

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GUILHERME CARDOSO PINTO**

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA MEDIR  
ESFORÇO DE TRAÇÃO EM UM TRATOR AGRÍCOLA**

**Alegrete**

**2023**

**GUILHERME CARDOSO PINTO**

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA MEDIR  
ESFORÇO DE TRAÇÃO EM UM TRATOR AGRÍCOLA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

Coorientador: Prof. Dr. Vilnei de Oliveira Dias

**Alegrete**

**2023**

**GUILHERME CARDOSO PINTO**

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA MEDIR ESFORÇO DE  
TRAÇÃO EM TRATOR AGRÍCOLA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em: 13 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Vilnei de Oliveira Dias  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia  
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2023, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2023, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **VILNEI DE OLIVEIRA DIAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2023, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1326219** e o código CRC **F0C11BAA**.

---

## Resumo

A medição do alongamento de materiais, técnica conhecida como extensometria, tem sua base nas propriedades dos materiais, aos quais possuem uma certa linearidade em sua relação entre tensão aplicada e a deformação correspondente. Os extensômetros são transdutores responsáveis por transformar as variações no comprimento do material em variações na resistência elétrica aos quais são compostos, essa variação na resistência pode ser posteriormente interpretada por um data logger (aparelho de leitura e de registro de dados), esta informação, por sua vez, pode ser transformada em uma força equivalente. Com o crescimento populacional e consequente aumento da demanda pela produção alimentícia, a extensometria tem um papel no monitoramento de ações desenvolvidas por tratores e implementos agrícolas por meio da barra de tração. O presente trabalho tem como objetivo projetar e fabricar uma célula de carga capaz de determinar a força exercida sobre a barra de tração de um trator agrícola através de técnicas de extensometria. A principal linha da metodologia aplicada contou com a concepção para um suporte responsável por fixar a célula de carga contendo o extensômetro, a fabricação desta proposta de suporte, a instrumentação da célula de carga e sua calibração, além dos testes aos quais foram responsáveis para a validação do projeto, sendo eles, o teste de tração com o trator e a avaliação de campo. Diante disto, verificou-se que, de maneira satisfatória, o presente trabalho atingiu com êxito o objetivo proposto, a qual estabelece a fabricação de uma célula de carga e todo suporte físico a ela anexado para a medição do esforço axial à barra de tração de um trator agrícola, e assim dar estrutura para futuros trabalhos referentes ao desempenho de tratores.

**Palavras chave:** Extensometria, Barra de Tração, Trator Agrícola.

## **Abstract**

The measurement of the elongation of materials, a technique known as extensometry, is based on the properties of materials, which have a certain linearity in their relationship between applied stress and the corresponding deformation. Extensometers are transducers responsible for transforming variations in the length of the material into variations in the electrical resistance to which they are composed, this variation in resistance can be later interpreted by a data logger (device for reading and recording data), this information, by turn, can be transformed into an equivalent force. With population growth and consequent increase in demand for food production, extensometry plays a role in monitoring actions taken by tractors and agricultural implements through the drawbar. The present work aims to design and manufacture a load cell capable of determining the force exerted on the drawbar of an agricultural tractor through extensometry techniques. The main line of the methodology applied included the conception of a support responsible for fixing the load cell containing the extensometer, the manufacture of this support proposal, the instrumentation of the load cell and its calibration, in addition to the tests that will be responsible for the validation of the project, namely, the traction test with the tractor and the field evaluation. In view of this, it was verified that, satisfactorily, the present work successfully achieved the proposed objective, which establishes the manufacture of a load cell and all physical support attached to it for measuring the axial effort to the traction bar of an agricultural tractor, and thus provide structure for future work regarding the performance of tractors.

**Keywords:** Extensometry, Drawbar, Agricultural Tractor.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Relação de estimativa e perdas de potência nos diferentes setores do trator, por tipo de tração e por condições de solo..... | 11 |
| Figura 2 - Corpo de prova para teste de tração.....   | 13 |
| Figura 3 - Diagrama tensão-deformação para materiais dúcteis (a) e frágeis (b). ....  | 13 |
| Figura 4 - Representação da Ponte de Wheatstone. ....   | 15 |
| Figura 5 - Trator principal, New Holland TL 75E .....   | 20 |
| Figura 6 – Trator lastro, New Holland 7630.....   | 21 |
| Figura 7 – Vista Superior com medida de distância mínima entre engate e apoio do trator. ....   | 26 |
| Figura 8 – Simulação do componente de engate ao trator. ....  | 27 |
| Figura 9 – Simulação do componente de engate ao implemento. ....  | 27 |
| Figura 10 – Estrutura completa.....   | 28 |
| Figura 11 – Malha sobre imagem microscópica do material da adaptação. ....  | 29 |
| Figura 12 – Configuração final do suporte. ....   | 30 |
| Figura 13 - Célula de carga e suporte instalados no trator. ....  | 30 |
| Figura 14 – Configuração da ligação dos strain gauges na forma de Ponte de Wheatstone.....  | 31 |
| Figura 15 – Posicionamento da célula de carga na máquina de ensaios durante a calibração. ....  | 32 |
| Figura 16 - Comparação entre sinal medido e calculado relação à força. ....   | 33 |
| Figura 17 – Percurso para a Determinação das Velocidades.....   | 34 |
| Figura 18 - Local de montagem do aquisitor de sinais. ....  | 35 |
| Figura 19 - Realização dos testes.....  | 35 |
| Figura 20 - Relação Força x Tempo T1A .....   | 37 |
| Figura 21 - Relação Força x Tempo T1B .....   | 37 |
| Figura 22 - Relação Força x Tempo T1C.....  | 38 |
| Figura 23 - Relação Força x Tempo T2A .....   | 38 |
| Figura 24 - Relação Força x Tempo T2B .....   | 39 |
| Figura 25 - Relação Força x Tempo T2C.....  | 39 |
| Figura 26 - Relação Força x Tempo T3A .....   | 40 |
| Figura 27 - Relação Força x Tempo T3B .....   | 40 |
| Figura 28 - Relação Força x Tempo T3C.....  | 41 |
| Figura 29 - Relação Força x Tempo T4A .....   | 41 |
| Figura 30 - Relação Força x Tempo T4B .....   | 42 |
| Figura 31 - Relação Força x Tempo T4C.....  | 42 |
| Figura 32 - Relação entre força de tração (kN) e velocidade de deslocamento do conjunto (km/h). ....                                    | 44 |
| Figura 33 - Dimensões do corpo de prova .....   | 50 |
| Figura 34 - Dimensões do suporte fixador do corpo de prova. ....  | 51 |
| Figura 35 - Dimensões da adaptação para o suporte.....  | 52 |
| Figura 36 - Relação tensão de saída 1 x força.....  | 54 |
| Figura 37 - Relação tensão de saída 2 x força.....  | 54 |
| Figura 38 - Relação tensão de saída 3 x força.....  | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Cálculo da força de tração máxima.....         | 24 |
| Tabela 2 - Nomenclatura para os testes realizados. ....   | 25 |
| Tabela 3 – Velocidades de acordo com nível de carga.....  | 34 |
| Tabela 4 – Patinamentos de acordo com nível de carga..... | 36 |
| Tabela 5 - Relação entre velocidade e força.....          | 44 |
| Tabela 6 - Valores adquiridos na calibração. ....         | 53 |
| Tabela 7 - Tempo para a determinação do patinamento.....  | 56 |



## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 8  |
| 2. OBJETIVOS .....   | 10 |
| 2.1 Objetivo Principal.....  | 10 |
| 2.2 Objetivos Específicos .....  | 10 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 11 |
| 3.1 Tração de Implementos por tratores agrícolas.....                      | 11 |
| 3.2 Propriedades Dos Materiais.....  | 12 |
| 3.3 Extensometria.....   | 14 |
| 3.3.1 Princípio físico dos extensômetros de resistência elétrica .....     | 14 |
| 3.3.2 Ponte De Wheatstone.....   | 15 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS .....   | 17 |
| 4.1 Materiais.....   | 17 |
| 4.1.1 Softwares .....  | 17 |
| 4.1.2 Célula de carga e suporte.....                                       | 17 |
| 4.1.3 Torno.....   | 18 |
| 4.1.4 Serra fita horizontal.....   | 18 |
| 4.1.5 Esmerilhadeira.....  | 18 |
| 4.1.6 Máquina para solda .....   | 18 |
| 4.1.7 Furadeira de coluna.....   | 19 |
| 4.1.8 Máquina universal de ensaios .....                                   | 19 |
| 4.1.9 Extensômetro .....   | 19 |
| 4.1.10 Condicionador de sinais e notebook.....                             | 19 |
| 4.1.11 Tratores .....  | 19 |
| 4.1.12 Inversor de tensão.....   | 21 |
| 4.2 Métodos.....   | 21 |
| 4.2.1 Concepção do suporte fixador .....                                   | 21 |
| 4.2.2 Caracterização do material da adaptação para o suporte fixador ..... | 22 |
| 4.2.3 Fabricação da adaptação para o suporte fixador .....                 | 22 |
| 4.2.4 Instrumentação da célula de carga .....                              | 22 |
| 4.2.5 Calibração da célula de carga .....                                  | 23 |
| 4.2.6 Avaliação de tração com o trator .....                               | 23 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 26 |
| 5.1 Concepção da adaptação para o suporte fixador.....                     | 26 |
| 5.2 Caracterização do material da adaptação para o suporte fixador .....   | 28 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 5.3 | Fabricação da adaptação para o suporte fixador .....             | 29 |
| 5.4 | Instrumentação da célula de carga .....                          | 30 |
| 5.5 | Calibração da célula de carga .....                              | 31 |
| 5.6 | Avaliação de tração com o trator .....                           | 33 |
| 6.  | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....                                   | 43 |
| 7.  | CONCLUSÕES.....  | 46 |
| 8.  | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                  | 47 |
| 9.  | APÊNDICES .....  | 50 |
| 9.1 | APÊNDICE A – Dimensões do corpo de prova .....                   | 50 |
| 9.2 | APÊNDICE B – Dimensões do suporte fixador do corpo de prova..... | 51 |
| 9.3 | APÊNDICE C – Dimensões da adaptação para o suporte .....         | 52 |
| 9.4 | APÊNDICE D – Valores adquiridos na calibração .....              | 53 |
| 9.5 | APÊNDICE E – Gráficos das calibrações .....                      | 54 |
| 9.6 | APÊNDICE F – Tempo para a determinação do patinamento .....      | 56 |

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, fruto do crescimento populacional, há uma grande necessidade de investimento em ramos como a produção alimentícia. Como explana Matsuura (2018), com dados da ONG Global Footprint Network, a data de 01/8/2018 foi marcada pelo dia em que o consumo de recursos pela humanidade ultrapassou a capacidade de renovação do planeta.

“Assim, os ganhos de produtividade agrícola constituem uma das formas de aumento da disponibilidade de alimentos e redução dos preços, o que contribui para a garantia de segurança alimentar da população” (Vieira Costa, Fernandes Maciel Gomes, *et al.*, 2013, p. 2).

Sichonany *et al.*, (2011, p. 2) explicam que a partir do monitoramento do desempenho de máquinas agrícolas, busca-se a otimização através da correção de pontos de operação críticos e que estão em dissonância com o ideal.

Espera-se que o trator agrícola, sendo base para as operações realizadas na agricultura, corresponda ao foco desse monitoramento e otimização.

Silveira e Sierra (2010) ponderam que diversos pontos podem ser levados em conta na escolha do trator ideal, como é o caso da potência, conforto, manobrabilidade, facilidade de manutenção e preço de aquisição, onde a eficiência energética traria benefícios ao ser incorporada nestes itens. (SILVEIRA e SIERRA, 2010)

“O motor do trator agrícola transforma parte da energia proveniente da queima do combustível em trabalho mecânico, e através do sistema de transmissão, este trabalho mecânico se converte em trabalho útil podendo ser utilizado nas mais diversas atividades agrícolas” (Schlosser, 1996 apud Frantz, 2018, p. 20).

“O trator para tracionar um implemento agrícola, necessita de uma força para quebrar a resistência imposta pelo implemento, além de produzir uma velocidade considerada ideal na realização do trabalho. Através do produto da força demandada pelo implemento pela velocidade de deslocamento obtém-se a potência que está sendo desenvolvida na barra de tração do trator” (Mialhe, 1974 apud Russini, 2022, 25).

A barra de tração, segundo Silva (2014, p. 51), é responsável pela tração de arados, grades, ancinhos, correntes, carretas, reservatórios de água e madeira em áreas de derrubada. Localizada na parte inferior traseira do trator, podendo ser

removida quando necessário além de ser opcionalmente fixa ou livre horizontalmente, conforme a operação que está sendo realizada.

Malerba, Guarnieri e Barros (2008, p. 1) explicam que a força externa aplicada a um corpo pode ser encontrada a partir da medição da deformação do mesmo, que por sua vez determina-se com a técnica de extensometria. Usa-se, portanto, Strain Gages que basicamente é uma resistência elétrica fina sobre uma base isolante que é fixada na superfície do material a ser analisado. A variação da resistência imposta à corrente elétrica, após a conversão feita através de equações, indica o quanto o componente se deformou.

É dentro deste contexto que situa-se este trabalho, onde busca-se projetar e fabricar uma célula de carga para monitoramento da força exercida pelo trator ao tracionar implementos agrícolas.

Considerando o crescimento populacional e o conseqüente aumento na demanda da produção agrícola, justifica-se este trabalho pela necessidade do investimento na área, como o projeto de máquinas voltadas para a otimização de operações realizadas a campo pelo maquinário.

O presente estudo teve como ponto de partida o trabalho *Projeto e construção de uma célula de carga para medir força de tração em tratores agrícolas* (Brönstrup, 2017), apresentado pelo discente Carlei Brönstrup como Trabalho de Conclusão de Curso para a graduação de engenharia mecânica pela Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Principal**

Projetar e construir uma célula de carga capaz de determinar a força exercida na barra de tração de um trator agrícola.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Desenvolver uma célula de carga que suporte o esforço axial produzido pelo trator ao tracionar implementos agrícolas.

Projetar e construir um suporte para a célula de carga de modo a impedir os esforços transversais e/ou momentos, permitindo somente esforços axiais na célula de carga.

Calibrar a célula de carga.

Executar testes de tração para a validação do projeto.



A figura 1 ilustra cada fase das principais perdas existentes no processo de tração de implementos por parte de um trator, além da relação de perda de rendimento relativo ao rodado e condição de solo em que o teste foi realizado.

O esforço horizontal imposto à barra de tração, segundo a ASABE (2006, p. 392), pode ser calculado de acordo com a equação 1, a seguir:

$$D = F_i[A + B(S) + C(S)^2]WT \quad (1)$$

Onde D é a força de tração exigida pelo implemento [N], F é parâmetro de ajuste adimensional para a textura do solo (1 para fina, 2 para média e 3 para uma textura de solo mais grosseira), A, B e C são parâmetros de especificação da máquina, S é a velocidade de campo [km/h], W corresponde ao número de ferramentas ou à largura do implemento [m] e T é a profundidade da ferramenta de trabalho [cm].

A norma brasileira para procedimentos de ensaio de potência, a NBR ISO 789, contém em sua parte 1 os tópicos a respeito da tomada de potência, em sua parte 9, mais especificamente sobre os ensaios de potência na barra de tração. Esta norma, por sua vez, tem como base o código 2 da norma de padronização mundial, para testes oficiais de tratores agrícolas e florestais, realizada pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (O.C.D.E.).

### 3.2 Propriedades Dos Materiais

Conforme Budynas & Nisbett (2011, p. 54-55), com o teste de tração padrão obtém-se uma grande variedade de propriedades do material. O corpo de prova típico, representado na figura 2, é frequentemente usado para a determinação de deformações. A carga é convertida em tensão de acordo com a equação 2, a seguir.

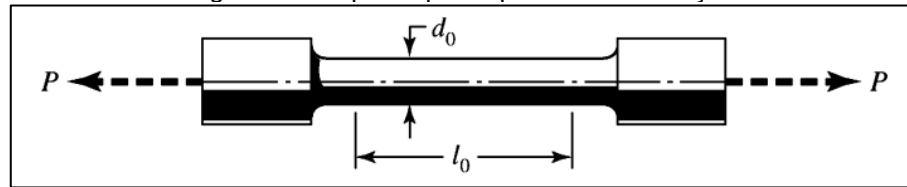
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão, P é a carga e  $A_0$  é a área inicial, antes da aplicação da carga, que por sua vez pode ser calculada a partir da equação 3.

$$A_0 = \frac{1}{4} \pi d_0^2 \quad (3)$$

Onde  $d_0$  é o diâmetro inicial do corpo de prova.

Figura 2 - Corpo de prova para teste de tração.



Fonte: (Budynas & Nisbett, 2011, p. 54)

O alongamento do comprimento do corpo de prova é dado pela diferença entre o seu comprimento final e inicial, e a deformação calculada a partir da equação 4, a seguir.

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4)$$

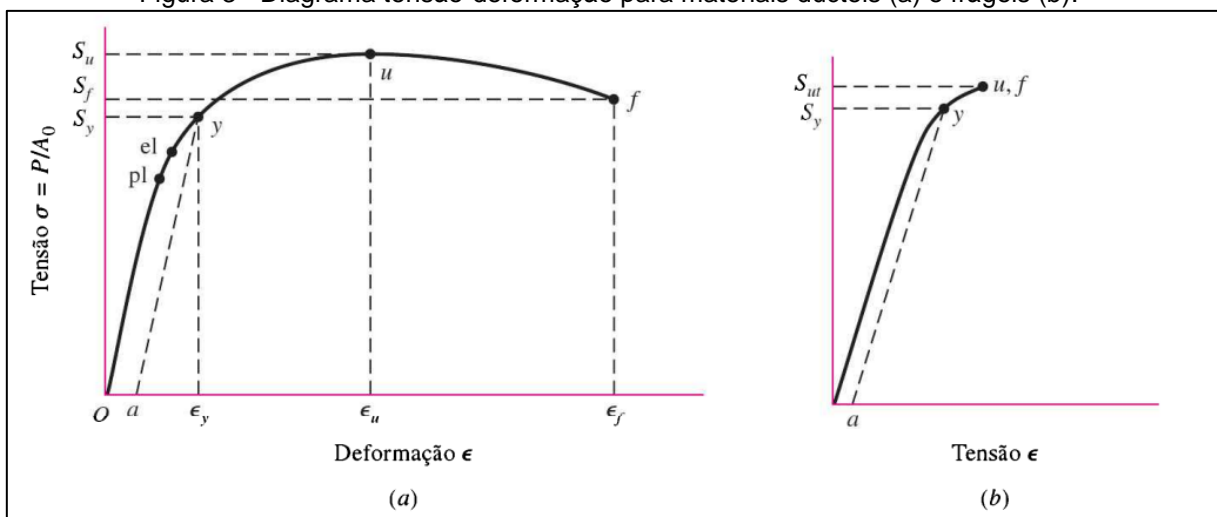
Onde  $\epsilon$  é a deformação normal,  $l$  e  $l_0$  são o comprimento final e inicial do corpo de prova, respectivamente.

A relação tensão-deformação normal, presentes nas equações 2 e 4, pode ser expressa a partir da lei de Hooke, representada na equação (5), onde surge a variável  $E$ , módulo de Young ou módulo de elasticidade, que associa estes dois termos.

$$\sigma = E\epsilon \quad (5)$$

A linearidade entre tensão e deformação, porém, fica restrita à fase elástica, podendo ser observada na figura 3 como a reta paralela à curva de tensão deformação que liga os pontos  $a$  e  $y$ , onde  $a$  tem, geralmente, o valor inicial próximo de 0,2% de deformação.

Figura 3 - Diagrama tensão-deformação para materiais dúcteis (a) e frágeis (b).



Fonte: (Budynas & Nisbett, 2011, p. 55)



Na figura 3a pode-se observar um material dúctil, com um grande alongamento antes de sua ruptura total, e na figura 3b um material frágil, com ruptura próximo ao término de sua fase elástica.

### 3.3 Extensometria

Para Pedersen (2006), sensores são dispositivos que basicamente respondem a um estímulo físico, já transdutores, são dispositivos que convertem uma energia em outra, a fim de executar a medição de uma grandeza física ou transferência de informação. A célula de carga com extensômetro de resistência elétrica é o tipo mais comum destes transdutores de força.

Segundo Andolfato, Camacho e de Brito (2004, p. 1), medidores de deformação não destrutivos chamados de extensômetros, ou Strain Gage (SG), são dispositivos que transformam pequenas variações nas dimensões, em variações equivalentes em sua resistência elétrica e possuem grande aplicabilidade devido a sua ampla utilização. A medida desta variação é realizada através da fixação de um extensômetro à estrutura que se deseja medir, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (mV) e amplificando-a para a leitura em um local remoto, fornecendo assim um método com numerosos benefícios, como por exemplo, a alta precisão de medição, pequeno tamanho e pouco peso, excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos, fácil utilização, excelente linearidade, possibilidade de medição em lugares remotos, dentre outros.

“Estes extensômetros são colados no corpo da célula de carga e ligados entre si conforme uma ponte de Wheatstone. Este circuito é ideal para se avaliar a variação da resistência ôhmica de modo mais exato, pois amplifica os sinais obtidos” (Barbosa, 2009 apud Uemura, 2016, p. 23).

#### 3.3.1 Princípio físico dos extensômetros de resistência elétrica

Como Andolfato, Camacho e de Brito (2004, p. 3-4) salienta, o funcionamento dos extensômetros é baseado na variação de resistência elétrica que passa por um metal ao alongá-lo ou contraí-lo. A resistência elétrica é dada a partir da equação 6.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (6)$$

Onde  $R$  é a resistência elétrica,  $\rho$  é a resistividade elétrica do material,  $l$  é o comprimento do fio e  $A$  é a área da seção transversal.

Outro parâmetro a ser levado em consideração é o Gage Factor (GF ou  $K$ ), que indica a sensibilidade do strain gage conforme a equação 3 como salienta Costa, 2001 apud Malerba, Guarnieri E Barros (2008, p. 1). O gage factor é fornecido pelo fabricante.

$$K = (\Delta R/R)/(\Delta L/L) \quad (7)$$

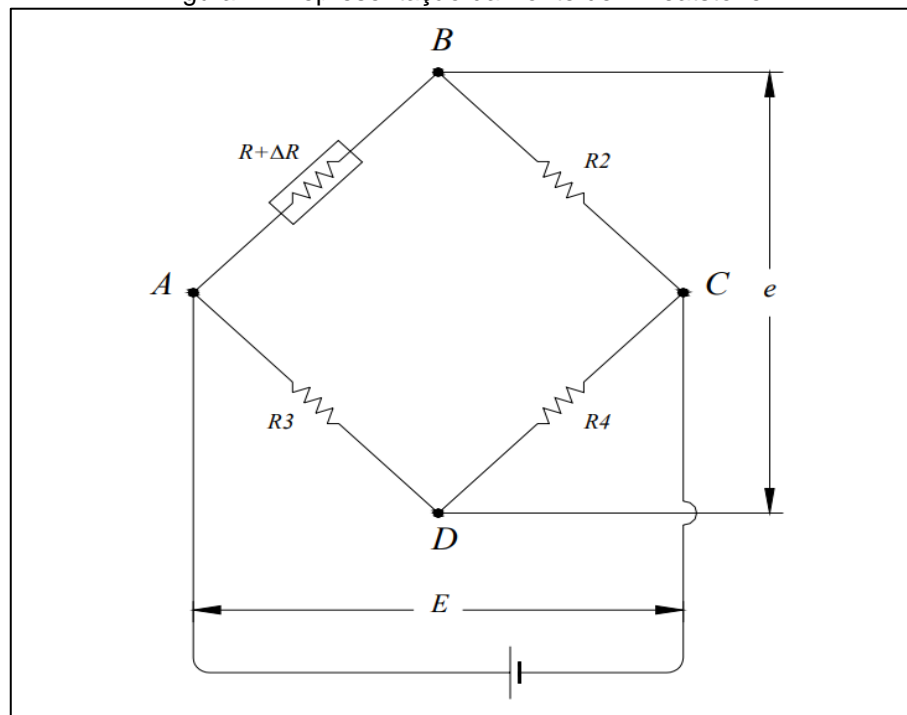
### 3.3.2 Ponte De Wheatstone

A ponte de Wheatstone converte a variação de resistência em uma saída de tensão, que é proporcional à força aplicada. Em alguns casos consegue-se dobrar o sinal de saída melhorando assim a percepção da deformação e as condições de “trabalho” do sinal. (Malerba, Guarnieri E Barros, 2008, p. 2).

Segundo Hoffmann (1989, p. 126), as vantagens do circuito em ponte alimentado por tensão incluem a correção automática de desvios de linearidade na característica do medidor de deformação e a insensibilidade às tolerâncias de resistência do extensômetro.

A figura 4 apresenta uma representação da Ponte de Wheatstone (PW).

Figura 4 - Representação da Ponte de Wheatstone.



Fonte: (Andolfato, Camacho e de Brito, 2004, p. 8)

Na figura 4, “R” representa as resistências, “e”, também chamado de Vs, é a excitação externa em volts e “E”, ou “V<sub>0</sub>”, é o sinal de saída, ou seja, o sinal a ser medido.

A PW é uma combinação de quatro resistências e uma fonte de tensão, assim como representada na Figura 4. Na extensometria de resistência elétrica, dos quatro resistores que constituem a ponte, um, dois ou quatro resistores podem ser extensômetros. A saída da ponte é a diferença entre a tensão nos pontos A e C. Os caminhos BAD e BCD (braços da ponte) são divisores de tensão onde V<sub>A</sub> e V<sub>C</sub> são dadas pelas equações 8 e 9 (LYNCH, 1999 apud BRÖNSTRUP, 2017, p. 22-23).

$$V_A = V_{entra} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

$$V_C = V_{sai} \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (9)$$

Ainda segundo Brönstrup (2017, p. 25), desprezando o efeito da não linearidade e após uma série de analogias e adequações algébricas, chega-se à equação 10, podendo ser usada para a conversão das medidas de deformação em medidas de tensões na ponte de Wheatstone.

$$\frac{V_{sai}}{V_{entra}} = \frac{K}{4} (+\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (10)$$

Onde  $\varepsilon$  é o alongamento determinado pelo SG em cada resistência.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste tópico serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a realização do projeto e fabricação da célula de carga e do suporte necessário para seu uso na operação de tração realizada por um trator agrícola. Também serão detalhadas as atividades de instrumentação com strain gauges, ligações elétricas formando uma Ponte de Wheatstone e calibração da célula de carga. É apresentada, ainda, a metodologia empregada na análise metalográfica para a caracterização do material usado na fabricação do suporte para ligação ao trator, a metodologia usada para a execução do ensaio de tração e avaliação de campo.

### **4.1 Materiais**

#### **4.1.1 Softwares**

A concepção do modelo para a célula de carga foi desenhada com o uso do software SOLIDWORKS, versão 2016.

A determinação dos parâmetros dimensionais da célula de carga e do suporte necessário para a fixação do trator ao implemento, assim como as simulações numéricas, foram feitas através do software de simulações de engenharia ANSYS Workbench, versão 2023.

A análise de dados colhidos, tanto na calibração quanto no teste de tração, foi feita usando o Microsoft Excel, versão 2021.

#### **4.1.2 Célula de carga e suporte**

Para este trabalho, que teve como base um trabalho anterior, não houve a necessidade de construir novamente a célula de carga e seu suporte, porém, em decorrência da mudança de configuração, precisou-se construir uma nova adaptação para conectar o suporte da célula de carga ao trator agrícola.

O material usado para a fabricação da célula de carga foi o aço ABNT 1045 e para o suporte foi utilizado o aço ABNT 1020, ambos disponíveis na UNIPAMPA/Campus Alegrete. Para a concepção de ambos, foram usados os softwares SOLIDWORKS, para a realização do desenho em 3D de forma iterativa, e o ANSYS Workbench, para as análises numéricas.

A fabricação, valendo-se da infraestrutura disponibilizada na oficina do curso de Engenharia Mecânica, teve início a partir da coleta das dimensões estabelecidas na concepção, a qual a célula de carga foi usinada com o torno CNC ROMI Centur 30D, já o suporte foi fabricado de forma manual.

As dimensões da célula de carga e do suporte estão dispostas, respectivamente, nos apêndices A e B.

O material usado para a fabricação da adaptação para o suporte foi o aço ABNT 1020, sendo encontrado na UNIPAMPA/Campus Alegrete em formato de barras de 4" (101,6 mm) por ½" (12,7 mm). Tratando-se inicialmente de ser um material desconhecido, foi realizada a análise metalográfica do mesmo.

#### **4.1.3 Torno**

O torno utilizado para a fabricação da célula de carga foi o torno CNC marca Romi modelo Centur 30D, operando através de comando numérico computadorizado.

#### **4.1.4 Serra fita horizontal**

Foi utilizada uma serra fita horizontal Franho, modelo FM 500, para o corte de barras metálicas de seção retangular.

#### **4.1.5 Esmerilhadeira**

O desbaste para ajuste do material das barras metálicas à estrutura, contou com o uso de uma esmerilhadeira angular da marca Einhell, modelo BT-AG 2350/180.

#### **4.1.6 Máquina para solda**

A soldagem utilizada para a união dos materiais foi realizada por meio do processo de soldagem por eletrodo revestido, com o retificador Origo Arc 456.

#### **4.1.7 Furadeira de coluna**

Os furos necessários para a fabricação do suporte para a célula de carga foram feitos com o auxílio de uma furadeira de bancada da marca Motomil, modelo FC-250, junto a uma sequência gradual de diâmetros de serra copo até 24 mm.

#### **4.1.8 Máquina universal de ensaios**

A calibração da célula de carga foi feita com o auxílio de uma máquina universal de ensaios modelo DL 200 da EMIC.

#### **4.1.9 Extensômetro**

A instrumentação da célula de carga foi feita com duas rosetas biaxiais de 90° com strain gages da marca KYOWA, modelo KFGS-5-350-D-16-11, com grade de 5 mm, resistência de 350  $\Omega$  e fator K de sensibilidade de 2,11.

#### **4.1.10 Condicionador de sinais e notebook**

O condicionador de sinais foi o data logger Spider8 da HBM, utilizado tanto para a calibração da célula de carga, como para os testes de campo. Para a realização da aquisição de dados foi utilizado o software Catman Easy da HBM rodando em um notebook PC com sistema Windows.

#### **4.1.11 Tratores**

Para as avaliações de campo foram necessários dois tratores, sendo um pertencente ao Laboratório de Mecanização Agrícola Aplicada - LAMAP (UNIPAMPA/ Campus Alegrete), tratando-se de um New Holland, modelo TL 75E, e outro pertencente à Prefeitura Municipal de Alegrete/RS, sendo um New Holland 7630, cedido temporariamente para os testes de campo.

O TL 75E foi o trator cuja capacidade de tração foi avaliada experimentalmente, possui potência declarada de 78 cv (57,37 kW) a uma rotação 2400 rpm, torque máximo de 264 Nm a uma rotação de 1400 rpm, pneus do tipo R1, indicados para tração regular, medidas 18.4-30 para as rodas traseiras e 12.4-24 para as dianteiras.

De acordo com o fabricante, este trator possui peso total, incluindo lastro metálico e 50% do volume interno total de cada pneu com água, de 4080 kg.

Figura 5 - Trator principal, New Holland TL 75E



Fonte: Autoria própria.

O trator de modelo 7630, com propósito de lastro, possui potência declarada de 110 cv (80,9 kW) a uma rotação de 2200 rpm, torque máximo de 528 Nm a uma rotação de 1400 rpm, pneus tipo R1, e peso máximo admissível de 5900 kg.

Figura 6 – Trator lastro, New Holland 7630.



Fonte: Autoria própria.

#### **4.1.12 Inversor de tensão**

Durante os testes de campo, um inversor de tensão foi necessário para fornecer energia ao condicionador de sinais. O inversor é um equipamento que aumenta a tensão de 12 V, captada diretamente da bateria do trator, para 110 V, possibilitando a alimentação do condicionador de sinais do notebook.

## **4.2 Métodos**

### **4.2.1 Concepção do suporte fixador**

A concepção da adaptação para o suporte fixador foi desenhada em três dimensões no software ANSYS Workbench, a partir da qual foi possível realizar simulações de modo a garantir um certo fator de segurança ao avaliar numericamente as tensões e deformações a que os componentes estariam submetidos. Esta elaboração teve um caráter dinâmico ao testar diferentes ideias de arranjos para a estrutura.



#### **4.2.2 Caracterização do material da adaptação para o suporte fixador**

Para a caracterização do material que foi utilizado para a fabricação da adaptação para o suporte fixador (elemento desenvolvido como interface entre o trator e o implemento) foi feita por metalografia. A finalidade foi certificar se o material correspondia ao ABNT 1020 e se a microestrutura encontrava-se normalizada. Foi retirada uma amostra da barra disponível, cortada de modo a facilitar o manuseio, lixada e polida para obter uma superfície adequada para a visualização microestrutural, atacada quimicamente para destacar as fases presentes e assim a amostra foi analisada com o auxílio de um microscópio óptico de reflexão. Por meio de uma “grade de teste” composta de linhas verticais e horizontais equidistantes, foi feita a quantificação da fração volumétrica de perlita do aço. Por meio da regra da alavanca aplicada de forma inversa foi determinado o teor de carbono do aço.

#### **4.2.3 Fabricação da adaptação para o suporte fixador**

Para a fabricação foram usadas as dimensões definidas na concepção do suporte, descrita anteriormente (4.2.1). O material usado, disponível na UNIPAMPA/Campus Alegrete, encontrava-se disposto em barras chatas de 4 polegadas de largura e 0,5 polegadas de espessura. Primeiramente as barras foram cortadas nos comprimentos estabelecidos no projeto e, posteriormente, foram soldadas de forma sobreposta para aumentar a espessura total necessária. Com uma furadeira de coluna foram feitas as furações para fixação do suporte ao trator e ao implemento agrícola.

#### **4.2.4 Instrumentação da célula de carga**

Duas rosetas biaxiais foram coladas no centro do elemento elástico da célula de carga, que corresponde à seção de menor diâmetro, ambas em hemisférios opostos do perímetro. As rosetas foram posicionadas de forma que uma grade ficou posicionada transversalmente ao corpo da célula de carga, e a outra longitudinalmente. Foi utilizada uma cola a base de ciano-acrilato para a colagem das rosetas. Posteriormente as grades foram ligadas de modo a formar um circuito de Ponte de Wheatstone (PW). O cabeamento foi feito com um cabo blindado de quatro

vias e um conector macho DB15 segundo o manual do condicionador de sinais (Spider8).

#### 4.2.5 Calibração da célula de carga

Após a instrumentação da célula de carga, a mesma foi conectada a um condicionador de sinais Spider 8 da HBM e submetida a um ensaio de tração em uma máquina universal de ensaios EMIC DL 200. A célula de carga da máquina de ensaios serviu como padrão para a calibração. Os dados de variação de tensão elétrica (em mV) da célula fabricada foram correlacionados com os dados de força de tração aplicada pela máquina de ensaios até a carga de projeto da célula de carga. A partir de três medições foi obtida a equação Força x Tensão através de interpolação linear.

#### 4.2.6 Avaliação de tração com o trator

A avaliação de tração com o trator teve como referência as condições de ensaio listadas na norma ABNT ISO 789 e o Código 2 da OECD, apresentadas na sequência. Denominando-se avaliação e não ensaio, por não apresentar condições ideais de repetibilidade.

- Realização do ensaio em uma superfície de concreto limpa, horizontal e seca;
- Durante os ensaios a alavanca do acelerador deve estar totalmente aberta, salvo especificações;
- Não ensaiar em marchas onde a velocidade de avanço ultrapasse os limites de segurança dimensionados ao equipamento;
- A patinação das rodas motrizes não deve exceder 15%;
- A linha de tração deve ser horizontal, podendo oscilar horizontalmente, porém não sempre paralela ao solo;
- As alturas das garras do pneu não devem ser 65% do tamanho inicial;
- A temperatura ambiente deve estar entre 5 °C e 35 °C;
- No intuito de manter a capacidade de direção, a altura máxima da barra de tração, em relação à força máxima de tração na barra é declarada através da equação 11.

$$H \leq \frac{0,8WZ}{P} \quad (11)$$

Considerando que a altura na barra de tração é fixa, através da equação 11, pode-se determinar a força de tração máxima [P]. Onde H é a altura estática máxima da linha de tração acima do solo [mm], P é a força máxima na barra de tração [N], W é a carga estática pelas rodas dianteiras sobre o solo [N], sendo ela de 40% do peso estático total do trator, e Z é a distância entre eixos [mm].

Tabela 1 - Cálculo da força de tração máxima.

| Parâmetros de Entrada |           |          | Parâmetro de Saída |
|-----------------------|-----------|----------|--------------------|
| H [mm]                | W [N]     | Z [mm]   | P [N]              |
| 400,00                | 16.009,32 | 2.150,00 | 68.840,08          |

Fonte: Autoria própria.

Portanto, de acordo com os dados expostos na tabela 1, a força máxima que pode ser desenvolvida pelo trator TL 75E através da barra de tração nestas condições é de 69,69 kN antes de perder a estabilidade, força a qual excede o peso do trator, tornando-a inviável.

O teste de determinação de desempenho foi direcionado ao trator TL75E, sendo o outro trator (New Holland 7630) usado apenas para agir como lastro, freando o trator de tração com determinada carga. Enquanto o primeiro teve sua velocidade fixada em torno de 5 km/h, o segundo teve quatro regimes de cargas, variadas a partir da velocidade do trator lastro. Para cada velocidade, foram realizados três testes para tomar o valor médio e minimizar eventuais erros de medição.

As velocidades foram calibradas anteriormente aos testes de tração, com os tratores livres. Para tanto, foi medido o tempo necessário para que cada trator percorresse uma distância pré-determinada.

Segundo Gamero e Lanças (1996), denomina-se patinamento o deslizamento entre a superfície externa do pneu e o solo. Podendo ser expresso pela equação 12.

$$P (\%) = \frac{V_{sc} - V_{cc}}{V_{cc}} * 100 \quad (12)$$

Onde P é o patinamento do trator, dado em percentual,  $V_{sc}$  e a velocidade do trator sem carga e  $V_{cc}$  é a velocidade do trator com carga.

Com o intuito de facilitar a apresentação dos dados, foi estabelecido um sistema de legendas para cada rodada de teste, onde a letra T foi seguida por um número e uma letra, sendo o número referente à velocidade usada pelo trator lastro e

a letra, em ordem alfabética, referente à rodada de teste naquela velocidade. A nomenclatura é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Nomenclatura para os testes realizados.

| Nível de Carga | Teste |
|----------------|-------|
| 1              | T1A   |
|                | T1B   |
|                | T1C   |
| 2              | T2A   |
|                | T2B   |
|                | T2C   |
| 3              | T3A   |
|                | T3B   |
|                | T3C   |
| 4              | T4A   |
|                | T4B   |
|                | T4C   |

Fonte: Autoria própria.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Concepção da adaptação para o suporte fixador

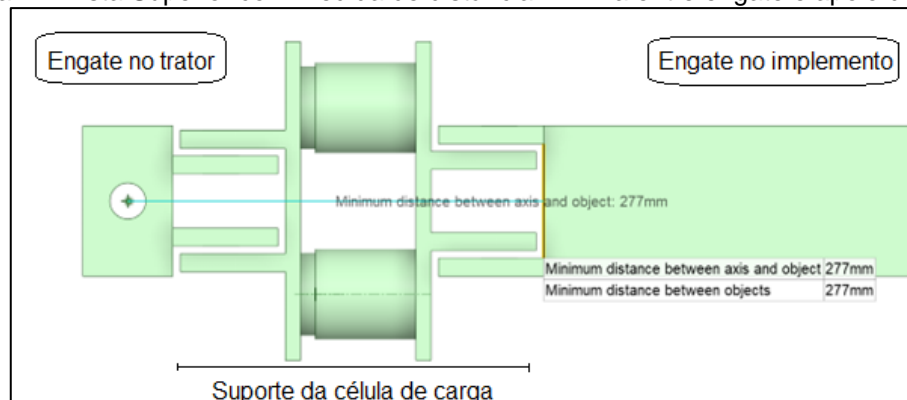
Com a finalidade de minimizar componentes transversais de carga sobre a célula de carga e garantir uma medida de carga “perfeitamente” de forma horizontal (paralela ao solo) foi necessário o desenvolvimento de um suporte para a conexão diretamente ao engate do trator e não por intermédio da barra de tração.

A concepção, portanto, da adaptação para o suporte fixador, foi feita de forma iterativa através do software ANSYS Workbench 2023, de forma a dimensioná-la com um comprimento menor ao disponível entre o engate e o apoio do trator (medido em aproximadamente 310 mm), além de preservar um fator de segurança razoável.

Foi definido um arranjo em que o comprimento total, entre a conexão com o trator e uma seção em que sua geometria não encontre resistência ao percorrer o apoio do trator (com altura de 45 mm), de 277 mm.

A figura 7 representa a vista superior da estrutura composta pelo suporte.

Figura 7 – Vista Superior com medida de distância mínima entre engate e apoio do trator.



Fonte: Autoria Própria.

De modo a verificar o fator de segurança, os elementos de adaptação foram submetidos a uma simulação no software. A força aplicada a estes componentes foi determinada a partir da potência do motor do trator TL 75E, multiplicada pelo fator de perda de 0,87 (figura 1, considerando tração 4x2 e ensaio em concreto), dividido por uma velocidade crítica de 1,4 m/s. Calculou-se um valor de aproximadamente 35 kN.

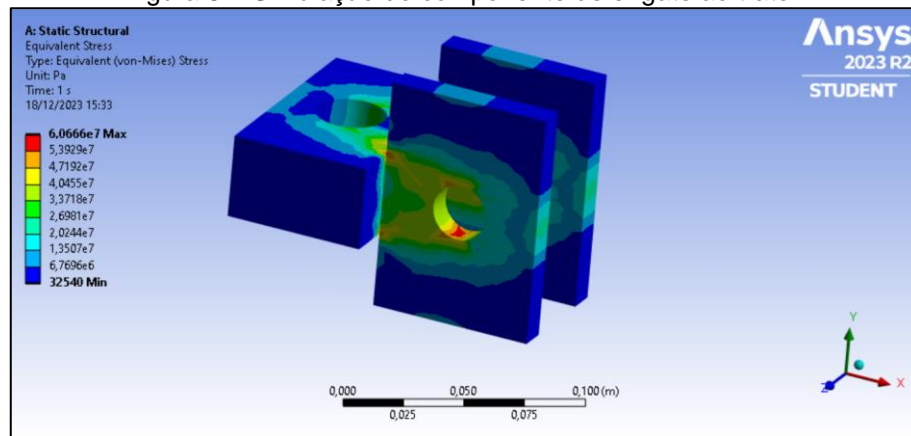
As figuras 8 e 9 representam a simulação feita a partir da geometria proposta (APÊNDICE C) para as ligações entre suporte e engate do trator e entre suporte e

implemento agrícola pelo sistema de análise de estruturas estáticas para elementos finitos.

O engaste de fixação em ambos os componentes foi a partir da configuração de suporte cilíndrico, selecionado no software, na superfície da perfuração vertical (eixo y), onde limitou-se o movimento radial e axial, deixando-o livre tangencialmente.

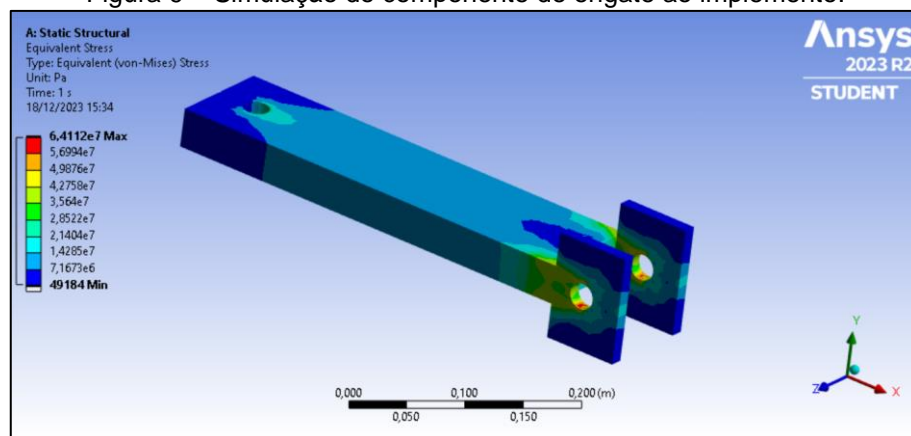
A força, de 35 kN, foi aplicada nas duas perfurações na horizontal (eixo z), no sentido de  $X^+$ .

Figura 8 – Simulação do componente de engate ao trator.



Fonte: Autoria Própria.

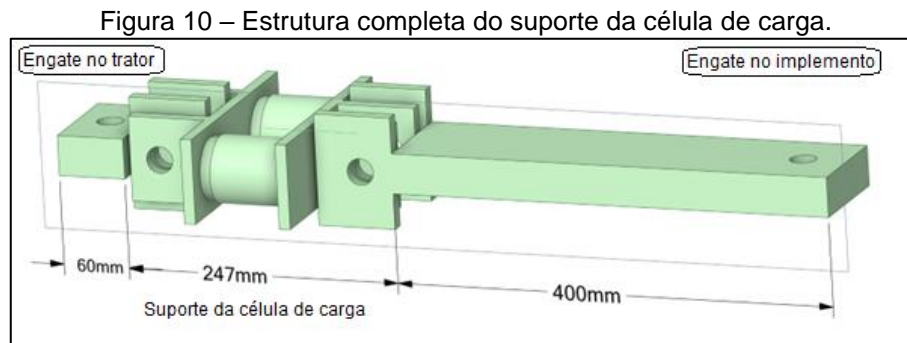
Figura 9 – Simulação do componente de engate ao implemento.



Fonte: Autoria Própria.

Para o pior cenário, na figura 9, a tensão máxima foi de 64,11 MPa, atingindo um fator de segurança de aproximadamente 4,68 ao levar em conta uma tensão de escoamento de 300 MPa para o aço ABNT 1020 a qual estes componentes foram fabricados.

A figura 10 apresenta o desenho final proposto para a estrutura, contendo o suporte para a célula de carga e sua adaptação.



Fonte: Autoria Própria.

Para tal configuração, foram dimensionados dois pinos para o acoplamento entre o suporte da célula de carga e o suporte fixador entre trator e implemento.

$$\tau = \frac{F}{2A} \quad (13)$$

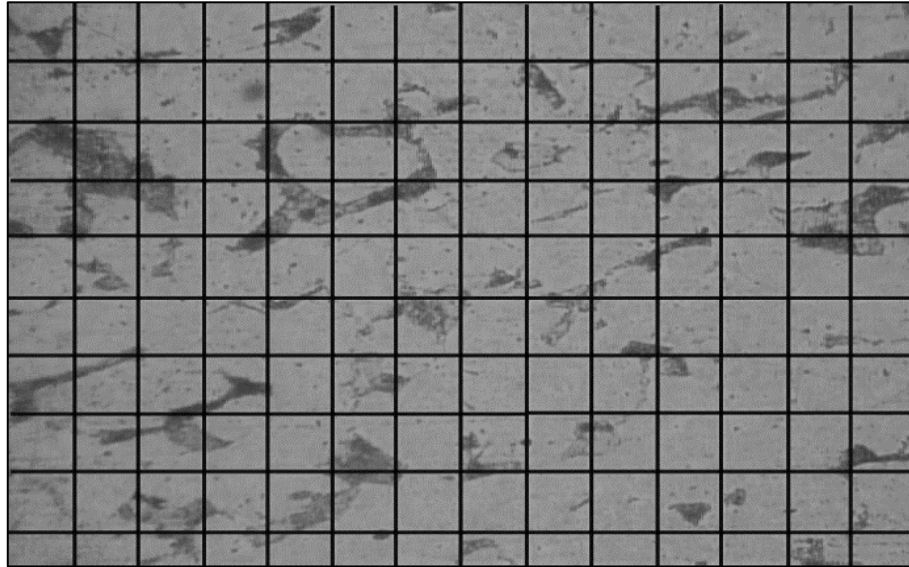
Onde a tensão de cisalhamento foi encontrada a partir da equação 13, a força aplicada foi de 35 kN, dividida por duas vezes a área transversal dos pinos, por haver duas áreas cisalhadas em cada pino. A área foi calculada a partir do diâmetro dos pinos, igual a 24 mm. Chegando a uma tensão de cisalhamento de 38,68 MPa.

O fator de segurança para cisalhamento é encontrado a partir da divisão da metade do valor da tensão de escoamento do material, ou seja, 150 MPa, pela tensão encontrada de forma analítica acima, resultando em um fator de segurança de próximo a 3,9.

## 5.2 Caracterização do material da adaptação para o suporte fixador

Para a caracterização do material usado na adaptação para o suporte foi feita uma análise metalográfica para a observação do estado da microestrutura, que deve ser normalizado. Também foi feito, por meio de uma grade de teste (ver figura 11), a quantificação da fração volumétrica de perlita do aço. Por meio da regra da alavanca aplicada de forma inversa pode-se estimar o teor de carbono do aço.

Figura 11 – Malha sobre imagem microscópica do material da adaptação.



Fonte: Autoria Própria.

Foram contados 28 nós na grade interceptados por perlita dentre as 117 nós da grade, indicando 23,93% de fração volumétrica de perlita. Portando pode-se determinar um teor de carbono de 0,19%, confirmando tratar-se de um aço ABNT 1020.

### **5.3 Fabricação da adaptação para o suporte fixador**

A etapa de fabricação das ligações entre o suporte para a célula de carga, trator e implemento teve como base a barra metálica disponível na UNIPAMPA/Campus Alegrete de 4 polegadas de largura por 0,5 polegadas de espessura, caracterizada no item anterior como aço ABNT 1020.

O primeiro passo para a fabricação foi segmentar a barra metálica em comprimentos próximos à utilização final usando a serra fita horizontal. Na sequência, com o intuito de ajustar as dimensões até a geometria proposta, foi usada a esmerilhadeira para o desbaste. As barras já em seu tamanho ideal foram então soldadas em suas posições correspondentes e, por final, foram feitos os furos presentes na proposta para as estruturas de ligação com o auxílio de uma furadeira de coluna. Para o ajuste final foi novamente utilizada a esmerilhadeira. A figura 12 mostra a construção final para o suporte da célula de carga.



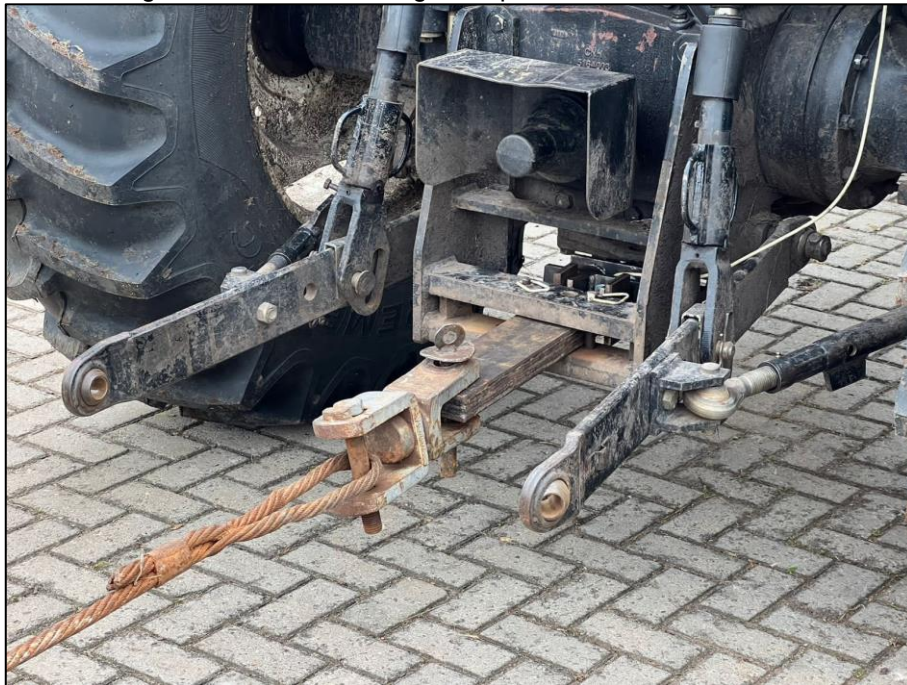
Figura 12 – Configuração final do suporte.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 13 mostra o suporte instalado no trator.

Figura 13 - Célula de carga e suporte instalados no trator.



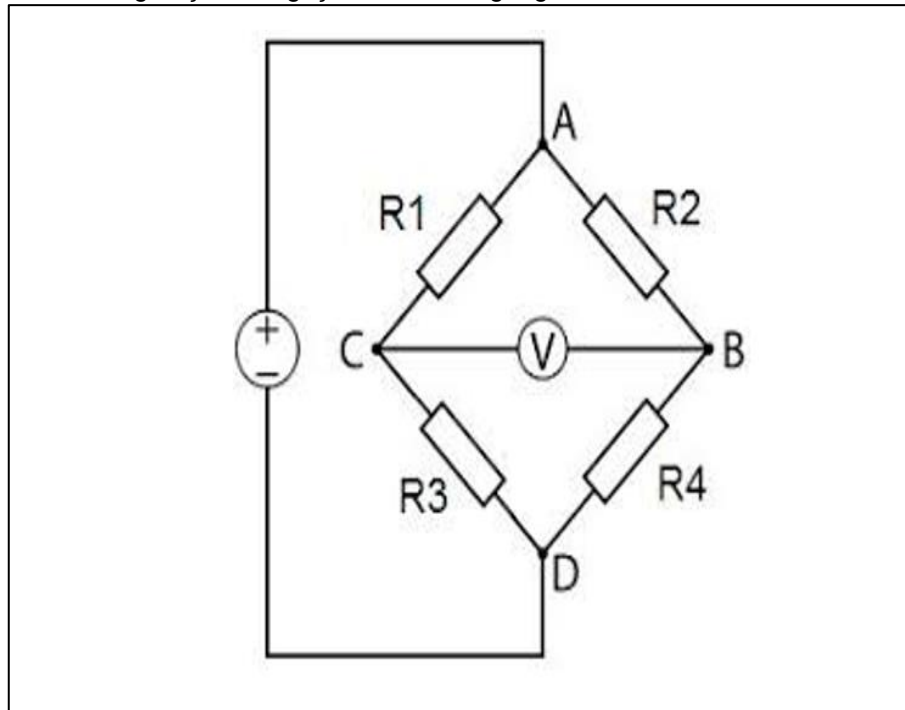
Fonte: Autoria Própria.

#### 5.4 Instrumentação da célula de carga

A instrumentação da célula de carga consistiu, portanto, na colagem de dois pares de rosetas biaxiais, aproximadamente no sentido oposto diametralmente uma à outra, de modo a obterem resultados semelhantes pela simetria do elemento elástico.

O esquema elétrico de Ponte de Wheatstone está montado na figura 13, onde R1, R2, R3 e R4 corresponde aos strain gauges das rosetas.

Figura 14 – Configuração da ligação dos strain gauges na forma de Ponte de Wheatstone.

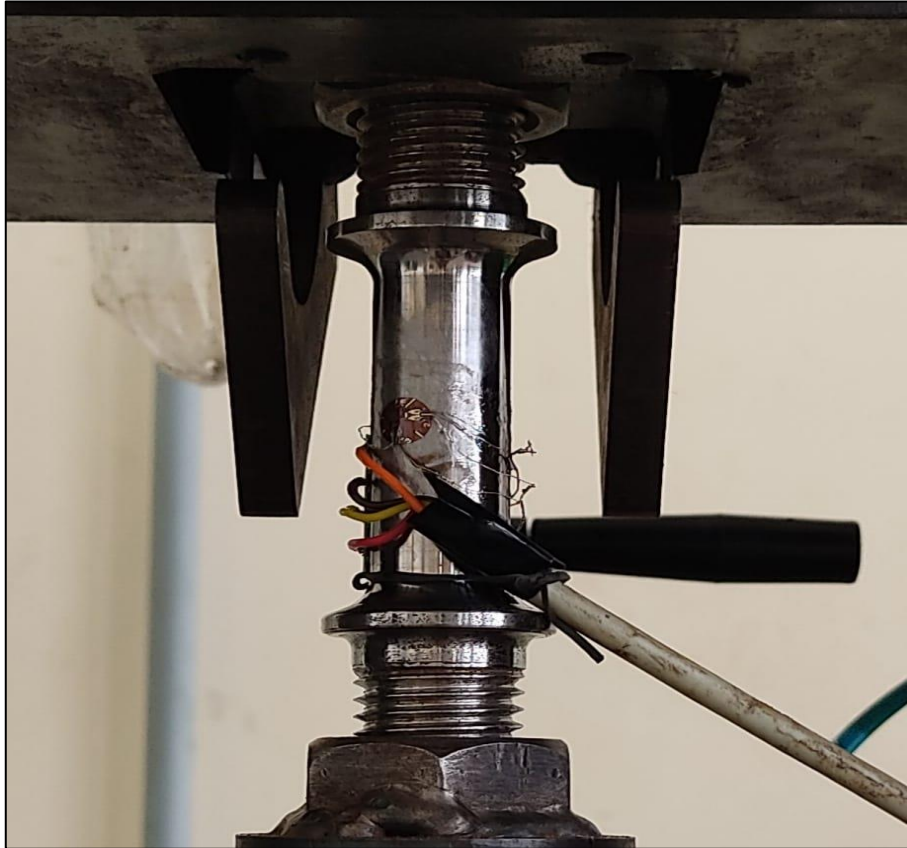


Fonte: Projetos de Engenharia Elétrica-USF, 2013.

### 5.5 Calibração da célula de carga

A calibração foi feita com o uso da máquina universal de ensaios, aplicando uma faixa de força entre 0 e 30 kN. A aquisição de dados feita pelo Spider8. A figura 15 mostra a célula de carga posicionada na máquina para a calibração.

Figura 15 – Posicionamento da célula de carga na máquina de ensaios durante a calibração.



Fonte: Autoria Própria.

Para uma minimização de possíveis erros de medições, foram feitas três rodadas de calibração, apresentadas no anexo D.

Ainda, com o objetivo de verificar os dados encontrados, foi calculada a tensão de saída a partir das equações 2, 3 e 5, das propriedades dos materiais, junto à equação 12.

$$V_S = \frac{(1 + \nu) * K * \varepsilon * V_E}{2} \quad (13)$$

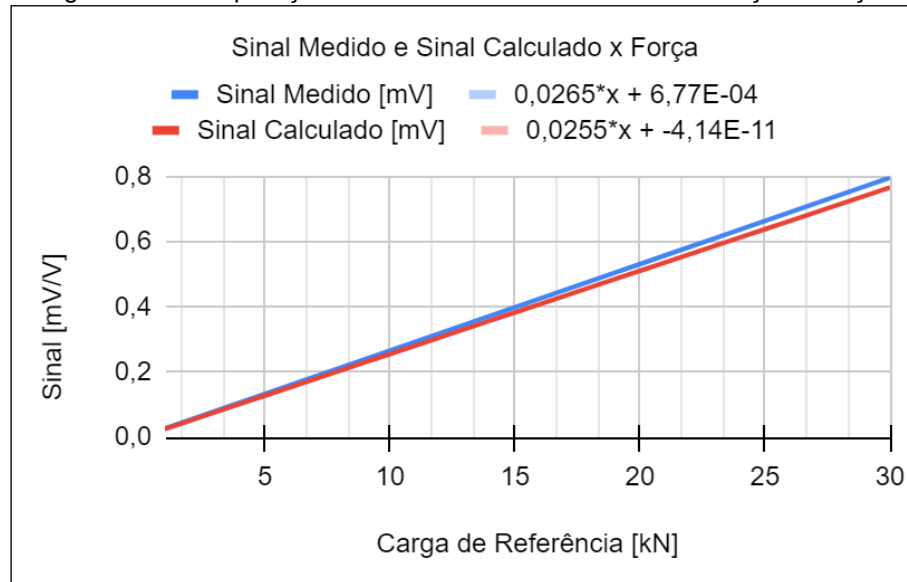
Onde  $V_S$  é a tensão elétrica de saída,  $V_E$  é a tensão elétrica de entrada,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do aço igual a 0,3,  $K$  é a sensibilidade do Strain Gage igual a 2,1 e  $\varepsilon$  é o alongamento.

A partir das equações 2, 3, 5 e 13, portanto, chega-se na seguinte equação.

$$V_S = \frac{2 * (1 + \vartheta) * K * V_E * F}{E * \pi * d^2} \quad (14)$$

A seguir, a figura 15 representa a reta de valor médio encontrada a partir do teste de calibração na máquina de tração, e a reta determinada analiticamente através da equação 13.

Figura 16 - Comparação entre sinal medido e calculado relação à força.



Fonte: Autoria Própria.

Pôde-se perceber que ambas as curvas apresentaram comportamento semelhante, com erro no valor máximo de 30kN, de 3,83%.

As tabelas com os dados dos cálculos e medições estão representadas, respectivamente, nos apêndices D e E.

## 5.6 Avaliação de tração com o trator

Ambos os tratores não possuem o recurso necessário para escolher a velocidade e assim mantê-la constante, portanto, foram atribuídas diferentes configurações entre marcha e rotação do motor para simular diferentes cargas. Em um primeiro momento, foram determinadas as velocidades as quais os tratores iriam ser testados.

As velocidades foram determinadas a partir de duas marcações, com distância de 30 metros entre elas. O tempo que os tratores percorreram entre uma marcação e



outra foi registrado a partir de dois cronômetros diferentes e com duas rodadas de testes. A figura 17 mostra o percurso usado para a determinação das velocidades.

Figura 17 – Percurso para a Determinação das Velocidades.



Fonte: Autoria própria.

O trator principal teve uma velocidade média de 4,77 km/h, enquanto o trator lastro apresentou as velocidades indicadas na tabela 3.

Tabela 3 – Velocidades de acordo com nível de carga.

| Nível de Carga | Velocidade [km/h] |
|----------------|-------------------|
| 1              | -                 |
| 2              | 4,60              |
| 3              | 4,23              |
| 4              | 3,66              |

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 3 foram apresentadas as velocidades do trator lastro de acordo com configurações entre marcha e rotação do motor lastro usadas nos testes, onde no

nível 1 o trator lastro é apenas puxado desengatado, e nos níveis 2, 3 e 4, sua velocidade é gradualmente reduzida, gerando uma resistência maior.

É importante salientar que essas velocidades são dadas com os tratores livres, de forma que, ao conecta-los, elas diminuem. Quanto mais a velocidade do trator lastro se afasta do trator principal, maior é a carga gerada.

Após a determinação das velocidades, o notebook e o condicionador de sinais foram montados junto ao trator principal, ligados entre si e eletricamente por meio do inversor de tensão, que por sua vez foi conectado à bateria do trator.

As figuras 18 e 19 mostram o sistema de aquisição de dados e um processo de medição em andamento.

Figura 18 - Local de montagem do aquisitor de sinais.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Realização dos testes.



Fonte: Autoria própria.

Todos os testes de tração foram cronometrados com o intuito de calcular a nova velocidade resultante desta iteração, para assim determinar o patinamento do trator de tração, segundo a equação 12.

Na tabela 4, estão apresentados os valores de patinamento calculado a partir da equação 12, levando em consideração as novas velocidades encontradas a partir de cada nível de carga.

Tabela 4 – Patinamentos de acordo com nível de carga.

| Nível de Carga | Tempo Médio [s] | Velocidade do trator livre [km/h] | Velocidade Junto ao trator lastro [km/h] | Patinamento |
|----------------|-----------------|-----------------------------------|--|-------------|
| 1              | 23,23           | 4,77                              | 4,65                                     | 2,58%       |
| 2              | 24,27           | 4,77                              | 4,45                                     | 7,19%       |
| 3              | 25,16           | 4,77                              | 4,32                                     | 10,42%      |
| 4              | 26,21           | 4,77                              | 4,12                                     | 15,78%      |

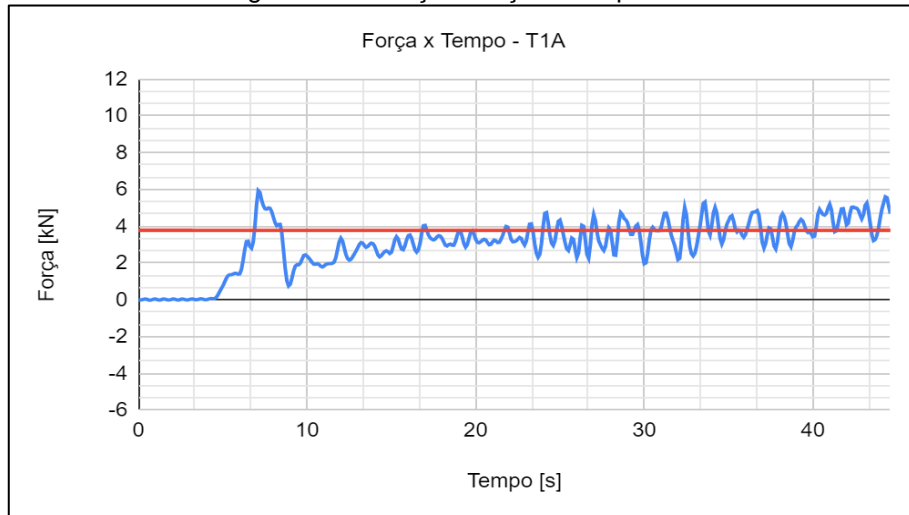
Fonte: Autoria própria.

Pôde-se observar que, com exceção do nível de carga máximo, todas as cargas respeitaram o valor de patinamento máximo para testes de tração, que é de 15%.

Nas figuras 20 a 22 estão apresentados os gráficos de força medidos durante as avaliações de campo para as cargas de T1A até T1C. A força é representada em kN, e o tempo em segundos. A taxa de aquisição utilizada foi de 10 Hz.

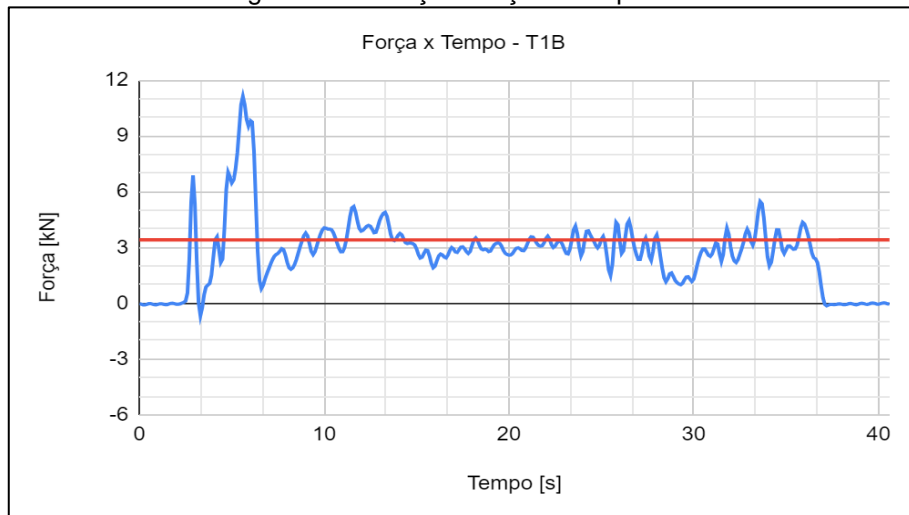
Pôde-se observar em todos os testes que inicialmente ocorre um pico de carga (da ordem de 6 kN na figura 20) que se deve, provavelmente a uma tração repentina por parte do trator principal e, posteriormente, a força se mantém em torno de um valor médio menor, aproximadamente 4 kN na medição T1A.

Figura 20 - Relação Força x Tempo T1A



Fonte: Autoria própria.

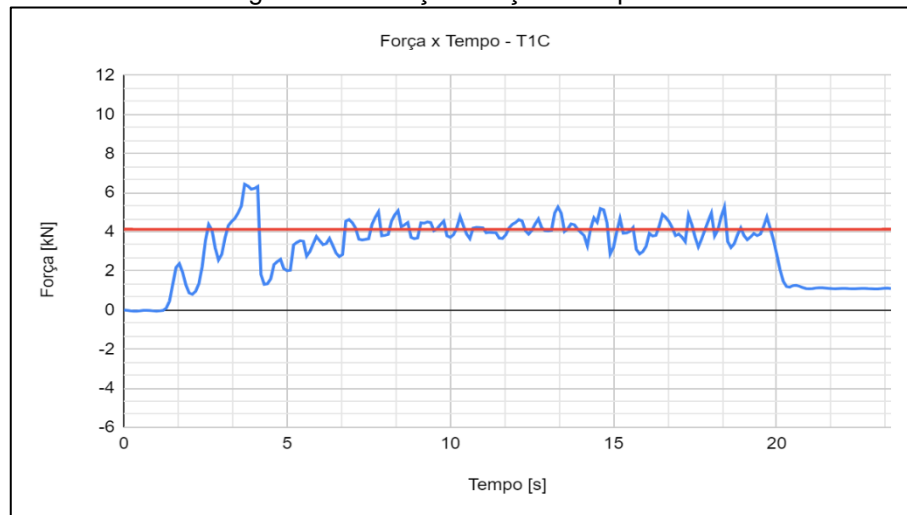
Figura 21 - Relação Força x Tempo T1B



Fonte: Autoria própria.



Figura 22 - Relação Força x Tempo T1C

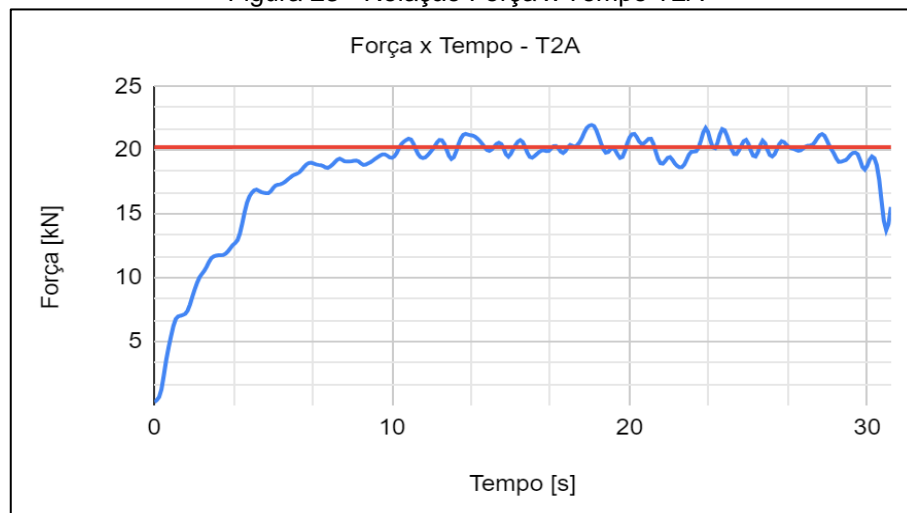


Fonte: Autoria própria.

Ao final da análise do teste de tração para o primeiro nível de carga (T1), ou seja, com o trator lastro desengatado, pôde-se verificar que a força na célula de carga manteve-se entorno de 4 kN.

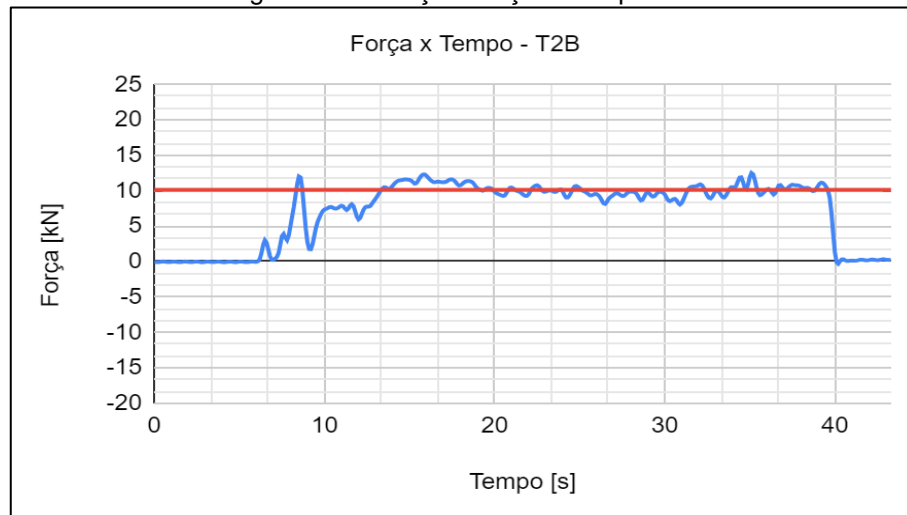
Nas figuras 23 a 25 são apresentadas as medições para as cargas T2A até T2C.

Figura 23 - Relação Força x Tempo T2A



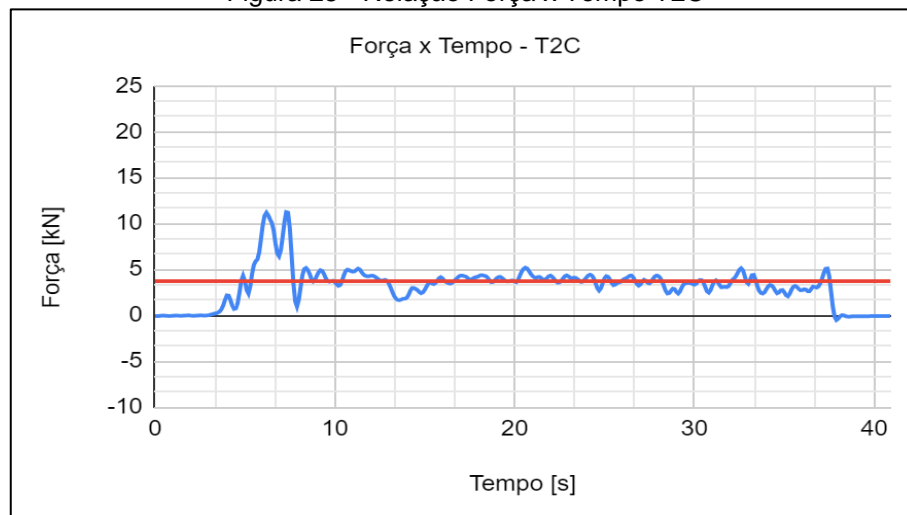
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Relação Força x Tempo T2B



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Relação Força x Tempo T2C



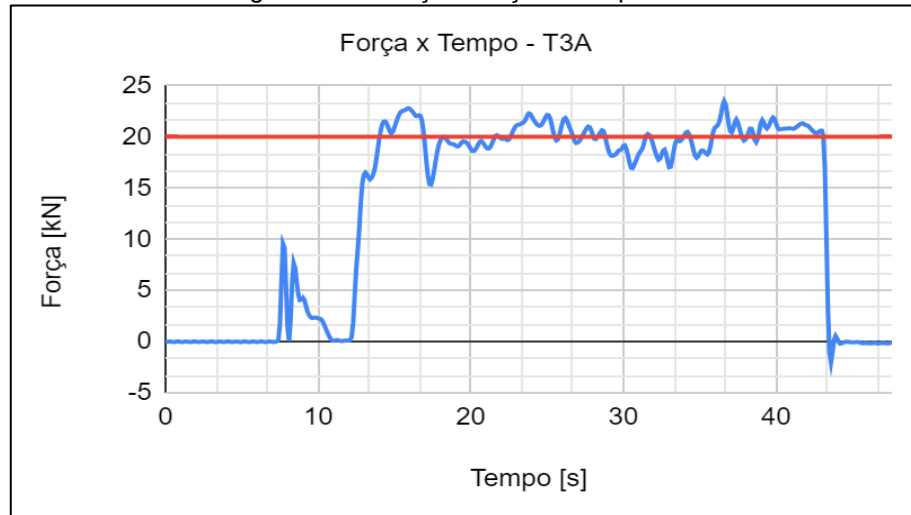
Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que o teste com o nível de carga T2 apresentou um comportamento irregular, passando por médias de força de 20, 10 e 4 kN, onde sua média é calculada pela equação 15.

$$T2 = \frac{T2A + T2B + T2C}{3} = 11,33 \text{ kN} \quad (15)$$

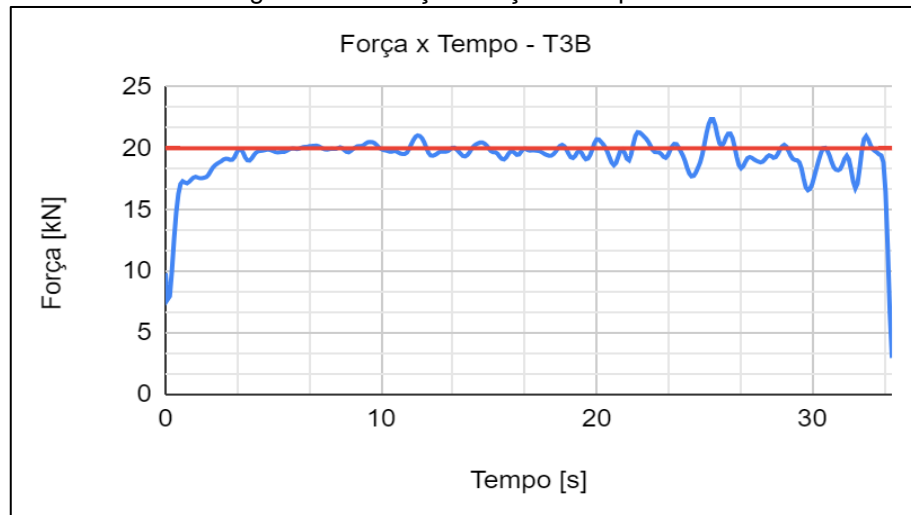
Nas figuras 26 a 28 são apresentadas as medições para as cargas T3A até T3C.

Figura 26 - Relação Força x Tempo T3A



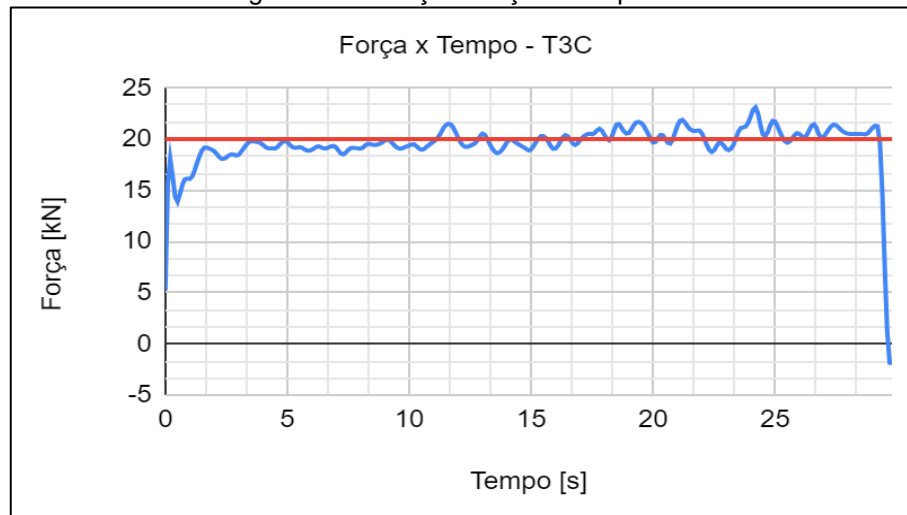
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Relação Força x Tempo T3B



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Relação Força x Tempo T3C

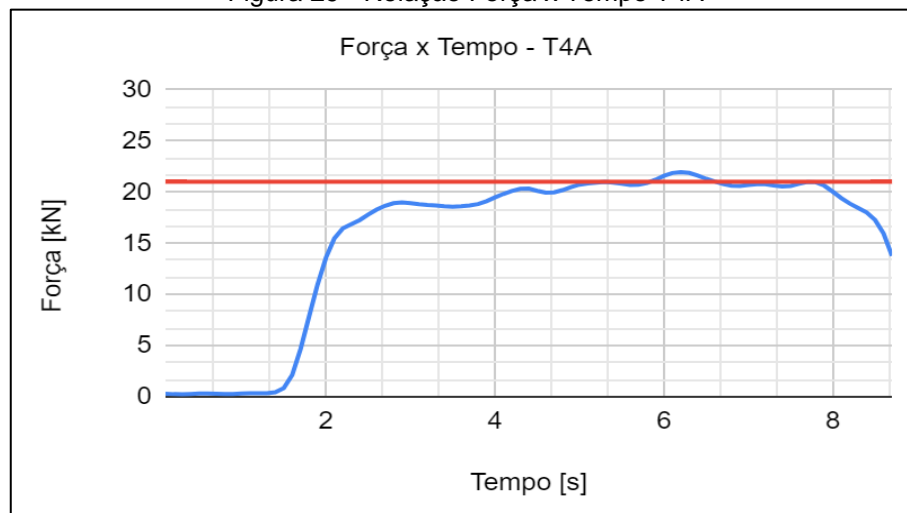


Fonte: Autoria própria.

Pode-se ver que o nível de carga T3 apresentou uma força média de aproximadamente 20 kN em todos os testes, demonstrando uma constância dos ensaios.

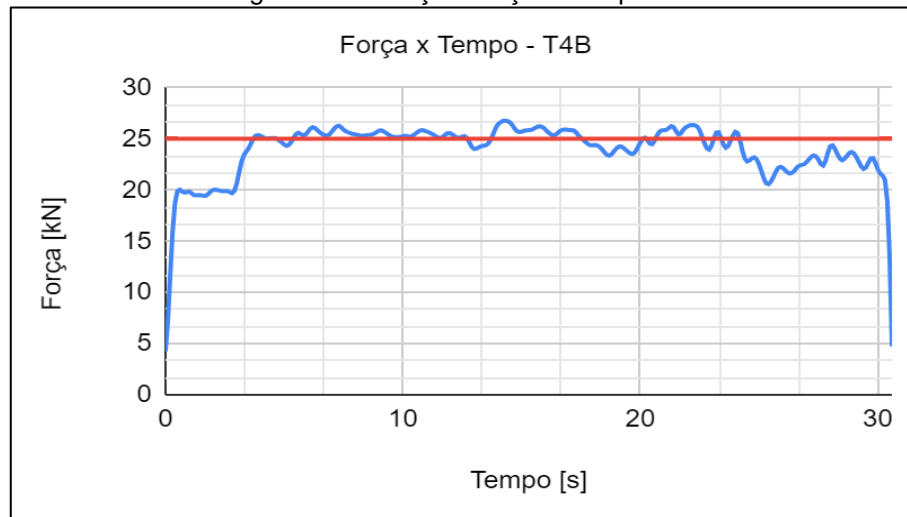
Nas figuras 29 a 31 são apresentadas as medições para as cargas T4A até T4C.

Figura 29 - Relação Força x Tempo T4A



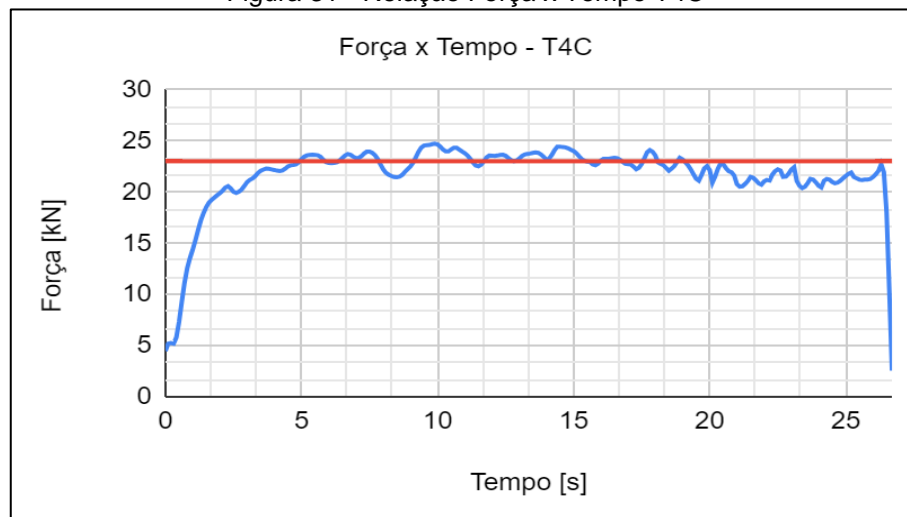
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Relação Força x Tempo T4B



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Relação Força x Tempo T4C



Fonte: Autoria própria.

Os últimos testes na carga T4 estabilizaram-se em valores próximos a 24 kN.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho foi feito o projeto e a fabricação de uma célula de carga para a medição de esforço axial que age sobre a barra de tração de um trator agrícola, incluindo seu suporte.

A abordagem metodológica usada envolveu a caracterização do metal usado para sua fabricação, concepção da estrutura, desenho computacional, análise numérica dos esforços, calibração para determinar a curva de relação entre força e sinal de saída do sensor, e teste de tração (realizado com o trator TL 75E, de propriedade da UNIPAMPA/Campus Alegrete).

Os resultados obtidos correspondem aos objetivos estabelecidos para este trabalho, visto que foi possível a determinação da força que age sobre a barra de tração de um trator agrícola. Isso possibilitará a realização de trabalhos de campo para otimização do desempenho do trator no cenário laboral.

A calibração, realizada com base na célula de carga da máquina universal de ensaios, foi comparada com os valores encontrados analiticamente e apresentou um erro de 3,83% para o valor máximo de 30 kN.

No teste de tração, foi feito o monitoramento do sinal elétrico (em mV) produzido pela célula de carga. A partir disto, usando a relação entre força e sinal de saída encontrada na calibração, foi determinada a solicitação de carga que age sobre a barra de tração do trator durante todo o teste de tração.

A força encontrada na maioria dos testes de tração sob diferentes cargas apresentou um comportamento esperado, onde foi possível visualizar, após um pico de carga, um acréscimo gradual da solicitação do strain gauge e, por consequência, na barra de tração, chegando a um valor médio que permaneceu relativamente constante até o final da avaliação. O teste com carga T2 apresentou inconsistência ao longo das repetições, por questões ainda desconhecidas. As hipóteses para as inconsistências nesta carga são: configuração errônea dos tratores, erro de medição, variações no nível de aderência pneu/piso dos dois tratores. Contudo, se for tomado o valor médio das medições feitas na carga T2, obtém-se o valor de 11,3 kN que está dentro do esperado, como mostra a tabela 5.

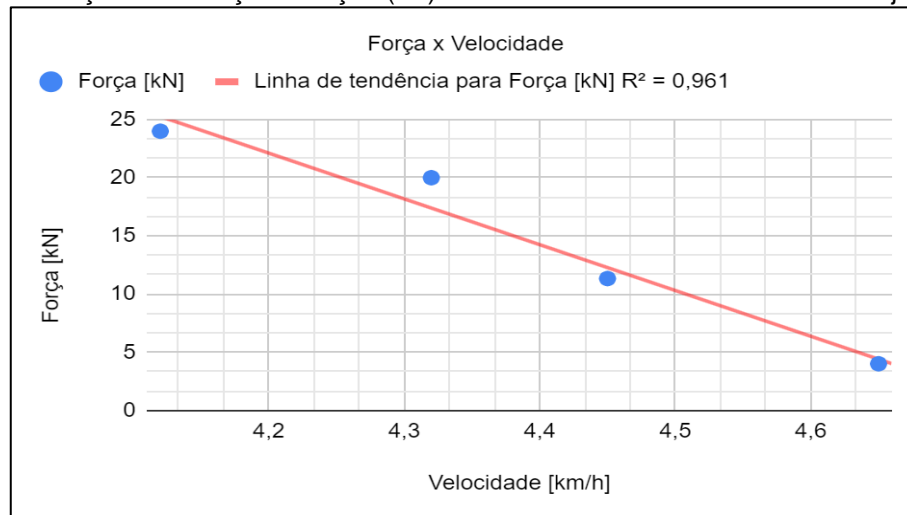
Tabela 5 - Relação entre velocidade e força.

| Nível de Carga | Velocidade<br>[km/h] | Força<br>[kN] |
|----------------|----------------------|---------------|
| 1              | 4,65                 | 4             |
| 2              | 4,45                 | 11,33         |
| 3              | 4,32                 | 20            |
| 4              | 4,12                 | 24            |

Fonte: Autoria Própria.

A figura 32 apresenta a curva da relação entre a força exercida pela barra de tração e a velocidade de deslocamento do trator.

Figura 32 - Relação entre força de tração (kN) e velocidade de deslocamento do conjunto (km/h).



Fonte: Autoria Própria.

Diante da metodologia proposta, percebeu-se que a principal limitação técnica encontrada foi no âmbito da aquisição dos sinais, ao qual verificou-se a instabilidade da conexão entre o sistema de aquisição de dados, Spider8, e o notebook usado para o registro dos dados. As desconexões detectadas no cabo de comunicação resultaram na instabilidade do sinal, gerando sobrecargas pontuais, além de dificuldades no processo de abertura do software. Além disso, por não haver espaço adequado para a fixação do sistema de medição no próprio trator, houve a necessidade de acompanhar o movimento do trator com estes equipamentos nos braços, o que representa mais uma fonte possível de erros.

Para trabalhos futuros será desenvolvido um sistema de aquisição de dados compacto e que possa ser fixado à estrutura do trator com mais facilidade.



## 7. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi criar um meio para o acompanhamento da força na barra de tração de um trator agrícola durante sua operação na lavoura. Foi feito o projeto e fabricação de uma célula de carga e de sistemas de fixação ao trator para tal aplicação.

O objetivo geral foi devidamente atendido, de forma que o equipamento desenvolvido retorna o esforço ao qual a barra de tração está sendo submetida ao longo do tempo.

O projeto, a fabricação e a calibração da célula foram bem sucedidos, de forma que um transdutor de baixo custo e alta sensibilidade foi devidamente obtido. A célula de carga desenvolvida tem capacidade de 504,91 kN, com coeficiente de segurança de 2,73.

Foi possível projetar e fabricar um suporte para a célula de carga de forma a minimizar a ocorrência de forças transversais à célula de carga.

A calibração da célula de carga indicou um erro máximo de 3,83 % e uma sensibilidade de 0,0255 [mV / kN].

Dados experimentais de campo foram realizados, atestando a capacidade e adequabilidade do conjunto desenvolvido.

## 8. REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; DE BRITO, Gilberto Antônio. Extensometria Básica. **Ed Nepae Unesp**, Ilha Solteira, SP, 2004. Disponível em:

<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>.

ASABE STANDARDS. ASAE D497.5 FEB2006 Agricultural Machinery Management Data. **Tractores y Máquinas**, St. Joseph, MI, 2006. Disponível em:

[https://www.tractoresymaquinas.com/wp-content/uploads/2021/07/ASABE\\_D497.5.pdf](https://www.tractoresymaquinas.com/wp-content/uploads/2021/07/ASABE_D497.5.pdf).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 789: Tratores Agrícolas - Determinação do Desempenho na Barra de Tração., Rio de Janeiro, 2020.

BRÖNSTRUP, Carlei. Projeto e construção de uma célula de carga para medir força de tração em tratores agrícolas. **Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete**, Alegrete, RS, jul 2017. Disponível em:

<https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/rii/1914/1/Carlei%20Br%c3%b6nstrup%20-%202017.pdf>.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica**. 8ª. ed. New York, NY: AMGH Editora Ltda., 2011.

CAMPOS, Fernando Henrique. Desenvolvimento de um Programa Computacional Destinado à Unidade Móvel na Barra de Tração ( UMEB) Para a Avaliação do Desempenho de Tratores. **Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu**, Botucatu, SP, v. viii, Junho 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/90484>.

FRANTZ, Ulisses Giacomini. Análise de desempenho em tração de rodado simples e duplo em um trator agrícola. **O Manancial - Repositório Digital da UFSM**, Santa Maria, RS, Março 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7539>.

GAMERO, C.A.; LANÇAS, K.P. Ensaio e certificação das máquinas de mobilização periódica do solo. **MIALHE, L.G. Máquinas agrícolas: ensaio e certificação**, Piracicaba, 1996. 463-514.

HOFFMANN, Karl. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Alsbach, Federal Republic of Germany: Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989. Disponível em:

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44775005/An\\_Introduction\\_to\\_Measurements\\_using\\_Strain\\_Gages-libre.pdf?1460762871=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAn\\_Introduction\\_to\\_Measurements\\_using\\_St.pdf&Expires=1682624622&Signature=Ba7UKHIFi4jy](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44775005/An_Introduction_to_Measurements_using_Strain_Gages-libre.pdf?1460762871=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAn_Introduction_to_Measurements_using_St.pdf&Expires=1682624622&Signature=Ba7UKHIFi4jy).

MALERBA, P. C. C; GUARNIERI, F. L; BARROS, J. APLICAÇÃO DA EXTENSOMETRIA ATRAVÉS DE STRAIN GAGE: ELABORAÇÃO DE UMA CELULA DE CARGA COM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS COMPUTADORIZADO. **XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**, José dos Campos, SP, p. 4, 2008. Disponível em:  
[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2008/anais/arquivosINIC/INIC1471\\_01\\_A.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2008/anais/arquivosINIC/INIC1471_01_A.pdf).

MASIERO, Fabrício Campos; LANÇAS, Kléber Pereira; MONTEIRO, Leonardo de Almeida. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO NA BARRA DE TRAÇÃO DE TRATORES AGRÍCO-LAS COM TRAÇÃO DIANTEIRA AUXILIAR (4X2 TDA).

**Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v. 26, n. 4, p. 55-73, 2011. Disponível em: <https://energia.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/303/185>.  
 MATSUURA, Sérgio. A partir de 1º de agosto a Humanidade entra em déficit ambiental com o planeta. **O Globo**, 24 Julho 2018. Disponível em:  
<https://oglobo.globo.com/brasil/a-partir-de-1-de-agosto-humanidade-entra-em-deficit-ambiental-com-planeta-22911967>.

O.E.C.D. Standard Codes for the official testing of agricultural and forestry tractors., 2023. Disponível em: <https://www.oecd.org/agriculture/tractors/codes/02-oecd-tractor-codes-code-02.pdf>.

PEDERSEN, H. C. Measurement techniques and data acquisition. **Lecture notes for the 6th semester course**, 2006.

RUSSINI, Alexandre. Estimativa do desempenho de tratores agrícolas em campo e pista a partir do ensaio dinamométrico. **O Manancial - Repositório Digital da UFSM**, Santa Maria, RS, p. 142, Março 2022. Disponível em:  
<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/3599>.

SERRANO, João Manuel Pereira Ramalho. Desempenho de tratores agrícolas em tração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Évora, Portugal, v. 42, n. 7, Julho 2007. ISSN <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000700015>. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/pab/a/CG887Lks86PHMXzfbyyMcHz/?lang=pt&format=pdf>.

SICHONANY, Oni R. D. A. O. *et al.* Sistema computacional de gerenciamento para acompanhamento de desempenho de máquinas agrícolas instrumentadas com sensores. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 41, n. 10, p. 1773-1776, Outubro 2011. ISSN 0103-8478. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/cr/a/3Qqg7xmBsLTdxX4S96ZTPcq/?lang=pt&format=pdf>.

SILVA, Rui Corrêa da. **Máquinas e Equipamentos Agrícolas**. 1. ed. [S.l.]: Saraiva-Érica, 2014.

SILVEIRA, G.M.; SIERRA, J.G. Eficiência energética de tratores agrícolas fabricados no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14, n. 4, 2010. 418-424.

UEMURA, Carlos Masaki. Análise teórica e numérica de um protótipo de treliça espacial. **Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá**, Guaratinguetá, SP, 2016. Disponível em:  
<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/155385/000882634.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

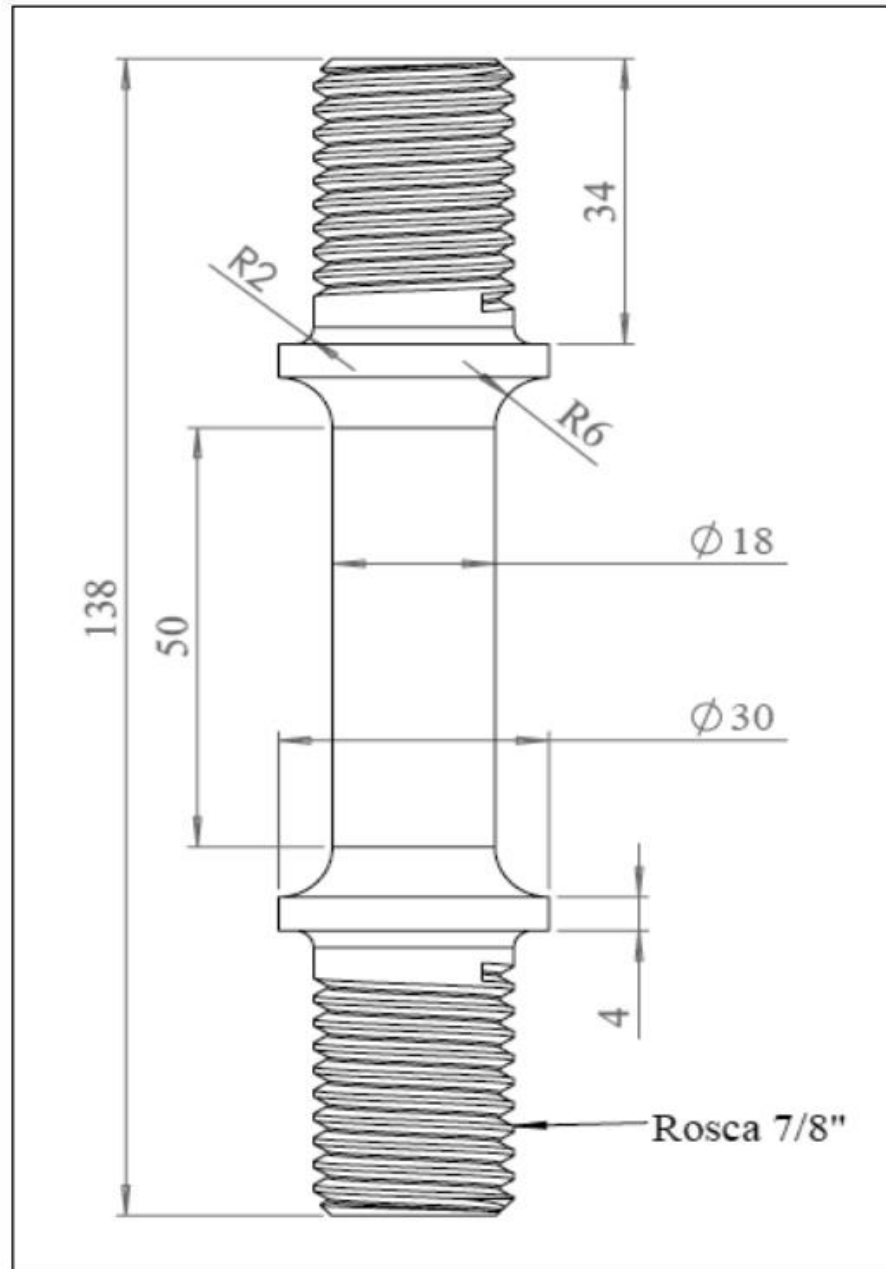
VIEIRA COSTA, Lorena *et al.* Produtividade agrícola e segurança alimentar dos domicílios das regiões metropolitanas brasileiras. **Revista De Economia E Sociologia Rural**, Viçosa, MG, v. 51, n. 4, p. 20, Dezembro 2013. ISSN  
<https://doi.org/10.1590/S0103-20032013000400003>. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/resr/a/VZ9f8S9CkVjRKDKw8ZWpnyg/?lang=pt&format=pdf>.

## 9. APÊNDICES

### 9.1 APÊNDICE A – Dimensões do corpo de prova

O apêndice A mostra as dimensões do corpo de prova.

Figura 33 - Dimensões do corpo de prova

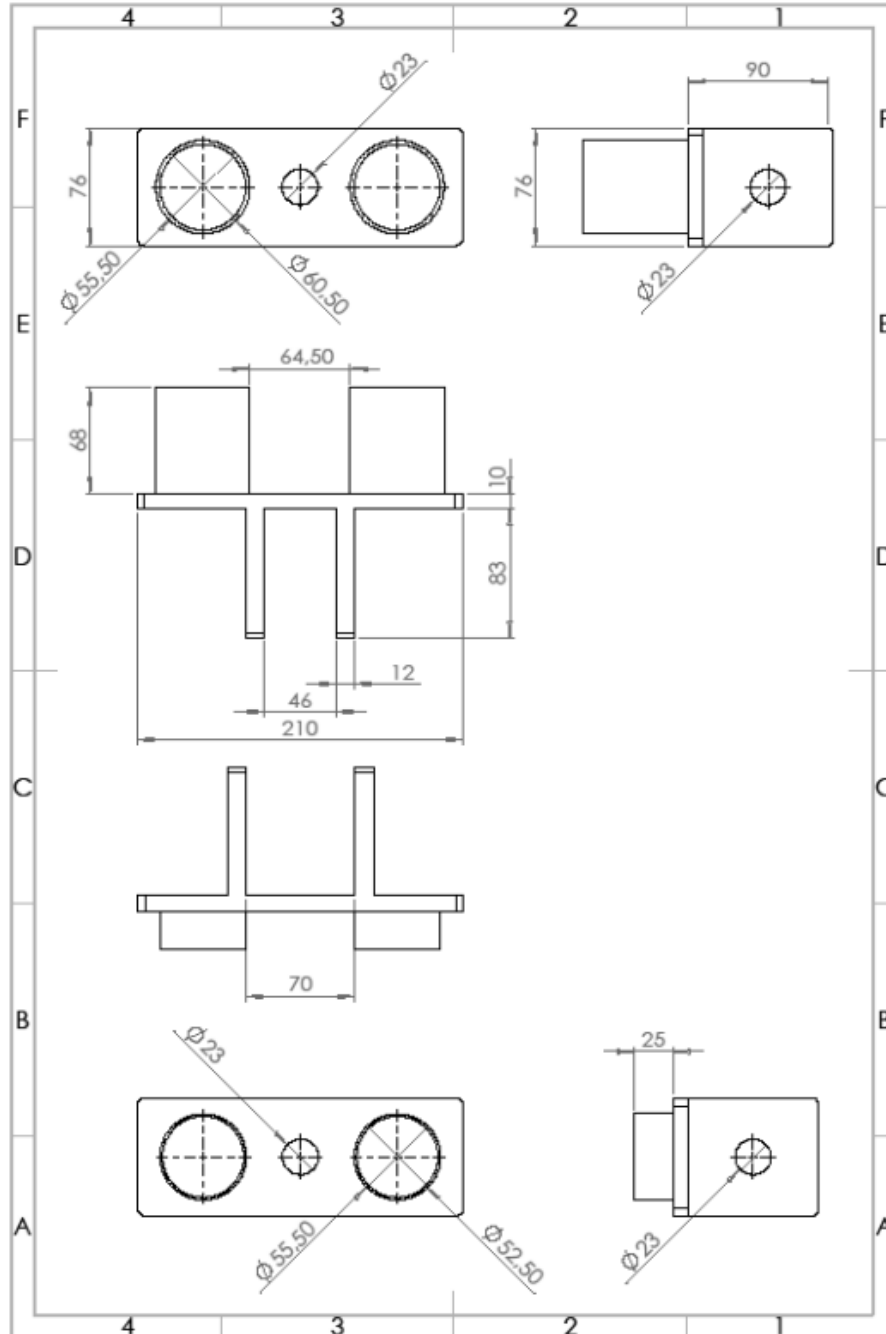


Fonte: Brönstrup, 2017.

## 9.2 APÊNDICE B – Dimensões do suporte fixador da célula de carga

A figura 34 mostra as dimensões do suporte da célula de carga.

Figura 34 - Dimensões do suporte fixador do corpo de prova.

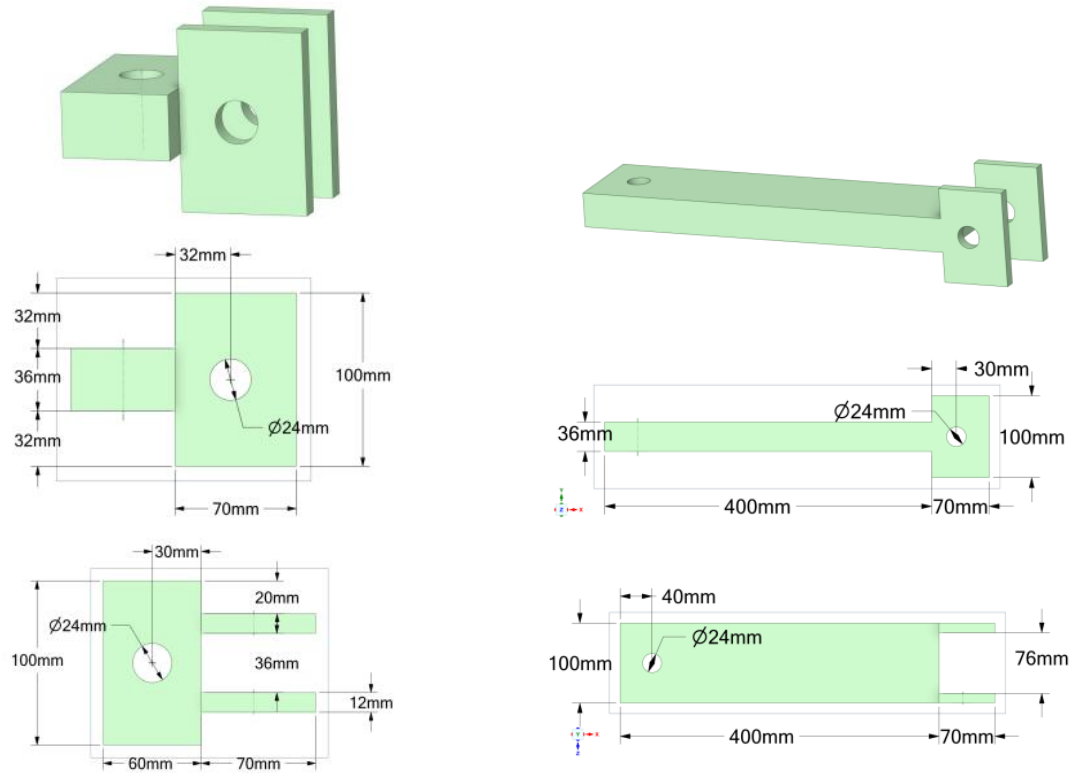


Fonte: Brönstrup, 2017.

### 9.3 APÊNDICE C – Dimensões do suporte fixador

A figura 35 mostra as dimensões do suporte fixador, usado como adaptação ao suporte da célula de carga.

Figura 35 - Dimensões da adaptação para o suporte



Fonte: Autoria Própria.

#### 9.4 APÊNDICE D – Valores adquiridos na calibração

A tabela 6 mostra os valores de tensão de saída adquiridos na calibração.

Tabela 6 - Valores adquiridos na calibração.

| <b>Força (kN)</b> | <b>Vs1 (mV/V)</b> | <b>Vs2 (mV/V)</b> | <b>Vs3 (mV/V)</b> |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1,00              | 0,0260            | 0,0259            | 0,0298            |
| 2,00              | 0,0513            | 0,0512            | 0,0588            |
| 3,00              | 0,0766            | 0,0765            | 0,0877            |
| 4,00              | 0,1019            | 0,1019            | 0,1167            |
| 5,00              | 0,1272            | 0,1272            | 0,1457            |
| 6,00              | 0,1526            | 0,1525            | 0,1747            |
| 7,00              | 0,1779            | 0,1778            | 0,2037            |
| 8,00              | 0,2032            | 0,2031            | 0,2327            |
| 9,00              | 0,2285            | 0,2284            | 0,2617            |
| 10,00             | 0,2538            | 0,2538            | 0,2906            |
| 11,00             | 0,2791            | 0,2791            | 0,3196            |
| 12,00             | 0,3045            | 0,3044            | 0,3486            |
| 13,00             | 0,3298            | 0,3297            | 0,3776            |
| 14,00             | 0,3551            | 0,3550            | 0,4066            |
| 15,00             | 0,3804            | 0,3803            | 0,4356            |
| 16,00             | 0,4057            | 0,4057            | 0,4646            |
| 17,00             | 0,4310            | 0,4310            | 0,4935            |
| 18,00             | 0,4564            | 0,4563            | 0,5225            |
| 19,00             | 0,4817            | 0,4816            | 0,5515            |
| 20,00             | 0,5070            | 0,5069            | 0,5805            |
| 21,00             | 0,5323            | 0,5322            | 0,6095            |
| 22,00             | 0,5576            | 0,5575            | 0,6385            |
| 23,00             | 0,5829            | 0,5829            | 0,6675            |
| 24,00             | 0,6083            | 0,6082            | 0,6964            |
| 25,00             | 0,6336            | 0,6335            | 0,7254            |
| 26,00             | 0,6589            | 0,6588            | 0,7544            |
| 27,00             | 0,6842            | 0,6841            | 0,7834            |
| 28,00             | 0,7095            | 0,7094            | 0,8124            |
| 29,00             | 0,7348            | 0,7348            | 0,8414            |
| 30,00             | 0,7601            | 0,7601            | 0,8704            |

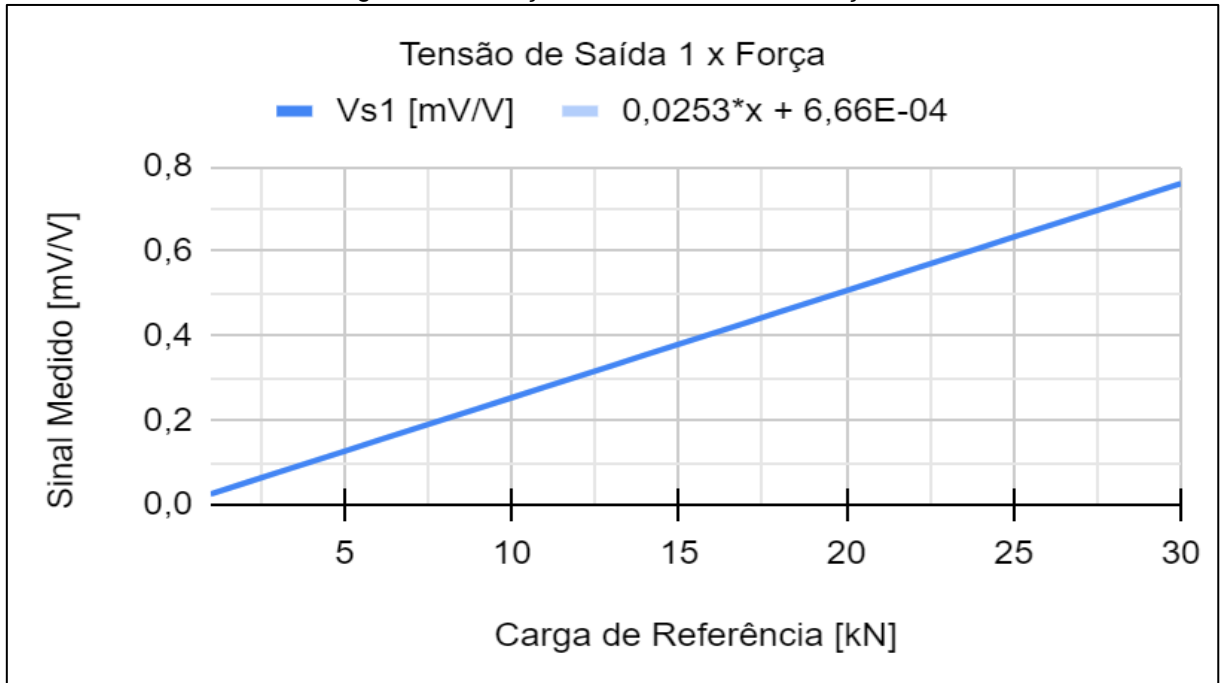
Fonte: Autoria Própria.



## 9.5 APÊNDICE E – Gráficos das calibrações

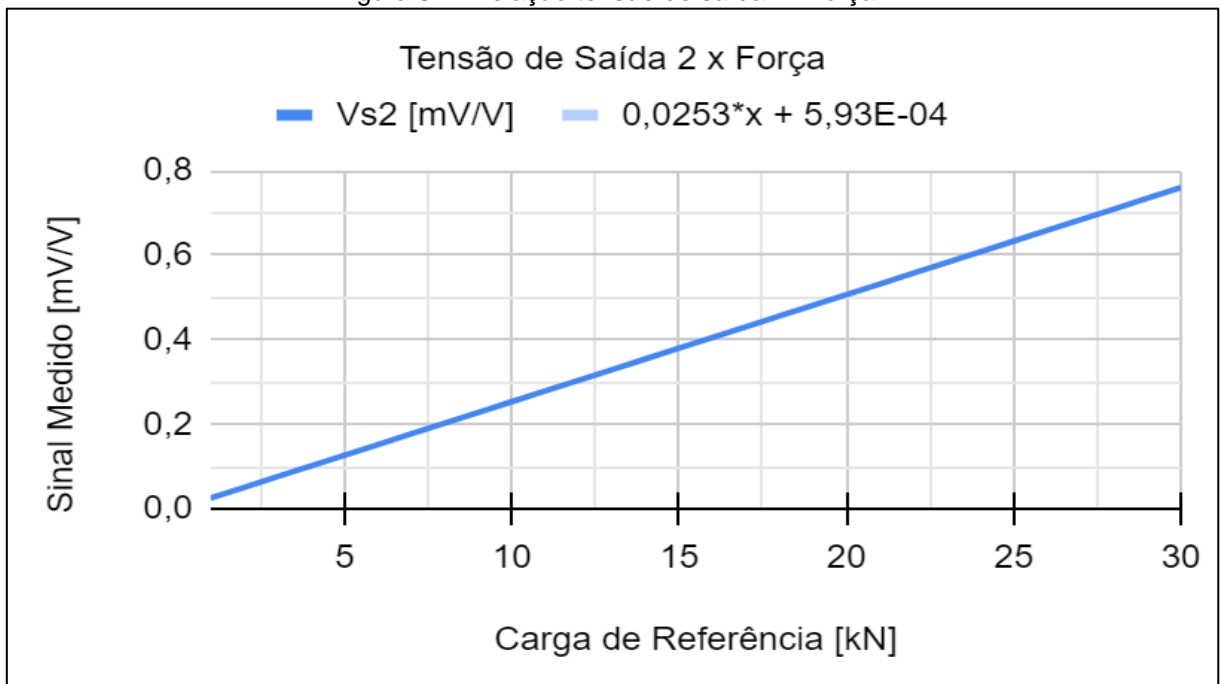
As figuras 36, 37 e 38 mostram os gráficos de calibração encontrados a partir das três rodadas de repetições.

Figura 36 - Relação tensão de saída 1 x força.



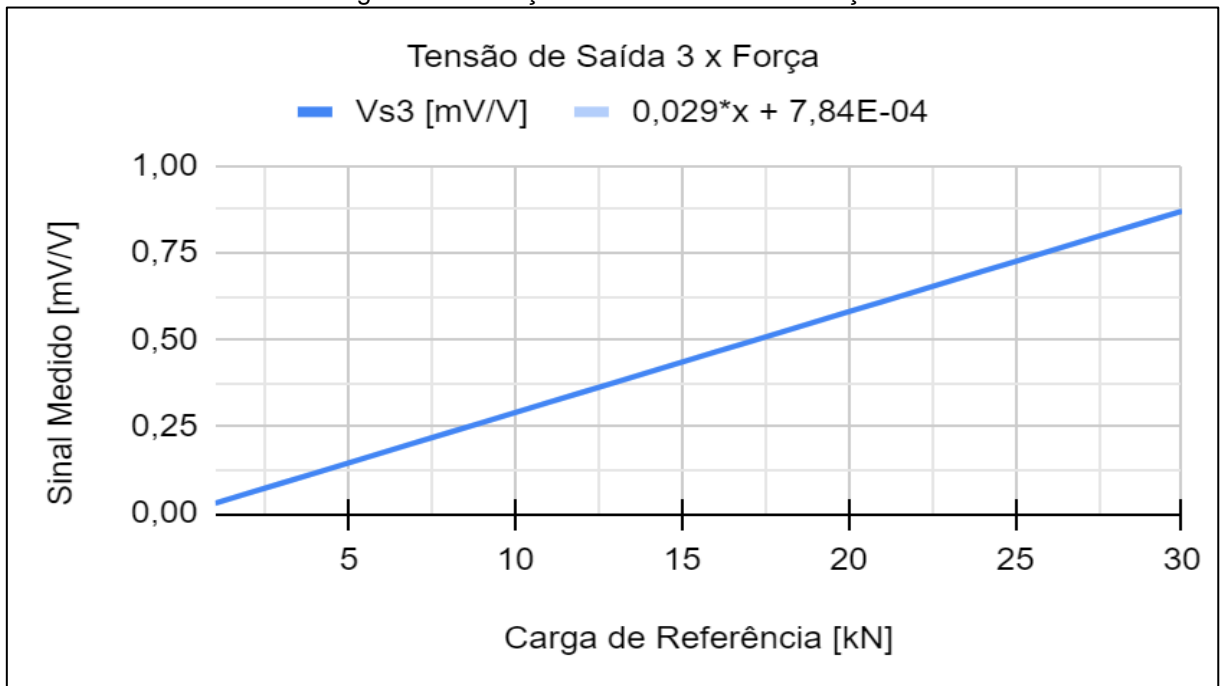
Fonte: Autoria Própria.

Figura 37 - Relação tensão de saída 2 x força.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38 - Relação tensão de saída 3 x força.



Fonte: Autoria própria.

## 9.6 APÊNDICE F – Tempo para a determinação do patinamento

A tabela 7 mostra os tempos das avaliações de tração, para posterior calculo do patinamento.

Tabela 7 - Tempo para a determinação do patinamento.

| Nível de Carga | Tempo 1 | Tempo 2 | Tempo 3 | Tempo Médio |
|----------------|---------|---------|---------|-------------|
| T1             | 23,01   | 23,04   | 22,91   | 22,99       |
| T2             | 24,92   | 23,21   | 23,09   | 23,74       |
| T3             | 26,62   | 24,32   | 24,74   | 25,23       |
| T4             | 25,04   | 25,04   | 24,87   | 24,98       |

Fonte: Autoria própria.