

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

Adriano de Sousa Cabral

**ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO À DETECÇÃO DE FALHAS POR  
DESGASTE MECÂNICO EM ROLAMENTO AUTOCOMPENSADOR DE ESFERAS**

Campina Grande, PB

2017

Adriano de Sousa Cabral

**ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO À DETECÇÃO DE FALHAS POR  
DESGASTE MECÂNICO EM ROLAMENTO AUTOCOMPENSADOR DE ESFERAS**

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

Área de concentração: Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

Orientador: Juscelino de F. Maribondo, Dr.

Campina Grande, PB.

2017

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

C117e

Cabral, Adriano de Sousa.

Estudo termográfico de auxílio à detecção de falhas por desgaste mecânico em rolamento autocompensador de esferas / Adriano de Sousa Cabral. – Campina Grande, 2017.

113 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

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

Referências.

1. Termografia. 2. Detecção de Falhas - Elementos de Máquinas. 3. Rolamentos Autocompensadores com 2 Carreiras de Esferas. I. Maribondo, Juscelino de Farias. II. Título.

CDU 621.81(043)

“ESTUDO TERMOGRÁFICO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS POR DESGASTE  
MECÂNICO EM ROLAMENTO AUTOCOMPENSADOR DE ESFERAS”.

**ADRIANO DE SOUSA CABRAL**

Dissertação Aprovada em 26/07/2017 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes  
membros




---

**Dr. Juscelino de Farias Maribondo**

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



---

**Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



---

**Dr. Cícero da Rocha Souto**

Examinador Externo

CEAR/DEE/UFPB

“Como é bom render graças ao Senhor e cantar  
louvores ao teu nome, ó Altíssimo, anunciar de  
manhã o teu amor leal e de noite a tua fidelidade.  
Tu me alegras, Senhor, com os teus feitos; as  
obras das tuas mãos levam-me a cantar de  
alegria.”

Salmos 92: 1-2,4

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por desde sempre suster-me e manter-me firme na fé mesmo nos momentos mais difíceis. Para Ele toda honra e toda glória.

Agradeço aos meus queridos pais Jonas e Zilá que são fonte de inspiração para mim desde sempre. Às minhas queridas irmãs Ana Paula e Patrícia pelos apoios e amores incondicionais. À minha amável esposa Perla pelos carinho, incentivo e orações. À Valentina, Emmanuel e Gustavo que nos tornam uma família unida e única.

Agradeço ao meu orientador, professor e amigo Prof. Dr. Juscelino Maribondo de Farias pela sua longanimidade para comigo com seus conselhos, conversas e incentivos sem fim.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos e dedicações à Academia. Aos meus colegas de curso em especial a José Jorge e Cibele da Silva pela ajuda com materiais, disponibilidade para reuniões e informações técnicas sobre o tema da pesquisa.

Agradeço à Cadensil Industrial Ltda pelo suporte financeiro à pesquisa e pela cessão do mecânico Jonas Comandante que participou ativamente na construção do dispositivo de testes.

A todos o meu muitíssimo obrigado!

**CABRAL, A. S. ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO À DETECÇÃO DE FALHAS POR DESGASTE MECÂNICO EM ROLAMENTO AUTOCOMPENSADOR DE ESFERAS.** 2017. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Estado da Paraíba, 2017.

## **RESUMO**

O objetivo desta pesquisa foi analisar se a Termografia pode auxiliar na detecção de falhas em elementos de máquinas, notadamente rolamentos autocompensadores com 2 carreiras de esferas. A motivação surgiu da necessidade de verificar os pontos de falhas existentes nestes elementos mecânicos visando minimizar e/ou eliminar paradas inesperadas que possam comprometer o bom funcionamento dos mesmos e conseqüentemente das máquinas às quais estão inseridos. A pesquisa é classificada como investigativa, documental, prescritiva, qualitativa e quantitativa. A metodologia utilizada fez uso de bancada de testes composta por elementos mecânicos diversos a citar: motor elétrico controlado por inversor de frequência, amortecedores de vibração (vibra-stop), polias e correias, mancais de rolamentos, carga em eixo, câmara térmica e rolamentos autocompensadores modificados com defeitos nas pistas interna e externa em cenário com condições de controle e não-controle de temperatura ambiente, umidade relativa, rotação do motor, velocidade do ar, temperatura refletida e emissividade. Como resultado, observou-se que houve alteração significativa de temperatura nas pistas interna e externa dos rolamentos com falha do tipo sulco. Por outro lado, não foram percebidas alterações significativas nas pistas interna e externa do rolamento com falha por desgaste por abrasão. Por fim, conclui-se, neste trabalho, que a hipótese inicial foi parcialmente confirmada, isto é, a Termografia pode sim auxiliar a detectar as falhas mecânicas, mas falhas do tipo sulco e não as falhas do tipo desgaste abrasivo.

**Palavras-chave:** Termografia. Falhas. Manutenção. Metodologia.

CABRAL, A. S. **THERMOGRAPHIC STUDY FOR DETECTION OF FAULTS BY MECHANICAL WEAR IN SELF-ALIGNING BEARINGS**. 2017. 113 p. Dissertation. (Master's degree in Mechanical Engineering). Federal University of Campina Grande, Campina Grande, State of Paraíba, 2017.

### **ABSTRACT**

The aim of this study was to verify if Thermography can help in the diagnosis of failures in machine elements, notably self-aligning bearings with 2 rows of balls. The motivation arose from the need to verify the fault points existing in these mechanical elements to minimize and / or eliminate unexpected stops that could compromise the proper functioning of themselves and consequently of the machines of which they are part of. This study is classified as investigative, documentary, prescriptive, qualitative and quantitative. The methodology made use of test bench composed of several mechanical elements: electric motor controlled by frequency inverter, vibration-stop buffers, pulleys and belts, house bearings, radial load, thermal camera and self-aligning bearings with inner and outer race fault in a scenario with control conditions and non-control of ambient temperature, relative humidity, engine speed, air velocity, reflected temperature and emissivity. It was confirmed that there was a significant temperature change in the inner and outer races of groove-type failure bearings. On the other hand, no significant changes were observed in the inner and outer races of the bearing with abrasion wear failure. Finally, it was concluded in this work that the initial hypothesis was partially confirmed, that is, the Thermography can help to detect mechanical failures in groove type failures but not abrasive wear type failures.

**Keywords:** Thermography. Failures. Maintenance. Methodology.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do rolamento .....	22
Figura 2 – Rolamento com desgaste severo por excesso de carga. ....	23
Figura 3 – Rolamento com desgaste severo por sobreaquecimento. ....	24
Figura 4 – Rolamento com falha por fadiga. ....	24
Figura 5 – Rolamento com falha por contaminação. ....	25
Figura 6 – Rolamento com falha por lubrificação inadequada. ....	25
Figura 7 – Rolamento com falha por corrosão. ....	26
Figura 8 – Espectro de ondas eletromagnéticas. ....	29
Figura 9 – Ângulo sólido subtendido por dAn em coordenadas esféricas. ....	32
Figura 10 – Geometria geral para transferência de calor por radiação. ....	33
Figura 11 - Radiação eletromagnética emitida por corpo negro em equilíbrio térmico. ....	35
Figura 12 – Potência irradiada pelo corpo cinza com diferentes emissividades. ....	36
Figura 13 – Radiação recebida pelo termovisor. ....	38
Figura 14 – Método direto. ....	41
Figura 15 – Método refletor. ....	41
Figura 16 – Normas brasileiras sobre Termografia. ....	42
Figura 17 – Falhas por abrasão em pistas externas. ....	43
Figura 18 – Curva de temperatura máxima em rolamentos com falhas. ....	43
Figura 19 – Rolamentos com falha perfurante e de controle. ....	44
Figura 20 – Curva de temperatura máxima em rolamentos com falhas e controle. ....	45
Figura 21 – Termogramas de rolamentos normal, baixa lubrificação e falha. ....	46
Figura 22 – Curva de temperaturas dos rolamentos nos cenários analisados. ....	46
Figura 23 – Termogramas de rolamentos normal e com falha de pó de ferro. ....	47
Figura 24 – Curva de temperaturas dos rolamentos normal e com falha. ....	48
Figura 25 – Falhas dos rolamentos e carga radial. ....	48
Figura 26 – Curva de temperaturas dos rolamentos B6304 e B6204 a 3.000 rpm. ....	49
Figura 27 – Termograma de rolamento com falha. ....	50
Figura 28 – Temperaturas dos rolamentos com falhas por abrasão e com pesos no desbalanceamento do eixo. ....	51
Figura 29 – Bancada de testes e disco em aço de 3 kg. ....	52

Figura 30 – Temperaturas dos rolamentos com falhas por abrasão e com pesos no desbalanceamento do eixo.....	52
Figura 31 – Rolamento de esferas com falha por eletro-erosão. ....	53
Figura 32 – Termograma e rolamentos de teste montado. ....	54
Figura 33 – Evolução da temperatura do rolamento de acordo com o sinal de vibração mecânica. ....	54
Figura 34 – Malha de modelo matemático do rolamento em estudo.....	55
Figura 35 – Distribuição de temperatura no mancal do rolamento em estudo.....	55
Figura 36 – Rolamento de esferas com falha por eletro-erosão nas pista interna e externa, respectivamente. ....	556
Figura 37 – Termograma de rolamentos normal, falha em pista externa e falha em pista interna, respectivamente.....	556
Figura 38 – Temperaturas dos rolamentos normal e com falhas por abrasão. ....	57
Figura 39 – Fluxograma metodológico utilizado na pesquisa.....	61
Figura 40 – Fluxograma metodológico da Fase 1. ....	62
Figura 41 – Fluxograma metodológico da Fase 2. ....	64
Figura 42 – Fluxograma metodológico da Fase 3 .....	65
Figura 43 – Fluxograma metodológico da Fase 4 .....	66
Figura 44 – Fluxograma metodológico da Fase 5 .....	67
Figura 45 – Fluxograma metodológico da Fase 6 .....	68
Figura 46 – Termogramas da pista interna rolamento de referência C1.....	73
Figura 47 – Termogramas da pista externa do rolamento de referência.....	74
Figura 48 – Termogramas da pista interna rolamento de referência .....	74
Figura 49 – Termogramas da pista externa do rolamento de referência.....	75
Figura 50 – Ruído emitido pelo rolamento de referência .....	75
Figura 51 – Mancal com os rolamentos de controle e rolamento As.....	77
Figura 52 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e As aos 60 minutos.....	77
Figura 53 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e As aos 60 minutos.....	78
Figura 54 – Pista interna do rolamento com sulco de 3mm antes e depois do experimento, respectivamente. ....	78
Figura 55 – Ruído emitido pelo rolamento As. ....	79
Figura 56 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e As aos 60 minutos.....	83
Figura 57 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Bs aos 60 minutos.....	83

Figura 58 – Pista externa do rolamento com sulco de 3mm antes e depois do experimento, respectivamente. ....	84
Figura 59 – Ruído emitido pelo rolamento Bs. ....	83
Figura 60 – Mancal com os rolamentos de controle C1 e rolamento Ar. ....	87
Figura 61 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Ar aos 60 minutos. ....	87
Figura 62 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Ar aos 60 minutos. ....	88
Figura 63 – Pista interna do rolamento com ranhura de 3 mm após o experimento. ....	88
Figura 64 – Ruído emitido pelo rolamento Ar. ....	89
Figura 65 – Mancal com os rolamentos de controle e rolamento Br. ....	92
Figura 66 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Br aos 60 minutos. ....	93
Figura 67 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Br aos 60 minutos. ....	92
Figura 68 – Pista externa do rolamento com ranhura de 3 mm após o experimento. ....	93
Figura 69 – Ruído emitido pelo rolamento Br. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espectro de ondas eletromagnéticas. ....	30
Tabela 2 – Valores de frequências para bandas espectrais .....	31
Tabela 3 – Emissividade de alguns materiais .....	40
Tabela 4 – Temperaturas dos rolamentos com falhas por abrasão .....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas de temperatura do rolamento de referência C1 em ambiente controlado. ...	72
Gráfico 2 – Curvas de temperatura do rolamento de referência C1 em ambiente não-controlado .....	75
Gráfico 3 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série As e referência em ambiente controlado .....	76
Gráfico 4 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série As e referência em ambiente não controlado .....	81
Gráfico 5 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série Bs e referência em ambiente controlado .....	81
Gráfico 6 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série Bs e referência em ambiente não- controlado .....	84
Gráfico 7 – Diferença de temperatura rolamento de referência versus rolamentos As e Bs em ambiente controlado .....	85
Gráfico 8 – Diferença de temperatura rolamento de referência versus rolamentos As e Bs em ambiente não-controlado .....	85
Gráfico 9 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série Ar e referência em ambiente controlado .....	86
Gráfico 10 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série Ar e referência em ambiente não- controlado .....	90
Gráfico 11 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série Br e referência em ambiente controlado .....	90
Gráfico 12 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série Br e referência em ambiente não controlado .....	94

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1– Resumo dos estudos experimentais citados neste trabalho e seus autores. ....	58
Quadro 2 – Dados do experimento .....	71

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$  – Velocidade da luz no vácuo [m/s]

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

$\nu$  – Frequência da onda eletromagnética [Hz]

$L$  – Radiância

$d^2\phi$  – Derivada segunda do elemento infinitesimal de um fluxo radiante incidente ou emergente de um ponto dentro do ângulo sólido em uma direção específica [W]

$dA$  – Elemento infinitesimal da área projetada [ $\text{m}^2$ ]

$d\omega$  – Elemento infinitesimal de ângulo sólido [sr]

$d\phi$  – Elemento infinitesimal de um fluxo radiante incidente ou emergente de um ponto dentro do ângulo sólido em uma direção específica [W]

$I$  – Intensidade de radiação [W/sr]

$dA$  – Elemento infinitesimal da área projetada para um sistema de coordenada esféricas [ $\text{m}^2$ ]

$R$  – Distância entre um elemento infinitesimal da superfície emissora e um elemento infinitesimal da superfície receptora [m]

$S_0$  – Área da fonte de emissão de radiação [ $\text{m}^2$ ]

$A_0$  – Área da fonte de recepção de radiação [ $\text{m}^2$ ]

$\Phi$  – Fluxo total recebido pela área e emitido pela área

$\theta$  – Ângulo entre a direção do fluxo que chega à área receptora e o vetor normal à superfície emissora [ $^\circ$ ]

$\Psi$  – Ângulo entre o vetor normal à superfície receptora e a direção do fluxo [ $^\circ$ ]

$dS_0$  – Elemento infinitesimal de área da superfície emissora [ $\text{m}^2$ ]

$dA_0$  – Elemento infinitesimal de área da superfície receptora [ $\text{m}^2$ ]

$\alpha_\lambda$  – Absortância

$\rho_\lambda$  – Reflectância

$\tau_\lambda$  – Transmitância

$W_{\lambda b}$  – Radiação eletromagnética emitida por corpo negro [W/( $\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$ )]

$C_1$  e  $C_2$  – Constantes

$T$  – Temperatura [K]

$E_b$  – Intensidade total da radiação total de um corpo negro [W/( $\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$ )]

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann [W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ )]

$\varepsilon$  – Emissividade

$W_{\text{tot}}$  – Radiação total recebida pelo termovisor [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ ]

$E_{\text{obj}}$  – Emissão do objeto analisado [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ ]

$E_{\text{refl}}$  – Emissão da vizinhança e refletida pelo objeto [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ ]

$E_{\text{atm}}$  – Emissão da atmosfera [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ ]

$\varepsilon_{\text{obj}}$  – Emissividade do objeto analisado

$T_{\text{obj}}$  – Temperatura do objeto analisado [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\tau_{\text{atm}}$  – Transmitância da atmosfera

$T_{\text{atm}}$  – Temperatura da atmosfera [ $^{\circ}\text{C}$ ]



# SUMÁRIO

## CAPÍTULO I

<b>1.0 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....</b>	<b>19</b>
<b>1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA .....</b>	<b>19</b>

## CAPÍTULO II

<b>2.0 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 ROLAMENTOS.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 INFORMAÇÕES RELACIONADAS AO ELEMENTO EM ESTUDO: o rolamento. características, mecanismos de falhas e tipos de manutenções.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.1 MECANISMOS DE FALHA.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2 TIPOS DE MANUTENÇÕES.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3 INFORMAÇÕES SOBRE A CIÊNCIA DA RADIAÇÃO TÉRMICA: princípios básicos, estudo do corpo negro, superfícies cinza e emissividade.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.1 PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.2 AFERIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA.....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.3 EMISSIVIDADE E TEMPERATURA REFLETIDA .....</b>	<b>39</b>
<b>2.4 INFORMAÇÕES SOBRE A TERMOGRAFIA.....</b>	<b>42</b>
<b>2.4.1 ESTUDOS SOBRE USO TERMOGRAFIA PARA DETECÇÃO DE FALHAS... </b>	<b>42</b>

## CAPÍTULO III

<b>3.0 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 PROCESSO METODOLÓGICO.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1.1 FASE 1 – DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>62</b>
<b>3.1.2 FASE 2 – PREPARAR OS ROLAMENTOS DE ESFERAS.....</b>	<b>63</b>

<b>3.1.3 FASE 3 – CONFECCIONAR E MONTAR DISPOSITIVO PARA EXPERIMENTOS .....</b>	<b>64</b>
<b>3.1.4 FASE 4 – PREPARAR AMBIENTE E CONFIGURAR O TERMOVISOR .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.5 FASE 5 – COLETAR DADOS.....</b>	<b>67</b>
<b>3.1.6 FASE 6 – ANALISAR OS DADOS .....</b>	<b>68</b>

#### **CAPÍTULO IV**

<b>4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
---	-----------

#### **CAPÍTULO V**

<b>5.0 CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>104</b>

## CAPÍTULO I

### 1.0 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Um dos elementos mecânicos bastante utilizados em máquinas industriais são os rolamentos. Tais elementos podem utilizar cilindros para manter a separação entre as partes móveis do rolamento ou utilizar esferas como elemento rolante, servindo para reduzir o atrito rotacional e suportar cargas radiais e axiais. Segundo Geitner e Block (2015), quase todas as bombas e motores de pequeno e médio porte utilizam esses tipos de rolamentos. O mercado é tão vasto que apenas um dos fabricantes chega a deter 26 % do mercado mundial e isto equivale à monta de aproximadamente US\$ 3 bilhões anuais.

Os rolamentos são projetados para uma vida útil que varia de milhares a milhões de horas de funcionamento desde que estejam operando em condições normais de trabalho aos quais foram projetados. Na prática, devido a vários fatores, como os desgastes indevidos, esses milhares ou milhões de horas podem se reduzir drasticamente.

Há várias formas de desgastes indevidos dos rolamentos como armazenamento errôneo, ambiente de operação inadequado, manuseio incorreto e as formas mais comuns de desgaste são excesso de carga nos eixos, oxidação, desalinhamento, lubrificação inadequada, contaminação com produtos químicos e sobreaquecimento causado, por exemplo, por falhas nos elementos do rolamento como pistas, esferas e gaiola.

Como muitas dessas falhas são ocasionadas pelo contato físico entre metais que estão em movimento um em relação ao outro, existe no momento desse contato, uma produção de calor que pode ser registrada em equipamentos dedicados a este fim, tais como as câmeras termográficas.

Pesquisas com estes equipamentos vêm sendo realizadas em várias partes do mundo. A intenção é tornar a técnica da Termografia mais acessível e de fácil aplicação principalmente na área da manutenção preditiva.

Trabalho recente realizado por Silva Júnior (2017) junto à Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande é exemplo de trabalho voltado a este fim.

Diante do exposto e procurando dar uma contribuição a esta área de pesquisa busca-se neste trabalho avançar no estudo da Termografia como ferramenta auxiliar na detecção de falhas por desgastes nas pistas de rolamentos autocompensadores submetido a esforço radial constante. A hipótese a ser verificada é que com a aplicação de força constante os rolamentos com falha de desgaste, quando comparados a rolamentos de referência em bom estado de conservação, apresentem escrita de calor significativa, contribuindo para confirmar a aplicação desta técnica na detecção de falhas em ambientes controlados, abrindo caminho para trabalhos futuros envolvendo detecção de falhas no mundo real, ou seja, no campo, no ambiente fabril.

### **1.1 OBJETIVO GERAL**

Realizar um estudo termográfico destinado a detectar falhas por desgastes em rolamentos autocompensadores com 2 carreiras de esferas e submetidos a cargas radiais constantes.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

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

- inserir uma falha atípica no objeto de estudo com o objetivo de verificar se a Termografia consegue detectar a sua localização;
- verificar se o tipo da falha inserida no objeto de estudo influencia na detecção das mesmas através da técnica da Termografia;
- verificar se a inserção da falha atípica no objeto causa temperaturas elevadas quando comparadas a um objeto de referência, sem falhas;
- verificar se a técnica da Termografia é válida na detecção de falhas mecânicas e com isso auxiliar nos trabalhos de manutenção preditiva.

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

Com o contínuo crescimento da economia, as indústrias sempre buscaram o aumento da produção de seus produtos, muitas vezes forçando os equipamentos envolvidos no processo de

fabricação funcionarem, durante longos períodos de tempos, em sua capacidade máxima. Se não planejada adequadamente, esta ação pode causar paradas emergenciais no processo devido a falhas em equipamentos, ocasionadas por diversos motivos, desde a má instalação destes ao longo do processo até a qualidade dos constituintes dos equipamentos. Com isto, promove-se a queda na produção e interferência direta nos custos, visto que a hora-máquina de uma máquina parada tem custo elevado, causando aumento no custo total do processo, e na qualidade do produto final. Se antecipar a tais paradas agindo de forma preditiva é garantir que a produção consiga obter o máximo do equipamento antes de tomar a decisão por pará-lo. Desenvolver técnicas de detecção de falhas que permitam a decisão mais adequada a cada momento é garantir dividendos para as empresas. Neste contexto, a Termografia por ser de caráter não invasivo, seguro do ponto de vista operacional e instantânea no auxílio à detecção pode contemplar tais necessidades empresariais. Conhecer a maneira de manipular as variáveis envolvidas no processo de registro das informações técnicas é garantir qualidade e precisão na tomada de decisão. Por tais motivos se justifica os estudos e as pesquisas neste campo de trabalho.

#### **1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA**

Este trabalho se delimita ao estudo da Termografia para o possível auxílio na detecção de falhas por desgaste, em forma de sulco e desgaste por abrasão, com comprimento de 3,0 mm nas pistas internas e externas de rolamentos autocompensadores com 2 carreiras de esferas, modelo SKF 1303, e submetido à aplicação de cargas radiais constantes. Os testes foram executados tanto em ambiente controlado de temperatura do ar, temperatura refletida, velocidade e umidade do ar, como sem o controle das variáveis termofísicas do ambiente. As análises termográficas se caracterizaram, em um primeiro momento, de caráter qualitativas e, posteriormente, de caráter quantitativas, com emissividade definida de 0,98.

#### **1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Esta pesquisa está estruturada em cinco capítulos, a saber:

No Capítulo I contextualizou-se o problema, definiu-se os objetivos geral e específico, as justificativas e as delimitações para o desenvolvimento da pesquisa.

No Capítulo II se fez a revisão de literatura envolvendo o problema em estudo. Buscou-se na literatura especializada informações sobre transferência de calor especificamente radiação térmica, Termografia, manutenção preditiva e falhas em rolamentos.

No Capítulo III foram expostos os procedimentos metodológicos para a realização desta pesquisa destacando por meio de um fluxograma “ ‘o como?’ e ‘com quê?’ ” foi realizada cada atividade para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo IV se destina a apresentar e discutir os resultados a partir dos procedimentos metodológicos estabelecidos.

No Capítulo V apresentam-se as conclusões obtidas a partir das discussões efetuadas no capítulo anterior, Capítulo IV. Por fim, seguem-se as referências que fundamentaram esta pesquisa, bem como o Apêndice.

## CAPÍTULO II

### 2.0 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo deste capítulo é efetuar a revisão de literatura do elemento de máquina em estudo, o rolamento de esferas, relativamente às suas características técnicas, principais tipos de falhas e as manutenções mais usadas e vigentes no mercado. Bem como a fundamentação sobre Termografia e aferição de temperatura em objetos considerando as variáveis envolvidas no processo.

### 2.1 ROLAMENTOS

O memorando técnico da Nasa de 1981 intitulado: “A História dos Rolamentos de Esferas” menciona que os rolamentos do século XX são produtos de tecnologia precisa e ciência sofisticada. Apesar de possuir forma e conceito simples, ainda sim é efetivo na redução do atrito e desgaste numa vasta gama de maquinários. Cita também que o desenvolvimento de vários tipos de rolamentos é bem conhecido e documentado e é possível rastrear as origens e desenvolvimento desses importantes elementos de máquina a períodos bem anteriores à grande demanda ocorrida na revolução industrial.

Moussa (2014) afirma que os egípcios por volta do ano 2.400 A.C. foram os primeiros povos a usar lubrificante e água para reduzir o esforço necessário no transporte das enormes pedras para a construção de suas estátuas. Ao invés de lubrificante, os Assírios por volta do ano 1.100 A.C. utilizaram roletes ou cilindros de madeira para o mesmo trabalho utilizando menor esforço físico.

Slocum (2008) diz que rolamentos são elementos de máquina que permitem que os componentes se movam uns em relação aos outros minimizando o atrito e o desgaste. Sendo também usados desde grandes arranha-céus, permitindo que se movimentem durante os terremotos, até nos melhores e mais caros relógios encontrados no nosso dia a dia.

Kugelfischer e Schafer (1986) citam que pelo fato de não haver um modelo na natureza para guiar rodas em eixo e eixos do tipo fuso, o homem enfrentou uma grande tarefa para conceber os rolamentos – uma tarefa que não perdeu a sua importância e seu contentamento

nos dias de hoje. Com isso, os rolamentos são, provavelmente, os elementos de máquina mais abundantes e usados no mundo em plantas industriais e seus maquinários. Esses elementos mecânicos podem ser encontrados desde correias transportadoras, passando pelos motores elétricos chegando às turbinas eólicas, entre outros.

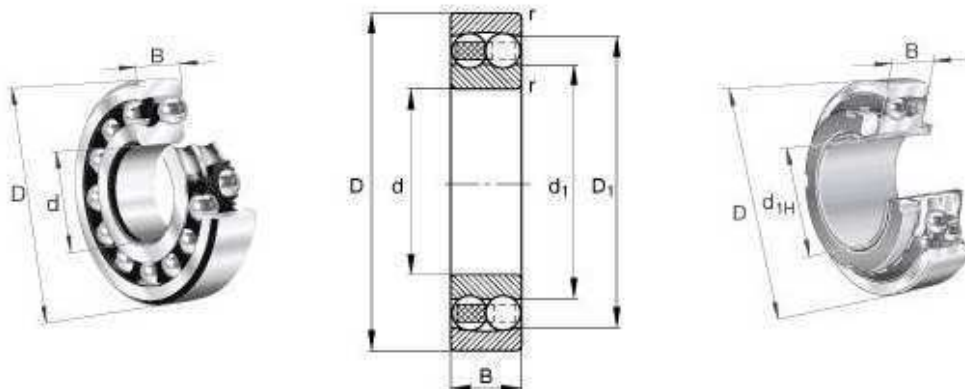
Saruhan *et al.* (2014) afirmam que os rolamentos proporcionam posição relativa e liberdade de rotação ao mesmo tempo em que transmitem uma carga entre o eixo e o mancal. A grande maioria das máquinas rotativas utilizam rolamentos de esferas e que devido à essa necessidade e contribuição das máquinas rotativas, os requisitos e exigências aos rolamentos se tornaram mais severas, atualmente.

Há no mercado mundial vários fabricantes de rolamentos e essas empresas produzem vários tipos de rolamentos, a saber: SKF, NSK, FAG, Timken, etc. Dentre os principais tipos de rolamentos e os mais comerciais tem-se: rolamentos de esferas e/ou rolos com uma ou duas carreiras, rolamentos autocompensadores de esferas e/ou rolos com uma ou duas carreiras e, rolamentos de contato angular.

Um rolamento é basicamente composto de anel interno, anel externo, esferas e/ou rolos e gaiolas que mantêm as esferas/rolos espaçados entre si e dentro das pistas do rolamento.

Na Figura 1 pode-se observar a estrutura de um rolamento autocompensador com duas carreiras de esferas. Cabe destacar que tal rolamento foi o elemento mecânico utilizado nos experimentos desta pesquisa. Este rolamento foi escolhido pelo fato de necessitar-se inserir falhas em suas pistas, ou seja, desmontá-lo, inserir as falhas e remontá-lo. Dentre as opções disponíveis, o rolamento autocompensador de 2 carreiras de esferas SKF 1303 foi o escolhido por contemplar as especificidades desejadas.

Figura 1 – Estrutura do rolamento



Fonte – SKF (2017)



Na Figura 1 observam-se algumas cotas de medidas e dentre elas as mais comuns são diâmetro da pista externa -  $D$ , diâmetro da pista interna -  $d$  e largura do rolamento -  $B$ .

Os rolamentos de esferas são projetados para terem uma longa vida útil. Para alcançar este intento, os rolamentos devem ser corretamente instalados, lubrificados e receberem manutenção adequada. Quando estas condições não são satisfeitas, os rolamentos de esferas podem apresentar falhas de diversos graus.

Como exemplos, podem ser observados a partir da Figura 2 algumas das principais falhas apresentadas por rolamentos de esferas, nela observa-se falha de fadiga no rolamento por excesso de carga. Como solução, aponta-se a redução da carga ou reprojetar o sistema utilizando rolamento com maior capacidade de carga.

Figura 2 – Rolamento com desgaste severo por excesso de carga



Fonte – Barden Bearings (2014)

Em rolamentos com falhas por sobreaquecimento, os sintomas observados são descoloração das pistas, esferas e gaiola da cor dourada para a cor azul. Quando a temperatura excede  $205^{\circ}\text{C}$ , pode-se observar uma têmpera nas pistas e esferas do rolamento causando a diminuição da dureza e sua vida útil. Pode-se observar este efeito na Fig. 3.

Figura 3 – Rolamento com desgaste severo por sobreaquecimento



Fonte – Barden Bearings (2014)

A falha por fadiga, normalmente conhecida como lascamento, é a fratura em pistas do rolamento e consequente remoção de pequenas partículas de material. Lascamento em rolamentos pode ocorrer nas pistas interna e externa ou esferas de contato. Este tipo de falha é progressivo e uma vez iniciada será difundida com a operação do rolamento.

Como solução, apontam-se a troca do rolamento defeituoso ou reprojeter o uso com rolamento com maior resistência à fadiga. Na Fig. 4, observa-se rolamento com falha por fadiga.

Figura 4 – Rolamento com falha por fadiga



Fonte – Barden Bearings (2014)

As falhas em rolamentos por contaminação são uma das principais causas de falhas. Essa contaminação pode causar endentações nas pistas externa e interna, e causar alta vibração e desgaste nas esferas de contato. Por isso, as áreas de trabalho e ferramentas devem estar limpas para manusear os rolamentos. Na Fig. 5 pode-se observar falhas por contaminação em pista de rolamento.

Figura 5 – Rolamento com falha por contaminação



Fonte – Barden Bearings (2014)

A lubrificação insuficiente causará excessivo desgaste, superaquecimento e falha do rolamento. Por isso, os rolamentos dependem da contínua presença de uma fina camada de filme lubrificante entre as esferas de contato e as pistas. Na Fig. 6 pode-se observar desgaste por lubrificação inadequada.

Figura 6 – Rolamento com falha por lubrificação inadequada



Fonte – Barden Bearings (2014)

A falha por corrosão resulta do ataque químico no metal do rolamento por fluido ou atmosfera inadequada. Com isso, há aumento na vibração do rolamento seguido de desgaste resultando em colapso na estrutura do rolamento como folga radial. Assim, o uso de selos ajuda no isolamento dos elementos do rolamento do ambiente e de fluidos inadequados. Na Figura 7 pode-se notar rolamento com falha por corrosão.

Figura 7 - Rolamento com falha por corrosão.



Fonte – Barden Bearings (2014)

## **2.2 INFORMAÇÕES RELACIONADAS AO ELEMENTO EM ESTUDO: o rolamento. características, mecanismos de falhas e tipos de manutenções**

### **2.2.1 MECANISMOS DE FALHA**

Máquinas rotativas são complexas e possuem muitos componentes que podem se tornar potencialmente vulneráveis e falhos. Análises devem ser efetuadas para identificar possíveis defeitos em rolamentos antes dos mesmos se tornarem falhas reais e aumentarem significativamente a possibilidade de danificar outros componentes, onerando os custos de operação da mesma.

Bezerra (2004) afirma que mesmo sendo geometricamente perfeitos, os rolamentos podem gerar vibrações ocasionadas por esforços mecânicos entre seus componentes ao longo do tempo ou decorrentes de variações de conformidade. Com o passar do tempo tais esforços tendem a causar fadiga em seus componentes e essa fadiga gerará sinais termofísicos que podem ser captados e tratados para uso da manutenção preditiva.

### 2.2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Dagnew (2012) e Moussa (2014) citam que atualmente, há diferentes técnicas e métodos para monitoramento de falhas em equipamentos e elementos mecânicos. Para cada tipo de monitoramento necessita-se de informações que precisam ser aferidas e avaliadas. Tais métodos podem ser análise de vibrações, análise de emissão acústica, análise de óleo lubrificante e análise de temperatura (Termografia infravermelha).

A análise de vibrações é utilizada em máquinas rotativas para avaliar mudanças em suas condições operacionais, geralmente problemas mecânicos. Alguns dos problemas que a análise de vibrações pode evidenciar são as falhas em rolamentos, desalinhamento de eixos, desbalanceamentos, defeitos em dentes de engrenagens, etc.

Os sinais captados da análise de vibrações em sistemas mecânicos são geralmente uma mistura de muitos sinais de várias fontes. Esses sinais afetam de diferentes maneiras os outros sinais captados seja na amplitude ou na frequência dos mesmos. Por isso é importante segregar os sinais advindos dos rolamentos dentre a mistura de sinais para a detecção de falhas rapidamente. (KURFESS *et al.*, 2016).

Bandes (2014) e Wright (2010) dizem que a análise de emissão acústica é um método para detectar falhas em equipamentos mecânicos e tais falhas podem ser defeitos em rolamentos, falta ou excesso de lubrificação e desgaste precoce de peças pela conversão do sinal de alta frequência emitido pela máquina em sinal de baixa frequência. Assim, agentes de manutenção podem detectar o som dos defeitos nos equipamentos.

Uma amostra do sinal emitido pela máquina em perfeito estado de funcionamento é registrada como referência, ao coletar os sinais em momentos de manutenção os operadores podem comparar os sinais e avaliar se há ou não defeitos na máquina ou em seus componentes.

A análise de óleo lubrificante refere-se à análise das propriedades do fluido, análise de contaminantes no fluido e análise de desgastes por detritos. Rosales (2006) afirma que

analisando as propriedades do fluído e os contaminantes, pode-se averiguar a qualidade do lubrificante indicando ou não a sua troca para evitar problemas mecânicos.

Moussa (2014) afirma que o monitoramento de sistemas mecânicos por meio da temperatura não é algo recente. Este método tem sido adotado para avaliar as condições operacionais de máquinas há algumas décadas. Apesar dos sensores de temperatura serem projetados seguindo princípios físicos semelhantes, eles diferem em termos de complexidade e precisão. A Termografia é um dos mais avançados métodos de monitoramento por temperatura. Sistemas tradicionais que monitoram o equilíbrio térmico estão presentes em muitas aplicações críticas como alimentos e medicamentos.

Dagneu (2012) cita que a Termografia é um método de monitoramento usado para avaliar as condições operacionais de uma máquina e seus componentes mecânicos aferindo a intensidade de radiação eletromagnética emitida sob forma de temperatura. A energia infravermelha emitida pelo objeto investigado é captada por um dispositivo, sem contato físico com o objeto, e convertida em sinal elétrico. Este sinal é processado e amplificado tornando-o visível no monitor de câmeras termográficas.

Tais sinais processados são chamados de termogramas e, segundo Alvares (2008), essas imagens térmicas permitem observar como a temperatura está distribuída em uma superfície. Este método é considerado uma forma de manutenção preditiva, onde a mesma pode ser realizada a qualquer momento com o objetivo de corrigir falhas notadas antecipadamente quando se observa a iminência da ocorrência de falha.

Como não há contato físico entre a câmera térmica e o objeto analisado, a Termografia fornece um processo de aferição e análise de dados com total segurança, pois este método evita a interferência no processo produtivo uma vez que o trabalho é feito com os equipamentos em funcionamento. (ALVARES, 2008).

## **2.3 INFORMAÇÕES SOBRE A CIÊNCIA DA RADIAÇÃO TÉRMICA: princípios básicos, estudo do corpo negro, superfícies cinza e emissividade**

### **2.3.1 PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA**

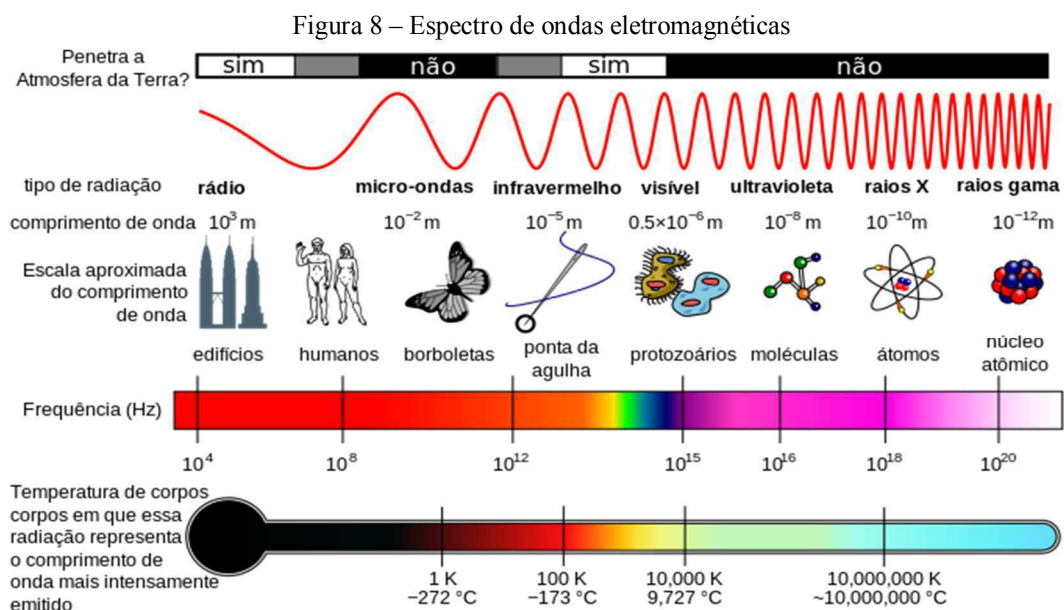
A radiação térmica é uma forma de energia eletromagnética que é emitida por todos os pontos de uma superfície plana e em todas as direções. A quantidade que descreve a magnitude da radiação emitida ou incidente numa direção específica do espaço é chamada de intensidade

de radiação. Poder emissivo, irradiação e radiosidade são considerados vários tipos de fluxos radiativos e são expressos em termos de intensidade. (CARAMALHO, 2012).

Çengel *et al.* (2015) afirmam que a radiação se difere da condução e da convecção pelo fato de não necessitar de um meio para que ela ocorra. A energia transferida por radiação é mais rápida que a energia transferida por outro meio de transferência de calor e no vácuo não sofre perdas.

As ondas eletromagnéticas transportam energia, no vácuo, à velocidade de  $c = 2,9979 \times 10^8$  m/s e são caracterizadas pela frequência  $\nu$  ou comprimento de onda  $\lambda$ . Onde o comprimento de onda  $\lambda$  é calculado como sendo a divisão da velocidade da luz  $c$  pela frequência  $\nu$ . Assim, nota-se que a frequência e o comprimento de onda são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior o comprimento de onda da energia eletromagnética irradiada, menor será a sua frequência e vice-versa.

Lienhard (2017) cita que apesar das ondas eletromagnéticas possuírem, geralmente, as mesmas características, seu comportamento muda substancialmente de acordo com o comprimento de onda. As ondas eletromagnéticas concentram-se em uma ampla faixa espectral que vai desde os raios cósmicos ( $10^{-10}$   $\mu\text{m}$ ) até as ondas de energia elétrica ( $10^{10}$   $\mu\text{m}$ ) passando pelos raios gama, raio X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, radiação térmica, micro-ondas e ondas de rádio. Na Fig. 8 nota-se o espectro das ondas eletromagnéticas.



Fonte – Google Imagens (2017)

No tocante à transferência de calor, o interesse fixa-se na radiação térmica que é emitida continuamente pelos objetos cujas temperaturas estejam acima do zero absoluto. Ainda segundo Çengel *et al.* (2015), a radiação térmica inclui toda a faixa visível e infravermelha até a radiação ultravioleta. A parte visível da radiação térmica encontra-se na faixa de 0,40  $\mu\text{m}$  a 0,76  $\mu\text{m}$  e não há diferença entre as outras radiações eletromagnéticas exceto que nesta faixa do espectro o olho humano é sensibilizado por ela. Por isso, chama-se luz visível.

A radiação solar é a energia eletromagnética emitida pelo sol e a maior parte dela encontra-se na faixa de comprimento de onda de 0,3  $\mu\text{m}$  a 3,0  $\mu\text{m}$ , ainda que metade desta radiação visível e partes concentram-se nas regiões infravermelha e ultravioleta.

De maneira geral, pode-se dividir por faixas de comprimento de onda de acordo com a Tab. 1 abaixo. A faixa inicia com a radiação ultravioleta-C, passando por ultravioleta B e A, então passa-se pela faixa visível e termina nas faixas de infravermelho A, B e C, respectivamente.

Tabela 1 – Espectro de ondas eletromagnéticas

<b>Nome</b>	<b>Faixa espectral</b>
UV-C	0,100 $\mu\text{m}$ – 0,280 $\mu\text{m}$
UV-B	0,280 $\mu\text{m}$ – 0,315 $\mu\text{m}$
UV-A	0,315 $\mu\text{m}$ – 0,400 $\mu\text{m}$
VISÍVEL	Aproximadamente 0,360 – 0,400 $\mu\text{m}$ a 0,760 -0,800 $\mu\text{m}$
IR-A	0,780 $\mu\text{m}$ – 1,400 $\mu\text{m}$
IR-B	1,400 $\mu\text{m}$ – 3,000 $\mu\text{m}$
IR-C	3,000 $\mu\text{m}$ – 1000,000 $\mu\text{m}$

Fonte – Adaptado de Caramalho (2012)

Cabe destacar que os limites de cada faixa de comprimento de onda não são rígidos, ou seja, há uma sobreposição dos limites. Por exemplo, o limite superior da faixa do infravermelho-A adentra um pouco no limite inferior do infravermelho-B e vice-versa. Porém, essa sobreposição não gera problemas nas análises e estudos efetuados.

Ainda na faixa do infravermelho-A existem subdivisões que são nomeadas de infravermelho-próximo (0,75  $\mu\text{m}$  a 3,0  $\mu\text{m}$ ), infravermelho-médio (3,0  $\mu\text{m}$  a 6,0  $\mu\text{m}$ ), infravermelho-distante (6,0  $\mu\text{m}$  a 15,0  $\mu\text{m}$ ), infravermelho-distante-extremo (15,0  $\mu\text{m}$  a 1.000  $\mu\text{m}$ ). Há também as respectivas faixas de frequência das faixas espectrais conforme nota-se na Tab. 2.



Tabela 2 – Valores de frequências para bandas espectrais

Muito Baixa Frequência		< 30 KHZ
Baixa Frequência		30 KHZ – 650 KHZ
Média Frequência		650 KHZ – 1700 KHZ
Onda Curta		1,7 MHZ – 30 MHZ
Muito Alta Frequência		30 MHZ – 300 MHZ
Ultra Alta Frequência		300 MHZ – 3000 MHZ
Micro Ondas		3 GHZ – 300 GHZ
	FIR* (Distante do Infravermelho)	300 GHZ – 6 THZ
INFRAVERMELHOS	MIR** (Infravermelho médio)	6 THZ – 120 THZ
	NIR*** (Próximo do infravermelho)	120 THZ – 384 THZ
Luz Visível		384 THZ – 789 THZ
Ultra Violeta		789 THZ – 30 PHZ
Raios X		30 PHZ – 30 EHZ
		> 30 EHZ

\**Far Infrared*

\*\**Medium Infrared*

\*\*\**Near Infrared*

Fonte – Adaptado de Chrzanowski (2001)

Sabendo-se que há uma base física que fornece condições para a análise e que a emissão e recepção de energia radiante dos objetos estão relacionadas à forma da superfície, orientação entre as superfícies, distâncias e suas áreas, Chrzanowski (2001) expõe conceitos referentes à transferência de calor por radiação térmica, a saber: irradiância, emitância, radiância, intensidade de radiação e fluxo radiante.

Irradiância representa a quantidade de potência radiante que incide sobre uma superfície, real ou imaginária, por unidade de área e sua unidade de medida é  $W/m^2$ .

Emitância radiante é o fluxo radiante por unidade de área em uma superfície especificada que está deixando a mesma e sua unidade de medida é  $W/m^2$ .

Radiância descreve a potência radiante emitida ou refletida por unidade de ângulo sólido e por unidade de área da superfície emissora ou refletora projetada na direção do ângulo sólido. Sua unidade de medida é  $W/(m^2.Sr)$  e pode ser definido matematicamente como:

$$L = \frac{d^2 \Phi}{dA d\omega} = \frac{d^2 \Phi}{d\omega dA_0 \cos\theta} \quad (1)$$

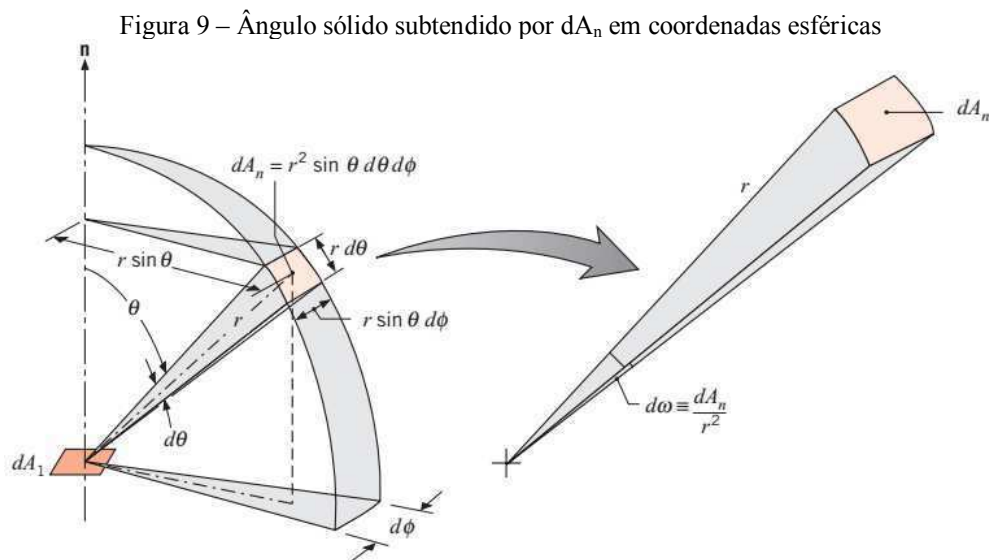
Onde  $dA = dA_0 \cos\theta$  é a área projetada ( $m^2$ ) e  $\theta$  é o ângulo entre a direção do fluxo de radiação e a normal à superfície no ponto específico (rad).

Intensidade de radiação é a densidade de ângulo sólido do fluxo radiante por unidade de ângulo sólido incidente, passando ou saindo de um ponto no espaço e se propagando em uma direção especificada. Sua unidade de medida é W/Sr e pode ser definida matematicamente como:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (2)$$

Onde  $d\Phi$  é o elemento infinitesimal de fluxo incidente ou emergente de um ponto dentro do elemento  $d\omega$  de ângulo sólido em uma direção especificada.

Segundo Incropera *et al.* (2011), o ângulo sólido, dado por  $d\omega = dA_n/r^2$  (Sr), subtendido por  $dA_n$  em um ponto  $dA_1$  em um sistema de coordenadas esféricas é apresentado na Fig. 9. Este parâmetro é definido no espaço 3D, mas é análogo a um ângulo plano. O ângulo plano é a proporção do comprimento do arco para a distância do ápice para a base, enquanto o ângulo sólido é a proporção de uma área projetada para o quadrado do comprimento da corda do ápice para a área.

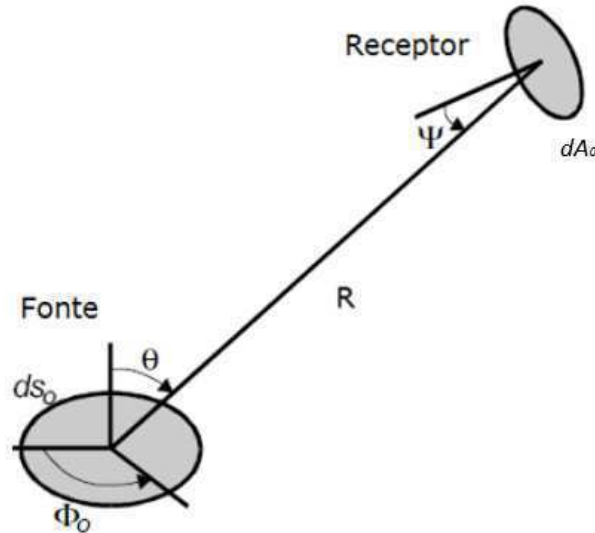


Fonte – Incropera *et al.* (2012)

Fluxo radiante é o fluxo de energia radiante emitida, transferida ou recebida por uma superfície ou região do espaço e sua unidade de medida é W.

Em transferência de calor por radiação, a configuração geométrica mais comum de uma fonte de área  $S_0$  para um receptor de área  $A_0$  está disposta na Fig. 10.

Figura 90 – Geometria geral para transferência de calor por radiação



Fonte – Chrzanowski (2001)

O fluxo total recebido pela área  $A_0$  pode ser determinado por:

$$\Phi = \int_{S_0} \int_{A_0} L \frac{dS_0 \cos\theta dA_0 \cos\psi}{R^2} \quad (3)$$

Onde  $\Phi$  é o fluxo total recebido pela área  $A_0$ ,  $\theta$  é o ângulo entre a direção do fluxo que chega à área receptora e o vetor normal à superfície emissora,  $dS_0$  é o elemento infinitesimal de área da superfície emissora,  $dA_0$  é o elemento infinitesimal de área da superfície receptora,  $\psi$  é o ângulo entre o vetor normal à superfície receptora e a direção do fluxo,  $R$  é a distância entre um elemento infinitesimal da superfície emissora e um elemento infinitesimal da superfície receptora.

O comprimento de onda pode incorrer na variação da potência recebida ou emitida por uma superfície. Por isso, os valores totais de radiação térmica estão associados à integração das contribuições espectrais e direcionais da mesma. (SILVA JÚNIOR, 2017).

Sabendo-se que a radiação infravermelha é a energia emitida por uma superfície cuja temperatura encontra-se acima do zero absoluto e que essa radiação depende da temperatura do objeto emissor, Holman (2010), Incropera *et al.* (2011), Usamentiaga *et al.* (2014), Çengel (2015) e Lienhard (2017) afirmam e concordam que há três meios pelos quais a energia

incidente em um objeto pode ser dissipada, a saber: absorção, transmissão e reflexão. Cada meio desses tem uma representatividade na energia total radiante e os três modos associados são absortividade, transmissividade e refletividade do objeto.

Com isso há três parâmetros que descrevem esses fenômenos: absorptância  $\alpha_\lambda$ , que é a porção da potência radiante absorvida pelo objeto, reflectância  $\rho_\lambda$ , que é a porção da potência radiante refletida pelo objeto e transmitância  $\tau_\lambda$ , que é a porção da potência radiante transmitida pelo objeto. Todos os parâmetros são dependentes do comprimento de onda e a sua soma é 1. A Equação 4 representa esta relação matemática:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4)$$

No caso de objetos opacos, a Equação 4 reduz-se à Equação 5, onde denota-se que toda energia incidente é também absorvida ou refletida e, pode-se ainda afirmar que a energia incidente que não é absorvida, é refletida.

$$\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda \quad (5)$$

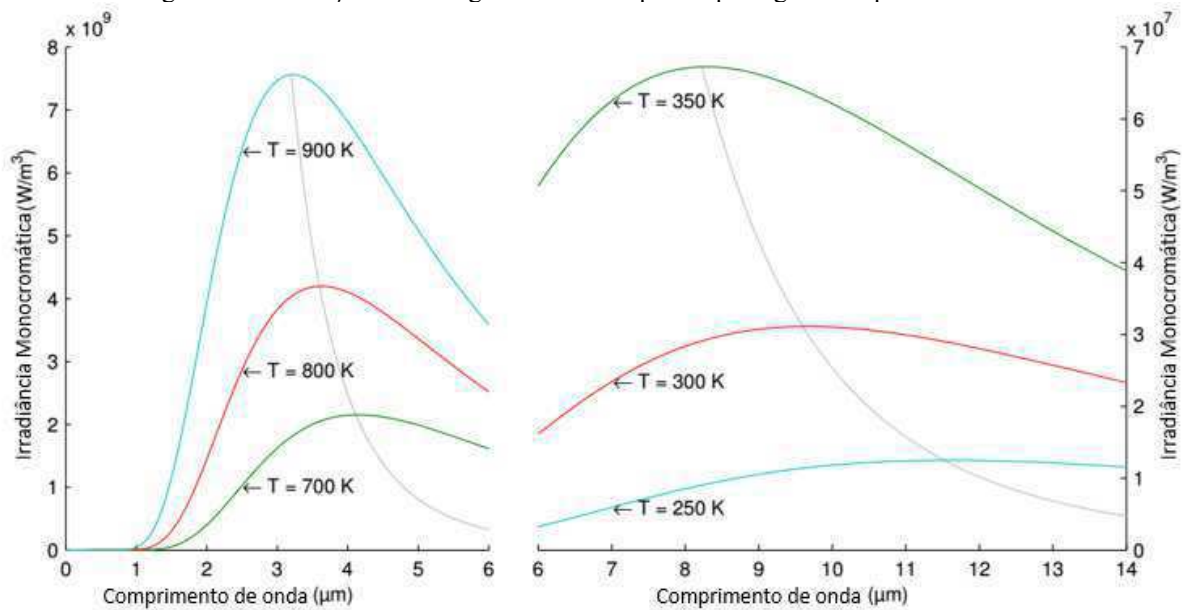
Os corpos negros são objetos em que seus materiais possuem refletividade e transmissividade nulas. Assim, toda a energia incidente na superfície do objeto é absorvida pelo mesmo, ou seja,  $\alpha_\lambda = 1$ .

Incropera *et al.* (2011) e Usamentiaga *et al.* (2014) afirmam que a radiação eletromagnética emitida por um corpo negro ( $W_{\lambda b}$ ) pode ser calculada fazendo-se uso da lei de Planck como mostra-se na Eq. 6 onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $T$  é a temperatura. O resultado da lei de Planck é a potência emitida por unidade de área por unidade de comprimento de onda [ $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ].

$$W_{\lambda b} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (6)$$

Na Figura 11 nota-se a distribuição da radiação eletromagnética emitida por um corpo negro em diferentes temperaturas. A curva expõe a quantidade de energia irradiada em cada comprimento de onda, destacando-se que os pontos máximos das curvas para os objetos de maiores temperaturas são bem maiores que nas curvas dos objetos mais frios. Ademais, percebe-se uma relação inversa entre a temperatura e o comprimento de onda do pico da emissão.

Figura 11 – Radiação eletromagnética emitida por corpo negro em equilíbrio térmico



Fonte – Usamentiaga *et al.* (2014)

O comprimento de onda no qual a radiação eletromagnética é emitida depende da temperatura do objeto, ou seja, quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda. Com isso, a distribuição é semelhante, mas o comprimento de onda é deslocado. O maior valor do comprimento de onda para uma temperatura específica pode ser calculado usando a Lei de Wien como exposto na Eq. 7. Esta equação é obtida pela diferenciação da Lei de Planck com relação ao comprimento de onda  $\lambda$  e achando o máximo valor para a intensidade da radiação.

$$\lambda_{\text{máximo}} = \frac{0,0029}{T} \quad (7)$$

Para obter a intensidade total da radiação de um corpo negro, deve-se integrar a equação da Lei de Planck com relação ao comprimento de onda variando de zero a infinito. Assim, obtém-se Eq. 8 que é nominada equação de Stefan-Boltzmann e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

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

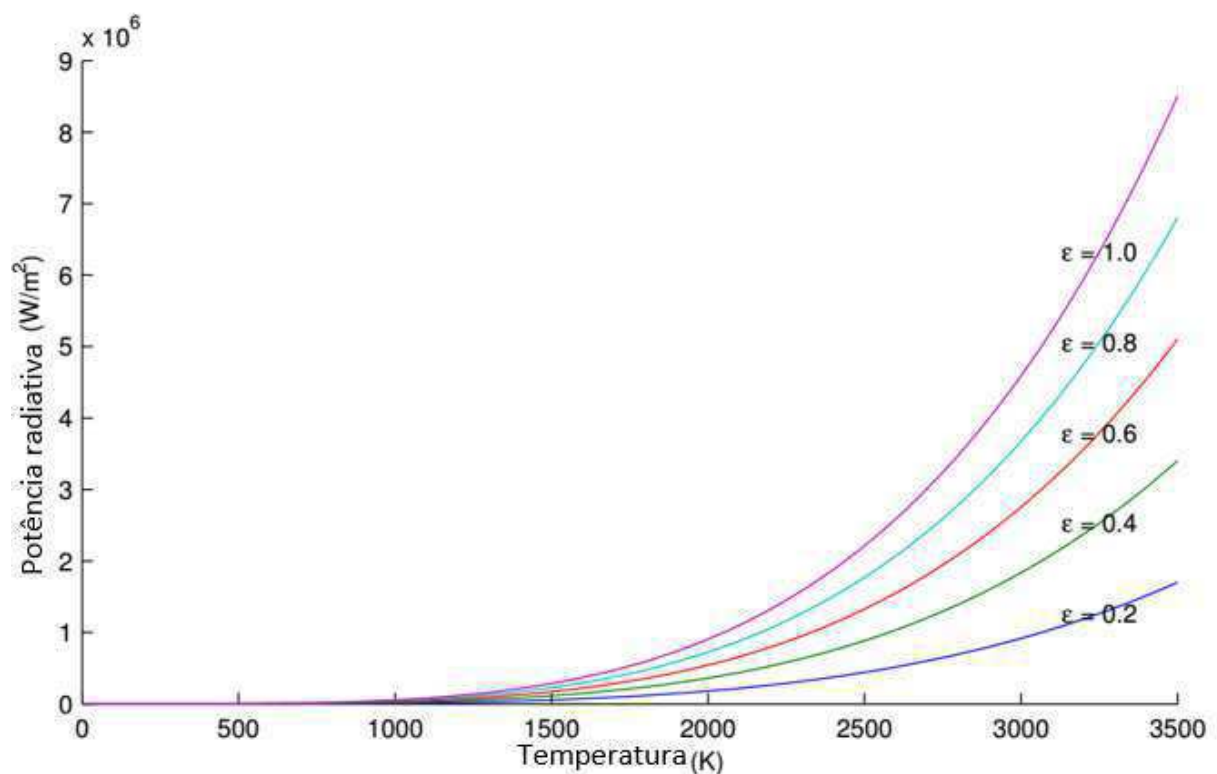
A emissividade de um corpo é definida formalmente para um comprimento de onda como sendo a razão entre a energia radiante emitida pelo corpo e a energia radiante emitida por um corpo negro, ambos à mesma temperatura. Um corpo real emite apenas uma fração da energia emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Em sendo a emissividade constante e independente do comprimento de onda, então se chama este corpo de corpo cinza.

Assim, a equação de Stefan-Boltzmann para corpo cinza incorpora a emissividade e pode ser observada na Eq. 9.

$$E_b = \epsilon \sigma T^4 \quad (9)$$

Na Figura 12 pode-se notar a potência irradiada pelo corpo cinza com diferentes emissividades.

Figura 12 – Potência radiativa pelo corpo cinza com diferentes emissividades



Fonte – Usamentiaga *et al.* (2014)

Usamentiaga *et al.* (2014) afirmam que se toda energia radiante incidente em um objeto for absorvida, a absorvidade é 1 e quando em equilíbrio térmico, toda energia absorvida deve ser emitida. Assim, a emissividade deste objeto seria 1. Portanto, a absorvidade em um corpo negro é igual à emissividade. De maneira geral, de acordo com a Lei de Kirchhof a emissividade e absorvidade de qualquer material são iguais à mesma temperatura e comprimento de onda e, pode ser observado na Eq. 10:

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (10)$$

Para materiais opacos, tem-se a Equação 11:

$$\rho_{\lambda} = 1 - \varepsilon_{\lambda} \quad (11)$$

Corpos cinzas emitem apenas uma fração da energia térmica emitida por um equivalente corpo negro. Assim, a emissividade nos corpos cinzas é sempre menor que 1 e a refletividade é sempre maior que 0.

### 2.3.2 AFERIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Uma das propriedades físicas mais aferidas é a temperatura e sua medição fornece informações sobre a energia interna de um objeto. Por isso, seu controle é tão importante em muitos processos industriais.

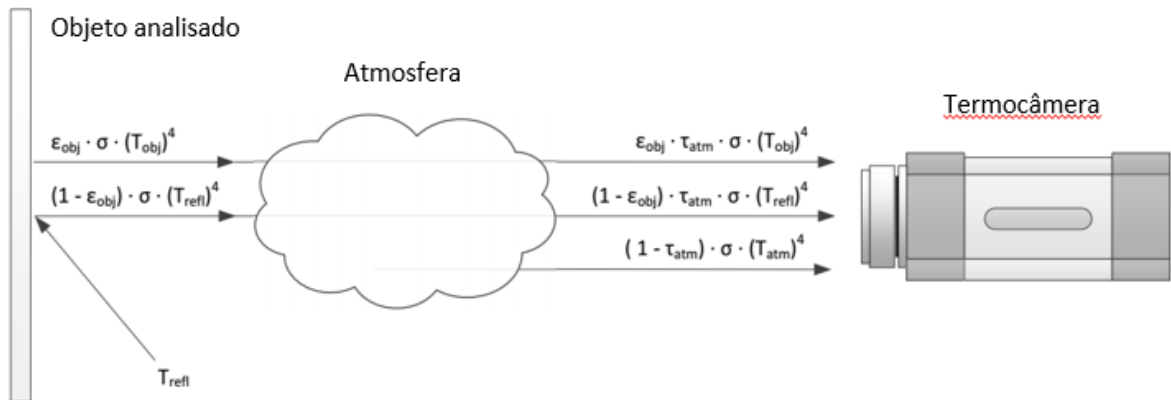
Azad e Ramji (2011) dizem que utilizando câmeras termográficas, pode-se observar o atrito que é produzido em sistemas mecânicos. No caso de sistemas de acionamento mecânico, problemas em rolamentos podem ser identificados de maneira rápida e fácil à medida que as falhas aparecem em componentes do rolamento ou há ausência ou excesso de lubrificação. As cargas radiais e/ou axial impostas ao rolamento também produzem calor facilitando a análise dos mesmos sob a ótica da Termografia antevendo falhas e colapsos.

Quando se afere a temperatura utilizando a Termografia, na verdade mede-se a radiação infravermelha emitida pelo objeto e converte-se essa energia detectada em valor de temperatura. Entretanto, nem toda a radiação recebida vem do objeto analisado e para aferir com precisão é necessário identificar e compensar a energia radiante de outras fontes de temperatura que estão próximas do objeto analisado.

A radiação total recebida pela câmera termográfica ( $W_{tot}$ ) origina-se em três fontes, a saber: a emissão do objeto analisado ( $E_{obj}$ ), a emissão da vizinhança e refletida pelo objeto ( $E_{refl}$ ) e a emissão da atmosfera ( $E_{atm}$ ). Esta energia total pode ser observada matematicamente na Eq. 12 e o processo de captura da energia pode ser observado na Fig. 13.

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} \quad (12)$$

Figura 13 – Radiação recebida pela termovisor



Fonte – Usamentiaga *et al.* (2014)

A primeira fonte de emissão é o objeto analisado. Entretanto, nem toda radiação emitida pelo objeto analisado é percebida pela termovisor pelo fato de uma parte desta emissão ser absorvida pela atmosfera. Assim, a emissão do objeto analisado pode ser expressa matematicamente pela Eq. 13.

$$E_{obj} = \varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4 \quad (13)$$

Sabe-se que corpos cinzas possuem refletividade maior que 0. Assim, eles refletem a radiação infravermelha emitida pela vizinhança e a refletividade pode ser calculada a partir da emissividade. Uma porção da radiação refletida é também absorvida pela atmosfera e esse é o segundo componente recebido pela termovisor e pode ser observado matematicamente pela Eq. 14.

$$E_{refl} = \rho_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 = (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 \quad (14)$$

O último componente é a emissão da radiação infravermelha pela atmosfera e pode ser observada na Eq. 15 onde  $(1 - \tau_{atm})$  é a emitância da atmosfera.

$$E_{refl} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 = (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 \quad (15)$$

Após substituições entre equações consegue-se a Eq. 16. Portanto, a temperatura do objeto analisado pode ser calculada pela Eq. 17 que serve de base para diferentes fabricantes de termovisores para obtenção de temperaturas.



$$W_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{obj}} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{atm}})^4 + (1 - \varepsilon_{\text{obj}}) \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{refl}})^4 + (1 - \tau_{\text{atm}}) \cdot \sigma \cdot (T_{\text{atm}})^4 \quad (16)$$

$$T_{\text{obj}} = \sqrt[4]{\frac{W_{\text{tot}} - (1 - \varepsilon_{\text{obj}}) \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{refl}})^4 - (1 - \tau_{\text{atm}}) \cdot \sigma \cdot (T_{\text{atm}})^4}{\varepsilon_{\text{obj}} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \sigma}} \quad (17)$$

Para encontrar a temperatura do objeto analisado, deve-se fornecer à Equação 17 os seguintes parâmetros: emissividade do objeto ( $\varepsilon_{\text{obj}}$ ), temperatura refletida ( $T_{\text{refl}}$ ), transmitância da atmosfera ( $\tau_{\text{atm}}$ ) e a temperatura da atmosfera ( $T_{\text{atm}}$ ).

A transmitância da atmosfera geralmente é estimada utilizando a distância entre o objeto analisado e a câmera e a umidade relativa e, geralmente este valor aproxima-se de 1. A emissividade do objeto analisado e a temperatura refletida possuem muita importância e influência na aferição da temperatura e devem ser medidos com bastante precisão.

A escrita de calor tem envolvimento com atrito. Quanto maior o atrito, maior o calor gerado. Nos experimentos são feitas análises qualitativas e quantitativas. A primeira consiste na comparação das paletas de cores dos objetos analisado nos termogramas com emissividade ajustada no valor de 0,95.

Ainda na análise qualitativa, se houver diferença na paleta de cores, pode-se afirmar que há uma anomalia e neste caso demanda uma análise quantitativa. Neste ponto devem-se observar cuidados com as variáveis envolvidas no processo, e na análise quantitativa são feitos ajustes na termovisor com dados sobre emissividade, temperatura refletida, temperatura ambiente e umidade relativa do ar.

Com isso, o trabalho que se presta neste momento é levar em consideração esses pontos e analisar a situação de um rolamento autocompensador com falhas inseridas nas pistas interna e externa para averiguar se essas falhas geram calor suficiente para a detecção; num primeiro momento de forma qualitativa e num segundo momento de forma quantitativa.

### 2.3.3 EMISSIVIDADE E TEMPERATURA REFLETIDA

A emissividade é o mais importante parâmetro para a aferição de temperatura utilizando a Termografia. Este parâmetro indica a quantidade de radiação emitida por um objeto quando comparado a um corpo negro à mesma temperatura. Assim, objetos com baixa emissividade emitem menos radiação infravermelha que objetos com alta emissividade à mesma temperatura.

Aferir precisamente a emissividade é muito importante em objetos com baixa emissividade. Em objetos com alta emissividade, pequenas variações no valor escolhido de

emissividade acarretam apenas pequenas variações na temperatura aferida. Porém, em objetos com baixa emissividade, como aço polido ou alumínio, a temperatura aferida torna-se mais difícil pelo fato de pequenas variações na emissividade leva a grandes variações de temperatura.

No caso específico desta pesquisa, foi utilizada emissividade com valor igual a 0,98 pelo fato dos mancais e rolamentos analisados terem sido pintados com tinta *spray* fosca na cor preta e tal emissividade foi fornecida pelo fabricante da mesma. Na Tab. 3 pode-se notar a emissividade de alguns materiais.

Tabela 3 – Emissividade de alguns materiais

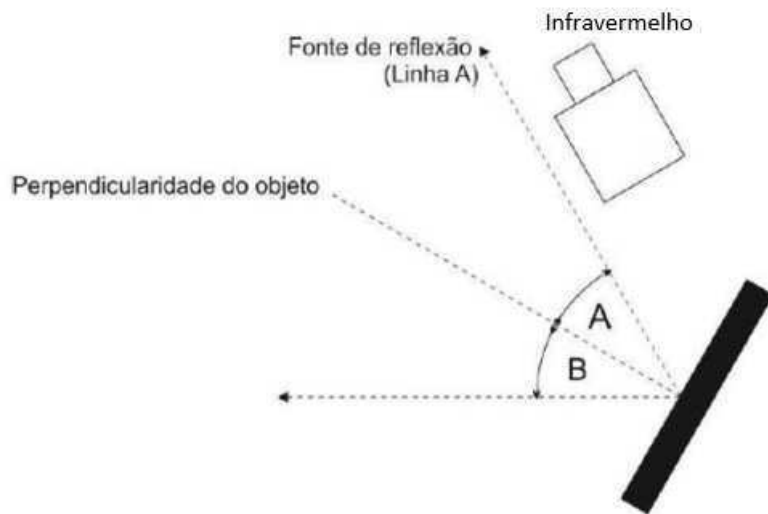
<b>Material</b>	<b>Emissividade (1 <math>\mu\text{m}</math>)</b>
Ferro e aço	0,35
Oxidado	0,85
Alumínio	0,13
Oxidado	0,40
Cobre	0,06
Oxidado	0,80
Tijolo	0,80
Asfalto	0,85
Amianto	0,90

Fonte – Adaptado de Infratemp (2014)

Silva Júnior (2017) cita que também fica clara a influência da radiação advinda das vizinhanças, proporcional às temperaturas das superfícies próximas, também conhecida como temperatura refletida. De acordo com a NBR 16.292 (2014), que trata da medição e compensação da temperatura refletida utilizando-se termovisor, há dois métodos para estimação desta influência, a saber: método direto e método refletor.

O método direto assume que o ambiente ao redor funciona com um corpo negro com emissividade igual a 1, irradiando o objeto de interesse. Neste caso, ajusta-se a emissividade da termovisor para o valor 1 e posiciona a mesma em sentido contrário ao objeto de interesse na mesma direção e ângulo da fonte de reflexão, conforme a Fig. 14. Com isso, faz-se o registro da temperatura.

Figura 14 – Método direto

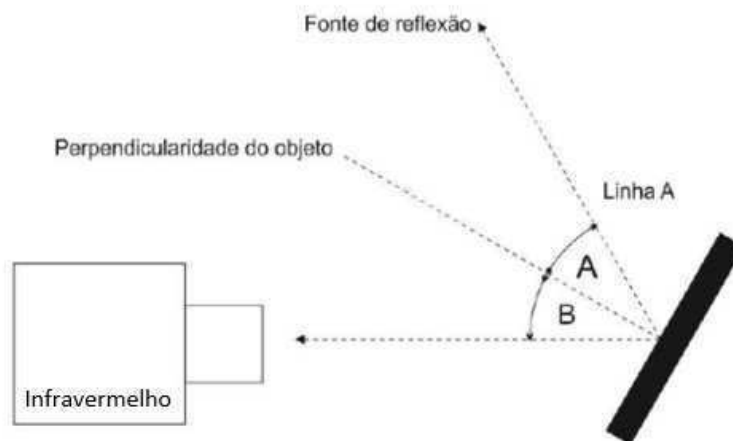


Fonte – NBR 16.292 (2014)

No método refletor, primeiramente posiciona-se o termovisor do mesmo modo que ela deve ser posicionada para medição da temperatura do objeto, ajustando-se o seu foco e a emissividade para o valor 1. Então, coloca-se um refletor, folha de papel alumínio amassado, em frente ao objeto, conforme Fig 15. A temperatura registrada é a temperatura refletida e este procedimento deve ser repetido no mínimo por três vezes para obter a média dos valores.

O método utilizado nesta pesquisa é o método refletor. Seguiram-se as instruções de aferição da temperatura refletida registrando em termogramas e analisando as mesmas no *software FLIR Tools* do fabricante do termovisor.

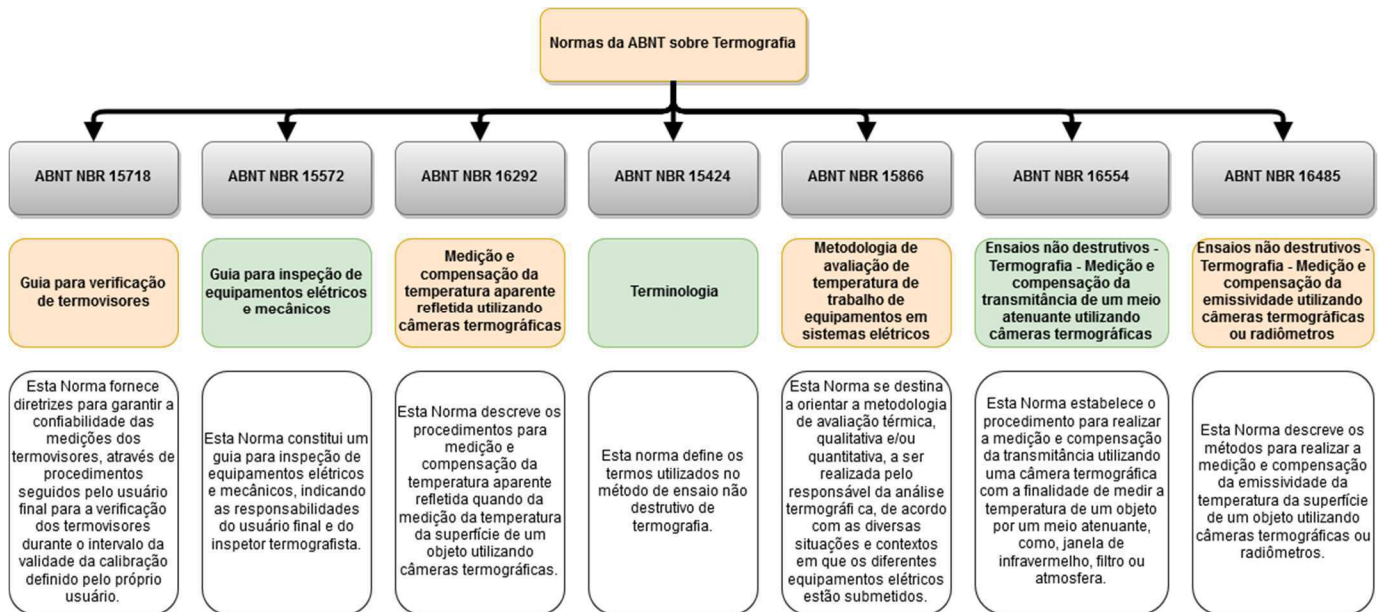
Figura 15 – Método refletor



Fonte – NBR 16.292 (2014)

Há também na literatura técnica outras normas brasileiras associadas ao manuseio e uso da Termografia. Tais normas podem ser observadas na Fig. 16.

Figura 16 – Normas brasileiras sobre Termografia



Fonte – Adaptado do LEEST/UAEM/CCT/UFCG (2016)

## 2.4 INFORMAÇÕES SOBRE A TERMOGRAFIA

### 2.4.1 ESTUDOS SOBRE USO TERMOGRAFIA PARA DETECÇÃO DE FALHAS

Kim *et al.* (2012), em um experimento, fizeram uso da Termografia para avaliar e monitorar máquina rotativa sob condições de cargas dinâmicas. Foram utilizados rolamentos de esferas submetidos a falhas por abrasão nas pistas externas e submetidos a carga radial. Na Fig. 17 podem-se observar as falhas por abrasão efetuadas nas pistas externas dos rolamentos.

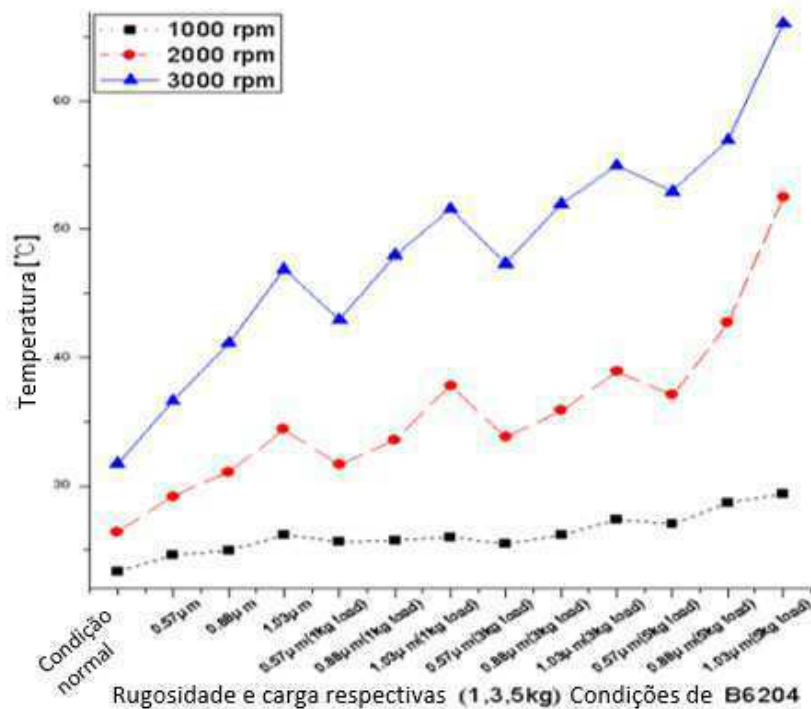
Figura 17 – Falhas por abrasão em pistas externas



Fonte – Kim *et al.* (2012)

Nesse estudo, os rolamentos foram submetidos a cargas radiais e velocidades variadas. Como resultado, na Fig. 18 pode-se notar o comportamento da temperatura máxima nos rolamentos quando em equilíbrio térmico de acordo com a carga e velocidade de rotação. Segundo os pesquisadores, quando o material possui defeitos, neste caso porosidades em sua estrutura, a condutividade térmica diminui e a difusividade térmica é alterada. Assim, a condução térmica através do material é afetada negativamente.

Figura 18 – Curva de temperatura máxima em rolamentos com falhas



Fonte – KIM et al (2012)

Com isso, eles confirmaram que a Termografia pode ser utilizada como método de monitoramento e detecção de falhas em rolamentos quando avaliada, quantitativamente e qualitativamente, a temperatura do mesmo relativamente às suas falhas.

Nunez *et al.* (2016) conduziu o experimento utilizando a Termografia como ferramenta para avaliar falhas em rolamentos de motores de indução. Foi feita perfuração de 1,2 mm na pista externa do rolamento do motor e compararam-se as temperaturas do rolamento com falha e rolamento sem falha submetida a níveis diferentes de carga. Na Fig. 19 pode ser observado o rolamento com falha perfurante e rolamento de referência.

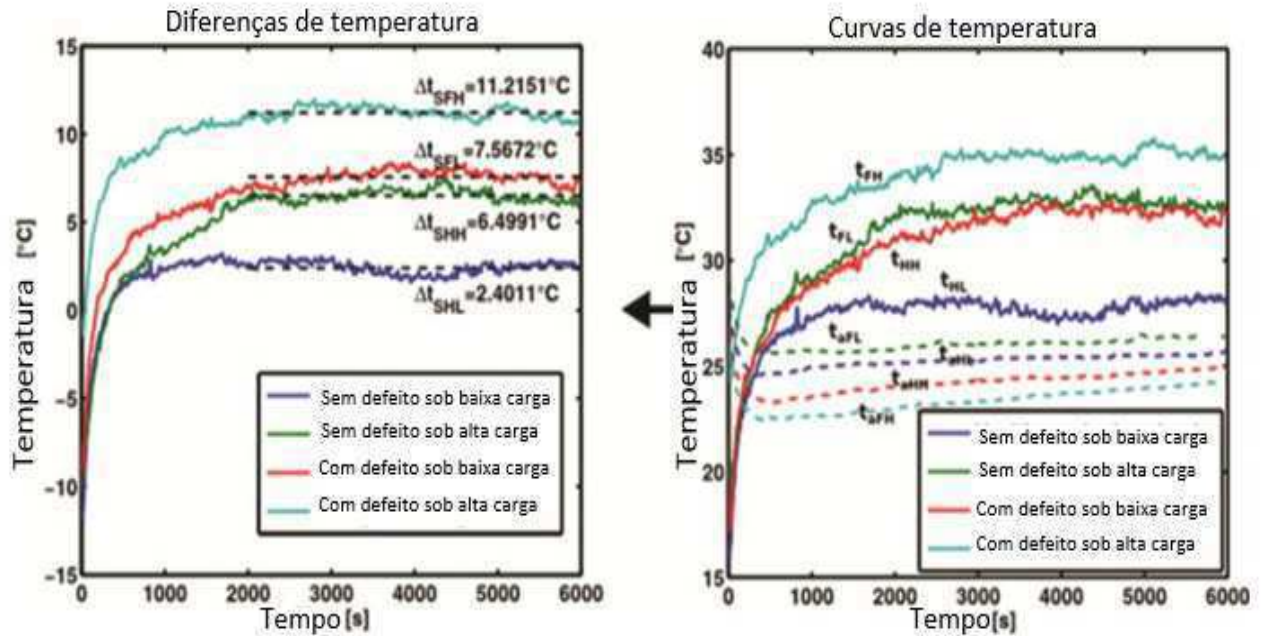


Fonte – Nunez *et al.* (2016)

Também, nessa pesquisa os rolamentos foram submetidos a cargas diferentes e como resultado pode-se observar que na Fig. 20, lado direito, notam-se as curvas de temperatura dos rolamentos com falha e de referência e, as temperaturas ambientes quando do experimento.

Já no lado esquerdo da Figura 20, nota-se o gradiente de temperatura entre a aferição e sua respectiva temperatura ambiente, demonstrando que o rolamento com falha e submetido a carga maior gera mais calor que os demais rolamentos e em condições mais amenas.

Figura 20 – Curva de temperatura máxima em rolamentos com falhas e referência



Fonte – Nunez *et al.* (2016)

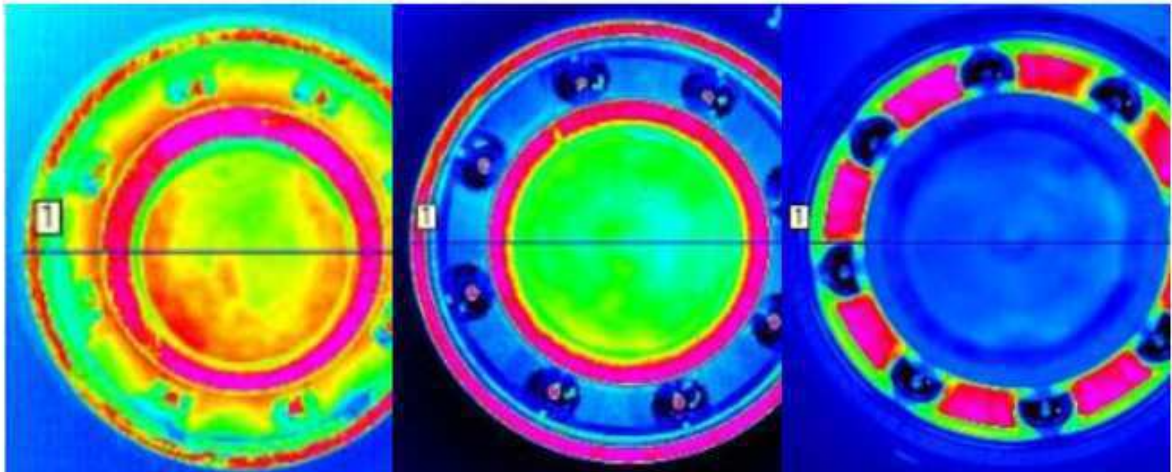
Como conclusão, Nunez *et al.* (2016), cita que fazendo uso da diferença de temperatura ambiente e a temperatura do rolamento com falha e em equilíbrio térmico é possível utilizar a Termografia para avaliar falhas em rolamentos e indicam que gradientes de temperatura maiores que  $5^\circ\text{C}$  já sugerem anomalia que merece investigação pelo setor de manutenção.

Seo *et al.* (2012) conduziram pesquisa fazendo uso de Termografia como ferramenta para avaliar falhas em rolamentos de esferas. O cenário do experimento consistiu-se em três situações de análise: rolamento normal, rolamento com pouca lubrificação e rolamento com dano em suas pistas.

Os testes foram feitos com variações de velocidades do motor e na Figura 21 pode-se observar os termogramas dos rolamentos normal, pouca lubrificação e falha, respectivamente à rotação de 1.000 rpm.



Figura 21 – Termogramas de rolamentos normal, baixa lubrificação e falha, respectivamente

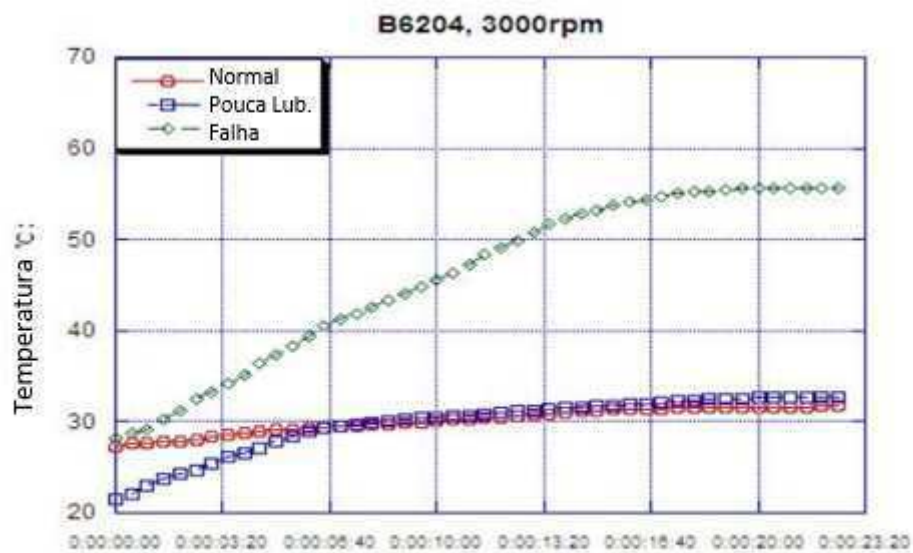


(a) B6204 1,000rpm normal (b) B6204 1,000rpm Pouca lubrificação (c) B6204 1,000rpm Falha

Fonte – Seo *et al.* (2012)

Na Figura 22 pode-se notar o comportamento das temperaturas nos rolamentos após equilíbrio térmico e relativo à condição operacional dos mesmos.

Figura 22 – Curva de temperaturas dos rolamentos nos cenários analisados



(c) B6204 3,000rpm

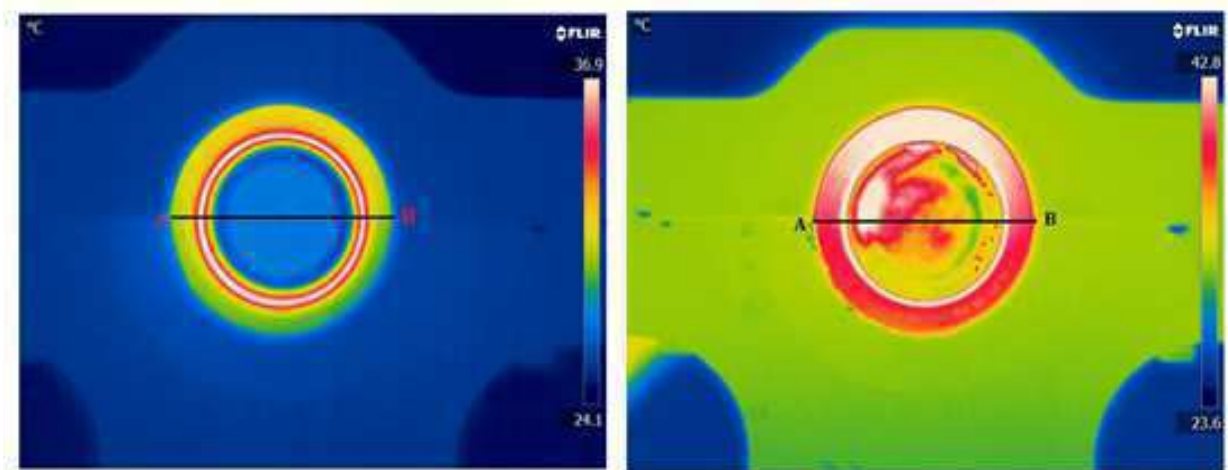
Fonte – Seo *et al.* (2012)



Com isso, Seo *et al.* (2012) confirmaram que a Termografia pode ser utilizada como ferramenta no auxílio à detecção de falhas, entretanto, no estudo foi possível saber que havia dano ao rolamento, mas que houve dificuldade em determinar a região exata da falha.

Ranjit *et al.* (2014) fizeram experimento com rolamentos em condição normal e inserção de pó de ferro como falha. Os mesmos foram submetidos a cargas radiais e diferentes velocidades de rotação. Na Fig. 23 notam-se termogramas de rolamento normal e com falha, respectivamente. Os termogramas foram obtidos quando do equilíbrio térmico aos 30 minutos de teste.

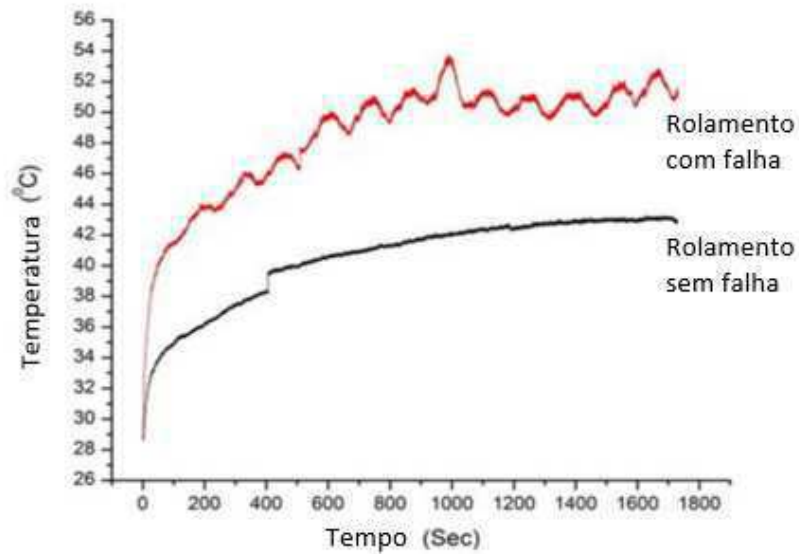
Figura 23 – Termogramas de rolamentos normal e com falha de pó de ferro



Fonte – Ranjit *et al.* (2014)

Na Figura 24 pode-se notar o comportamento das temperaturas nos rolamentos após equilíbrio térmico e relativo à condição operacional dos mesmos. Em cor vermelha apresenta-se a curva do rolamento com falha de pó de ferro. Em cor preta apresenta-se a curva de temperatura do rolamento normal.

Figura 24 – Curva de temperaturas dos rolamentos normal e com falha



Fonte – Ranjit *et al.* (2014)

Ranjit *et al.* (2014) concluem o estudo expondo que a presença de pó de ferro como falha nos rolamentos e submetidos a diferentes níveis de carga e velocidades de rotação concorrem para o aparecimento de vibrações mecânicas que se transformam em energia em forma de calor causando aquecimento anormal do sistema em estudo.

Em pesquisa conduzida por Hong *et al.* (2013) utilizaram Termografia e análise acústica no monitoramento de rolamentos com falhas nas pistas externas, esferas de contato, perda de lubrificação e, submetidos a carga radial e diferentes velocidades de rotação.

Na Figura 25 podem-se observar as falhas nas pistas externas, esferas de contato e, carga radial de 5 kg.

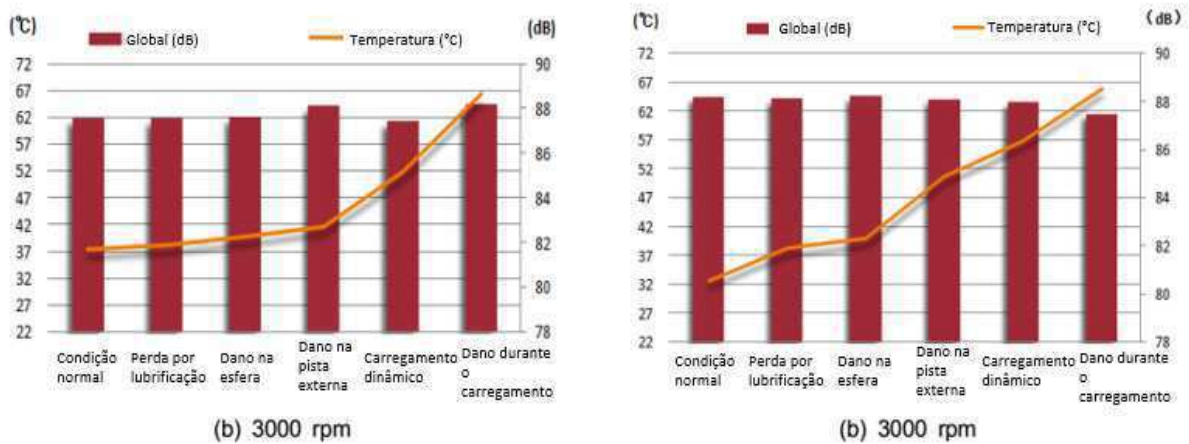
Figura 25 – Falhas dos rolamentos e carga radial



Fonte – Hong *et al.* (2013)

Na Figura 26 pode-se notar o comportamento das temperaturas nos rolamentos após equilíbrio térmico e relativo à condição operacional dos mesmos. Nota-se que a temperatura atingiu maior valor na pista externa do rolamento B6204.

Figura 26 – Curva de temperaturas dos rolamentos B6304 e B6204 a 3.000rpm

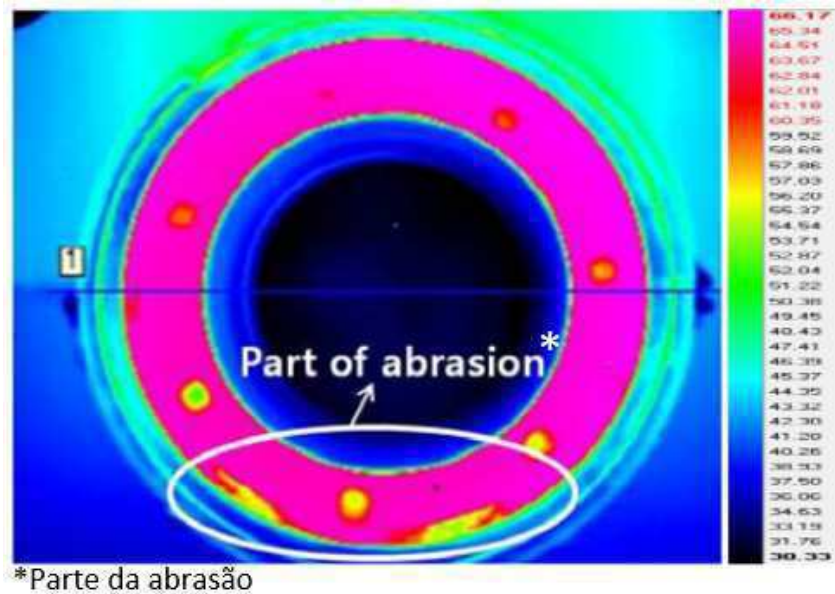


Fonte – Hong *et al.* (2013)

Como resultado, Hong *et al.* (2013) afirmam que foi possível detectar, por meio da Termografia, as falhas nos rolamentos submetidos à carga radial e variação de velocidade de rotação.

Em um outro estudo conduzido por Kim *et al.* (2011), foi utilizada a Termografia para analisar falhas em rolamentos por meio de abrasão, mas desta feita no intervalo de tempo de 7 minutos a partir do início da rotação do motor e não mais quando do atingimento do equilíbrio térmico do sistema. Os rolamentos foram submetidos a quatro cenários de cargas radiais e três cenários de velocidades de rotação. Na Fig. 27 é notado o termograma de um rolamento com falha.

Figura 27 – Termograma de rolamento com falha



\*Parte da abrasão

Fonte – Kim *et al.* (2011)

Na Tabela 4 podem-se notar os valores de temperaturas de acordo com a variação de carga radial e a velocidade de rotação. As medições foram efetuadas aos 1, 3 e 7 minutos. As cargas variavam de 0 kg a 5 kg e as velocidades de rotação foram 1.000, 2.000 e 3.000 rpm.

Tabela 4 – Temperaturas dos rolamentos com falhas por abrasão

B6304	1 minuto				3 minutos				7 minutos			
	0 kg	1 kg	3 kg	5 kg	0 kg	1 kg	3 kg	5 kg	0 kg	1 kg	3 kg	5 kg
1000 rpm	24,31	26,33	27,38	32,14	25,24	26,54	27,46	32,18	25,21	27,17	27,91	32,8
2000 rpm	31,08	34,87	35,66	42,02	33,31	36,34	36,36	45,04	36,05	36,99	38,02	54,42
3000 rpm	37,19	42,07	45,77	52,06	38,74	42,95	50,23	55,35	41,87	44,66	51,12	66,17

Fonte – Adaptado de Kim *et al.* (2011)

Com isso, Kim *et al.* (2011) confirmaram que a Termografia pode ser utilizada como ferramenta na detecção de falhas em rolamentos de esferas.

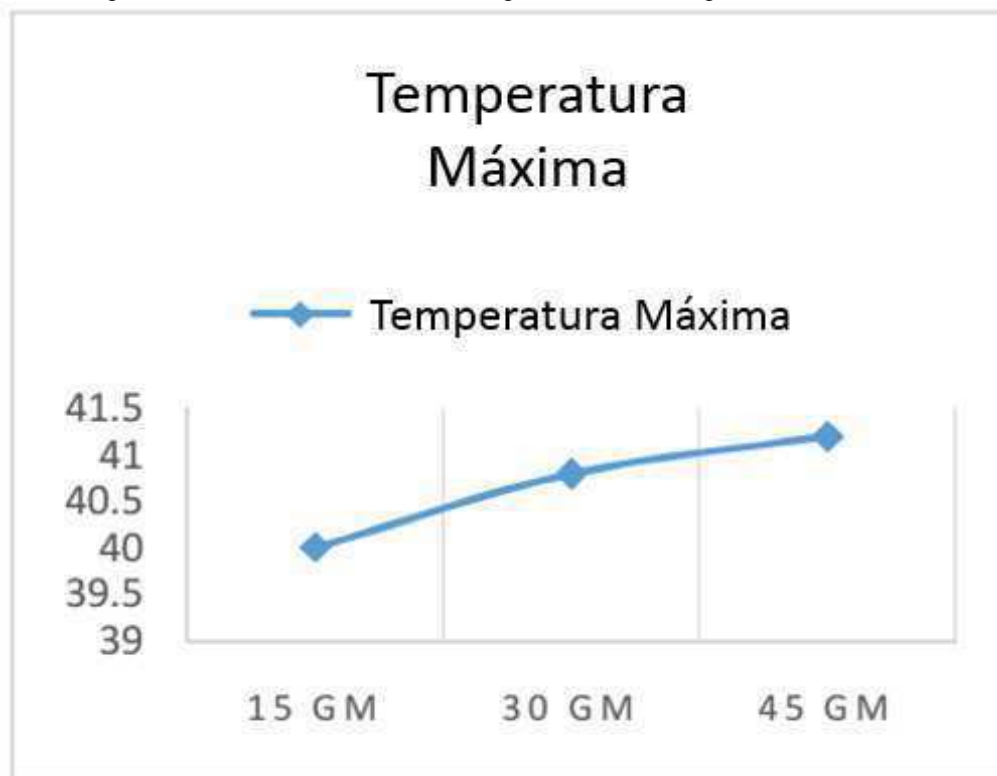
Singh (2014) também conduziu experimento utilizando Termografia e com rolamentos danificados por abrasão na pista externa e nas esferas de contato. O rolamento da pesquisa foi do tipo autocompensador com 2 carreiras de esferas.

O experimento diferenciou-se dos demais estudos pelo fato de utilizar pesos para causar desbalanceamento no eixo do sistema e buscar detectar pela Termografia a presença de

anomalias térmicas nos rolamentos. Foram utilizados pesos de 15 g, 30 g e 45 g para induzir o desbalanceamento do eixo.

Na Figura 28 nota-se a curva de temperatura com os valores máximos atingidos nos rolamentos com falha nas esferas de contato e eixo com peso provocando o desbalanceamento do mesmo. As temperaturas ocorreram quando do uso dos três valores de pesos citados.

Figura 28 – Temperaturas dos rolamentos com falhas por abrasão e com pesos no desbalanceamento do eixo



Fonte – Singh (2014)

Singh (2014) afirma que as forças radiais que causaram o desbalanceamento do eixo em conjunto com as falhas por abrasão nas esferas de contato dos rolamentos provocaram instabilidade e aquecimento nos rolamentos. Tal aquecimento foi detectado com o uso da Termografia e em comparação com rolamento normal percebeu-se que a Termografia auxiliou na detecção de falhas nos rolamentos.

Kim *et al.* (2014) conduziram estudo em rolamentos de esferas e utilizando Termografia em que foram inseridas falhas sob forma de grãos de pó de ferro. O experimento utilizou três cenários de falhas sendo que a gradação do pó de ferro foi de 0,1 g, 0,2 g e 0,3 g de peso. Após essa inserção, os rolamentos foram submetidos a carga radial de peso 3 kg e velocidade de rotação de 2.000 rpm.

Na Figura 29 nota-se a bancada de testes utilizada pelos pesquisadores e o disco em aço de 3 kg utilizado como carga radial.

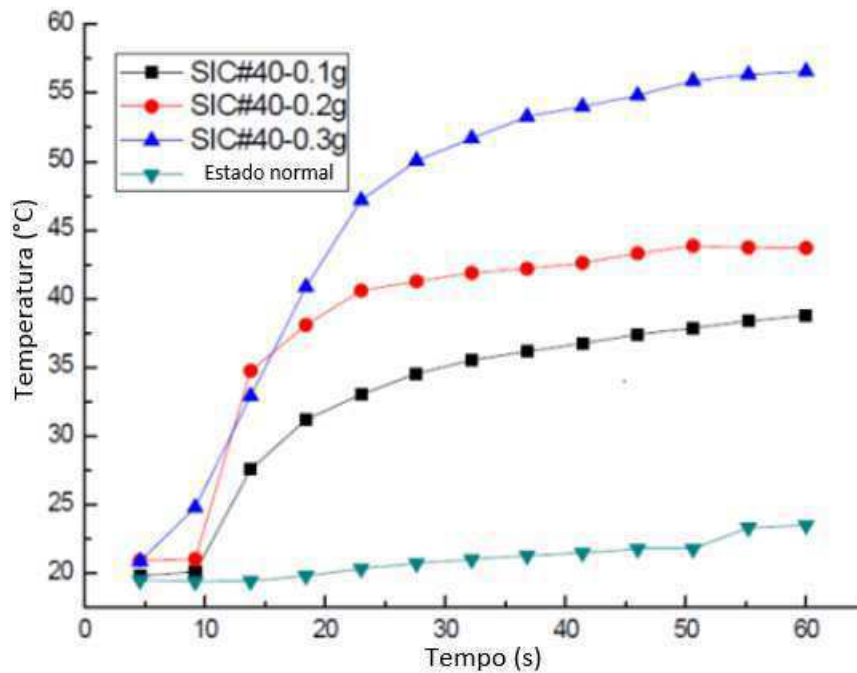
Figura 29 – Bancada de testes e disco em aço de 3 kg



Fonte – Kim *et al.* (2014)

Na Figura 30 nota-se a curva de temperatura com os valores máximos atingidos nos rolamentos com falha por pó de ferro. Nota-se que quanto maior o defeito inserido, maior a temperatura registrada relativamente ao rolamento normal.

Figura 30 – Temperaturas dos rolamentos com falhas por abrasão e com pesos no desbalanceamento do eixo



Fonte – Kim *et al.* (2014)



Kim *et al.* (2014) concluíram que por meio de termogramas e gráficos de curvas de temperatura, pode-se utilizar a Termografia como ferramenta na detecção de defeitos em rolamentos de esferas com falhas inseridas sob forma de pó de ferro em três gradações diferentes.

Mazioud *et al.* (2008) conduziram experiência com a Termografia. Porém, desta feita a Termografia foi utilizada para que eles por meio das variações de temperaturas pudessem monitorar a vibração mecânica causada no sistema e assim estimar o nível de desgaste do rolamento. Também foi proposto modelo matemático objetivando explicar o fenômeno térmico do experimento.

Os rolamentos de esferas tiveram falhas inseridas em suas pistas com furos de 0,6 mm de diâmetro e 7,0 mm de profundidade por meio de eletro-erosão. Ao todo foram efetuadas 9 perfurações nas pistas dos rolamentos de testes. Na Fig. 31 observa-se o defeito inserido no rolamento de esferas.

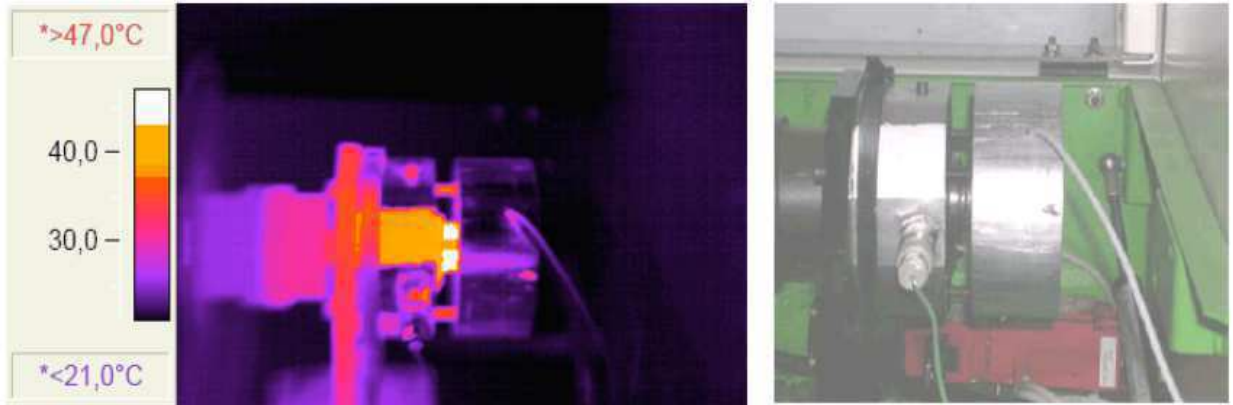
Figura 31 – Rolamento de esferas com falha por eletro-erosão



Fonte – Mazioud *et al.* (2008)

A Termografia foi utilizada para aferir a temperatura no rolamento para então subtrair da temperatura ambiente e gerar o gráfico de correlação. Na Fig. 32 observa-se o termograma e montagem do rolamento do experimento, respectivamente.

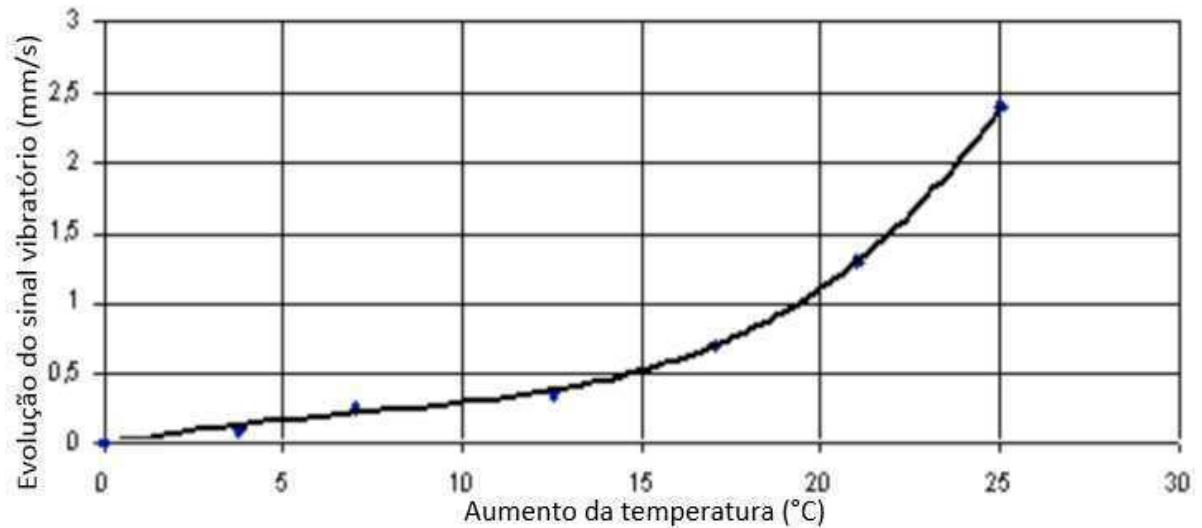
Figura 32 – Termograma e rolamentos de teste montado



Fonte – Mazioud *et al.* (2008)

Com isso, Mazioud *et al.* (2008), mostram na Figura 33, a correlação entre a temperatura capturada pela Termografia e o sinal de vibração do rolamento. Com a correlação positiva, foi confeccionado modelo matemático utilizando método de volumes finitos, cuja malha do rolamento é mostrada na Fig. 34.

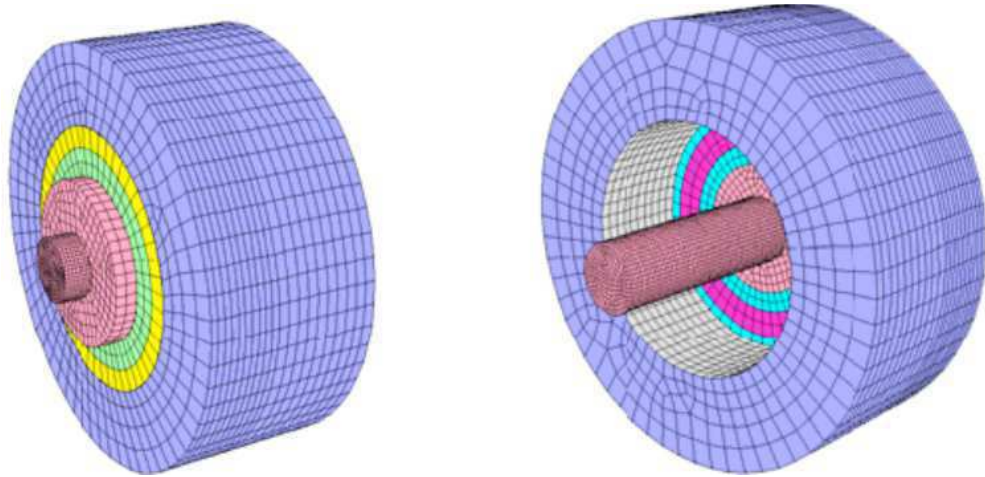
Figura 32 – Evolução da temperatura do rolamento de acordo com o sinal de vibração mecânica



Fonte – Mazioud *et al.* (2008)



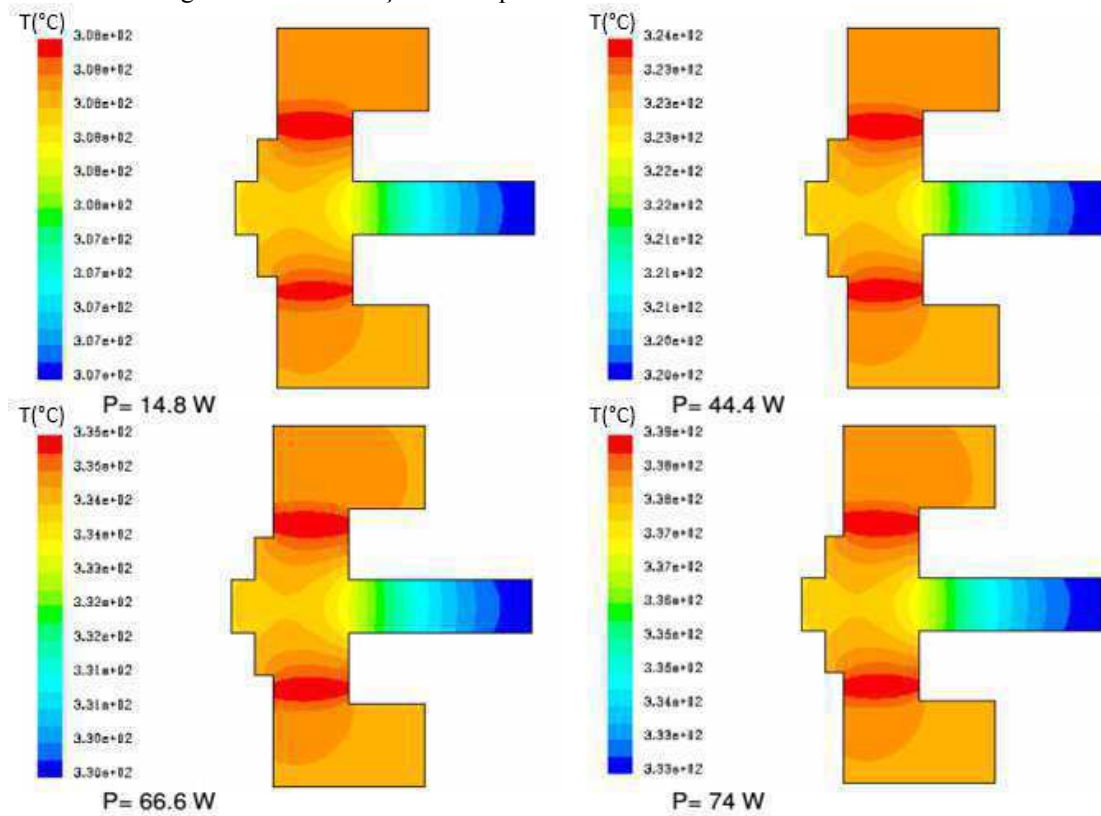
Figura 34 – Malha de modelo matemático do rolamento em estudo



Fonte – Mazioud *et al.* (2008)

Na Figura 35 pode-se observar a distribuição de temperatura da parte superior do mancal bipartido do rolamento em estudo. Nota-se claramente aumento de temperatura com a variação de carga e velocidade de rotação.

Figura 35 – Distribuição de temperatura no mancal do rolamento em estudo



Fonte – Mazioud *et al.* (2008)

Com isso, Mazioud *et al.* (2008), confirmaram o uso da Termografia no auxílio de detecção de falhas e anomalias em rolamentos de esferas.

Em sua tese de doutoramento, Moussa (2014) fez uso de Termografia para avaliação e monitoramento de falhas em rolamentos inseridas por meio de eletro-erosão.

Na Figura 36 podem-se observar os rolamentos e as falhas inseridas.

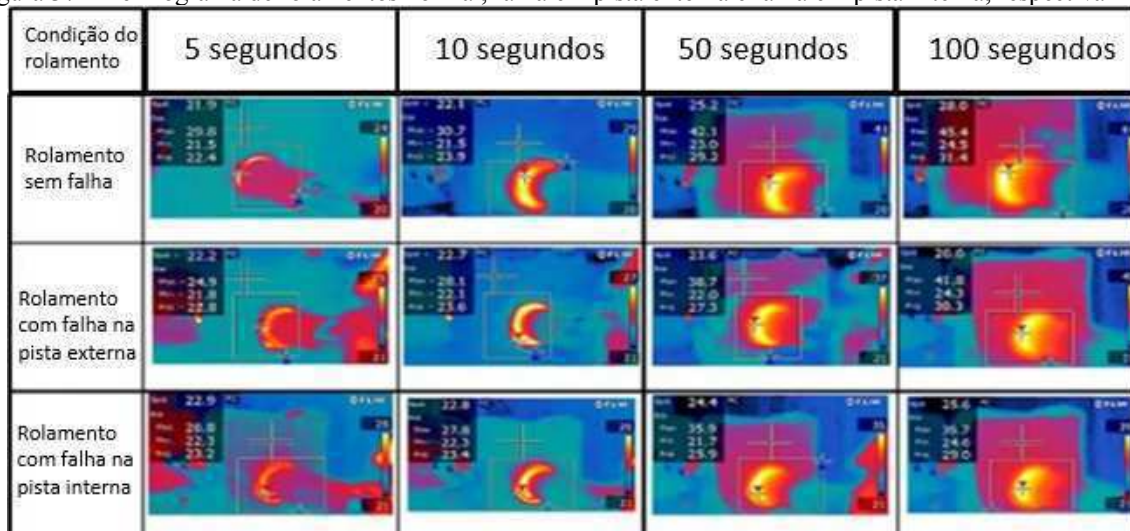
Figura 36 – Rolamento de esferas com falha por eletro-erosão nas pistas interna e externa, respectivamente



Fonte – Moussa (2014)

A experiência fez uso de medições de temperaturas aferidas nos 5 minutos iniciais em detrimento da espera pelo equilíbrio térmico do sistema. Na Fig. 37 observam-se termogramas comparativos em quatro momentos diferentes de rolamentos normal, falha na pista externa e falha na pista interna.

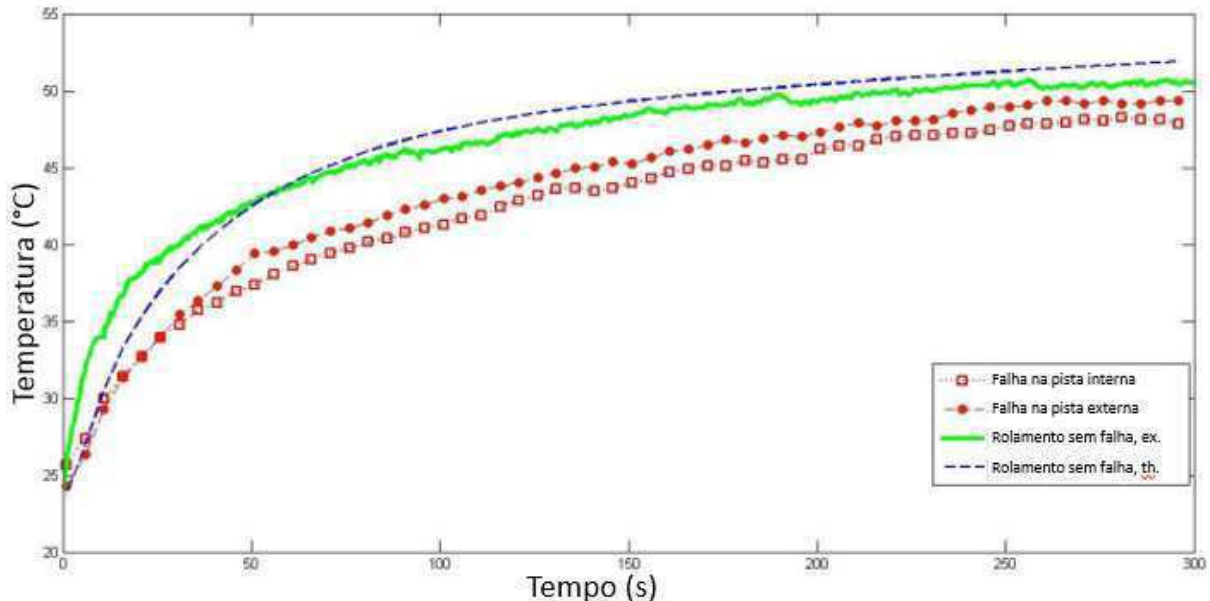
Figura 37 – Termograma de rolamentos normal, falha em pista externa e falha em pista interna, respectivamente



Fonte – Moussa (2014)

Na Figura 38 notam-se as curvas de temperatura dos rolamentos normal e com falha por eletro-erosão. Neste caso, ao contrário dos demais, as temperaturas dos rolamentos com falhas ficaram menores que o rolamento normal.

Figura 38 – Temperaturas dos rolamentos normal e com falhas por abrasão



Fonte – Moussa (2014)

Moussa (2014) concluiu que as temperaturas nos rolamentos com falhas foram menores que as temperaturas do rolamento normal pelo fato de que há diminuição na área de contato das esferas com as pistas quando há presença de falha devido ao fato de que as esferas ao invés de sempre rolarem pela pista há momentos em que elas saltitam entre as pistas. Com a diminuição da área de contato, segundo o pesquisador, diminuiu-se o atrito gerado e, por conseguinte diminuiu-se o calor gerado, refletindo na temperatura inferior ao rolamento normal.

Tais deduções reportadas por Moussa (2014) foram feitas, partindo-se dos estudos de Sakamoto e Tsukizoe (1978), Sakamoto (1987) e Hess e Soom (1991) em que, sob carga harmônica, a área média de contato diminuiu, levando à força de fricção média reduzida. O modelo também sugeriu que a diminuição das forças de atrito devido ao carregamento dinâmico normal, quando não havia perda de contato, era de aproximadamente 10 % da força de atrito devido ao carregamento estático. Este fenômeno também pode ser observado em aplicações médicas. Sakamoto *et al.* (2012) propuseram um modelo de cateter para intervenções cardíacas que faz uso de vibrações para diminuir o atrito entre as paredes das artérias e evitar danos às mesmas. Em seus estudos, eles demonstram a diminuição aproximadamente 33 % no atrito

quando do uso do modelo sugerido em relação aos atuais. Miller (2014) é detentor de patente americana sob número US20140276923 A1 em que o mesmo também expõe modelo com a particularidade de vibrar e com isso diminuir o atrito entre o dispositivo e as paredes da artéria, diminuindo assim o risco de danos à integridade do paciente.

Na indústria de alimentos, Schneider *et al.* (2009) descobriram que a vibração da ferramenta de corte facilitou a separação do material devido à redução do atrito médio deslizante. Eles propuseram que a liberação, temporária, das travas das superfícies de contato causadas por vibração ultra-sônica levou a uma redução do atrito médio.

Demonstra-se assim que em termos de temperatura é plausível a diminuição da mesma pelo uso de vibração das esferas na pista externa. Já em termos de análise de vibrações, seria necessário estudo mais aprofundado sobre possíveis danos à estrutura do rolamento. Com isso, o pesquisador conclui que a Termografia pode diagnosticar por meio de termogramas e gráficos de curvas de temperatura, falhas em rolamentos de esferas.

No Quadro 1 observa-se de forma resumida os autores citados acima e seus estudos, considerando as falhas dos rolamentos, cenários de experimentos e resultados.

Quadro 1 – Resumo dos estudos experimentais citados neste trabalho e seus autores

<b>Autores</b>	<b>Material</b>	<b>Condições</b>	<b>Resultado</b>	<b>Termografia aprovada?</b>
Kim <i>et al.</i> (2012)	Rolamentos com falhas por eletroerosão	Carga radial e velocidades variantes	Aumento de temperatura nos rolamentos com falhas	Sim
Nunez <i>et al.</i> (2016)	Rolamentos com perfuração em pista	Cargas e velocidades variantes	Aumento de temperatura do rolamento com falha	Sim
Seo <i>et al.</i> (2012)	Rolamentos com pouca lubrificação e falha nas pistas	Carga constante e velocidades variantes.	Aumento de temperatura do rolamento com falha	Sim
Ranjit <i>et al.</i> (2014)	Rolamento com falha por pó de ferro	Cargas radiais e velocidades variantes	Aumento de temperatura do rolamento com falha	Sim
Hong <i>et al.</i> (2013)	Rolamentos com falhas na lubrificação e falhas nas pistas e esferas	Carga constante e velocidades variantes.	Aumento de temperatura nos rolamentos com falhas	Sim

Continuação do Quadro 1

Kim <i>et al.</i> (2011)	Rolamentos com falhas por eletroerosão	Carga radial e velocidades variantes por 7 minutos	Aumento de temperatura nos rolamentos com falhas	Sim
Singh (2014)	Rolamentos com falhas por eletroerosão	Eixo desbalanceado e cargas variantes	Aumento de temperatura nos rolamentos com falhas	Sim
Kim <i>et al.</i> (2014)	Rolamento com falha por grãos de pó de ferro	Falhas variantes, cargas radiais e velocidades constantes	Aumento de temperatura nos rolamentos	Sim
Mazioud <i>et al.</i> (2008)	Rolamentos com perfurações de diâmetros variantes	Cargas e velocidades variantes	Aumento de temperatura nos rolamentos	Sim
Moussa (2014)	Rolamentos com falhas por eletroerosão	Falhas variantes, cargas radiais e velocidades constantes	Diminuição/aumento de temperatura nos rolamentos	Sim

Fonte – Autoria própria

## CAPÍTULO III

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha os métodos e procedimentos utilizados para a consecução dos objetivos geral e específicos. Para tanto, faz-se necessária a classificação desta pesquisa de acordo com Silva (2005).

Do ponto de vista da sua natureza, esta pode ser classificada como pesquisa aplicada – uma vez que se objetiva a construção de conhecimento para a aplicação prática da termografia e a solução de problemas específicos, por exemplo, predição de defeitos em rolamentos autocompensadores com 2 carreiras de esferas sob carga radial.

Pela ótica de seus objetivos, esta pode ser classificada como explicativa – uma vez que buscou-se identificar os fatores que determinaram ou contribuíram para a ocorrência do fenômeno, no caso, aquecimento não-natural das pistas de rolamento autocompensador.

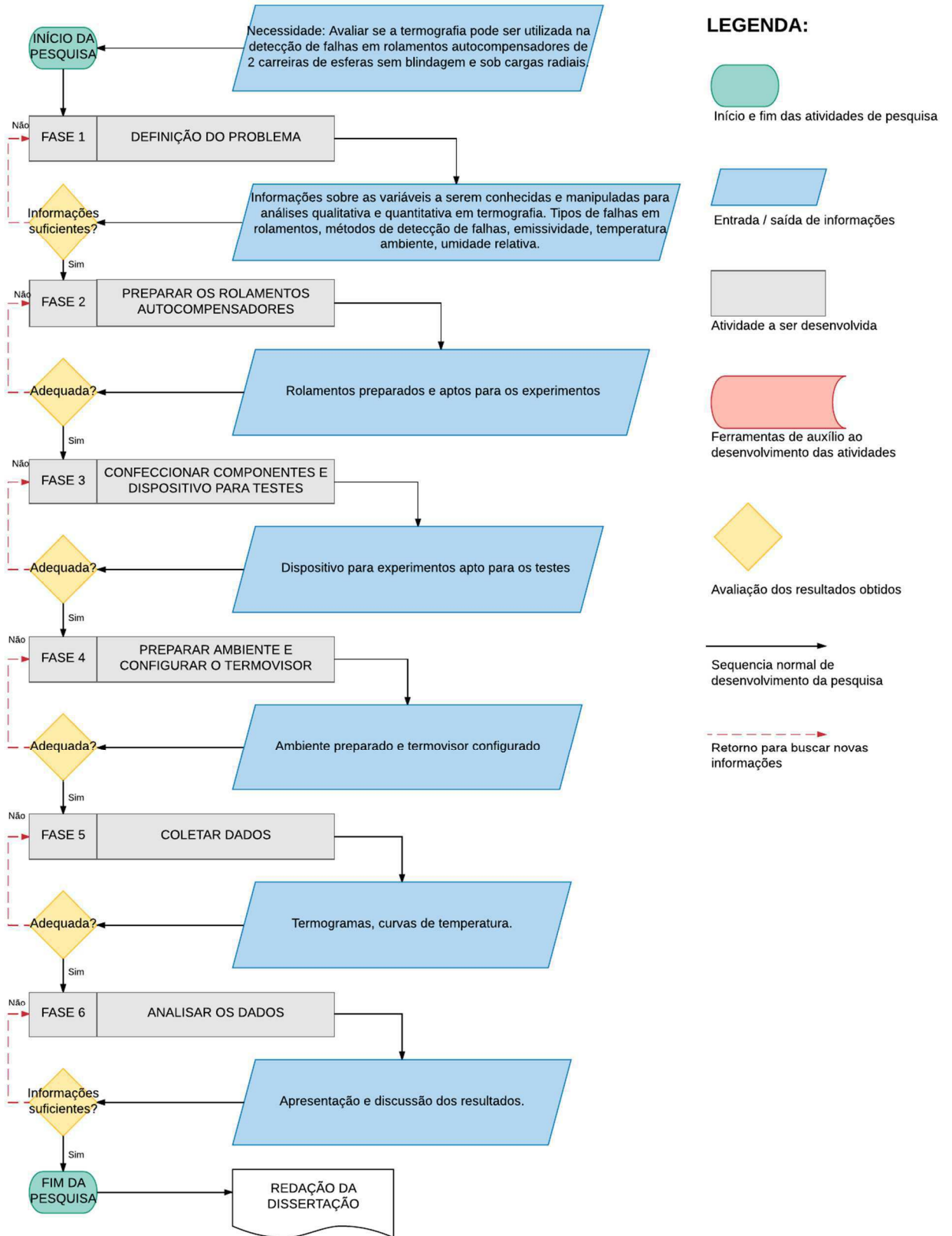
Por fim e relativo aos procedimentos técnicos, pode-se classificar esta pesquisa como sendo experimental – uma vez que foi feito levantamento em material já publicado como dissertações e artigos em periódicos acerca do problema, e houve a determinação do objeto de estudo e as variáveis que poderiam ser influentes sobre seu comportamento. É também do tipo estudo de caso pois, houve estudo profundo do fenômeno afim de conhecer o seu comportamento.

### 3.1 PROCESSO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico e os meios utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa são apresentados na Fig. 39.

Buscou-se nesta pesquisa verificar se a Termografia pode ser uma técnica auxiliar na detecção de falhas nas pistas interna e externa em rolamentos autocompensadores de 2 carreiras de esferas submetidos à carga radial. Com este intuito, elaborou-se plano metodológico e as atividades de pesquisa foram desdobradas em 6 fases onde entende-se por fase as atividades com nível de complexidade maior. Estas fases são, por sua vez, desdobradas em etapas, que compreendem atividades de complexidade menor quando comparadas às fases.

Figura 39 – Fluxograma metodológico utilizado na pesquisa



Fonte – Autoria própria

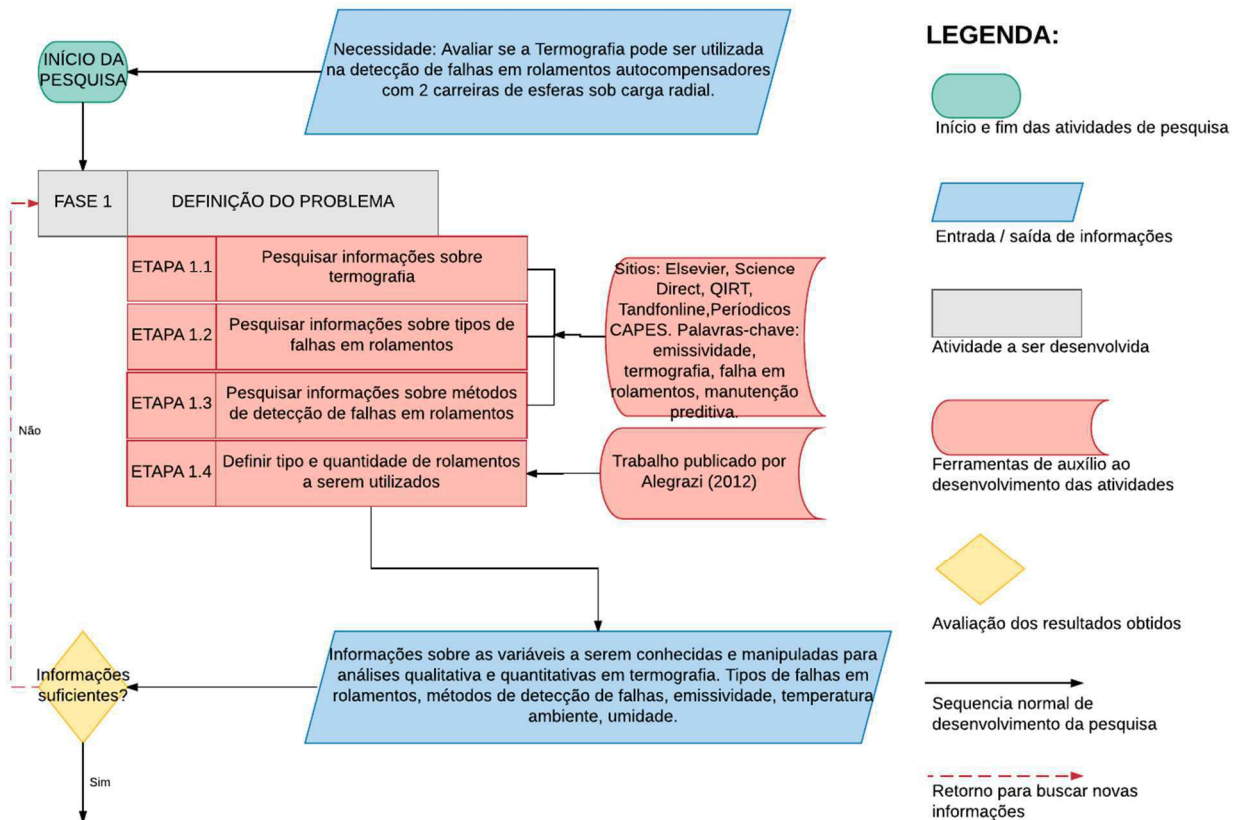


### 3.1.1 FASE 1 – DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A primeira fase, denominada Fase 1, tem por objetivo definir o problema a ser analisado na pesquisa, bem como coletar informações científicas na literatura sobre o mesmo. Esta fase é dividida em 4 etapas conforme exposto na Fig. 40 e são nominadas conforme segue: 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 métodos de detecção de falhas em rolamentos; Etapa 1.4 – Definir tipo e quantidade de rolamentos a serem utilizados na pesquisa.

Para auxiliar no desenvolvimento desta fase se fez uso das seguintes ferramentas: pesquisar em sítios, periódicos científicos e nos trabalhos de Alegranzi (2012) e Moussa (2014) as palavras-chaves contextualizadas para esta pesquisa.

Figura 40 – Fluxograma metodológico da Fase 1





Continuação da Figura 40

ENTRADAS	SAÍDAS	FERRAMENTAS	PROBLEMAS QUE PODEM OCORRER
Informações sobre o problema apresentado à pesquisa	Informações úteis à definição do problema e definição do tipo de rolamento	Pesquisas sobre Termografia, falhas em rolamentos, manutenção preditiva. Pesquisas de Alegranzi (2012) e Moussa (2014)	Escassez de informações sobre o problema apresentado na pesquisa. Necessidade de ampliação dos prazos para obtenção de tais informações.

Fonte – Autoria própria

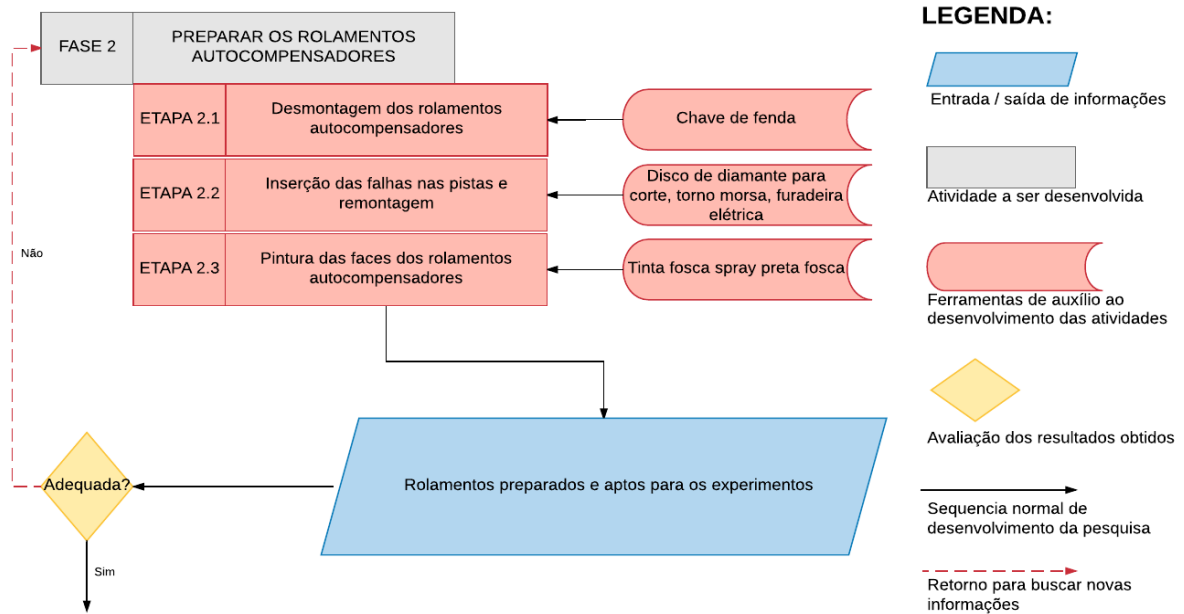
De posse das informações nas quatro etapas supracitadas, conseguiu-se melhor entendimento do problema a ser estudado. A partir de então, passou-se à próxima fase que consiste na preparação dos rolamentos autocompensadores de 2 carreiras de esferas para os experimentos.

### 3.1.2 FASE 2 – PREPARAR OS ROLAMENTOS DE ESFERAS

O objetivo desta fase é a preparação dos rolamentos para os experimentos. Esta fase é dividida em 3 etapas conforme exposto na Fig. 41 e são nominadas conforme segue: Etapa 2.1 – Desmontagem dos rolamentos; Etapa 2.2 – Inserção das falhas nas pistas interna e externa e montagem do rolamento; Etapa 2.3 – Pintura da face dos rolamentos autocompensadores de 2 carreiras de esferas para assegurar a emissividade de 0,98.

Para auxiliar no desenvolvimento desta fase se fez uso das seguintes ferramentas: disco de diamante para corte, morsa torno de bancada, tinta fosca preta e paquímetro. O procedimento de utilização destas ferramentas se encontra no Apêndice A.

Figura 41 – Fluxograma metodológico da Fase 2



ENTRADAS	SAÍDAS	FERRAMENTAS	PROBLEMAS QUE PODEM OCORRER
Preparação, inserção de falhas e pintura dos rolamentos escolhidos.	Rolamentos autocompensadores de 2 carreiras de esferas aptos para os experimentos	Disco de diamante para corte, morsa torno de bancada, tinta fosca preta e paquímetro	Dificuldade em encontrar a ferramenta mais adequada para a inserção das falhas. Comprimentos da falha não ficar conforme definido. Fragilizar pistas dos rolamentos pelas falhas inseridas.

Fonte – Autoria própria

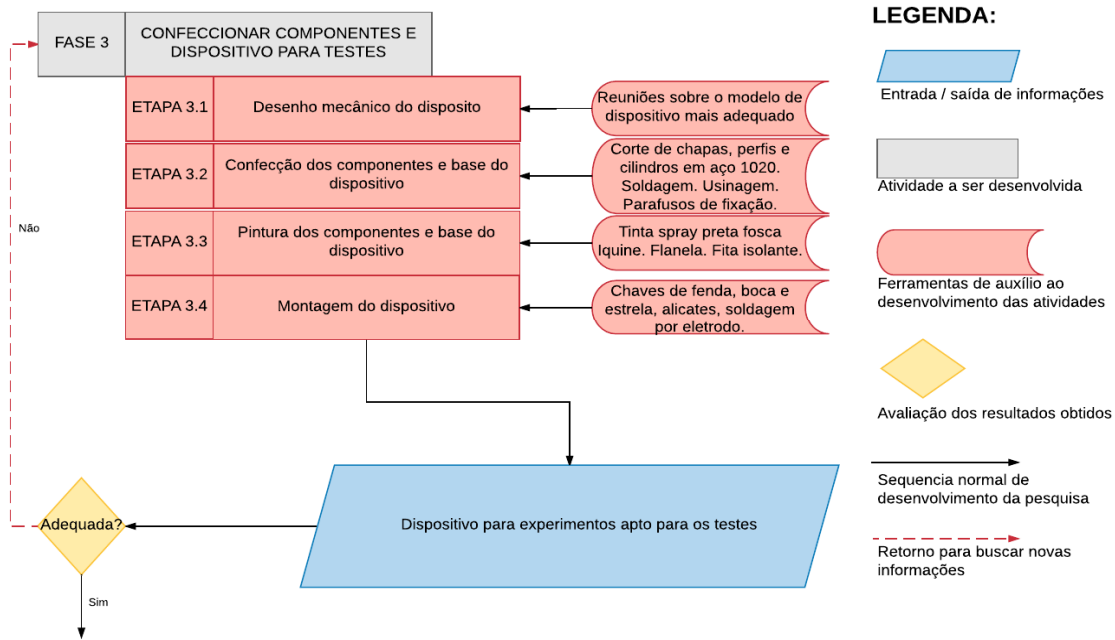
Ao final desta fase, passa-se à confecção e montagem dos componentes e dispositivos para experimentos.

### 3.1.3 FASE 3 – CONFECCIONAR E MONTAR DISPOSITIVO PARA EXPERIMENTOS

O objetivo desta fase é a confecção dos componentes, dispositivo de testes e sua montagem para os experimentos. Esta fase é dividida em 4 etapas conforme exposto na Fig. 42 e são nominadas conforme segue: Etapa 3.1 – Desenho mecânico do dispositivo; Etapa 3.2 – Confecção dos componentes e base do dispositivo; Etapa 3.3 – Pintura dos componentes e da base do dispositivo; Etapa 3.4 – Montagem do dispositivo.

Para auxiliar no desenvolvimento desta fase se fez uso das seguintes ferramentas: reuniões sobre o modelo de dispositivo mais adequado, cortes de chapas, perfis e cilindros em aço, soldagem, usinagem, fixação de parafuso e tinta fosca preta. O procedimento de utilização destas ferramentas se encontra no Apêndice A.

Figura 42 – Fluxograma metodológico da Fase 3



ENTRADAS	SAÍDAS	FERRAMENTAS	PROBLEMAS QUE PODEM OCORRER
Confeção dos componentes e dispositivo para experimentos.	Dispositivo apto para início dos experimentos	Reuniões sobre modelo do dispositivo, corte de chapas, perfis e cilindros em aço. Soldagem, usinagem e fixação de parafuso. Tinta preta fosca.	Demora na escolha do modelo de dispositivo mais adequado. Falta de material especificado no mercado local. Dificuldade na construção dos elementos mecânicos.

Fonte – Autoria própria

Após o término desta etapa, segue-se a fase de preparação do ambiente de experimentos e configuração da câmera termográfica.

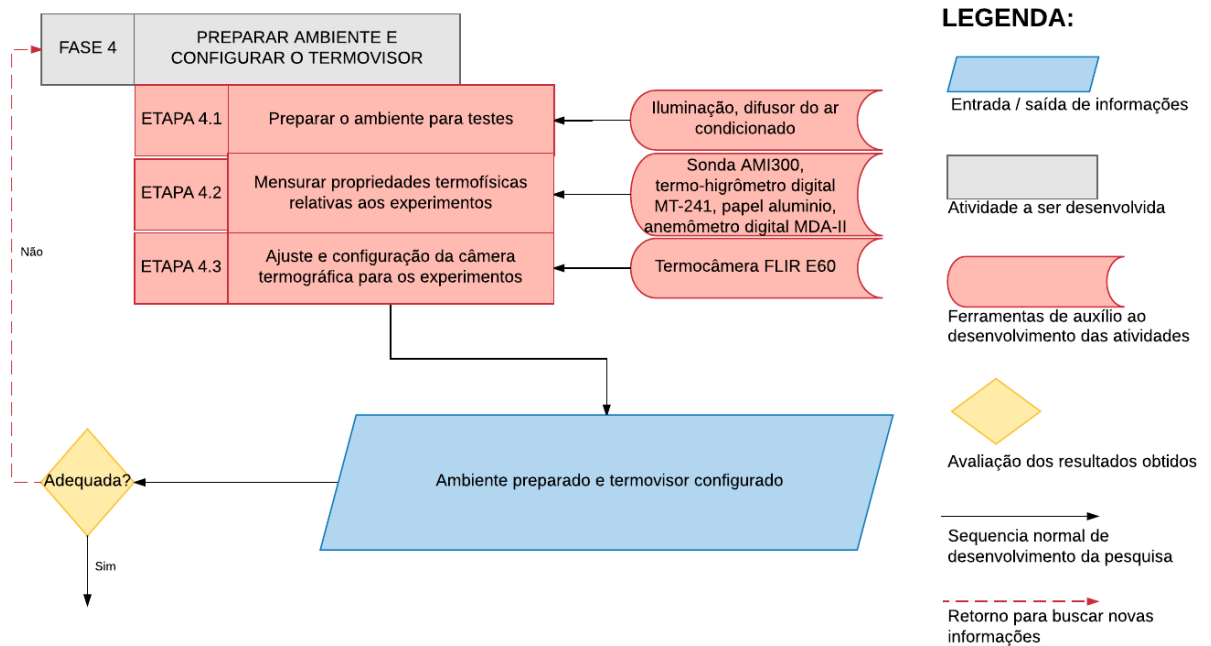
### 3.1.4 FASE 4 – PREPARAR AMBIENTE E CONFIGURAR O TERMOVISOR

O objetivo desta fase é a preparação do ambiente de experimentos e a configuração do termovisor. Esta fase é dividida em 3 etapas conforme exposto na Fig. 43 e são nominadas

conforme segue: Etapa 4.1 – Preparar o ambiente; Etapa 4.2 – Mensurar propriedades termofísicas relativas aos experimentos; Etapa 4.3 – Ajuste e configuração da câmera termográfica para os experimentos.

Para auxiliar no desenvolvimento desta fase se fez uso das seguintes ferramentas: ajuste de iluminação e ar condicionado, uso de termo-higrômetro e anemômetro digitais, termovisor FLIR E60. O procedimento de utilização destas ferramentas se encontra no Apêndice A.

Figura 43 – Fluxograma metodológico da Fase 4



ENTRADAS	SAÍDAS	FERRAMENTAS	PROBLEMAS QUE PODEM OCORRER
Preparação do ambiente e termovisor	Ambiente e termovisor aptos para início dos experimentos	Aferição e ajustes de parâmetros termofísicos	Falta de controle adequado de parâmetros termofísicos como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, emissividade, temperatura refletida e iluminação

Fonte – Autoria própria

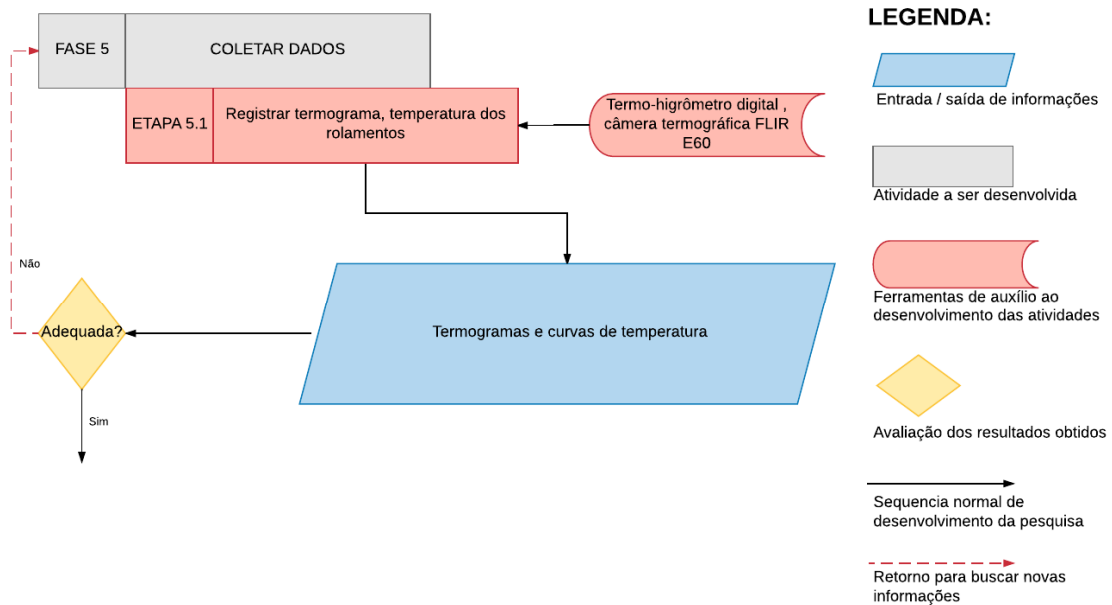
Com isto, concluiu-se a fase 4 que denota a preparação do ambiente e configuração do termovisor, passando-se então à fase de coleta de dados.

### 3.1.5 FASE 5 – COLETAR DADOS

O objetivo desta fase é a coleta dos dados dos experimentos considerando os parâmetros e ambiente ajustados na fase anterior. Esta fase é composta de 1 etapa conforme exposto na Fig. 44 e nominada Etapa 5.1 – Registrar temperaturas e termogramas dos rolamentos.

Para auxiliar no desenvolvimento desta fase se fez uso das seguintes ferramentas: leitura de temperaturas em termo-higrômetro e obtenção de termogramas com o termovisor FLIR E60. O procedimento de utilização destas ferramentas se encontra no Apêndice A.

Figura 44 – Fluxograma metodológico da Fase 5



ENTRADAS	SAÍDAS	FERRAMENTAS	PROBLEMAS QUE PODEM OCORRER
Requisitos para a coleta de dados	Temperaturas e termogramas coletados e aptos para análises	Termo-higrômetro digital e termivisor FLIR E60	Inconsistências na temperaturas aferidas e termogramas causando discrepância entre as informações obrigando o refazimento dos experimentos

Fonte – Autoria própria

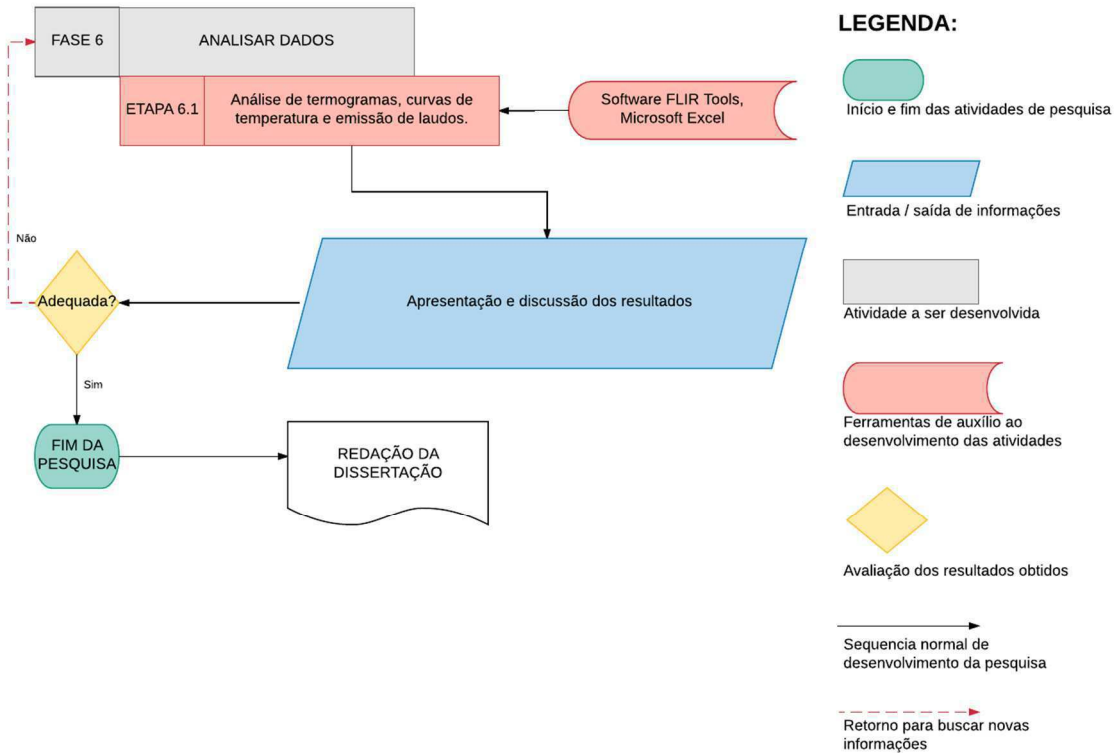
Após os experimentos e de posse das temperaturas e termogramas, seguiu-se a análise dos dados da pesquisa.

### 3.1.6 FASE 6 – ANALISAR OS DADOS

O objetivo desta última fase foi a análise dos dados coletados neste experimento. Esta fase é composta de 1 etapa conforme exposto na Fig. 45 e nominada Etapa 6.1 – Análise de termogramas, curvas de temperatura e emissão de laudos.

Para auxiliar no desenvolvimento desta fase se fez uso das seguintes ferramentas: *Software* FLIR Tools e planilhas Microsoft Excel. O procedimento de utilização destas ferramentas se encontra no Apêndice A.

Figura 45 – Fluxograma metodológico da Fase 6



ENTRADAS	SAÍDAS	FERRAMENTAS	PROBLEMAS QUE PODEM OCORRER
Requisitos para as análises dos dados coletados na fase anterior	Análise dos dados concluída, apresentação e discussão dos resultados	<i>Software</i> FLIR Tools e Microsoft Excel	Inconsistências entre os resultados da pesquisa e os resultados esperados em teoria

Fonte – Autoria própria

No capítulo seguinte serão debatidos os principais resultados encontrados nesta pesquisa por meio de gráficos e propriedades termofísicas dos elementos mecânicos ensaiados.

## CAPÍTULO IV

### 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados e discuti-los a partir da aplicação da metodologia mostrada no capítulo anterior. Para melhor visualização e entendimento dos resultados, os mesmos foram expostos em forma de gráficos, figuras e quadro. A discussão dos resultados será dividida paralelamente em duas partes: resultados em ambiente controlado e resultados em ambiente não controlado.

No ambiente controlado manteve-se rígido controle das variáveis termofísicas relevantes aos experimentos, por exemplo, temperatura da sala, umidade relativa do ar, iluminação e velocidade do ar.

No ambiente não-controlado não houve controle de tais variáveis justamente pelo fato de no ambiente de chão de fábrica não ser possível, na maioria das vezes, manipular tais variáveis por motivos característicos da planta industrial e principalmente por motivos econômicos. Entretanto, variáveis como temperatura refletida e emissividade tiveram controle rígido.

Os experimentos foram realizados na primeira quinzena de junho de 2017 e foram feitos com 4 rolamentos autocompensadores com 2 carreiras de esferas modelo SKF 1303. Sendo que 2 rolamentos, nominados como série A, possuíam falhas inseridas em suas pistas internas com comprimentos de falhas de 3,0 mm. Tais rolamentos foram nominados de Ar (falha tipo desgaste por abrasão) e As (falha tipo sulco). Os outros 2 rolamentos, nominados como série B, possuíam falhas inseridas em suas pistas externas com comprimentos de falhas de 3,0 mm. Tais rolamentos foram nominados de Br (falha tipo desgaste por abrasão) e Bs (falha tipo sulco). No Qdr. 2 pode-se observar a estratificação dos rolamentos de esferas com relação aos comprimentos das falhas inseridas e dados termofísicos do início de cada experimento.



Quadro 2 – Dados do experimento

Local da falha	Amostras	Comprimento da falha (mm)	Temperatura ambiente controlado (° C)	Temperatura refletida controlado (° C)	U. R. ambiente controlado (%)	Velocidade do ar (m/s)	Temperatura ambiente não controlado (° C)	Temperatura refletida não controlado (° C)	U. R. ambiente não controlado (%)	Velocidade do ar (m/s)
Interna	Ar	3,0	21,9	25,0	41,0	0,00	25,6	29,0	70,0	0,05
	As		22,3	26,0	42,0		27,0	28,6	69,0	0,05
Externa	Br		21,7	25,0	41,0		26,1	29,0	59,0	0,11
	Bs		22,2	25,0	40,7		25,0	27,3	77,7	0,09

Fonte – Autoria própria

Do Quadro 2 nota-se que, no ambiente controlado, as medições das propriedades termofísicas foram homogêneas. A temperatura da sala ficou em torno de 22,0° C, a temperatura refletida manteve-se em torno de 25,5° C, a umidade relativa deteve-se à marca média de 41,2 % e a velocidade do ar manteve-se zero. Como esperado para um ambiente não controlado, as aferições não apresentaram homogeneidade. A temperatura da sala apresentou diferença máxima de 2,0° C ou 8,0 %. A temperatura refletida mostrou diferença máxima de 1,7° C ou 6,3 %. No caso da umidade relativa houve variação máxima de 18,7 % e a velocidade do ar apresentou diferença máxima de 0,06 m/s.

No que tange as medições entre ambiente controlado e ambiente não controlado, observa-se especificamente, no caso da temperatura da sala, uma diferença máxima de 4,7° C ou 21,1 % que é considerado um percentual alto e poderá refletir na temperatura dos rolamentos.

Embora siga os mesmos procedimentos metodológicos, porém em condições de temperatura e umidade relativa diferentes, isto afetou a troca de calor entre elementos mecânicos, rolamentos, mancais e eixos, e a sala. Ora retardando a troca quando em ambiente não controlado e ora aumentando a troca em ambiente controlado, devido à característica física em que diz que quanto maior o gradiente de temperatura entre dois corpos, maior será a taxa de transferência de calor entre eles.

Vários experimentos prévios de ajustes de parâmetros foram realizados antes dos experimentos efetivos que foram aqui apresentados. Inicialmente destaca-se a consistência dos

dados coletados. Vários gráficos serão expostos com o intuito de mostrar a fidelidade dos mesmos. Cabe destacar que os rolamentos nos gráficos receberam as seguintes nomenclaturas:

C1\_CLI e C1\_AMB: Rolamento de referência em temperatura Controlada e Não - Controlada;

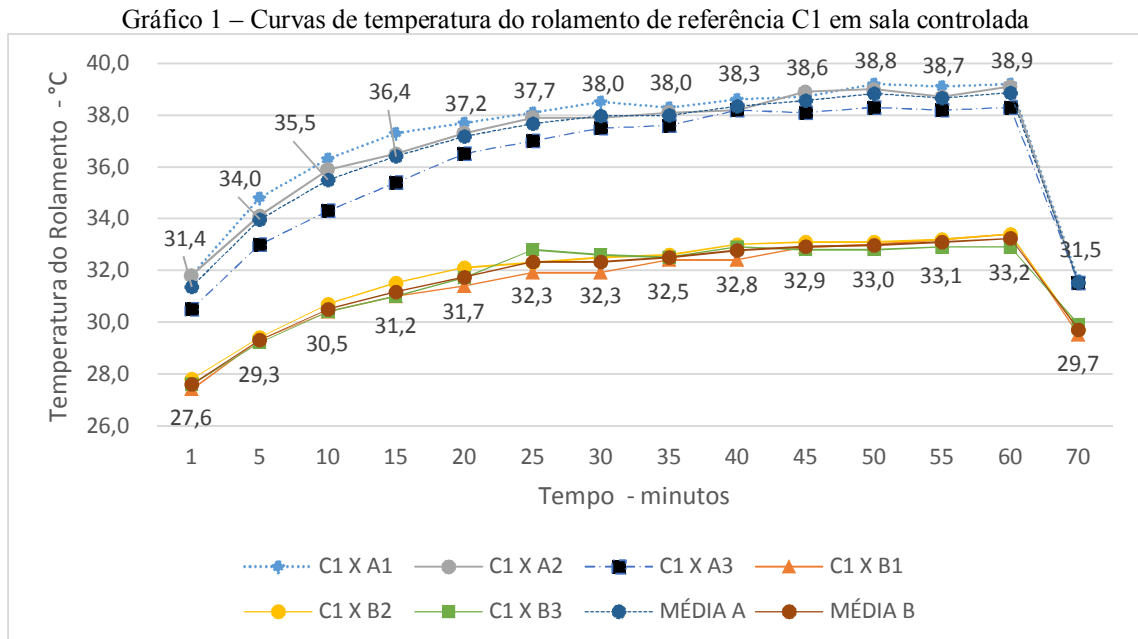
Ar\_CLI e Ar\_AMB: Rolamento Ar em temperatura Controlada e Não-Controlada;

As\_CLI e As\_AMB: Rolamento As em temperatura Controlada e Não-Controlada;

Br\_CLI e Br\_AMB: Rolamento Br em temperatura Controlada e Não-Controlada;

Bs\_CLI e Bs\_AMB: Rolamento Bs em temperatura Controlada e Não-Controlada.

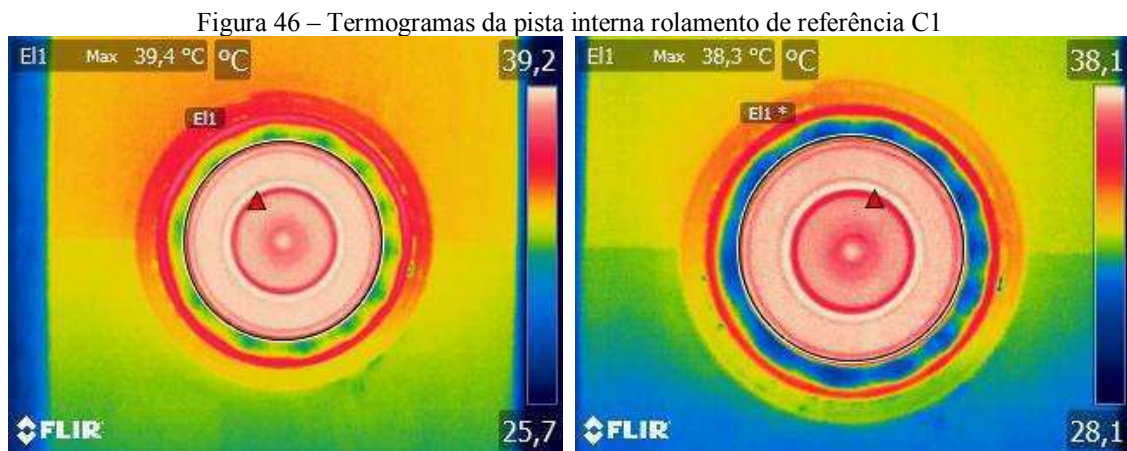
No Gráfico 1 nota-se o comportamento do rolamento de referência ao longo dos experimentos com os rolamentos da série A e B e, em sala controlada. As curvas em tons azuis referem-se às temperaturas na pista interna do rolamento de referência e mostram que as temperaturas na pista interna são maiores que as temperaturas na pista externa. Uma das explicações para esta característica é o fato da pista interna possuir área de superfície menor que a área de superfície da pista externa. Portanto, o choque das esferas de encontro com a falha se dá em intervalos de tempo menor. E, devido a maior frequência com que ocorrem tais choques, há uma produção maior de energia, liberando mais calor.



A temperatura média da pista interna, em tons azuis, do rolamento de referência iniciou-se com 31,4° C e atingiu a marca de 38,9° C aos 60 minutos da experiência. No caso da pista externa, em tons alaranjados, e por ter área de superfície maior que a pista interna em 2,76 vezes, a temperatura média iniciou-se com 27,6° C e atingiu a marca de 33,2° C aos 60 minutos de experimento.

A consistência dos dados também é percebida aqui notando-se que a diferença de temperatura entre as pistas no início e no final dos experimentos é aproximadamente constante. É digno de nota, também, os valores de temperaturas após o desligamento do motor. Em ambas as pistas os valores aproximadamente sobrepõem-se até o final dos experimentos aos 70 minutos. Neste caso há apenas a troca de calor entre os elementos de máquina e o ambiente.

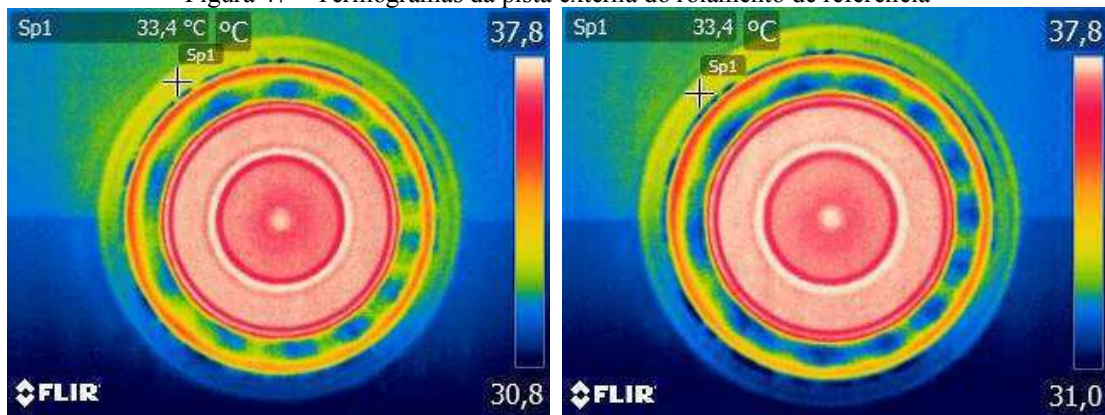
Na Figura 46 são expostos termogramas da pista interna do rolamento de referência quando dos experimentos com os rolamentos da série A. Cada termograma representa a temperatura do rolamento de referência aos 60 minutos e nota-se a temperatura máxima na pista interna nos pontos indicados pelos triângulos vermelhos.



Fonte – Autoria própria

Na Figura 47 pode-se observar os termogramas da pista externa do rolamento de referência quando dos experimentos com a série B. Assim como exposto para a Fig. 45, representam a temperatura aos 60 minutos de cada experimento.

Figura 47 – Termogramas da pista externa do rolamento de referência



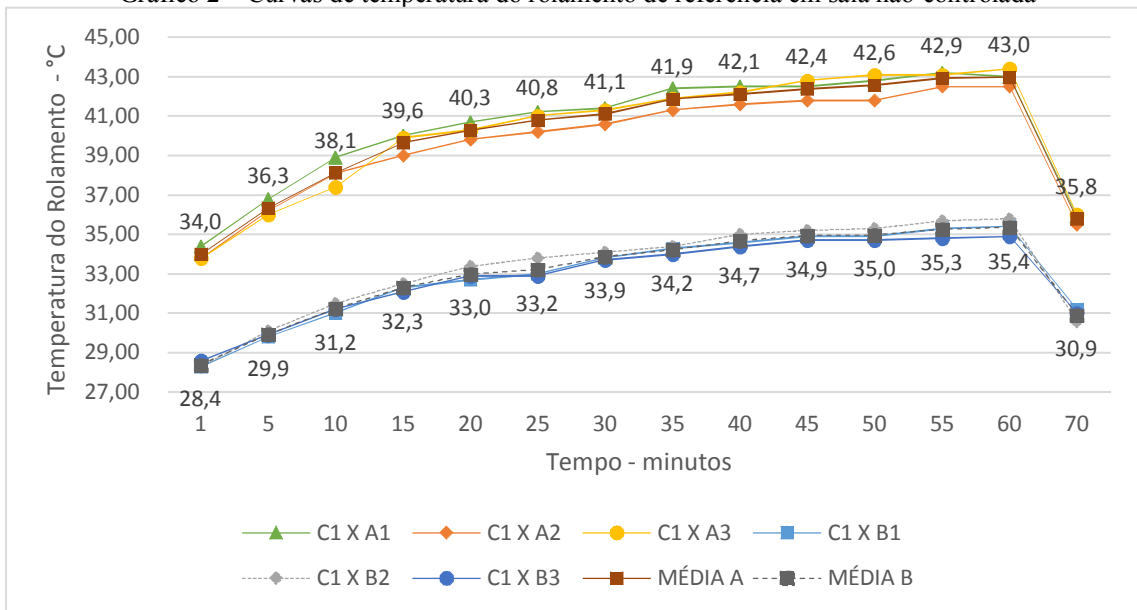
Fonte – Autoria própria

Pode-se perceber, nos termogramas da Figura 47, que há constância nas temperaturas da pista externa quando dos experimentos com os rolamentos da série B. As diferenças visuais nos termogramas deram-se pelo uso de isotermas para aferir com precisão o ponto mais quente da pista externa.

Aplicando-se a mesma analogia feita para ambiente controlado, no rolamento de referência em ambiente não-controlado, nota-se, no Gráf. 2, o comportamento do rolamento de referência ao longo dos experimentos com os rolamentos da série A e B e, em sala não-controlada. As curvas em tons alaranjados referem-se às temperaturas na pista interna do rolamento de referência e mostram que as temperaturas na pista interna são maiores que as temperaturas na pista externa. A temperatura média da pista interna do rolamento de referência iniciou-se com 34,0° C e atingiu a marca de 43,0° C aos 60 minutos da experiência.

No caso da pista externa, em tons azuis, a temperatura média iniciou-se com 28,4° C e atingiu a marca de 35,4° C aos 60 minutos de experimento. A consistência dos dados também é percebida aqui notando-se que a diferença de temperatura entre as pistas no início e no final dos experimentos é aproximadamente constante. Percebe-se, também, que os valores de temperaturas após o desligamento do motor e em ambas as pistas os valores se aproximam bastante até o final dos experimentos aos 70 minutos. Neste momento há apenas a troca de calor entre os elementos de máquina e a vizinhança.

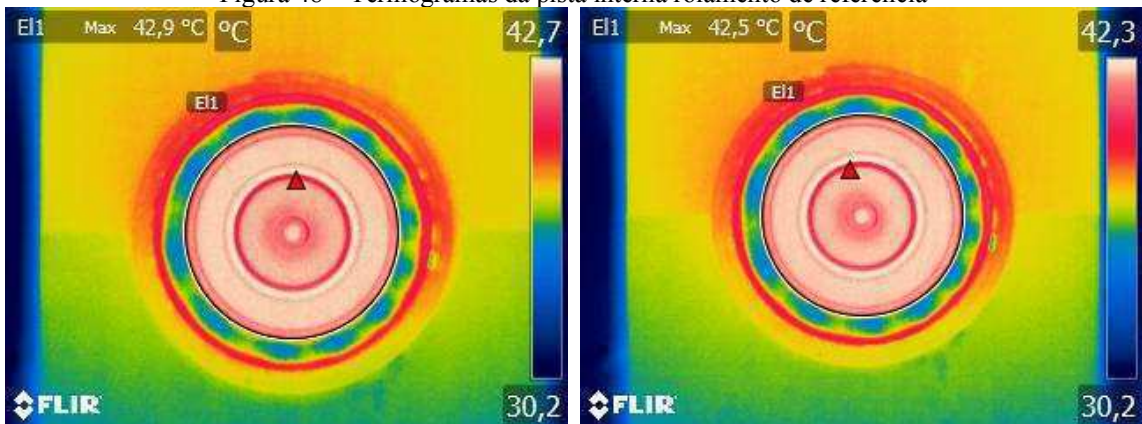
Gráfico 2 – Curvas de temperatura do rolamento de referência em sala não-controlada



Fonte – Autoria própria

Na Figura 48 são expostos termogramas da pista interna do rolamento de referência quando dos experimentos com os rolamentos da série A. Cada termograma representa a temperatura do rolamento de referência aos 60 minutos de cada experimento. Nota-se a temperatura máxima na pista interna nos pontos indicados pelos triângulos vermelhos.

Figura 48 – Termogramas da pista interna rolamento de referência

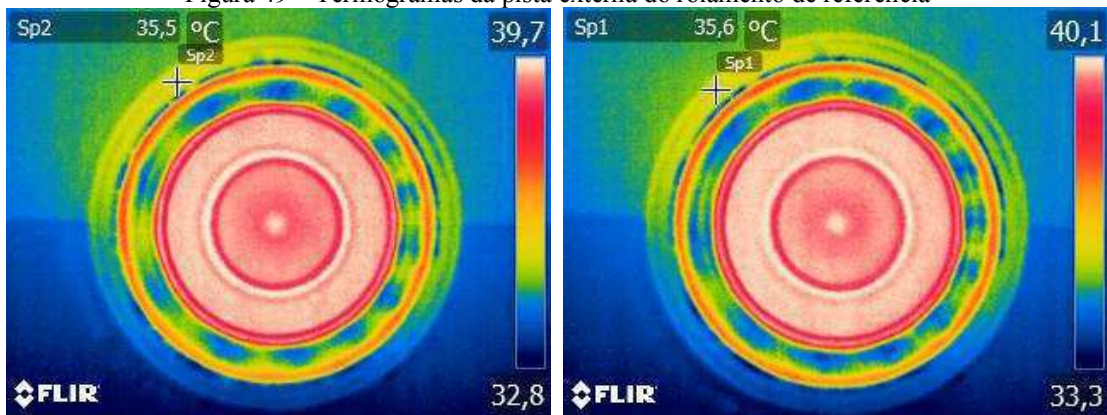


Fonte – Autoria própria

Na Figura 49 pode-se observar os termogramas da pista externa do rolamento de referência quando dos experimentos com a série B. Assim como exposto para a Fig. 47, representam a temperatura aos 60 minutos de cada experimento.



Figura 49 – Termogramas da pista externa do rolamento de referência

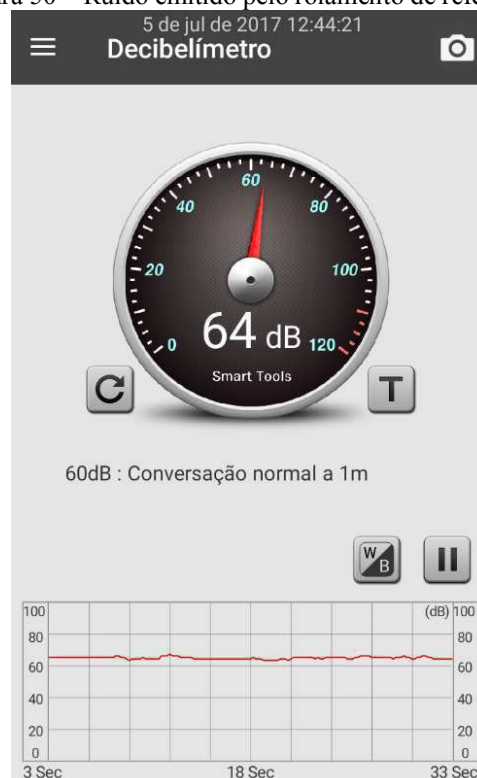


Fonte – Autoria própria

Pode-se perceber, nos termogramas da Figura 49, que há constância nas temperaturas da pista externa quando dos experimentos com os rolamentos da série B. As diferenças visuais nos termogramas deram-se pelo uso de isotermas para aferir com precisão o ponto mais quente da pista externa.

Ainda foi aferido o nível de ruído gerado pelo rolamento de referência para comparar com os níveis aferidos nos rolamentos com falhas por sulco e desgaste por abrasão. Na Fig. 50 pode-se observar que o rolamento de referência gerou ruído acústico na ordem de 64 dB.

Figura 50 – Ruído emitido pelo rolamento de referência



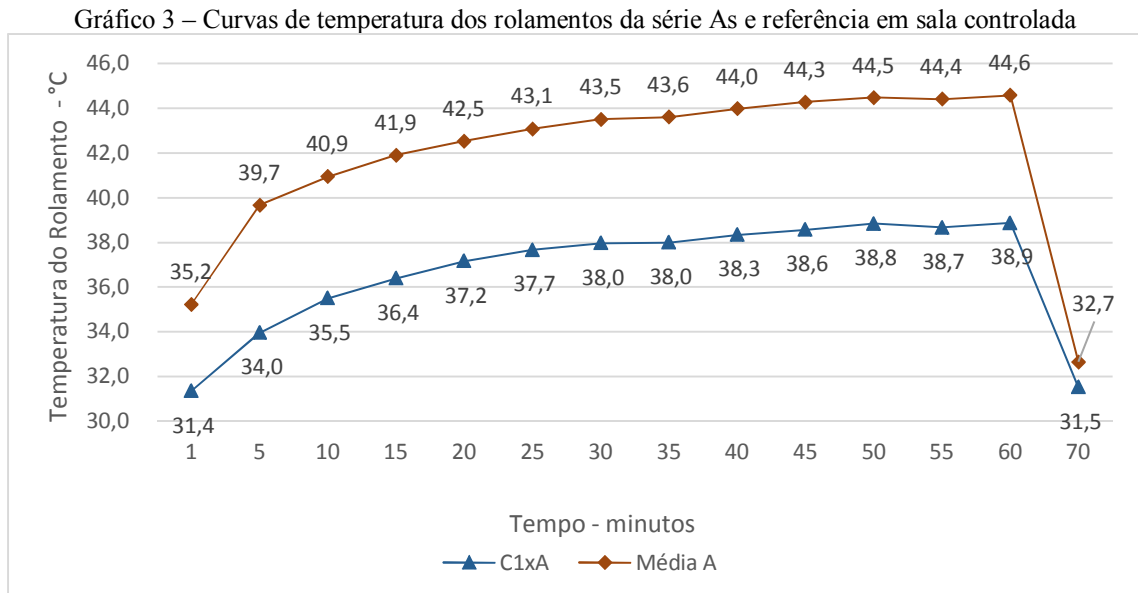
Fonte – Autoria própria

Com os gráficos e termogramas acima expostos, nota-se que há homogeneidade e confiabilidade nos dados de temperatura nas pistas interna e externa do rolamento de referência, obtidas nos experimentos com os rolamentos das séries A e B, e em ambientes controlado e não-controlado.

A seguir, serão expostos e discutidos os resultados aferidos nos rolamentos de referência e séries A e B, com falhas do tipo desgaste por abrasão e sulco, em ambientes controlado e não-controlado. Evidenciou-se por meio dos gráficos e termogramas as diferenças de temperatura entre os rolamentos de referência e rolamentos com falhas inseridas.

No Gráfico 3 pode-se observar os rolamentos As, com falha tipo sulco de 3 mm, e rolamento de referência C1 em experimento com sala controlada à 22° C. A homogeneidade das curvas reflete a consistência dos dados e mostra que o aumento de temperatura nas pistas atinge a estabilidade, com pequena variação, aos 40 minutos. O rolamento de referência C1 inicia com 31,4° C e alcança 38,9° C. O rolamento As inicia com 35,2° C e alcança 44,6° C.

A partir de então e até os 60 minutos, as temperaturas tendem a manter-se estabilizadas. Quando aos 60 minutos o motor é desligado, a partir daí elas diminuem devido à transferência de calor por condução, convecção e radiação entre os elementos envolvidos, ou seja, rolamentos, eixos, mancais e a sala.



Os mancais com os rolamentos podem ser observados na Figura 51. À esquerda, o mancal com o rolamento de referência C1 e à direita o rolamento As.

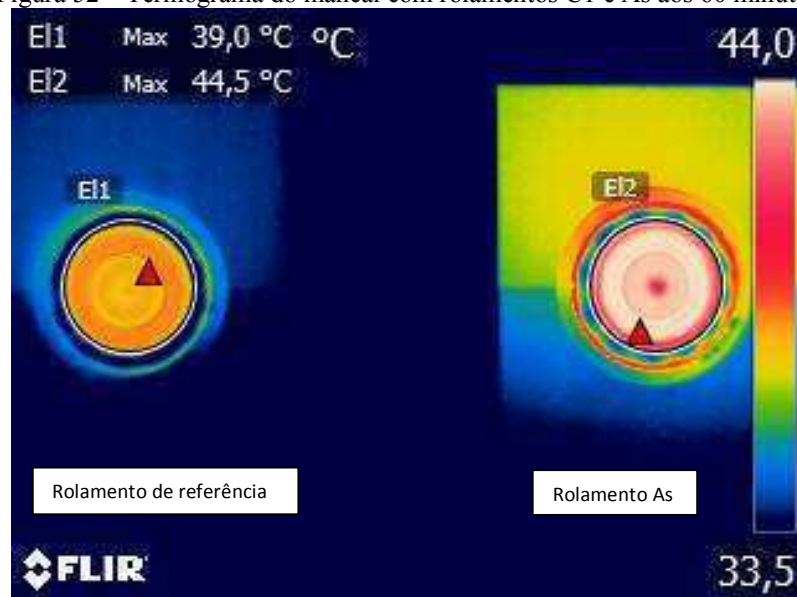
Figura 51 – Mancal com os rolamentos de referência e rolamento As



Fonte – Autoria própria

Na Figura 52 pode ser observado o termograma comparativo do mancal com rolamento de referência C1 e o rolamento As e, suas temperaturas aos 60 minutos de cada experimento. Percebe-se visualmente a diferença de temperatura pelas cores. Do lado esquerdo está o rolamento de referência e do lado direito está o rolamento As.

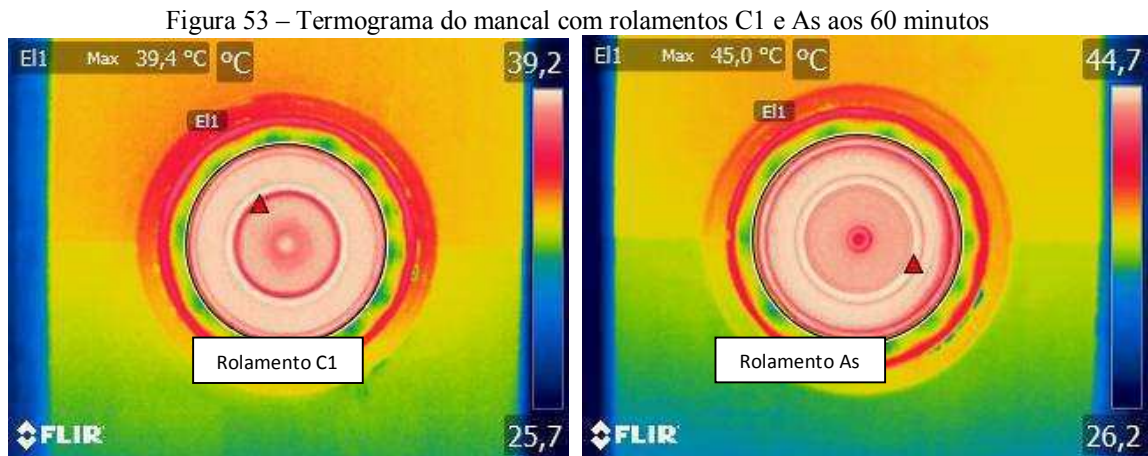
Figura 52 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e As aos 60 minutos



Fonte – Autoria própria



Na Figura 53 observam-se os termogramas individuais dos rolamentos C1 e As, respectivamente.



Na Figura 54 pode-se observar à esquerda a pista interna do rolamento antes do experimento e à direita a pista interna depois do experimento. Nota-se que não houve, em termos visuais, alteração em sua aparência física.

Figura 54 – Pista interna do rolamento com sulco de 3 mm antes e depois do experimento, respectivamente



O ruído gerado pelo rolamento As foi medido para comparar com os níveis aferidos no rolamento C1. Na Fig. 55 pode-se observar que o rolamento As gerou ruído acústico na ordem

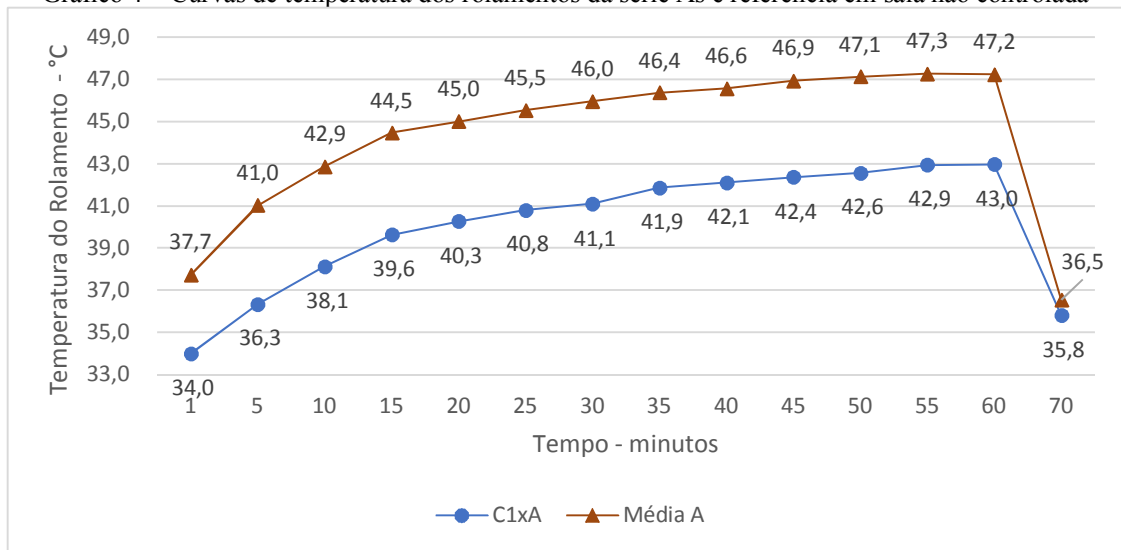
de 83 dB, ou seja, a falha de 3 mm na pista interna gerou ruído acústico de 19 dB acima do nível aferido no rolamento C1.



Fonte – Autoria própria

No Gráfico 4 pode-se observar os rolamentos As e rolamento de referência em experimento em ambiente não controlado. O gráfico gerado assemelha-se fortemente ao gráfico obtido em ambiente controlado à exceção dos valores aferidos, ou seja, as curvas de temperatura deslocam-se para cima devido ao fato da temperatura ambiente ser maior que a temperatura em ambiente controlado. Ademais, o nível de ruído é o mesmo, os termogramas também se assemelham, exceto os valores encontrados conforme explicado acima.

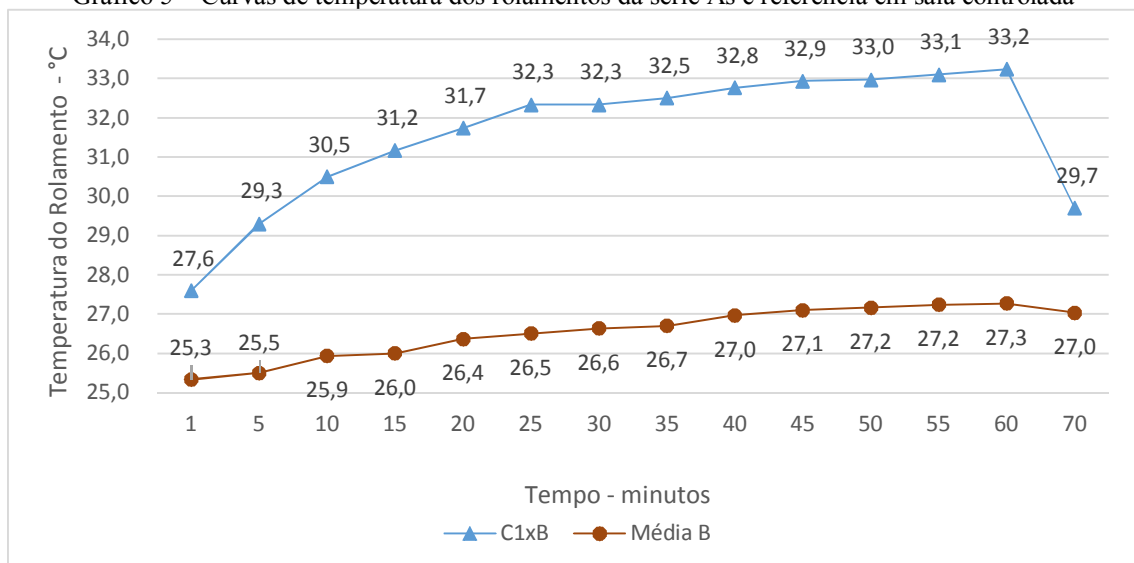
Gráfico 4 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série As e referência em sala não controlada



Fonte – Autoria própria

No Gráfico 5 pode-se observar os rolamentos Bs, com falha tipo sulco de 3 mm, e rolamento de referência em experimento com sala controlada à 22° C. Denota-se que o aumento de temperatura nas pistas atinge a estabilidade, com pequena variação, aos 40 minutos. O rolamento de referência C1 inicia com 27,6° C e alcança 33,2° C. A temperatura do rolamento Bs inicia com 25,3° C e alcança 27,0° C. A partir de então e até os 60 minutos, as temperaturas tendem a manter-se estabilizadas. Quando aos 60 minutos o motor é desligado, a partir daí elas diminuem devido à transferência de calor por condução, convecção e radiação entre os elementos envolvidos, ou seja, rolamentos, eixos, mancais e a sala.

Gráfico 5 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série As e referência em sala controlada



Fonte – Autoria própria

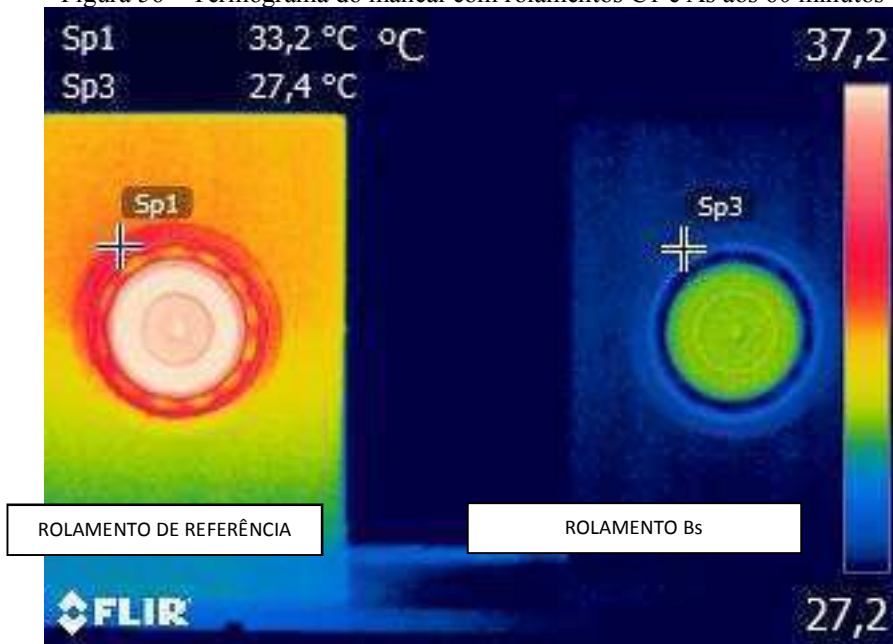
O resultado encontrado neste teste mostra que ao contrário do rolamento As, que teve temperaturas maiores que as temperaturas do rolamento C1, o rolamento Bs teve temperaturas menores que as temperaturas do rolamento C1. À primeira vista pensou-se que as medições estivessem erradas e os ensaios foram repetidos várias vezes e, novamente, as temperaturas estavam corretas, ou seja, o rolamento com defeito Bs apresentava temperatura menor que o rolamento de referência C1.

A explicação para tal fenômeno, segundo Moussa (2014) e baseada nos trabalhos de Sakamoto e Tsukizoe (1978), Sakamoto (1987) e Hess e Soom (1991) indicam que, sob carga harmônica, a área média de contato diminuiu, levando à força de fricção média reduzida. Seu modelo também sugeriu que a diminuição das forças de atrito devido ao carregamento dinâmico normal, quando não havia perda de contato, era de aproximadamente 10 % da força de atrito devido ao carregamento estático. Ou seja, a falha em forma de sulco de 3,0 mm faz com que os elementos rolantes saltitem na pista externa ao invés de rolaem normalmente. Com isso, a área de contato entre os elementos rolantes e a pista externa diminui, o atrito também diminui e o calor gerado diminui a tais valores que funciona como uma forma de refrigeração do rolamento.

Nesta linha de pensamento, Sakamoto *et al.* (2012) já haviam proposto modelo de cateter venoso para procedimentos de angioplastia que faz uso de vibração para diminuição do atrito entre o dispositivo e as paredes arteriais. O modelo mostrou diminuição de 33 % no valor do atrito gerado. Miller (2014) também desenvolveu patente americana de dispositivo que exerce o mesmo efeito anti-atrito nas paredes arteriais. Na indústria de alimentos, Schneider *et al.* (2009) descobriram que a vibração da ferramenta de corte facilitou a separação do material devido à redução do atrito médio deslizante. Eles propuseram que a liberação, temporária, das travas das superfícies de contato causadas por vibração ultra-sônica levou a uma redução do atrito médio.

Na Figura 56 pode ser observado o termograma comparativo do mancal com rolamento de referência C1 e o rolamento Bs e, suas temperaturas aos 60 minutos de cada experimento. Percebe-se visualmente a diferença de temperatura pelas cores. Do lado esquerdo está o rolamento de referência C1 e do lado direito está o rolamento Bs.

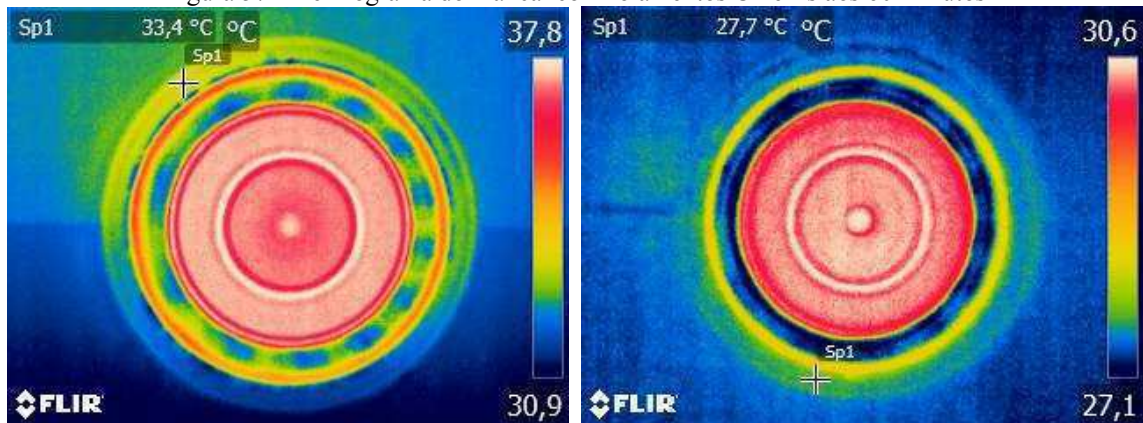
Figura 56 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e As aos 60 minutos



Fonte – Autoria própria

Na Figura 57 observam-se os termogramas individuais dos rolamentos C1 e Bs, respectivamente.

Figura 57 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Bs aos 60 minutos



Fonte – Autoria própria

Na Figura 58 pode-se observar à esquerda a pista externa do rolamento Bs antes do experimento e à direita a pista externa depois do experimento. Nota-se que houve registro de fortes marcas feitas pelos elementos rolantes na pista e lascamento na borda da falha circulado em vermelho na figura. Depreende-se que apesar do pouco número de horas de funcionamento, houve mudanças muito significativas na pista externa devido à falha inserida.

Figura 58 – Pista externa do rolamento com sulco de 3mm antes e depois do experimento, respectivamente



Fonte – Autoria própria

Ainda foi aferido o nível de ruído gerado pelo rolamento Bs para comparar com os níveis aferidos no rolamento C1. Na Fig. 59 pode-se observar que o rolamento Bs gerou ruído acústico na ordem de 78 dB, ou seja, a falha de 3 mm na pista externa gerou ruído acústico de 14 dB acima do nível aferido no rolamento C1.

Deve-se levar em consideração a proporcionalidade da falha de 3 mm na pista interna com comprimento de 53,4 mm e a proporcionalidade da falha na pista externa com comprimento de 147,6 mm, ou seja, a falha de 3 mm representa na pista externa aproximadamente 36 % do que representa na pista interna.

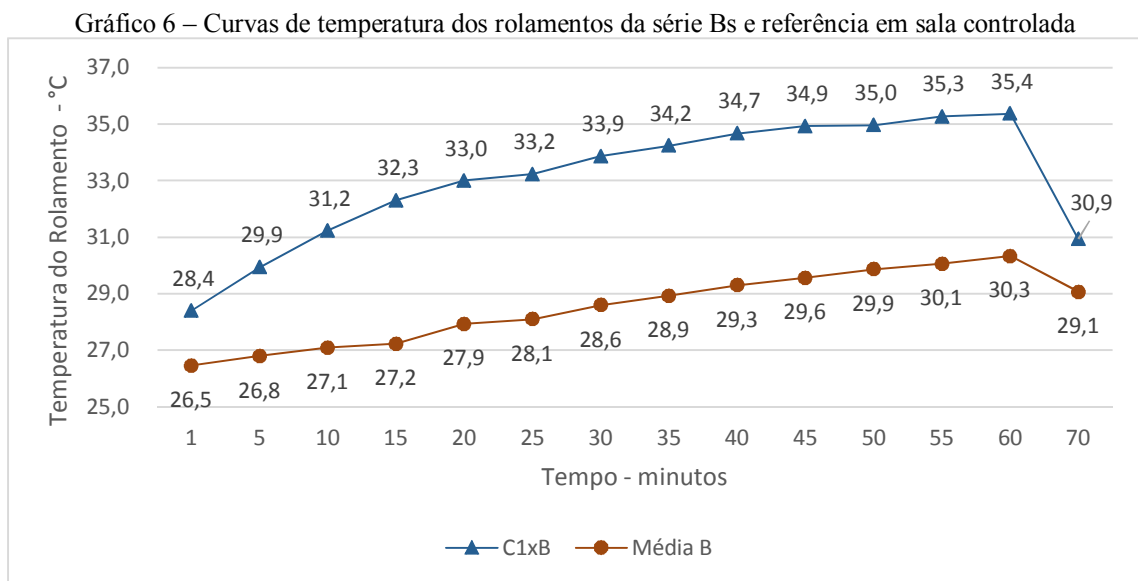
Figura 59 – Ruído emitido pelo rolamento Bs



Fonte – Autoria própria



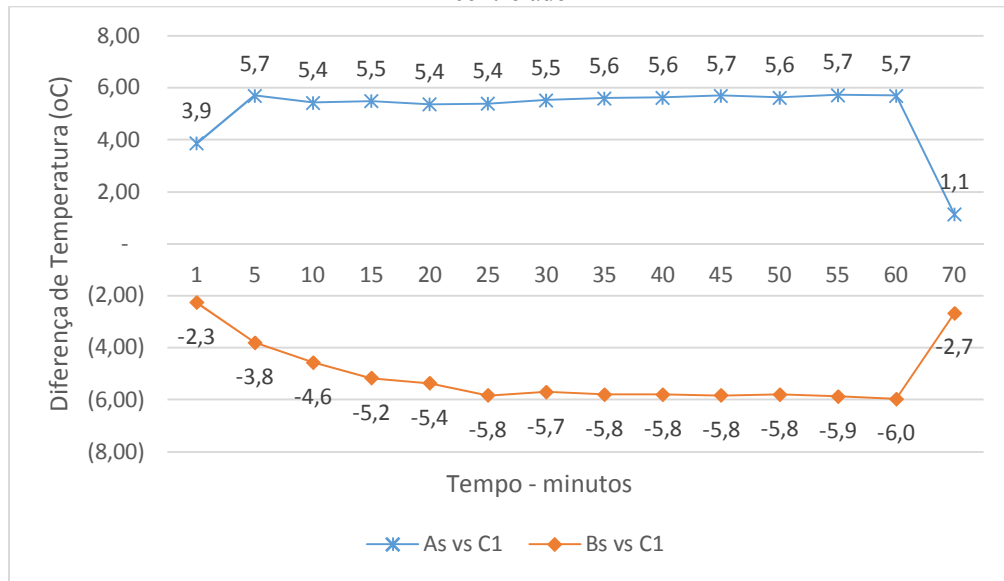
No Gráfico 6 pode-se observar as temperaturas do rolamento Bs e rolamento de referência C1 em experimento em ambiente não controlado. O gráfico gerado assemelha-se fortemente ao gráfico obtido em ambiente controlado diferenciando-se os valores aferidos, ou seja, as curvas de temperatura deslocam-se para cima devido ao fato da temperatura ambiente ser maior que a temperatura em ambiente controlado. Além disso, o nível de ruído é o mesmo e, os termogramas também se assemelham, à exceção dos valores encontrados conforme explicado acima.



Um último achado interessante no tocante aos rolamentos As e Bs, foram as curvas com as diferenças de temperatura entre o rolamento com falha e o rolamento de referência C1. As curvas mostraram-se simétricas denotando a consistência dos dados aferidos.

No Gráfico 7 e em ambiente controlado nota-se, em azul, a curva de diferença de temperatura entre o rolamento As e C1 e, em laranja, a curva de diferença de temperatura entre o rolamento Bs e C1, expondo diferença negativa.

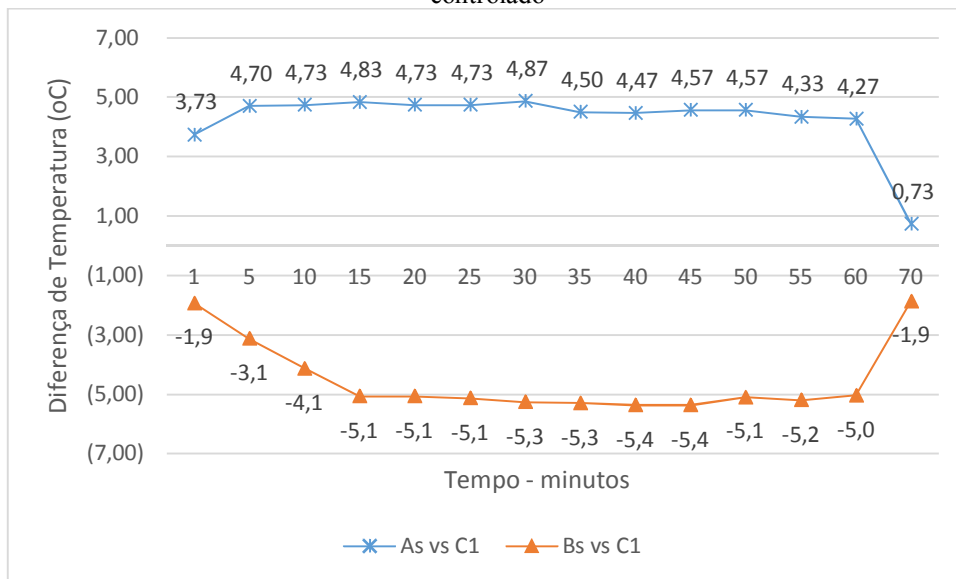
Gráfico 7 – Diferença de temperatura rolamento de referência versus rolamentos As e Bs em ambiente controlado



Fonte – Autoria própria

No Gráfico 8 e em ambiente não controlado nota-se, em azul, a curva de diferença de temperatura entre o rolamento As e C1 e, em laranja, a curva de diferença de temperatura entre o rolamento Bs e C1, expondo diferença negativa.

Gráfico 8 – Diferença de temperatura rolamento de referência versus rolamentos As e Bs em ambiente não controlado

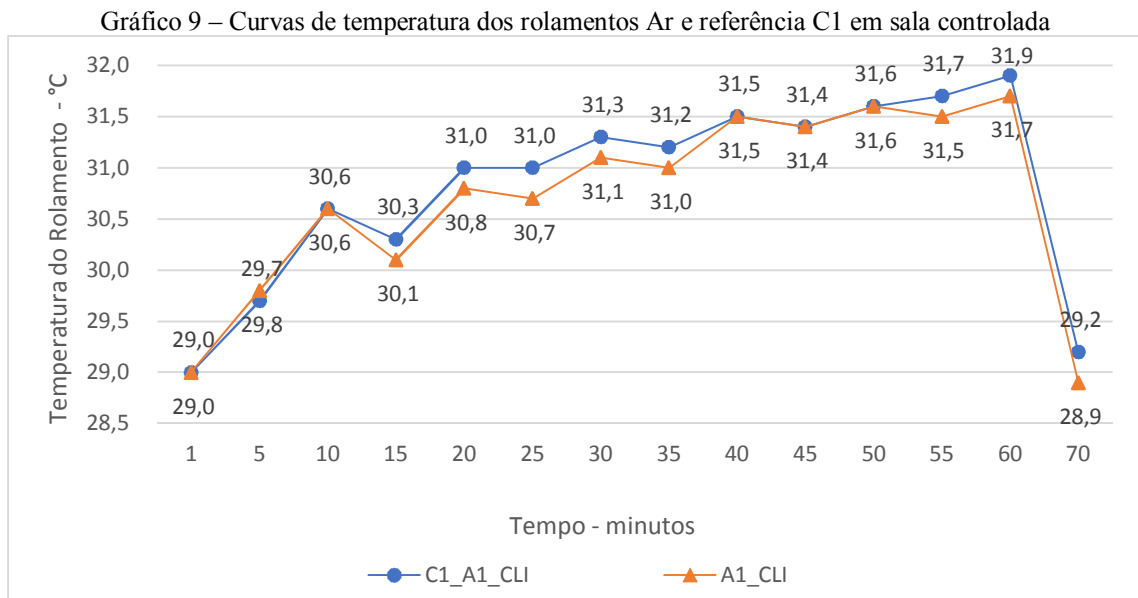


Fonte – Autoria própria



No Gráfico 9 pode-se observar os rolamentos Ar, com falha tipo desgaste por abrasão de 3 mm, e rolamento de referência C1 em experimento com sala controlada à 22° C. Neste gráfico pode-se observar que as curvas demonstram a consistência dos dados e expõem que o aumento de temperatura nas pistas atinge a estabilidade, com pequena variação, aos 40 minutos. O rolamento de referência C1 inicia com 29,0° C e alcança 31,9° C. O rolamento Ar inicia com 29,0° C e alcança 31,7° C.

A partir de então e até os 60 minutos, as temperaturas tendem a manter-se estabilizadas. Quando aos 60 minutos o motor é desligado, a partir daí elas diminuem devido à transferência de calor por condução, convecção e radiação entre os elementos envolvidos, ou seja, rolamentos, eixos, mancais e a vizinhança.

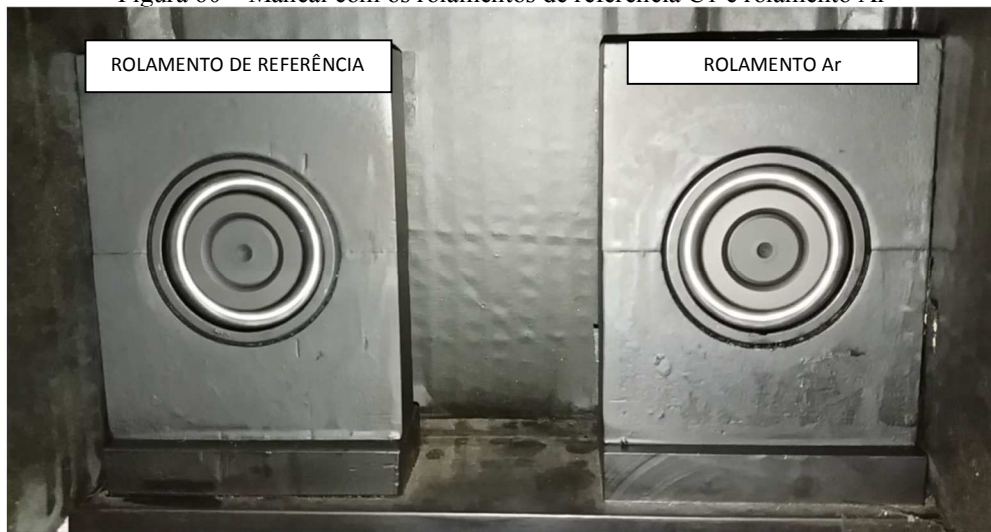


Fonte – Autoria própria

Do Gráfico 9 depreende-se que o desgaste por abrasão de 3 mm inserido na pista interna não foi suficiente para aumentar a temperatura de maneira a destacar-se da medição ora aferida no rolamento de referência C1. Explica-se isto, pelo fato da energia mecânica gerada converter-se em energia acústica e não foi suficiente para a geração de energia térmica para que fosse percebida pela Termografia.

Os mancais com os rolamentos podem ser observados na Figura 60. À esquerda, o mancal com o rolamento de referência C1 e à direita o rolamento Ar.

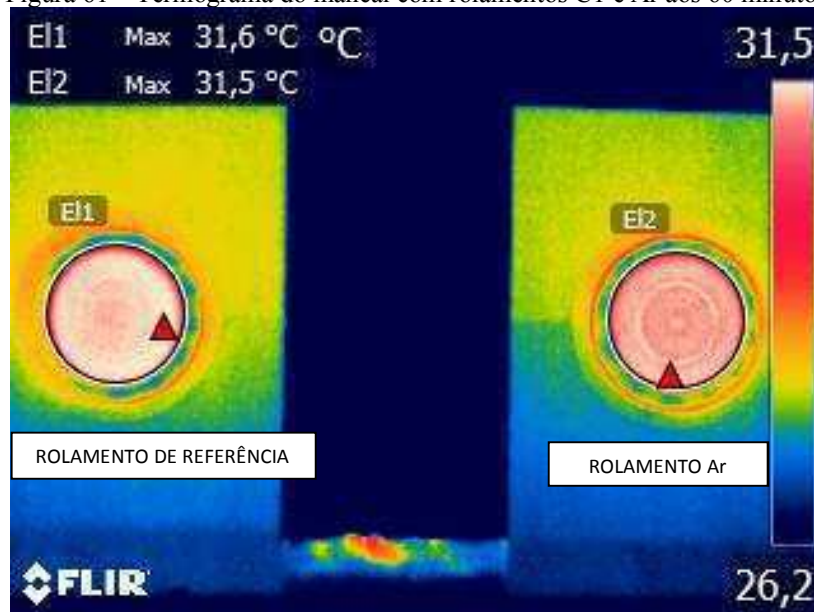
Figura 60 – Mancal com os rolamentos de referência C1 e rolamento Ar



Fonte – Autoria própria

Na Figura 61 pode ser observado o termograma comparativo do mancal com rolamento de referência C1 e o rolamento Ar e, suas temperaturas aos 60 minutos de cada experimento. Percebe-se visualmente a diferença praticamente nula de temperatura pelas cores. Do lado esquerdo está o rolamento de referência e do lado direito está o rolamento Ar.

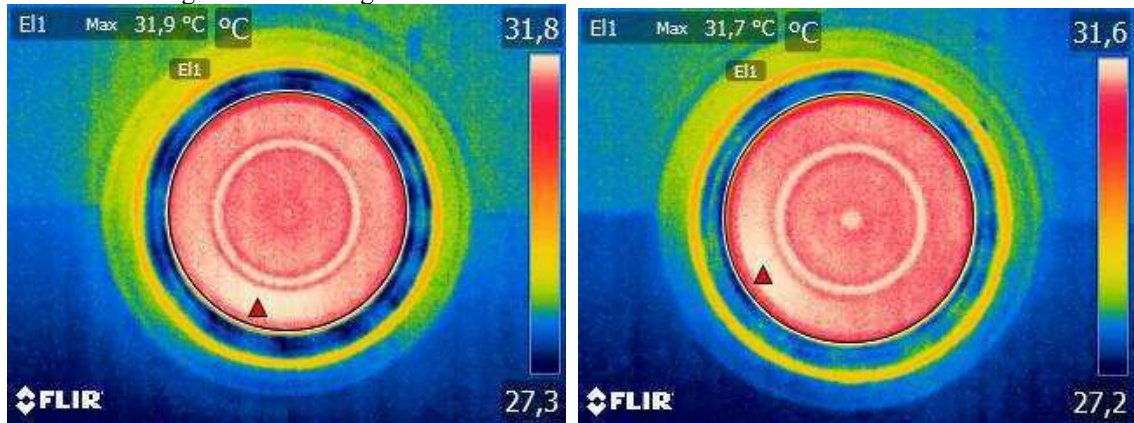
Figura 61 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Ar aos 60 minutos



Fonte – Autoria própria

Na Figura 62 observam-se os termogramas individuais dos rolamentos C1 e Ar, respectivamente.

Figura 62 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Ar aos 60 minutos



Fonte – Autoria própria

Na Figura 63 pode-se observar a pista interna do rolamento após o experimento. Verificou-se que não houve, em termos visuais, alteração em sua aparência física.

Figura 63 – Pista interna do rolamento com desgaste por abrasão de 3 mm após o experimento



Fonte – Autoria própria

Ainda foi aferido o nível de ruído gerado pelo rolamento Ar para comparar com os níveis aferidos no rolamento C1. Na Fig. 64 pode-se observar que o rolamento Ar gerou ruído acústico na ordem de 69 dB, ou seja, a falha de 3mm na pista interna gerou ruído acústico de 4 dB acima do nível aferido no rolamento C1.

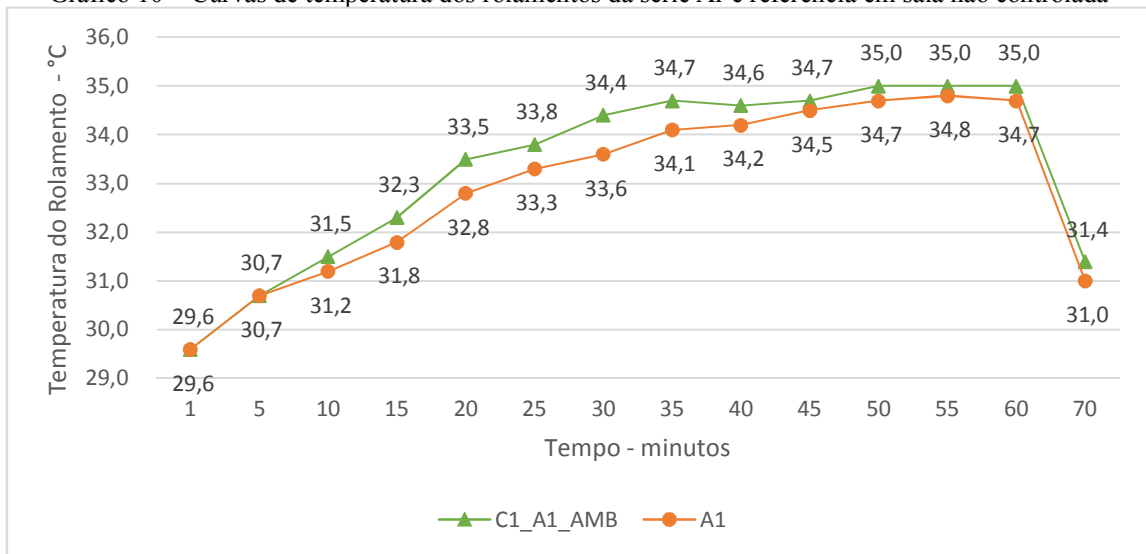
Figura 64 – Ruído emitido pelo rolamento Ar



Fonte – Autoria própria

No Gráfico 10 pode-se observar as temperaturas dos rolamentos Ar e rolamento de referência em experimento em ambiente não controlado. O gráfico gerado assemelha-se fortemente ao gráfico obtido em ambiente controlado diferenciando-se os valores aferidos, ou seja, as curvas de temperatura deslocam-se para cima devido ao fato da temperatura ambiente ser maior que a temperatura em ambiente controlado. Por outro lado, o nível de ruído é o mesmo e, os termogramas também se assemelham, a menos dos valores encontrados conforme explicado anteriormente.

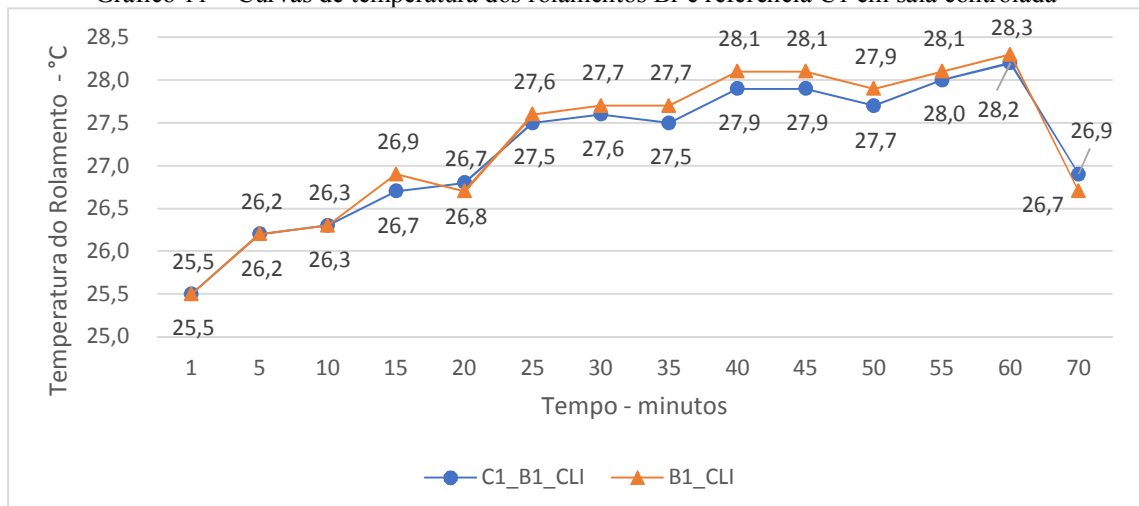
Gráfico 10 – Curvas de temperatura dos rolamentos da série Ar e referência em sala não controlada



Fonte – Autoria própria

No Gráfico 11 pode-se observar os rolamentos Br, com falha tipo desgaste por abrasão de 3 mm, e rolamento de referência C1 em experimento com sala controlada à 22° C. A homogeneidade das curvas reflete a consistência dos dados e mostra que o aumento de temperatura nas pistas atinge a estabilidade, com pequena variação, aos 40 minutos. O rolamento de referência C1 inicia com 25,5° C e alcança 28,3° C. O rolamento Br inicia com 25,5° C e alcança 28,2° C. A partir de então e até os 60 minutos, as temperaturas tendem a manter-se estabilizadas. Quando aos 60 minutos o motor é desligado, a partir daí elas diminuem devido à transferência de calor por condução, convecção e radiação entre os elementos envolvidos, ou seja, rolamentos, eixos, mancais e a sala.

Gráfico 11 – Curvas de temperatura dos rolamentos Br e referência C1 em sala controlada

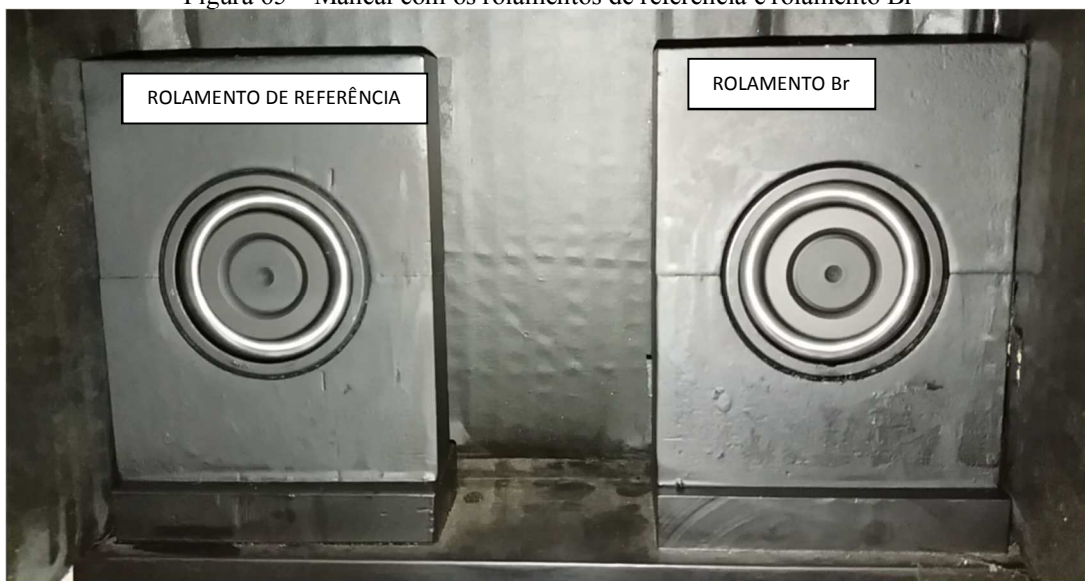


Fonte – Autoria própria

Do Gráfico 11 observa-se que o desgaste por abrasão de 3 mm inserido na pista externa não foi suficiente para aumentar a temperatura de maneira a destacar-se da medição ora aferida no rolamento de referência C1. Explica-se isto, pelo fato da energia mecânica gerada converteu-se em energia acústica e não foi suficiente para a geração de energia térmica para que fosse percebida pela Termografia.

Os mancais com os rolamentos podem ser observados na Figura 65. À esquerda, o mancal com o rolamento de referência C1 e à direita o rolamento Br.

Figura 65 – Mancal com os rolamentos de referência e rolamento Br

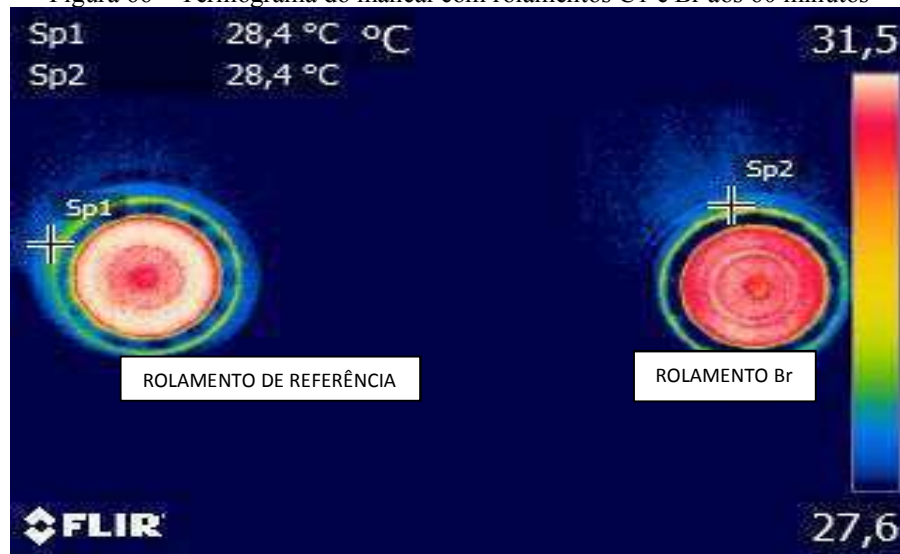


Fonte – Autoria própria

Na Figura 66 pode ser observado o termograma comparativo do mancal com rolamento de referência C1 e o rolamento Br e, suas temperaturas aos 60 minutos de cada experimento. Percebe-se visualmente a diferença de temperatura pelas cores. Do lado esquerdo está o rolamento de referência e do lado direito está o rolamento Br.



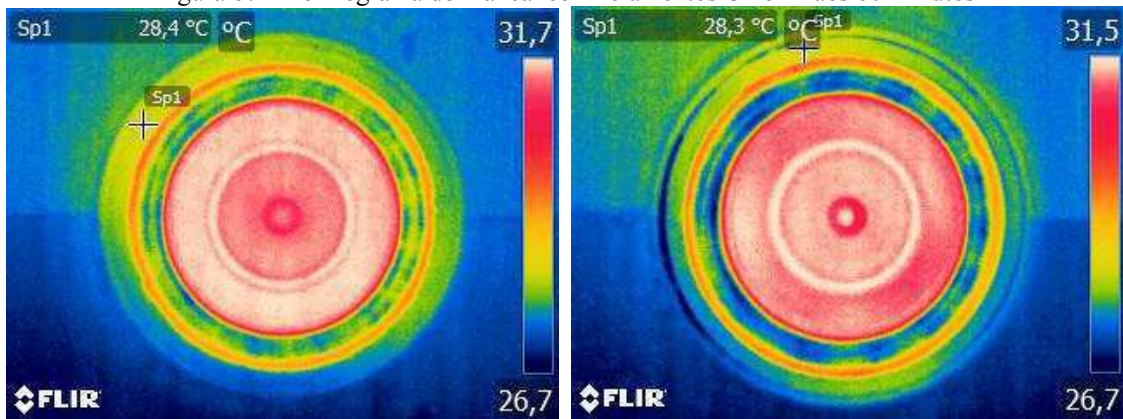
Figura 66 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Br aos 60 minutos



Fonte – Autoria própria

Na Figura 67 observam-se os termogramas individuais dos rolamentos C1 e Br, respectivamente.

Figura 67 – Termograma do mancal com rolamentos C1 e Br aos 60 minutos



Fonte – Autoria própria

Na Figura 69 pode-se observar a pista interna do rolamento após o experimento. Verificou-se que não houve, em termos visuais, alteração em sua aparência física, apenas marcas dos elementos rolantes na pista.

Figura 69 – Pista externa do rolamento com desgaste por abrasão de 3 mm após o experimento



Fonte – Autoria própria

Ainda foi aferido o nível de ruído gerado pelo rolamento Br para comparar com os níveis aferidos no rolamento C1. Na Fig. 70 pode-se observar que o rolamento Br gerou ruído acústico na ordem de 69 dB, ou seja, a falha de 3 mm na pista interna gerou ruído acústico de 4 dB acima do nível aferido no rolamento C1.

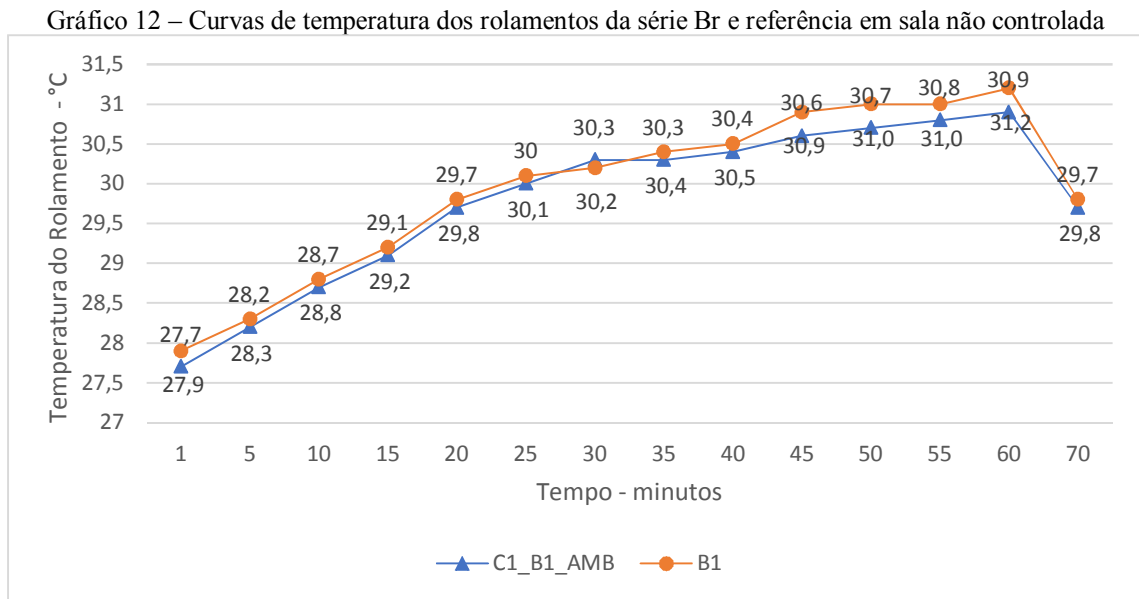
Figura 70 – Ruído emitido pelo rolamento Br



Fonte – Autoria própria

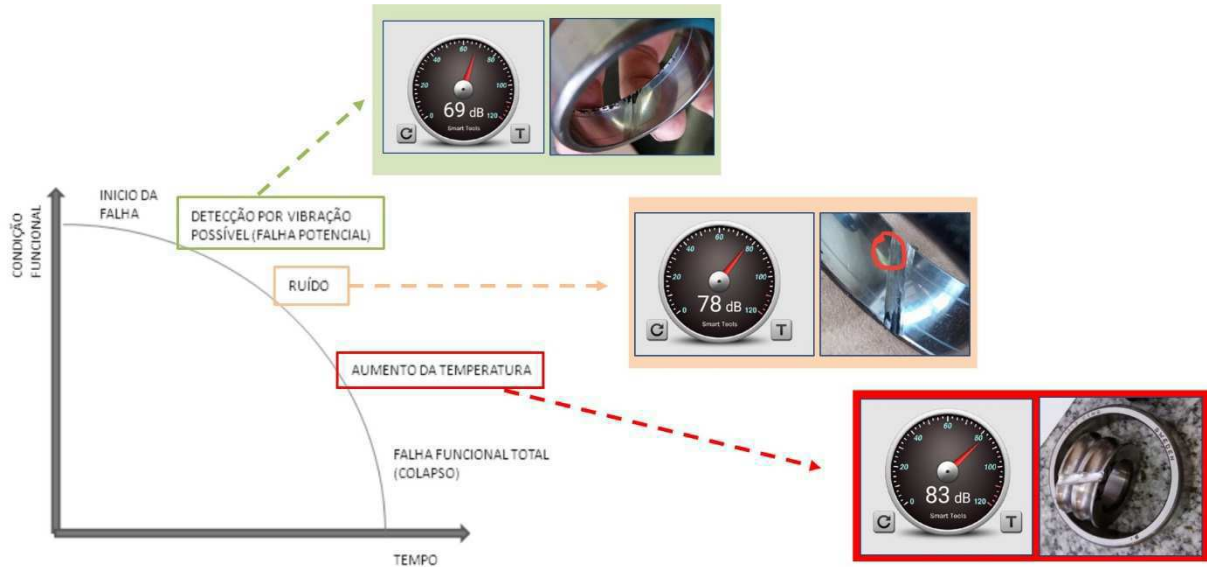


No Gráfico 12 pode-se observar os rolamentos Br e rolamento de referência C1 em experimento em ambiente não controlado. O gráfico gerado assemelha-se ao gráfico obtido em ambiente controlado com valores medidos diferentes, ou seja, as curvas de temperatura deslocam-se para cima devido ao fato da temperatura ambiente ser maior que a temperatura em ambiente controlado. Ademais, o nível de ruído é o mesmo e, os termogramas também se assemelham, exceto pelos valores encontrados conforme explicado.



Na Figura 71 pode-se observar gráfico adaptado de Aleganzi (2012) em que são expostos 3 resultados desta pesquisa com relação ao estágio da falha do rolamento autocompensador. Inicialmente não há variação significativa de temperatura, a seguir tem-se que o ruído gerado aumenta com o tipo de falha, por último detecta-se o aumento significativo de temperatura na falha.

Figura 71 – Exposição da falha de acordo com o tipo da mesma



Fonte – Adaptado de Aleganzi (2012)

Fonte – A autoria própria

De posse de todo o exposto, percebe-se que os dados aferidos são consistentes e condizentes com os estudos relatados no Capítulo 2. No próximo capítulo serão expostas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO V

### 5.0 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho procurou-se responder a seguinte questão básica: Pode a Termografia auxiliar na detecção de falhas por desgaste mecânico em rolamentos autocompensadores com 2 carreiras de esferas sob carregamento radial constante? A hipótese era que sim, pois a energia dos impactos das esferas de encontro às falhas não só geraria calor em intensidade maior, devido à presença de um carregamento constante, como definiria o local onde a falha foi inserida. Para tanto foi realizada uma revisão na literatura envolvendo os temas relativos à problemática inicial, estabeleceu-se a metodologia de trabalho e após apresentar e discutir os resultados é possível afirmar que:

- *quanto à localização da falha atípica inserida nas pistas do rolamento*: a Termografia não evidenciou emissão de calor que pudesse confirmar a presença de falhas no objeto estudado, no caso, as pistas interna e externa do rolamento autocompensador de 2 carreiras de esferas, sem blindagem;

- *quanto ao tipo da falha inserida nas pistas do rolamento*: a técnica da Termografia consegue detectar a falha do tipo sulco, mas não a do tipo por desgaste abrasivo. Isto foi percebido em função das esferas do rolamento ao passarem pela falha do tipo sulco, na pista externa, perderem momentaneamente o contato físico com a pista diminuindo a geração de atrito e, conseqüentemente, a geração de calor. Tal fenômeno não foi observado na pista interna do rolamento com a mesma inserção de falha. Isto se deu em função da pista interna ser de dimensão linear muito menor quando comparada à pista externa do rolamento, resultando maior contato físico entre os elementos rolantes e a pista interna, gerando com isto maior quantidade de calor. Devido a estes fenômenos relatados a Termografia se mostrou útil na detecção destes tipos de falhas. Por sua vez, as falhas do tipo desgaste abrasivo inseridas nas pistas interna e externa do rolamento não geraram variações térmicas significativas que confirmassem a presença de tal falha por meio da técnica da Termografia. Isto se deu em função do calor gerado pelas esferas, quando passa pelo desgaste abrasivo, ser rapidamente transportado ao longo do comprimento linear da pista devido aos fenômenos cinemáticos envolvidos;

- *quanto aos tipos de falhas e a elevação da temperatura em comparação ao elemento de referência sem falhas*: na falha do tipo sulco na pista externa não houve constatação de elevação de temperatura quando comparado ao elemento de referência sem falhas. Já na falha

do tipo sulco na pista interna houve constatação de elevação da temperatura e na falha por desgaste abrasivo não foi observada elevação significativa de temperatura;

- *quanto à validade da Termografia na detecção de falhas:* é possível concluir que a técnica é válida para alguns casos como, por exemplo, a falha do tipo sulco em razão da mesma conseguir detectar as variações térmicas produzidas nos contatos mecânicos entre os elementos rolantes e pistas causados pelos choques destes elementos constituintes. No entanto, para falhas do tipo desgaste abrasivo a técnica se mostrou pouco eficiente na detecção das variações térmicas envolvidas.

Diante do exposto, conclui-se, neste trabalho, que a hipótese inicial foi parcialmente confirmada, isto é, a Termografia pode sim auxiliar a detectar as falhas mecânicas, mas falhas do tipo sulco e não as falhas do tipo desgaste abrasivo. E, como o trabalho não se encerra neste, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- realizar novos estudos envolvendo a variação do tipo, do tamanho e da quantidade de falhas inseridas nas pistas interna e externa;

- realizar pesquisa envolvendo a influência do formato das falhas inseridas nas pistas dos rolamentos;

- realizar experimentos envolvendo a inserção de falhas nas esferas do rolamento;

- realizar testes envolvendo a inserção de falhas no separador de esferas do rolamento;

- realizar a modelagem matemática e a simulação computacional destas falhas e comparar com os resultados obtidos;

- variar parâmetros do experimento tipo: velocidade de rotação, carga radial, condições ambientais e verificar a sua influência na aquisição de dados termográficos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15424**: 2006 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Terminologia . Rio de Janeiro, 2006. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15572**: 2013 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15718**: 2009 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para verificação de termovisores. Rio de Janeiro, 2009. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16292**: 2014 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas. Rio de Janeiro, 2014. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16485**: 2016 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.

ALEGRANZI, Selvino Bork. **Construção e adequação de uma bancada de ensaios para investigações de técnicas não-destrutivas de detecção de falhas incipientes em rolamentos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Mestrado em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, 2012. 99 p.

ALVARES, Ricardo Costa. **Diagnóstico de falhas em para-raios utilizando termografia**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais – Mestrado em Engenharia Elétrica. Minas Gerais, 2008. 119 p.

AZAD D., RAMJI K. Process plant reliability through infrared thermography. **International Journal of Applied Engineering Research**, Vol. 6, p. 1-9, 2011.

BANDES, A. (2012), **Ultrasonic condition monitoring**, Disponível em:<<http://www.uesystems.com/wp-content/uploads/2012/07/ultrasound-condition-monitoring-ue-v7.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

BANDES, A. **Ultrasound condition monitoring**. UE System Inc. 2014.

BARDEN BEARINGS. **Bearing failure: causes and cures**. Barden Precision Bearings, 2014

BEZERRA, Roberto de Araújo. **Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas – Doutorado em Engenharia Mecânica. Campinas, 2004. 152 p.

CARAMALHO, Alberto. **25 anos em termografia**. 1 ed. Portugal: Bubok, 2012. 474 p.

ÇENGEL, Yunus A. **Heat and mass transfer: fundamentals e applications**, 5°. Ed. New York: McGraw Hill, 2015

CHRZANOWSKI, Krzysztof. **Non-contact thermometry: measurement errors**. Research & Development Chapter, Treatises SPIE Polish Chapter, Vol. 7, Warsaw. Poland. 2001.

DAGNEW, Abiot. **Optimization of periodic maintenance using condition monitoring techniques and operational data**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade de Stavanger. Noruega, 2012. 58 p.

DOWSON, D. **Nasa Technical Memorandum – history of ball bearings**. 1981.

FLIR. **Flir E-Series Data Sheet**. Disponível em: <[http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography\\_USA/Products/Product\\_Literature/flir-e-series-datasheet.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_USA/Products/Product_Literature/flir-e-series-datasheet.pdf)> , Acesso em: 10 jan 2016.

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. -1°. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, 74.

HESS, D. P., SOOM, A. Normal Vibrations and Friction under Harmonic Loads: Part I - Hertzian Contacts. **Journal of Tribology**, vol.113, p. 80-86, jan. de 1991.

HOLMAN, J. P. **Heat transfer**, 10°. Ed. New York: McGraw Hill, 2010.

HONG, Dong-pyo. *et al.* A study on real-time fault monitoring detection method of bearing using the infrared thermography. **Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing**, vol. 33, p. 330-335, 2013.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7ª Edição, Ed. John Wiley & Sons, 2011.

INFRATEMP. **Termometria infravermelha – teoria básica.** Infrared Soluções para Processos Industriais. 2010.

KIM, Wontae. *et al.* Infrared thermography diagnosis for fault detection of the bearings under stage of abrasion. **Pan American Conference for NDT**, 5a. Ed., Cancun, México, out. de 2011.

KIM, Wontae. *et al.* Infrared thermography NDT for the fault diagnosis of bearing with foreign substances inside under loading condition. **11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)**, Praga, República Tcheca, out. de 2014.

KIM, Wontae, SEO. Jinju, HONG, Dong-pyo. Infrared Thermographic Inspection of Ball Bearing; Condition Monitoring for Defects under Dynamic Loading Stages. **Proceedings of the 18th World Conference of Non Destructive Testing**, Durban, South Africa, abril de 2012.

KUGELFISCHER, F., SCHAFER, G. **Rolling bearings and their contribution to the progress of technology.** Ed. 3a. Weppert Gmbh Co. Alemanha, 1986.

KURFESS, T. R. *et al.* **Advanced diagnostic and prognostic techniques for rolling elements bearing.** Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing - Springer. London, UK, 2016.

LABDAMP. **Metodologia geral para emissão de laudos preditivos por meio de termografia.** Disponível em:  
<<https://www.facebook.com/labdamp/photos/a.534675203269071.1073741825.385234801546446/647742658628991/?type=1&theater>> Acesso em 25 set 2016.

LEEST. **Normas sobre Termografia publicadas pela ABNT.** Laboratório de Engenharia Ergonomia e Segurança do Trabalho. UFCG, 2016.

LIENHARD, J. H. **A heat transfer textbook**, 4º. Ed. Cambridge: Phlogiston Press, 2017.

MAZIOUD, A. *et al.* **Detection of rolling bearing degradation using infrared thermography.** International Conference on Quantitative Infrared Thermography – QIRT, Ed. 9a., Krakow, Polonia, jul. de 2008.

MILLER, D. **Vibration catheter and methods of use.** Patente US 20140276923 A1, 2014. Disponível em:< <http://www.google.com/patents/US20140276923>>. Acesso em: 08 jul. 2017.

MOUSSA Wael., **Thermography-assisted bearing condition monitoring**. Tese de Doutorado, Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, University of Ottawa, Canada, 2014.

NUNEZ, J. A. *et al.* Low cost thermographic analysis for bearing fault detection in induction motors. **Journal of Scientific & Industrial Research**, Vol. 75, pp. 412-415, jul. de 2016.

RANJIT, Shrestha. *et al.* Quantitative evaluation for early defect detection of contaminated ball bearing by temperature mapping in infrared thermography. **International Journal of Applied Engineering Research**, vol. 9, número 21, pp. 9401-9409, nov. de 2014.

ROSALES, Juan. **Condition monitoring- a closer look at lubricating oil analysis**, Front & Sullivan, nov. 2006. Disponível em: <<http://www.frost.com/sublib/display-market-insight.do?id=87444743>>. Acesso em: Junho de 2016.

SAKAMOTO, T. *et al.* **Effects of Vibration on Frictional Resistance during Angioplasty Device Insertion: Possible Application of a Newly Designed Support System to Complex Coronary Intervention**. Journal of the American College of Cardiology, 2012.

SAKAMOTO, T. Normal Displacement and Dynamic Friction Characteristics in a Stick-Slip Process. **Journal Article Tribology International**, vol. 20, pp. 25-31, 1987.

SAKAMOTO, T., TSUKIZOE, T. **Metal Transfer in the Frictional Contact of a Rough Hard Surface**. Wear, vol. 47, ed. 2, abril de 1978, pp. 301-313, 1978.

SARUHAN, H. *et al.* Vibration analysis of rolling elements bearings defects. **Journal of Applied Research and Technology**, vol. 12, pp. 384-385, jun. de 2014.

SCHNEIDER, Y. *et al.* **Ultrasonic excitation affects friction interactions between food materials and cutting tools**. Ultrasonics, vol. 20, pp. 6-7, jun. de 2009.

SEO, J. *et al.* Infrared thermographic diagnosis mechanism for fault detection of ball bearing under dynamic loading conditions. **Proceedings of the 18th World Conference of Non Destructive Testing**, Durban, South Africa, abril de 2012.

SILVA JÚNIOR, J. **Análise de óleos lubrificantes sob a ótica da termografia em ensaios de atrito cisalhante**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande – Mestrado em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2017, 165 p.



SILVA, E. L. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação** – 4.Ed. – Florianópolis: UFSC, 2005

SINGH, R. C. Analysis of ball bearings under dynamic loading using non-destructive technique of thermography. **International Journal of Advance Research and Innovation**, vol. 2, pp. 781-783, dez. de 2014.

Site de imagens Google Images. Disponível em:<<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi&ei=Px5lWYvBB8GpwATw8YbYBA&ved=0EKouCBYoAQ>> Acesso em: 16 jun. 2017.

SKF. **High temperature bearings for operating temperatures up to 350 °C (660 °F)**. PUB BU/P2 14961 EN, SKF Group, Dezembro, 2014.

SLOCUM, Alexander. **Fundamentals of design – bearings**. Departamento de Engenharia Mecânica – MIT, 2008, 32 p.

USAMENTIAGA, R. *et al.* Infrared Thermography for temperature measurement and non-destructive testing. **Sensors Journal**, vol. 14, pp. 2305-12348, Jul. 2014.

WRIGHT, J. **Technologies, techniques for acoustic/ultrasonic regreasing**, 2010. Disponível em:< <http://www.machinerylubrication.com/Read/22934/acousticultrasonic-regreasing>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

## APÊNDICE A

Este apêndice versa sobre detalhes das fases 2, 3, 4, 5 e 6 do processo metodológico que foram suprimidos no capítulo 3.

Na Fase 2 houve a preparação dos rolamentos e para esta pesquisa foi escolhido o rolamento do tipo autocompensador de 2 carreiras de esferas e não blindado pelo fato do mesmo proporcionar facilidade na sua desmontagem e montagem.

Após a desmontagem dos rolamentos, foram inseridas falhas dos tipos sulco e desgaste por abrasão nas pistas interna e externa com comprimento de 3 mm. Para tanto, fez-se uso de ferramentas como disco de diamante para corte, furadeira elétrica e torno morsa. A Figura A1 oferece maiores informações com relação às falhas inseridas.

Figura A1 – Ferramentas utilizadas para inserção de falhas



Fonte - Autoria própria

Para a consecução da emissividade de 0,98, foi feita a pintura das faces dos rolamentos com tinta spray fosca com emissividade de mesmo valor. Para isto fez-se o isolamento com fita adesiva das pistas interna e externa deixando exposta apenas a face das mesmas. Procedeu-se a pintura e após a secagem os rolamentos foram montados e aptos para os experimentos. Vide Figura A2 para maiores informações.

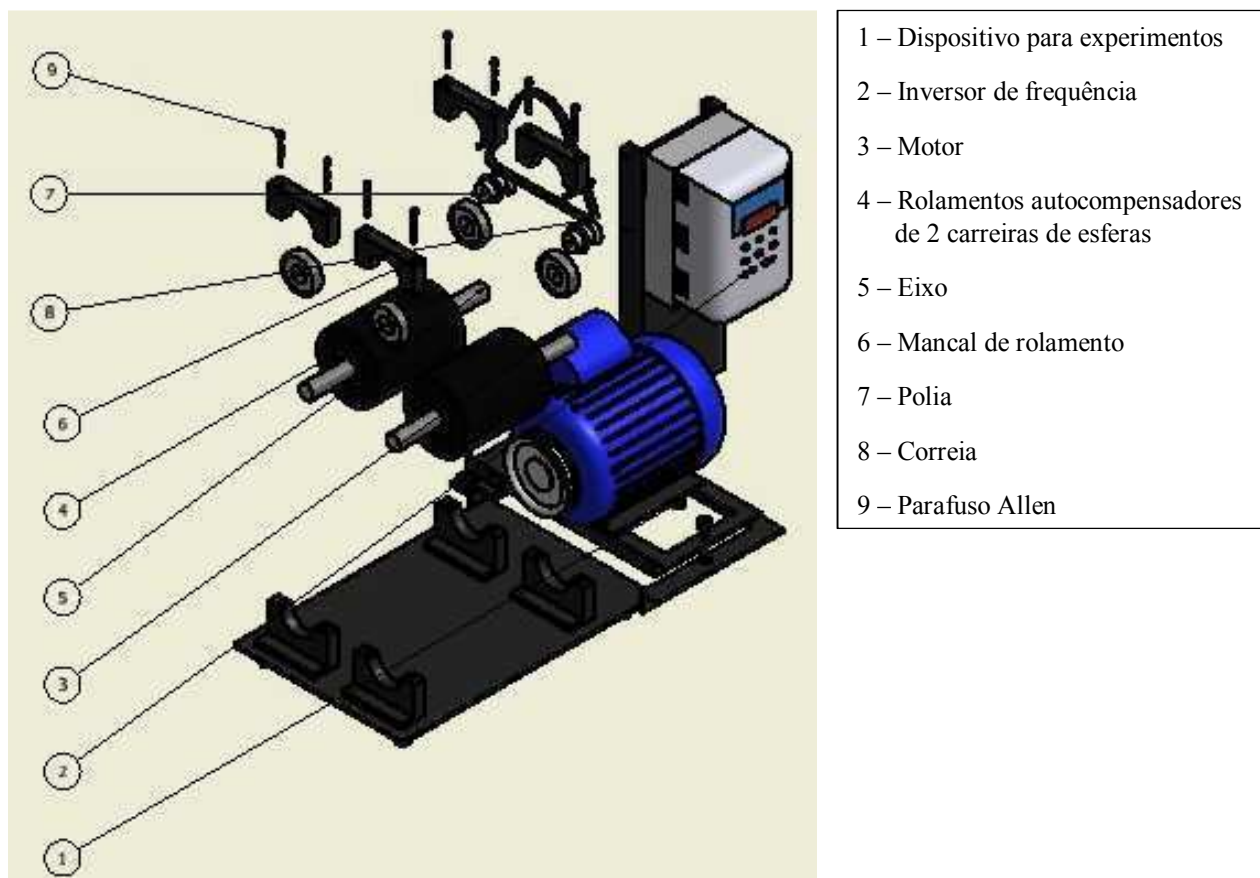
Figura A2 – Pintura das faces dos rolamentos



Fonte – Autoria própria

Já na Fase 3, foi feita a confecção dos componentes e dispositivo para testes. Para que esta fase obtivesse êxito, fez-se uso de dispositivo mecânico especialmente construído para este fim. Na Figura A3 observa-se o desenho do dispositivo e seus componentes.

Figura A3 – Desenho mecânico do dispositivo



Fonte - Autoria própria

Os componentes do dispositivo foram confeccionados conforme especificações estabelecidas previamente. Cada mancal bipartido possui dimensões de 75 mm de base, 90 mm de altura, 16 mm de espessura e 47 mm de diâmetro no furo interno para acondicionamento do rolamento SKF 1303. São usados 2 parafusos tipo Allen de 5 mm para fixação da parte superior na parte inferior.

Outro componente mecânico confeccionado foram os 2 eixos em aço que possuem dupla função. A primeira função consiste em transmitir o torque do motor via mancais de rolamentos primários (sem falhas inseridas) e conjunto de polias para os mancais de rolamentos secundários (com falhas inseridas). A segunda função é servir de suporte para o cilindro em aço de massa 5,8 kg. Este cilindro exerce a função de carga radial sobre o eixo dos rolamentos simulando uma situação real de maquinário.

O eixo foi confeccionado em aço SAE 1020, comprimento de 360 mm e diâmetro de 17 mm. Já o cilindro que serviu de carga radial foi confeccionado em aço SAE 1020, comprimento

de 160 mm, diâmetro externo de 87 mm, diâmetro interno de 20 mm para acondicionamento do eixo rotor e que ao final tenha massa de 5,8 kg.

Necessitou-se também de 5 amortecedores de impacto-vibração da marca Vibra-Stop e modelo Micro II 3/8" com capacidade individual de 70 kg. Tais amortecedores foram conectados à base em aço do dispositivo por meio de parafusos e distribuídos de forma a harmonizar a massa sobre cada componente sem sobrecarregar os demais amortecedores.

O conjunto de polias de transmissão foi adquirido no mercado local. Foram 3 polias em alumínio sendo 2 polias com diâmetro de 60 mm e 1 polia com diâmetro de 120 mm. Com esta relação de 2:1 conseguiu-se rotações de até 3.400 rpm com o inversor de frequência WEG.

O conjunto motor-inversor de frequência foi adquirido no mercado local. O inversor de frequência é da marca WEG e modelo CFW08. O motor é da marca WEG, potência de 0,5cv, tensão trifásica em 380 V e rotação de 1.700 rpm. Pelo fato do motor ser limitado a 1.700 rpm, foi-se necessária a compra do conjunto de polias em alumínio com razão 2:1 para garantir rotação de até 3.400 rpm dos eixos.

A base do dispositivo foi confeccionada em aço SAE 1020 e projetada para receber os componentes de maneira que os mesmos pudessem funcionar sem interferências externas e de forma harmoniosa. Nela, foram acondicionados todos os componentes supracitados após todos receberem pintura com tinta fosca na cor preta. Na Figura A4 pode-se notar o dispositivo após a confecção do mesmo e seus componentes.

Figura A4 – Dispositivo montado para experimentos



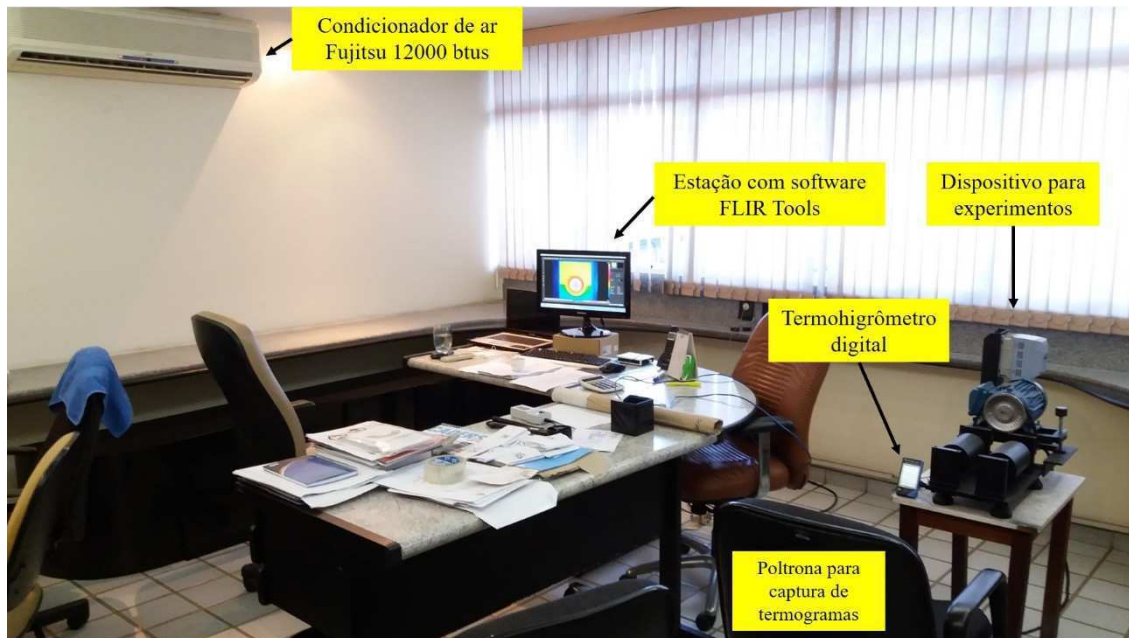
Fonte - Autoria própria



Na Fase 4 da metodologia foi feita a preparação do ambiente e configuração do termovisor. A primeira etapa, nominada Etapa 4.1, denota-se pela preparação do ambiente em que os experimentos foram conduzidos. O ambiente em questão trata-se de uma sala com dimensões de 4,73 m (C) x 4,73 m (L) x 2,90 m (A) com piso em cerâmica e paredes em alvenaria e em cor pastel. Há janelas em alumínio do tipo Maxim-Ar em meia-parede voltadas para o lado nascente do sol e dimensões totais de 4,73 m (C) x 1,50 m (A). Conta também com persianas articuláveis em tecido para evitar entrada de luz externa e diminuição de calor entrante.

Há também ar condicionado Split de 12.000 btus da marca Fujitsu que foi utilizado para a manutenção da temperatura em 22° C quando os experimentos foram conduzidos em ambiente controlado. Cabe ressaltar que os difusores de ar do mesmo foram direcionados de forma que o dispositivo de testes não receba ventilação direta, mas sim ventilação indireta. Procedendo assim, eliminamos irregularidades na aferição da velocidade do ar. Vide Figura A5 para maiores informações do ambiente de testes.

Figura A5 – Ambiente de testes



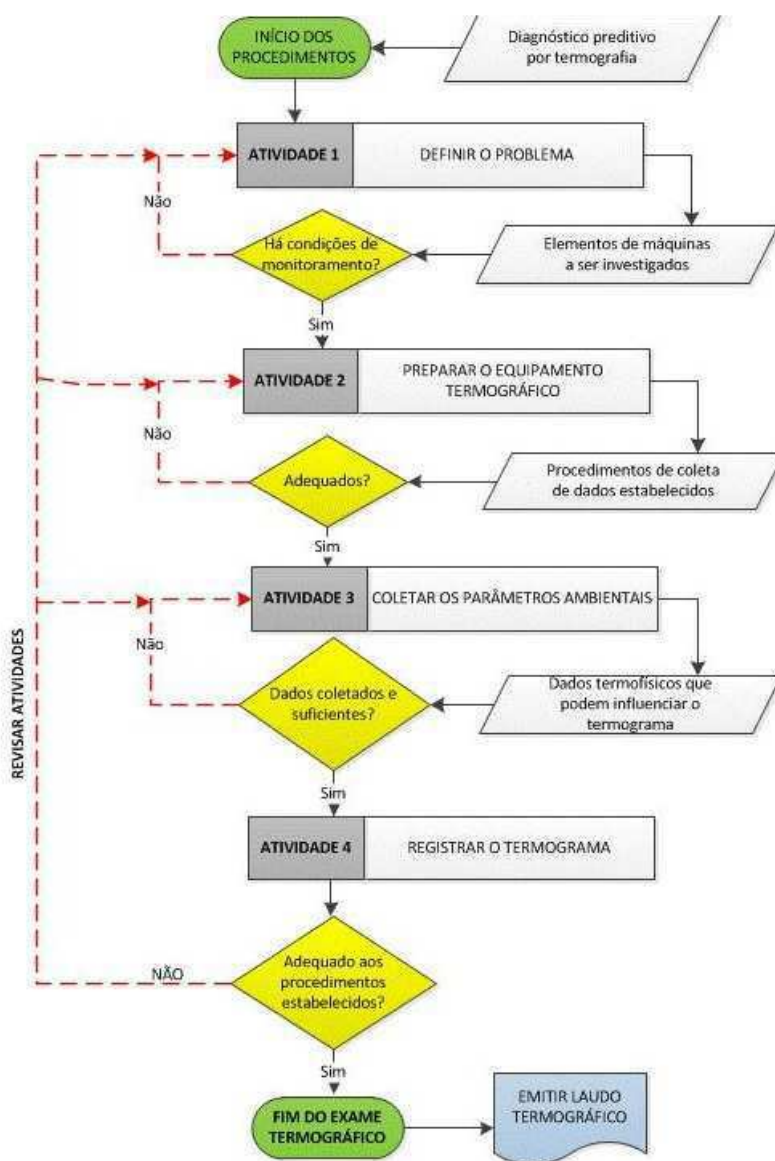
Fonte - Autoria própria

Para que as lâmpadas fluorescentes não afetassem as medições dos termogramas, as mesmas permaneceram desligadas durante o experimento de ambiente controlado. Agiu-se desta

maneira, pois mesmo após desligadas continuam a emitir radiação eletromagnética invisível ao olho humano, porém visível ao termovisor.

A Etapa 4.2 denota-se pela mensuração da temperatura ambiente, refletida, velocidade do ar e umidade relativa. Para realizar esta tarefa foi utilizada a metodologia geral para emissão de laudos preditivos por meio de termografia desenvolvida no Lab DAMP (Laboratório de Desenvolvimento e Aplicação de Metodologia de Projetos) e que pode ser observada na Figura A6.

Figura A6 – Metodologia geral para emissão de laudos preditivos por meio de termografia.



Fonte - Laboratório de Desenvolvimento e Aplicação de Metodologia de Projetos (LABDAMP/UAEM/CCT/UFCG),2014.

Optou-se pelo início do processo de estabilização das variáveis termofísicas sempre 45 minutos antes dos experimentos, uma vez que a sala de experimentos possui janelas voltadas para o lado nascente do sol e isso gerava carga térmica no interior da sala nas primeiras horas da manhã. Com isso, o ar condicionado era ligado na temperatura de 22° C para que houvesse tempo de estabilização da temperatura na sala de forma não-abrupta e homogênea. Após 45 minutos eram aferidas as temperaturas refletidas utilizando-se da NBR 16292 (2014) o método refletor de medição.

Para a aferição da temperatura ambiente e umidade relativa do ar, procedeu-se a leitura em 2 termo-higrômetros da marca Minipa e modelo MT-241. Esses aparelhos possuem um sensor interno que mede a temperatura ambiente e a umidade relativa e, um sensor de temperatura externo cujo qual foi fixado aos mancais de rolamentos. Vide Figura A7 para maiores informações.

Figura A7 – Disposição do termohigrômetro



Fonte - Autoria própria

A emissividade de 0,98 foi garantida pela aplicação da tinta fosca preta e conforme testes realizados previamente com termogramas para verificar se de fato, a emissividade estava correta.

Nas medições em ambiente não havia controle de temperatura ambiente, velocidade ou umidade do ar. Apesar de não serem controladas, as mesmas eram aferidas antes dos experimentos assim como a temperatura refletiva.



A última etapa, denominada Etapa 4.3, denota a configuração dos parâmetros capturados acima no termovisor FLIR E60. Os dados foram inseridos na câmera antes de cada experimento. Configurou-se o termovisor para aquisição da temperatura refletida em que se ajusta a emissividade para o valor de 1 e, para início dos testes quando se ajusta a emissividade para 0,98 e a temperatura refletida para o valor encontrado no *software* FLIR Tools. Vide Figura A8 para informações dos ajustes no termovisor.

Figura A8 – Informações dos ajustes no termovisor para aferição da temperatura refletida e início dos testes, respectivamente



Fonte - Autoria própria

Na fase 5 foi feita a coleta dos dados. A Etapa 5.1 denota-se pela coleta dos dados da pesquisa. Esses dados são temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade do ar, termogramas dos mancais de rolamento. Após toda a preparação do ambiente e termovisor, o motor do dispositivo foi ligado e mantida a rotação de 1.720 rpm. Após 1 minuto foi capturado um termograma dos mancais e assim sucessivamente pelos próximos 60 minutos com intervalos de 5 minutos.

Optou-se pelo desligamento do motor após 60 minutos porque observou-se previamente que a temperatura dos rolamentos tendia à estabilização na faixa entre 25 e 40 minutos e manteve-se até os 60 minutos por zelo na acurácia das medições. Após o desligamento do motor foi capturado um termograma após 10 minutos. Este momento denota-se pelo arrefecimento dos rolamentos até estabilização com a temperatura ambiente.

Após o experimento, o rolamento de teste foi trocado pelo rolamento que seria utilizado no experimento do dia seguinte e assim sucessivamente até que todos os rolamentos

autocompensadores fossem testados em ambiente controlado e ambiente não-controlado. Vide Figura A9 para maiores informações sobre a coleta dos dados.

Figura A9 – Dispositivo montado para experimentos



Fonte - Autoria própria

Na última fase, denominada fase 6, foi feita a análise dos dados coletados nos experimentos. Para a consecução do objetivo desta fase, fez-se a importação dos termogramas tirados nos experimentos e uso do *software FLIR Tools* para, a partir dos termogramas e utilizando-se paleta coerente identificar os pontos de maior temperatura nas pistas de rolamento de acordo com o rolamento testado. Usou-se ferramentas de marcação como elipse, linha e ponto para identificar o local exato da temperatura e seu valor.

Todas as informações advindas do *software FLIR Tools* foram adicionadas às planilhas que já possuíam dados como temperatura ambiente, umidade relativa e temperatura dos mancais. A partir destas planilhas foram confeccionados gráficos de temperaturas dos rolamentos em cada experimento, comparando o rolamento sem falhas e o rolamento com falhas.