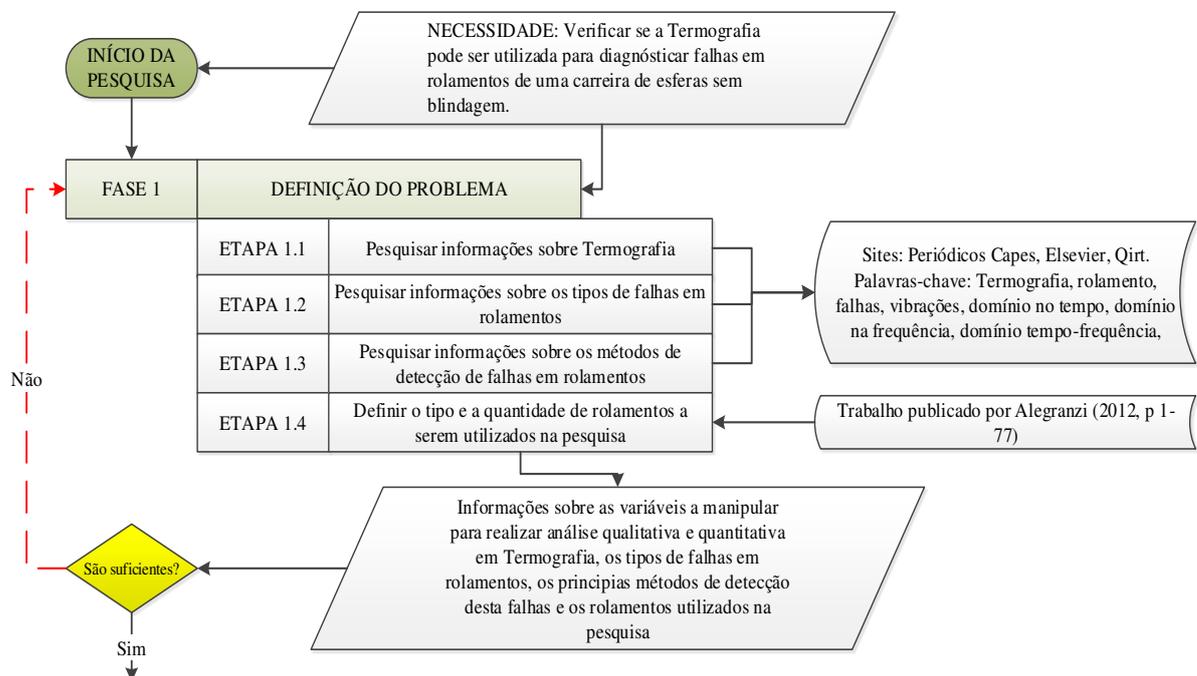
Para tanto, foram elaboradas nove estágios para a realização deste trabalho denominados de fases, a saber: FASE 1 – Definição do problema; Fase 2 – Preparar as amostras; Fase 3 – Confeccionar base do experimento e cabine de proteção; Fase 4 – Montar componentes do experimento na base; Fase 5 – Instalar sistema na mesa inercial; Fase 6 – Instalar sensores e cabine; Fase 7 – Preparar o ambiente e configurar o termovisor; Fase 8 – Coletar dados e Fase 9 – Analisar dados.

Para cada uma destas fases apresentadas etapas foram desdobradas com o objetivo de reduzir a complexidade da atividade e melhor esclarecer a maneira de como desenvolver o processo metodológico deste trabalho. Nos tópicos que se seguem são melhor detalhadas estas atividades.

5.1 A Fase 1 – Definição do problema.

Esta fase tem por objetivo esclarecer a necessidade que norteou a pesquisa. A intenção é aprofundar os conhecimentos com relação ao tema do trabalho. Dentro deste contexto, quatro etapas foram estabelecidas: Etapa 1.1 – Pesquisar informações sobre Termografia; Etapa 1.2 – Pesquisar informações sobre os tipos de falhas em rolamentos; Etapa 1.3 – Pesquisar informações sobre os métodos de detecção de falhas em rolamentos e Etapa 1.4 – Definir o tipo e a quantidade de rolamentos a serem utilizados na pesquisa. Vide Fig. 38.

Figura 38 - Procedimento metodológico para a Fase 1



Fonte – Autoria própria

Para o desenvolvimento das três primeiras etapas apresentadas na Figura 38 se fez uso do Quadro 3 destinado a sistematizar as informações pesquisadas sobre cada assunto, a saber: Termografia e as principais variáveis a manipular na elaboração de ensaios qualitativos e quantitativos nesta área e os principais tipos de falhas que ocorrem em rolamentos e seus principais métodos de detecção.

O quadro é composto por cinco colunas destinadas a informar os sítios de busca da informação, as palavras-chaves utilizadas para esta busca, o número de trabalhos encontrados em cada sítio, um filtro destinado a selecionar os trabalhos apresentados nos últimos cinco anos e, por fim, depois de lê-los e analisa-los informar quais autores foram selecionados para alicerçar esta pesquisa.

Quadro 3- Quadro de informações pesquisadas sobre Termografia

Sítios de busca Utilizados.	Palavras-chave utilizadas.	Nº de trabalhos encontrados nos sites	Trabalhos apresentados nos últimos 5 anos	Autores selecionados para compor a pesquisa.
Periódicos Capes, Elsevier, Qirt.	Termografia, rolamento, falhas, vibrações.			
	Domínio no tempo, domínio na frequência, domínio tempo-frequência.			

Fonte – Autoria própria

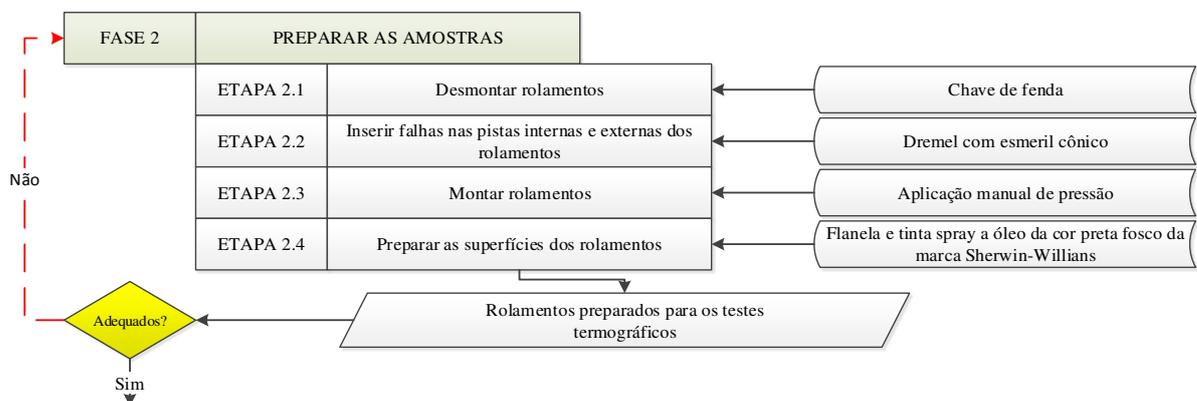
Por fim, na última etapa, Etapa 1.4, apoiado no trabalho publicado por Aleganzi (2012, p. 11-17), definiu-se o tipo e a quantidade de rolamentos a serem utilizados nesta pesquisa. Fez uso deste trabalho pela similaridade entre os estudos realizados.

Juntas, tais informações permitiram uma melhor compreensão do problema a ser pesquisado. Passou-se para a fase seguinte: preparar as amostras.

5.2 Fase 2 - Preparar as amostras

A fase de preparação das amostras a serem utilizadas nos testes de laboratório foi desdobrada em quatro etapas, a saber: Etapa 2.1 – desmontar rolamentos; Etapa 2.2 - Inserir falhas nas pistas internas e externas dos rolamentos; Etapa 2.3 – montar rolamentos; Etapa 2.4 preparar as superfícies dos rolamentos. Vide Fig. 39.

Figura 39 - Procedimentos metodológico para Fase 2

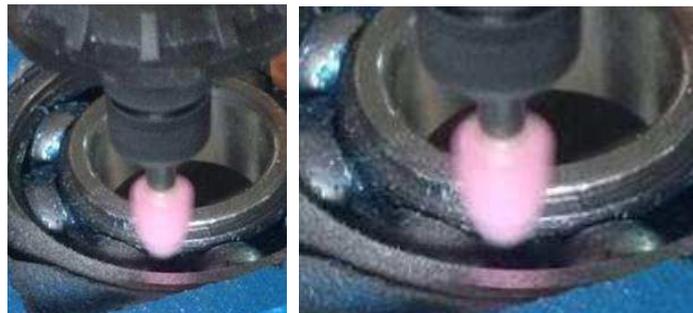


Fonte – Autoria própria

Nesta fase foram adquiridos 9 (nove) rolamento da marca NSK C4DDUC4. Destes nove, foram separadas 8 (oito) amostras para inserir as falhas e uma foi mantida em estado de novo a ser utilizada como referência para os experimentos. Os rolamentos são do tipo de uma carreira de esferas sem blindagem, confeccionados em aço, contendo tampa metálica com acabamento superficial em elastômero.

Na Etapa 2.1 foram desmontados os rolamentos e, em seguida, foram inseridas as falhas mecânicas nas pistas internas e externas por meio de uma micro retífica Dremel com ponta abrasiva tipo cone de aproximadamente 2 mm. As falhas inseridas nas pistas internas foram denominadas de “A”. Como foram realizadas quatro falhas, foram assim denominadas: C1 (amostra de referência), A1, A2, A3 e A4. Já as falhas inseridas nas pistas externas foram denominadas de “B”. Como foram realizadas quatro falhas, foram assim denominadas: B1, B2, B3 e B4. Vide Fig. 40.

Figura 40- Vista da ponta abrasiva utilizada para inserir as falhas nos rolamentos



Fonte - Autoria própria

Os comprimentos das falhas foram assim estabelecidos: 3,5 mm, 3 mm, 2 mm e 1mm, respectivamente, para cada amostra do tipo A e B. Um dos rolamentos foi mantido nas suas condições iniciais, sem falhas e em perfeito funcionamento, para servir de parâmetro de comparação com estas amostras produzidas, o mesmo foi nomeado de Amostra C1.

Na Etapa 2.4 foram preparadas as faces externas dos rolamentos. Isto foi preciso, pois o material e o tipo de acabamento da superfície do objeto eram muito reflexivos o que dificulta o registro de emissões de calor. Assim, as faces dos rolamentos foram pintadas com tinta a óleo de cor preto fosco da marca Sherwin-Williams (Fig.41). Fez-se uso desta tinta por ela ter alta emissividade e emissividade conhecida.

Figura 41 - Rolamentos pintados com tinta preta fosca de emissividade conhecida

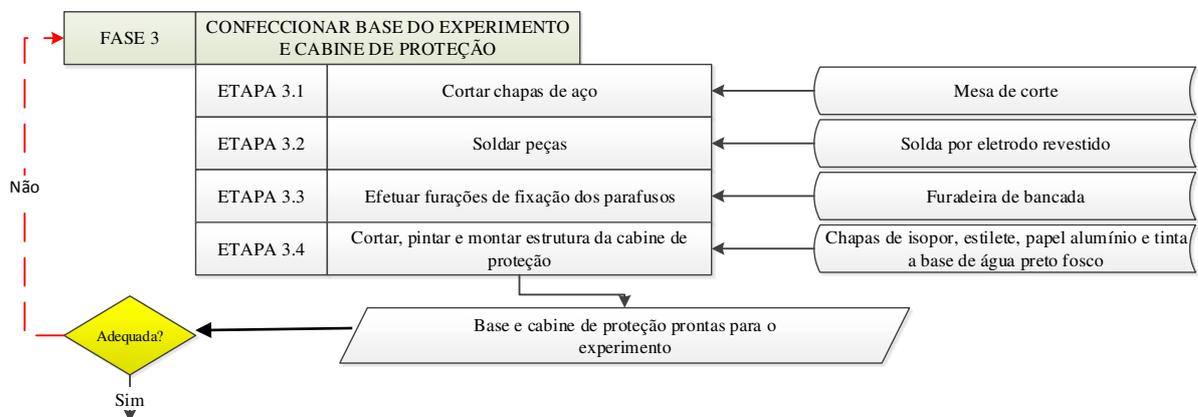


Fonte - Autoria própria

5.3 Fase 3 - Confeccionar base do experimento e cabine de proteção

A Fase 3 compreende a confecção da base do experimento e gabinete de proteção necessários para a montagem, instalação e realização do experimento (Fig. 42). Esta fase foi dividida em quatro etapas, a saber: 3.1 – Corta chapas de aço; 3.2 – Soldar peças; 3.3 – Efetuar furação de fixação dos parafusos; 3.4 – Cortas, pintar e montar estrutura da cabine de proteção.

Figura 42 - Procedimento metodológico referente a Fase 3



Fonte - Autoria própria

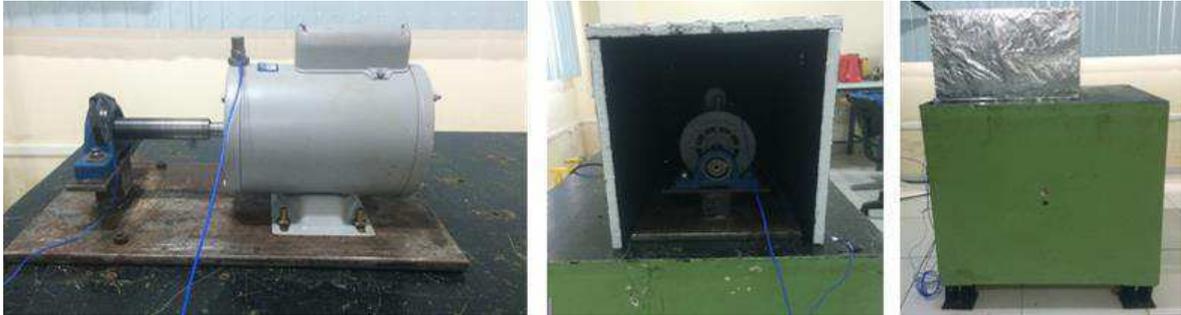
O corte da chapa de aço para a confecção da base do experimento, Etapa 3.1, foi realizado utilizando uma mesa de corte seguindo as especificações do desenho técnico (ver Anexo p. 121- 122).

Para a soldagem das peças, Etapa 3.2, se fez uso de eletrodos revestidos do tipo OK® 46.00. Em seguida, na Etapa 3.3, foram confeccionados os furos de fixação do motor utilizando furadeira de coluna e brocas para aços de 10 mm.

Na Etapa 3.4 foi confeccionada a proteção do objeto de estudo por meio de chapas de isopor de espessura de 15 mm, papel alumínio e tinta fosca de emissividade conhecida. A tinta

foi colocada na parte interna para evitar reflexões de calor provenientes do objeto de estudo e o papel alumínio na parte externa para proteger as amostras da incidência de calor provenientes de outras fontes de calor existentes no ambiente, vide Fig. 43, finalizando esta fase.

Figura 43 - Cabine de proteção

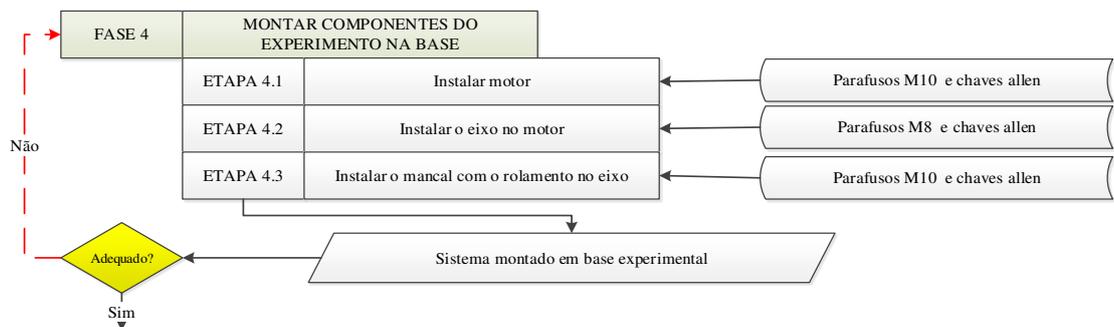


Fonte- Autoria própria

5.4 Fase 4 - Montar componentes do experimento na base.

A Fase 4 denominada: montar componentes do experimento na base foi dividida em três etapas, a saber: Etapa 4.1 - Instalar motor; Etapa - 4.2 Instalar o mancal com o rolamento no eixo e a Etapa 4.3 - Instalar o mancal com o rolamento no eixo. Ver Fig. 44.

Figura 44 - Procedimento metodológico da Fase 4



Fonte - Autoria própria

A instalação do motor (Etapa 4.1) na base foi realizada com auxílio de parafusos do tipo allen M10. A instalação do eixo no motor (Etapa 4.2) foi realizada por meio de chaveta e do mancal com rolamento na mesa inercial (Etapa 4.3) por meio de parafusos do tipo allen M10. Cada amostra de rolamento foi inserida individualmente no mancal interligando ao motor de indução de $\frac{1}{2}$ CV de 1740 rpm e 29 Hz.

Figura 45 - Montagem do sistema de estudo

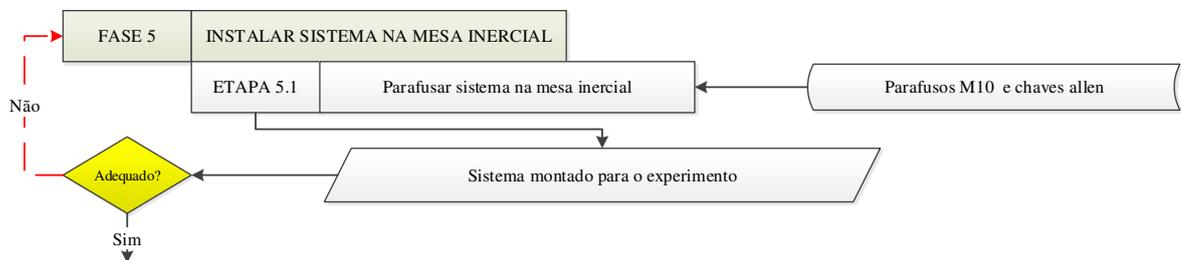


Fonte- Autoria própria

5.5 Fase 5- Instalar sistema na Mesa Inercial

O objetivo desta etapa foi instalar o experimento, mancal, eixo, motor e mesa na bancada inercial. Para tanto, esta atividade necessitou apenas da Etapa 5.1 – Parafusar sistema na mesa inercial Fig. 46.

Figura 46- Procedimento metodológico referente a Etapa 5



Fonte- Autoria própria

A instalação foi feita com uso de ferramentas manuais, chave de boca de 10 mm e parafusos do tipo allen M10. A Fig. 47 mostra o posicionamento da base na mesa inercial.

Figura 47 - Fixação e montagem da base na mesa inercial

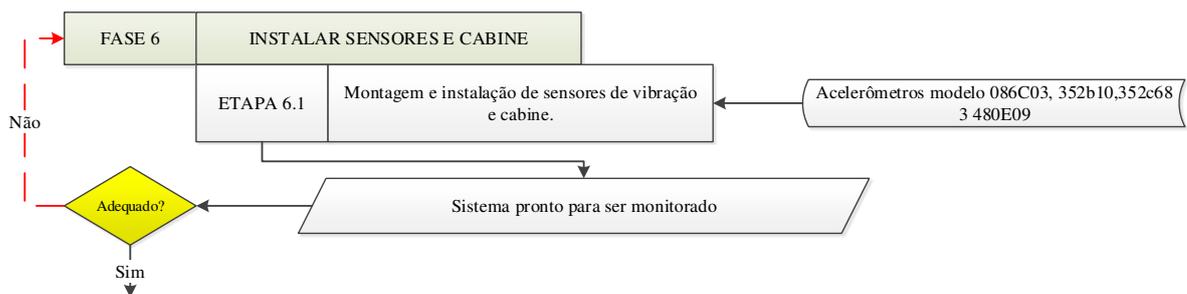


Fonte - Autoria própria

5.6 Fase 6 - Instalar sensores e cabine

Com as fases anteriores concluídas, foi realizada a montagem e acoplamento dos sensores (acelerômetros) no mancal e no motor (Etapa 6.1) destinado a captar os espectros de vibrações do funcionamento do sistema (Vide Fig. 48).

Figura 48 - Procedimento metodológico Fase 6



Fonte - Autoria própria

Na Figura 49 visualizam-se os sensores (modelo 352B10 para o motor e modelo 352C68 para o mancal de rolamento) e seus respectivos posicionamentos.

Figura 49 - Sensores para aquisição de dados

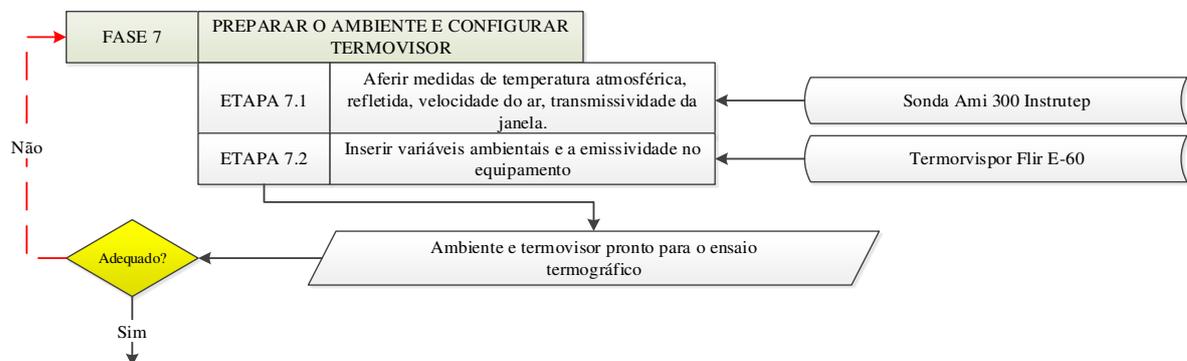


Fonte - Arquivo próprio

5.7 Fase 7: Preparar o ambiente e configurar Termovisor

A Fase 7 foi dividida em duas etapas, a saber: Etapa 7.1 – Aferir medidas de temperatura atmosférica, refletida, velocidade do ar e transmissividade das janelas e a Etapa 7.2 – Inserir variáveis ambientais e emissividade no equipamento, Fig. 51.

Figura 50 - Procedimento metodológico Fase 7



Fonte – Autoria própria

Para aferir as medidas de temperatura atmosférica, velocidade do ar e umidade relativa se fez uso da Sonda AMI 300 da Instrutemp. As medidas foram realizadas ao lado da cabine de proteção das amostras. Foi aguardado o tempo de equalização de 5 minutos após o que foram coletadas e registradas as variáveis mencionadas. Posteriormente, por meio de medição direta, foi realizada a coleta de dados referente à temperatura ambiente refletida e transmissividade das janelas. O equipamento utilizado foi a câmera térmica E60 da FLIR SYSTEMS. Os procedimentos de medição destas variáveis seguiram a norma ABNT NBR 16292. A emissividade

utilizada foi a de 0.95 de acordo com o tipo e o fabricante da tinta utilizada para preparar a superfície do objeto em estudo. Para melhor compreensão apresenta-se a Fig. 52.

Figura 51 – Posicionamento do equipamento utilizado nas medições de temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar



Fonte - Autoria própria

Na Etapa 7.2 foi realizada a configuração do equipamento termográfico (Fig. 53), inserindo os valores das variáveis obtidas na etapa anterior. Para o registro térmico das imagens utilizou-se o termovisor E60 da FLIR SYSTEMS com leitura na faixa espectral de 7.5 a 13 μm a uma distância focal de 400 mm.

Figura 52- Registro dos termogramas por meio de câmera termográfica modelo E60 da FLIR SYSTEMS

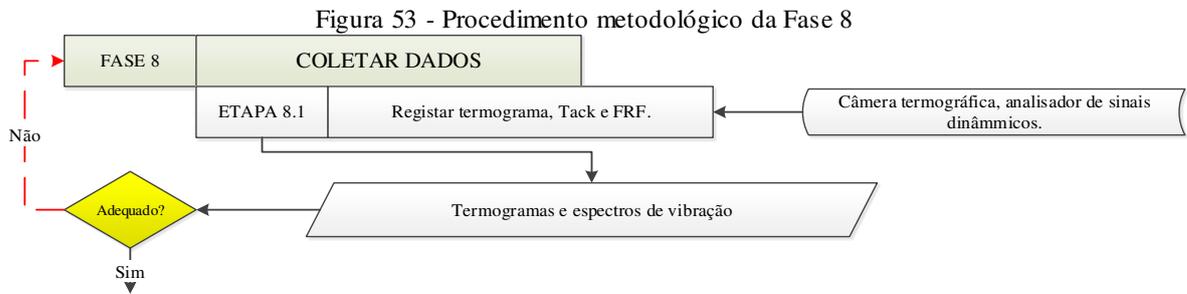


Fonte - Autoria própria

Todos os experimentos seguiram as especificações das normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBRs 15718:2009; 15572:2013; 15572:2003; 16292:2014; 15424:2006.

5.8 Fase 8 - Coleta de dados

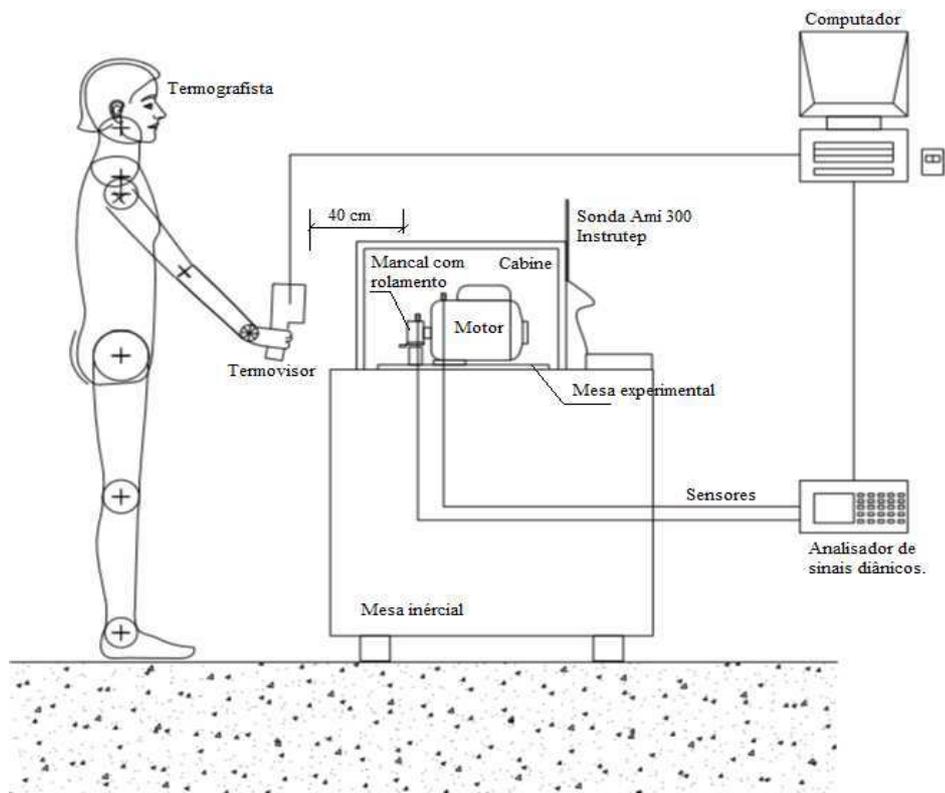
Para a obtenção da Fase 8 – Coleta de dados se fez necessário à realização da Etapa 8.1: registrar termogramas, Tack e FFT. Vide fluxograma apresentado na Fig. 53.



Fonte - Autoria própria

Para esta etapa foi necessário todos os equipamentos estarem devidamente posicionados para o registro dos termogramas e dos sinais dinâmicos conforme mostra a Fig. 54.

Figura 54 - Esquema experimental



Fonte – Autoria própria

Os registros de dados foram realizados no período da manhã entre 8:00 h e 12:00 h, o monitoramento dos termogramas ocorreu durante um tempo total 30 minutos para cada amostra ensaiada e a cada 5 minutos registrava-se um termograma (Ver Fig. 55).

Figura 55 - Registro de termogramas



Fonte - Autoria própria

A coleta dos dados de vibrações foi realizada em intervalos de tempo de 10 segundos, com taxa de aquisição até 800 Hz. A intenção foi observar a temperatura que o objeto emitia devido ao atrito gerado pelas falhas inseridas e confirmar a sua localização por meio da análise de vibrações (ver Fig. 56).

Figura 56 - Registro de termogramas e FRF



Fonte - Autoria própria

Estas por sua vez, eram observadas a partir das frequências, encontrada utilizando como referência os dados da Tab. 4. Com isso foi observado a identificação de amplitude de 144,8 Hz nas pistas internas e de 87,5 Hz nas pistas externas.

Tabela 3 - Dados para cálculo das frequências

Dados de entrada		
Frequência do motor	29	HZ
Número de esferas	8	-
Diâmetro das esferas	7,938	mm
Diâmetro primitivo	33,5	mm
Ângulo de folga (β)	0	Rad.

Fonte – Autoria própria

Para iniciar a análise de vibrações utilizou-se o martelo de impacto modelo 086C03 (*impulse force test Hammer*), com o intuito de excitar os componentes experimentais (eixo e mancal) de forma precisa a reproduzir e medir a força de excitação do sistema. O martelo de impacto tem sensibilidades que vai de 1 até 100mV/ lbf e, massas de 0,1 a 5,5 Kg, com amplitude de gama até 22 KN. O objetivo é registrar através do analisador de dados a frequência natural dos elementos mecânicos, vide Fig.57.

Figura 57- . Excitação do Sistema (esquerda). *Impulse force test Hamme* (direita)



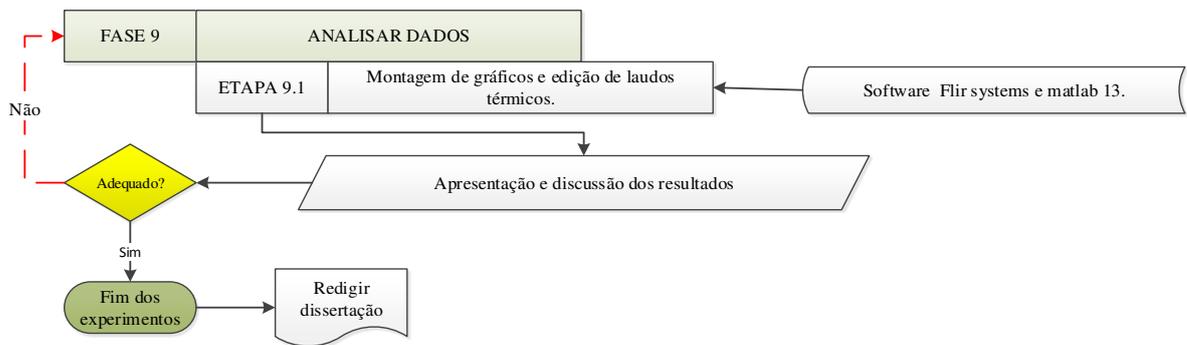
Fonte - Autoria própria

Os procedimentos de análise de vibrações foram baseados nas normas brasileiras NBR 15928:2011, 10272:2013; 10273:2013; 15928:2011 e 10082:2011. Com os acelerômetros instalados e interligados ao analisador de sinais dinâmicos, iniciaram-se os testes experimentais. A cada 5 minutos foram registrados um *track* e um registro de termograma. Ao todo foram sete *track por amostra* e uma FRF ao final de cada teste. Seguindo este procedimento foi possível fazer o registro dos dados termográficos e sinais de vibração.

5.9 Fase 9 - Analisar dados

A Fase 9 denominada: analisar dados foi desmembrada em uma única etapa (Etapa 9.10) - Montagem de gráficos e edição de laudos termográficos (vide Fig.58).

Figura 58 - Procedimento metodológico Fase 9



Fonte – Autoria própria

Na Etapa 9.1 foram analisados e discutidos os resultados obtidos através dos termogramas, da análise de vibrações e dos registros de sinais.

Para a análise de vibrações as frequências foram tratadas no Matlab 13, onde se construiu as rotinas para a montagem dos gráficos de sinal no tempo; espectro do sinal das pistas internas e externas do rolamento; frequências (central de ressonância, FFT) e geração de envelope na transformada de Hilbert.

Para os termogramas utilizou-se o software Flir Tools e suas ferramentas *line*, *point*, paleta de cor arco-íris para indicar as zonas de aquecimento e enquadramento das imagens tipo paisagem. Após as análises no software foram montados os gráficos das curvas de aquecimento dos rolamentos na Planilha do Excell para observar o comportamento térmico em cada sistema monitorado.

CAPITULO VI

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar, de acordo com a metodologia estabelecida no capítulo anterior, os resultados e suas discussões envolvendo a técnica da Termografia e da análise de vibrações.

6.2 TRABALHOS PESQUISADOS NA ÁREA DE ESTUDO

Com a necessidade estabelecida e fazendo uso do Quadro 3 (Quadro de informações pesquisadas sobre Termografia) foram sistematizadas as informações necessárias ao esclarecimento da tarefa e detalhadas as quantidade de obras obtidas envolvendo o tema:

Quadro 3 - Quadro de informações pesquisadas sobre Termografia

Sítios de busca Utilizados.	Palavras-chave utilizadas.	Nº de trabalhos encontrados nos sites	Trabalhos apresentados nos últimos 5 anos	Autores selecionados para compor a pesquisa.
Periódicos Capes, Elsevier, Qirt.	Termografia, rolamento, falhas, vibrações.	328	230	58
	Domínio no tempo, domínio na frequência, domínio tempo-frequência.	77	33	7

Fonte – Autoria própria

A partir dessas obras selecionadas foram determinadas as variáveis a manipular no campo da Termografia, a saber: emissividade, velocidade do ar, umidade relativa do ar, temperatura ambiente, temperatura refletida, enquadramento de imagem tipo retrato, distância focal, foco e isolamento do objeto de análise de outras fontes de calor. Quanto às falhas no rolamento

trabalhou-se com o defeito por desgaste nas pistas internas e externas. Quanto à forma de detecção desses defeitos trabalhou com duas técnicas: a termográfica e a de análise de vibrações.

6.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES TERMOGRÁFICAS

Montado todo o aparato descrito na metodologia obteve-se os seguintes resultados relativos às amostras A e B. Vide Tab. 4.

Percebe-se pela Tabela 4 que a variação da temperatura refletida para os ensaios com a amostra A foram de 0,5 °C enquanto para a amostra B foram de 3,7 °C. Já a variação ambiental para os ensaios foram de 2,9 °C para os testes com a amostra A enquanto para a amostra B foi de 2 °C. A umidade relativa do ar também mostrou variação ficando para os testes da amostra A em 5,8 % e para as amostras do tipo B de 4,2 % e, por fim, a variação da transmissividade das janelas do ambiente do laboratório ficou para as amostras do tipo A em 2°C e para as amostras do tipo B em 1°C. Apesar de constatar estas variações elas não influenciam significativamente nos resultados das análises termográficas em função do campo de variação de temperatura aceitável para o elemento de máquina rolamento, que podem oscilar em até 14 °C.

Tabela 4 - Dados do experimento

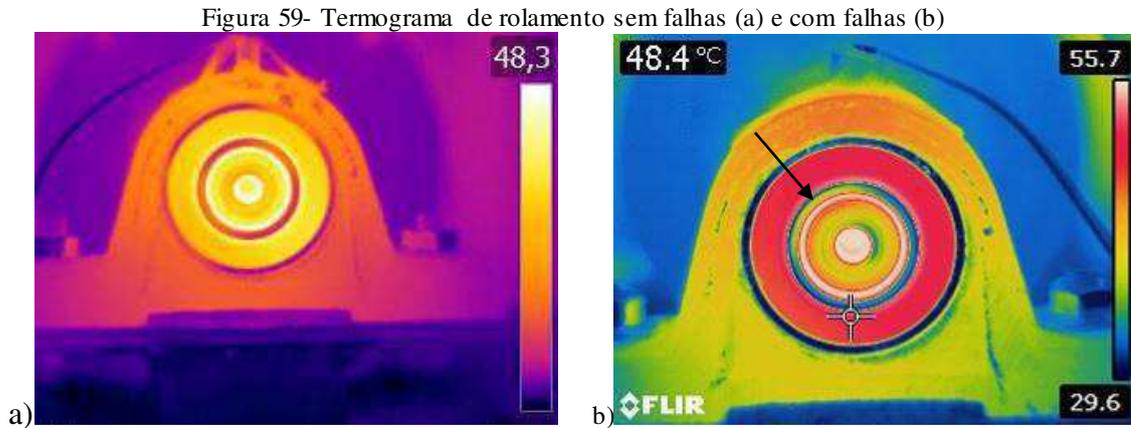
Amostras	Comprimento da falha (mm)	$\epsilon =$	ΔT .refletida (°C)	T. ambiente (°C)	Distância (cm)	Δ Umidade Relativa (%)	Velocidade do ar (m/s)	Transmissividade da janela (°C)
B1	3,5	0,95	26,5	22	40	50,2	0,0	21
B2	3,0		24,5	20		42,6		20
B3	2,0		22,8	21,9		52,0		21
B4	1,0		24,4	21,9		54,4		21
A1	3,5		23	23,7		48,8		20
A2	3,0		23,1	22		54,9		22
A3	2,0		23	24,9		47,2		20
A4	1,0		23,5	22		53,0		21

Fonte- Autoria própria

Analisando qualitativamente os termogramas obtidos no experimento percebem-se variações de cores o que indica variações de emissão de calor e, conseqüentemente, de temperatura. Vide Fig. 59.

Na Figura 59a se tem o termograma do rolamento sem defeito e na Figura 59b o termograma do rolamento com defeito. A seta indica o local da variação na cor da imagem o que

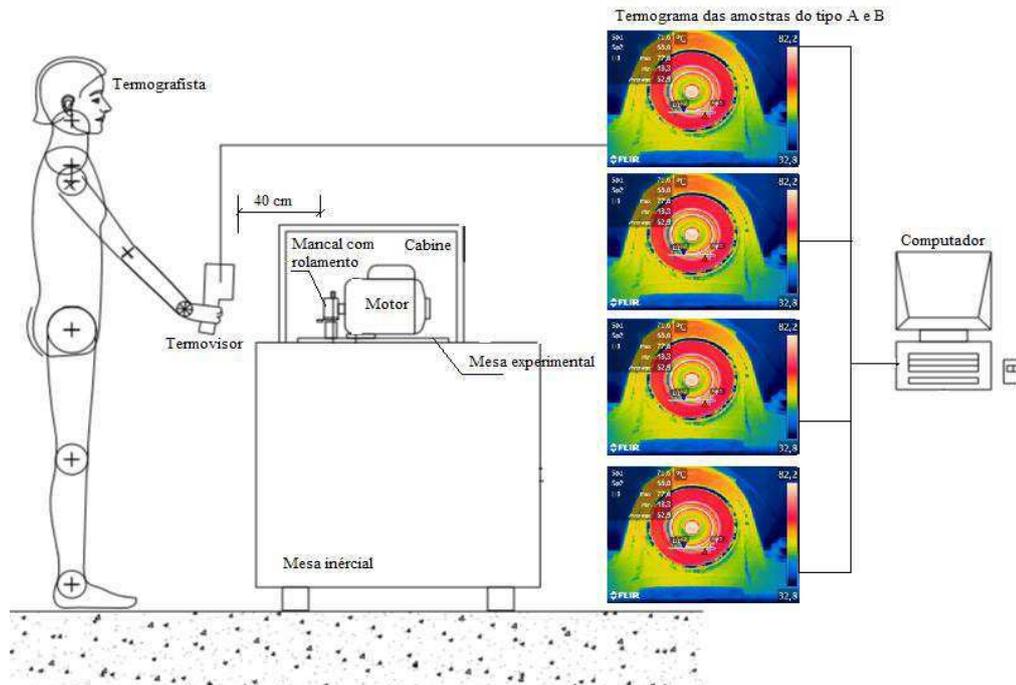
representa, neste caso, um aquecimento em razão do tipo de cor (amarela) em relação às demais partes do rolamento (azul).



Fonte- Autoria própria

Com esta informação qualitativa passou-se a coletar os dados de forma quantitativa. Neste momento, os dados apresentados na Tab. 4 foram alimentados na câmera termográfica e, posteriormente, no software Flir Tools. Os termogramas foram obtidos conforme esquema representado na Fig. 60.

Figura 60 - Esquema de registro termográfico

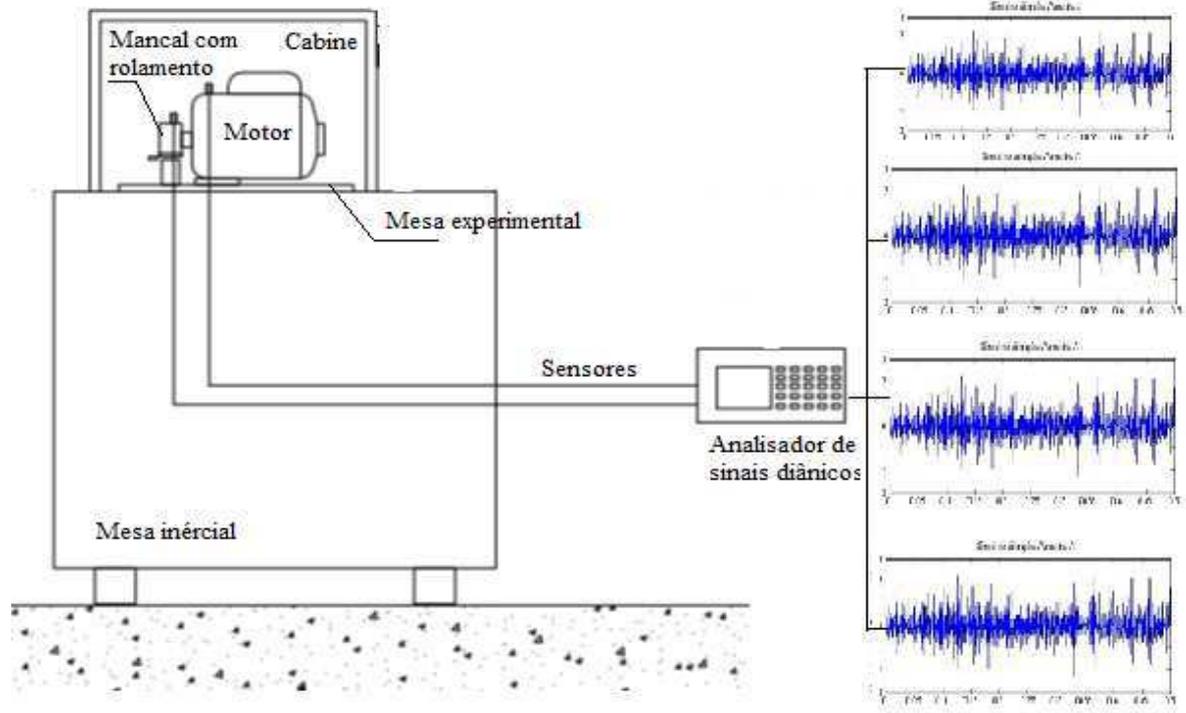


Fonte – Autoria própria

Em paralelo a análise termográfica registrou-se os sinais experimentais de vibração utilizados para a validação do experimento. Os resultados obtidos foram mediante instalação e

montagem dos acelerômetros e analisador de sinais dinâmicos, conforme mostra o esquema na Fig. 61.

Figura 61 - Esquema de aquisição de sinais dinâmicos



Fonte – Autoria própria

Antes do registro dos sinais experimentais foram calculadas as frequências com base nos dados da Tab.5. Para os sinais analíticos simulados usou-se o software Matlab. Os parâmetros utilizados para a simulação estão na Tab. 5. A simulação indicou as frequências de ruído referentes às falhas dos rolamentos a ser registrada nos sinais experimentais, onde serão analisados e filtrados os espectros de vibração.

Tabela 5 - Resultado dos cálculos de frequência

Dados de entrada		
Frequência do motor	29	HZ
Número de esferas	8	-
Diâmetro das esferas	7,938	mm
Ângulo de folga (β)	0	Rad.
Diâmetro primitivo	33,5	mm

Continuação da Tabela 5.

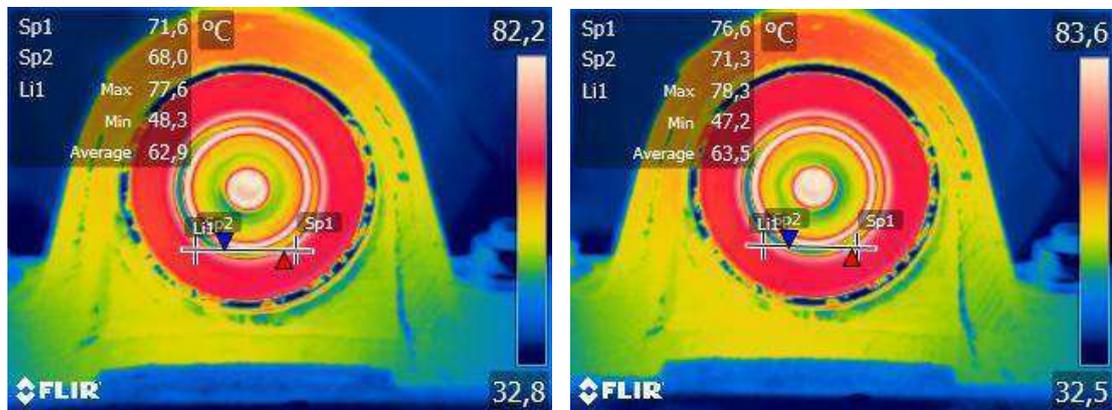
Frequência da pista externa (B)	87,5	HZ
---------------------------------	------	----

Frequência da pista interna (A)	144,8	HZ
Frequência da mesa inercial	2	Hz

Fonte – Autoria própria

A Figura 62 mostra os termogramas obtidos referentes à amostra A1. Para facilitar a análise definiram-se duas áreas denominadas Sp1 (áreas com defeito inserido) e Sp2 (área livre de defeito), para tanto, se fez uso da ferramenta *Line* (Li) do software Flir.

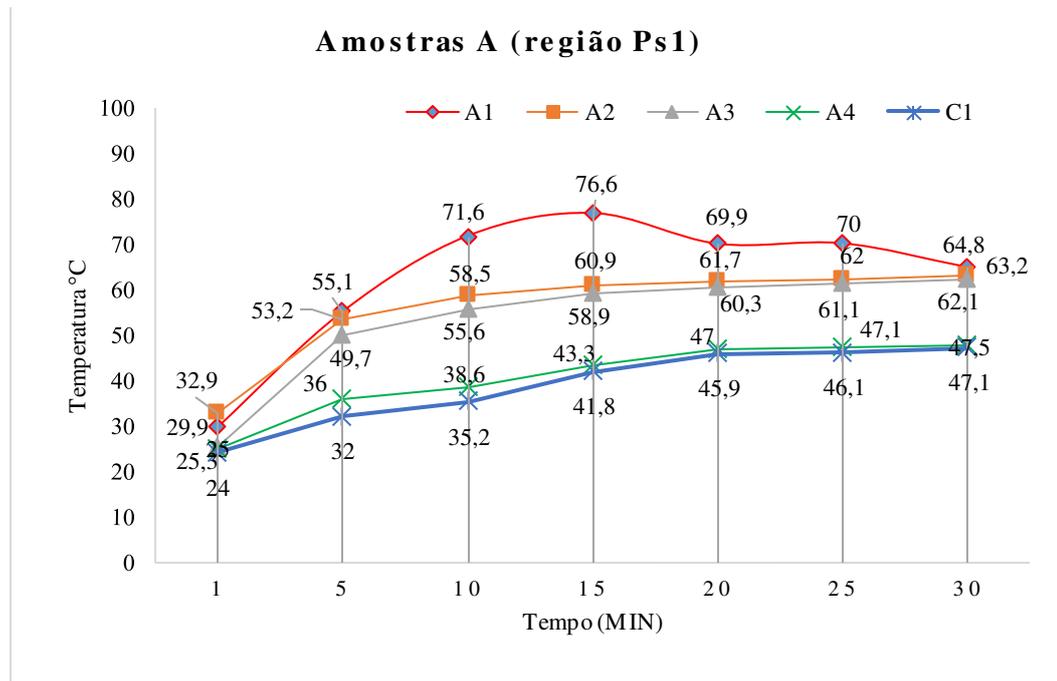
Figura 62- Termograma da amostra A SP1 e SP2 respectivamente (Amostra A1 pista interna)



Fonte – Próprio autor

Os termogramas foram registrados a cada intervalo de 5 minutos, de posse dos mesmos, plotou-se os gráficos referentes aos resultados térmicos. A Fig. 63 mostra o gráfico das curvas de aquecimentos das amostras do tipo A obtidos em experimento e a amostra de referência C1 que é o rolamento livre de defeitos.

Figura 63 - Gráfico das Amostras A (Zona SP1)



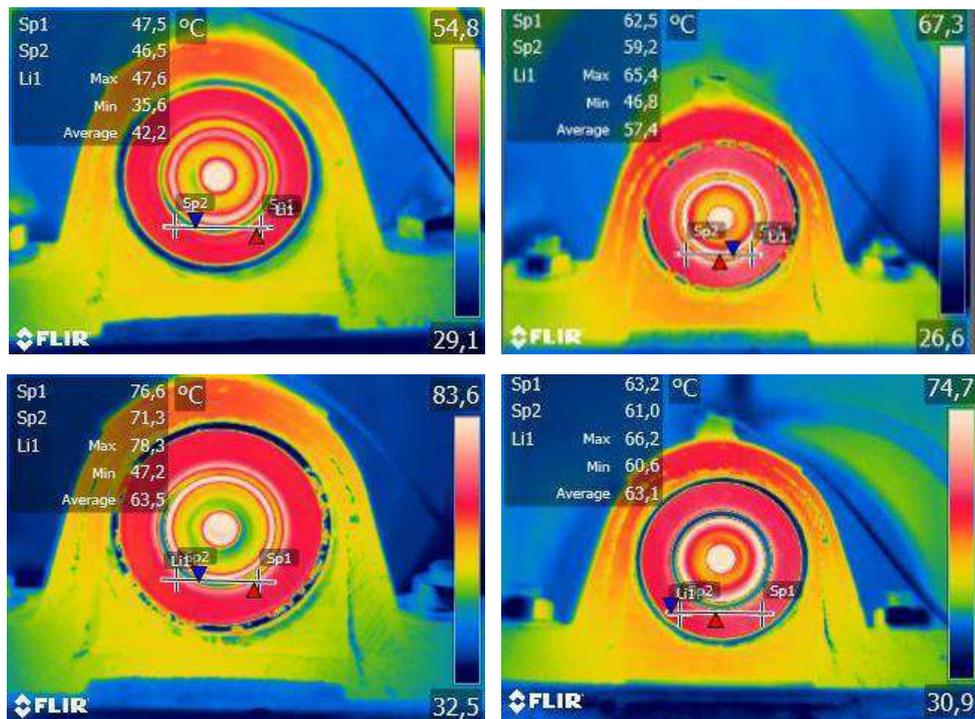
Fonte – Autoria própria

O gráfico da Figura 63 mostra os resultados referentes à região Sp1 das amostras A1, A2, A3, A4 e C1, as quais se notam variações térmicas diferenciadas. Partindo de um referencial, a amostra C1, mostrou o aquecimento típico de um elemento mecânico em funcionamento. Ao observar as demais amostras foi possível perceber as oscilações térmicas diferenciadas quando comparamos com a amostra C1.

As amostras A2, A3, A4 apresentaram pequenas alterações térmicas conforme indicada no gráfico. As temperaturas registradas foram similares, mas todas tiveram aquecimento maior em comparado com a C1. Isso indica que conforme as falhas foram maiores mais energia térmica se concentrava nessas regiões, causando a elevação da temperatura. Dentre as amostras analisadas percebeu-se que um dos rolamentos teve o registro térmico significativo, a amostra A1 (ver termogramas na Fig. 64). Em sua região Ps1 evidenciou-se fortes picos de temperatura e o mesmo foi percebido em Ps2, onde a energia gerada nos impactos, também foi propagada nas demais regiões do rolamento em menor quantidade.

A mesma marcou picos de 76,6°C aos 15 minutos de funcionamento enquanto a amostra C1 registrava 46,2 °C no mesmo instante de tempo. Comparando os valores há uma diferença de 30,4 °C, e média entre todas as temperaturas a amostra A1 e C1 obtém-se 62 °C para A1 e 36,5°C para C1, resultando em uma variação térmica de 19,5 °C entre ambas, esta alteração em A1 é devido à falha inserida na pista interna do rolamento.

Figura 64 - Termogramas da Amostra A1



Fonte - Acervo próprio

A variação térmica percebida em A1 ocorre principalmente aos instantes iniciais, onde a curva de aquecimento se destaca das demais. Isso ocorre devido a falha inserida na pista do rolamento ser de aproximadamente 3,5 mm de espessura, por ser de maior dimensão que as demais a fricção e o contato metal-metal entre as esferas e a pista geram um acúmulo de calor na região analisada.

Também se percebe que o melhor momento para a detecção da falha nesta pesquisa foi observado nos primeiros vinte (20) minutos de funcionamento do equipamento, isto é, na fase de pré-aquecimento (vide Fig(s). 63 e 64). Ao passar desse tempo, a falha presente no rolamento distribui o calor acumulado da zona Sp1 devido à distribuição de calor por todo o perímetro da pista aos demais componentes do rolamento pelo processo de condução térmica, fazendo com que a temperatura diminua e conseqüentemente estabilize o sistema.

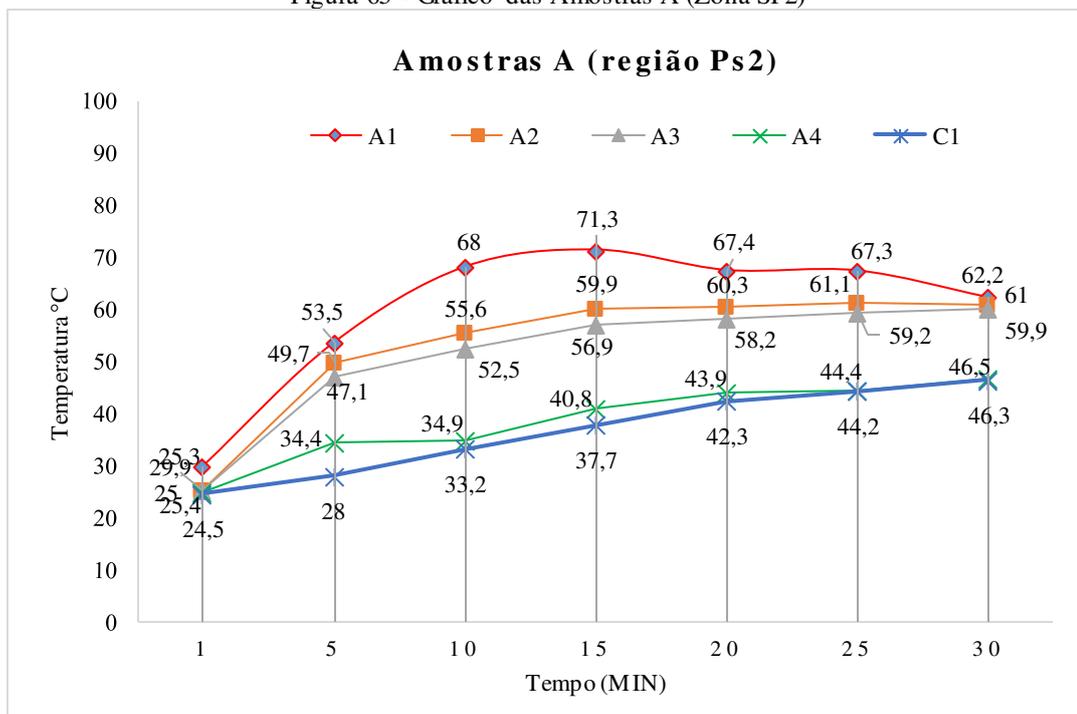
A redução da temperatura do sistema também é feita ao mesmo tempo pelo lubrificante que irá funcionar como um agente resfriador, a fim de manter o rolamento em equilíbrio térmico e evitar o colapso do elemento mecânico. Esse resfriamento pode ser percebido após 30 minutos de funcionamento. Mesmo o sistema estabilizando os locais onde existem as falhas continuaram com valores térmicos maiores em comparação as demais regiões e com a amostra de referência C1.

A região mais quente sempre apresentará maior concentração de calor, pois é o local de atrito e fricção entre a falha e as esferas. Essas esferas distribuíram o calor concentrado em Sp1 para as demais regiões do rolamento, como a Sp2 (ver Fig. 65), mas em menor quantidade, já que parte dessa energia é absorvida, conduzida para os demais componentes e perdida para o ambiente.

Em relação à zona do SP2 (Zona livre de defeitos), perceber-se que há mudanças de temperatura em comparação a C1. O calor em Sp2 é em menor quantidade justamente por não ocorrer falhas nesta região. Dos resultados obtidos no gráfico da Fig. 65, têm-se situações de coerência entre as amostras A4 e C1, isso ocorreu devido a falha presente no rolamento ser mínima e superficial de aproximadamente 1 mm, sendo assim, a quantidade de energia dissipada durante o choque é mínima assemelhando-se a temperatura do rolamento C1, a média de aquecimento entre as amostras A4 e C1 foram de 3,5 e 3,63°C bastante próximas.

Como a falha da amostra A4 é pequena existem duas possibilidades para esse resultado; a primeira seria limitação do equipamento, sendo preciso um termovisor de melhor resolução e a segunda a falha ser muito superficial e não profunda e não causa atrito suficientes sendo necessárias melhores câmeras infravermelhas e mais estudos para comprovar este tipo de defeito pela Termografia.

Figura 65 - Gráfico das Amostras A (Zona SP2)

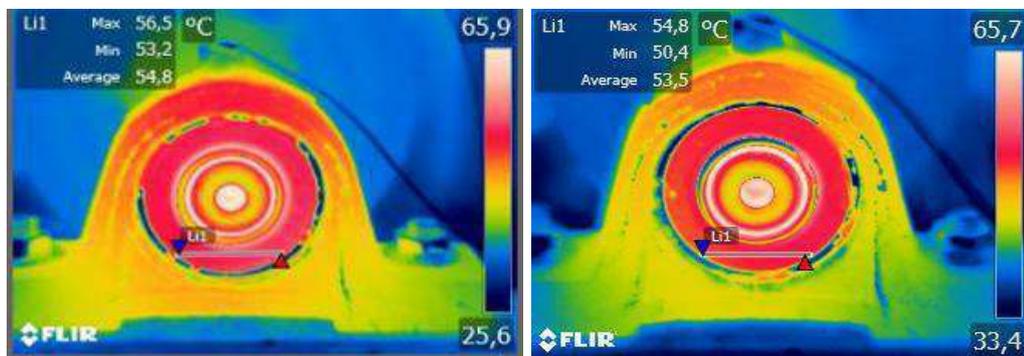


Fonte- Acervo próprio

Para as demais amostras A2 e A3 os comportamentos das curvas de aquecimento mostraram uma média de elevação da temperatura de $5,8^{\circ}\text{C}$ e $7,1^{\circ}\text{C}$ respectivamente, para A2 e A3. Apesar da média de A3 ser maior, devido ao rápido aquecimento nos 15 minutos iniciais, seguido de rápida estabilização após esse tempo, mesmo assim, os valores térmicos aferidos no experimento mostraram um aquecimento diferenciado da amostra C1, conforme mostra a ocorrência de alguma irregularidade térmica.

Nos resultados referentes às amostras do tipo B também foi analisado os termogramas delimitando duas áreas nominadas Sp1 (áreas com defeito inserido) e Sp2 (área livre de defeito), para tanto, se fez uso da ferramenta *Line* (Li) do software Flir (Ver Fig. 66).

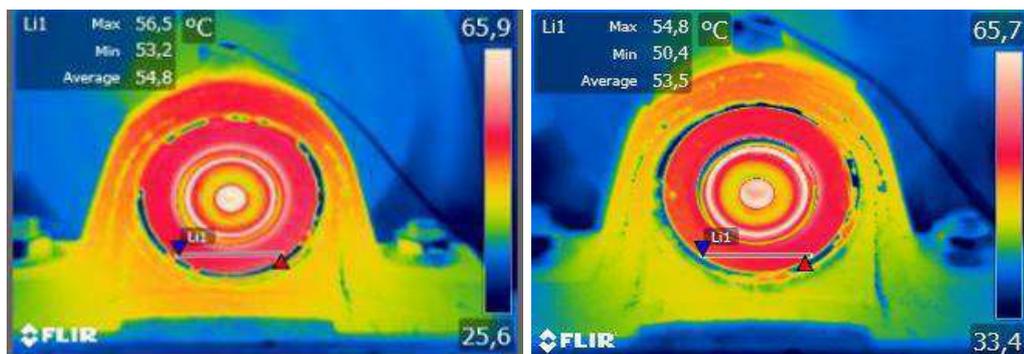
Figura 66- Termograma das Amostras B

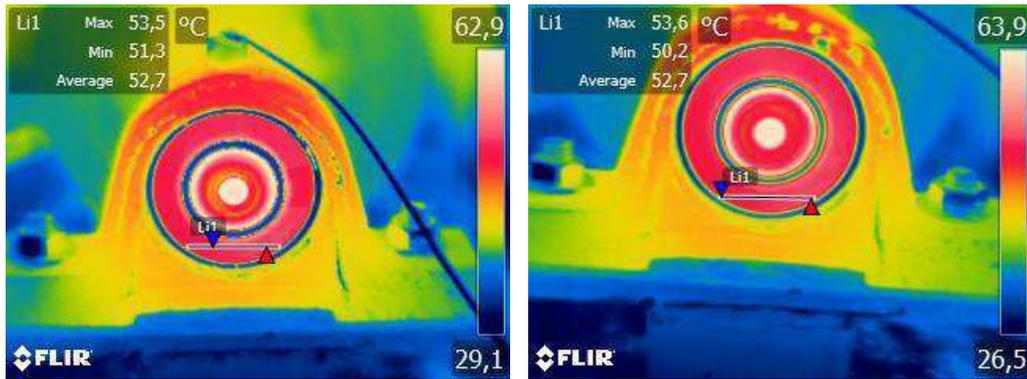


Fonte - Autoria própria

Os experimentos realizados nas amostras B tiveram resultados diferentes de A, algo já esperado por tratar-se de falhas na pista externa, as oscilações térmicas deveriam ser menores, principalmente devido a distância percorrida pelas esferas durante o funcionamento do rolamento, os resultados mais expressivos em valores térmicos foram em B1 (ver Fig. 67).

Figura 67 – Termograma da amostra B1

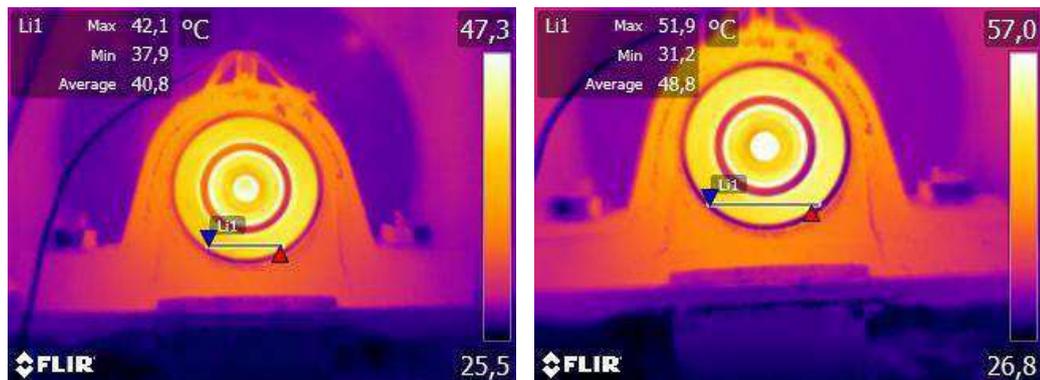




Fonte- Acervo próprio

Na Figura 68 têm-se ao rolamento em perfeito estado, sem falhas (C1). A Fig. 68 a esquerda é referente ao instante de aquecimento aos 15 minutos de funcionamento e a direita o rolamento após 30 minutos de funcionamento.

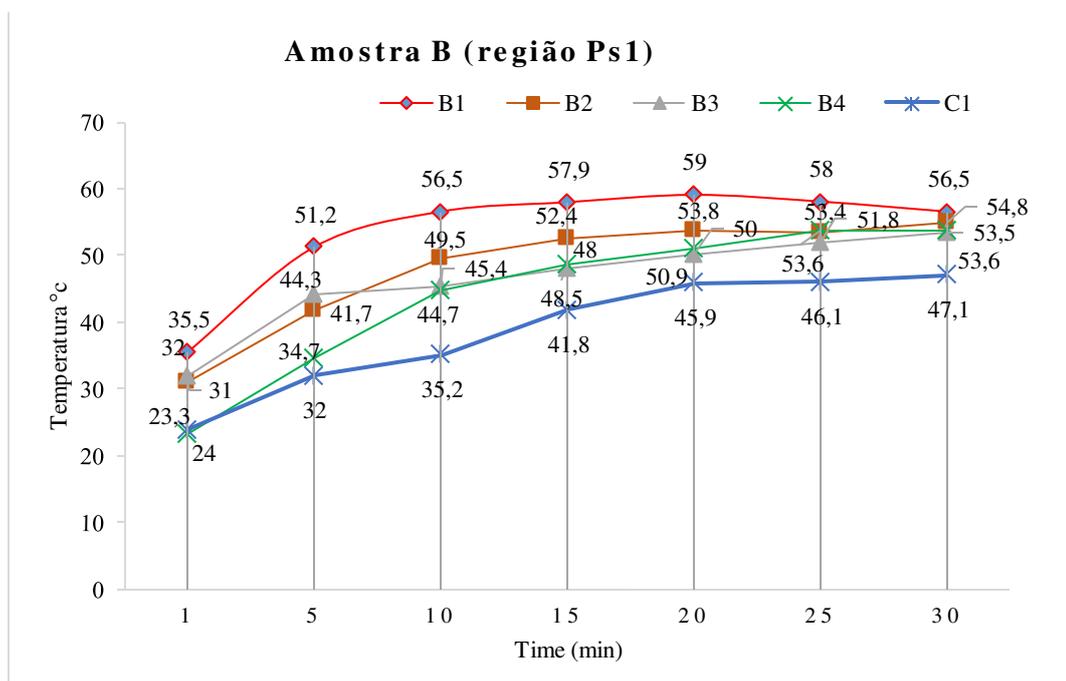
Figura 68 - Rolamentos sem defeito Amostra C1



Fonte – Autoria própria

Em B1 a falha na pista externa de aproximadamente 3,5 mm foi possível perceber alterações térmicas nos espectros de radiação. Quando comparada as amostras B1 e C1 notou-se disparidade entre as curvas térmicas. O aquecimento presente em B1 teve média de 53,51 °C e em C1 de 39,1 °C a diferença entre ambas foram de 14,5 °C, algo significativo para um sistema testado sem cargas e livre de qualquer esforço (ver Fig. 69).

Figura 69- Gráfico das Amostras B (Zona SP1)



Fonte- Acervo próprio

Tendo como objetivo usar a Termografia para identificar com maior rapidez as falhas em rolamentos, a amostra B1 apresentou sua curva de aquecimento incoerente nos primeiros 20 minutos de aquecimento seguindo de estabilização após esse tempo. Das medidas aferidas nas zonas Sp1 todas mostram algum tipo de irregularidade diferente as B2, B3 e B4 também tiveram curvas de aquecimento diferentes de C1.

Em B2 ocorreu elevação da temperatura coerente sem com uma média de variação de aproximadamente 6,01 °C entre cada instante de tempo. Quando comparado B2 e C1 as diferenças térmicas foram bem semelhante próximo a 6 °C. Esta mudança de temperatura é menor quando comparamos as amostras A2 com B2, pode-se dizer que a energia retida nos choque mecânicos nas regiões Sp1 em A2 são maiores que B2.

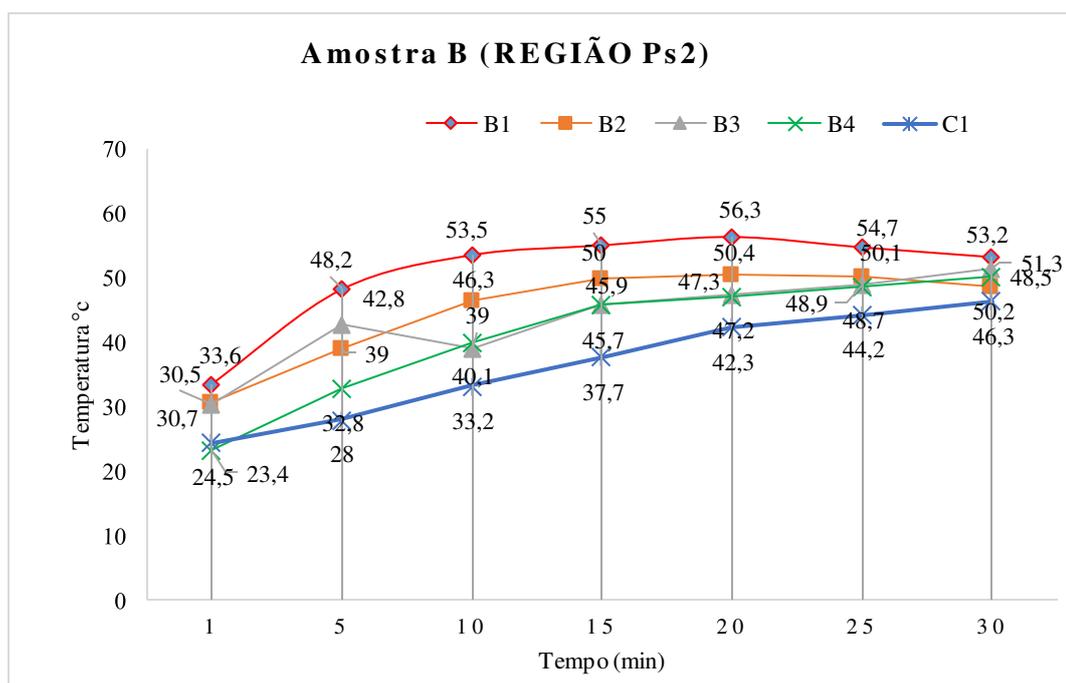
Já o rolamento B3 apresentou um pico de 44,3 °C nos primeiros 5 minutos seguido de leve aquecimento em Sp1 e após 15 minutos a variação térmica foi de 2 °C a cada instante de tempo, isso reflete na dimensão da falha inserida na pista do rolamento menor quantidade de energia consequentemente menor o calor emitido pelo sistema.

Por sua vez, a B4 apresentou alterações que coincidiram com B3 após os 10 minutos de aquecimento, algo incoerente para uma falha de 1 mm, isso pode indicar alguma limitação do equipamento ou até mesmo erro de medição do termograma, sendo necessário estudos mais

elaborados futuramente. Mas, de todas as amostras testadas pode-se verificar que o rolamento C1 funciona em um regime de temperatura inferior as demais amostras inspeccionadas.

Das regiões inspeccionadas Sp1(B) e Sp2 (B) têm-se resultados equivalentes ente ambas as zonas, a Fig. 70 mostra como são semelhantes os resultados das amostras do tipo B e suas respectivas regiões analisadas.

Figura 70 - Gráfico das Amostras B (Zona SP2)



Fonte - Acervo próprio

Um aspecto importante a destacar sobre as diferenças entre as curvas de aquecimento mostrada na Fig. 69 e 70 diz respeito ao tamanho do defeito inserido e o caminho percorrido pelas esferas do rolamento. A falha 1 mm (B4) na pista externa permitir que os elementos rolantes passem por ela sem causar impacto significativo, e assim, registrando temperaturas de aquecimento mais baixas em comparação as amostra A.

Diante de uma segunda situação, onde as esferas passam por falha de 3,5 mm (A1 e B1) comprimento da falha é maior e em consequência maior impacto traduzindo em aquecimento na região de análise, ver Figs. 64 e 69.

Contudo, pode-se tirar uma síntese dos resultados referente aos gráficos das Fig(s). 64 e 65 relacionados as alterações das curvas de aquecimento das zonas Sp1 e Sp2. À medida que

a falha foi inserida nas amostras A1, A2, A3 e A4 registou-se picos em Sp1 de 3,1 °C para a amostra A1 a variação foi de 5,1 °C entre as regiões Sp1 e Sp2 estudadas termicas.

Para as amostras B1, B2 a variação máximo registradas entre as regiões Sp1 e Sp2 dos respectivos gráficos (ver Fig 69 e 70) foi de 3 °C e a média de 2,7 °C, as amostras do tipo B3 e B4 conforme já mencionado foram as que apresentaram menores variações, conforme demonstra a Fig. (s) 69 e 70. Pode-se afirmar que a termografia apresentou resultados significativos para esta pesquisa, mesmo assim, é preciso mais estudos quando se trabalha com falha mínimas como a de 1 mm e um equipamento de melhor resolução, bem como manter um controle rígido das variáveis e parâmetros estabelecidos para a inspeção.

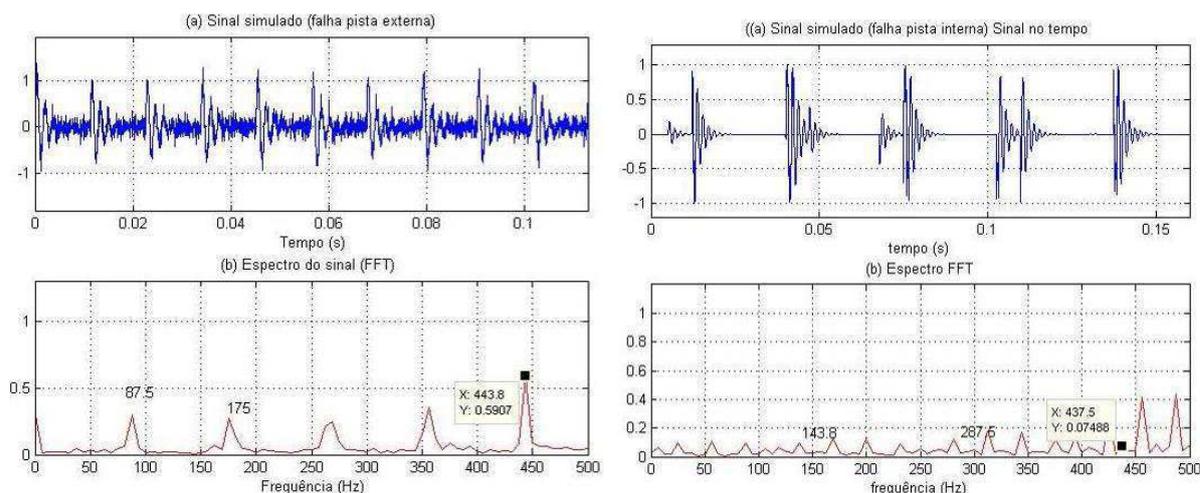
No entanto, deve-se estar atento ao fato de comparar, quantificar e qualificar a temperatura dos elementos rotativos. Uma vez que, ao ar livre existem inúmeras interferências, o que torna o processo de inspeção mais rigoroso. É fundamental que a análise termográfica busque o uso das variáveis adequadas, ou seja, o especialista em termografia deve está atento a todas as variáveis a serem manipuladas no equipamento termográfico. Sem o conhecimento das mesmas os termogramas gerados são errôneos, pois não registra a emissão real do calor, que por sua vez quando defeituoso, o mesmo, também gera ruído. Por essa razão se fez necessário à análise de vibrações para comprovar os resultados das falhas nas pistas internas e externas.

6.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Antes do registro dos sinais experimentais, montou-se uma rotina no software Matlab para comprovar o cálculo da frequência (ver Eq. 31 e 32 no item 4.6) corresponde de cada defeito da pista interna e externa do rolamento.

A Figura 71 trata-se de sinais simulados das frequências dos defeitos nas pistas internas e externas. Para tanto, a rotina programada utilizou os resultados da Tab. 5, onde foi possível encontrar analiticamente as frequências de 143,56 Hz e 88,5 Hz para pista interna e externa respectivamente.

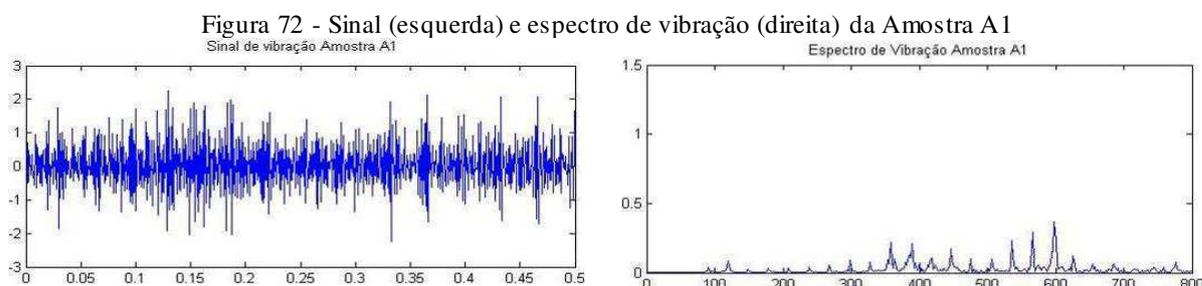
Essas frequências quando simuladas mostram apenas os picos de amplitude do sinal característico sem a interferência de ruído, ou seja, expressam unicamente as ressonâncias das falhas nos rolamentos, a qual serve de referencial para a aquisição dos sinais dinâmicos experimentais.



Fonte – Autoria própria

Na rotina montada pode-se observar nos respectivos espectros, que aparecem as frequências características de cada defeito simulado. Neles percebem-se os picos de variação os quais são repetidos ao longo do tempo. É importante focar que nos espectros da Fig. 71 não se encontram outros sinais de ruído, as únicas bandas laterais presentes são os das frequências simuladas. Já em análises de sinais experimentais estão presentes inúmeros ruídos externos provenientes da vibração de máquinas, outros elementos mecânicos, motores e inúmeras interferências.

Já os sinais experimentais as análises são mais detalhadas, pois além da frequência característica e seus múltiplos do defeito estão outras frequências provenientes de ruídos. As Figs. 72 e 73 mostram sinais reais captados pelos acelerômetros referentes a falhas em mancais de rolamento.

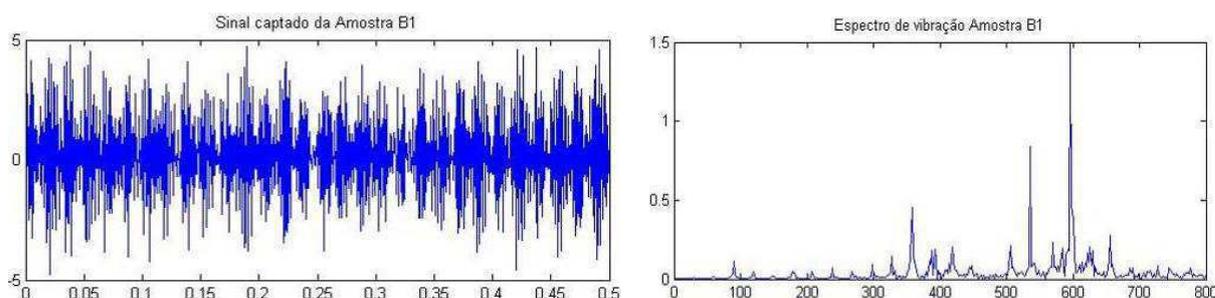


Fonte- Acervo próprio

Como já informado, os rolamentos definidos como amostra do tipo A, tiveram falhas inseridas na pista interna a Fig. 72 mostra o resultado obtido em um experimento ou análise de vibração em mancal de rolamento. No sinal captado observam-se inúmeras frequências também

registradas em paralelo a frequências pesquisadas (sinal experimental à esquerda). A direita tem-se o espectro de vibração referente à amostra A1 gerado a partir da FFT, nele percebem-se algumas frequências de defeito que serão melhor analisadas a seguir.

Figura 73 - Espectro de vibração Amostra B1



Fonte- Acervo próprio

A Figura 73 mostra o sinal captado referente a uma amostra B. As falhas presentes neste rolamento foram inseridas na pista externa e o sinal adquirido também mostra várias interferências de ruídos. Como os ruídos captados acabam por atrapalhar as informações registradas na análise de vibração a aplicação da FFT auxilia no espectro de vibração a mostra as várias frequências captadas e seus múltiplos conforme ver-se a direita da Fig. 73. Com os sinais e respectivos espectros de vibração é possível analisar e comparar os resultados dos experimentos com a simulação analítica.

6.3.1 Comparação dos resultados experimentais e simulados

As falhas na DPFO e DPFI surgem nos espectros devido a uma modulação do sinal. Estas bandas laterais ("bandas laterais") sobre os sinais de vibração decorrentes rolamentos defeituosos em torno de uma frequência de ressonância (F_c "frequências características dos defeitos"). Para tanto, montou-se um comparativo entre os espectros para verificar as $\Delta f = F_d$.

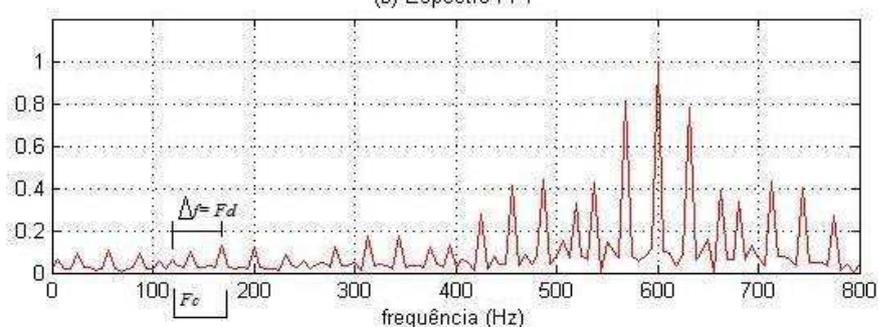
Onde, Δf indicada em todos os gráficos corresponde a variação das bardas largas moduladas dentro da frequência característica elas são iguais a F_d , que por sua vez, é a frequência em do defeito na pista interna (F_i) ou externa (F_e).

Em todos os sinais analíticos e experimentais foram aplicando a FFT com suas rotinas programadas no software Matlab®. Observa-se que, no sinal simulado as áreas de defeito são evidentes e demonstram acúmulo de energia e torna-se evidente cada frequência registrada. No

expectro após a FFT torna-se mais fácil identificar a frequência característica do defeito por não haver outros sinais de baixa frequência na mesma intensidade. No comparativo dos sinais captados utilizaram-se os analíticos e os experimentais referentes aos rolamentos do tipo A1 e B1 respectivamente. As amostras tinham falhas de aproximadamente 3,5 mm e foram as que melhor mostraram a energia das vibrações representadas nos sinais.

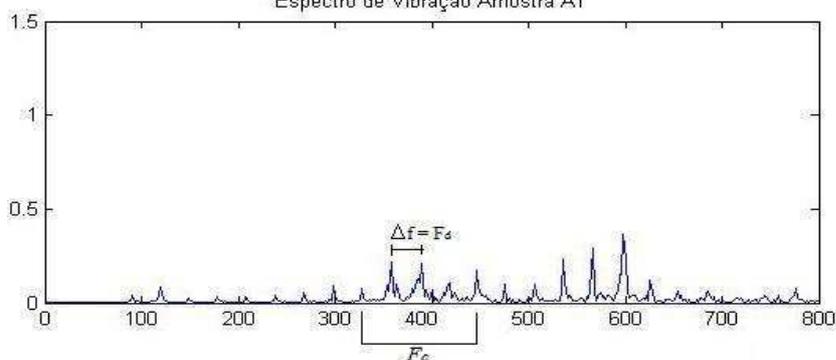
Para analisar se realmente os rolamentos apresentavam os defeitos inseridos, comparou-se os espectros de vibração analítico referente a pista interna com o resultado experimental de A1, nas Fig(s). 74 e 75 respectivamente, para todos os espectros foram delimitados a frequência de 0 (zero) Hz a 800 Hz para o registro dos sinais, aplicação da FFT e aquisição dos espectros.

Figura 74 - Espectro simulado pista interna
(b) Espectro FFT



Fonte – Autoria própria

Figura 75 - Espectro de vibração Amostra A1
Espectro de Vibração Amostra A1



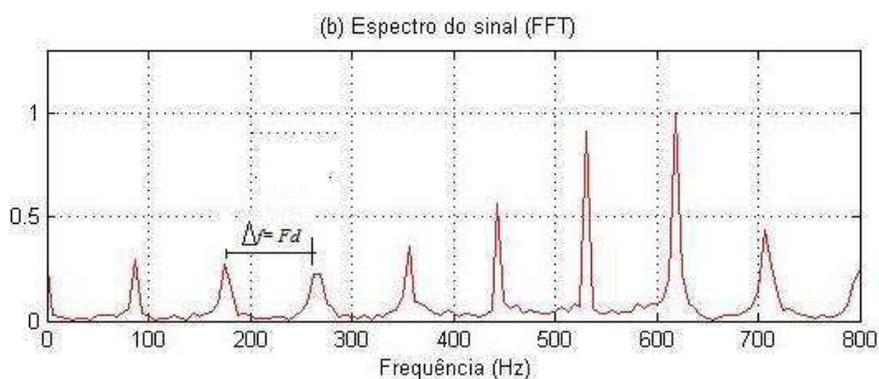
Fonte – Autoria própria

Nas Figuras 74 e 75 apresentam-se os espectros de vibração simulado e experimental referente à amostra A1 (falha na pista interna). Quando comparado ambos os espectros, nota-se que, no analítico percebem-se com maior rapidez as frequências características do defeito principalmente por não existirem outras frequências semelhantes ao simulado. Já no experimental (Fig. 75) há vários picos oscilatórios de baixa frequência próximos das bandas laterais do defeito da pista do rolamento.

Isso ocorre devido a existência de inúmeras interferências captadas pelos acelerômetros, tendo em vista, o sistema analisado, e a intensidade do choque entre as esferas e a pista, e as várias outras vibrações que ocorrem em um sistema. Como a modulação do sinal de falha se repete ao longo do tempo, as Figs. 74 e 75 mostram F_c indizadas em alguns dos seus múltiplos. A mesma é possível separar uma frequência menor (F_c), para ser analisado e aplicado o envelope.

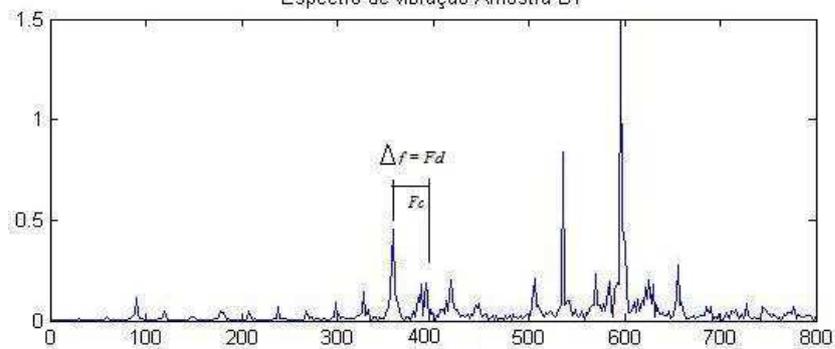
Para os espectros referentes às falhas na pista externa a Figura 76 e 77 tem-se os seus respectivos espectros de simulação e experimental. No entanto, quando se considera um elemento rotativo como o rolamento, a periodicidade, a ressonância e as amplitudes de frequência gravadas no espectro FFT, podem auxiliar na comprovação de falhas na análise de vibração, mas também depende da quantidade de sinais captados pelos acelerômetros durante a aquisição de dados.

Figura 76 - Espectro simulado pista externa



Fonte – Autoria própria

Figura 77 - Espectro de vibração Amostra B1
Espectro de vibração Amostra B1



Fonte – Autoria própria

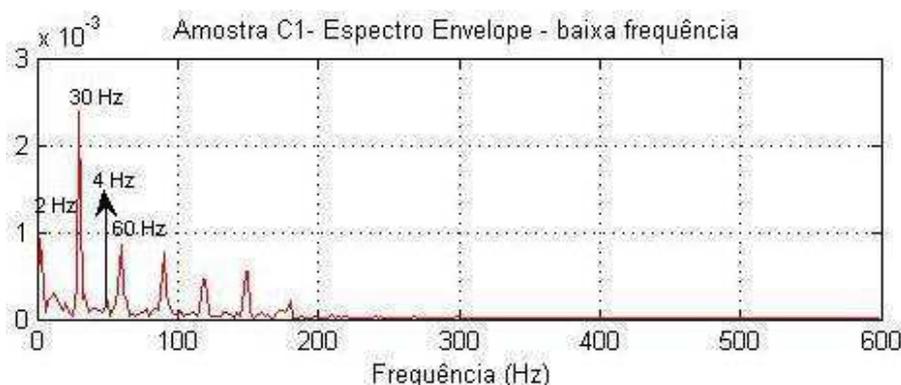
Ambas as figuras são resultados de frequências referentes às falhas na pista externa. Ao compará-los se vê algumas pequenas frequências muito próxima da f_e . Como já mencionado

anteriormente muitos dos ruídos captados são provenientes do motor, da mesa inercial, bancada experimental, ou seja, do conjunto de elementos que formam o sistema estudado. Na Figs. 76 e 77 têm-se a modulação do sinal de falha, o mesmo se repete ao longo do tempo, $\Delta f = F_d$ que corresponde a f_e (frequência da falha na pista externa), onde estão centrados os múltiplos do defeito em F_c .

Na frequência de ressonância (F_c) apresentada nos espectros experimentais nota-se a necessidade mais detalhes. Tendo em vista a indicação doas frequências encontradas para cada defeito. Para os defeitos da pista interna foi confirmada a oscilação na faixa de 148 Hz próximo do cálculo de 143,8 Hz, e a externa à frequência esperada era 88,3 Hz, e o resultado experimental foi de 89 Hz. Sendo assim, esses valores são melhor expressos quando aplicado o envelope.

Também se utilizou para a comparação entre os espectros das amostras A1 e B1 o espectro de envelope da amostra C1, onde mostra um referencial de envelope sem o registro de falha (Fig. 78). Nas Figs. 79 e 80 estão os envelopes referentes às amostra A1 e B1. Entretanto, para a aquisição dos mesmos foi montada a rotina no Matlab®, onde se delimitou o envelope filtrado na frequência F_c de 0 (zero) a 600 Hz, para a análise.

Figura 78 - Envelope da amostra C1



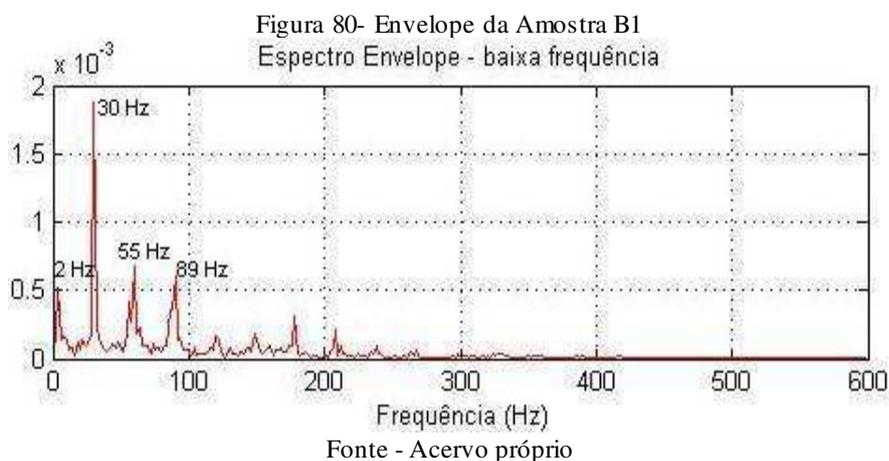
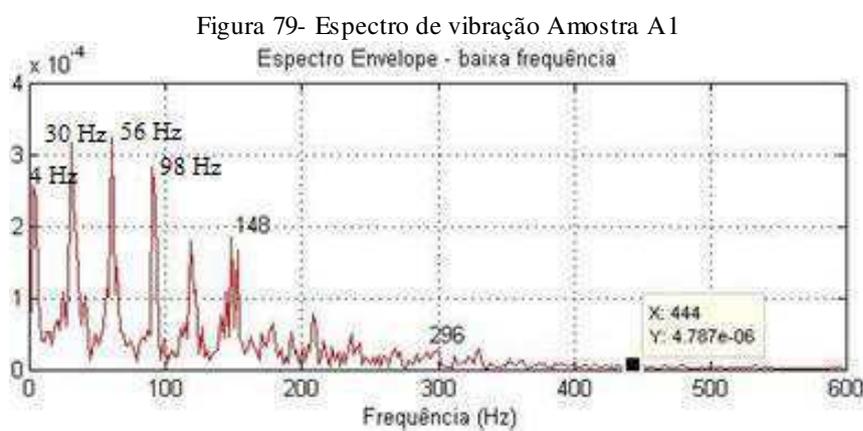
Fonte – Autoria própria

Observando o espectro referente a amostra C1 percebe-se que as frequência de ressonância encontradas são de 2 Hz, a qual coincide com a mesa inercial, 30 Hz a frequência do motor, mesmo o cálculo informando que seria 29 Hz, a diferença pode ocorrer devido a alguma instabilidade de rotação do mesmo, como por exemplo instalação na bancada experimental e/ou variação da corrente elétrica.

Percebe-se no envelope da amostra C1 uma modulação do sinal, onde seus múltiplos correspondem às bandas largas sobre os picos registrados no envelope. Sendo assim, possível

utilizá-lo para comparar aos resultados dos demais envelopes e comprovar a indicação da frequência de cada defeito para as pistas internas e externas.

A Figura 79 mostra o gráfico resultante da técnica de envelope aplicada aos sinais de um rolamento com falha na pista interna. No espectro da amostra A1 estão presentes as frequências de 4 Hz, que pode ser referente a um defeito nas esferas (utilizando a equação correspondente para esse defeito onde é possível encontrar o valor 3,63 Hz). As respectivas frequências de 30 Hz e 148 Hz são correspondentes ao motor e a falha na pista interna.



No envelope da amostra B1 a técnica de envelopamento mostra-se eficiente na detecção de falhas incipientes, pois apesar do registro de vários ruídos a possível encontrar a frequência do defeito referente à falha. Neste caso, a frequência de 89 Hz corresponde à falha externa da pista do rolamento e é bem identificada na Fig. 80, em que as frequências estão espaçadas deste mesmo valor, caracterizando assim o defeito.

As demais amostras A2, A3, A4 e B2, B3, B4 também foram possível identificar mudanças no espectro de vibração, mas sobre a aquisição de dados da análise de vibração e termográfica as amostra A1 e B1 foram às de maior estaque para este estudo, onde foram confrontadas ambas as técnicas de inpeção por ensaio NDE (Ensaio não destrutível).

Diante dos resultados acima é possível provar que a termografia pode auxiliar no diagnóstico de análise de falhas em rolamentos, mas com algumas limitações em determinadas situações, onde é preciso equipamentos mais precisos para inspecionar falhas menores.

CAPITULO VII

7 CONCLUSÕES FINAIS

O Capítulo de conclusões contempla a confirmação argumentativa da hipótese questionada, a qual deu início a esta pesquisa científica e os ganhos de conhecimento, bem como sugestões de novos trabalhos a serem realizados.

7.1 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados e das discussões efetuadas é possível concluir que a Termografia pode ser utilizada no auxílio ao diagnóstico de falhas desde que as superfícies do objeto estejam preparadas, livres de poeiras, gravas, óleos e que os demais parâmetros definidos nos experimentos possam ser manipulados durante a inspeção termográfica. Em casos contrários, no campo, os dados obtidos não representaram informações quantitativas confiáveis. Nestes casos, o uso de outra técnica de auxílio ao diagnóstico das falhas deve ser utilizado para garantir a confiabilidade dos resultados.

O estudo comprova que a Termografia é uma técnica viável para qualificar e quantificar as falhas nas pistas internas e externas dos rolamentos, onde foi possível indicar as áreas defeituosas e sua variação térmica caracterizada na análise térmica. Vale salientar também a importância do tipo de resolução do equipamento, pois para falhas minuciosas se faz necessários câmeras de infravermelho mais eficiente. Por fim, a FFT mostrou a frequência em relação ao tempo dos registros de picos de amplitude na área defeituosa seguido da aplicação da técnica do envelope a fim de melhor apresentar as falhas nas pistas internas e externas validando a análise termográfica com as informações térmicas obtidas pelos espectros de radiação juntamente com os espectros de envelope de vibração. E, como o trabalho não se encerra neste sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Efetuar este mesmo estudo, mas com o defeito nas esferas do rolamento;
- Efetuar este mesmo estudo, mas com falhas nas pistas internas, externas e nas esferas;

- Efetuar este mesmo estudo e com as variações acima mencionadas só que com aplicação de carga.

REFERENCIAS

- ANDRADE, Alan Sulato. *Elementos orgânicos de máquinas ii at-102*. Universidade Federal do Paraná Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Paraná, 2015.
- FOGLIATO, Flávio, RIBEIRO. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Cap. 1, 3-6. Rio de Janeiro. Elsevier: ABEPRO, 2011.
- RODRIGUES, M. V. *Qualidade de vida no trabalho*. 1989. 180 f. Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1989.
- ALMEIRA S. Antônio. *Deteção e análise dinâmica de falhas em rolamentos*. Cap. 1- 3, pp 4-5, 38-63. Tese de Doutorado, USP, São Carlos, São Paulo, 1999.
- PACHOLOK, M. *Uso da termografia para avaliação do desalinhamento de máquinas rotativas: uma ferramenta auxiliar à análise de vibrações*. Dissertação de Mestrado, PUC- PR, 2004.
- CARAMALHO Alberto. *25 anos em termografia*. Cap. 7-8, pp 67-87. Ed. 1º, Portugal, 2012.
- SANTOS Gilnete Leite. *Análise e extração de características de imagens termográficas utilizando componentes principais*. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira : [s.n.], 2010 112 f. : il.
- SOBRINHO M. Pedro, MATHIAS M. Hugo, SOUZA G. S. Victor. *Methodology for failure analysis integrating of vibration analysis and themography*. Cobem, 2015. Rio de Janeiro, 2015.
- AHMADIPOUR, Foroughi, NEMATOLLAHI, SotoudehBahreini. *Detection of Pillow Block Bearings Defect Using Infrared Thermography: A Case Study in Golgohar Mining and Industrial Co*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, pp 1-7, 2015.
- ARAÚJO, Romero de Souza. *Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Alimentados por Inversores: Análise e Proposta de Solução*. Cap. 2, pp. 29-34, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte, MG, 2011.
- SKF. *High temperature Bearings For operating temperatures up to 350 °C (660 °F)*. pp. 7-9. PUB BU/P2 14961 EN, SKF Group, December, 2014.
- WEIDLICH, Felipe. *Avaliação de lubrificação de rolamentos de motores elétricos por ultrassom*. Cap. 3, pp. 46-51. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS. Porto Alegre, RS; 2009.
- HARRIS, T. A.; KOTZALAS, M. N. *Essential Concepts of Bearing Technology, Fifth Edition*. Cap. 11, pp.195 – 249. Ed. 5º; Talyon & Francis, London, New York; 2007.
- VANEGAS Nelson M., ÁLVAREZ John R, SOUZA Gilberto F. M. de. *Teoria da confiabilidade aplicada na avaliação da vida em fadiga-de-contato*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 17 N° 3, pp. 423-43, 2009.

CABRAL, J. *Organização e Gestão da Manutenção*. 3ª edição, Lidel, edições Técnicas Lda. Lisboa, Portugal, 1998.

PARREIRA Xavier Fernandes. *Gestão da Manutenção Aplicada a Linhas Especializadas em Corte de Aço*. Cap.2; pp.20-30. Dissertação. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Portugal, 2011.

INCROPERA, F. P e DEWITT, D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Cap. 12, pp. 495-521, 5ª Edição, ed. Copyrights, John Wiley & Sons, 2002.

CARUSO, Francisco e OGURI Vitor. *Física Moderna: Origens clássicas e fundamentos quânticos*. p.310, 2ª Edição, ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

SOUSA, Luís Filipe Rodrigues. *Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios*. Cap. 2, pp. 5. Dissertação. Universidade de Aveiro, Departamento de engenharia mecânica, Aveio, Portugal. 2010.

DA SILVA, Tadeu Castro. *Concepção, projeto, construção e teste de um aparato com memória de forma*. Cap. 3, pp. 17. Dissertação de iii DA SILVA. (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2014). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, DF.

_____ e SKF. *Linha 1 SKF : Tecnologia de rolamentos*. Treinamento SKF Organizacion. Março. 2016.

CHRZANOWSKI, krzysztof. *NON-CONTACT THERMOMETRY Measurement Errors*. Cap. 2, pp. 18-20. Research & Development Chapter, Treatises SPIE Polish Chapter, Vol. 7, Warsaw. Poland. 2001.

NSK. *Novas tecnologias: Soluções inteligentes*. p. 7 – 8. Catálogo NSK. São Paulo. SP.

GEITNER, Fred k. e BLOCK, Heinz P. *Análises e solução de falhas em sistemas mecânicos: gerenciamento prático de equipamentos mecânicos para indústria de processos*. Cap. 1. Pp.74-138. Tradução Eduardo Kraszczuk. -1º. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, 74.

NORTON, Robert L. *PROJETO DE MÁQUINAS: Uma abordagem integrada*. Cap. 11, pp. 623 – 680. 4º. Ed. 2013.

TSCHIPTSCHIN, André Paulo. *Tratamento térmico de aços*. EPUSP. Engenharia metalúrgica e de materiais. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO%20T%C3%89RMICO%20DE%20A%C3%87OS.pdf>. Acesso em: 10/03/2016.

SMITH, William F. e HASHEMI, Javad. *Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Cap. 6-9, pp. 149-260. Ed.5º. São Paulo, SP. 2012.

MEDEIROS João Telésforo; TANAKA Deniol Katsuki Nóbrega; SINATORA Amilton. *Mecanismos de fadiga de contato em discos de aço aisi 52100*. 1º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Conem. Natal, RN. 2000. <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2000/OC8752.pdf>. Acesso em 05/06/2016.

MOUBRAY, J. *Reliability-centred Maintenance (RCM): Manutenção Centrada em Confiabilidade*, p. 3. Tradução de Kleber Siqueira, Aladon, Grã Bretanha. 1997.

COUTO, Luís Filipe Neves. *Gestão Lean da Manutenção Aplicada a Equipamentos de Transporte de Granéis Sólidos*. Dissertação. Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2011.

MINKINA, W. SAWICKI, A. SOSIŃSKI, R. *Wyznaczenie rozkładu temperatury narzędzi lutowniczych z wykorzystaniem termografii komputerowej*. Część I: Pomiar termowizyjny rezystancyjnych narzędzi lutowniczych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 48, p. 13-16, 2002.

MINKINA W. *Thermovision measurements – methods and instruments*. Publishing Office of Czestochowa University of Technology, Czestochowa in Polish. (2004).

KREITH F. *The CRC handbook of thermal engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL. (2000)

ORLOVE G.L. *Practical thermal measurement techniques, Proceedings of the SPIE*, Vol. 371, 1982. p. 72–81

ASMT (2010). Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. Designation: E1933 – 99.

QIRT. <http://qirt.ge.l.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=72&Lang=0> . Acessado em 15 de dezembro de 2015.

QIRT. <http://www.qirt2016.gda.pl/program.html>. Acessado em 15 de dezembro de 2015.

ATHANASOPOULOS Nikolaos G; BOTSARIS Pantelis N. *A Comparative Analysis of Detecting Bearing Fault, Using Infrared Thermography, Vibration Analysis and Air-Borne Sound*. Acessado em 16 de junho de 2016.
<<https://www.researchgate.net/publication/297731444>>.

OLARTE Y. William, BOTERO A. Marcela, ZABALETA Cañón Benhur. Aplicación de la termografía em elmantenimientopredictivo. *ScientiaetTecnica*Año XVI, p. 253-255. N° 48, agosto de 2011. Universidad Tecnológica Pereira. ISSN 0122-1701.
<<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1303>> em: 02 mar. 2014

OLIVEIRA, Davi Borges. *Manutenção preditiva com ênfase em termografia: um estudo de caso em uma indústria sucroalcooleira*. Centro Universidade de Formiga. Formiga, 2012.
<<http://bibliotecadigital.uniformg.edu.br:21015/jspui/handle/123456789/148>>. Acesso em: 04 may.2014.

A. Krenzinger. *Aplicações da termografia na análise térmica de sistemas de conversão de energia solar*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 10, 2006. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184 <<http://www.asades.org.ar/averma/trabajos/2006/2006-t008-a011.pdf>> Acesso em: 10 may. 2014.

OLIVEIRA, Jonarhan H. Efigênio. *Inspeção autorizada utilizando termografia*. Cap. 3, p. 28 – 29. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010. <<http://hdl.handle.net/10183/29989>>Acesso em: 04 may. 2014.

OTAMI Mario, MACHADO Waltair. *A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial*. Revista Gestão Industrial, v.04, n02: p. 01-16, Paraná, 2008 < <http://revista.utfpr.edu.br/index.php/revistagi/article/viewFile/17/14>>. Acesso em: 02 mar. 2014.

SANTOS, Gilnete Leite dos. *Análise e extração de características de imagens termográficas utilizando componentes principais*. Cap. 1-2, p. 20-25. Ilha Solteira. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2010.

ATHANASOPOULOS, Nikolaos G. e BOTSARIS Pantelis N. *A Comparative Analysis of Detecting Bearing Fault, Using Infrared Thermography, Vibration Analysis and Air-Borne Sound*. p. 171-181. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2014.

NELSON, Vanegas M., JOHN Álvarez R., GILBERTO F. M. de Souza. *Theory of reliability applied in the evaluation of the life in contact fatigue*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, Vol. 17 N° 3, 2009, p. 423-431.

BEZERRA, Roberto de Araújo. *Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração*. 2004. Cap. 6, p. 109-115. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo. S.P. Brasil.

CASTRO, Douglas Aquino. *Projeto de estruturas sujeitas a radiação térmica no interior de confinamentos utilizado o método da otimização topológica*. 2013. Cap. 1, p. 8-25. Dissertação de mestrado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

ALMEIDA. Luiz Carlos de. *Determinação matemática da lei de wien, seu significado físico e suas relações com a lei de planck na determinação da radiação espectral*. Gsjournal. p. 1 -29.

CTK BRASIL. *Construção e componentes do rolamento*. Acessado em 15 de junho 2016. <http://www.ctkbrasil.com.br/construcao.asp>

M. M. M. Novo, C. S. Bitencourt, P. R. T. Tiba, D. G. M. Silva, V. C. Pandolfelli. *Fundamentals on emissivity and its correlation with the refractory materials, energy saving and the environment*. 2014, p. 22-33.< <http://www.scielo.br/pdf/ce/v60n353/04.pdf> >. Acessado em 16 dez. 2015.

TANDON, N. and CHOUDHURY, A., *A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings*, Tribology International. Vol. 32, pp. 469-480, 1999.

VIEIRA, Fabiano Vieira. *MÉTODOS E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO*. Grupo Moura. P. 1-5. Acessado em 16 dez. 2015.

ROLIM, Carlos Oberdan. *Redes de computadores redes de computadores e camada física*. 2015. p. 1-102. <<http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/espectro.htm>>. Acessado em 16 dez. 2015.

FILHO, Júlio de Mesquita. *FERRAMENTAS DE DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS: Avaliação de falhas com o uso de técnicas no domínio da frequência*. 2016, p. 1-19. UNESP. Campus de Guaratinguetá. SP.

NENNA, Alexandre Ribeiro. *DETECÇÃO DE FALHAS EM MANCAIS DE ROLAMENTO POR ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM BANDA LARGA: Um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos*. 2007, p.40-50. Dissertação. UFRS, Porto Alegre. RS.

LOUGHLIN, P. J, BERNARD, G.D. *COHEN–POSCH (POSITIVE) TIME–FREQUENCY DISTRIBUTIONS AND THEIR APPLICATION TO MACHINE VIBRATION ANALYSIS*. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 11, Issue 4, July 1997, p. 561 - 576.

BARILLI, Rodrigo Jorge de Castilho. *Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope*. 2013. Cap. 3, p. 8-23. POLI-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica Engenharia Naval e Oceânica. Rio de Janeiro, RJ.

SENKO Richard. *Implementação de sistema especialista para o monitoramento e diagnóstico de desbalanceamento em sistema mecânico rotativo por análise de vibrações*. Cap. 2, p. 24-30. Dissertação, UFCG, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, PB.

ABNT NBR 15424:2016. *Ensaaios não destrutivos - Termografia -Terminologia*. p. 1-9. 2016

ABNT NBR 15572:2013. *Ensaaios não destrutivos - Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos*. p. 1-9. 2016.

ABNT NBR 15718:2009. *Ensaaios não destrutivos - Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos*. p. 1-5. 2016.

ABNT NBR 15763:2009. *Ensaaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência*. p. 1-3. 2016.

ABNT NBR 15866:2010. *Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos*. p. 1-6, 2016.

ABNT NBR 16292:2014. *Ensaaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas*. p. 1-5, 2016.

ABNT NBR 16485:2016. *Ensaaios não destrutivos - Termografia - Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros*. p. 1-4. 2016.

ABNT NBR 10082:2011. *Ensaio não destrutivo — Análise de vibrações — Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15 000 rpm*. p. 1-9. 2016.

ABNT NBR 10272:2013. *Ensaaios não destrutivos — Análise de vibrações — Medição e avaliação da severidade das vibrações mecânicas de máquinas elétricas rotativas*. p. 1-6. 2016.

ABNT NBR 10273:2013. *Ensaaios não destrutivos — Análise de vibrações — Requisitos para instrumentos de medição de severidade de vibração de máquinas*. p. 1-9. 2016.

ABNT NBR 15928:2011. *Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Terminologia*. p. 1-22. 2016.

ABNT NBR 10273:2013. Ensaio não destrutivo — Análise de vibrações — Requisitos para instrumentos de medição de severidade de vibração de máquinas. p. 1-9.2016.

LEEST. *Normas sobre Termografia publicadas pela ABNT*. Laboratório de engenharia ergonomia e segurança do trabalho. UFCG, 2016.

APENDICES

Segue Checklist realizado durante os experimentos.

 Universidade Federal de Campina Grande	Universidade Federal de Campina Grande – UFCG Departamento de engenharia mecânica- UAEM Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM	 	
Experi- mento:	Número do experimento: 01 / Amostra / teste		
Local:		Horário:	Data:
Mestranda:			OBS:
Orientador:			
Informações para iniciar experimentos			
Temperatura do ambiente:	Umidade:	EPI's () sim () não *Caso sim quais?	
Equipamentos 01	Mesa vibração	Modelo:	Fabricante:
Equipamentos 02	Câmera termográfica	E-60	System FLIR
Equipamentos 03	Fita métrica	Starrett 5m	Starrett
Equipamentos 04	Sonda	Ami 300	Instrutemp
Equipamentos 05	Mancal	20-30	
Equipamentos 06	Motor de indução monofásico de gaiola	48/56	Kohlbach
Equipamentos 07	Rolamento blindado eixo interno	Modelo: Explorer 6205- 2Z/C3	Fabricante: NSK
Equipamentos 08	Shappe Vibrações		
Equipamentos 09	Acelerômetro e sen- sores de vibração.		
Variáveis do experimento			
Emissividade	E = 98	Sala (a= m ²)	Umidade relativa
Temperatura re- fletida °C		Velocidade do ar	Temperatura atmosférica °C
Distância (m)	0,40 m		Compensação da janela Temperatura da janela °C
Metodologia			

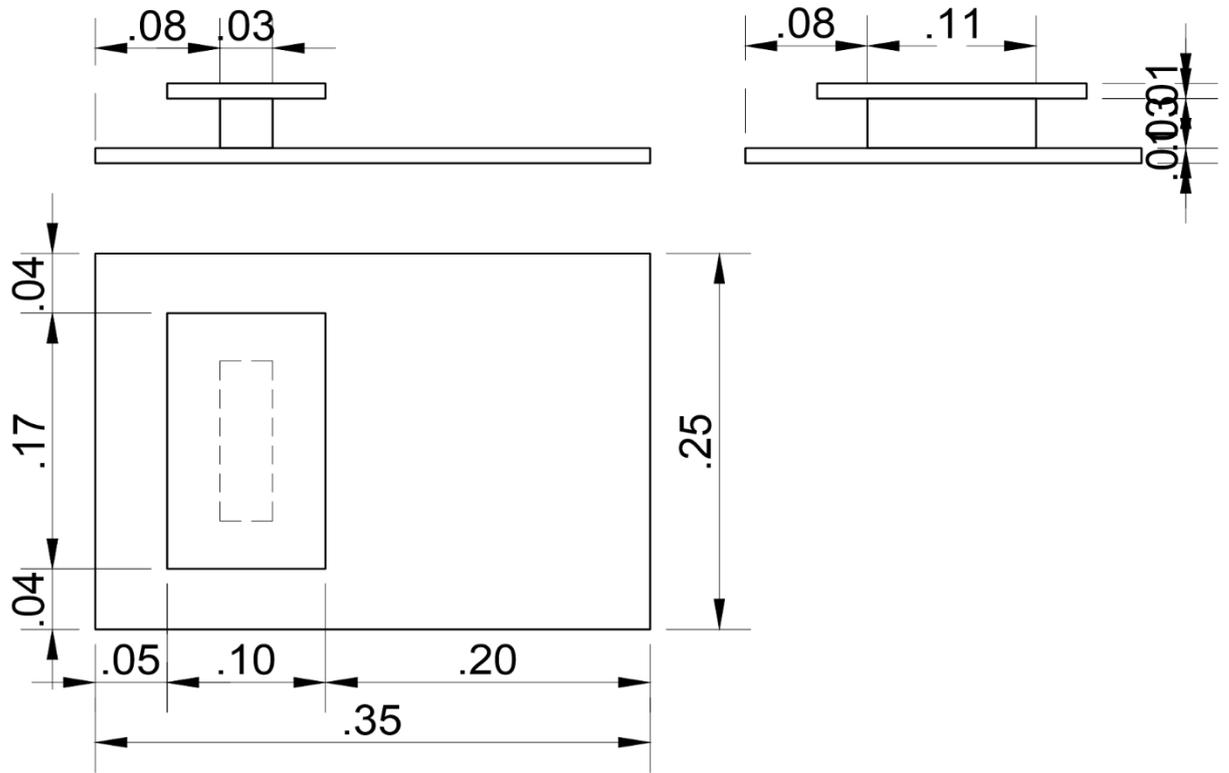
<p>Descrição do experimento:</p> <p>Tempo para leitura das sondas 5 (min).</p> <p>Fazer cálculo de frequência da falha para saber a amplificação.</p> <p>Seleção do sinal intervalo de 10s taxa de aquisição de 500 ou 800Hz.</p> <p>Pista interna 144 Hz</p> <p>Pista externa 87.5 Hz</p>
--

Registro de temperatura (Termografia)		Horário	Confirmação
T0	Amostra A1.	8:45	ok
T1	Amostra A1.	8:50	ok
T2	Amostra A1.	8:55	ok
T3	Amostra A1.	9:00	ok
T4	Amostra A1.	9:05	ok
T5	Amostra A1.	9:10	ok
T6	Amostra A1.	9:15	ok
Registro de temperatura (Termografia) Amostra A2		Horário	Confirmação
T0	Amostra A2	9:55	ok
T1	Amostra A2	10:00	ok
T2	Amostra A2	10:05	ok
T3	Amostra A2	10:10	ok
T4	Amostra A2	10:15	ok
T5	Amostra A2	10:20	ok
T6	Amostra A2	10:25	ok
Registro de temperatura (Termografia) Amostra A3		Horário	Confirmação
T0	Amostra A3	11:00	ok
T1	Amostra A3	11:05	ok
T2	Amostra A3	11:10	ok
T3	Amostra A3	11:15	ok
T4	Amostra A3	11:20	ok
T5	Amostra A3	11:25	ok

T6	Amostra A3	11:30	ok
Registro de temperatura (Termografia) Amostra A4		Horário	Confirmação
T0	Amostra A4	8:15	ok
T1	Amostra A4	8:20	ok
T2	Amostra A4	8:25	ok
T3	Amostra A4	8:30	ok
T4	Amostra A4	8:35	ok
T5	Amostra A4	8:40	ok
T6	Amostra A4	8:45	ok
Registro de temperatura (Termografia) Amostra B1		Horário	Confirmação
T0	Amostra B1	9:00	ok
T1	Amostra B1	9:05	ok
T2	Amostra B1	9:10	ok
T3	Amostra B1	9:15	ok
T4	Amostra B1	9:20	ok
T5	Amostra B1	9:25	ok
T6	Amostra B1	9:30	ok
Registro de temperatura (Termografia) Amostra B2			
T0	Amostra B2	9:45	ok
T1	Amostra B2	9:50	ok
T2	Amostra B2	9:55	ok
T3	Amostra B2	10:00	ok
T4	Amostra B2	10:05	ok
T5	Amostra B2	10:10	ok
T6	Amostra B2	10:15	ok
Registro de temperatura (Termografia) Amostra B3		Horário	Confirmação
T0	Amostra B3	10:30	ok
T1	Amostra B3	10:35	ok
T2	Amostra B3	10:40	ok

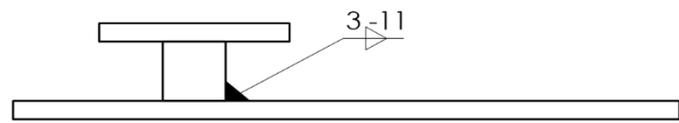
T3	Amostra B3	10:45	ok
T4	Amostra B3	10:50	ok
T5	Amostra B3	10:55	ok
T6	Amostra B3	11:00	ok
T7	Amostra B3	11:05	ok
Registro de temperatura (Termografia) Amostra B4		Horário	Confirmação
T0	Amostra B4	11:25	ok
T1	Amostra B4	11:30	ok
T2	Amostra B4	11:35	ok
T3	Amostra B4	11:40	ok
T4	Amostra B4	11:45	ok
T5	Amostra B4	11:50	ok
T6	Amostra B4	11:55	ok

VISTAS ORTOGONAIS



ESCALA.....1:10

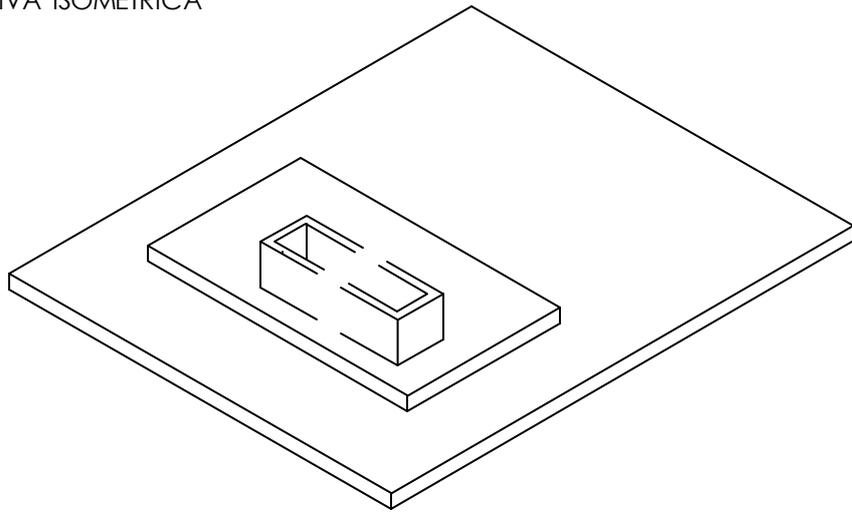
Detalhes



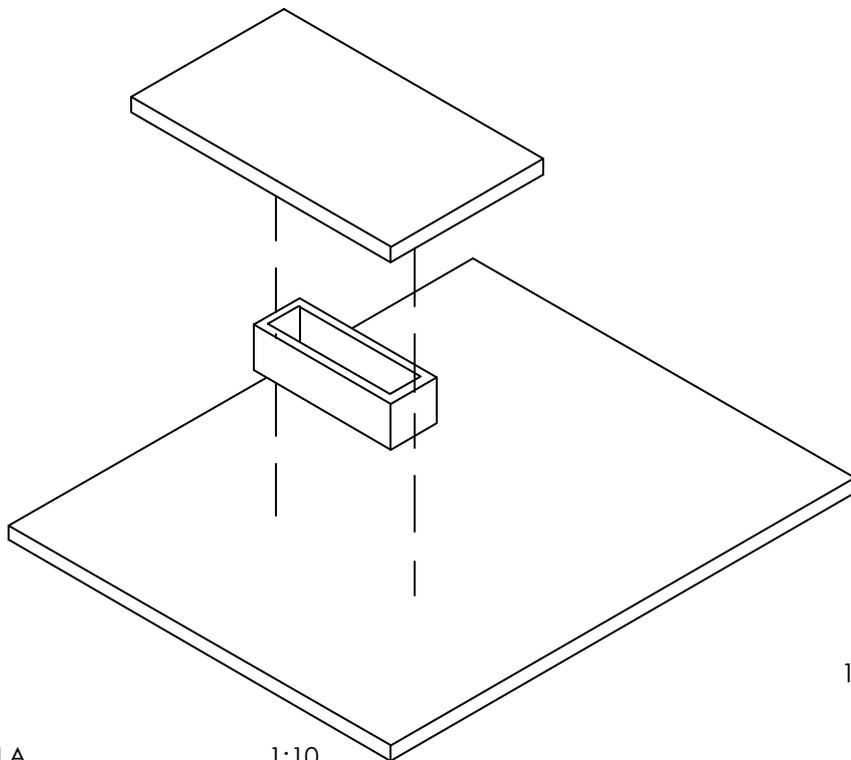
ESCALA.....1:10

Universidade Federal de Campina Grande		DATA: AGOSTO/2016	
Desenho Técnico		ESCALA: 1/10	
Bancada para experimento		PRANCHA: 1/2	
Designer: Cibele Silva		P.R.:	P.O.:
Vistas ortogonais			

PERSPECTIVA ISOMÉTRICA



PERSPECTIVA EXPLODIDA



1 – Base em aço

ESCALA.....1:10

Universidade Federal de Campina Grande	DATA: AGOSTO/2016
Desenho técnico	ESCALA: 1/10
Bancada para experimento	PRANCHA: 2/2
Designer: Cibele Silva	
Perspectiva isométrica e explodida	