

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DO USO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA ASSOCIADA AO
MEDIDOR DE ESPESSURA ULTRASSÔNICO COMO MÉTODO DE
MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS DE
CARREGAMENTO DE GRÃOS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

EVERTON RODRIGUES DA SILVA

RIO GRANDE, RS

2020

EVERTON RODRIGUES DA SILVA

**ESTUDO DO USO DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA ASSOCIADA AO
MEDIDOR DE ESPESSURA ULTRASSÔNICO COMO MÉTODO DE
MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS DE
CARREGAMENTO DE GRÃOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

RIO GRANDE, RS

2020.

Ficha Catalográfica

S588e Silva, Everton Rodrigues da.
Estudo do uso da técnica de termografia associada ao medidor de espessura ultrassônico como método de manutenção preditiva em tubulações industriais de carregamento de grãos / Everton Rodrigues da Silva. – 2020.
94 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2020.

Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. Manutenção 2. Manutenção Preditiva 3. Termografia 4. Ensaio não Destrutivo 5. Tubos de Transporte de Grãos 6. Vida Útil 7. Taxa de Perda de Espessura I. Biehl, Luciano Volcanoglo II. Título.

CDU 621.644:772.96

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Alex Fabiano Bueno
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedicatória

*Aos meus pais pela dedicação e exemplo,
me passando os valores importantes da
vida.*

*A minha esposa pelo incentivo e pela
paciência nesta jornada de busca de
conhecimento.*

*Aos meus amigos que foram incansáveis em
me levar para frente nos momentos de
dúvidas.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer a minha esposa Leticia Lagos de Avila da Silva por ser esta grande companheira nesta grande jornada que é a vida. Juntos, concebemos o bem mais valioso que tenho nesta vida, que são os nossos filhos Mateus Lagos de Avila da Silva e Murilo Lagos de Avila da Silva, e construímos uma bela família, Obrigado!

A minha querida mãe Jucelia Maria Felipe Rodrigues pelo seu amor incondicional e pelo seu zelo constante, sempre presente e preocupada em ajudar. Minha mãe talvez você não tenha esta compreensão, mas me ensinaste valores que carrego junto comigo na minha jornada, obrigado mamãe.

Ao meu pai José Batista da Silva pelas orientações e exemplo de postura para enfrentar os problemas que cruzam a nossa jornada. Obrigado por me dar o sangue empreendedor e a paixão pelo Colorado. Agradeço imensamente todos os ensinamentos feitos pela palavra ou pelo exemplo, são até hoje de grande valia, obrigado.

Agradeço aos meus sogros Gilberto Simões de Avila e Guaraci Lagos de Avila por estarem sempre juntos de nós e por me acolherem em sua família com muito amor e respeito. Obrigado por serem estes grandes avôs dos meus filhos.

Para finalizar gostaria de agradecer dois amigos em especial, que de certa forma representaram todos os outros. Meu amigo Jorge Braz, amizade que nasceu durante a vivência como professor da FURG e aluno do programa de Mestrado e que irá durar para a vida toda. Saiba que você é um grande incentivador deste trabalho, pois sempre procurei em ti e encontrei uma palavra de incentivo, que foi o gás necessário nos momentos de dúvidas. Ao amigo Oberdan Nogueira, que nos conhecemos nos tempos de estudante universitário, agradeço por todo o incentivo e por me fazer acreditar neste trabalho, algumas vezes até com mais força do que eu.

Agradeço a todos os professores, em especial ao meu orientador, professor Luciano Biehl, pelo conhecimento e pela dedicação em ensinar e qualificar, velhos e novos, profissionais fomentando sempre a pesquisa como trampolim para o desenvolvimento tecnológico do nosso país e ao professor Lauro Witt, que foi um grande apoiador deste projeto.

RESUMO

A aplicação de técnicas de manutenção preditiva no cenário industrial vem se intensificando nas últimas três décadas. Desta forma o uso de ensaios não-destrutivos é de grande relevância, pois permite antecipar problemas futuros, propiciando agir antes que estes ocorram. A termografia já ocupa um papel importante como técnica de manutenção preditiva na área industrial, aplicada a sistemas elétricos, como em quadros de comandos, subestações, etc. Neste trabalho foi proposto o uso da termografia, como técnica preditiva para a identificação de pontos potenciais de colapso em tubos de transporte de grãos por gravidade. Em seguida, ao escolher o ponto, objeto deste trabalho, com o uso de um medidor ultrassônico de espessura, este ponto foi monitorado quanto a sua taxa de perda de espessura da parede ao longo do tempo. Ao extrapolar os dados encontrados, relacionados à taxa de perda de espessura da parede, foi obtida uma equação, que permitiu identificar o tempo de vida remanescente da tubulação. Esta equação também permite identificar, ainda na fase de projeto, a espessura mínima da chapa para a construção da tubulação, levando em conta a relação de custo benefício entre espessura da chapa e tempo desejado de operação, reduzindo desta maneira custos desnecessários com material empregado para a fabricação da tubulação.

Palavras-chave: Manutenção, Manutenção preditiva, Termografia, Ensaio não destrutivo, Tubos de transporte de grãos, Vida útil, Taxa de perda de espessura.

ABSTRACT

The application of predictive maintenance techniques in the industrial scenario has been intensifying in the last three decades. In this way the use of non-destructive tests is of great relevance, because it allows to anticipate future problems, propitiating to act before they occur. Thermography already plays an important role as a predictive maintenance technique in the industrial area, applied to electrical systems, such as in control panels, substations, etc. This work was proposes the use of thermography as a predicitive techniqe for the identification of potencial collapse points in grain transport tubes bay gravity. Then, when choosing the point, object of this work, with the use of an ultrasonic thicknessgauge, this point was monitored for its rate of loss of wall thickness over time. When extrapolating the data found, related to the rate of loss of wall thickness, an equation was obtained, which allowed to identify the remaining life span of the pipe. This equation also allows to identify, even in the design phase, the minimum thickness of the sheet for the construction of the pipe, taking into account the cost-benefit ratio between sheet thickness and the desired time of operation, thus reducing unnecessary costs with material used for the manufacture of the pipe.

Key words: Maintenance, Predictive maintenance, Thermography, Non-destructive tests, Grain transport tubes, Maintenance, Service life, Rate of loss of thickness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tubo de transporte de grãos.	25
Figura 2 – Termograma e foto da Igreja São Francisco de Assis, 2006, Belo Horizonte, MG.	26
Figura 3 – Aplicação de lama no corpo humano.	27
Figura 4 – Espectro eletromagnético.	31
Figura 5 – Espectro eletromagnético.	32
Figura 6: Aplicação na infra-estrutura de pontes: a) Fotografia digital e b) Termograma.	35
Figura 7: Evolução da manutenção	39
Figura 8: Diagrama dos processos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces.	47
Figura 9: Configuração mecânica do processo de desgaste abrasivo por: a)deslizamento b)rolamento	49
Figura 10: Formas de desgaste abrasivo.	50
Figura 11: Forças envolvidas no processo de desgaste de erosão por partícula Termógrafo Ultrassônico.	51
Figura 12: Representação esquemática dos mecanismos de erosão por partículas sólidas.	54
Figura 13: Influência do ângulo de impacto no desgaste do aço AISI 1018.	55
Figura 14: Ângulo de impacto de uma partícula causando erosão na superfície.	55
Figura 15: Câmera termográfica infravermelha.	58
Figura 16: Medidor ultrassônico de espessura.	59
Figura 17: Atividade comparativa de medição.	60

Figura 18: Tubulação escolhida para o trabalho.	64
Figura 19: Esboço das dimensões da tubulação.	65
Figura 20: Pontos de medição A) Ponto na superfície da chapa com perda de espessura, B) Ponto fora da chapa, C) Ponto na superfície da chapa sem perda considerável de espessura.	66
Figura 21: Mapa termográfico da coleta 1.	71
Figura 22: Mapa termográfico da coleta 2.	73
Figura 23: Mapa termográfico da coleta 3.	74
Figura 24: Mapa termográfico da coleta 4.	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Linha histórica da evolução da termografia.

29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas do espectro infravermelho com os respectivos comprimentos de onda.	31
Tabela 2: Emissividade de alguns materiais.	33
Tabela 3: Coeficiente de Students para 95,45% de probabilidade.	38
Tabela 4: Resultados de medição da atividade comparativa.	60
Tabela 5: Estimativas de repetitividade calculadas.	61
Tabela 6: Resultados de medição corrigidos.	62
Tabela 7: Planilha de dados.	67
Tabela 8: Valor medido da espessura da chapa na coleta 1.	72
Tabela 9: Valor medido da espessura da chapa na coleta 2.	73
Tabela 10: Valor medido da espessura da chapa na coleta 3.	74
Tabela 11: Valor medido da espessura da chapa na coleta 4.	75
Tabela 12: Variação da temperatura na superfície da chapa da tubulação.	76
Tabela 13: Estimativa da espessura final conforme o tempo de operação.	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores de espessura da chapa da tubulação durante o tempo de sua vida útil.	77
Gráfico 2 – Tendência de perda de espessura da chapa da tubulação durante o tempo de sua vida útil.	78
Gráfico 3 – Distribuição bibliográfica por estrato.	90
Gráfico 4 – Percentual de artigos com Qualis.	91
Gráfico 5 – Distribuição bibliográfica por Qualis.	91
Gráfico 6 – Distribuição bibliográfica por data de artigo.	92

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Sequência das etapas do trabalho	62
Fluxograma 2 – Sequência das atividades do projeto.	63

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Lei de Planck.	30
Equação 2 – Cálculo da incerteza padrão.	37
Equação 3 – Cálculo da repetitividade.	37
Equação 4 – Valor de espessura perdido pela chapa ao longo do tempo de sua vida útil.	78
Equação 5 – Cálculo da espessura final conforme o tempo de operação.	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo.	24
FLIR – Foward Looking Infra Red.	29
NBR – Norma Brasileira de Regulamentação.	42
AISI – American Iron and Steel Institute.	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	23
2.1. Objetivo Geral	23
2.2. Objetivos Específicos	23
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1. Tubos de Transporte de Grãos	24
3.2 Termografia Infravermelha	25
3.2.1 A História da Termografia	27
3.2.2 O Princípio da Termografia	30
3.2.3 Aplicações da Termografia	34
3.3 Medidores de Espessura Ultrassônicos	35
3.4 Incerteza Padrão	36
3.5 Manutenção	38
3.5.1 Manutenção Preditiva	41
3.5.2 Disponibilidade e confiabilidade	43
3.6 Tribologia dos Materiais	44
3.6.1 Desgaste Abrasivo	48
3.6.1 Desgaste Erosivo	50
4. MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1 Instrumentos de Medição	58
4.1.1 Câmera Termográfica Infravermelha	58

4.1.2 Medidor Ultrassônico de Espessura	59
4.1.2.1 Comparação do Medidor Ultrassônico de Espessura com um Paquímetro	59
4.1.2.2 Cálculo da Estimativa da Incerteza Padrão	61
4.2 Etapas e Método Utilizado	62
4.2.1 Escolha da Tubulação	64
4.2.2 Caracterização do Material	65
4.2.3 Coleta de Dados	66
4.2.4 Cálculo da Estimativa do Tempo de Vida Remanescente da Tubulação	68
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	69
5.1 Histórico da Manutenção	69
5.2 Medições na Tubulação	70
5.3 Variação de Temperatura na Superfície da Chapa	76
5.4 Estimativa do Tempo de Vida Remanescente da Tubulação	77
6. CONCLUSÕES	82
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
8. REFERÊNCIAS	85
8.1 Referências Nominais	85
8.2 Referências por Estrato	90
8.3 Referências por Qualis	91
8.4 Referências por Data do artigo	92
APÊNDICE A	93

1. INTRODUÇÃO

As normas de concorrência atuais imperam sobre as empresas a necessidade constante de busca pela excelência em seus processos produtivos, excelência esta, que está intimamente ligada a alta qualidade na produção, uma melhor performance produtiva e a redução de custos.

Neste contexto de excelência dos processos produtivos é importante destacar um fator importante que é a Disponibilidade Técnica dos Equipamentos e Máquinas, podendo ainda, dependendo do meio produtivo, abranger além dos equipamentos a sua estrutura.

Manter a disponibilidade dos equipamentos em patamares aceitáveis, condizentes a necessidade produtiva não é tarefa fácil, principalmente quando não nos é possível atuar preventivamente, restando apenas intervenções corretivas após a falha dos equipamentos, ou em alguns casos as manutenções corretivas programadas, as chamadas paradas de manutenção.

Em ambos os casos nos deparamos com situações sempre muito onerosas para as empresas, pois além do processo produtivo parado o custo da intervenção, quase sempre emergencial, principalmente em empresas com processo produtivo contínuo, é sempre maior quando comparamos com uma intervenção preventiva.

Diante deste cenário é fundamental o desenvolvimento de novos métodos de manutenção preditiva e inspeção mais eficiente. Um dos métodos, o qual vem se destacando no uso da manutenção preditiva é o de análise termográfica, pois sua aplicação tem um baixo custo quando comparamos com outros métodos preditivos de inspeção, além de apresentar uma grande gama de aplicações, apresenta resultados eficientes de diagnósticos e ainda propicia a sua execução sem a necessidade de parar o processo produtivo.

Inseridos neste contexto, mas com suas particularidades, devido aos processos que operam, estão os tubos de transporte de grãos, a quais na sua maioria, sofrem intervenções já no fim de sua vida útil, ou quando ocorre uma ruptura de sua estrutura, implicando sempre neste caso em uma parada da

planta ou equipamento e geralmente na perda de grandes volumes de produto, devido ao vazamento que ocorre do mesmo.

Desta forma foi proposto o estudo da aplicação da Termografia Infravermelha, associada ao acompanhamento da taxa de perda de espessura da parede do tubo de transporte de grão, como método de manutenção preditiva na identificação e controle de pontos potenciais de ruptura nestes tubos, além de identificar, através da geração de uma equação matemática, a vida útil remanescente dos tubos de transporte de grãos.

2. OBJETIVOS

Neste capítulo é definido o objetivo geral e os objetivos específicos, que nortearam o desenvolvimento deste trabalho.

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar a aplicação da termografia infravermelha como método de manutenção preditiva, associada a um medidor de espessura para a identificação prematura de eventos de ruptura em tubulações de transporte de grãos, através da perda de espessura na parede das tubulações industriais.

2.2. Objetivos Específicos

Buscando atingir o objetivo geral deste projeto foi fundamental a definição de objetivos mais específicos, os quais são:

- Analisar o potencial do uso da termografia infravermelha como método preditivo de identificação de pontos potenciais de ruptura de tubulações de transporte de grãos;
- Analisar através do acompanhamento sistemático da taxa de perda de espessura da tubulação a sua contribuição para prever o rompimento da tubulação, e agir preventivamente, evitando assim perdas monetárias com paradas de manutenção corretivas
- Determinar através de equação matemática, o tempo de vida remanescente da tubulação;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos conceitos que nortearam a fundamentação teórica e prática deste trabalho.

O capítulo foi dividido em cinco seções, objetivando proporcionar um melhor entendimento, onde a Seção 3.1 Tubos de Transporte de Grãos, traz um breve histórico destas estruturas e apresenta as suas principais falhas. Na sequência vem a Seção 3.2 Termografia Infravermelha, que aborda o histórico, princípios e aplicações da termografia infravermelha. Na Seção 3.3 Medidores de Espessura Ultrassônicos faz-se uma breve introdução dos princípios da ultrassonografia e de sua aplicação para medir espessuras. A Seção 3.4 Incerteza Padrão, traz uma abordagem sobre o cálculo da incerteza padrão aplicada a instrumentos de medição. Na Seção 3.5 Manutenção é feita uma descrição de sua importância e evolução através da história, conforme a indústria foi evoluindo, além de apresentar o conceito por traz da técnica Preditiva de manutenção, a metodologia e as principais aplicações. Nesta seção também é apresentado os conceitos de disponibilidade e confiabilidade e a importância destes para os equipamentos e máquinas que atuam nos processos de manufatura. E por último na seção 3.6 foi abordado os conceitos da Tribologia dos Materiais e seus tribossistemas, que norteiam as formas de desgaste de componentes, máquinas e equipamentos mecânicos.

3.1. Tubos de Transporte de Grãos

Transportadores de grãos são equipamentos projetados para transportar produtos granéis sólidos de um ponto para outro, em qualquer direção, com o menor dano possível, de forma contínua, individual ou integrado [1].

O transporte via tubulações de grãos e sólidos, a cada ano, tanto em terra ou sob o mar, tem aplicação a diversos produtos com um valor estimado em torno de milhões de dólares [2].

Conforme a ANP (Agência Nacional do Petróleo), descrito em seu Regulamento Técnico Nº 2/2011, no item 4.2.1, dutos terrestres podem ser

definidos como uma instalação constituída por uma sequência de tubos ligados entre si, incluindo os seus componentes [3].

Os transportadores de grãos podem ser empregados de modo individual ou integrados com outros transportadores do mesmo tipo ou de diferentes tipos. Quando da necessidade de utilização de mais de um transportador numa planta, tem-se os sistemas integrados de transporte, que tem a finalidade de efetuar o transporte de materiais de maneira mais econômica, suprimindo às necessidades técnicas adequando-se a disposição física dos equipamentos [1].

Na indústria de beneficiamento de grãos boa parte do transporte de grãos, quando possível, é feito por gravidade através de tubos retangulares, quadrados ou redondos, fabricados normalmente de chapas de aço carbono de 1020, com espessura de $\frac{1}{4}$ ".

Estes tubos, como mostrado na Figura 1, são utilizados principalmente na transferência de grãos de um ponto a outro por gravidade ao longo do processo produtivo, por exemplo entre silos, correias transportadoras e elevadores.

Figura 1 – Tubo de transporte de grãos



Fonte – Próprio autor.

3.2 Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica de ensaio não destrutivo, que permite obter imagens térmicas dos objetos que estão sendo analisados [4].

A termografia pode ser apresentada como sendo a técnica de um método não-destrutivo sem contato de identificação visual do gradiente de

temperatura superficial de um corpo em condições ambientais [5], conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Termograma e foto da Igreja São Francisco de Assis, 2006,

Belo Horizonte, MG.



Fonte – Cortizo (2008).

Os sistemas que capturam imagens térmicas são constituídos de sensores que registram as temperaturas emitidas por objetos na região do infravermelho longo (7-20 μm) [6].

A termografia infravermelha transforma a energia térmica emitida por um objeto na faixa infravermelha do espectro eletromagnético em uma imagem visível [6].

A termografia infravermelha é um ensaio não destrutivo, que permite correlacionar algumas imperfeições das estruturas com a sua temperatura superficial, a qual é captada por um sistema termográfico [7].

A termografia infravermelha é uma ciência dedicada a aquisição e processamento da informação térmica de um objeto, medida através de um dispositivo sem contato com o mesmo [8]. É a identificação da temperatura superficial de um corpo através da transferência de calor por radiação, pois todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica [5].

3.2.1 A História da Termografia

Os antigos filósofos e médicos gregos reconheceram e se fascinaram com a relação entre o calor e a vida, entretanto a origem do calor corporal não era questionada, embora muitos especulavam sobre os meios de dissipação do calor pelo corpo humano, onde a respiração era considerada como um mecanismo de resfriamento, já que era possível sentir a temperatura mais quente do ar exalado [9].

Registros históricos [10] mencionam a utilização do método de diagnosticar um corpo através da sua radiação térmica a partir de estudos realizados pelo médico e filósofo grego Hipócrates, onde este, para identificar as diferenças de temperatura no corpo humano se utilizava do dorso de sua mão.

Hipócrates observou ao longo do corpo humano, variações de temperatura, e diagnosticava doenças a partir do aumento do calor de determinada parte do corpo humano “...quando uma parte do corpo é mais quente ou mais fria do que o restante, então a doença esta presente nesta parte.”. A técnica de Hipócrates era através do dorso da sua mão sentir o calor radiante do corpo humano e ao identificar uma área com uma maior quantidade de calor emitida, esfrega lama nesta área para confirmar conforme a Figura 3, observando onde ela secava e endurecia primeiro [9].

Figura 3 – Aplicação de lama no corpo humano



Fonte: Brioschi (2008).

Hipócrates [10] também com o objetivo de identificar partes do corpo dos pacientes com temperaturas mais elevadas, utilizava a lama, de forma que o local onde a lama secava mais rapidamente indicava um local com uma temperatura mais elevada, e a partir de seu raciocínio, este local teria um diagnóstico com potencial de alguma enfermidade.

Os primeiros experimentos de Della Porta no campo ótico, deram início ao estudo da radiação infravermelha no final do século XVI. Mais tarde, já no século 18, Sir William Herschel, utilizou um espectroscópio para descobrir que o sol emitia raios infravermelhos, que a partir do século XIX, o seu filho Sir John Herschel, tornou mais clara a relação desta descoberta com a luz, através da produção em papel da primeira imagem termográfica [9].

Os primeiros registros das primeiras atividades envolvendo a coleta de imagens com o uso de um sistema infravermelho, datam inicialmente o ano de 1800 com William Herschel e quarenta anos depois, com o seu filho, John Herschel, que se utilizaram para tanto, da técnica evaporográfica, a qual é a evaporação do álcool obtido de uma superfície pintada com carbono [5].

Segundo Ferreira et al (2016) em 1800 William Herschel, com o uso de um espectroscópio, descobriu a radiação térmica infravermelha. Herschel ao identificar que o sol emitia raios infravermelhos, estudou as temperaturas das diferentes faixas dos espectros que fazem parte da luz visível ao olho humano.

Três anos após John Herschel coletar imagens com a técnica evaporográfica, Henry Becquerel identificou que ao serem expostas à radiação infravermelha, algumas substâncias emitiam luminescência, além de produzirem emulsões fotográficas sensíveis à radiação próxima do infravermelho [5].

Em 1880, Samuel Langley desenvolveu e montou um aparelho, chamado de bolômetro, com capacidade de medir a diferença de temperaturas extremamente pequenas, no qual seu princípio de funcionamento era baseado no efeito da variação da temperatura sobre a variação da resistência elétrica de um metal. Esta descoberta propiciou que em 1917, Case, desenvolvesse o primeiro detector baseado na interação direta entre fótons da radiação infravermelha e elétrons do material (sulfeto de tálio), mas o primeiro equipamento de termografia, só foi ser desenvolvido em 1929 por Czerny [5].

Durante a Segunda Guerra Mundial [10] houveram novos avanços no uso da tecnologia da radiação infravermelho, os quais ficaram todos no campo do uso militar, aplicados principalmente no objetivo de identificar o inimigo, através de equipamentos de visão noturna.

Durante a Segunda Guerra Mundial alemães utilizaram em seus tanques um sistema de visão noturno para a invasão da Rússia e em resposta, os aliados desenvolveram, o que chamavam de FLIR – Foward Looking Infra Red, visão dianteira por infravermelho, que tinha como função inicial identificar a localização do inimigo, mas sua aplicação avançou também para o desenvolvimento de mísseis com detector de calor [5].

No ano de 1946[5] foi desenvolvido para uso militar um escâner de infravermelho, produzindo termogramas em horas, o qual avançou tecnologicamente ao longo dos anos até 1954, onde este mesmo equipamento produzia termogramas em duas dimensões em 45 minutos.

Mas o grande salto dos equipamentos de radiação infravermelho [5] aconteceu a partir de 1960, quando foi desenvolvido os imageadores infravermelhos, além de sistemas integrados, que formavam imagens instantâneas, a partir da determinação da temperatura.

Um sistema que permitisse, simultaneamente, a visão termográfica e óptica de uma pessoa, só foi ser desenvolvido em 1975, sistema o qual foi denominado de ENOUX, que era baseado em um sistema elétrico óptico. Já a obtenção da imagem em tempo real só foi acontecer, de forma confiável, nos anos de 1980 e 1990 [5].

Quadro 01 – Linha histórica da evolução da termografia

Época	Evento
1950	Os primeiros radiômetros.
1960	Os primeiros sistemas de infravermelho imageadores (termovisores).
1970	Os visores térmicos, sem a determinação de temperatura, só detecção qualitativa.
1980	Evolução na óptica e uso de circuito integrado, reduzindo peso e volume. Em 1985: Detectores resfriados termoeletricamente, substituindo os de nitrogênio líquido.
1990	Introdução dos CCD e FPAs, permitindo a realização de centenas de imagens por segundo com alta resolução e grande sensibilidade.

Fonte: Cortizo (2008).

3.2.2 O Princípio da Termografia

Qualquer objeto que possua temperatura acima de 0 K, ou seja, 273°C é capaz de emitir radiação eletromagnética na região infravermelha do espectro eletromagnético, onde esta radiação está localizada entre as microondas e a parte visível do espectro eletromagnético [11].

Conforme a teoria da radiação térmica [11], o corpo negro será considerado como um hipotético objeto, o qual ao absorver as radiações incidentes é capaz de irradiar um espectro contínuo conforme a lei de Planck:

Equação 1 – Lei de Planck

$$L_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1]}$$

Fonte: Bagavathiappan (2013).

Onde:

λ = comprimento de onda da radiação;

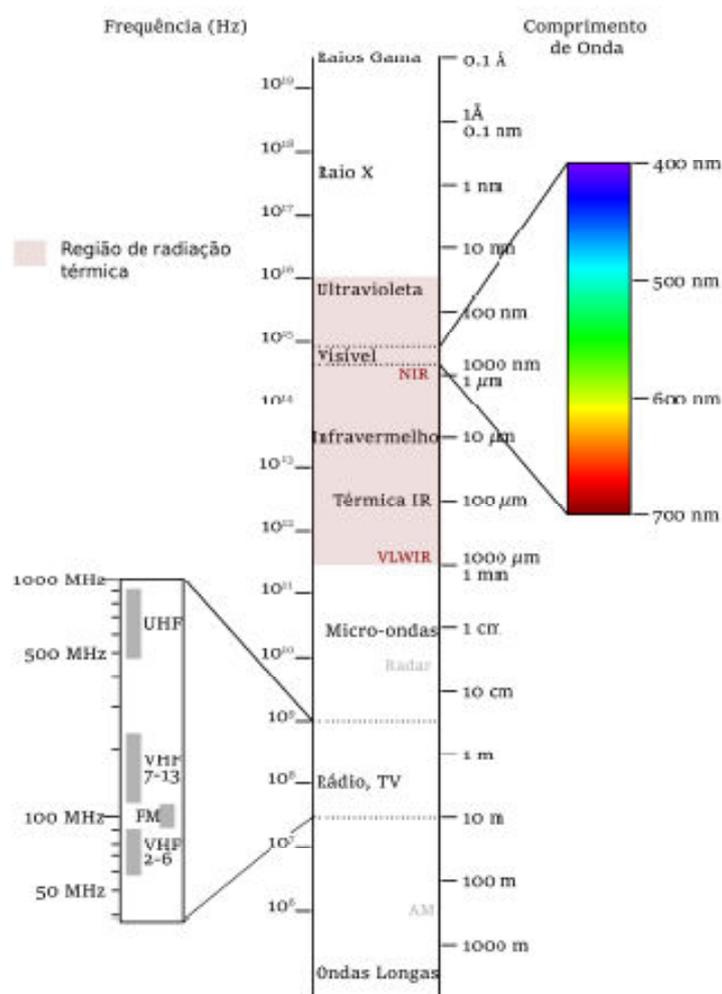
L_{λ} = é o poder de radiação do corpo negro por unidade de superfície e por unidade de ângulo de sólido para um determinado comprimento de onda ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$);

T = temperatura (K);

C_1 e C_2 = são, respectivamente, são a primeira e a segunda constantes de radiação.

Destacada em rosa na Figura 4 está a região de radiação térmica contendo parte da radiação ultravioleta, toda a região de luz visível, parte da região infravermelha e uma pequena parte da região de micro-ondas, a qual possui sobreposição com a região de ondas muito longas de infravermelho [8].

Figura 4 – Espectro eletromagnético



Fonte: Junior (2018).

A Tabela 1 mostra as faixas do espectro infravermelho e os seus respectivos comprimentos de onda.

Tabela 1 – Faixas do espectro infravermelho com os respectivos comprimentos de onda

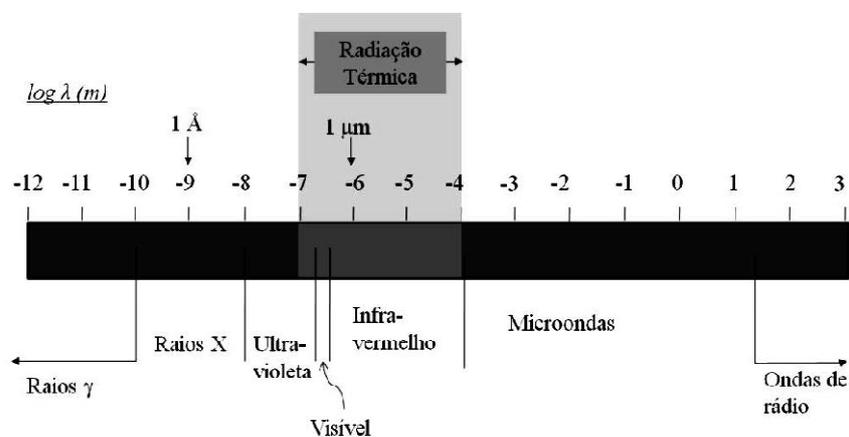
Acrônimo	Descrição em Inglês	Descrição em Português	Comprimento de Onda
NIR	<i>Near Infrared</i>	Próximo ao Infravermelho	0,7 – 1 μm
SWIR	<i>Short Wavelength Infrared</i>	Ondas Curtas de Infravermelho	1 – 2,5 μm
MWIR	<i>Mid Wavelength Infrared</i>	Ondas Médias de Infravermelho	3 – 5 μm
LWIR	<i>Long Wavelength Infrared</i>	Ondas Longas de Infravermelho	7,5 – 14 μm
VLWIR	<i>Very Long Wavelength Infrared</i>	Ondas Muito Longas de Infravermelho	14 – 1000 μm

Fonte: Junior (2018).

A energia térmica é emitida pela radiação térmica, onde esta radiação [12] é propagada pelas ondas eletromagnéticas, as quais estão distribuídas em um espectro e são classificadas conforme o comprimento de onda (λ).

Algumas fontes da literatura [13] descrevem a faixa de comprimento de onda da radiação térmica com um comprimento entre 0,1 a 100 μm do espectro eletromagnético, já outras fontes destacam que este intervalo compreende de 0,1 a 1000 μm . A figura 5 ilustra bem a pequena parcela visível da radiação térmica pelo olho humano, o que compreende o intervalo de 0,35 a 0,75 μm .

Figura 5 – Espectro eletromagnético



Fonte: Novo et al (2014).

Conforme a Lei de Stefan – Boltzmann um objeto irá emitir energia proporcional a temperatura da sua superfície, mas no caso do sensor termográfico a detecção desta energia dependerá do coeficiente de emissividade do objeto a ser medido, conforme a Lei de Planck [14].

A emissividade dos materiais corresponde a uma fração do corpo negro, considerando estes nas mesmas condições, como que para o corpo negro a emissividade é igual a 1, a emissividade dos materiais varia de 0 a 1 [13].

Tabela 2: Emissividade de alguns materiais

MATERIAL	EMISSIVIDADE	MATERIAL	EMISSIVIDADE	MATERIAL	EMISSIVIDADE
Cimento	0,96	Areia	0,9	Borracha	0,94
Água	0,94	Gelo	0,97	Madeira	0,9
Vidro	0,93	Cerâmica	0,92	Óxido de cromo	0,81
Mármore	0,94	Tijolo	0,95	Plástico	0,9
Tecido	0,9	Pele humana	0,98	Papel	0,82
Espuma	0,77	Carvão	0,96	Óxido de ferro	0,8

Fonte: Souza (2017).

A câmera termográfica infravermelha pode capturar uma imagem do padrão térmico e pode ser usada em várias faixas de temperatura dependendo da emissividade da superfície [14].

A câmera de termografia funciona como um detector de infravermelho que tem a capacidade de absorver tanto a energia térmica emitida pelo objeto como a temperatura da superfície deste mesmo objeto, e assim converter estes dados em um sinal [14].

Esta energia térmica não pode ser visualizada totalmente pelo o olho humano, apenas uma parte desta energia pode ser visível, isto devido ao fato que a energia infravermelha é emitida pelos corpos como energia térmica, sendo assim estas imagens de calor na superfície dos corpos, apenas é possível de enxergar através de um aparelho de termografia, que converte esta energia térmica, invisível ao olho humano em uma energia térmica visível, através de uma fotografia térmica do objeto, onde o objeto irá apresentar cores diferentes, conforme a temperatura da sua superfície [15].

Esta imagem termográfica digital é chamada de Thermogram, onde cada pixel tem um valor específico de temperatura, e a diferença nas temperaturas da superfície do objeto determinaram o contraste da imagem [16].

O perfil térmico de cada objeto contém a imagem de calor e os valores de escala de temperatura, onde as diferentes cores, devido a diferentes temperaturas representam diferentes regiões de temperaturas na superfície [15].

Com o perfil térmico, as imagens térmicas podem ser analisadas por um termógrafo, o qual categoriza o status das partes defeituosas pelo o nível de urgência da manutenção do equipamento [15].

3.2.3 Aplicações da Termografia

A técnica de análise termografica vem sendo aplicada ao longo dos anos na área militar, na astronomia, no sensoriamento remoto, em aplicações médicas, monitoramento de redes de alta, média, baixa tensão e em equipamentos elétricos. Na área da siderurgia a termografia é utilizada no monitoramento de altos-fornos e dutos de gás, fornos rotativos e avaliação da espessura de refratário. Na petroquímica a termografia é aplicada no monitoramento, associado a perda de calor, de fluxo de produto, válvulas de segurança, purgadores, níveis de tanques, refratários e isolamentos térmicos, fornos, reatores, trocadores de calor, chaminés, dutos de gás, tanques e tubulações isoladas, inspeção interna em fornos de processo. A indústria de papel e celulose, utiliza a termografia para controle de secagem de folha e medição de temperatura em máquinas rotativas [17].

Na últimas décadas vem crescendo o uso de imagens de infravermelho, em particular, no Brasil, existe uma grande aplicação em empresas de geração e transmissão de energia elétrica e também, mas em uma escala menor, em indústrias que usam caldeiras, fornos e tubulações com temperaturas distantes da ambiente [18].

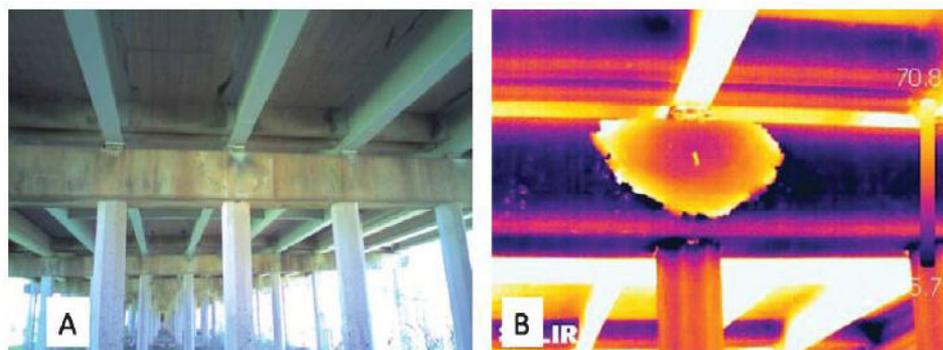
A termografia pode ser aplicada de forma qualitativa com a finalidade de identificar falhas e materiais diferentes empregados em restaurações de monumentos históricos, assim como a visualização de pontos quentes em instalações elétricas. E quantitativamente a termografia pode ser aplicada, permitindo identificar a perda de calor em um equipamento industrial de grande porte [18].

A maioria das anomalias identificadas nas edificações estão associadas à temperatura, assim identificar estas temperatura com o auxílio da termografia irá auxiliar na compreensão das causas que levam a estas anomalias [7].

A termografia infravermelha vem sendo utilizada como ensaio não destrutivo aplicado a inspeção de estruturas civis com resultados satisfatórios, principalmente como ferramenta de inspeção de pontes, conforme mostra a Figura 6 [19].

Figura 6: Aplicação na infra-estrutura de pontes:

a) Fotografia digital e b) Termograma



Fonte: Rocha (2017)

A termografia infravermelha tem sido aplicada com sucesso no monitoramento de condições como em estruturas civis, na inspeção de equipamentos, monitorização de deformações plásticas, na inspeção de deformação de tração e avaliação de fadiga, danos em materiais, inspeção de máquinas, inspeção de processos de soldagem, monitoramento de circuito impresso eletrônico painéis (PCBs) e avaliação do processo da deposição química de vapor [11].

A termografia também tem grande aplicação na energia nuclear, aeroespacial, alimentos, madeira, densidade de corrente de alto nível, identificação em setores de circuito de microondas planar e na indústria do papel [11].

3.3 Medidores de Espessura Ultrassônicos

O conceito de ultrassom, parte da idéia de som, o qual seus princípios e conceitos básicos podem ser explicados pelo efeito piezométrico, sendo que o som é uma forma de energia, que surge devido a aumentos e reduções periódicas da densidade do ar, compressão e rarefação [20].

Em 1880, Pierre Curie concluiu que os cristais anisotrópicos, quando submetidos a deformações mecânicas, são capazes de desenvolver cargas elétricas. Ao aplicarmos cargas mecânicas nas duas faces opostas de uma lâmina de cristal de quartzo, ocorrerá a formação de cargas elétricas com sinais contrários nessas faces. Aplicando uma tensão, o cristal contrai-se ou expande-se e ao aplicar uma tensão alternada, a superfície do cristal oscila para cima e para baixo, com um ritmo igual, produzindo uma onda ultrassônica [20].

Os ultrassons são ondas mecânicas que não podem ser sentidas pelo homem, pois possuem uma frequência acima dos 16kHz propagando-se em ciclos sucessivos de compressão e rarefação através de qualquer meio material [21].

O sinal ultrassônico não é retido por barreiras sólidas nem líquidas, além de permanecer sem qualquer degradação pelas condições dos processos, e pode ser monitorado em tempo real e no local de operação. No entanto, o ultrassom precisa ser calibrado a fim de correlacionar os níveis de atenuação acústica com as concentrações das fases dispersas [21].

O dispositivo transdutor de ultrassom contém um ou mais elementos piezoelétricos que ao serem submetidos a um pulso de tensão elétrica, vibram em suas frequências de ressonância emitindo o ultrassom. O elemento ativo do dispositivo transdutor de ultrassom é composto de um disco de cerâmica piezoelétrica, com eletrodos metálicos depositados nas faces paralelas e ao operar como transmissor, irá converter uma excitação elétrica em campo acústico, e ao operar como receptor irá converter a pressão do ultrassom em sinal elétrico [21].

3.4 Incerteza Padrão

Por melhor que seja a qualidade do sistema de medição, por mais cuidadoso e habilidoso que seja o operador e por mais bem controladas que sejam as condições ambientais, ainda assim, em maior ou menor grau, o erro de medição estará presente [22].

Repetitividade é a faixa de valores simétrica em torno do valor médio, dentro do qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado com uma certa probabilidade [22].

Incerteza Padrão é uma medida da intensidade da componente aleatória do erro de medição. Corresponde ao desvio padrão dos erros de medição [22].

A incerteza padrão de um sistema de medição para uma população finita é calculada pela equação 2, conforme abaixo:

Equação 2: Cálculo da Incerteza padrão

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}}$$

Fonte: Albertazzi (2008).

Onde:

u = Incerteza padrão

I_i = i-ésima indicação

\bar{I} = média das “n” medições.

n = número de medições repetitivas efetuadas

Para o cálculo da repetitividade utilizamos a equação 3 abaixo:

Equação 3: Cálculo da Repetitividade

$$Re = \pm t * u$$

Fonte: Albertazzi (2008).

Sendo:

t = coeficiente t de Student para 95,45% de probabilidade e $n-1$ de graus de liberdade.

O coeficiente t de Student para uma probabilidade de 95,45% é obtido na tabela 3, considerando o número de graus de liberdade (v), calculado pela equação $n-1$.

Tabela 3: Coeficiente de Students para 95,45% de probabilidade.

v	t	v	t	v	t	v	t
1	13,968	10	2,284	19	2,140	80	2,032
2	4,527	11	2,255	20	2,133	90	2,028
3	3,307	12	2,231	25	2,105	100	2,025
4	2,869	13	2,212	30	2,087	150	2,017
5	2,649	14	2,195	35	2,074	200	2,013
6	2,517	15	2,181	40	2,064	1000	2,003
7	2,429	16	2,169	50	2,051	10000	2,000
8	2,366	17	2,158	60	2,043	100000	2,000
9	2,320	18	2,149	70	2,036	∞	2,000

Fonte: Albertazzi (2008).

3.5 Manutenção

A manutenção já existe há séculos, mas somente passou a ser conhecida pelo termo “Manutenção” a partir do século XVI juntamente com o surgimento do relógio mecânico, gerando assim a necessidade de profissionais capazes de realizar a assistência e montagem dos mesmos, vindo a ser aperfeiçoada, devido a identificação de sua importância, ao longo da Revolução Industrial e consolidada com a Segunda Guerra Mundial [23].

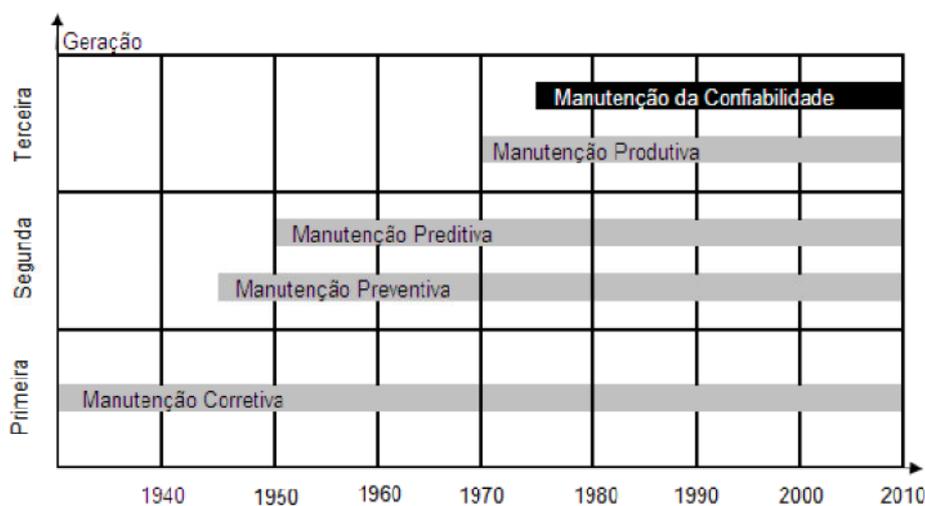
Talvez não percebamos, mas a manutenção, do latim *manus tenere*, que significa manter o que se tem, está presente na história humana há muito tempo, onde com a Revolução Industrial no fim do século XVIII, a manutenção ganhou maior relevância, diante do aumento da capacidade produtiva [24].

A manutenção tem uma importância estratégica na busca de uma maior disponibilidade e confiabilidade dos ativos, através da minimização de quebras

e falhas dos equipamentos, máquinas e sistemas, maximizando desta forma o uso dos recursos disponíveis, sendo que o seu objetivo básico é propiciar a continuidade operacional da planta, aumentando a disponibilidade e a confiabilidade dos ativos industriais, levando sempre em conta o menor custo possível, além de preservar a integridade do homem e do meio ambiente [25].

Em termos históricos a manutenção pode ser dividida em três gerações distintas, evoluindo ao longo do tempo, conforme a figura 7 [26].

Figura 7 – Evolução da manutenção



Fonte: Siqueira (2012)

Cada geração é caracterizada por um estágio diferente de evolução tecnológica dos meios de produção, e pela introdução de novos conceitos e paradigmas nas atividades de manutenção [26].

A primeira geração da manutenção compreende o período entre os anos de 1940 e 1950, sendo que neste período o grau de mecanização da indústria estava em seu estágio inicial, na maioria equipamentos simples e demasiadamente dimensionados para as suas funções. Por outro lado a demanda era gerada mais pelo restauro de produtos, do que por produtos novos e as atividades de manutenção se resumiam a limpezas e alguma lubrificação das máquinas e o tradicional quebra conserta.

Já a segunda geração, inicia no período pós Segunda Guerra Mundial, entre os anos de 1950 e 1970, neste período a demanda por produtos novos cresceu e a quantidade de mão de obra diminuiu. Assim as indústrias passaram a mecanizar mais as atividades, que antes eram manuais, e assim a disponibilidade dos ativos passaram a ter uma maior atenção, surgindo a manutenção preventiva, que consistia em fazer intervenções nos equipamentos em intervalos de tempo previamente estipulados, aumentando o custo da manutenção.

Ainda durante os anos 70 um maior investimento e estudo científico levaram ao desenvolvimento de técnicas de manutenção preventivas com o objetivo de minimizar o impacto das falhas e maximizar os ganhos produtivos, que junto com algumas ações preditivas, integraram o surgimento da Manutenção Produtiva Total (TPM – *Total Productive Maintenance*).

Na metade dos anos 70, exatamente a partir de 1975, as indústrias começaram a automatizar os seus processos. Máquinas cada vez mais automatizadas começaram a surgir e o consumo por bens começou a crescer em larga escala, desta forma as técnicas, até então desenvolvidas na área de manutenção, não entregam mais um resultado satisfatório, por outro lado com o aumento da concorrência, a importância de melhores resultados com os ativos existentes cresceu e junto com ela a importância da manutenção.

Nos últimos 30 anos as indústrias passaram a adotar uma filosofia de busca por redução de desperdícios e entre eles a redução de estoque, com a utilização do conceito de “*just-in-time*” (no momento certo) em seus processos produtivos aumentando desta forma a necessidade de um maior uso dos ativos, desta forma conceitos de disponibilidade técnica de equipamentos e confiabilidade passaram a ser mais conhecidos e estudados.

A visão histórica dos departamentos de manutenção é que estes existiam para consertar avarias nos equipamentos. Quando as paralisações dos equipamentos passaram a impactar mais profundamente no resultados das empresas, começaram a surgir novas técnicas com a finalidade de minimizar as paradas de máquinas por quebras, objetivo que inicialmente foi atingido com a manutenção preventiva, já que parecia ser menos dispendioso substituir peças regularmente, do que esperar até que elas finalmente quebrem [6].

O método de manutenção preditiva vai além da manutenção preventiva, pois permite detectar pequenos defeitos ou irregularidades nas máquinas, utilizando para isto diferentes tipos de sensores, tornando-se um método mais caro, mas que justifica o investimento, pois o monitoramento preditivo permite identificar exatamente as peças que necessitam realmente serem substituídas [6].

Conforme dados históricos americanos, o uso efetivo de manutenção preventiva e preditiva nos equipamentos elétricos reduz o custo com manutenção de 50% para 33%, o que é negligenciado pela maioria das fábricas no mundo [15].

3.5.1 Manutenção Preditiva

A aplicação de técnicas preditivas como manutenção dos ativos nas indústrias teve início na chamada terceira geração da manutenção a partir da década de 70. A qual teve a sua prática mais freqüente e ampliada na quarta geração, já no final da década de 90, pois permitia monitorar os ativos, sem a necessidade de interrupções da produção.

Entre 2006 e 2010, durante a quinta geração, onde a Gestão do Ativos passaram a ter uma grande importância na busca da competitividade, necessária a sobrevivência empresarial, foi quando a aplicação das práticas de manutenção preditiva tiveram o seu grande aumento.

A manutenção preditiva é uma técnica baseada no monitoramento e análise periódica de alguns parâmetros do equipamento em operação possibilitando a identificação de falhas antes que estas ocorram, permitindo realizar intervenções corretivas de forma planejada, precisa e quando é realmente necessário, maximizando assim a disponibilidade do equipamento [12].

A manutenção preditiva, também conhecida por manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento, pode ser definida da seguinte forma: É a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. Através de técnicas preditivas é feito o monitoramento da

condição e a ação de correção, quando necessária, é realizada através de uma manutenção corretiva planejada [27].

A NBR 5462 define a Manutenção Preditiva como a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva [27].

A Manutenção Preditiva [27] é a primeira grande quebra de paradigma na manutenção e tanto mais se intensifica, quanto mais o conhecimento tecnológico desenvolve equipamentos que permitam avaliação confiável das instalações e sistemas operacionais sem funcionamento.

Seu objetivo é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. Na realidade, o termo associado à Manutenção Preditiva é o de prever as condições dos equipamentos. Ou seja, a Manutenção Preditiva privilegia a disponibilidade à medida que não promove a intervenção do equipamento, pois o monitoramento é efetuado com o equipamento produzindo [27].

Quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido, é tomada a decisão de intervenção. Normalmente esse tipo de acompanhamento permite a preparação prévia do serviço, além de outras decisões e alternativas relacionadas com a produção. De forma mais direta, podemos dizer que a Manutenção Preditiva prediz as condições dos equipamentos, e quando a intervenção é decidida, o que se faz, na realidade, é uma manutenção corretiva planejada [27].

A Manutenção Preditiva são tarefas de manutenção preventiva que visam acompanhar a máquina ou as peças, por monitoramento, por medições ou por controle estatístico e tentam prever a proximidade da ocorrência da falha. O objetivo de tal tipo de manutenção é determinar o tempo correto da necessidade de intervenção mantenedora, com isso evitando desmontagens para inspeção, e utilizar o componente até o máximo de sua vida útil [24].

Na manutenção preditiva as inspeções periódicas limitam-se ao monitoramento de parâmetros que permitem identificar o estado operacional de um sistema ou equipamento, sendo este estado a existência de um funcionamento inadequado, estima-se a tendência evolutiva do problema e programa-se a parada para a correção antes que a falha aconteça [28].

Usar a manutenção preditiva significa “...que se intervirá sobre uma máquina de forma condicional, isto é, unicamente se os parâmetros de controle evoluírem de forma significativa para níveis que sejam considerados não admissíveis” [28].

A manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva [29].

3.5.2 Disponibilidade e confiabilidade

O termo disponibilidade, principalmente depois do sistema *Lean manufacturing* (produção enxuta) de produção, passou a ser de forma universal na indústria como um indicador de desempenho, o qual está associado diretamente a capacidade dos ativos estarem disponíveis para a produção.

O termo disponibilidade é como a capacidade de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados [29].

A manutenibilidade, é a probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos [29].

E confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar suas funções, sob condições específicas, durante um determinado intervalo de tempo [29].

A indisponibilidade, ou a falta de disponibilidade, de equipamentos reduz a capacidade produtiva do equipamento, aumentando custos e interferindo diretamente no resultado da empresa, ou seja, as falhas geram perdas significativas nos resultados almejados pela organização, assim a manutenção industrial e a engenharia da confiabilidade devem ser tratadas como ações estratégicas [30].

A confiabilidade permite estabelecer leis de falhas sistêmicas de dispositivos, o que permite minimizar a sua ocorrência [4].

Para a aplicação da confiabilidade é necessário um amplo conhecimento do produto ou equipamento, pois somente desta forma poderemos identificar com maior exatidão os modos e as causas de falhas [4].

O conceito de confiabilidade de uma unidade pode ser visto em termos da probabilidade de sobrevivência até um tempo “t” de interesse, sendo possível a determinação dessa probabilidade através da modelagem dos tempos até a falha da unidade em estudo. A modelagem dos dados é realizada frequentemente através de quatro distribuições: exponencial, Weibull, gama e lognormal [31].

3.6 Tribologia dos Materiais

A palavra tribologia foi cunhada em 9 de maio de 1966 significando a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos relacionados [32][3][54].

O termo tribologia, que vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” [34][35].

A superfície de um componente/equipamento é uma região que merece atenção, uma vez que é nesse local que a maioria dos processos de falhas iniciam. O campo da ciência que estuda as superfícies de contato de

movimento relativo, ou seja, que lida com fenômenos que envolvem atrito e desgaste, chama-se tribologia [36][37].

A tribologia estuda os assuntos e as práticas relacionadas com o atrito, o desgaste e a lubrificação, sendo uma área de interesse econômico, científico e tecnológico [34][38][39].

Tribologia é um campo da ciência que aplica uma análise operacional para problemas de grande importância econômica, tais como confiabilidade, manutenção e desgaste dos equipamentos técnicos na interação das partes móveis, como engrenagens, rolamentos, acoplamentos, vedações, cames, embreagens, dentre outros componentes [34][38][15][40].

Outras consequências do desgaste se somam a essa, como custo da produção cessante, os riscos ambientais de vazamento dos produtos e a segurança dos trabalhadores, justificando o investimento nos estudos científicos e desenvolvimentos tecnológicos na área [32].

Dessa forma, a redução e o controle do desgaste em ambientes industriais são de extrema importância, uma vez que pode ser atribuído a esses fatores o aumento da vida útil e o desempenho de máquinas equipamento [36][41].

De modo bastante amplo, o fenômeno de desgaste pode ser definido como a deterioração não intencional de um material resultante do uso ou da interação com o meio ambiente [36][42].

O desgaste [34] pode ser classificado das seguintes formas:

- Desgaste adesivo, quando os filmes são ineficazes, gerando desgastes mais leves devido a tensões repetitivas chamadas de desgaste por fadiga;
- Desgaste por abrasão, causado por partículas duras na superfície do material;
- Desgaste erosivo, provenientes do impacto de partículas contra a superfície;
- Desgaste corrosivo, quando o material da película é formado por ataque químico, este leva ao desgaste corrosivo, quando o oxigênio atmosférico é o agente corrosivo e também ao desgaste oxidativo;

- Desgaste por impacto, causado pelo impacto entre dois sólidos;
- Desgaste em altas temperaturas, quando as cargas de contato e as velocidades são suficientemente elevadas para permitir que as camadas da superfície fundem-se.

Existem vários tipos de desgaste, dos quais é possível destacar o desgaste por erosão e por abrasão, sendo que a solução para uma determinada situação dependerá da identificação das características deste desgaste, as quais serão analisadas no estudo do tribossistema, que compõe este problema [32].

Um conceito importante de ser assimilado em estudos de desgaste é o de tribossistema, ou sistema tribológico. Corresponde a todas as características de um sistema fechado, que tem entradas e saídas. Dentre outras, destacam-se [32]:

- Variáveis operacionais: movimento, força, velocidade, temperatura;
- Estrutura do sistema: elementos, propriedades, relações;
- Saídas úteis: movimento, informação, energia, materiais;
- Perdas: desgaste, calor, ruído, vibração.

No geral, o desgaste não ocorre por apenas um mecanismo, e por isso, o entendimento de cada forma de desgaste é importante para que o processo possa ser entendido, ao passo que o mecanismo de desgaste dominante pode mudar por razões que incluem a mudança nas propriedades dos materiais, formação de película e ainda na medida em que o desgaste acontece [36].

Portanto a resistência ao desgaste não é uma característica intrínseca de um material ou uma peça, assim como dureza, resistência à compressão, resistência à flexão, mas sim consequência de todo o tribossistema no qual está inserido [32].

Os processos de desgaste e atrito nos metais foram os primeiros a serem observados, onde a transferência de metal pode ser seguida por oxidação do metal transferido, a última fase deste processo considerada desgaste moderado é dada pelo atrito dos óxidos metálicos [34].

A temperatura também exerce influência no desgaste erosivo, pois pode fundir o material causando a erosão e aumentando a taxa de desgaste, sendo assim as propriedades mecânicas do material como a temperatura de erosão e a taxa de desgaste estão relacionadas, onde à temperatura elevada, o metal

oxida e a corrosão acelera a taxa de desgaste, fazendo com que o material seja removido da superfície erodida como um óxido frágil [34].

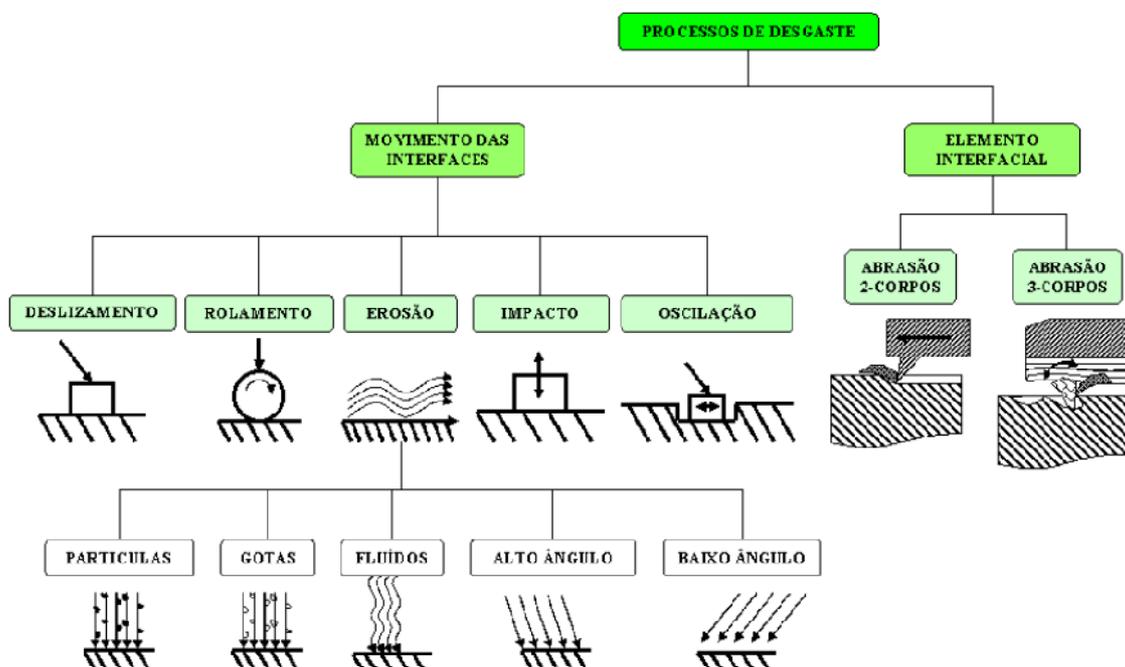
O conhecimento dos mecanismos de desgaste impacta diretamente na tecnologia dos novos materiais, pois suas consequências determinam alterações geométricas em ferramentas e componentes. Se não forem bem entendidos, podem resultar na redução dos padrões de qualidade dos produtos finais [36][43].

Em geral, o desgaste ocorre através de mais de um modo, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada modo se torna importante [34][44].

Dessa forma, variando-se o tribossistema, variam-se as resistências ao desgaste e a vida útil dos materiais, sendo essa a maior dificuldade em se fazer previsões de durabilidade [32].

A Figura 8 abaixo ilustra um resumo destes mecanismos de desgaste:

Figura 8: Diagrama dos processos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces.



Fonte: Kato (2001)

O desgaste ocorre em função da cinemática do sistema. Pode variar entre, deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, dependendo do tipo de interação e do movimento das interfaces. A erosão pode ainda ser classificada pelo estado físico do contracampo, sólido ou líquido, ou pelo ângulo de ação, alto ou baixo [34].

3.6.1 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando um objeto sólido é movimentado contra as partículas de um material que tem dureza igual ou maior que a da superfície do objeto sólido. Um exemplo comum deste problema é o desgaste de pás em máquinas de terraplanagem, que com o tempo de utilização perdem sua função devido ao desgaste do contato com o solo [34].

O desgaste abrasivo é comumente encontrado em equipamentos industriais, sendo ele, algumas vezes, o principal responsável pelo desgaste superficial das máquinas e/ou seus componentes. Esse dano, mesmo que não seja catastrófico, pode reduzir drasticamente a eficiência de uma manufatura, provocado por um aumento na perda de energia, consumo de óleo e das taxas de manutenção [36].

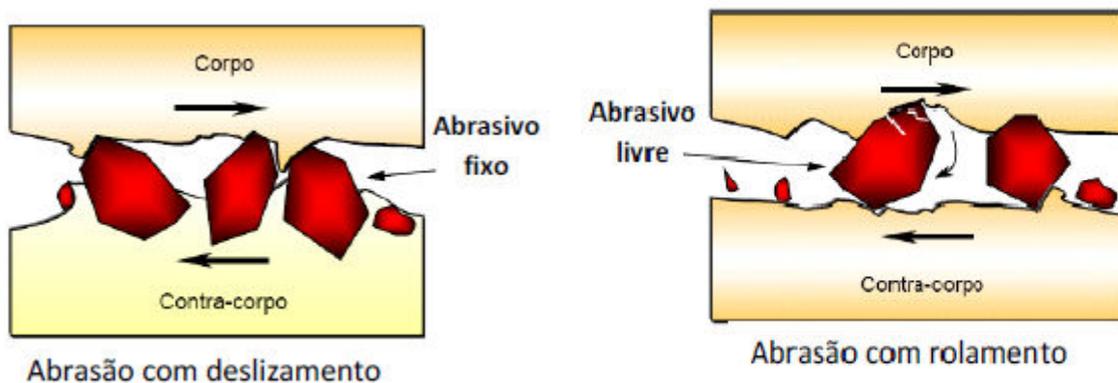
A abrasão é o desgaste gerado por materiais duros forçados contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida [32][45]. Os mecanismos de desgaste podem ser por deformação plástica ou fratura frágil. É possível que os dois mecanismos ocorram simultaneamente, mesmo em materiais que são classificados como frágeis. Nos materiais cerâmicos a deformação plástica possui menor importância [32][46].

O desgaste abrasivo é a mais [47] frequente forma de ocorrência em inúmeros segmentos industriais, contribuindo com cerca de 50% dos problemas industriais envolvendo desgaste podendo-se citar sua ocorrência em serpentinas (mais especificamente nos suporte dos tubos) de fornos de processos, onde o ensaio por desgaste abrasivo faz parte do planejamento para inspeção desses equipamentos [21].

O desgaste abrasivo pode ser classificado também quanto à movimentação das partículas sobre a superfície, sendo de deslizamento e rolamento [46].

O desgaste abrasivo por deslizamento é ocasionado devido à movimentação de partículas duras impregnadas em um contra-corpo ou asperidades duras entre as superfícies em contato, como pode ser visto na Figura 9a. O desgaste por rolamento é ocasionado por partículas que rolam sobre a superfície dos corpos que estão em movimento relativos, como ilustrado na Figura 9b, onde este tipo de desgaste pode evoluir para o deslizamento quando as partículas de alta dureza se impregnam em uma das superfícies dos corpos [48].

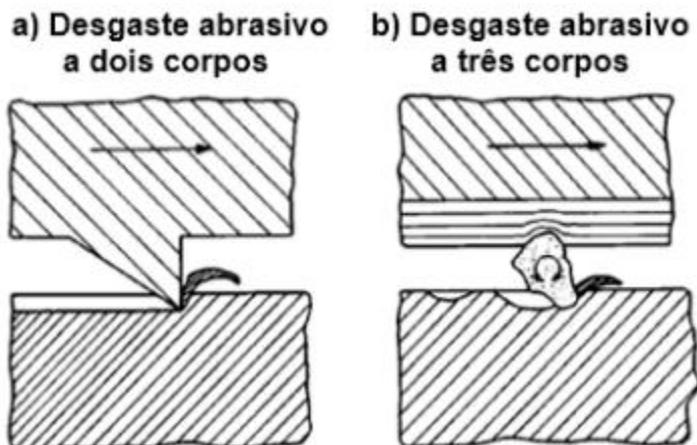
Figura 9: Configuração mecânica do processo de desgaste abrasivo por:
a) Deslizamento b) Rolamento



Fonte: Silva (2017).

A abrasão ocorre de dois modos distintos, denominados desgaste por abrasão de dois e três corpos. A abrasão a dois corpos refere-se a um material duro e rugoso deslizando sobre um material mais mole, enquanto a abrasão a três corpos se refere à introdução de partículas duras entre duas superfícies deslizantes, sendo pelo menos um dos dois corpos mais mole do que as partículas [36], conforme mostra a Figura 10.

Figura 10: Formas de desgaste abrasivo.



Fonte: Gomez (2014), apud Zum Gahr (1987)

No geral, no desgaste de dois corpos as partículas são rígidas e no desgaste a três corpos as mesmas são livres para movimentar-se. A natureza destes dois tipos de desgaste é muito similar e, o desgaste abrasivo entre dois corpos pode se tornar em uma combinação de dois e três corpos na medida que o fragmento do desgaste é aprisionado entre a superfície e o desgaste [36][49].

O desgaste abrasivo é a forma mais rápida de desgaste e o maior causador de prejuízos para a indústria, por isto vários métodos de controle do desgaste abrasivo têm sido desenvolvidos para evitar prejuízos. A maneira mais comum de controlar ou evitar o desgaste abrasivo é aumentar a dureza da superfície a ser desgastada no mínimo 80% da dureza do abrasivo. Isto pode causar o endurecimento do material levando-o a fragilidade [34][16].

3.6.1 Desgaste erosivo

Erosão por impacto de partícula sólida ocorre quando sólidos discretos atingem uma superfície, diferente do desgaste abrasivo, quando as partículas são pressionadas e arrastadas contra a superfície [32][46].

O desgaste erosivo é definido como a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica com um fluido, um fluido multi-componente ou impacto de líquido ou de partículas sólidas [36].

O desgaste erosivo é provocado pelo impacto repetitivo de partículas sólidas ou líquidas ou implosão de bolhas formadas em um fluido contra uma superfície de um corpo sólido [34][50].

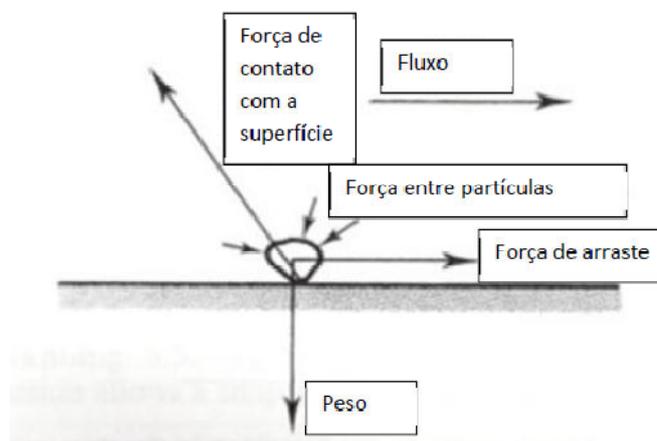
Tribossistemas de desgaste erosivo podem ser caracterizados como sistemas abertos, ou seja, o erosivo está sendo constantemente substituído. O desgaste erosivo é causado nos corpos sólidos pela ação de impacto. O ângulo de incidência das partículas influencia o desgaste substancialmente, e pode inclusive modificar os mecanismos [32][46].

O ângulo e a velocidade de impacto, a forma, a dureza e o tamanho da partícula, juntamente com a taxa de fluxo, são as variáveis consideráveis para este tipo de desgaste. A temperatura também deve ser considerada, pois pode fundir o material erodido e aumentar o desgaste [34].

As variáveis envolvidas no desgaste erosivo influenciam nos mecanismos de desgaste do material, tendo consequências diretas na taxa de desgaste [34][51]. Cada tipo de desgaste erosivo possui seus mecanismos específicos de degradação que dependem da configuração do tribossistema [34][48].

Os tipos de força vinculados ao processo erosivo estão indicados na Figura 11:

Figura 11: Forças envolvidas no processo de desgaste de erosão por partícula sólida.



Fonte: Hutchings (1992).

O desgaste erosivo é função das propriedades das partículas erosivas, material alvo, velocidade do erodente, taxa de alimentação, ângulo de impacto e meio ambiente [36][37].

Os fatores que influenciam esse desgaste serão discutidos a seguir:

a) Propriedades das partículas: A taxa de desgaste é fortemente influenciada pela dureza das partículas impactantes. O comportamento está relacionado com a razão entre a dureza da partícula erosiva e a dureza do material desgastado.

b) Velocidade de impacto: A velocidade das partículas no momento do impacto com a superfície desgastada tem grande influência na taxa de erosão EWALD [36].

Quando uma menor velocidade da partícula é aplicada, ocorre deformação plástica, seguida de um afundamento da partícula erodente sobre o material de aço de destino. Em alta velocidade, o efeito de erosão é combinado entre impacto e cisalhamento [36].

c) Ângulo de impacto: O ângulo de impacto é definido como o ângulo entre o movimento da partícula e o plano da superfície desgastada. O efeito do ângulo é determinado pela natureza dos materiais. Para materiais dúcteis, a taxa de erosão acentuada aumenta com o ângulo de impacto, com um máximo entre 15° e 40° [36][37].

Ângulos de incidência normal têm sua taxa de desgaste reduzida em até um terço [36][51].

A resistência dos materiais a este tipo de desgaste varia com o ângulo de colisão ou de incidência, morfologia, tamanho e velocidade das partículas cortantes sobre a superfície de desgaste [36][42].

Alguns indicam ser o módulo de elasticidade o principal aspecto a ser modificado para se obter uma maior resistência ao desgaste erosivo. Foi identificado que, quanto menor o valor do módulo de elasticidade, maior a resistência a esse desgaste [32][52].

Outro estudo indica a importância da baixa porosidade[32][53], já outro registra que não foi observado o aumento do desgaste por erosão com o aumento da porosidade [32][54].

No desgaste erosivo, a perda de volume é dependente principalmente da energia de impacto das partículas quando atingem a superfície, gerada pela velocidade da partícula e massa [32][47].

Em diferentes temperaturas o fenômeno de desgaste modifica. Com o aumento de temperatura de 25 °C para 1000 °C, o valor do volume de desgaste diminui [32].

Existem basicamente seis formas nas quais a erosão pode acontecer, sendo elas: erosão por partículas sólidas em meio gasoso, erosão por partículas sólidas em meio líquido, erosão devido à ação de líquidos, erosão-corrosão, erosão por cavitação e a erosão térmica. Ainda é possível que mais de uma forma de erosão aconteça simultaneamente [36][51].

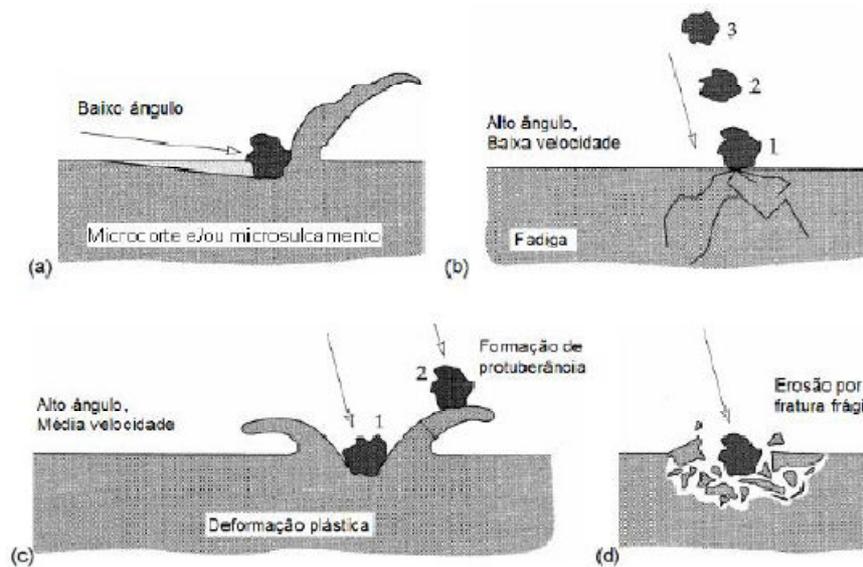
Os mecanismos de erosão conhecidos atualmente são compostos basicamente pelo corte, sulcamento, deformação plástica e fratura frágil, sendo que os mecanismos de sulcamento e corte são os semelhantes encontrados na abrasão [36].

Os mecanismos de corte e sulcamento são semelhantes aos encontrados no desgaste abrasivo [34][46], desta forma o microsulcamento é definido como o deslocamento do material para o lado ou a frente da partícula abrasiva em deslocamento.

Já quando há predominância de deformação plástica e da fratura frágil, as maiores taxas são encontradas com a incidência das partículas abrasivas em ângulos normais, caracterizando um comportamento frágil [36][48].

A Figura 12 representa os principais mecanismos de erosão por partículas sólidas: a) microcorte ou microsulcamento – baixo ângulo de incidência; b) fadiga – altos ângulos e baixa velocidade, c) deformação plástica – alto ângulo e média velocidade e d) fratura frágil [36][50].

Figura 12: Representação esquemática dos mecanismos de erosão por partículas sólidas.

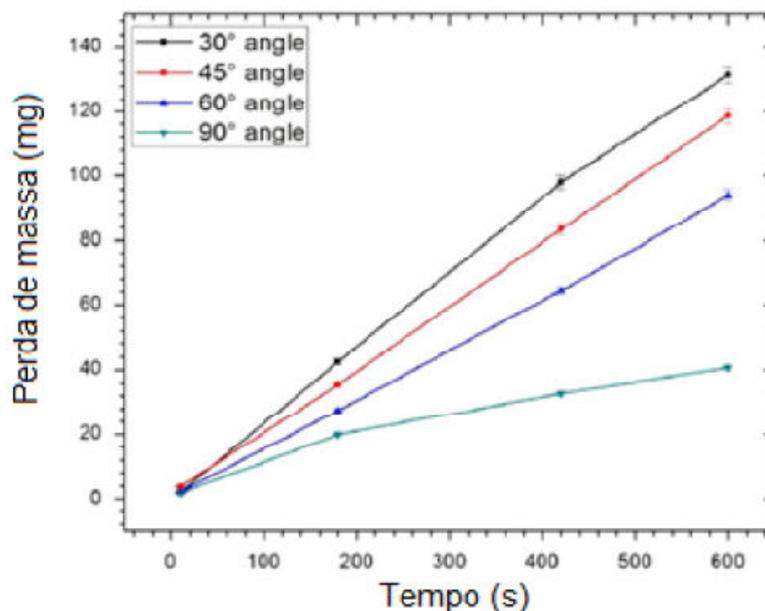


Fonte: Felipe (2017).

Mecanismos de desgaste também são diferentes conforme o ângulo adotado. Para ângulos de 90° tem-se danos por deformação plástica e para ângulo de 30° ocorrem dois mecanismos: a deformação por microsulcamento e deformação plástica [36].

Um estudo do efeito da microestrutura do aço AISI 1018, onde, uma das suas variáveis foi o ângulo de incidência do erodente, onde, por meio da figura 13 é possível perceber que entre os ângulos de 30 a 90° , quanto menor o ângulo, maior a taxa de desgaste [26]. A justificativa é que ângulos oblíquos causam eventos de erosão individuais (que não estão associados a outros mecanismos), causando maior destruição da superfície alvo. Mecanismos de desgaste também são diferentes conforme o ângulo adotado. Para ângulos de 90° tem-se danos por deformação plástica e para ângulo de 30° ocorrem dois mecanismos: a deformação por microsulcamento e deformação plástica [36].

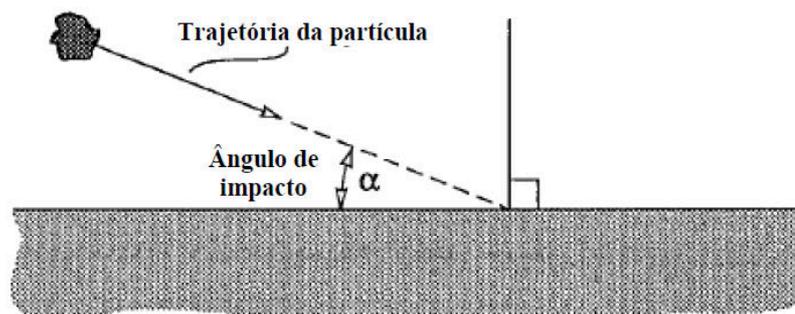
Figura 13: Influência do ângulo de impacto no desgaste do aço AISI 1018.



Fonte: Islam (2014).

O ângulo de impacto é o ângulo entre a superfície corroída e a trajetória das partículas, imediatamente antes do impacto contra a superfície, podendo variar de 0 a 90° conforme mostrado na Figura 14 [34].

Figura 14: Ângulo de impacto de uma partícula causando erosão na superfície.



Fonte: Stachowiak (2007).

O baixo ângulo de impacto favorece o processo de desgaste, similar ao desgaste abrasivo, devido à tendência de as partículas se arrastarem sobre a superfície após o impacto. O alto ângulo de impacto favorece mecanismos de desgaste que são característicos da erosão. Quando ocorre alta taxa de erosão e baixo ângulo de impacto, prevalece o desgaste por fratura dúctil. Caso a taxa

máxima seja encontrada para altos ângulos de impacto, o desgaste frágil predomina [55].

A velocidade da partícula erosiva tem muita influência no processo de desgaste. Se a velocidade for baixa, a tensão do impacto não é suficiente para causar deformação plástica, então o desgaste ocorre por fadiga da superfície. Quando a velocidade aumenta, a erosão da superfície acontece por deformação plástica com o impacto da partícula [34].

O tamanho da partícula também é de considerável importância, tamanhos na faixa de $5\mu\text{m}$ a $500\mu\text{m}$, causam o desgaste erosivo, o que não significa que esta faixa de tamanhos seja referência, pois partículas minúsculas também causam desgaste erosivo [34][55][56][57].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os instrumentos de medição e o material utilizado para a coleta de dados deste trabalho.

Também será descrita neste capítulo a metodologia utilizada e alguns procedimentos necessários para a execução da coleta de dados com total segurança e confiança, pois como se trata de uma atividade dentro de uma empresa em operação, estes cuidados além de obrigatórios, foram essenciais para a execução da atividade de coleta de dados, afim de atender o objetivo estabelecido para este trabalho.

O principal objetivo desse estudo foi analisar a aplicação da termografia infravermelha como método de manutenção preditiva, associada a um medidor de espessura para a identificação prematura de eventos de ruptura em tubulações de transporte de grãos, através da perda de espessura na parede das tubulações industriais.

Para isto, como trata-se de um trabalho com um objetivo de aplicação prática de uma técnica de manutenção, buscou-se na região a possibilidade de empresas, que permitissem este tipo de estudo. Um ponto preponderante para a escolha da empresa foi à existência de uma proximidade e um relacionamento, que permitisse o acesso, entre a empresa e o autor deste trabalho.

Desta forma foi escolhida uma empresa situada na cidade de Rio Grande (RS), que atua no ramo industrial de extração de óleos vegetais e produção de farelos, além do beneficiamento, logística e armazenagem de grãos e embarques portuários de granéis sólidos e líquidos.

Após os trâmites obrigatórios de segurança da empresa para acesso a área industrial, com o uso de um Termógrafo e de um Medidor de Espessura Ultrassônico, acompanhou-se por um determinado intervalo de tempo, em campo, uma tubulação de transporte de grãos por gravidade identificando a sua taxa de perda de espessura.

4.1 Instrumentos de Medição

Para a execução deste trabalho foram utilizados dois instrumentos de medição, inicialmente, de forma isolada, uma Câmera Termográfica Infravermelha e em um segundo momento um Medidor Ultrassônico de espessura associado à Câmera Termográfica Infravermelha.

4.1.1 Câmera Termográfica Infravermelha

A câmera termográfica infravermelha utilizada foi uma câmera de marca Fluke modelo Ti9, conforme figura 15 abaixo:

Figura 15: Câmera Termográfica Infravermelha



Fonte: Acesso em www.salcas.com.br

A câmera termográfica, ou Termovisor Fluke TI9 é um instrumento básico para técnicos e eletricitas, trata-se de um equipamento robusto, que basta apontar, focar e apertar o gatilho para capturar a imagem completa, mostrando os pontos quentes que podem indicar falha iminente do equipamento [58].

Este equipamento possui uma resolução de 160 x 120, e uma gama de medição de temperatura (não calibrada abaixo de -10 °C) de -20 °C a +250 °C (-4 °F a +482 °F), com uma precisão de Precisão: ± 5 °C ou 5% (o que for maior) [57].

4.1.2 Medidor Ultrassônico de Espessura

Como instrumento de medição da espessura da parede da tubulação foi utilizado um medidor ultrassônico de espessura, modelo TM 8811, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16: Medidor Ultrassônico de espessura



Fonte: Acesso em www.impotecnica.com.br.

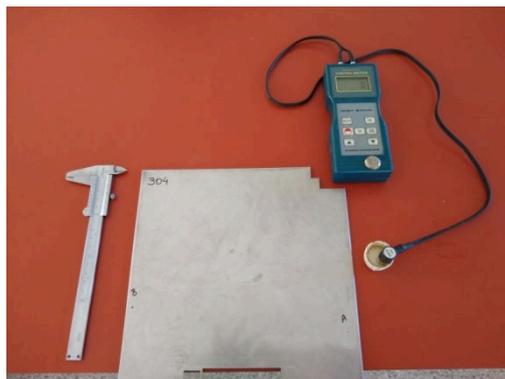
O medidor ultrassônico de espessura TM8811 possui um display de cristal líquido (LCD) de 4 dígitos, 10mm, sendo apropriado para medir a espessura de materiais de superfície rígida como aço, ferro, alumínio, cobre, latão, vidro, polietileno, PVC, ferro fundido cinza e ferro fundido nodular. O equipamento possui uma escala de 1,5 a 200 mm, uma resolução de 0,1 mm, com precisão de $\pm 0,5\% + 0,2$, velocidade do som de 500 a 9000 m/s, é alimentado por 4 pilhas 1,5 AA e trabalha em um intervalo temperatura de 0 a 50°C [59].

4.1.2.1 Comparação do Medidor Ultrassônico de Espessura com um Paquímetro

Foi realizada uma atividade comparativa entre um paquímetro calibrado e o medidor de espessura com a finalidade obter maior credibilidade ao instrumento de medição utilizado.

Conforme mostra a figura 17, foi utilizada uma chapa inox de 3,18 mm e em sua superfície, aleatoriamente, foi escolhido dois pontos, A e B, onde foram feitas 5 medições para cada ponto utilizando inicialmente o paquímetro e depois o medidor de espessura.

Figura 17: Atividade comparativa de medição



Fonte: Próprio autor.

Os valores obtidos da medição são apresentados na tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Resultados de medição da atividade comparativa.

Medição		1	2	3	4	5	Média
Instrumento	Ponto	Valores (mm)					
Paquímetro	A	3,2	3,2	3,3	3,2	3,2	3,2
Medidor espessura		3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Paquímetro	B	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Medidor espessura		3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1

Fonte: Próprio autor.

4.1.2.1.1 Cálculo da Estimativa da Incerteza Padrão

Com o objetivo de obter um valor de medição do medidor ultrassônico de espessura o mais próximo do valor do mensurado, foi feita uma atividade comparativa deste com um paquímetro calibrado.

Embora todo o processo de medição seja composto de erros sistêmicos e aleatórios, nesta atividade comparativa entre os dois instrumentos consideramos apenas o erro associado ao erro aleatório, através da estimativa da Incerteza Padrão, desta maneira foi calculada a Repetitividade.

Desta forma a tabela 5, abaixo, representa os valores de repetitividade encontrados para as medições realizadas nos pontos A e B, utilizando-se um paquímetro e o medidor ultrassônico de espessura.

Tabela 5: Estimativas de repetitividade calculadas.

Ponto A			Ponto B		
	Paquímetro	M. Ultrassônico		Paquímetro	M. Ultrassônico
n	$(I_i - \bar{I})^2$	$(I_i - \bar{I})^2$	n	$(I_i - \bar{I})^2$	$(I_i - \bar{I})^2$
1	0	0,01	1	0	0
2	0	0	2	0	0
3	0	0	3	0	0
4	0,01	0	4	0	0
5	0	0	5	0	0
u	0,05	0,05	u	0	0
Re	0,1	0,1	Re	0	0

Fonte: Próprio autor.

A tabela 6 traz os resultados de medição dos pontos A e B para o paquímetro e o medidor ultrassônico com a estimativa da repetitividade.

Tabela 6: Resultados de medição corrigidos.

	Ponto A (mm)	Ponto B (mm)
Paquímetro	3,2 ± 0,1	3,2
M. Ultrassônico	3,1 ± 0,1	3,1
Valor Mensurando	3,18	3,18

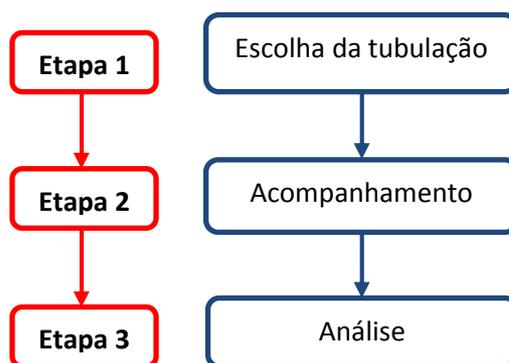
Fonte: Próprio autor.

Observe que os resultados encontrados entre o paquímetro e o medidor ultrassônico de espessura são valores de medição muito próximos, onde a pouca diferença do resultado de medição e o valor real do mensurado podem ter origem nos erros sistêmicos, que estão relacionados [22] a parcela imprevisível do erro de medição.

4.2 Etapas e Método Utilizado

Conforme o fluxograma 1, este trabalho foi executado em três etapas, que foram:

Fluxograma 1 – Sequência das etapas do trabalho.



Fonte: Próprio Autor

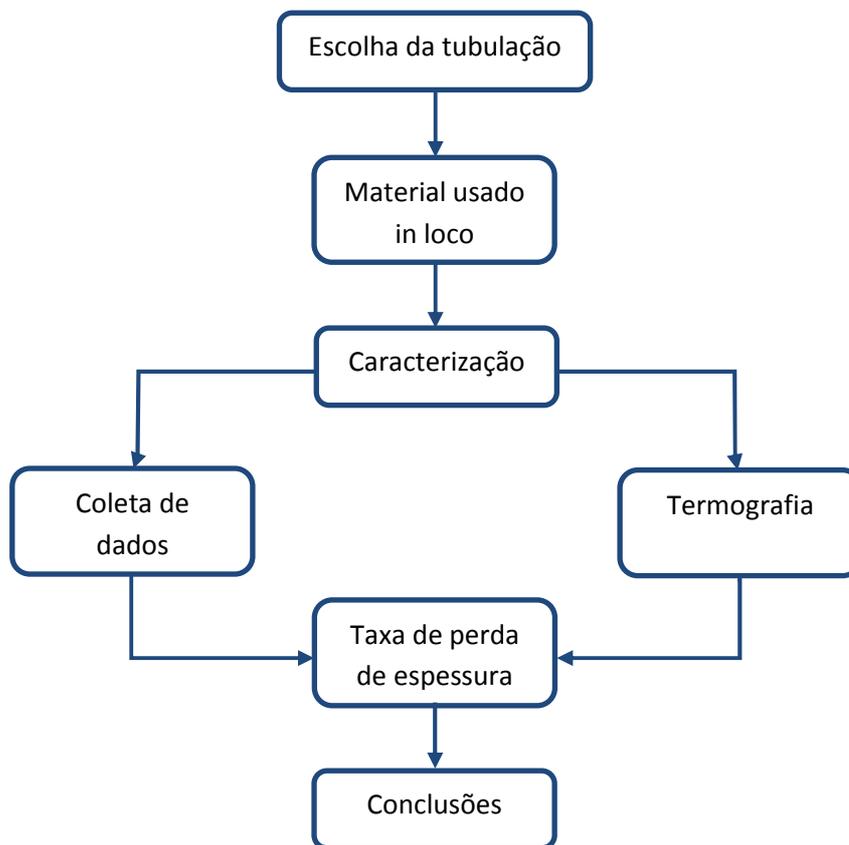
A **primeira etapa** deste trabalho foi de escolher a tubulação, dentro da área industrial, que permitisse a aplicação das técnicas propostas neste trabalho.

Na **segunda etapa**, uma vez escolhida a tubulação iniciou-se o acompanhamento necessário, através da termografia e medição da espessura da chapa de construção da tubulação.

E por final, na **terceira etapa** foi realizada a discussão e a análise dos dados coletados em campo da taxa de perda de espessura da chapa e do mapa termográfico.

O fluxograma 2, abaixo, representa a sequência de atividades em todas as etapas deste trabalho, que nortearam a execução deste projeto.

Fluxograma 2 – Sequência das atividades do projeto.



Fonte: Próprio Autor.

4.2.1 Escolha da Tubulação

Inicialmente com a ajuda de alguns colaboradores do setor de manutenção da empresa foram identificadas algumas tubulações de transporte de grãos que poderiam ser objeto deste trabalho.

Então nestas tubulações foram identificados pontos onde a passagem do grão gerava na tubulação um aumento de temperatura, capaz de ser identificado pelo termógrafo, através de um mapa termográfico, que poderia indicar um certo potencial de colapso, ou seja de ruptura da chapa.

Outro ponto importante para a escolha da tubulação foi a necessidade de que a mesma deveria ter uma operação, um uso contínuo, pois isto evitaria a não possibilidade de execução de uma coleta, devido a tubulação não estar em uso.

Foi escolhida então a tubulação da caída do Redler para o pé do Elevador no setor de Preparação, conforme a figura 18, pois além de o termógrafo apontar um potencial de colapso da sua estrutura, esta tubulação já apresentava alguns remendos devido ter apresentado rupturas no passado.

Figura 18: Tubulação escolhida para o trabalho.



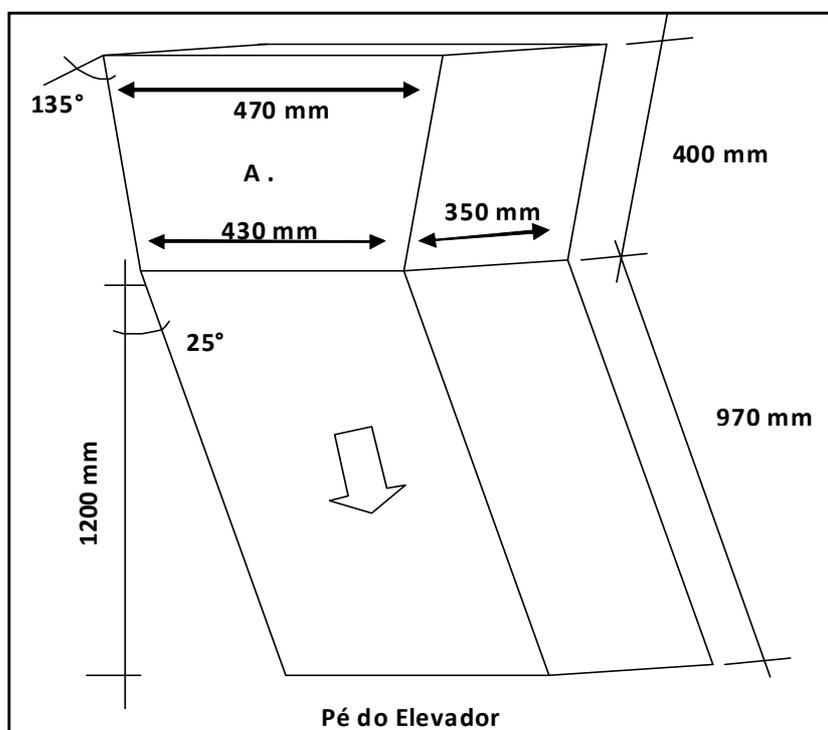
Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Caracterização do Material

Após escolher a tubulação foi identificado junto a Gerência de Manutenção da empresa algumas informações referentes a tubulação, como material de construção, espessura inicial, data de instalação e alguns aspectos relacionados a operação e características identificadas em manutenções de reparos no passado.

Foi informado que a tubulação em estudo foi instalada há 3 anos, embora não exista um registro formal desta informação, apenas o registro no conhecimento do pessoal da manutenção. A tubulação escolhida para o estudo é uma tubulação retangular com dimensões de 430x350x400 mm na sua parte inferior e 470x350x400 mm na parte superior, conforme mostra a figura 19 para transporte de grãos por gravidade, que faz a transferência do grão de soja do Redler para o pé do Elevador de Canecas, construída em chapa de aço galvanizado 1020 com espessura inicial de 4,76 mm.

Figura 19: Esboço das dimensões da tubulação.



Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Coleta de Dados

Para iniciar o acompanhamento do comportamento da chapa da tubulação foram pré-determinados 3 pontos para serem analisados, 2 sobre a área da tubulação e 1 fora da tubulação, conforme está identificado na figura 20.

Figura 20: Pontos de medição: A) ponto na superfície da chapa com perda de espessura; B) ponto fora da chapa; C) ponto na superfície da chapa sem considerável perda de espessura



Fonte: Próprio autor.

O ponto A é o ponto de maior potencial de colapso da tubulação, identificado através do termógrafo, devido a grande variação de temperatura apresentado com relação aos demais pontos da superfície da tubulação. O ponto C está sobre uma área da tubulação que apresentou um valor de temperatura mais próximo da temperatura ambiente, indicando desta forma um baixo potencial de colapso e o ponto B representa um ponto fora da área da tubulação apresentando apenas a temperatura ambiente.

A partir deste momento foram realizadas 4 (quatro) coletas de dados nos pontos escolhidos. Cada coleta de dado iniciou com uma medição termográfica, identificando para o ponto A os valores da maior temperatura, da temperatura mais baixa e a temperatura média.

E após foram feitas as medições da espessura da chapa nos pontos A e C, conforme sequência abaixo:

1. Calibrar medidor
2. Aplicar gel no medidor
3. Medir ponto A
4. Anotar valor
5. Limpar medidor
6. Calibrar medidor
7. Aplicar gel no medidor
8. Medir ponto B
9. Anotar valor

Esta sequência de medição foi repetida por 5 vezes em cada ponto, durante cada coleta, obtendo-se ao final um valor médio das medições para os pontos A e C.

Para registrar os valores de temperatura e espessura de parede coletados, foi utilizado uma folha de coleta de dados, que se encontra no apêndice A e como é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Planilha de dados.

PONTOS COLETA	Temperatura A (°)			Temp. B (°)	Temp. C (°)	Data	Espessura ponto A	Espessura ponto C
	Máx.	Min.	Média					
1								
2								
3								
4								

Fonte: Próprio autor.

4.2.4 Cálculo da Estimativa do Tempo Útil Remanescente da Tubulação

Para o cálculo da estimativa da vida útil remanescente da tubulação utilizou-se os valores coletados da espessura da chapa no período deste trabalho, para plotar um gráfico de barras.

Algumas considerações iniciais foram importantes, como considerar o acompanhamento do tempo de vida da tubulação em dias, sendo que o momento da fabricação da tubulação para esta avaliação é o dia zero, desta forma no dia zero a espessura da chapa da tubulação era a nominal, ou seja, 4,76 mm. O intervalo entre o dia zero e o dia da primeira coleta foi de 1095 dias, ou seja, 3 anos, conforme informado pelos manutentores.

Após plotar o gráfico de colunas, foi adicionada uma linha de tendência logarítmica, por ser mais usual em uma extrapolação em função do tempo.

Com a equação logarítmica em função da estimativa de tendência da perda de espessura pela chapa ao longo de sua vida útil, foi possível extrapolar os dados e identificar em períodos específicos o valor de perda de espessura da chapa, que uma vez diminuída do valor inicial da espessura chapa identificou-se a estimativa do valor da espessura da chapa nestes períodos, inclusive, estimar em quanto tempo de uso a chapa romperia totalmente, chegando ao valor de vida útil remanescente da mesma.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Para que a análise e discussão dos resultados encontrados neste projeto, fosse a mais completa e próxima da realidade foi importante conhecer o histórico de manutenções realizadas na tubulação.

Embora a empresa não possua um controle formal das tubulações, a experiência e o conhecimento dos manutentores, ajudou e permitiu uma análise, embora um tanto quanto superficial, mas norteada pela bibliografia existente, da trajetória de comportamento do material, dando suporte para os dados coletados durante a execução deste trabalho.

5.1 Histórico de Manutenção

Através da equipe de Engenharia da gerência de Manutenção foi identificado que a tubulação em estudo, conforme figura 18, foi instalada há 3 anos. Trata-se de uma tubulação de transporte de grãos por gravidade construída em chapa de aço galvanizado 1020 com espessura inicial de 4,76 mm.

Esta tubulação, diferente de outras existentes na empresa, não possui revestimento interno com chapas de sacrifício, escolha esta feita, segundo a empresa, devido as suas dimensões e ao custo de revestimento, sendo mais viável o monitoramento visual e a realização de pequenos reparos até a necessidade de sua substituição.

Segundo os relatos da equipe de Engenharia esta tubulação em manutenções anteriores nunca apresentou nenhum tipo de deformação em torno dos pontos de ruptura, ela simplesmente rompe. Aparentemente os pontos de ruptura vão perdendo espessura até chegar o momento que o contato do grão com a tubulação a rompe neste ponto.

Ainda conforme os relatos dos manutentores, a chapa começa a apresentar pequenos furos, muito próximos, normalmente todos localizados na mesma região da chapa, e em determinado momento toda esta região rompe.

Mas é necessário destacar que a empresa não tem, embora de suma importância, um foco de Engenharia de Manutenção para estas tubulações baseado no histórico de reparos e substituições como tem para os equipamentos mecânicos, sendo estes relatos baseados apenas na experiência dos manutentores.

5.2 Medições na Tubulação

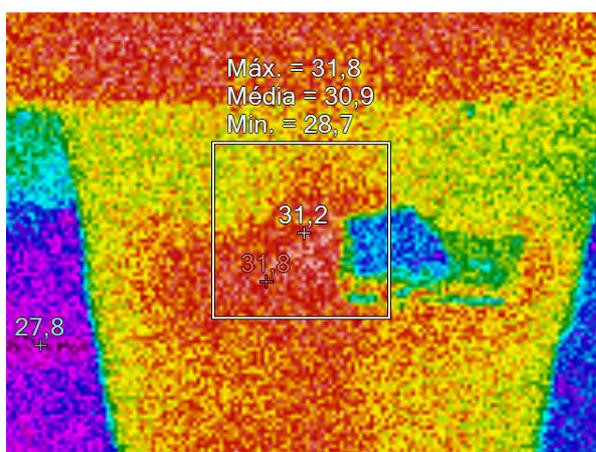
Foram realizadas 04 (quatro) coletas de dados em campo, dentro da empresa, sempre com a tubulação em uso, utilizando-se a câmera termográfica para gerar o mapa termográfico e o medidor de espessura para identificar o valor da espessura atual da chapa, como mostra a folha de coleta de dados, que se encontra no apêndice B.

Vale destacar que o planejamento inicial era realizar em torno de 10 (dez) medições, com um intervalo de 30 (trinta) dias entre cada uma, mas inicialmente foi difícil acessar a empresa devido algumas necessidade de segurança e de proteção do patrimônio, que deveriam ser asseguradas. Então as medições além de não ocorrerem na quantidade esperada, até pelo fato que no retorno a empresa para a realização da quinta coleta de dados a empresa tinha trocado a tubulação durante a sua parada de manutenção anual, elas também não ocorreram com o intervalo planejado, o que de certa maneira reduz a capacidade e assertividade da análise dos dados.

Em cada coleta de dados foi gerado um mapa termográfico e realizadas, 5 (cinco) medições de espessura para cada ponto a ser acompanhado. Sendo que o valor médio destas medições foi considerado como valor atual da espessura da chapa e anotado na Folha de Coleta de Dados, conforme apêndice A.

Na primeira coleta de dados o mapa termográfico, conforme figura 21, apresentou uma variação de temperatura, entre a ambiente e a máxima medida na área da chapa da tubulação, de 4°C. Considerando apenas as temperaturas da área da chapa da tubulação, ainda assim a temperatura não é uniforme, apresentando, embora menor, uma variação de temperatura, o que é proveniente da passagem do grão pela tubulação, através do contato com diferentes regiões da tubulação, conforme o seu escoamento.

Figura 21: Mapa termográfico da coleta 1.



Fonte: Próprio autor.

Reparem na figura 21, que existe uma região ao lado da área medida, que apresenta um valor de temperatura menor, quando comparado com o restante da chapa, pois trata-se do local onde a chapa já foi reparada com a instalação de uma chapa externa.

A primeira coleta de valores da espessura da chapa apresentou um valor médio da espessura coletada no ponto "A" de 3,8 mm e no ponto C um valor médio de espessura de 4,9 mm, conforme mostra a tabela 8.

Tabela 8: Valor medido da espessura da chapa na coleta 1.

PONTOS COLETA	Temperatura A (°)			Temp. B (°)	Temp. C (°)	Data	Espessura ponto A	Espessura ponto C
	Máx.	Min.	Média					
1	31,8	28,7	30,9	27,8	29,6	16/12/18	3,8 mm	4,9 mm

Fonte: Próprio autor.

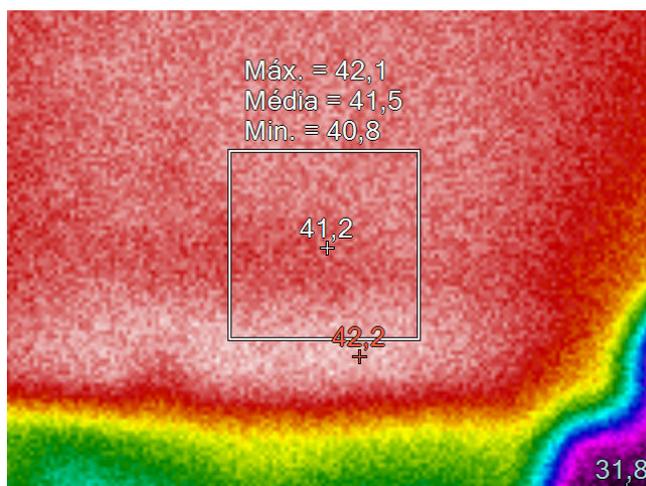
Observa-se que o valor da espessura medido no ponto “C” é maior que o valor nominal da chapa, que é de 4,76 mm, isto provavelmente deve-se ao fato de o ponto “C” estar localizado na região da dobra da chapa.

Da mesma forma observa-se que o ponto “A” apresenta uma perda de espessura, ao longo destes 3 (três) anos de operação na ordem de 0,96 mm em relação a sua espessura inicial de construção que é de 4,76 mm, o que representa 20% de perda de espessura.

Em um primeiro momento se não analisarmos a taxa de perda de espessura encontrada, que foi em torno 6,66%, por ano, mas sim o fato de já existir locais de reparo na chapa, podemos discutir de forma mais ampla que a forma como grão entra em contato com a chapa da tubulação irá determinar regiões na mesma face da tubulação com uma taxa maior ou menor de perda de espessura, e assim, um potencial maior ou menor para ruptura.

Na realização da segunda coleta, conforme a figura 22, a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura máxima do ponto “A” foi de 10,3°C, um valor já bem maior que a medida na primeira coleta, o que nos leva a crer em uma diferença de volume de grão passando pela tubulação e variando, desta forma, o efeito de desgaste na superfície da chapa e por conseqüência a temperatura na região de contato.

Figura 22: Mapa termográfico da coleta 2.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 9: Valor medido da espessura da chapa na coleta 2.

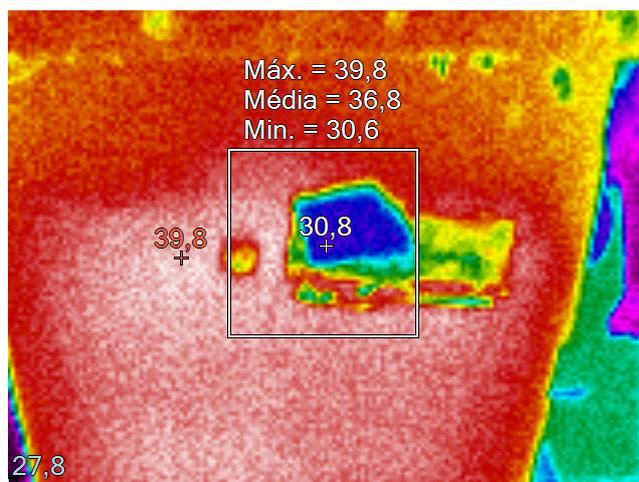
PONTOS COLETA	Temperatura A (°)			Temp. B (°)	Temp. C (°)	Data	Espessura ponto A	Espessura ponto C
	Máx.	Min.	Média					
1	31,8	28,7	30,9	27,8	29,6	16/12/18	3,8 mm	4,9 mm
2	42,1	40,8	41,5	31,8	39,7	04/01/19	3,5 mm	5,1 mm

Fonte: Próprio autor.

Na coleta 02 dos dados, conforme mostra a tabela 9, foi encontrado um valor médio de espessura para o ponto A de 3,5 mm, que é de 0,3 mm menor que o valor medido na coleta 01.

Esta perda de 0,3 mm na espessura da chapa pode estar ligada a um volume maior de produto passando pela tubulação, o que é comum neste período, devido a proximidade com a parada de manutenção anual ou mesmo devido ao fato de na primeira coleta existir uma parte da parede da chapa próxima de se soltar ou escoar, o que com o uso e até mesmo com o aumento do volume aconteceu.

Figura 23: Mapa termográfico da coleta 3.



Fonte: Próprio autor.

Conforme a figura 23, a coleta 03 apresentou uma diferença de temperatura entre a mínima e a máxima na área da chapa de 9,3°C, que entre as 3 coletas, até então, realizadas representa a maior diferença de temperatura entre a mínima e a máxima temperatura na área do duto.

O valor médio da espessura da chapa no ponto A, medido na coleta 03, conforme a tabela 10, não apresentou variação de valor, quando comparado com o valor medido na coleta 02, permanecendo a chapa com um valor de espessura igual a 3,5 mm. Isto talvez se deva ao curto tempo no intervalo das entre as duas coletas

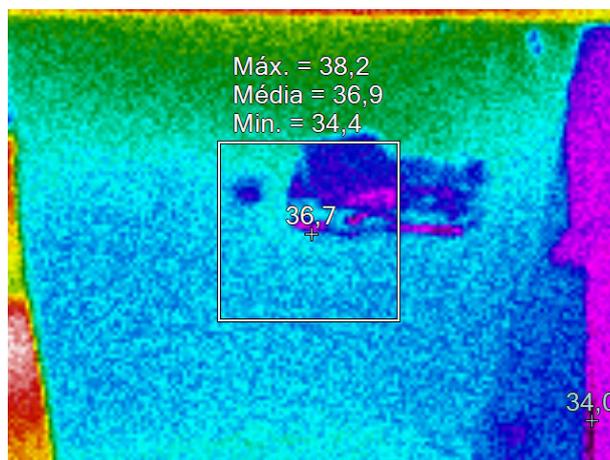
Tabela 10: Valor medido da espessura na coleta 03.

PONTOS COLETA	Temperatura A (°)			Temp. B (°)	Temp. C (°)	Data	Espessura ponto A	Espessura ponto C
	Máx.	Min.	Média					
1	31,8	28,7	30,9	27,8	29,6	16/12/18	3,8 mm	4,9 mm
2	42,1	40,8	41,5	31,8	39,7	04/01/19	3,5 mm	5,1 mm
3	39,8	30,6	36,8	27,8	36,8	10/01/19	3,5 mm	5,0 mm

Fonte: Próprio autor.

O mapa termográfico, conforme mostra a figura 24, obtido na coleta 04 manteve, assim como as coletas anteriores, a mesma área de concentração de calor ao longo da chapa do duto, com uma temperatura máxima de 38,2°C e uma temperatura média de 36,9°C. A temperatura mínima medida na área da chapa ficou próxima da temperatura ambiente, com uma diferença de apenas 0,4°C.

Figura 24: Mapa termográfico da coleta 4.



Fonte: Próprio autor.

Na coleta 04 o valor da espessura da chapa encontrado foi de 3,4 mm, conforme mostra a tabela 11, sendo que esta foi a última coleta, pois durante a parada para a manutenção que aconteceu após a coleta 04, a tubulação foi substituída.

Tabela 11: Valor medido da espessura na coleta 4.

PONTOS COLETA	Temperatura A (°)			Temp. B (°)	Temp. C (°)	Data	Espessura ponto A	Espessura ponto C
	Máx.	Min.	Média					
1	31,8	28,7	30,9	27,8	29,6	16/12/18	3,8 mm	4,9 mm
2	42,1	40,8	41,5	31,8	39,7	04/01/19	3,5 mm	5,1 mm
3	39,8	30,6	36,8	27,8	36,8	10/01/19	3,5 mm	5,0 mm
4	38,2	34,4	36,9	34	35,3	28/01/19	3,4 mm	5,0 mm

Fonte: Próprio autor.

Como podemos observar na tabela 11, o valor da espessura da chapa no ponto C, fora da zona de maior temperatura do mapa termográfica, se mostrou inalterada, em todos os momentos de coletada de dados, não apresentando redução de seu valor inicial, não se caracterizando desta forma, como um ponto com um potencial de colapso, validando desta forma a afirmativa de Mario (2011), que a maioria das anomalis identificadas nas edificações estão associadas a temperatura.

5.3 Variação de Temperatura na Superfície da Tubulação

A tabela 12 mostra a variação de temperatura encontrada, durante a coleta de dados, através do mapa termográfico na superfície da chapa da tubulação.

Tabela 12: Variação da temperatura na superfície da chapa da tubulação.

Coleta	T. mínima	T. máxima	Variação
1	28,7°C	31,8°C	3,1°C
2	40,8°C	42,1°C	1,3°C
3	30,6°C	39,8°C	9,2°C
4	34,4°C	38,2°C	3,8°C

Fonte: Próprio autor.

Embora não seja objeto deste trabalho identificar os tipos de desgastes, que agem nesta tubulação, é importante destacar esta variação de temperatura na superfície da chapa, identificada pela o mapa termográfico, pois esta variação de temperatura pode ter potencial para gerar uma pilha termo galvânica que afetaria a estrutura da chapa, através de um processo de corrosão.

Além do potencial de formação de pilha termo galvânica, a temperatura na superfície da chapa também exerce influência [37] no desgaste erosivo, pois o aumento de temperatura na região pode fundir o material gerando um processo de erosão e assim aumentando a taxa de desgaste. Considerando

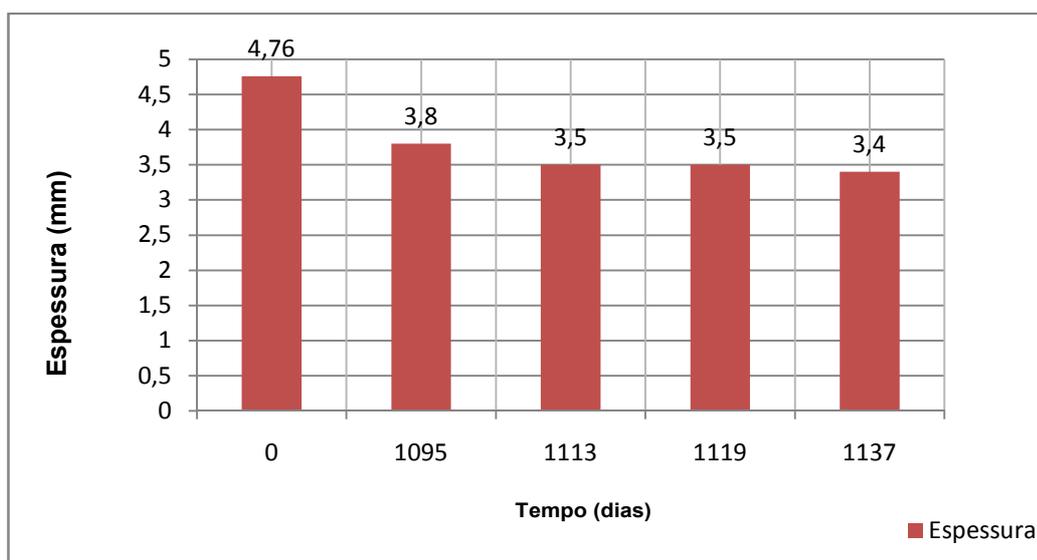
que a temperatura de erosão do material e a taxa de desgaste estão relacionadas, elevando-se a temperatura, o metal inicia um processo de oxidação e a corrosão acelera a taxa de desgaste, fazendo com que o material seja removido da superfície erodida como um óxido frágil.

5.4 Estimativa do Tempo de Vida Remanescente da Tubulação

Para estimar o tempo de vida remanescente da tubulação e identificar em quanto tempo de operação a parede romperia, utilizou os dados coletados de espessura da chapa ao longo do tempo, da sua fabricação até a data da última coleta.

Com os 04 valores de espessura da chapa medidos no ponto A, mais o valor de espessura da chapa no tempo igual a zero, ou seja, na sua fabricação, foi gerado um gráfico de colunas, conforme o gráfico 1, onde relaciona o valor de espessura da chapa com o intervalo, transcorrido em dias, da fabricação da tubulação até a data da coleta.

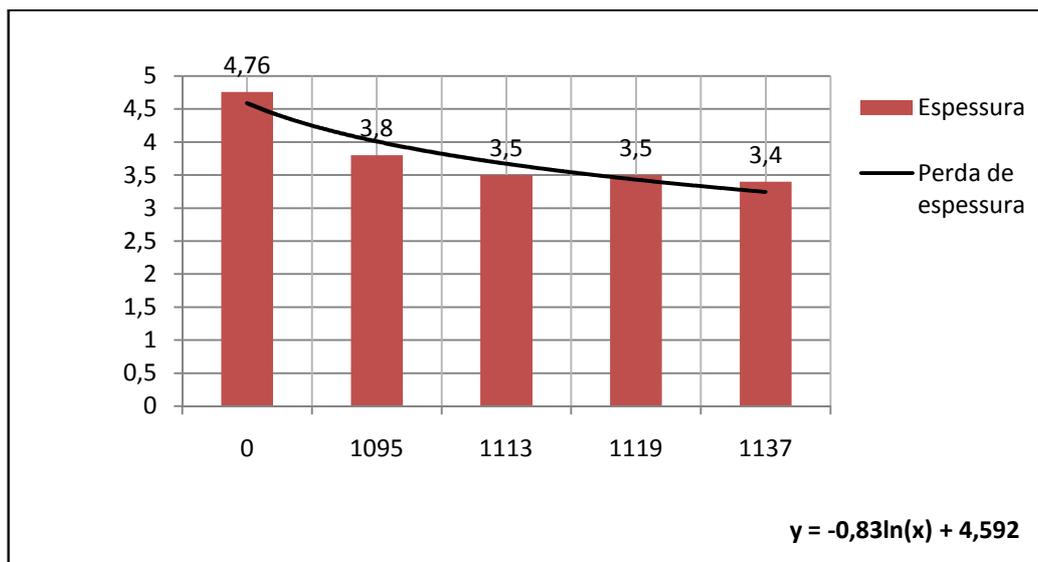
Gráfico 1: Valores de espessura da chapa da tubulação durante sua vida útil.



Fonte: Próprio autor.

Após gerar gráfico 1, em suas colunas representativas dos valores de espessura medidos foi adicionada uma linha de tendência logarítmica, conforme mostra o gráfico 2, que representa a estimativa da tendência de perda de espessura da chapa ao longo do tempo.

Gráfico 2: Tendência de perda de espessura da chapa da tubulação durante sua vida útil.



Fonte: Próprio autor.

A equação logarítmica da linha de tendência gerada, conforme a equação 4, determina o valor de espessura em mm perdido pela chapa da tubulação no intervalo de tempo da sua fabricação até a medição.

Equação 4: Valor estimado de espessura perdido pela chapa ao longo do tempo de vida útil.

$$y = -0,83 * \ln(x) + 4,592$$

Fonte: Próprio autor.

Sendo:

y = o valor perdido de espessura em mm pela parede da chapa e

x = a quantidade de dias, entre a fabricação até a data desejada.

Esta equação, embora gerada com poucos dados coletados de acompanhamento da tubulação, permite, para esta tubulação, estimar o tempo de vida remanescente.

Equação 5: Cálculo da espessura final conforme o tempo de operação.

$$Espessura\ Final = Espessura\ Inicial - y$$

Fonte: Próprio autor.

Onde:

Espessura Inicial, é a espessura da chapa usada na construção da tubulação e

y = o valor perdido de espessura em mm pela parede da chapa

Desta maneira, utilizando a equação 5, foi possível estimar o valor da espessura final da chapa, conforme vamos variando o tempo de operação, sendo possível inclusive, calcular o tempo vida remanescente desta tubulação até a espessura romper totalmente, conforme mostra a tabela 13.

Tabela 13: Estimativa da espessura final conforme o tempo de operação.

Espessura Inicial (mm)	Tempo de vida		Perda de espessura (mm)	Espessura Final (mm)
	Anos	Dias		
4,76	5	1825	-1,64	3,12
	10	3650	-2,22	2,54
	15	5475	-2,55	2,21
	20	7300	-2,79	1,97
	25	9125	-2,98	1,78
	30	10950	-3,13	1,63
	50	18250	-3,55	1,21
	214	78110	-4,76	0,00

Fonte: Próprio autor.

O valor em anos, encontrado através da estimativa do tempo de vida remanescente, para esta tubulação romper totalmente, se mostra demasiadamente grande e não retrata de forma alguma o tempo real de uso destas tubulações, até mesmo porque, como já foi dito anteriormente, esta tubulação já continha um remendo em sua superfície.

Com base neste fato alguns pontos são importantes em se destacar:

- a) A tubulação, conforme pode ser verificada na figura 17, liga o redler ao pé do elevador e estes não estão alinhados, de forma que a tubulação foi construída, com suas bocas de entrada e de saída desalinhadas, além do fato de que após a boca de entrada existe uma redução de dimensões, conforme a figura 18 nos mostra, na sua largura, o que pode gerar um fluxo de grão também desalinhado dentro da tubulação, neste caso, mais concentrado no lado direito da tubulação, exatamente o lado onde já existia o remendo na chapa;
- b) Ao analisarmos o fluxo do grão pela tubulação, é possível descaracterizar na tubulação um processo por desgaste de abrasão, pois não existe [34] uma força pressionando o grão contra a superfície. No entanto, como o grão é arrastado dentro do redler, por uma corrente, para entrada da tubulação, caindo nesta com baixa velocidade, não existindo um lançamento deste grão contra a parede da tubulação e com um ângulo de impacto quase nulo não nos traz parâmetros suficientes para determinar que seja este, um processo de desgaste de erosão [34]. Entretanto o baixo ângulo [62] de impacto da partícula, tende a fazer com que as partículas, após o impacto, se arrastem pela superfície da tubulação, favorecendo um processo de desgaste muito similar ao desgaste abrasivo, e nestes casos de alta taxa de erosão e baixo ângulo de impacto, irá prevalecer o desgaste por fratura dúctil, o que pode justificar a lenta degradação desta tubulação, devido à predominância da deformação plástica;

c) O escoamento do grão pela chapa gera um aquecimento da mesma, e assim esta diferença de temperatura da chapa em relação ao ambiente, permite a aplicação da termografia. Ao analisarmos a diferença de temperatura entre pontos distintos da chapa, conforme apresenta a tabela 12, e compararmos nestes mesmos pontos os valores de espessura da chapa medidos, identificamos que o ponto com maior temperatura existe um desgaste maior, e assim como Hipócrates [9], podemos relacionar o ponto com maior temperatura à presença de uma anomalia na chapa, ou seja, a presença de desgaste. O que confirma que a maioria das anomalias [7] identificadas nas edificações estão associadas a temperatura, atestando assim que de forma geral [19], a termografia pode ser aplicada de forma qualitativa com a finalidade de identificar falhas;

d) A superfície da chapa da tubulação apresenta um tribossistema complexo [34], com variáveis operacionais de movimento, vibração, velocidade, umidade do ar, força e temperatura, que mudam conforme o regime de operação da fábrica e o período do ano, assim o desgaste da chapa, provavelmente não ocorre por apenas um mecanismo. Importante ainda ressaltar que o mecanismo de desgaste dominante pode mudar, ao longo da vida útil conforme vai acontecendo, por razões [39] que incluem a mudança nas propriedades dos materiais e a formação de película. Nestes processos de desgaste e atrito nos metais, a transferência [37] de metal pode ser seguida por oxidação do metal transferido. Então como a resistência ao desgaste não é uma característica [34] intrínseca do material, mas sim uma consequência de todo o tribossistema no qual está inserido é possível que a ruptura da chapa não aconteça por um único processo de desgaste, mas talvez pela combinação de vários [37], onde o desgaste ocorre através de mais de um modo. Dessa forma, ao variar o tribossistema, a resistência ao desgaste da chapa da tubulação também vai variar, bem como o tempo de vida útil remanescente da tubulação, dificultando previsões de durabilidade [34].

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados neste trabalho, pode-se concluir que:

- A termografia infravermelha se mostrou eficiente como método de inspeção e identificação de pontos potenciais de colapso de tubulações de transporte de grãos, visto que o local apresentado no mapa termográfico com maior concentração de calor apresentava uma perda contínua de espessura ao longo do tempo.

Mas para servir como método preditivo de manutenção, ela sozinha não é eficaz, é necessário então estar associada a outra técnica como o acompanhamento da espessura residual da chapa.

De qualquer maneira a aplicação da termografia como método de inspeção para tubulações traz benefícios à tomada de decisão, além de permitir realizar esta inspeção sem a necessidade de parar a operação, até mesmo porque é necessário que a tubulação esteja em uso para permitir a aplicação da termografia;

- O acompanhamento sistemático da taxa de perda de espessura da tubulação se mostrou de suma importância para prever, talvez não com exatidão, mas muito aproximado o momento de rompimento da chapa da tubulação, evitando desta forma gastos com perdas de produto, inoperância e limpeza do local, devido ao derramamento de grão pelo chão.

Este acompanhamento da espessura da chapa também se mostrou de grande valia como método de manutenção preditiva, pois permite identificar a vida remanescente da chapa, evitando substituições desnecessárias como a executada logo após a quarta coleta.

- Com o acompanhamento sistemático da espessura da chapa foi possível determinar a taxa de perda de espessura da chapa da tubulação e gerar uma equação matemática logarítmica, que permite identificar o tempo de vida residual desta chapa evitando intervenções desnecessárias, bem como pode servir como apoio a

novos projetos, reduzindo custos de fabricação com material, pois ao ter a possibilidade de ainda em fase de projeto identificar a espessura da chapa com melhor relação de custo benefício para um tempo específico de vida útil da tubulação traz grandes benefícios econômicos para a empresa.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios para identificar as diferenças de temperatura na mesma superfície da chapa com maior potencial de formação de pilha termo galvânica;
- Realizar estudo em campo de tubulações de transporte de grãos para identificar o tribossistema que atua no processo de desgaste destas tubulações;
- Continuar o estudo de acompanhamento de perda de espessura em tubulações construídas de materiais diferentes ao aço galvanizado 1020, afim de comparar o seu comportamento e estabelecer relações de custo benefício quanto ao material e espessura inicial da chapa.

8. REFERÊNCIAS

8.1 Referências Nominais

- [1] OCHÔA, ANA LÚCIA DA SILVA. **Avaliação do índice de quebra de grãos em transportadores agrícolas**. UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2011.
- [2] MACIAS, ISABEL BUENO. **Deteccção de vazamentos em tubulações transportando Gás**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [3] DE OLIVEIRA, JOSÉ JEFFERSON MORAIS. **Análise e reparo em dutos corroidos – Um estudo de caso para reparo por dupla calha**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.
- [4] SILVA, JOSIANE ROBERTA DOS SANTOS; SOUZA, LUCIANA APARECIDA DUTRA DE; CASTRO, LUIZA ZAMBALDE DE; FERREIRA, THAIS ALVES; CAMPOS, MAGNO SILVERIO. **Análise da confiabilidade: um estudo de caso**. ENEGEP, Fortaleza, CE, 2015.
- [5] CORTIZO, EDUARDO CABALEIRO.; BARBOZA, MARCOS PINOTTI.; SOUZA, LUIZ ANTÔNIO CRUZ. **Estudo da arte da termografia**, Fórum Patrimônio: amb. Constr. E patr., 2008.
- [6] WHITE, TIM. **An exploratory study of the role of internet technologies in the field of industrial maintenance: is knowledge management the way forward?** Journal of Information Systems and Technology Management, 2004.
- [7] MARIO, MAURO. **Uso da termografia como ferramenta não destrutiva para avaliação de manifestações patológicas ocultas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- [8] JUNIOR, JOSE REGIVALDO DE CARVALHO. **Processamento digital de imagens para a identificação automática de falhas em rolos de transportadores de correias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- [9] BRIOSCHI, MARCOS LEAL. **A história da termografia**. Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- [10] FERREIRA, KAMILA DIAS.; FILHO, SAULO HUMBERTO ÁVILA.; BERTOLINO, JÉSSICA FERNANDA.; SILVA, LUIZ ANTÔNIO FRANCO DA.; VULCANI, VALCINIRI ALOISO SCALLA – **Termografia por infravermelho em medicina veterinária**, Enciclopédia Biosfera 2016.
- [11] BAGAVATHIAPPAN, S. B.B.; LAHIRI, T. SARAVANAN, JOHN PHILIP, T. JAYAKUMAR. **Infrared thermography for condition monitoring – A review**. Elsevier, 2013. (73%)

[12] MENDES, MARIANA ALTOÉ.; TONINI, LUIZ GUILHERME RIVA.; MUNIZ, PABLO RODRIGUES.; DONADE, CLAINER BRAVIN. **Thermographic analysis of parallelly cables: A method to avoid misdiagnosis**. Elsevier, 2016. (91%)

[13] NOVO, M. M. M.; BITENCOURT, C. S.; TIBA, P. R. T.; SILVA, D. G. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade**. Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais - GEMM, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, 2014. (23%)

[14] RAMIREZ, ARMANDO GUADALUPE GARCIA. et al. **Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis**. Elsevier B. V, 2014. (86%)

[15] ULLAH, IRFAN.; et al. **Predictive Maintenance of Power Substation Equipment by Infrared Thermography Using a Machine-Learning Approach**. Energies., 2017. (91%)

[16] PERROTT, C. M.; **Materials and Design to Resist Wear; Private Communication; Source ref. V. Mason; Implications of Recent Investigations on Shredder Hammer Tip Materials**; 44th Conf. Queensland Society of Sugar Cane Technologists; Páginas: 255-259; 1977.

[17] SANTOS, DAGOBERTO JOSÉ DOS.; GEDRAITE, RUBENS. **O uso da termografia como ferramenta de análise de processos industriais**. XIII SIMPEP, 2006.

[18] SILVA, RENATA NUNES TAVARES DA. **Influência dos erros da câmera de infravermelho na estimativa de parâmetros termofísicos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

[19] ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. **A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte**. Revista ALCONPAT, 2017.

[20] SELLITTO, MIGUEL AFONSO.; MORAIS, Rafael Antunes. **Aplicação do ensaio por ultrassom no controle de qualidade de processo de soldagem a ponto em operação industrial**. E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial, v. 7, n. 2 2014.

[21] MELO, LEANDRO LUTTERBACH DE MORAES E. **Avaliação da atenuação e da velocidade do som em soluções e suspensões utilizadas em fluidos de perfuração**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2015.

[22] ALBERTAZZI, ARMANDO; SOUZA, ANDRÉ R. DE: **Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial**. Manole. Barueri/SP, 2008.

- [23] FREIRE, ANDERSON SANTANA; FLORIDO, WANSHIGTON LONTRA. **Controle da corrosão nos dutos da indústria de petróleo**. Instituto Federal Fluminense, 2016.
- [24] VIANA, HERBERT RICARDO GARCIA. **PCM, planejamento e controle de manutenção** – Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2002.
- [25] CARVALHO, ALEX LUIS DE.; MENEGON, NILTON LUIZ. **O trabalho invisível e perigoso dos profissionais de manutenção: reflexões sobre a atividade em uma indústria automobilística**. Production, v.25, n.1, p. 201-222, 2015. (38%)
- [26] SIQUEIRA, Y. P. D. S. **Manutenção centrada na confiabilidade: Manual de implantação**. 1ª (Reimpressão). Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.
- [27] KARDEC, ALAN E NASCIF, JÚLIO – **Manutenção – Função estratégica** – 4º Ed. – Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.
- [28] JUNIOR, ADYLES ARATO. **Manutenção preditiva: Usando análise de vibrações**. 1º edição – Barueri, SP: Manole, 2004.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: **Confiabilidade e Manutenibilidade: Terminologia**. Rio de Janeiro, 1994.
- [30] FAGUNDES, ANGELYNA MACHADO; ROCHA, ANDRE LUIZ DA SILVA; BARBOSA, SIMONE RODRIGUES; CARVALHO, ALESSANDRA LOPES. **Estudo de Caso: Análise Quantitativa de Confiabilidade e Disponibilidade de um Torno CNC, Baseado na Metodologia RCM (Reliability Centred Maintenance), Aplicado a Área de Manutenção Industrial**. ENEGEP, Belo Horizonte, MG, 2011.
- [31] FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. 265 p.
- [32] CHAGAS, LUIS FERNANDO SARAIVA DE ABREU. **Concepção e Processamento de Material Compósito para Otimização de Performance Tribológica: Abrasão e Erosão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
- [33] SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. 12 p. Erudição para provimento de cargo de Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica – USP, São Paulo, 2005.
- [34] SILVA, VINICIUS AUGUSTO DA. **Desgaste de Poliuretano por Erosão Úmida: Desenvolvimento de um Ensaio Tecnológico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- [35] JOST, H. P.; **“Tribology-origin and future”**; Wear; Volume 136; Páginas: 1-17; 1990. (85%)

[36] FELIPE, GABRIELI BORGES UGIONI. **Estudo da Resistência a Abrasão e Erosão do Aço ASTM A106GrB Submetido a Diferentes Condições de Tempo e Temperaturas de Esferoidização**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

[37] ISLAM, AMINUL. et al. **Effect of microstructure on the erosion behavior of carbon steel**. Revista Wear. Elsevier. Canadá, 2014. (85%)

[38] CZICHOS, H.; **Tribology: A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**; Amsterdam, Oxford e New York; Elsevier; Volume 1 (Tribology Series); 1978.

[39] SOUZA, C. J.; **Desgaste Abrasivo em Compósitos Metal/Cerâmicos: Estudo Aplicado ao Desenvolvimento de Coroas de Perfuração**; 2011; 88 páginas; Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais; REDEMAT/UFOP; Ouro Preto; 2011.

[40] DOWSON, D.; **History of Tribology**; Longman Group Limited; 1979.

[41] SANTOS, G.S. **Avaliação do efeito de modificações superficiais a plasma no desempenho frente ao desgaste de um aço baixa liga: Estudo da correlação entre profundidade de endurecimento e melhoria de desempenho**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

[42] COUTINHO, BOTRELL. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 1992.

[43] MARTINS, PAULO. et al. **Tecnologia mecânica: Tecnologias de deformação plástica e corte**. Volume I. Lisboa. Escolar editora. 2013.

[44] KATO, K. e ADACHI, K. **Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook**. Editora CRC Press LLC; Volume 2; Capítulo 22; 2001.

[45] ASTM, ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, G-40. **Standard terminology relating to wear and erosion**. West Conshohocken, 2002, 8 páginas.

[46] HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering Materials**. Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

[47] KRAUSE, O.; URBANEK, G.; KORBER, H. **Determining resistance to abrasion at ambiente temperature – improving comparability between laboratories**. RHI Bulletin, v. 2, p. 44-49, 2013.

[48] OLIVEIRA, de S. P. H.; **Contribuição ao estudo do desgaste erosivo e abrasivo de poliuretanos utilizados na indústria mineradora e petrolífera**; Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica; UFU; Uberlândia; 2011.

[49] CORREA, OTONI EDMILSON. **Avaliação da resistência ao desgaste de ligas desenvolvidas para solda de revestimento duro para uso sob condições altamente abrasivas.** Tese de doutorado. São Carlos, 2005.

[50] BHUSHAN, B.; **Principles and applications of tribology**, Ed. Wiley-Interscience, ISBN 0-471-59407-5; Página 1020; 1999.

[51] SILVA, F PINA. **Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma. 2008.** 272 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

[52] DAN'KIN, A. A. **Resistance of some refractory compounds and hard alloys to wear induced by a high-speed abrasive-laden air stream.** Poroshkovaya Metallurgiya, v. 10, p. 73-77, 1970.

[53] YANG, J.Z.; FANG, M.H.; HUANG, Z.H.; HU, X.Z.; LIU, Y.G.; SUN, H.R.; HUANG, J.T.; LI, X.C. **Solid particle impact erosion of alumina-based refractories at elevated temperatures.** Journal of the European Ceramic Society, v. 32, p. 283-289, 2012. (91)%

[54] SANTOS, V. A. A.; VALENZUELA, A. O.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V.C. **Fundamentos e testes preliminares de resistência a erosão em concretos refratários.** Cerâmica, v. 52, p. 128-135, 2006. (23%)

[55] STACHOWIAK, G. W. e BATCHELOR, A. W.; **Engineering Tribology; Department of Mechanical and Materials Engineering;** University of Western Australia; 769 páginas; Australia 2007.

[56] GARTON, A.; STEVENSON, W. T. K. e MCLEAN, P. D.; **The Stability of Polymers in Low Earth Orbit;** Materials and Design; Volume 7; Páginas: 319-323; 1986. (96%)

[57] SCHULTZ, P. H. e GAULT, D. E.; **Atmospheric Effects on Martian Ejecta Emplacement;** Journal of Geophysical Research; Volume 84; Páginas: 7669-7687; 1979. (99%)

[58] [www.salcas.com.br/termovisor-fluke-ti9?search=c%C3%A2mera%20termogr % C3 %A1fica%20TI9&description=true](http://www.salcas.com.br/termovisor-fluke-ti9?search=c%C3%A2mera%20termogr%C3%A1fica%20TI9&description=true)

[59] www.importecnica.com.br/tm-8811.html

[60] GOMEZ, VICTOR. **Efeito da distribuição do tamanho de partículas abrasivas sobre a taxa e modos de desgaste para o ensaio de microabrasão.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2014.

[61] LEITE, RICARDO. et al. **Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares.** Universidade

Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2009.

[62] SOUZA, ENES AMARAL DE.; SILVA, JOSÉ BEROALDO DA.; MACHADO, RONNIE MARIO CONCEIÇÃO. **Desenvolvimento de um dispositivo com sensor infravermelho para a medição de temperatura em materiais não reflexivos sem contato físico**. Faculdade ENIAC, 2017.

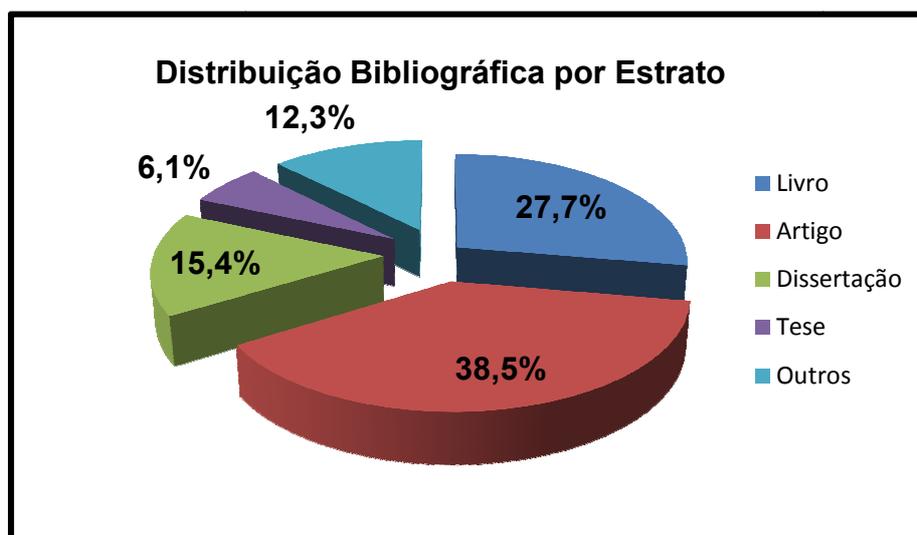
[63] YASTIKLI, NACI.; GULER, ESRA. **Performance evaluation of thermographic câmeras for photogrammetric documentation of historical buildings**. BCG – Boletim de Ciências Geodésicas, 2013.

[64] YUAN, BOYAN.; SPIESSBERGER, CHRISTIAN.; WAAG, TOR INGE. **Eddy current thermography imaging for condition-based maintenance of overlay welded components under multidegradation**. Elsevier B. V, 2017. (94%)

[65] ZUM GAHR, KARL. **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology Series, Volume 10, Elsevier Science Publishers B. V, 1987.

8.2 Referências por Estrato

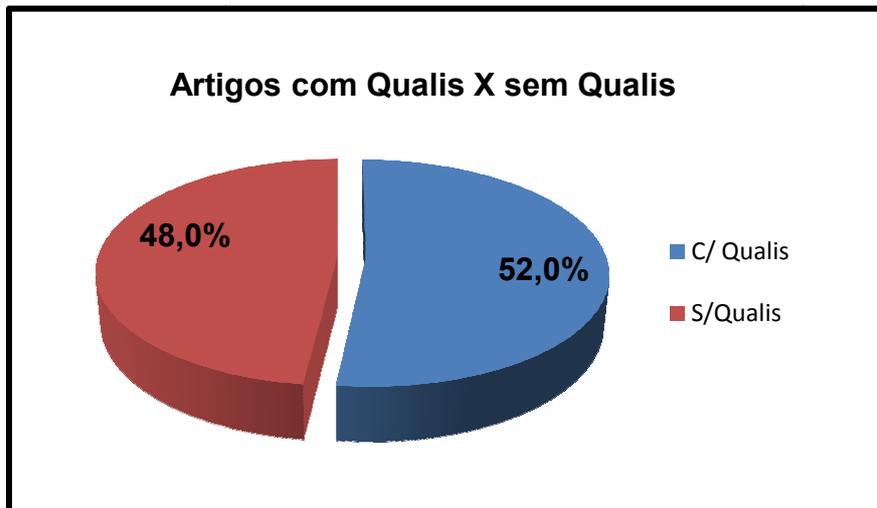
Gráfico 3: Distribuição bibliográfica por Estrato.



Fonte: Próprio autor.

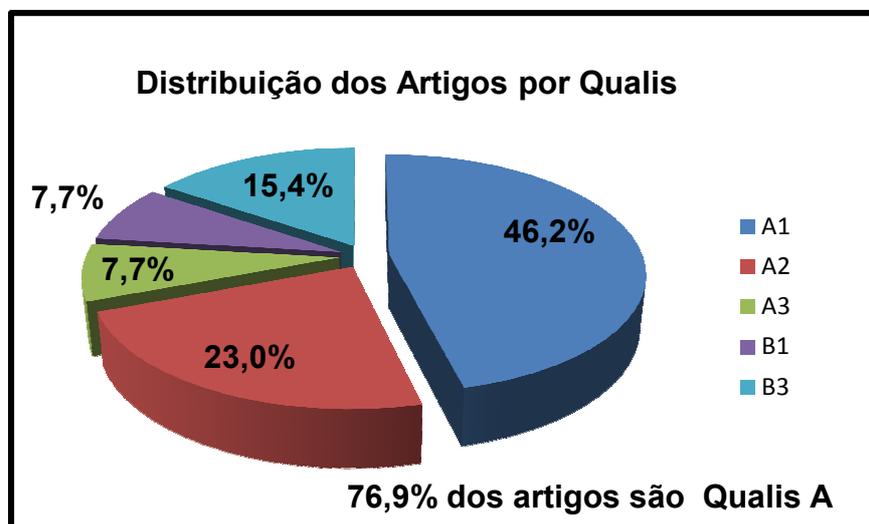
8.3 Referências por Qualis

Gráfico 4: Percentual de artigos com Qualis.



Fonte: Próprio autor.

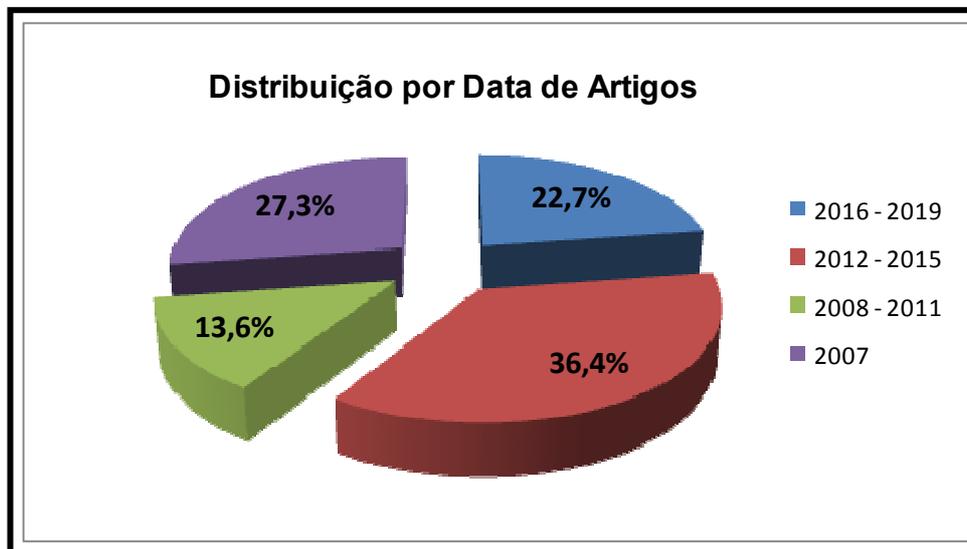
Gráfico 5: Distribuição dos artigos por Qualis.



Fonte: Próprio autor.

8.4 Referências por Data do Artigo

Gráfico 6: Distribuição por data de artigos.

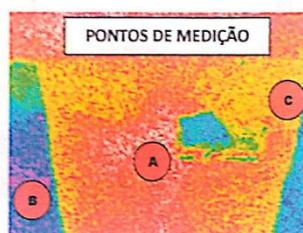


Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE B – FOLHA DE COLETA DE DADOS COM OS VALORES COLETADOS

	MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
	DIRETORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPMec

PLANILHA DE COLETA DE DADOS



PONTOS COLETA	Temperatura A (°)			Temp. B (°)	Temp. C (°)	Data	Espessura ponto A	Espessura ponto C
	Máx.	Mín.	Média					
1	31,8	28,7	30,3	27,8	29,6	16/12	3,8	4,9
2	42,1	40,7	41,5	31,8	39,7	04/10	3,5	5,1
3	39,8	30,6	36,8	27,8	36,8	10/10	3,5	5,0
4	38,2	34,4	36,9	34,0	35,3	28/10	3,4	5,0
5								
6								
7								
8								
9								
10								