



**Leonardo Henrique Zamin Moreira**

**ESTUDO DE MÉTODO ALTERNATIVO DE MEDIÇÃO DE TORQUE EM  
TRANSMISSÕES MECÂNICAS UTILIZANDO EXTENSÔMETROS**

Horizontina-RS

2020

**Leonardo Henrique Zamin Moreira**

**ESTUDO DE MÉTODO ALTERNATIVO DE MEDIÇÃO DE TORQUE EM  
TRANSMISSÕES MECÂNICAS UTILIZANDO EXTENSÔMETROS**

Projeto do Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob orientação do professor Luís Carlos Wachholz, Me.

Horizontina-RS

2020

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**“Estudo de método alternativo de medição de torque em transmissões mecânicas  
utilizando extensômetros”**

**Elaborado por:  
Leonardo Henrique Zamin Moreira**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 07/Dezembro/2020

Pela Comissão Examinadora



---

Mestre. Luís Carlos Wachholz

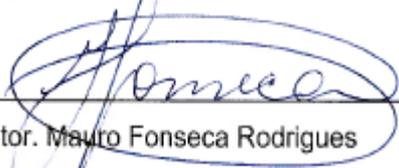
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador



---

Mestre. Francine Centenaro Gomes

FAHOR – Faculdade Horizontina



---

Doutor. Mauro Fonseca Rodrigues

FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina-RS**

**2020**

Dedico este trabalho aos meus pais, Neuza e Carlos Moreira, que sempre me apoiaram e me deram forças para atingir meus objetivos, também às minhas irmãs Laura e Larissa pela troca de experiências e o constante incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Presto meus mais sinceros agradecimentos aos meus familiares, especialmente aos meus pais por não medirem esforços para que eu pudesse concluir mais esta etapa de minha vida. Durante este processo tive a oportunidade de me desenvolver profissionalmente e espiritualmente.

Agradeço à todos os professores e colegas pela troca de experiências e que fizeram parte da minha formação. Meu muito obrigado a todos colegas da empresa John Deere que me incentivaram e auxiliaram na escolha do tema, assim como o suporte que necessitei para realizar algumas atividades do trabalho e o compartilhamento de conhecimento. Também agradeço ao meu orientador Luís Carlos Wachholz por sua paciência e dedicação, auxiliando-me durante a realização deste trabalho.

Para finalizar agradeço a Deus pela oportunidade de estar aqui hoje realizando este sonho.

“Nada é tão difícil que, à força de tentativas, não tenha resolução.”

(Terêncio)

## RESUMO

Sistemas mecânicos estão presentes nos mais diversos produtos das indústrias, entretanto, estes tipos de mecanismos são submetidos a cargas e tensões de diferentes formas. Ao longo do tempo vem se desenvolvendo novas formas de medir deformações devido aos esforços aplicados nos materiais, portanto este trabalho tem como intuito realizar um estudo teórico sobre resistência dos materiais e como são feitas as leituras de deformações utilizando a extensometria. Para este fim serão instalados *strain gauges* em uma peça que faz parte de um conjunto de transmissão mecânica em uma máquina agrícola, utilizando *softwares* para coleta de dados e análise estrutural da peça pelo método de elementos finitos. Este estudo possibilitará analisar a efetividade do método sugerido comparado ao método tradicional de medição de torque em eixos. Ao final do desenvolvimento deste trabalho será possível observar que sobre os aspectos específicos em que os testes foram realizados o novo método sugerido não pode substituir o método tradicional de medição de torque.

**Palavras-chave:** Método alternativo. Resistência dos materiais. Extensometria. Instrumentação.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma Projeto x Resistência dos Materiais .....	19
Figura 2 - Cubo de tensões – Diagrama de corpo livre .....	20
Figura 3 - Distribuição de tensão na seção transversal.....	21
Figura 4 - Forças cisalhantes .....	22
Figura 5 - Força cortante na seção .....	23
Figura 6 - Deformação axial .....	25
Figura 7 - Deformação de flexão .....	25
Figura 8 - Tipos de esforços em deformação.....	26
Figura 9 - Diagrama tensão - deformação.....	28
Figura 10 - Exemplos de transmissão por polias.....	28
Figura 11 - Estrutura de um Strain Gauge .....	30
Figura 12 - Aplicação de um Strain Gauge .....	31
Figura 13 - Esquema de sistema de medição com extensômetro.....	32
Figura 14 - Strain Gauge tipo V.....	32
Figura 15 - Circuito de Ponte de Wheatstone.....	33
Figura 16 - Configuração I para ponte de 1/4 – Flexão .....	35
Figura 17 - Configuração I para ponte de 1/4 - Tração e compressão .....	35
Figura 18 - Configuração II ponte de 1/4 - Minimizar os efeitos temperatura .....	35
Figura 19 -Configuração I para ponte de 1/2 - Tração, compressão e flexão .....	36
Figura 20 - Configuração II para ponte de 1/2 - Flexão .....	36
Figura 21 - Configuração I para ponte completa - Flexão .....	37
Figura 22 - Configuração II para ponte completa - Flexão .....	37
Figura 23 - Configuração III para ponte completa – Tração ou compressão.....	38
Figura 24 - Método tradicional de medição de torque .....	42
Figura 25 - Imagem da polia em corte.....	43
Figura 26 - Malha de elementos finitos .....	43
Figura 27 - Travamento e força aplicada na peça.....	44
Figura 28 - Análise de tensões.....	44
Figura 29 - Local de instalação do strain gauge.....	45
Figura 30 - Lixamento da superfície .....	46
Figura 31 - Limpeza com Spray limpa contato .....	46
Figura 32 - Produtos para instrumentação .....	47

Figura 33 - Traçado da linha central da peça.....	47
Figura 34 - Puncionamento .....	48
Figura 35 - Aplicação do ácido e base .....	49
Figura 36 - Fita adesiva para posicionamento.....	49
Figura 37 - Colagem do Strain Gauge.....	50
Figura 38 - Escopo de ligação dos terminais.....	50
Figura 39 - Processo de soldagem concluído .....	51
Figura 40 - Aplicação de esmalte de proteção .....	51
Figura 41 - Aplicação de silicone neutro .....	52
Figura 42 - e-DAQ Little HBM-SOMAT.....	52
Figura 43 - Smart Modules .....	53
Figura 44 - Célula de carga .....	54
Figura 45 - Alterando IP .....	54
Figura 46 - Configurando canal 1 do e-Daq - Eixo .....	55
Figura 47 - Configurando canal 1 para 1 V/mV .....	55
Figura 48 - Configurando canal 2 do e-Daq - Polia - 1V/mV .....	56
Figura 49 - Configurando canal 3 do e-Daq – Célula de carga - Kg.....	56
Figura 50 - Informações da ponte e do strain gauge.....	57
Figura 51 - Montagem final dos componentes .....	58
Figura 52 - Braço de alavanca a 90° em relação a força aplicada .....	59
Figura 53 - Calibração ponte do eixo .....	60
Figura 54 - Calibração ponte da polia .....	61
Figura 55 - Comparativo entre o eixo e a polia.....	62
Figura 56 - Raio do centro até o ponto de cisalhamento a ser calculado.....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\sigma$	Tensão	MPa
$\tau$	Tensão de cisalhamento	MPa
$P$	Força aplicada	N
$A$	Área na seção transversal	$m^2$
$\Delta_s$	Varição de comprimento	m
$l$	Comprimento carregado	m
$E$	Módulo de elasticidade do material	MPa
$F$	Força aplicada sobre a seção transversal da barra	N
$\tau_{méd}$	Tensão de cisalhamento média	MPa
$\tau_{max}$	Tensão máxima de cisalhamento	MPa
$T$	Torque	N.m
$\rho$	Distribuição de tensão proporcional ao raio	m
$J$	Momento polar da área	$m^4$
$r$	Raio da superfície	m
$d$	Diâmetro	m
$F_{sen\theta}$	Resultante da força aplicada	N
$P$	Potência	W
$\omega$	Velocidade angular	rad/s
$\epsilon$	Deformação	mm
$\Delta l$	Comprimento de deformação	mm
$l_0$	Comprimento inicial do material	mm
$G$	Módulo de elasticidade transversal	
$\gamma$	Distorção angular	
$R$	Resistência elétrica	$\Omega$
$\Delta R$	Varição de resistência	$\Omega$
$R_0$	Resistência nominal	$\Omega$
$K$	Fator de sensibilidade do <i>Strain Gauge</i>	
$V_{EX}$	Tensão de entrada	V
$V_0$	Tensão de saída	V

## LISTA DE DEFINIÇÕES

<b>Palavra</b>	<b>Descrição</b>
Strain Gauge	Extensômetro
<i>Wheatstone</i>	Circuito elétrico
e-Daq	Equipamento de aquisição de sinais
<i>Creo Parametric</i>	Software modelador de sólidos 3D
<i>Ansys Workbench</i>	Software de análise de elementos finitos
<i>Layers Hight level</i>	Placa de leitura de sinais analógicos
<i>Smart Module</i>	Amplificador de sinal
Célula de carga	Equipamento para medir força
<i>Data Logger</i>	Equipamento de aquisição de sinais
<i>nCode DataPlugin</i>	Software de processamento de dados
TCE	Software de aquisição de dados

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	TEMA	14
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	14
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.4	HIPÓTESES	15
1.5	OBJETIVOS	15
1.5.1	<b>Objetivo geral</b>	<b>15</b>
1.5.2	<b>Objetivos específicos</b>	<b>16</b>
1.6	JUSTIFICATIVA	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>18</b>
2.1	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	19
2.1.1	<b>Tensões</b>	<b>19</b>
2.1.2	<b>Tensão normal</b>	<b>21</b>
2.1.3	<b>Tensão de Cisalhamento</b>	<b>22</b>
2.1.4	<b>Torque e potência em eixos</b>	<b>24</b>
2.1.5	<b>Deformação</b>	<b>25</b>
2.1.6	<b>Lei de Hooke</b>	<b>27</b>
2.2	TRANSMISSÃO POR POLIAS E EIXOS	28
2.3	EXTENSOMETRIA	29
2.3.1	<b>Extensômetros</b>	<b>29</b>
2.3.2	<b>Princípio de funcionamento do Strain Gauge</b>	<b>30</b>
2.3.3	<b>Strain Gauge tipo V</b>	<b>32</b>
2.3.4	<b>Circuito de ponte de Wheatstone</b>	<b>33</b>
2.3.5	<b>Configuração I para ponte de <math>\frac{1}{4}</math> usando <i>Strain Gauges</i></b>	<b>34</b>
2.3.6	<b>Configuração II para ponte de <math>\frac{1}{4}</math> usando <i>Strain Gauges</i></b>	<b>35</b>
2.3.7	<b>Configuração I para ponte de <math>\frac{1}{2}</math> usando <i>Strain Gauges</i></b>	<b>36</b>
2.3.8	<b>Configuração II para ponte de <math>\frac{1}{2}</math> usando <i>Strain Gauges</i></b>	<b>36</b>
2.3.9	<b>Configuração para ponte completa usando <i>Strain Gauges</i></b>	<b>37</b>
2.3.10	<b>Hardware e-DAQ</b>	<b>38</b>
2.4	CALIBRAÇÃO	38
2.5	MEDIÇÃO COM EXTENSÔMETROS	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
3.1	FASE EXPLORATÓRIA	40
3.2	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	40
3.3	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	41
3.4	COLETA DE DADOS BIBLIOGRÁFICOS	41
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>42</b>
4.1	MÉTODO TRADICIONAL DE MEDIÇÃO DE TORQUE EM EIXOS	42
4.2	ESTUDO DE CASO	42
4.3	INSTRUMENTAÇÃO DA POLIA	45
4.3.1	<b>Preparação e limpeza da superfície da polia</b>	<b>45</b>
4.3.2	<b>Traçado das linhas de orientação</b>	<b>47</b>
4.3.3	<b>Limpeza final para colagem do <i>Strain Gauge</i></b>	<b>48</b>
4.3.4	<b>Colagem do <i>Strain Gauge</i></b>	<b>49</b>
4.3.5	<b>Processo de soldagem dos terminais do <i>Strain Gauge</i></b>	<b>50</b>
4.3.6	<b>Proteção do <i>Strain Gauge</i> após soldagem</b>	<b>51</b>
4.4	EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	52
4.5	CONFIGURANDO E-DAQ PARA COLETA DE DADOS	54

4.6	LEITURA E RESULTADOS DAS AQUISIÇÕES DE SINAIS .....	57
4.7	CALCULANDO TENSÕES.....	63
	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
	<b>SUJESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os cursos de engenharia vêm buscando cada vez mais formar competências, além do conhecimento teórico. Algumas habilidades adquiridas durante o curso possibilitam aos estudantes desenvolverem novos projetos nas mais diversas áreas.

Nas indústrias e no mercado são lançados diariamente novos produtos e a inovação é motivo de competição entre concorrentes, e o que todas as empresas têm em comum é a necessidade de verificar e validar novos projetos antes de lançá-los no mercado.

Para alcançar o nível de qualidade e desempenho que possa competir com marcas de alto nível, as empresas estão investindo na área de testes do produto, tanto para validação de novos produtos quanto para solucionar problemas existentes, onde é muito utilizada a instrumentação com sensores em peças e sistemas mecânico, hidráulico, elétrico e pneumático para aquisição de dados e para que a partir de uma detalhada análise destes dados possam ser tomadas decisões para o seguimento do projeto.

Os sistemas mecânicos são desenvolvidos para suportar a tensões e a fadiga, o que pode variar muito de acordo com o segmento do produto. O estudo deste trabalho será desenvolvido em uma máquina do ramo agrícola de grande porte onde os mecanismos trabalham com altas tensões de carregamento.

A instrumentação industrial é algo que está em crescente desenvolvimento e que vem ajudando no que se refere a eficiência dos processos de produção, e se utilizado de maneira correta e planejada reduz custos e aumenta a produtividade. De suma importância também mas não muito conhecida devido a confidencialidade que envolvem produtos protótipos, a instrumentação para testes de validação, que no caso é ao que se refere esse trabalho, tem como finalidade verificar os efeitos sofridos em mecanismos quando submetidos as condições normais de trabalho, em alguns casos sendo possível também acelerar o teste simulando a vida útil da peça.

Portanto, o estudo de resistência dos materiais em eixos e polias tem como objetivo ajudar a entender o comportamento de um material, juntamente com instrumentação de extensômetros e análise de dados.

## 1.1 TEMA

Estudo focado em um novo método para medição de torque através de instrumentação diretamente na polia em uma das extremidades do eixo durante a operação de uma máquina colheitadeira e posteriormente a coleta e análise de dados.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho delimita-se em analisar tensões e deformações resultantes em um material utilizando extensometria, os demais assuntos que se relacionam ao tema principal como a parametrização dos *softwares* utilizados e a vasta gama de extensômetros existentes não são submetidos a uma explanação mais profunda pois cada tipo de instrumentação tem sua particularidade e conseqüentemente diferentes formas de ser analisado.

## 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Na empresa onde está sendo realizado este trabalho são fabricadas colheitadeiras, plataformas de corte e plantadeiras, onde existe uma enorme demanda de trabalho ao que se refere a testes, com equipes multifuncionais para conseguir realizar o trabalho com eficiência e agilidade.

Durante o desenvolvimento de um produto, deve se levar em consideração o processo de montagem, onde cada peça deve estar em uma sequência lógica de montagem, pois existirá a necessidade de acessar algumas partes de uma máquina para manutenção ou avaliação de uma determinada situação. Porém para alguns procedimentos que estão fora do cotidiano de trabalho do equipamento, ou seja, não tem procedimentos especificados em catálogo, o difícil acesso e a demanda de muito tempo para desmontar a peça e poder instrumentá-la, trouxe a necessidade de uma alternativa para medir o torque em eixos em máquinas agrícolas sem precisar desmontá-los.

Sensores chamados de extensômetros ou *strain gauges* são colocados em superfícies de peças onde é utilizado para medir deformação plástica diante da aplicação de um carregamento de forças. Esta técnica é bastante utilizada para verificar o nível de tensão atuante em peças diante da aplicação de carregamento mecânico.

Atualmente o tipo de *strain sauge* utilizado para realização de testes que é o do tipo V mais conhecido como espinha de peixe, porém como é instalado em eixos configura-se o *hardware* para coletar dados de torque. Dependendo do local onde o eixo está montado existe a dificuldade de acesso para desmontagem dele, o que geralmente acontece em colheitadeiras é que a demanda de tempo para desmontar as vezes é maior do que o próprio tempo para instrumentar a peça a ser testada.

Assim, esta pesquisa busca responder a seguinte pergunta: é possível medir de maneira efetiva o torque aplicado em um eixo a partir de uma instalação de extensômetro em uma polia fixada em uma das extremidades do eixo, e desta forma diminuir o tempo de execução da atividade?

#### 1.4 HIPÓTESES

Com a alta demanda de trabalho é necessário aprimorar os procedimentos para otimizar o tempo mantendo a qualidade do serviço e quando se trata de um problema, o mesmo deve ser solucionado o mais rápido possível pois isso pode impactar na qualidade e financeiramente uma empresa.

Desta forma, a possibilidade de medir o torque através de uma instrumentação na polia ajudará nas atividades diárias de modo que:

- Diminui o tempo necessário para execução da atividade de instrumentação, conseqüentemente minimiza o risco de acidentes e facilita o trabalho para quem está envolvido diariamente com este tipo de atividade.

#### 1.5 OBJETIVOS

##### 1.5.1 Objetivo geral

Estudar e compreender os fundamentos de resistência dos materiais, tensões e deformações, com apoio de material didático e acompanhamento na prática utilizando *hardwares* de análise de dados. Propor uma nova alternativa de metodologia de trabalho. Será realizado um estudo para tentar desenvolver esta metodologia de medição de torque através da instrumentação em polias de transmissão, em substituição ao método tradicional de medição de torque direto no eixo.

### 1.5.2 Objetivos específicos

Serão realizadas algumas atividades ao longo do desenvolvimento deste estudo procurando atingir o objetivo geral mencionado anteriormente, assim os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinação dos requisitos do equipamento como forças e condições de trabalho do mecanismo;
- Desenvolver metodologia de medição de torque;
- Configurar o *hardware* e-DAQ para a aquisição de dados dos extensômetros;
- Gerenciar e analisar dados das aquisições através do software *nCode*;
- Calcular tensões de cisalhamento da peça instrumentada;
- Correlacionar os resultados dos cálculos analíticos de tensão com os resultados do *hardware* de análise de dados.

### 1.6 JUSTIFICATIVA

Ao passar dos anos as empresas fabricantes de máquinas agrícolas vem procurando formas de melhorar a qualidade do produto, assim como a eficiência do trabalho no campo. Deste modo a concorrência entre as marcas faz com que cada empresa tente melhorar seu produto para ter competitividade no mercado.

Para iniciar um projeto, é necessário avaliar todas partes funcionais de um equipamento, isso leva um bom tempo, então tudo deve ser planejado e testado antes que o produto entre definitivamente em produção. Quando se trata de um problema onde o item já está em linha de produção é imprescindível que seja solucionado de forma imediata.

A aplicação de tensões em polias, que é objeto de estudo neste trabalho, está presente em praticamente todos os tipos de equipamentos agrícolas, o que releva a importância de entender quais são as forças aplicadas em cada peça do equipamento para dimensioná-lo de forma que atenda as necessidades do projeto.

Os cálculos teóricos, a análise de elementos finitos, os testes físicos e a análise de dados trazem uma boa perspectiva de como a prática coincide com a teoria e de fato é uma boa prática e melhora a confiabilidade no produto e nos procedimentos de testes da empresa. A alta qualidade e durabilidade do produto estão diretamente ligadas ao quanto tem se de preocupação por parte da empresa

em garantir que o produto chegue ao mercado com baixa taxa de falha por máquina e o quanto investe em testes durante o desenvolvimento do projeto.

Portanto, o método alternativo para medir torque em transmissões mecânicas pode garantir resultados confiáveis e pode abrir novas opções para quem trabalha diariamente com este tipo de atividades.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Projetar consiste em criar um plano para suprir uma necessidade tanto quanto para solucionar um problema, plano este que se resultar em algo de realidade física deve ser funcional, manufaturável, competitivo e seguro. No desenvolvimento de um projeto o engenheiro pode se deparar com mais de uma opção que atenda às necessidades, por isso é importante ter habilidade e conhecimento para escolher uma entre as demais opções. Também é necessário intensa comunicação em que palavras e desenhos são utilizados para resultar em uma comunicação efetiva (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Conforme Beer e Johnston (2008), o estudo da mecânica dos materiais tem como objetivo trazer ao engenheiro o conhecimento de como as várias estruturas de máquinas se comportam quando sujeitas a diferentes esforços. Para os autores o estudante de engenharia mecânica deve ser capaz de analisar problemas de maneira simples e lógica e encontrar a solução utilizando o conhecimento adquirido durante a graduação.

Segundo Hibbeler (2009), a aplicação de cargas externas e a resultante das cargas internas no interior do corpo é o que pode ser definido como o que estuda a resistência dos materiais.

Norton (2013) define que tensão é uma força por unidade de área com unidades de PSI ou MPa, onde um corpo está sujeito a algumas forças e essa tensão é distribuída segundo uma função contínua variável dentro de uma porção de material. Para analisar melhor o comportamento de um material sujeito a tensões é indicado analisar elementos extremamente pequenos dentro do corpo, o que pode ser chamado de elementos infinitesimais que geralmente são modelados em formato de cubos.

Os *strain gauges* ou extensômetros como são chamados, já existem há quase 80 anos e continuam sendo um meio fundamental de medir tensões e fadigas em materiais (HBM, 2020).

Sistemas de medições são utilizados para quantificar fenômenos da natureza, dos quais podem ser medidos esforços, temperatura, escoamento de fluidos entre outros. Na análise de tensões utilizando extensometria o sistema de medição é formado por sensores de deformação de resistência variável, que converte deformação mecânica em variação de resistência elétrica. Os

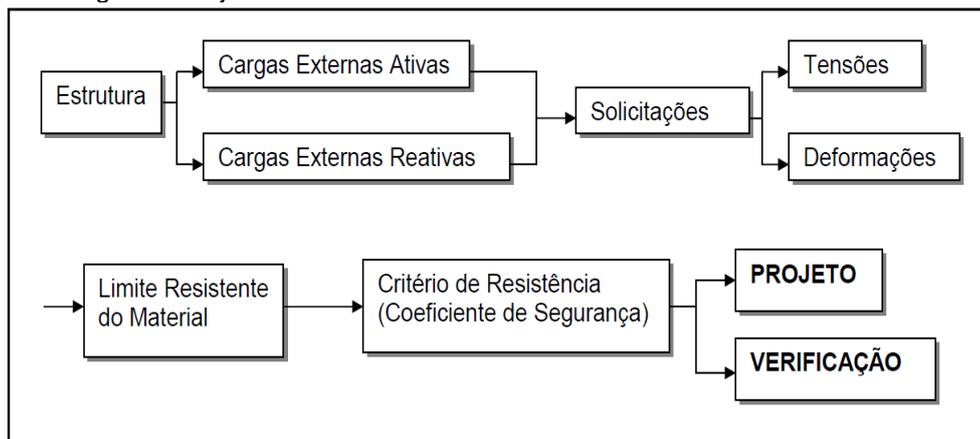
extensômetros são montados em um circuito elétrico, esse circuito elétrico utilizado é chamado de ponte de *Wheatstone*, a qual pode ser instalada de diferentes formas (UFSC, 2004).

## 2.1 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Resistência dos materiais é fundamentada no estudo do comportamento das diversas partes de um corpo quando sob ações de solicitações. Para estudar o equilíbrio interno de um corpo são determinadas as solicitações fundamentais que estão penetrando no interior da estrutura. Ao aplicar esforços externos as partículas destes corpos se deslocam até que se atinja uma situação de equilíbrio entre os esforços externos aplicados e os esforços internos resistentes, este equilíbrio citado se manifesta sob a forma de deformações, ou seja, mudança da forma original, dando origem à tensões internas, (PUCRS,2007).

Ainda segundo PUCRS (2007), geralmente as deformações resultantes nos materiais são de pequena escala, onde deformação é um fenômeno geométrico enquanto tensão é um fenômeno mecânico de difusão dos esforços para as diversas partes de um corpo. Devido a vasta diversidade de materiais, existem também diversos limites de resistência, no fluxograma da figura 1 está exemplificado os passos de um projeto perante a resistência dos materiais.

Figura 1 - Fluxograma Projeto x Resistência dos Materiais



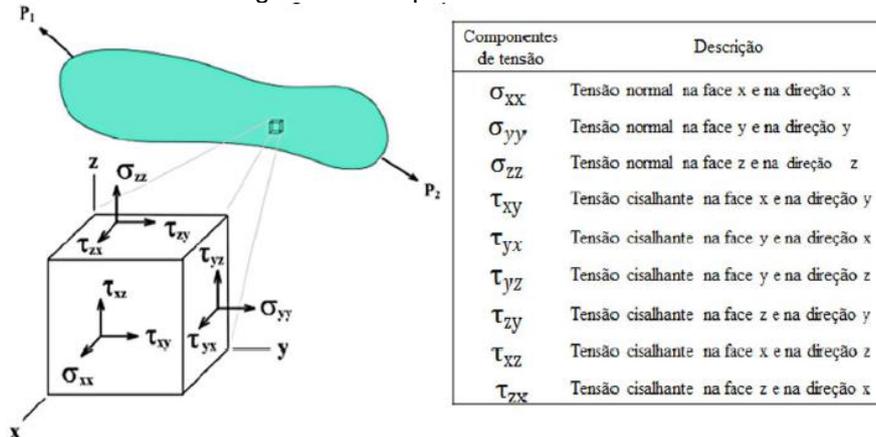
Fonte: PUCRS, 2007

### 2.1.1 Tensões

Tensão pode ser definida como força por unidade de área, podendo ser representado por PSI ou MPa. Na figura 2 encontram-se componentes normais de

tensão e cisalhamento da tensão que estão atuando em um cubo infinitesimal e correspondem aos termos de um tensor, sendo assim a tensão é um tensor de segunda ordem e requer nove componentes para descrevê-los em três dimensões (NORTON, 2013).

Figura 2 - Cubo de tensões – Diagrama de corpo livre



Fonte: Adaptado de Kim, Sankar, 2011

De acordo com Beer e Johnston (2008), o estado mais geral de tensões pode ser representado por seis componentes, sendo tensões normais consideradas como  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , onde se considera estas forças sendo aplicadas nas faces de um elemento cúbico, as outras três são  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$  são as componentes de tensões de cisalhamento em cada elemento x, y e z. Ainda representando as tensões tem-se a equação 1 através da matriz de tensões:

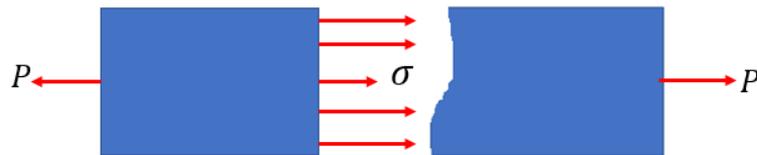
$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Norton (2013), afirma que as tensões normais e de cisalhamento irão variar de acordo com a direção de força aplicada, haverá também as componentes de tensões de cisalhamento que serão anuladas. São chamadas tensões principais as tensões normais que atuam sobre um plano, planos principais serão os que as tensões principais atuam. As direções da superfície normal ao plano principal são chamadas de eixo principal e tensões normais principais são as tensões normais atuando na direção dos eixos principais.

### 2.1.2 Tensão normal

Norton (2013) explica que um dos tipos mais simples de carregamento que podem ser aplicados em um elemento é a sollicitação normal de tração. Ao longo de um corpo sobre carregamento a tensão na seção transversal do elemento é uniforme, como mostrado na figura 3.

Figura 3 - Distribuição de tensão na seção transversal



Fonte: Adaptado de Norton, 2013

O que exemplifica a figura 3 é o motivo para utilizar este método de carregamento para testar as propriedades dos materiais, sendo assim utilizando a equação 2 para encontrar a tensão normal aplicada na tração pura:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão normal;

$P$  = força aplicada;

$A$  = área na seção transversal em determinado ponto.

Quando aplicadas forças em uma barra de seção transversal o material sofre alongamento ou encurtamento, essa variação de comprimento pode ser encontrada pela equação 3: (NORTON,2013)

$$\Delta_s = \frac{P \cdot l}{A \cdot E} \quad (3)$$

Onde:

$\Delta_s$  = variação de comprimento;

$P$  = força aplicada;

$l$  = comprimento carregado;

$A$  = área na seção transversal;

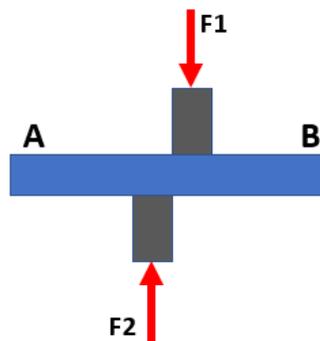
$E$  = módulo de elasticidade do material.

### 2.1.3 Tensão de Cisalhamento

De acordo com UNICAMP (2020), cisalhamento nada mais é que um corte feito no material onde as duas partes se movimentam uma sobre a outra paralelamente por escorregamento. Por este motivo, para projetar componentes mecânicos é necessário ter conhecimento de até onde vai a resistência dos materiais.

A tensão de cisalhamento ocorre normalmente em pinos, parafusos e rebites que fazem ligação de diversas partes de estruturas. Pode ser utilizado como exemplo o caso da figura 4, quando duas forças  $F_1$  e  $F_2$  são aplicadas a uma barra AB, na direção transversal à barra, ocorre o tipo de tensão chamado de cisalhamento (BEER; JOHNSTON, 2008).

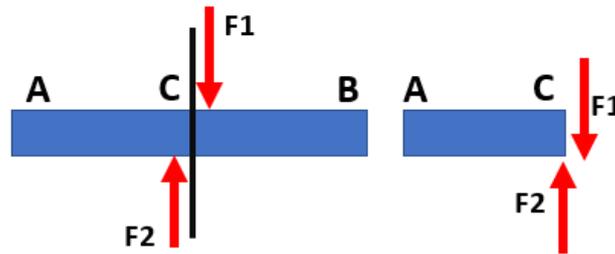
Figura 4 - Forças cisalhantes



**Fonte:** Adaptado de Beer e Johnston, 2008

Ainda segundo Beer e Johnston (2008), se adicionar um ponto C e passar uma seção transversal por ele, que será entre os pontos de aplicação de forças, pode-se desenhar o diagrama da parte AC e pode ser concluído que sua resultante deve se igualar a  $F_1$  conforme ilustrado na figura 5. Essa resultante é chamada de força cortante na seção.

Figura 5 - Força cortante na seção



**Fonte:** Adaptado de Beer e Johnston, 2008

Ao dividir a força constante  $F_1$  pela área da seção transversal  $A$ , terá tensão média de cisalhamento na seção conforme equação 4, lembrando que esse valor obtido na seção  $C$  é um valor médio das tensões de cisalhamento e ao contrário do que as tensões normais, não pode ser considerada como uniforme (BEER; JOHNSTON, 2008).

$$\tau_{méd} = \frac{F_1}{A} \quad (4)$$

Onde:

$\tau_{méd}$  = tensão média de cisalhamento

$F_1$  = força aplicada sobre a seção transversal da barra

$A$  = área da seção transversal

Ao aplicar torque em uma barra redonda sólida, ocorre a tensão de cisalhamento. No centro do diâmetro desta barra o cisalhamento será zero e na superfície será o cisalhamento máximo. A equação 5 é utilizada quando a distribuição é proporcional ao raio  $\rho$ . Para designar o raio da superfície externa é utilizada a equação 6, (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$\tau = \frac{T \cdot \rho}{J} \quad (5)$$

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot r}{J} \quad (6)$$

Onde:

$\tau_{max}$  = tensão máxima de cisalhamento;

$\rho$  = distribuição de tensão proporcional ao raio;

$T$  = torque;

$J$  = momento polar da área;

$r$  = raio da superfície.

Ainda segundo Shigley; Mischke e Budynas (2005), aplica-se a equação 7 quando se tem seções circulares para encontrar o momento polar de inércia.

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad (7)$$

Onde:

$d$  = diâmetro da superfície

#### 2.1.4 Torque e potência em eixos

As cargas aplicadas em eixos são predominantemente de torção que é devido ao torque e de flexão devido às cargas transversais, onde estas duas forças atuam. Descrito na equação 8, o torque pode ser definido como a capacidade que uma força tem de fazer um corpo girar em torno do próprio eixo, porém somente uma força não gera o torque, é necessário que esta força seja aplicada em uma alavanca de uma certa distância (HALLIDAY, 2016)

$$T = F \cdot \text{sen}\theta \cdot d \quad (8)$$

Onde:

$T$  = torque;

$F \text{sen}\theta$  = resultante da força aplicada;

$d$  = distância perpendicular formado pelo braço da alavanca.

Para calcular a potência instantânea transmitida por um eixo rotativo é necessário saber a velocidade angular e o torque, utilizando a equação 9 que está representada abaixo, (NORTON, 2013).

$$P = T \cdot \omega \quad (9)$$

Onde:

$P$  = potência no eixo;

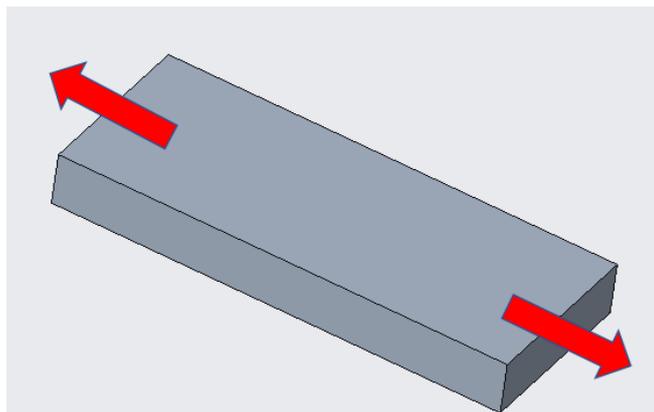
$T$  = torque em N.m;

$\omega$  = velocidade angular.

### 2.1.5 Deformação

Cada tipo de material possui diferentes propriedades elásticas, assim como cada geométrica sofrerá deformação de diferentes modos, portanto existem quatro tipos diferentes de deformação que são axial, flexão, cisalhamento e torção. A deformação axial ilustrada na figura 6 que é uma das mais comuns mede como um material se estica ou se comprime, (NI, 2020).

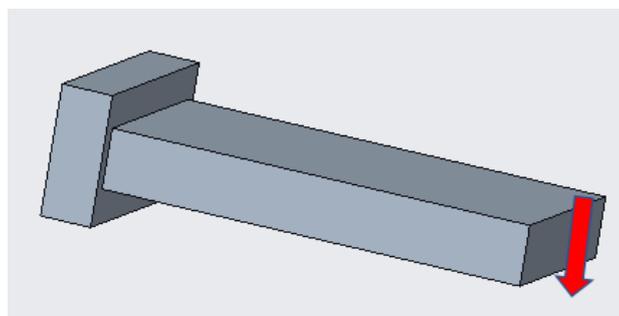
Figura 6 - Deformação axial



Fonte: Adaptado de NI, 2020

Conforme mostrado na figura 7, a tensão de flexão mede o alongamento de um lado e contração do outro devido a força linear aplicada na direção vertical.

Figura 7 - Deformação de flexão



Fonte: Adaptado de NI, 2020

Para descrever um alongamento de uma seção é usado o termo deformação, esta deformação é uma consequência de um carregamento mecânico ou térmico e

sempre representa uma variação relativa no comprimento, sendo descrita pela equação 10, (UFSC, 2004).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (10)$$

Onde:

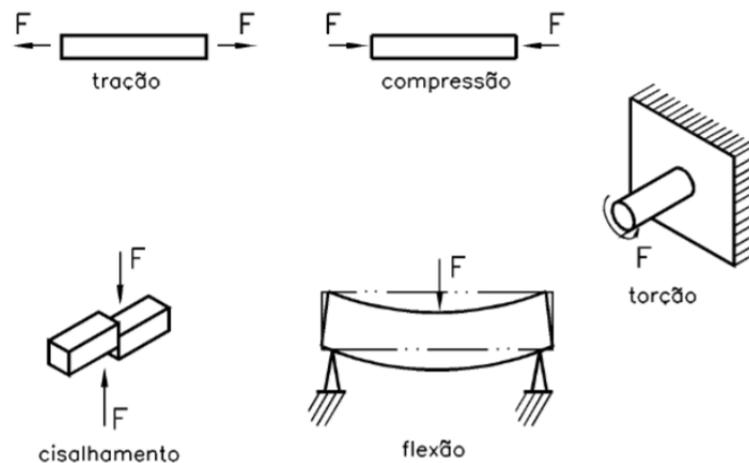
$\varepsilon$  = deformação;

$\Delta l$  = comprimento de deformação;

$l_0$  = comprimento inicial do material.

Quando um corpo é alongado ele tende a voltar a forma original devido a força de tração entre as partículas, isso representa a elasticidade de um material. Quanto mais um corpo tende a voltar a sua forma original mais elástico é seu material. É possível diferenciar os diferentes tipos de deformações observando o sentido de aplicação de forças, sendo assim, ilustrados na figura 8 alguns exemplos baseados no sentido de aplicação de forças, (PUCRS, 2007).

Figura 8 - Tipos de esforços em deformação



Fonte: Weber, 2008

Segundo Norton (2013), para a maioria dos materiais de engenharia a deformação e tensão são relacionados pela lei de Hooke.

### 2.1.6 Lei de Hooke

De acordo com Beer e Johnston (2008) as estruturas devem ser projetadas para sofrerem apenas pequenas deformações e não ultrapassar os valores do diagrama tensão-deformação correspondente ao trecho reto do diagrama, sendo assim a tensão é diretamente proporcional a deformação específica, esta relação é definida pela equação 11, conhecida como Lei de Hooke.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (11)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão;

$E$  = módulo de elasticidade do material;

$\varepsilon$  = deformação do material.

Na equação 11 pode ser encontrado o módulo de elasticidade longitudinal de um material, já para encontrar o módulo de elasticidade transversal deve ser utilizado a equação 12.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (12)$$

Onde:

$G$  = módulo de elasticidade transversal;

$\tau$  = tensão de cisalhamento;

$\gamma$  = Distorção angular.

Ainda segundo Beer e Johnston (2008), as propriedades dos materiais podem ser modificadas por tratamento térmico, presença de ligas metálicas ou pelo processo de manufatura, tendo isso em vista, pode-se notar na figura 9 um exemplo de diagrama tensão - deformação do aço puro e de mais três tipos de aço.

Figura 9 - Diagrama tensão - deformação



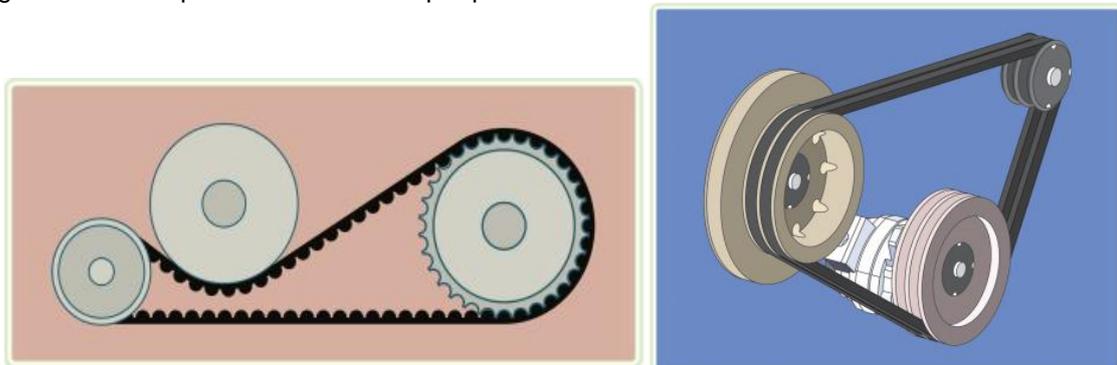
**Fonte:** Adaptado de Beer e Johnston, 2008

## 2.2 TRANSMISSÃO POR POLIAS E EIXOS

Segundo Franceschi e Antonello (2014), as polias são definidas como peças cilíndricas as quais são movimentadas por meio de rotação de um eixo e por correias. Este elemento de máquinas é constituído de uma coroa ou face, na qual é envolvida por uma correia. Existem várias formas de polias em função dos diferentes tipos de correias as quais variam de acordo com a utilização, na figura 10 pode ser observado três tipos diferente de polias sendo utilizadas em uma só correia.

Ao projetar uma polia deve-se respeitar as normas técnicas e de tolerância evitando possíveis erros de dimensionamento.

Figura 10 - Exemplos de transmissão por polias



**Fonte:** Franceschi e Antonello, 2014

Transmissões por correias possuem baixo custo inicial, alto coeficiente de atrito, resistência elevada a desgastes, funcionamentos silenciosos, são flexíveis e podem ser utilizadas para grande distância entre centros. (SENAI, 1996).

De acordo com Norton (2013), os eixos são responsáveis por transmitir movimento de rotação e torque de uma posição até outra, na maioria das vezes são montadas polias, engrenagens ou catracas sobre os eixos.

Ainda segundo Norton (2013), o eixo pode ser parte uma parte integral do acionamento, tal como eixo manivela e eixo do motor, ou pode ser um eixo livre que é conectado a outro componente por meio de um acoplamento. Nos mais variados equipamentos podem ser encontrados eixos, com por exemplo em máquinas de produção automatizada.

## 2.3 EXTENSOMETRIA

Ao longo dos anos diversos equipamentos e procedimentos foram criados com o objetivo de medir deformações em materiais, porém inicialmente os sistemas eram mecânicos e apresentavam limitações e erros de medição, devido a evolução da eletromecânica foi constatado que a variação de resistência de um condutor elétrico causada pela aplicação de tensão mecânica poderia ser utilizada para medir estas deformações (UFSC, 2004).

Um extensômetro não funciona sozinho, são necessários outros equipamentos específicos para fazer a leitura da deformação, estes equipamentos têm a função de filtrar e amplificar o sinal medido pela ponte de *Wheatstone*, (NI,2020).

Para avaliar a relação entre esforços e deformações em um material é utilizada a Lei de Hooke, que relaciona os esforços aplicados através da tensão gerada pelo material com a deformação resultante (UFSC, 2004).

### 2.3.1 Extensômetros

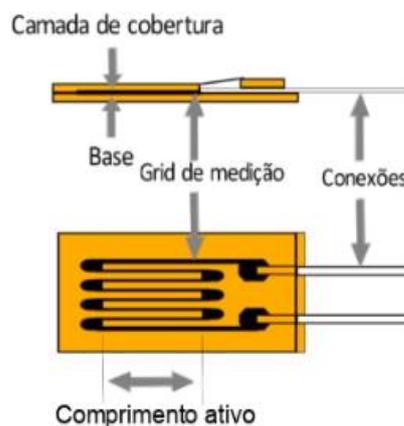
Uma das formas mais comuns de medição e deformações é usando extensômetros ou *strain gauges*, tanto para análise experimental como para determinação de cargas de serviço. A aplicação de extensômetros sobre a superfície da peça a ser monitorada depende de alguns fatores como os pontos de medição, o tipo de leitura a ser feita e o layout de fiação do sistema (UFSC, 2004).

Ainda segundo UFSC (2004), existem vários tipos de extensômetros, as formas se diferenciam no posicionamento e na quantidade das grades, assim como a posição dos conectores. Entre os extensômetros existentes tem-se os lineares com simples e duplo (paralelo) arranjo, rosetas “X, XX, XY, XYZ, XX” com grades de medição dispostas a 90° uma das outras, também tem os que são chamados de rosetas “R” com três grades que ficam a um certo ângulo uma das outras, entre outras formas especiais.

### 2.3.2 Princípio de funcionamento do Strain Gauge

O princípio de funcionamento de um *strain gauge* consiste em ler alteração de resistência e deformação de um condutor elétrico, ou seja, todo condutor elétrico tem uma resistência, quando a peça é submetida a tensões ocorre a alteração destas resistências que com auxílio de *hardware* é possível fazer uma leitura. As causas desta variação podem ser descritas por duas razões, uma se dá a deformação do condutor e a outra variação de resistividade do material condutor, na figura 11 está representado a estrutura de um *strain gauge* (UFSC, 2004).

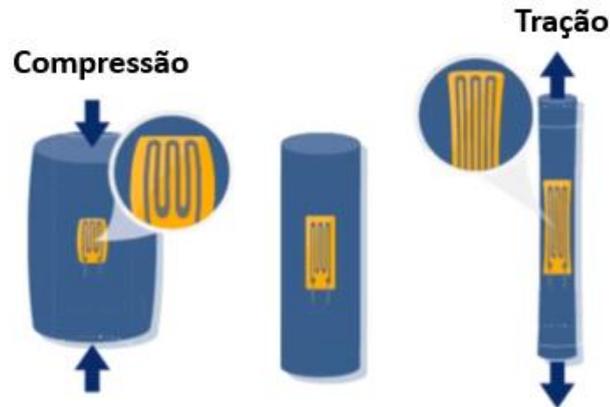
Figura 11 - Estrutura de um Strain Gauge



Fonte: HBM, 2020

O *strain gauge* utiliza a tensão para descrever a medição de deformação de um material, este material pode estar sendo tracionado ou comprimido como mostra o exemplo da figura 12, conseqüentemente variando a tensão devido ao efeito de uma força externa aplicada (tensão mecânica), a influência do calor e do frio (tensão térmica) e forças internas do resfriamento não uniforme de componentes fundidos, como por exemplo forjado ou soldado (tensão residual), (HBM, 2020).

Figura 12 - Aplicação de um Strain Gauge



Fonte: Adaptado de HB, 2020

A deformação do *strain gauge* pode ser calculada a partir da mudança de resistência com a equação 13 (HBM, 2020).

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \cdot \varepsilon \quad (13)$$

Onde:

$\Delta R$  = variação de resistência no SG devido a deformação;

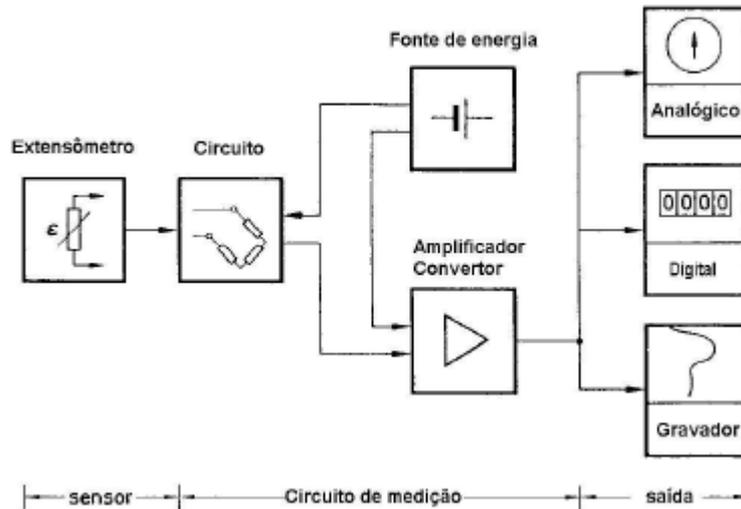
$R_0$  = resistência nominal do SG;

$K$  = fator de gauge (sensibilidade do SG);

$\varepsilon$  = deformação a ser medida.

Para realizar o processo de medição outros equipamentos podem ser acoplados no sistema com a finalidade melhorar o processamento e leitura de dados conforme ilustrado na figura 13 onde está representado um esquema básico de um sistema de medição de extensômetro de resistência variável, (UFSC, 2004).

Figura 13 - Esquema de sistema de medição com extensômetro



Fonte: UFSC, 2004

### 2.3.3 Strain Gauge tipo V

Este tipo de *strain gauge* em forma V ilustrado na figura 14, também conhecido por *strain gauge* espinha de peixe, possui duas grades de medição dispostas em um ângulo de  $45^\circ$  em relação ao eixo central *strain Gauge*, normalmente são utilizados para realizar medições em barras de torção e determinação de tensões de cisalhamento quando ocorrem em barras de cisalhamento na área de fibras neutras, (HBM, 2020).

Figura 14 - Strain Gauge tipo V



Fonte: HBM, 2020

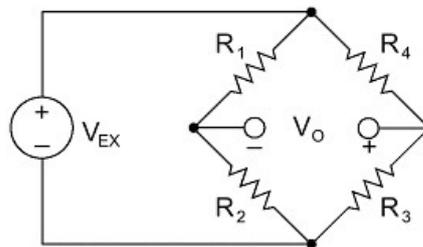
Ainda este tipo de *strain gauge* pode ser encontrado com diferentes geometrias e tamanhos, cada um disponível com respostas e temperaturas adequadas aos diferentes tipos de matérias, aos quais podem ser aplicados para realizar medições de deformações (HBM, 2020).

### 2.3.4 Circuito de ponte de Wheatstone

Em 1843 Charles *Wheatstone* apresentou um circuito capaz de medir resistências elétricas com precisão, chamado de Ponte de *Wheatstone* (UFSC, 2004).

A ponte deste circuito pode medir resistência elétrica de várias maneiras, uma delas é para determinar um valor absoluto de resistência por meio de comparação de uma resistência já conhecida, outro método utilizado é a medição de alterações relativas na resistência. Por último, um método que consegue chegar a uma maior precisão de medição é o método utilizando *strain gauge*. Cada tipo de conexão de ponte terá uma equação correspondente, o que determina a forma como será instalada a rede de ponte dependerá da geometria da peça e qual a deformação e tensão que se procura medir, na figura 15 está representado uma ponte completa de *Wheatstone* (HBM, 2020).

Figura 15 - Circuito de Ponte de Wheatstone



Fonte: NI, 2020

A ponte funciona com uma diferença de potencial (ddp) aplicada entre dois pontos, a ddp é dividida para os dois braços  $R_1$ ,  $R_4$  e  $R_2$ ,  $R_3$ . A resistência de cada braço contribui para o equilíbrio da ponte, sendo assim uma ddp pode ser medida entre os dois pontos horizontais da ponte, com isso as medidas da ddp na entrada e na saída da ponte não se relacionam pela equação de equilíbrio. Os circuitos de pontes podem ser lineares ou não lineares (UFSC, 2004).

Ainda observando a figura 15, pode ser dito também que a ponte é o equivalente elétrico de dois circuitos divisores de tensão  $R_1$  e  $R_2$  compõe um circuito divisor de tensão, e  $R_4$  e  $R_3$  que compõe o segundo circuito divisor de tensão. Na saída da ponte, o  $V_0$  pode ser calculado pela equação 14 que é a medida entre os nós intermediários dos dois divisores de tensão (NI, 2020).

$$V_0 = \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_4} + \frac{R_2}{R_1 + 2} \right] * V_{EX} \quad (14)$$

Onde:

$V_0$  = valor da saída de tensão;

$R_1 \dots$  = são os valores de resistência do *strain gauge*;

$V_{EX}$  = tensão de excitação.

Para ser possível chegar na relação de mV/V em função da deformação do material vezes o fator de sensibilidade K do *strain gauge* introduz se a equação 12 na equação 13, as quais resultarão na equação 15, (HBM, 2020).

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \frac{K}{4} * [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4] \quad (15)$$

Onde:

$K$  = fator de sensibilidade do *strain gauge*;

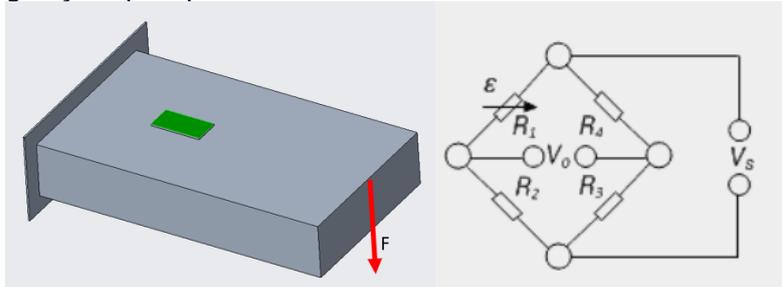
$\varepsilon_1 \dots$  = são os valores de deformação nos *strain gauges*.

Cada tipo de deformação requer determinada configuração de ponte, sendo assim, existem três tipos possíveis de configurações de extensômetros, que são a ponte de  $1/4$ , de  $1/2$  e a ponte completa, dentro de cada configuração existem mais de um tipo nomenclatura de instrumentação (NI, 2020).

### 2.3.5 Configuração I para ponte de $1/4$ usando *Strain Gauges*

Este tipo de configuração que está representado na figura 16 mede deformação axial ou de flexão e requer resistores de conclusão de meia ponte para completar a ponte, (NI, 2020).

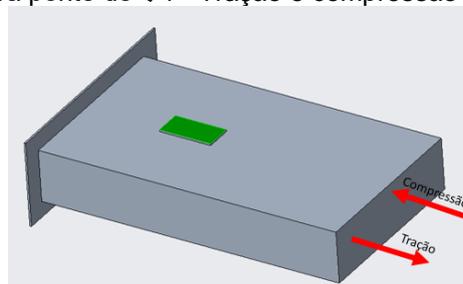
Figura 16 - Configuração I para ponte de 1/4 – Flexão



Fonte: autor, 2020

Ainda nesta mesma configuração de 1/4 de ponte pode ser medido tração e compressão conforme exemplificadas na figura 17, (HBM, 2020).

Figura 17 - Configuração I para ponte de 1/4 - Tração e compressão

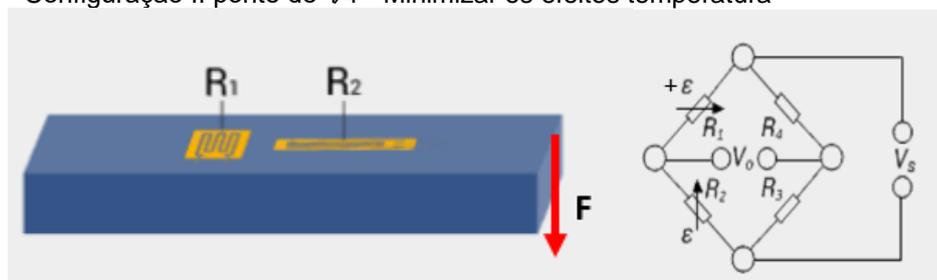


Fonte: autor, 2020

### 2.3.6 Configuração II para ponte de 1/4 usando *Strain Gauges*

Tanto o material da peça quanto o material do *strain gauge* pode mudar sua temperatura, o que pode ocasionar uma mudança nos resultados obtidos na coleta de dados. Esta configuração II para ponte de 1/4 conforme mostra a figura 18, tem como objetivo minimizar estes efeitos decorrentes da mudança de temperatura, (NI,2020).

Figura 18 - Configuração II ponte de 1/4 - Minimizar os efeitos temperatura

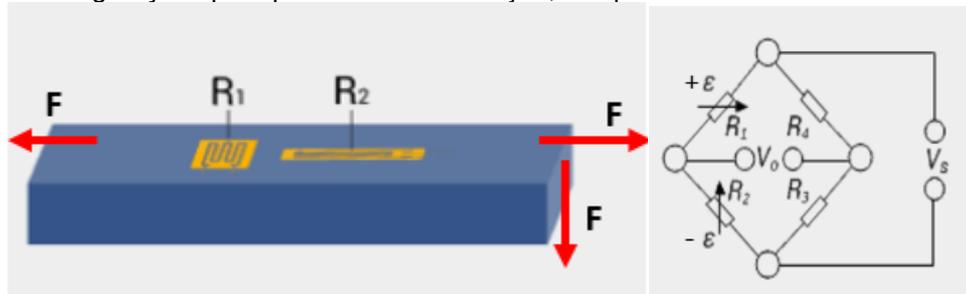


Fonte: HBM, 2020

### 2.3.7 Configuração I para ponte de $\frac{1}{2}$ usando *Strain Gauges*

É possível dobrar a sensibilidade da ponte à deformação tornando ambos os *strain gauges* ativos em uma configuração de meia ponte. Esta configuração é utilizada para medir deformação axial ou de flexão, tração e compressão. É possível observar na figura 19 que esta configuração pode ser facilmente confundida com a configuração de quarto de ponte tipo II, mas o tipo I tem um elemento  $R_2$  ativo que é ligado ao espécime de deformação (NI, 2020).

Figura 19 - Configuração I para ponte de  $\frac{1}{2}$  - Tração, compressão e flexão



Fonte: HBM, 2020

Onde:

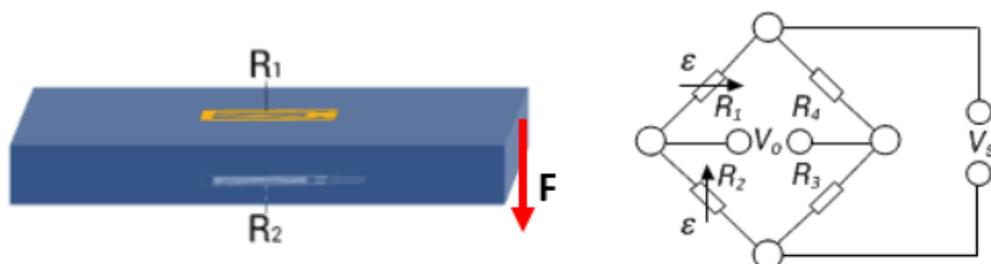
$R_2$  = extensômetro ativo compensando o efeito de Poisson ( $-\nu\epsilon$ );

$R_1$  = extensômetro ativo que mede a deformação de tração ( $+\epsilon$ ).

### 2.3.8 Configuração II para ponte de $\frac{1}{2}$ usando *Strain Gauges*

Este tipo de configuração ilustrado na figura 20 mede unicamente tensão de flexão (NI,2020).

Figura 20 - Configuração II para ponte de  $\frac{1}{2}$  - Flexão



Fonte: HBM, 2020

Onde:

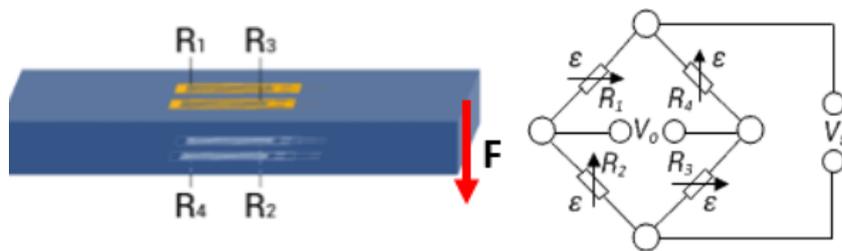
$R_1$  = extensômetro ativo que mede a deformação de tração ( $+\epsilon$ );

$R_2$  = extensômetro ativo que mede a deformação compressiva ( $-\epsilon$ ).

### 2.3.9 Configuração para ponte completa usando *Strain Gauges*

Uma ponte completa tem quatro extensômetros ativos e está disponível em três tipos diferentes. Os tipos I mostrado na figura 21 e tipo II mostrado na figura 22 medem a deformação de flexão e o tipo III mostrado na figura 23 mede a deformação axial. Apenas os tipos II e III compensam o efeito Poisson, mas todos os três tipos minimizam os efeitos da temperatura (NI,2020).

Figura 21 - Configuração I para ponte completa - Flexão



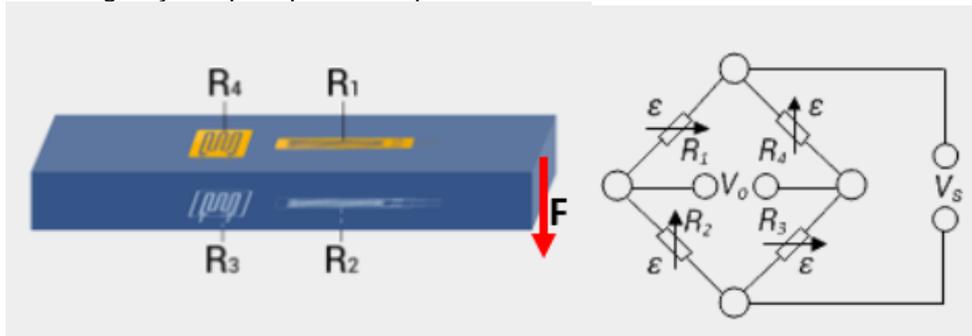
Fonte: HBM, 2020

Onde:

$R_2$  e  $R_4$  = extensômetros ativos que medem a deformação compressiva ( $-\epsilon$ );

$R_1$  e  $R_3$  = extensômetros ativos que medem a deformação de tração ( $+\epsilon$ ).

Figura 22 - Configuração II para ponte completa - Flexão



Fonte: HBM, 2020

Onde:

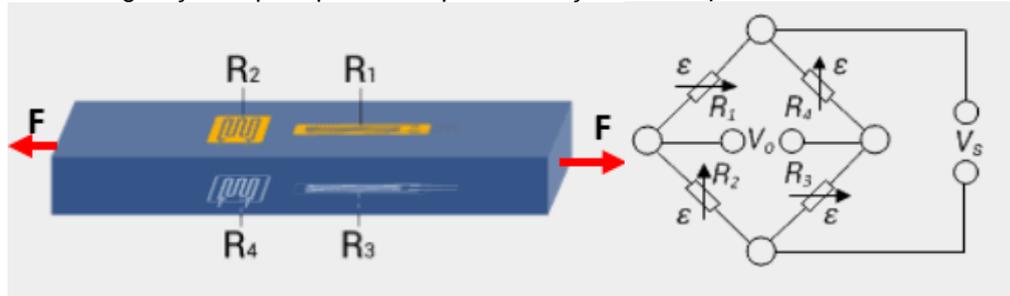
$R_1$  = extensômetro ativo medindo o efeito de Poisson compressivo ( $-v\epsilon$ );

$R_2$  = extensômetro ativo que mede o efeito de Poisson de tração ( $+v\epsilon$ );

$R_3$  = extensômetro ativo que mede a deformação compressiva ( $-\epsilon$ );

$R_4$  = extensômetro ativo que mede a deformação de tração ( $+\epsilon$ ).

Figura 23 - Configuração III para ponte completa – Tração ou compressão



Fonte: HBM, 2020

Onde:

$R_1$  e  $R_3$  = extensômetros ativos que medem o efeito de Poisson compressivo ( $-v\varepsilon$ );

$R_2$  e  $R_4$  = extensômetros ativos medindo a deformação de tração ( $+\varepsilon$ ).

### 2.3.10 Hardware e-DAQ

Este equipamento é capaz de realizar uma ampla gama de processamento, armazenamento de dados e cálculos complexos, também podem realizar testes com contagem de canais pequenas e altas frequências. É bastante utilizado em testes de longo prazo e para monitoramento autônomo em ambientes agressivos (HBM, 2020).

## 2.4 CALIBRAÇÃO

Calibração é uma operação específica que estabelece sob condições específicas uma relação entre valores e as incertezas de medição fornecidos por equipamentos de medição e as indicações correspondentes com as incertezas associadas, logo, utiliza esta informação para relacionar a obtenção de um resultado de medição. Existe uma sequência de calibração desde uma referência até o sistema de medição final onde o resultado de calibração sempre irá depender das etapas de calibração anteriores (INMETRO, 2012).

## 2.5 MEDIÇÃO COM EXTENSÔMETROS

As deformações medidas são geralmente muito pequenas e produzem sinais elétricos de variação de tensão muito baixos, portanto não pode ser lida por um osciloscópio ou por um multímetro. Este processo de medição de deformação até a leitura dados legíveis é feito por um sistema de medição (UFSC, 2004).

Ainda segundo UFSC (2004), vários fatores podem afetar o desempenho da medição pois as medições com extensômetros são complexas, sendo necessário selecionar e usar adequadamente a ponte, a fiação, a temperatura, o condicionamento de sinal e os componentes DAQ para gerar medições confiáveis. Outros fatores que interferem na medição são as tolerâncias de resistência e deformação que são induzidas pela aplicação do medidor que geram tensão inicial quando nenhuma deformação é aplicada e quando os fios condutores são longos e podem adicionar resistência ao braço da ponte.

### 3 METODOLOGIA

A partir de uma pesquisa bibliográfica este trabalho busca através de livros e materiais acadêmicos assuntos relacionados ao tema em questão. Sendo necessário ter acesso aos materiais referentes à resistência dos materiais, projeto de máquinas, instrumentação e análise de dados.

Procurando uma solução para o problema de pesquisa, foi identificado que método a ser seguido é o de pesquisa-ação, o qual faz referência a um problema onde procura-se uma ação e a solução, segundo Thiollent (1985) apud Gil (2002).

#### 3.1 FASE EXPLORATÓRIA

Conforme metodologia Thiollent (1985) apud Gil (2002), durante a fase exploratória, realizou-se uma pesquisa sobre o tema para coletar informações de como é feito atualmente a atividade de medir torque em eixos e o porquê seria necessário um novo método de medição. Coletados os dados necessários para entender o assunto, iniciou-se um levantamento de quais os materiais e equipamentos seriam necessários para dar andamento nas atividades, assim como o local, equipamentos e as datas para realizar a instrumentação, coleta e análise de dados.

#### 3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Diante da necessidade de entender o comportamento de um corpo submetido a esforços, foram utilizadas bibliografias que detalham a resistência dos materiais, utilizando como referências Beer e Johnston (2008), Norton (2013), entre outros materiais relacionados a extensometria, onde são expostos exemplos de problemas práticos envolvendo este tema. Compreendendo assim alguns tópicos, cálculos e análises que devem ser resolvidos até o final do projeto.

Os tópicos necessários para realização deste trabalho foram organizados da seguinte forma:

- a) Identificar em qual equipamento e o local do laboratório onde será realizado o teste assim como a data que os recursos estarão disponíveis para uso;

- b) Adquirir por meio de treinamento e estudos o conhecimento necessário para realizar a atividade de instrumentação e análise de dados;
- c) Instrumentar a polia com *strain gauges* para realizar a coleta de dados.
- d) Processar a análise de dados no *hardware* de análise de dados;
- e) Calcular analiticamente a partir de estudos focado em resistência dos materiais algumas tensões quando aplicado carregamento de forças, as quais devem ser determinadas previamente;
- f) Comparar os resultados dos cálculos analíticos das tensões de cisalhamento e de torção com os resultados do *hardware* de análise de dados.

### 3.3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para realizar os cálculos utilizando as fórmulas citadas ao longo do estudo, optou-se pela utilização do *software* Excel devido aos recursos que oferece para realizar os cálculos e para organização de dados do trabalho. Com o *hardware* de análise de dados e-Daq foi possível coletar e analisar os dados durante os testes. Para as verificações de dimensões e demais dados da peça foi utilizado o *Software Creo Parametric* e para a realização da análise estrutural foi utilizado o *Software Ansys Workbench*.

### 3.4 COLETA DE DADOS BIBLIOGRÁFICOS

A coleta de dados foi realizada através de pesquisa bibliográfica em trabalhos semelhantes ao tema disponíveis ao público em geral e com apoio de livros.

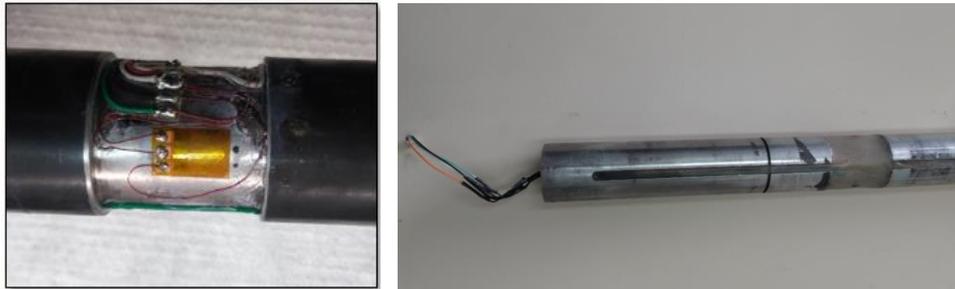
## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente foi feito uma análise do problema, de como é realizado atualmente a instrumentação em eixos para leitura de torque. Entendido o funcionamento do sistema a ser analisado e suas configurações no meio em que ele está imerso. Também buscou se entender quais as respostas almejadas e qual a importância destas respostas para a solução do problema.

### 4.1 MÉTODO TRADICIONAL DE MEDIÇÃO DE TORQUE EM EIXOS

O método tradicional utilizado para medição de torque é a instrumentação de uma ponte de *Wheatstone* de torque em eixos, conforme pode ser visto na figura 24. Muito utilizado na empresa onde o trabalho foi realizado para verificar cargas que são submetidos os mecanismos, assim como ajudar a encontrar as causas raiz dos problemas.

Figura 24 - Método tradicional de medição de torque



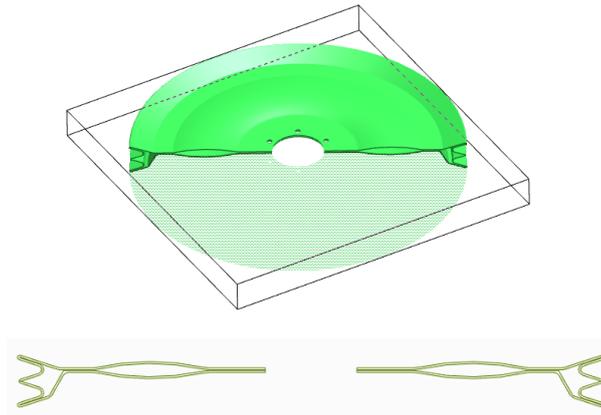
**Fonte:** autor, 2020

Nos tópicos onde estão descritos o problema de pesquisa e a justificativa, estão expostas as razões que levaram a propor um novo método de medição de torque, o qual será descrito nos próximos tópicos do trabalho.

### 4.2 ESTUDO DE CASO

A polia a ser instrumentada faz parte de um conjunto de acionamento mecânico de uma colheitadeira e tem o diâmetro externo de 606 milímetros. Analisando a peça foi identificado que ela é feita de duas chapas de aço soldadas com solda ponto conforme pode ser visto na figura 25 onde está a imagem da polia em corte. Este fato tornou o estudo deste método de medição ainda mais desafiador.

Figura 25 - Imagem da polia em corte



**Fonte:** autor, 2020

Partindo do princípio de que seria necessário realizar a medição de tensão e consequentemente a deformação do material, foi realizado a análise estrutural da peça utilizando o *Software Ansys Workbench* na empresa onde foi realizado o trabalho, para verificar qual seria a melhor posição para instalação do *strain gauge*. Pode ser observado na figura 26 a malha de elementos finitos que foi criada na peça para iniciar esta atividade.

Figura 26 - Malha de elementos finitos



**Fonte:** autor, 2020

O travamento da peça no eixo é por meio de seis parafusos onde localizam-se os furos e a força é aplicada ao redor da polia através de uma correia, na figura 27 pode ser observado o travamento na área dos parafusos e o sentido da força aplicada na extremidade da peça.

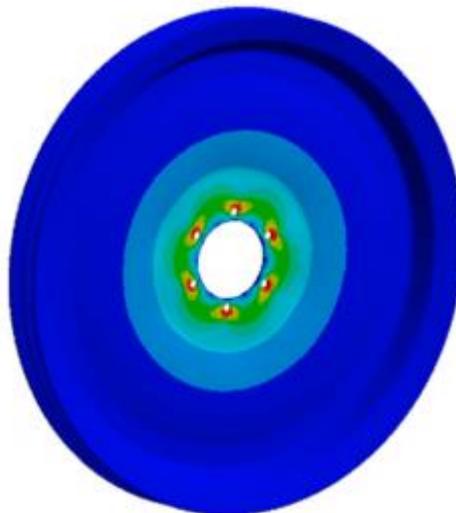
Figura 27 - Travamento e força aplicada na peça



**Fonte:** autor, 2020

Para simular o torque aplicado na polia, foi utilizado o valor de 1000 N.m onde foi possível observar na figura 28 os principais locais que sofrem tensões destacados nas áreas de cor verde, amarelo e sendo em vermelho os locais com maior concentração de tensão.

Figura 28 - Análise de tensões

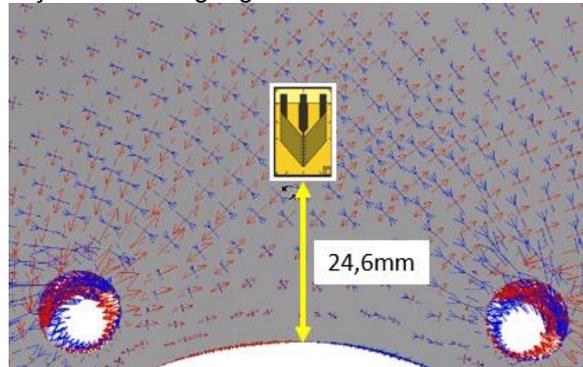


**Fonte:** autor, 2020

Além da análise estrutural também foi necessário ter conhecimento de montagem da peça com o restante do conjunto e quais seriam os possíveis locais

para passagem dos fios de instrumentação, sendo assim o local escolhido para instalação do *strain gauge* que está ilustrada na figura 29.

Figura 29 - Local de instalação do strain gauge



Fonte: autor, 2020

Nas próximas etapas estão descritas as atividades passo a passo para realizar a instrumentação da polia.

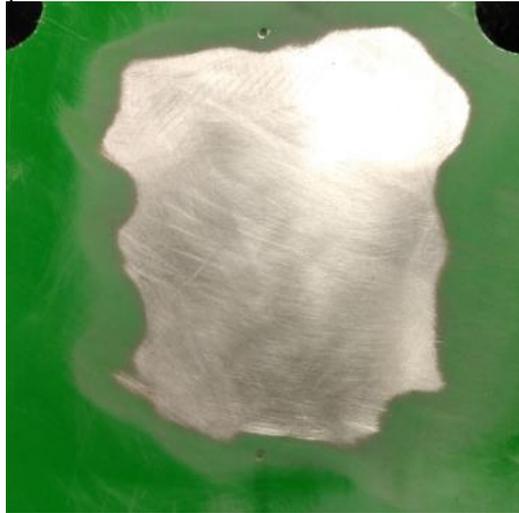
### 4.3 INSTRUMENTAÇÃO DA POLIA

Nas próximas etapas estão descritas as atividades passo a passo para realizar a instrumentação da polia.

#### 4.3.1 Preparação e limpeza da superfície da polia

Para preparar a peça que será colado o *strain gauge* é preciso lixar a superfície para retirar a tinta e após certificar-se que a superfície não apresente irregularidades. O lixamento deve ser em várias direções evitando linhas de tendência e deixando a rugosidade do material adequada para colagem do *strain gauge*. Após seguir as orientações é possível verificar na figura 30 como ficou a superfície da polia.

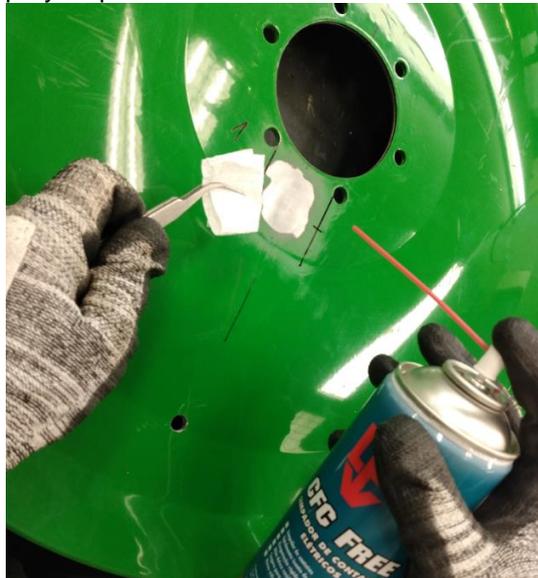
Figura 30 - Lixamento da superfície



**Fonte:** autor, 2020

Ainda nesta etapa, após o lixamento é realizada limpeza do local, para isso foi utilizado uma gaze umedecida com limpa contato conforme ilustrado na figura 31, passando a mesma em toda área onde poderia haver sujidades devido ao lixamento.

Figura 31 - Limpeza com Spray limpa contato



**Fonte:** autor, 2020

Ao longo deste procedimento de instalação dos *strain gauges* foram utilizados alguns produtos específicos para este tipo de atividade os quais estão ilustrados na figura 32.

Figura 32 - Produtos para instrumentação



Fonte: autor, 2020

#### 4.3.2 Traçado das linhas de orientação

Neste caso onde o objetivo é medir o cisalhamento do material, os *strain gauges* devem ser colados a 180° um do outro em sentidos opostos, foi utilizado um paquímetro para medir a distância entre os furos e posteriormente o centro entre eles, com isso foi possível traçar as linhas de orientação na mesma posição nos dois lados da polia pelo fato da peça ser simétrica, conforme ilustrado na figura 33.

Figura 33 - Traçado da linha central da peça

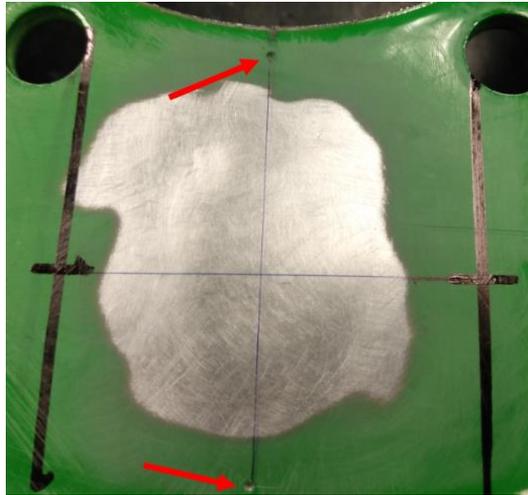


Fonte: autor, 2020

Seguindo as linhas de orientação e utilizando uma punção foi realizado o puncionamento em duas extremidades um pouco afastadas do local onde o *strain*

*gauge* será colado, pois neste local de colagem não pode haver linhas de tendência nem resquícios de contaminantes. Os dois pontos conforme ilustrado na figura 34, serviram de referência para centralizar o *strain gauge* na hora da colagem.

Figura 34 - Puncionamento



Fonte: autor, 2020

#### 4.3.3 Limpeza final para colagem do *Strain Gauge*

Antes de colar o *strain gauge* deve ser realizada a limpeza profunda na peça com o objetivo de retirar gorduras oriundas ao próprio manuseio com mãos e dedos.

Para certificar que a superfície não ficasse contaminada foi realizada novamente a limpeza com uma gaze e limpa contato de toda área próxima ao local de colagem.

Na figura 35, em seguida foi aplicado ácido e a base sobre o material, o ácido é responsável por limpar e criar pequenas rugosidades sobre o material o que facilita a adesão da cola. Porém o ácido não deve agir sobre o material por mais de 10 segundos pois pode gerar rugosidade em excesso, então logo após sua aplicação foi feita a limpeza do local com gaze limpa e aplicado a base, em seguida repetiu-se a limpeza com uma gaze limpa.

Figura 35 - Aplicação do ácido e base

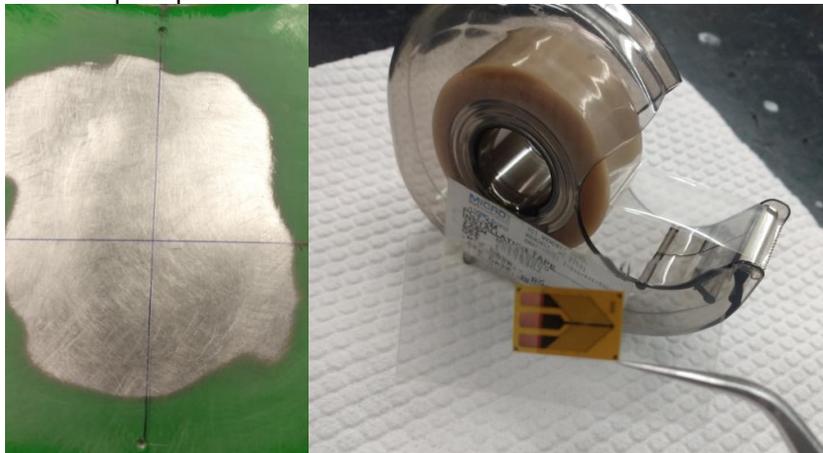


Fonte: autor, 2020

#### 4.3.4 Colagem do *Strain Gauge*

Para posicionar o *strain gauge* na posição devida foram utilizadas uma pinça e uma fita adesiva, os dois pontos traçados serviram de referência para o alinhamento do extensômetro conforme ilustra a figura 36, com a fita adesiva foi possível realizar esta atividade sem tocar no *strain gauge* e na superfície da peça.

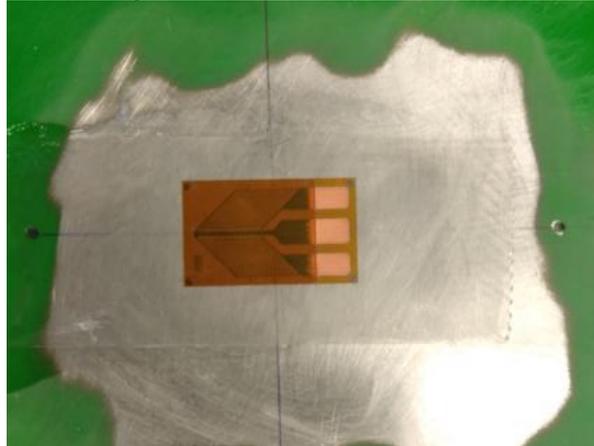
Figura 36 - Fita adesiva para posicionamento



Fonte: autor, 2020

Para o *strain gauge* aderir a peça foi utilizada a cola Loctite 469, a qual o fabricante recomenda o período de 24 horas para o efeito efetivo da cola, sendo assim foi colado na peça e aguardado o tempo necessário de cura e assim possibilitando começar a soldagem dos terminais.

Figura 37 - Colagem do Strain Gauge

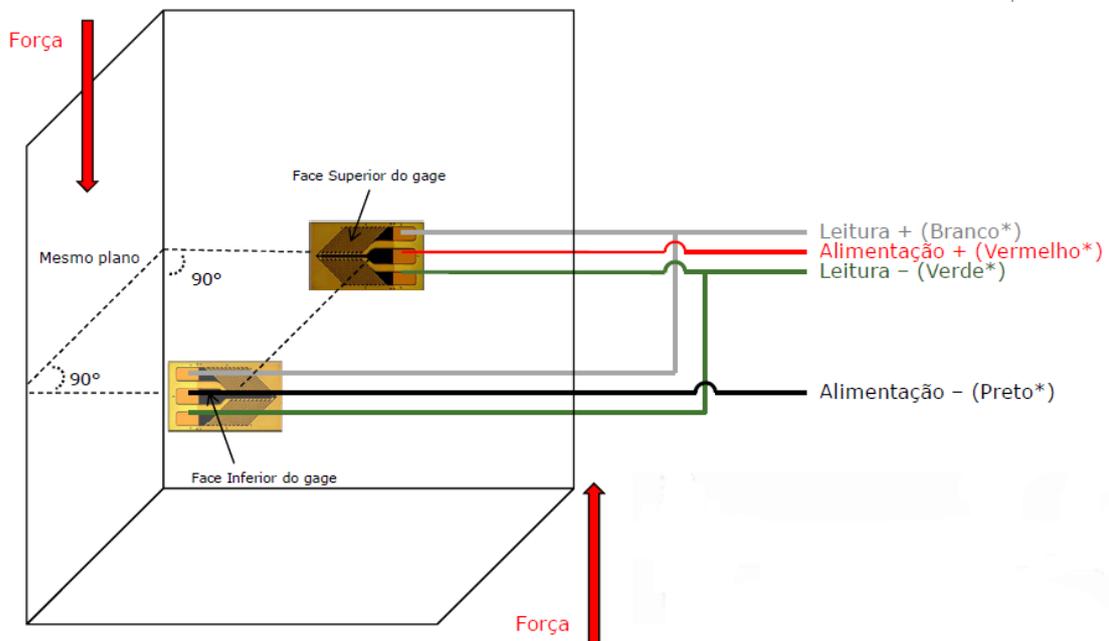


Fonte: autor, 2020

#### 4.3.5 Processo de soldagem dos terminais do *Strain Gauge*

Após finalizar o tempo de cura do processo de colagem foi realizada a soldagem dos terminais. Foi desenhado um escopo de ligação para auxiliar na montagem ponte de *Wheatstone* a qual podemos observar na figura 38 e baseando-se nisso foram soldados os terminais dos Strain Gauges utilizados.

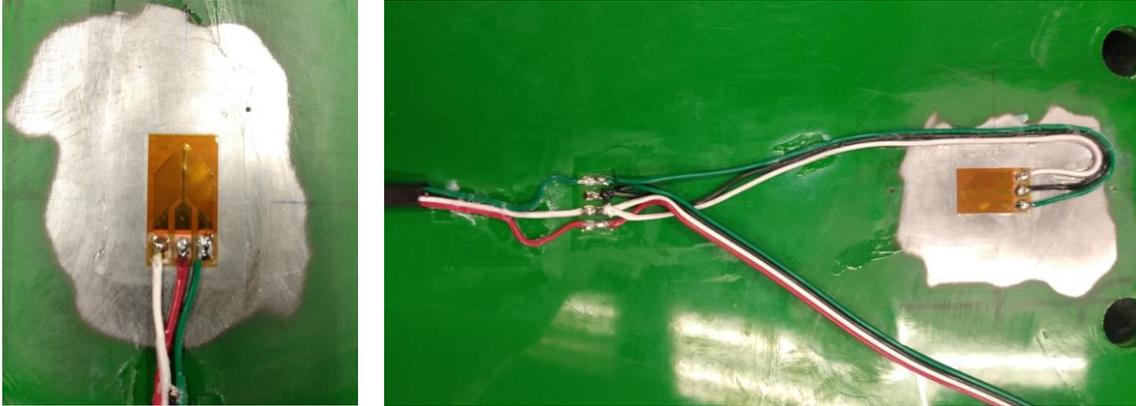
Figura 38 - Escopo de ligação dos terminais



Fonte: autor, 2020

Assim como nas etapas anteriores esta atividade também necessita de muito cuidado pois se o extensômetro for aquecido mais que o necessário para soldar os terminais pode danificá-lo, descolar da peça ou até mesmo perder a capacidade de medição. Na figura 39 pode-se observar o processo de soldagem concluído.

Figura 39 - Processo de soldagem concluído

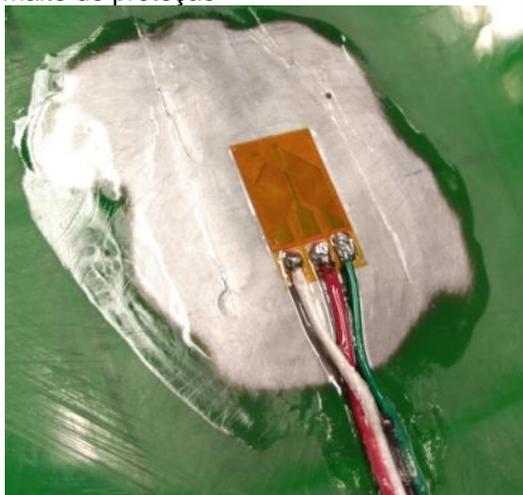


Fonte: autor, 2020

#### 4.3.6 Proteção do *Strain Gauge* após soldagem

Com o processo de soldagem finalizado a próxima etapa consiste em aplicar uma proteção sobre a instalação evitando danificá-la no processo de montagem da peça no conjunto. Primeiramente foi utilizado esmalte base transparente com objetivo de evitar a oxidação da superfície conforme pode ser visto na figura 40.

Figura 40 - Aplicação de esmalte de proteção

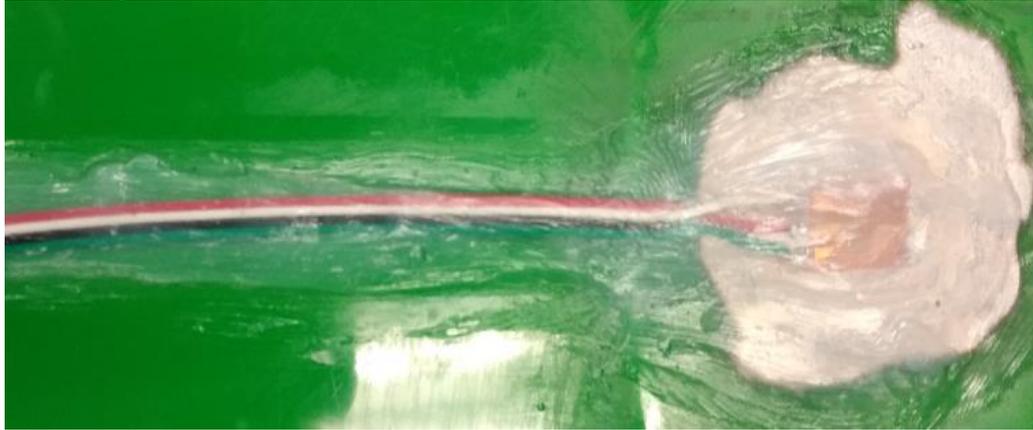


Fonte: autor, 2020

A polia será montada em uma bancada de testes a qual está exposta a graxa e sujidades, portanto é necessário uma proteção que suporte esta condição de

trabalho, para isto foi utilizado silicone neutro, aplicando-o em toda área próximo ao *strain gauge* e nos fios de ligação da ponte de *Wheatstone*, é possível verificar o resultado final na figura 40.

Figura 41 - Aplicação de silicone neutro



**Fonte:** autor, 2020

#### 4.4 EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Para realizar a leitura da ponte de *Wheatstone* e célula de carga foi utilizado o equipamento de aquisição de dados e-DAQ *Little HBM-SOMAT* ilustrado na figura 42.

Figura 42 - e-DAQ Little HBM-SOMAT

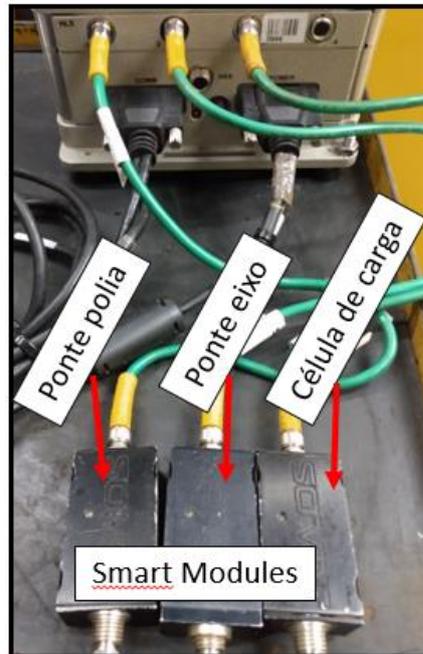


**Fonte:** autor, 2020

Para o condicionamento de pequenos sinais das *Layers High level* do e-Daq *Little* foram utilizados amplificadores externos chamados *Smart Modules*, os quais

podem ser vistos na figura 43. O *Smart Module* atua como interface entre a ponte dos *strain gauges* e o canal de entrada do *High level*, possibilitando um condicionamento de sinal dedicado a cada ponte ligado ao *Data Logger*.

Figura 43 - Smart Modules



Fonte: autor, 2020

Foi utilizado também para calibração da polia em mV uma célula de carga modelo Z que pode ser visto na figura 44, com capacidade de 500 kg e com sensibilidade de 2 mV/V, a qual já estava aferida e certificada. A célula de carga foi montada em uma correia que envolvia a polia para assim poder aplicar a força de torção e replicar a condição de torque.

Figura 44 - Célula de carga

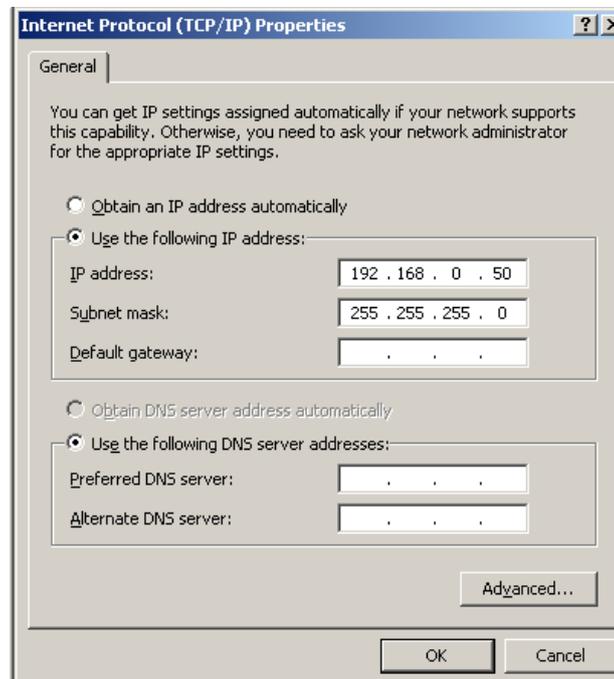


Fonte: autor, 2020

#### 4.5 CONFIGURANDO E-DAQ PARA COLETA DE DADOS

Para configurar o e-Daq deve-se alterar o IP do computador a ser utilizado para o endereço que corresponde ao IP do e-Daq como mostra na figura 45.

Figura 45 - Alterando IP



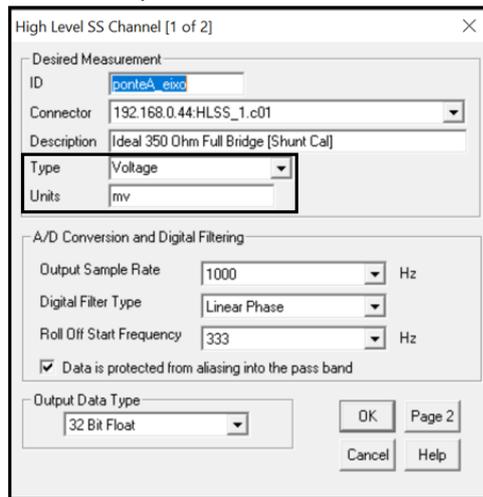
Fonte: autor, 2020

Para medir as pontes de *Wheatstone* do eixo, da polia e a célula de carga é necessário parametrizar os mesmos para que o e-Daq possa realizar a aquisição

de sinais e para isso foi utilizado o *software* TCE da HBM o qual realiza o gerenciamento e parametrização dos sensores acoplados ao *Data Logger*.

Primeiramente como pode ser visto na figura 46, para realizar a leitura de tensão da ponte no eixo o canal 1 foi configurado para ler em mV.

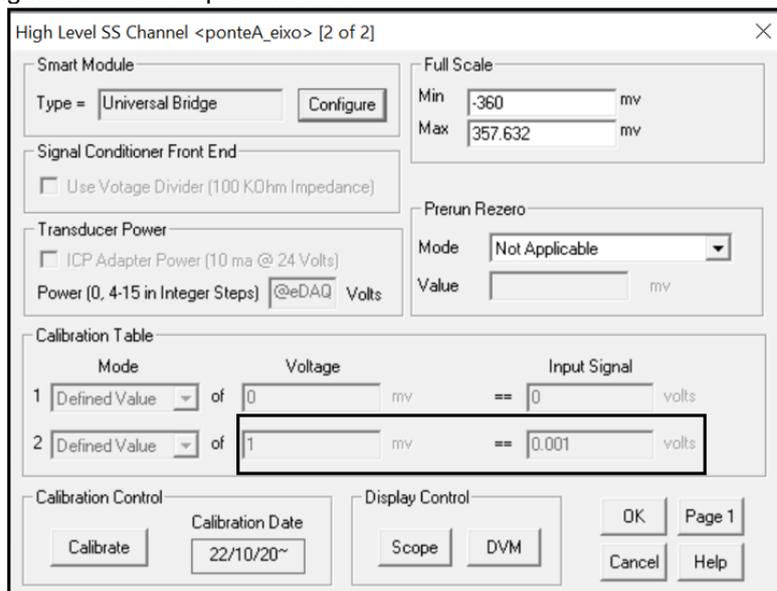
Figura 46 - Configurando canal 1 do e-Daq - Eixo



Fonte: autor, 2020

Seguindo com a configuração para o eixo, conforme mostrado na figura 47, foram inseridas as informações onde a resposta desejada deveria ser de 1 V/mV.

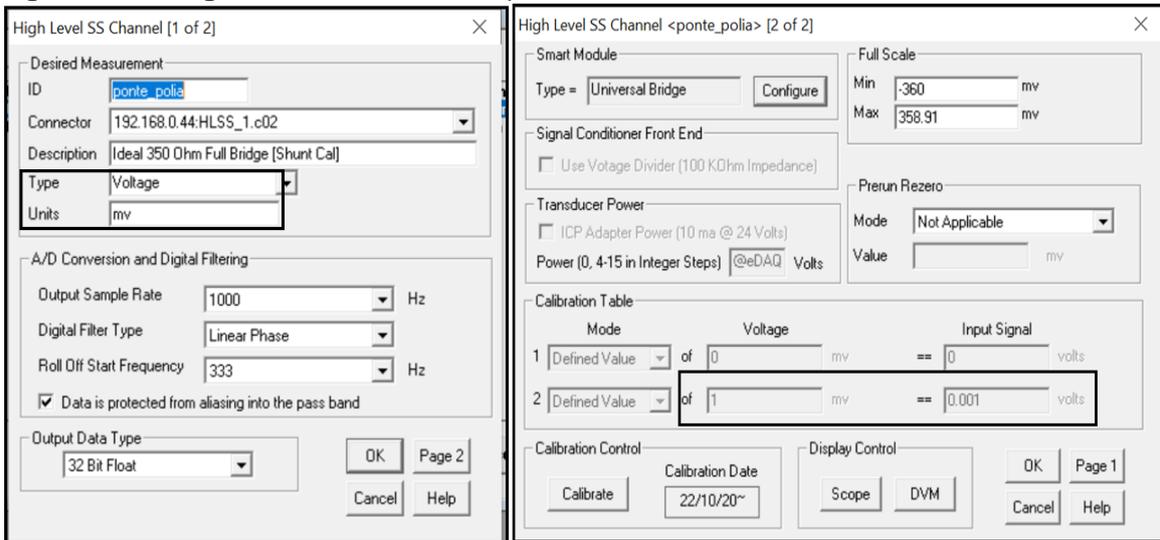
Figura 47 - Configurando canal 1 para 1 V/mV



Fonte: autor, 2020

Da mesma forma que foi configurado na ponte 1, na figura 48 a ponte 2 foi parametrizada para realizar a leitura da ponte na polia, os parâmetros foram os mesmos que no eixo justamente para verificar a correlação de leitura entre o eixo e a polia.

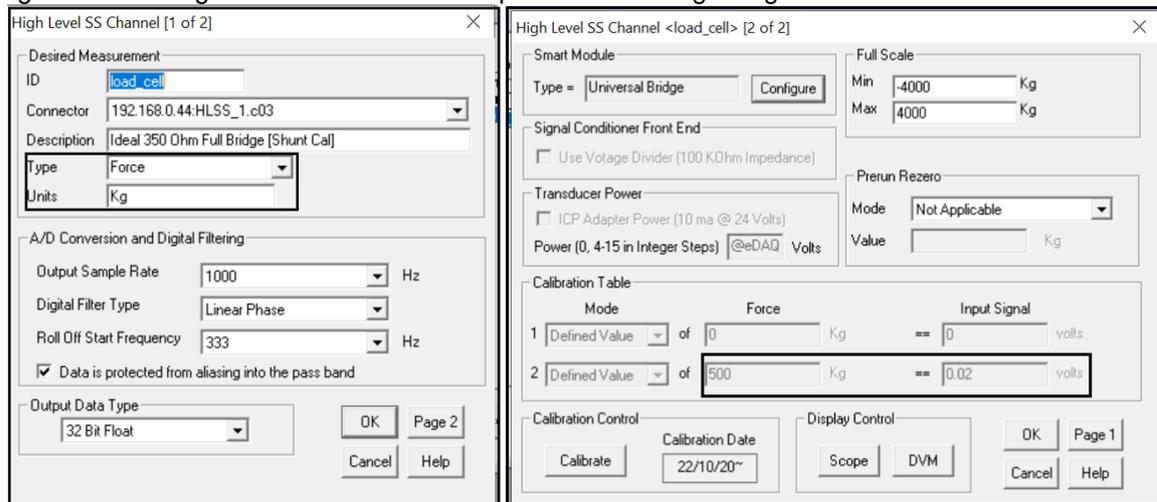
Figura 48 - Configurando canal 2 do e-Daq - Polia - 1V/mV



Fonte: autor, 2020

Na figura 49 pode ser visto que assim como as pontes de *Wheatstone* a célula de carga também precisa ser parametrizada, onde o valor de referência que é de 500 kg já é conhecido, é a partir deste valor conhecido que é possível realizar a calibração das pontes.

Figura 49 - Configurando canal 3 do e-Daq – Célula de carga - Kg



Fonte: autor, 2020

Uma informação muito importante quanto a utilização de extensômetros é o fator do *gauge* ( $K$ ), mais especificamente é a sensibilidade do *gauge*. Na figura 50

pode ser visto também que é necessário informar a tensão de alimentação da ponte, o modelo e a quantidade do *strain gauges*.

Figura 50 - Informações da ponte e do strain gauge

The image shows a software dialog box titled "Smart Bridge Configuration". It contains the following fields and controls:

- Serial Number = SMSTRB4-350-9824
- Excitation Range: 10.0 Volts
- Bridge Type: Full Bridge
- Bridge Resistance: 350 Ohms
- Bridge Factor: 4
- Gage Factor: 2
- Leadwire Resistance section:
  - Do Leadwire Corrections
  - n/a Ohms
  - Buttons: Back Calculate Resistance, Help
- Shunt Target: -Sig to +Ex (DownScale)
- Hardware Configuration button
- OK, Cancel, Help buttons at the bottom.

Fonte: autor, 2020

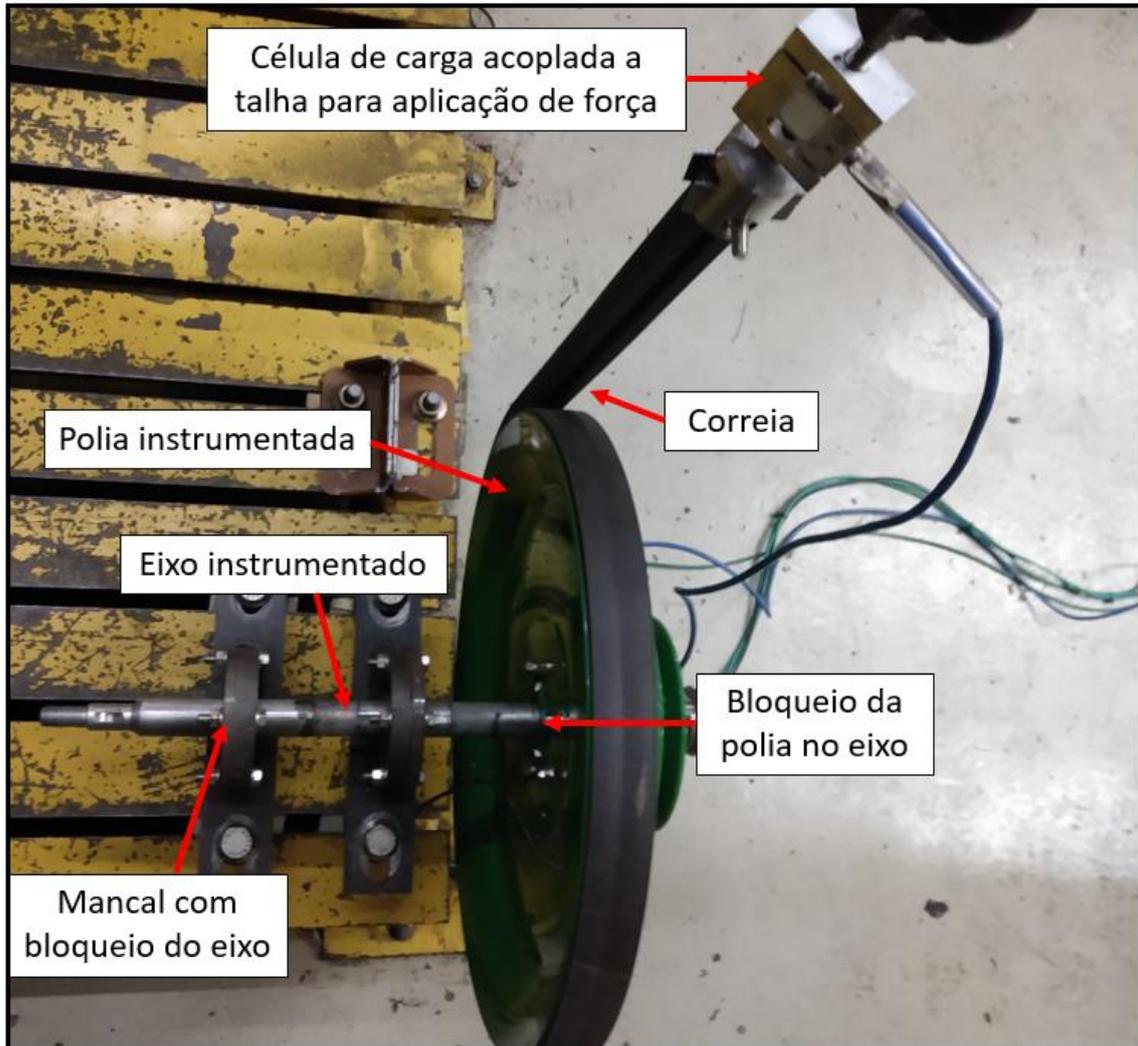
Com os equipamentos e pontes e *Wheatstone* parametrizados foi possível iniciar a próxima etapa de aquisição de dados.

#### 4.6 LEITURA E RESULTADOS DAS AQUISIÇÕES DE SINAIS

O processo de calibração talvez seja o processo mais importante pois garante que as medições sejam precisas, evitando assim o retrabalho ou comprometimento de toda a aquisição de dados.

A montagem dos componentes foi realizada em uma bancada que é utilizada especificamente para realizar calibração de peças instrumentadas, a montagem final pode ser vista na figura 51. A polia está montada e bloqueada em um eixo por meio de uma chaveta, o eixo por sua vez está montado e bloqueado no mancal, com o intuito de aplicar torque na polia foi utilizado uma correia ao redor da polia. Para aplicar força foi utilizado uma talha, nesta talha foi engatada a célula de carga a qual estava presa à correia.

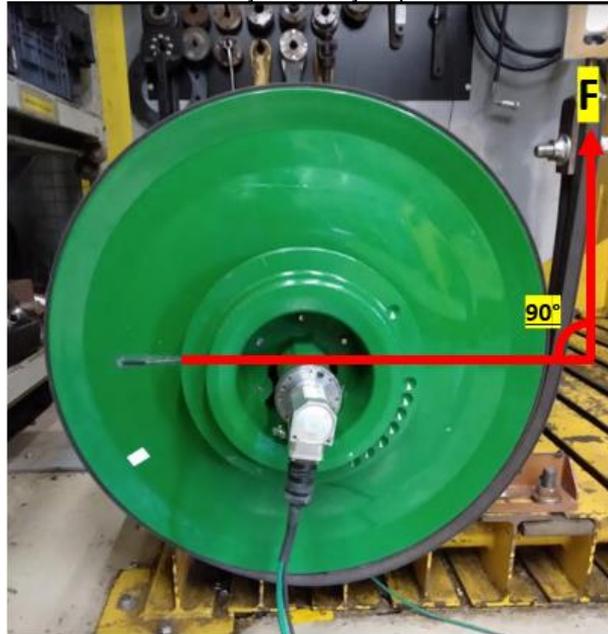
Figura 51 - Montagem final dos componentes



Fonte: autor, 2020

A melhor situação para leitura de deformação utilizando extensômetros é onde a força aplicada está a  $90^\circ$  em relação ao braço de alavanca, para isto foi tomado o cuidado na hora da montagem conforme ilustrado na figura 52. O torque aplicado durante os testes foi de aproximadamente 36,4 kgf.m, sendo a força na correia de 120 kgf.

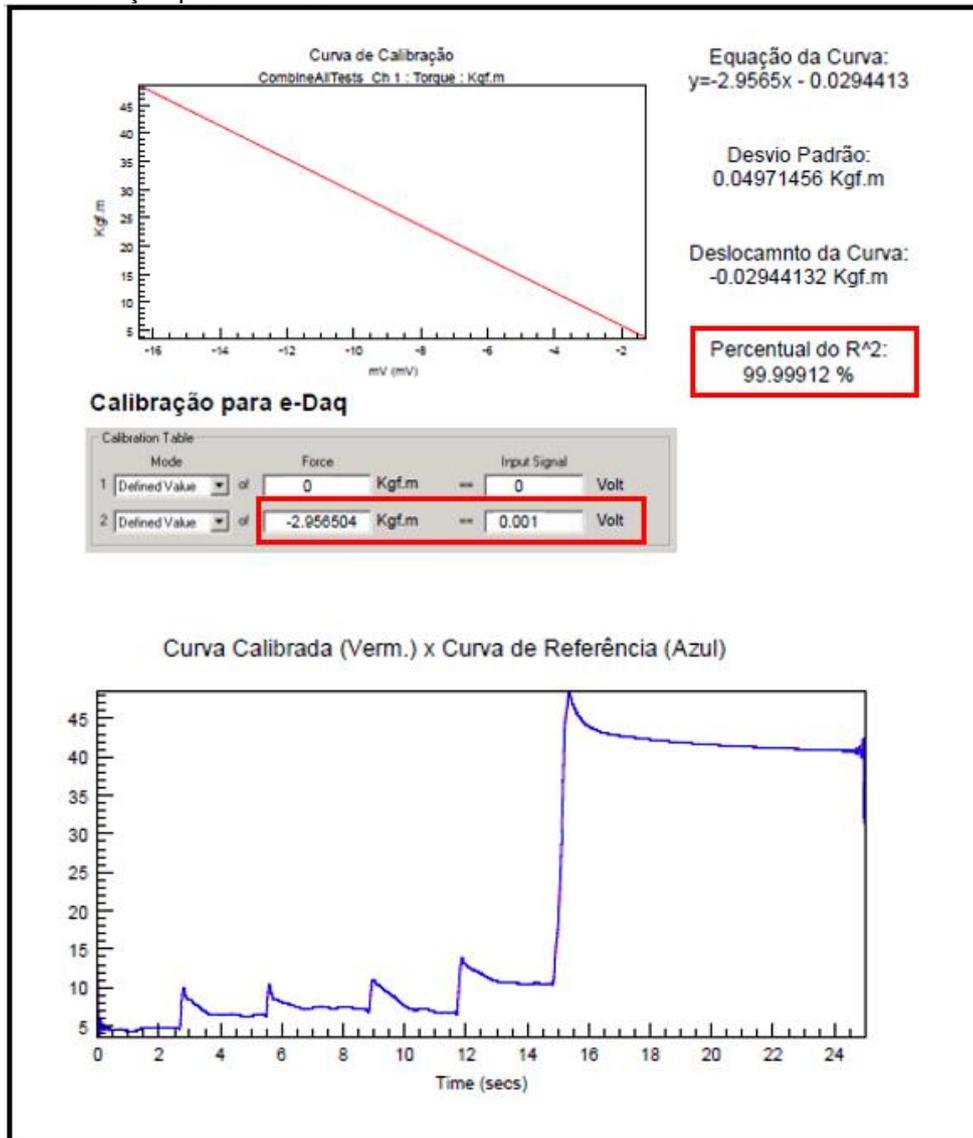
Figura 52 - Braço de alavanca a 90° em relação a força aplicada



**Fonte:** autor, 2020

A ponte do eixo foi a primeira a ser verificada, onde foi submetida a uma análise comparativa com a célula de carga já aferida, utilizando o software *nCode DataPlugin* da HBM obteve-se o relatório de calibração, mostrado na figura 53. Pode ser observado que o percentual de assertividade entre o eixo e a célula de carga foi de 99,999%, onde para cada 2,956 kgf.m corresponderá a 1 mV.

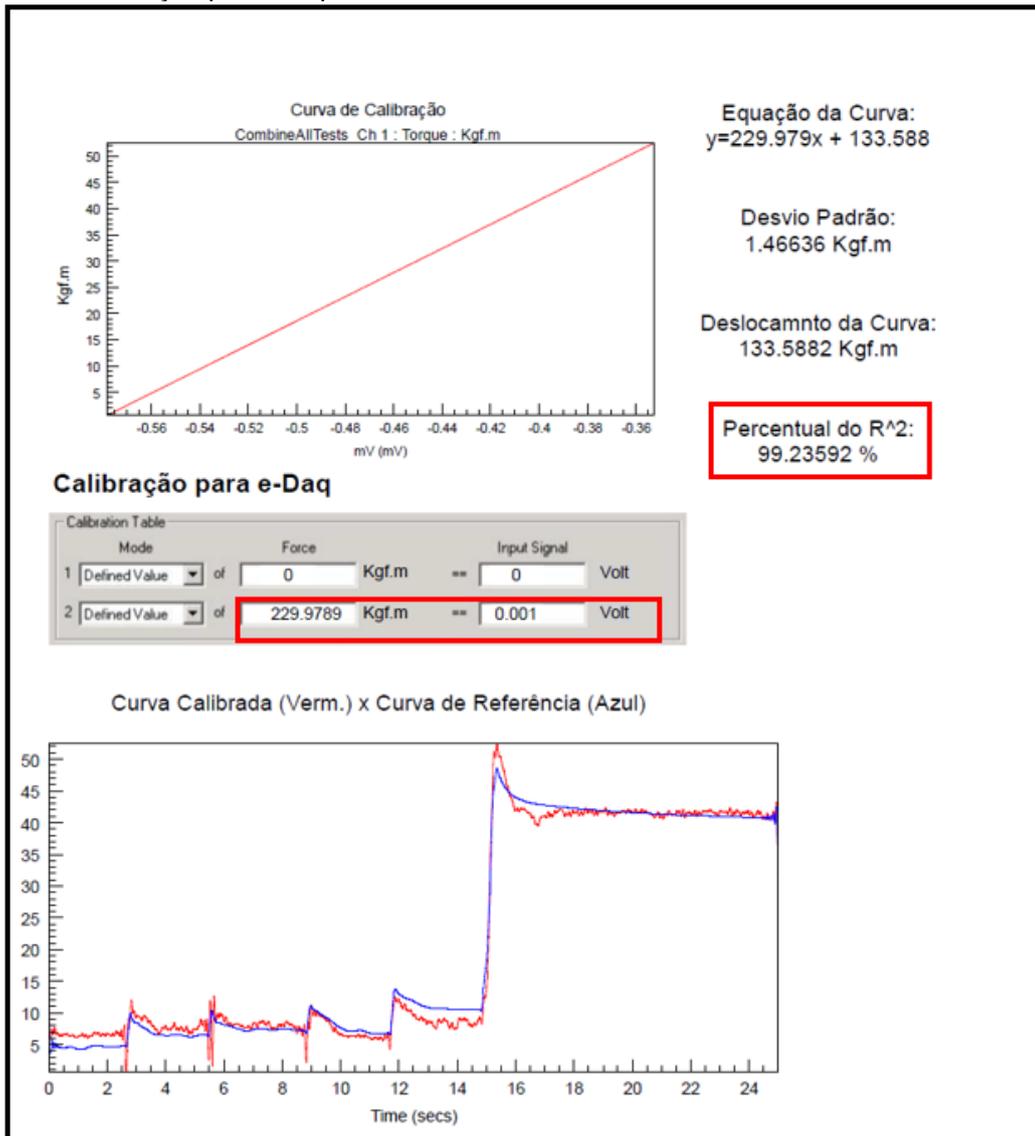
Figura 53 - Calibração ponte do eixo



Fonte: autor, 2020

Em seguida foi utilizado o mesmo procedimento para calibração da ponte da polia em comparação à célula de carga, no relatório de calibração visto na figura 54 pode ser verificado que o percentual de assertividade entre a ponte e célula de carga foi de 99,236%, onde para cada 229,979 kgf.m corresponderá a 1 mV.

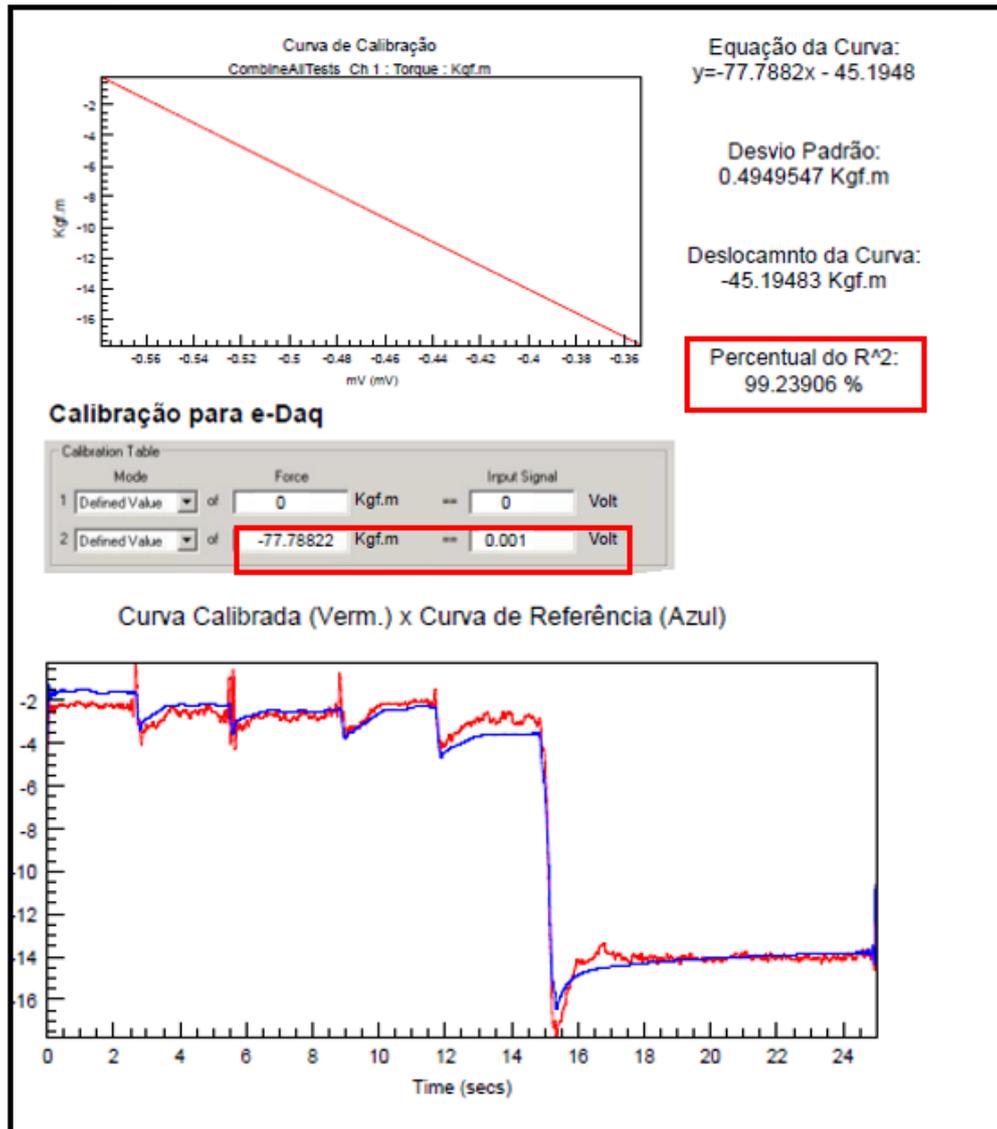
Figura 54 - Calibração ponte da polia



Fonte: autor, 2020

Tento o relatório de calibração dos dois componentes foi possível dar seguimento nas atividades. Como o objetivo deste estudo é verificar qual é a porcentagem de assertividade entre a ponte do eixo que mede o torque e a ponte da polia que mede cisalhamento, os dois componentes foram submetidos a uma análise comparativa, como mostra na figura 55, onde o percentual de leitura entre a polia e o eixo foi de 99,239% e a cada 77,788 Kgf.m corresponderá a 1 mV.

Figura 55 - Comparativo entre o eixo e a polia



Fonte: autor, 2020

Ao realizar estas análises e comparações entre os componentes instrumentados foi possível perceber que houve uma boa correlação na leitura de sinais, porem um ponto importante e indispensável para este trabalho é que a deformação no eixo é superior a 100 vezes a deformação na polia sendo que o torque é o mesmo para os dois componentes. Normalmente e o que acontece neste caso, é que o eixo é fragilizado intencionalmente para deixar o material mais sensível a deformações, mas a polia não foi fragilizada o que explica esta grande diferença entre os valores de deformação.

#### 4.7 CALCULANDO TENSÕES

Seguindo como referência o torque de 1000 N.m que foi utilizado para realizar a análise de elementos finitos e o diâmetro total da polia de 606 mm, foi possível calcular a força tangencial aplicada na polia de acordo com a equação 16:

$$F = \frac{T}{R} = \frac{1000}{0,303} = 3300 \text{ N} \quad (16)$$

Com o intuito de calcular a força aplicada nos 6 parafusos que prendem a polia, foi utilizado novamente a equação 17. O centro do diâmetro dos parafusos está a 58,75 mm do centro da polia.

$$F = \frac{T}{R} = \frac{1000}{0,0588} = 17021 \text{ N} \quad (17)$$

Este valor de 17021 N é o valor total da força, dividindo esta força entre os 6 parafusos encontra-se o valor de 2836,9 N para cada parafuso. Com a força resultante em cada parafuso é possível calcular a tensão de ruptura do parafuso utilizando a equação 19. Antes de calcular a tensão é preciso encontrar com a equação 18 a área da seção transversal do parafuso sabendo que o parafuso tem 10 mm de diâmetro.

Área de seção transversal de cada parafuso:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78,5 \text{ mm}^2 \quad (18)$$

Tensão normal de ruptura no parafuso:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{2836,9}{78,5} = 36,14 \text{ MPa} \quad (19)$$

Para materiais de 0,3 a 0,7% de aço carbono a tensão de cisalhamento de ruptura no parafuso calculada pela equação 20:

$$\tau = 0,75 \cdot \sigma = 0,75 \cdot 36,14 = 27,1 \text{ MPa} \quad (20)$$

Ao ser aplicado força os parafusos irão comprimir a chapa da polia, ou seja, resultará em uma tensão de esmagamento na chapa. Lembrando que conforme visto na figura 24 a polia é feita por duas chapas de 2,15 mm, então a espessura utilizada para calcular a área é de 4,3 mm, conforme equação 21.

A área de esmagamento na chapa:

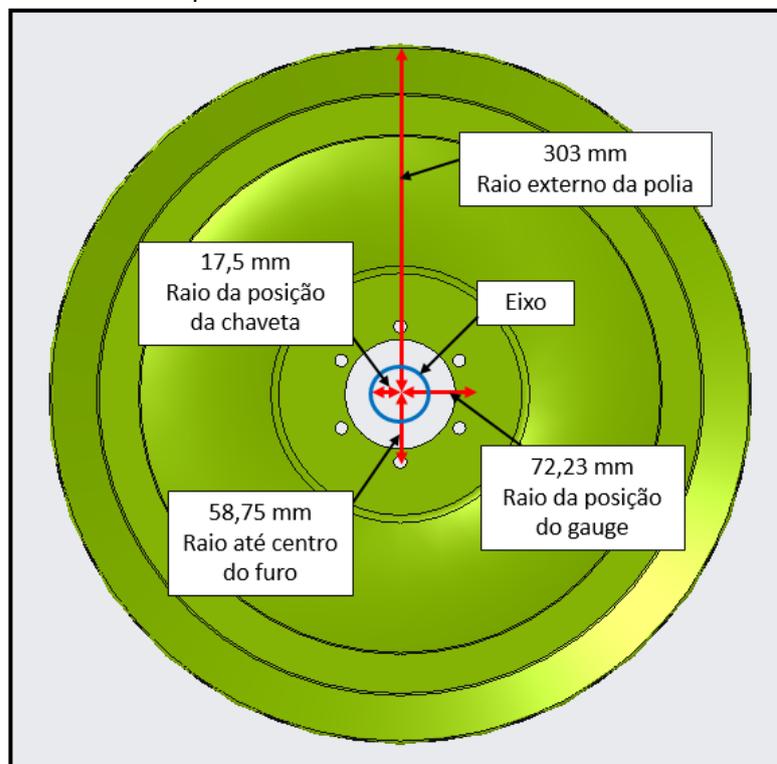
$$A = d.e = 10.4,3 = 43 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

Tensão de esmagamento na chapa em função a força aplicada nos parafusos, conforme equação 22:

$$\sigma_{esm} = \frac{P}{A} = \frac{2836,9}{43} = 66 \text{ MPa} \quad (22)$$

Descritos na figura 56, outros pontos importantes para o esclarecimento de alguma dúvida, são os raios utilizados nos cálculos.

Figura 56 - Raio do centro até o ponto de cisalhamento a ser calculado



Fonte: autor, 2020

Utilizando a equação 23 encontra-se o momento de inércia polar e em seguida é utilizado a equação 24 para calcular a tensão de cisalhamento no local onde o *strain gauge* foi instalado:

$$J = \frac{\pi \cdot 0,606^4}{32} = 0,0132 \text{ m}^4 \quad (23)$$

$$\tau_{gauge} = \frac{1000 \cdot 0,0722}{0,0132} = 5457,8 \text{ MPa} \quad (24)$$

Os cálculos analíticos foram realizados a partir de equações descritas ao longo do trabalho e serviram para mostrar as tensões que determinadas partes da peça sofreram, sendo possível afirmar que o conjunto suportaria sem rupturas ao torque de 1000 N.m utilizado nos testes. Analisando os cálculos das tensões da polia é possível verificar que a teoria que diz que quanto maior o diâmetro, ou seja, mais perto da extremidade, maior será o cisalhamento. Na figura 27 é possível verificar que o local que mais sofre tensão normal é próximo aos furos onde são presos os parafusos, o que não pode ser afirmado para tensões de cisalhamento.

Mesmo com o bom funcionamento da ponte de *Wheatstone*, é difícil realizar uma comparação entre os cálculos analíticos e os resultados dos gráficos de calibração, pois a leitura de deformação está sendo relacionada com a variação de resistência e sinais elétricos em mV e V, estes dados são processados e analisados pelo software TCE que realiza operações múltiplas para chegar aos resultados que foram apresentados nos gráficos.

## CONCLUSÃO

A realização deste trabalho possibilitou o aprendizado e desenvolvimento de uma metodologia alternativa para ler deformações resultantes de tensões em polias. Foi visto que os resultados de leitura das pontes de *Wheatstone* foram válidos, porém o eixo que foi utilizado como base para correlacionar com a polia foi fragilizado resultando em uma deformação maior.

O estudo de resistência dos materiais e extensometria são muito amplos e podem ser aplicados em vários ramos das engenharias. Estes temas vêm sendo estudados a anos por físicos e engenheiros, possibilitando o aperfeiçoamento das técnicas utilizadas para ler estes fenômenos.

A instalação da ponte de cisalhamento foi muito desafiadora pois este tema é mais abordado nos cursos engenharias Elétrica e de Controle e Automação. Para a realização da instalação foi necessário estudar e entender o funcionamento das pontes de *Wheatstone* e extensometria, seguindo todos os passos de lixamento e limpeza da superfície, aplicação de ácido e base, colagem do *strain gauge*, soldagem dos terminais, aplicação do silicone de proteção e roteamento dos cabos elétricos.

Com base no funcionamento do mecanismo em situação de trabalho em uma máquina agrícola, foram montados os componentes do conjunto em uma bancada de calibração. Os dados utilizados foram coletados por meio de tabelas disponíveis na empresa onde o trabalho foi desenvolvido, assim foi possível simular a condição real de trabalho do mecanismo.

O próximo passo foi parametrizar os equipamentos de leitura de sinais e aquisição de dados. A calibração é uma das partes mais importantes de todo o processo, pois serviu para verificar o percentual de assertividade de leitura entre célula de carga x eixo, célula de carga x polia e por fim o eixo x polia, portanto quanto mais próximas estiverem as linhas dos gráficos maior será a precisão dos dados.

Por fim, os resultados das aquisições de instrumentação foram satisfatórios, possibilitando afirmar que a ponte de *Wheatstone* de cisalhamento da polia foi instalada e funcionou corretamente, já o fato de que a deformação na polia foi muito baixa leva a crer que para cada tipo de geometria e material de uma polia deve ser realizado um estudo diferente. Então pode-se afirmar que este método alternativo

de medição de torque não é confiável e não pode substituir o método tradicional que utiliza da instrumentação de uma ponte de torque em um eixo fragilizado. Lembrando que esta conclusão está baseada neste caso e nas condições específicas as quais os testes foram realizados.

## SUJESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Instalar quatro strain gauges na peça para aumentar a sensibilidade e realizar novamente os testes.
- Fragilizar a polia para aumentar a sensibilidade de leitura de deformação do material;
- Utilizar uma polia raiada, pois para este tipo de geometria existem trabalhos que comprovam que este método é confiável.
- Realizar os testes novamente quando o conjunto estiver submetido a rotações.

## REFERÊNCIAS

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. de. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Pearson Makron Books , 2008.

FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial: Conceitos, Aplicações e Análises**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2010.

FRANCESCHI, Alessandro de; ANTONELLO, Miguel Guilherme. Santa Maria: UFSM, 2014. **Elementos de máquinas**. Rede e-Tec Brasil. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/342/2020/04/ELEMENTOS-DE-M%C3%81QUINAS.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2020.

GIL, A, C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

HBM. **Fundamentos sobre Strain Gauges**. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/7074/fundamentos-sobre-strain-gauges/>>. Acesso em: 21 ago.2020.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de física, volume 1: mecânica**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Makron Books , 2009.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. 2012. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim\\_2012.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf)> Acesso em: 1 nov. 2020.

KIM, N.; SANKAR, B. V. **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

LEGGERINI, Maria Regina Costa. **Mecânica dos Sólidos, EQ: notas de aula**. Porto Alegre: PUCRS, 2007. Disponível em: <<https://www.politecnica.pucrs.br/professores/mregina/ENGENHARIA>>. Acesso em: 25 out. 2020.

NI. **Measuring strain with strain gages**. Disponível em: <<https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/07/measuring-strain-with-strain-gages.html>>. Acesso em: 25 set. 2020.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SENAI. **Noções básicas de elementos de máquinas**. Vitória: Senai,1996. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/arquivos/72/72.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R. G. de. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. Ed. São Paulo: Bookman, 2006.

UFSC. **Aplicação de Extensômetros**. Florianópolis: UFSC, [s.d.]: GRANTE - Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Disponível em: <<http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Aplicac%CC%A7a%CC%83o.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2020.

UFSC. **Apostila de Extensometria**. Florianópolis: UFSC, 2004. GRANTE - Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Disponível em: <<http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2020.

UNICAMP. **Ensaios Destrutivos**. Campinas: UNICAMP, 2020. Disponível em: <<https://www.doccity.com/pt/ensaios-destrutivos/4712721/>>. Acesso em: 05 out. 2020.

WEBER, Albano Luiz. **Extensometria: instrumentação**. Caxias do Sul: UCS, 2008. Disponível em: <[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain\\_gauge%20extensometria.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20extensometria.pdf)>. Acesso em: 24 ago. 2020.

OLIVEIRA, João Michel Machado de. **Estudo para medição de potência utilizando-se um eixo instrumentado com *strain gauges***. 2018. Monografia (Graduação) – Unijuí, Ijuí, 2018.