

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

João Manoel de Oliveira Neto

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE
FALHAS DECORRENTES DE FADIGA POR CONTATO EM ENGRENAGENS
CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS**

Campina Grande, PB

2019

João Manoel de Oliveira Neto

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE
FALHAS DECORRENTES DE FADIGA POR CONTATO EM ENGRENAGENS
CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologias 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:

Wanderley Ferreira de Amorin Júnior, Dr.

Campina Grande, PB.

2019

O48e

Oliveira Neto, João Manoel de.

Estudo da viabilidade da termografia para a detecção de falhas decorrentes de fadiga por contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos / João Manoel de Oliveira Neto. – Campina Grande, 2019.

156 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior".

Referências.

1. Engenharia Mecânica – Termografia. 2. Termografia Ativa e Passiva. 3. Engrenagem de Dentes Retos. 4. Temperatura e Falhas. I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

CDU 621:772.96(043)

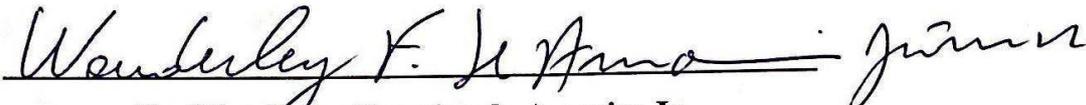
João Manoel de Oliveira Neto

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE
FALHAS DECORRENTES DE FADIGA POR CONTATO EM ENGRENAGENS
CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica.

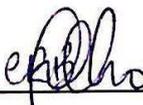
Aprovada em 27 de fevereiro de 2019.

BANCA EXAMINADORA


Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Jr

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG


Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG


Dr. Juscelino de Farias Maribondo

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG

“Às vezes Deus te leva pelo caminho mais longo,
não para te punir, mas sim para te preparar. ”

(Autor Desconhecido)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por desde sempre me amparar e manter-me firme na fé, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu pai, Adrian Cleidson Herculano Tolentino (*in memoriam*), minha mãe, Maria Efigênia de Oliveira, minha tia, Neilia Maria de Queiroz, meu avô, Antônio Paulo Tolentino, minha esposa e meu filho, Regina Eduarda Celestino Costa e Ádrian Costa de Oliveira, familiares dedicados e sempre presentes, os quais sempre estiveram ao meu lado em qualquer das circunstâncias, e inteiramente responsáveis pelo meu desenvolvimento pessoal.

Agradeço ao facilitador, professor e amigo Prof. Dr. Juscelino de Farias Maribondo pela sua paciência, atenção e disponibilidade desde a época de graduação.

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, pela ajuda com materiais, disponibilidade para reuniões e informações técnicas sobre o tema da pesquisa.

Agradeço a CAPES, Universidade Federal de Campina Grande, SENAI CITI e Cadarsil por todo o suporte técnico e financiamentos para minha pesquisa.

Deixo meu agradecimento ao ensino público, que foi um dos maiores contribuintes a todos os êxitos alcançados por mim até o presente momento.

A todos o meu muitíssimo obrigado!

OLIVEIRA NETO, J. M. ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE FALHAS DECORRENTES DE FADIGA POR CONTATO EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS. 2019. 156 p. Dissertação. (Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Estado da Paraíba, 2019.

RESUMO

Essa pesquisa tem por objetivo avaliar se a Termografia pode detectar um incremento ao campo de temperatura, que caracterize a presença de falhas decorrentes de fadiga por contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos, a partir de sua face. A motivação surgiu a partir do estudo sobre Tribologia, onde constatou-se que o surgimento de falhas em elementos de máquina, tem como uma de suas características principais o aumento do atrito e consequente geração de calor. Classifica-se a pesquisa como aplicada, quantitativa, explicativa, experimental e bibliográfica. A metodologia utilizada fez uso de uma bancada de testes previamente projetada para ensaios termográficos, composta pelos seguintes elementos mecânicos: motor elétrico controlado por inversor de frequência, amortecedores de vibração, eixos, mancais de rolamentos, isolamento térmico e engrenagens. Realizou-se ensaios termográficos a partir do enquadramento do pinhão, onde aferiu-se valores de temperatura a partir de sua face para as seguintes condições de funcionamento: com e sem lubrificação na ausência de falhas (condições de referência), e com e sem lubrificação com a implementação de falhas (estado de falha). Inseriu-se anomalias com o intuito de reproduzir problemas decorrentes de desgaste de fadiga por contato em cenário com ambiente controlado, no que diz respeito a temperatura ambiente, umidade relativa, rotação do motor, velocidade do vento, temperatura refletida e emissividade. Como resultados, definiu-se valores de temperatura para as condições de referência, onde a condição em que o par engrenado se encontrava lubrificado, apresentou uma menor geração de calor e menores variações de temperatura entre os experimentos. Para o estado de falha, os dados coletados de temperatura assemelham-se às condições de referência, não se evidenciando uma perturbação ao campo térmico devido a presença das anomalias. Então, conclui-se que é possível a aferição via Termografia (ativa e passiva) quantitativa para engrenagens cilíndricas de dentes retos em ambiente de laboratório, mas esta não se mostrou viável quanto à detecção das falhas inseridas na superfície dos dentes.

Palavras-chave: Termografia ativa. Termografia passiva. Engrenagem de dentes retos. Temperatura e falhas.

OLIVEIRA NETO, J. M. STUDY OF THE FEASIBILITY OF THE THERMOGRAPHY FOR THE DETECTION OF FAILURES ARISING FROM FADIGA BY CONTACTING ON CYLINDRICAL GEARS OF CHALLENGES. 2019. 156 p. Dissertation. (Graduate Program in Mechanical Engineering). Federal University of Campina Grande, Campina Grande, State of Paraíba, 2019.

ABSTRACT

This research aims to evaluate if thermography can detect an increment to the temperature field, which characterizes the presence of failures due to contact fatigue in cylindrical gears of spurs, from its face. The motivation arose from the study on Tribology, where it was found that the emergence of failures in machine elements, has as one of its main characteristics the increase of friction and consequent heat generation. The research is classified as applied, quantitative, explanatory, experimental and bibliographical. The methodology used used a bench of tests previously designed for thermographic tests, composed of the following mechanical elements: electric motor controlled by frequency inverter, vibration dampers, shafts, bearings, thermal insulation and gears. Thermal tests were carried out from the frame of the pinion, where temperature values were measured from its face for the following operating conditions: with and without lubrication in the absence of failures (reference conditions), and with and without lubrication with the implementation of failures (failure status). Anomalies were inserted in order to reproduce problems due to contact fatigue wear in a controlled environment scenario, relative to ambient temperature, relative humidity, engine speed, wind speed, reflected temperature and emissivity. As results, temperature values were defined for the reference conditions, where the condition in which the gear couple was lubricated, presented a lower heat generation and lower temperature variations between the experiments. For the fault state, the collected data of temperature resemble the reference conditions, not showing a disturbance to the thermal field due to the presence of the anomalies. Therefore, it is concluded that it is possible to calibrate via quantitative (active and passive) thermography for cylindrical gears of straight teeth in a laboratory environment, but this was not shown to be feasible in detecting the defects inserted in the surface of the teeth.

Key words: Active thermography. Passive thermography. Waste teeth gear. Temperature, and failures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conjunto coroa e pinhão de engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	25
Figura 2 - Engrenagens cilíndricas de dentes retos: engrenagem exterior e engrenagem interior	25
Figura 3 - Engrenagens cilíndricas helicoidais.....	26
Figura 4 - Tipos de engrenagens cônicas.....	27
Figura 5 - Conjunto roda-pinhão de engrenagens do tipo hipóide	27
Figura 6 - Engrenagens do tipo sem-fim	28
Figura 7 - Conjunto engrenagem cilíndrica-cremalheira.....	29
Figura 8 - Perfil de rugosidade esquemático - ampliação vertical é 5 vezes maior	30
Figura 9 - Esquema de desgaste entre dois e três corpos.....	31
Figura 10 - Tipos de desgaste	32
Figura 11 - Fadiga por flexão em engrenagens cilíndricas helicoidais	34
Figura 12 - Falha por fadiga de contato em dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos	35
Figura 13 - pitting, início de spalling e condições de arrancamento dos dentes (fadiga de flexão) de um pinhão de um moedor de cana-de-açúcar	36
Figura 14 - pittings em dentes de engrenagens.....	37
Figura 15 - Scuffing em dentes de engrenagens.....	37
Figura 16 - Lubrificação de engrenagens retas abertas com graxa por pincelagem.....	39
Figura 17 - Lubrificação por banho de óleo com salpico	40
Figura 18 - Lubrificação por circulação sob pressão.....	40
Figura 19 - Bancada FZG	41
Figura 20 - Surgimento e comportamento de uma falha e os meios de planejar seu diagnóstico	44
Figura 21 - Espectro eletromagnético.....	46
Figura 22 - Espectro eletromagnético.....	47
Figura 23 - Termos de radiação para um invólucro preenchido com material irradiado	49
Figura 24 - Hemisfério mostrando as relações do ângulo sólido	50
Figura 25 - Esquema geral para representação da transferência radiativa	50
Figura 26 - Intensidade radiativa se propagando através de um elemento de volume	51

Figura 27 - Invólucro perfeitamente isolado para trocas radiativas entre um elemento de superfície e um corpo negro	53
Figura 28 - Fluxo radiativo de calor em uma superfície de material arbitrário	54
Figura 29 - Emitância/emissividade para materiais selecionados	55
Figura 30 - Fenômenos de reflexão, absorção e transmissão radiativa em um corpo de espessura finita.....	56
Figura 31 - Medição termográfica em dispositivos eletroeletrônicos	59
Figura 32 - Termografia quantitativa e qualitativa para motores e demais componentes	59
Figura 33 - Influência de variáveis ambientais em inspeções termográficas	62
Figura 34 - Funcionamento da câmera termográfica.....	62
Figura 35 - Procedimentos simplificados para o método indireto ou refletor	64
Figura 36 - Método refletor	65
Figura 37 - Procedimentos simplificados para o método direto.....	65
Figura 38 - Método indireto.....	66
Figura 39 - Imagem térmica de um conjunto de motor e bomba para monitoramento de um acoplamento.....	67
Figura 40 - Mancais com deficiência de lubrificação.....	68
Figura 41 - Mancais com desalinhamentos de eixos	68
Figura 42 - Comparação entre as imagens visíveis e geradas pelo termovisor	69
Figura 43 - Teste de fadiga em uma engrenagem helicoidal com indutor	70
Figura 44 - Termografia para um dos dentes a 40×10^6 gerando um termograma para 0,2 s após o aquecimento	70
Figura 45 - Indicação da engrenagem que sofreu o dano no sistema de engrenamento.....	71
Figura 46 - Engrenagem motora com o dente quebrado	71
Figura 47 - Termogramas do estado de referência do redutor.....	72
Figura 48 - Termograma para o redutor após a quebra do dente da engrenagem	72
Figura 49 - Par de engrenagens hipóides utilizadas nos experimentos e posicionamento da linha de extração.....	73
Figura 50 - Distribuição de temperatura com base no tempo e para diferentes velocidades de rotação	73
Figura 51 - Engrenagem com e sem defeito	74
Figura 52 - Termogramas para o fluxo a geração de calor na carcaça com a engrenagens em boas e más condições de funcionamento	74
Figura 53 - Divisão das áreas de análise no Termograma.....	75

Figura 54 - Comportamento da temperatura para as regiões do posicionamento das engrenagens exemplificadas na Figura 53.....	76
Figura 55 - Defeito na superfície do dente da engrenagem.....	76
Figura 56 - Termograma para análise dos gradientes de temperatura na superfície da engrenagem.....	77
Figura 57 - Perfil de temperatura ampliado.....	77
Figura 58 - Monitoramento da temperatura através da carcaça que enclausura o sistema de engrenagens por Termografia.....	78
Figura 59 - Termografia quantitativa para detecção de: falha em rolamento e níveis de desalinhamento em acoplamento.....	81
Figura 60 - Bancada didática para instrução em transmissão mecânica.....	84
Figura 61 - Bancada experimental para analisar contato dentário dentre engrenagens por meio da Termografia.....	85
Figura 62 - Bancada experimental para detecção de falhas em engrenagens através aquecimento por indução.....	85
Figura 63 - bancada experimental para avaliação de falhas em engrenagens através da Termografia.....	85
Figura 64 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....	88
Figura 65 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 1 da pesquisa.....	89
Figura 66 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 2 da pesquisa.....	91
Figura 67 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 3 da pesquisa.....	92
Figura 68 - Desenho do projeto e bancada experimental de testes concluída.....	93
Figura 69 - Desenho 3D e cabine de isolamento térmico construída.....	93
Figura 70 - Testes de funcionalidade dos equipamentos para ensaios termográficos.....	94
Figura 71 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 4 da pesquisa.....	95
Figura 72 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 5 da pesquisa.....	98
Figura 73 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 6 da pesquisa.....	100
Figura 74 - Lubrificação das engrenagens por pincelamento.....	101
Figura 75 - Estrutura tipo pórtico para reter excesso de graxa.....	101
Figura 76 - Demarcação da regiões para inserção de falha.....	102
Figura 77 - Falhas inseridas nos dentes do pinhão.....	102
Figura 78 - Posicionamento do objeto refletor.....	103
Figura 79 - Posicionamento da sonda de umidade.....	104
Figura 80 - Posicionamento da sonda de fio quente.....	104

Figura 81 - Posicionamento do termovisor para os ensaios termográficos	Fonte - Autoria própria	
.....		105
Figura 82 - Enquadramento do pinhão pelo termovisor		105
Figura 83 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 7 da pesquisa		106
Figura 84 - Pontos para leitura de temperatura no pinhão através dos termogramas		107
Figura 85 - Pontos para medição de velocidade do vento		108
Figura 86 - Termogramas		108
Figura 87 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 8 da pesquisa		109
Figura 88 - Correção dos termogramas no software FLIR tools		109
Figura 89 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos de referência por Termografia ativa sem e com lubrificação		113
Figura 90 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos de referência por Termografia passiva sem e com lubrificação		117
Figura 91 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia ativa sem e com lubrificação		121
Figura 92 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia passiva sem e com lubrificação		124
Figura 93 - Gráfico de representação do comportamento para os valores médios de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia ativa e passiva sem e com lubrificação		125
Figura 94 - Gráfico de representação do comportamento para os valores médios de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia ativa e passiva sem e com lubrificação		126
Figura G 1 - Principais parâmetros para engrenagens cilíndricas de dentes retos		137
Figura G 2 - Ângulo de pressão e outros parâmetros referentes a terminologia para engrenagens retas		137
Figura A 1 - Fluxograma metodológico para aplicação de metodologia de projeto para o desenho da bancada experimental		139
Figura A 2 - Bancada de testes para rolamentos autocompensadores de esferas		140
Figura A 3 - Bancada de testes com (b) e sem (a) a cabine para isolamento térmico		141
Figura A 4 - Desenho do projeto preliminar da bancada experimental sem a cabine de isolamento térmico		141
Figura A 5 - Desenho da bancada experimental com a cabine de isolamento térmico		142
Figura A 6 - Desenho da vista explodida do projeto preliminar da bancada experimental		143

Figura A 7 - Ferramenta do software Autodesk Inventor para projeto de elementos de máquina	145
Figura A 8 - Desenho do projeto final detalhado com os elementos montados da bancada experimental	146
Figura A 9 - Vistas frontal e traseira da montagem da cabine de isolamento na bancada de testes	148
Figura A 10 - Desenho da vista explodida do projeto final da bancada experimental	149
Figura A 11 - Termo-anemômetro com sonda para medição de umidade relativa do ar e temperatura ambiente	151
Figura A 12 - Termo-anemômetro com sonda de fio quente para medição de velocidade do ar	152
Figura A 13 - Termovisor	152
Figura A 14 - Decibelímetro.....	153
Figura A 15 - Equipamentos de segurança.....	153
Figura A 16 - Cronômetro	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espectro de ondas eletromagnéticas.....	47
Tabela 2 - Valores de frequências para bandas espectrais.....	48
Tabela 3 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens sem lubrificação em condições de referência.....	111
Tabela 4 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens lubrificadas em condições de referência	112
Tabela 5 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens sem lubrificação em condições de referência.....	115
Tabela 6 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens lubrificadas em condições de referência	116
Tabela 7 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens sem lubrificação em condições de falha.....	119
Tabela 8 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens com lubrificação em condições de falha.....	120
Tabela 9 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens sem lubrificação em condições de falha.....	122
Tabela 10 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens com lubrificação em condições de falha	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Possibilidades de falhas em engrenagens	33
Quadro 2 - Normas técnicas para ensaios termográficos	60
Quadro 3 - Quadro resumo das informações pertinentes a utilização da Termografia em estudos com engrenagens	79
Quadro 4 - Variáveis de influência para ensaios termográficos mediante utilização da técnica por pesquisadores	83
Quadro 5 - Informações obtidas sobre engrenagens e seus tipos de falha	90
Quadro 6 - Informações obtidas sobre Termografia e suas aplicações	91
Quadro AN 1 - Níveis de tolerância de ruído mediante o tempo de exposição	156

LISTA DE SÍMBOLOS

c - Velocidade da luz no vácuo [m/s]

λ - Comprimento de onda [μm]

ν - Frequência da onda eletromagnética [Hz]

KHZ - Kilo Hertz

MHZ - Mega Hertz

THZ - Tera Hertz

GHZ - Giga Hertz

PHZ - Penta Hertz

KHZ - Exa Hertz

dA - Elemento infinitesimal da área projetada [m^2]

dV - Elemento infinitesimal do volume [m^3]

$d\omega$ - 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]

q_A - Fluxo de energia, energia por unidade de área [$\text{W}/(\text{m}^2)$]

q_V - Fluxo de energia, energia por unidade de volume [$\text{W}/(\text{m}^3)$]

Q - Energia radiativa por unidade de tempo [W]

S - Distância entre um elemento infinitesimal da superfície emissora e um elemento infinitesimal da superfície receptora [m]

Ω - Ângulo sólido [sr]

I_λ - Intensidade de radiação espectral [W/sr]

I_b - Intensidade de radiação para um corpo negro [W/sr]

T - Tempo (s)

J - Joule

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

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

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

T - Temperatura [$^\circ\text{C}$]

ε - Emissividade ou emitância

α - Absortividade ou absortância

ρ - Reflectividade ou reflectância

τ - Transmissividade ou transmitância

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

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

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

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

ϵ_{obj} - Emissividade do objeto analisado

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

τ_{atm} - Transmitância da atmosfera

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

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	19
1.0 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.3 JUSTIFICATIVA	21
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	22
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
CAPÍTULO II.....	24
2.0 ENGRENAGENS	24
2.0.1 ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS	24
2.0.2 ENGRENAGENS CILÍNDRICAS HELICOIDAIS	26
2.0.3 ENGRENAGENS CÔNICAS.....	26
2.0.4 ENGRENAGENS SEM-FIM E CREMALHEIRAS.....	28
2.1 RUGOSIDADE E <i>RUNNNIG-IN</i>	29
2.2 TRIBOLOGIA	30
2.3 FALHAS EM ENGRENAGENS.....	32
2.3.1 FADIGA POR FLEXÃO	33
2.3.2 FADIGA DE CONTATO.....	34
2.3.3 ADESÃO OU <i>SCUFFING</i>	37
2.4 LUBRIFICAÇÃO DE ENGRENAGENS	38
2.4.1 MÉTODO MANUAL	38
2.4.2 MÉTODO POR BANHO DE ÓLEO.....	39
2.4.3 MÉTODO DE CIRCULAÇÃO SOB PRESSÃO	40
2.4.4 LUBRIFICAÇÃO PARA ENGRENAGENS FECHADAS	41
2.4.5 LUBRIFICAÇÃO PARA ENGRENAGENS ABERTAS	42
2.5 MANUTENÇÃO EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	42
CAPÍTULO III	45
3.0 RADIAÇÃO TÉRMICA	45
3.1 ÂNGULO SÓLIDO	49
3.2 INTENSIDADE RADIATIVA ESPECTRAL	50

3.3 CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO	52
3.4 RADIAÇÃO DE UM CORPO NEGRO	52
3.5 EMISSIVIDADE	53
3.6 PROPRIEDADES RADIATIVAS DOS MATERIAIS	56
CAPÍTULO IV	58
4.0 TERMOGRAFIA	58
4.1 AFERIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOGRAFIA.....	61
4.2 TERMOGRAFIA EM AMBIENTE INDUSTRIAL	66
4.3 EMPREGO DA TERMOGRAFIA EM PESQUISAS PARA DETECÇÃO DE ANOMALIAS EM ENGRENAGENS	68
4.4 BANCADAS EXPERIMENTAIS	84
CAPÍTULO V	87
5.0 METODOLOGIA.....	87
5.0.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	87
5.0.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	88
CAPÍTULO VI.....	110
6.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	110
CAPÍTULO VII	127
7.0 CONCLUSÕES.....	127
REFERÊNCIAS.....	129
GLOSSÁRIO – TERMINOLOGIA PARA ENGRENAGENS RETAS	136
APÊNDICE I – DESENHO DOS EQUIPAMENTOS DE TESTES	138
APÊNDICE II – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS	151
APÊNDICE III – PLANILHA PARA REGISTRO DOS DADOS REFERENTES AOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS	155
ANEXO I - LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE.....	156

CAPÍTULO I

Neste capítulo introduzir-se-á os temas abordados no decorrer da pesquisa, assim como os objetivos necessários a serem atingidos. Posteriormente, expõe-se a justificativa para realização deste trabalho assim como a delimitação e, por fim, a estruturação do documento.

1.0 INTRODUÇÃO

Segundo Seidel (2011, p. 5), a engrenagem é um dos dispositivos mecânicos mais antigos utilizados pelo homem. Relatos mostram sua utilização por mais de 5.000 anos, porém existe um registro de Aristóteles sobre engrenagens, datado em 330 a.C. Consistem basicamente de dois cilindros nos quais são fabricados dentes e a transmissão de movimento se dá através do contato entre eles. (JÚNIOR, 2002, p. 2).

Para Waqar e Demetgul (2016, p. 57), engrenagens permitem a transferência de energia entre dois eixos. O processo é importante porque os componentes de um sistema podem ser projetados para máxima eficiência, com as engrenagens atuando como interface entre os componentes. Usos específicos para engrenagens são mudar velocidades, mudar de direção de rotação e transmissão de potência em um sistema.

Budynas e Keith (2011, p. 670) afirmam que para a transmissão de força existem pelo menos quatro tipos de engrenagens: cilíndricas de dentes retos, helicoidais, cônicas e sem-fim. Dentre estas, as engrenagens de dentes retos são as mais comuns e de menor custo dentre as outras. (SEIDEL, 2011, p. 9).

Como existe o contato contínuo entre os dentes das engrenagens, o modo como isso ocorre é responsável pela capacidade de carga que estes elementos de máquina oferecem, dependendo da velocidade de contato entre dentes e superfícies. Koda (2009a, p. 67) diz que a pressão de contato e a magnitude cíclica por fadiga nos dentes causam as principais influências sobre o desgaste dos mesmos. Para Seidel (2011, p. 18), vários fatores influenciam na falha destes dispositivos, os principais são: o uso inadequado ou a não utilização de lubrificante, a escolha do lubrificante incorreto, e o principal, com o desgaste dos dentes, as partículas metálicas se soltam e contribuem para o desgaste do sistema mecânico de uma forma geral.

Conforme explicado por Koda (2009a, p. 68), desgaste por contato de rolamento é o resultado das tensões mecânicas repetitivas na superfície de um corpo que rola sobre outro

corpo. O desgaste pode ocorrer na superfície do elemento rolante ou na superfície de rolamento. O desgaste por contato é a causa principal de falhas em rolamentos, dentes de engrenagem, contatos de roda de trens, seguidores de rolo de came em máquinas de combustão internas, rolos de moinho, etc. Em unidades de engrenagens, muitos dos defeitos de superfície ocorrem nessa escala, tais como *micropitting*, *pitting*, *spalling* ou *scuffing*.

Com o aumento da temperatura em determinadas superfícies a quantidade de radiação térmica emitida por essas também aumenta. No espectro das radiações, a radiação térmica é classificada como: radiação infravermelha, visível e ultravioleta.

Todos os objetos cuja temperatura está acima do zero absoluto emitem radiação infravermelha na faixa de comprimento de onda de 740 nm a 1 mm. Este intervalo é entre ondas de rádio e luz visível. Este fenômeno relacionado à radiação térmica é usado em métodos de imagem térmica para medir valores e distribuição de temperaturas em um objeto inspecionado. (BLAZEJ *et al.*, 2016, p. 53).

A Termografia pode ser usada para identificar e analisar anomalias térmicas para o monitoramento de condições de máquinas. A termografia infravermelha é baseada na medição da distribuição da energia térmica radiante emitida a partir da superfície alvo e na conversão para um termograma de superfície, descrevendo a energia térmica presente durante a operação de todas as máquinas. Pode estar na forma de: perdas por atrito e perdas de energia dentro de máquinas, como uma característica dos meios de processo, ou qualquer combinação dos mesmos. Como resultado, a temperatura pode ser um parâmetro chave para monitorar o desempenho, a condição e, conseqüentemente, o diagnóstico dos problemas da máquina. (WAQAR; DEMETGUL, 2016, p. 59, tradução nossa).

O diagnóstico de imagens térmicas consiste na detecção não invasiva de alterações na estrutura da máquina, com base na análise do sinal térmico. O aumento da emissão de calor durante a operação da máquina, pode ser resultado do aumento de carga ou de danos que ocorreram durante sua operação, fornecendo diferentes padrões quanto ao incremento de temperatura no componente de interesse. Por este motivo, a Termografia possui aplicabilidade na manutenção de sistemas mecânicos, onde os componentes mais inspecionados são motores, bombas, rolamentos e caixas de embreagem. (OLINDA, 2018, p. 70).

Pesquisas recentes realizadas por Silva Júnior (2017), Cabral (2017) e Olinda (2018) junto à Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande se mostraram eficazes no que diz respeito a viabilidade do uso da Termografia como técnica de detecção de falhas em determinados elementos de máquinas mediante suas condições de funcionamento.

1.1 OBJETIVO GERAL

Verificar a possibilidade da detecção de falhas decorrentes de fadiga por contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos, a partir de determinadas condições de funcionamento, por meio da técnica da Termografia infravermelha.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja alcançado, faz-se necessários que os seguintes objetivos específicos sejam atendidos:

- verificar as condições de temperatura no pinhão, sem lubrificação e com ausência de falhas;
- verificar as condições de temperatura no pinhão, com lubrificação e com ausência de falhas;
- verificar as condições de temperatura no pinhão, sem lubrificação e com a presença de falhas;
- verificar as condições de temperatura no pinhão, com lubrificação e com a presença de falhas;

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com Rodrigues (2009, p. 133), a maior parte das falhas em engrenagens tem origem ligadas à montagem, lubrificação inadequada e sobrecarga, sendo classificadas em quatro classes gerais: desgaste, fadiga, deformação plástica e quebras. Todos esses problemas apresentados têm como resultado o superaquecimento do conjunto de engrenagens.

Dada a praticidade de avaliações por meio de Termografia, a avaliação da modificação do campo de temperatura de engrenagens mediante as condições de falha, do ponto de vista térmico, pode abrir caminho para estudos que resultem em uma metodologia a ser aplicada dentro de indústrias durante a manutenção preditiva, como no caso de máquinas que utilizam engrenagens abertas.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Realizou-se esta pesquisa em ambiente controlado de laboratório, no que diz respeito a temperatura, umidade e velocidade do vento.

Se fez uso de engrenagens cilíndricas de dentes retos, do tipo coroa-pinhão.

Inseriu-se falhas na superfície de cinco dentes do pinhão, pelo fato de ser o elemento mais suscetível a ocorrência das mesmas, por estar submetido a maior quantidade de ciclos, obter menor massa e por ser a engrenagem motora.

Reproduziu-se, artificialmente, anomalias que se assemelham as falhas decorrentes de desgaste por fadiga de contato, caracterizadas por se apresentarem na região do diâmetro primitivo, podendo se prolongar para as regiões do adendo ou dedendo.

Realizou-se o trabalho com o funcionamento do engrenamento a baixa rotação, onde a mesma se manteve constante, sendo controlada através de um inversor de frequência.

Por fim, isolou-se o objeto em estudo com uma cabine, que tem por objetivo evitar trocas térmicas deste com o meio.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, a saber:

No Capítulo I o problema é abordado de forma introdutória, definiu-se os objetivos: geral e específico, a justificativa, delimitações para o desenvolvimento da pesquisa e a estruturação do trabalho de uma forma geral.

No Capítulo II apresenta-se a revisão da literatura, onde buscou-se nas obras especializadas informações sobre engrenagens e seus principais tipos e características, Tribologia, operações de amaciamento em superfícies girantes, tipos de falha, métodos de lubrificação e técnicas de manutenção.

No Capítulo III realiza-se uma fundamentação teórica sobre radiação térmica e as variáveis fundamentais ao seu entendimento.

No Capítulo IV aborda-se assuntos referentes a conceitos, definições e aplicações da Termografia, assim como uma revisão da literatura em trabalhos que trata desta como técnica para detecção de anomalias em engrenagens. Por fim, levanta-se a importância do emprego de bancadas experimentais voltado ao contexto desta pesquisa.

O Capítulo V trata-se da metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho, caracterizada como investigativa, documental, prescritiva, qualitativa, quantitativa e dividida em atividades.

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

No Capítulo VII apresenta-se as conclusões obtidas a partir das discussões efetuadas no capítulo anterior. Por fim, seguem as referências, glossário, apêndices e anexos que fundamentam esta pesquisa.

CAPÍTULO II

O objetivo deste capítulo é realizar uma fundamentação teórica envolvendo o tema engrenagens, quanto ao seus principais tipos e características. Abordar-se-á a ciência Tribologia para que se tenha um entendimento sobre desgastes em superfícies, onde também deve-se saber, e será informado, sobre o comportamento da rugosidade superficial em períodos iniciais de funcionamento de elementos girantes. Posteriormente, levanta-se argumentações acerca dos tipos de falhas associadas ao desgaste, assim como os métodos de lubrificação empregados em engrenagens e, por fim, técnicas de manutenção para máquinas e equipamentos.

2.0 ENGRENAGENS

Segundo Sousa Silva (2015, p. 19), pares engrenados são comumente utilizados na indústria e aplicados a diversos sistemas mecânicos. Isto se deve a característica de transmissão de potência a velocidade de rotação uniforme. Geralmente utiliza-se o termo redutor para pares engrenados onde a rotação no eixo de entrada é menor que a rotação no eixo de saída, e multiplicador quando se tem uma situação contrária.

Para Andrade *apud* Seidel (2011, p. 7), existem basicamente quatro tipos de engrenagens básicas, as cilíndricas de dentes retos, as helicoidais cilíndricas, as cônicas e as sem fim ou coroas. Cada um desses tipos de engrenagens tem suas particularidades.

2.0.1 ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS

De acordo com Budynas e Keith (2011, p. 680), as engrenagens cilíndricas de dentes retos, possuem dentes paralelos ao eixo de rotação e são utilizados para transmitir movimento de um eixo a outro eixo, paralelo ao primeiro. Se trata do tipo de engrenagem mais simples e, por este motivo, utilizada para desenvolver as relações cinemáticas primárias na forma de dente.

Segundo Seidel (2011, p. 10), este tipo de engrenagem é mais empregada na transmissão de baixa rotação do que na de alta rotação, por causa do ruído que produz. Na Figura 1 pode-se visualizar o conjunto coroa e pinhão de engrenagens cilíndricas de dentes retos.

Segundo Koda (2009a, p. 29), estes elementos permitem a redução ou aumento de torque e velocidades, com mínimas perdas de energia. A mudança de velocidade e torção é feita na razão dos diâmetros primitivos.

Para Flores *et al.* (2017, p. 2), as engrenagens cilíndricas de dentes retos podem ser exteriores ou interiores, como ilustra a Figura 2. É indubitável que as engrenagens cilíndricas de dentes retos são as mais frequentemente utilizadas em máquinas e mecanismos quando se pretende transmitir movimento entre eixos paralelos.

Figura 1 - Conjunto coroa e pinhão de engrenagens cilíndricas de dentes retos



Fonte - Seidel (2011)

Figura 2 - Engrenagens cilíndricas de dentes retos: engrenagem exterior e engrenagem interior



Fonte - Flores *et al.* (2017)

Informações técnicas a respeito da terminologia para engrenagens cilíndricas de dentes retos são expostas no Glossário.

2.0.2 ENGRENAGENS CILÍNDRICAS HELICOIDAIS

Segundo Budynas e Keith (2011, p. 680), as engrenagens helicoidais possuem dentes inclinados com relação ao eixo de rotação. Elas podem ser usadas nas mesmas aplicações que as engrenagens cilíndricas de dentes retos e, quando assim utilizadas, não são ruidosas, devido ao engajamento mais gradual dos dentes durante o engate. O dente inclinado também cria forças axiais e conjugados de flexão, o que não ocorre para as de dentes retos. Em alguns casos este tipo de engrenagem é responsável pela transmissão de forças entre eixos não paralelos. O posicionamento deste tipo de engrenagem dependendo se os eixos são paralelos ou não são exemplificados na Figura 3.

Figura 3 - Engrenagens cilíndricas helicoidais

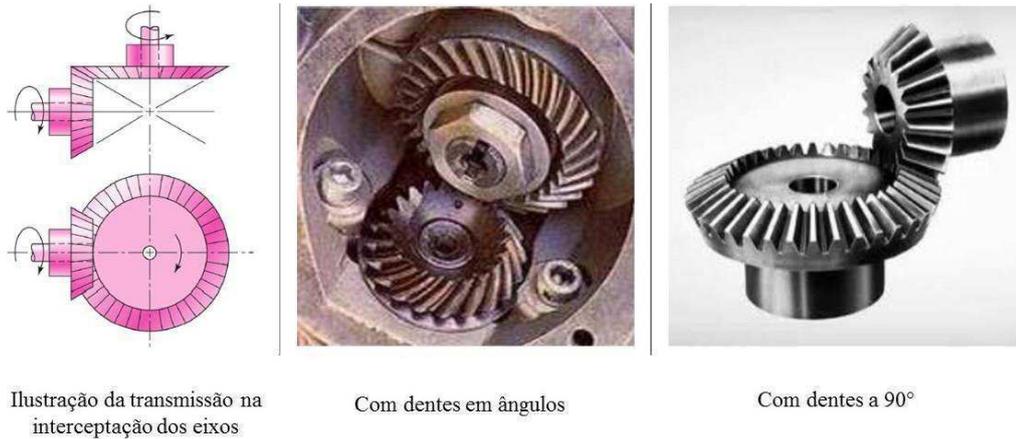


Fonte - Adaptado de Seidel (2011)

2.0.3 ENGRENAGENS CÔNICAS

Segundo Seidel (2011, p. 12), as engrenagens cônicas são empregadas quando as árvores se cruzam, o ângulo de intersecção é geralmente 90° , podendo ser menor ou maior. Sua superfície primitiva geralmente é formalizada como um tronco de cone, podendo variar, pois existem diferentes tipos de engrenagens cônicas, dentre as mais utilizadas, a de dentes retos ou a 90° e a outra forma com dentes em ângulo. Os dentes das rodas cônicas têm formato também cônico, o que dificulta a sua fabricação, diminui a precisão e requer uma montagem precisa para o funcionamento adequado. Este tipo de elemento é usado para mudar a rotação e a direção da força, em baixas velocidades. Estas engrenagens geram cargas tanto radiais como de empuxo nos mancais que as suportam. A Figura 4 ilustra os tipos de engrenagens cônicas.

Figura 4 - Tipos de engrenagens cônicas

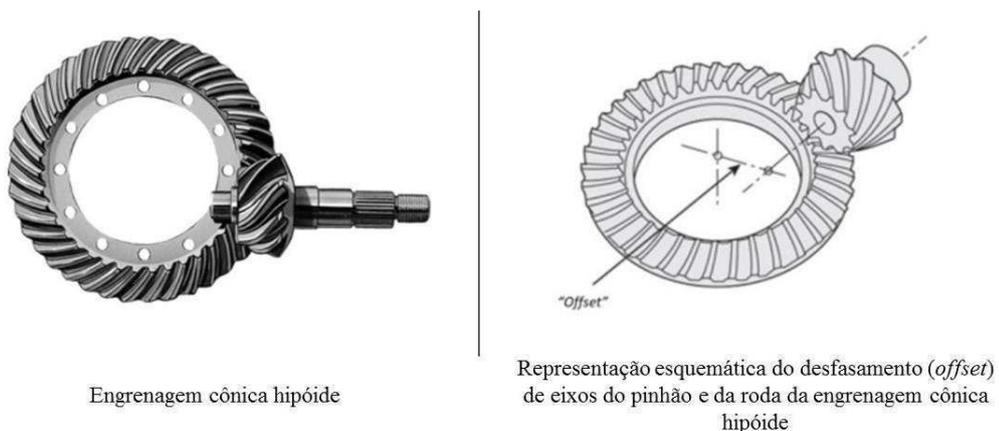


Fonte - Adaptado de Budynas e Keith (2011) e Seidel (2011)

Outro tipo de engrenagem cônica é a hipóide, que segundo Soares (2016, p. 14) são constituídas basicamente por um pinhão e por uma roda, em que o primeiro componente apresenta um número de dentes inferior ao segundo. Estas são utilizadas quando é exigida uma montagem descentralizada dos elementos de transmissão de potência, verificando-se um defasamento (*offset*) do eixo do pinhão em relação ao eixo da roda, como mostrado na Figura 5, juntamente com a ilustração deste tipo de engrenagem.

Esses elementos de máquina apresentam geralmente dentes em espiral, permitindo um maior contato entre o pinhão e a coroa, o que resulta em um engrenamento mais suave, com baixa vibração e ruído. Pelas características apresentadas, estes componentes são os mais utilizados nos diferenciais de automóveis. (SOARES, 2016, p. 15)

Figura 5 - Conjunto roda-pinhão de engrenagens do tipo hipóide



Fonte - Adaptado de Soares (2016)

2.0.4 ENGRENAGENS SEM-FIM E CREMALHEIRAS

De acordo com Budynas e Keith (2011, p. 681), o par pinhão-coroa sem-fim, representa o quarto tipo básico de engrenagem, como mostrado na Figura 6. Seidel (2011, p. 14) menciona que engrenagens do tipo sem-fim são usadas quando grandes reduções de transmissão são necessárias, esse tipo de engrenagem costuma ter reduções de 20:1, chegando até a números maiores do que 300:1. Muitas engrenagens sem-fim têm uma propriedade interessante que nenhuma outra engrenagem tem: o eixo gira a engrenagem facilmente, mas a engrenagem não consegue girar o eixo. Isso se deve ao fato de que o ângulo do eixo é tão pequeno que quando a engrenagem tenta girá-lo, o atrito entre a engrenagem e o eixo não deixa que ele saia do lugar. Essa característica é útil para máquinas como transportadores, nos quais a função de travamento pode agir como um freio para a esteira quando o motor não estiver funcionando. A aplicação desta configuração de engrenagens pode ser detalhada em um violão, onde necessita-se de precisão para afinar o instrumento, por isso usa-se engrenagens de parafuso sem-fim, para que o ajuste seja o quanto reduzido possível, afim de chegar ao tom desejado, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Engrenagens do tipo sem-fim



Engrenagem sem-fim



Exemplo de sistema engrenagem sem-fim utilizada para afinar as cordas do violão

Fonte - Adaptado de Seidel (2011)

As cremalheiras são nada mais nada menos que barras com dentes acoplados a uma engrenagem cilíndrica de dentes, geralmente retos, responsável por transmitir movimento rotativo em linear ou vice-versa. O dimensionamento é semelhante às engrenagens cilíndricas

ou helicoidais, mas a diferença é que uma segunda engrenagem acoplada à primeira tem diâmetro infinito, o que a torna linear, como exemplificado na Figura 7, estando a cremalheira indicada pela seta de cor vermelha.

Figura 7 - Conjunto engrenagem cilíndrica-cremalheira



Fonte - Seidel (2011)

2.1 RUGOSIDADE E *RUNNIG-IN*

Segundo Koda (2009a, p. 45), quando montados componentes que terão contato entre si, haverá regiões entre essas peças nas quais o contato é mais ou menos intenso. O *running-in* (amaciamento) consiste no desgaste das asperezas para proporcionar uma melhor adaptação das superfícies em contato, ou seja, um aumento da área de contato real, devido à remoção e conformação dos picos.

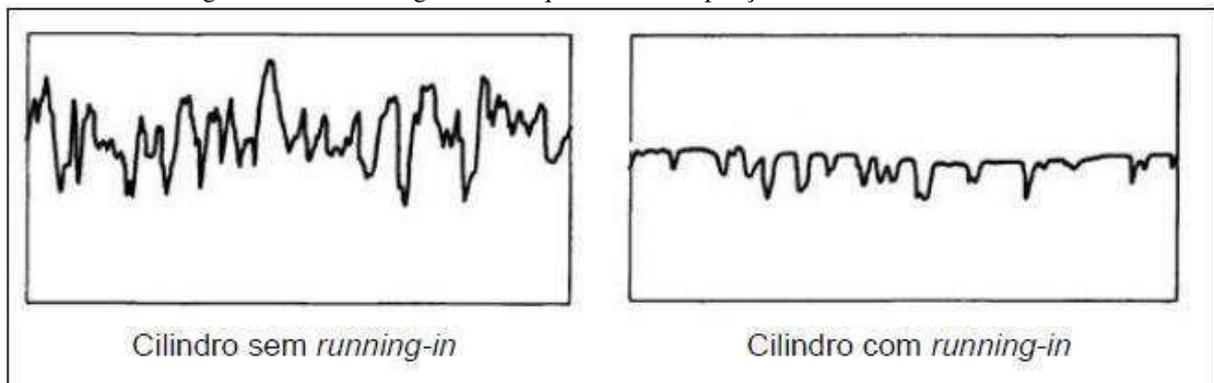
Seabra e Berthe (1987) estudaram a influência das imperfeições da superfície (ondulação e rugosidade) na distribuição da pressão normal no contato entre estas. Estes autores constataram que a máxima pressão desenvolvida no contato é muito maior do que a pressão máxima calculada pela teoria de Hertz¹. Isto ocorre, pelo fato de que a área real de contato é

¹ Quando dois sólidos elásticos de revolução são postos em contato um com o outro e tocam-se, inicialmente, num único ponto ou segundo uma linha. Se solicitados por uma determinada carga, mesmo de pequena intensidade, eles deformam-se na vizinhança do ponto inicial de contato, originando uma área de contato de pequenas dimensões quando comparadas com as dos dois corpos. No caso mais geral o contato sem atrito entre dois corpos de revolução elásticos produz uma área de contato elíptica.

menor do que aquela considera por Hertz, admitindo uma superfície lisa. No estudo destes autores foram realizadas comparações do estado de tensões de uma superfície antes e após um período de *running-in* em ensaio de desgaste. Constatou-se que com o processo de amaciamento da superfície, as tensões nos contatos das asperezas ficam menos intensas, pois as áreas de cada junção tornam-se maiores.

Figura 8 mostra uma comparação de perfil de rugosidade antes e após o período de *running-in* para conformação da camisa de um cilindro.

Figura 8 - Perfil de rugosidade esquemático - ampliação vertical é 5 vezes maior



Fonte - Koda (2009a)

2.2 TRIBOLOGIA

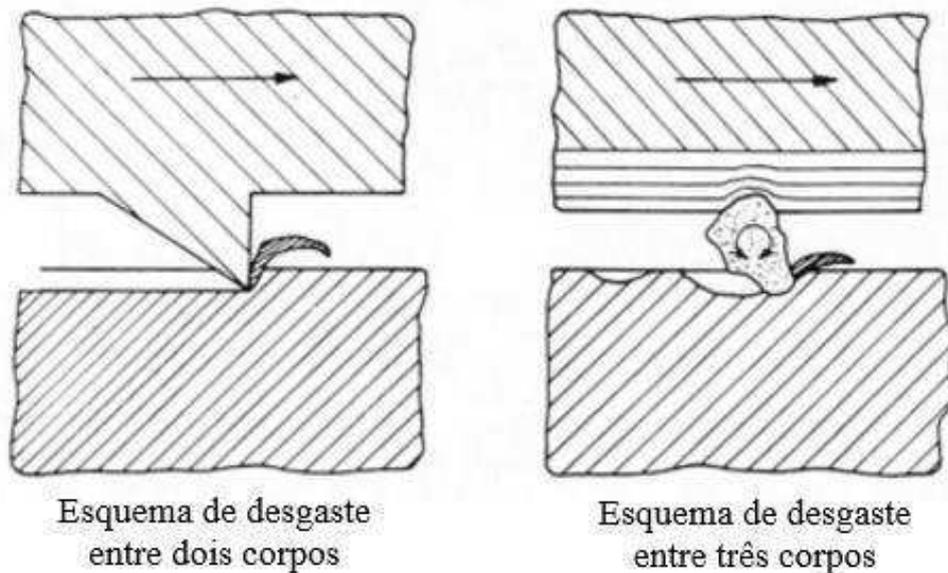
Segundo Souza (2015, p. 40), um dos principais focos do estudo da Tribologia é o desgaste, que é classificado como a perda progressiva de material a partir da superfície operacional de um corpo causado pelo movimento relativo da superfície. Esse fenômeno é influenciado por uma variedade de fatores, sendo os principais envolvidos, a temperatura, as condições ambientais, os gases ou líquidos presentes e a formação de filmes superficiais durante o processo. Os processos de desgaste podem ser lubrificados ou secos, podem ser de dois ou três corpos. No processo de três corpos, partículas presentes no sistema tribológico, que podem ser, inclusive, oriundas da interação em um sistema de dois corpos, ficam aprisionadas entre duas superfícies, gerando um sistema de três corpos. Na Figura 9 é mostrada a representação de uma interação entre dois e três corpos.

A Tribologia une os campos da mecânica, física, química e materiais aos conhecimentos de lubrificação, atrito e desgaste para prever o comportamento de sistemas físicos. O desgaste pode ser representado em seus quatro principais modos de classificação, como ilustra a Figura 10. O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente

forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é provocada na região de contato, gerando uma trinca, que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material.

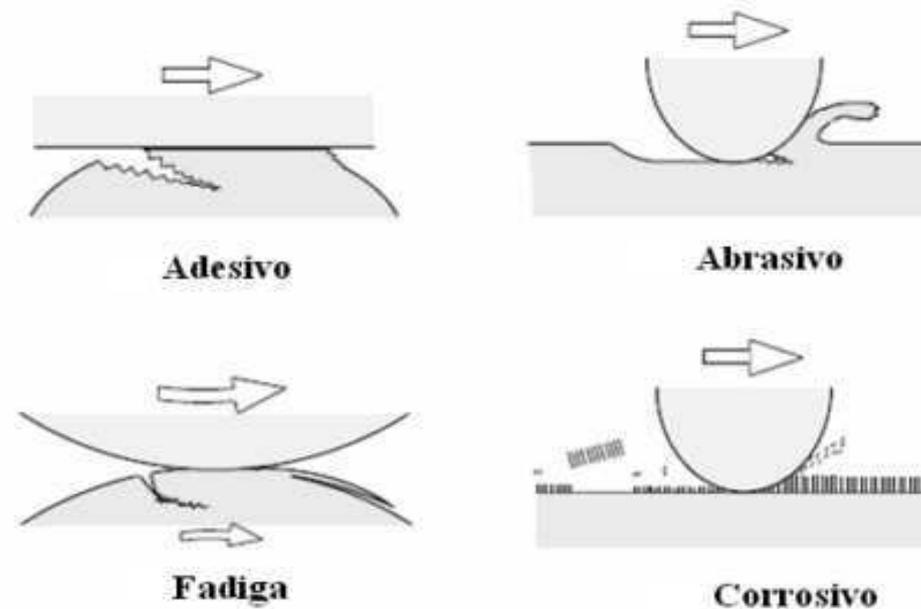
Para Souza (2015, p. 42) o desgaste abrasivo é a forma de desgaste que ocorre quando uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície mole contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais mole e forma uma série de ranhuras superficiais. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste geralmente soltas. Quando o desgaste é ocasionado pelo alto número de repetições do movimento ele é chamado de desgaste por fadiga. Finalmente, o desgaste ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.

Figura 9 - Esquema de desgaste entre dois e três corpos



Fonte - Adaptado de Souza (2015)

Figura 10 - Tipos de desgaste



Fonte - Adaptado de Souza (2015)

2.3 FALHAS EM ENGRENAGENS

O desgaste se trata dos primeiros sintomas antes que venha ocorrer a falha. No sentido mais generalizado o desgaste pode ser classificado como moderado ou severo.

No desgaste moderado, o processo ocorre nas camadas superficiais exteriores, as superfícies permanecem suaves e são geralmente cobertas por superfícies de óxidos gerados durante a fricção. Deste tipo de desgaste resultam pequenos detritos na pista, com dimensões de alguns nanômetros. No desgaste severo, as superfícies são seriamente deformadas e os detritos de desgaste consistem em partículas com dimensões até algumas centenas de micrômetros. (SILVA, 2016, p. 5).

Para Júnior (2002, p. 9) as engrenagens podem falhar basicamente por três tipos de solicitações antes mesmo ou posteriormente ao desgaste: a que ocorre no contato, devido à tensão normal, a que ocorre no pé do dente, devido a flexão causada pela carga transmitida, e a adesão que se trata da fusão localizada do material devido ao contato metal-metal. A fadiga no pé do dente causa a quebra do dente, o que não é comum em conjuntos de transmissão bem projetados. Geralmente, a falha que ocorre primeiro é devido a fadiga de contato, e para a adesão, na maioria dos casos acontece em condições inadequadas de lubrificação.

De acordo com Waqar e Demetgul (2016, p. 58), as falhas normais de engrenagem são rachaduras na raiz, pontuações, corrosão, arranhões e falhas distribuídas, como desgaste de adesivo, desgaste abrasivo, imprecisão da superfície e desalinhamento. A maior parte das falhas

em engrenagens tem origem ligada à montagem, a lubrificação inadequada e sobrecarga, sendo classificadas em quatro classes gerais: desgaste, fadiga, deformação plástica e quebras.

A Associação Americana dos Fabricantes de Engrenagens (AGMA) (“American Gear Manufacturers Association”, 2015), classifica 20 modalidades de falhas em engrenagens para diversas categorias. O Quadro 1 apresenta o conjunto completo das possibilidades de falha das engrenagens.

Quadro 1 - Possibilidades de falhas em engrenagens

Falhas relatadas sem lubrificação	Falhas relatadas com Lubrificação	Desgaste	<i>Scuffing Scoring</i>
Sobrecarregamento Fratura frágil Fratura dúctil Deformação plástica: <ul style="list-style-type: none"> • escoamento a frio; • escoamento a quente; • indentação. <ul style="list-style-type: none"> Rolamento Esmagamento Martelamento Similar a indentação brinell Ondulação Sulcos Dobramento (escoamento) Interferência ponta a raiz Fadiga de dobramento Fadiga de baixo ciclo (<1000 ciclos para falha) Fadiga de alto ciclo (>1000 ciclos para falha)	Fadiga de contato <i>Pitting</i> Inicial Superficial Destrutivo Lascamento (<i>Spalling</i>) <i>Micropitting</i>	Adesão Suave Moderada Severa Excessiva Abrasão Arranhões Raspagem Sulcos Incisões Arrancamento Cavitação Danos por descargas elétricas Polimento (brunimento)	Esfolamento Adesão Soldagem Atrito Inicial Moderado Destrutivo

Fonte - Adaptado de Koda (2009b)

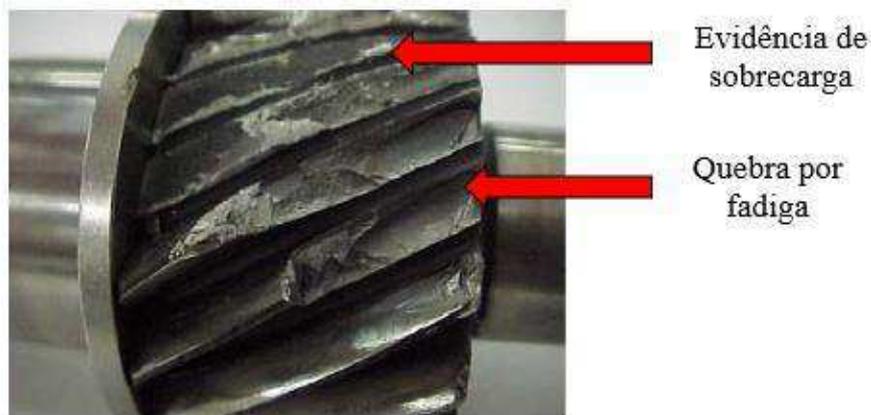
2.3.1 FADIGA POR FLEXÃO

Mediante os outros problemas em engrenagens, é o que apresenta uma menor dificuldade em ser evitado.

O aparecimento desta avaria é potenciado se não for respeitada a geometria do dentado durante o processo de maquinagem, ou se na utilização em serviço existir um desalinhamento importante dos dentes. Actualmente, é considerado inadmissível que ocorra este tipo de avaria em serviço, perante um projeto consciente de engrenagens. (AMARO, 2001, p. 7).

As fendas decorrentes deste tipo de falha são retilíneas e normalmente têm origem na superfície, elas iniciam-se no local onde a concentração de tensão é máxima e, praticamente em todos os casos, ocorrem do lado do dente onde é solicitado por tensões de tração. Este tipo de problema é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Fadiga por flexão em engrenagens cilíndricas helicoidais



Fonte - Violante (2010)

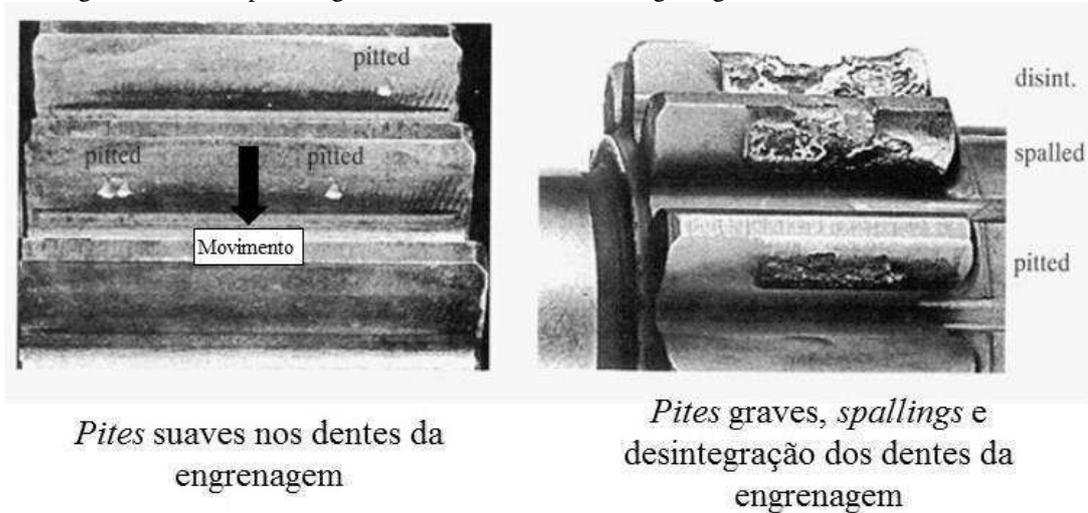
2.3.2 FADIGA DE CONTATO

É umas das principais causas de falhas ou desgastes em engrenagens. Segundo Violante (2010, p. 26), o início das fissuras decorrentes deste tipo de falha na superfície tem origem ou em tensões tangenciais provocadas pelo efeito do atrito ou pela grande concentração de tensões que ocorrem em zonas da superfície onde a rugosidade superficial é elevada.

A Figura 12 mostra duas engrenagens com falha por fadiga de contato. Esse tipo de falha, pode ser avaliada pelo que convencionou-se chamar de critério de durabilidade superficial. A imagem da esquerda mostra o estágio inicial da falha, o que se trata de desgastes suaves, esses pequenos sulcos chamados *pittings* ou pites segundo nomenclatura brasileira, são formados na região próximo a linha primitiva do dente, que é definida pelo diâmetro primitivo, exemplificado no Glossário. Amaro (2001, p. 9) define *pitting* por um desgaste ocasionado por elevadas tensões localizadas, que podem surgir devido aos picos de rugosidade das superfícies ou devido a defeitos geométricos dessas superfícies. Uma vez removidas as rugosidades, o

processo deixa de progredir e as pequenas crateras formadas nas superfícies são geralmente removidas pelo desgaste normal no flanco dos dentes.

Figura 12 - Falha por fadiga de contato em dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos



Fonte - Adaptado de Júnior (2002)

Supondo que as engrenagens da Figura 12 estejam trabalhando com o pinhão (superior) movendo a coroa, da esquerda para a direita, lentamente. Quando os dentes entram em contato, é fácil notar que existe uma compressão na direção radial devido ao deslizamento. Quando os dentes estão deixando o contato, a tensão se inverte e passa a tração na direção radial. Como os elementos são rígidos, existe um pequeno deslizamento entre as superfícies dos dentes, tanto na entrada quanto na saída dos dentes em contato. Como existe a inversão no sentido do deslizamento, existe um ponto no qual esse deslizamento será zero e isso ocorre quando o contato é na linha primitiva. Já que o lubrificante depende do movimento relativo entre as superfícies para atuar (efeito elasto-hidrodinâmico²), nessa região a separação dos elementos em contato não é adequada. Por isso, os *pittings* ocorrem ao longo dessa linha.

O *pitting* progressivo inicia-se bastante mais tarde durante a vida útil de uma engrenagem, começando, normalmente, na zona do *dedendo*. Este tipo de problema é mais frequente no pinhão do que nas rodas das engrenagens redutoras, afirma Amaro (2001, p. 11), já que os pinhões, pelo menor diâmetro estão submetidos a um maior número de ciclos. Além disso, a direção do deslizamento na zona do *dedendo* provoca tensões que favorecem a propagação de fissuras. É complicado prever a evolução deste tipo de falha, podendo ocorrer

² Este tipo de lubrificação ocorre quando duas superfícies em movimento relativo são separadas por uma película de um fluido lubrificante. O regime de lubrificação hidrodinâmica acontece quando a espessura do filme de fluido lubrificante entre as superfícies deslizantes é maior que três vezes a rugosidade combinada das duas superfícies.

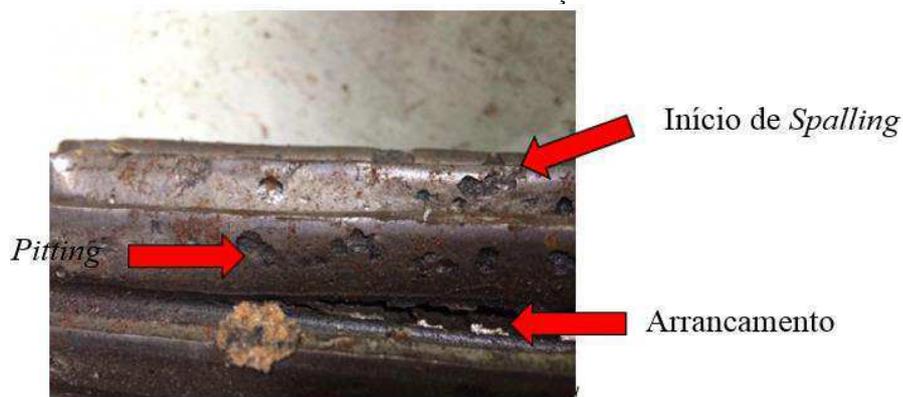
situações em que a evolução diminua ou inexista e em outras que ocorra o oposto. Para este último caso, a falha de fadiga por contato aumenta de tamanho e partes maiores são arrancadas da superfície. O termo em inglês para o que ocorre é *Spalling* e após essa fase ocorre a desintegração do dente, como mostrado na Figura 12.

Se este tipo de falha continuar progredindo conduz a redução de uma área significativa da área resistente transversal dos dentes afetados, reduzindo consideravelmente a sua capacidade de resistência a flexão, terminando, muitas vezes sendo transformada em uma falha rotulada como fadiga de flexão, como pode ser exemplificada na Figura 13.

Outro tipo de fissura é o *micropitting*, que se trata de um dano superficial que ocorre em sistemas de alta rotação devido ao contato cíclico e ao fluxo plástico das rugosidades. Primeiro, aparece na zona de rotação até chegar à raiz da engrenagem, dando lugar à perda do perfil do dente ou à fratura do mesmo, o que se traduz em ruído e vibrações.

Em muitos casos, o *micropitting* não é destrutivo para a superfície das engrenagens e, inclusive, pode-se parar a sua evolução quando se restabelecem as condições tribológicas do sistema. Também há casos em que se pode eliminar através do polimento durante o processo de rotação das engrenagens. Ainda assim, a profundidade do *micropitting* é muito difícil de ver pelo olho humano e há poucos métodos de controle do mesmo em engrenagens em uso. Os principais métodos de controle são inspeções visuais (boroscopia³), análises do óleo e ensaios destrutivos das engrenagens. (ABREU, 2016, p. 1).

Figura 13 - *pitting*, início de *spalling* e condições de arrancamento dos dentes (fadiga de flexão) de um pinhão de um moedor de cana-de-açúcar



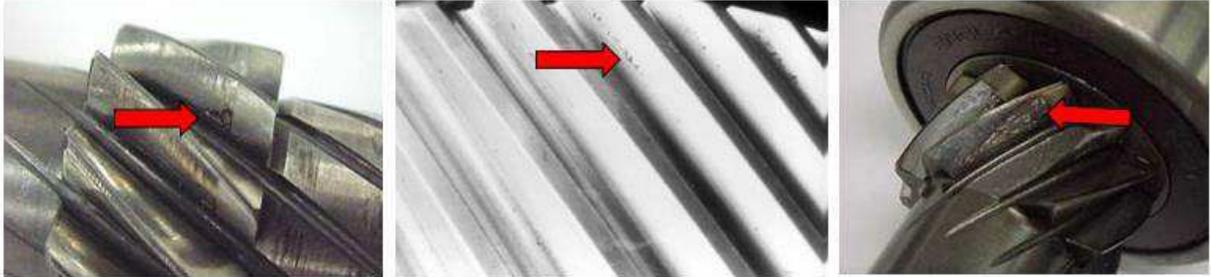
Fonte - Autoria própria

O *pitting* de uma forma geral, deve ser assumido como um fenômeno complexo e que depende, para além das condições de funcionamento (solicitações, lubrificação, entre outros.), da composição dos próprios materiais, dos lubrificantes em uso e da interação entre esses dois

³ Técnica de inspeção em equipamentos industriais que utiliza uma câmera de vídeo, que permita visualizar possíveis falhas e danos na parte interna de máquinas.

fatores perante as condições locais mediante o contato entre as superfícies. Na Figura 14 podem ser observados outros casos de *pitting* em diferentes estágios para dentes de engrenagens, apontados pelas setas de cor vermelha.

Figura 14 - *pittings* em dentes de engrenagens

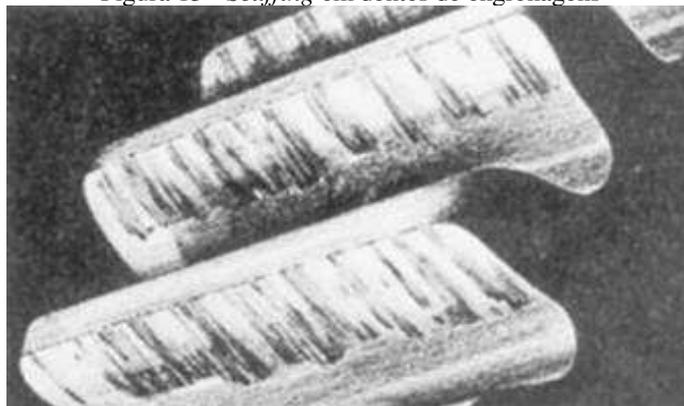


Fonte - Violante (2010)

2.3.3 ADESÃO OU *SCUFFING*

As falhas em engrenagens também podem ocorrer por adesão ou *scuffing*, que ocorre em casos em que a película lubrificante não consegue manter separadas as superfícies em contato, permitindo desse modo a ocorrência do contato metal-metal, de fusões localizadas dos materiais e conseqüentemente o arrancamento de material nesses pontos. Este fenômeno pode ser ocasionado através de uma falha generalizada da lubrificação ou, em determinadas condições de contato, da interação entre os picos de rugosidade das superfícies face e uma espessura inadequada da película de lubrificante, um exemplo de *scuffing* pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - *Scuffing* em dentes de engrenagens



Fonte - Fei *et al.* (2008)

Diversas falhas de engrenagens são conhecidas por vários nomes e condições qualificativas, como inicial, moderado, destrutivo, e assim por diante. O termo "*scoring*" foi usado no passado nos Estados Unidos, enquanto o termo "*scuffing*" é usado na Europa. Ambos descrevem uma forma severa de desgaste adesivo que envolve a soldagem e cisalhamento das superfícies (engripamento) dos dentes da engrenagem. (KODA, 2009a, p. 57).

Segundo Amaro (2001, p. 13), para este tipo de falha devem ser considerados outros fatores, que são as tensões envolvidas no contato e a velocidade relativa das superfícies. Com isso, pode ser gerado o aumento substancial da temperatura e posteriormente a fusão do material. Este fenômeno é acelerado com o aumento da carga imposta ao contato, com o aumento da velocidade de escorregamento das superfícies, da geração de calor e da rugosidade superficial dos dentes da engrenagem. Diminui, no entanto, com o aumento da viscosidade do lubrificante, com o aumento da velocidade do rolamento (que aumenta a espessura do óleo lubrificante) e com o aumento da dureza superficial. A atividade química também interfere e contribui para a o surgimento da adesão, já que os aditivos presentes no lubrificante reagem com as superfícies em contato, originando óxidos e outros produtos que impedem o contato direto entre as superfícies.

2.4 LUBRIFICAÇÃO DE ENGRENAGENS

Segundo Norton (2013, p. 732) todos os engrenamentos devem ser lubrificados para evitar falha prematura em qualquer modo de falha de superfície, como por exemplo, abrasão, desgaste adesivo, fadiga de contato, etc.

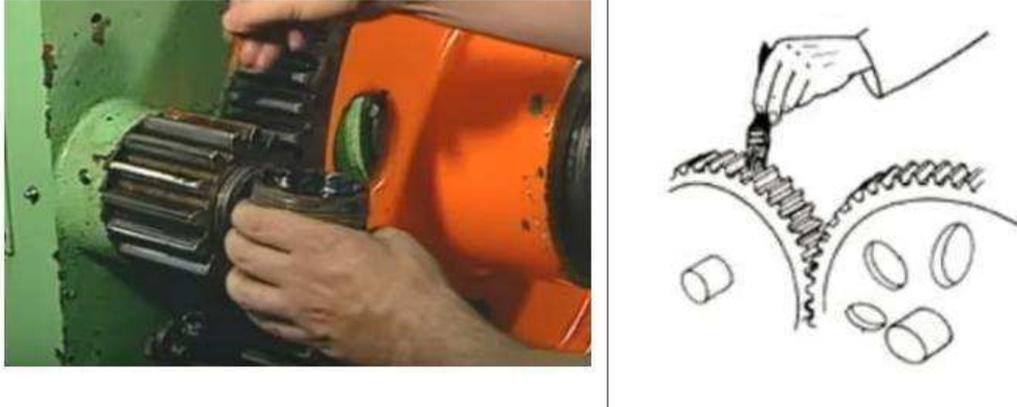
Os métodos mais comuns de lubrificação de engrenagens são os seguintes: manual, por banho de óleo ou por sistema circulatório. As engrenagens podem ser classificadas em abertas ou fechadas, o que faz variar o método de lubrificação e a seleção do lubrificante.

2.4.1 MÉTODO MANUAL

Geralmente este método é realizado por pincelagem, conforme pode ser exemplificado na Figura 16, onde se trata da lubrificação em engrenagens cilíndricas de dentes retos, que é o caso das engrenagens abertas ou expostas, com o emprego de composição betuminosa e graxa, aplicadas por meio de brochas, pincéis ou espátulas (TELECURSO 2000, 1997, p. 7). Essas

composições tem uma aderência maior que o óleo ou a graxa e são indicadas para engrenagens grandes, de baixa rotação, que transmitem cargas elevadas.

Figura 16 - Lubrificação de engrenagens retas abertas com graxa por pincelagem



Fonte - Adaptado de Telecurso 2000 (1997)

2.4.2 MÉTODO POR BANHO DE ÓLEO

A lubrificação por banho de óleo em engrenagens pode ser com “salpico⁴”, sem “salpico e por circulação.

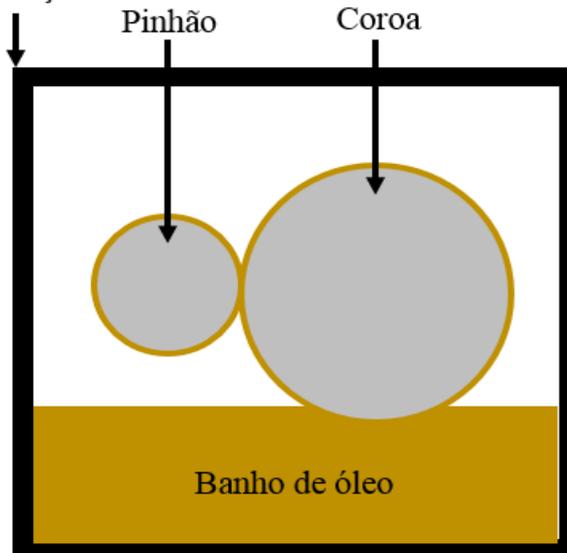
Sem salpico é o caso da lubrificação de engrenagens abertas, de grandes dimensões e baixa rotação. Aplicam-se óleos lubrificantes muito viscosos e até mesmo composições betuminosas leves.

O enfoque usual e preferido é prover um banho de óleo alojando as engrenagens em uma caixa com óleo bem fechada, chamada de redutor. Esse redutor é parcialmente enchido com lubrificante apropriado de forma que pelo menos um membro de cada par engrenado esteja parcialmente submerso. (NORTON, 2013, p. 732).

Com salpico é quando o nível do lubrificante é mantido de modo a que apenas os dentes da engrenagem inferior mergulham no óleo, como ilustrado na Figura 17, onde o controle de nível de óleo deve ser monitorado.

⁴ Designação de gota que pula e respinga

Figura 17 - Lubrificação por banho de óleo com salpico
Carcaça



Fonte - Autoria própria

2.4.3 MÉTODO DE CIRCULAÇÃO SOB PRESSÃO

Método bastante empregado quando dispõe de altas velocidades (de 10 a 13 m/s) e em engrenagens fechadas ou enclausuradas. O óleo é fornecido por meio de uma bomba, sob pressão na forma de um jato aplicado próximo ao ponto de engrenamento e depois recirculado. O sistema é projetado, de tal forma que pressão interna seja maior que a pressão atmosférica, para evitar a entrada de impurezas. Estes sistemas apresentam a vantagem de proporcionar maior troca de calor, havendo casos em que são instalados radiadores para arrefecimento de óleo.

Figura 18 - Lubrificação por circulação sob pressão



Fonte - Inovação Industrial (2018)

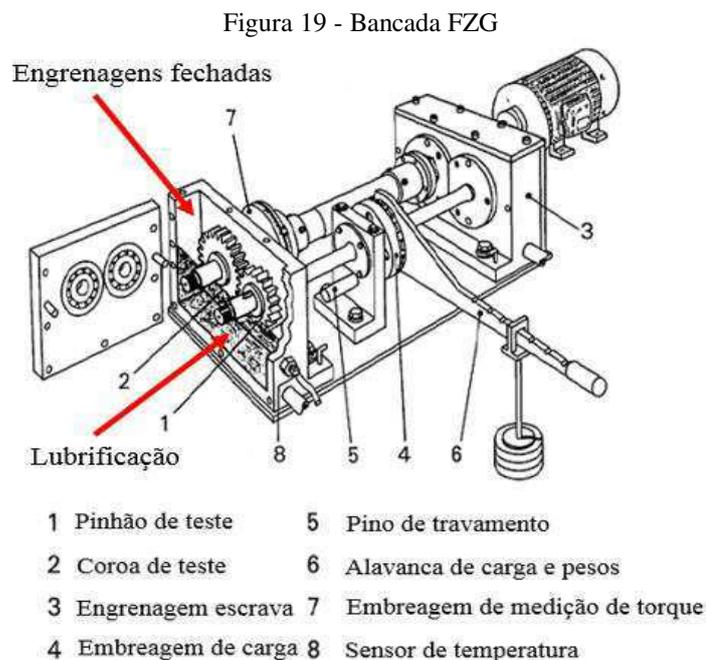
2.4.4 LUBRIFICAÇÃO PARA ENGRENAGENS FECHADAS

Segundo Hernandez ([s.d.], p. 8), a completa separação das superfícies dos dentes das engrenagens durante o engrenamento, implica na presença de uma película de óleo de espessura suficiente para que as saliências microscópicas destas superfícies não se toquem.

O óleo é aplicado às engrenagens fechadas por meio de salpico ou de circulação. Na lubrificação por salpico, cuidado especial com o nível de óleo do reservatório, se tiver baixo, resultará em distribuição deficiente e falta de lubrificação, se alto, provoca agitação excessiva consumindo força e gerando calor, que influirá na viscosidade do óleo.

Um exemplo de lubrificação em engrenagens fechadas pode ser exemplificado através da bancada experimental FZG para ensaios de desgastes em engrenagens, ilustrada na Figura 19. A mesma bancada utilizada em trabalhos como os de Amaro (2001) e Koda (2009a), onde o método de lubrificação é com salpico, o nível de óleo é devidamente monitorado para a lubrificação em engrenagens de dentes retos.

A seleção do óleo para estes tipos de engrenagens depende dos seguintes fatores: tipo de engrenagem, rotação do pinhão, grau de redução, temperatura de serviço, potência, natureza da carga, tipo de acionamento, método de aplicação e contaminação.



Fonte - Hoehn *et al.* (2008)

2.4.5 LUBRIFICAÇÃO PARA ENGRENAGENS ABERTAS

O enclausuramento de engrenagens não é viável em termos de praticidade e economia, embora exigido pela legislação trabalhista, conforme requisitado pela norma regulamentadora nº 12 (NR-12), no intuito de atender aos requisitos mínimos de segurança, agregando negativamente também na ação dos contaminantes advindos do ambiente, estas são as chamadas engrenagens abertas. Só podem ser lubrificadas intermitentemente e, muitas vezes, só a intervalos regulares, proporcionando películas lubrificantes de espessuras mínimas entre os dentes, prevalecendo as condições de lubrificação limítrofe⁵. (HERNANDEZ, [s.d.], p. 8).

Ao selecionar o lubrificante de engrenagens abertas, é necessário levar em consideração as seguintes condições: temperatura, método de aplicação, condições ambientais e material da engrenagem.

2.5 MANUTENÇÃO EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

Segundo Benedetti (2002, p. 15), até o ano 1940, o conceito era de reparar as quebras, quando os Estados Unidos lançaram a manutenção preventiva como uma nova técnica revolucionária para manter a performance dos equipamentos. Este tipo de manutenção teve como foco o tempo, o intervalo pré-definido para todas as tarefas programadas a executar. Também tem como regra, a substituição de peças e componentes em qualquer estágio de maturidade. Um relatório, espécie de planilha loca-se às tarefas em forma sequencial, de acordo com as características do equipamento.

Enquanto, em 1950, era consolidado o processo de manutenção preventiva, ou manutenção baseada no tempo, nasce no meio industrial a manutenção baseada na performance e desempenho, também conhecida como manutenção baseada nas condições, em que se encontra o equipamento. A manutenção preventiva com base no tempo e a manutenção da condição são baseadas na técnica preditiva, também chamada de manutenção preditiva.

De uma forma geral, os tipos de manutenção empregadas para máquinas e equipamentos são: manutenção corretiva, preventiva, preditiva e proativa.

⁵ A lubrificação limite ou limítrofe é observada quando a película protetora apresenta uma espessura mínima do ponto de vista prático, podendo chegar a ser “monomolecular”, sendo desenvolvida graças a essas moléculas depositadas nas superfícies de contato. Quando destrói-se essa camada, ocorre o atrito seco e, por conseguinte, o desgaste da peça.

Para Olinda (2018, p. 19), manutenção corretiva é o reparo do equipamento, ou de um de seus componentes, quando o mesmo apresenta certa redução do seu desempenho ou falha durante seu uso, e pode ser realizada de forma planejada ou não planejada.

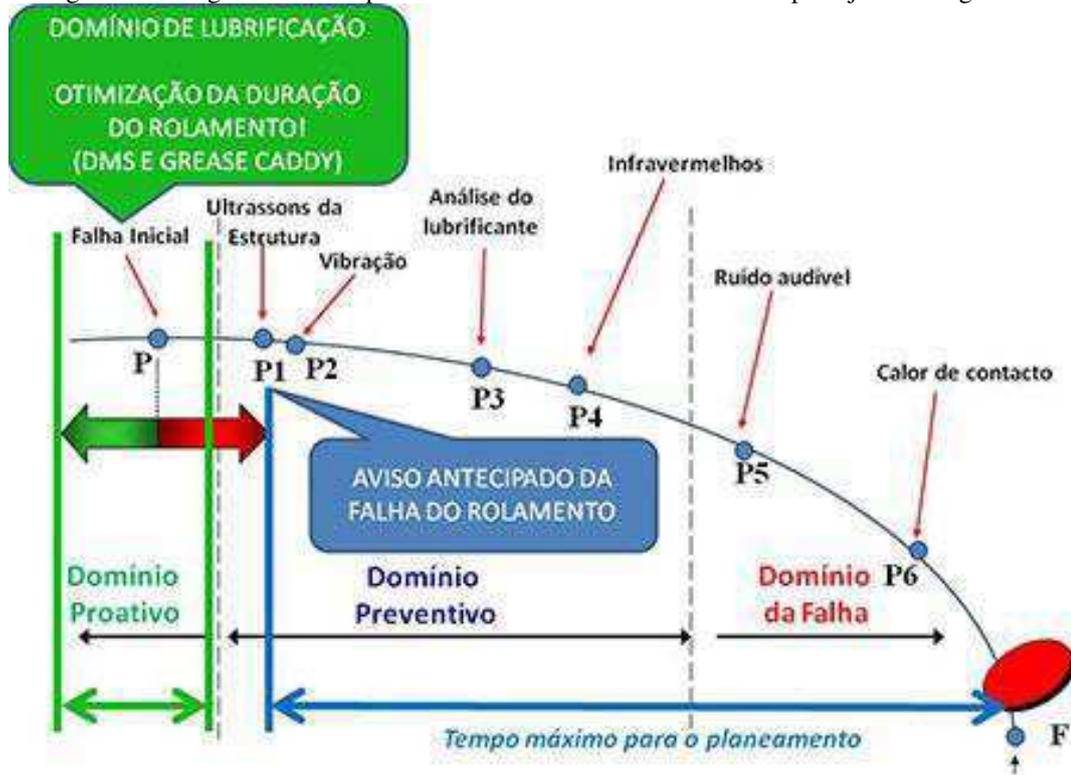
A manutenção preventiva se caracteriza por tarefas determinadas em intervalos fixos e com substituição de partes. Consiste regularmente de inspeções, ajustes, limpeza, lubrificação, calibração e reparos de componentes do equipamento. Manutenção preventiva também pode ser chamada de manutenção baseada no intervalo, de acordo com Rockwell (1998). As inspeções periódicas, ou eventos em intervalos pré-definidos ajudam a reduzir as falhas nos equipamentos.

A manutenção Preditiva, também chamada de manutenção baseada na condição ou monitoramento da condição, é estritamente focada na tarefa, verificando se está falhando. Esta tecnologia usa a inspeção visual, técnicas não destrutivas e dados de performance da condição da máquina. Permite uma análise contínua das condições do equipamento, monitora dados e programa a manutenção, trabalha com a funcionalidade da falha.

Na manutenção proativa a ação é tomada antes da maturação do processo de falha. Tem-se desenvolvido esta técnica, através do melhor projeto, instalação, procedimentos de manutenção e programação.

Ainda relativo a manutenção preditiva, os métodos de análises que determinam o percurso da falha são: dados comparativos, correlação com tecnologias múltiplas, análise de tendência e principalmente dados do fornecedor e estatística interna. Entre as técnicas não destrutivas destacam-se três, bem difundidas no parque industrial: análises de lubrificantes, Termografia e monitoramento da vibração. Uma situação de análise para viabilidade de uso destas técnicas, é exemplificada por meio da Figura 20, que se trata de uma falha causada por condições inadequadas de lubrificação em um rolamento.

Figura 20 - Surgimento e comportamento de uma falha e os meios de planejar seu diagnóstico



Fonte - UE Systems (2019)

CAPÍTULO III

O objetivo deste capítulo é realizar uma fundamentação teórica sobre radiação térmica, no que diz respeito a forma de propagação e as variáveis de interesse para o entendimento deste fenômeno. Levantar-se-á informações sobre variáveis como: ângulo sólido, intensidade radiativa, características da emissão da radiação, radiação em um corpo ideal e real (adentrando aos conceitos de emissividade) para, por fim, expor as propriedades radiativas dos materiais.

3.0 RADIAÇÃO TÉRMICA

Para Modest (2013, p. 1), os termos transferência de calor por radiação e radiação térmica, são comumente usados para descrever a ciência da transferência de calor causada por ondas eletromagnéticas. Um exemplo óbvio de radiação térmica cotidiana inclui o efeito de aquecimento da luz do sol em um dia claro.

Depois que essas ondas atingem outro objeto, elas perdem parcialmente sua energia e dão origem a transições eletrônicas ou moleculares e/ou vibrações de rede no corpo receptor. Isso é chamado de absorção, o que faz com que o nível de energia do segundo objeto aumente. Tanto a radiação emitida quanto a absorvida são funções das propriedades físicas e químicas do material, bem como do seu nível de energia (como quantificado pela sua temperatura). A interação entre os órgãos emissores e absorventes através das ondas eletromagnéticas é a essência da transferência de energia radiativa.

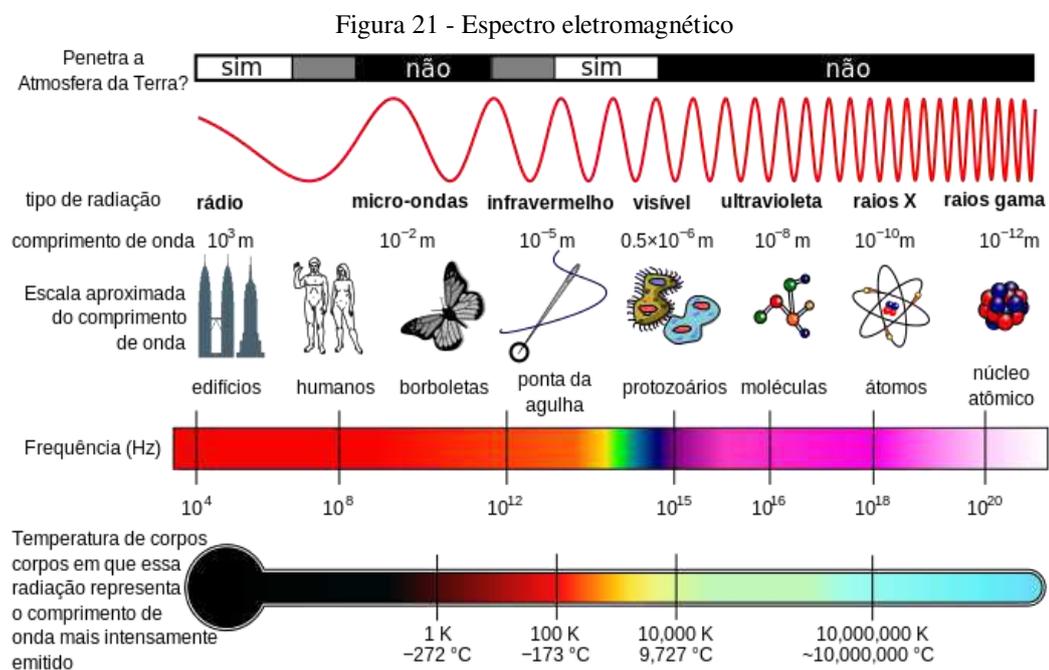
Howell *et al.* (2016, p. 8) afirma que qualquer propriedade usada para cálculos de transferência radiativa deve ser de natureza espectral, especificada em um determinado comprimento de onda ou frequência. Além disso, a radiação eletromagnética pode ser classificada de acordo com seu comprimento de onda (λ_0) no vácuo, ou sua frequência (ν), como mostrado na Equação 1.

$$\nu = \frac{\lambda_0}{c_0} \quad (1)$$

Onde $c=3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo.

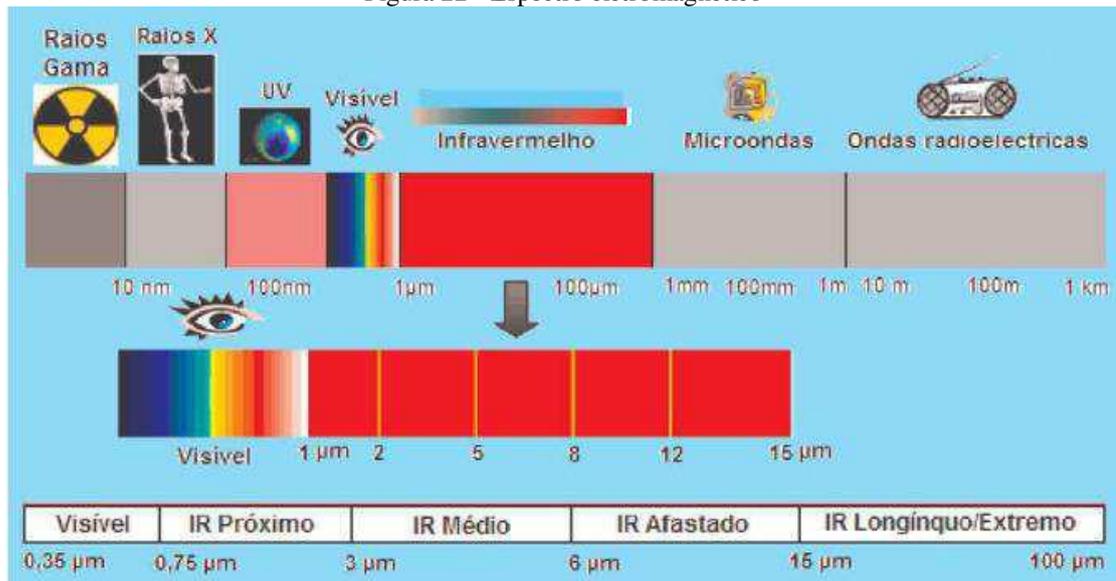
Os intervalos de ondas eletromagnéticas são mostrados nas Figuras 21 e 22. Os comprimentos de ondas de rádio e televisão podem ser de até milhares de metros. Na outra extremidade do espectro, os comprimentos de onda dos raios cósmicos podem ser tão pequenos da ordem de 10^{-14} m. A energia dos corpos aumenta proporcionalmente a diminuição do comprimento de onda, tendo em vista que os raios gama possuem uma energia muito superior as ondas de radiofrequência. Dentro desta vasta gama que abrange mais de 18 ordens de grandeza, a luz visível é confinada a um intervalo de 400-740 nm (isto é, 0,4-0,7 μm). Para a maioria dos propósitos práticos, a radiação térmica está relacionada com uma faixa de comprimento de onda de 100 nm a 100 μm , incluindo o ultravioleta e o visível ($\lambda = 0,1-0,7 \mu\text{m}$), o infravermelho próximo ($\lambda = 0,7-10 \mu\text{m}$) e o infravermelho distante ($\lambda = 10-100 \mu\text{m}$). Diferentes mecanismos físicos produzem ondas eletromagnéticas em diferentes comprimentos de onda. Alguns desses mecanismos incluem átomos ou moléculas passando por transições de um estado de energia para outro estado de energia mais baixo. Essas transições podem ocorrer espontaneamente ou podem ser induzidas pela presença de um campo de radiação externo.

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



Fonte - Wikipédia (2018)

Figura 22 - Espectro eletromagnético



Fonte - Caramalho (2012)

Tabela 1 - Espectro de ondas eletromagnéticas

Nome	Faixa espectral
UV-C	0,100 μm – 0,280 μm
UV-B	0,280 μm – 0,315 μm
UV-A	0,315 μm – 0,400 μm
VISÍVEL	Aproximadamente 0,360 – 0,400 μm a 0,760 -0,800 μm
IR-A	0,780 μm – 1,400 μm
IR-B	1,400 μm – 3,000 μm
IR-C	3,000 μm – 1000,000 μm

Fonte - Adaptado de Caramalho (2012)

Segundo Cabral (2017, p. 30), deve ser destacado 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, para Silva Júnior (2017, p. 24), existem subdivisões que são nomeadas de infravermelho próximo (0,75 μm a 3,0 μm), infravermelho médio (3,0 μm a 6,0 μm), infravermelho distante (6,0 μm a 15,0 μm), infravermelho distante extremo (15,0 μm a 1.000 μm). Há também as respectivas faixas de frequência das faixas espectrais conforme a Tabela 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* (infravermelho distante)	300 GHZ – 6 THZ
INFRAVERMELHOS	MIR** (infravermelho médio)	6 THZ – 120 THZ
	NIR*** (infravermelho próximo)	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*

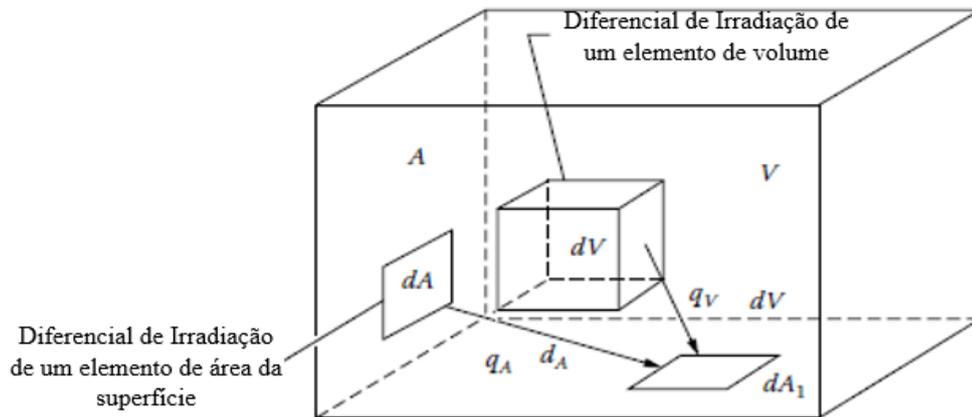
****Near Infrared*

Fonte - Adaptado de Chrzanowski (2001)

A energia radiativa é transmitida entre elementos distantes sem requerer um meio entre eles. Por exemplo, considerando um gabinete aquecido com superfície A e volume V, preenchido com material radiante, como gás quente, nuvem de partículas quentes ou vidro quente como mostrado na Figura 23. Se $q_A dA$ for definido como a taxa de energia radiante que chega a dA_1 a partir de um elemento de superfície dA e a taxa de energia $q_V dV$ chega em dA_1 a partir de um elemento de volume dV , então a taxa de energia radiativa de todo o recinto chegando a dA_1 é dada pela Equação 2.

$$Q_{rad}(dA_1) = \int_A q_A dA + \int_V q_V dV \quad (2)$$

Figura 23 - Termos de radiação para um invólucro preenchido com material irradiado



Fonte - Adaptado de Howell *et al.* (2016)

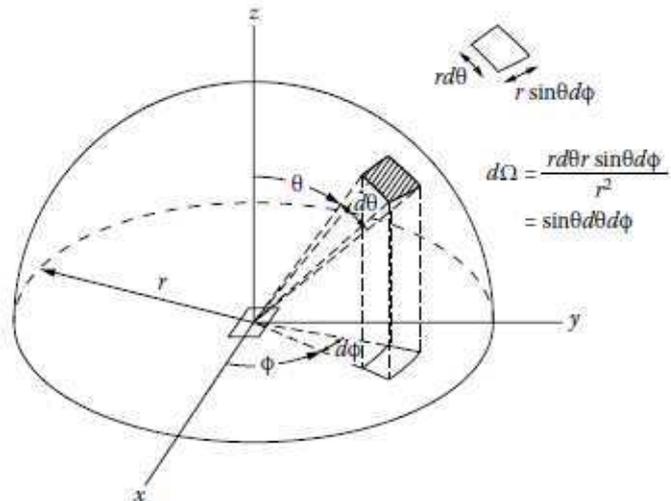
A transferência radiativa precisa ser determinada após a contabilização de todos os efeitos direcionais. Segundo Howell *et al.* (2016, p. 19), para poder analisar quantitativamente qualquer um desses problemas, é necessário definir e quantificar adequadamente as propriedades radiativas, incluindo os coeficientes de absorção, emissão e dispersão. Para isso, são apresentados os conceitos de ângulo sólido, intensidade de radiação, poder emissivo, corpo negro e emissividade.

3.1 ÂNGULO SÓLIDO

Para desenvolver a compreensão da energia radiativa que se propaga de uma superfície para outra, considere a energia radiativa espectral se propagando ao longo de uma direção S e incidente sobre um pequeno volume de controle dV em $S(x, y, z)$. Essa energia é confinada a uma pequena região cônica, que é chamada de ângulo sólido (Ω).

O ângulo sólido é definido no espaço tridimensional, 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. Para a definição de ângulo sólido, considere uma área de superfície elemental dA cercada por um hemisfério de raio R , conforme exposto na Figura 24.

Figura 24 - Hemisfério mostrando as relações do ângulo sólido

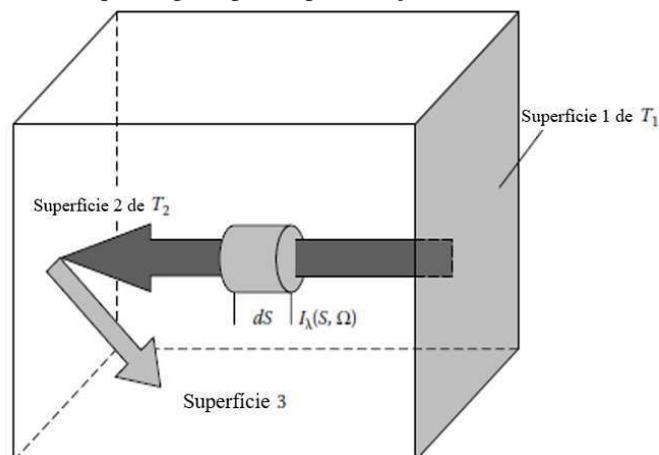


Fonte - Howell *et al.* (2016)

3.2 INTENSIDADE RADIATIVA ESPECTRAL

O conceito de intensidade radiativa, será apresentado a partir da energia radiativa dQ_λ (S, Ω, t) propagando na direção Ω ao longo do caminho S , exemplificados nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Esquema geral para representação da transferência radiativa



Fonte - Howell *et al.* (2016)

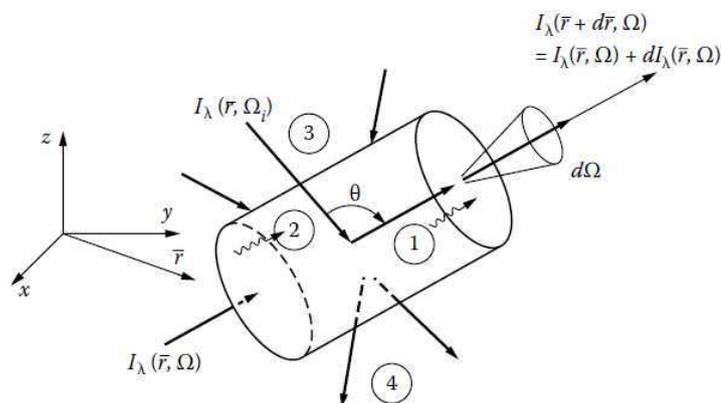
A intensidade radiativa espectral I_λ é definida como a energia radiativa espectral dQ_λ por unidade de área projetada dA ao longo de um caminho S , pelo ângulo sólido $d\Omega$ em torno de Ω , por intervalo de tempo de unidade dt no tempo t e um pequeno intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ , como mostrado na Equação 6.

$$I_\lambda(S, \Omega, t) = \lim \frac{dQ_\lambda(S, \Omega, t)}{dA d\lambda d\Omega dt} \quad (3)$$

A intensidade radiativa espectral é a quantidade fundamental para todos os cálculos de radiação. As unidades da intensidade radiativa espectral $I_\lambda(S, \Omega, t)$ são $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$. A quantidade mensurável é geralmente a energia radiativa, $Q(S, \Omega, t)$, que requer uma integração da intensidade radiativa sobre um elemento de área finita, ângulo sólido, intervalo de comprimento de onda e duração do tempo, produzindo unidades de Joule (J). A intensidade espectral é uma função de sete parâmetros independentes, incluindo três coordenadas espaciais (x, y, z) ao longo de S e duas coordenadas angulares (θ, ϕ) para direção Ω , o comprimento de onda (λ) (ou frequência, ν) e tempo (t). É sempre especificado com um comprimento de onda λ por unidade de intervalo de onda em torno de λ .

A dependência de temperatura da intensidade está implícita nessas expressões, pois a temperatura é especificada com as coordenadas espaciais dentro do meio. Especificamente, a intensidade espectral refere-se à radiação em um intervalo $d\lambda$ em torno de um único comprimento de onda, enquanto a intensidade total refere-se à radiação combinada incluindo todos os comprimentos de onda. Todos esses parâmetros mencionados podem ser ilustrados na Figura 26 para quatro diferentes situações de incidência radiativa.

Figura 26 - Intensidade radiativa se propagando através de um elemento de volume



Fonte - Howell *et al.* (2016)

À medida que se propaga ao longo da direção Ω através de um intervalo de percurso dS , a energia radiativa perde parte da sua força devido à dispersão e absorção.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO

Todo objeto a uma temperatura finita emite energia radiativa. Em princípio, a emissão de um determinado corpo é uma função das propriedades do material, da temperatura e da direção, como mostrado na Equação 4, caracterizando o poder emissivo.

$$E_{\lambda} = f(T, \lambda, \theta, \varphi) \quad (4)$$

Onde:

$$T = T(x, y, z)$$

θ e φ são as coordenadas angulares

Um corpo ideal emitiria a quantidade máxima de energia uniformemente em todas as direções e em cada comprimento de onda. O conceito de um corpo tão ideal, que é o chamado corpo negro, é básico para o estudo da transferência de energia radiativa. Como um absorvente ideal, serve como um padrão com o qual os materiais reais podem ser comparados, já que nunca absorvem a energia em todos os comprimentos de onda.

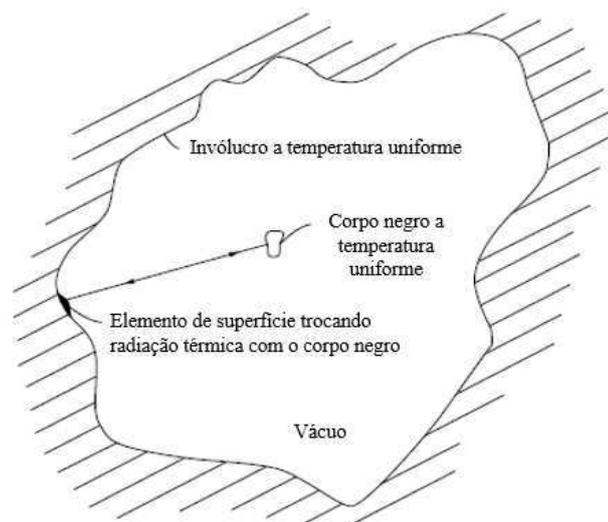
A interação da energia radiante na superfície de um corpo depende não apenas das propriedades da própria superfície, mas também do material abaixo da superfície. Quando um feixe é incidente em um corpo homogêneo, algumas das radiações são refletidas e o restante penetra no corpo. A radiação pode então ser absorvida e dispersa à medida que viaja através do meio como discutido anteriormente. Se a espessura do material for menor do que a necessária para absorver toda a radiação, então uma quantidade significativa da radiação passa pelo corpo. Se, por outro lado, o material for um absorvedor forte, nenhuma radiação pode escapar do meio; neste caso, a radiação não refletida na superfície seria convertida em energia interna do meio. Esta conversão varia em função da distância da superfície, dependendo das propriedades espectrais do meio. Este mecanismo de absorção aumenta a temperatura do corpo.

3.4 RADIAÇÃO DE UM CORPO NEGRO

Segundo Olinda (2018, p. 44), para o entendimento das características da radiação dos corpos, é necessário entender a definição de corpo negro. Este é um corpo ideal, capaz de absorver toda radiação que incide na sua superfície além do fato de que nenhum corpo emite

mais radiação que um corpo negro em uma dada temperatura e comprimento de onda. Ou seja, sua emissão radiativa será sempre maior que a capacidade dos corpos reais. Considere um corpo negro ou ideal a uma temperatura uniforme dentro de um invólucro evacuado perfeitamente isolado de formas arbitrárias, cujas paredes também são corpos negros a temperaturas uniformes e diferentes, como mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Invólucro perfeitamente isolado para trocas radiativas entre um elemento de superfície e um corpo negro



Fonte - Adaptado de Howell *et al.* (2016)

Após um período de tempo, o corpo negro e o recinto alcançam uma temperatura comum de equilíbrio uniforme. Em equilíbrio, o corpo negro deve emitir tanta energia quanto absorve. Para provar isso, considere o que aconteceria se as quantidades recebidas e emitidas de radiação não fossem iguais com o sistema a uma temperatura uniforme. Então, o corpo negro fechado aumentaria ou diminuiria a temperatura. Isto implicaria uma quantidade líquida de transferência de energia entre dois corpos à mesma temperatura. Isso será impossível de acordo com a segunda lei da termodinâmica, a menos que haja entrada de trabalho externo no sistema. Segue-se que o corpo negro é, por definição um absorvedor e emissor ideal da radiação do invólucro em cada comprimento de onda e em cada direção de propagação. (HOWELL; MENGUC; SIEGEL, 2016, p. 15, tradução nossa).

3.5 EMISSIVIDADE

Para Modest (2013, p. 62) é importante perceber que as propriedades radiativas dos materiais opacos⁶ dependem exclusivamente da composição de uma camada superficial muito

⁶ Um corpo é chamado de opaco se toda a radiação incidente que passa por sua superfície é absorvida internamente. Um material pode ser opaco se a espessura do material for bastante grande, mas pode ser semitransparente se a sua espessura for de poucos longos períodos de onda. Um dos melhores exemplos disso é o ouro; Devido à

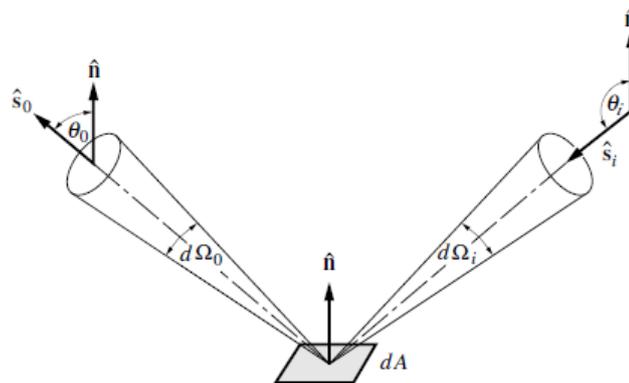
finas e, portanto, podem, para o mesmo material, mudar de lote para lote e, de fato, durante a noite. Esse comportamento contrasta com a maioria das outras propriedades termofísicas, como a condutividade térmica, que são propriedades a granel e, como tal, são insensíveis à contaminação da superfície, rugosidade e assim por diante.

O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST, anteriormente NBS) recomendou reservar a terminação "ssividade" para propriedades radiativas de materiais puros e perfeitamente lisos e "tância" para superfícies rugosas ou contaminadas. (MODEST, 2013, p. 62).

A propriedade radiativa mais básica para a emissão de uma superfície opaca é a emissividade espectral direcional, definida como exposto na Equação 5, onde \hat{s}_0 se trata da direção do fluxo de saída (vetor direção) da energia radiativa, como mostrado na Figura 28, para uma superfície de material arbitrário. O sub-índice "b" refere-se aos parâmetros de um corpo negro.

$$\epsilon_{\lambda}(T, \lambda, \hat{s}_0) = \frac{I_{\lambda}(T, \lambda, \hat{s}_0)}{I_{b\lambda}(T, \lambda, \hat{s}_0)} \quad (5)$$

Figura 28 - Fluxo radiativo de calor em uma superfície de material arbitrário



Fonte - Modest (2013)

Na Equação 6, que segue o mesmo princípio da Equação 7, pode-se observar que se trata da razão do poder real emissivo, espectral e direcional de uma superfície de material

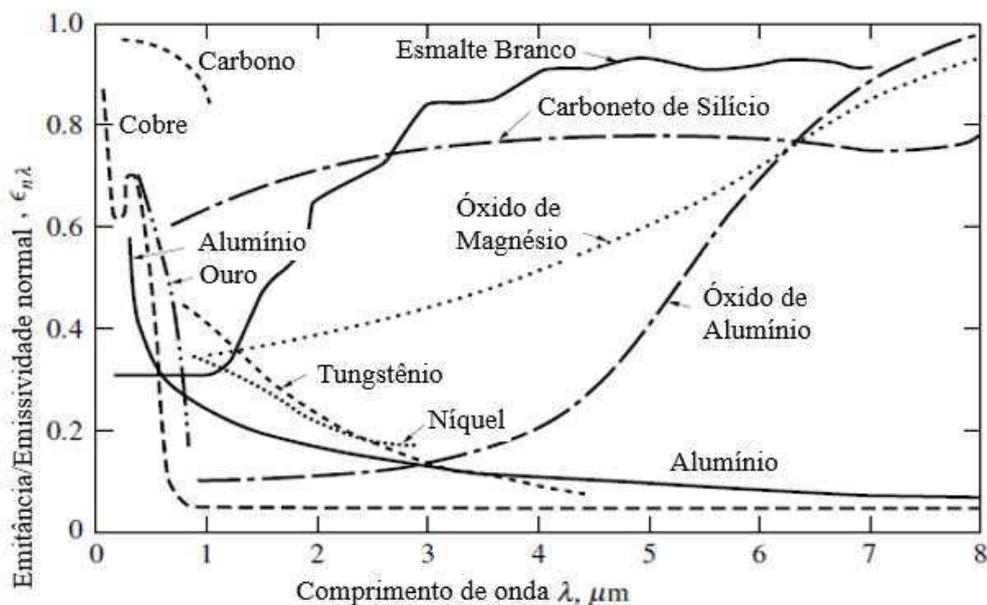
transmissividade espectral seletiva de filmes de ouro finos, eles são usados em muitas aplicações práticas, incluindo a proteção de astronautas da entrada excessiva de energia solar através de seus capacetes.

arbitrário com o de uma superfície de um corpo negro nas mesmas condições. O sub índice λ é utilizado para distinguir a emissividade espectral do valor total (isto é, a média espectral).

$$\epsilon_{\lambda}(T, \lambda) = \frac{E_{\lambda}(T, \lambda)}{E_{b\lambda}(T, \lambda)} \quad (6)$$

A emitância ou emissividade pode variar entre os valores de 0 a 1 e, para um corpo negro, temos $\epsilon = 1$. Todas as quatro propriedades podem ser funções de temperatura, bem como de comprimento de onda (ou frequência). A absorção pode variar para diferentes direções de irradiação, enquanto a emissividade pode variar com as direções de saída. O comportamento espectral típico da emissividade de superfícies é mostrado na Figura 29 para alguns materiais, conforme coletados por White (1984, *apud* Modest, 2013, p. 22). São apresentados resultados direcionais na direção normal para a superfície. Em geral, os não-metais dispõem de valores relativamente elevados, que podem variar de forma errática em todo o espectro, e os metais se comportam de forma semelhante para comprimentos de onda curtos, mas tendem a ter valores mais baixos com dependência espectral mais regular no infravermelho.

Figura 29 - Emitância/emissividade para materiais selecionados



Fonte - Adaptado de Modest (2013)

Com isso, a emissividade é a capacidade de um objeto emitir radiação eletromagnética quando o comparado com o chamado "corpo negro" para a mesma temperatura e comprimento

de onda. A energia emitida é proporcional a quarta potência da temperatura de um objeto. Pode-se concluir que a emissividade de um objeto pode ser exemplificado pela Equação 7.

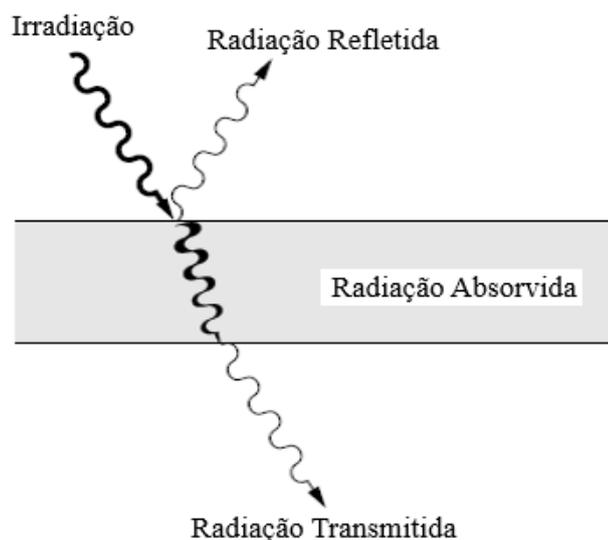
$$\epsilon = \frac{\text{energia emitida por uma superfície}}{\text{energia emitida pela superfície de um corpo negro a mesma temperatura}} \quad (7)$$

3.6 PROPRIEDADES RADIATIVAS DOS MATERIAIS

Para Chrzanowski (2001, p. 32), fazendo um balanço de energia em uma superfície, a radiação incidente sofre uma divisão, tendo parte de sua intensidade inicial absorvida pela superfície, parte transmitida e parte refletida. Um exemplo disso é a radiação recebida por um meio semitransparente, ao qual tem a capacidade de absorver, transmitir e refletir parte da radiação, como em janelas translúcidas que recebem radiação solar.

Considere a radiação térmica que chega a um meio de espessura finita, como mostrado na Figura 30. Em geral, parte dessa irradiação será refletida para longe do meio, outra fração será absorvida dentro da camada e o restante será transmitido através do corpo. Com base nessa observação, são definidas três propriedades radiativas fundamentais, como pode ser visto nas Equações 8, 9, e 10.

Figura 30 - Fenômenos de reflexão, absorção e transmissão radiativa em um corpo de espessura finita



Fonte - Adaptado de Modest (2013)

$$\text{Refletância/Refletividade, } \rho = \frac{\text{parte refletida da radiação recebida}}{\text{radiação total recebida}} \quad (8)$$

$$\text{Absortância/Asortividade, } \alpha = \frac{\text{parte absorvida da radiação recebida}}{\text{radiação total recebida}} \quad (9)$$

$$\text{Transmitância/Transmitividade, } \tau = \frac{\text{parte transmitida da radiação recebida}}{\text{radiação total recebida}} \quad (10)$$

Como todas as radiações devem ser refletidas, absorvidas ou transmitidas, isso pode ser exemplificado através da Equação 11.

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (11)$$

Se o meio não se caracteriza como transparente ou semi-transparente, então $\tau = 0$, como exposto na Equação 12.

$$\rho + \alpha = 1 \quad (12)$$

Essas propriedades são não dimensionais e podem variar em magnitude entre os valores 0 e 1. Uma vez que um corpo negro absorve toda a radiação recebida, segue para tal superfície que $\alpha = 1$ e $\rho = \tau = 0$. Todas as superfícies também emitem radiação térmica (ou, em vez disso, a energia radiativa é emitida no meio, algumas das quais escapam da superfície). Como se sabe que, a uma determinada temperatura, o máximo possível é emitido por um corpo negro.

CAPÍTULO IV

Abordar-se-á neste capítulo conceitos sobre a Termografia, métodos e realização da aferição da temperatura por esta técnica, a partir da utilização de metodologias regulamentadas por normas brasileiras, reconhecimento da câmera acerca das variáveis presentes no ambiente, aplicações desta para o âmbito industrial, assim como uma revisão da literatura, em trabalhos acadêmicos, de aplicação da Termografia para detecção de anomalias em engrenagens. Para finalizar este capítulo, levanta-se a importância do uso de bancadas experimentais para pesquisa, mediante o contexto de aplicação das mesmas nos trabalhos consultados.

4.0 TERMOGRAFIA

Segundo Waqar e Demetgul (2016, p. 56), a Termografia pode ser usada para identificar e analisar anomalias térmicas. A Termografia infravermelha é baseada na medição da distribuição da energia térmica radiante (calor), emitida a partir da superfície alvo, onde a partir disto, ocorre conversão para um termograma de superfície.

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios termográficos são chamados termovisores ou câmeras termográficas. Elas geram as imagens térmicas, conhecidas como termogramas, que evidenciam a radiação infravermelha emitida pelo objeto em análise e, desta forma, ocorre a aferição de sua temperatura. Um tipo de medição termográfica com termovisor é exemplificada na Figura 31, para dispositivos eletroeletrônicos estáticos.

O estudo termográfico pode ser realizado de dois modos diferentes, são eles a forma qualitativa ou quantitativa. A diferença entre estes dois modelos de avaliação trata-se da necessidade ou não de valores de temperatura. Na inspeção qualitativa são realizadas análises dos padrões térmicos sem determinar valores específicos de temperatura. Ou seja, busca-se encontrar diferenças ou anomalias térmicas nos corpos. Já na inspeção quantitativa, são determinados os valores de temperatura. Neste tipo, é determinada a magnitude e severidade da anomalia encontrada por meio do modelo qualitativo. (OLINDA, 2018, p. 63).

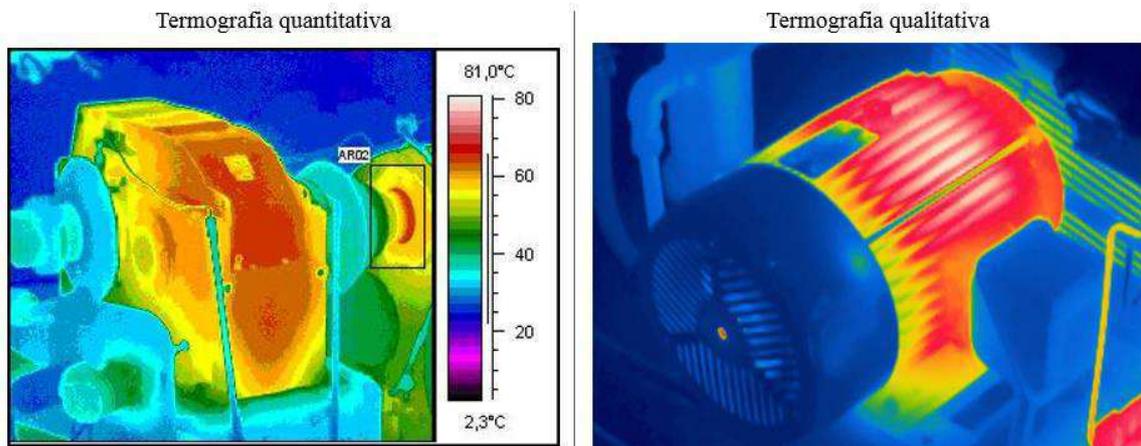
Figura 31 - Medição termográfica em dispositivos eletroeletrônicos



Fonte - Cyrino (2015)

A Figura 32 ilustra os dois modos diferentes de utilização da Termografia, quantitativa e qualitativa, para aplicação industrial em motores, redutores e seus elementos.

Figura 32 - Termografia quantitativa e qualitativa para motores e demais componentes



Fonte - Percon (2018)

A Termografia pode ser utilizada, portanto, como uma técnica de ensaio não-destrutivo que se baseia no mapeamento térmico de uma peça, componente ou estrutura para a localização de suas regiões danificadas ou defeituosas. Isto é possível porque a condutância térmica, ou, inversamente, a resistência térmica dos materiais depende fortemente do seu grau de integridade, assim, o fluxo de calor no material é alterado na presença dessas anomalias. (ALMEIDA, 2010, p. 53). Desta forma, o aquecimento ou resfriamento forçado da peça pode ser realizado pelo que se chama Termografia ativa, ou então o aquecimento ou resfriamento ocorrendo naturalmente no componente, conhecido por Termografia passiva, ambos os métodos podem revelar a presença dos danos e/ou defeitos.

Para a orientação da utilização da Termografia faz-se uso de um conjunto de normas, dependendo da aferição, desenvolvidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as quais estão citadas e descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Normas técnicas para ensaios termográficos

Norma	Título	Objetivo
15424:2016	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Terminologia	Esta Norma define os termos utilizados no método de ensaio não destrutivo de Termografia.
15572:2013	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos	Esta Norma constitui um guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos, indicando as responsabilidades do usuário final e do inspetor termografista.
15718:2009	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Guia para verificação de termovisores	Esta Norma fornece diretrizes para garantir a confiabilidade das medições dos termovisores, através de procedimentos seguidos pelo usuário final para a verificação dos termovisores durante o intervalo da validade da calibração definido pelo próprio usuário.
15763:2009	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência	Esta Norma prescreve os critérios para definição de periodicidade de inspeção por Termografia de sistemas elétricos de potência.
15866:2010	Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos	Esta Norma se destina a orientar a metodologia de avaliação térmica, qualitativa e/ou quantitativa, a ser realizada pelo responsável da análise termográfica, de acordo com as diversas situações e contextos em que os diferentes equipamentos elétricos estão submetidos.
16292:2014	Ensaaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas	Esta Norma descreve os procedimentos para medição e compensação da temperatura aparente refletida quando da medição da temperatura da superfície de um objeto utilizando câmeras termográficas.

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

Fonte - Adaptado de Olinda (2018)

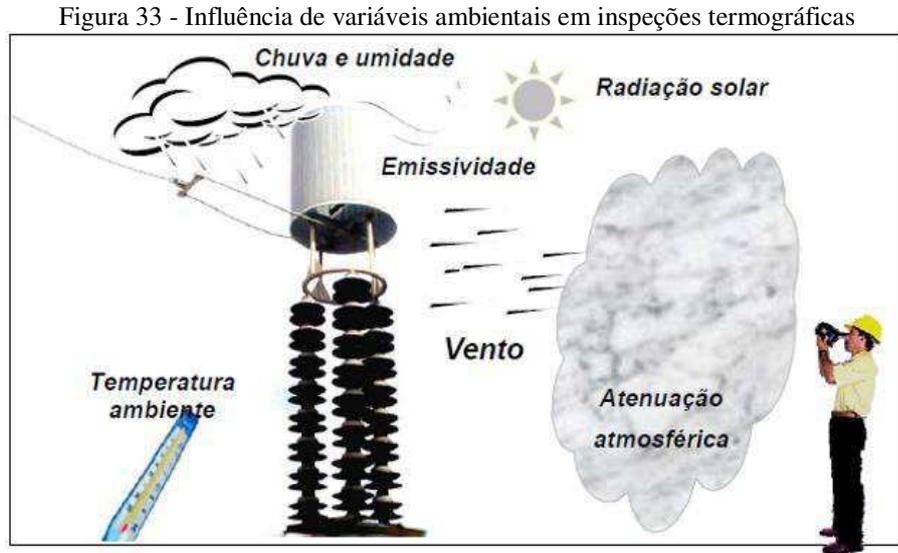
4.1 AFERIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOGRAFIA

Para Caramalho (2012, p. 33), ao visualizar um objeto, a câmera recebe radiações emitidas não só pelo próprio objeto, mas também pelo meio adjacente, refletidas pela superfície do objeto. Ambas as radiações são, em parte, atenuadas pela atmosfera na trajetória da medição. A estas, junta-se uma terceira contribuição de radiações emitidas pela própria atmosfera. É possível que tenha sido negligenciada, por exemplo, a difusão da luz do sol na atmosfera ou a radiação difusa proveniente de fontes de radiação intensa, fora do campo de visão. É difícil quantificar essas perturbações. Porém, na maioria dos casos a sua quantidade é, felizmente, suficientemente reduzida, a ponto de as tornar negligenciáveis. No caso de não o serem, a configuração da medição poderá ser de tal ordem que o risco de perturbações se torna óbvio.

Na prática, observações de efeitos de superfície devido à propagação de calor no material podem ser usadas para obter informações sobre a estrutura interna do meio. Uma parte essencial do sucesso do método é a maneira como esse calor é transferido para o material. Geralmente, as observações devem ser feitas durante o regime transitório, porque elas dependem das taxas relativas de transferência de calor dentro do material. Os contrastes de radiação tornam-se indetectáveis assim que o equilíbrio de temperatura é atingido. (GAUSSORGUES, 1994, p. 416, tradução nossa).

Segundo Laerte Santos (2006, p. 52), para uma inspeção termográfica detalhada em um determinado ambiente a influência de algumas variáveis ambientais devem ser levadas em consideração para que aumente a confiabilidade dos resultados, dentre essas estão a temperatura

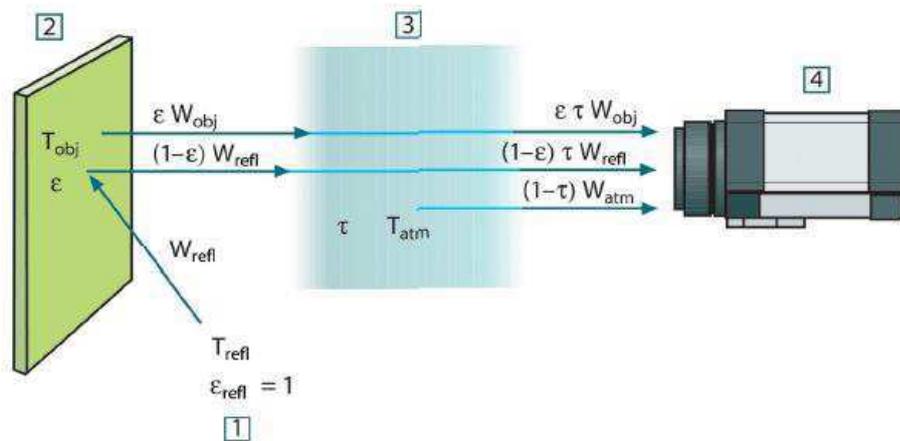
ambiente, velocidade do ar, incidência de radiação solar, umidade relativa do ar, chuvas e atenuação atmosférica, como exemplificado na Figura 33.



Fonte - Laertes Santos (2006)

Na Figura 34 pode ser exemplificado o funcionamento da câmera.

Figura 34 - Funcionamento da câmera termográfica



Fonte - FLIR (2017)

A radiação total recebida pela câmera termográfica (W_{tot}) origina-se em três fontes, a saber: a emissão do objeto analisado (W_{obj}), a emissão da vizinhança e refletida pelo objeto (W_{refl}) e a emissão da atmosfera (W_{atm}). A quantidade total de energia pode ser expressa matematicamente na Equação 13.

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{obj}} + W_{\text{refl}} + W_{\text{atm}} \quad (13)$$

A primeira fonte de emissão é o objeto analisado. Entretanto, nem toda radiação emitida pelo objeto analisado é percebida pela termocâmara pelo fato de uma parte desta emissão ser absorvida pela atmosfera. Assim, a emissão do objeto analisado pode ser expressa pela Equação 14.

$$W_{\text{obj}} = \varepsilon_{\text{obj}} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{obj}})^4 \quad (14)$$

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 termocâmara como expresso na Equação 15.

$$W_{\text{refl}} = \rho_{\text{obj}} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{refl}})^4 = (1 - \varepsilon_{\text{obj}}) \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{refl}})^4 \quad (15)$$

O último componente é a emissão da radiação infravermelha pela atmosfera e pode ser observada na Equação 16, onde $(1 - \tau_{\text{atm}})$ é a transmitância da atmosfera.

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

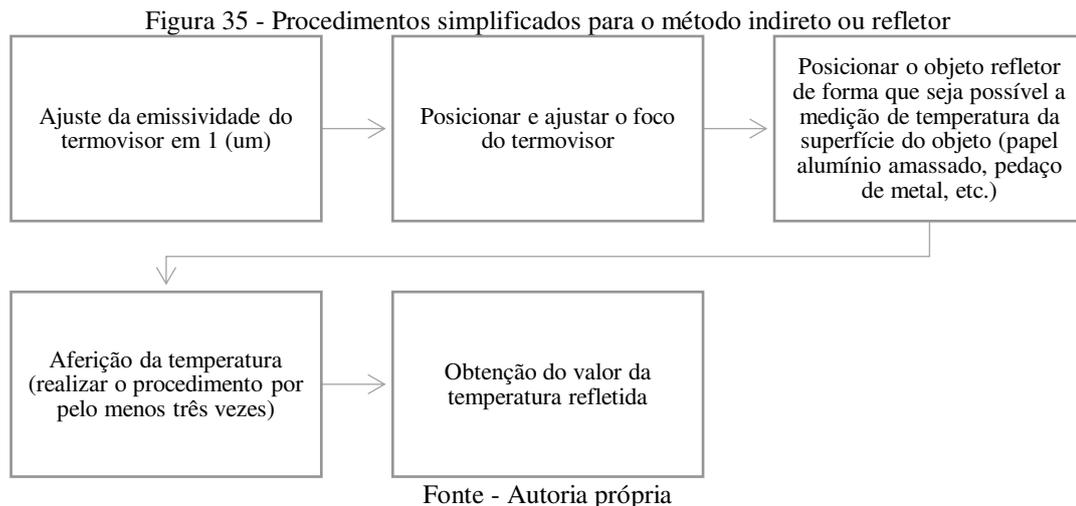
Após substituições entre equações foi obtida a Equação 17. Portanto, a temperatura do objeto analisado pode ser calculada pela Equação 18 que serve de base para diferentes fabricantes de termocâmeras para obtenção de temperaturas.

$$W_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{obj}} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{atm}})^4 + (1 - \epsilon_{\text{obj}}) \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{refl}})^4 + (1 - \tau_{\text{atm}}) \cdot \alpha \cdot (T_{\text{atm}})^4 \quad (17)$$

$$T_{\text{obj}} = \sqrt[4]{\frac{W_{\text{tot}} - (1 - \epsilon_{\text{obj}}) \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{refl}})^4 - (1 - \tau_{\text{atm}}) \cdot \alpha \cdot (T_{\text{atm}})^4}{\epsilon_{\text{obj}} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \alpha}} \quad (18)$$

Para encontrar a temperatura do objeto analisado, devem ser fornecidos, segundo à Equação 17, os seguintes parâmetros: emissividade do objeto (ϵ_{obj}), temperatura refletida (T_{refl}), transmitância da atmosfera (τ_{atm}) e a temperatura da atmosfera (T_{atm}), além disso, alguns outros parâmetros também são primordiais para que a câmera disponha de confiabilidade nos valores de temperatura, que são a umidade relativa do ar, velocidade do vento próximo ao objeto, o foco, enquadramento e a distância entre a câmera e o objeto em análise.

Os ensaios realizados com o termovisor para equipamentos mecânicos devem seguir os preceitos da NBR 15572, assim como a NBR 16292 para a medição de temperatura refletida, onde existem dois métodos de medição, um deles é o método indireto (ou refletor), que segue o procedimento descrito no fluxograma da Figura 35.



A Figura 36 apresenta uma ilustração deste método.

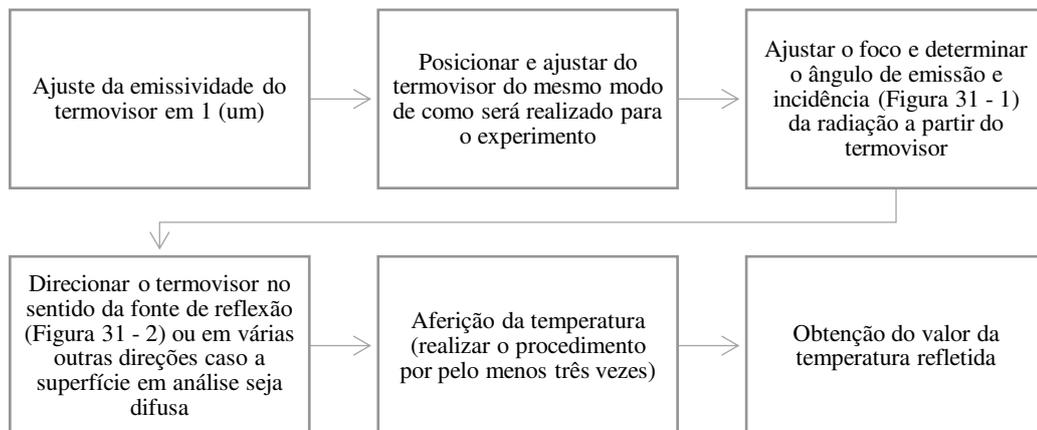
Figura 36 - Método refletor



Fonte - NBR 16292 (2014)

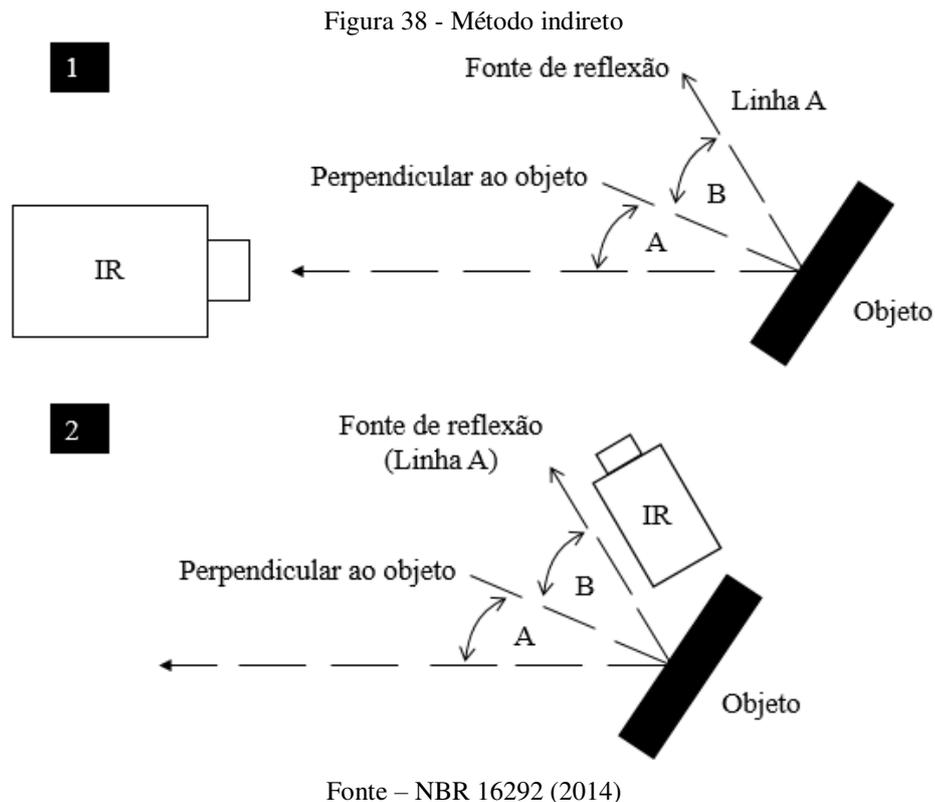
O segundo método é o direto, que segue os procedimentos descritos no fluxograma da Figura 37.

Figura 37 - Procedimentos simplificados para o método direto



Fonte – NBR 16292 (2014)

A Figura 38 representa a ilustração deste método, este não leva em consideração o aquecimento do corpo do termografista como fonte de temperatura aparente refletida, ou seja, considera o operador como um corpo negro.



4.2 TERMOGRAFIA EM AMBIENTE INDUSTRIAL

Caramalho (2012, p. 51) afirma que, no setor industrial, a Termografia é um ótimo complemento a outros tipos de ensaios não destrutivos. Detecção de sobreaquecimentos em chumaceiras, problemas por fricção, alinhamento de eixos, defeitos em rolamentos, caixas de bornes de ligações, anéis e escovas, polias, correias, etc.

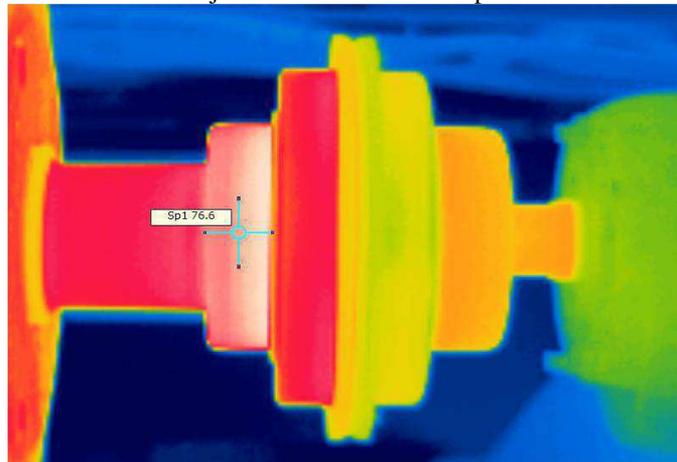
O teste de um processo por termografia infravermelha, baseado na emissão de radiação de superfície pelos objetos sendo fabricados, pode ser realizado por um método passivo ou ativo. O método passivo baseia-se no calor natural liberado durante o processo e é usado para observar a distribuição de temperatura espacial e temporal com um receptor de radiação infravermelha passivo, sendo essas distribuições de temperatura o resultado da transferência de calor no interior do material. Comparação com um modelo de transferência de calor perfeita produz então todos os desvios e anomalias no processo. (GAUSSORGUES, 1994, p. 419, tradução nossa).

Segundo Waqar e Demetgul (2016, p. 59), a Termografia pode ser usada para identificar e analisar anomalias térmicas para o monitoramento de condições de máquinas. Pode estar na forma de: perdas por atrito e perdas de energia dentro de máquinas, como uma característica dos meios de processo, ou qualquer combinação dos mesmos. Como resultado, a temperatura

pode ser um parâmetro chave para monitorar o desempenho, a condição e, conseqüentemente, o diagnóstico dos problemas da máquina.

Um exemplo de análise termográfica pode ser apresentado na Figura 39, a qual se trata do monitoramento de um acoplamento de uso industrial.

Figura 39 - Imagem térmica de um conjunto de motor e bomba para monitoramento de um acoplamento

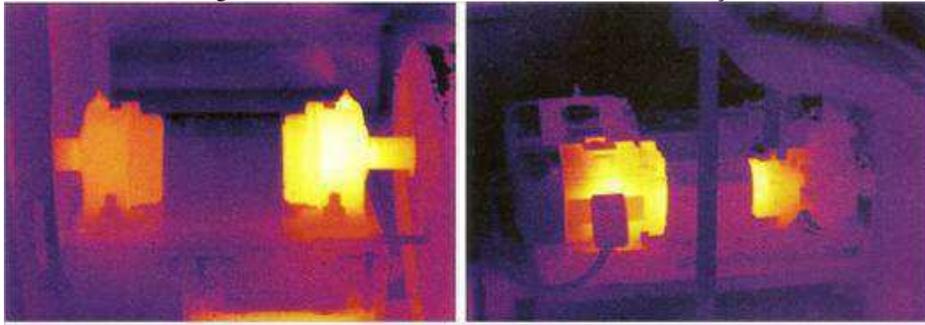


Fonte - Bomfim (2013)

O monitoramento da temperatura foi adotado para avaliação da saúde das máquinas nas últimas décadas. Embora a maioria dos sensores de temperatura sejam projetados seguindo princípios físicos semelhantes, eles diferem em termos de complexidade e precisão. A termografia é um dos métodos mais avançados para monitoramento de temperatura. Sistemas tradicionais que monitoram a temperatura de equilíbrio encontraram muitas aplicações, incluindo monitoramento de temperatura de alimentos e drogas. No entanto, outras aplicações, como máquinas rotativas de alta velocidade, precisam de sistemas de avaliação de saúde mais sensíveis que possam detectar falhas nos estágios iniciais. Portanto, em vez de monitorar a temperatura de equilíbrio, o comportamento transiente de temperatura para algumas aplicações é usado para inspeção e Teste Não Destrutivo (NDT). (MOUSA, 2014, p. 15, tradução nossa)

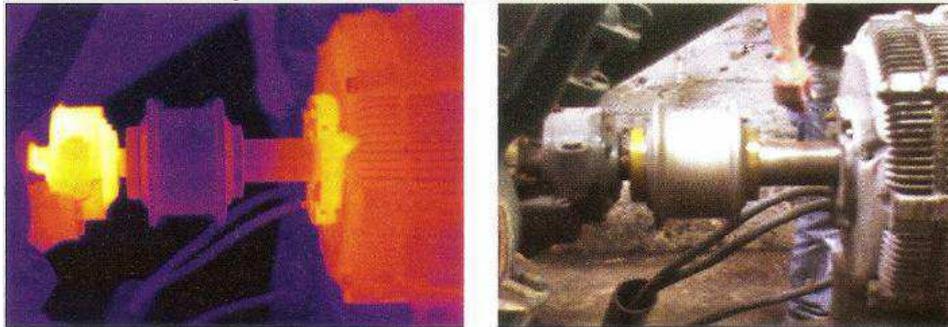
Durante o funcionamento, os componentes dos equipamentos mecânicos apresentam desgastes naturais, que, às vezes, são agravados por alguns fatores tais como má lubrificação (Figura 39), desalinhamento de eixos (Figura 40), montagens inadequadas, etc. Quando acontece o desgaste, normalmente é acompanhado de um aquecimento anormal que tende a aumentar antes da falha do equipamento conforme informado por Araújo (2014, p. 26). A Termografia vem se mostrando uma ferramenta auxiliar na detecção desses desgastes, principalmente quando utilizada em conjunto com outras ferramentas, tais como análise de vibração e análise de óleo.

Figura 40 - Mancais com deficiência de lubrificação



Fonte - Bomfim (2013)

Figura 41 - Mancais com desalinhamentos de eixos



Fonte - Bomfim (2013)

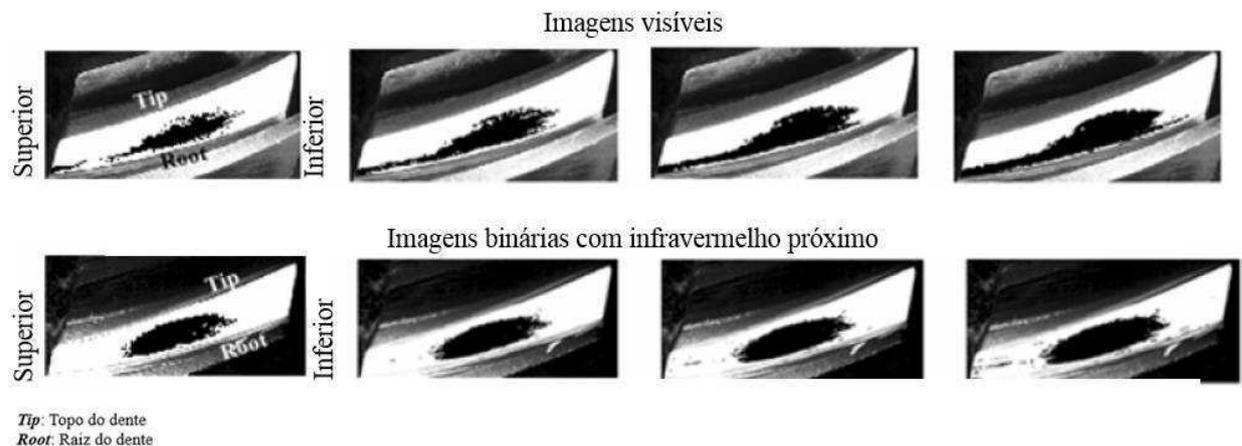
4.3 EMPREGO DA TERMOGRAFIA EM PESQUISAS PARA DETECÇÃO DE ANOMALIAS EM ENGRENAGENS

Os estudos e pesquisas voltadas para a utilização da Termografia para detecção de falhas ou algum outro tipo de anomalias em elementos de máquina são recentes e ainda estão em desenvolvimento. No que diz respeito a análises em engrenagens, poucos são os trabalhos encontrados na literatura, sendo mais comum pesquisas envolvendo rolamentos e mancais, como mostrado por Touret *et al.* (2018, p. 203), autor ao qual efetuou uma revisão da literatura, a partir de trabalhos que abordaram o emprego da Termografia infravermelha para estudos nos elementos mecânicos supracitados. Para engrenagens, como o espectro obtido é utilizado para estimar a temperatura da superfície dos elementos considerados, o principal problema com este método é devido às incertezas introduzidas pela lubrificação, pois o óleo pode interferir na emissão de infravermelho, ou seja, a emitância da superfície é desconhecida, não sendo possível realizar os ajustes pertinentes no termovisor.

A avaliação das engrenagens por contato entre os dentes é um dos métodos mais comuns para investigar a real condição de acionamento do conjunto de engrenagens em uma

caixa de redução. Uma técnica muito comum é a avaliação do contato com os dentes, se trata de uma verificação visual que examina a superfície do dente onde a pintura com chumbo vermelho é implementada e sai depois do funcionamento e consequente deslizamento entre eles. No entanto, os resultados dos exames visuais são muito subjetivos. Na pesquisa de Nagata *et al.* (2010), uma câmera termográfica que captura a radiação infravermelha próxima registrou imagens da superfície do dente de engrenagens hipóides à temperatura ambiente. Portanto, foi proposto um contato dentário adequado como método de avaliação usando imagens de infravermelho próximo para extrair o contato com o dente. Comparando-se com as imagens visíveis tradicionais com a pintura de chumbo, uma imagem de infravermelho próximo permitiu avaliar com precisão a parte de contato do dente, como pode ser observado na Figura 42. O método se mostrou válido para detecção da região onde havia o contato dentário, o qual pode ser verificado na região do diâmetro primitivo até o dedendo do dente, qualitativamente pelo método ativo.

Figura 42 - Comparação entre as imagens visíveis e geradas pelo termovisor



⁷Fonte - Adaptado de Nagata *et al.* (2010)

Tian *et al.* (2014) realizou medições de temperatura para engrenagens, com diferentes ciclos de testes de fadiga, por Termografia e os resultados de comparação entre ela com ruído magnético de Barkhausen, que se trata de outra técnica para avaliação de desgastes. O ruído magnético pode medir o estado de fadiga através do RMS⁸ da amplitude do ruído de

⁷ Uma Imagem binária, também chamada bi-nível, é uma imagem digital na qual há apenas dois valores possíveis para cada pixel. Os nomes preto-e-branco, P&B, monocromia e monocromático também são usados para este conceito, mas também podem significar imagens que tenham apenas uma amostra por pixel, como o nível de cinza.

⁸ Em matemática, a raiz do valor quadrático médio ou RMS (do inglês *root mean square*) ou valor eficaz é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. Pode calcular-se para uma série de valores discretos

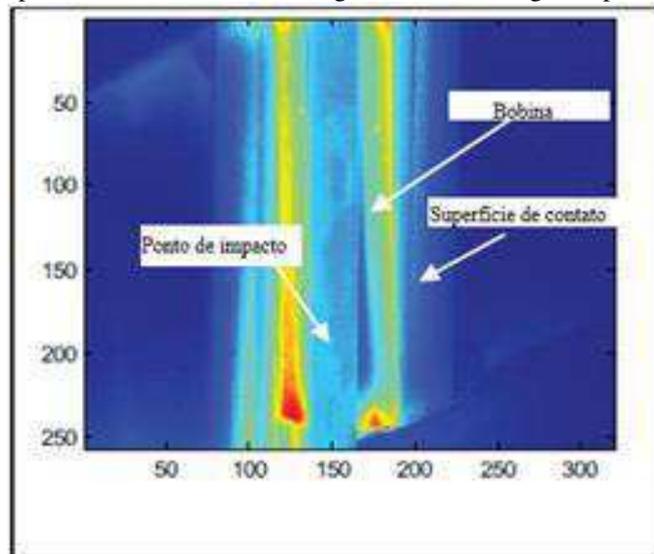
Barkhausen. A Termografia é utilizada de forma ativa, que indica a difusão de calor e o efeito de aquecimento pelo efeito Joule⁹. Nas Figuras 43 e 44 pode ser observado o tipo de engrenagem que foi utilizado e como a fonte de aquecimento foi posicionada, e logo em seguida o Termograma para avaliação dos pontos de impacto em decorrência do tempo de geração de calor.

Figura 43 - Teste de fadiga em uma engrenagem helicoidal com indutor



Fonte - Tian *et al.* (2014)

Figura 44 - Termografia para um dos dentes a 40×10^6 gerando um termograma para 0,2 s após o aquecimento



Fonte - Adaptado de Tian *et al.* (2014)

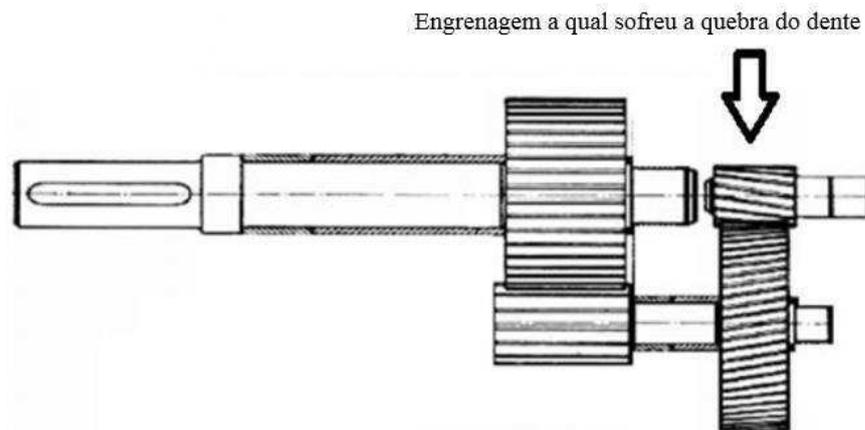
É notado, a partir de uma análise qualitativa, que os pontos de impacto demoram mais a aquecer devido a não-homogeneidade decorrente do desgaste superficial nos dentes.

ou para uma função variável contínua. O nome deriva do fato de que é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores.

⁹ A lei de Joule (também conhecida como efeito Joule ou efeito térmico) é uma lei física que expressa a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo. Um resistor é um dispositivo que transforma a energia elétrica integralmente em calor.

Araújo (2014) realizou medições termográficas com um par de engrenagens helicoidais em boas condições de funcionamento, tida como condição de referência, e logo após, provocou uma quebra no dente de um dos pinhões que compunha o sistema de engrenamento, e o colocou em funcionamento novamente. Após um determinado período foram realizadas novas medições com o intuito de detectar a falha no elemento comprometido. Nas Figuras 45 e 46 é ilustrado no sistema de engrenagens, e posteriormente a imagem do elemento defeituoso.

Figura 45 - Indicação da engrenagem que sofreu o dano no sistema de engrenamento



Fonte - Adaptado de Araújo (2014)

Figura 46 - Engrenagem motora com o dente quebrado

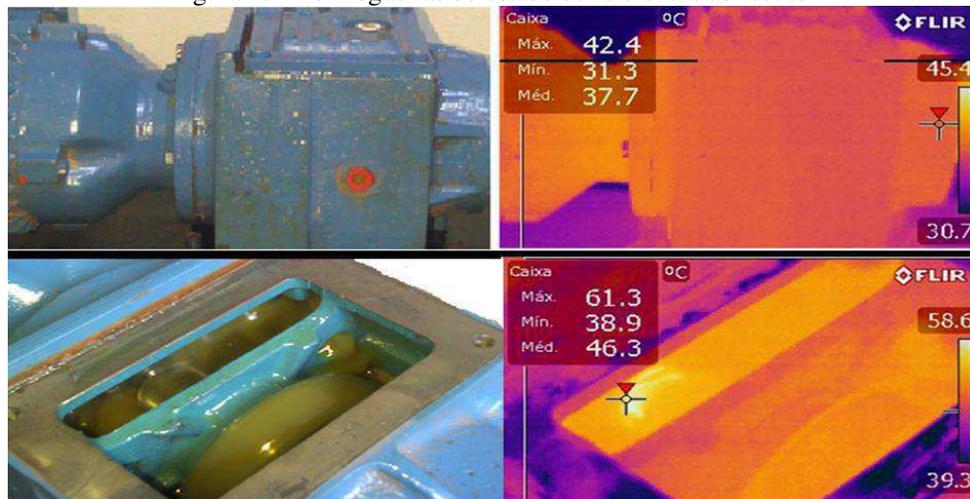


Fonte - Araújo (2014)

Para as condições do sistema de engrenamento foi avaliada a temperatura da carcaça do redutor pela técnica da Termografia ativa de forma quantitativa pontual, como mostrado nas Figuras 46 e 47. Comparando as primeiras imagens com as adquiridas após a quebra simulada

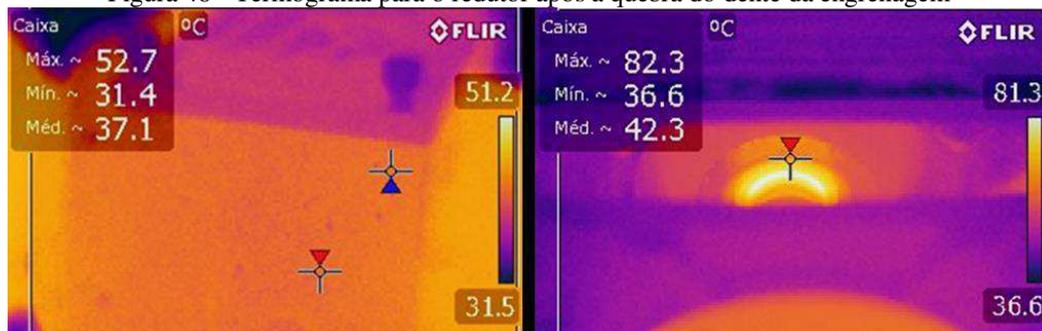
do dente da engrenagem defeituosa, foi possível detectar que houve uma variação de temperatura da carcaça que envolvia as engrenagens de 42,4 °C para 52,7 °C e também houve um aumento de temperatura do pinhão com defeito que variou de 61,3 °C para 82,3 °C, aferindo-se a temperatura após a retirada da tampa superior da carcaça.

Figura 47 - Termogramas do estado de referência do redutor



Fonte - Araújo (2014)

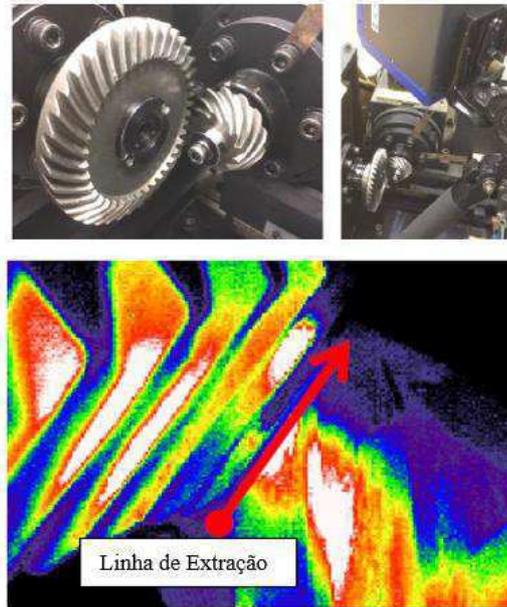
Figura 48 - Termograma para o redutor após a quebra do dente da engrenagem



Fonte - Araújo (2014)

Niwa *et al.* (2014) planejou um método de análise das condições de contato dos dentes, para um par de engrenagens hipóides usando Termografia ativa e quantitativa de alta resposta, analisando a distribuição de temperatura durante o contato dentário entre o pinhão e a coroa ao longo do tempo. Foi definida a necessidade de realizar uma fotografia de alta velocidade utilizando Termografia e definindo uma linha de extração em uma imagem térmica para extrair os dados de temperatura. Pode ser visto na Figura 49 o par de engrenagens que foi utilizado nos experimentos e como foi implementada a linha de extração, vista em termograma.

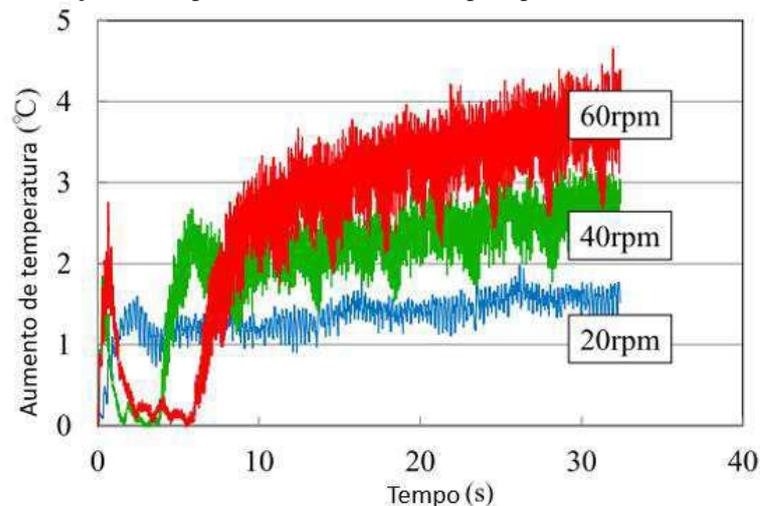
Figura 49 - Par de engrenagens hipóides utilizadas nos experimentos e posicionamento da linha de extração



Fonte - Adaptado de Niwa *et al.* (2014)

Como resultado, foi possível obter a distribuição de temperatura na superfície do dente, durante o funcionamento das engrenagens em uma sequência de tempo, para diferentes velocidades de rotação, conforme ilustrado na Figura 50, onde pode ser visualizado graficamente o incremento de temperatura para velocidades mais altas de rotação.

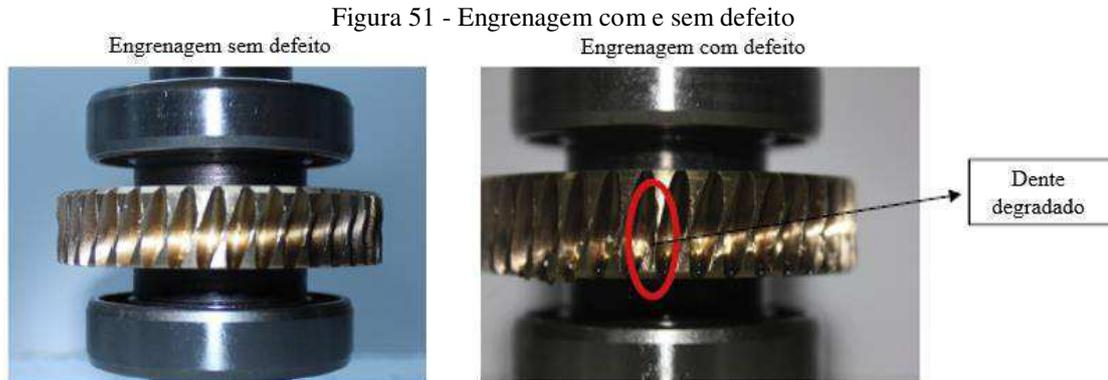
Figura 50 - Distribuição de temperatura com base no tempo e para diferentes velocidades de rotação



Fonte - Adaptado de Niwa *et al.* (2014)

Waqar e Demetgul (2016) realizaram um arranjo experimental construído especificamente para o diagnóstico de máquinas rotativas, especialmente engrenagens. A configuração experimental usada para este estudo tem uma faixa de velocidade efetiva de 100

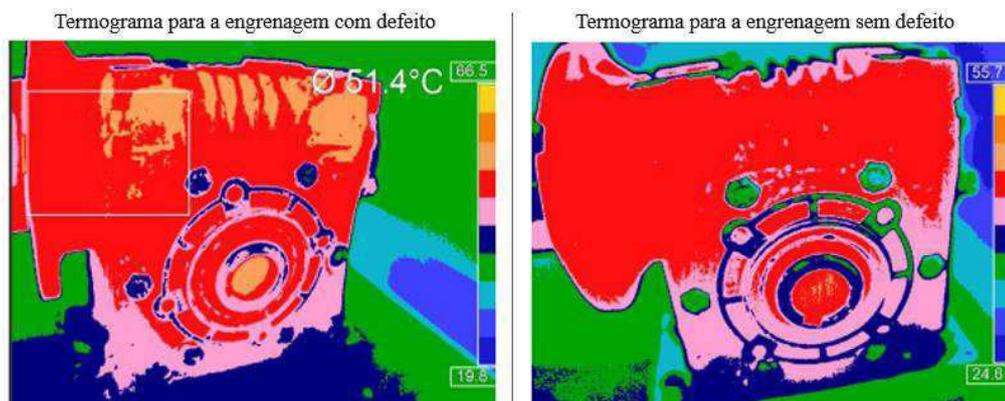
a 5000 rpm fornecida por um motor trifásico de corrente alternada. Uma câmera térmica foi usada para capturar imagens térmicas, utilizando o método ativo e quantitativo, da carcaça onde estavam as engrenagens de teste do tipo helicoidais. Foram empregadas: uma engrenagem em estado de referência e outra com defeito como pode ser visto na Figura 51, respectivamente. Uma falha foi criada artificialmente pela remoção de uma parte de um dente.



Fonte - Adaptado de Waqar e Demetgul (2016)

Os dados brutos, tanto para a engrenagem em condição de referência quanto para a engrenagem defeituosa, foram coletados para 6 (seis) condições diferentes de operação. Essas condições foram baseadas em diferentes velocidades de revolução e diferentes níveis de óleo. Vibração e dados sonoros, bem como padrão de fluxo de calor foram coletados e examinados, as imagens térmicas são exemplificadas na Figura 52.

Figura 52 - Termogramas para o fluxo a geração de calor na carcaça com a engrenagens em boas e más condições de funcionamento



Fonte - Adaptado de Waqar e Demetgul (2016)

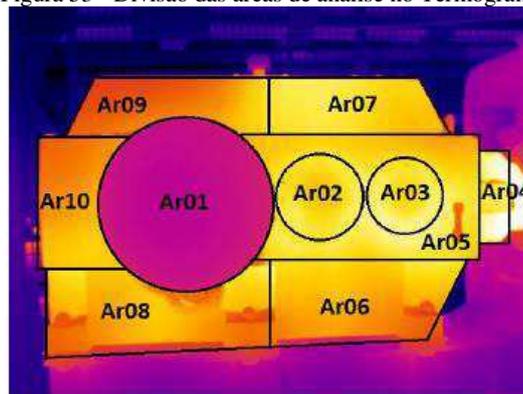
Os resultados mostram que houve um aumento na temperatura na carcaça referente as condições de referência e com a engrenagem defeituosa. Isso mostra que as técnicas utilizadas

neste estudo, no que diz respeito a Termografia, foi validada com o auxílio de outras técnicas para extrair informações úteis de dados brutos para análise e diagnóstico de falhas para este tipo de engrenagem.

Blazej *et al.* (2016) utilizou a Termografia ativa e quantitativa para inspecionar um conjunto de engrenagens de dois estágios em um sistema de transmissão de energia de um transportador de correia, localizado em uma mina subterrânea. As medições realizadas como parte do experimento não permitem detectar mudanças significativas na condição técnica do sistema de engrenagens, permitiram no entanto, criar características dos componentes e especificar suas temperaturas durante o trabalho constante, que servirá como ponto de referência quando a inspeção for repetida em intervalos de aproximadamente vários meses, ou seja, o intuito é estabelecer um banco de dados visando a implementação da Termografia como técnica preditiva para análise de anomalias no equipamento.

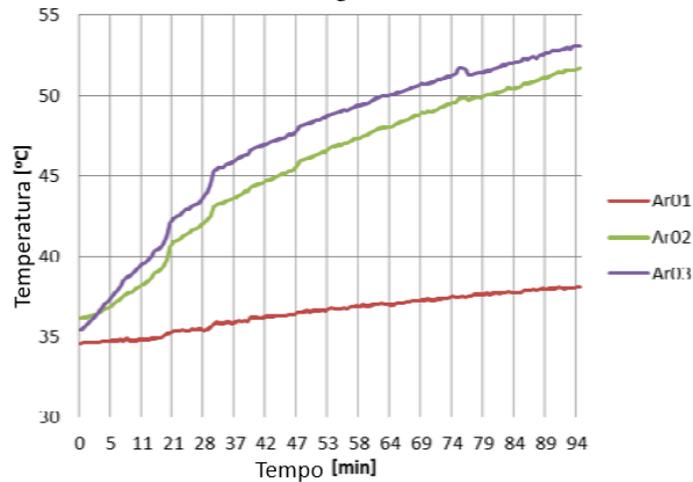
Como resultado, mudanças significativas na condição das engrenagens se tornarão detectáveis, calculando a diferença entre as temperaturas médias de cada área em duas medições. Para um tempo de 94,5 minutos foi possível detectar um incremento de até 26,2°C na temperatura dos elementos. Diferenças significativas podem, então, implicar a condição propensa a falhas do transportador. Tais medições devem ser repetidas, em um contexto futuro, para condições atmosféricas muito similares as que foram realizados os primeiros experimentos, segundo o autor, para que as variáveis externas não influenciem nas aferições termográficas. As maiores temperaturas médias das rodas de engrenagem foram registradas para o elemento localizado na área Ar03. As curvas de função de temperatura média são muito semelhantes para as áreas Ar02 e Ar03, o que pode significar que elas estão significativamente carregadas ou em condições técnicas ruins, como ilustrado nas Figuras 53 e 54, onde as leituras foram realizadas a partir da temperatura da carcaça que encobre o sistema de engrenagens.

Figura 53 - Divisão das áreas de análise no Termograma



Fonte - Blazej *et al.* (2016)

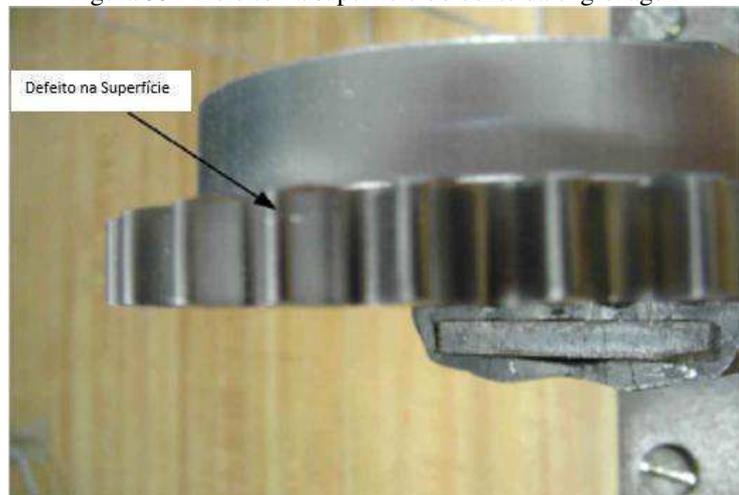
Figura 54 - Comportamento da temperatura para as regiões do posicionamento das engrenagens exemplificadas na Figura 53



Fonte - Błazej *et al.* (2016)

Benzerrouk *et al.* (2007) apresentam os resultados de uma investigação que explora a adequação da Termografia passiva e quantitativa à compactos de metalurgia do pó, visando detecção de defeitos superficiais e subsuperficiais no estado de pré-sinterização em um ambiente de fabricação que visa garantia de qualidade completa. Nesta pesquisa, os termogramas de defeitos de subsuperfície são baseados em uma abordagem de instrumentação transitória que depende de um sistema de controle elétrico que sincroniza e monitora a resposta térmica devido a uma fonte de calor gerada eletricamente. Na Figura 55 pode ser observada uma rachadura típica encontrada na fabricação de engrenagens de dentes retos por metalurgia do pó.

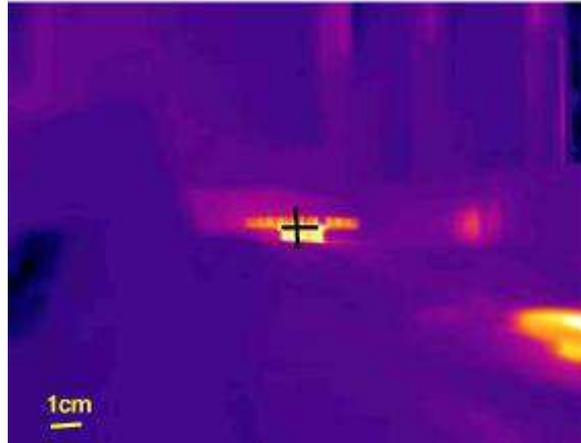
Figura 55 - Defeito na superfície do dente da engrenagem



Fonte - Adaptado de Benzerrouk *et al.* (2007)

Foi criada uma configuração de sistema que depende do aquecimento por indução para gerar o gradiente térmico que é subsequentemente gravado através da câmera termográfica, como pode ser visto na Figura 55.

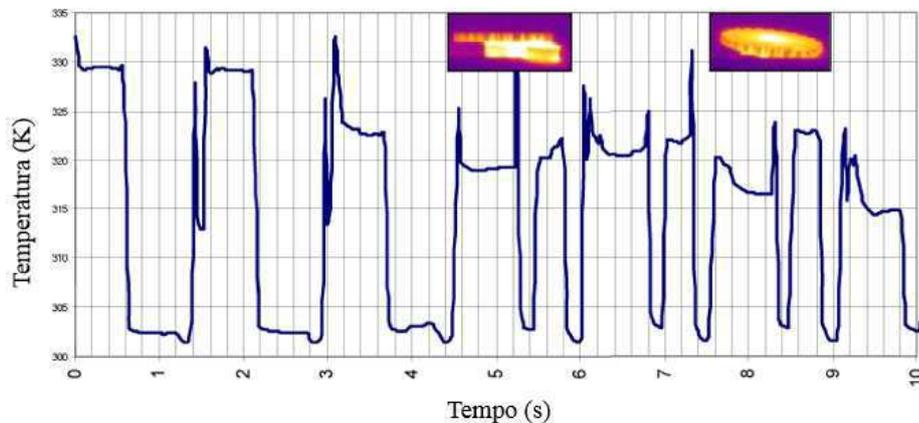
Figura 56 - Termograma para análise dos gradientes de temperatura na superfície da engrenagem



Fonte - Benzerrouk *et al.* (2007)

As falhas na superfície repercutem uma dissipação de energia, provocando um gradiente de temperatura gerado devido as discontinuidades decorrentes das falhas. Como pode ser visto na Figura 57, os decréscimos de temperatura repercutem os defeitos, que ao longo do tempo de experimento vão ficando cada vez mais difíceis de serem detectados pelo fato do elemento tender a entrar em homogeneidade, no que diz respeito a temperatura.

Figura 57 - Perfil de temperatura ampliado



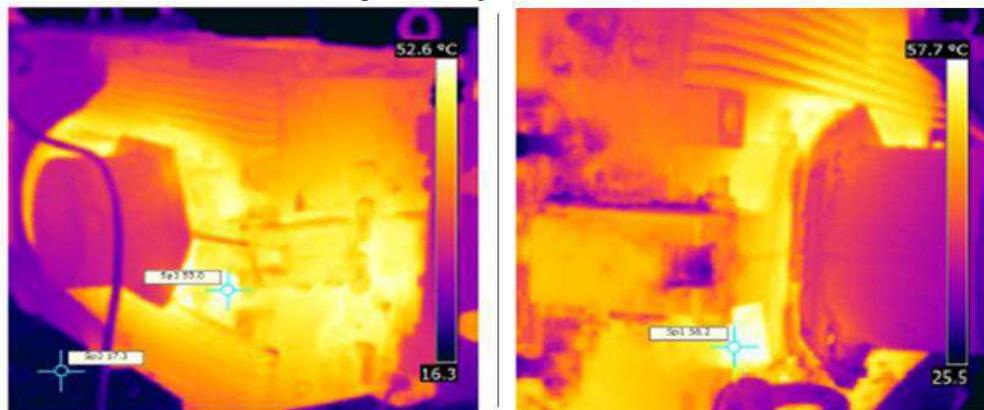
Fonte - Adaptado de Benzerrouk *et al.* (2007)

Benzerrouk *et al.* (2007) afirma em sua pesquisa que esses testes preliminares revelam que o sistema de Termografia por impulsos pode ser empregado para a detecção de defeitos de

superfície em peças de estado verde, ou seja, antes de passar pelos processos de acabamento, à medida que eles saem da prensa de compactação.

Kuzin *et al.* (2017) determinaram um conjunto de métodos de diagnósticos técnicos para caixas de transmissão de transportadores de correia de mina de carvão nos parâmetros de vibração, análise de óleo lubrificante e controle térmico por Termografia infravermelha. Os estudos foram realizados periodicamente a partir do momento da instalação das linhas de transporte. O controle térmico dos atuadores via Termografia infravermelha permite um controle mais preciso dos nós defeituosos, como, por exemplo, identificar um superaquecimento local do mancal e a falha do sistema de resfriamento, como ilustrado na Figura 58, que apresenta os termogramas de engrenagens tendo uma diferença de temperatura de 5,1°C, para diferentes momentos, no que diz respeito a periodicidade, de funcionamento.

Figura 58 - Monitoramento da temperatura através da carcaça que enclausura o sistema de engrenagens por Termografia



Fonte - Adaptado de Kuzin *et al.*(2017)

A proposta da pesquisa é que os resultados do monitoramento ajudem a criar um banco de dados sobre a natureza dos processos de desgaste e estabelecer critérios de avaliação adequados para as engrenagens com base em padrões de temperatura pré-estabelecidos mediante um cronograma, por Termografia e demais técnicas associadas a manutenção preditiva.

Mediante o que foi exposto nos trabalhos em que a Termografia infravermelha foi utilizada para análises em engrenagens, foi construído o Quadro 3, onde resumidamente são mostrados dados pertinentes no que diz respeito aos autores, tipos de engrenagem, como foram realizadas as análises, quais os resultados obtidos, se a Termografia foi válida mediante o que se era esperado e o qualis do trabalho explorado através da Plataforma Sucupira, quando identificado ou aplicável. Quanto a coluna que expõe o tipo de análise, a diferença entre a análise direta e indireta se trata da medição de temperatura pelo termovisor realizada

diretamente nas engrenagens, sendo classificada como medição direta, e indireta quando a leitura da temperatura foi realizada através de uma carcaça que tem por finalidade enclausurar o engrenamento (engrenagens fechadas).

Quadro 3 - Quadro resumo das informações pertinentes a utilização da Termografia em estudos com engrenagens

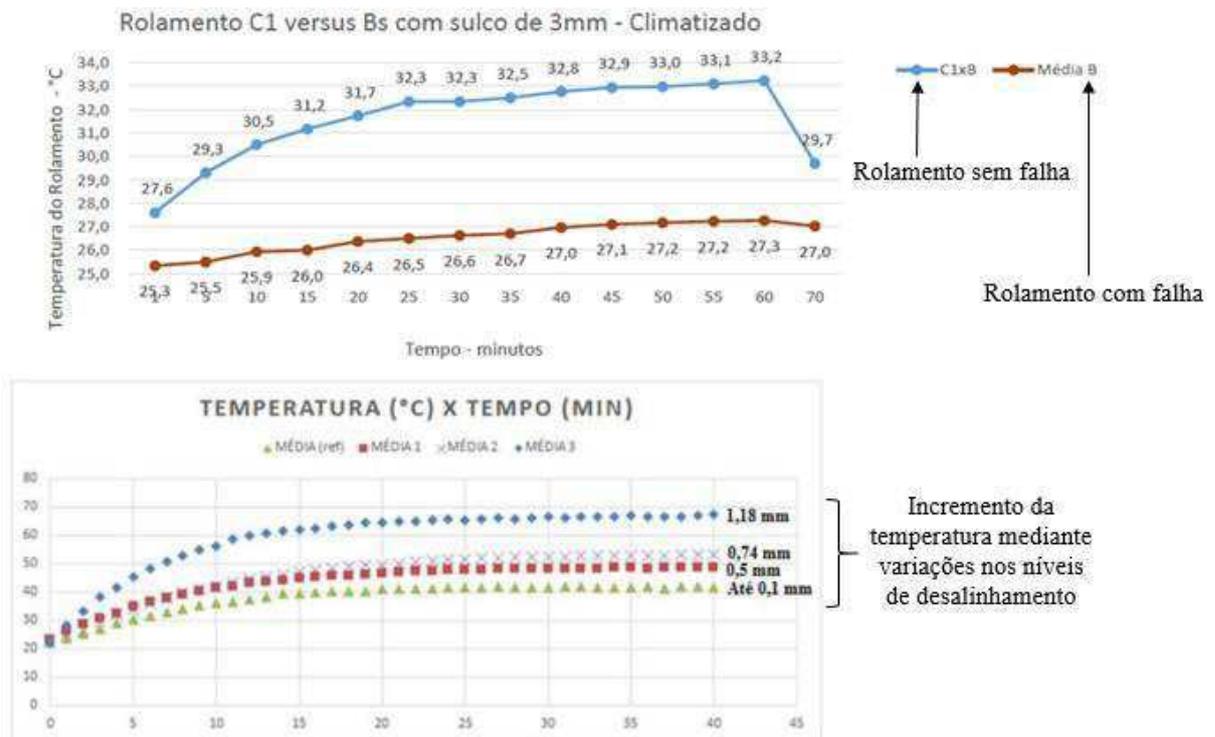
Autores	Tipo de engrenagem	Tipo de análise	Resultado	Termografia	Qualis
Benzerrouk <i>et al.</i> (2007)	Reta	Análise direta e quantitativa de falhas superficiais através da Termografia passiva	Temperaturas mais baixas nas regiões com falha (dissipação do calor)	Aprovada	C
Nagata <i>et al.</i> (2010)	Hipóide	Análise direta e qualitativa do contato dentário através da Termografia ativa	Incremento da temperatura na região de maior pressão de contato	Aprovada	B2
Tian <i>et al.</i> (2014)	Helicoidal	Análise direta e qualitativa de falhas superficiais através da Termografia ativa	Temperaturas mais baixas nas regiões com falha (não-homogeneidade da superfície)	Aprovada	B4
Araújo (2014)	Helicoidal	Análise indireta e quantitativa para boas e más condições da engrenagem através da Termografia ativa	Incremento na temperatura da carcaça	Aprovada	Não se aplica
Niwa <i>et al.</i> (2014)	Hipóide	Análise direta e quantitativa do contato entre os dentes através da Termografia ativa	Incremento nos valores de temperatura superficial do dente, mediante maiores velocidades de rotação	Aprovada	A2
Waqar e Demetgul (2016)	Helicoidal	Análise indireta e quantitativa para boas e más condições da engrenagem através da Termografia ativa	Incremento na temperatura da carcaça	Aprovada	B1

Błazej <i>et al.</i> (2016)	Não informado	Análise indireta e quantitativa para criar indicadores de temperaturas remetentes ao funcionamento do equipamento através da Termografia ativa	Monitoramento da temperatura da carcaça	Aprovada	Não identificado
Kuzin <i>et al.</i> (2017)	Não informado	Análise indireta e quantitativa visando criar indicadores para temperatura de funcionamento do equipamento através da Termografia ativa	Monitoramento da temperatura da carcaça	Aprovada	B3

Fonte - Autoria própria

A Termografia foi validada mediante a necessidade dos pesquisadores no que diz respeito aos seus objetivos, mas vários parâmetros pertinentes não foram levados em consideração nos trabalhos, como pode ser visto no Quadro 4. Para que os resultados tenham uma boa confiabilidade existe a necessidade de vários cuidados, como por exemplo, determinar a emissividade do material em análise, seja por valores tabelados, equipamento adequado ou pelo comportamento térmico do material como fez Niwa *et al.* (2014, p. 2). As aferições termográficas, isentando o uso de Termografia de alta resposta, mostram resultados mais promissores nos primeiros 60 minutos de funcionamento do equipamento, pois passando disso foi comprovado em trabalhos, como os de Cabral (2017) e Olinda (2018), que a temperatura tende a entrar em homogeneidade térmica, conforme exemplificado na Figura 59, onde Cabral (2017) realizou o uso da Termografia quantitativa para gerar curvas relativas ao comportamento de temperatura de rolamentos autocompensadores de esferas, com a presença de falha do tipo sulco na pista interna e sem a presença destas, enquanto Olinda (2018), partiu do mesmo pressuposto para o estudo quanto ao comportamento térmico mediante condições de desalinhamentos em acoplamentos.

Figura 59 - Termografia quantitativa para detecção de: falha em rolamento e níveis de desalinhamento em acoplamento



Fonte - Adaptado de Cabral (2017) e Olinda (2018)

A obtenção da temperatura refletida, conforme os requisitos da NBR 16292, é necessária para a reprodução confiável dos valores de temperaturas a partir dos termogramas, assim como cuidados com o isolamento térmico adequado, para que as radiações recorrentes do meio externo e reflexões não influenciem nos resultados, tempo de equalização para que a temperatura do ambiente entre em estabilidade, e possa ser reconhecida a diferenciação entre os regimes transiente e permanente, no que diz respeito ao comportamento das curvas de temperatura por Termografia quantitativa. Nenhuma dessas precauções foram citadas nos trabalhos mencionados nos Quadros 3 e 4. A distância entre a câmera e o objeto também deve ser controlada para que o foco seja ajustado na forma mais precisa possível, com o objetivo de gerar imagens claras e valores de temperatura confiáveis com boa resolução. A umidade relativa, assim como a velocidade do ar são variáveis que devem ser mensuradas e controladas para que não influenciem nos resultados negativamente, a NBR 15572 orienta que se deve evitar inspeções com umidade relativa do ar acima de 90 % e velocidades do vento que excedam 6 m/s. Além de que para corrigir os valores medidos segundo os critérios de correção de temperatura adotados para o termovisor, esses parâmetros são essenciais.

Touret *et al.* (2018) realizou uma revisão da literatura com trabalhos os quais foi utilizada a Termografia infravermelha para monitoramento de funcionamento em engrenagens e rolamentos, e em seu trabalho deixou bem claro que na literatura, de uma forma geral, é escassa a preocupação com esses estudos direcionados a engrenagens. Esse problema pode ser gerado pelo fato da dificuldade em controlar a emissividade em decorrência do uso de lubrificantes nos dentes. Dos periódicos que foram analisados por Touret *et al.* (2018), como por exemplo do Waqar e Demetgul (2016), na metodologia experimental não foi citada nenhuma precaução referente aos cuidados que devem ser tomados para aferições termográficas. Concluindo que a metodologia experimental aplicada para monitoramento de condições de funcionamento em engrenagens é deficiente mediante o que foi constatado em pesquisas recentes, o que corrobora para uma baixa confiabilidade dos resultados.

Quadro 4 - Variáveis de influência para ensaios termográficos mediante utilização da técnica por pesquisadores

Variáveis									
Autores/ano	Emissividade	Tempo de coleta de dados	Temperatura Refletida (°C)	Isolamento Térmico	Tempo de Equalização (min)	Temperatura Ambiente (°C)	Distância do objeto até a câmera (m)	Umidade Relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)
Benzerrouk <i>et al.</i> , 2007	0,6	45 segundos	-	-	-	-	-	-	-
Nagata <i>et al.</i> , 2010	-	-	-	-	-	25	-	-	-
Tian <i>et al.</i> , 2014	-	1 segundo	-	-	-	-	-	-	-
Araújo <i>et al.</i> , 2014	0,82	6 horas	32	-	-	32	1	70	-
Niwa <i>et al.</i> , 2014	0,35	30 segundos	-	-	-	-	-	-	-
Waqar e Demetgul, 2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Błazej <i>et al.</i> , 2016	0,97	94,5 minutos	20	-	-	30	3	65	-
Kuzin <i>et al.</i> , 2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-

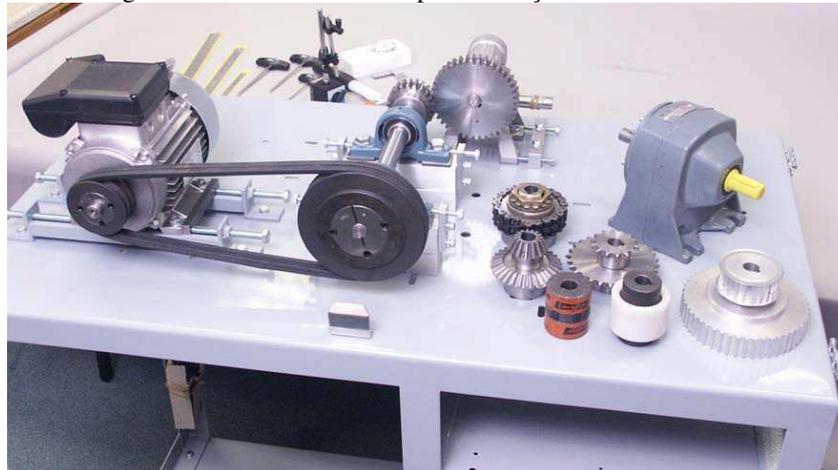
Fonte - Autoria própria

4.4 BANCADAS EXPERIMENTAIS

Segundo Alves da Silva (2014, p. 26), O desenvolvimento de bancadas didáticas experimentais é vista com bons olhos na engenharia, principalmente para aqueles que buscam métodos simples e com um alto potencial de ensino e desenvolvimento de ensaios voltados para pesquisa.

As bancadas experimentais desempenham ainda outro papel importante dentro das universidades. A utilização de ferramentas didáticas oferece a oportunidade de verificar determinados efeitos apresentados pela teoria, e fazer a aplicação desses conceitos em atividades práticas de forma correlacionada, como mostrado na Figura 60. Devido ao fato de estar em um ambiente controlado, como o laboratório, é possível analisar resultados com possíveis variações de parâmetros, e dados de entrada, o que permite tirar conclusões mais elaboradas em relação ao conteúdo que está sendo abordado.

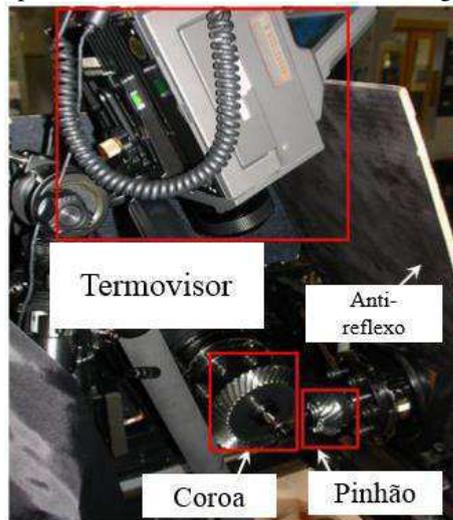
Figura 60 - Bancada didática para instrução em transmissão mecânica



Fonte - Penambra (2017)

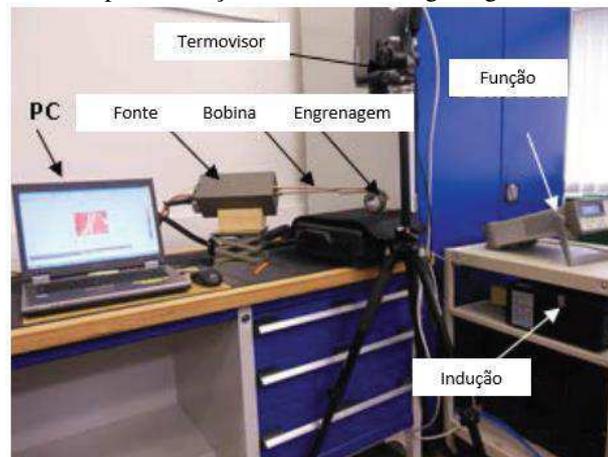
Na busca pela aplicação de conceitos, validação de modelos teóricos e refinamento de projetos, a utilização de bancadas experimentais que simulam sistemas reais, revela-se uma alternativa bastante difundida em universidades e em centros de pesquisa de todo o mundo. Sendo perfeitamente possível a aplicação desse conceito para a análise da Termografia, como pôde ser exemplificado nos trabalhos de Niwa *et al.* (2014), Tian *et al.* (2014) e Waqar e Demetgul (2016) que utilizaram bancadas experimentais para realização de ensaios termográficos, associados a outras técnicas como análise de vibração e análise óleo em sistemas de engrenamento, como podem ser exemplificados nas Figuras 61, 62 e 63.

Figura 61 - Bancada experimental para analisar contato dentário dentre engrenagens por meio da Termografia



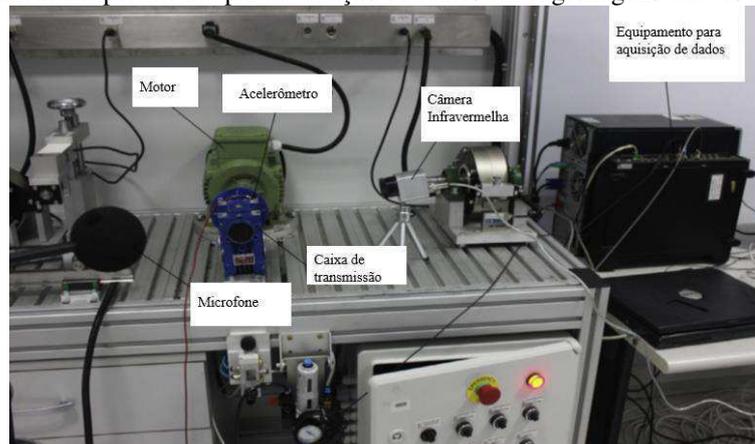
Fonte - Adaptado de Niwa *et al.* (2014)

Figura 62 - Bancada experimental para detecção de falhas em engrenagens através aquecimento por indução



Fonte - Adaptado de Tian *et al.* (2014)

Figura 63 - bancada experimental para avaliação de falhas em engrenagens através da Termografia



Fonte - Adaptado de Waqar e Demetgul (2016)

O desenvolvimento de um equipamento deste tipo é dependente de uma série de parâmetros inerentes ao processo ao qual vai ser submetido, ambiente de trabalho, segurança, limitações de uso, número de pessoas, manutenção, etc. Então para que venha a atender as expectativas, é sugerido que deva passar por uma linha de elaboração, concebida via metodologia de projeto, levando em consideração todo o contexto de utilização da bancada, a concepção de diferentes modelos, com o intuito de gerar uma discussão, um projeto preliminar mediante a definição do conceito final, e por fim o projeto detalhado e construção do equipamento.

Apesar do uso de bancadas experimentais poderem auxiliar no estudo e desenvolvimento de metodologias para aplicações de técnicas diversas, como por exemplo, a Termografia, análise de vibrações, análise de óleos, etc., as mesmas se empregam geralmente a ambientes controlados, com o monitoramento de uma infinidade de variáveis inerentes ao processo. De forma análoga, mas não controlada, é o que ocorre em ambiente industrial, como por exemplo quanto ao funcionamento de um par engrenado, sendo assim, metodologias e resultados obtidos com a utilização destas bancadas não podem ser reproduzidas à risca em aplicações industriais, como exemplificado por Błazej *et. al* (2016) e Kuzin *et al.* (2017), sendo necessárias adaptações e talvez modificações metodológicas de bom emprego das técnicas, principalmente quando se trata da Termografia, que se mostra sensível a variáveis ambientais, tratamento inadequado da superfície, fatores climáticos, dentre outros parâmetros.

CAPÍTULO V

Neste capítulo apresenta-se a metodologia empregada para o desenvolvimento da pesquisa, composta por 10 (dez) atividades, as quais detalhar-se-á de acordo com o cumprimento de etapas que as compõe.

5.0 METODOLOGIA

5.0.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

No presente capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para a realização da pesquisa. Para isto, faz-se necessário, primeiramente, classificar a pesquisa de acordo com o ponto de vista de sua natureza, da forma de abordagem do problema, seus objetivos e procedimentos técnicos, conforme citado por Olinda (2018, p. 75).

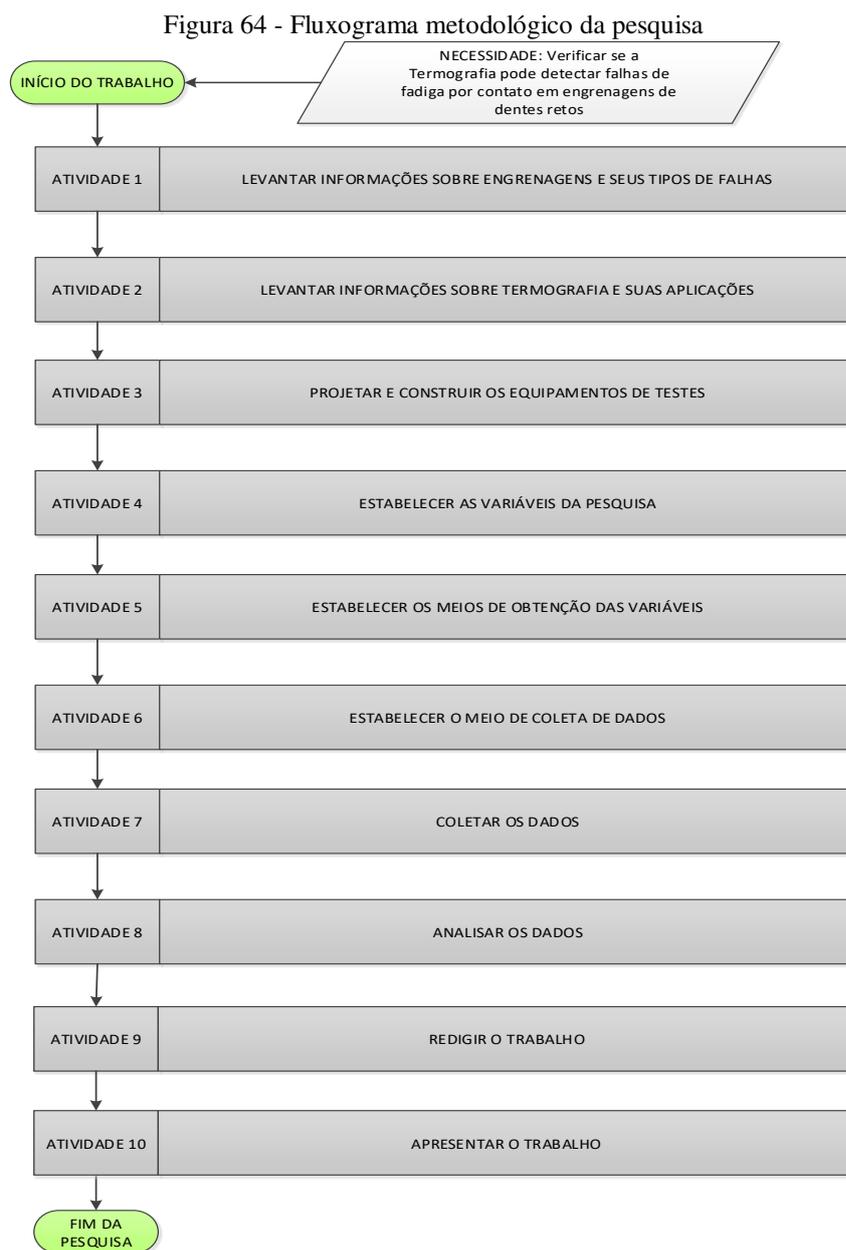
A natureza dessa pesquisa pode ser classificada como do tipo aplicada, pois buscou-se teorias, conhecimentos, métodos e técnicas nas comunidades de pesquisa acadêmica para um propósito específico, tendo em vista que esse tipo de pesquisa é útil para encontrar soluções de problemas. Neste caso, trata-se da avaliação da capacidade da técnica da Termografia para detecção de falhas superficiais em dentes de engrenagens retas. Por sua vez, quanto a forma de abordagem do problema, trata-se de uma pesquisa quantitativa, ou seja, as informações são expressas em valores numéricos, onde classifica-se e analisa-se para a obtenção dos resultados. Para este trabalho, obteve-se valores de temperatura, a partir das faces do engrenamento, que indicam as condições de referência (em bom estado) para o funcionamento, com e sem a presença de lubrificação, e posteriormente a repetição dos ensaios com a implementação de falhas.

Com relação aos objetivos da pesquisa, trata-se de uma pesquisa explicativa com o intuito de conectar as ideias para compreender as causas e efeitos dos fenômenos envolvidos. Neste caso, faz-se referência ao superaquecimento das engrenagens, mais precisamente do pinhão, devido a presença de falhas superficiais nos dentes e ausência de lubrificação. Com relação aos procedimentos técnicos, este estudo trata-se de uma pesquisa experimental. Isto se dá, visto que, a partir da determinação de um objeto de estudo, neste caso engrenagem, seleciona-se as variáveis pertinentes ao tipo de ensaio, suas formas de controle e observados os

efeitos gerados. Além disso, caracteriza-se também como uma pesquisa bibliográfica, onde há a apuração de material já publicado, abrangendo a literatura especializada de uma forma geral.

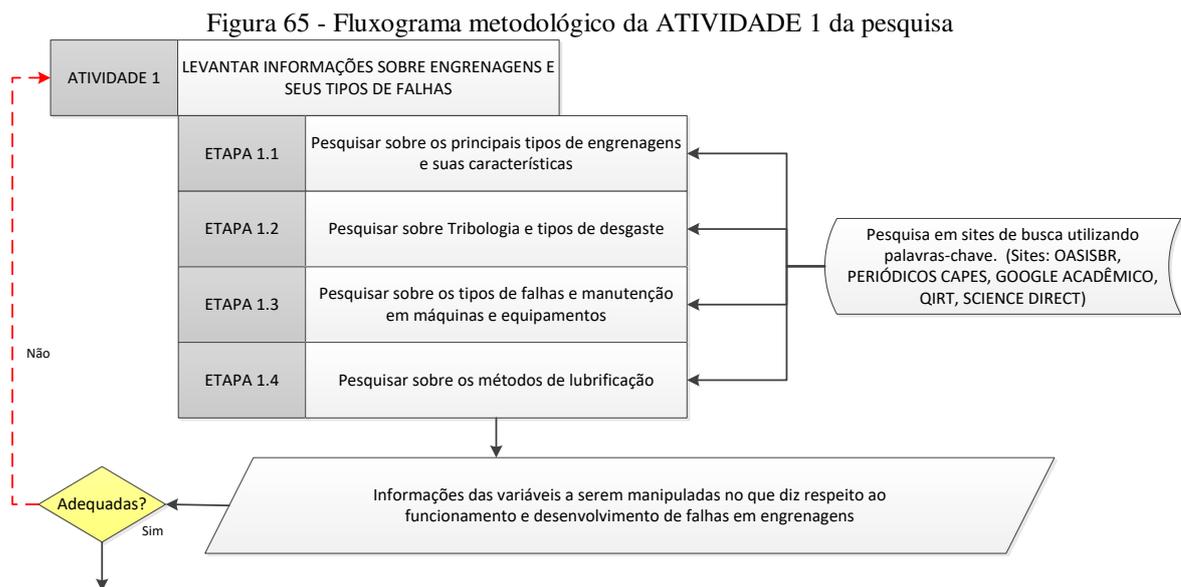
5.0.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento desta pesquisa são apresentados de maneira geral na Figura 64. O detalhamento de cada atividade segue nas demais figuras apresentadas ao longo deste capítulo.



Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

A partir da necessidade de esclarecer a viabilidade do uso da Termografia para a detecção de falhas decorrentes de fadiga por contato em engrenagens de dentes retos, dar-se início a pesquisa. Na ATIVIDADE 1, exemplificada no fluxograma da Figura 65, pesquisa-se informações sobre engrenagens e seus tipos de falhas, para isso, esta ATIVIDADE é subdividida em 4 etapas. Levanta-se informações sobre engrenagens (ETAPA 1.1), quanto aos seus principais tipos e características. Na ETAPA 1.2, busca-se informações sobre a ciência Tribologia e os principais tipos de desgaste em elementos mecânicos. Na ETAPA 1.3 consulta-se sobre os principais tipos de falhas que podem ser desenvolvidas em engrenagens, técnicas de manutenção e, por fim, na ETAPA 1.4 pesquisa-se informações a respeito dos métodos de lubrificação empregados aos elementos em cheque. Como ferramenta de suporte para o desenvolvimento destas ETAPAS, faz-se o uso de sites de busca especializados como: OASISBR, Periódicos da Capes, Google Acadêmico, QIRT e *Science Direct*, utilizando-se das palavras-chaves adequadas. Com o cumprimento desta atividade, tem-se como resultado as informações necessárias a respeito das variáveis a serem manipuladas, referentes ao funcionamento e desenvolvimento de falhas em engrenagens de dentes retos.



Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

No Quadro 5, são apresentados os sítios consultados, as palavras-chaves utilizadas, o número de respostas obtidas e os principais autores consultados.

Quadro 5 - Informações obtidas sobre engrenagens e seus tipos de falha

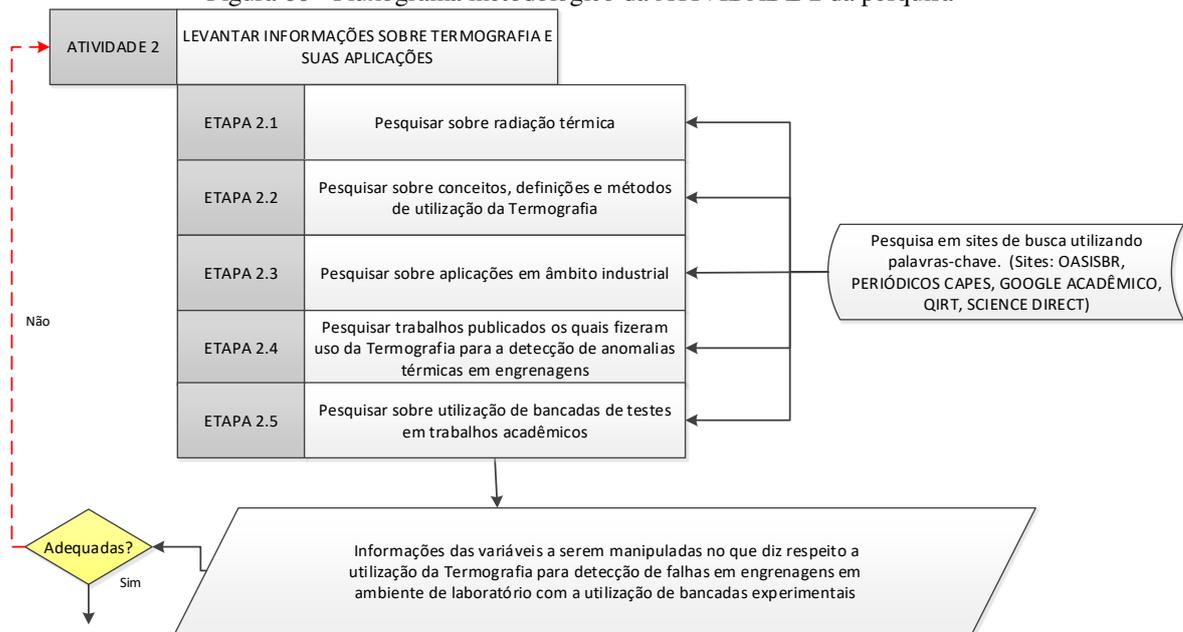
SÍTIOS CONSULTADOS	PALAVRAS-CHAVE	NÚMERO DE RESPOSTAS OBTIDAS	PRINCIPAIS AUTORES CONSULTADOS
OASISBR, PERIÓDICOS CAPES, GOOGLE ACADÊMICO, QIRT e SCIENCE DIRECT	Engrenagens, engrenagens de dentes retos, Tribologia, desgaste, falha, manutenção em máquinas e equipamentos lubrificação e atrito	101	(JÚNIOR, 2002), (WAQAR; DEMETGUL, 2016), (BUDYNAS; J. KEITH, 2011), (SEIDEL, 2011), (KODA, 2009a), (TOURET <i>et al.</i> , 2018), (MOUSINHO, 2017), (SOUSA SILVA, 2015), (FLORES, 2014), (NORTON, 2013), (SOARES, 2016), (SOUZA, 2015), (SILVA JÚNIOR, 2017), (VIOLANTE, 2010), (AMARO, 2001), (STACHOWIAK; BATCHELOR, 1993), (KODA; SILVA, 2008) e (HOEHN <i>et al.</i> , 2008)

Fonte - Autoria própria

A partir destas consultas, obteve-se como o resultado da ATIVIDADE 1, informações sobre as variáveis que precisam ser manipuladas quanto ao funcionamento e desenvolvimento de falhas em engrenagens de dentes retos. Essas variáveis se tratam da rotação do sistema de engrenamento, material de fabricação, variáveis de projeto, tipos de lubrificante, métodos de lubrificação, condição de amaciamento e a partir de quais situações surgem determinados tipos de falhas e como essas se mostram.

Na ATIVIDADE 2, exposta no fluxograma da Figura 66, levanta-se informações a respeito da Termografia e suas aplicações. Para isso, foi necessária a pesquisa de subsídios sobre radiação térmica, as quais são primordiais ao entendimento da aquisição de imagens na banda do infravermelho (ETAPA 2.1). Na ETAPA 2.2, consulta-se informações a respeito da Termografia, como: conceitos, definições e as formas de utilização. Posteriormente, coleta-se documentos sobre a aplicação desta técnica em âmbito industrial (ETAPA 2.3). Na ETAPA 2.4 realiza-se a pesquisa em trabalhos publicados, os quais fizeram uso da Termografia para a análise de anomalias térmicas em engrenagens. Por fim, na ETAPA 2.5 pesquisa-se informações sobre a importância da utilização das bancadas experimentais, em trabalhos acadêmicos, de uma forma geral e para uso da Termografia. Como ferramenta de suporte para o desenvolvimento destas ETAPAS, faz-se o uso de sites de busca especializados como: OASISBR, Periódicos da Capes, Google Acadêmico, QIRT e *Science Direct*, utilizando-se de palavras-chaves adequadas. Como resultado do desenvolvimento desta atividade, tem-se informações necessárias sobre as variáveis a serem manipuladas, no que diz respeito a utilização da técnica Termografia, para detecção de falhas em engrenagens de dentes retos em ambiente de laboratório, utilizando bancadas experimentais.

Figura 66 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 2 da pesquisa



Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

No Quadro 6, são apresentados os sítios consultados, as palavras-chaves utilizadas, o número de respostas obtidas e os principais autores consultados.

Quadro 6 - Informações obtidas sobre Termografia e suas aplicações

SÍTIOS CONSULTADOS	PALAVRAS-CHAVE	NÚMERO DE RESPOSTAS OBTIDAS	PRINCIPAIS AUTORES CONSULTADOS
OASISBR, PERIÓDICOS CAPES, GOOGLE ACADÊMICO, QIRT e SCIENCE DIRECT	Engrenagem, Termografia, infravermelho, radiação térmica, calor, falha, elementos de máquina, bancadas experimentais	68	(HOWELL; MENGUC; SIEGEL, 2016), (MODEST, 2013), (SILVA JÚNIOR, 2017), (CABRAL, 2017), (CHRZANOWSKI, 2001), (GAUSSORGUES, 1994), (OLINDA, 2018), (TOURET et al., 2018), (BENZERROUK; LUDWIG; APELIAN, 2007), (NAGATA et al., 2010), (TIAN et al., 2014), (ARAÚJO, 2014), (NIWA et al., 2014)(WAQAR; DEMETGUL, 2016), (BŁAZEJ et al., 2016) e (KUZIN et al., 2017)

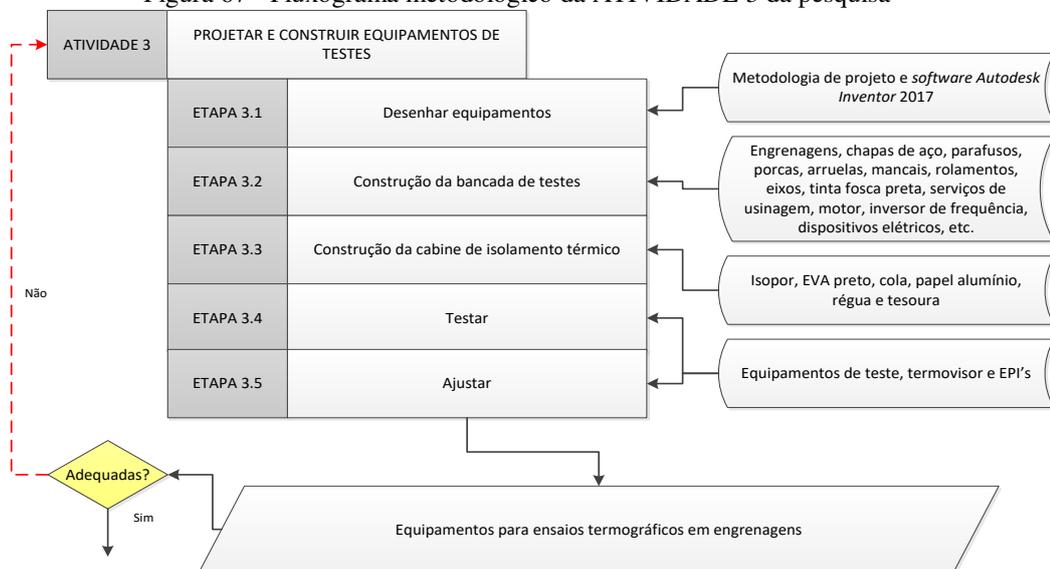
Fonte - Autoria própria

Como resultado da ATIVIDADE 2, tem-se o conhecimento a respeito das variáveis a serem manipuladas e alguns outros cuidados necessários para a utilização da Termografia em análise de falhas em engrenagens. Dentre estas variáveis estão a emissividade, temperatura

refletida, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, interferências térmicas decorrentes do meio, e por fim, distâncias, tempo, horário e intervalos de medição.

Na ATIVIDADE 3, exemplificada na Figura 67, projeta-se os equipamentos de testes, mediante o cumprimento de 5 (cinco) etapas a saber: A ETAPA 3.1 compreende o desenho dos equipamentos, com o emprego de metodologia de projeto e utilização do *software* de desenho *Autodesk Inventor 2017*. Na ETAPA 3.2 realiza-se a concepção da bancada de testes, responsável pela reprodução do funcionamento de um par de engrenagens do tipo coroa-pinhão, onde para sua construção, utiliza-se elementos como: engrenagens, chapas de aço, parafusos, porcas, arruelas, mancais, rolamentos, eixos, tinta fosca preta, motor, inversor de frequência, dispositivos elétricos e serviços de usinagem. Na ETAPA 3.3 constrói-se uma cabine de isolamento térmico com a finalidade de enclausurar o sistema de engrenamento, de forma a prevenir interferências térmicas provenientes do meio. Para a construção desta, faz-se uso de materiais como: isopor, EVA de cor preta, cola, papel alumínio, régua e tesoura. Para a ETAPA 3.4, realiza-se testes nos equipamentos no que diz respeito a funcionalidade e a capacidade de aquisição de imagens térmicas, também se fazendo da utilização de equipamentos de proteção individual, visando a segurança e integridade física do pesquisador. Por fim, na ETAPA 3.5, para qualquer condição estabelecida como não conforme, mediante a necessidade dos ensaios termográficos, de funcionalidade da bancada ou do isolamento térmico, incorpora-se os ajustes pertinentes. Como resultado desta atividade tem-se os equipamentos necessários para a realização dos ensaios termográficos em engrenagens.

Figura 67 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 3 da pesquisa

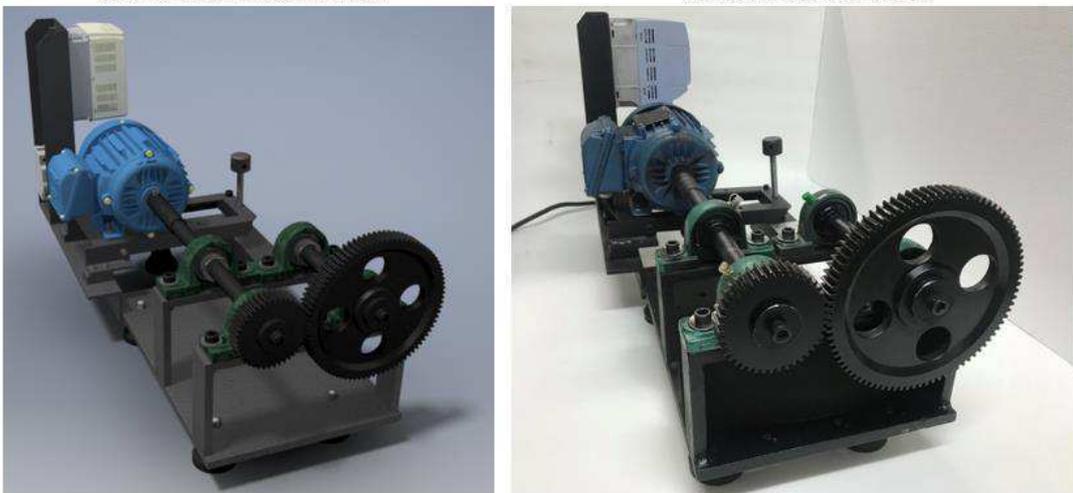


Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

Para cumprir com o estabelecido pela ATIVIDADE 3, inicialmente aplicou-se metodologia de projeto para o desenvolvimento dos equipamentos de testes. Esta etapa se encontra descrita de forma resumida no Apêndice I.

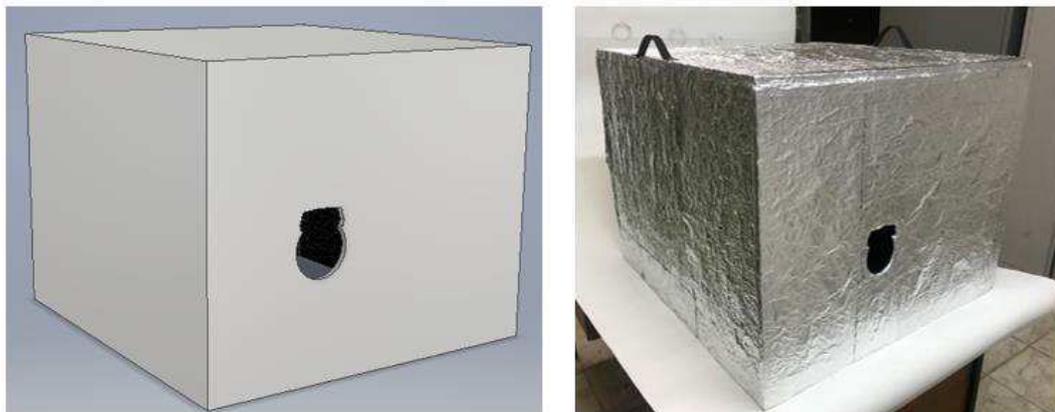
Após o projeto ser detalhado, posteriormente deu-se início a fabricação e montagem dos componentes para a reprodução da bancada de testes na oficina mecânica do SENAI CITI de Campina Grande-PB. Construiu-se a cabine para isolamento térmico após a construção da bancada, no LEEST. Nas Figuras 68 e 69 são ilustrados os desenhos em 3 (três) dimensões dos equipamentos de teste e a imagem destes após a construção.

Figura 68 - Desenho do projeto e bancada experimental de testes concluída
Desenho 3D da bancada de testes Bancada de testes construída



Fonte - Adaptado de Cabral (2017)

Figura 69 - Desenho 3D e cabine de isolamento térmico construída
Desenho 3D da cabine Cabine construída



Fonte - Autoria própria

Estando construída, realizou-se testes de funcionamento para a bancada no próprio SENAI, e após estar pronta a cabine, verificou-se a funcionalidade dos equipamentos como um todo, realizando ensaios termográficos de teste, exemplificados na Figura 70. Foi verificada a ausência de reflexão na superfície das engrenagens e o funcionamento adequado destas para a velocidade de rotação adotada. No decorrer dos testes foram utilizados EPI's, como protetor auricular, óculos, luvas e jaleco, com o objetivo de preservar a higiene e segurança do pesquisador.

Figura 70 - Testes de funcionalidade dos equipamentos para ensaios termográficos

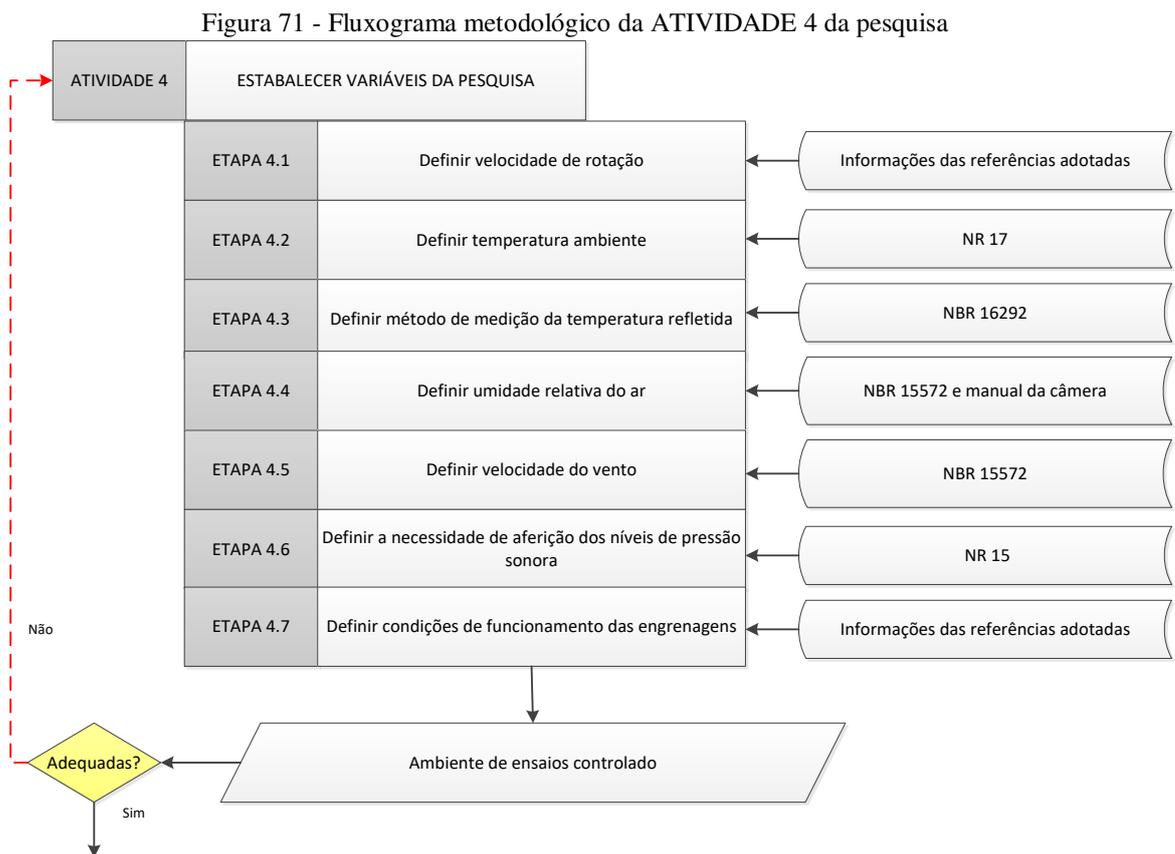


Fonte - Autoria própria

Com a realização dos testes de funcionalidade, verificou-se que a bancada estava apta a realização dos ensaios destinados ao desenvolvimento da pesquisa.

Na ATIVIDADE 4, determina-se as variáveis da pesquisa, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 71, e está dividida em 7 etapas. Na ETAPA 4.1 realiza-se a definição da velocidade de rotação oferecida pelo motor, que deve ser estipulada mediante o tipo de engrenagem utilizada, como se trata de engrenagens retas, emprega-se uma baixa rotação. Para a ETAPA 4.2 propõe-se um valor para a temperatura ambiente, onde leva-se em consideração a faixa de temperatura para conforto térmico ambiental citada na norma regulamentadora nº 17 (NR 17), de 20 a 23°C. Na ETAPA 4.3, define-se o método de medição da temperatura refletida, sendo esses esclarecidos no Capítulo IV do presente trabalho, ou através da NBR 16292. Para a ETAPA 4.4, em ensaios termográficos, faz-se necessária a aferição do valor da umidade relativa do ar, objetivando a obtenção de valores confiáveis de temperatura. Estes valores devem ser bem monitorados, pois de acordo com a NBR 15572, estando acima de 90%, carecem de ser evitadas medições via Termografia. Na ETAPA 4.5, também se define as condições

limites para o valor de velocidade do vento próximo ao pinhão, de modo que na NBR 15572, é estabelecido que para velocidades maiores que 6 m/s as medições não dispõem de uma boa confiabilidade. Outra necessidade para este tipo de aferição, é saber qual equipamento de proteção individual é mais adequado para o abafamento do ruído emitido pelo sistema de engrenagens, para isso consulta-se a norma regulamentadora nº 15 (NR 15). Por fim, na ETAPA 4.7, define-se as condições de funcionamento das engrenagens, quanto a lubrificação e disposição e implementação das falhas. Estando bem estabelecidas as variáveis da pesquisa, tem-se como resultado um ambiente de testes controlado.



Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

Em relação ao cumprimento da ATIVIDADE 4, estabeleceu-se as variáveis da pesquisa. O motor que compõe a bancada de testes tem potência de 1CV, chegando a uma rotação de até 1720 RPM. Sendo assim, adotou-se uma velocidade de 1200 RPM, controlada via inversor de frequência.

A temperatura ambiente manteve-se no valor de 23° e o método escolhido para aferição da temperatura refletida foi o método refletor. Evitou-se a realização de experimentos em dias

muito frios ou chuvosos, onde a umidade se encontrava muito alta. Para a geração das imagens térmicas, também necessitou da implementação da informação referente ao valor da umidade relativa do ar no termovisor ou no *software* de análise dos termogramas.

A preocupação com a velocidade do vento, apesar de se tratar de um ambiente de laboratório, se deu pelo fato de que os ensaios são realizados acerca das condições de engrenagens, as quais são elementos girantes que ao efetuar o movimento de rotação contribui para a geração de vórtices de ar em suas extremidades que atingem uma determinada velocidade, de modo que esta deve estar abaixo de 6 m/s, para que os valores de temperatura advindos do termovisor tenham boa confiabilidade.

As engrenagens retas são ruidosas, este incremento aos níveis de pressão sonora está relacionado a saúde e segurança do pesquisador, para isso realizou-se a consulta ao Quadro 1 da NR 15, que trata dos níveis de tolerância de exposição ao ruído (Anexo I). Tendo os valores aferidos, consultou-se o quadro, e a partir dos valores obtidos em dB e do tempo de exposição com relação aos ensaios, designou-se o protetor auricular adequado ao abafamento parcial deste agente.

Como o objetivo desta pesquisa é determinar a viabilidade do uso da Termografia para detecção de falhas em engrenagens retas decorrentes de desgaste por fadiga de contato, impõe-se 4 (quatro) condições de funcionamento ao par engrenado, sendo essas:

- sem lubrificação e com ausência de falhas;
- com lubrificação e com ausência de falhas;
- sem lubrificação e com a presença de falhas;
- com lubrificação e com a presença de falhas.

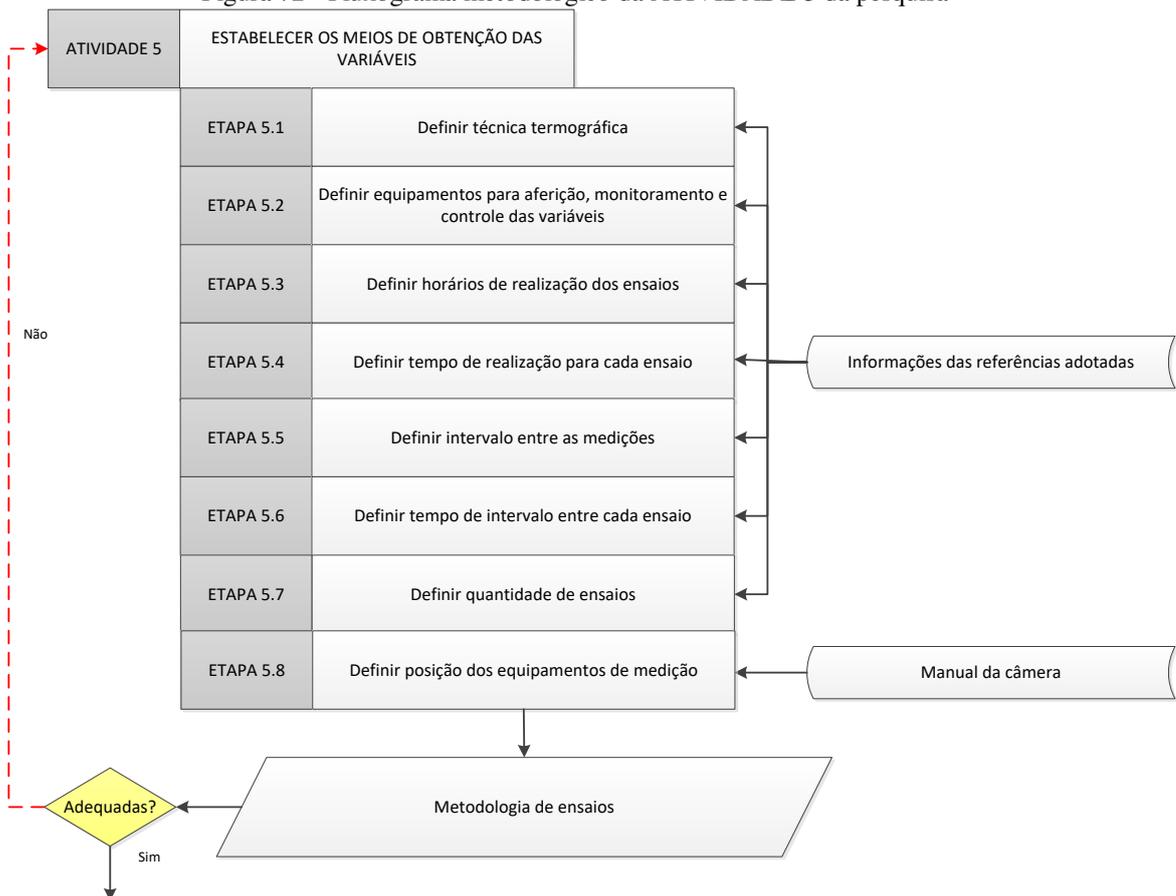
Para as duas primeiras definiu-se como as condições de referência para o funcionamento do engrenamento, onde valores de temperatura são aferidos sem a presença da falha. Estipulou-se ensaios com e sem lubrificação, pelo fato de que, quando não adequada, é um dos fatores que contribuem para o surgimento das falhas em cheque, então tem-se por objetivo verificar a influência deste fluido na variação de temperatura da engrenagem. Para as duas condições posteriores, espera-se o incremento da temperatura, o que caracteriza as condições que fogem da referência. Com relação a implementação das falhas, inseriu-se as mesmas artificialmente, por meio de ferramentas manuais, para conformação mecânica, na região do diâmetro primitivo de 5 (cinco) dentes do pinhão, tendo como referência para decisão quanto a localização e quantidade das anomalias, experimentos realizados por Koda (2009) e Amaro (2001), que através de ensaios de desgaste por fadiga de contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos,

após horas de funcionamento, as falhas de uma forma geral, originavam-se em 4~5 dentes. Tendo as variáveis dos ensaios estabelecidas, tem-se como resultado um ambiente de testes controlado.

Na ATIVIDADE 5 determina-se os meios de obtenção das variáveis mencionadas na ATIVIDADE 4, assim como exemplificado na Figura 72. Na ETAPA 5.1 define-se a técnica termográfica a ser empregada nesta pesquisa, baseando-se nos ensaios realizados pelos autores citados no Capítulo IV, os quais foram realizados por Termografia ativa ou passiva. Na ETAPA 5.2, seleciona-se os equipamentos a serem utilizados para a aferição, monitoramento e controle das variáveis estabelecidas na ATIVIDADE 4, tomando como referência os utilizados por Silva Júnior (2017), Cabral (2017), Ferreira da Silva (2017) e Olinda (2018).

Em cumprimento da ETAPA 5.3, para evitar condições indesejadas de umidade no ambiente, mediante o que foi estabelecido na ETAPA 4.4, realiza-se as medições nos turnos da manhã e tarde. Tendo em vista que nos turnos da noite e madrugada a umidade relativa é alta, e para dias chuvosos ou em alguma outra condição ambiental que propicie condições não satisfatórias, os ensaios termográficos foram suspensos. Na ETAPA 5.4, realiza-se a definição do tempo de ensaio, baseando-se em trabalhos como os de Cabral (2017), Nunez *et al.* (2016), Seo *et al.* (2012), Singh (2014) e Kim *et al.* (2014), que realizaram experimentos para detecção de falhas em rolamentos, Olinda (2018) em acoplamento flexível, Silva Júnior (2017) para rompimento de película limítrofe de óleo e Błazej *et al.* (2016) para monitoramento da temperatura de engrenagens, onde confirma-se uma variação de temperatura plausível até, aproximadamente, os 40 minutos de experimento, tendo em vista que após esse tempo a temperatura do sistema tende a estabilizar. Para a ETAPA 5.5 determina-se um intervalo de tempo entre os ensaios, para que haja o resfriamento e consequente homogeneização da temperatura do engrenamento com o ambiente. Na ETAPA 5.6, define-se o tempo de intervalo entre as medições tomando como base a metodologia adotada por Cabral (2017) e Olinda (2018), tendo em vista a similaridade de realização dos ensaios. Por fim, na ETAPA 5.7, determina-se uma quantidade de ensaios para cada condição de funcionamento das engrenagens, baseando-se nas quantidades de ensaios realizadas por Waqar e Demetgul (2016). Na ETAPA 5.8, concebe-se as posições dos equipamentos de medição para a aferição das variáveis de interesse na pesquisa, tomando por base distâncias estipuladas no manual da câmera e tentando aproximar ao máximo possível os instrumentos de medição ao conjunto de transmissão. Com o cumprimento de todas as ETAPAS da ATIVIDADE 5, tem-se como resultado uma metodologia de ensaios termográficos para detecção de falhas em engrenagens de dentes retos.

Figura 72 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 5 da pesquisa



Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

Para a ATIVIDADE 5, determinou-se que os ensaios são realizados por Termografia ativa, de modo que as aquisições das imagens térmicas devem ocorrer no período de funcionamento das engrenagens. E também por Termografia passiva, para o período de resfriamento, logo após o desligamento do sistema.

Sobre os equipamentos utilizados para captura das imagens térmicas, aferição de temperatura refletida, umidade relativa do ar, temperatura ambiente, velocidade do vento, e níveis de pressão sonora estão demonstrados no Apêndice II.

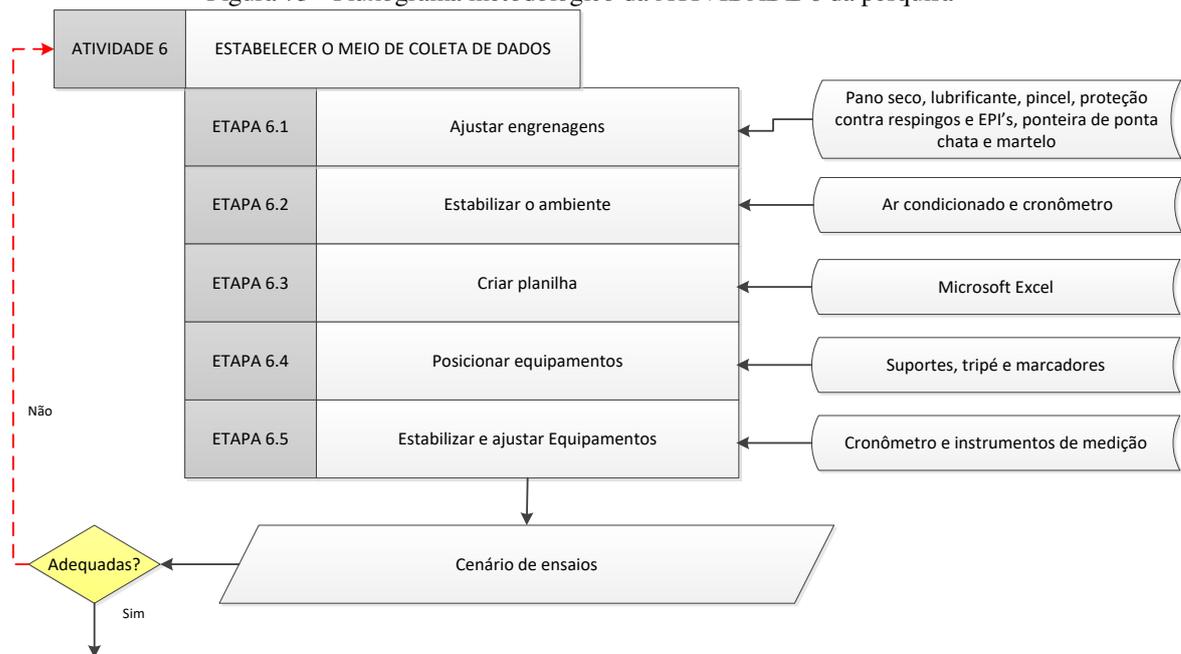
O horário de realização dos ensaios, mediante os cuidados quanto as condições de umidade relativa do ar, realizou-se aos turnos da manhã, dando início no horário das 8:30 e a tarde as 14:30, aproximadamente. Adotou-se um tempo de 60 (sessenta) minutos para cada ensaio, tanto para a utilização da Termografia ativa, como para a passiva. Concebeu-se as medições termográficas em intervalos de 5 (cinco) minutos, totalizando na obtenção de 12 (doze) termogramas por experimento, assim como também as medições de umidade relativa e temperatura ambiente. Entre um intervalo e outro de ensaio estabeleceu-se um tempo mínimo

de aproximadamente 4 horas, que é o tempo necessário para que a engrenagem esfrie, e dissipe o calor proveniente do funcionamento do experimento anterior. Realizou-se 10 (dez) ensaios para cada condição de funcionamento.

Posicionou-se a lente do termovisor a uma distância de aproximadamente 40 cm da face do pinhão e a sonda de umidade e de fio quente o mais próximas possíveis do mesmo.

Na ATIVIDADE 6, determina-se o meio para coleta dos dados, conforme exemplificado no fluxograma da Figura 73. Na ETAPA 6.1, realiza-se o ajuste das engrenagens, quanto a limpeza, lubrificação quando necessário, para que, por exemplo, respingos de graxa ou partículas contaminantes não interfiram nas aferições de temperatura, assim como insere-se as falhas após o período de testes para boas condições do par engrenado. Posteriormente, referente a ETAPA 6.2, estabiliza-se o ambiente, levando em consideração períodos adotados por Cabral (2017), Olinda (2018) e Aires (2018), sendo este controle possível por meio de um condicionador de ar para o controle da temperatura e um cronômetro para o tempo. Mediante a necessidade de coleta de dados durante o ensaio, elabora-se uma planilha com os dados a serem coletados para facilitar os registros pertinentes, conforme requisitado pela ETAPA 6.3. Na ETAPA 6.4 posiciona-se os equipamentos com o auxílio de suportes, tripé, e marcadores, posteriormente, aguarda-se um tempo para estabilização dos equipamentos, assim como os ajustes técnicos dos mesmos. Tendo todas as ETAPAS em cumprimento, tem-se como produto um cenário adequado a realização dos ensaios desejados.

Figura 73 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 6 da pesquisa



Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

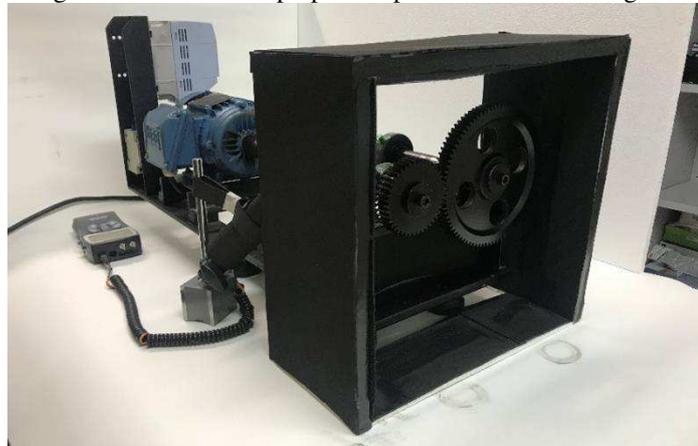
Em cumprimento da ATIVIDADE 6, estabeleceu-se o meio de coleta de dados, mediante a metodologia de ensaios construída a partir da ATIVIDADE 5. Antes da realização dos experimentos, se fez uso dos equipamentos de proteção individual (óculos, jaleco, luvas e protetor auricular). Os níveis de ruído próximos ao ouvido do pesquisador no momento de funcionamento do sistema eram em média 96 dB, medidos em resposta lenta (*slow*) e ponderação "A". Como o tempo de ensaios por dia, para o sistema em funcionamento, eram de 2 horas (uma hora para cada turno), estava dentro dos limites de tolerância permitidos pela NR 15, mas de toda forma se fazia o uso do EPI. Posteriormente, realizou-se ajustes nas engrenagens, onde para as condições do engrenamento com a ausência de lubrificação, efetuava-se apenas a limpeza da face do pinhão com um pano seco ou papel higiênico. Quando das condições de lubrificação, pelo menos 3 (três) horas antes do experimento aplicava-se o lubrificante, sendo este graxa para engrenagens abertas, de boa adesividade, para baixas temperaturas e baixas velocidades de rotação. Aplicava-se o lubrificante por meio de pincelamento, como exemplificado na Figura 74, e posteriormente, funcionava por volta de 5 minutos para que o excesso de graxa fosse retirado e lançado em uma estrutura de proteção tipo pórtico, como exemplificado na Figura 75, este tempo de espera se dava justamente para que o calor proveniente do funcionamento para a retirada do excesso fosse dissipado.

Figura 74 - Lubrificação das engrenagens por pincelamento



Fonte - Autoria própria

Figura 75 - Estrutura tipo pórtico para reter excesso de graxa



Fonte - Autoria própria

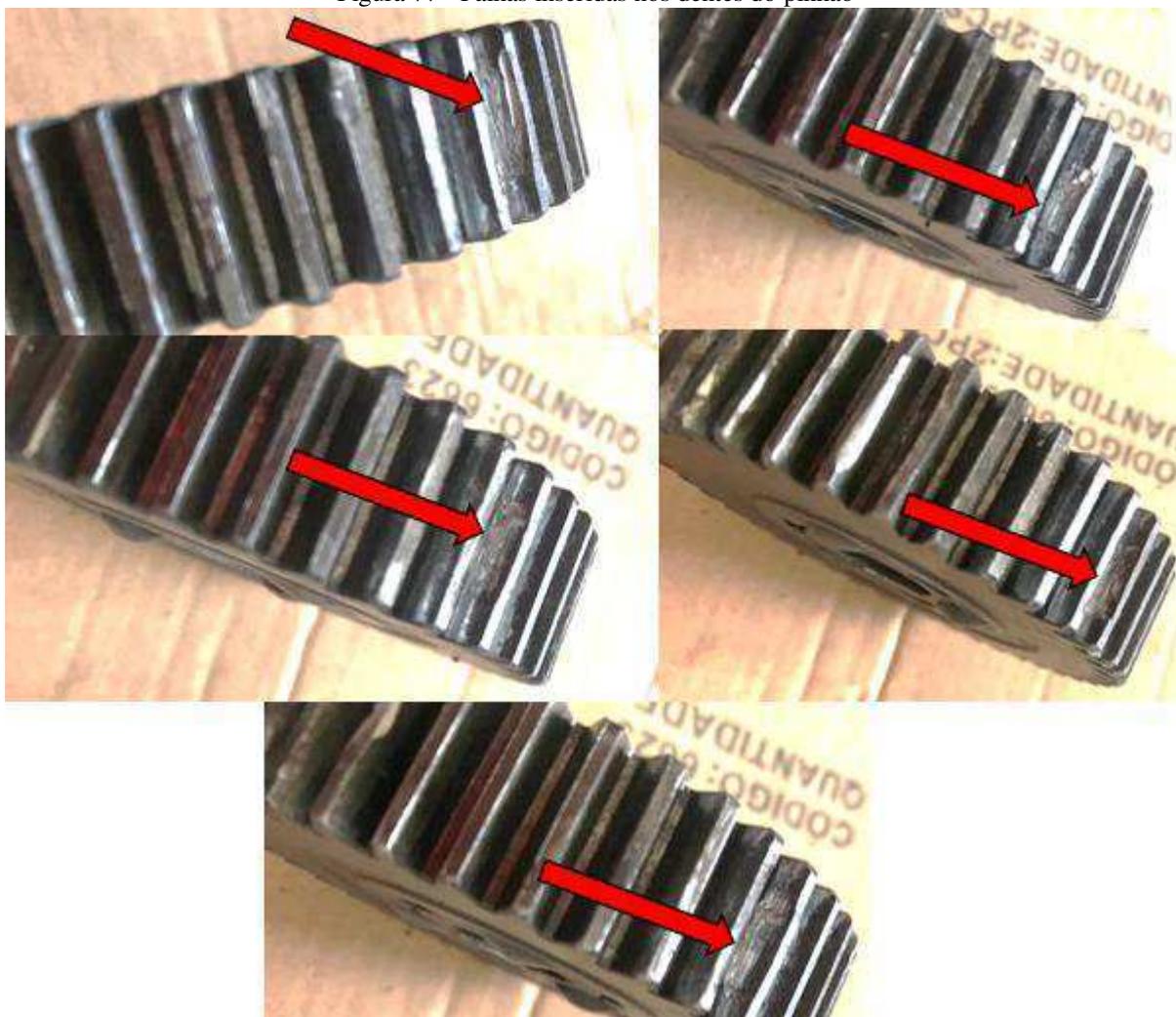
Para os ensaios em que o pinhão se encontrava em estado de falha, demarcou-se a região de inserção da anomalia com auxílio de uma caneta preta de ponta fina e régua, como exposto na Figura 76, sempre na superfície do dente correspondente a direção de rolamento do pinhão. Inseriu-se estas anomalias a partir de choques mecânicos na região do diâmetro primitivo, onde em alguns dentes também eram afetadas as regiões do adendo e dedendo, com o objetivo de reproduzir o que se aproximaria de um *pitting* avançado ou *spalling* em cinco dentes, baseando-se em informação referentes ao surgimento de falhas em dentes de engrenagens retas por fadiga de contato dos trabalhos do Koda (2009b) e Amaro (2001). Utilizou-se uma ponteira com ponta chata, e com o auxílio de um martelo, efetuaram-se choques mecânicos na região de interesse para o ocorrência de anomalias as quais caracterizam falhas decorrentes de desgaste de fadiga por contato, conforme exemplificado na Figura 77.

Figura 76 - Demarcação da regiões para inserção de falha



Fonte - Autoria própria

Figura 77 - Falhas inseridas nos dentes do pinhão



Fonte - Autoria própria

Estando o engrenamento ajustado, esperou-se um tempo de 30 a 45 minutos para a estabilização da temperatura da sala através do aparelho de ar condicionado. Tomou-se outros cuidados, como o fechamento das cortinas e o desligamento das lâmpadas.

Em meio a este tempo de estabilização criou-se uma planilha para registro dos dados, onde o modelo pode ser observado no Apêndice III.

Posteriormente posicionou-se os equipamentos de medição. Para a aferição da temperatura refletida, localizou-se o objeto refletor (papel alumínio amassado) paralelo ao pinhão, com o auxílio de um suporte magnético com braço articulado, conforme a configuração exposta na Figura 78.

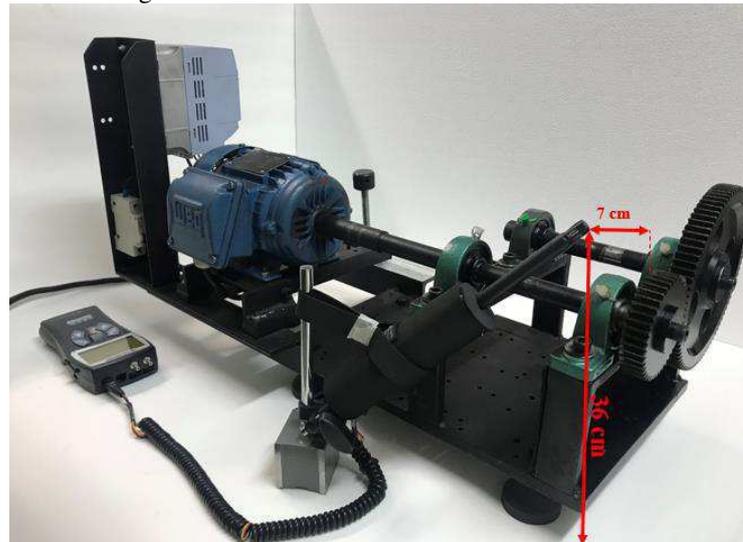
Figura 78 - Posicionamento do objeto refletor



Fonte - Autoria própria

Para a medição da umidade relativa do ar e temperatura ambiente, após ter aferido a temperatura refletida, posicionou-se a sonda pelo mesmo suporte magnético com braço articulado, mantendo-se próximo ao pinhão, mediante a configuração exemplificada na Figura 79.

Figura 79 - Posicionamento da sonda de umidade



Fonte - Autoria própria

Para a medição da velocidade do vento, situou-se a sonda de fio quente próxima as faces do pinhão, conforme exemplificado na Figura 80.

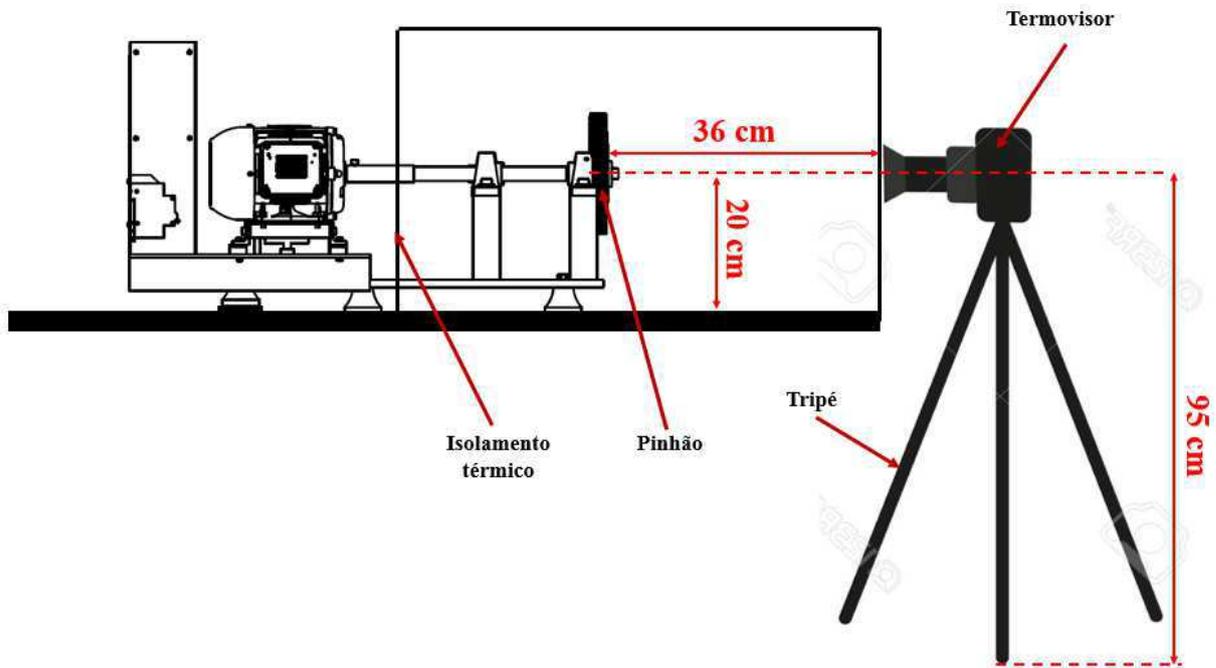
Figura 80 - Posicionamento da sonda de fio quente



Fonte - Autoria própria

Para o posicionamento do termovisor, fez-se uso de um tripé, com o objetivo de enquadrar o pinhão, visando a detecção da radiação infravermelha emitida pela superfície de sua face. Utilizou-se marcadores no piso para estabelecer a posição do tripé, e quanto ao posicionamento da câmera, as distâncias estão exemplificadas no croqui da Figura 81. Na Figura 82, pode ser observado o pinhão enquadrado com o foco desejado.

Figura 81 - Posicionamento do termovisor para os ensaios termográficos



Fonte - Autoria própria

Figura 82 - Enquadramento do pinhão pelo termovisor

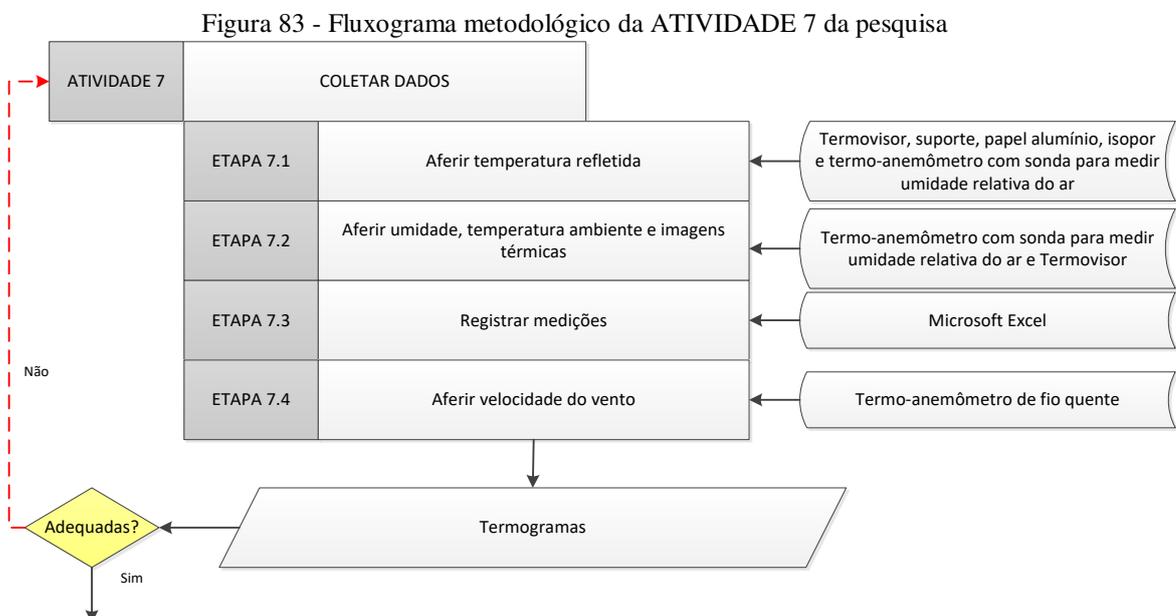


Fonte - Autoria própria

Após os equipamentos estarem posicionados efetuou-se os ajustes, e por fim, após serem ligados, esperou-se um tempo de aproximadamente 5 (cinco) minutos relativos as necessidades de estabilização, antes da realização das medições.

Para a ATIVIDADE 7, a qual os dados foram coletados, está exemplificada na Figura 83 e composta por 4 etapas a saber: Na ETAPA 7.1 mede-se a temperatura refletida, de acordo com o método adotado na ETAPA 4.3. Para essa medição faz-se uso de instrumentos como termovisor, termo-anemômetro com sonda para medição da umidade relativa do ar e materiais

como papel alumínio, isopor e suportes para a construção de um objeto refletor. Posteriormente, na ETAPA 7.2, durante os experimentos, de acordo com o que foi estabelecido na ATIVIDADE 5, realiza-se aferições de umidade, temperatura ambiente e a captura das imagens térmicas. Para que esta etapa se concretize, utiliza-se os seguintes instrumentos de medição: termoanemômetro com sonda para medição de umidade relativa do ar e temperatura ambiente, e o termovisor para a aquisição das imagens térmicas. Na ETAPA 7.3, registra-se estes dados na planilha desenvolvida na ETAPA 6.3. Por fim, na ETAPA 7.4, ao fim dos experimentos realiza-se a aferição da velocidade do vento nas proximidades do engrenamento, com o objetivo de verificar os valores mediante a criação de vórtices que surgem com o movimento rotativo. Como resultado do cumprimento desta ATIVIDADE, tem-se os termogramas dos ensaios.



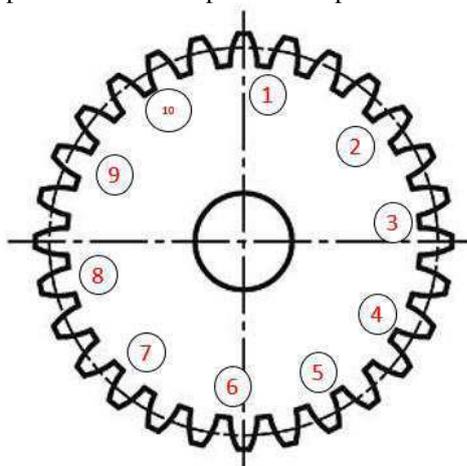
Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

Na ATIVIDADE 7 iniciou-se a coleta dos dados para as condições de funcionamento pré-estabelecidas, com o engrenamento sem lubrificação e posteriormente com o implemento do lubrificante, caracterizando o estado de referência, para posteriormente, estes ensaios serem repetidos no que diz respeito às condições de falha. A priori, para cada um dos experimentos, realizou-se a medição da temperatura refletida, onde coletou-se 10 (dez) valores de temperatura da superfície do objeto refletor, sendo este procedimento realizado 6 (seis) vezes, onde em cada

um destes também se realizou a medição da umidade relativa do ar e temperatura ambiente. Por fim, obteve-se uma média de temperatura equivalente ao valor final da temperatura refletida.

Após ser determinada a temperatura refletida, deu-se início aos experimentos com o funcionamento do sistema de engrenamento (Termografia ativa). Aferiu-se valores de umidade relativa do ar e temperatura ambiente em simultaneidade à captação das imagens térmicas. O pinhão foi mapeado em 10 (dez) pontos para coleta de dados de temperatura, assim como ilustrado na Figura 84, para posteriormente obter-se uma média. O mesmo procedimento se deu para a situação de resfriamento (Termografia passiva).

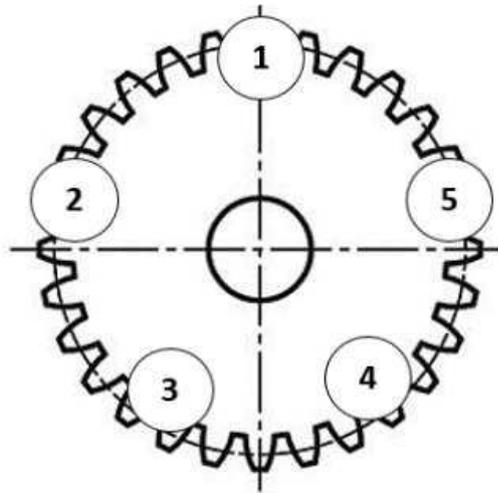
Figura 84 - Pontos para leitura de temperatura no pinhão através dos termogramas



Fonte - Autoria própria

Ao fim de cada ensaio termográfico realizou-se a medição da velocidade do vento 3 (três) vezes em 5 (cinco) pontos distintos do pinhão, assim como ilustrado na Figura 85, para posteriormente obter-se a média para cada ponto. Após realizadas as medições, registrou-se os dados na planilha do Apêndice III.

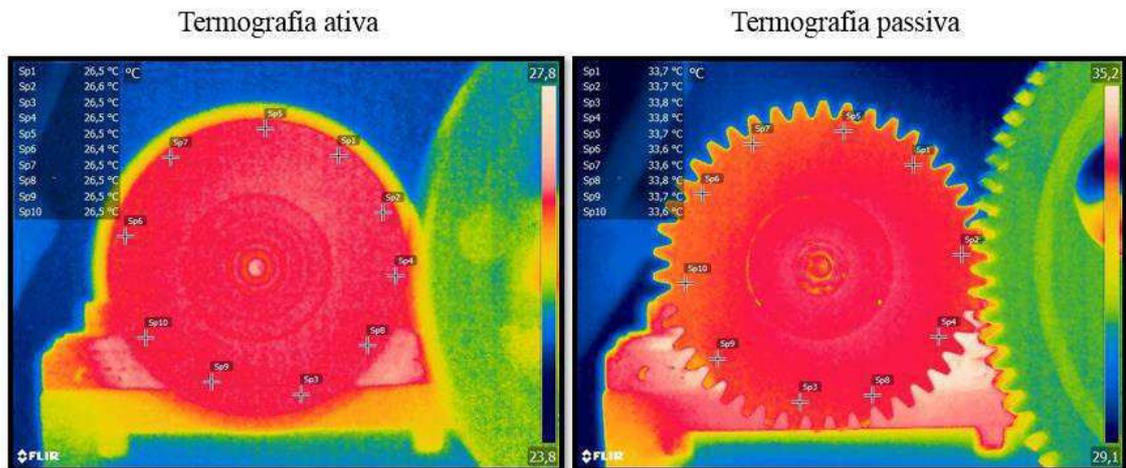
Figura 85 - Pontos para medição de velocidade do vento



Fonte - Autoria própria

Como resultados das medições obteve-se os termogramas dos experimentos, como exemplificados na Figura 86, para as medições por Termografia ativa e passiva.

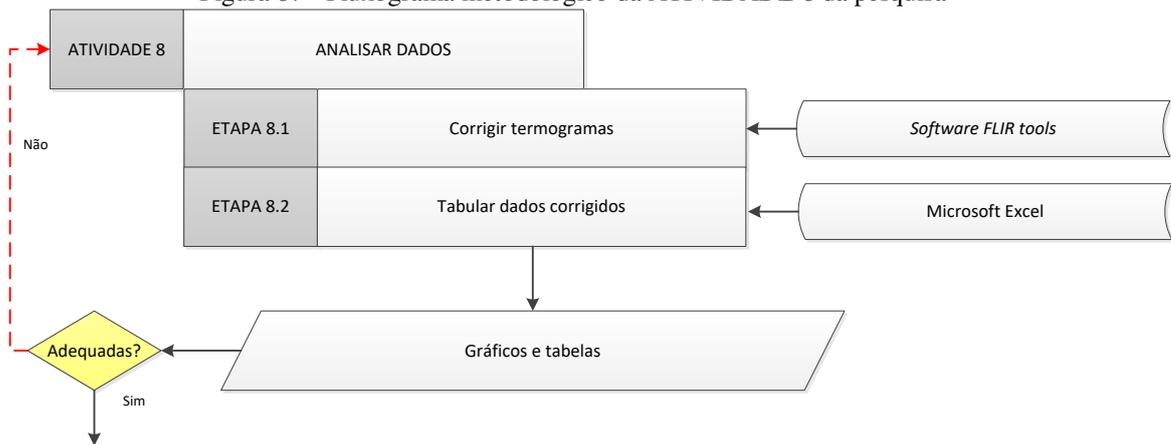
Figura 86 - Termogramas



Fonte - Autoria própria

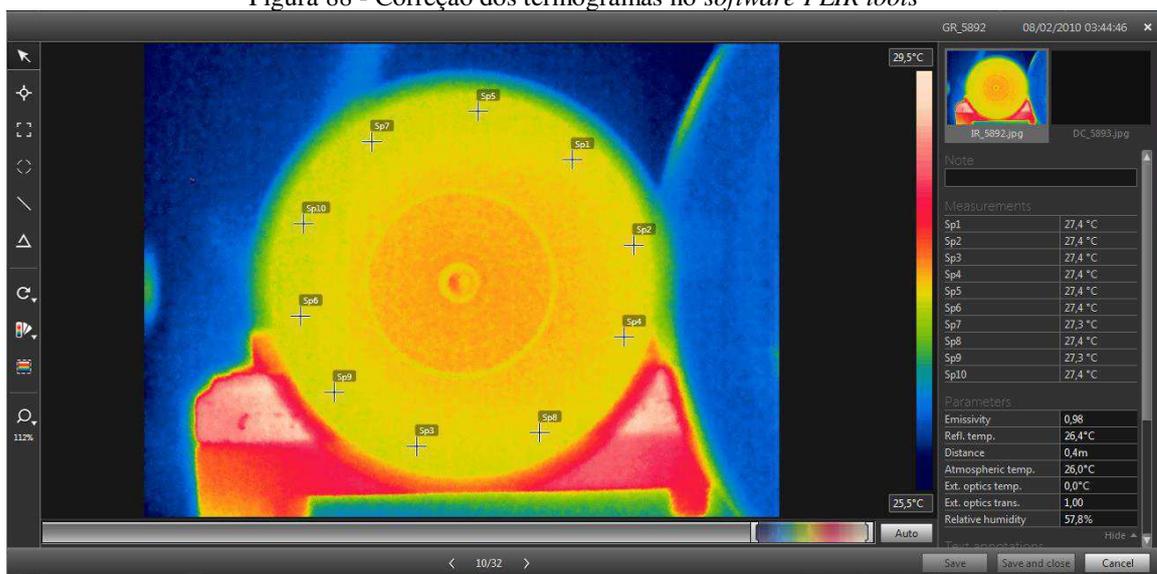
Na ATIVIDADE 8, analisa-se os dados coletados na ATIVIDADE 7, o fluxograma metodológico desta atividade está exemplificado na Figura 84. Na ETAPA 8.1, efetiva-se a correção dos termogramas com o auxílio do *software FLIR tools*, de acordo com os dados e informações obtidas nos ensaios. Na ETAPA 8.2, tabula-se os dados corrigidos, e como resultado desta ATIVIDADE gera-se tabelas e gráficos com os valores de temperatura da engrenagem, a partir do *software Excel*.

Figura 87 - Fluxograma metodológico da ATIVIDADE 8 da pesquisa



Fonte - Baseado em Maribondo (2000)

Tendo os termogramas, frutos do cumprimento da ATIVIDADE 7, deu-se início a ATIVIDADE 8, onde realizou-se a análise dos dados. Corrigiu-se os valores de temperatura dos termogramas, sendo implementados os valores de temperatura refletida, umidade relativa do ar, temperatura ambiente e distância da câmera ao objeto no *software FLIR tools*, assim como exemplificado na Figura 88.

Figura 88 - Correção dos termogramas no *software FLIR tools*

Fonte - Autoria própria

Posteriormente realiza-se a ATIVIDADE 9, referente a redação do trabalho, e por fim, a apresentação do mesmo na ATIVIDADE 10, com informações baseadas em todas as ATIVIDADES anteriores a estas. Tendo todo o cumprimento das atividades, tem-se como resultado o fim da pesquisa.

CAPÍTULO VI

Neste capítulo, apresentar-se-á os resultados e discussões face a realização da ETAPA 8.3 da ATIVIDADE 8 propostas na metodologia do Capítulo V.

6.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efetivadas as correções dos termogramas, obteve-se valores de temperatura para cada experimento e as médias destas para: as condições de funcionamento do par engrenado sem a presença de lubrificante e com lubrificação, nas condições de referência (ausência de falhas) e em estado de falha. Quantificou-se a velocidade do vento no ponto 5 (cinco) para cada experimento, pelo fato de ser o ponto o qual apresentou maiores velocidades, caracterizado por ser a região do contato dentário entre a coroa e o pinhão. Esses valores são exemplificados adiante, através de tabelas para cada condição pré-estabelecida de funcionamento, onde logo em seguida expor-se-á estes dados em gráficos elucidando as curvas de temperatura.

Para os experimentos 1 e 2 notou-se um comportamento mais acentuado para os níveis de temperatura do pinhão com ausência de lubrificação no estado de referência, conforme exemplificado na Tabela 3 e Figura 89, esta anomalia se apresentou pelo fato de ser o período de amaciamento ou *running-in* do elemento, ou seja, sua rugosidade superficial apresentava-se mais elevada, o que contribuiu ao aumento do atrito entre os dentes, correspondendo à maior geração de calor.

Constatou-se que no momento em que se realizavam ajustes no equipamento de testes (apertos nos parafusos), havia um leve aumento referente as condições finais de temperatura do pinhão, pelo fato de que essas intervenções contribuía ao maior contato dentário ou atrito entre o par engrenado.

Com a implementação do lubrificante evidenciou-se um decremento aos níveis de temperatura do pinhão através da Termografia ativa, devido a redução do atrito mediante a formação de uma camada limítrofe de graxa. Se tratando de uma média de temperatura final, com a ausência de lubrificação tem-se 32,69 °C e com a presença da graxa esse valor cai para 31,28 °C, contribuindo ao decréscimo médio de 1,41 °C, conforme exposto pela Figura 89.

Tabela 3 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens sem lubrificação em condições de referência

		Tempo (min)													Velocidade do vento (m/s) no ponto 5
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
Sem Lubrificação - Termografia Ativa (°C) – Estado de Referência	Experimento 1	24,51	26,1	28,19	29,34	30,16	30,98	31,49	31,8	32,22	32,64	33,09	33,53	33,72	0,39
	Experimento 2	25,22	27,09	28,86	29,83	30,85	31,2	31,91	32,31	32,74	32,96	33,44	33,68	33,66	0,66
	Experimento 3	24,62	26,19	27,78	28,9	29,79	30,55	30,9	31,43	31,83	32,04	32,44	32,68	32,96	0,64
	Experimento 4	25,2	26,79	27,95	28,97	29,91	30,6	30,88	31,45	31,88	32,18	32,39	32,41	32,98	0,55
	Experimento 5	24,07	25,65	27,03	28,12	28,98	29,72	30,26	30,85	31,09	31,57	31,81	32,06	32,4	0,43
	Experimento 6	24,38	25,91	27,3	28,3	29,06	29,89	30,38	30,88	31,41	31,73	32,14	32,27	32,53	0,92
	Experimento 7	24,35	25,57	26,9	27,91	28,8	29,55	30,01	30,51	31,11	31,53	31,74	31,92	32,25	0,73
	Experimento 8	24,14	26,58	27,79	28,73	29,43	30,07	30,5	30,84	31,13	31,55	31,81	31,86	32,38	0,65
	Experimento 9	24,75	26,41	27,65	28,67	29,47	30,05	30,5	31,02	31,34	31,56	31,92	32,18	32,39	0,69
	Experimento 10	23,97	25,68	26,81	27,97	28,82	29,4	29,85	30,38	30,71	31,07	31,27	31,61	31,67	0,67
	Média	24,52	26,20	27,63	28,67	29,53	30,20	30,67	31,15	31,55	31,88	32,21	32,42	32,69	0,63

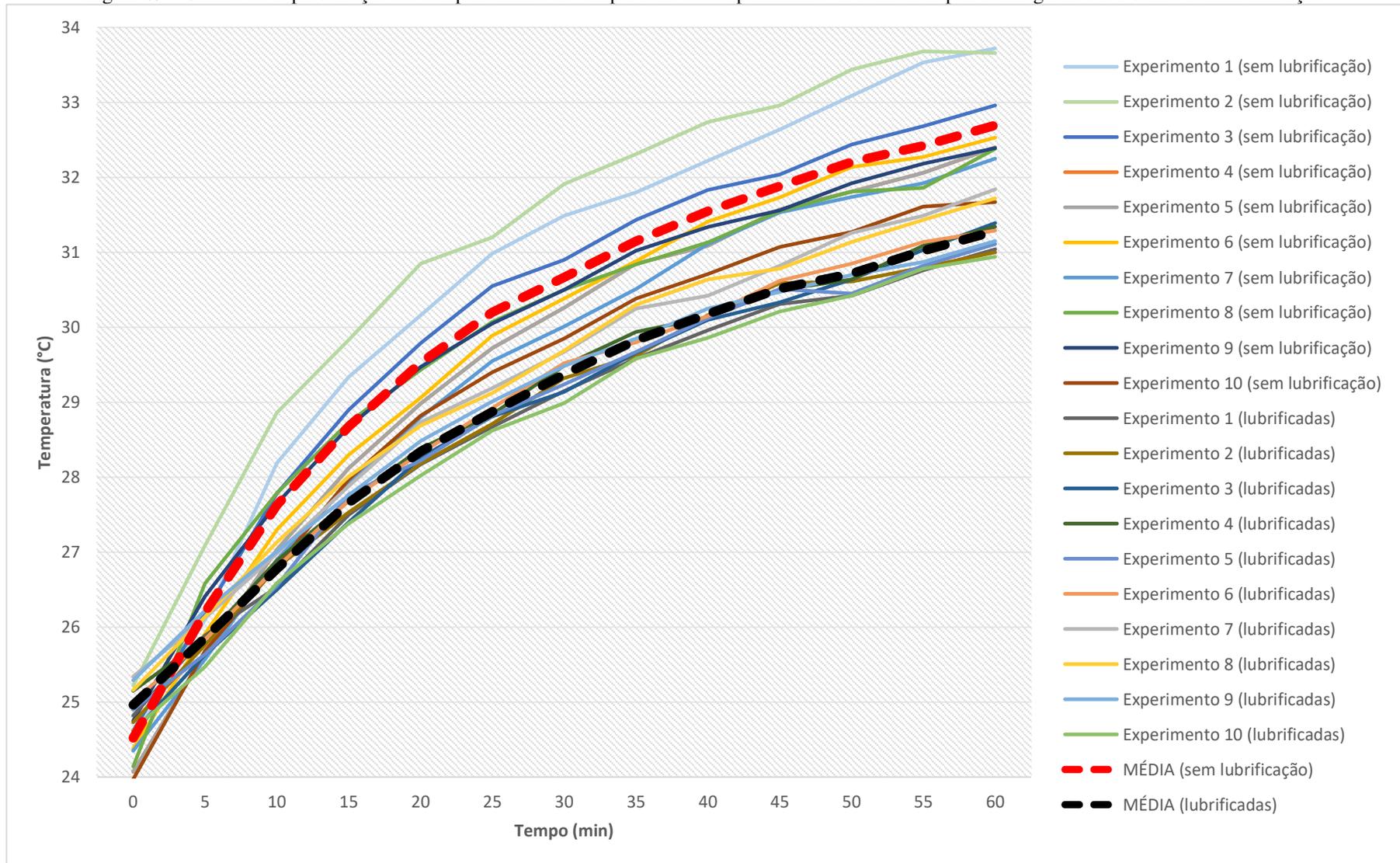
Fonte - Autoria própria

Tabela 4 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens lubrificadas em condições de referência

		Tempo (min)													Velocidade do vento (m/s) no ponto 5
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
Com Lubrificação - Termografia Ativa (°C) – Estado de Referência	Experimento 1	24,82	25,89	26,53	27,5	28,17	28,67	29,15	29,58	29,96	30,31	30,42	30,76	31,04	0,5
	Experimento 2	24,73	25,76	26,8	27,53	28,18	28,71	29,32	29,62	30,16	30,59	30,61	30,8	31	0,61
	Experimento 3	24,59	25,63	26,5	27,4	28,26	28,81	29,14	29,66	30,1	30,33	30,64	31,03	31,39	0,43
	Experimento 4	25,15	25,85	26,89	27,68	28,38	28,84	29,49	29,94	30,13	30,5	30,64	31,09	31,34	0,6
	Experimento 5	24,9	25,64	26,55	27,77	28,22	28,82	29,24	29,67	30,12	30,51	30,45	30,82	31,11	0,63
	Experimento 6	25,01	25,84	26,8	27,69	28,32	28,92	29,52	29,8	30,15	30,62	30,85	31,14	31,29	0,63
	Experimento 7	25,34	26,12	26,98	27,88	28,73	29,19	29,67	30,25	30,42	30,82	31,26	31,49	31,84	0,54
	Experimento 8	25,16	26,14	27,13	28,01	28,69	29,12	29,69	30,3	30,64	30,78	31,14	31,43	31,72	0,56
	Experimento 9	25,29	26,22	27,01	27,76	28,48	29,01	29,48	29,85	30,25	30,47	30,7	30,87	31,15	0,55
	Experimento 10	24,63	25,47	26,59	27,38	28,02	28,62	28,99	29,58	29,86	30,21	30,42	30,78	30,94	0,68
	Média	24,96	25,86	26,78	27,66	28,35	28,87	29,37	29,83	30,18	30,51	30,71	31,02	31,28	0,57

Fonte - Autoria própria

Figura 89 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos de referência por Termografia ativa sem e com lubrificação



Expostos os experimentos realizados via Termografia ativa para as condições de referência do pinhão, realizou-se a etapa de testes por Termografia passiva. Para as condições do sistema engrenado sem e com lubrificação, evidenciou-se que ambas tendem a estabilizar a temperatura em um tempo próximo aos 60 minutos, conforme exemplificado nas Tabelas 5, Tabela 6 e Figura 90, onde é notória a aproximação das curvas térmicas ao longo do tempo.

Constatou-se, aos 5 minutos de experimento, um pico de temperatura para todos os ensaios por Termografia passiva, decorrente da dissipação de calor do pinhão, que não era possível ser evidenciado logo após a parada do sistema devido ao vórtice de vento criado em suas extremidades quando em movimento, que promovia um efeito refrigerante. Para o par engrenado lubrificado, este pico se mostrava pouco menos expressivo, isso dava-se pelo motivo da presença da graxa interferir na dissipação de calor do pinhão, devido promover uma película adesiva de espessura não definida na direção normal à área de superfície do dente, caracterizada por uma resistividade térmica maior que a do ar, pois quando não lubrificado, o único fluído o qual interage com o calor emanado pela engrenagem é o ar.

Após este incremento a temperatura tende a decrescer até se homogeneizar à temperatura do ambiente, conforme exposto nas curvas térmicas da Figura 90.

Tabela 5 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens sem lubrificação em condições de referência

		Tempo (min)												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Sem Lubrificação - Termografia Passiva (°C) - Estado de Referência	Experimento 1	33,7	33,74	33,43	32,88	32,35	31,9	31,42	30,95	30,54	30,19	29,81	29,5	29,16
	Experimento 2	33,8	34,11	33,68	32,81	32,43	31,86	31,46	30,99	30,55	30,06	29,94	29,61	29,32
	Experimento 3	33,05	33,18	32,8	32,59	32,06	31,56	31,17	30,72	30,4	29,99	29,68	29,44	29,13
	Experimento 4	33,03	33,24	32,83	32,42	31,94	31,47	31,09	30,71	30,29	29,99	29,67	29,29	29,14
	Experimento 5	32,47	32,78	32,46	31,9	31,48	30,99	30,9	30,49	30,05	29,73	29,32	29,06	28,72
	Experimento 6	32,62	32,83	32,65	32,23	31,83	31,42	31,07	30,59	30,36	30,04	29,69	29,24	29,04
	Experimento 7	32,32	32,47	32,3	32,02	31,63	31,22	30,73	30,33	29,89	29,7	29,32	29,05	28,76
	Experimento 8	32,36	32,16	31,99	31,47	30,9	30,54	30,22	29,81	29,51	29,21	28,95	28,69	28,39
	Experimento 9	32,53	32,34	31,99	31,59	31,2	30,79	30,4	30	29,58	29,22	29,08	28,72	28,56
	Experimento 10	31,75	31,95	31,61	31,21	30,88	30,44	30,21	29,77	29,44	29,09	28,76	28,56	28,25
	Média	32,76	32,88	32,57	32,11	31,67	31,22	30,87	30,44	30,06	29,72	29,42	29,12	28,85

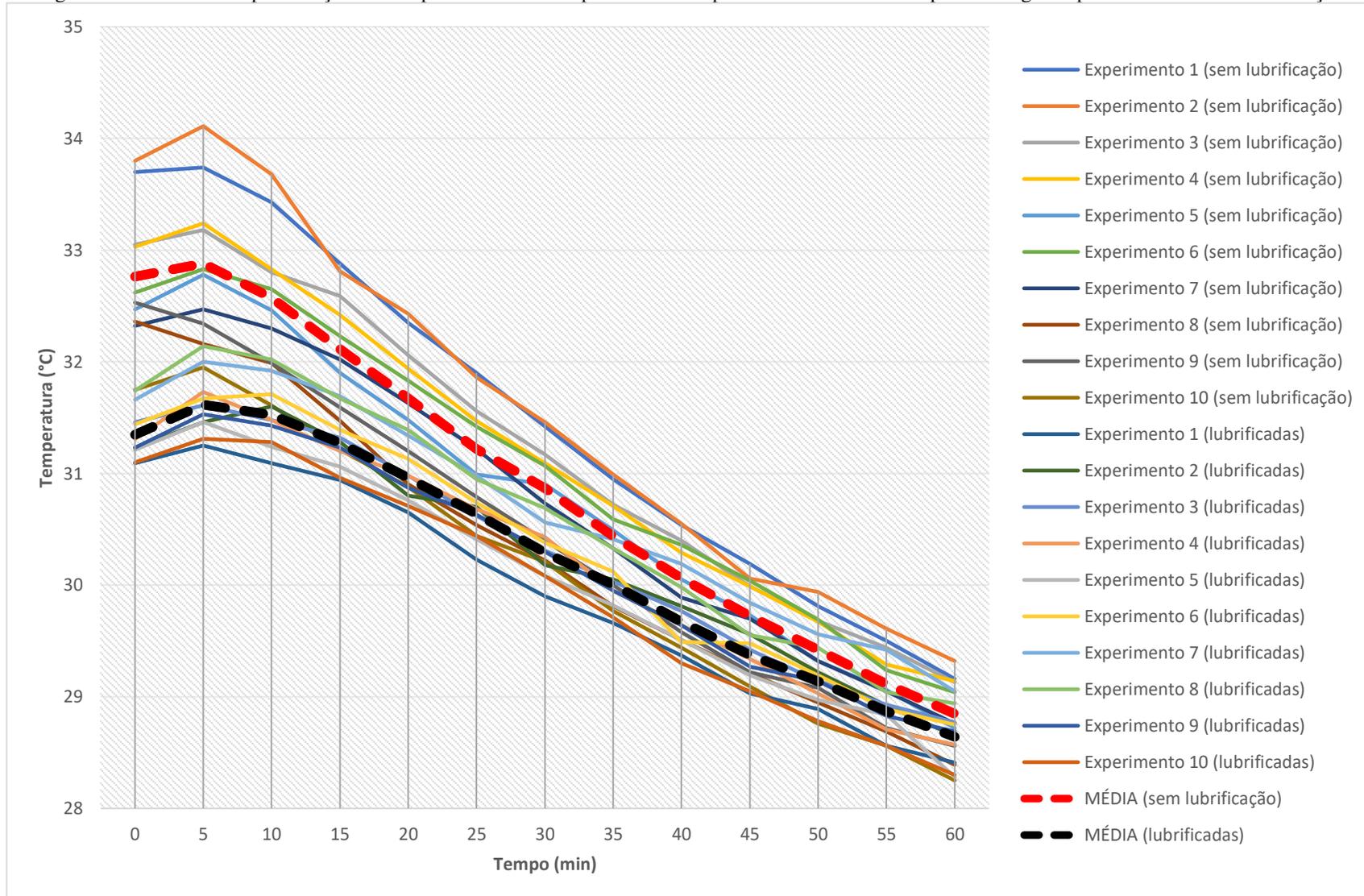
Fonte - Autoria própria

Tabela 6 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens lubrificadas em condições de referência

		Tempo (min)												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Com Lubrificação - Termografia passiva (°C) - Estado de Referência	Experimento 1	31,09	31,25	31,09	30,94	30,65	30,23	29,9	29,66	29,37	29,03	28,89	28,56	28,41
	Experimento 2	31,23	31,46	31,6	31,28	30,8	30,7	30,18	30,05	29,81	29,56	29,22	28,92	28,65
	Experimento 3	31,46	31,61	31,48	31,32	30,98	30,62	30,31	30,03	29,77	29,42	29,14	28,93	28,77
	Experimento 4	31,31	31,73	31,48	31,2	30,98	30,68	30,43	29,95	29,64	29,34	29,03	28,71	28,57
	Experimento 5	31,21	31,46	31,24	31,06	30,76	30,41	30,08	29,82	29,51	29,19	28,97	28,84	28,28
	Experimento 6	31,44	31,67	31,71	31,39	31,13	30,74	30,38	30,12	29,49	29,48	29,19	28,89	28,75
	Experimento 7	31,66	32	31,92	31,69	31,34	30,98	30,56	30,41	30,19	29,84	29,56	29,42	29,05
	Experimento 8	31,74	32,14	32,02	31,67	31,39	30,95	30,69	30,33	29,98	29,55	29,44	29,04	28,94
	Experimento 9	31,23	31,53	31,43	31,23	30,87	30,63	30,3	29,95	29,64	29,27	29,14	28,83	28,69
	Experimento 10	31,1	31,31	31,28	30,96	30,71	30,44	30,08	29,71	29,3	29,05	28,78	28,56	28,3
	Média	31,35	31,62	31,53	31,27	30,96	30,64	30,29	30,00	29,67	29,37	29,14	28,87	28,64

Fonte - Autoria própria

Figura 90 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos de referência por Termografia passiva sem e com lubrificação



Fonte - Autoria própria

Após realizada a etapa de testes correspondente às condições de referência do pinhão, deu-se início aos experimentos deste em estado de falha. Diferente do que ocorreu para a primeira rodada de ensaios, que se realizou durante o mês de setembro de 2018, onde se tratava da estação do ano correspondente a primavera, caracterizada por temperaturas mais amenas, os experimentos com a engrenagem em estado de falha ocorreram em janeiro de 2019, no período congruente ao verão.

Devido estes ensaios ocorrerem em uma estação de temperaturas mais elevadas, e as paredes do laboratório estarem suscetíveis à exposição do sol da tarde, houveram dificuldades para estabilizar a temperatura do ambiente mediante o tempo estabelecido na metodologia. É notório para os resultados explicitados (nas tabelas e figuras a seguir), que as temperaturas nos instantes iniciais se encontravam mais elevadas em comparação aos experimentos para o estado de referência.

Mesmo com esta interferência climática, atestou-se que não se obteve um gradiente térmico considerável que venha por aprovar a presença das falhas no pinhão, comparando-se às condições de referência, conforme exemplificado pelas Tabelas 6, 7 e Figura 91. Então, os valores de temperatura, para as engrenagens sem e com a presença de falhas, tendem a se tornar equivalentes, sendo mais evidente após os 40 minutos de ensaio, ocorrendo de forma diferente ao que se evidenciou por Olinda (2018) e Cabral (2017), por exemplo, onde confirmou-se, a partir das curvas de temperatura, gradientes térmicos que distanciavam estados de referência das condições defeituosas. O estado de falha proporcionado não foi capaz de ser detectado via Termografia ativa mediante o escopo da metodologia adotada.

Análogo aos experimentos por Termografia passiva nas condições de referência, com a presença das falhas, também não foi observada nenhuma variação expressiva com relação ao comportamento dos valores de temperatura, conforme exemplificado nas Tabelas 9, 10 e Figura 92.

Nas Figuras 93 e 94 são ilustrados os valores médios de temperatura que atestam a proximidade entre os valores finais para os experimentos em estado de referência e falha para Termografia ativa e passiva, onde para a primeira tem-se os valores de 32,69°C e 32,72° sem lubrificação e 31,28°C e 31,31°C lubrificadas, e para a segunda 28,85°C e 28,77° sem lubrificação e 28,64°C e 28,37°C lubrificadas, o que não vem a ser suficiente para caracterizar a presença das anomalias inseridas.

Tabela 7 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens sem lubrificação em condições de falha

		Tempo (min)													Velocidade do vento (m/s) no ponto 5
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
Sem Lubrificação - Termografia Ativa - Estado de Falha (°C)	Experimento 1	27,19	28,11	29,05	29,83	30,52	31,07	31,4	31,73	31,99	32,16	32,42	32,69	32,77	0,73
	Experimento 2	26,07	27,05	28,28	29,12	29,89	30,61	31,04	31,51	31,91	32,18	32,61	32,84	32,89	0,71
	Experimento 3	26	27,15	28,15	29,13	29,66	30,43	30,85	31,37	31,67	32,05	32,36	32,6	32,78	0,72
	Experimento 4	24,41	25,74	27,24	28,25	29,04	29,72	30,42	30,87	31,34	31,68	31,98	32,24	32,52	0,7
	Experimento 5	25,32	26,75	28,01	28,92	29,77	30,44	30,94	31,42	31,8	32,2	32,4	32,65	32,98	0,67
	Experimento 6	25,94	27,5	28,59	29,4	29,7	30,77	31,23	31,73	31,81	32,24	32,52	32,73	32,99	0,66
	Experimento 7	25,21	26,49	27,81	28,86	29,63	30,29	30,69	31,11	31,46	31,86	32,1	32,36	32,6	0,66
	Experimento 8	25,47	26,92	28,11	29,14	29,8	30,28	30,86	31,22	31,64	31,95	32,22	32,36	32,67	0,64
	Experimento 9	24,64	26,28	27,54	28,48	29,3	29,91	30,44	30,94	31,36	31,61	32,09	32,18	32,52	0,71
	Experimento 10	25,46	27,03	27,95	28,98	29,66	30,26	30,8	31,24	31,54	31,86	32,03	32,32	32,51	0,64
	Média	25,57	26,90	28,07	29,01	29,70	30,38	30,87	31,31	31,65	31,98	32,27	32,50	32,72	0,68

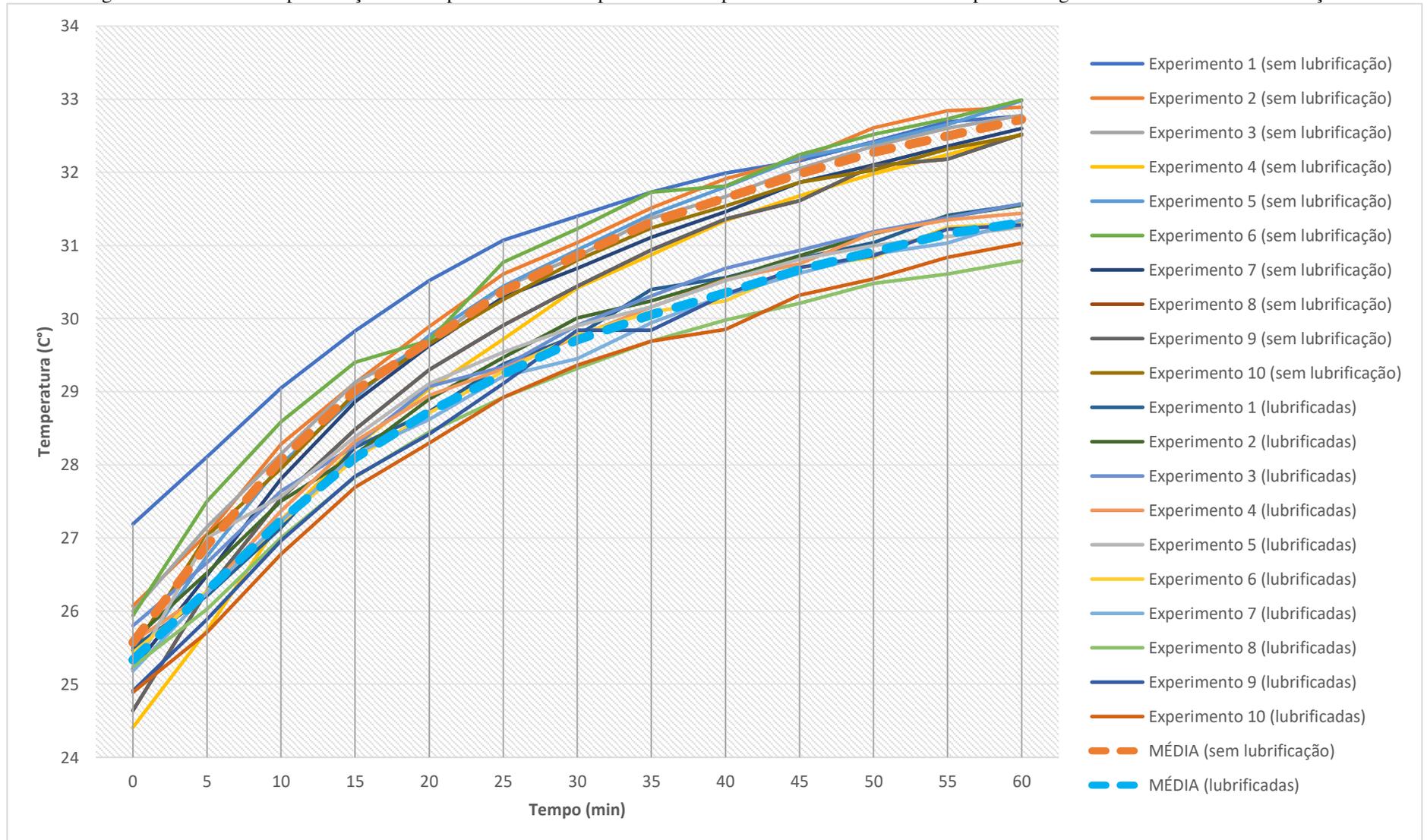
Fonte - Autoria própria

Tabela 8 - Dados dos experimentos para Termografia ativa nas engrenagens com lubrificação em condições de falha

		Tempo (min)													Velocidade do vento (m/s) no ponto 5
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
Com Lubrificação - Termografia Ativa – Estado de Falha (°C)	Experimento 1	25,5	26,21	27,14	28,24	28,73	29,38	29,77	30,4	30,56	30,82	31,04	31,41	31,56	0,63
	Experimento 2	25,6	26,52	27,5	28,14	28,9	29,47	30,01	30,24	30,54	30,86	31,16	31,39	31,55	0,65
	Experimento 3	25,8	26,66	27,64	28,26	29,07	29,34	29,91	30,31	30,69	30,93	31,19	31,38	31,57	0,67
	Experimento 4	25,58	26,26	27,37	28,32	28,95	29,31	29,75	30,16	30,53	30,75	31,17	31,35	31,44	0,65
	Experimento 5	25,19	27	27,57	28,38	29,11	29,54	29,9	30,16	30,52	30,81	31	31,12	31,25	0,65
	Experimento 6	25,43	26,27	27,21	28,09	28,71	29,28	29,78	30,09	30,24	30,7	30,84	31,25	31,3	0,62
	Experimento 7	25,18	26,25	27,23	28,15	28,62	29,21	29,45	29,94	30,32	30,62	30,88	31,03	31,35	0,64
	Experimento 8	25,24	26,03	27	27,83	28,45	28,92	29,32	29,69	29,98	30,21	30,48	30,61	30,79	0,66
	Experimento 9	24,91	25,89	26,96	27,84	28,42	29,11	29,84	29,84	30,33	30,7	30,86	31,22	31,28	0,67
	Experimento 10	24,89	25,71	26,78	27,69	28,3	28,92	29,36	29,69	29,85	30,32	30,54	30,84	31,03	0,72
	Média	25,33	26,28	27,24	28,09	28,73	29,25	29,71	30,05	30,36	30,67	30,92	31,16	31,31	0,66

Fonte - Autoria própria

Figura 91 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia ativa sem e com lubrificação



Fonte - Autoria própria

Tabela 9 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens sem lubrificação em condições de falha

		Tempo (min)												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Sem Lubrificação - Termografia Passiva - Estado de Falha (°C)	Experimento 1	32,8	33	32,58	32,2	31,69	31,15	30,8	30,38	30,04	29,75	29,34	28,99	28,77
	Experimento 2	32,93	33,01	32,77	32,38	31,99	31,49	31,13	30,65	30,31	29,97	29,61	29,2	28,98
	Experimento 3	32,86	32,88	32,64	32,25	31,86	31,36	30,99	30,54	30,18	29,81	29,53	29,22	28,94
	Experimento 4	32,58	32,64	32,4	31,84	31,32	30,86	30,54	30,03	29,67	29,35	28,95	28,8	28,49
	Experimento 5	32,99	33,17	32,87	32,4	32,01	31,46	30,99	30,68	30,29	29,81	29,67	29,29	28,93
	Experimento 6	33,09	33,23	32,83	32,44	31,98	31,47	30,99	30,62	30,31	29,9	29,65	29,36	28,98
	Experimento 7	32,61	32,9	32,39	31,9	31,51	31,14	30,73	30,35	29,88	29,45	29,18	28,99	28,76
	Experimento 8	32,63	32,82	32,59	32,17	31,56	31,2	30,71	30,41	30,01	29,46	29,16	28,91	28,72
	Experimento 9	32,57	32,74	32,24	31,86	31,39	31,06	30,63	30,24	29,71	29,56	29,24	29,03	28,7
	Experimento 10	32,55	32,63	32,29	31,86	31,54	31,04	30,6	30,09	29,64	29,5	29,08	28,87	28,44
	Média	32,76	32,90	32,56	32,13	31,69	31,22	30,81	30,40	30,00	29,66	29,34	29,07	28,77

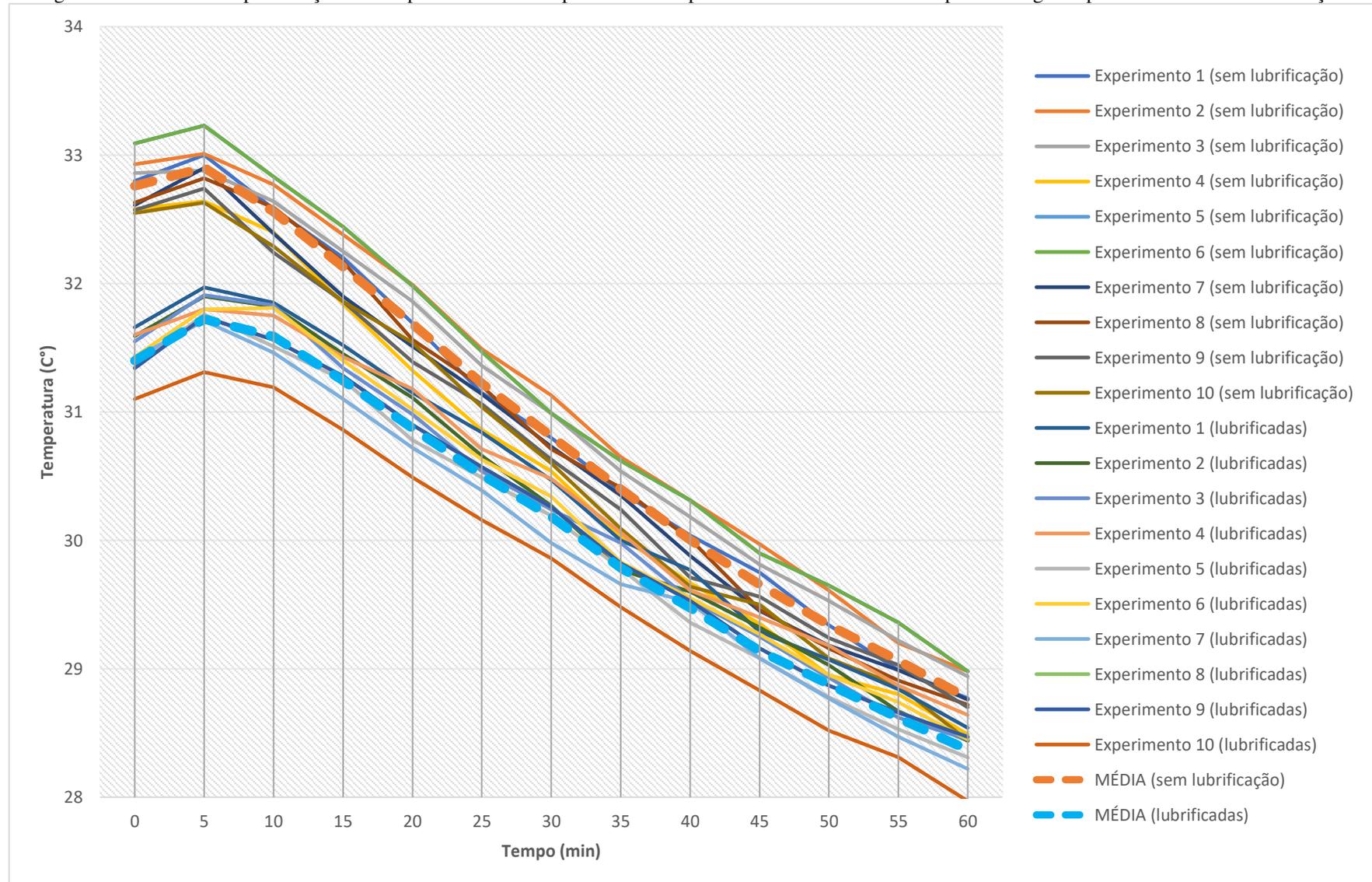
Fonte - Autoria própria

Tabela 10 - Dados dos experimentos para Termografia passiva nas engrenagens com lubrificação em condições de falha

		Tempo (min)												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Com Lubrificação - Termografia passiva - Estado de Falha (°C)	Experimento 1	31,66	31,97	31,85	31,52	31,15	30,84	30,47	30	29,77	29,29	29,07	28,84	28,54
	Experimento 2	31,59	31,9	31,82	31,45	31,11	30,66	30,27	29,77	29,6	29,32	29,03	28,67	28,44
	Experimento 3	31,55	31,91	31,83	31,34	30,98	30,54	30,24	29,98	29,54	29,25	28,93	28,62	28,45
	Experimento 4	31,6	31,8	31,75	31,43	31,18	30,71	30,48	30,06	29,61	29,4	29,18	28,87	28,64
	Experimento 5	31,35	31,76	31,51	31,25	30,78	30,49	30,19	29,78	29,36	29,08	28,78	28,53	28,31
	Experimento 6	31,43	31,8	31,81	31,4	31,02	30,63	30,34	29,83	29,55	29,27	28,95	28,74	28,45
	Experimento 7	31,42	31,71	31,46	31,1	30,72	30,39	29,98	29,66	29,52	29,08	28,77	28,47	28,22
	Experimento 8	30,95	31,33	31,09	30,8	30,39	30,09	29,77	29,46	29,12	28,71	28,68	28,44	28,2
	Experimento 9	31,34	31,74	31,56	31,28	30,9	30,57	30,26	29,82	29,53	29,16	28,87	28,66	28,47
	Experimento 10	31,1	31,31	31,19	30,86	30,49	30,16	29,86	29,48	29,14	28,83	28,52	28,31	27,97
	Média	31,40	31,72	31,59	31,24	30,87	30,51	30,19	29,78	29,47	29,14	28,88	28,62	28,37

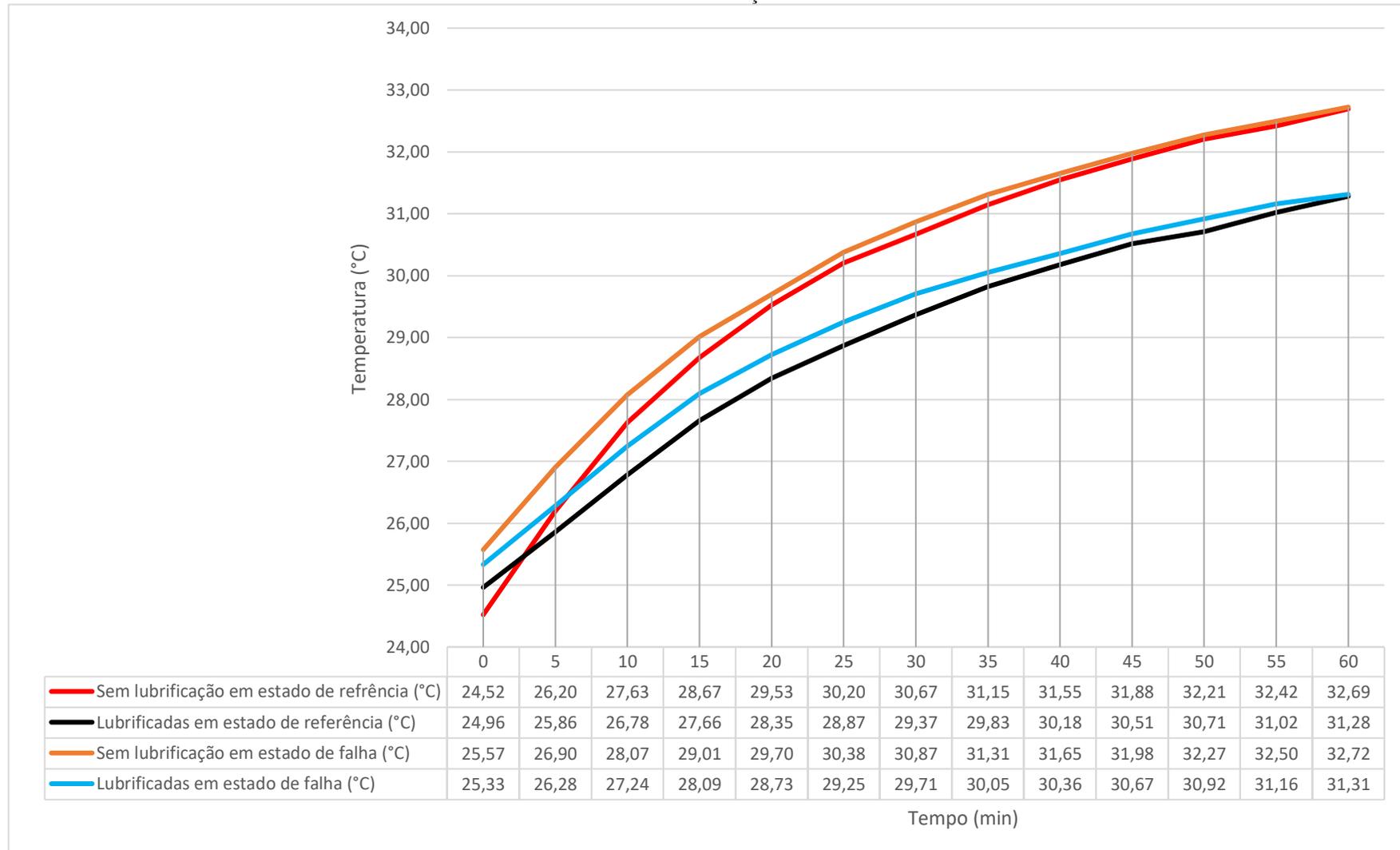
Fonte - Autoria própria

Figura 92 - Gráfico de representação do comportamento de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia passiva sem e com lubrificação



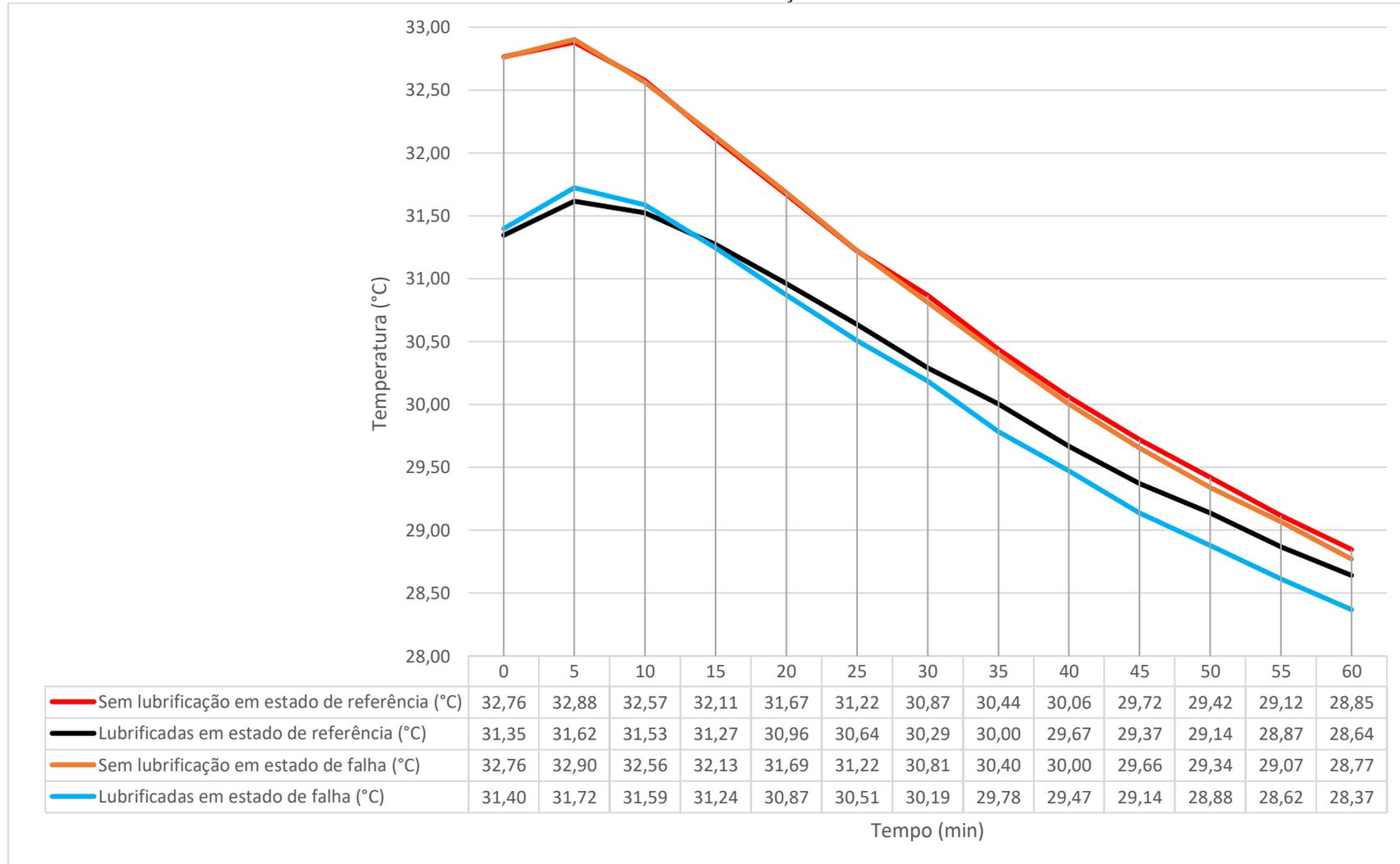
Fonte - Autoria própria

Figura 93 - Gráfico de representação do comportamento para os valores médios de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia ativa e passiva sem e com lubrificação



Fonte - Autoria própria

Figura 94 - Gráfico de representação do comportamento para os valores médios de temperatura dos experimentos em estado de falha por Termografia ativa e passiva sem e com lubrificação



Fonte - Autoria própria

CAPÍTULO VII

Neste capítulo apresentar-se-á as conclusões, mediante os resultados obtidos e discutidos no CAPÍTULO VI.

7.0 CONCLUSÕES

A manutenção preditiva em máquinas e equipamentos vem incorporando a Termografia – como técnica quantitativa – com o objetivo de estabelecer padrões de temperatura para boas e más condições de funcionamento em elementos de máquinas, mediante uma periodicidade pré-definida, visando praticidade e rapidez no que diz respeito a análise e diagnóstico de estado de falha.

Ao longo deste trabalho buscou-se verificar a viabilidade da Termografia quantitativa, para detecção de falhas decorrentes de fadiga por contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos, para ambiente controlado de laboratório. Para tanto, efetuou-se uma revisão da literatura envolvendo os seguintes temas: engrenagens, Tribologia, falhas, lubrificação, manutenção em máquinas e equipamentos, radiação térmica, Termografia e bancadas experimentais. Estabeleceu-se a metodologia do trabalho, apresentou-se e discutiu-se os resultados e, após isto é possível concluir que, a partir da Termografia quantitativa, pode-se verificar as condições de temperatura do pinhão por meio de um mapeamento térmico de sua face, com e sem a ausência de lubrificação por meio das técnicas ativa e passiva.

Para as condições atinentes ao estado de referência sem lubrificação, notou-se a geração de um campo térmico mais acentuado quando comparada às outras condições de funcionamento. Isso se deu, devido a ausência de lubrificação e pelo fato do perfil de rugosidade nos dentes ainda se mostrarem acentuados, tendo em vista que o par engrenado passou pelo estágio de amaciamento. Constatou-se um comportamento menos acentuado da temperatura para a condição onde houve o implemento do lubrificante. Sendo assim, a partir da Termografia infravermelha, se evidenciou uma variação térmica conseguinte à presença do fluido redutor de atrito, entre as duas condições de funcionamento remetentes ao estado de referência do par engrenado.

Ainda durante a realização dos experimentos supracitados, a partir das curvas de temperatura, também se evidenciou a ação refrigerante do vórtice de vento criado devido a ação do movimento dos dentes, via Termografia passiva.

Para as duas condições de funcionamento que caracterizam o estado de falha, quanto aos ensaios realizados sem a presença de lubrificante, o que diferiu aos realizados no estado de referência, foi a ausência de curvas acentuadas para os primeiros experimentos, pois as superfícies dos dentes já haviam sido usinadas, e desta forma, abatidos os picos de rugosidade. Também se constatou o decremento da temperatura com a presença do lubrificante, mas para nenhuma das condições de funcionamento, houve a geração de um campo térmico ou gradiente de temperatura que viesse a expressar a presença das anomalias na superfície dos dentes do pinhão, não sendo possível a detecção de falhas decorrentes de fadiga por contato através da Termografia quantitativa, mediante o estágio de severidade da anomalia que foi adotado.

Outro fator evidenciado, é que mesmo em ambiente controlado, variáveis externas podem vir a corroborar ao erro nos ensaios Termográficos, como a interferência climática, remetente a alta carga solar no mês em que foram realizados os ensaios para o pinhão em estado de falha.

E como o trabalho não se encerra neste, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- refazer testes avaliando as condições de alinhamento dos eixos;
- refazer testes avaliando a região da superfície do dente ao invés da face do pinhão;
- refazer testes para outros tipos de engrenagem e lubrificação;
- realizar testes em ambiente não controlado;
- realizar testes para diferentes estágios de lubrificação do par engrenado; e
- refazer testes em simultaneidade com análise de vibrações visando verificar uma correlação de resultados.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. **Micropitting : O que é e como se pode prevenir ?** Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/micropitting-o-que-é-e-como-se-pode-prevenir-marcos-abreu>>. Acesso em: 5 mar. 2018.
- AIRES JÚNIOR, F. A. F. **OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO METODOLÓGICO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS TERMOGRÁFICAS DA FACE.** Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.
- ALMEIDA, E. GUILHERME R. DE. **INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA DE DANOS POR IMPACTO EM LAMINADOS COMPÓSITOS SÓLIDOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRAS DE CARBONO.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade de São Carlos. São Carlos, 2010.
- ALVES DA SILVA, R. B. **Avaliação da inércia de rotação em rotores de turbinas eólicas,** Brasília, 2014.
- AMARO, R. P. I. **COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS AUTO-LUBRIFICANTES PARA ENGRENAGENS.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto. Porto, 2001.
- American Gear Manufacturers Association.** Disponível em: <<https://www.agma.org/>>. Acesso em: 7 mar. 2018.
- ARAÚJO, H. B. **Termografia infravermelha,** Rio Verde, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15424:** 2006 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Terminologia. Rio de Janeiro, 2006. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15572:** 2013 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15718:** 2009 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Guia para verificação de termovisores. Rio de Janeiro, 2009. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16292:** 2014 – Ensaio 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 – Ensaio não destrutivo – Termografia – Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.

BENZEROUK, S.; LUDWIG, R.; APELIAN, D. Active thermography for the detection of defects in powder metallurgy compacts. **AIP Conference Proceedings**, v. 894, p. 1312–1319, 2007.

BŁAZEJ, R. *et al.* Automatic analysis of thermograms as a means for estimating technical of a gear system. **Diagnostyka**, v. 17, n. 2, p. 43–48, 2016.

BOMFIM, P. R. S. **ESTUDO EXPERIMENTAL DA POTENCIALIDADE DO USO DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO D DESALINHAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS NA INDÚSTRIA**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pernambuco. Recife, 2013.

BRASIL, NORMA REGULAMENTADORA Nº 15, de 08 de junho de 1978. Atividades e operações insalubre, anexo N.º 1. Disponível em: <http://carep.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_15_anexo1.pdf>. Acesso em 03 jun. 2018.

BUDYNAS, R. G.; J. KEITH, N. **Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

CABRAL, A. DE S. **ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO À DETECÇÃO DE FALHAS POR DESGASTE MECÂNICO EM ROLAMENTO AUTOCOMPENSADOR DE ESFERAS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Univesidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

CARAMALHO, A. **25 anos em Termografia**. 1. ed. Portugal: [s.n.].

CIBELE DA SILVA, F. **ESTUDO TERMOGRÁFICO DE AUXÍLIO AO DIAGNOSTICO DE FALHAS MECÂNICAS EM PISTAS DE ROLAMENTO: o caso dos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas sem blindagem**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

CHRZANOWSKI, K. Non-Contact Thermometry: Measurement Errors. **SPIE Polish Chapter**, v. 7, p. 139, 2001.

CYRINO, L. **Termografia conceitos e aplicações**. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/termografia-conceitos-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 7 ago. 2018.

FEI, R.; MOBLEY, R. K.; WIKOFF, D. J. **Maintenance Engineering Handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. v. 7

FERREIRA DA SILVA, J. **ESTUDO DO MAPEAMENTO TÉRMICO DAS MÃOS PARA O AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO DA LER**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 207.

FLIR. **Flir E-Series Data Sheet**. Disponível em:

<http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_USA/Products/Product_Literature/flir-e-series-datasheet.pdf> , Acesso em: 09 jan 2018.

FLORES, P. Cinemática e Dinâmica de Engrenagens Engrenagens. 2014.

FLORES, P.; GOMES, J.; DOURADO, N. MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA. Órgãos de Máquinas II. 2017.

GAUSSORGUES, G. **Infrared Thermography**. [s.l: s.n.]. v. 43

HERNANDEZ, G. M. **Lubrificantes Industriais**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, [s.d.].

HOEHN, B. *et al.* Test methods for gear lubricants. p. 141–152, 2008.

HOWELL, J. R.; MENGUC, M. P.; SIEGEL, R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. [s.l: s.n.].

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

INOVAÇÃO INDUSTRIAL, E. **15 mitos e verdades sobre lubrificantes utilizados pela indústria**. Disponível em: <<https://inovacaoindustrial.com.br/mitos-e-verdades-sobre-lubrificantes/>>. Acesso em: 14 out. 2018.

JULINHO, A. B. **MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE E ANÁLISE**

DE VIBRAÇÃO. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

JÚNIOR, A. A. DOS S. **Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos**. Campinas: [s.n.].

KIM, W.; SEO, J.; HONG, D. Infrared Thermographic Inspection of Ball Bearing; Condition Monitoring for Defects under Dynamic Loading Stages. **Word conference on nondestructive testing**, p. 4–7, 2012.

KIM, W. T. *et al.* Infrared Thermographic NDT for the Fault Diagnosis of Bearing with Foreign Substances inside under Loading Condition. n. Ecdnt, p. 2–5, 2014.

KODA, F. **ESTUDO DA FADIGA DE CONTATO EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e dos Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, 2009.

KODA, F.; SILVA, C. H. Ensaio tribológico em engrenagens de ferro fundido nodular austemperado e aço baixa liga 8620 cementado utilizando equipamento Fzg-Lasc. p. 1–12, 2008.

KUZIN, E. G. *et al.* Diagnostics of Technical Condition of Gear Units of Belt Conveyors for the Aggregate of Methods of Nondestructive Testing. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 253, p. 012013, 2017.

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

MARIBONDO, J. F. **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMAS MODULARES, APLICADA A UNIDADES DE PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

MODEST, M. F. **Radiative Heat Transfer**. 3. ed. Nova Iorque: [s.n.].

MOUSA, W. **Thermography-Assisted Bearing Condition Monitoring**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica e Aeroespacial, University of Ottawa. Canadá, 2014.

MOUSINHO, M. A. F. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DE UMA ENGRENAGEM HELICOIDAL**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2017.

- NAGATA, M. *et al.* Quality Control Method Based on Gear Tooth Contact Evaluation Using Near-Infrared Ray Imagery. **Key Engineering Materials**, v. 447–448, p. 569–573, 2010.
- NIWA, K. *et al.* Novel Monitoring Method of Gear Meshing Using a High Response Infrared Thermography. v. 20, n. mm, p. 1–8, 2014.
- NORTON, R. L. **Projetos de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. NR-17 - Ergonomia. 2009.
- 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.
- OLINDA, P. V. DA S. **ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA NA DETECÇÃO DE FALHA POR DESALINHAMENTO PARALELO VERTICAL EM ACOPLAMENTO FLEXÍVEL**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.
- PENAMBRA. **Bancadas didáticas**. Disponível em: <<http://www.penambra.com.br>>. Acesso em 6 de jul. 2017.
- PERCON. **Termografia infravermelha conceitos e ferramentas**. Disponível em: <<http://acessopercon.com.br/percon/termografia-infravermelha/>>. Acesso em: 7 ago. 2018.
- 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.
- Rockwell Automation, 1998. “**Condition Monitoring Withing Enterprise Information Systems, Managing Preventive Maintenance**”. Disponível em: <<http://www.entek.com.br>>. Acesso em janeiro de 2019.
- RODRIGUES, C. A. C. **LUBRIFICAÇÃO DE MOTORES DIESEL**. Dissertação de Mestrado em Manutenção industrial, Universidade do Porto. Porto, 2009.
- RODRIGUES, L. E. M. **Curso de Especialização em Manutenção Produtiva Total**. Santos, 2008.
- SANTOS, L. Termografia Infravermelha em Subestações de alta Tensão Desabrigadas. p. 129, 2006.

SEABRA, J.; BERTHE, D. Influence of Surface Waviness and Roughness on the Normal Pressure Distribution in the Hertzian Contact. *Tribology Journal*, vol. 109, 1987.

SEIDEL, W. **Falhas em Engrenagens**. Santa Catarina: [s.n.].

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. J. DA. **ANÁLISE DE ÓLEOS LUBRIFICANTES SOB A ÓTICA DA TERMOGRAFIA EM ENSAIOS DE ATRITO CISALHANTE**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

SILVA, T. P. **ESTUDO DOS EFEITOS DE ACUMULAÇÃO DE DANO POR DESGASTE**. Dissertação de Mestrado em Engenharia mecânica, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2016.

SINGH, R. C. *et al.* Analysis of Ball Bearings under Dynamic Loading Using Non-Destructive Technique of Thermography. v. 2, n. 4, p. 781–783, 2014.

SOARES, J. P. DE J. **ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DA TAMPA DE REFORÇO DE UM CÁRTER**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2016.

SOUSA SILVA, E. F. M. **INVESTIGAÇÃO DE TÉCNICAS PARA O ACOMPANHAMENTO DO DESGASTE DE UM PAR ENGENHADO UTILIZANDO TRIBOLOGIA E ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA PROCESSADA VIA FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE BETA**. Dissertação de Mestrado em Engenharia mecânica, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira - SP, 2015.

SOUZA, M. A. **Comportamento tribológico de materiais de carbono**. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2015.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 24. ed. New York: Tribology Series, 1993.

TELECURSO 2000, P. 2000. **Lubrificação industrial I**, São Paulo, 1997. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=FwBuQ8GXvOM>>. Acesso em março de 2018.

TIAN, G. Y. *et al.* Eddy current pulsed thermography for fatigue evaluation of gear. **AIP Conference Proceedings**, v. 1581 33, n. September, p. 1652–1662, 2014.

TOURET, T. *et al.* On the use of temperature for online condition monitoring of geared systems – A review. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 101, p. 197–210, 2018.

UE systems inc, 2018. **Inspeção e Lubrificação de Rolamentos**, Nova Iorque, [s.n.]. Disponível em: <<http://www.uesystems.eu/pt-pt/aplicacoes/inspecao-e-lubrificacao-de-rolamentos/>>. Acesso em fevereiro de 2019.

VIOLANTE, D. **Processo de construção de dentes de um par de engrenagens**. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1352426/>>. Acesso em: 5 mar. 2018.

WAQAR, T.; DEMETGUL, M. Thermal analysis MLP neural network based fault diagnosis on worm gears. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 86, p. 56–66, 2016.

WIKIPÉDIA, A ENCICLOPÉDIA LIVRE. **Espectro eletromagnético**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagnético>. Acesso em: 16 out. 2018.

GLOSSÁRIO – TERMINOLOGIA PARA ENGRENAGENS RETAS

Quanto a terminologia de dentes de engrenagens retas, tem-se os principais parâmetros:

Circunferência primitiva (d_p): se trata de um círculo teórico sobre o qual todos os cálculos geralmente se baseiam. Os círculos primitivos de um par de engrenagens engatadas¹⁰ são tangentes entre si, onde o *pinhão* é o elemento de menor tamanho e o maior chamado de *coroa*

Coefficiente de engrenagem (i): Relação entre o número de dentes da coroa e do pinhão.

Passo circular (p): O *passo circular* é a distância medida da circunferência primitiva, do ponto de um dente ao correspondente ponto do dente adjacente. Assim, o passo circular é igual à soma da *espessura do dente* com a *largura de espaçamento*.

Módulo (m): O *módulo* é a razão entre o *passo diametral* e o *número de dentes*. A unidade costumeira de comprimento utilizada é o milímetro. O módulo é o índice de tamanho de dente no SI.

Passo diametral (P): O *passo diametral* é a razão entre o *número de dentes* da engrenagem e o *diâmetro primitivo*, se trata do recíproco do *módulo*.

Altura da cabeça do dente ou adendo (a_p): O *adendo* é a distância radial entre o topo do dente e o círculo primitivo.

Altura do pé ou dedendo (b): O *dedendo* é a distância radial do *fundo do dente* ao círculo primitivo.

Altura total do dente (h_r): A *altura completa* ou *total* é a soma do *adendo* com o *dedendo*.

Número de dentes (N): Quantidade de *dentes* inseridos no cilindro sob o qual é concebida a engrenagem.

Círculo de folga: O *círculo de folga* se trata de um círculo que é tangente ao círculo de adendo da engrenagem par.

Folga: A *folga* é a quantidade pela qual o *dedendo* em dada engrenagem excede o *adendo* da sua engrenagem par.

¹⁰ Engatar neste sentido consiste na ligação ou junção entre duas engrenagens por meio do encaixe entre os dentes em situações de movimento.

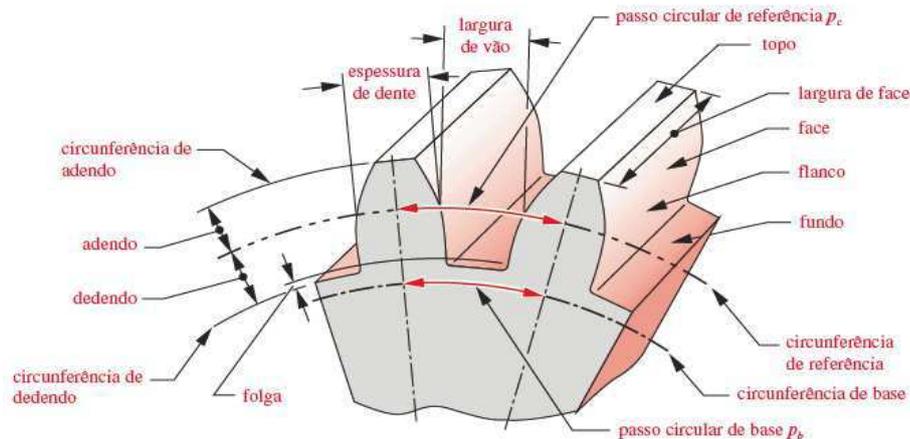
Recuo: O recuo é a quantia pela qual a largura do espaço entre dentes excede a espessura do dente a este engatado, medida sobre os círculos primitivos.

Ângulo de pressão (α): O *ângulo de pressão* de um par de engrenagens é definido como o ângulo entre a linha de ação (normal comum) e a direção da velocidade no ponto de referência (primitivo) tal que a linha de ação seja rodada de um ângulo ϕ em graus na direção, de rotação da engrenagem movida geralmente tem valores entre 20° e 25° .

Ângulo de hélice (β): Ângulo de inclinação dos dentes.

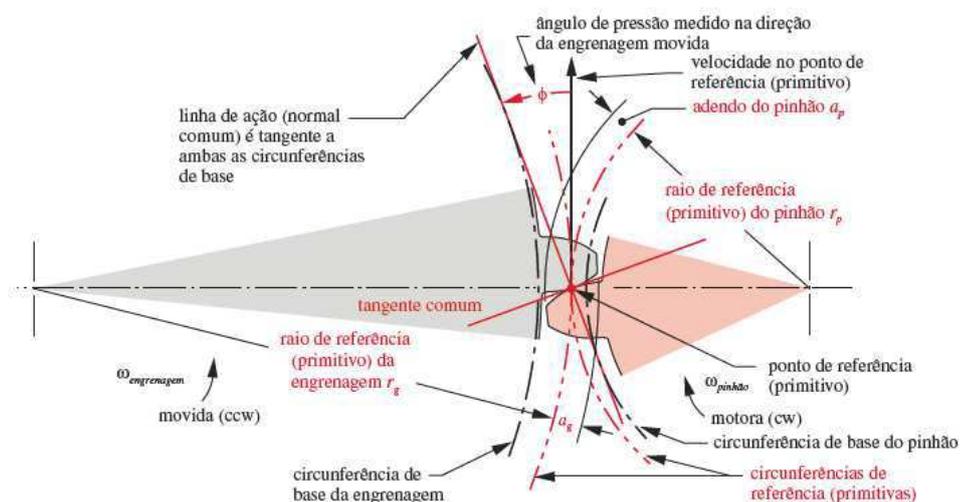
Os parâmetros mencionados podem ser observados nas Figuras G1 e G2.

Figura G 1 - Principais parâmetros para engrenagens cilíndricas de dentes retos



Fonte - Norton (2013)

Figura G 2 - Ângulo de pressão e outros parâmetros referentes a terminologia para engrenagens retas



Fonte - Norton (2013); Budynas e Keith (2011)

APÊNDICE I – DESENHO DOS EQUIPAMENTOS DE TESTES

Neste apêndice apresenta-se resumidamente o emprego da metodologia de projeto para o desenvolvimento do desenho dos equipamentos de testes, em cumprimento da ETAPA 3.1 da ATIVIDADE 3 da metodologia empregada na presente pesquisa.

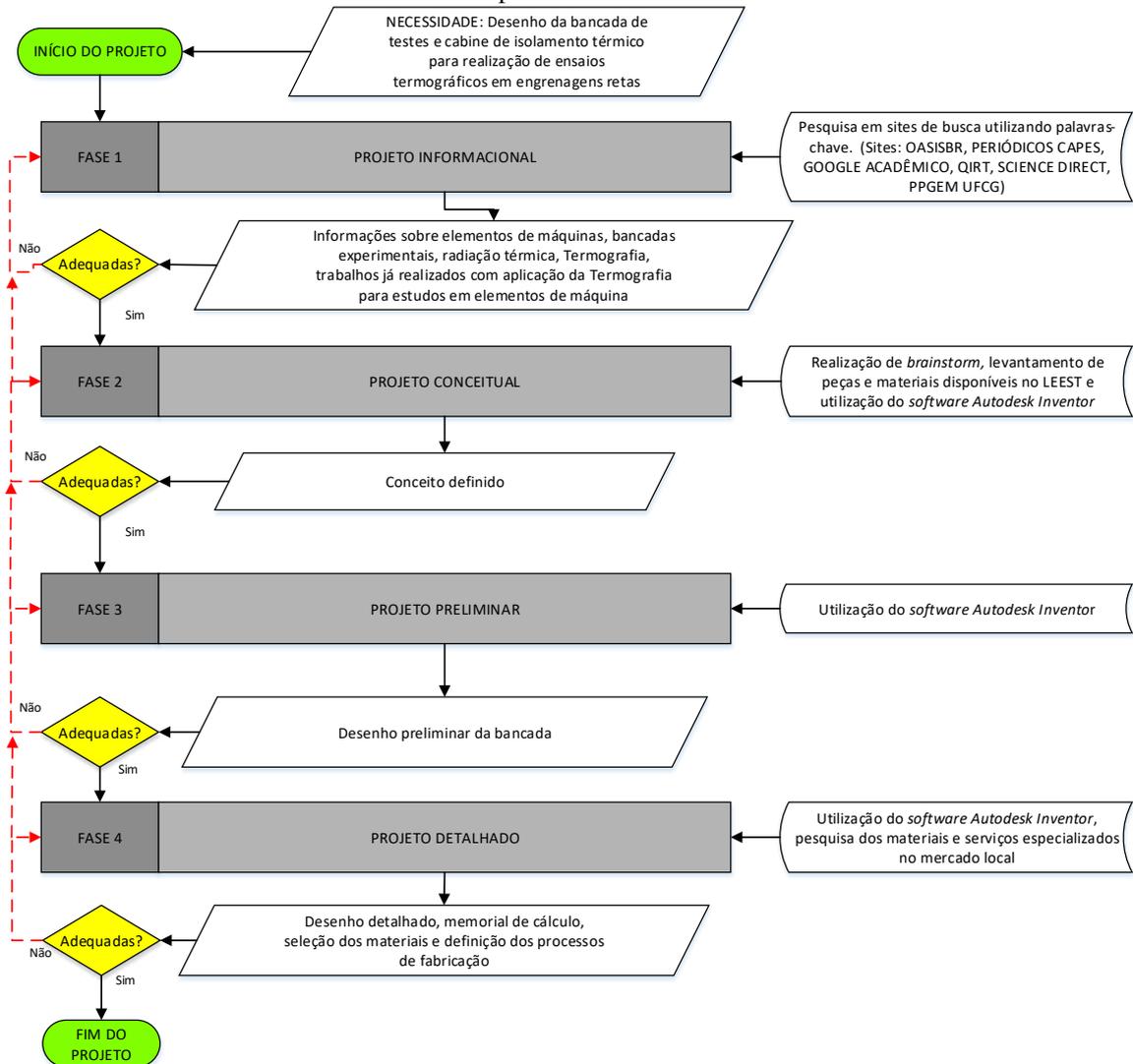
Dado início ao trabalho e esclarecida a necessidade do desenho dos equipamentos para realização dos ensaios termográficos em engrenagens, a metodologia de projeto empregada, basicamente, dividiu-se em 4 (quatro) FASES, expostas no fluxograma da Figura A1.

Na FASE 1 realizou-se o projeto informacional, onde informações pertinentes aos equipamentos foram levantadas, como os tipos já existentes, características e aplicações em âmbito acadêmico. Efetivou-se um levantamento de informações dos efeitos radiativos que podem surgir no funcionamento de bancadas experimentais, decorrentes dos elementos dinâmicos, e também de variáveis externas. Buscou-se entender como a Termografia pode ser aplicada a esse tipo de estudo. Para isso, consultou-se alguns trabalhos já realizados no PPGEM da UFCG, os quais fizeram do uso de bancadas experimentais para realização de ensaios termográficos, assim como tantos outros trabalhos encontrados em sites de busca como: OASISBR, Periódicos Capes, Google Acadêmico, QIRT e *science direct*.

Na FASE 2 realizou-se um *brainstorm*¹¹ levando em consideração as ideias de concepção de uma bancada experimental para o funcionamento de engrenagens atrelado as necessidades de posicionamento das mesmas, tendo em vista, a indigência de uma exposição clara de suas faces para que os ensaios termográficos pudessem ser realizados com maior confiabilidade. Outros cuidados também se concluíram como pertinentes, como o distanciamento entre o objeto em análise e o motor, pois o calor gerado pode interferir na precisão dos resultados. A implementação do isolamento térmico, vem com a necessidade de atuar de modo que as radiações térmicas advindas do meio externo (corpo do termografista, lâmpadas, carga solar, entre outros) também não venham a interferir de forma negativa aos ensaios.

¹¹ Para o português, traduz-se chuva de ideias, as quais várias informações e ideias são sugeridas, com o objetivo de selecionar as mais adequadas ao desenvolvimento do projeto.

Figura A 1 - Fluxograma metodológico para aplicação de metodologia de projeto para o desenho da bancada experimental



Fonte - Autoria própria

Para a definição de um conceito e o posterior projeto preliminar da bancada, também levou-se em consideração as peças, materiais e equipamentos disponíveis no LEEST, onde já existia uma bancada de testes, no que diz respeito ao funcionamento de rolamentos autocompensadores de esferas, oriunda da pesquisa do Cabral (2017), como mostrado na Figura A2, onde os rolamentos, que foram os protagonistas da pesquisa, estão destacados. Existiu-se a possibilidade deste equipamento ser adaptado para o funcionamento de um par de engrenagens retas do tipo coroa-pinhão, onde desinstalou-se alguns elementos, como: rolamentos, eixos, mancais, cargas, polias e correias. Inseriu-se outros tipos de mancais, eixos, suportes, rolamentos e um par de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Os demais componentes como a base estrutural, *vibra-stops*, inversor de frequência, motor, os elementos que compõem a regulação da altura do motor, utilizaram-se para a concepção do sistema com engrenamento.

Figura A 2 - Bancada de testes para rolamentos autocompensadores de esferas



Fonte - Adaptado de Cabral (2017)

Como parâmetros principais, levou-se em consideração a preocupação com uma boa rigidez e um bom funcionamento dos componentes da bancada. Para isso, houve um cuidado com o dimensionamento dos eixos e engrenagens, seleção adequada dos mancais, rolamentos, parafusos e porcas, a correta fixação destes elementos, escolha dos lubrificantes e tintas para pintura adequada. Tudo isso, com a intenção de garantir um bom funcionamento do sistema e não haver uma geração de calor indesejada que pudesse vir a interferir nos ensaios.

Posicionou-se o par de engrenagens com relação as suas faces frontais, para que seja realizado um mapeamento e enquadramento adequado do pinhão, e posteriormente gerados os termogramas da forma mais contundente.

Construiu-se a bancada de forma que possa ser realizado um isolamento térmico da mesma, por uma estrutura que tem por intuito não permitir a dispersão da radiação gerada pelo funcionamento das engrenagens, nem a entrada da radiação térmica proveniente do ambiente. Como mostrado na Figura A3, que se trata do enclausuramento realizado na bancada de testes utilizada por Olinda (2018). De modo que a distância adotada entre o objeto analisado e o termovisor permita um bom foco e enquadramento.

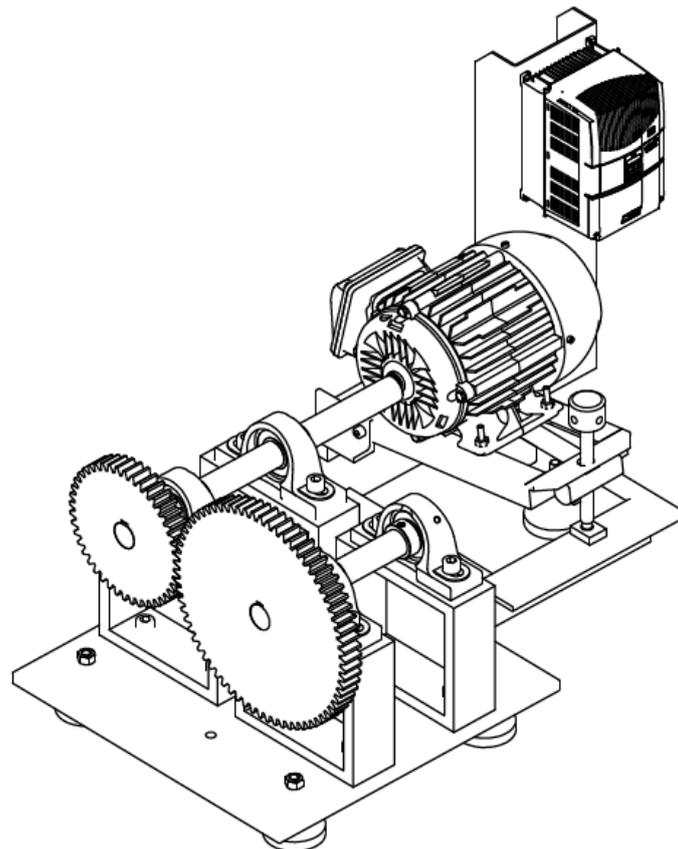
Figura A 3 - Bancada de testes com (b) e sem (a) a cabine para isolamento térmico



Fonte - Olinda (2018)

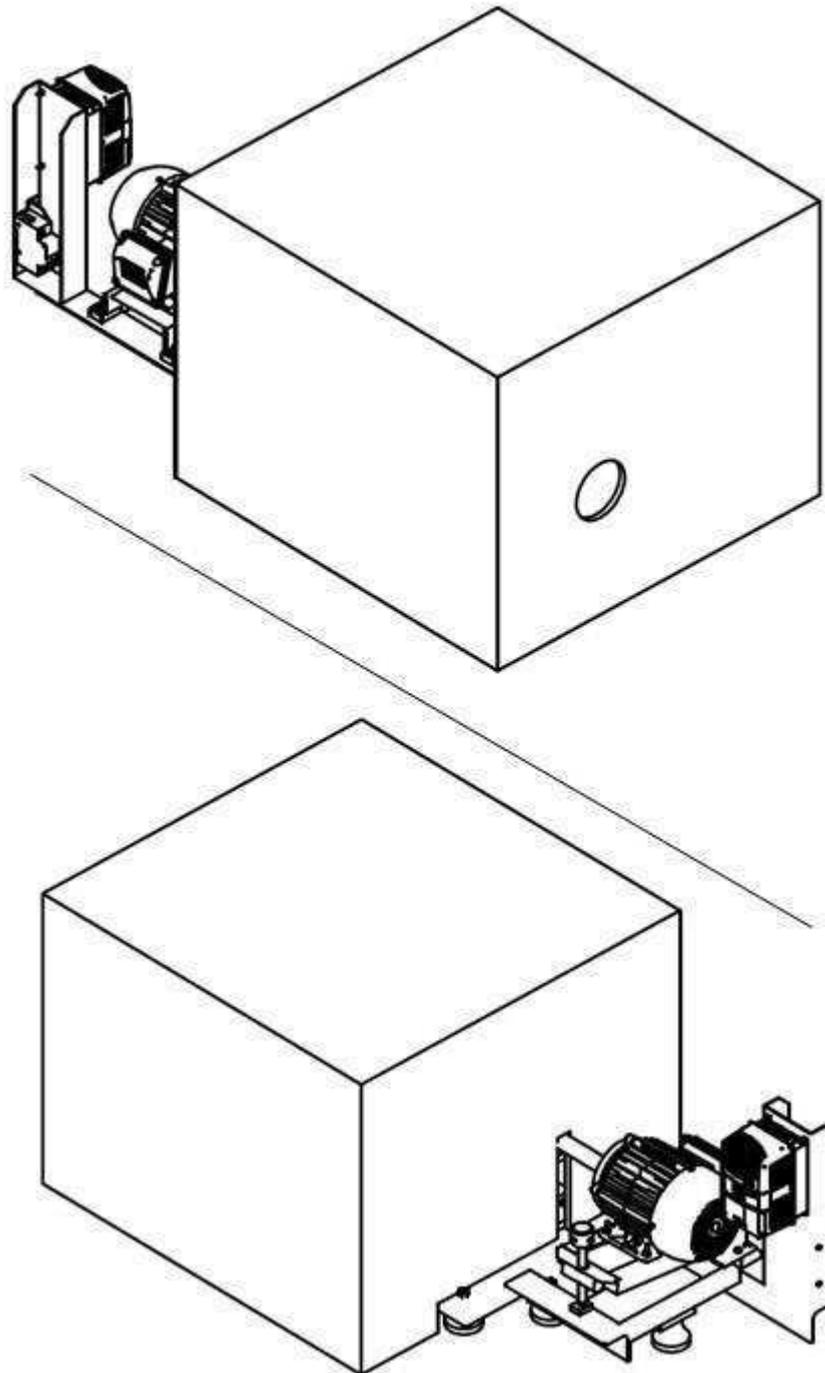
Na FASE 3, com o conceito definido, realizou-se uma proposta de projeto através de um desenho da bancada. Adaptou-se o que já havia disponível no laboratório e implementou-se o uso de alguns materiais, como parafusos, mancais e rolamentos. Concebeu-se o conceito exposto na Figura A4, sem a cabine de isolamento, na Figura A5 são expostas duas perspectivas (frontal e traseira) do equipamento com a estrutura de isolamento sugerida.

Figura A 4 - Desenho do projeto preliminar da bancada experimental sem a cabine de isolamento térmico



Fonte - Autoria própria

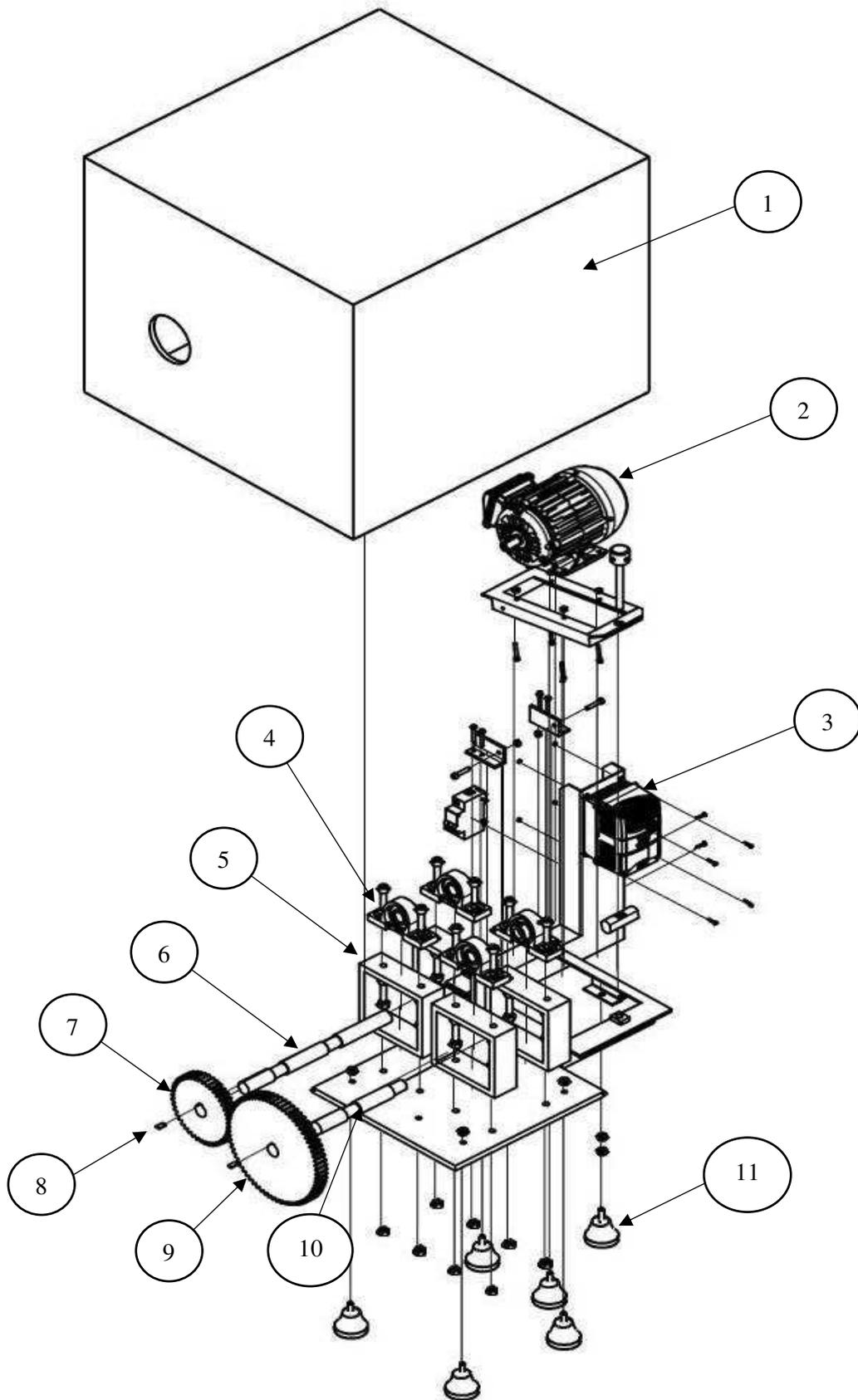
Figura A 5 - Desenho da bancada experimental com a cabine de isolamento térmico



Fonte - Autoria própria

Ainda para o projeto preliminar, a Figura A6 expõe o desenho do projeto em vista explodida, com a indicação dos componentes fundamentais a funcionalidade desejada da bancada.

Figura A 6 - Desenho da vista explodida do projeto preliminar da bancada experimental



Continuação da Figura A6

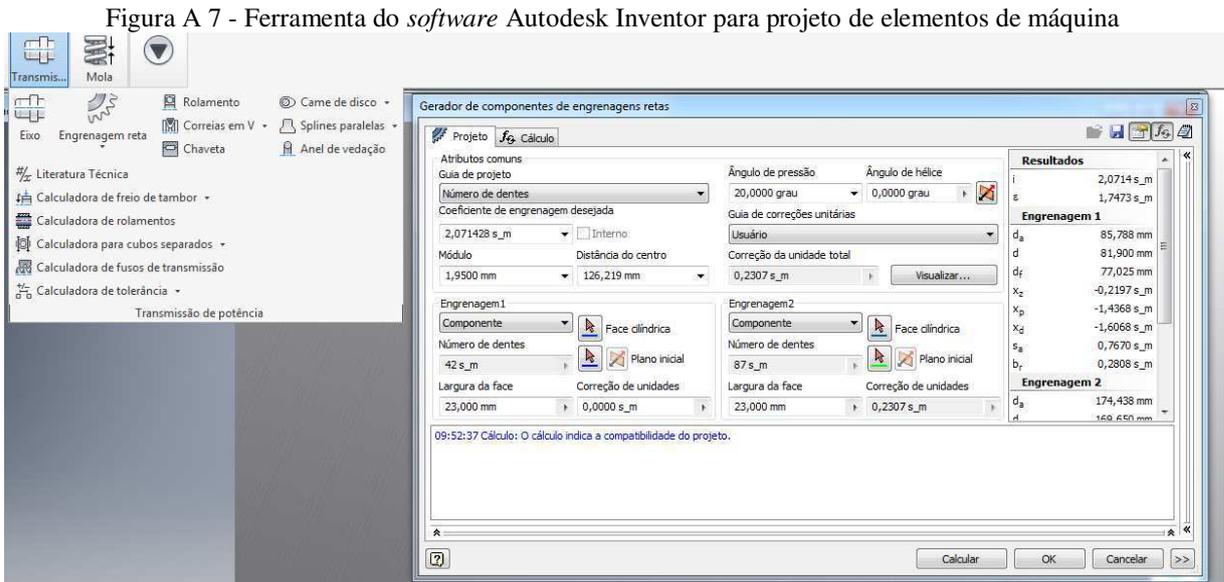
Item	Nome
1	Cabine de isolamento térmico
2	Motor
3	Inversor de Frequência
4	Mancal e rolamento
5	Suporte para mancal
6	Eixo do pinhão
7	Pinhão
8	Chaveta
9	Coroa
10	Eixo da coroa
11	<i>Vibra-stop</i>

Fonte - Autoria própria

No que diz respeito à disponibilidade, as chapas de fixação dos suportes dos mancais, *vibra-stops*, inversor de frequência e o motor já encontravam-se disponíveis, assim como boa parte dos parafusos, porcas, mancais e rolamentos aproveitados das bancadas experimentais utilizadas por Cabral (2017) e Olinda (2018).

Tendo o projeto preliminar, inicia-se a FASE 4, referente ao projeto detalhado. Dimensionou-se em escala real a bancada experimental, onde realizaram-se os cálculos levando em consideração os parâmetros essenciais para o dimensionamento de engrenagens (supramencionados no Glossário).

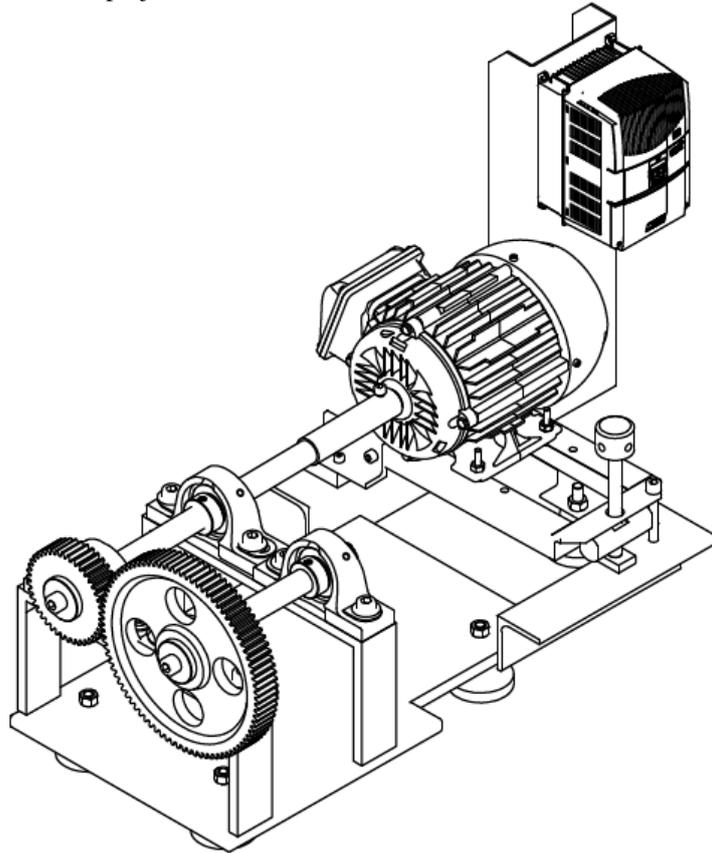
Para o dimensionamento das engrenagens e dos eixos utilizou-se a ferramenta “projetos” do *software* Autodesk Inventor, como mostrado na Figura A7, assim como a calculadora para geração de engrenagens retas.



Fonte - Autoria Própria

Após realizado o dimensionamento, apresentou-se o projeto preliminar aos técnicos da oficina mecânica do SENAI CITI, e algumas sugestões foram acatadas quanto ao projeto da bancada, como a substituição dos suportes móveis dos mancais por suportes fixos por solda, pelo fato de eliminar possíveis folgas e facilitar o trabalho de montagem. Outra modificação foi acrescentar furos e rebaixos na coroa, com o intuito de redução de massa e consequente redução das forças axiais, o que contribui para um melhor funcionamento do sistema. A fixação das engrenagens aos eixos, ao invés de engate por chaveta, fixar com parafusos, mediante a praticidade de fabricação e montagem. Com a modificação dos suportes dos mancais, também não necessitou do alongamento da chapa onde os mesmos foram fixados, não havendo a necessidade da implementação de 5 (cinco) *vibra-stops*, os 4 (quatro) já disponíveis no laboratório foram suficientes. O motor que no projeto preliminar ficava em uma posição inclinada, optou-se por uma configuração o qual se encontra reto, pelo fato de um melhor posicionamento com relação ao eixo e os mancais. A Figura A8 representa o desenho referente a projeto final da bancada experimental sem a cabine de isolamento.

Figura A 8 - Desenho do projeto final detalhado com os elementos montados da bancada experimental



Fonte - Autoria própria

Empregou-se aço 1020 para confecção dos eixos e para as engrenagens o aço 1045, que são materiais comumente utilizados na fabricação destes tipos de elementos. Os principais parâmetros das engrenagens estão expostos na Tabela A1.

Tabela A 1 - Parâmetros característicos das engrenagens para a bancada

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Pinhão	Coroa
Número de dentes	z	-	42	87
Distância entre os centros (a)	a	mm	126,22	
Módulo	m	mm	1,95	
Ângulo de pressão	α	°	20	
Ângulo de hélice	β	°	0	
Largura da face	L	mm	23	
Coefficiente de engrenagem	i	-	2,071428	

Diâmetro	d_a	mm	85,788	174,438
----------	-------	----	--------	---------

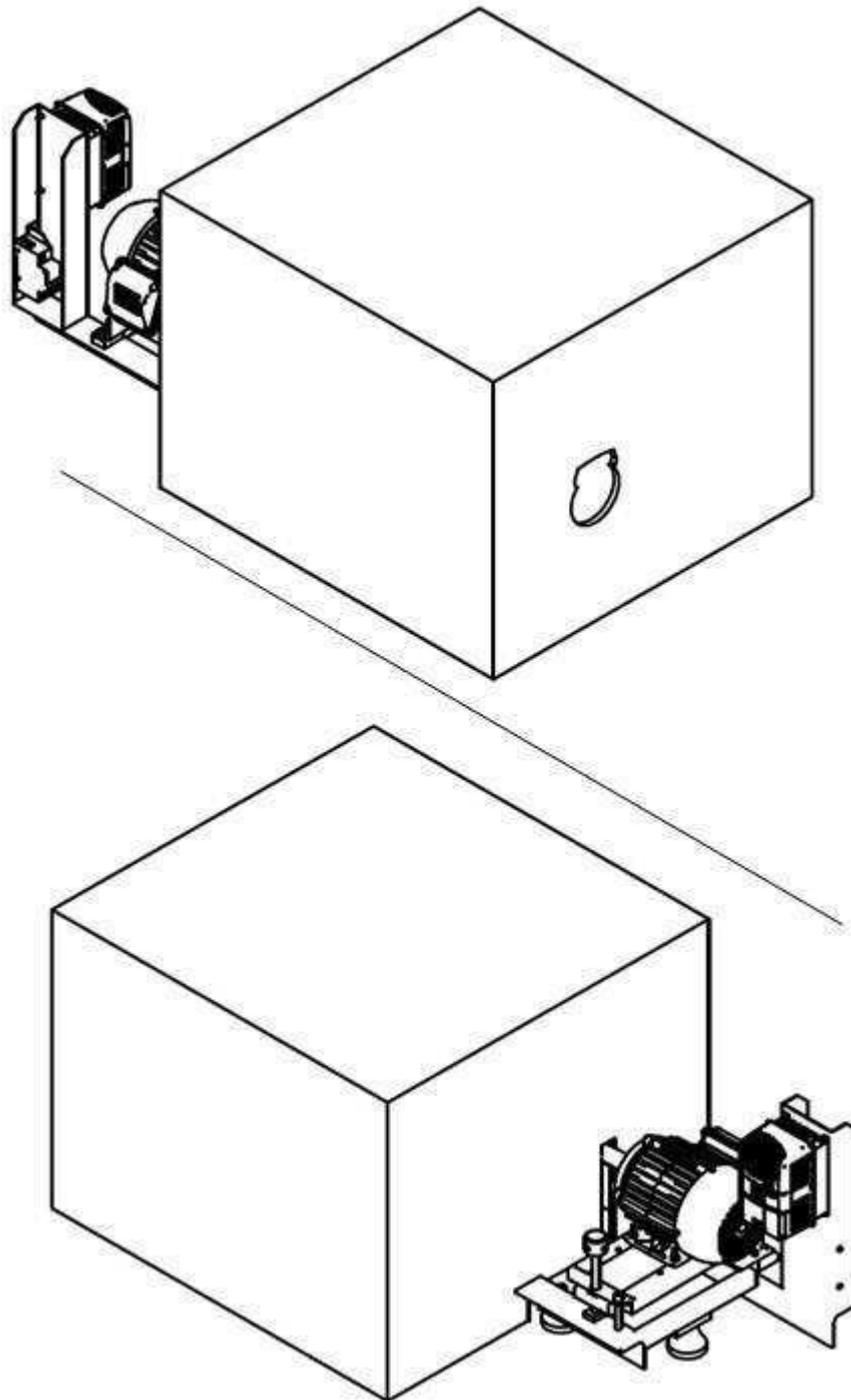
Fonte - Autoria Própria

As faces das engrenagens, mediante projeto, encontram-se na cor preto fosco da marca, pintadas por tinta iquine de emissividade de 0,98, facilitando a implementação deste parâmetro no termovisor. Utilizou-se mancais modelo P204 para rolamentos com diâmetro de 20 mm e parafusos de fixação, assim como as porcas, do tipo M10.

Estando pronto o projeto da bancada, realizou-se o projeto da cabine de isolamento térmico, a qual tem por objetivo a redução da interferência da radiação térmica proveniente do meio. Para que isso seja evitado, dimensionou-se e construiu-se a cabine com estrutura de isopor, onde revestiu-se suas faces externas com papel alumínio amassado, com a intenção de refletir, da forma mais difusa possível, a radiação térmica proveniente do meio. Nas faces internas um revestimento com EVA de cor preta, com emissividade conhecida de 0,98, visando a absorção e evitando a reflexão da radiação emitida pelo par de engrenagens e demais componentes da bancada. Obedeceu-se uma distância de aproximadamente 40 cm em projeto entre a abertura para introdução da câmera e o objeto a ser analisado (pinhão), em virtude do foco, como pode ser exemplificado na Figura A9.

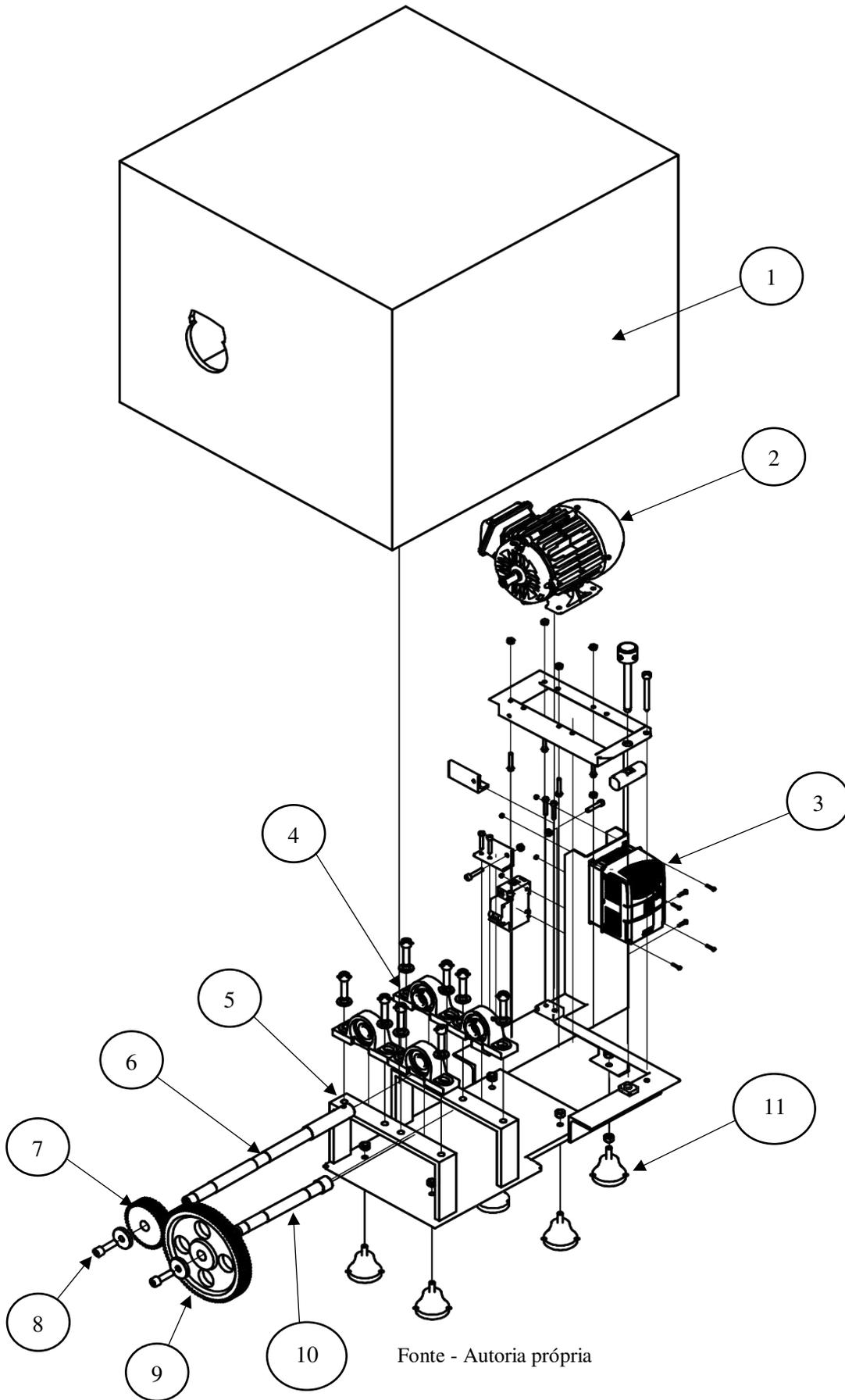
Assim como para o projeto preliminar, no projeto detalhado também se reproduziu a vista explodida para melhor observar os elementos de montagem da bancada experimental, conforme exemplificado na Figura A10.

Figura A 9 - Vistas frontal e traseira da montagem da cabine de isolamento na bancada de testes



Fonte - Autoria Própria

Figura A 10 - Desenho da vista explodida do projeto final da bancada experimental



Fonte - Autoria própria

Continuação da Figura A6

Item	Nome
1	Cabine de isolamento térmico
2	Motor WEG W22 0,5 CV
3	Inversor de Frequência WEG - Vector Inverter CFW 08
4	Mancal modelo P204 e rolamento ($\varnothing = 20$ mm)
5	Suporte para mancal
6	Eixo do pinhão
7	Pinhão
8	Parafuso e arruela para fixação das engrenagens nos eixos com rosca
9	Coroa
10	Eixo da coroa
11	<i>Vibra-stop</i>

Fonte - Autoria própria

APÊNDICE II – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS

Para a realização dos ensaios termográficos necessitou-se da aferição de parâmetros como umidade relativa do ar, temperatura ambiente, velocidade do ar e temperatura refletida para que essas informações sirvam como dados de entrada para o termovisor, com o objetivo reproduzir termogramas de boa confiabilidade, e para a possível detecção de alguma anomalia térmica presente, proveniente ou não do ambiente externo, que possa influenciar nos resultados.

Para a medição de umidade relativa e temperatura do ar utilizou-se um anemômetro com a sonda de umidade, e para a aferição da velocidade do ar o mesmo anemômetro, mas adaptado a sonda de fio quente. Para a medição da temperatura refletida e obtenção dos termogramas pertinentes a pesquisa utilizou-se um termovisor, e para a medição do nível de pressão sonora um decibelímetro. Durante os ensaios também se fez uso de um cronômetro para medir o tempo dos ensaios e equipamentos de segurança individual (EPI's), que foram: jaleco, óculos de proteção, luvas e protetor auricular.

Para a medição da umidade relativa do ar e temperatura ambiente utilizou-se, na pesquisa, um termo-anemômetro modelo AMI 300 da Instrutemp ligado a uma sonda de umidade, que está exemplificado na Figura A11.

Figura A 11 - Termo-anemômetro com sonda para medição de umidade relativa do ar e temperatura ambiente



Fonte - Autoria própria

Referente a aferição da velocidade do ar, utilizou-se o mesmo instrumento, sendo que a sonda ligada ao anemômetro foi a sonda de fio quente, exemplificado na Figura A12.

Figura A 12 - Termo-anemômetro com sonda de fio quente para medição de velocidade do ar



Fonte - Autoria própria

Para as medições termográficas e de temperatura refletida, utilizou-se na pesquisa o termovisor modelo T620 da FLIR (vide Figura A13), devidamente calibrado.

Figura A 13 - Termovisor



Fonte - Autoria própria

Para a aferição do nível de pressão sonora ou ruído, utilizou-se nesta pesquisa um decibelímetro modelo SL-4011 da marca Ultron. O intervalo de medição foi marcado de 80 a

130 dB, ponderação em A e resposta em “lento”. O instrumento está exemplificado na Figura A14.

Figura A 14 - Decibelímetro



Fonte - Aatoria própria

Para a segurança mediante ao funcionamento da bancada e manuseio de determinados materiais utilizou-se um jaleco de cor branca, luvas de pano com saliência de borracha antiderrapantes, óculos de proteção e protetor auricular do tipo *plug* com abafamento de até 14dB (vide figura A15).

Figura A 15 - Equipamentos de segurança



Fonte - Aatoria própria

Para a medição do tempo dos experimentos se fez uso do cronômetro do celular iPhone 7, da Apple, proveniente do sistema operacional iOS 12.0.1. Sua interface pode ser observada através da figura A16.



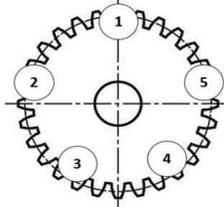
Fonte - Autoria própria

APÊNDICE III – PLANILHA PARA REGISTRO DOS DADOS REFERENTES AOS ENSAIOS TERMOGRÁFICOS

A planilha utilizada para o registro dos dados provenientes dos ensaios termográficos e aferição dos níveis de pressão sonora está exemplificada na Tabela A2.

Tabela A 2 - Planilha para registro de dados no decorrer dos ensaios termográficos

Experimento "n"				
Localização	Velocidade do vento			
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
Ponto 1				
Ponto 2				
Ponto 3				
Ponto 4				
Ponto 5				
Aferições com a Sonda – Termografia ativa				
Tempo (min)	Umidade (%HR)	Temperatura (°C)		
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				



Aferições com a Sonda – Temperatura Refletida		
Tempo (min)	Umidade (%HR)	Temperatura (°C)
Medição 1		
Medição 2		
Medição 3		
Medição 4		
Medição 5		
Média		

Aferições com a Sonda – Termografia passiva		
Tempo (min)	Umidade (%HR)	Temperatura (°C)
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		

Fonte - Autoria própria

ANEXO I - LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE

Para a realização da consulta dos níveis de tolerância de ruído em relação ao tempo de exposição, podem ser verificados no Quadro AN1.

Quadro AN 1 - Níveis de tolerância de ruído mediante o tempo de exposição

Nível de ruído dB (A)	Máxima exposição diária PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas
92	3 horas e 30 minutos
93	3 horas
94	2 horas e 40 minutos
95	2 horas e 15 minutos
96	2 horas
97	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
99	1 hora
100	45 minutos
102	35 minutos
104	30 minutos
105	25 minutos
106	20 minutos
108	15 minutos
110	10 minutos
112	8 minutos
114	7 minutos
115	

Fonte - NR 15