

---

---

# PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA ELETROMECÂNICA DE ENSAIO DE TRAÇÃO MINIATURIZADA

---

---

UM PROJETO DESENVOLVIDO PELO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA PUC-RIO

RIO DE JANEIRO, 03 DE DEZEMBRO DE 2015

ESCRITO POR

RULLIANE DOS SANTOS GONÇALVES

ORIENTADA POR

JAIME TUPIASSÚ PINHO DE CASTRO

*Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*

## Agradecimentos

Primeiramente à Deus, que permitiu a conclusão desta etapa. À minha mãe que, incansavelmente, batalhou para tornar possíveis todas as etapas da minha educação; que me deu sempre todo o amor que precisava e me ensinou a não desistir. À minha melhor amiga: minha irmã, que está e esteve sempre ao meu lado em todos os momentos da vida e sempre incentivou a busca pelo conhecimento. Às minhas amadas sobrinhas, Duda e Giovanna, que encheram minha vida de amor, tornando tudo mais fácil e trazendo alegria aos dias difíceis. Ao meu amado companheiro, Eduardo, que me apoiou nos momentos mais difíceis deste jornada e que, acima de tudo, sempre acreditou em mim, agradeço por todo o amor, paciência e dedicação. À minha amada avó (in memoriam), de quem sempre recebi amor incondicional. Ao meu irmão, primos, tios e toda minha família, que sempre me apoiaram, acreditando que esta data chegaria. À Vivian Suzano, por toda a imensa dedicação, paciência e ajuda durante grande parte da graduação, incluindo este trabalho. Aos amigos da Equipe Reptiles Baja PUC-Rio, por todo o aprendizado e companheirismo que levarei por toda a vida. Aos amigos do CPTI, pelo companheirismo e por serem sempre tão solícitos e disponíveis para questionamento e dúvidas. Ao professor José Paulo Silva de Paula, pela dedicação e atenção durante a graduação e imensa ajuda durante a execução deste trabalho. Ao professor Pedro Paulo Almeida, pela disponibilização do maquinário para usinagem e André pela execução da mesma. Aos amigos da Pastoral PUC-Rio, pelos momentos que, sem dúvida alguma, tornaram mais agradável este período. Finalmente, ao professor orientador deste trabalho e exemplo, Jaime Tupiassú Pinho de Castro, por todo o aprendizado, dedicação, disponibilidade e confiança.

## Sumário

Neste trabalho serão abordadas as fases de projeto mecânico e consecutiva construção de protótipo de uma máquina eletromecânica de ensaio de tração, miniaturizada, a ser utilizada posteriormente para testes de tração e compressão em corpos de prova. Será utilizado o modelo de pórtico acionado por macaco eletromecânico com fuso de esferas recirculantes e movimento axial, com travessão e mesa imóveis. No desenho aqui apresentado, o travessão da máquina será fixo às colunas com parafusos por interferência e o movimento axial do fuso da unidade de levantamento é que tracionará, de fato, o corpo de prova.

Será descrito, primeiramente, um modelo simplificado de pórtico, seguido por um desenvolvimento de análise de esforços intrínsecos ao funcionamento do sistema, em carga máxima de operação. A validação do projeto se dará, então, através de análise e simulação computacional de elementos finitos. Por fim, será abordado o processo de construção e testes do protótipo, que deve se manter dentro das especificações de rigidez e deformação determinadas.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Principais Componentes . . . . .	1
1.2	Objetivo . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Modelo Analítico Estrutural Simplificado</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento do Projeto</b>	<b>8</b>
3.1	Componentes da Estrutura em Pórtico . . . . .	8
3.1.1	Travessão e Mesa de Reação . . . . .	8
3.1.2	Colunas de Sustentação . . . . .	9
3.2	Parafusos . . . . .	12
3.2.1	Carga de Ruptura por Tração, de Escoamento e de Prova . . . . .	13
3.2.2	Número Mínimo de Filetes Ativos . . . . .	15
3.2.3	Pré-carga nos Parafusos . . . . .	15
3.3	Componentes Não Estruturais . . . . .	18
3.3.1	Unidade de Levantamento . . . . .	18
3.3.2	Célula de Carga . . . . .	18
3.3.3	Motor Mobilizador da Unidade de Levantamento . . . . .	19
3.3.4	Acionamento do Motor . . . . .	20
3.3.5	Adaptadores . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Análise Estrutural</b>	<b>23</b>
4.1	Análise de Tensões e Deformações . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Construção do Protótipo</b>	<b>26</b>
5.1	Processos de Fabricação . . . . .	28
5.2	Corpos de Prova . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>33</b>



<b>Referências</b>	<b>35</b>
<b>A Desenhos de Fabricação</b>	<b>36</b>
A.1 Travessão . . . . .	36
A.2 Mesa de Reação . . . . .	37
A.3 Colunas de Sustentação . . . . .	38
A.4 Adaptador: Célula de Carga – Garra . . . . .	39
A.5 Adaptador: Motor – Unidade de Levantamento . . . . .	40
A.6 Corpo de Prova segundo ASTM E8 . . . . .	41
<b>B Datasheet Unidade de Levantamento</b>	<b>42</b>
<b>C Datasheet Célula de Carga</b>	<b>44</b>
<b>D Datasheet Motor</b>	<b>46</b>
D.1 Datasheet Driver do Motor . . . . .	48
<b>E Código Arduino UNO</b>	<b>50</b>
<b>F Orçamento</b>	<b>52</b>
F.1 Unidade de Levantamento . . . . .	52
F.2 Colunas de Sustentação . . . . .	53
F.3 Material para Mesa e Travessão . . . . .	54
F.4 Material para adaptadores . . . . .	55
F.5 Célula de Carga . . . . .	56
<b>G Programa MATLAB – Dimensionamento dos Parafusos</b>	<b>57</b>

## Índice de Figuras

1	Principais componentes presentes em uma máquina de ensaio de tração/compressão em pórtico. . . . .	2
2	Princípio de funcionamento do macaco mecânico utilizado – Referência [3]. . . . .	4
3	Modelo estrutural em pórtico a ser utilizado. . . . .	5
4	Modelo analítico estrutural simplificado. . . . .	6
5	Modelos finais. . . . .	10
6	Curva de Euler para $C=1$ , referência [3]. . . . .	11
7	Especificações de rosca – referência [3]. . . . .	14
8	Tipos de célula de carga considerados para o projeto. . . . .	19
9	Motor de passo e redução utilizados. . . . .	20
10	Driver de motor utilizado. . . . .	20
11	Ligação Arduino – Driver – Motor. . . . .	20
12	Arduino utilizado. . . . .	21
13	Ligação teste. . . . .	21
14	Adaptadores desenvolvidos para o projeto. . . . .	22
15	Malha para simulação. . . . .	23
16	Condições de contorno e carregamentos para simulação. . . . .	24
17	Deformação sentida pela estrutura. . . . .	25
18	Tensões sentidas pela estrutura e fator de segurança do modelo. . . . .	26
19	Materiais adquiridos para construção do protótipo. . . . .	27
20	Material para travessão durante processo de aplainamento. . . . .	28
21	Marcação de centros dos furos no travessão. . . . .	29
22	Travessão em fase de finalização. . . . .	30
23	Padrão para o corpo de prova plano – Referência [5]. . . . .	31
24	Modelo de Corpo de Prova em Solidworks. . . . .	32
25	Alguns corpos de prova fabricados . . . . .	32

## Índice de Tabelas

1	Dimensões dos Membros Estruturais . . . . .	7
2	Constantes $C$ de Condições de Contorno para Colunas . . . . .	10
3	Propriedades Mecânicas de Parafusos Métricos . . . . .	13
4	Fatores de $\kappa$ para cálculo de força de pré-carga – Referência [1]. . . . .	16
5	Dimensões dos corpos de prova – Referência [5]. . . . .	31
6	Custos do projeto. . . . .	34

## 1 Introdução

Máquinas de ensaios mecânicos de materiais são amplamente utilizadas – e necessárias – na indústria, objetivando as mais diversas aplicações para os resultados colhidos. Testar os materiais – ou pequenas montagens – sob diferentes situações tem grande importância, pois inúmeras vezes estes são encontrados fora de condições normais de aplicação como no ar e à temperatura ambiente.

Ensaio de tração e compressão são testes em que um corpo de prova é submetido à tensão controlada, até que ocorra a falha desejada – geralmente, até a fratura. São úteis, por exemplo, para obtenção de limites de tensão admissíveis para determinado material, considerando um corpo de prova padronizado, além de curvas  $\sigma \times \varepsilon$  sob condições específicas – como tensão aplicada sob corrosão. O primeiro equipamento para esse tipo de teste surgiu por volta de 1870, idealizado por Tinius Olsen, solicitado por seus empregadores para desenvolver uma máquina que os permitisse testar a resistência de alguns componentes industriais. Alguns anos depois, em 1946, foi fundada a *Instron*<sup>®</sup> por Harold Hindman e George Burr, sendo hoje uma das líderes em máquinas para esses e outros tipos de ensaios mecânicos, juntamente com a *MTS*<sup>®</sup>. Inicialmente, os primeiros pesquisadores e desenvolvedores desse tipo de equipamento foram motivados pela necessidade de testes confiáveis o suficiente para suas aplicações. Hoje, com os diversos modelos disponíveis, essa necessidade foi suprida, porém não sem o aparecimento de uma nova: um equipamento que atende, além de um projeto simples e confiável, **baixo custo** de fabricação e comercialização. Nesse trabalho será abordada esta idéia.

### 1.1 Principais Componentes

Alguns componentes são comuns aos diferentes tipos de modelo de máquinas de ensaio de tração/compressão existentes, salvo algumas poucas e não muito expressivas variações, observadas principalmente em geometria e dimensionamento de projeto. Tais componentes principais estão listados a seguir e exemplificados na Figura 1:

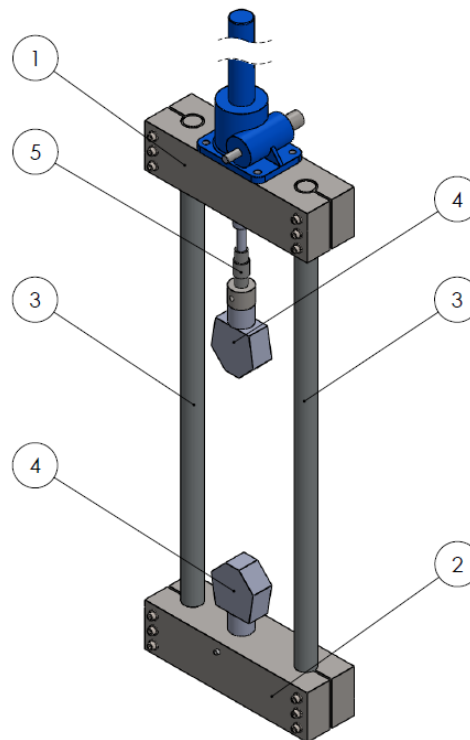


Figura 1: Principais componentes presentes em uma máquina de ensaio de tração/compressão em pórtico.

1. Travessão;
2. Mesa;
3. Colunas para sustentação;
4. Garras de fixação de corpo-de-prova;
5. Célula de carga.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é o projeto mecânico, construção do protótipo e controle de funcionamento de uma máquina de ensaio de tração miniaturizada e de baixo custo. Neste relatório será descrito todo o processo de idealização, dimensionamento e construção de tal equipamento. O protótipo construído terá capacidade máxima de 5 toneladas – aproximadamente 50 kN – sendo toda a estrutura de reação dimensionada a fim de que impossibilite o surgimento de deflexões com

ordem de grandeza superior a  $10^{-3} \text{ mm}$ . Vale ressaltar que uma máquina deste tipo deve ser projetada com foco em sua rigidez, e não em sua resistência.

A unidade de levantamento utilizada no protótipo, melhor descrita posteriormente neste relatório, será eletromecânica com acionamento por esferas recirculantes e fuso de movimento axial, uma boa opção quando se deseja aplicar grandes forças axiais, cujo princípio de funcionamento pode ser observado na Figura 2. O protótipo final não será adequado à utilizações em que se façam necessárias altas velocidades e frequências de movimento. Por outro lado, será possível fazer com que a movimentação seja tão lenta quanto desejado e, assim, teremos um protótipo extremamente adequado à operação em velocidades de elevação muito baixas – como, por exemplo, ensaios de tração visando observar o comportamento do material sujeito à tensão sob corrosão. Testes dessa natureza têm as mais diversas aplicações, tais qual análises do comportamento mecânico dos materiais a serem utilizados na fabricação de equipamento submarino.

Além disso, sendo a máquina aqui tratada idealizada para ter peso e dimensões reduzidos e baixo custo, ela será muitíssimo adequada ao ambiente acadêmico, pois tornará possível, por exemplo, a realização de ensaios de tração e compressão em sala de aula.

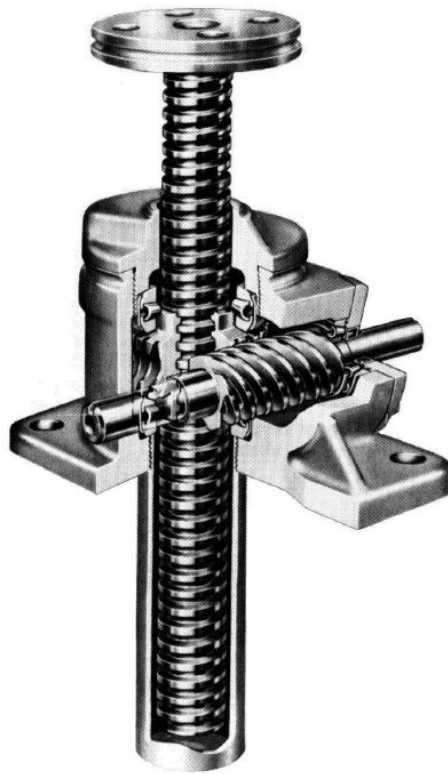


Figura 2: Princípio de funcionamento do macaco mecânico utilizado – Referência [3].

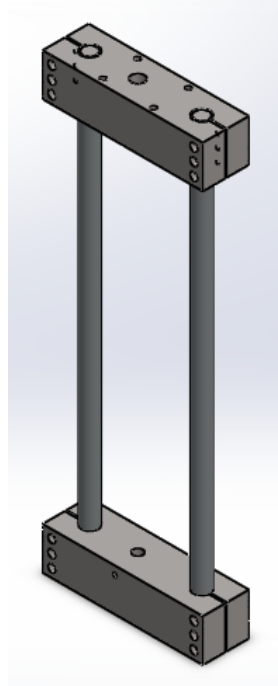


Figura 3: Modelo estrutural em pórtico a ser utilizado.

## 2 Modelo Analítico Estrutural Simplificado

Primeiramente será analisado o modelo estrutural mostrado na Figura 4, um modelo simplificado da estrutura final em pórtico mostrada na Figura 3. Nesse momento, será considerada a estrutura principal de pórtico biapoiada, com movimento horizontal livre em uma das extremidades da mesa de reação. A carga considerada será a máxima, de 50 kN, concentrada no centro do travessão. Além disso, será assumida a pior das hipóteses de arranjo estrutural – travessão posicionado na altura máxima, deixando um vão livre vertical de 1.22 m.

Sendo assim, é possível afirmar que os maiores deslocamentos dentro do sistema ocorrerão na região central do travessão e da mesa de reação que, inicialmente, serão aproximados a uma viga biapoiada. Como proposto por Young e Budynas [4], o deslocamento máximo em uma viga biapoiada é expresso pela equação (1):

$$\delta = \frac{P L^3}{48 E I} \quad (1)$$

Onde  $P$  é a carga aplicada,  $L$  é a distância entre os apoios,  $E$  é o módulo de elasticidade do material e  $I$  é o momento de inércia da barra onde está sendo aplicada a carga.



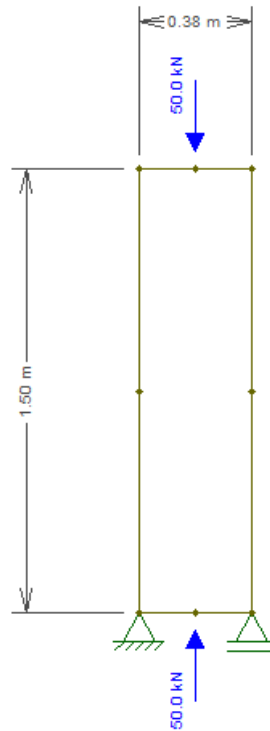


Figura 4: Modelo analítico estrutural simplificado.

No que se refere às propriedades do material utilizado, o único parâmetro que é levado em consideração na equação (1) é o módulo de elasticidade – o que é natural, já que máquinas desse tipo são projetadas à rigidez. Sendo assim, como este parâmetro não varia para os diferentes tipos de aço, será utilizado no projeto o AISI 1020, por sua ampla utilização na indústria, fácil acesso e baixo custo, devido à baixa concentração de carbono e ausência de metais de liga. Foi considerada também a utilização de ligas nobres de alumínio – o que diminuiria consideravelmente o peso do equipamento, porém aumentaria muito o seu custo. Como já foi dito, minimizar os custos é uma das principais idealizações deste projeto.

Dessa maneira, para otimização do protótipo no que diz respeito ao deslocamento máximo equacionado acima, foi alterada a geometria dos componentes – mesa e travessão – visando encontrar a melhor relação possível que maximize o momento de inércia  $I$  e minimize o vão livre  $L$  (desde que este continue viável à operação da máquina). Como mencionado anteriormente, o critério é que o deslocamento máximo não passe da ordem de grandeza de  $10^{-3} \text{ mm}$ . Visando minimizar custo e facilitar o processo de compra de material e fabricação, foi definido que mesa e

Tabela 1: Dimensões dos Membros Estruturais

Número	Membro	Seção Transversal Reta	Dimensões	Unidades
1	Travessão	Retangular	152.4 x 140	mm
2	Mesa de Reação	Retangular	152.4 x 140	mm
3	Colunas	Circular	55	mm

travessão tivessem as mesmas dimensões principais.

No que diz respeito às colunas de sustentação do pórtico, sabe-se que os modelos comerciais *Instron*<sup>®</sup> de capacidade máxima similar têm diâmetro de, em média, 80 mm. Por conseguinte, o diâmetro das colunas da máquina aqui idealizada pode ser consideravelmente abaixo desse valor, pois o vão livre e altura necessários à este projeto são menores. A Tabela 1 mostra as dimensões principais dos componentes, consideradas ótimas segundo essas análises. Vale ressaltar, mais uma vez, que a disponibilidade comercial foi fator crucial no dimensionamento dos componentes.

A partir dessas premissas, temos:

$$\delta = \frac{P L^3}{48 E I} = \frac{50000 \times 370^3}{48 \times 205000 \times 3,485 \times 10^7} = 7,4 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

O que indica que o modelo possivelmente está dentro da ordem de grandeza desejada para o deslocamento máximo. Com o modelo definido adiante, veremos que este simples cálculo inicial já fornece uma boa aproximação do valor real encontrado.

### 3 Desenvolvimento do Projeto

Os valores otimizados mostrados anteriormente possibilitam o dimensionamento dos componentes mecânicos necessários à máquina. A partir do projeto da estrutura, os componentes não estruturais serão definidos. Todo o projeto foi modelado no software *Solidworks*<sup>®</sup> e simulado em *ANSYS*<sup>®</sup>. Novamente, todas as definições de projeto foram feitas levando em consideração os seguintes itens, dispostos em ordem de relevância:

1. Baixo custo;
2. Peso reduzido;
3. Fácil acesso e disponibilidade comercial;
4. Fácil fabricação.

#### 3.1 Componentes da Estrutura em Pórtico

Os componentes estruturais do modelo de pórtico serão dimensionados a partir das dimensões otimizadas anteriormente e levando em consideração o baixo custo de fabricação e o alinhamento intrínseco da máquina: é desejável que esta não necessite de ajuste manual do usuário para o alinhamento tanto da aplicação de força sobre o corpo de prova, quanto dos furos para encaixe das colunas de sustentação. Isso garantirá que os corpos de prova serão carregados unicamente à tração ou compressão, sem a atuação de momentos parasitas.

##### 3.1.1 Travessão e Mesa de Reação

Para o desenvolvimento destes componentes, foi utilizada primeiramente a seção reta descrita na Tabela 1, com base de 6”(152,4 mm) e altura de 140 mm. A unidade de levantamento, tratada posteriormente neste relatório, tem largura de 155 mm e, por isso, buscou-se uma barra de seção retangular disponível à pronta entrega que mais se aproximasse a essa dimensão. A altura de 140 mm foi, também, a que mais se aproximou a altura mínima necessária para atender ao pré requisito de deslocamento máximo.

A fixação do travessão e mesa de reação às colunas, como já mencionado, será dada através de parafusos por interferência. Sendo assim, é necessário um espaço de, pelo menos, um diâmetro entre os furos de tais parafusos e as extremidades da barra. Além disso, para definir o comprimento das barras a serem utilizadas como mesa e travessão, também foi levado em consideração o vão livre de trabalho da máquina desejado. Após serem posicionados os demais componentes, foi definido que seria necessário um vão de 370 mm, o que nos leva a um comprimento final de 530 mm para essas barras.

Novamente, o posicionamento das colunas foi feito de modo à permitir espaço suficiente para os parafusos nas extremidades e vão livre central suficiente para manuseio de corpos de prova. Dois furos em cada componente, ajustados ao diâmetro das colunas, serão feitos num mesmo passe para assegurar a concentricidade. Além disso, um furo na região central do travessão é necessário para passagem do fuso da unidade de levantamento, ligeiramente maior que o diâmetro deste e também quatro furos roscados para fixação da unidade, cujo diâmetro foi definido pelo fabricante.

Na mesa deverá ser fixada a garra que prenderá o corpo de prova. Seguindo o método da *Instron*®, as garras serão presas à estrutura através de pinos. Sendo assim, na mesa da máquina aqui abordada existirá um furo ajustado ao diâmetro da garra e outro, perpendicular ao anterior, para a colocação do pino. A Figura 5 mostra como serão, finalmente, estes componentes. Os desenhos de fabricação se encontram nos apêndices A.1 e A.2 deste relatório. Pode-se observar, através dos desenhos de fabricação, que existem rebaixos para os parafusos laterais. Esta configuração foi escolhida para que não fosse necessária a utilização de parafusos especiais, de corpo muito longo, o que aumentaria muito o custo desses elementos. Com este mesmo propósito, definiu-se que a porção posterior do travessão e da mesa devem ser roscados, tornando desnecessário o uso de porcas que adicionariam custo e complexidade de montagem extras.

### 3.1.2 Colunas de Sustentação

Colunas são elementos estruturais verticais, sujeitos a esforços totalmente axiais. Para este tipo de componente estrutural, a falha à qual devemos atentar é a flambagem. Para uma aproximação inicial – que se mostrará suficiente devido à ordem de grandeza dos resultados – as

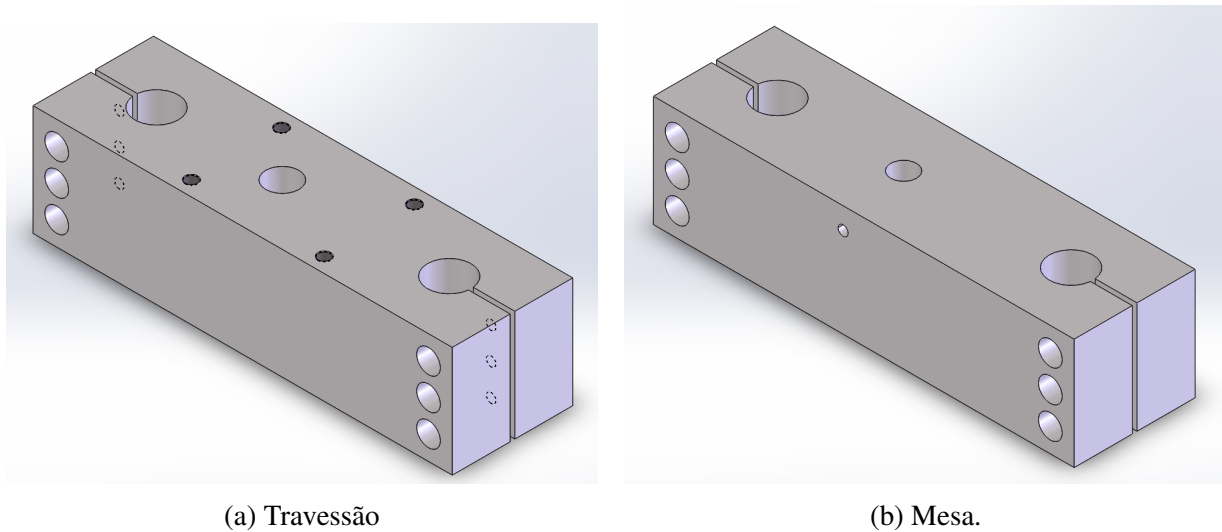


Figura 5: Modelos finais.

Tabela 2: Constantes  $C$  de Condições de Contorno para Colunas

Condição de Contorno	Valor Teórico	Valor Conservador	Valor Recomendado
Engastada-livre	1/4	1/4	1/4
Bi-apoiada	1	1	1
Engastada-apoiada	2	1	1.2
Bi-engastada	4	1	1.2

colunas aqui tratadas serão consideradas como submetidas a esforço axial aplicado nas extremidades e centralizado em seu diâmetro.

De acordo com Shigley [3], primeiramente deve-se classificar a coluna de acordo com sua fixação. Como se pode observar na Figura 3, considera-se que ambas as colunas sejam bi-engastadas. A Tabela 2, referência [3], mostra a constante  $C$ , que é diferente para cada tipo de fixação. Utilizaremos o valor recomendado de 1.2.

Em seguida, é preciso definir se a coluna em questão é considerada longa ou de comprimento intermediário para, então, definir o equacionamento correto. Para isso é necessário primeiro verificar o quão *esbelta* a coluna é – calcular a propriedade do termo em inglês *slenderness ratio*, que quantifica uma dimensão efetiva para a coluna. Essa propriedade é dada por  $l/k$ , onde  $l$  é o comprimento da coluna e  $k$  é o *raio de giro* que, por sua vez, quantifica a distribuição em área ao redor do eixo principal da coluna. A Figura 6, referência [3], mostra o termo de comparação  $(l/k)_1$



$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \frac{2 \pi^2 1.2 205000}{530} = 95.72$$

$$\frac{l}{k} = \frac{1220}{13.75} = 88.72$$

Portanto, temos  $l/k < \left(\frac{l}{k}\right)_1$  e a carga crítica  $P_{cr}$  que causa flambagem na coluna é dada pela equação (4), de acordo com Shigley [3].

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \left(\frac{S_y}{2\pi} \frac{l}{k}\right)^2 \frac{1}{C E} \quad (4)$$

Substituindo os valores nesta equação, temos que a carga crítica de flambagem para as colunas da estrutura de pórtico é de, aproximadamente, 718 kN. A máquina aqui tratada terá capacidade máxima de 50 kN, de acordo com a capacidade da unidade de levantamento utilizada no protótipo. Assim sendo, as colunas utilizadas de 55 mm de diâmetro e 1500 mm de comprimento serão mais do que suficientes para perfeita operação da máquina, além de possível adaptação às versões futuras de maior capacidade. O desenho de fabricação dessas colunas encontra-se no apêndice A.3 deste relatório.

### 3.2 Parafusos

Foram utilizados neste projeto dois parafusos diferentes: 4 unidades de M16 para fixação do macaco no travessão e 12 unidades de M12 para fixação de travessão e mesa nas colunas, ambos com rosca grossa de passo 1.75. Quanto à fixação do macaco, seguimos a especificação do fabricante. Já para o restante dos parafusos, uma análise prévia de tensões se faz necessária.

Além de seu dimensional, o material do qual é feito o parafuso obviamente tem enorme influência sobre suas propriedades mecânicas. Para parafusos métricos existem várias classes de resistência padrão, que dependem do limite de resistência do material ( $S_R$ ) e da razão entre seu limite de escoamento e de resistência ( $S_E/S_R$ ). Para a classe 12.9 – escolhida para este projeto por sua alta resistência e por, após extensa pesquisa, não apresentar custo muito alto – temos

Tabela 3: Propriedades Mecânicas de Parafusos Métricos

Classe	Tamanho	Resistência de Prova [MPa]	Resistência de Escoamento [MPa]	Resistência Ruptura [MPa]	Material
4.6	M5 - M36	225	240	400	aço carbono
4.8	M1.6 - M16	310	340	420	aço carbono
5.8	M5 - M24	380	420	520	aço carbono encruado
8.8	M16 - M36	600	660	830	aço carbono T&R
9.8	M1.6 - M16	650	720	900	aço carbono T&R
10.9	M5 - M35	830	940	1040	liga baixo carbono T&R
12.9	M1.6 - M36	970	1100	1220	liga T&R

que  $S_R > 1200 \text{ MPa}$ , com  $S_E \cong 0.9 S_R$ , como mostra a Tabela 3, de acordo com a referência [3]. Na mesma tabela, temos a Resistência de prova, que é definida pela carga mínima necessária para se ter uma deformação plástica residual de  $\varepsilon = 100 \mu\text{m}/\text{m}$  e a de escoamento, associada a uma deformação residual de  $\varepsilon = 200 \mu\text{m}/\text{m}$ . De todo modo, a escolha da classe 12.9 também possibilita a utilização de um parafuso de menor diâmetro quando comparado às classes inferiores, outra vantagem de projeto. A resistência de ruptura maior que 1200 MPa referente à esta classe pode ser alcançada, por exemplo, com a utilização de aço AISI 4340 ou 5130, após tratamento de têmpera e revenimento em óleo, como mostrado também na Tabela 3.

### 3.2.1 Carga de Ruptura por Tração, de Escoamento e de Prova

Partindo das premissas anteriores, são realizáveis os cálculos necessários para descobrir as cargas admissíveis aos elementos escolhidos. Seja mostrada, primeiramente, a Figura 7 que apresenta as dimensões principais de um parafuso (referência [3]): diâmetro máximo  $d$ , diâmetro mínimo  $d_{min}$ , passo  $P$  e diâmetro de passo  $d_P$ . Como podemos ver, o diâmetro máximo é o diâmetro externo da rosca e o mínimo, analogamente, é o menor diâmetro (no pé da rosca). O diâmetro de passo está imaginariamente localizado entre estes dois anteriores, enquanto o passo é a distância entre dois filetes de rosca. A partir destes, podemos então definir uma importante propriedade do parafuso que é o diâmetro resistente, dimensão levada efetivamente em consideração no momento do cálculo de tensão axial atuando no parafuso.



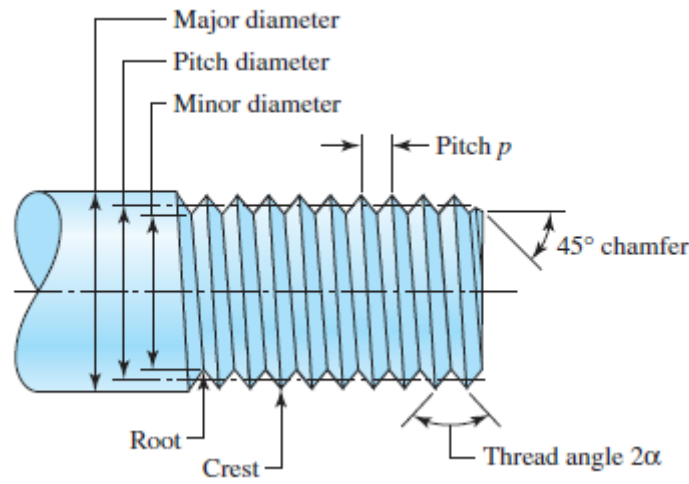


Figura 7: Especificações de rosca – referência [3].

$$d_P = d - 3\sqrt{3}/8 P = d - 0.650 P \quad (5)$$

$$d_{min} = d - 1.227 P \quad (6)$$

$$d_{res} = \frac{d_P + d_{min}}{2} = d - 0.938 P = 10.3585 \text{ mm} \quad (7)$$

Com isso, portanto, calcula-se a força totalmente axial  $F_R$  que rompe o parafuso por tração, sendo  $S_R$  o limite de resistência à ruptura mostrado na Tabela 3 e considerando um parafuso de rosca grossa, classe 12.9, M12 x 1.75. Além disso, é possível calcular também o limite de resistência de prova e de escoamento do parafuso, definidos pela carga que deixa no parafuso uma deformação residual de  $100 \mu\text{m}/\text{m}$  e  $200 \mu\text{m}/\text{m}$ , respectivamente.

$$F_R = S_R \frac{\pi d_{res}^2}{4} \cong 102.8 \text{ kN} \quad (8)$$

$$F_{esc} = \frac{(d_{res}^2 \cdot \pi \cdot S_{esc})}{4} \cong 92.7 \text{ kN} \quad (9)$$

$$F_{prova} = \frac{(d_{res}^2 \cdot \pi \cdot S_{prov})}{4} \cong 81.7 \text{ kN} \quad (10)$$

### 3.2.2 Número Mínimo de Filetes Ativos

A carga de ruptura por cisalhamento de rosca para o parafuso na especificação escolhida é de 65.2 kN, de acordo com a referência [3], um valor bem menor que a carga de ruptura axial. Portanto uma boa prática de engenharia, além disso, é calcular o mínimo de filetes ativos necessários ( $\alpha$ ) para que o parafuso utilizado rompa por **tração** e não por corte de rosca. Tais cálculos são mostrados a seguir.

$$\begin{aligned}\alpha &> \frac{\sqrt{3} (d - 0.938P)^2}{4 (d - 1.23P) P} \\ &= \frac{\sqrt{3} (12 - 0.938 \times 1.75)^2}{4 (12 - 1.23 \times 1.75) 1.75} \cong 2.7\end{aligned}$$

Por conseguinte, precisaremos de no mínimo 2.7 filetes ativos para que os parafusos M12 utilizados para fixação do travessão e da mesa de reação nas colunas não rompam por cisalhamento de rosca antes da ruptura por tração. Esse valor será facilmente alcançado devido às dimensões utilizadas neste projeto.

### 3.2.3 Pré-carga nos Parafusos

É preciso atentar também à pré-carga dada aos parafusos, para garantir um bom funcionamento da estrutura. A assumpção inicial a ser tomada é que a força de pré-carga que atua sobre a junta aparafusada,  $F_p$ , está diretamente ligada ao torque de aperto  $T$ . Chamando de  $D$  o diâmetro do parafuso – no caso, 12 mm – sendo assim usual estimar tal força de pré-carga pela equação a seguir – considerando uma confiabilidade de 50%, como abordado em seguida – de acordo com a referência [1].

$$F_p = \frac{5T}{d} \quad (11)$$

Todavia,  $F_p$  depende não tão somente do torque de aperto, mas também do atrito entre filetes de rosca do parafuso e do corpo roscado – os quais podem oscilar muito. Dessa forma, deve tratar-se  $F$  como uma variável *aleatória*, e não determinística. Iremos então implementar nos cálculos questões estatísticas aplicáveis, de confiabilidade. Determinaremos aqui um modelo ini-

Tabela 4: Fatores de  $\kappa$  para cálculo de força de pré-carga – Referência [1].

Confiabilidade R %	$z_R$	$\kappa_R$ Com Lubrif.	$\kappa_R$ Sem Lubrif.
90	-1.282	4.4	4.0
99	-2.326	4.0	3.3
99.9	-3.090	3.6	2.7

cial no qual  $F(T)$  é descrita por uma gaussiana, distribuição que em geral caracteriza fenômenos dispersos contínua e simetricamente com relação à média. Sendo o torque  $T$  e o diâmetro  $d$  determinísticos nos testes, toda a dispersão de  $F(T)$  pode ser então quantificada por uma *constante de confiabilidade*,  $\kappa_R$ , sendo  $R$  a confiabilidade de referência:

$$\kappa_R = \kappa_{50}(1 + z_R V) \quad (12)$$

Onde, para roscas lubrificadas,  $V_{lub} \cong 0.09$  e para roscas não lubrificadas  $V_{nlub} \cong 0.15$  – ainda maior, como esperado – e  $\kappa_{50}$  correspondente a uma confiabilidade de 50%. Além disso,  $z_R$  é uma variável normal normalizada, mostrada na Tabela 4, que relaciona esta com  $\kappa_R$  e a confiabilidade desejada para os cálculos. Partindo desses princípios tem-se, finalmente, uma melhor equação para representar a força de pré-carga devido ao torque  $T$ , mostrada na equação (13):

$$F_p = \frac{\kappa_R T}{d} \quad (13)$$

Em uma análise inicial ainda a ser validada, utilizaremos uma força de pré-carga menor que a carga de prova (Tabela 3) do parafuso escolhido, pois não é desejado que exista deformação residual alguma. Foi definida a pré-carga como 80% da carga de prova – ou seja, aproximadamente 87.76 kN, referente à uma tensão de 776 MPa. Para 90% de confiabilidade, considerando que inicialmente seriam produzidas algumas dezenas da máquina, teremos  $\kappa_{90} = 4$ . O torque de aperto necessário para gerar essa força é calculado a seguir.

$$T = \frac{87.76 \times 10^3 \times 0.012}{4} \cong 237.78 \text{ Nm} \quad (14)$$

Ou seja: garante-se que, com 90% de confiabilidade, aplicando torque de 237.78 Nm nos parafusos M12 x 1.75 sem lubrificação de rosca e de classe 12.9, teremos uma pré-carga de 87.76 kN. Todavia, devido ao alto grau de dispersão de  $F(T)$  já mencionado, o referido torque tem uma grande probabilidade de escoar alguns parafusos. Voltando o raciocínio, é possível encontrar a probabilidade da força gerada pelo torque de 237.78 Nm ser maior que a força de prova do parafuso, de acordo com [1].

$$\kappa_{rp} = \frac{F_{prova} \cdot d}{T} = 4.12 \quad (15)$$

$$\kappa_{rp} = \kappa_{50} \cdot (1 + Z_{rp} \cdot V_{nlub}) \quad (16)$$

Subsequentemente, temos que:

$$Z_{rp} = -1.944 \quad (17)$$

Permitindo-nos definir, então, que a probabilidade de ocorrer escoamento dos parafusos é de 97.4%. Este, obviamente, é um valor altíssimo e indesejável. Reduzindo então a força de pré-carga para 50% da carga de prova referente a este parafuso e repetindo os cálculos anteriores, obtem-se redução dessa probabilidade de escoamento para apenas 0.0189% dos parafusos, o que pode ser considerado um valor inexpressivo nas condições deste projeto. Todos os cálculos desta etapa foram realizados com auxílio da rotina *MATLAB*® desenvolvida para este projeto, que se encontra no Apêndice G deste relatório. Através do mesmo, pudemos observar também que a força de pré-carga e o torque relativos à essa probabilidade ínfima são de 40.9 kN e 148.62 Nm, respectivamente. Vale ressaltar que serão 3 parafusos em cada extremidade de fixação da mesa de reação e do travessão, aumentando em 3 vezes esses valores para os valores resultantes totais.

### 3.3 Componentes Não Estruturais

Estando definidos os componentes estruturais, foram então determinados o restante dos componentes necessários ao funcionamento do protótipo, sejam eles: célula de carga, unidade de levantamento e adaptadores necessários à montagem mecânica.

#### 3.3.1 Unidade de Levantamento

A unidade de levantamento aqui utilizada será um macaco mecânico de esferas recirculantes e fuso de movimento axial. A idéia principal, como dito anteriormente neste relatório, é que o travessão permaneça imóvel durante os ensaios. Nessa configuração, o macaco mecânico é que estará ligado diretamente à célula de carga – tratada a seguir – e será, então, o elemento que de fato tracionará o corpo de prova, sendo travessão, mesa e colunas a estrutura de reação para resistir aos esforços resultantes. Para a escolha da unidade dentre os modelos disponíveis no catálogo, teve grande peso o custo relacionado à capacidade máxima de carga que, diretamente, influencia na natureza dos testes que poderão ser realizados. As dimensões e capacidade desta unidade serviram de condições de contorno ao desenvolvimento dimensional do travessão. O desenho técnico da unidade se encontra no apêndice B deste relatório. Foi solicitado ao fabricante, também, um terminal especial roscado, para mais fácil adaptação à célula de carga.

#### 3.3.2 Célula de Carga

Definida a capacidade máxima de carga da máquina – 5 toneladas – buscou-se uma célula de carga que atendesse a essa especificação. Devido à maior facilidade de fixação e utilização, foram considerados dois tipos: células de carga em coluna e *donut*, ambos os tipos exemplificados nas Figuras 8a e 8b. O tipo mais indicado seria a célula de carga *donut*, por ter perfil mais baixo e, assim, permitir maior vão livre vertical. Entretanto, este modelo teria um custo muito mais alto – de 2 a 3 vezes mais alto – do que o de células em coluna. Por este motivo, determinou-se a utilização do modelo em coluna.

Tendo sido escolhida a célula de carga em coluna, foi feita uma extensa pesquisa levando em consideração, além do valor, o terminal de fixação. A célula escolhida dispunha, então, de dois

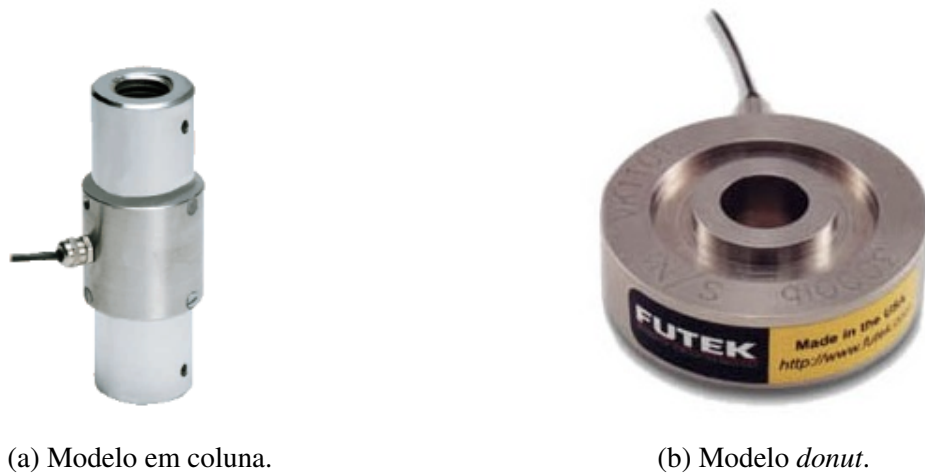


Figura 8: Tipos de célula de carga considerados para o projeto.

terminais roscados em ambas as extremidades. Dessa maneira, foi solicitado para a unidade de levantamento um terminal com a mesma especificação de rosca da célula, o que permitirá que o acoplamento entre estes dois componentes seja direto, simplificando a montagem da máquina.

A célula de carga utilizada aqui foi a mostrada na Figura 8a, cujo datasheet se encontra no apêndice C.

### 3.3.3 Motor Mobilizador da Unidade de Levantamento

Deseja-se que o acionamento da máquina seja realizado através de um motor elétrico. Foi escolhido para esta função um motor de passo, já que nesse tipo de motores tem-se conhecimento do *deslocamento* do eixo – e não apenas sua velocidade – o que facilitará o controle feito mais adiante. O motor e driver utilizados na construção do protótipo foram cedidos pelo núcleo de Engenharia Eletrônica do CPTI – Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção, empresa localizada na PUC-Rio, especializada em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para ensaios não destrutivos. Este componente é mostrado na Figura 9. Datasheet e desenho técnico de motor e driver (Figura 10) podem ser encontrados no Apêndice D.



Figura 9: Motor de passo e redução utilizados.

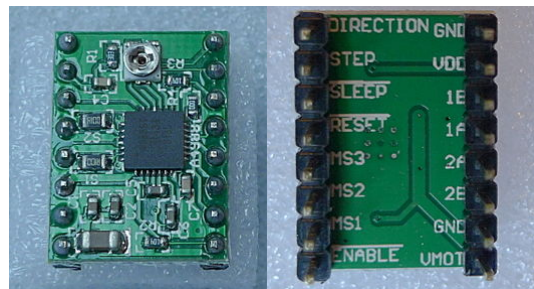


Figura 10: Driver de motor utilizado.

### 3.3.4 Acionamento do Motor

Para ligação – e possível controle do sistema a ser realizado posteriormente – foi utilizado um Arduino UNO®, mostrado na Figura 12. A ligação deste com o driver da Figura 10 e o motor (modelo NEMA 23) da Figura 9 foi feita de acordo com a Figura 11. Para simplesmente acionar o macaco, sem utilização do sinal de saída da célula de carga para controle do sistema, foi desenvolvido um código para o Arduino, disponível no Apêndice E deste relatório. No referido código, é possível ajustar velocidade e torque do motor, além da direção de giro, tornando-o adaptável a diferentes materiais e utilizável para testes tanto de tração quanto de compressão. A ligação do sistema montada para testes iniciais é mostrada na Figura 13.

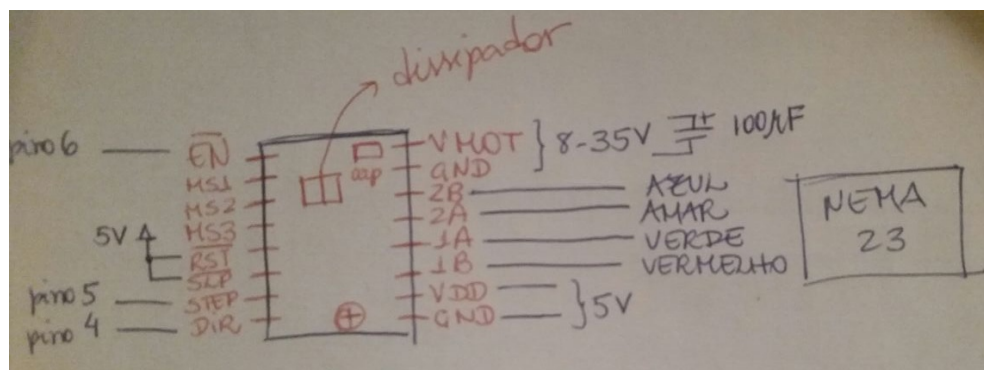


Figura 11: Ligação Arduino – Driver – Motor.

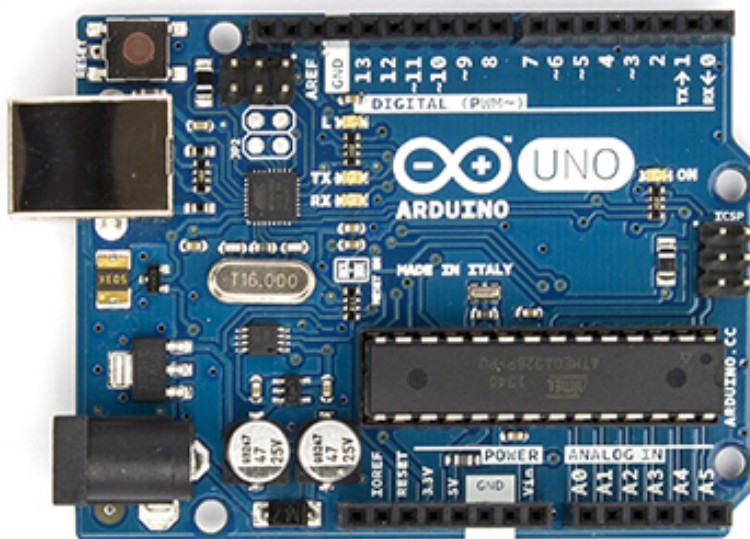


Figura 12: Arduino utilizado.

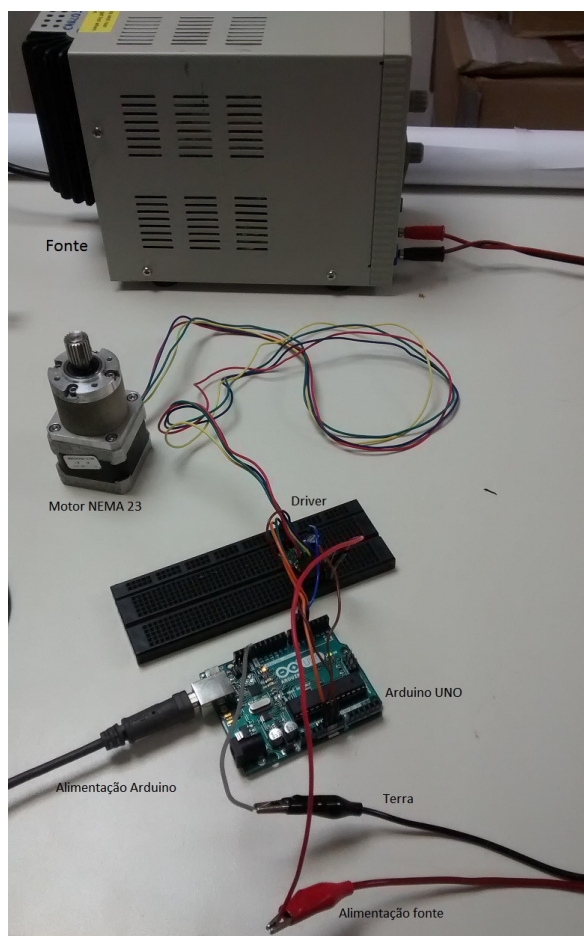


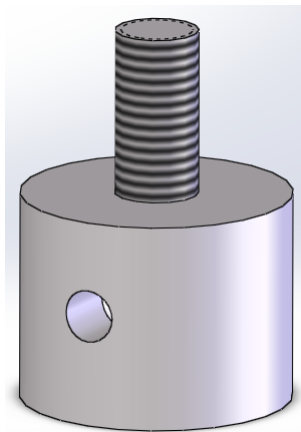
Figura 13: Ligação teste.



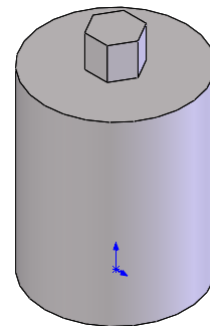
### 3.3.5 Adaptadores

Como dito anteriormente, a conexão entre célula de carga e macaco se dará através do terminal roscado deste. Já para a fixação da célula de carga à garra superior, se faz necessária a utilização de um elemento intermediário, pois será utilizado o par de garras para corpo de prova plano, já disponível no laboratório. Tais garras possuem terminal de fixação pinado e, dessa forma, o adaptador para este propósito deve ter uma extremidade compatível com este tipo de terminal e a outra extremidade deve ser roscada, da mesma especificação da rosca na célula de carga. Partindo dessas premissas, foi desenvolvido em *Solidworks*® um adaptador que realizasse tal ligação.

Além disso, também foi necessário desenvolver um elemento para realizar a ligação entre o macaco e o motor utilizado para acionamento da máquina. Mais uma vez, um modelo foi desenvolvido em *Solidworks*® e fabricado em seguida. Ambos os adaptadores são mostrados na Figura 14 e têm seus desenhos de fabricação apresentados nos Apêndices A.4 e A.5.



(a) Célula de Carga – Garra.



(b) Motor – Unidade de Levantamento.

Figura 14: Adaptadores desenvolvidos para o projeto.

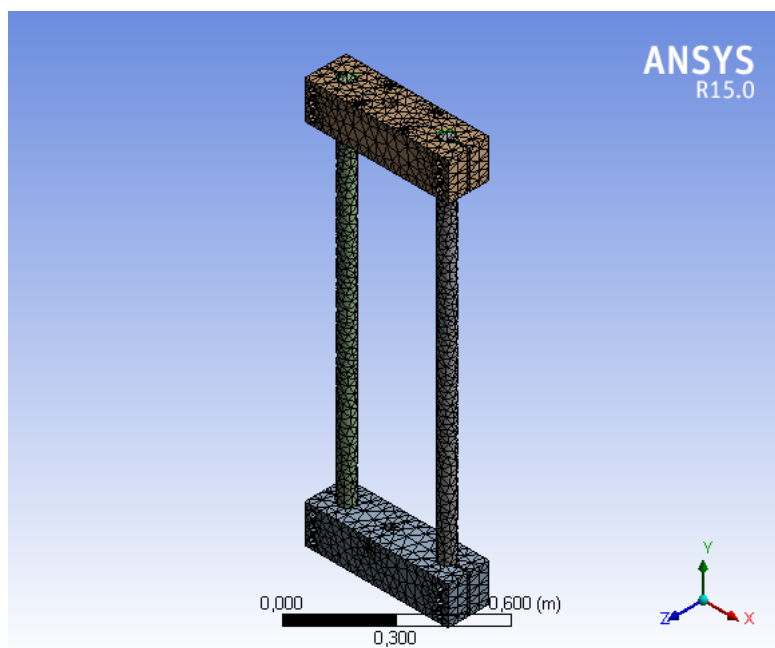
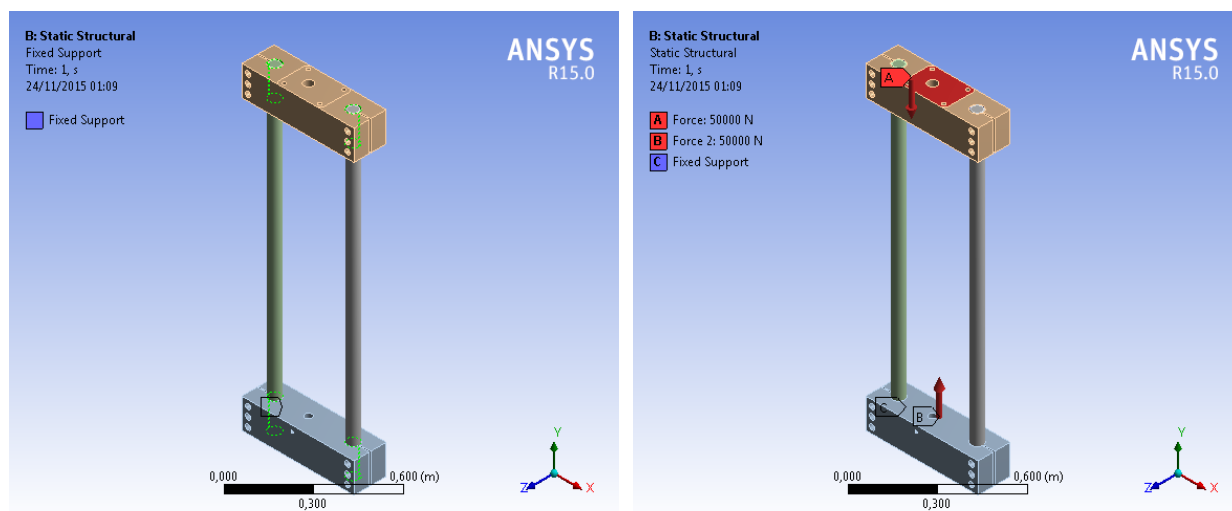


Figura 15: Malha para simulação.

## 4 Análise Estrutural

Impreterivelmente, todo projeto desenvolvido analiticamente deve ser validado de alguma maneira previamente à sua fabricação ou desenvolvimento prático. Visando a validação do modelo até aqui desenvolvido, foi realizada uma análise por meio de simulação computacional de elementos finitos da estrutura, através do software *ANSYS*<sup>®</sup>, a partir da modelagem em *Solidworks*<sup>®</sup>. A simulação foi feita sem a inserção de arruelas, porcas e parafusos, para facilitar a análise computacional. Afim de se obter resultados confiáveis, a definição das forças atuantes no sistema e de, principalmente, condições de contorno corretas é de imensa importância.

Primeiramente, foi criada a malha na montagem importada do *Solidworks*<sup>®</sup>, mostrada na Figura 15, que discretizará os componentes em pequenos elementos básicos de tamanho finito – daí o nome do método de *elementos finitos*. Quanto à forma dos elementos, a cada situação geométrica existem formas mais ou menos indicadas. Esse quesito não foi alterado, permanecendo a opção default em que o próprio software atribui o formato otimizado para o elemento finito em cada situação. Foi alterado, porém, o tamanho máximo dos elementos para 20 mm, refinando consideravelmente a malha de modo a conseguir melhores resultados. Ao final da geração da malha, o



(a) Condições de contorno. As áreas pontilhadas em verde mostram os suportes fixos.

(b) Carregamentos atribuídos.

Figura 16: Condições de contorno e carregamentos para simulação.

modelo apresenta 17270 elementos finitos individuais. Em seguida, foi inserida uma carga vertical para baixo de 50 kN, atuando no travessão, numa área equivalente à área do macaco e uma carga oposta à anterior, na metade superior da área do furo para a passagem do pino de fixação da garra. Não foi considerado um possível apoio – que não o solo – externo à máquina (como um carrinho, por exemplo), pois este não deverá resistir à nenhum esforço que não o próprio peso da máquina. As condições de contorno impostas nesta etapa foram as seguintes:

- A mesa está apoiada no solo;
- Travessão e mesa estão fixos em relação às colunas;
- Esforços são feitos totalmente na vertical.

Essas condições de contorno, tais como os carregamentos atribuídos, podem ser vistos na Figura 16.

#### 4.1 Análise de Tensões e Deformações

Inseridas corretamente as cargas atuantes no sistema e suas condições de contorno, foi realizada a simulação e colhidos os seguintes resultados: deformação total, deformação equivalente

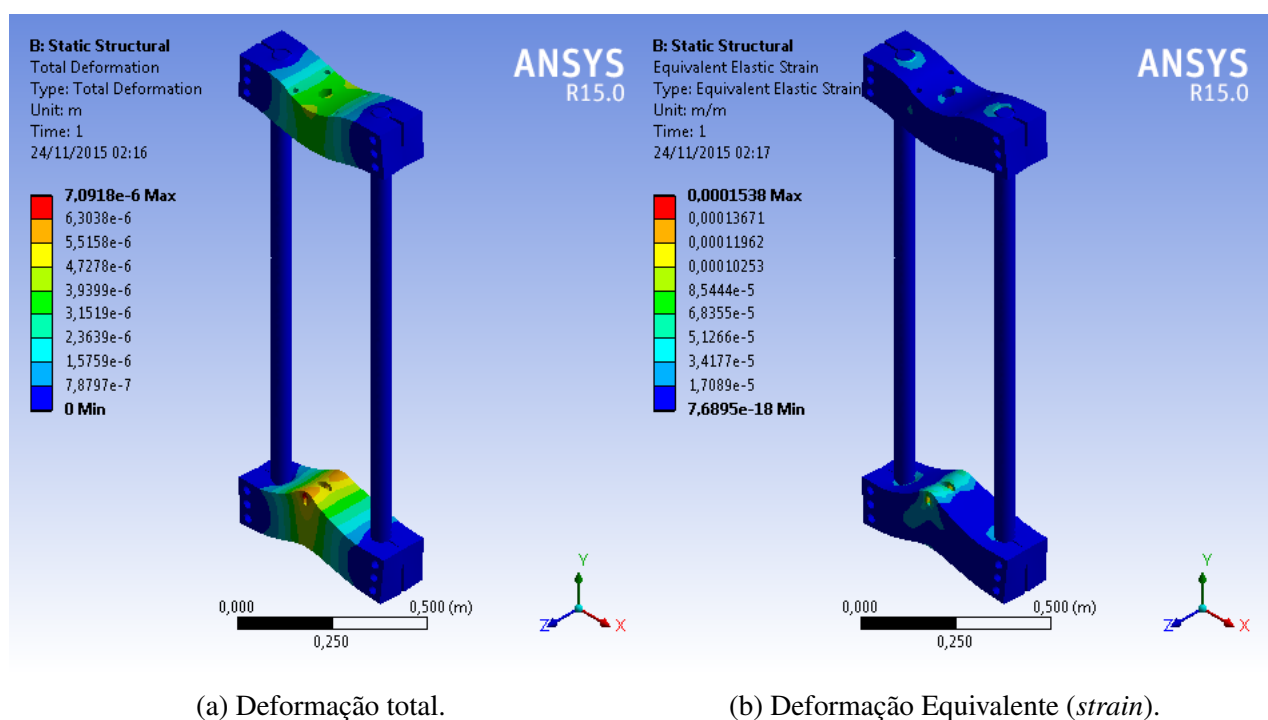
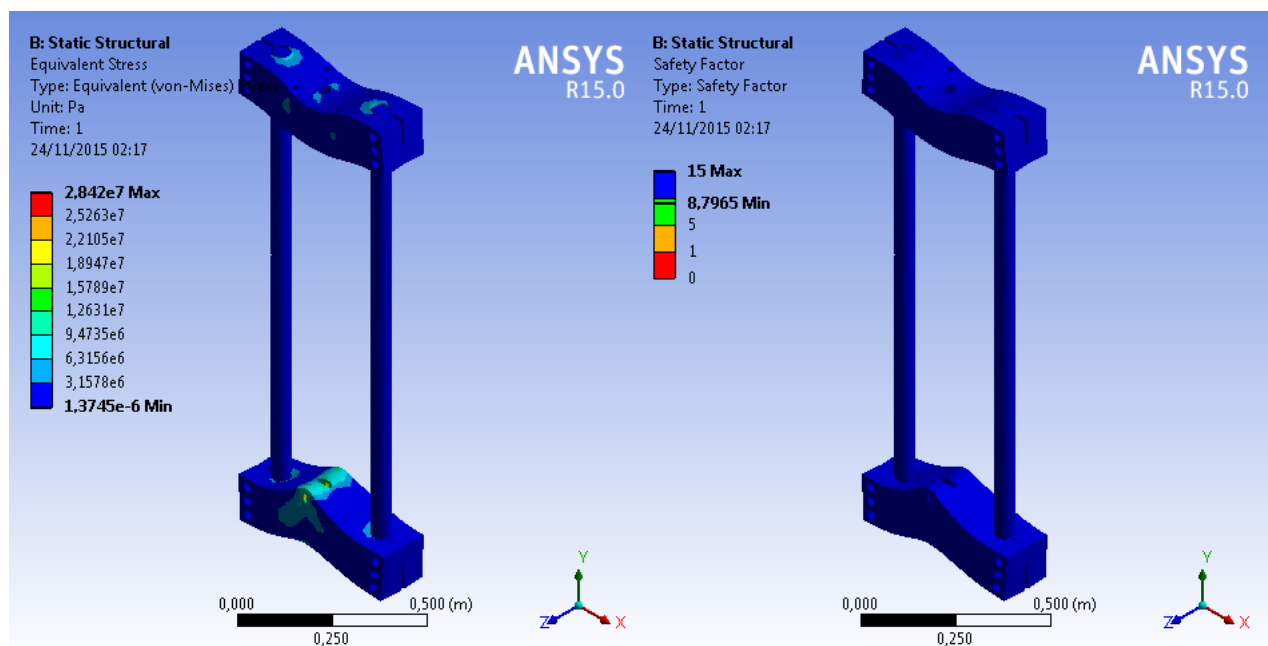


Figura 17: Deformação sentida pela estrutura.

(*strain*) e tensão equivalente de von-Mises, que podem ser analisados nas figuras 17 e 18. Para a máquina aqui desenvolvida, não se faz necessária a análise de frequências naturais, visto que é uma máquina destinada à testes lentos.

Verificou-se, então, que a deformação total máxima atende ao critério previamente definido de não ultrapassar a ordem de grandeza de  $10^{-3} \text{ mm}$ . A Figura 17a mostra que o ponto crítico da estrutura é a região central da mesa, mais especificamente o ponto de apoio do pino de fixação da garra. Já era esperado este efeito, já que a área de aplicação do carregamento é muito menor na mesa do que no travessão. Observamos, então, uma deformação máxima de 0.007 mm, validando o modelo nesse quesito como desejado.

Foi obtida também a máxima tensão sentida pela estrutura, de 28.43 MPa, tendo o modelo um fator de segurança entre 8.8 e 15. Através desses valores de baixa tensão com relação à de limite de escoamento dos materiais utilizados na fabricação da estrutura, ratifica-se a afirmação anterior de que tais máquinas devem ser projetadas à rigidez. Os resultados obtidos através da análise computacional de elementos finitos realizada, portanto, validam o projeto da estrutura e legitimam a subsequente fabricação e construção do protótipo.



(a) Tensão equivalente de von-Mises.

(b) Fator de segurança do modelo.

Figura 18: Tensões sentidas pela estrutura e fator de segurança do modelo.

## 5 Construção do Protótipo

Em fase inicial de projeto, juntamente ao dimensionamento estrutural, foi feita uma extensa pesquisa de mercado com o objetivo de conseguir o menor custo possível para cada componente. Como já dito anteriormente, a disponibilidade e custo do material foram levados em consideração quanto às dimensões definidas, assim como prazo de entrega – visto que o tempo hábil para finalização do projeto, incluindo fase de fabricação, não era muito grande. Foi escolhido inicialmente aço AISI 1020 para construção do protótipo, por ser facilmente encontrado no mercado e ter baixo custo associado. Todavia, no caso das colunas de sustentação, incrivelmente o mesmo fornecedor dispunha de componentes de AISI 1045 – já revestidas a cromo – mais baratos que os de 1020. Por este motivo as colunas são desse material, diferindo dos outros componentes. As figuras 19a, 19c e 19b mostram alguns dos materiais adquiridos.



(a) Material para fabricação dos adaptadores.



(b) Colunas de sustentação, aço AISI 1045 revestido a cromo.



(c) Aço AISI 1020 para fabricação da mesa.

Figura 19: Materiais adquiridos para construção do protótipo.

Os orçamentos encontrados para a usinagem de todo o material descrito no Apêndice A foram bem mais altos do que o valor aceitável para a construção de um primeiro protótipo. Sendo assim, decidiu-se por usar os componentes dentro da PUC: a colaboração do pessoal do ITUC – Instituto Tecnológico da PUC-Rio – juntamente com o aval do professor Pedro Paulo Almeida Silva do Departamento de Engenharia Mecânica e responsável pelo uso do laboratório, permitiu o processo de usinagem do travessão e da mesa de reação, que se encontra em fase de finalização. A usinagem dos adaptadores, para economizar tempo, foi feita pela autora. Dessa maneira o protótipo não gerou custo algum de usinagem. Todos os gastos do projeto, realizados ou estimados, encontram-se no Apêndice F. Os fornecedores escolhidos e modelos comprados foram o que apresentaram menor custo total, já considerando os gastos com entrega.

## 5.1 Processos de Fabricação

A primeira ação de usinagem necessária é o aplainamento das faces do material bruto destinado à fabricação da mesa e do travessão, já que não foi solicitado esse tipo de precisão de corte ao fornecedor, visando redução de custos. Devido ao tempo curto para fabricação, entretanto, esta etapa foi feita apenas na face em que realmente se fazia necessária para alcançar um bom funcionamento do projeto – na face superior do travessão, onde será colocado o macaco. Idealmente, este processo deveria ser realizado em todas as faces dos sólidos brutos. Podemos ver o travessão passando por este processo na máquina fresadora na Figura 20.



Figura 20: Material para travessão durante processo de aplainamento.

Em seguida, foi feita a marcação dos centros dos furos verticais do travessão – de acordo com o desenho de fabricação A.1 – que servirão para a centralização da broca de pré-furação, etapa que precede a furação em diâmetro mais próximo ao desejado que se faz necessária devido às grandes dimensões de tais furos. O resultado do processo de marcação de centros é mostrado na Figura 21.

Após esta marcação de centros, é realizada a pré-furação, seguida da furação com uma broca de 52 mm – que era a mais próxima ao diâmetro final desejado, disponível no laboratório – e, por fim, alargamento ao diâmetro necessário com uma bailarina. De qualquer maneira, seria





Figura 21: Marcação de centros dos furos no travessão.

necessário um melhor acabamento do que o deixado pela broca para garantir o ajuste desejado às colunas, o que seria feito com um passe da bailarina, sendo então esta uma etapa, de todo modo, necessária. A Figura 22 mostra o travessão após pré-furação dos diâmetros de 55 mm e restante dos furos finalizados.

Os furos laterais – onde serão colocados os parafusos – foram feitos logo após a marcação de centros mostrada na Figura 21. O próximo passo é a abertura de rosca métrica M12 x 1.75, que foi escolhida por sua maior disponibilidade comercial. Como pode ser observado no desenho A.1, haverá um rebaixo para a cabeça do parafuso (allen, de cabeça cilíndrica e sextavado interno, classe 12.9). Foi escolhido esse tipo de fixação porque, para utilizar um parafuso preso por porca, o mesmo deveria ter comprimento suficiente para atravessar toda a peça, além do espaço necessário para colocação da porta. Além disso, esta configuração dificultaria a montagem. Sendo a parte traseira do componente roscada, é possível apertar todos os parafusos apenas com uma chave allen, além de permitir que sejam utilizados parafusos mais comuns no mercado – os que foram usados no projeto foram M12 de 90 mm de comprimento, muito mais baratos do que os parafusos





Figura 22: Travessão em fase de finalização.

especiais de maior comprimento que seriam necessários no caso de aperto com porca. Seguindo as mesmas premissas, os furos para fixação do macaco também serão roscados.

O processo para fabricação da mesa é similar ao do travessão. A furação é similar, como vista nos desenhos de fabricação, porém com diâmetro do furo da região central diferente, já que na mesa será fixada diretamente a garra inferior, enquanto que passaremos o fuso do macaco através do travessão. A montagem da máquina, como já abordado anteriormente, será feita de acordo com a Figura 1. Para fabricação dos adaptadores foi utilizado um torno mecânico, por se tratarem de componentes de revolução. As estrias para chaveta, entretanto, foram feitas na fresadora.

A máquina encontra-se na a presente data em processo de finalização de fabricação. Após esta etapa, será realizada montagem seguida de testes iniciais em corpos de prova de alumínio, tratados a seguir.

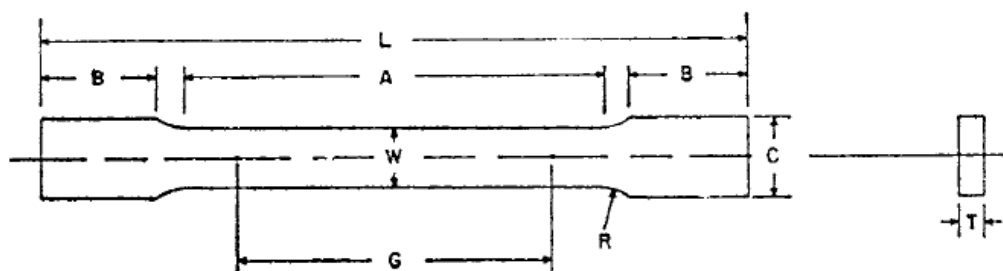


Figura 23: Padrão para o corpo de prova plano – Referência [5].

## 5.2 Corpos de Prova

Devido à utilização de garras planas por sua disponibilidade no laboratório, serão utilizados nos testes corpos de prova de acordo com a norma ASTM E8 – [5], que trata deste tipo de elemento. A Figura 23 mostra o corpo de prova a ser utilizado, segundo esta referência. A Tabela 5 mostra as dimensões escolhidas para os elementos destinados aos testes iniciais, que serão de alumínio 6061, de acordo com tal norma e segundo as dimensões mostradas na Figura 23, retirada da mesma referência. Essas dimensões caracterizam o corpo de prova como *Subsize Specimen*, termo que se refere a um espécime reduzido. A Figura 24 mostra um corpo de prova modelado segundo a norma, a partir do qual foi feito o desenho de fabricação do Apêndice A.6. Alguns dos corpos de prova fabricados para os testes podem ser vistos na Figura 25.

Tabela 5: Dimensões dos corpos de prova – Referência [5].

Item	Dimensão – mm [pol.]
G	25.0 $\pm$ 0.1
W	6.0 $\pm$ 0.1
T	espessura do material
R	6 [0.250]
L	100 [4]
A	32 [1.25]
B	30 [1.25]
C	10 [0.375]

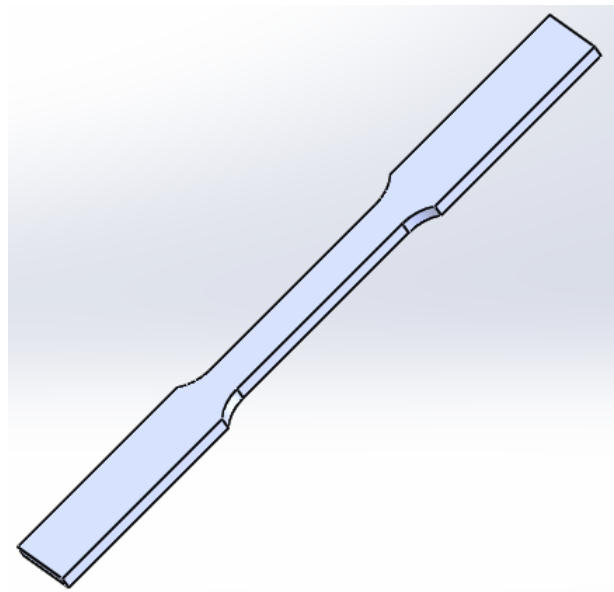


Figura 24: Modelo de Corpo de Prova em Solidworks.



Figura 25: Alguns corpos de prova fabricados

## 6 Conclusão

Provou-se a possibilidade de projeto e fabricação da máquina aqui abordada com maior simplicidade e a um custo baixíssimo, quando comparado ao valor das máquinas similares *Instron*<sup>®</sup> e *MTS*<sup>®</sup> comercializadas hoje, que custam em torno de 80 mil dólares – a construção da máquina tratada neste relatório teve seu custo consideravelmente abaixo de **uma ordem de grandeza** desse valor, como mostrado na Tabela 6. Os orçamentos enviados pelos fabricantes no processo de compra de material se encontram disponíveis no Apêndice F.

Após a finalização de usinagem dos componentes para travessão e mesa de reação, será possível realizar testes de tração e compressão com a máquina, que servirão primeiramente para validar a fabricação. Posteriormente, como aqui idealizado, espera-se que seja possível o acoplamento da máquina em uma unidade móvel como, por exemplo, um carrinho com capacidade para seu peso que, de acordo com a modelagem feita em *Solidworks*<sup>®</sup>, será de aproximadamente 220 kg – vemos também que essa máquina será bem mais leve que os modelos supracitados. Esta máquina será igualmente válida para ensaios que necessitem ser bem lentos – como, por exemplo, para testar corpos de prova sofrendo tensão sob corrosão. Devido ao seu princípio de funcionamento, a máquina pode ser tão lenta quanto seja desejado.

Provou-se possível, também, a reprodução de fabricação deste modelo tal qual versões de maior ou menor capacidade, devido à sua simplicidade e fácil alteração dimensional, que partiria da variação do momento de inércia do travessão e da mesa de reação.

Por fim, pode-se afirmar que o projeto aqui tratado alcançou seus objetivos de dimensionamento e sequente validação realizada através de simulações. Dessa maneira, não são esperadas falhas da estrutura durante os testes após a finalização de fabricação.

Tabela 6: Custos do projeto.



CUSTO TOTAL DO PROJETO			
Item	Valor (R\$)	Frete (R\$)	Total (R\$)
Unidade de Levantamento	3.548,00	156,52	3.704,52
Célula de Carga	1.644,00	81,00	1.725,00
Material para Usinagem	1.582,50	0,00	1.582,50
Colunas	570,00	226,40	796,40
Valor gasto:			7.808,42
Usinagem	1.500,00	-	1.500,00
Motor	200,00	-	200,00
Driver do Motor	60,00	0,00	60,00
Arduíno UNO	40,00	0,00	40,00
Valor não efetivamente gasto:			1.800,00
TOTAL:			9.608,42

## Referências

- [1] Castro, J.T.P. e Meggiolaro, M.A., *Fadiga: Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço*. Lexington, KY, 2011.
- [2] Juvinall, R., *Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength*. McGraw-Hill, New York, 1967.
- [3] Shigley, J.E., *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill, New York, 8th Edition, 1989.
- [4] Young, W. C. e Budynas, R. G., *Roark's Formulas for Stress and Strain*. McGraw-Hill, New York, 2002.
- [5] ASTM Standard E8, *Standard Test methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009. [www.astm.org](http://www.astm.org)

# A Desenhos de Fabricação

## A.1 Travessão

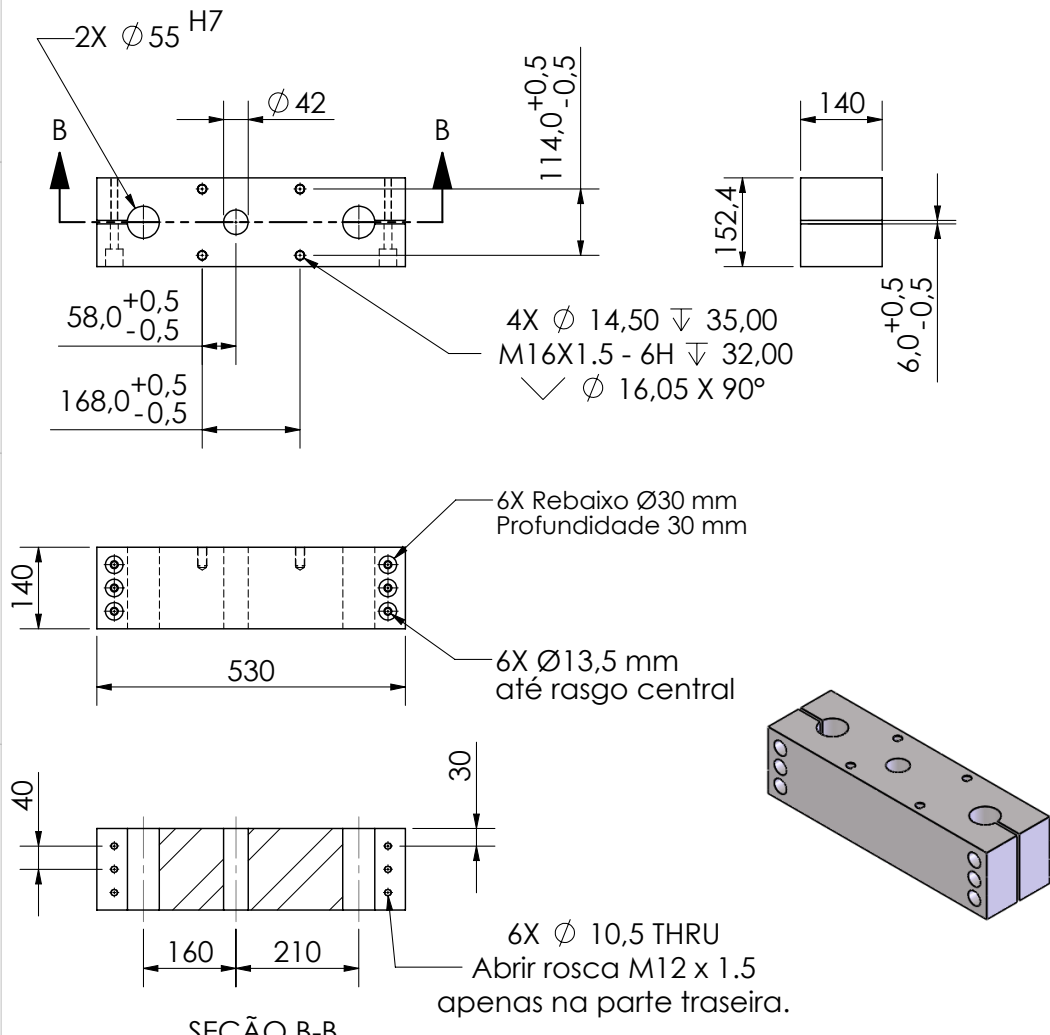
1		2		3		4	
				NÚMERO -		REV. -	
AREA OU UNIDADE		DEM - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA		CLIENTE OU USUARIO -		DATA 29/10/2015	
TÍTULO		MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO ELETROMECAÂNICA TRAVESSÃO		EMPREENDIMENTO OU PROGRAMA Projeto de Graduação em Eng. Mecânica		FOLHA de	
				ESCALA		1 : 10	

ITEM	QNT	DIMENSÕES	MATERIAL
1	1	Seção retangular 6" X 140 mm / Comprimento 530 mm	AÇO CARBONO 1020

**SEÇÃO B-B**



2X Ø55 H7

Ø42

114.0<sup>+0,5</sup><sub>-0,5</sub>

140

152.4

6.0<sup>+0,5</sup><sub>-0,5</sub>

58.0<sup>+0,5</sup><sub>-0,5</sub>

168.0<sup>+0,5</sup><sub>-0,5</sub>

4X Ø14,50 ∇ 35,00  
M16X1.5 - 6H ∇ 32,00  
∇ Ø16,05 X 90°

6X Rebaixo Ø30 mm  
Profundidade 30 mm

6X Ø13,5 mm  
até rasgo central

6X Ø10,5 THRU  
Abrir rosca M12 x 1.5  
apenas na parte traseira.

530

140

40

30

160

210

SEÇÃO B-B

Acabamento: Quando não indicado, adotar:  
Aparar quinas: 0.5mm x 45° Adoçar: r 0.5mm Rmax: 3.2µmm


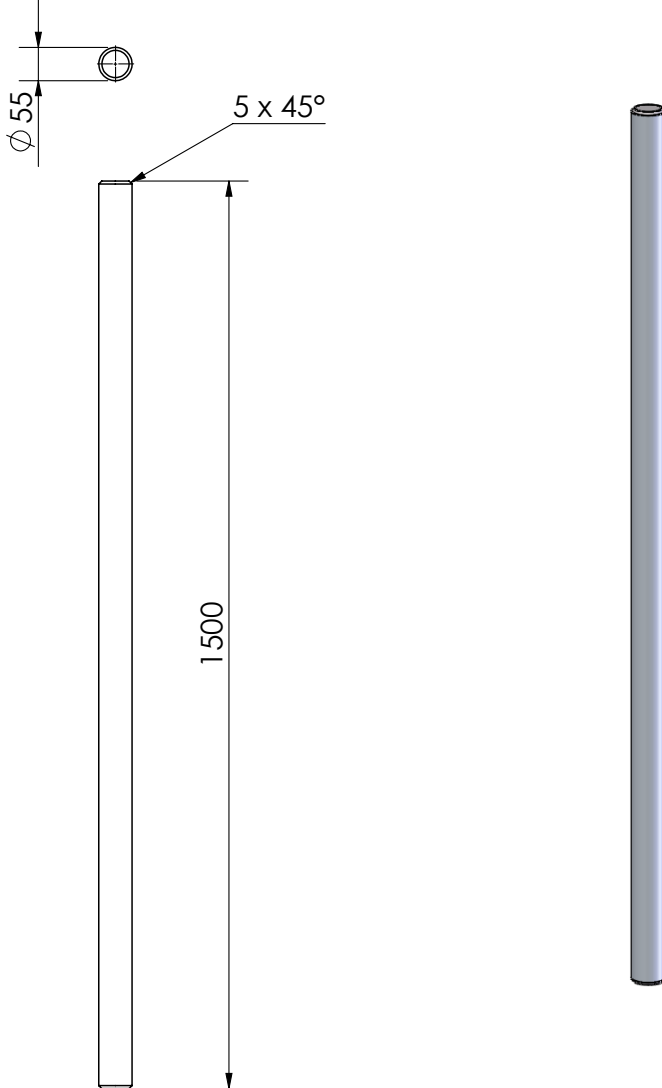
Tolerâncias: Quando não indicado, adotar:  
Lineares: +/- 0.35mm Circulares: +/- 0.25mm Angulares: +/- 1°

DATA	ORIGINAL	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H
29/10/2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PROJETO	RULLIANE GONÇALVES								
DESENHO	RULLIANE GONÇALVES								
VERIFICADO	-								
APROVADO	-								


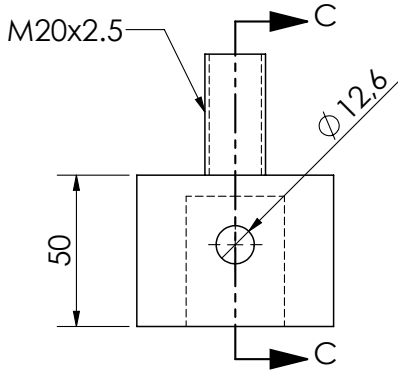
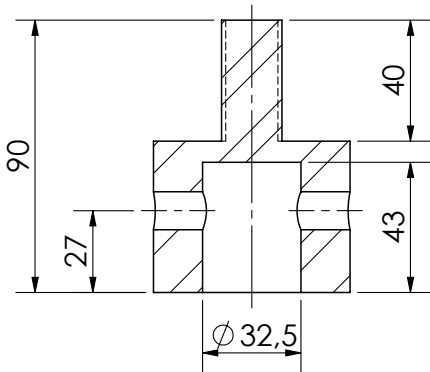
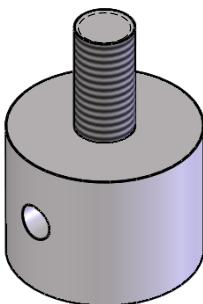




### A.3 Colunas de Sustentação

1		2		3		4	
				NÚMERO -		REV. -	
				CLIENTE OU USUARIO -		DATA 16/11/2015	
				EMPREENDIMENTO OU PROGRAMA Projeto de Graduação em Eng. Mecânica		FOLHA de	
AREA OU UNIDADE				DEM - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
TITULO				MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO ELETROMECAÂNICA COLUNA			
				ESCALA 1 : 10			
ITEM		QNT		DIMENSÕES		MATERIAL	
1		1		BARRA Ø55mm x 1500mm		AISI 1045	
							
Acabamento: Quando não indicado, adotar: Aparar quinas: 0.5mm x 45° Adoçar: r 0.5mm Rmax: 3,2µmm				Tolerâncias: Quando não indicado, adotar: Lineares: +/- 0,35mm Circulares: +/- 0,25mm Angulares: +/- 1°			
DATA	ORIGINAL	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F
16/11/2015	-						
PROJETO	RULLIANE GONÇALVES						
DESENHO	RULLIANE GONÇALVES						
VERIFICADO	-						
APROVADO	-						


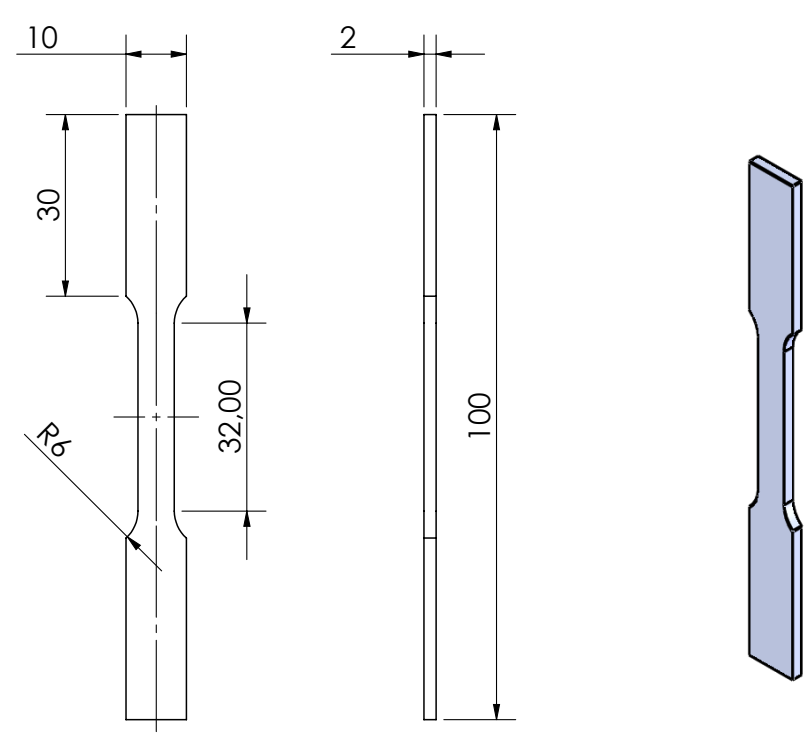
## A.4 Adaptador: Célula de Carga – Garra

1	2	3	4
		NÚMERO	REV.
		CLIENTE OU USUÁRIO	DATA
		EMPREENDIMENTO OU PROGRAMA	FOLHA
DEM - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA		Projeto de Graduação em Eng. Mecânica	16/11/2015 de
MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO ELETROMECAÂNICA ADAPTADOR CÉLULA-GARRA		ESCALA 1 : 2	
ITEM	QNT	DIMENSÕES	MATERIAL
1	1	BARRA Ø2 3/8" x 90 mm	AÇO CARBONO 1020
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  <p>SEÇÃO C-C</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  </div>			
Acabamento: Quando não indicado, adotar: Aparar quinas: 0.5mm x 45° Adoçar: r 0.5mm Rmax: 3.2µmm			
Tolerâncias: Quando não indicado, adotar: Lineares: +/- 0.35mm Circulares: +/- 0.25mm Angulares: +/- 1°			
DATA	ORIGINAL	REV. A	REV. B
PROJETO	RULLIANE GONÇALVES	REV. C	REV. D
DESENHO	RULLIANE GONÇALVES	REV. E	REV. F
VERIFICADO	-	REV. G	REV. H
APROVADO	-		

### A.5 Adaptador: Motor – Unidade de Levantamento

[illegible]

## A.6 Corpo de Prova segundo ASTM E8

1		2		3		4				
		NÚMERO - CLIENTE OU USUARIO - EMPREENDIMENTO OU PROGRAMA Projeto de Graduação em Eng. Mecânica		REV. - DATA 21/11/2015 FOLHA de ESCALA 1:1						
A		AREA OU UNIDADE DEM - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA								
		TÍTULO MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO ELETROMECAÂNICA CORPO DE PROVA								
ITEM		QNT		DIMENSÕES		MATERIAL				
1		1		CHAPA 10 mm X 100 mm X 2 mm		ALUMÍNIO 6061				
B										
C										
D										
E										
F		Acabamento: Quando não indicado, adotar: Aparar quinas: 0.5mm x 45° Adoçar: r 0.5mm Rmax: 3.2µmm								
		Tolerâncias: Quando não indicado, adotar: Lineares: +/- 0.35mm Circulares: +/- 0.25mm Angulares: +/- 1°								
DATA		ORIGINAL	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H
PROJETO		RULLIANE GONÇALVES								
DESENHO		RULLIANE GONÇALVES								
VERIFICADO		-								
APROVADO		-								

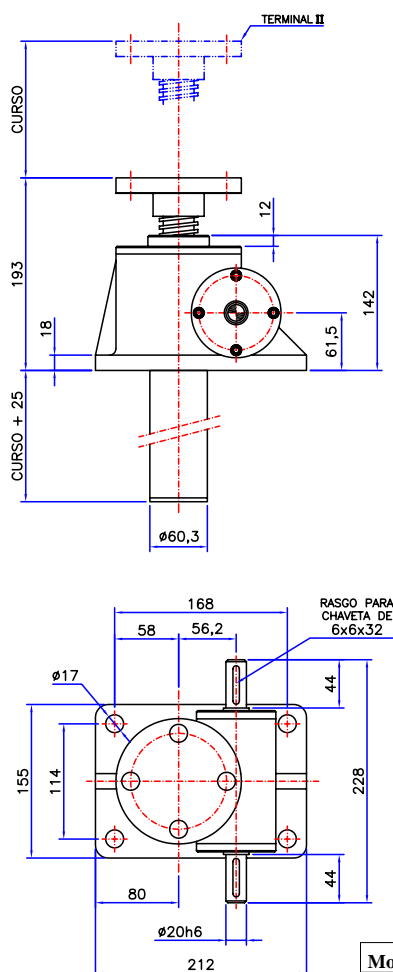
## B Datasheet Unidade de Levantamento



### DIMENSÕES Modelo UL - 5 Toneladas

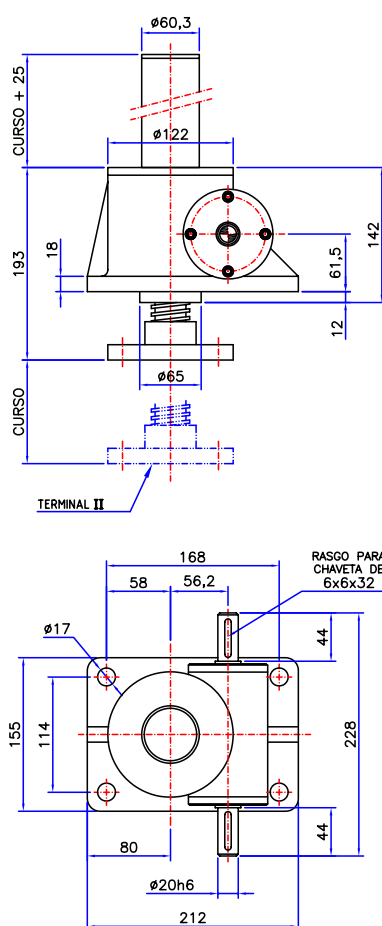
#### TIPO 1

##### Série "A"



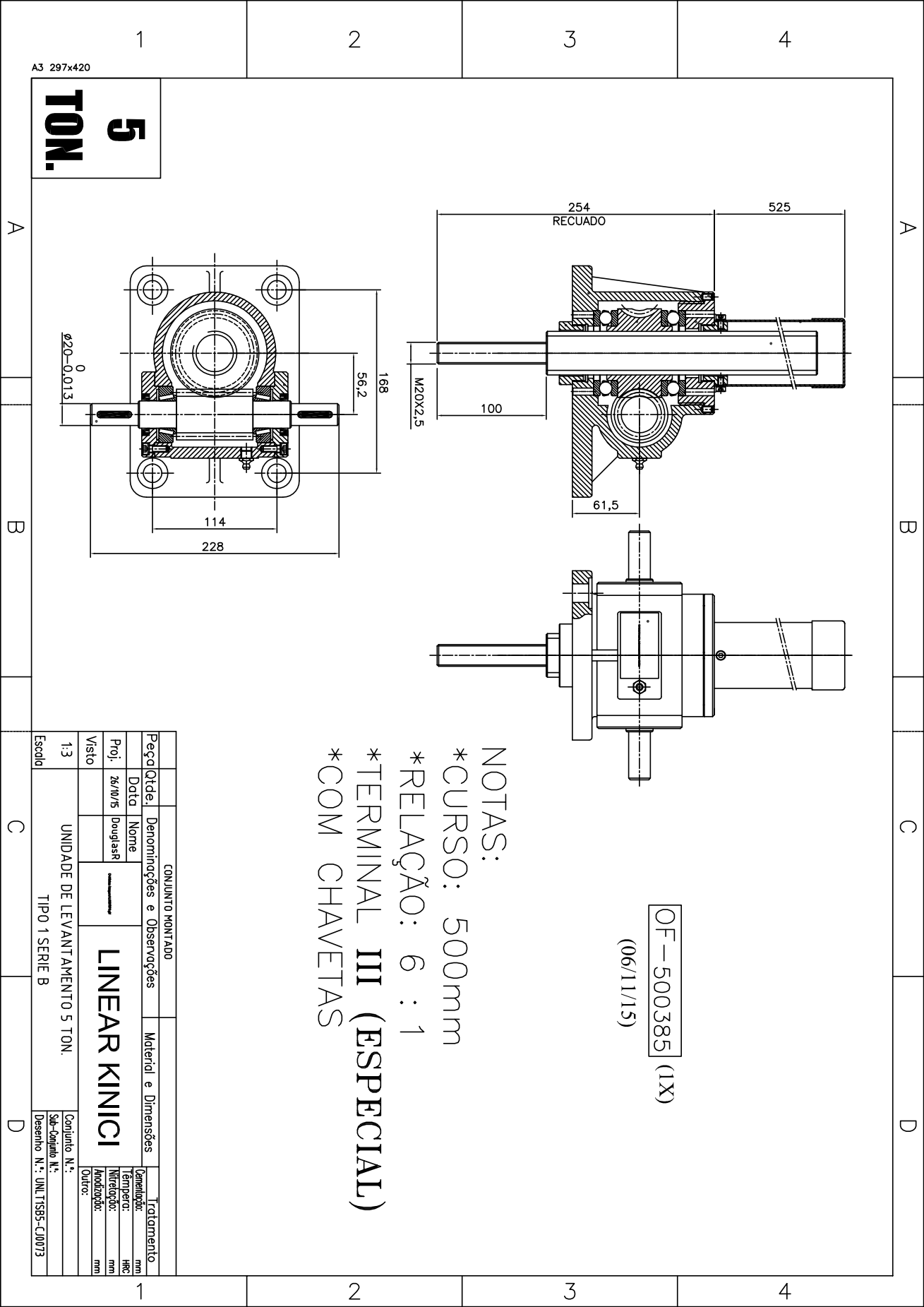
[mm]

##### Série "B"



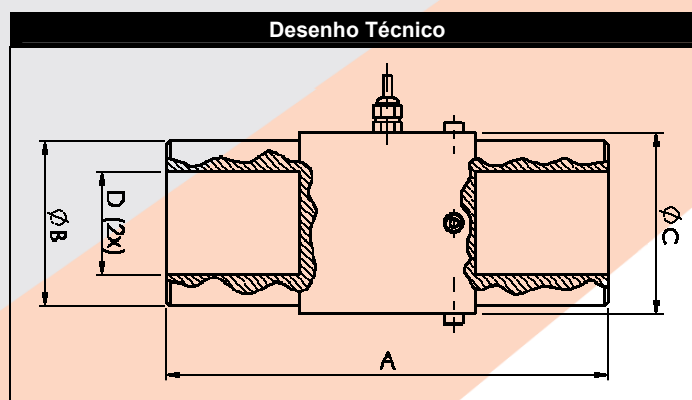
Modelo: UL	5 Ton.	
Força de Elevação Máx.:	50.000N	
Relação:	6 : 1	24 : 1
Curso p/ Rotação no Sem-Fim:	1,17 mm	0,20 mm
*Potência Máx. do Motoredutor:	1½ HP	1½ HP
Torque Máx.:	31,6 Nm	15,8 Nm
Rosca do Fuso:	Tr 40x7 ou 32x5 Fuso de Esferas (opcional)	
Compr. Máx. do Fuso em Tração:	2000 mm	
Compressão Sem Guia:	700 mm	
Compressão Guiado:	1400 mm	
Terminais:	I, II, III ou IV	
Tampas Laterais :	Somente para UL acima de 10 Ton.	

\*Consultar tabela páginas 35 e 36B



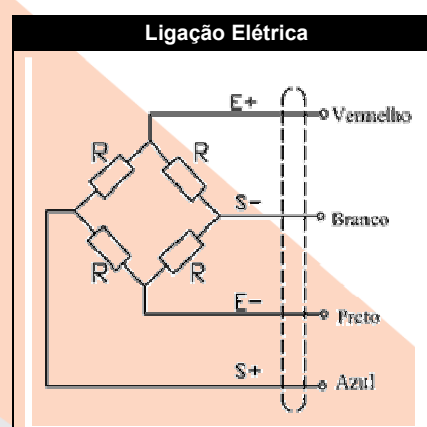
## C Datasheet Célula de Carga

### CÉLULA DE CARGA - MOD. DTS



Modelo	Capacidade (Kgf)	Dimensões (mm)			
		A	Ø B	Ø C	D
DTS-5000	5000	100	31	38	M20x2,5
DTS-10000	10000	150	50	60	M30x3,5
DTS-15000	15000	160	56	65	M36x4
DTS-20000	20000	170	62	70	M42x4
DTS-50000	50000	250	75	82	M52x3
DTS-100000	100000	400	160	168	M100x4

Características Técnicas	
Parâmetro	Unidade
Sensibilidade Nominal	2,0 mV/V
Balanco de Zero	± 1 %
Repetibilidade	0,02 %
Erro de Fluência (20 minutos)	0,03 %
Efeito da Temperatura no Zero	0,002 %/°C
Efeito da Temp. na Sensibilidade	0,002 %/°C
Temperatura de Operação	-10°C a +80°C
Compensação de Temperatura	-10°C a +50°C
Impedância de Entrada (25°C)	Ohms 350±30
Impedância de Saída (25°C)	Ohms 350±3
Resistência de Isolação	Mohm >5.000
Tensão de Excitação	10Vdc/Vac
Tensão de Excitação Máxima	15Vdc/Vac
Material	Aço Liga
Cabo	5 metros




OBS.: Outros materiais e capacidades sob consulta.



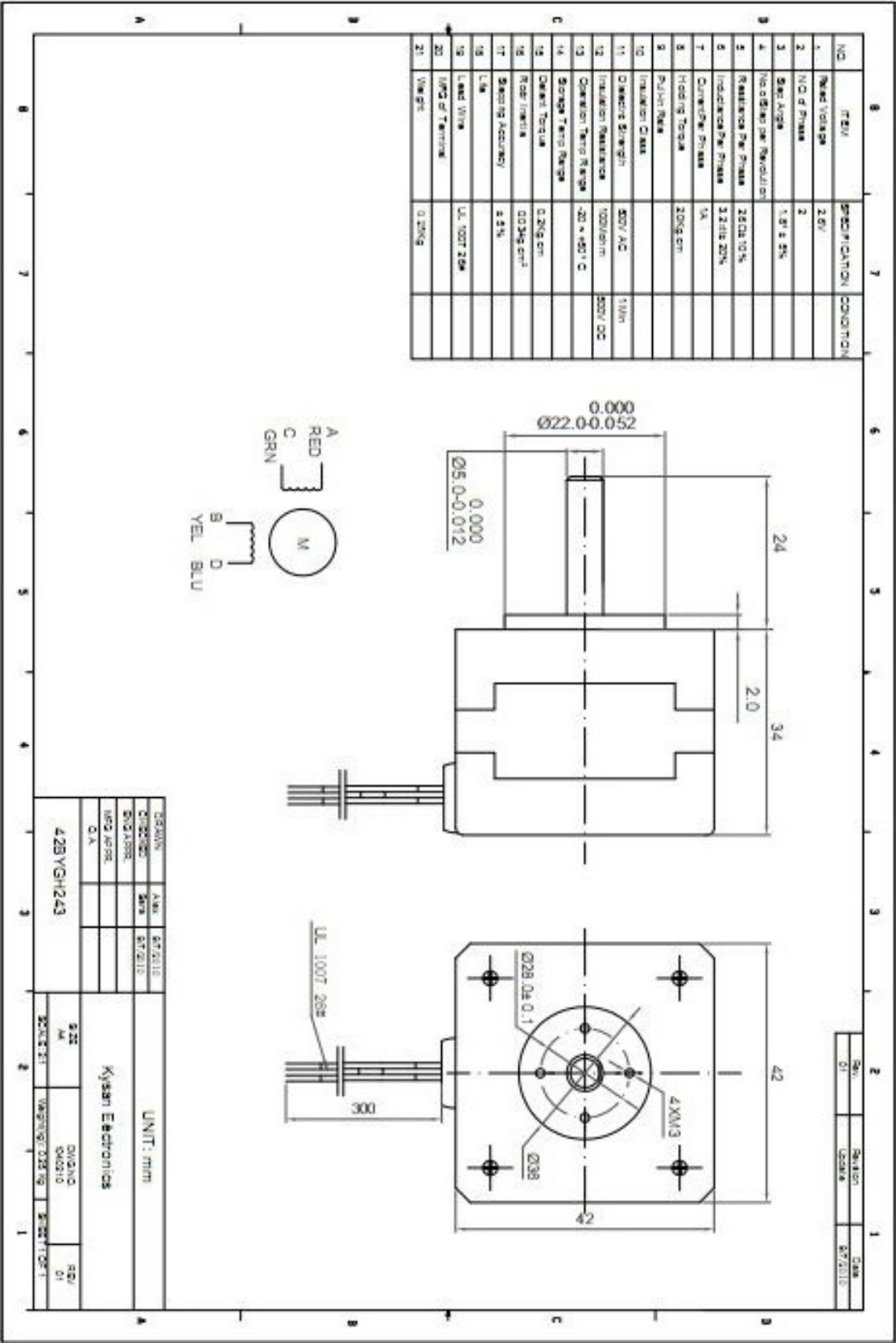


D Datasheet Motor



Data Group: 2082  
SKU: 1040210  
Weight (Kg): 1.0000  
Description: 42BYGH243  
HS Code: 8483.40.9000  
Applications: Office Automation, banking equipment, Automobil control unit, telecom, home appliance  
Document:  
PDF File: 

Mfg Model	Gear Ratio	Length of Geared Box	Holding Torque Geared	Rotor Inertia	Mass	Step Angle	Motor Length	Lead Wires	Rated Voltage	Rated Current	Phase Resistance	Phase Inductance	Detent Torque
	I	L2 mm	(Kg-cm)	g.cm <sup>2</sup>	kg	Degree	L1 mm	Number	VDC	A	Ω	mH	Kg.cm
42BYGH243	N/A	N/A	2.0	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2
42BYGH243-5	5.2:1	31	10	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2
42BYGH243-14	13.6:1	39	26.4	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2
42BYGH243-19	19.2:1	39	38	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2
42BYGH243-27	26.8:1	39	53	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2
42BYGH243-51	50:1	47	100	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2
42BYGH243-71	71:1	47	142	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2
42BYGH243-100	99.5:1	47	198	0.034	0.3	1.8	34	4	2.6	1	2.6±10%	3.2±20%	0.2



## D.1 Datasheet Driver do Motor



# A4988

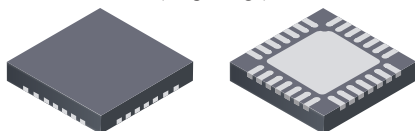
### DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

#### Features and Benefits

- Low  $R_{DS(ON)}$  outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full,  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , and  $1/16$

#### Package:

28-contact QFN  
with exposed thermal pad  
 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.90\text{ mm}$   
(ET package)



Approximate size

#### Description

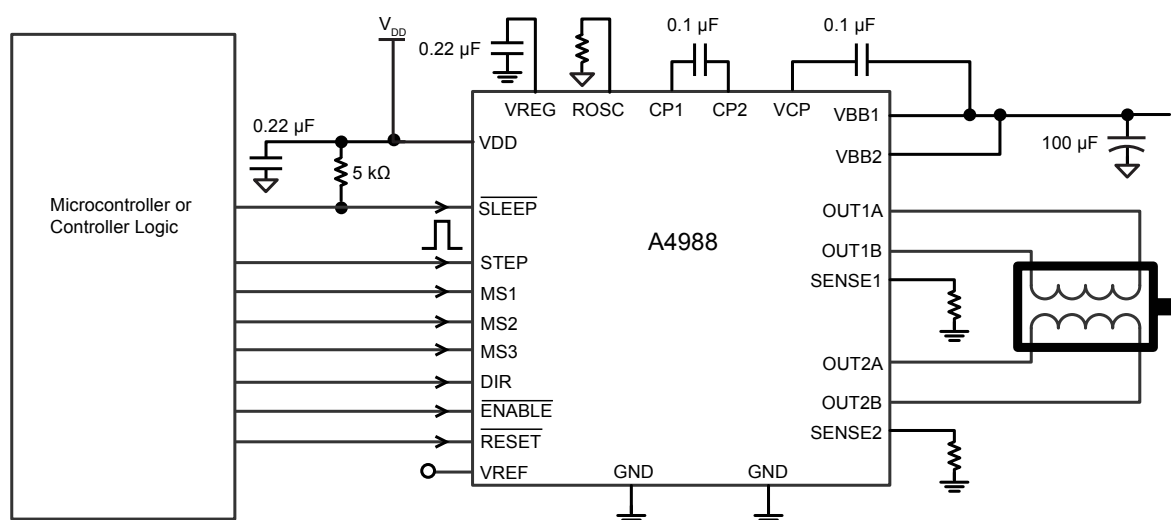
The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and  $\pm 2\text{ A}$ . The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

*Continued on the next page...*

#### Typical Application Diagram



# A4988

## DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS<sup>1</sup> at T<sub>A</sub> = 25°C, V<sub>BB</sub> = 35 V (unless otherwise noted)

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. <sup>2</sup>	Max.	Units
Output Drivers						
Load Supply Voltage Range	V <sub>BB</sub>	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	V <sub>DD</sub>	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	R <sub>DSON</sub>	Source Driver, I <sub>OUT</sub> = –1.5 A	–	320	430	mΩ
		Sink Driver, I <sub>OUT</sub> = 1.5 A	–	320	430	mΩ
Body Diode Forward Voltage	V <sub>F</sub>	Source Diode, I <sub>F</sub> = –1.5 A	–	–	1.2	V
		Sink Diode, I <sub>F</sub> = 1.5 A	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	I <sub>BB</sub>	f <sub>PWM</sub> < 50 kHz	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	I <sub>DD</sub>	f <sub>PWM</sub> < 50 kHz	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	V <sub>IN(1)</sub>		V <sub>DD</sub> ×0.7	–	–	V
	V <sub>IN(0)</sub>		–	–	V <sub>DD</sub> ×0.3	V
Logic Input Current	I <sub>IN(1)</sub>	V <sub>IN</sub> = V <sub>DD</sub> ×0.7	–20	<1.0	20	μA
	I <sub>IN(0)</sub>	V <sub>IN</sub> = V <sub>DD</sub> ×0.3	–20	<1.0	20	μA
Microstep Select	R <sub>MS1</sub>	MS1 pin	–	100	–	kΩ
	R <sub>MS2</sub>	MS2 pin	–	50	–	kΩ
	R <sub>MS3</sub>	MS3 pin	–	100	–	kΩ
Logic Input Hysteresis	V <sub>HYS(IN)</sub>	As a % of V <sub>DD</sub>	5	11	19	%
Blank Time	t <sub>BLANK</sub>		0.7	1	1.3	μs
Fixed Off-Time	t <sub>OFF</sub>	OSC = VDD or GND	20	30	40	μs
		R <sub>OSC</sub> = 25 kΩ	23	30	37	μs
Reference Input Voltage Range	V <sub>REF</sub>		0	–	4	V
Reference Input Current	I <sub>REF</sub>		–3	0	3	μA
Current Trip-Level Error <sup>3</sup>	err <sub>I</sub>	V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TripMAX</sub> = 38.27%	–	–	±15	%
		V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TripMAX</sub> = 70.71%	–	–	±5	%
		V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TripMAX</sub> = 100.00%	–	–	±5	%
Crossover Dead Time	t <sub>DT</sub>		100	475	800	ns
Protection						
Overcurrent Protection Threshold <sup>4</sup>	I <sub>OCPST</sub>		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	T <sub>TSD</sub>		–	165	–	°C
Thermal Shutdown Hysteresis	T <sub>TSDHYS</sub>		–	15	–	°C
VDD Undervoltage Lockout	V <sub>DDUVLO</sub>	V <sub>DD</sub> rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	V <sub>DDUVLOHYS</sub>		–	90	–	mV

<sup>1</sup>For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.

<sup>2</sup>Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

<sup>3</sup>V<sub>ERR</sub> = [(V<sub>REF</sub>/8) – V<sub>SENSE</sub>] / (V<sub>REF</sub>/8).

<sup>4</sup>Overcurrent protection (OCP) is tested at T<sub>A</sub> = 25°C in a restricted range and guaranteed by characterization.

## E Código Arduino UNO

```
int x;  // global variable

void setup()
{
  pinMode(6,OUTPUT);    // Enable
  pinMode(5,OUTPUT);    // Step
  pinMode(4,OUTPUT);    // Dir
  digitalWrite(6,LOW);  // Set Enable low - liga o chip!
}

void loop()
{
  digitalWrite(4,HIGH);    // Set Dir high
  //for(x = 0; x < 2500; x++)  // Loop 200 times
  //{
    digitalWrite(5,HIGH);  // Output high
    delayMicroseconds(1500); // Wait 1/2 a ms
    digitalWrite(5,LOW);   // Output low
    delayMicroseconds(1500); // Wait 1/2 a ms
  /*}

  delay(1000); // pause one second


  digitalWrite(4,LOW);    // Set Dir low
  for(x = 0; x < 2500; x++)  // Loop 200 times
  {
```

```
    digitalWrite(5,HIGH);    // Output high
    delayMicroseconds(500); // Wait 1/2 a ms
    digitalWrite(5,LOW);     // Output low
    delayMicroseconds(500); // Wait 1/2 a ms
}
delay(1000); // pause one second */
}
```

# F Orçamento

## F.1 Unidade de Levantamento

RECEBEMOS DE LK Linear Kinici Indústria Mecânica Ltda OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO		NF-e
DATA DE RECEBIMENTO	IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR	Nº 2800 SÉRIE: 1




**Identificação do emitente**  
LK Linear Kinici Indústria Mecânica Ltda  
Rua Lino Peixoto Amorim,1000 - Paineiras - - Itupeva - SP  
Fone: 1144964380  
CEP : 13.295-000

**DANFE**  
DOCUMENTO AUXILIAR  
DA NOTA FISCAL  
ELETRÔNICA

0 - ENTRADA  
1 - SAÍDA

Nº 2800  
SÉRIE: 1  
FL 1 / 1



Chave de acesso  
**3515 1060 3717 4700 0188 5500 1000 0028 0016 9590 1059**

Consulta de autenticidade no portal da NF-e  
<http://www.nfe.fazenda.gov.br/portal/>

Protocolo de autorização de uso  
**135150661872393 - 23/10/2015 15:31:29**

NATUREZA DA OPERAÇÃO SIMPLES FATURAMENTO		
INSCRIÇÃO ESTADUAL 388.012.350.110	IE SUBST. TRIBUTÁRIO	CNPJ 60.371.747/0001-88

**DESTINATÁRIO REMETENTE**

NOME / RAZÃO SOCIAL FUNDAÇÃO PADRE LEONEL FRANCA		CNPJ / CPF 28.019.214/0001-29	DATA DE EMISSÃO 23/10/2015
ENDEREÇO RUA MARQUES DE SAO VICENTE, 225,		BAIRRO / DISTRITO GAVEA	CEP 22453-900
MUNICÍPIO Rio de Janeiro	FONE / FAX 219 7559-6456	UF RJ	INSCRIÇÃO ESTADUAL Isento
HORA DA SAÍDA			

**FATURA**

Fatura: 1 Vencimento: 26/10/2015 Valor: 3.548,00

<b>CÁLCULO DO IMPOSTO</b>				
BASE DE CÁLCULO DO ICMS 0,00	VALOR DO ICMS 0,00	BC ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00	VALOR DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00	VALOR TOTAL DOS PRODUTOS 3.548,00
VALOR DO FRETE 0,00	VALOR DO SEGURO 0,00	DESCONTO 0,00	OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS 0,00	VALOR DO IPI 0,00
VALOR TOTAL DA NOTA 3.548,00				

**TRANSPORTADOR / VOLUMES TRANSPORTADOS**

RAZÃO SOCIAL	FRETE POR CONTA 0 - EMITENTE 1 - DESTINATÁRIO	CÓDIGO ANTT	PLACA DO VEÍCULO	UF	CNPJ / CPF
ENDEREÇO	MUNICÍPIO	UF	INSCRIÇÃO ESTADUAL		
QUANTIDADE 0	ESPÉCIE	MARCA	NUMERAÇÃO 0	PESO BRUTO 0,000000 Kg	PESO LÍQUIDO 0,000000 Kg

DADOS DO PRODUTO / SERVIÇO													
COD. PROD.	DESCRIÇÃO DO PRODUTO / SERVIÇO	NCM	CST	CFOP	UNID.	QUANT.	V. UNITÁRIO	V. TOTAL	BC. ICMS	V. ICMS	V. IPI	ALIQ. ICMS	ALIQ. IPI
137.00017	UNL.005.T1.SB.001.006.0500.00.00.00000.0 0.0 Total aproximado de tributos: R\$ 108,92	8425.49.90	0101	6922	UN	1,000000	3.548,000000	3.548,00			0,00		0,00

**CÁLCULO DO ISSON**

INSCRIÇÃO MUNICIPAL	VALOR TOTAL DOS SERVIÇOS 0,00	BASE DE CÁLCULO ISSON 0,00	VALOR DO ISSON 0,00
---------------------	----------------------------------	-------------------------------	------------------------


**DADOS ADICIONAIS**

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

"Nota Fiscal de Simples Faturamento em venda para entrega futura, emitida nos termos do artigo 129, caput do RICMS/2000-SP". EMPRESA OPTANTE PELO SIMPLES NACIONAL. Permite aproveitamento de crédito de ICMS no valor de R\$ 108,92, corresponde à alíquota de 3,07%, nos termos do art. 23 da LC 123. Pedido n. 500.385, termo de garantia n. 1854. DADOS PARA DEPOSITO: BANCO BRADESCO - AGÊNCIA: 0306 CONTA: 15.636-1  
Total aproximado de tributos: R\$ 108,92

RESERVADO AO FISCO

## F.2 Colunas de Sustentação

IDENTIFICAÇÃO DO EMITENTE				DANFE																					
UNAFE Comercio e Industria de Ferro e Aco				DOCUMENTO AUXILIAR																					
Eireli EPP				DA NOTA FISCAL																					
AV. COMENDADOR LUCIANO GUIDOTTI, 1100 - JD				0 - ENTRADA				1																	
CAXAMBU				1 - SAÍDA																					
13425-000 PIRACICABA - SP				25.126																					
FONE: (19) 3426-0790				SÉRIE 1																					
				FOLHA 1/1																					
NATUREZA DA OPERAÇÃO								PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO																	
VENDA FORA DO ESTADO								135150723355560 19/11/2015 15:35:04																	
INSCRIÇÃO ESTADUAL				INSCRIÇÃO ESTADUAL DO SUBST. TRIBUT.				CNPJ																	
535.015.471.116								54.386.784/0001-67																	
DESTINATÁRIO / REMETENTE																									
NOME / RAZÃO SOCIAL						CNPJ / CPF		DATA DA EMISSÃO																	
FUNDACAO PADRE LEONEL FRANCA (0003227)						28.019.214/0001-29		19/11/2015																	
ENDEREÇO				BAIRRO / DISTRITO		CEP		DATA DA SAÍDA																	
RUA MARQUES DE SAO VICENTE, 225				GAVEA		22451-041		19/11/2015																	
MUNICÍPIO				UF		FONE / FAX		HORA DA SAÍDA																	
RIO DE JANEIRO				RJ		(21) 97558-6457		15:34:36																	
FATURA / DUPLICATA																									
025126 19/11/2015 570,00																									
CÁLCULO DO IMPOSTO																									
BASE CÁLC ICMS		VALOR ICMS		BASE CÁLC ICMS ST		VALOR ICMS ST		VLR IMP. IMPORT		VLR PIS		TOTAL DOS PRODUTOS													
570,00		68,40		0,00		0,00		0,00		9,41		570,00													
VALOR FRETE		VALOR SEGURO		VALOR DESCONTO		OUTRAS DESP		VALOR IPI		VALOR COFINS		TOTAL DA NOTA													
0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		43,32		570,00													
TRANSPORTADOR / VOLUMES TRANSPORTADOS																									
NOME / RAZÃO SOCIAL				FRETE POR CONTA		CÓDIGO ANTT		PLACA DO VEÍC		UF		CNPJ / CPF													
OKSMAN TRANSPORTE E LOGISTICA LTDA ME				1-DESTINAT.						SP		08.992.005/0001-50													
ENDEREÇO				MUNICÍPIO								INSCRIÇÃO ESTADUAL													
AVENIDA AVIADOR JOAO MAURICIO CAMPOS, 186				GUARULHOS								336.854.615.116													
QUANTIDADE		ESPÉCIE		MARCA		NUMERAÇÃO		PESO BRUTO		PESO LÍQUIDO															
1		VOLUME						57,000		57,000															
DADOS DOS PRODUTOS / SERVIÇOS																									
CÓDIGO PRODUTO		DESCRIÇÃO DO PRODUTO / SERVIÇO				NCM/SH		CST		CFOP		UNID		QUANT		VALOR UNIT		VALOR TOTAL		B.CÁLC ICMS		VALOR ICMS		ALÍQ ICMS	
04870		ACO CROMADO 1045-REDONDO 55,00 IMP 55,00 1500 mm 2 pc				72149910		100		6102		KG		57		10,00		570,00		570,00		68,40		12	
		*CONTINUAÇÃO - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES*																							
		ALÍQUOTA DO ICMS REDUZIDA CONFORME ARTIGO 54, PARÁGRAFO PRIMEIRO DO RICMS.																							
		ALÍQUOTA DE ICMS 4% DE PRODUTOS IMPORTADOS DE ACORDO COM RESOLUÇÃO DO SENADO N. 13/2012.																							
		VALOR APROXIMADO DOS TRIBUTOS FEDERAIS R\$ 212.38(37.26%) e ESTADUAIS R\$ 96.90(17.00%) FONTE: IBPT																							
DADOS ADICIONAIS																									
INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES						RESERVADO AO FISCO																			
PEDIDO INTERNO: 0112362																									
PEDIDO DE COMPRA SOLICITADO VIA E-MAIL																									
RULLIANE.GONCALVES@GMAIL.COM																									
(21) 97559-6456 > RULLIANE GONCALVES																									
RECLAMACOES / DEVOLUCOES NAO SERAO ACEITAS APOS 48HRS DO RECEBIMENTO. NAO RECEBENDO O BOLETO ATE O VENCIMENTO CONTATE O DEPTO. DE COBRANCA.																									
JBOS- ENGENHARIA E AUTOMAÇÃO						Gerado pelo UniDANFE 3.5.6 Plus   www.unidanfe.com.br																			
RECEBEMOS DE UNAFE Comercio e Industria de Ferro e Aco Eireli EPP OS PRODUTOS E/OU SERVIÇOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL ELETRÔNICA INDICADA AO LADO. EMISSÃO: 19/11/2015 VALOR TOTAL: 570,00 DESTINATÁRIO: FUNDACAO PADRE LEONEL FRANCA (0003227) - RUA MARQUES DE SAO VICENTE, GAVEA, 22451-041-RIO DE JANEIRO-RJ						NF-e																			
DATA DO RECEBIMENTO						IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR						25.126													
												SÉRIE 1													



## F.3 Material para Mesa e Travessão



TENAX AÇO E FERRO LTDA  
Travessa Leonor Mascarenhas, 101 - Ramos  
Rio de Janeiro - RJ - CEP 21040-135  
Telefone: (21) 3865-4400 FAX: (21) 3865-4422  
www.tenax.com.br | vendas@tenax.com.br  
CNPJ: 33.097.536/0001-26 | IE: 81.801.215

Proposta de Fornecimento		646549	Data:		12/11/2015					
Vendedor: ALFREDO - alfredo@tenax.com.br (21) 3865-4429										
Cliente: PUC-RIO.		28.019.214/0001-29		Comprador: SRa. RULLIANE GONÇALVES						
E-mail: celso@fplf.org.br		Tel: ()		Fax: ()						
Item	Material/Dimensões	NCM	N° de Pçs	Quant.	Un	Preço Unit.	Total	IPI(%)	ICMS(%)	Prazo
1	ACO SAE 1045 CHAPA # 6" x 140mm x 530mm	7208.51.00	2	2,00	Pç	685,00	1.370,00	5	19,00	2 DIAS UTEIS

Total produtos: R\$ 1.370,00  
Total IPI: R\$ 68,50  
Valor Total: R\$ 1.438,50

- Condições de Pagamento: A VISTA	Consulte-nos também : - Tubos Mecânicos VMec 134AP. - Chapas de Aço SAE 1045, A-36, 1060, ST-52.3. - Aço Prata Tungstenado de 1,50mm a 25,40mm. - Aços SAE 4140, 4340, 8620, 4320, 8550, 4130, 4145H. - Aços Trefilados Chumballoy 12L14, Ressulfurados 11SMn30. - Aços Ferramenta AISI D6, O1, P20, H13, 420, S1.
- Frete: Cliente Retira(FOB)	
- ICMS incluso e conforme Legislação. IPI excluído - Os pesos são teóricos e aproximados, podendo sofrer variações - Não aceitamos devolução de materiais cortados. - Materiais com certificado de qualidade. - Sobremetais para usinagem deverão respeitar a norma DIN 7527. - Reajuste conforme aumento das usinas produtoras.	
Observação:	

## F.4 Material para adaptadores



TENAX AÇO E FERRO LTDA  
Travessa Leonor Mascarenhas, 101 - Ramos  
Rio de Janeiro - RJ - CEP 21040-135  
Telefone: (21) 3865-4400 FAX: (21) 3865-4422  
www.tenax.com.br | vendas@tenax.com.br  
CNPJ: 33.097.536/0001-26 | IE: 81.801.215

Proposta de Fornecimento 646776				Data: 16/11/2015						
Vendedor: ALFREDO - alfredo@tenax.com.br (21) 3865-4429										
Cliente: PUC-RIO. 28.019.214/0001-29				Comprador: SRa. RULLIANE GONÇALVES						
E-mail: celso@fplf.org.br				Tel: ( )		Fax: ( )				
Item	Material/Dimensões	NCM	N° de Pçs	Quant.	Un	Preço Unit.	Total	IPI(%)	ICMS(%)	Prazo
1	ACO SAE 1020 RED. LAMINADA 2.3/8" x 90 mm	7214.99.10	1	1,00	Pç	10,00	10,00	0	13,00	IMEDIATO
2	ACO SAE 1020 RED. LAMINADA 1/2" x 120 mm	7214.99.10	1	1,00	Pç	4,00	4,00	0	13,00	IMEDIATO

Total produtos: R\$ 14,00  
Total IPI: R\$ 0,00  
Valor Total: R\$ 14,00

- Condições de Pagamento: 21 DDL	Consulte-nos também : - Tubos Mecânicos VMec 134AP. - Chapas de Aço SAE 1045, A-36, 1060, ST-52.3. - Aço Prata Tungstenado de 1,50mm a 25,40mm. - Aços SAE 4140, 4340, 8620, 4320, 8550, 4130, 4145H. - Aços Trefilados Chumballoy 12L14, Ressulfurados 11SMn30. - Aços Ferramenta AISI D6, O1, P20, H13, 420, S1.
- Frete: Entrega Tenax(CIF)	
- ICMS incluso e conforme Legislação. IPI excluído - Os pesos são teóricos e aproximados, podendo sofrer variações - Não aceitamos devolução de materiais cortados. - Materiais com certificado de qualidade. - Sobremetais para usinagem deverão respeitar a norma DIN 7527. - Reajuste conforme aumento das usinas produtoras.	
Observação:	

## F.5 Célula de Carga

RECEBEMOS DE MK CONTROLE E INSTRUMENTACAO LTDA - EPP OS PRODUTOS/SERVIÇOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO		NF-e
		Nº 000.005.506
DATA DE RECEBIMENTO	IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR	
		SÉRIE: 1

 <p><b>MK CONTROLE E INSTRUMENTACAO LTDA - EPP</b></p> <p>RUA MAURO, 476 - - SAUDE, Sao Paulo, SP - CEP: 04055041 - Fone/Fax: 1155817674</p>	<p><b>DANFE</b></p> <p>Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica</p> <p>0 - Entrada 1 - Saída <b>1</b></p> <p>Nº 000.005.506</p> <p>SÉRIE: 1</p> <p>Página 1 de 1</p>		<p>CONTROLE DO FISCO</p>  <p>CHAVE DE ACESSO</p> <p>3515 1001 2087 2500 0132 5500 1000 0055 0610 0400 0189</p> <p>Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e <a href="http://www.nfe.fazenda.gov.br/portal">www.nfe.fazenda.gov.br/portal</a> ou no site da Sefaz Autorizadora</p>
	<p>NATUREZA DA OPERAÇÃO</p> <p><b>VENDA FORA DE SP</b></p>		<p>PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO</p> <p>135150661489429 - 23/10/2015 13:50</p>
INSCRIÇÃO ESTADUAL	INSCRIÇÃO ESTADUAL DO SUBST. TRIB.	CNPJ	
114650643113		01.208.725/0001-32	

<b>DESTINATÁRIO/REMETENTE</b>			
NOME/RAZÃO SOCIAL		CNPJ/CPF	DATA DA EMISSÃO
FUNDAÇÃO PADRE LEONEL FRANCA		28.019.214/0001-29	23/10/2015
ENDEREÇO	BAIRRO/DISTRITO	CEP	DATA DE ENTRADA/SAÍDA
RUA MARQUES DE SÃO VICENTE, 225 -	GAVEA	22453-900	
MUNICÍPIO	FONE/FAX	UF	INSCRIÇÃO ESTADUAL
Rio de Janeiro	2135271178	RJ	

<b>FATURA</b>
PAGAMENTO A PRAZO / Num.: 5506 / V. Orig.: 1.725,00 / V. Liq.: 1.725,00

<b>CÁLCULO DO IMPOSTO</b>					
BASE DE CÁLCULO DO ICMS	VALOR DO ICMS	BASE DE CÁLCULO DO ICMS ST	VALOR DO ICMS ST	VALOR TOTAL DOS PRODUTOS	
0,00	0,00	0,00	0,00	1.725,00	
VALOR DO FRETE	VALOR DO SEGURO	DESCONTO	OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS	VALOR DO IPI	VALOR TOTAL DA NOTA
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.725,00

<b>TRANSPORTADOR/VOLUMES TRANSPORTADOS</b>					
RAZÃO SOCIAL	FRETE POR CONTA	CÓDIGO ANTT	PLACA DO VEÍCULO	UF	CNPJ/CPF
	1- Destinatário/Remetente				
ENDEREÇO	MUNICÍPIO	UF	INSCRIÇÃO ESTADUAL		
QUANTIDADE	ESPÉCIE	MARCA	NUMERAÇÃO	PESO BRUTO	PESO LÍQUIDO

<b>DADOS DO PRODUTO/SERVIÇO</b>													
CÓDIGO	DESCRIÇÃO DO PRODUTO/SERVIÇO	NCM/SH	CST	CFOP	UNID.	QTD.	VLR. UNIT.	VLR. TOTAL	BC ICMS	VLR. ICMS	VLR. IPI	ALÍQ. ICMS	ALÍQ. IPI
DTS-ST	CELULA DE CARGA DTS-ST Total aproximado de tributos federais, estaduais e municipais: 588,57	90318060	0101	6101	PC	1,0000	1.725,0000	1.725,00					

<b>CÁLCULO DO ISSQN</b>			
INSCRIÇÃO MUNICIPAL	VALOR TOTAL DOS SERVIÇOS	BASE DE CÁLCULO DO ISSQN	VALOR DO ISSQN

<b>DADOS ADICIONAIS</b>	
<p>INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES</p> <p>VENCIMENTO: 30/10/2015 * PEDIDO: EMAIL RULLIANE * PEDIDO MK: 8119 "DOCUMENTO EMITIDO POR EPP OPTANTE PELO SIMPLES NACION AL. NÃO GERA DIREITO A CREDITO FISCAL DE ISS E IPI." " PERM ITE O APROVEITAMENTO DO CREDITO FISCAL DE ICMS NO VALOR DE R\$60,03, CORRESPONDENTE A ALIQUOTA DE 3,48% NOS TERMOS DO A RT 23 DA LC 123."</p> <p>Total aproximado de tributos federais, estaduais e municipais: 588,57</p>	RESERVADO AO FISCO

## G Programa MATLAB – Dimensionamento dos Parafusos

```
1 clear all;
2 clc;
3
4 display('—————')
5 display('      DIMENSIONAMENTO DE PARAFUSOS      ')
6 display('—————')
7 display(' ')
8 display(' ')
9
10
11
12 display('—————')
13 display('      PROPRIEDADES DO PARAFUSO      ')
14 display('—————')
15 display(' ')
16 display(' ')
17
18 display('Diametro e passo de rosca [mm]:')
19 Dp = 12
20 P = 1.75
21 display(' ')
22 display('Limites de resistencia a ruptura , escoamento e prova do
        parafuso [MPa]:')
23 Sr = 1220 % carga que rompe o parafuso
24 Se = 1100 % deformacao residual de 200 micro strain
25 Sp = 970  % deformacao residual de 100 micro strain
```

```

26 display(' ')
27 display('Modulo de Elasticidade — Aco [MPa]:')
28 E = 205000
29
30 display('_____')
31 display('          Diametros e resistencias          ')
32 display('_____')
33 display(' ')
34 display(' ')
35
36 Dpp = Dp-3*sqrt(3)*P/8;      % Diametro de passo [mm]
37 Dmp = Dp-1.226869*P;      % Diametro minimo [mm]
38 Dres = (Dpp+Dmp)/2;      % Diametro resistente [mm]
39
40 display('Carga de ruptura , de escoamento e de prova [kN]:')
41 Fr = Dres^2*pi*Sr/(4*10^3)
42 Fe = Dres^2*pi*Se/(4*10^3)
43 Fp = Dres^2*pi*Sp/(4*10^3)
44 display(' ')
45 display('Minimo de filetes ativos:')
46 alpha = (sqrt(3)*(Dp-0.94*P)^2)/(4*P*(Dp-1.227*P))
47
48
49
50 display('_____')
51 display('          PRE-CARGA          ')
52 display('_____')
53 display(' ')

```

```
54 display(' ')
55
56 display('Pre-Carga desejada [kN]:')
57 Kr = 3.3; % Fator de confiabilidade , R=0.99, sem lubrificacao
58 Fpc = 0.50*Fp
59
60 display(' ')
61 display('Torque necessario para essa pra-carga [Nm]:')
62 Tq = Fpc*Dp/Kr
63
64 display(' ')
65 display('Torque pode ocasionar escoamento em uma porcentagem dos
        parafusos [%]:')
66 Kmed = 5.0; % R=0.5
67 V = 0.15; % 0.09 lubrificadas , 0.15 nao lubrificadas
68
69 Krp = Fp*Dp/Tq % K pra funcao normal
70 Zrp = (Krp-Kmed)/(Kmed*V) % Z pra funcao normal
71 Prob = (1-normcdf(Zrp))*100
```