

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL  
Campus Ibirubá**

**JOEL TREVISAN**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
Teste de esforço por tração entre trator e semeadora**

**Ibirubá**

**2024**

JOEL TREVISAN

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Teste de esforço por tração entre trator e semeadora

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Instrumentação

Orientador: Dr. Eng. Cristiano Kulman

Ibirubá

2024

TREVISAN, Joel

Teste de esforço por tração entre trator e semeadora. / Joel Trevisan, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Cristiano Kulman.

56 páginas, ilustrado.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Ibirubá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Instrumentação. 3. Implementos agrícolas. 4. Célula de carga. I. Kulman, Cristiano. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

*Teste de esforço por tração entre trator e semeadora.*

**Joel Trevisan**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 15 de agosto de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. (Orientador) Dr. Cristiano Kulman

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá.

Prof. Dr. Daniel Uhry

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá.

Prof. Dr. Marcos Vinício Oro

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente minha família pelo apoio e incentivo, durante estes anos da minha graduação.

Agradeço a Indústria de Implemento Agrícola Vence Tudo e aos colegas de trabalho pelo apoio, durante estes anos da minha graduação.

Agradeço ao meu orientador Eng. Dr. Cristiano Kulman por disponibilizar do seu tempo para que fosse possível a realização deste trabalho.

Agradeço aos demais professores do IFRS Campus Ibirubá, por todo conhecimento adquirido, em especial, gostaria de agradecer aos professores: Dr. Daniel Vieira Pinto, Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski, Dr. Daniel Uhry.

Agradeço ao Sr. Maiquel Gromman por auxiliar e conduzir o trator na avaliação de campo.

Agradeço a minha banca avaliadora por dispor do seu tempo e contribuição para o enriquecimento deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e teste do sistema que possibilita a mensuração de esforço de tração em uma semeadora para avaliar o desempenho e a eficiência do conjunto. Durante o teste, o trator é acoplado à semeadora por uma interface de mensuração e submetido a diferentes condições de carga, representativas das situações encontradas no campo. O projeto é feito inicialmente pelo desenho do corpo da célula de carga, considerando a montagem na máquina de ensaio de tração e colagem dos extensômetros de resistência elétrica ou strain gauges. Este conjunto se originará em uma célula de carga que utiliza strain gauges para converter a variação da resistência elétrica em deformação gerada pela tração que o trator realizará devido à resistência ao movimento da semeadora, para isso se utilizará um equipamento de aquisição de dados ou data logger como meio de leitura e conversão e leitura de dados.

**Palavras chave:** Mensuração, Célula de Carga, Strain Gauge, Datalogger.

## **ABSTRACT**

The present work aims to develop and test a system that enables the measurement of traction effort on an implement to assess the performance and efficiency of the setup. During the test, the tractor is coupled to the seed drill via a measurement interface and subjected to different load conditions, representing situations encountered in the field. The project begins with the design of the load cell body, considering the assembly on the traction testing machine and the bonding of strain gauges. This setup will result in a load cell that uses electrical resistance strain gauges to convert the variation in electrical resistance into deformation caused by the traction exerted by the tractor due to the resistance to movement of the seed drill. A data acquisition system or data logger will be used as a means of converting and reading the data.

**Keywords:** measurement, load cell, strain gauge, data logger.

## **LISTA DE ABREVIACÕES**

CAD	Computer Aided Design
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SAE	Society of Automotive Engineers International
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
PW	Ponte de Wheatstone

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_n$	Potência nominal trator
$\eta$	Rendimento do trator
$F$	Força de tração
$V$	Velocidade de deslocamento do trator
$\pi$	Constante trigonométrica
$r$	Raio
$A$	Área
$K$	Varição relativa de resistência
$R$	Resistência original
$\Delta R$	Varição da resistência
$L$	Comprimento original
$\Delta L$	Varição do comprimento
$\varepsilon$	Deformação específica
$E$	Módulo de elasticidade
$\sigma$	Tensão mecânica
$E$	Erro de medição
$I$	Indicação do sistema de medidas
$VV$	Valor verdadeiro do mensurado

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da Célula de Carga .....	13
Figura 2 – Relação de Potência para Tratores Agrícolas.....	15
Figura 3 – Representação de uma Ponte de Wheatstone.....	18
Figura 4 – Posicionamento dos Extensômetros.....	19
Figura 5 – Gráfico Tensão X Deformação .....	20
Figura 6 – Representação de uma Máquina de Ensaio de Tração.....	21
Figura 7 – Ligação em Ponte Completa .....	22
Figura 8 – Máquina de Ensaio Universal .....	24
Figura 9 – Strain Gauge BF350-3AA.....	24
Figura 10 – Data Logger ADS-1800 .....	25
Figura 11 – Suportes.....	26
Figura 12 – Inversor de Corrente.....	26
Figura 13 – Trator BM 125i .....	27
Figura 14 – Semeadora Modelo Panther SM7000.....	28
Figura 15 – Esquemática da Força Atuante.....	29
Figura 16 – Estrutura para Montagem da Célula de Carga .....	29
Figura 17 – Corpo de Prova.....	30
Figura 18 – Posição de Colagem .....	32
Figura 19 – Revestimento.....	33
Figura 20 – Calibração .....	33
Figura 21 – Regressão Linear.....	34
Figura 22 – Suporte Trator Implemento .....	37
Figura 23 – Posição da Célula de Carga.....	38
Figura 24 – Suporte do Computador e Data Logger .....	38
Figura 25 – Teste Solo Cultivado .....	39
Figura 26 – Gráfico Completo.....	40
Figura 27 – Argiloso Cultivado 4km/H - Teste 1 .....	40
Figura 28 – Argiloso Cultivado 4km/H – Teste 2 .....	41
Figura 29 – Argiloso Cultivado 8km/H – Teste 1 .....	41
Figura 30 – Argiloso Cultivado 8km/H – Teste 2 .....	42
Figura 31 – Argiloso Compactado 4km/H – Teste 1.....	43
Figura 32 – Argiloso Compactado 8km/H – Teste 2.....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Aço SAE 1045 .....	23
Tabela 2: Parâmetro de Teste .....	35
Tabela 3: Calibração da Célula de Carga .....	36
Tabela 4: Valor Médio.....	37
Tabela 5: Potência Exigida Solo Compactado .....	45
Tabela 6: Potência Exigida Solo Cultivado.....	45

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivos específicos	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	15
2.1	FORÇA DE TRAÇÃO ESTIMADA DO TRATOR	15
2.2	EXTENSOMETRIA DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA	16
2.2.1	Conceitos fundamentais sobre <i>Strain Gauge</i>	16
2.2.2	Medição de Força por extensômetros de resistência elétrica	17
2.2.3	Ponte de Wheatstone	18
2.2.4	Ponte completa de tensão axial	19
2.3	ENSAIO DE TRAÇÃO	20
2.4	EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS	22
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	23
3.1	MATERIAIS	23
3.1.1	Programa de Computador	23
3.1.2	Material da célula de carga	23
3.1.3	Máquina universal de tração	24
3.1.4	Instrumentação da célula de carga	24
3.1.5	Aquisição de dados	25
3.1.6	Suportes	25
3.1.7	Inversor de corrente	26
3.1.8	Trator	27
3.1.9	Implemento	28
3.2	MÉTODO	29
3.2.1	Síntese e análise	29
3.2.2	Força de tração realizada pelo trator	30
3.2.3	Concepção da célula de carga	30
3.2.4	Instrumentação da célula de carga	32

3.2.5	Calibração da célula de carga .....	33
3.2.6	Avaliação de campo .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
4.1	CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....	35
4.2	MONTAGEM DO EQUIPAMENTO .....	37
4.3	AVALIAÇÃO DE CAMPO .....	39
4.3.1	Avaliação de campo solo cultivado.....	39
4.3.2	Avaliação de campo solo compactado .....	43
4.4	DISCUSSÃO .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICE A – Dimensões da Célula de carga .....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

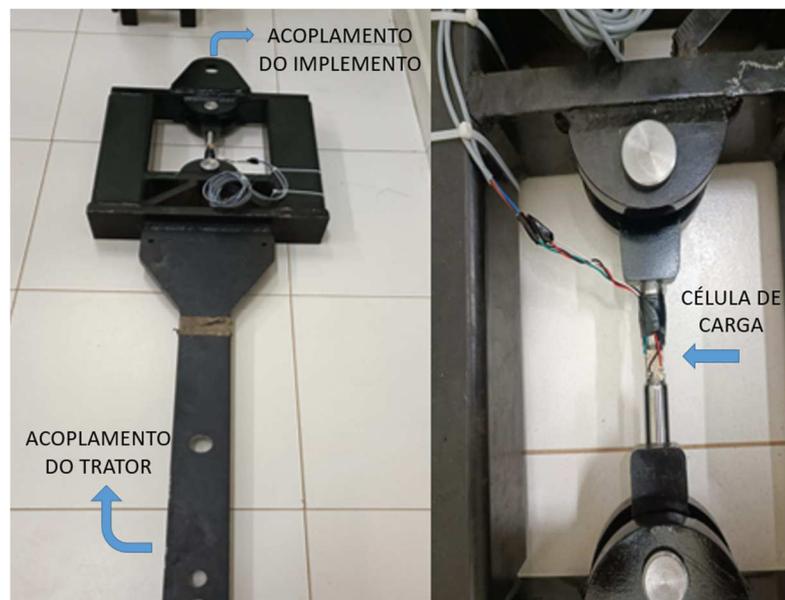
O Rio Grande do Sul, mais especificamente a região do Alto Jacuí, é um ponto de referência da agroindústria por ser muito produtiva e com várias empresas do ramo metal mecânico destinadas a buscar maior eficiência para o produtor agrícola, e por isso, tem se destacado nos quesitos engenharia e tecnologia. O agricultor tem se tornado cada vez mais ousado a fim de tirar o maior rendimento possível do solo, aumentando o número de culturas no ano. E para isso além do clima favorável é importante ter equipamentos que permitam este trabalho em diversas condições de terreno.

Por isso é importante mensurar as forças atuantes nos componentes, e determinar a potência máxima e mínima do trator para o bom funcionamento do implemento.

O uso de sensores para obtenção de diferentes dados em equipamentos agrícolas é uma evolução tecnológica que traz agilidade para resolução de falhas ou melhoria na construção do produto. O objetivo do trabalho é a análise da força de tração obtida através de uma célula de carga que é submetida a um esforço de tração realizado entre o trator e a semeadora, para poder mensurar e posteriormente definir cargas que os componentes estarão sofrendo.

A célula de carga é composta por quatro *Strain Gauge* e um corpo de prova cilíndrico. Os sensores são ligados em ponte completa conectados a um sistema de aquisição de dados que informa os resultados pelo programa em um computador. Esta célula de carga é acoplada no centro da estrutura que faz a união entre o trator e o implemento conforme Figura 1.

Figura 1 – Estrutura da célula de carga



Fonte: Autor

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Foi analisado que muitos implementos apresentam trincas e quebras inesperadas com o tempo e em algumas situações, semeadoras trabalham com tratores que não tem capacidade de tracioná-las. O que gera custo desnecessário para a empresa e para o próprio cliente que em certos casos afeta a percepção de qualidade do produto.

Com várias empresas neste ramo, a concorrência é um fato e isso torna as empresas cada vez mais ativas no quesito desenvolvimento de protótipos e lançamentos de produtos para atender as necessidades dos agricultores (consumidor final). Desta forma, os setores de engenharia de produto e tecnologia das indústrias de equipamentos agrícolas trabalham para desenvolver equipamentos robustos e com um preço acessível, o que se torna essencial validar o implemento para a categoria certa de tratores.

Partindo desta realidade, o projeto de um medidor de força de tração de implementos agrícolas com aquisição de dados permitirá avaliar o desempenho do conjunto e verificar a demanda da potência necessária para tracionar o implemento em diversas condições de solo.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um equipamento capaz de mensurar a força gerada pela objeção do equipamento ao movimento.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Projetar e desenvolver uma célula de carga capaz de suportar cargas até 60 KN;
- Calibrar célula de carga;
- Testar e validar dispositivo com o trator BM 125i em um implemento disponível no IFRS/Campus Ibirubá;
- Avaliar o desempenho do conjunto.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

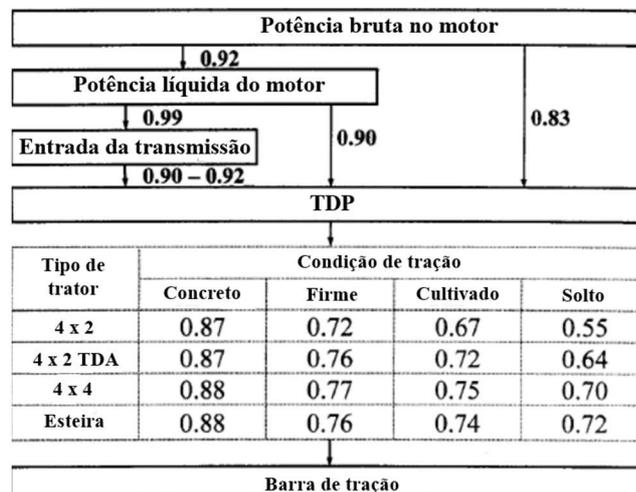
Neste tópico encontra-se a revisão de literatura realizada para compreensão do tema abordado no trabalho, sobre construção de dispositivo de medição de força de tração entre trator e semeadora. Primeiramente, é feita uma revisão sobre força de tração exercida pelo trator, dimensionamento do corpo de prova, o princípio e funcionamento de extensômetros, a medição de força mecânica através de extensometria, montagem de circuito elétrico do tipo Ponte de Wheatstone para medição de tensões elétricas, utilização de máquina de tração que será utilizada para a calibração deste dispositivo e sistema de aquisição de dados (*Data Logger*).

### 2.1 FORÇA DE TRAÇÃO ESTIMADA DO TRATOR

A força na barra de tração de um trator agrícola depende de características do solo, dos rodados, da potência e do seu peso. Rodado é um dispositivo de autopropulsão onde a tração é obtida pela ação de rolamento contínuo de roda ou esteira sobre o solo. A força que vem da interação entre rodado e solo é denominada força na barra de tração. A condição ideal seria a conversão de todo o torque do motor em força na barra de tração (VARELLA 2018).

A norma SAE EP496.3 (2006), considera que as reduções na potência de um trator, ficam em torno de 19 a 25% da potência produzida no motor até chegar onde é acoplado o implemento, devido ao consumo decorrente do sistema de transmissão, embreagem, diferencial, redução final e rodados, em condições de pista pavimentada. Abaixo na Figura 2 é possível verificar o rendimento por solo e modelos de trator.

Figura 2 – Relação de potência para tratores agrícolas



Fonte: Adaptado de ASAE (2006, p. 3)

Segundo Russini (2012), o rendimento é reduzido ainda mais devido à patinação dos rodados, que pode reduzir a eficiência em até 15%, e, em alguns casos, levar a uma diminuição global da potência motora de até 35%.

Baseado em Deters (2014) pode-se utilizar a seguinte equação para determinar a força de tração realizada pelo trator.

$$P_n \times \eta = \frac{F_t \times V}{270} \quad \dots(1)$$

Onde:

$P_n$  = Potencia nominal trator (CV)

$\eta$  = Rendimento do trator

$F_t$  = Força de tração (N)

$V$  = Velocidade de deslocamento trator (km/h)

Isolando  $F_t$ , tem-se:

$$F_t = \frac{P_n \times \eta \times 270}{V} \quad \dots(2)$$

## 2.2 EXTENSOMETRIA DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

### 2.2.1 Conceitos fundamentais sobre *Strain Gauge*

A forma mais comum de avaliar peças estruturais em máquinas, edifícios, veículos, aviões e outros itens similares é através do cálculo das forças atuantes sobre o material. Esse método é viável quando se tem conhecimento das cargas aplicadas aos componentes, tanto qualitativa quanto quantitativamente. No entanto, problemas surgem especialmente quando as cargas são desconhecidas ou apenas estimadas. Para garantir a segurança e assegurar uma vida útil adequada do componente, é essencial conhecer as tensões que o material experimenta. Por isso, são necessárias medições realizadas em condições operacionais (HOFFMANN, 1989).

Baseado em uma descoberta feita pelo cientista inglês Robert Hooke em 1678, foi desenvolvido um método prático para a determinação experimental das tensões no material. Hooke identificou uma relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante no material.

Esta deformação (ou "strain" em inglês) também ocorre na superfície dos objetos e, portanto, pode ser medida diretamente.

Entre as diversas técnicas usadas para a análise experimental das tensões, a mais comum atualmente é a utilização de extensômetros, para medir as deformações na estrutura. Esses dispositivos são amplamente adotados devido à sua eficácia e facilidade de instalação, exigindo pouco espaço físico para a sua instalação.

### 2.2.2 Medição de Força por extensômetros de resistência elétrica

A medição de força mecânica através de extensometria de resistência elétrica é baseada na utilização de um transdutor conhecido como extensômetro (ou "strain gauge"). Esse dispositivo é sensível às deformações que ocorrem em um corpo elástico em resposta à força aplicada. Um extensômetro é um transdutor resistivo que se deforma mecanicamente, e cuja resistência elétrica varia conforme o grau de deformação. A variação na resistência elétrica do extensômetro é medida por meio de um circuito elétrico, o que permite estimar tanto o grau de deformação quanto a força aplicada ao dispositivo (GUADAGNINI; ROCHA; BARLETTE, 2011).

No ano de 1856, Lord Kelvin (William Thomson), constatou que havia variação na resistência de fios metálicos quando os mesmos apresentavam deformação. De acordo com Weber (2009), Lord Kelvin demonstrou que a variação relativa da resistência  $\Delta R/R$  relaciona-se linearmente com a variação relativa do comprimento  $\Delta L/L$ .

Com a observação de Lord Kelvin, é possível formular a equação 3 onde K é variação relativa de resistência.

$$K = (\Delta R/R) / (\Delta L/L) \quad \dots(3)$$

A deformação  $\varepsilon$ , é determinada como a razão entre a variação de comprimento  $\Delta L$ , e o comprimento original L, como demonstrado na equação 4.

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad \dots(4)$$

Logo a variação relativa da resistência K, é informada na equação 5.

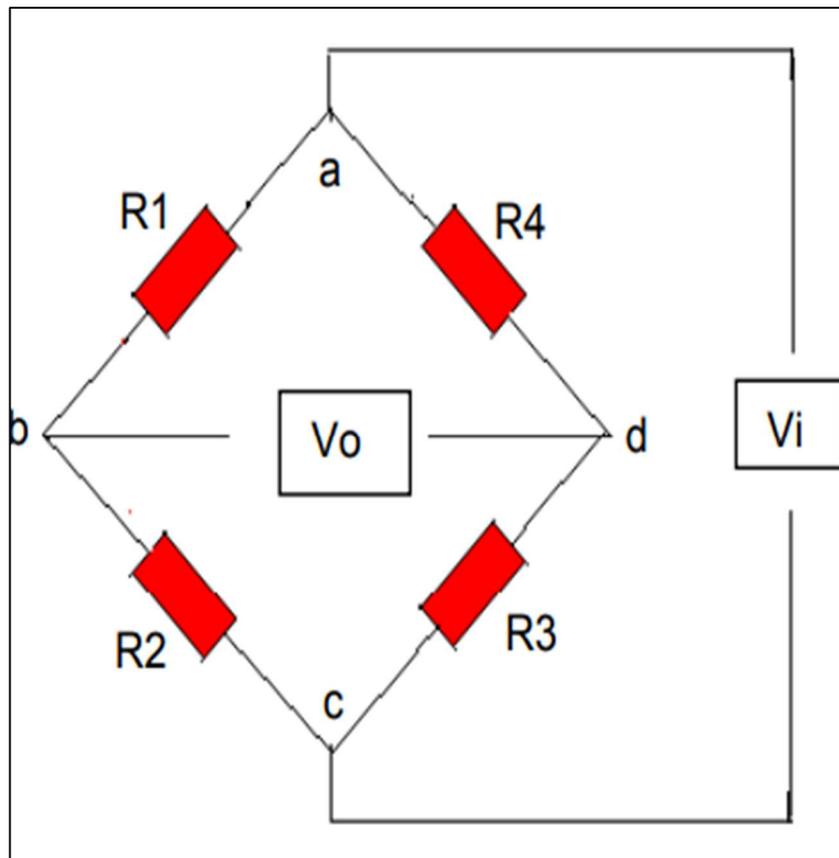
$$K\varepsilon = (\Delta R/R) \quad \dots(5)$$

### 2.2.3 Ponte de Wheatstone

De acordo com Hoffmann (1989), o *Strain Gauge*, quando ligado ao elemento elástico, atua como um sensor secundário que converte a tensão gerada pela força aplicada ao elemento primário em uma variação de resistência elétrica. A Ponte de Wheatstone (PW) é um circuito frequentemente utilizado em aplicações com *Strain Gauge* para medir essas variações de resistência.

Segundo Cunha (2010), a ponte de Wheatstone é um elemento sensível usado como medidor de resistências elétricas. Foi inventado por Kevin Hunter Christie em 1833, porém foi descrito por Kevin Weaststone. A Figura 3 demonstra uma Ponte de Wheatstone.

Figura 3 – Representação de uma Ponte de Wheatstone



Fonte: WEBER (2009)

Como demonstrado na Figura 3, a Ponte de Wheatstone é composta por uma fonte de Tensão  $V_i$  e quatro resistências, sendo R1, R2, R3 e R4. A ponte é energizada nos terminais "a" e "c" pela fonte de tensão  $V_i$ , e o sinal de saída  $V_o$  é obtido nos terminais "b" e "d", assim sendo um par de resistores para comparar e o outro para medir as variações.

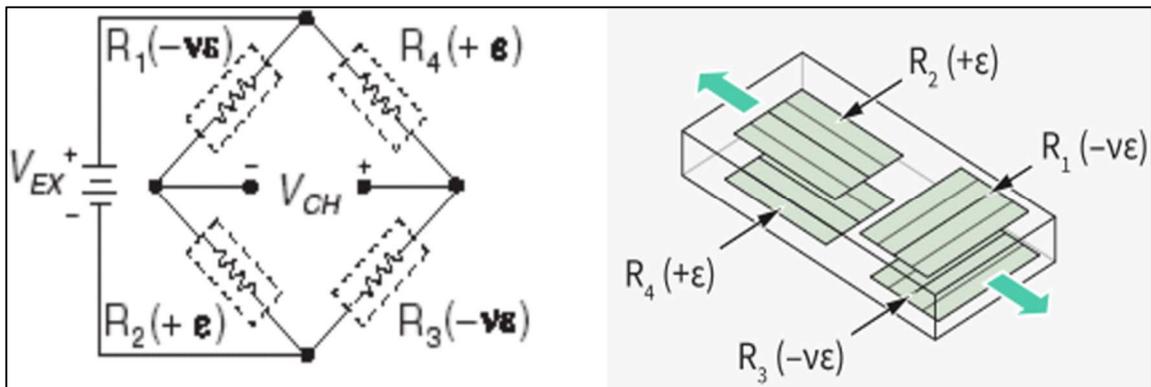
## 2.2.4 Ponte completa de tensão axial

Para a aplicação em questão, será utilizada uma ponte completa que elimina a deformação por flexão e mede exclusivamente a deformação axial. Na configuração da ponte, os elementos  $R_1$  e  $R_3$  (extensômetros ativos) medem o efeito de compressão de Poisson, enquanto  $R_2$  e  $R_4$  (também extensômetros ativos) medem a tensão de tração. No total, a configuração inclui quatro extensômetros ativos: dois são montados na direção da deformação axial (um na parte superior e outro na parte inferior), e os outros dois atuam como medidores do efeito de Poisson (ELPROCUS, 2024).

O efeito de Poisson pode ser descrito da seguinte forma: quando uma tensão de tração é aplicada, o material se alonga na direção axial. Simultaneamente, observa-se uma contração na direção transversal, resultando na redução da espessura do material à medida que o alongamento aumenta ao longo do eixo onde a tensão é aplicada (ELPROCUS, 2024).

Abaixo a Figura 4 mostra a configuração dos extensômetros em ponte completa e o desenho esquemático ao lado de montagem.

Figura 4 – Posicionamento dos extensômetros



Fonte: Elprocus (2024)

- Mede a tensão axial;
- $R_1$  e  $R_3$  são extensômetros ativos que medem o efeito Poisson compressivo ( $-\nu\varepsilon$ );
- $R_2$  e  $R_4$  são extensômetros ativos que medem a deformação de tração ( $+\varepsilon$ ).

A célula de carga mais simples para a medição de força de tração é geralmente projetada com uma geometria de barra de seção transversal circular, que pode ser sólida ou vazada. Essa forma permite uma ampla gama de dimensões, adaptando-se aos materiais disponíveis e facilitando o processamento. A barra circular é menos suscetível a flexão, torção e dobra em

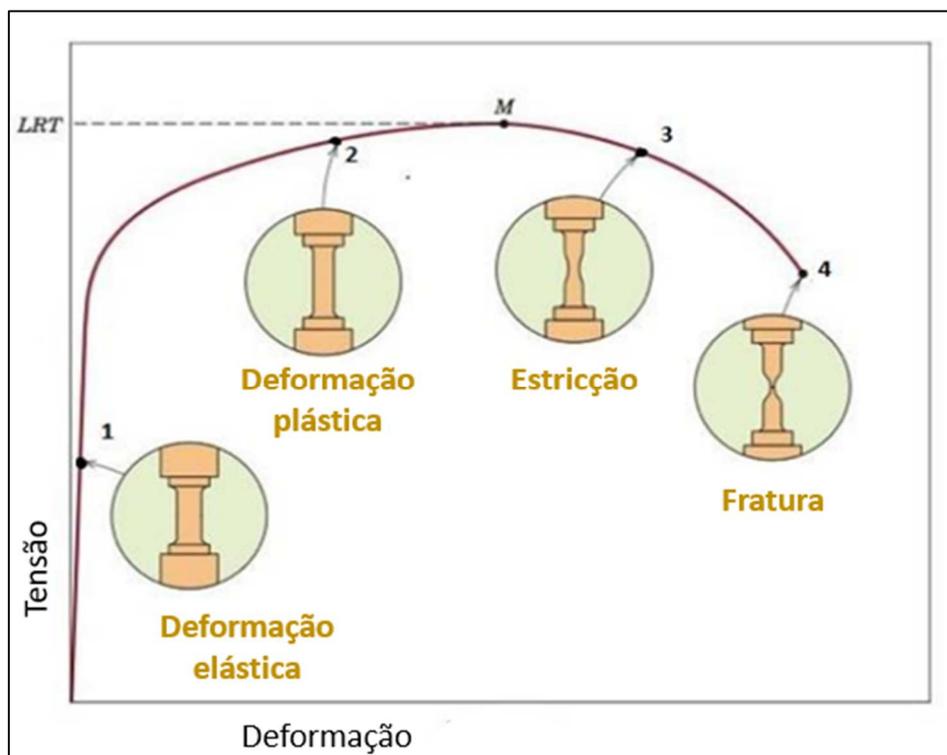
comparação com outras geometrias, proporcionando maior versatilidade na instalação no equipamento a ser testado (STEFANESCU, 2011).

### 2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Em um ensaio de tração, utiliza-se uma técnica para avaliar o comportamento do material sob esforços mecânicos. Nesse processo, aplica-se uma tensão axial ao material, que tende a se deformar e alongar o corpo de prova. Esses esforços, também chamados de cargas, são medidos diretamente na máquina de ensaio. Os ensaios de tração permitem determinar como os materiais reagem aos esforços de tração, quais são seus limites de tração e a partir de qual sollicitação ocorre o rompimento (SOBRAL e OLIVEIRA, 2009).

A Figura 5 mostra, um gráfico, que descreve o comportamento do material em relação aos esforços de tração. Esse tipo de gráfico é conhecido como gráfico de tensão em função da deformação e é o principal resultado disponibilizado após o ensaio. Nessa Figura 5 verifica-se que a deformação fica delimitada na parte central do corpo de prova que é mais estreita e contém uma secção uniforme no seu comprimento.

Figura 5 – Gráfico Tensão x Deformação

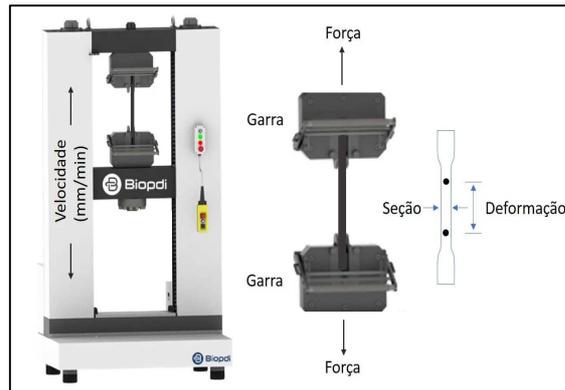


Fonte: Adaptado CALLISTER, 2002

A Figura 5, na região do ponto 1 é a deformação elástica, onde o corpo de prova ainda pode voltar ao seu estado original. Esta é a aplicação desejada da máquina de tração, não há interesse em passar do regime elástico do material no processo de calibração da célula de carga.

A demonstração do ensaio de tração efetuado por uma máquina de ensaio é representada na Figura 6.

Figura 6 – Representação de uma máquina de ensaio de tração



Fonte: Biopdi (2021)

Segundo Holt (2000) os corpos de prova mais utilizados são de secção retangular e secção circular.

O desenvolvimento desse ensaio é dado pela aplicação de uma carga de tração ( $F$ ) no corpo de prova com secção transversal ( $A$ ), essa carga deve ter um valor suficiente para alongar o corpo de prova até a ruptura, como mostra a Figura 6. A relação entre a carga de tração e a secção transversal é a tensão mecânica ( $\sigma$ ), que é dado a equação 6:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots(6)$$

Segundo Guessser (2009), a curva tem duas regiões, elástica e a plástica. Na região elástica é aplicado a lei de Hooke, que obedece a equação 7:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \dots(7)$$

Onde:

$E$  = Modulo de Elasticidade;

$\varepsilon$  = Deformação Específica.

## 2.4 EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

De acordo com o site Altus (2024), *Data Logger*, como o próprio nome sugere, é um registrador de dados, um dispositivo eletrônico que monitora e registra dados em tempo real ao longo do tempo ou em relação a uma determinada posição geográfica. Geralmente utilizado em aplicações para medição de longo prazo, o equipamento faz uso de instrumentos para coletar informações de variáveis de campo, como tensão, temperatura, corrente, entre outras.

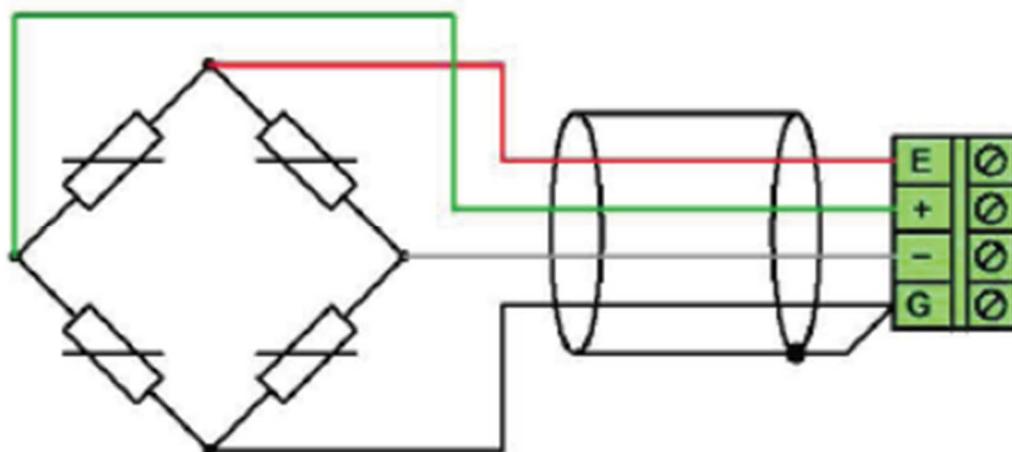
Para a aquisição dos dados será utilizado o equipamento Lynx ADS1800 disponibilizado pelo Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá.

Conforme o manual do Lynx ADS1800, ele é um equipamento de aquisição de dados com 8 canais analógicos configuráveis, 2 canais de contagem, 2 entradas digitais isoladas, 2 saídas digitais isoladas, 1 saída analógica configurável e uma interface CAN (Controller Area Network).

Os canais analógicos são universais, ou seja, permitem que diversos tipos de sensores sejam conectados em qualquer canal. A seleção do tipo de entrada é feita por um programa, sem a necessidade de abrir o equipamento para alterar a configuração. A única exceção é o complemento de ponte (usado no modo  $\frac{1}{4}$  de ponte). Para selecionar entre sensores de 120 ohms ou 350 ohms, é necessário colocar/remover um jumper interno.

Para a utilização da ponte completa, esse modo é usado quando o sensor possui os quatro braços da ponte. A Figura 7 mostra que os sinais “+” e “-” devem ser ligados nos nós de medida positivo e negativo da ponte (respectivamente). A tensão de excitação “E” e o Terra devem ser ligados aos nós restantes.

Figura 7 – Ligação em ponte completa



Fonte: Lynx Tecnologia (2019)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para a concepção da célula de carga, a caracterização do material que foi utilizada na fabricação da célula, assim como descreve também a fabricação, instrumentação e ligações elétricas da célula de carga. Na sequência é falado sobre a calibração, e por fim, sobre a validação dos métodos utilizados no projeto da célula de carga através de ensaios experimentais.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Programa de Computador

Se fez uso do programa de desenho computacional (CAD) SolidWorks, versão 2023, para encontrar a concepção ideal de célula de carga pois deve-se adaptar ao suporte de fixação que será acoplado à máquina de ensaio de tração, e também o suporte de fixação para ser acoplado ao suporte que será usado para fazer a avaliação de campo.

##### 3.1.2 Material da célula de carga

Para a confecção da célula de carga, foi escolhido um aço ABNT 1045 no estado normalizado, uma vez que este encontrava-se disponível na empresa Vence Tudo, apresentando boa usabilidade e resistência ao escoamento relativamente elevado, conforme Tabela 1 abaixo. O material estava disponível na forma de barra com 165 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro.

Tabela 1 - Características aço SAE 1045

Tipo de aço	Teor de Carbono (%)	Módulo de Elasticidade $f_{el}$ (GPa)	Limite de escoamento $f_y$ (MPa)	Limite de resistência à tração $f_u$ (MPa)	Alongamento (%)
<b>SAE 1045</b>	0,45	250	310	560	17

Fonte: Editado de Aço Especial (2024)

### 3.1.3 Máquina universal de tração

Para se fazer a calibração da célula de carga foi utilizada uma máquina universal de ensaios da Quanteq 50KN, uma vez que encontrava-se disponível no IFRS Campus Ibirubá, mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Máquina de ensaio universal

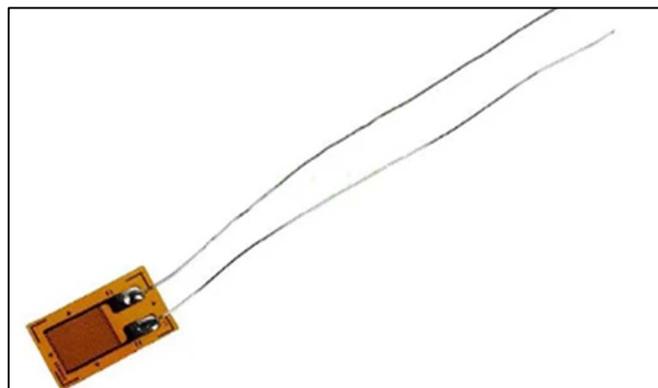


Fonte: Autor

### 3.1.4 Instrumentação da célula de carga

Para a instrumentação da célula de carga, foram utilizados quatro *Strain Gauge* BF350-3AA, mostrado na Figura 9.

Figura 9 – *Strain Gauge* BF350-3AA



Fonte: ELEROGATE (2024)

As especificações do *Strain Gauge* conforme fabricante são as seguintes abaixo:

- Material condutor: cobre-níquel liga 55% cobre / 45% níquel;
- Resistência: 350 Ohms;
- Tolerância de Resistência:  $<\pm 0,1\%$ ;
- Limite de Deformação: 2%;
- Temperatura de Operação:  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ ;
- Coeficiente de sensibilidade (fator de calibre): 2.0-2.20;
- Dimensões: 8 x 5mm.

### 3.1.5 Aquisição de dados

Para a etapa de calibração e uso posterior da célula de carga foi utilizado um equipamento de aquisição de dados modelo ADS-1800, mostrado na Figura 10. Para o reconhecimento destes dados foi necessário o uso de um Notebook com os programas necessário instalados.

Figura 10 – *Data Logger* ADS-1800



Fonte: Lynx Tecnologia (2019)

### 3.1.6 Suportes

Para tornar possível a instalação e adaptação da célula de carga, notebook e o *data logger* ADS-1800, foi utilizado a caixa protetora que ajuda a reduzir a vibração do trator além de proteger do meio externo os componentes eletrônicos. O suporte da célula de carga tem o objetivo de fazer a união entre o trator e o implemento e recebe toda a carga radial, permitindo

transferir apenas a carga axial para a célula de carga. A Figura 11 abaixo mostra os suportes, estes foram disponibilizados pelo IFRS Campus Ibirubá.

Figura 11 – Suportes



Fonte: Autor

### 3.1.7 Inversor de corrente

Para a alimentação do sistema de aquisição de dados (ADS 1800) durante a avaliação de campo foi utilizado um inversor de corrente Meind 150W, mostrado na Figura 12. O inversor, conectado à bateria do trator, promoveu elevação da tensão para 220 V.

Figura 12 – Inversor de corrente



Fonte: Autor

### 3.1.8 Trator

Na avaliação de capô foi utilizado o trator da marca Valtra, modelo BM 125i disponibilizado pelo IFRS Campus Ibirubá, Figura 13 abaixo mostra o trator.

Figura 13 – Trator BM125i



Fonte: Autor

O trator é um 4x2 TDA (tração dianteira auxiliar), tem potência de 125 cv disponível à uma rotação de 2300 rpm e torque máximo de 450 Nm à rotação de 1400 rpm. O trator utiliza pneus do tipo TM95 com as medidas de 23.1-30 para as rodas traseiras e 14.9-26 para as dianteiras. O peso de embarque lastrado é de 5720 kg.

### 3.1.9 Implemento

O implemento a ser utilizado será uma semeadora adubadora de arrasto da marca Vence Tudo, modelo Panther SM 7000 disponibilizado pelo IFRS Campus Ibirubá, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 – Semeadora modelo Panther SM7000



Fonte: Autor

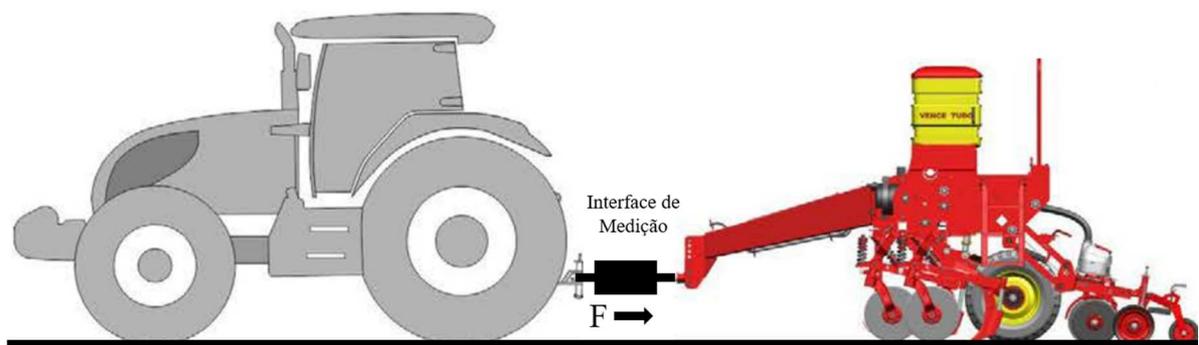
O modelo Panther SM 7000 possui 7 linhas de semeadura, disco liso de 18” e facão sulcador. Tem peso aproximado de 2260 kg, a capacidade no reservatório de sementes é de 266 kg e de fertilizante são 879 kg. Conforme o fabricante da semeadora a potência exigida do trator para tracionar este implemento é de 75 a 85 cv.

## 3.2 MÉTODO

### 3.2.1 Síntese e análise

A força a se considerar será gerada pelo trator quando em movimento, resultado da objeção da semeadora ao movimento. A Figura 15, mostra a região que será montado o suporte e a célula de carga.

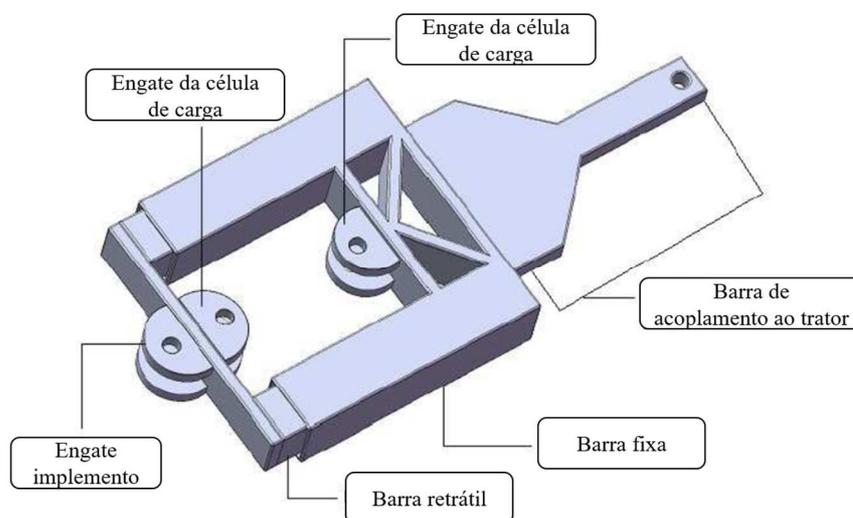
Figura 15 – Esquemática da força atuante



Fonte: Editado de Manual de Operação Panther SM (09/2023)

Neste suporte que foi baseado em Russini (2009), será montado a célula de carga conforme mostra a Figura 16. Esta estrutura possui um sistema flexível que cede quando tracionada no sentido axial e minimiza outras forças atuantes que acontecem na prática como forças radiais que atuam em transporte e manobra.

Figura 16 – Estrutura para montagem da célula de carga



Fonte: Russini 2009

### 3.2.2 Força de tração realizada pelo trator

Para determinar a força de tração realizada pelo trator é feito o cálculo abaixo, levando em consideração a potência de 125 cv, o rendimento de 0,72 para solo cultivado de trator 4x2 TDA e a velocidade de trabalho que será de 4 km/h.

$$F_t = \frac{P_n \times \eta \times 270}{V}$$

$$F_t = \frac{125cv \cdot 0,72 \cdot 270}{4km/h}$$

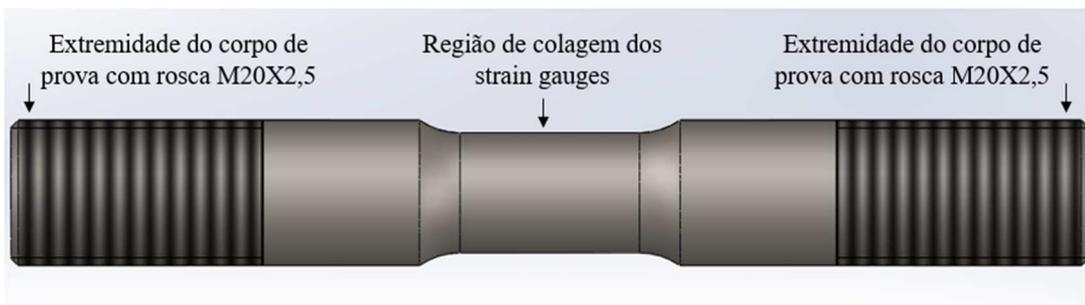
$$F_t = 6075 \text{ kgf}$$

A partir deste cálculo se tem a força de tração com base na potência nominal do trator, nessas dadas condições resultando em 6075 kgf (59575 N).

### 3.2.3 Concepção da célula de carga

No desenvolvimento da célula de carga foi levado em consideração o formato de um corpo de prova redondo. Este formato se mostrou satisfatório para realizar os testes na máquina de tração, para ser acoplado ao suporte da avaliação de campo e também para posicionar os *Strain Gauges*. Abaixo, na Figura 17, mostra o formato projetado no programa SolidWorks, e no apêndice A, o seu respectivo desenho técnico utilizado para produzi-lo na Indústria Vence Tudo.

Figura 17 – Corpo de prova



Fonte: Autor

O formato deste corpo de prova que se tornará uma célula de carga, com rebaixo no centro, é proposital para que a deformação se concentre nesta região onde estará colado os

*Strain Gauges*, e as rosca na extremidade foi feita para que seja possível adaptá-lo na máquina de tração e no suporte do teste.

Partindo de que o eixo possui uma rosca M20X2.5 nas pontas a região do rebaixo foi projetada com um diâmetro de 17,5mm com comprimento de 25mm. Para confirmar que o diâmetro da região onde será colado os *Strain Gauges* irá suportar a tração do trator de 6230 kg, se fez necessário realizar os cálculos abaixo, levando em consideração o módulo de elasticidade do aço SAE 1045 que é de 250 GPa.

Primeiro, é necessário achar a área do local de colagem considerando com  $\varnothing$  de 17,5mm:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad \dots(8)$$

$$A = \pi \cdot 8.75^2$$

$$A = 240,52 \text{ mm}^2$$

Segundo, encontrar o  $\Delta L$  (variação de comprimento) considerando 240,52 mm<sup>2</sup> de área, a força de tração que o trator irá exercer de 6072 kg (59575 N) e o comprimento da área de colagem de 25 mm (L).

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad \dots(9)$$

$$\Delta L = \frac{59575N \cdot 25mm}{250000MPa \cdot 240,52mm^2}$$

$$\Delta L = 0,0257mm$$

Terceiro, é preciso encontrar a tensão.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{59575N}{240,52mm^2}$$

$$\sigma = 247,70MPa$$

Quarto, é preciso encontrar deformação específica.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\varepsilon = \frac{0,0257}{25}$$

$$\varepsilon = 1,028 \times 10^{-3}$$

Quinto, será encontrado o módulo de elasticidade para estas condições.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \dots(10)$$

$$E = \frac{247,70 \text{ MPa}}{1,028 \times 10^{-3}}$$

$$E = 240953.30 \text{ MPa}$$

$$E = 240,95 \text{ GPa}$$

Como o módulo de elasticidade calculado de 240,95 GPa não ultrapassou o módulo de elasticidade do material que será usado de 250 GPa, pode-se utilizar o diâmetro de 17,50mm na região onde será aplicado os *Strain Gauges*.

### 3.2.4 Instrumentação da célula de carga

Para fazer a fixação dos *Strain Gauges*, a superfície da célula de carga foi preparada com lixamento por uma lixa P600 para ajuste da rugosidade. Na colagem dos *Strain Gauges*, foi posicionado o primeiro longitudinalmente ao corpo da célula de carga e o outro transversalmente, conforme é apresentado na Figura 18. Na sequência outros dois *Strain Gauges* foram fixados no lado oposto da célula de carga, considerando a mesma configuração longitudinal e transversal em paralelo a este posicionamento.

Figura 18 – Posição de colagem



Fonte: Autor

Foi utilizado a cola Loctite Super Bonder na colagem. Foram ligados entre si na forma de um circuito Ponte de Wheatstone (PW) completa. Para a ligação elétrica dos *Strain Gauges* foi utilizado estanho e ferro de solda para soldados entre si, fio fixado uma barra de pinos contendo 4 pinos para completar a ligação dos *Strain Gauges*. Deste conector com 4 pinos até o equipamento de aquisição de dados foi feito um cabeamento de aproximadamente 2 metros de comprimento.

Posteriormente a parte onde estão os *Strain Gauges* foi revestida com silicone para vedação e proteção conforme Figura 19 abaixo.

Figura 19 – Revestimento



Fonte: Autor

### 3.2.5 Calibração da célula de carga

Depois da instrumentação, a célula de carga foi conectada ao *data logger* Lynx ADS-1800 e montada na máquina de tração universal para calibração, mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Calibração



Fonte: Autor

Para a calibração da célula de carga foi utilizado o método de Regressão Linear uma opção do ADS-1800 onde é possível ajustar os limites da escala de um canal. Basicamente é criada uma lista de valores de entrada da tensão e seus respectivos valores em unidade de engenharia. A partir desses pontos, é feita uma regressão linear (ajuste de reta que melhor aproxima os pontos) para determinar os limites da escala.

Para adicionar um ponto na tabela de regressão é preenchido o campo Medida com o valor de entrada e Val. Engenharia com o valor de engenharia, correspondente a essa medida, e pressionar o botão Inserir. Em vez de preencher o valor da medida, também é possível ler o valor atual na entrada do canal, pressionando o botão Lê.

A cada novo ponto inserido na tabela, o programa recalcula os limites e a correlação dos pontos. A Figura 21 abaixo mostra a interface da opção Regressão Linear e os comandos mencionados anteriormente.

Figura 21 – Regressão Linear

**Aferição por Regressão Linear**

Canal: An - 4    Anterior / Próximo

Nome: Cel Carga 4

Unidade: Newtons

Equip.: LYNX ENG5 - 70987

Adotar Novos Limites

**Tabela de Calibração**

Medida: 0,0000800 V

Valor Calculado: 1220563 Newtons

Val. Engenharia: 0 Newtons

Inserir / Remover

Limpar

Correlação: 99.96 %

Ganho K: ,869548E-006 V / Newtons

Ganho 1/K: 101321,8 Newtons / V

Encerrar / Cancelar

**EscaLa de Entrada    Nova Escala Calculada**

EscaLa de Entrada	Nova Escala Calculada
Max +0,0109 V	1101,87 Newtons
+0,0100 V	1008,38 Newtons
0 V	-4,835 Newtons
-0,0100 V	-1018,05 Newtons
Min -0,0109 V	-1111,54 Newtons

Lim Sup Antes: 5000

Lim Inf Antes: -5000

Fonte: Autor

O Coeficiente de Correlação (em azul na Figura 21) dá uma indicação de quão próximo de uma reta estão os pontos tomados e serve, portanto, como um indicador da linearidade dos valores presentes na tabela.

Os valores de engenharia obtidos na máquina de tração foram definidos e inseridos em quilograma-força (kgf).

### 3.2.6 Avaliação de campo

Durante o teste será acoplado o trator e a semeadora, por uma interface de mensuração e submetido a diferentes condições de carga, representativas das situações encontradas no campo.

Foram definidos os parâmetros de teste, incluindo a velocidade de deslocamento monitorada pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS) do trator e o tipo de solo onde será feito o teste conforme Tabela 2. Durante o teste serão registradas variáveis importantes, como força de tração exercida pelo trator para tracionar a semeadora nas adversas condições do solo.

Tabela 2: Parâmetro de teste

<b>PARAMETRO DE TESTE</b>		
TESTE SOLO CULTIVADO	4 km/h	8 km/h
	4 km/h	8 km/h
TESTE SOLO COMPACTADO	4 km/h	8 km/h
	4 km/h	8 km/h

Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O respectivo capítulo abordará o desenvolvimento das etapas assim como os resultados do trabalho, inicialmente falará da etapa de calibração da célula de carga, instalação da interface de medição e os resultados obtidos através do teste prático a campo.

### 4.1 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Foi aplicado o método de correlação para a calibração da célula de carga adicionando 7 pontos de correlação conforme mostra a Tabela 3. A correlação entre os pontos adicionados conforme o programa, resultou em 99,98%.

Tabela 3: Calibração da célula de carga

<b>CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA</b>		
	<b>MÁQUINA DE TRAÇÃO</b>	<b>CÉLULA DE CARGA</b>
<b>VALOR 1</b>	8 kgf	11 kgf
<b>VALOR 2</b>	558 kgf	562 kgf
<b>VALOR 3</b>	994 kgf	995 kgf
<b>VALOR 4</b>	1763 kgf	1760 kgf
<b>VALOR 5</b>	2068 kgf	2064 kgf
<b>VALOR 6</b>	3004 kgf	3002 kgf
<b>VALOR 7</b>	3423 kgf	3426 kgf

Fonte: Autor (2024)

Levando em consideração o valor da máquina de tração como o valor real, é possível identificar que a célula de carga possui um erro em relação ao valor real.

Para Junior e Souza (2008) o erro está presente toda vez que o comportamento real de um sistema se afasta do ideal e matematicamente pode ser mostrado pela equação:

$$E = I - VV \quad \dots(10)$$

Onde:

E - erro de medição;

I - indicação do sistema de medidas;

VV - valor verdadeiro do mensurado.

De acordo com Barbosa (2019), diversos fatores em um sistema de medição podem gerar erros. Esses fatores incluem a calibração do instrumento, o material de ensaio, a temperatura, a umidade e a pessoa que realiza as medições, sendo todas essas possíveis fontes de erro em um sistema de medição.

Considerando os valores mencionados na Tabela 3, para descobrir o erro de medição entre o valor da máquina de tração (VV) e o valor da célula de carga (I), se tem o valor de E conforme Tabela 4 para todos os valores.

Tabela 4: Valor médio

<b>CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA</b>			
	<b>MÁQUINA DE TRACÇÃO (VV)</b> <b>(kgf)</b>	<b>CÉLULA DE CARGA (I)</b> <b>(kgf)</b>	<b>E (kgf)</b>
<b>VALOR 1</b>	8	11	3
<b>VALOR 2</b>	558	562	4
<b>VALOR 3</b>	994	995	1
<b>VALOR 4</b>	1763	1760	3
<b>VALOR 5</b>	2068	2064	4
<b>VALOR 6</b>	3004	3002	2
<b>VALOR 7</b>	3423	3426	3
		<b>VALOR MÉDIO</b>	<b>2,9</b>

Fonte: Autor

A partir dos valores de E é feito uma somatória desses valores e dividido pela quantidade de valores, resultando no valor 2,9. Tem-se que o valor medido pela célula de carga pode ter uma variação de  $\pm 2,9$ .

#### 4.2 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

A instalação do equipamento é feita toda no trator, primeiramente se retira a barra de tração original do trator e é instalado o suporte onde será colocado a célula de carga conforme Figura 22.

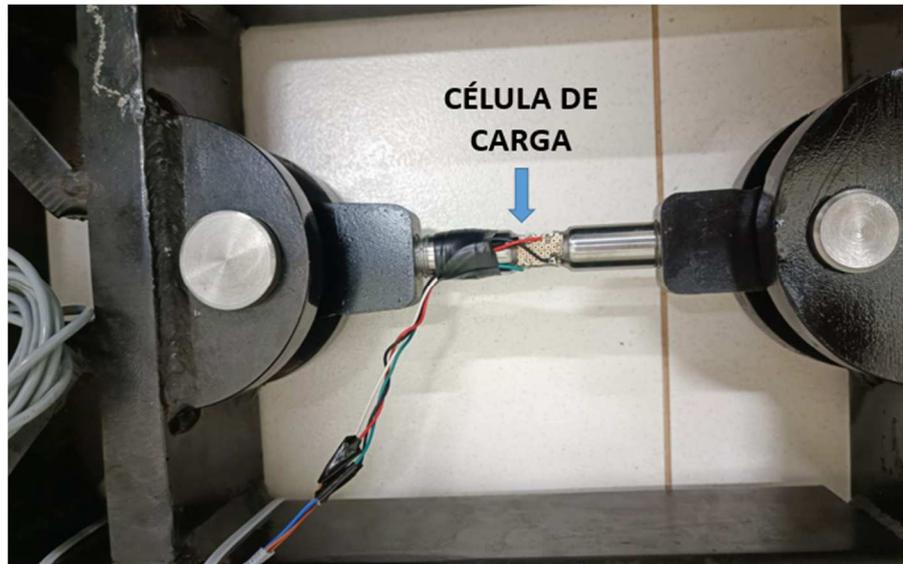
Figura 22 – Suporte trator implemento



Fonte: Autor

Após, é montado a célula de carga conforme mostrado na Figura 23 abaixo, fixada nas duas extremidades por pinos.

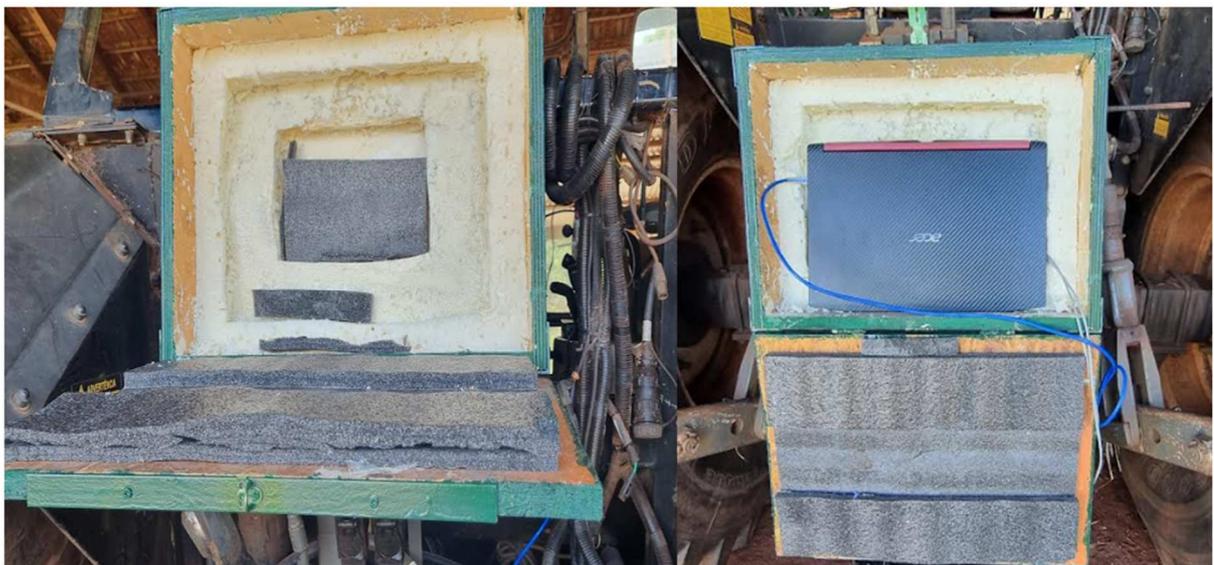
Figura 23 – Posição da célula de carga



Fonte: Autor

Para a montagem dos componentes eletrônicos como o notebook e aparelho de aquisição de dados se fez uso de uma caixa, conforme Figura 24, que diminui a vibração gerada pelo trator e a poeira gerada do teste prático. Esta caixa foi projetada pelos alunos do Técnico em Mecânica Subsequente 2023.

Figura 24 – Suporte do computador e *data logger*



Fonte: Autor

### 4.3 AVALIAÇÃO DE CAMPO

Assim que tudo foi instalado no trator, é acoplado a semeadora e feito o transporte até o local do teste. A semeadora estava vazia, portanto possui um peso de 2260 kg conforme fabricante.

Para validação do projeto desenvolvido neste trabalho foram realizadas avaliação de campo como descrito no item 3.2.5. Cada teste teve em média um trajeto de 50 metros.

#### 4.3.1 Avaliação de campo solo cultivado

O primeiro teste foi realizado em um solo argiloso já cultivado, mostrado na Figura 25, possuía apenas cultura de cobertura. Aplicaram-se os parâmetros em quatro testes, dois em 4 km/h e dois em 8 km/h.

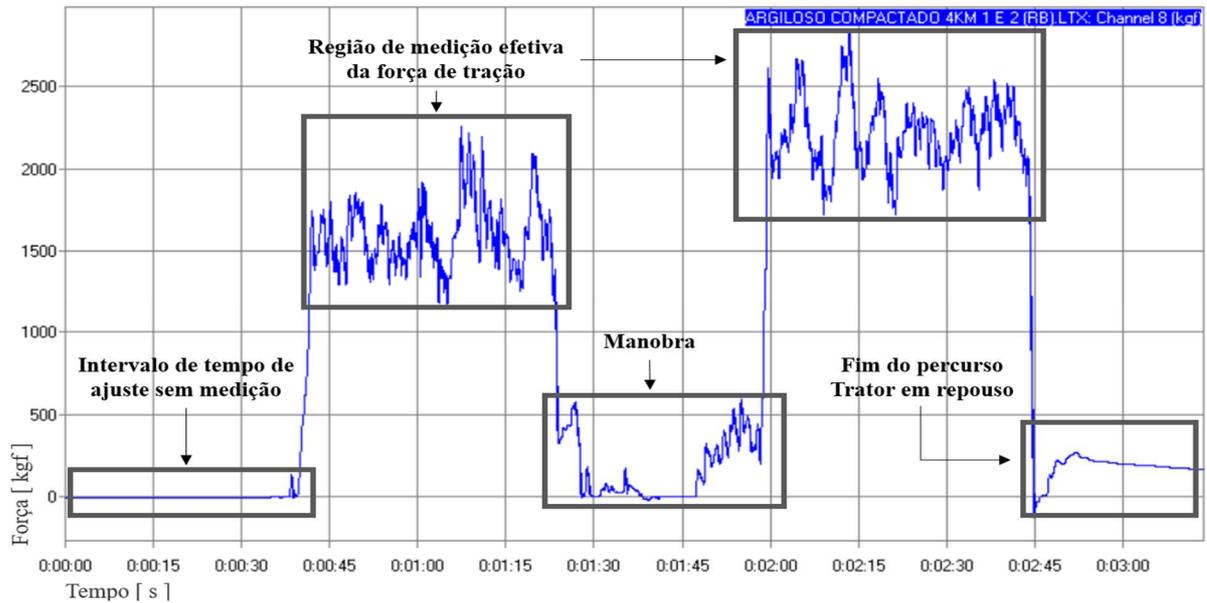
Figura 25 – Teste solo cultivado



Fonte: Autor

Os dados obtidos estão organizados em gráficos que gerou para cada uma das situações. O gráfico da Figura 26 mostra todo o intervalo de tempo da realização do teste.

Figura 26 – Gráfico completo

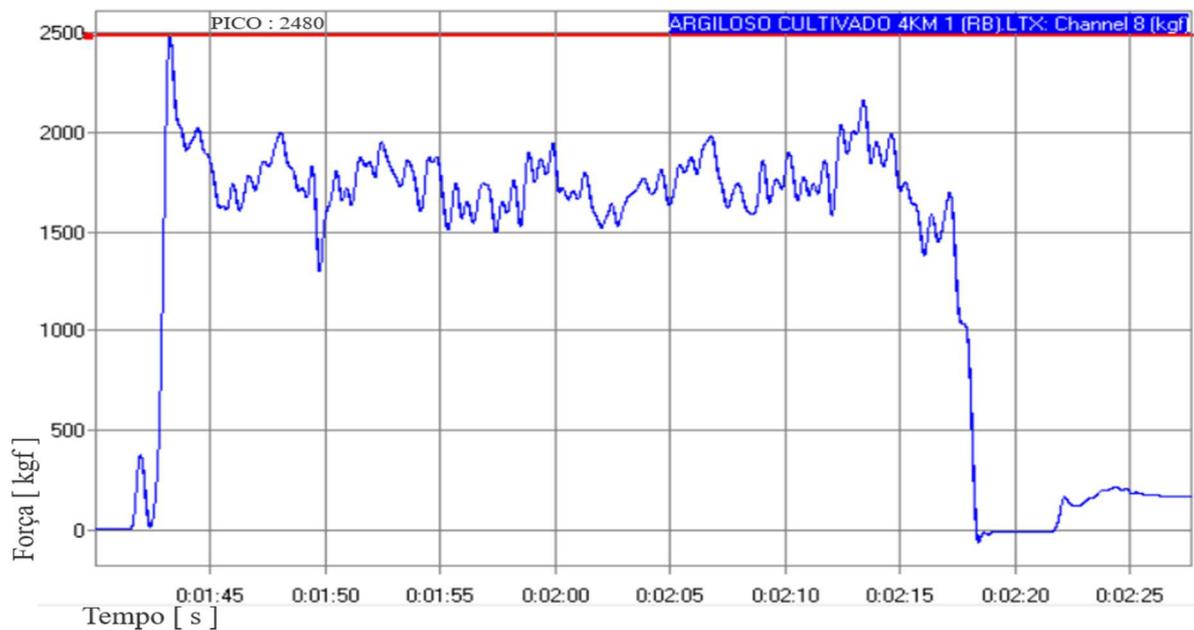


Fonte: Autor

A Figura 26 acima, mostra o gráfico por completo durante todo o percurso de um dos testes realizados. Para os demais gráficos são subtraídos o intervalo de tempo em que não houve medição efetiva de força, onde é realizado o ajuste de medição, manobra e do fim do percurso, onde o trator se encontra em repouso.

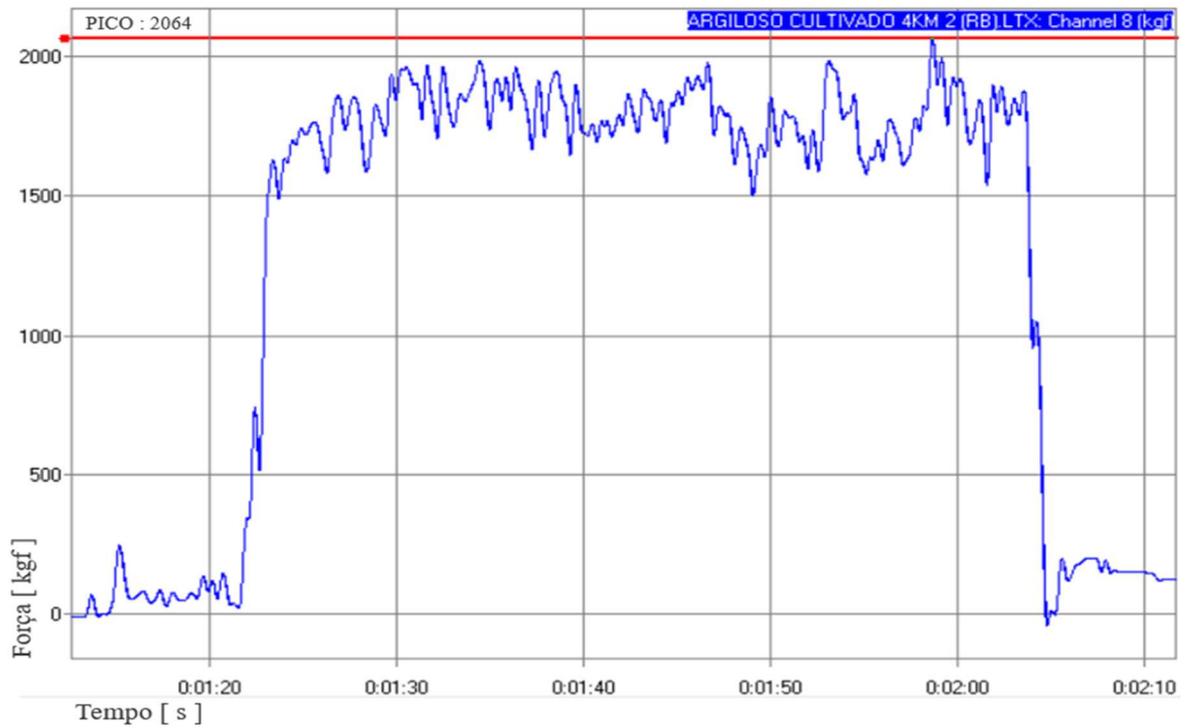
As Figuras 27 e 28 mostram os valores e o pico da força de tração com velocidade de 4km/h em um solo argiloso cultivado.

Figura 27 – Argiloso cultivado 4km/h - Teste 1



Fonte: Autor

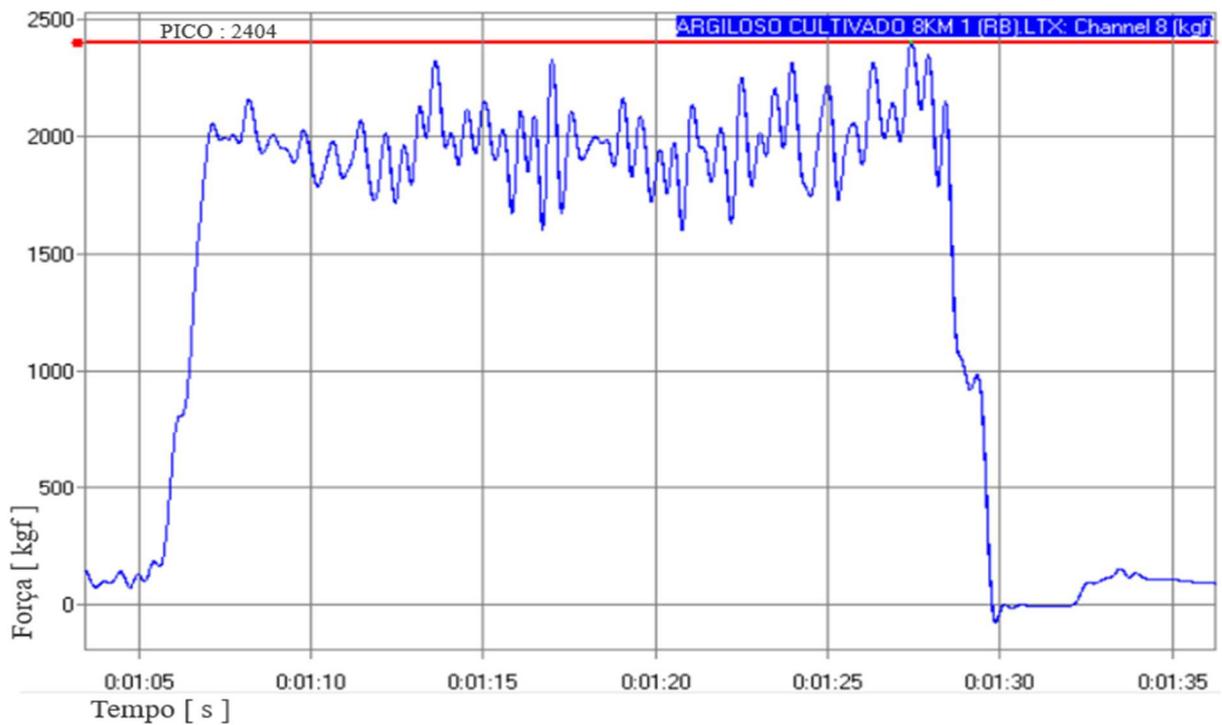
Figura 28 – Argiloso cultivado 4km/h – Teste 2



Fonte: Autor

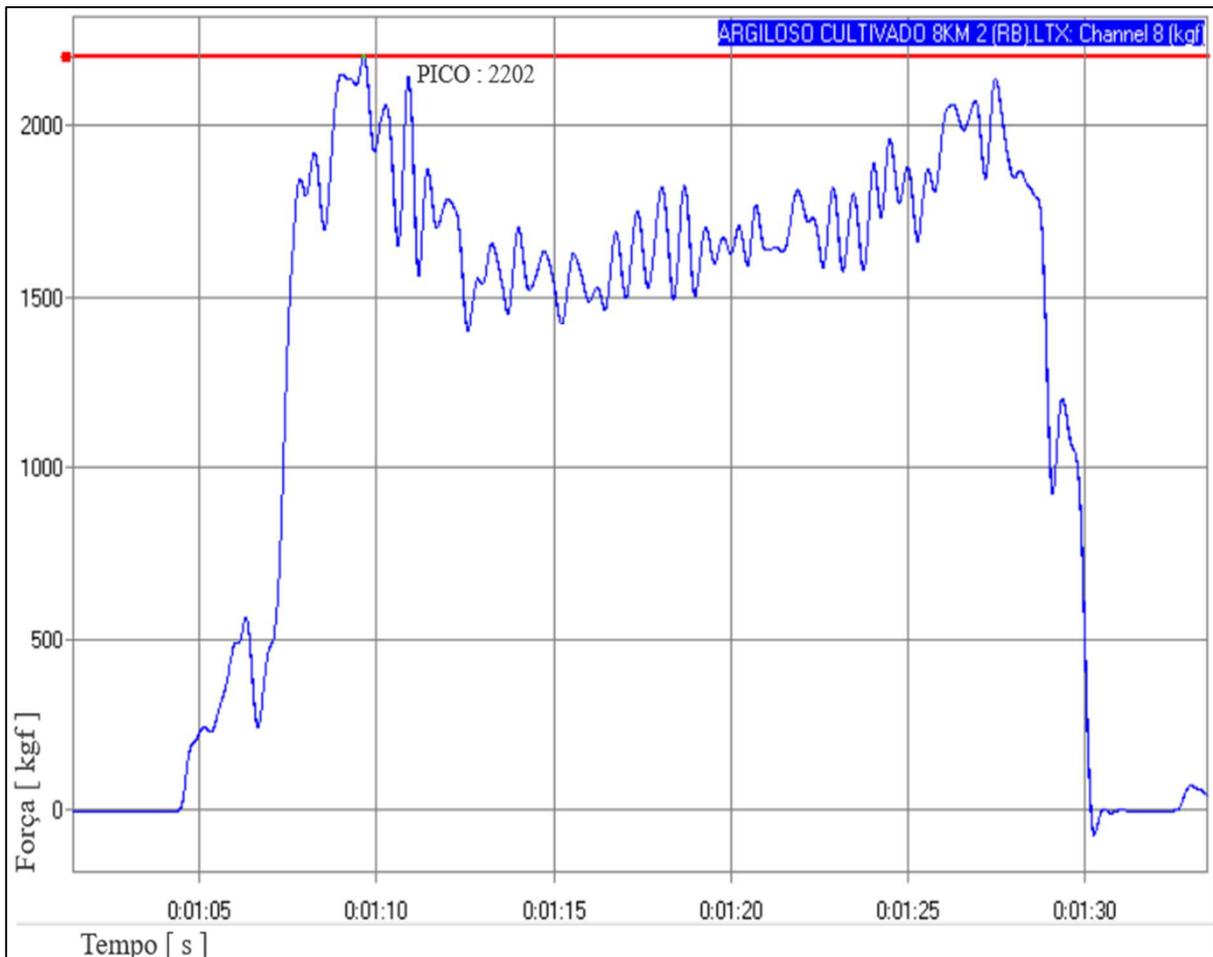
As Figuras 29 e 30 mostram os valores e o pico da força de tração, com velocidade de 8km/h em um solo argiloso cultivado.

Figura 29 – Argiloso cultivado 8km/h – Teste 1



Fonte: Autor

Figura 30 – Argiloso cultivado 8km/h – Teste 2



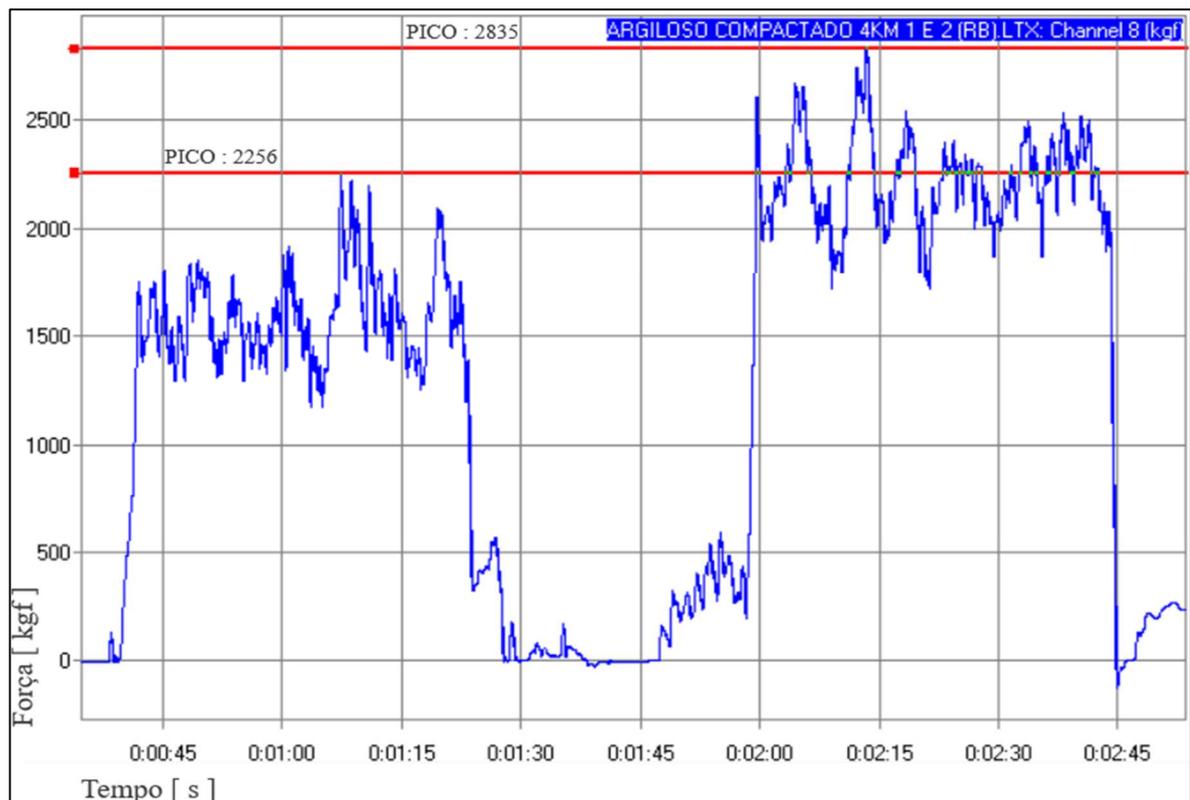
Fonte: Autor

Pode-se notar que em velocidades mais baixas como de 4km/h em um solo cultivado se mantém uma tração de trabalho em 1500 a 2000 kgf (14700N a 19610N), apenas em alguns picos se tem um aumento superior a 2000 kgf (19610N). Já na velocidade de 8km/h a tração de trabalho se mantém em uma força de tração maior, oscilando em torno de 2000 kgf (19610N), como indica a Figura 29. Na Figura 30 pode-se identificar que teve uma baixa na força de trabalho durante o meio do percurso, provavelmente resultado de uma condição ideal em que o solo ajudou a minimizar a força de tração exigida do trator, porém no início e no final da medição efetiva se manteve entre os 2000kgf (19610N).

### 4.3.2 Avaliação de campo solo compactado

A Figura 31 mostra os valores e o pico da força de tração, com velocidade de 4km/h em um solo argiloso compactado. Dentro deste mesmo gráfico há duas medições efetivas de tração, com a diferença entre elas que no primeiro momento do gráfico, o trator está tracionando a semeadora a descer, e posteriormente, a subir.

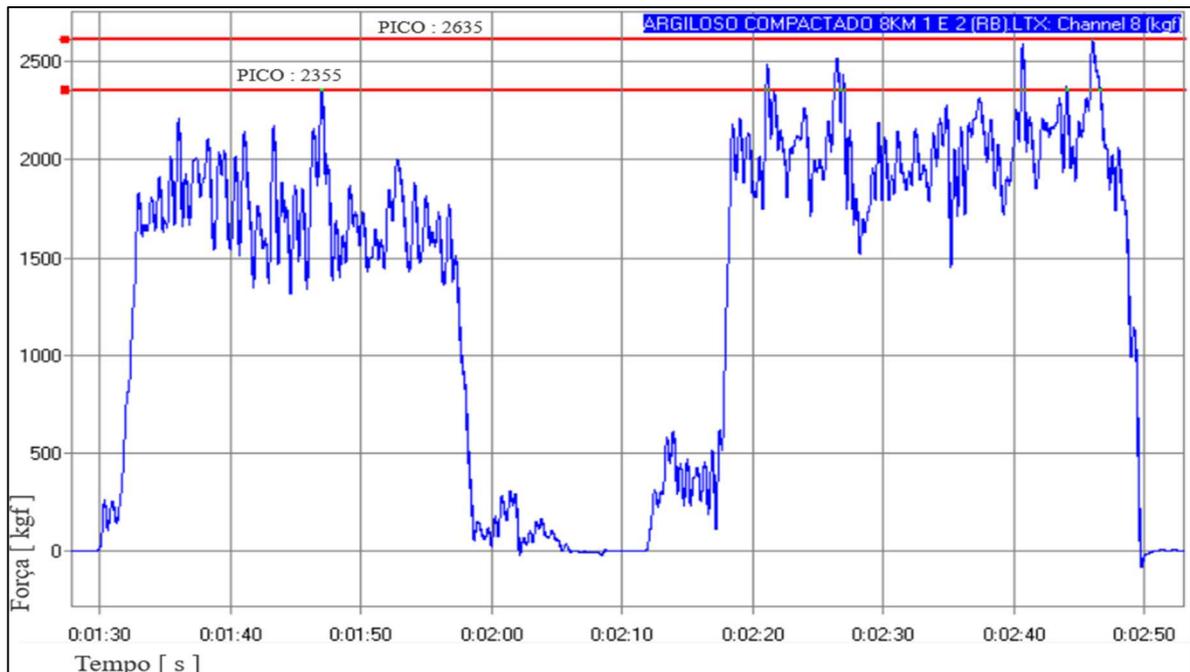
Figura 31 – Argiloso compactado 4km/h – Teste 1



Fonte: Autor

A Figura 32 mostra os valores e o pico da força de tração, com velocidade de 8km/h em um solo argiloso compactado. Dentro deste mesmo gráfico há duas medições efetivas de tração, com a diferença entre elas que no primeiro momento do gráfico, o trator está tracionando a semeadora a descer, e posteriormente, a subir.

Figura 32 – Argiloso compactado 8km/h – Teste 2



Fonte: Autor

Pode-se notar na Figura 31, a velocidade de 4km/h em um solo compactado, se encontrou o maior pico de força de tração com 2835 kgf (27801N) em aclave, e em declive o menor pico 2256 kgf (22124N).

No teste de 8km/h, esta velocidade só se manteve no declive, pois em aclave teve-se que reduzir para 7km/h e o trator conseguir tracionar a semeadora. Conforme Figura 32, o pico no aclave foi o menor de 2635 kgf (25840N) e no declive foi o maior de 2355 kgf (23094N).

É possível verificar analisando as Figuras 31 e 32 em conjunto, que em velocidade maior de 8 km/h a força de tração se mantém em uma faixa de trabalho mais próxima nas duas regiões de medição efetiva da Figura 32, já na velocidade de 4 km/h a variação da força de tração nas duas regiões de medição efetiva é maior.

#### 4.4 DISCUSSÃO

Comparando os dois tipos de solo pelos gráficos nas Figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, é possível notar que um solo compactado, exige mais da força de tração do trator de acordo com a velocidade de trabalho analisadas.

Os gráficos da Figura 27, 28, 29, 30, 31, 32, mostram que na faixa de medição efetiva de tração não existe uma força constante e sim uma variação em torno de uma média, pois o

solo não é uniforme, existem pedras, raízes, a diferença de umidade, além da patinação do trator e a velocidade. A semeadora em operação de semeadura, está com as hastes sulcadoras em torno de 10cm adentro do solo, isso faz com que encontre essas adversidades do solo.

De modo geral em solo compactado encontra-se o maior pico de força de tração em 2835 kgf (27801N). Para verificar o que cada linha exige da tração do trator pode-se dividir pela quantidade de linhas da semeadora que são 7 neste caso, portanto tem-se uma demanda de força de tração do trator em torno de 405kgf/linha, aplicando o erro de medição fica em  $405 \pm 2,9$  kgf ou  $(3972 \pm 28,4N)$ .

Segundo o fabricante a potência exigida para tracionar a semeadora é de 75 a 85cv, fazendo e a conversão da força máxima obtida de 2835 kgf (27801N) é possível pela Tabela 5 verificar que em velocidades maiores se exige mais da potência do trator.

Tabela 5: Potência exigida solo compactado

Velocidade	Potência exigida.
4 km/h	55 cv
5 km/h	69 cv
6 km/h	82 cv
7 km/h	96 cv
8 km/h	110 cv

Fonte: Autor (2024)

Em solo cultivado encontra-se o maior pico de força de tração em 2480 kgf (24320N). Para verificar o que cada linha exige da tração do trator pode-se dividir pela quantidade de linhas da semeadora que são 7 neste caso, portanto tem-se uma demanda de força de tração do trator em torno de 354kgf/linha, aplicando o erro de medição, fica em  $354 \pm 2,9$  kgf ou  $(3471 \pm 28,4N)$ .

Fazendo a conversão da força máxima obtida de 2480 kgf (24320N) é possível pela Tabela 5 verificar a mesma situação da Tabela 6 porém em solo cultivado exige uma potência menor.

Tabela 6: Potência exigida solo cultivado

Velocidade	Potência exigida.
4 km/h	51 cv
5 km/h	63 cv
6 km/h	76,5 cv
7 km/h	89,3 cv
8 km/h	102 cv

Fonte: Autor (2024)

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho foi dedicado ao desenvolvimento e validação de um equipamento para mensuração de forças de tração, com foco específico na célula de carga projetada para o trator BM 125i. O projeto, desenvolvido através de um programa de CAD, levou em conta a necessidade de suportar uma força de tração de 60 KN, e foi complementado pela calibração da máquina de ensaio universal disponível no IFRS - Campus Ibirubá.

Os testes realizados, tanto em laboratório quanto em campo, demonstraram a eficácia do projeto. A célula de carga foi capaz de fornecer dados precisos, com variações aceitáveis de  $\pm 2,9$  kgf ( $\pm 28,4$  N), o que confirma a robustez do equipamento. As avaliações de campo, que consideraram diferentes condições de solo e velocidades de operação, revelaram que o trator apresentou desempenho satisfatório em solo cultivado e a necessidade de ajustes em solo compactado para manter a eficiência da tração.

Os gráficos gerados durante os testes evidenciam que as variações nos dados estão associadas às irregularidades do solo e às condições operacionais variáveis, como a patinação do trator e a umidade do solo. Esses resultados são consistentes com as expectativas de que solos compactados exigem maior esforço de tração.

Em suma, o trabalho não apenas validou a célula de carga projetada, mas também integrou conhecimentos teóricos e práticos, incluindo CAD, mecânica dos sólidos, e análise experimental com strain gauges e equipamento de aquisição de dados. O sucesso na validação do dispositivo destaca sua utilidade potencial para futuras aplicações e pesquisas, contribuindo significativamente para o aprimoramento das práticas agrícolas e a análise de desempenho de equipamentos.

Este trabalho estabelece uma base sólida para o desenvolvimento de tecnologias semelhantes e fornece um exemplo prático da integração de diferentes ferramentas e técnicas para a solução de problemas técnicos no campo da engenharia.

Para trabalhos futuros, baseando-se nos desafios e descobertas encontrados neste trabalho, as seguintes sugestões são apresentadas:

- I. Realizar os testes novamente com as caixas de semente e fertilizante cheias em uma situação real de plantio.
- II. Realizar medições com o sulcador da semeadora em diferentes profundidades, pois ele tem grande influência na força de tração.

## REFERÊNCIAS

- AÇO ESPECIAL. Aço 1045. **Características do aço 1045**. São Paulo, 2024. Disponível em: < <https://www.acoespecial.com.br/aco-1045>>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- ALTUS. Tecnlogua. **O que é e para que serve um datalogger**. Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: < <https://www.altus.com.br/post/397/o-que-e-um-datalogger-e-por-que-voce-deveria-utiliza-lo-em-sua-aplicacao>>. Acesso em: 07 jul. 2024.
- ASAE. D497.4 – **Agricultural machinery management data**. In: Standards 2006. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI. 2006.
- BARBOSA, M. A. J. **Análise da Conformidade dos Resultados das Medições Adquiridas em uma Máquina de Ensaio de Tração**. Recife, 2019. Disponível em: < <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/47185>>. Acesso em: 28 jul. 2024.
- BIOPDI. **Ensaio de tração**. In: Ensaio de tração. [S. l.], 11 abr. 2021. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 6 jun. 2024.
- BRÖNSTRUP, C. **Projeto e Construção de uma Célula de Carga para medir Força de tração em Tratores Agrícolas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete. 2017.
- CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. Editora LTC, 5. Edição, Rio de Janeiro, 2002.
- CUNHA, M. **Comparação da Análise Miográfica Sonora com a Força Muscular**. 2010. Tese – Universidade Estadual Paulista Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá. 2010.
- DETERS, A. **Projeto de Adaptação Plana Agrícola Frontal para Tratores Agrícolas**. 2014. Dissertação (Bacharelado Engenharia Mecânica) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2014.
- ELETROGATE. **Extensômetro**. Strain gauge BF350-3AA, Minas Gerais, 2024. Disponível em: < <https://www.eletrogate.com/sensor-extensometro-transdutor-strain-gauge-bf350>>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- ELPROCUS. **Tipos de strain gauges: características e suas aplicações**. Ponte completa tipo III. Disponível em: < <https://www.elprocus.com/types-of-strain-gauge/>>. Acesso em: 03 jun. 2024.
- GUADAGNINI,P.; ROCHA,F.; BARLETTE, V. **Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força**. 2011. Universidade Federal do Pampa Campus Bagé, Bagé 2011.
- GUESSER, W L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- HOFFMANN, K. **An introduction to measurements using strain gages**. Darmstadt, Germany: Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989.

HOLT, J. M. **Uniaxial Tension Testing**. In: AMERICAN SOCIETY FOR MATERIAL, ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Ohio, ASM International, vol.08, 2000.

LYNX. **Manual de usuário, ADS1800**. Acesso em: 05 jun. 2024

RUSSINI, A. Projeto, Construção e Teste de Instrumentação Eletrônica Para Avaliação do Desempenho de Tratores Agrícolas. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2009.

SOBRAL, M. D. C.; OLIVEIRA, D. G. R. **Tecnologia dos materiais**. 2009. Disponível em: <[http://www.ifba.edu.br/metalografia/arq/apostila\\_sem\\_i\\_2009.pdf](http://www.ifba.edu.br/metalografia/arq/apostila_sem_i_2009.pdf)>. Acesso em: 03 jan.2024.

SOUSA, G. G. P.; JR, L. S. **Aplicação da Simulação de Monte Carlo no Cálculo da Incerteza de Medição**. Extensão em Ação. Fortaleza, 2016. Disponível em:< <http://www.periodicos.ufc.br/extensaoemacao/article/view/3832>>. Acesso em: 18 jul.2024.

STEFANECSU, D. M.: **Methods for increasing the sensitivity of strain gauge force transducers**. PhD Dissertation, p. 4, “Politehnica” University of Bucharest, 1999.

VARELLA, C. **Estimativa de capacidade de tração de tratores agrícolas**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica- RJ

WEBER, Albano Luiz. **Extensometria**. In: Extensometria . [S. l.], 12 set. 2009. Disponível em: [http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain\\_gauge%20extensometria.pdf](http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20extensometria.pdf). Acesso em: 5 jul. 2024.

### APÊNDICE A – Dimensões da Célula de carga

