



Klinsmann Oliveira Costa
Marcelo Henrique Araujo
Marcos Raphael Batista Gonçalves
Maxwell Jonathan Azevedo Santos
Renato Aguilar Santos
Vinicius Silva Nunes

Trabalho Acadêmico Integrador IV

**Projeto e construção de uma máquina de
ensaio de tração com acionamento mecânico**

Arcos, MG

5 de janeiro de 2019

Klinsmann Oliveira Costa
Marcelo Henrique Araujo
Marcos Raphael Batista Gonçalves
Maxwell Jonathan Azevedo Santos
Renato Aguilar Santos
Vinicius Silva Nunes

Trabalho Acadêmico Integrador IV

Projeto e construção de uma máquina de ensaio de tração com acionamento mecânico

Projeto apresentado à disciplina de TAI-
Trabalho Acadêmico Integrador do curso de
Engenharia Mecânica ministrado no Instituto
Federal de Minas Gerais, Campus Arcos

Instituto Federal de Minas Gerais
Campus Avançado Arcos
Bacharelado em Engenharia Mecânica

Orientador: Flávio Fernandes Barbosa Silva

Arcos, MG
5 de janeiro de 2019

RESUMO

Os ensaios mecânicos são de grande importância na engenharia, pois com os dados coletados referentes aos materiais ensaiados permitem aos engenheiros selecionarem os materiais adequados para a finalidade do projeto, assim influenciando no custo e segurança do mesmo. O ensaio mecânico mais utilizado é o de tração, pois nele é possível obter-se mais propriedades do material em relação aos outros tipos de ensaios. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de uma máquina de ensaio de tração de baixo custo, tendo a limitação de poder ser utilizados apenas corpos de provas impressos em uma impressora 3D, seguindo as normas que padronizam esse tipo de processo.

Palavras-chave: Ensaio, máquina, tração.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Máquina para ensaios de tração Shimadzu AG-X plus	7
2	Exemplo de um Gráfico Tensão-Deformação	9
3	Exemplo de corpos de prova usados em ensaios de tração, acima, um proverte antes de ser ensaiado e a baixo um já ensaiado.	10
4	Modelagem 3D	11
5	Soldagem da estrutura	13
6	Garra	13
7	Representação do Corpo de prova	14
8	Corpo de prova acoplado na garra	14
9	Cabeçote sem carga	15
10	Flecha da deflexão máxima	16
11	Tensão cisalhante causada por torção	18
12	Flambagem causada por carga de compressão	19
13	Sistema de acionamento da célula de carga	22
14	Representação esquemática da montagem do sistema	22
15	Fluxograma representando os algoritmos de calibragem e pesagem	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	Objetivos gerais	5
1.2	Objetivos específicos	5
1.3	Justificativa	6
2	REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1	Máquinas de ensaio	7
2.2	Ensaio de tração	8
3	METODOLOGIA	11
3.1	Método de construção	11
3.2	Materiais	12
3.3	Utilização de soldagem e funcionalidade	12
3.4	Garra e corpo de prova	13
4	RESULTADOS	15
4.1	Análise estrutural	15
4.1.1	Deflexão do cabeçote móvel	15
4.2	Definição de componentes	16
4.2.1	Fusos	16
4.2.2	Flambagem	19
4.2.3	Motor	20
4.2.4	Transmissão	20
4.2.5	Sistema de acionamento da célula de carga	21
4.3	Eletrônica de dados	22
5	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS	25
	ANEXO A – DESENHO TÉCNICO DA MÁQUINA DE ENSAIO	26
	ANEXO B – CRONOGRAMA	27
	ANEXO C – CÓDIGO DE CALIBRAGEM	28

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de muitas das tecnologias que tornam a nossa existência tão confortável está intimamente associado ao acesso a materiais adequados. Um avanço na compreensão de um tipo de material é com frequência o precursor de um progresso gradativo da tecnologia [1]. Ao passar por esse desenvolvimento, as máquinas foram aprimoradas para melhorar o conforto e reduzir o gasto de energia para determinadas tarefas, assim, necessitando progressivamente de maior precisão acerca do comportamento dos materiais.

A partir da revolução industrial, com a mecanização dos sistemas de produção, vem se exigindo materiais cada vez mais mais específicos para a fabricação de diversos produtos, de modo a atender um mercado cada vez mais competitivo e exigente [1]. Devido a isso, máquinas que são capazes de realizar ensaios mecânicos estão cada vez mais avançadas e mais presentes na indústria.

As máquinas de ensaio, seja de tração, compressão, torção, entre outros, são ferramentas necessárias para o desenvolvimento de projetos ligados à engenharia. Elas são utilizadas para a compreensão da resistência dos materiais quando submetidos a diversos esforços. Durante o ensaio de tração, a máquina fornece dados relevantes em um gráfico tensão-deformação, em que é possível observar as fases de deformação elástica e deformação plástica do material, assim como, ao se efetuar cálculos, determinar o módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência (U_r) e módulo de tenacidade (U_t).

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Projetar e construir uma máquina de ensaio de tração em escala reduzida com baixo custo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar a maquina de ensaios de tração;
- Executar a montagem da máquina de ensaios de tração;
- Realizar ensaios no IFMG Campus Arcos;

1.3 JUSTIFICATIVA

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas através de experimentos, realizados em laboratórios cuidadosamente planejados para reproduzirem da forma mais fiel possível as condições de serviço [1]. As máquinas usadas nesses experimentos são chamadas de máquinas de ensaios e podem realizar diversos tipos de ensaios, como ensaio de tração, compressão, cisalhamento, dobramento, flexão, torção, entre outros.

Essas máquinas são utilizadas em vários seguimentos da engenharia como na mecânica, na construção civil, automobilística, aeronáutica. Em projetos de grande e pequeno porte, é de extrema importância que se conheça o comportamento do material e suas propriedades em diversas situações de uso, como a exposição a diferentes temperaturas, formas de carregamento, frequência de aplicação e desgaste.

Do ponto de vista profissional, torna-se fundamental que um engenheiro mecânico tenha contato e conhecimento com os mais variados tipos de ensaios mecânicos, para julgar qual propriedade do material será mais importante em cada projeto. Por vezes, algum projeto demandará uma peça mais tenaz, em outros será necessário uma peça de dureza elevada. A principal maneira de conhecer esses dados é através dos ensaios mecânicos.

Sabendo disso, foi definido a realização do projeto e construção de uma máquina de ensaio de tração com acionamento mecânico, visando a necessidade dos alunos de conhecerem e terem contato com os ensaios mecânicos. Um bom exemplo é o trabalho de construção de uma ponte de palitos de picolé realizado no terceiro período do curso, que integra as disciplinas de Estática e Ciência dos Materiais e solicita que os alunos conheçam as propriedades mecânicas de um palito de picolé, como a resistência a tração e a compressão. A construção da máquina facilitará a aquisição desses dados e enriquecerá ainda mais a experiência acadêmica dos alunos do Campus.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MÁQUINAS DE ENSAIO

Para conhecer as propriedades de algum material, é necessário submetê-lo a algum ensaio que ofereça uma medição para aquela propriedade de interesse. Por exemplo, para conhecer a dureza de algum material, é usado um durômetro, um equipamento que mede a quantidade de deformação plástica de um material ou uma peça acabada.

Para conhecer a resistência ao escoamento, resistência a tração, resiliência e o módulo de tenacidade de um material, é realizado um ensaio de tração em uma máquina de ensaios própria. A figura 1 apresenta a Shimadzu AG-X Plus utilizada principalmente, para a realização de ensaios de tração.



Figura 1 – Máquina para ensaios de tração Shimadzu AG-X plus

Fonte – [2]

Existem várias outras máquinas de ensaio, como o Pendulo Charpy para ensaios de impacto, máquina de fadiga para verificação de falhas por repetições, máquina para ensaios de fluência, entre vários outros ensaios destrutivos (onde se tem perda total ou parcial do material de ensaio). Assim como equipamentos destinados aos ensaios não destrutivos. Como o objetivo do trabalho é projetar e construir uma máquina de ensaios de tração, os outros equipamentos não serão mais abordados no decorrer do texto.

2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova (material a ser ensaiado) a uma tensão crescente, obtendo os resultado do ensaio por um gráfico denominado Tensão-Deformação. Os corpos de prova podem ter seção transversal circular, retangular, quadrada, entre outros, e são produzidos de acordo com parâmetros estabelecidos em normas internacionais.

O principal objetivo de um ensaio de tração é conhecer a tensão suportada no final da fase elástica, também conhecido como Limite de Proporcionalidade, onde a fase elástica se encerra e inicia a fase de deformação plástica. Nessa fase, a deformação produzida na peça se torna irreversível.

O gráfico $\sigma - \epsilon$ possibilita avaliar a tensão suportada pelo corpo de prova, e a elongação sofrida. Pode-se calcular a tensão pela força F dividida pela área da seção transversal A .

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

A elongação ϵ , está relacionada com a variação de comprimento do corpo de prova, Δl , dividida pelo seu comprimento inicial.

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

O gráfico de Tensão-Deformação é dividido em duas fases, a fase elástica e a fase plástica. Durante a fase elástica a deformação produzida não é permanente, e o corpo de prova retorna ao seu tamanho inicial assim que as forças de tração são removidas. Essa fase obedece a Lei de Hooke, e a tensão pode ser encontrada pela fórmula:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.3)$$

Em que E representa o módulo de elasticidade. Esse valor varia em função do material, onde, para aços, se encontra em torno de 207 GPa [1].

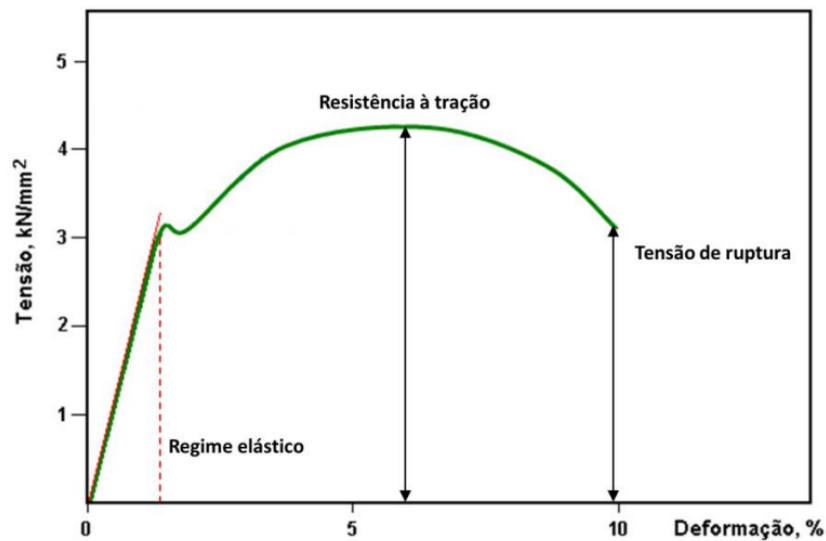


Figura 2 – Exemplo de um Gráfico Tensão-Deformação

Fonte – [3]

Ainda do gráfico de tensão-deformação, é possível obter mais duas propriedades mecânicas importantes, a Resiliência e a Tenacidade.

A resiliência se refere a quantidade de energia que o material pode absorver ainda no seu domínio elástico e sua capacidade para restituição. O módulo de resiliência, representado por U_r , apresenta a energia necessária para provocar deformação por unidade de volume, de uma tensão nula até o limite de elasticidade, dado pela fórmula 2.2 [4].

$$U_r = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \epsilon \quad (2.4)$$

Como:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.5)$$

A fórmula 2.2, também pode ser escrita como:

$$U_r = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \quad (2.6)$$

O módulo de resiliência corresponde à área abaixo da curva $\sigma - \epsilon$ do domínio elástico. A tenacidade, no que lhe concerne, esta relacionada com a deformação plástica do material até o momento da ruptura. Um material que apresenta pouca ou nenhuma deformação plástica é chamado de frágil. A tenacidade corresponde à área abaixo de toda a curva $\sigma - \epsilon$ (2.7).

O ensaio de tração também permite avaliar a ductilidade dos materiais através da extensão após a ruptura (A) e a partir do coeficiente de estrição (Z). O alongamento é determinado pela expressão:

$$A = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \cdot 100 \quad (2.8)$$

O coeficiente de estrição Z , dado pela formula 2.2, representa a variação na área da seção transversal no momento da fratura. A_0 é a área da seção transversal do corpo de prova antes do início do ensaio, e A_f a área observada no final do ensaio, após a ruptura [1].

$$Z = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100 \quad (2.9)$$



Figura 3 – Exemplo de corpos de prova usados em ensaios de tração, acima, um provete antes de ser ensaiado e a baixo um já ensaiado.

Fonte – Próprios autores

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODO DE CONSTRUÇÃO

O presente projeto inicialmente foi dividido em duas etapas, sendo realizadas em dois semestres. Na primeira etapa foi realizado a análise de forças na estrutura e a construção de um protótipo em escala reduzida para demonstração. A segunda, foi realizado no semestre que se encontra, sendo subdividido em quatro novas etapas para melhor aproveitamento do tempo, e juntamente com isso, foi construído um cronograma, que se encontra no Anexo B, cujas principais etapas são:

Etapa 1: Pesquisa e desenvolvimento da temática abordada e delimitação dos elementos de contorno do problema.

Etapa 2: Esboço e modelagem da máquina: Construído em 3D, usando uma versão gratuita para estudantes do *software Autodesk Inventor* [5].



Figura 4 – Modelagem 3D

Fonte – Próprios autores

Etapa 3: Aquisição dos materiais: A compra dos materiais foi feita grande parte pela internet, sendo parte adquirido também em ferros velhos, visando diminuir custos.

Etapa 4: Construção da máquina: A construção foi realizado em oficina mecânica, sendo os integrando responsáveis por construir todo o protótipo. Inicialmente foi construída a estrutura externa, e posteriormente os outros componentes foram adicionados.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a construção do protótipo da máquina de ensaio de tração estão listados na tabela 1.

Tabela 1 – Materiais

	Descrição	Qtd	Preço Unitário R\$
1	Metais para estrutura	13,5 kg	3,50
2	Barra roscada - m10	2	20,00
3	Rolamento	4	15,00
4	Porcas	6	2,00
5	Arruelas	8	0,50
6	Arduino	1	35,00
7	Placa Hx711	1	15,00
8	Célula de Carga	2	20,00
9	Motor	1	100,0
10	Inversor de frequência	1	320,0
11	Cabos	5 m	10,0
12	Eléttodos	15	0,60
13	Disco de corte	2	5,00
	Total		546,6

Fonte – Próprios autores

3.3 UTILIZAÇÃO DE SOLDAGEM E FUNCIONALIDADE

A soldagem é um processo através do qual duas peças de metal são unidas utilizando calor e eletricidade. Um material de preenchimento é utilizado para formar uma gota de metal fundido, que arrefece e se torna um forte ligamento entre as duas peças. Há diversos processos de soldagem, mas os mais comuns são de soldagem fixa (*SMAW*, sigla em inglês), também conhecido como solda por eletrodo revestido; soldagem por gás metálico inerte; e soldagem por gás inerte de tungstênio.

Para esse projeto foi utilizado soldas fixas por ter um baixo custo, e fácil manuseio; assim como também ser acessível, já que o projeto foi construído em um ambiente que possuía uma máquina de solda, sendo necessária somente a aquisição dos eletrodos.

As soldas foram utilizadas para unir partes da estrutura da máquina, que ficariam com maior custo se feitas de outra forma. Foram conectadas partes como cabeçote inferior, guias laterais, entre outros, optando assim, pela mesma.



Figura 5 – Soldagem da estrutura

Fonte – Próprios autores

3.4 GARRA E CORPO DE PROVA

Alguns desenhos foram feitos para o desenvolvimento de uma garra de acordo com o formato do corpo de prova; porém, devido a necessidade de usinar essas garras, um processo com custo elevado, essas garras feitas em materiais metálicos foram substituídas por um modelo possuindo as mesmas dimensões, porém, construído em uma impressora 3D, como mostrada na figura 6.

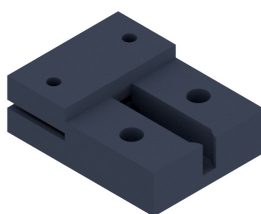


Figura 6 – Garra

Fonte – Próprios autores

Os corpos de prova foram feitos em uma impressora 3D utilizando filamento

(material usado para impressões) do modelo PLA (poliácido láctico). Estes corpos de prova foram desenvolvidos seguindo a norma ASTM A 370 [5], que define qual deve ser as dimensões do corpo de prova, que serão de seção retangular, como mostrado na figura 8.

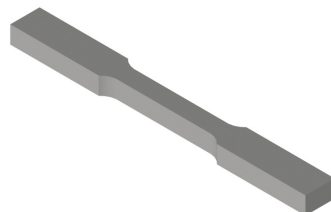


Figura 7 – Representação do Corpo de prova

Fonte – Próprios autores

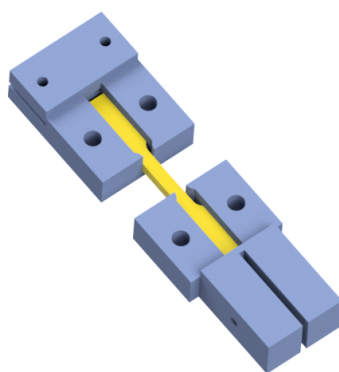


Figura 8 – Corpo de prova acoplado na garra

Fonte – Próprios autores

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

4.1.1 DEFLEXÃO DO CABEÇOTE MÓVEL

A deflexão no cabeçote móvel pode afetar os dados coletados durante o ensaio realizado em um determinado corpo de prova pois o cabeçote está sujeito a uma carga ao longo do ensaio. Sendo assim, essa carga provocará uma deflexão na viga, tendo sua deflexão máxima em seu centro.

Para o cálculo da deflexão, as forças atuantes no cabeçote serão consideradas pontuais, visto que provocam a maior deflexão em pontos críticos. Vale notar que a deflexão máxima ocorre no centro da linha elástica, e foi considerado um material homogêneo e simétrico, como mostra a figura 9.

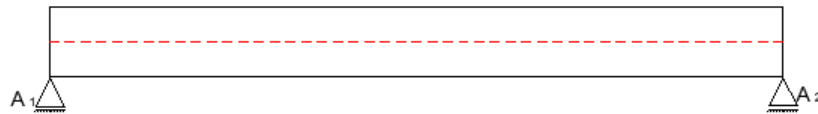


Figura 9 – Cabeçote sem carga

Fonte – Próprios autores

O cálculo para a deflexão pode ser obtido por meio de definições da teoria da elasticidade, no qual mostra-se que o momento fletor $M(x)$, aplicado ao longo do cabeçote por uma determinada carga $w(x)$, relaciona-se da forma:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = w(x) \quad (4.1)$$

Sendo que $M(x)$ é proporcional a curvatura k da curva elástica $M(x) = EIk$, onde E é o módulo de elasticidade do material, que será adotado em $200GPa$, sendo uma média dos aços, segundo [1] e o momento de inércia (I) de área da seção transversal do cabeçote, que é calculado usando o teorema dos eixos paralelos, $I = \frac{1}{12}bh^3 + Ad^2$.

No cálculo, a curvatura é dada por $k = \frac{v''}{[1 + (v')^2]^{3/2}}$, quando a deflexão é pequena a inclinação $v' \approx 0$, então se for feito $k = v''$ a equação, vai se tornar, $M = EIV''$. Fazendo a derivada segunda desta última expressão:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = E \cdot I \cdot \frac{d^4 v}{dx^4} \quad (4.2)$$

Se for substituído a equação (4.1) em (4.2), pode ser obtido uma equação diferencial de 4° ordem, não homogênea.

$$\frac{d^4 v}{dx^4} \cdot E \cdot I = w(x) \quad (4.3)$$

Para resolver a equação (4.3), será utilizado o método de coeficientes a determinar, onde teremos um problema de valor de contorno, um PVC, e após a resolução da EDO, será aplicado as condições de contorno, tendo a equação:

$$V(x) = \frac{w(x) \cdot x^4}{24 \cdot E \cdot I} + C_1 \cdot x^3 + C_2 \cdot x^2 \quad (4.4)$$

As condições de contorno serão $v(0) = 0$, $v'(\frac{l}{2}) = 0$, $v'(l) = 0$. Aplicando-as e resolvendo o sistema, será possível obter os valores de C_1 e C_2 .

$$V(x) = \frac{1}{E \cdot I} \left(\frac{w(x) \cdot x^4}{24} - \frac{w(x) \cdot L \cdot x^3}{12} + \frac{w(x) \cdot L \cdot x^2}{24} \right) \quad (4.5)$$

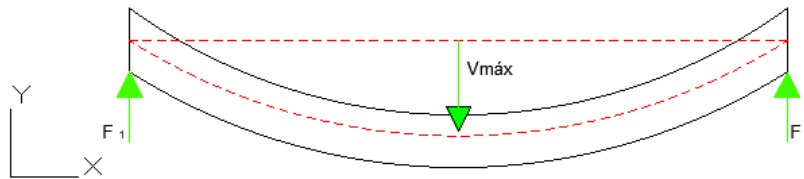


Figura 10 – Flecha da deflexão máxima

Fonte – Próprios autores

A equação (4.5) descreve a deflexão ao longo do cabeçote. Com a finalidade de obter a deflexão máxima, serão substituídos estes termos, obtendo um $V_{máx} = 0,0406mm$. Após os cálculos, podemos perceber que a deflexão que o cabeçote terá com a carga máxima será pequena e não haverá influência significativa nos dados coletados durante o ensaio.

4.2 DEFINIÇÃO DE COMPONENTES

4.2.1 FUSOS

Por serem os componentes que ligam o acionamento mecânico fornecido pelo motor à estrutura da máquina, os fusos são submetidos a diversos esforços, sendo eles compressão, flambagem, cisalhamento nos fios da rosca e cisalhamento causado por torção. Os fusos

também possuem características fundamentais ao dimensionamento do conjunto mecânico da máquina.

O passo dos fusos, junto a seus diâmetros externos, internos e primitivos, e o ângulo dos fios de rosca em relação à seção transversal da peça ditam os requisitos a serem supridos pelo motor e sua redução, sendo eles o torque aplicado sobre as mesmas, gerando a carga de tração no corpo de prova, e a velocidade angular da mesma, que por sua vez define a velocidade de deformação do objeto ensaiado.

Os fusos submetidos ao dimensionamento possuem 10mm de diâmetro externo, seção de fio de rosca triangular, 1,5mm de passo, e são compostos por aço inox AISI 304,

TORQUE SOBRE O FUSO

Em situações ideais, parafusos de potência possuem seção de rosca quadrada, de modo a se obter a maior eficiência possível na transmissão de trabalho; porém, o grupo não encontrou um fuso desse modelo a um preço acessível, sendo necessário o uso de um fuso de seção triangular. Isto implica em uma perda energética, considerada pela equação seguinte de torque [6]:

$$T_u = \frac{P \cdot d_p}{2} \cdot \left(\frac{\mu \cdot \pi \cdot d_p - L \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot d_p \cdot \cos \alpha + \mu \cdot L} \right) + \mu_c \cdot P \cdot \frac{d_c}{2} \quad (4.6)$$

Nessa equação, T_u é o torque necessário para se levantar a carga, P é a carga aplicada, d_p é o diâmetro primitivo, a média entre o diâmetro interno e o externo no fuso, μ é o coeficiente de atrito entre a rosca e o colar axial, L é a hipotenusa de um triângulo formado por L , o passo da rosca e a circunferência da mesma, α é o ângulo do fio de rosca em relação à seção transversal do fuso, e μ_c é o coeficiente de atrito do rolamento que apoia o fuso ou o colar axial [6].

ESFORÇO DE COMPRESSÃO

Os fusos aplicam a carga de tração no corpo de prova por meio do cabeçote, como consequência disso, os mesmos sofrem uma tensão de compressão gerada pela resistência à deformação exercida pelo corpo de prova. A intensidade desse esforço é dada pela fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.7)$$

σ sendo o valor da tensão de compressão, F a carga no corpo de prova e A a área de seção transversal dos fusos. Como a carga gerada pelo ensaio é compartilhada entre os dois fusos, os mesmos não apresentaram tensão significativa para esse esforço.

CISALHAMENTO DOS FIOS DA ROSCA

Toda a carga aplicada no corpo de prova passa pelos fios de rosca dos fusos e pelos fios das porcas, ou colares axiais; como consequência disso, há esforços de cisalhamento entre as peças. Esses esforços são calculados da seguinte maneira:

$$\tau_S = \frac{F}{A_S} \quad (4.8)$$

Em que τ_S é a tensão a ser encontrada, em Pa, F é a carga aplicada, e A_S é a área que sofre esforço cisalhante. No caso de fios de rosca, a área de cisalhamento é calculada como:

$$A_S = \pi \cdot d \cdot w \cdot p \quad (4.9)$$

Nesse caso, d é o diâmetro do fuso, p é o passo da rosca, e w é um fator que define a porcentagem do passo ocupado pelo metal no diâmetro do fuso, seu valor que pode ser encontrado em tabelas [6]. Dessa forma, resulta uma tensão de cisalhamento nos fusos de 16,1MPa, confortavelmente dentro dos limites de resistência do aço empregado.

ESFORÇO DE TORÇÃO

Os fusos nas máquinas de ensaio de tração tomam o papel de parafusos de potência, por consequência da aplicação de um torque pelo motor nos fusos, e uma consequente resistência gerada pelo objeto ensaiado, as barras roscadas são sujeitas ao esforço de torção, que por sua vez gera uma tensão de cisalhamento. Esse esforço é distribuído pela seção transversal da peça, com aumento linear de intensidade do centro até a extremidade do fuso, e é calculado pela seguinte fórmula:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (4.10)$$

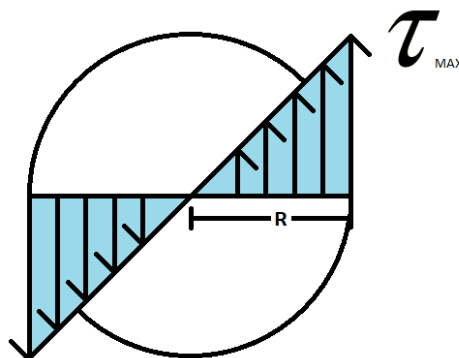


Figura 11 – Tensão cisalhante causada por torção

Fonte – Os Próprios Autores

Em que τ_{max} é a tensão cisalhante, dada em Pascal, T é o torque aplicado, c é o raio em que a tensão é calculada, e J é o momento polar de inércia da seção transversal do fuso [7]. A tensão máxima causada por torção na extremidade dos fusos resultou no valor de 2,95MPa em esforço cisalhante, considerado muito abaixo do limite de resistência das peças.

4.2.2 FLAMBAGEM

Flambagem é uma deformação de um elemento estrutural esbelto quando sujeito a uma carga de compressão em suas extremidades, causando uma deflexão, podendo resultar em uma falha repentina do material [7]

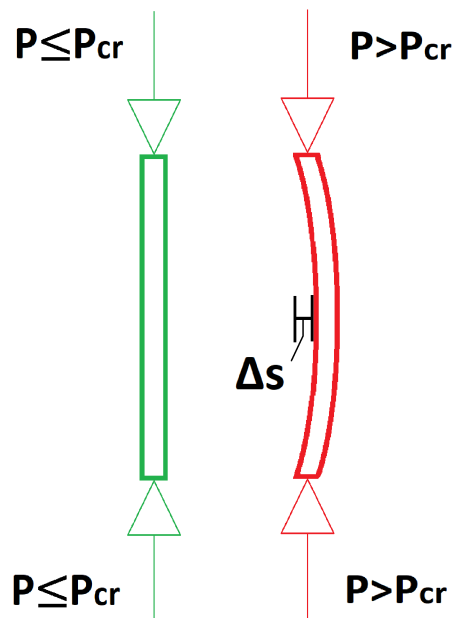


Figura 12 – Flambagem causada por carga de compressão

Fonte – Próprios autores

A figura acima esquematiza a flambagem. Nela, P_{cr} é a carga máxima de compressão que pode ser aplicada sem causar deflexão, também chamada de carga crítica. Qualquer esforço de compressão com valor acima de P_{cr} causará flambagem, representada na seção direita da figura. A carga máxima admissível pode ser encontrada por meio da seguinte fórmula:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (4.11)$$

Nessa situação, P_{cr} é a carga máxima admissível, dada em Newtons, E é o módulo de elasticidade do material que compõe o fuso, I o momento de inércia de área da seção transversal da peça, e L é o comprimento da seção da peça que não possui apoio lateral.

No caso da máquina de ensaio de tração é a distância entre o cabeçote inferior, ou um mancal ali situado, e o colar axial situado no cabeçote móvel. Dos cálculos resultou uma carga crítica de 1,48KN, tornando possível a utilização dos fusos de 10mm no projeto.

4.2.3 MOTOR

Como já dito anteriormente, a utilização dos fusos será de seção triangular. Como consequência da utilização desse modelo de barra roscada, o motor deverá suprir ao par de fusos o torque total mínimo de $154N.mm$, a uma velocidade angular constante de $8,33RPM$, para que o ensaio gere resultados concisos, de acordo com a equação:

$$P = \tau \cdot w \quad (4.12)$$

Nesse caso, P é a potência gerada, τ e w são o torque e a velocidade angular necessários, resultando em uma potência mínima de 0,14W. Esse valor não representa a potência real que o motor deve ter, pois o mesmo possui perdas. Perdas geradas pela transmissão também são consideráveis.

4.2.4 TRANSMISSÃO

O acionamento mecânico é responsável por transmitir movimento para o motor e fusos, e é feito pela transmissão, podendo ser desenvolvidas de várias formas. Visando o melhor custo benefício, o modelo utilizado no projeto é o de coroa, catracas e correntes de roletes, onde cada catraca acoplada ao motor é ligada através das correntes e coroas aos fusos, transmitindo torque e velocidade angular. Para a definição entre a relação das catracas e coroas, levou-se em conta as seguintes premissas:

- $w_m = 33.000RPM$
- $V_e = 12,5mm/m$
- $p_f = 1,5mm$

Onde w_m é a rotação por minuto do motor quando em ligação direta, V_e é a velocidade de ensaio e p_f é o passo do fuso.

Para a definição da relação utilizada na transmissão entre catraca e coroa, considerou-se a velocidade constante de ensaio e o passo do fuso, com isso, é possível determinar a velocidade angular do fuso. Sua fórmula é dada por:

$$w_f = \frac{v_e}{p_f} \quad (4.13)$$

Obtêm-se um valor de $w_f = 8,33RPM$. Desse resultado de w_f torna visível a necessidade do uso de um segundo conjunto de redução ao se comparar a velocidade

angular do fuso e a do motor, visto que ao caso de se utilizar uma redução puramente mecânica, haveria a necessidade de se criar uma redução de 3960:1, o que tornaria o projeto inviável.

Com isso em mente, foi empregado o uso de uma combinação de uma redução mecânica pequena com inversor de frequência, que ao mesmo tempo diminui a velocidade angular do motor, e mantém o torque que o mesmo pode fornecer quando em ligação direta. Esse novo conjunto de redução emprega a utilização de uma coroa de 44 dentes em cada fuso e duas catracas de 14 dentes no eixo do motor, resultando em uma relação de 3,14:1 na redução mecânica, e sendo responsável pela maior parte da redução, e pelo ajuste no inversor de frequência.

4.2.5 SISTEMA DE ACIONAMENTO DA CÉLULA DE CARGA

O cálculo da tensão máxima que pode ser aplicada no sistema de acionamento da célula de carga é obtido através da seguinte equação:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (4.14)$$

onde V é a força máxima que poderá ser aplicada, esta força é de 490,5 N que é a carga máxima que a máquina poderá suportar; Q é medido pela parte superior ou inferior da linha neutra, onde o seu resultado é a multiplicação da área de uma das partes e de seu respectivo centroide, I é o momento de inércia da área da seção transversal inteira, que foi calculado utilizando o teorema dos eixos paralelos devido a não simetria do conjunto e t é largura da área da seção transversal do elemento onde passa a linha neutra.

$$\tau = \frac{490,5 \cdot 12,68 \cdot 10^{-6}}{2,06 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01}$$

Com os dados mostrados anteriormente, a tensão máxima é de:

$$\tau = 30,14MPa$$

sendo uma força de tração como pode ser visto na figura 13. O sistema de acionamento da célula de carga é um componente que terá grande importância no projeto, já que o mesmo irá fazer com que as células de carga sejam pressionadas e enviem os dados para o computador, também ideal para o esforço que ele estará submetido, pois o material possui uma maior resistência a tração do que a que será aplicado no mesmo.

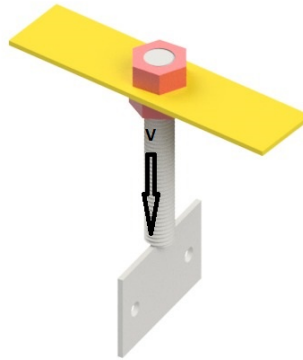


Figura 13 – Sistema de acionamento da célula de carga

Fonte – Próprios autores

4.3 ELETRÔNICA DE DADOS

Para realizar a aquisição dos dados gerados pelo procedimento do ensaio, foi usada duas células de carga de 50 quilos, que é um equipamento eletromecânico concebido para medir a força submetida no corpo de prova. Uma placa amplificadora de sinais HX711, que será ligada em uma placa de microcontrolador modelo Arduíno UNO, que permitirá a interpretação dos dados gerados pelo ensaio por um computador, através desses resultados, será possível gerar o gráfico tensão-deformação para o provete ensaiado.

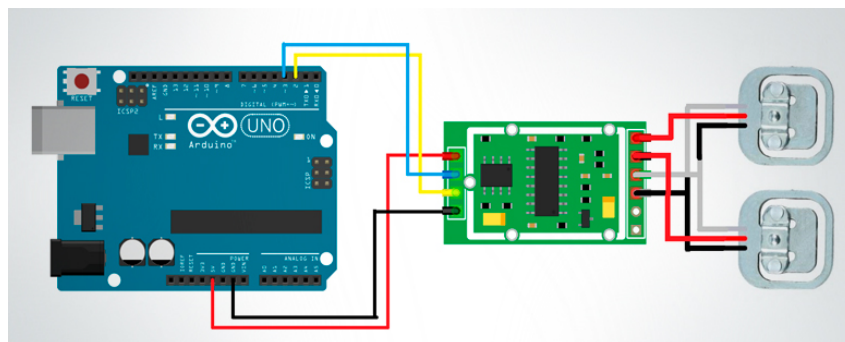


Figura 14 – Representação esquemática da montagem do sistema

Fonte – [8]

A figura 14 apresenta o modelo esquemático final da montagem do equipamento, onde são necessários dois códigos de programação para que o sistema funcione, o primeiro realiza a calibragem das células de carga e o outro apresenta resultados; assim, o fluxograma da figura 15 apresenta o esquema para realizar a calibragem e efetuar a pesagem com o sistema de células de carga.

Primeiro passo é colocar um peso conhecido sobre as células de carga e após calibrar o algoritmo para que ele apresente, no monitor serial, valores próximos do conhecido. a seguir, será gerado um fator de calibração que deverá ser inserido no segundo código, que irá realizar as medições e apresentar os resultados para o usuário. Ambos os códigos estão disponíveis de maneira gratuita na internet [9].

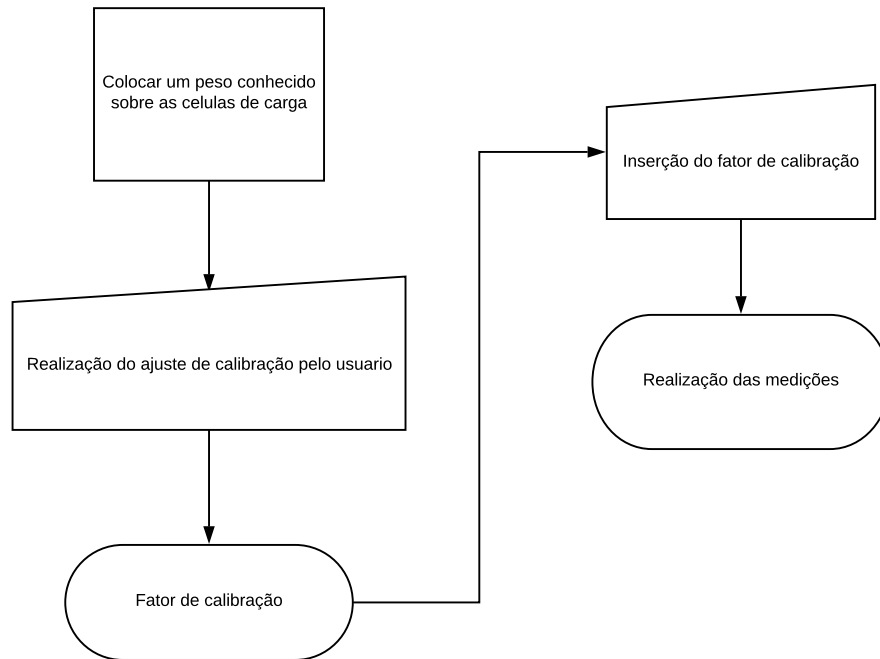


Figura 15 – Fluxograma representando os algoritmos de calibragem e pesagem

Fonte – Próprios autores

Para se confirmar a precisão pode-se comparar os resultados dos ensaios realizados pela máquina projetada com resultados de testes de mesma natureza realizados em máquinas de ensaio já calibradas e certificadas.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma máquina de ensaio de tração com baixo custo. Além de ter um orçamento reduzido para sua elaboração, traz também uma contribuição para o campus já que a máquina será utilizada pelos alunos do mesmo.

Após a escolha do modelo de máquina que seria desenvolvido, foi visto a necessidade da realização de um estudo sobre os ensaios de tração, funcionamento e como os corpos de prova são fixados. Os estudos sobre ensaios de tração são importantes, pois sabendo como o mesmo é realizado, pode-se dimensionar a máquina e quais materiais serão utilizados em sua construção.

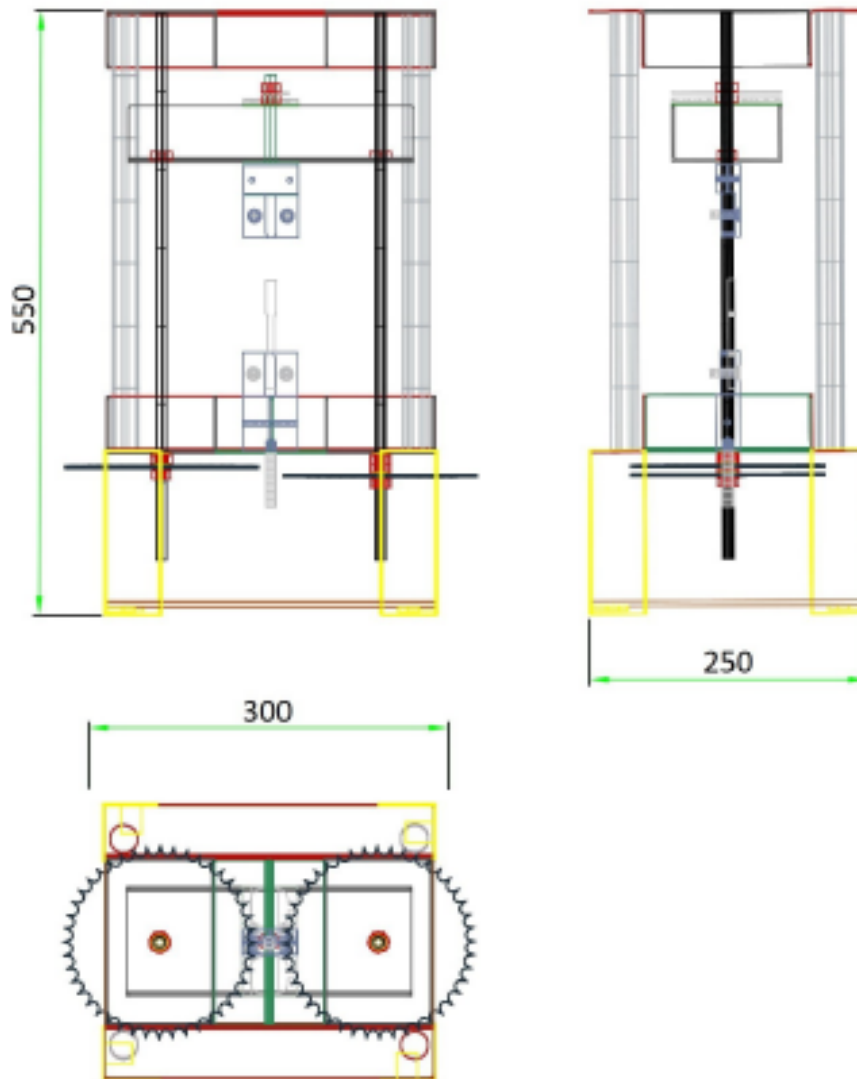
A dificuldade identificada, a princípio, foi de como decidir as dimensões e quais materiais seriam utilizados. Para minimizar os custos, o grupo realizou algumas pesquisas para selecionar o modelo mais viável economicamente para ser projetado. Ao final, o grupo conseguiu utilizar algumas peças metálicas compradas em ferro velho, e com boa qualidade; sendo necessário apenas a preparação das mesmas. Foi necessário também algumas soldas durante a montagem, extinguindo custos com usinagem, e evitando o uso de fixadores onde possível.


Ao final o trabalho aqui proposto cumpriu o seu objetivo principal, o de construir uma máquina de ensaio de tração com baixo custo, explicando como o ensaio é realizado, qual a carga suportada, com a máquina feita em estrutura metálica, com motor e os componentes para a aquisição de dados do ensaio.

REFERÊNCIAS

- 1 CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Unico. Citado 5 vezes nas páginas 5, 6, 8, 10 e 15.
- 2 SHIMADZU. *Máquina de ensaios estática AG-X Plus*. 2018. Disponível em: <<http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/test/estaticas/servo-eletricas/ag-x.shtml>>. Acesso em: 25 de setembro de 2018. Citado na página 7.
- 3 OTANI, L. B. et al. *Caracterização dos módulos elásticos de compósitos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso*. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276289024_Caracterizacao_dos_modulos_elasticos_de_compositos_utilizando_a_Tecnica_de_Excitacao_por_Impulso>. Acesso em: 7 de março de 2018. Citado na página 9.
- 4 SOARES, P. *AÇOS - Características, tratamentos*. 6. ed. Porto: Publindústria, 2009. Citado na página 9.
- 5 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Citado na página 14.
- 6 NORTON, R. L. *Projeto de máquinas*. 4. ed. São Paulo SP: Bookman, 2013. Unico. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- 7 HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo SP: Pearson Education do Brasil Ltda, 2010. Unico. Citado na página 19.
- 8 ELETRÔNICA, B. da. *Ligação do Arduino,-Módulo HX711 e Células de Carga*. 2018. Disponível em: <<http://blog.baudaeletronica.com.br/conversor-hx711-para-balanca-eletronica/ligacao-do-arduino-modulo-hx711-e-celulas-de-carga/>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2018. Citado na página 22.
- 9 SEIDLE, N. *Arduino Bathroom Scale With 50 Kg Load Cells and HX711 Amplifier*. 2014. Disponível em: <<https://www.instructables.com/id/Arduino-Bathroom-Scale-With-50-Kg-Load-Cells-and-H/>>. Acesso em: 12 de novembro de 2018. Citado na página 23.
- 10 STEWART, J. *Cálculo 2*. 8. ed. [S.l.]: Cengage learning, 2017. v. 2. Nenhuma citação no texto.
- 11 SOUZA, S. A. de. *ENSAIOS MECÂNICOS DE MATERIAIS METÁLICOS: fundamentos teóricos e práticos*. 5. ed. [S.l.]: Edgard Blucher Ltda, 1982. Unico. Nenhuma citação no texto.
- 12 ALBUQUERQUE, O. A. L. P. *Dinâmica das máquinas*. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1974. Unico. Nenhuma citação no texto.

ANEXO A – DESENHO TÉCNICO DA MÁQUINA DE ENSAIO



 INSTITUTO FEDERAL Minas Gerais	Projeto: Máquina de ensaio de tração			
	Desenho: Desenho Técnico			
	Nº Fabricante:	Projetado por: Grupo TAI 4	Folha: Única	
	Nº Cliente:	Verificado por: Grupo TAI 4	Unidade de medida: Milímetro (mm)	
Data: 04/12/2018	Aprovado por:	Firmado:		

ANEXO B – CRONOGRAMA

Id	Modo da Tarefa	Nome da Tarefa	Duração	Início	Término	Predecessoras	Agosto 2018	Setembro 2018	Outubro 2018	Novembro 2018	Dezembro 2018
1	Tarefa	Pesquisa e desenvolvimento	88 dias	Seg 06/08/18	Qua 05/12/18		29 03 08 13 18 23 28 02 07 12 17 22 27 02 07 12 17 22 27 01 06 11 16 21 26 01 06 11 16				
2	Tarefa	Dimensionamento estrutural	31 dias	Seg 03/09/18	Seg 15/10/18						
3	Tarefa	Accionamento (Fusos, motor, transmissão)	31 dias	Seg 03/09/18	Seg 15/10/18						
4	Tarefa	Busca por peças	67 dias	Seg 03/09/18	Ter 04/12/18						
5	Tarefa	Montagem	47 dias	Seg 08/10/18	Ter 11/12/18						
6	Tarefa	Coletores de dados	24 dias	Qua 10/10/18	Sáb 10/11/18						
7	Tarefa	Modelagem matemática	81 dias	Seg 06/08/18	Sáb 24/11/18						
8	Tarefa	Desenvolvimento do relatório	88 dias	Seg 06/08/18	Qua 05/12/18						

<p>Projeto: Projeto da máquina de Data: Qua 05/12/18</p>	<p>Tarefa</p> <p>Resumo Inativo</p> <p>Divisão</p> <p>Tarefa Manual</p> <p>Marco</p> <p>Somente duração</p> <p>Resumo do projeto</p> <p>Acúmulo de Resumo Manual</p> <p>Tarefa Inativa</p> <p>Resumo Manual</p> <p>Marco Inativo</p> <p>Somente início</p> <p>Somente término</p> <p>Tarefas externas</p> <p>Marco externo</p> <p>Data limite</p> <p>Andamento</p> <p>Progresso manual</p>
--	--

ANEXO C – CÓDIGO DE CALIBRAGEM

```

#include "HX711.h"
//You must have this library in your arduino library folder

#define DOUT  A1
#define CLK   A2

HX711 scale(DOUT, CLK);

//Change this calibration factor as per your load cell once it
//is found you many need to vary it in thousands
float calibration_factor = -96650;
//setup
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711_Calibration");
  Serial.println("Remove_all_weight_from_scale");
  Serial.println("After_readings_begin, place_known_weight_on_scale");
  Serial.println("Press_a,s,d,f_to_increase_calibration_factor_by_10");
  Serial.println("Press_z,x,c,v_to_decrease_calibration_factor_by_10");
  Serial.println("Press_t_for_tare");
  scale.set_scale();
  scale.tare(); //Reset the scale to 0

  long zero_factor = scale.read_average();
  Serial.print("Zero_factor:");
  Serial.println(zero_factor);
}

// LOOP
void loop() {

delay(200);

  scale.set_scale(calibration_factor); //calibration factor

```

```
Serial.print("Reading:␣");
Serial.print(scale.get_units(), 3);
Serial.print("␣kg");
Serial.print("␣calibration_factor:␣");
Serial.print(calibration_factor);
Serial.println();

if(Serial.available())
{
  char temp = Serial.read();
  if(temp == '+' || temp == 'a')
    calibration_factor += 10;
  else if(temp == '-' || temp == 'z')
    calibration_factor -= 10;
  else if(temp == 's')
    calibration_factor += 100;
  else if(temp == 'x')
    calibration_factor -= 100;
  else if(temp == 'd')
    calibration_factor += 1000;
  else if(temp == 'c')
    calibration_factor -= 1000;
  else if(temp == 'f')
    calibration_factor += 10000;
  else if(temp == 'v')
    calibration_factor -= 10000;
  else if(temp == 't')
    scale.tare(); //Reset the scale to zero
}
}
//
```