

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO AUGUSTO PAVANI BENEVENUTO
PEDRO HENRIQUE MALANDRINO CLEMENTE
RODOLFO MOINO GOMES DA SILVA

MINI TORNO CNC CONTROLADO POR ARDUINO COMO PROJETO INTEGRADOR
NO CURSO DE ENGENHARIA

São Paulo
2019

PEDRO AUGUSTO PAVANI BENEVENUTO
PEDRO HENRIQUE MALANDRINO CLEMENTE
RODOLFO MOINO GOMES DA SILVA

MINI TORNO CNC CONTROLADO POR ARDUINO COMO PROJETO
INTEGRADOR NO CURSO DE ENGENHARIA

Projeto do Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Mecânica da Escola de Engenharia da
Universidade Presbiteriana Mackenzie, como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Engenheiro.

ORIENTADOR: PROF. DR. Sérgio Luís Rabelo de Almeida

São Paulo
2019

Aos nossos pais, que sempre nos apoiaram
na busca dos nossos sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor. Dr. Sérgio Luís Rabelo de Almeida por ter sido orientador persistente com diretrizes seguras, muita paciência, constante acompanhamento e incentivo.

Às nossas famílias, pela paciência e compreensão.

Aos nossos amigos, pelas palavras de incentivo e apoio.

Um agradecimento especial aos técnicos dos laboratórios de usinagem da universidade por toda a ajuda e disposição, principalmente aos técnicos Edson Agostinho dos Santos, José Fernando e Flávio Augusto.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o projeto e construção de um mini torno CNC controlado por Arduino para aplicação didática dentro da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Este projeto foi elaborado buscando-se a redução de custos e a facilidade durante os processos de usinagem realizados. O projeto foi dividido em três partes: mecânico, eletrônico e o controle por software. No projeto mecânico foram feitas as especificações do material e o dimensionamento dos elementos de máquina. As peças que compõe o torno em sua maioria foram usinadas nos laboratórios de usinagem da própria universidade. O projeto eletrônico consistiu na escolha do microcontrolador, dos motores de passo e drivers desses motores e na seleção do motor que aciona o eixo árvore da máquina. Para o projeto de software, definiu-se o *software* CAD para o desenho da peça, o pós-processador e o software de controle, que transforma os comandos os códigos G em sinais elétricos que são enviados para o microcontrolador. Após as definições dos parâmetros de funcionamento, foram calculadas as forças de usinagem que possibilitaram o dimensionamento mecânico da máquina. Em paralelo foram definidos os programas que seriam utilizados para desenho, pós-processamento e controle da máquina. Finalizada a usinagem das peças deu-se início aos testes, e ao final foi possível se obter um modelo de máquina e de projeto integrador para os cursos de engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Palavras-chave: CNC. Integrador. Torno

ABSTRACT

This Project was designed to build a small CNC lathe controlled by an Arduino for didactical application inside the School of Engineering Universidade Presbiteriana Mackenzie. It was designed thinking about costs reduction and machining process and it was divided in three parts: Mechanical, Eletronic and Software control. In the Mechanical project, the material specifications were made and also the scaling of the machine parts. The parts that compound the lathe were machined in the machine labs of the College. The Eletronic part consists in choosing a microcontroller, stepper motor with its drivers and selecting a motor to trigger the spindle. For the software part, CAD had been chosen to draw the pieces, a post processor to generate the G-code and the CNC controler software that transform the G-code into eletrics signals and send to the microcontroler. With the operational parameters, the calculation of the machining forces that enable the mechanical sizing of the lathe were done. With the machinig of the parts done and the assemble of the electronics completed the tests were started, and in the end was possible to build a model of the small CNC lathe for didactical applicatopn inside the School of Engineering Universisdade Presbiteriana Mackenzie.

Keywords: CNC. Integrator. Lathe

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: movimentos no torneamento (Fonte: Ferraresi (1977)).	21
Figura 2: ângulo de posição (ou ângulo do gume de corte), indicado por χ .	22
Figura 3: primeiro conceito do mini torno (Fonte: acervo próprio).	24
Figura 4: mini torno(fonte: http://www.thefirsttools.com/2-4-3-three-axis-cnc-lathe.html).	25
Figura 5: mini torno (fonte: https://grabcad.com/library/cnc-mini-lathe--1).	25
Figura 6: mini torno (fonte: https://www.pinterest.com/dtorrestcmd/machining/).	25
Figura 7: guias lineares (Fonte: www.kalatec.com.br/trh15fl/).	26
Figura 8: guias lineares cilíndricas com rolamento linear (Fonte: acervo próprio).	26
Figura 9: pillow block (Fonte: www.kalatec.com.br/rolamento-sme/).	26
Figura 10: primeiro modelo da placa do torno (Fonte: acervo próprio).	27
Figura 11: sistema de pinça para prender o tarugo (Fonte: acervo próprio).	28
Figura 12: vista explodida do sistema de pinças do eixo árvore.	28
Figura 13: carro transversal (Fonte: acervo próprio).	29
Figura 14: vista frontal e vista lateral do torno (Fonte: acervo próprio).	29
Figura 15: vista superior do torno (Fonte: acervo próprio).	30
Figura 16: disposição das grandezas de corte (Fonte: acervo próprio).	31
Figura 17: disposição das forças durante o torneamento externo.	31
Figura 18: carregamento alternado completamente invertido (Fonte: Shigley (2005)).	34
Figura 19: motor de passo com o fuso trapezoidal no lugar do eixo (Fonte: https://www.kalatec.com.br/motoresdepasso/motor-de-passo-com-fuso/).	37
Figura 20: Sequência de passos para (Fonte: acervo próprio).	38
Figura 21: Arduino UNO (Fonte: https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3).	38
Figura 22: driver A4988 (Fonte: www.pololu.com/product/2980).	39
Figura 23: CNC <i>Shield</i> (placa vermelha), com 3 drivers A4988, acoplada ao Arduino	40
Figura 24: localização dos resistores R_s no driver A4988 (Fonte: acervo próprio).	41
Figura 25: módulo relê utilizado para controlar o motor principal.	41
Figura 26: disposição das forças no tarugo (Fonte: acervo próprio).	44
Figura 27: vista em corte do eixo e dos mancais (Fonte: acervo próprio).	44
Figura 28: distribuição dos esforços sobre o eixo no plano YZ (Fonte: acervo próprio)	45
Figura 29: distribuição dos esforços cortantes sobre o eixo no plano YZ.	45
Figura 30: distribuição do momento fletor sobre o eixo no plano YZ (Fonte: acervo próprio).	45

Figura 31: dimensões do rolamento SKF 61802 (Fonte: catálogo SKF).	49
Figura 32: motor 28BYJ-48 (Fonte: datasheet do motor).	52
Figura 33: desenho em CAD (Fonte: acervo próprio).	52
Figura 34: interface gráfica do GrblGRU (Fonte: acervo próprio).	53
Figura 35: geração do código G no GrblGRU (Fotne: acervo próprio).	53
Figura 36: interface do Universal G-Code Sender (Fonte: acervo próprio).	54
Figura 37: montagem do circuito de acionamento dos motores (Fonte: acervo próprio).	55
Figura 38: usinagem dos furos das guias no castelo. (Fonte: acervo próprio).	56
Figura 39: usinagem dos rebaixos na porca transversal (Fonte: acervo próprio).	56
Figura 40: usinagem dos furos na base (Fonte: acervo próprio).	57
Figura 41: usinagem dos alojamentos dos rolamentos lineares (Fonte: acervo próprio).	57
Figura 42: usinagem do eixo-árvore (Fonte: acervo próprio).	58
Figura 43: usinagem da pinça (Fonte: acervo próprio).	59
Figura 44: usinagem dos rasgos na pinça (Fonte: acervo próprio).	59
Figura 45: porca, pinça e eixo-árvore após usinados (Fonte: acervo próprio).	60
Figura 46: montagem do cabeçote fixo (Fonte: acervo próprio).	60
Figura 47: montagem do apoio das guias longitudinais e do cabeçote na placa	61
Figura 48: montagem dos carros transversal e longitudinal (Fonte: acervo próprio).	61
Figura 49: montagem parcial da máquina (Fonte: acervo próprio).	62
Figura 50: apoio do motor de passo longitudinal (Fonte: acervo próprio).	62
Figura 51: teste de controle dos motores de passo (Fonte: acervo próprio).	64
Figura 52: teste do motor de acionamento do eixo-árvore (Fonte: acervo próprio).	65
Figura 53: teste de movimentação do carro longitudinal (Fonte: acervo próprio).	65
Figura 54: montagem do conjunto CAD (Fonte: acervo próprio).	66
Figura 55: detalhe do conjunto do carro transversal e longitudinal em CAD.....	66
Figura 56: detalhe em CAD do sistema de acionamento do eixo-árvore (Fonte: acervo próprio).	67
Gráfico 1: variação das componentes da força de usinagem para diferentes valores de avanço.....	31
Gráfico 2: variação das componentes da força de usinagem para diferentes valores de profundidade.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: fatores para cálculo do rolamento (Fonte: acervo próprio).	36
Tabela 2: Valores para os fatores a e b (Fonte: acervo próprio).....	46
Tabela 3: valores para kc (Fonte: acervo próprio).....	47
Tabela 4: Valores para kd (Fonte: acervo próprio).....	48
Tabela 5: Valores para ke (Fonte: acervo próprio).....	48
Tabela 6: dados técnicos do rolamento SKF 61802 (Fonte: catálogo SKF).	49
Tabela 7: quantidade de peças da máquina.	67
Tabela 8: tabela de custo dos componentes da máquina.	68

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Deutsches Institut für Normung
E.E.	Escola de Engenharia
MIT	Massachusetts Institute of Technology
SKF	Svenska Kullager Fabriken
UPM	Universidade Presbiteriana Mackenzie
USB	Universal Serial Bus

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de abraçamento da correia na polia [rad]
a	Número de Bach [adimensional]
ap	Profundidade de corte [mm]
b	Largura de corte [mm]
bg	Fator geométrico para eixos [adimensional]
C	Varga dinâmica básica [kN]
C0	Carga estática básica [kN]
CA	Capacidade de carga no mancal A [N]
CB	Capacidade de carga no mancal B [N]
d	Diâmetro calculado do eixo [mm]
di	Diâmetro interno [mm]
De	Diâmetro externo [mm]
e	Número de Euler [adimensional]
f	Avanço da ferramenta [mm/rotação]
h	Espessura de corte [mm]
Ha	Reação horizontal no mancal A [N]
Fa	Força de avanço [N]
Fap	Força de apoio [N]
Fc	Força de corte [N]
Ft	Força ativa [N]
Fu	Força de usinagem [N]
ka	Fator de modificação de condição da superfície [adimensional]
kb	Fator de modificação de tamanho [adimensional]
kc	Fator de modificação de carga [adimensional]
kd	Fator de modificação de temperatura [adimensional]

k_e	Fator de modificação de confiabilidade [adimensional]
k_f	Fator de modificação para condições efeito diversos [adimensional]
$k_{c1.1}$	Pressão específica de corte [MPa]
K_r	Ângulo de posição [°]
L_d	Número e revoluções do rolamento [adimensional]
M_f	Momento fletor no eixo [N.mm]
M_i	Momento ideal no eixo [N.mm]
M_t	Momento torçor no eixo [N.mm]
P	Carga resultante no mancal [N]
P_c	Potência de corte [CV] e [W]
P_m	Potência do motor [CV] e [W]
T_0	Soma das forças na polia [N]
T_1	Força atuante no lado tensionado da polia [N]
T_2	Força atuante no lado frouxo da polia [N]
τ_{adm}	Tensão de cisalhamento admissível [Mpa]
r	Raio da polia [mm]
σ_e	Tensão de escoamento do material [Mpa]
σ_{eadm}	Tensão de escoamento admissível do material [Mpa]
S_f	É a tensão de fadiga corrigida [Mpa]
S'_f	É a tensão de fadiga estimado para um espécime de teste do tipo viga rotativa [Mpa]
μ	Fator de atrito entre polia e correia [adimensional]
V_A	Reação vertical no mancal A [N]
v_a	Velocidade de avanço [mm/mín]
v_{ap}	Velocidade de avanço radial [mm/mín]
v_c	Velocidade de corte [m/mín]

X	Fator radial para cálculo da carga resultante no rolamento [adimensional]
Y	Fator axial para cálculo da carga resultante no rolamento [adimensional]
z	Propriedade do material tabelada [adimensional]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 PROJETOS INTEGRADORES	20
2.2 PROCESSOS DE USINAGEM.	20
2.3 PROJETO MECÂNICO	22
2.4 CONTROLE DA MÁQUINA.....	23
3 METODOLOGIA.....	24
3.1 PROJETO CONCEITUAL.	24
3.1.1 Sistemas de movimentação linear	25
3.1.2 Sistema de fixação do tarugo	27
3.1.3 Carro longitudinal e transversal	28
3.1.4 Conjunto final	29
3.2 CÁLCULOS DAS FORÇAS DE USINAGEM, POTÊNCIAS E VELOCIDADES.	30
3.3. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE MÁQUINA.....	33
3.3.1 Dimensionamento do eixo	33
3.3.2 Dimensionamento dos mancais de rolamento	35
3.3.3 Seleção do motor de passo.....	36
3.4 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO COMPUTADOR MÁQUINA E ELETRÔNICA.....	38
4 PARTE PRÁTICA	42
4.1 CÁLCULOS DE USINAGEM	42
4.2 CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE MÁQUINA	43
4.3 ESCOLHA DOS SOFTWARES E COMPONENTES ELETÔNICOS	52
4.4 USINAGEM DOS COMPONENTES	55
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
6 CONCLUSÃO.....	69

REFERÊNCIAS	70
Apêndice A – desenhos de fabricação	71
Anexo B – Lista de códigos G suportados pelo GRBL.....	84

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo trazer aos alunos da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), dos cursos da Escola de Engenharia (E.E.), um projeto que envolve diversas áreas do conhecimento e que devem ser empregadas em conjunto para que possa ser concluído. Também deverá haver um diálogo entre o professor orientador e os alunos envolvidos de forma a estimular a reflexão sobre os problemas a serem enfrentados, possibilitando a criação de um conhecimento conjunto e integrado.

O projeto irá oferecer aos estudantes a oportunidade de colocar em prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, bem como obter experiência de como ocorre o processo de criação de um produto, desde a sua concepção até o modelo final, e a integração que é necessária entre as diversas áreas para que ele funcione.

Uma série de disciplinas podem ser associadas a esse projeto. Apenas da Engenharia Mecânica seria possível citar quase que a matriz curricular inteira do curso, que engloba desenho de elementos de máquina, construção de máquinas, materiais de construção mecânica, entre muitas outras. Matérias como “Linguagem de programação”, “Mecânica geral 1 e 2”, “Resistência dos materiais 1” são comuns a todos os cursos e estão associadas a esse projeto. Sendo mais específico com relação ao curso de Engenharia de Produção, é possível utilizar os conhecimentos de “Engenharia da qualidade e metrologia” e “Inovação e desenvolvimento de produto”. Os alunos do curso de Engenharia Elétrica poderão aplicar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de “Microprocessadores”, “Eletrônica aplicada” e “Controle de servomecanismos”.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Ao se pensar em produzir algo, por exemplo uma máquina, é necessário se pensar, ao mesmo tempo, em algumas questões do tipo: para que ela será feita? Qual o objetivo a ser cumprido por ela? Como ela será feita e quais os métodos utilizados para a sua fabricação? Quem irá fazê-la? Essas questões levam a uma complexidade de pensamentos que envolvem diferentes tipos de conhecimentos e informações. Atualmente, quando se pensa em realizar um projeto é necessário que haja uma equipe para fazê-lo, cada um com a sua responsabilidade e conhecimento específico para que o objetivo final seja alcançado. A máquina do começo desse parágrafo irá necessitar de um desenho, esquemas elétricos

e, talvez, pneumáticos ou hidráulicos, peças que serão fabricadas, elementos de fixação, rolamentos, muito cálculo e outras coisas necessárias ao seu funcionamento. Cada elemento da equipe irá se utilizar dos conhecimentos na sua área, e todo esse conhecimento será utilizado de forma integrada para se alcançar o objetivo final do projeto. E a boa integração desse conhecimento irá determinar se a máquina irá ou não funcionar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Projetar e construir um mini torno CNC controlado por Arduino para aplicação didática dentro da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie

1.2.2 Objetivos específicos

Fazer um estudo dos tipos de tornos CNC existentes afim de entender o seu funcionamento e, com isso, iniciar o modelo conceitual da máquina.

Projetar os elementos de máquina, tais como o eixo árvore, rolamentos e fusos e selecionar os motores dos carros longitudinal e transversal, selecionar o motor de acionamento do eixo árvore

Projetar o sistema de controle de máquina. Definir qual será o microcontrolador utilizado, selecionar os drivers de controle dos motores e definir quais serão os softwares de desenho, pós-processamento e de controle da máquina.

Elaborar os desenhos de fabricação mecânica dos elementos que serão fabricados pelos alunos.

Realizar a montagem da máquina, fazer a calibração dela e testar o funcionamento do conjunto.

Gerar a documentação da máquina.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco seções.

A Seção 1 apresenta a Introdução, que é composta pelos seguintes itens: texto de contextualização do tema e justificativa, problema de pesquisa e objetivos.

A Seção 2 apresenta uma revisão de literatura sobre projetos integradores, projeto mecânico para tornos mecânicos e controle de máquina.

A Seção 3 indica a metodologia adotada no trabalho, os requisitos fixados para o funcionamento da máquina e suas medidas, a conceituação e desenvolvimento de um modelo de torno mecânico, a sequência e equações utilizadas no projeto mecânico, o desenvolvimento do controle da máquina e as considerações a serem feitas a respeito do controle dos motores elétricos.

A Seção 4 contempla o cálculo das forças de usinagem, bem como os parâmetros que foram adotados para realizá-los, o cálculo dos elementos de máquina (eixo árvore, rolamentos e dos motores elétricos), como foi feita a seleção dos softwares e dos drivers de controle do motor. Aqui também é feito alguns comentários sobre a usinagem das peças que compõe a máquina.

A Seção 5 discute os resultados obtidos durante os testes e as dificuldades encontradas e suas soluções.

A Seção 6 relata as conclusões do trabalho e indica algumas recomendações para os próximos alunos que derem continuidade ao projeto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROJETOS INTEGRADORES

Escolas de engenharia no mundo inteiro desenvolvem projetos que integram diferentes áreas do conhecimento. Na Universidade de Stanford um dos professores propôs aos seus alunos de ensino fundamental e ensino médio a adaptação de um kit de robótica LEGO Mindstorm® para experimentos de biologia. Outra grande universidade, o MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusets). desenvolve robôs de biomimetismo que são capazes de recriar o movimento de animais como arrais e tubarões. No Brasil, o Instituto de Tecnologia Mauá tem um laboratório de controle, automação e robótica onde são desenvolvidos projetos nas áreas de controle de processo, engenharia biomédica, inteligência artificial, programação, materiais e mecânica. A Universidade Presbiteriana Mackenzie não fica de fora e em 2016 iniciou-se um estudo sobre comportamento coletivo de drones, que está sendo realizado pelo Laboratório de Computação Natural e Aprendizagem de Máquina

2.2 PROCESSOS DE USINAGEM.

As máquinas ferramentas tem como objetivo a transformação física de um corpo, seja no sentido geométrico ou no sentido dimensional. A transformação física, que tem por objetivo dar ao elemento uma forma diferente da inicial, pode produzir cavaco (ROSSI, 1981).

Segundo Ferraresi (1977):

Torneamento – processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

Operações de usinagem são aquelas que promovem a transformação de uma peça bruta através da remoção de material, que é chamado de cavaco. Segundo Ferraresi (1977), “cavaco é a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-

se por apresentar forma geométrica irregular”. Existem diversos processos de usinagem, cada um com uma finalidade diferente e que conferem diferentes formatos a peça bruta. Entre eles destacam-se: torneamento, aplainamento, furação, fretamento, brochamento, rosqueamento, retificação, brunimento, lixamento e denteamento.

Durante o torneamento ocorrem quatro tipos de movimento: movimento de corte, movimento de avanço, movimento de profundidade e movimento efetivo, que é o movimento resultante dos movimentos de corte e de avanço. Esses movimentos são relativos entre a peça e a aresta cortante, e a peça é considerada como parada. Na figura 1 podemos ver como esses avanços se distribuem na peça.

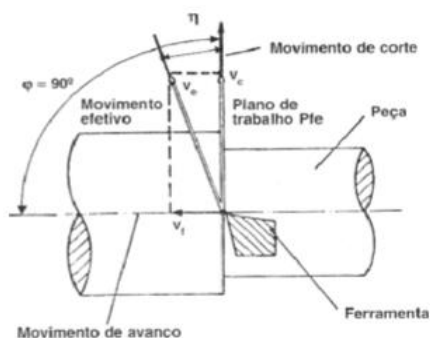


Figura 1: movimentos no torneamento (Fonte: Ferraresi (1977)).

Além dos movimentos, deve-se distinguir a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a velocidade efetiva, que seguem a direção de corte, direção de avanço e direção efetiva, respectivamente.

O plano que contém as direções de corte e de avanço é chamado de plano de trabalho. Neste plano realizam-se todos os movimentos que tomam parte na formação do cavaco.

O ângulo de posição K_r formado entre o plano de corte e o plano de trabalho deve ser levado em conta, pois este é considerado para o cálculo das grandezas do cavaco. Ele depende do tipo de fixação da pastilha na haste e da forma da haste. A figura 2 ilustra esse ângulo.

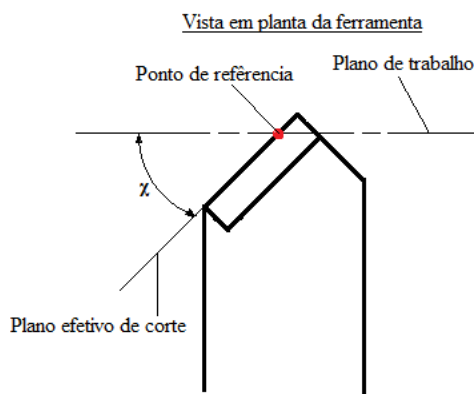


Figura 2: ângulo de posição (ou ângulo do gume de corte), indicado por χ .

(Fonte: acervo próprio)

2.3 PROJETO MECÂNICO

Os cálculos das forças geradas durante a usinagem foram realizados tendo como referência Ferraresi (1977), que toma como base a norma DIN 6584, de 1963. Algumas medidas ligadas ao processo de torneamento precisaram ser preestabelecidas para que os cálculos pudessem ser feitos. As forças de usinagem são consideradas agindo em direção e sentido sobre a ferramenta, e estas são decomposições da força de usinagem F_u num plano ou numa direção. A partir dos dados obtidos para essas forças foi possível obter-se as potências ligadas a elas, e então a potência que deve ser fornecida pelo motor que rotaciona o eixo árvore da máquina.

Após o cálculo das forças de usinagem foi feito o dimensionamento dos elementos de máquinas utilizados. O dimensionamento desses elementos foi realizado através dos métodos utilizados em Shigley (2005) e Mott (2015). O eixo árvore foi dimensionado considerando que ele sofre flexo-torção, e depois foi verificada a fadiga no local mais crítico. Os rolamentos foram escolhidos a partir dos catálogos de fabricantes e então foi verificada a carga dinâmica básica calculada com a que é disponibilizada pelos fabricantes para verificar se os rolamentos poderiam ser utilizados. Os fusos transversais foram calculados como parafusos de potência

2.4 CONTROLE DA MÁQUINA

O comando numérico computadorizado (ou CNC) permitiu a automatização das máquinas ferramentas que hoje são capazes de fabricar peças com geometrias complexas com rapidez e grande precisão dimensional, excluindo do processo o erro humano e aumentando a produtividade que não eram possíveis de serem obtidas até a sua invenção na segunda metade do século XX.

Os equipamentos comandados com controle numérico se diferenciam basicamente dos convencionais, uma vez que não necessitam de acessórios que proporcionem o controle dos movimentos da máquina [...]. Estes movimentos são comandados através de dados de entrada que determinam os movimentos a serem executados [...], além do que, são maiores as garantias de uniformidade de qualidade de peça para peça e de lote para lote. (MACHADO, 1986).

Em seu livro, Banzi (2009) diz que o “Arduino nasceu para ensinar Design Interativo, uma matéria que coloca prototipagem no centro de sua metodologia”. Ele ainda diz que seu livro foi escrito para “os ‘originais’ utilizadores do Arduino: designers e artistas”. A plataforma Arduino foi criada para facilitar o ensinamento e aprendizagem de estudantes de design que tinham poucos ou nenhum conhecimento de eletrônica e programação. “O Arduino é uma plataforma de prototipagem de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar.” (ARDUINO). A placa do Arduino pode ser considerada como um computador e é baseada no microchip ATmega programada como entrada USB, o que faz o computador reconhecer o Arduino como um dispositivo tal qual um mouse.

Como microcontrolador pensou-se em duas opções: controladores PIC ou o Arduino. Era necessário que esse controlador fosse de fácil aprendizagem e de baixo custo. O Arduino foi o escolhido por uma série de fatores: é uma plataforma de hardware e software aberto, o que permite que pessoas façam variações de sua placa e programação (que é baseada em C/C++, sendo de fácil aprendizagem, é compatível, com Mac OSX, Windows e Linux, tem uma grande comunidade de pessoas, possuindo vasto conhecimento disponível na internet, a placa do Arduino tem menor custo comparada a outras opções semelhantes.

3 METODOLOGIA

3.1 PROJETO CONCEITUAL.

A concepção da máquina teve como premissa os seguintes requisitos:

- Ter medidas máximas de 200 x 80 mm, quando vista em planta
- Ser capaz de usinar alumínio
- Ter uma rotação no eixo árvore de 1000 rpm
- Diâmetro máximo do tarugo deve ser de 16 mm, com comprimento de até 70 mm
- Ter um custo máximo de R\$500,00

A ideia do projeto surgiu com o professor orientador que queria desenvolver um mini torno CNC controlado por Arduino. A figura 3 mostra o primeiro conceito do torno desenhado por ele.

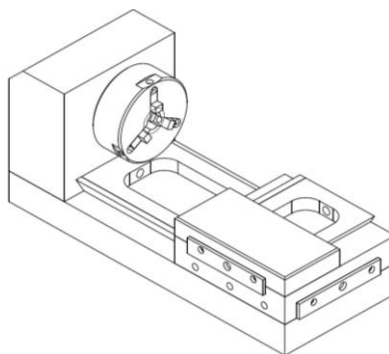


Figura 3: primeiro conceito do mini torno (Fonte: acervo próprio).

O projeto iniciou-se com uma pesquisa a respeito dos tornos mecânicos e tornos CNC, a forma como funcionam, diferenças e igualdades, bem como modelos de mini tornos construídos por entusiastas e outros estudantes. Existem diversos projetos de fresas e impressoras 3D feitos por pessoas e que disponibilizam vídeos na internet ou até um manual do projeto. Esses projetos foram essenciais para que se pudesse moldar o conceito inicial do torno para o que ele se tornou no final. As imagens 4, 5 e 6 mostram alguns modelos que serviram como base para desenvolvimento do mini torno.

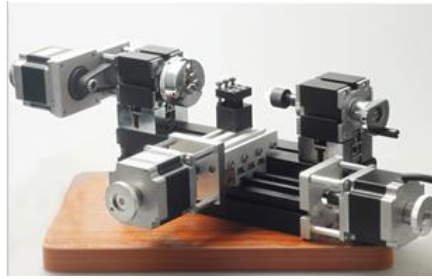


Figura 4: mini torno(fonte: <http://www.thefirsttools.com/2-4-3-three-axis-cnc-lathe.html>).

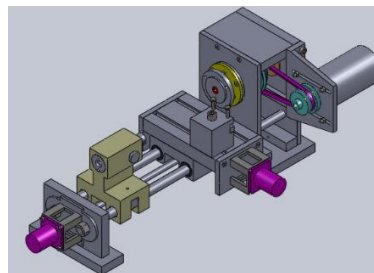


Figura 5: mini torno (fonte: <https://grabcad.com/library/cnc-mini-lathe--1>).

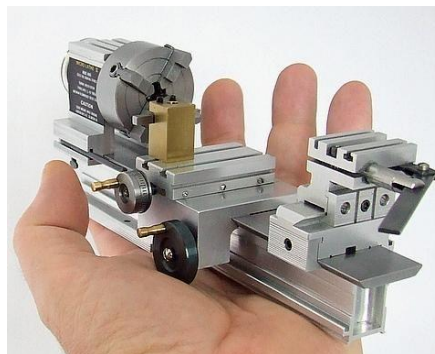


Figura 6: mini torno (fonte: <https://www.pinterest.com/dtorrestcmd/machining/>).

3.1.1 Sistemas de movimentação linear

Para o apoio dos carros longitudinal e transversal durante a movimentação linear dos mesmos foram consideradas a utilização de guias lineares como a da figura 7, também guias lineares cilíndricas com rolamentos lineares, mostrados na figura 8 ou *pillow blocks*, como os da figura 9.



Figura 7: guias lineares (Fonte: www.kalatec.com.br/trh15fl/).

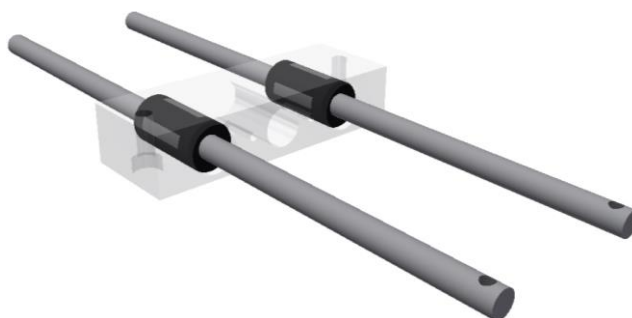


Figura 8: guias lineares cilíndricas com rolamento linear (Fonte: acervo próprio).



Figura 9: pillow block (Fonte: www.kalatec.com.br/rolamento-sme/).

Após realizar uma pesquisa de preço e viabilização, optou-se por utilizar guias cilíndricas com rolamentos lineares, tanto para o carro longitudinal quanto para o carro transversal, pois estas poderiam ser usinadas nos laboratórios de usinagem da própria universidade, e o custo de um rolamento linear para o diâmetro da guia é baixo.

Para a movimentação dos carros, a primeira opção seria a utilização de fusos de esferas recirculantes. Essa opção seria a ideal, pois permite um alto grau de precisão

dimensional, porém, esse tipo de fuso tem um custo muito elevado. A opção mais próxima é a de fuso trapezoidal, que perde um pouco em precisão, mas tem um custo muito menor, sendo viável a sua utilização no projeto.

3.1.2 Sistema de fixação do tarugo

Como as dimensões do torno são muito pequenas comparadas a um torno convencional, a placa universal seria de difícil fabricação caso o sistema de fechamento das castanhas fosse feito do mesmo modo que nos tornos convencionais. A primeira opção de placa universal foi desenvolvida com base num projeto de placa de torno disponível na internet. A placa é usinada e o fechamento é feito por parafusos. A figura 10 mostra o modelo desenvolvido em software CAD da placa.

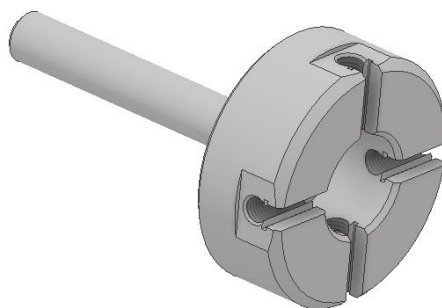


Figura 10: primeiro modelo da placa do torno (Fonte: acervo próprio).

O problema deste modelo é que ele não garante a centralidade da peça em relação ao eixo de giro dela, sendo necessário um outro tipo de placa, como uma placa com castanhas retráteis. Mas o sistema de acionamento retrátil das castanhas precisaria de um espaço muito grande, sendo inviável para o projeto. A solução encontrada veio após uma conversa com um dos técnicos dos laboratórios de usinagem da universidade. Foi proposto por ele que fosse feito o mesmo sistema utilizado nas máquinas fresadoras, ou seja, um sistema de pinças. Este sistema é mostrado na figura abaixo.

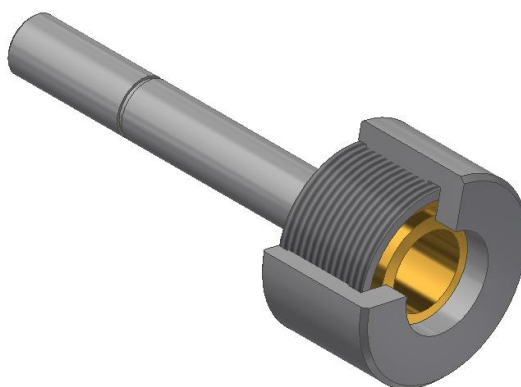


Figura 11: sistema de pinça para prender o tarugo (Fonte: acervo próprio).

O sistema é dividido em três peças: o eixo árvore, a pinça e a porca. Os três componentes são mostrados separados na vista explodida da figura 12 abaixo.

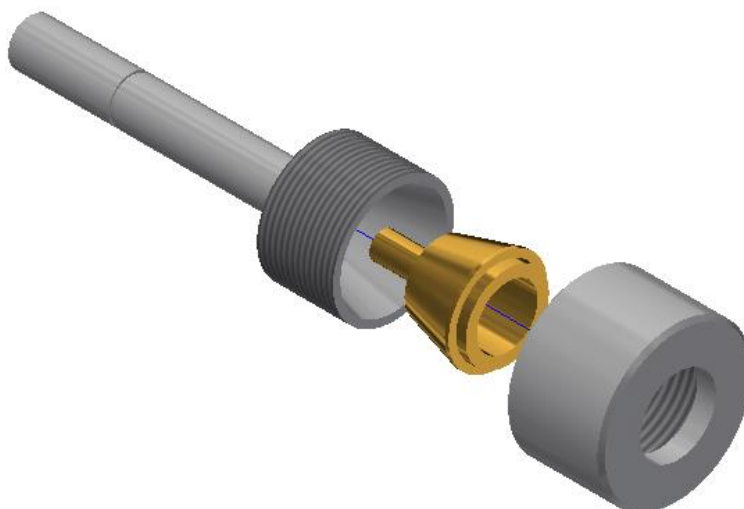


Figura 12: vista explodida do sistema de pinças do eixo árvore.

3.1.3 Carro longitudinal e transversal

O carro longitudinal foi elaborado para que pudesse ser utilizado com a guias cilíndricas junto com o rolamento linear. Para tanto, há o alojamento dos rolamentos bem como os furos para a fixação de uma tampa para que não escapem, o que também dificulta a entrada de quaisquer materiais que possam atrapalhar o seu funcionamento.

Como serão utilizados rolamentos lineares, a fabricação das guias foi feita com muito cuidado e atentando-se para as tolerâncias dimensionais, para que não haja espaço para folgas. Ao carro longitudinal também será fixada a bucha com rosca do fuso

trapezoidal de movimentação longitudinal e também o motor de passo que irá fazer a movimentação do carro transversal.

O carro transversal e o castelo são a mesma peça também é mantido na posição através de guias cilíndricas. Como não há espaços para a colocação de buchas e entre o carro e a guia, optou-se por utilizar pinos retificados e temperados como guias. Um outro fator para essa escolha é a dificuldade de se obter boas tolerâncias e peças muito esbeltas. A figura 13 mostra o castelo preso ao carro longitudinal.

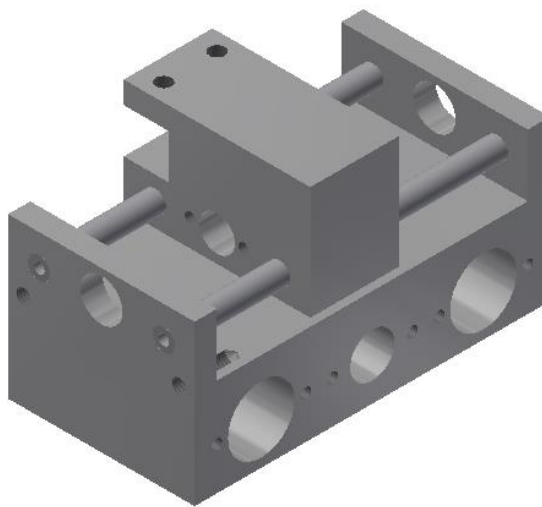


Figura 13: carro transversal (Fonte: acervo próprio).

3.1.4 Conjunto final

As figuras 14 e 15 mostram o conceito final do torno, junto com algumas medidas externas.

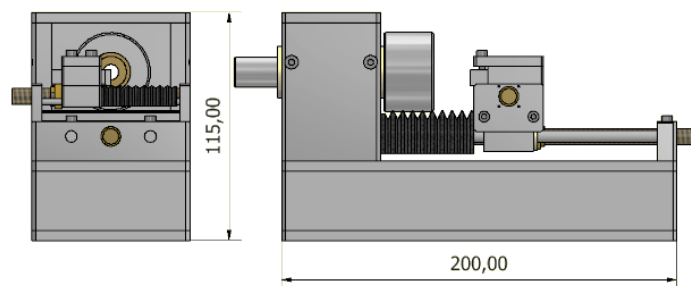


Figura 14: vista frontal e vista lateral do torno (Fonte: acervo próprio).

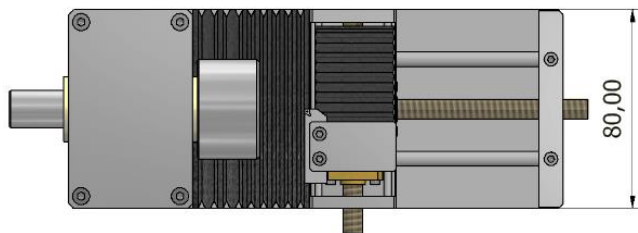


Figura 15: vista superior do torno (Fonte: acervo próprio).

3.2 CÁLCULOS DAS FORÇAS DE USINAGEM, POTÊNCIAS E VELOCIDADES.

Para iniciar os cálculos de usinagem são necessárias algumas considerações iniciais, como os materiais que serão usinados no torno, para que possamos definir alguns parâmetros de corte. Tomou-se como base o alumínio utilizado nos laboratórios de usinagem da UPM.

A força de corte (F_c) é dada pela fórmula de Kienzle (1) abaixo, que é “bastante simples e suficientemente precisa para os cálculos práticos da força de usinagem” (FERRARESI, 1977). A força de corte é igual a:

$$F_c = k_c 1.1 * b * h^{1-z} \text{ (N)} \quad (1)$$

Onde b é a largura de usinagem, h é a espessura de usinagem e z é uma propriedade do material obtida experimentalmente, sendo igual 0,25 para o alumínio. Para calcular a largura de corte é necessário escolher um valor para a profundidade de corte (a_p), e para calcular a espessura de corte também é necessário fixar o valor do avanço (f). Além disso é necessário especificar também o valor do ângulo de corte. A largura de corte (b) e a espessura de corte (h) podem ser calculadas pelas equações (2) e (3) abaixo.

$$b = \frac{a_p}{\sin K_r} \text{ (mm)} \quad (2)$$

$$h = f * \sin K_r \text{ (mm)} \quad (3)$$

Na figura 16 podemos ver como essas características estão dispostas durante o torneamento.

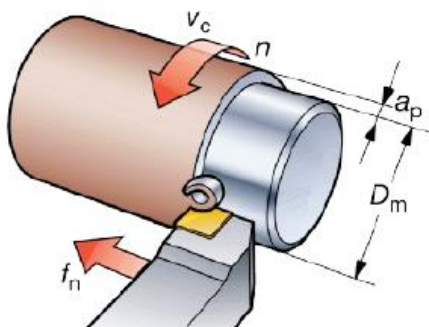


Figura 16: disposição das grandezas de corte (Fonte: catálogo SKF).

Além da força de corte, outras forças também devem ser consideradas, pois contribuem para a potência de usinagem. Elas são decomposições da força de usinagem F_u , que “é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem” (FERRARESI, 1977). A figura 17 ilustra essas forças durante o processo de torneamento.

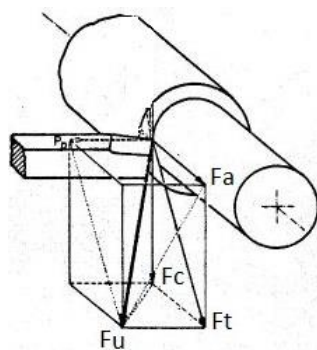


Figura 17: disposição das forças durante o torneamento externo.

(Fonte: Ferraresi (1977)).

Nesta figura, F_t é a força ativa, que é a projeção de F_u sobre o plano de trabalho, F_a é a força de avanço, que é a projeção de F_u sobre a direção de avanço, F_c é a projeção de F_u sobre a direção de corte, dada pela velocidade de corte v_c , e F_{ap} é a força de apoio, que é a projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

Segundo Ferraresi (1977), no torneamento tem-se as seguintes relações entre as forças de corte, de avanço e de apoio:

$$F_c \cong 4,5 * F_a \text{ (N)} \quad (4)$$

$$F_{ap} \cong 0,4 * F_c \text{ (N)} \quad (5)$$

Foi necessário fixar uma gama de trabalho para o avanço e para a profundidade de corte, pois, dependendo da geometria da peça, a máquina poderá trabalhar de diferentes formas. Os gráficos 1 e 2 abaixo mostram como as forças de corte, de avanço e de apoio se comportam com a variação desses dois parâmetros de usinagem.

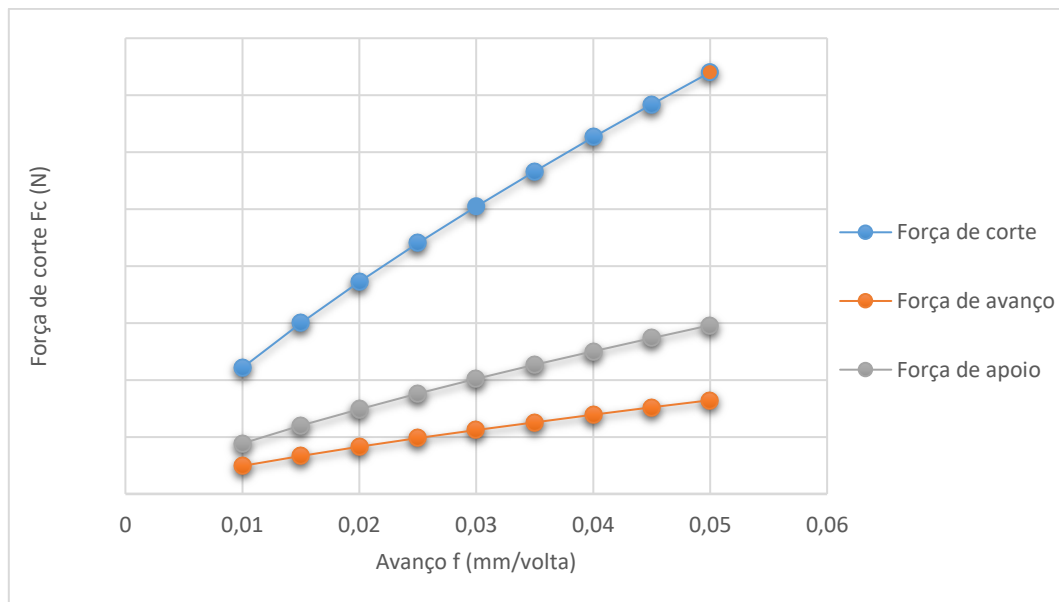


Gráfico 1: variação das componentes da força de usinagem para diferentes valores de avanço.

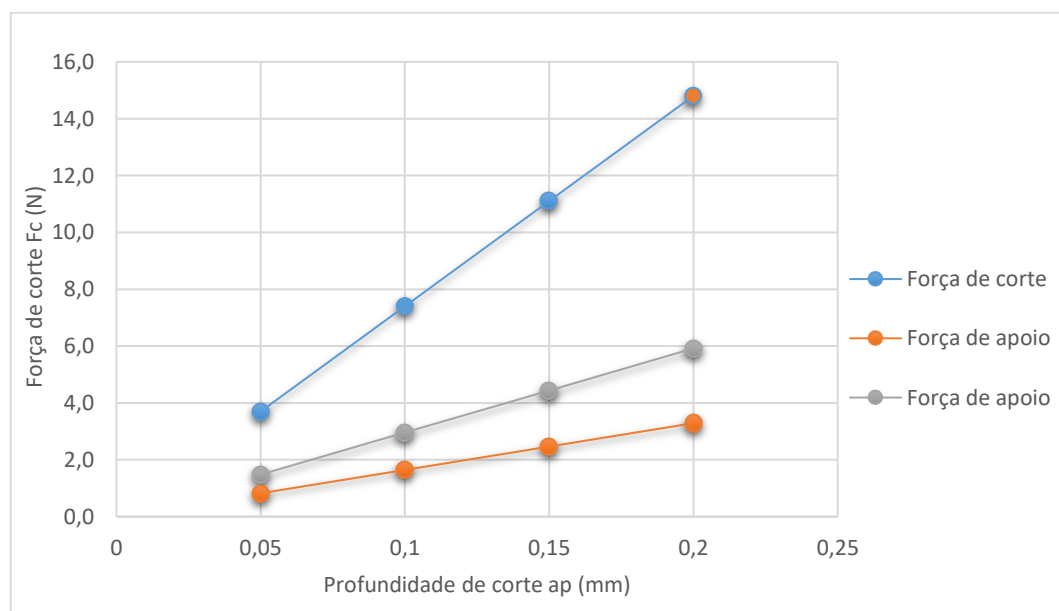


Gráfico 2: variação das componentes da força de usinagem para diferentes valores de profundidade.

A potência de corte pode ser calculada pela equação (6):

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 75} \quad (CV) \quad (6)$$

A velocidade de corte é dada pela equação (7) abaixo:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad \left(\frac{m}{\text{mín}} \right) \quad (7)$$

Onde “d” é o diâmetro do tarugo em mm e “n” é rotação em rpm.

No torneamento, a potência que deverá ser entregue pelo motor que rotaciona o eixo árvore deve ser calculada a partir da soma das potências geradas pelas três forças que atuam na peça: F_c , F_a e F_{ap} . A equação (8) mostra o cálculo da potência que deve ser fornecida pelo motor.

$$P_m = F_c \cdot v_c + F_a \cdot v_a + F_{ap} \cdot v_{ap} \quad (8)$$

Contudo, o valor de potência associado a força de corte é responsável pela maior parcela da potência efetiva de corte, podendo chegar a ser 1000 vezes maior do que as outras duas potências (a velocidade de corte “ v_c ” é dada em m/mín, enquanto que as outras duas velocidades são dadas em mm/mín), e por isso F_c é chamada de força principal de corte. Para o cálculo da potência fornecida pelo motor (P_m) utiliza-se apenas a F_c dividida por um coeficiente η , que é o rendimento da máquina operatriz, igual a 60% a 80%. A equação (9) abaixo mostra como é feito o cálculo da potência do motor. Neste projeto foi adotado $\eta = 0,75$

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (9)$$

3.3. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE MÁQUINA

3.3.1 Dimensionamento do eixo

A transferência de potência do motor principal para o eixo árvore foi feita através de polias. No eixo árvore, além das forças de usinagem, atua também uma força T_0 que é a força que a polia exerce sobre o eixo devido à transmissão por correia entre o motor e o eixo árvore. Calcula-se o momento torsor no eixo pela equação (10) abaixo:

$$M_t = 71620 \cdot \frac{P}{n} \quad (10)$$

T_0 é a soma das forças T_1 e T_2 que atuam na polia. Para calcular as forças T_1 e T_2 são necessárias as equações (11) e (12) abaixo:

$$Mt = (T_1 - T_2) * r \quad (11)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu * \alpha} \quad (12)$$

A equação (13) abaixo foi utilizada para calcular o diâmetro do eixo. Nessa equação “b” é um fator de geometria, calculado pela equação (14), “Mi” é o momento ideal, calculado pela equação (15).

$$d \geq 2,17 * \sqrt[3]{\frac{b * Mi}{\sigma e_{adm}}} \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

$$b = \frac{1}{1 - \left(\frac{di}{De}\right)^4} \quad (14)$$

$$Mi = \sqrt{Mf^2 + \left(\frac{a}{2} * Mt\right)^2} \quad (\text{N.mm}) \quad (15)$$

Na equação (13), para um eixo vazado, “di” é o diâmetro interno e “De” o diâmetro externo. Para um eixo maciço esse fator é igual a 1. Na equação (13) “Mf” é o momento fletor máximo no eixo, “Mt” é o momento torsor e “a” é o número de Bach, que é igual a relação abaixo.

$$a = \frac{\sigma e_{adm}}{\tau_{adm}}$$

O eixo árvore sobre um carregamento alternado, devido a flexão alternada, mais a torção. A figura 18 abaixo mostra como a tensão varia com o tempo num carregamento alternado. Portanto é necessário verificar o eixo à fadiga.

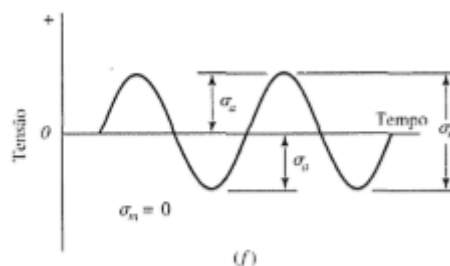


Figura 18: carregamento alternado completamente invertido (Fonte: Shigley (2005)).

Para a verificação a fadiga é necessário calcular a tensão de fadiga corrigida, através da equação (16) abaixo

$$S_f = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_f \quad (16)$$

- Onde:
- k_a : fator de modificação de condição da superfície;
 - k_b : fator de modificação de tamanho;
 - k_c : fator de modificação de carga;
 - k_d : fator de modificação de temperatura;
 - k_e : fator de modificação de confiabilidade;
 - k_f : fator de modificação para condições efeito diversos.
 - S_f : é a tensão de fadiga corrigida;
 - S'_f : é a tensão de fadiga estimado para um espécime de teste do tipo viga rotativa.

3.3.2 Dimensionamento dos mancais de rolamento

Aqui será mostrado como os mancais de rolamento foram dimensionados e selecionados. Foi feita uma pré-seleção do rolamento que seria utilizado através dos parâmetros geométricos, como diâmetro interno e largura, e depois foi feita a verificação desse rolamento com base na carga dinâmica básica informada no catálogo do fabricante.

A capacidade de carga dinâmica básica é utilizada para calcular a vida nominal básica de rolamentos sob cargas. Ela é definida como a carga no rolamento que resultará numa vida nominal básica de 1.000.000 revoluções, e foi calculada pela equação (17):

$$C = P * \left(\frac{L_d}{10^6}\right)^{1/k} \quad (17)$$

Nessa equação L_d é dado em revoluções, k depende do tipo do rolamento (se de esferas ou de rolos) e P é a carga aplicada no rolamento.

Para o mancal B, em que apenas atua uma carga vertical, o valor de P é o próprio valor da força.

No mancal A, em que atuam uma força radial e outra axial, a carga P é calculada utilizando a seguinte equação (18):

$$P = X * V_a + Y * H_a \quad N \quad (18)$$

Porém, é necessário calcular algumas relações para verificar se a magnitude da carga axial terá influência para o dimensionamento do rolamento. A tabela 6 abaixo mostra dois fatores, “e” e “Y” que serão utilizados para comparação e a relação $\frac{V_A}{C_0}$, que é uma das relações utilizadas.

e	V/C0	Y
0,17	0,003	2,54
0,19	0,014	2,3
0,22	0,028	1,99
0,26	0,056	1,71
0,28	0,084	1,55

Tabela 1: fatores para cálculo do rolamento (Fonte: acervo próprio).

3.3.3 Seleção do motor de passo.

Os motores de passo são os atuadores que irão movimentar o carro transversal e o carro longitudinal. O principal motivo para utilizá-los ao invés de outros tipos de motor é que são altamente precisos, algo imprescindível para esse projeto. Existem muitos modelos de motor de passo disponíveis e a escolha deve levar em consideração os esforços a serem vencidos, e, portanto, o torque do motor é um parâmetro a ser observado, o tamanho, a corrente consumida pelas bobinas do motor, a tensão necessária para a sua alimentação e o custo. A figura 19 abaixo mostra um exemplo de motor de passo.



Figura 19: motor de passo com o fuso trapezoidal no lugar do eixo (Fonte: <https://www.kalatec.com.br/motoresdepasso/motor-de-passo-com-fuso/>).

Como perfil de rosca para os fusos, o filete ideal seria o de perfil quadrado, pois provê máxima eficiência e elimina qualquer componente de força radial entre o fuso e a porca. Contudo, esse tipo de rosca é de difícil fabricação e não se encontra facilmente no mercado. Uma solução mais conveniente é o filete do tipo ACME, que é encontrada mais facilmente e por um custo menor, quando comparado com o custo da rosca quadrada.

Uma outra opção seria utilizar fusos de esferas recirculantes. Porém, elevaria muito o custo final do projeto.

Esses motores irão movimentar os fusos, que nada mais são do que parafusos de potência, e assim foram dimensionados, utilizando a equação (19).

$$T = \frac{F \cdot dp}{2} * \frac{(\mu \cdot \pi \cdot dp + L \cdot \cos \alpha)}{(\pi \cdot dp \cdot \cos \alpha - \mu \cdot L)} \text{ (N.mm)} \quad (19)$$

Nessa equação temos que:

- F é a força contrária ao movimento
- dp: diâmetro primitivo do parafuso
- L: é o avanço do parafuso
- μ : é o coeficiente de atrito entre o parafuso e a porca
- α : é o ângulo entre a força normal a força contrária ao movimento, quando o parafuso é olhado num corte transversal; para roscas do tipo ACME esse ângulo tem o valor de 14,5°.

3.4 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO COMPUTADOR MÁQUINA E ELETRÔNICA

Existem vários programas ligados ao CNC e que possibilitam que a máquina funcione corretamente. É necessário haver algo que traduza o desenho feito num CAD em código G, algo que interprete esse código e algo que o envie para a máquina, fazendo o seu controle (um software CNC). Portanto é necessário seguir uma sequência de passos que se inicia no projeto e desenho da peça até o seu modelo físico, mostrada na figura 20 abaixo.

Existem diversos softwares CAD disponíveis no mercado, e como o desenho deve estar no formato DXF para esse projeto, qualquer um poderia ser utilizado. Por ser um projeto que visa ter baixo custo, foi dada preferência para softwares gratuitos, ou o que a universidade possui licença de uso. O mesmo critério foi utilizado para a seleção dos softwares CAM e de controle da máquina

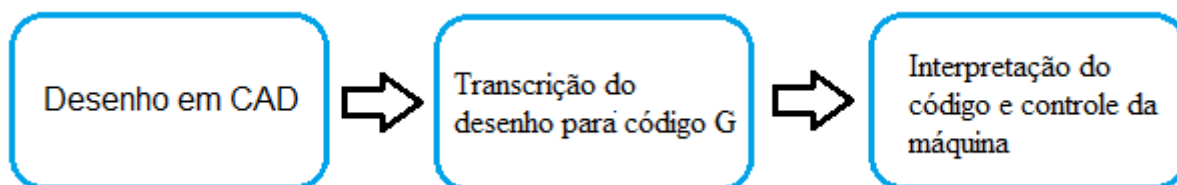


Figura 20: Sequência de passos para (Fonte: acervo próprio).

Para a interface de comunicação entre o computador e o torno foi escolhido o Arduino UNO (mostrado na figura 21), que é de fácil aprendizagem e pode ser ligado diretamente ao computador para a transferência dos dados.



Figura 21: Arduino UNO (Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>).

O Arduino possui um software próprio para a sua programação que possui diversas bibliotecas disponíveis (como bibliotecas para controle de motor de passo) e muitas outras que podem ser encontradas para download na internet. A programação do Arduino, apesar de possuir comandos próprios, é baseada C/C++. A função do Arduino é de receber os comandos enviados pelo Linux CNC e então enviá-los para os drivers dos motores de passo.

O Arduino necessita de uma programação que o comande. Existe um firmware chamado GRBL que é o responsável por receber as informações do software de controle e então enviar esse código para os motores, através do Arduino. O GRBL é instalado no *chip* ATmega 328 do Arduino UNO da mesma forma como seria feito para qualquer outra programação no microcontrolador. O GRBL foi escolhido por ser um software gratuito, de alta performance e que permite que seu código seja reescrito.

Para se controlar os motores de passo é necessário um *driver* de potência. Eles permitem que motores que funcionam com tensões e correntes elevadas sejam controlados por circuitos menores. No caso, alguns dos motores consomem até 1A de corrente por fase, enquanto o Arduino só é capaz de fornecer no máximo 50 mA através de suas portas. Se o motor for ligado direto ao microcontrolador irá danificar a placa permanentemente, se fazendo necessário a utilização dos drivers. Existem muitos modelos de drivers de motor de passo disponíveis. Como os motores de passo são controlados por um circuito separado do motor do eixo árvore, o que guiou a escolha dos drivers foi a corrente utilizada pelo motor de passo escolhido. Um modelo de *driver* é mostrado na figura 22 abaixo.



Figura 22: driver A4988 (Fonte: www.pololu.com/product/2980).

Existe no mercado uma placa de circuito (denominada de *CNC Shield*) que possibilita o controle de até quatro *drivers*. Essa placa é ideal para projetos de máquinas de pequeno porte – é muito utilizada para fresadoras e impressoras 3d - pois possui espaço para os drivers dos motores de passo, pode ser colocada diretamente no Arduino e é possível também ligar os “fins de curso” a ela, facilitando bastante a ligação da parte elétrica e reduzindo o espaço necessário para as ligações. Na figura 23 podemos ver um exemplo dessa placa acoplada ao Arduino.

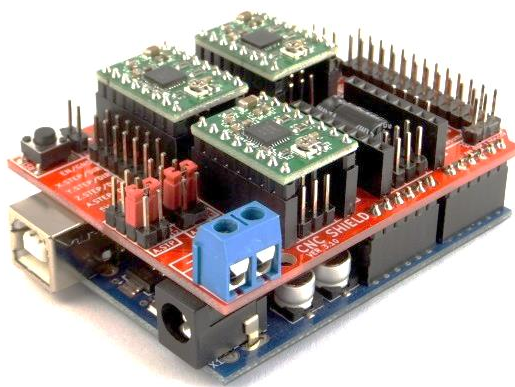


Figura 23: *CNC Shield* (placa vermelha), com 3 drivers A4988, acoplada ao Arduino

(Fonte: blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield/)

Para garantir que o motor opere com a potência máxima é necessário fazer um ajuste no driver. Esse ajuste é feito pelo trimpot do próprio driver. Para isso é necessário calcular a tensão de referência (V_{REF}) correspondente à corrente limite. Pelo *datasheet* do *driver*, a equação que se deve utilizar é:

$$V_{REF} = 8 * I_{m\acute{a}x} * R_s \quad (V)$$

Nesta equação, $I_{m\acute{a}x}$ é a corrente que se deseja no motor e R_s é o valor dos resistores no *driver*. A localização desses resistores pode ser vista na figura 24.



Figura 24: localização dos resistores R_s no driver A4988 (Fonte: acervo próprio).

Assim como os motores de passo, o motor que aciona o eixo árvore necessita de tensão e corrente além do que o Arduino pode fornecer. Como é necessário que ele apenas ligue no início da usinagem e desligue ao final, foi utilizado um módulo relê de 1 canal com a bobina acionada por 5V (mostrado na figura 25) para fazer o seu controle.



Figura 25: módulo relê utilizado para controlar o motor principal

(Fonte: www.curtocircuito.com.br/modulo-rele-1-canal-5v-10a.html).

Para alimentar os motores é necessário dispor de uma fonte. Ela foi dimensionada com base na corrente total consumida pelo circuito e também na tensão de alimentação, que deve ser capaz de atender a demanda dos dois motores de passo e do motor que aciona o eixo-árvore.

4 PARTE PRÁTICA

Aqui serão demonstrados todos os cálculos que foram feitos para o projeto.

4.1 CÁLCULOS DE USINAGEM

Como foi informado no item 3.2, o material tomado como base para os cálculos foi o alumínio. Da literatura obtém-se o valor da pressão específica de corte ($k_{c1.1}$), deste alumínio, que é de 700 N/mm².

Para a profundidade de corte foi fixado o valor de 0,2 mm e para o avanço 0,05 mm. A ferramenta de corte foi fabricada em aço rápido de tal forma que o valor para o ângulo K_r (ângulo de corte) fosse de 90°. Portanto,

$$k_{c1.1} = 700 \text{ N/mm}^2$$

$$a_p = 0,2 \text{ mm}$$

$$f = 0,05 \text{ mm}$$

$$K_r = 90^\circ$$

Substituindo esses valores nas equações (2) e (3) tem-se para a largura de corte:

$$\mathbf{b = 0,2 \text{ mm}}$$

E para a espessura de corte:

$$\mathbf{h = 0,05 \text{ mm.}}$$

Com os valores de h e b calculados a força de corte pode então ser calculada pela equação (1).

$$\mathbf{F_c = 700 * 0,2 * 0,05^{1-0,25} \approx 14,8 \text{ N}}$$

Os valores da força de avanço e da força de apoio, após substituir F_c em (4) e (5), são:

$$\mathbf{F_a \cong \frac{F_c}{4,5} \cong 3,29 \text{ N} \quad \text{e} \quad F_{ap} \cong 0,4 * F_c \cong 5,95 \text{ N}}$$

Devido as dimensões da pinça que prende o tarugo, o diâmetro máximo da matéria prima é de 16 mm. Para esse projeto estipulou-se uma rotação de 1000 rpm. A força de

corte deve ser convertida para kgf na equação. Substituindo esses valores na equação (7) obtém-se:

$$v_c = 50,27 \text{ m/mín.}$$

Com esse valor obtém-se para a potência de corte P_c , substituindo na equação (7)

$$P_c = 0,017 \text{ CV} = 12,5 \text{ W.}$$

Considerando um rendimento de 0,75, a potência do motor que aciona o eixo árvore deve ser de no mínimo, pela equação (9):

$$P_m = \frac{0,017}{0,75} \cong 0,023 \text{ CV ou } 16,7 \text{ W}$$

4.2 CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE MÁQUINA

No eixo árvore, além das forças de usinagem, atua também uma força T_0 que é a força que a polia exerce sobre o eixo devido à transmissão por correia entre o motor e o eixo árvore. Considerando a rotação $n = 1000 \text{ rpm}$ e a potência $P = 0,017 \text{ CV}$, calcula-se o momento torsor no eixo pela equação (10):

$$M_t = 71620 * \frac{P}{n}$$

$$M_t = 71620 * \frac{0,023}{1000} = 1,65 \text{ kgf.cm} = 161,60 \text{ N.mm}$$

T_0 é a soma das forças T_1 e T_2 que atuam na polia. Para calcular as forças T_1 e T_2 são necessárias as equações (11) e (12) abaixo. O raio “r” da polia do eixo árvore é de 10 mm.

$$M_t = (T_1 - T_2) * r$$

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu * \alpha}$$

Onde $\mu = 0,8$ e $\alpha = \pi \text{ rad}$. Após os cálculos temos que

$$T_1 = 17,54 \text{ N}$$

$$T_2 = 1,42 \text{ N}$$

$$T_0 = T_1 + T_2 = 18,96 \text{ N.}$$

Com as forças atuantes obtidas foi elaborada uma análise das forças no eixo árvore. A figura 26 mostra as forças de usinagem agindo no tarugo durante a usinagem. A figura 27 abaixo mostra uma vista em corte do eixo e dos mancais, identificando cada um. As figuras 28, 29 e 30 abaixo mostram a distribuição do momento fletor no eixo e os esforços cortantes que atuam sobre ele. Esses resultados foram obtidos considerando que o tarugo a ser usinado deve ter no máximo 70 mm de comprimento.

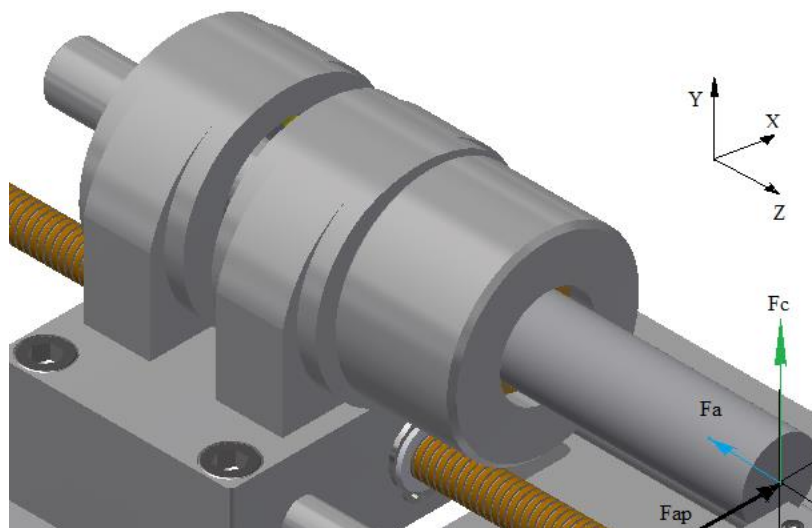


Figura 26: disposição das forças no tarugo (Fonte: acervo próprio).

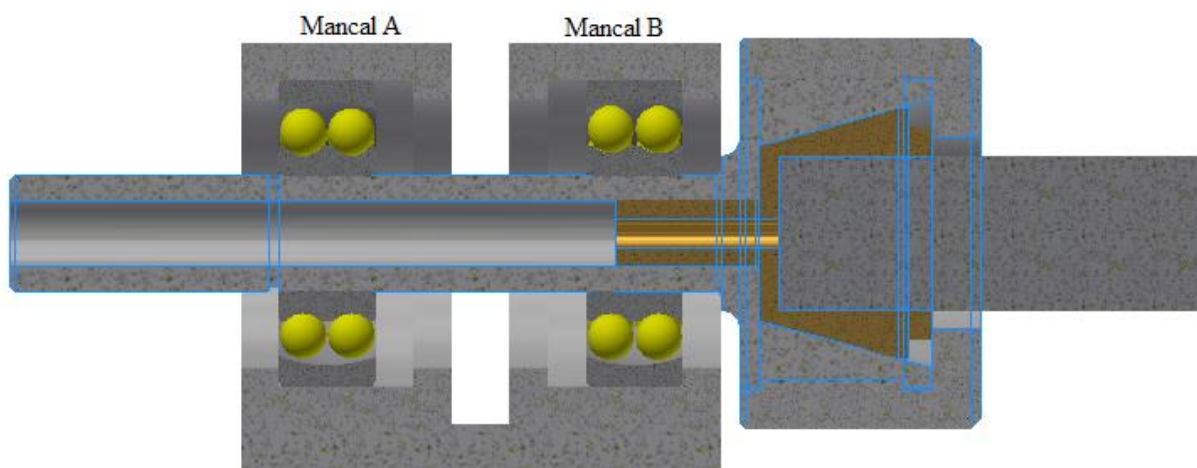


Figura 27: vista em corte do eixo e dos mancais (Fonte: acervo próprio).

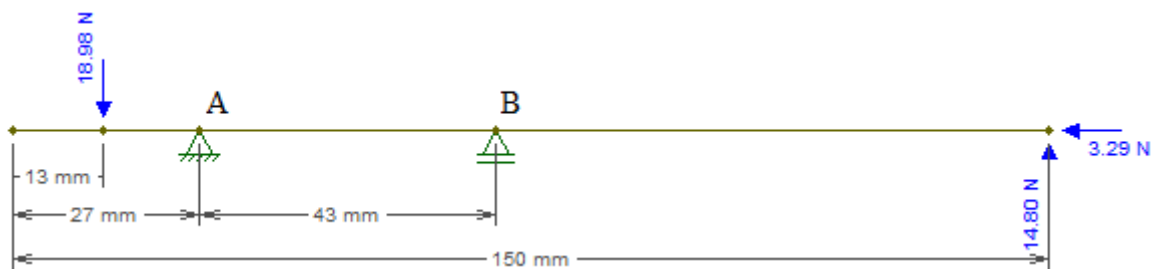


Figura 28: distribuição dos esforços sobre o eixo no plano YZ (Fonte: acervo próprio).

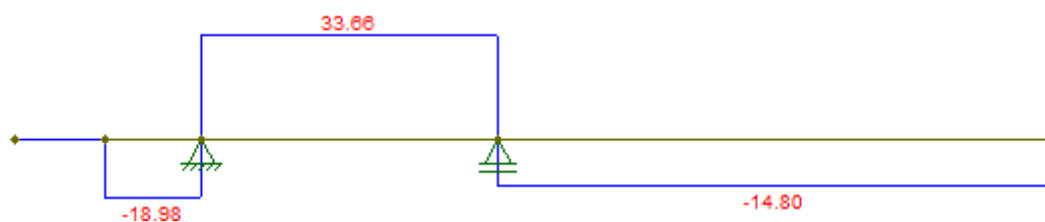


Figura 29: distribuição dos esforços cortantes sobre o eixo no plano YZ (Fonte: acervo próprio).

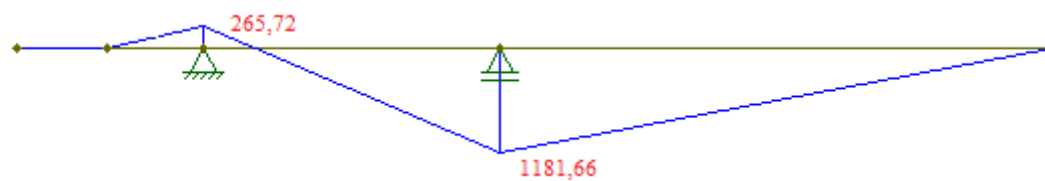


Figura 30: distribuição do momento fletor sobre o eixo no plano YZ (Fonte: acervo próprio).

Pelos gráficos a região mais solicitada é no mancal B. Portanto, o dimensionamento do eixo foi feito para esse ponto. O material escolhido para o eixo foi o aço 1020, com $\sigma_e = 207 \text{ MPa}$, segundo Mott (2015). O critério de resistência utilizado foi o da “Energia máxima de distorção”, conhecido como critério de von Mises. Após o cálculo foi verificada a fadiga a partir do método descrito em Shigley (2005).

Para o material escolhido, a tensão de cisalhamento é igual a:

$$\tau_{adm} = 0,577 * 207 = 119,44 \text{ MPa}$$

Portanto o fator “a” é igual a:

$$a = \frac{201}{119,44} = 1,73$$

Considerando uma relação entre “di” e “De” igual a 0,5, o fator “b” é igual a:

$$b = \frac{1}{1 - (0,5)^4} = 1,07$$

Com esses dados é possível calcular o momento ideal “Mi”:

$$Mi = \sqrt{1181,66^2 + \left(\frac{1,73}{2} * 161,60\right)^2} = 1189,9 \text{ N.mm}$$

Considerando o carregamento com tensão alternada, o coeficiente de segurança considerado é igual a 11,4. Portanto:

$$\sigma_{e_{adm}} = \frac{207}{11,4} = 18,16 \text{ MPa}$$

Substituindo os dados na equação (11):

$$d \geq 2,17 * \sqrt[3]{\frac{1,07 * 1189,9}{18,16}} = 8,94 \text{ mm}$$

A verificação da fadiga é necessária, pois o eixo está sujeito a flexão alternada. Os fatores de modificação foram determinados como mostrado no processo abaixo.

O fator ka depende da qualidade de acabamento da superfície da peça real e resistência a tração do material que a constitui. É calculada pela equação (16) abaixo:

$$ka = a * \sigma_{ut}^b \quad (16)$$

Onde σ_{ut} é a tensão de ruptura do material, a e b são fatores escolhidos na tabela 1 abaixo:

Acabamento superficial	Fator a σ_{ut} (MPa)	Expoente b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Como forjado	272	-0,995

Tabela 2: Valores para os fatores a e b (Fonte: acervo próprio).

Para esse trabalho, o eixo foi considerado como usinado. Portanto: $a = 4,51$ e $b = -0,265$. O material escolhido tem $\sigma_{ut} = 379$ Mpa. Substituindo esses dados na equação (16) obtém-se:

$$ka = 4,51 * 379^{-0,265} = 0,93$$

O valor de kb depende apenas do tamanho e da geometria da peça e pode ser calculado pela equação (17) abaixo. Porém, essa equação considera que o eixo é maciço, o que não é o caso para esse projeto. Sendo assim, é necessário calcular um diâmetro efetivo “ de ”, que pode ser feito através da equação (18) abaixo.

$$kb = 1,24 * de^{-0,107} \quad (17)$$

$$de = 0,37 * De \quad (18)$$

Substituindo $De = 10,0$ mm na equação (18) e então na equação (17), obtém-se:

$$kb = 1,24 * 3,7^{-0,107} = 1,08$$

O fator kc é obtido considerando-se apenas o tipo de carregamento na peça e pode ser obtido pela tabela 2 abaixo. Para cargas combinadas deve-se considerar o maior valor.

kc	Tipo de carregamento
1	flexão
0,85	axial
0,59	torção

Tabela 3: valores para kc (Fonte: acervo próprio).

Como o eixo está submetido à flexo-torção, $kc = 1$.

O fator kd depende da temperatura de operação em que a peça irá trabalhar. Os valores para esse fator são mostrados na tabela 3 abaixo. A temperatura de operação do eixo para esse projeto foi estimada em 50°C . Para esse valor temos que o fator $kd = 1,010$

Temperatura (°C)	kd
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900

Tabela 4: Valores para kd (Fonte: acervo próprio).

O fator ke depende da confiabilidade que se espera para o projeto bem como dos dados que são utilizados. A tabela 4 abaixo mostra alguns valores para esse fator. Para esse projeto utilizou – se ke = 0,897.

Confiabilidade (%)	ke
50	1,000
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,713
99,99	0,702

Tabela 5: Valores para ke (Fonte: acervo próprio).

O fator kf é estimado levando em conta diversos fatores que muitas vezes não são quantificáveis. Pode – se incluir os efeitos da corrosão, falhas ou defeitos da matéria prima, propriedades não uniformes dos materiais, tensões residuais, entre outras. Para esse projeto foi considerado kf = 1.

O último item a ser analisado é a tensão de fadiga estimada. Esse valor depende da tensão de ruptura do material e foi calculado através da equação (19).

$$S'_e = 0,504 * \sigma_{ut} \quad (19)$$

Portanto:

$$S'_e = 0,504 * 379 = 191,02 \text{ MPa}$$

Substituindo esse valor e os valores dos fatores na equação (16), temos que o valor da tensão de fadiga corrida é igual a:

$$S_f = 0,93 * 1,08 * 1 * 1,010 * 0,897 * 1 * 191,02 = 173,82 \text{ MPa}$$

Substituindo – se esse valor na equação (13), o diâmetro passa a ter um valor mínimo igual a:

$$d \geq 2,17 * \sqrt[3]{\frac{1,07 * 1189,9}{\left(\frac{173,82}{11,4}\right)}} = 9,48 \text{ mm}$$

Por questões construtivas, o eixo foi usinado com um $D_e = 12,0 \text{ mm}$, que é um valor maior do que o necessário, mesmo quando considerando a fadiga.

Para calcular o rolamento pré-selecionou-se o rolamento SKF 61802 para os dois mancais, que é um rolamento rígido de uma carreira de esferas. A figura 31 mostra alguns dados geométricos deste rolamento e a tabela 5 alguns dados técnicos dele.

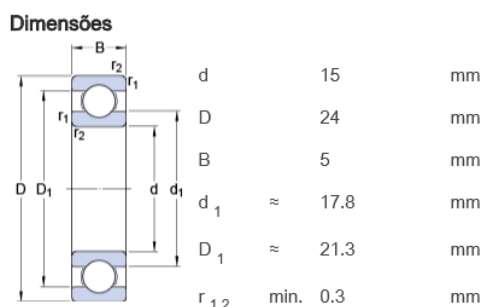


Figura 31: dimensões do rolamento SKF 61802 (Fonte: catálogo SKF).

Carga dinâmica básica	C	1,9 kN
Carga estática básica	C0	1,1 kN
Massa do rolamento		65 g
Velocidade limite		38000 rpm

Tabela 6: dados técnicos do rolamento SKF 61802 (Fonte: catálogo SKF).

A reação vertical no mancal A é de $V_A = 54,64 \text{ N}$ e no mancal B é de $V_B = 48,46 \text{ N}$. A reação horizontal no mancal A é de $H_A = 3,29 \text{ N}$. A capacidade de carga dinâmica básica

Para uma vida útil estimada em 10000 h para ambos os mancais e considerando que os rolamentos são de esferas o número de revoluções nesse ciclo será igual à:

$$L_d = (10000) * \text{rpm} * \left(60 \frac{\text{mín}}{\text{h}}\right) = 600 * 10^6 \text{ revoluções}$$

Para o mancal B, em que apenas atua uma carga vertical, $\mathbf{P_B = V_B = 48,46N}$. Portanto, após substituir a carga do mancal B na equação (17), a capacidade de carga para esse mancal é igual a:

$$\mathbf{C_B = 48,46 * \left(\frac{600 * 10^6}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 408,73 \text{ N}}$$

No mancal A, em que atuam uma força radial e outra axial, a carga P é calculada utilizando a seguinte equação (18)

Porém, é necessário calcular algumas relações para verificar se a magnitude da carga axial terá influência para o dimensionamento do rolamento. A tabela 6 foi utilizada para determinar os fatores “e” e “Y”, utilizados para comparação e a relação $\frac{V_A}{C_0}$.

A primeira linha da tabela 6 são os valores que foram calculados com os dados desse projeto. Ou seja, $\frac{V_A}{C_0} = \frac{3,29}{1100} \cong 0,003$ e o fatores “e” e “Y” foram calculados por regressão linear.

Para que a carga axial não precise ser considerada, a desigualdade $\frac{V_A}{H_A} < e$ deve existir. Nesse projeto temos que:

$$\frac{3,29}{54,64} = 0,060 < 0,17$$

Isso significa que a carga axial que atua no mancal A não deve ser considerada, e o procedimento de cálculo é igual ao do mancal B.

Portanto, $\mathbf{P_A = V_A = 54,64 \text{ N}}$ e a capacidade de carga dinâmica após substituir $\mathbf{P_A}$ na equação (17) é:

$$\mathbf{C_A = 54,64 * \left(\frac{600 * 10^6}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 460,85 \text{ N}}$$

A capacidade de carga dinâmica básica fornecida pelo fabricante para esse rolamento é de $\mathbf{C = 1900 \text{ N}}$, que é maior do que o calculado para os dois mancais. Dessa forma, esse rolamento pôde ser utilizado para os dois mancais.

Para escolher o motor de passo, foi necessário levar em consideração o seu tamanho, de forma que ficasse proporcional ao tamanho da máquina, o torque e o custo. O torque foi calculado pela equação (19), tanto para acionar o fuso longitudinal quanto o

transversal. A força a ser vencida no primeiro caso é a força de avanço, e no segundo a força de apoio. Para o fuso transversal utilizou-se uma barra roscada com filete comum, apesar de não ser a mais recomendada. Para esse caso $\alpha = 30^\circ$.

Para o movimentar o carro longitudinal, pré-selecionou-se um motor de passo que já possui o fuso de 8mm embutido no lugar do eixo (como o motor de passo mostrado na figura 19 no tópico 3.3.3). Esse motor é um Nema 17 e possui um torque de 0,5 N.m.

Os valores encontrados na literatura para o valor do atrito μ entre a porca e o parafuso é de 0,15. Nas tabelas de parafuso acha-se como valor do diâmetro primitivo para uma rosca M8 o valor de $d_p = 7,25\text{mm}$. O avanço L é definido como o produto entre o passo e o número de entradas de rosca, que nesse caso são, respectivamente, 2mm de passo e 4 entradas de rosca.

Para o fuso longitudinal:

$$T = \frac{3,29 * 7,25}{2} * \frac{(0,15 * \pi * 7,25 + 8 * \cos 14,5^\circ)}{(\pi * 7,25 * \cos 14,5^\circ - 0,15 * 8)} = 6,38 \text{ N. mm}$$

Portanto o motor de passo pré-selecionado pôde ser utilizado sem problemas. Além disso, as suas dimensões não são destoantes em relação às medidas da máquina.

O fuso transversal foi feito com um parafuso M6 de rosca comum, com passo 1mm e com uma entrada. O torque necessário para movimentar o carro transversal é igual a:

$$T = \frac{5,95 * 5,4}{2} * \frac{(0,15 * \pi * 5,4 + 1 * \cos 30^\circ)}{(\pi * 5,4 * \cos 30^\circ - 0,15 * 1)} = 3,77 \text{ N. mm}$$

O motor de passo para o acionamento transversal deveria ter dimensões bem reduzidas, bem como o seu peso, pois deveria ser preso ao carro transversal e ficaria em balanço. Após uma pesquisa dos modelos disponíveis no mercado, optou-se por utilizar o modelo 28BYJ-48, mostrado na figura 32 abaixo. O torque desse motor de acordo com o seu datasheet é de 300gf.cm, que é mais do que o suficiente.



Figura 32: motor 28BYJ-48 (Fonte: datasheet do motor).

4.3 ESCOLHA DOS SOFTWARES E COMPONENTES ELETÔNICOS

Para gerar o desenho no formato DXF optou-se por utilizar o *software* CAD, como mostra a figura 33, que a universidade disponibiliza para os alunos. Dessa forma não há custos diretos para o projeto. Foi feita uma pesquisa para decidir qual seria o software que transcreveria o desenho gerado no CAD para código G. Esse software deveria permitir que o código fosse transcrito de forma que pudesse ser utilizado com o GRBL, pois infelizmente esse *firmware* suporta somente alguns comandos em linguagem de máquina (mostrados no Anexo B). O software escolhido para gerar o código G a partir do desenho foi o GrblGRU, que possui uma interface gráfica muito interessante, como mostrado na figura 34 abaixo, simulando diversos tipos de máquinas ferramentas, além de ser gratuito e ser capaz de gerar os códigos de forma rápida e eficaz, como mostra a figura 35 abaixo.

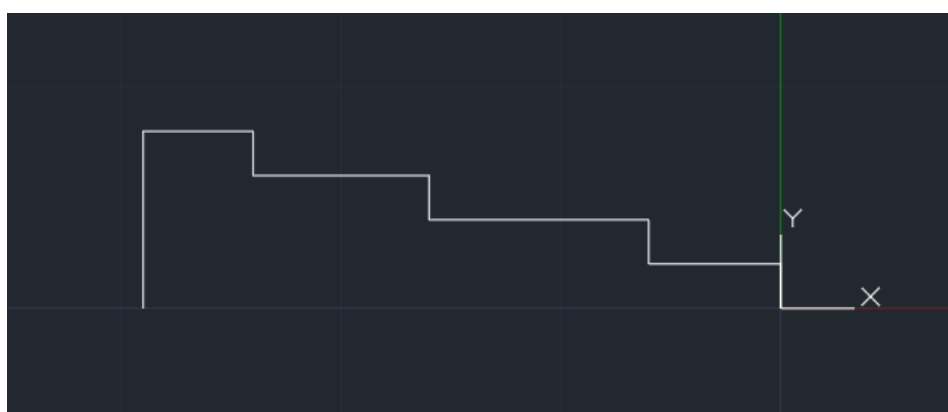


Figura 33: desenho em CAD (Fonte: acervo próprio).

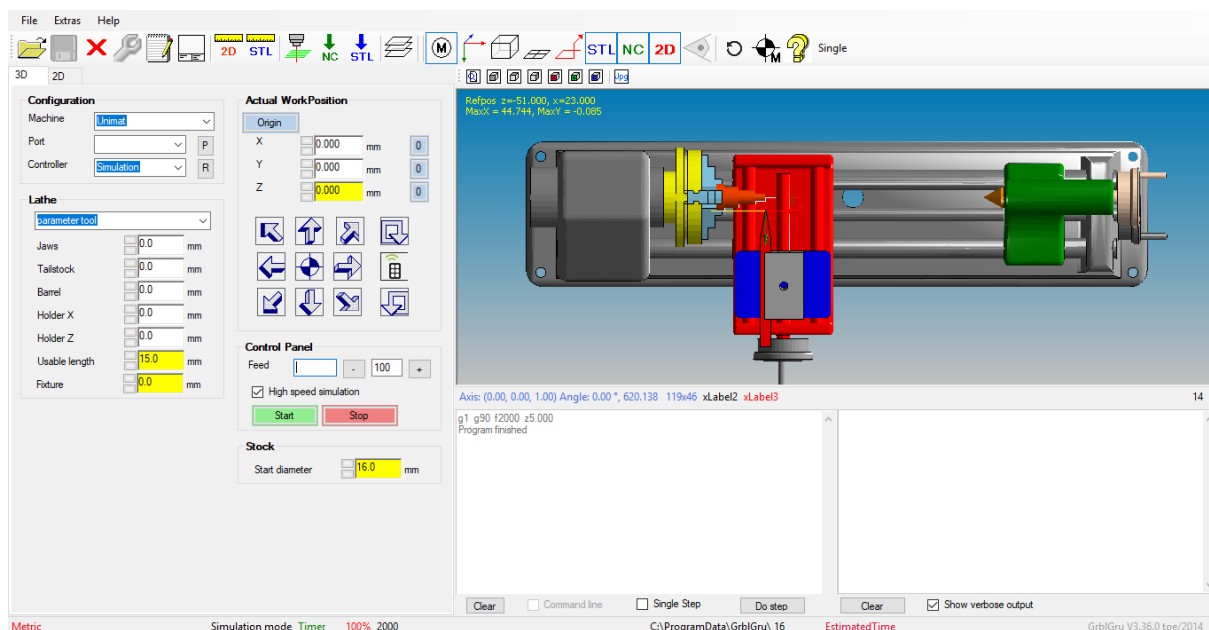


Figura 34: interface gráfica do GrblGRU (Fonte: acervo próprio).

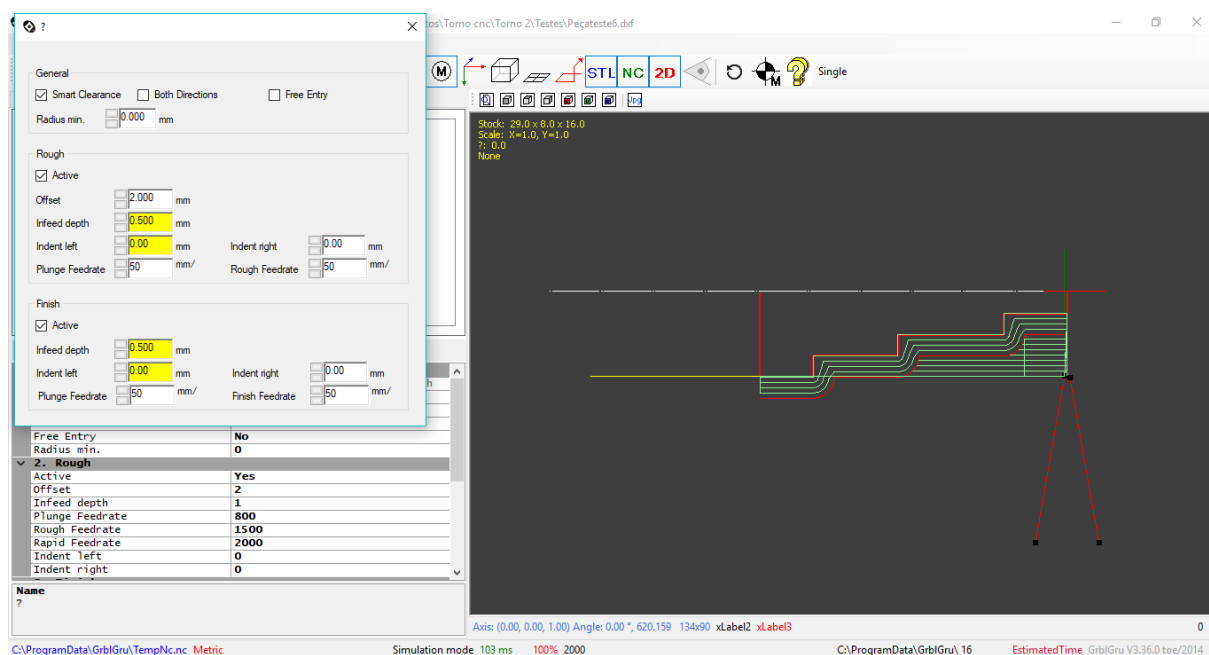


Figura 35: geração do código G no GrblGRU (Fotne: acervo próprio).

O *software* escolhido para enviar os comandos para a máquina e assim controlá-la foi o Universal G-Code Sender, que é um software gratuito e compatível com o GRBL. A figura 36 mostra a sua interface de comando. Ele permite alterar os parâmetros do GRBL e controlar a máquina manualmente.

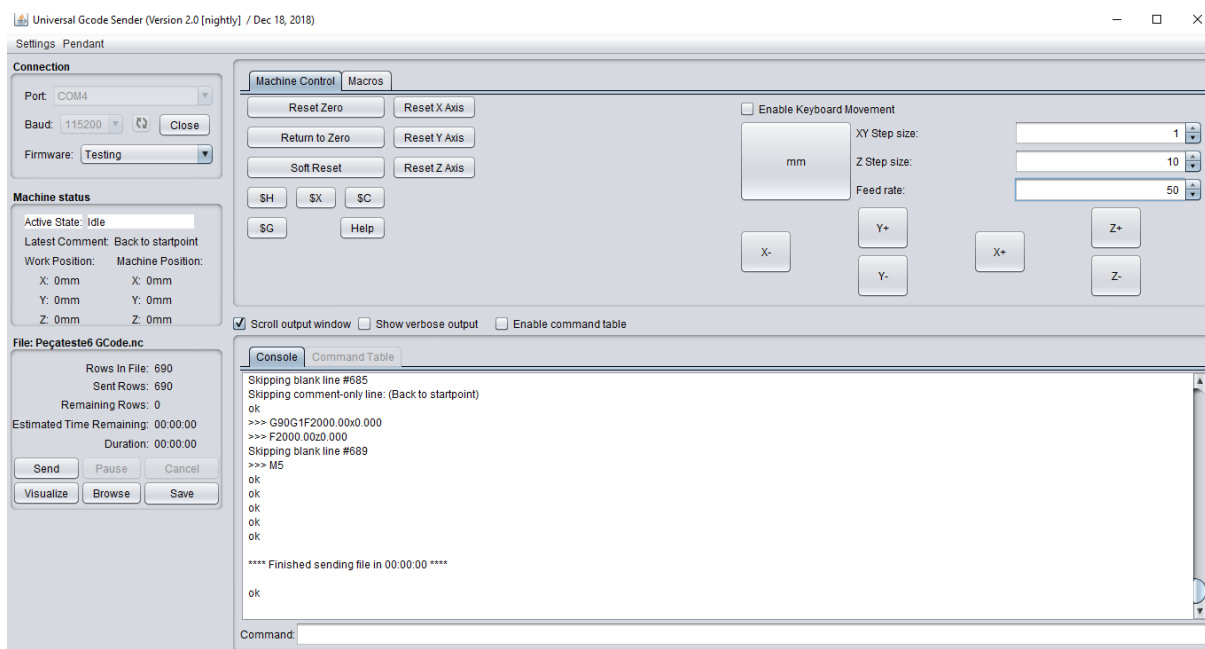


Figura 36: interface do Universal G-Code Sender (Fonte: acervo próprio).

A escolha dos *drivers* dos motores de passo foi guiada pela corrente que eles conseguem suportar. Segundo informações disponibilizadas pelos fabricantes do motor, a corrente por fase é de 1,0 A para o motor do fuso longitudinal e 100 mA para o do fuso transversal. O driver escolhido deveria ser capaz de suportar essas correntes sem que fosse danificado. Existem diversas opções de *drivers* no mercado. Algumas voltadas para motores maiores e que necessitam de mais corrente e outras de menor custo e que conseguem controlar motores menores com boa precisão, como é o caso para esse projeto.

Existem diversas opções de driver e que poderiam ser escolhidas para esse projeto. As opções principais eram o circuito integrado L293D, que é uma dupla ponte H. Outra opção seria o *driver* DVR 8825, que é mais voltado para o controle preciso de motores de passo. E o *driver* A4988, que também é voltado para o controle preciso de motores de passo. Apesar de ter o menor custo entre os três drivers apontados, seriam necessários 3 L293D para poder controlar os dois motores de passo. Além disso, pelo datasheet do driver, ele só é capaz de fornecer 600mA por fase, o que é insuficiente para os motores de passo funcionarem. A escolha entre os outros dois drivers baseou-se apenas pelo custo. Ambos têm faixas de trabalho muito parecidas (8,2V à 47V e 2,5A por fase para o DVR8825; 8,0V à 35V e 2,0A por fase para o A4988) e podem ser conectados ao CNC Shield. Como o custo do driver A4988 é menor comparado ao do DVR8825, foi o *driver* escolhido para o controlar os motores de passo desse projeto.

Entre os motores escolhidos o motor do eixo-árvore é o que precisa de mais tensão, sendo necessária uma fonte de 12V-8,5A para atender a essa demanda. Não há problema da tensão de alimentação dos motores de passo ser menor – 10V para o motor do fuso longitudinal e 5V para o motor do fuso transversal – pois os *drivers* são capazes de regular a tensão transmitida aos motores através do ajuste da tensão de referência para cada motor, utilizando a corrente máxima for fase de cada um.

A montagem do circuito final dos motores é mostrada na figura 37.

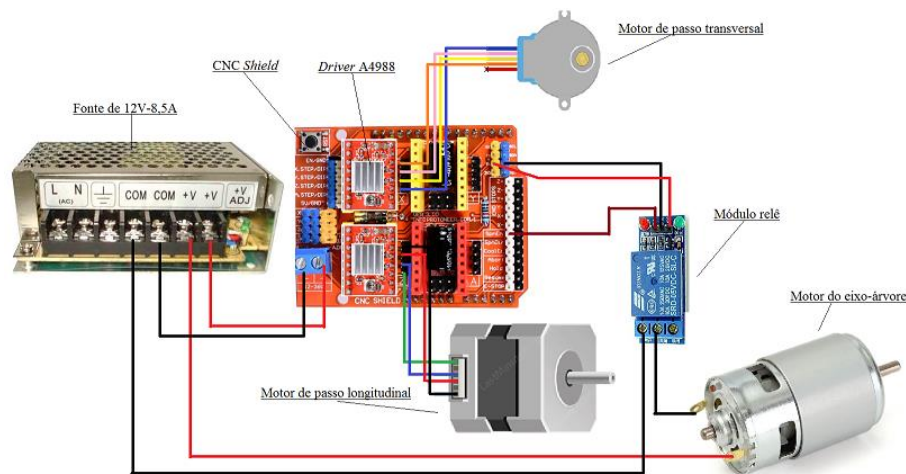


Figura 37: montagem do circuito de acionamento dos motores (Fonte: acervo próprio).

4.4 USINAGEM DOS COMPONENTES

Para fabricar os componentes do torno, foi utilizado aço 1020 disponível nos laboratórios de usinagem da universidade. Pensou-se primeiro em utilizar o alumínio, que é de usinagem mais fácil. A escolha do aço se dá devido a rigidez que ele provê à máquina, diminuindo a vibração resultantes das operações de usinagem.

A usinagem dos componentes foi feita com base nos desenhos de fabricação mostrados no anexo A. A maior dificuldade encontrada durante a fabricação das peças foi o tamanho delas. Algumas peças são muito pequenas e por isso necessitam de uma grande atenção nas medidas, pois qualquer variação pode significar que não haverá encaixe entre peças, ou que a folga será muito grande, o que seria prejudicial para a usinagem de alguma peça pela máquina.

O castelo foi uma dessas peças. Como não há bucha entre ele e as guias transversais, os furos passantes das guias foram feitos com extrema cautela, utilizando

um alargador $\varnothing 6\text{mm}$ H7 para garantir que não haveria folgas e de forma que o movimento do castelo seria possível. A imagem 38 mostra a usinagem dos furos do castelo.



Figura 38: usinagem dos furos das guias no castelo. (Fonte: acervo próprio).

A porca do furo transversal também teve que ser cuidadosamente usinada a partir de um tarugo de latão. Sua usinagem é mostrada na figura 39. Os rebaixos foram necessários pois sem eles o diâmetro externo da porca encostaria no carro longitudinal.



Figura 39: usinagem dos rebaixos na porca transversal (Fonte: acervo próprio).

A figura 40 mostra os furos do apoio das guias longitudinais e o apoio do cabeçote sendo usinados (na foto eles estão circulados em vermelho). A placa foi reutilizada de um

outro projeto e apresentava alguns furos, mas isso não comprometeu o projeto. E a figura 41 mostra os alojamentos dos rolamentos lineares sendo feitos no carro longitudinal.

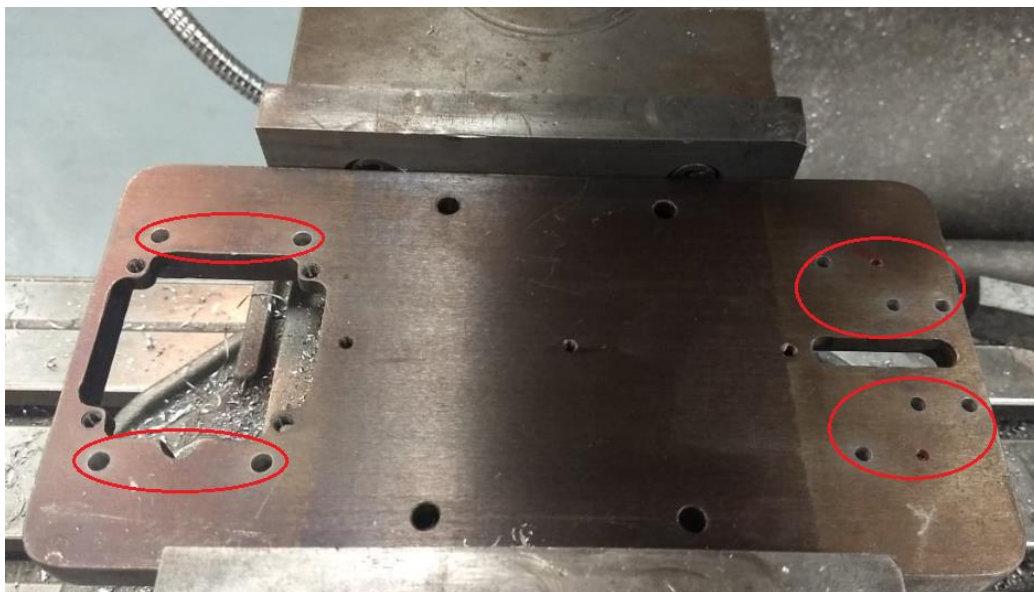


Figura 40: usinagem dos furos na base (Fonte: acervo próprio).



Figura 41: usinagem dos alojamentos dos rolamentos lineares (Fonte: acervo próprio).

As peças que compõe o cabeçote foram as que mais necessitaram de um bom planejamento dos métodos e processos. Os técnicos dos laboratórios de usinagem nos deram uma grande ajuda para usiná-las.

Para garantir que todas as medidas estariam bem centradas, todas as operações foram feitas sem retirar o tarugo do torno, utilizando o contraponto giratório como apoio. Primeiro fez-se o furo central e o desbaste de forma a deixar um sobremetal de 2mm para o acabamento. A rosca no diâmetro maior foi feita em seguida e então o local onde ficariam os rolamentos, seguido pelo rasgo de anel elástico. O furo cônico da face frontal foi a última operação a ser feita. A figura 42 mostra o eixo-árvore sendo usinado no torno.



Figura 42: usinagem do eixo-árvore (Fonte: acervo próprio).

A pinça só foi usinada após o término do eixo-árvore, pois assim a conicidade dela poderia ser ajustada com precisão no furo cônico do eixo-árvore. Ela foi feita em duas partes. A primeira foi o torneamento externo e o furo no seu centro. Da mesma forma que no eixo-árvore, foi feito um desbaste deixando 2mm de sobremetal para o acabamento. A conicidade foi feita verificando-se a cada novo passe de ferramenta se todos os pontos da pinça tocavam o cone do eixo-árvore, corrigindo-se a angulação do carro transversal sempre que necessário. Para a segunda parte, a pinça foi presa - através de um parafuso numa rosca feita no furo de 3mm - ao eixo-árvore para garantir que o furo de 16mm ficaria centralizado com o eixo. Esse furo foi obtido utilizando um escalonamento de brocas até 15mm, seguido por uma broca modificada sem ângulo de corte para que o final do furo ficasse reto e então pelo desbaste interno com ferramenta de desbaste. A figura 43 mostra a pinça sendo usinada.

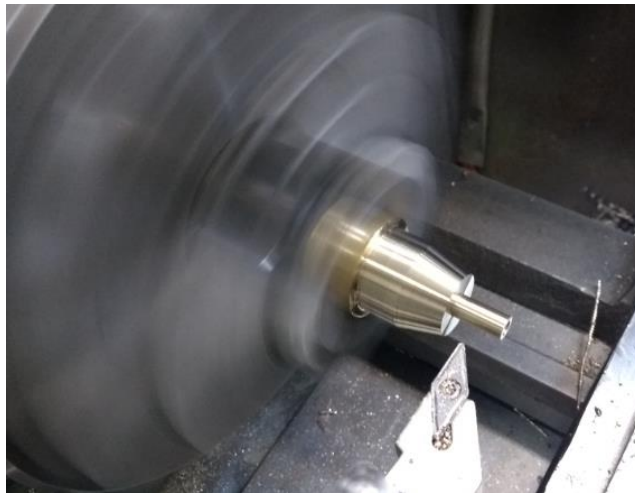


Figura 43: usinagem da pinça (Fonte: acervo próprio).

Para garantir que a pinça tenha uma deformação suficiente para prender a peça após o seu aperto, foram feitos 4 rasgos longitudinais nela. Essa operação é mostra na figura 44.



Figura 44: usinagem dos rasgos na pinça (Fonte: acervo próprio).

A figura 45 abaixo mostra como ficaram o eixo-árvore, a pinça e a porca após usinadas.



Figura 45: porca, pinça e eixo-árvore após usinados (Fonte: acervo próprio).

À medida que eram usinadas, as peças eram montadas para verificar possíveis interferências indesejadas ou folgas, de forma que isso era corrigido em paralelo a fabricação. As figuras 46, 47 e 48 mostram a montagem individual do cabeçote e do carro transversal e longitudinal.

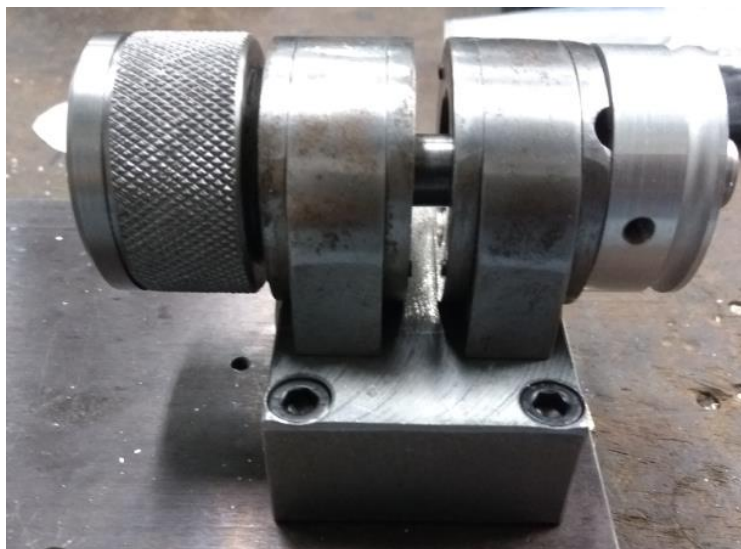


Figura 46: montagem do cabeçote fixo (Fonte: acervo próprio).

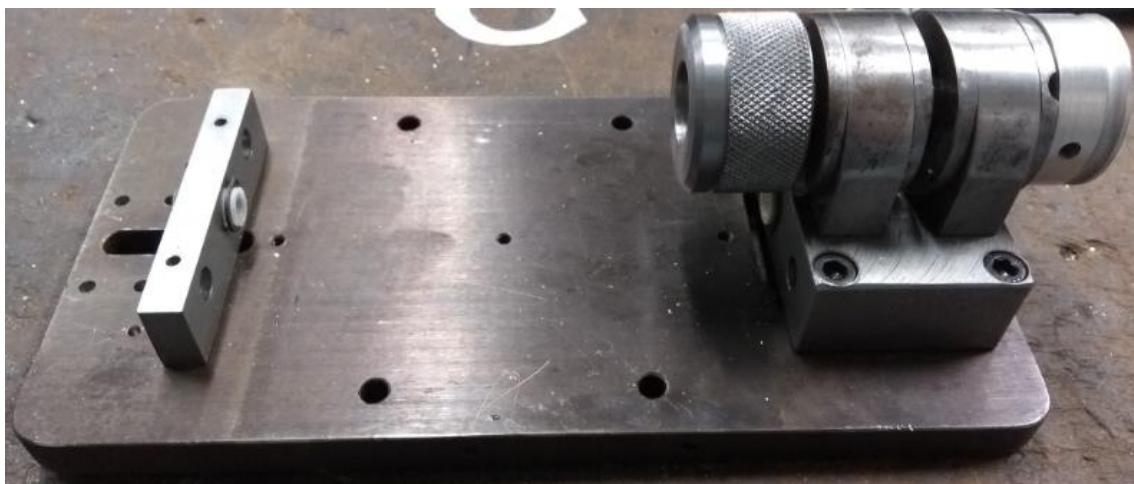


Figura 47: montagem do apoio das guias longitudinais e do cabeçote na placa
(Fonte: acervo próprio).

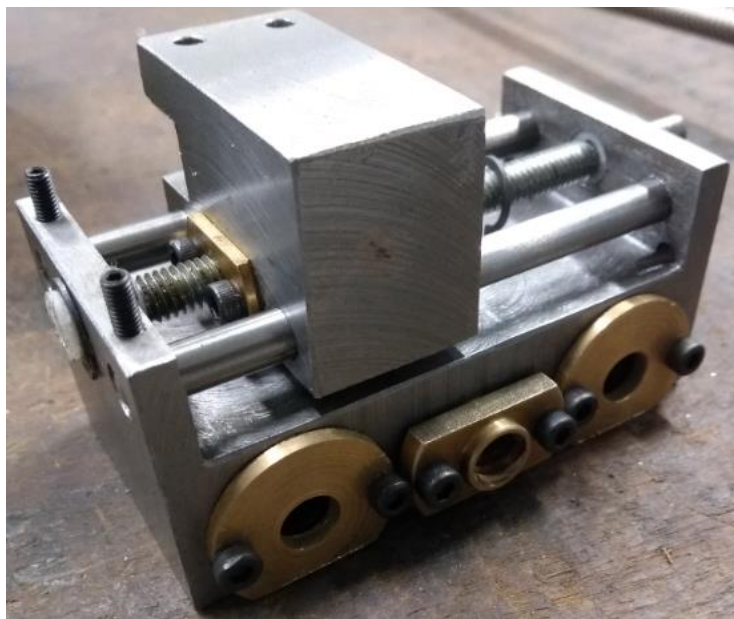


Figura 48: montagem dos carros transversal e longitudinal (Fonte: acervo próprio).

Uma montagem parcial da máquina é mostrada na figura 49. Nela ainda faltam o fuso transversal, a ferramenta de corte, o motor de acionamento do eixo-árvore e o motor de passo do carro transversal.

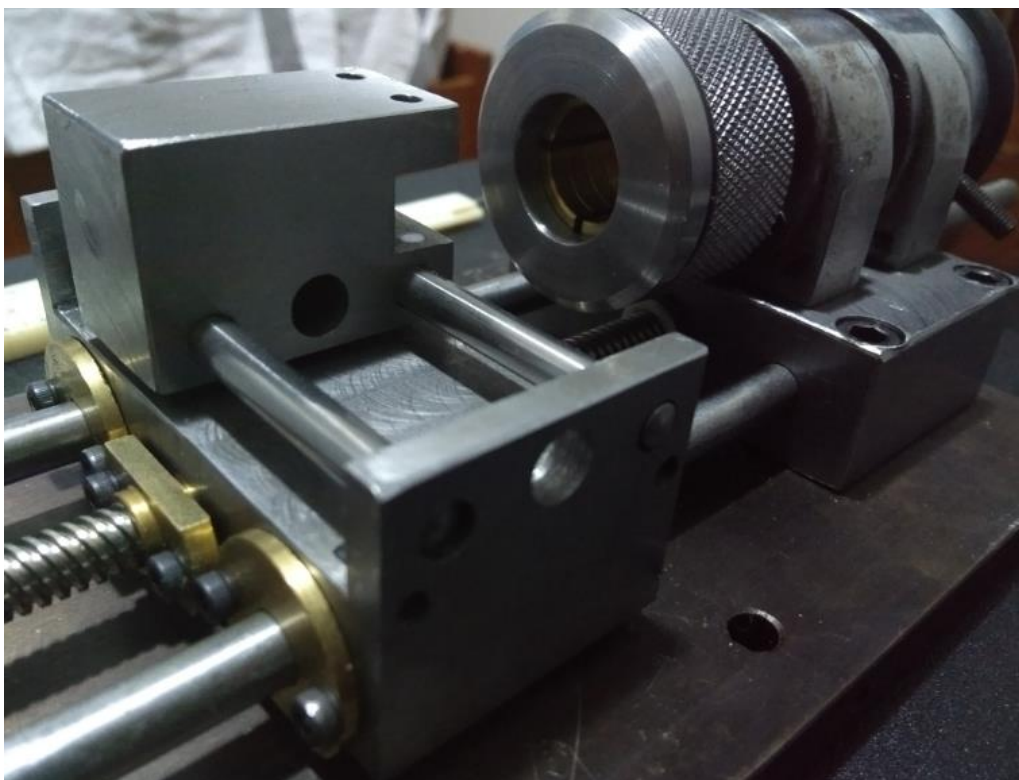


Figura 49: montagem parcial da máquina (Fonte: acervo próprio).

A única peça da máquina que não foi usinada foi o apoio do motor de passo do carro longitudinal. Por praticidade, utilizamos a impressora 3D da universidade. Essa peça é mostrada na figura 50 montada ao motor e à base da máquina.



Figura 50: apoio do motor de passo longitudinal (Fonte: acervo próprio).

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com relação a usinagem dos componentes, o tempo total de usinagem foi maior do que o esperado. Foi estipulado pelos integrantes do grupo 1 mês para terminar todas as peças que compõe o torno. No final, o tempo total foi de dois meses. Alguns dos motivos foi que as oficinas nem sempre podiam ser utilizadas devido as aulas que ocorrem nas mesmas, e isso deve ser um ponto a ser levado em consideração em projetos futuros. Como as peças são pequenas, é necessário muito cuidado durante a sua usinagem, e os passes com a ferramenta devem ser feitos com baixas profundidades de corte e avanço, o que aumenta o tempo de usinagem.

A usinagem das guias do carro transversal foi de difícil operação, devido à relação comprimento/diâmetro, o que deixa a peça muito esbelta. Isso fazia com que ela fletisse muito ao aproximar a ferramenta do tarugo, mesmo quando se utilizava baixos valores de profundidade de corte. Devido a isso optou-se por comprar pinos retificados nas medidas necessárias. Essa opção mostrou-se muito melhor, pois garantiu que não houvesse folgas entre o castelo e as guias.

Um problema semelhante aconteceu com o fuso transversal. Por ter um comprimento muito maior do que o diâmetro, ficaria impossível fazer a rosca do fuso em um torno. A solução foi comprar uma barra roscada com o diâmetro desejado e usinar apenas os mancais de apoio.

As guias lineares cilíndricas com rolamento linear também se mostraram muito eficientes e permitem a translação do carro com suavidade.

Com relação aos softwares, o GRBLGru apesar de limitado, mostrou-se muito capaz de gerar o código G a partir do desenho gerado em CAD. A sua interface simples e intuitiva permite que o usuário logo fique adaptado a utilizá-la. Um outro ponto é que, comparado a outros softwares de pós-processamento, a forma de geração do código G é muito mais simples, permitindo o controle dos parâmetros de corte como profundidade de corte e avanço, além de possuir algumas opções para modificar a estratégia de usinagem.

Da mesma forma, o Universal G-Code Sender também se mostrou muito eficiente na leitura do código G gerado e sua transformação em sinais elétricos que são enviados para o Arduino.

O conjunto Arduino-GRBL foi capaz de controlar corretamente os motores através dos sinais que eram enviados pelo computador. A figura 51 abaixo mostra um dos testes sendo realizado com os motores de passo.

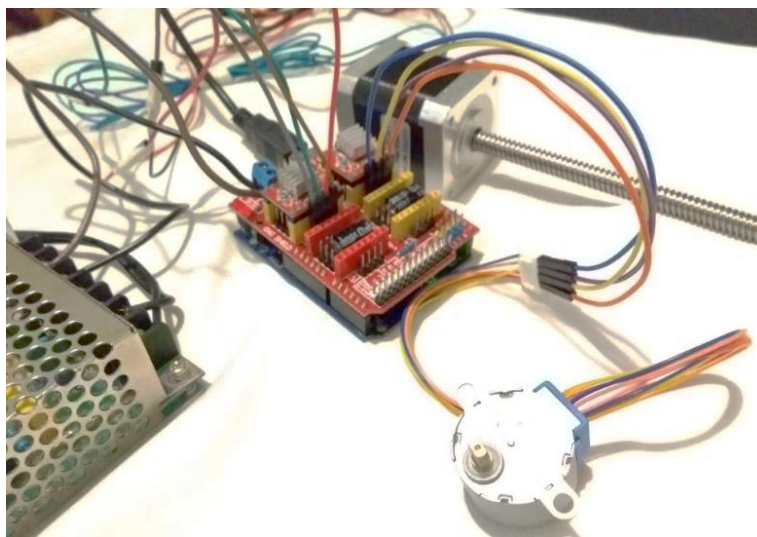


Figura 51: teste de controle dos motores de passo (Fonte: acervo próprio).

Durante os testes foi verificado que o GRBLGru não é capaz de gerar códigos muito complexos, como ciclos de desbaste e acabamento, por exemplo, apesar de o desenho das peças poder ser dos mais variados tipos. Isso não impede a sua utilização, e como o objetivo do projeto é ser didático, ele atende muito bem ao seu propósito. A desvantagem é que o tempo de usinagem para peças mais complexas aumenta.

Também foram feitos testes com o motor principal. Para acionar o eixo-árvore, utilizou-se um sistema de polias com redução de 1:4 com um *o'ring* como correia. Os testes serviam para verificar se o motor conseguiria acionar o eixo-árvore e para testar os *o'rings* como correia, tendo bons resultados de operação. Um dos testes é mostrado na figura 52.



Figura 52: teste do motor de acionamento do eixo-árvore (Fonte: acervo próprio).

Os resultados para esses testes foram satisfatórios, com o eixo-árvore sendo acionado sem dificuldades e a correia transmitindo o movimento sem deslizamentos.

Um outro teste que foi possível realizar foi a movimentação do carro longitudinal com a máquina montada. O motor de passo foi capaz de mover o conjunto sem problemas e com suavidade. A figura 53 mostra o teste sendo realizado.



Figura 53: teste de movimentação do carro longitudinal (Fonte: acervo próprio).

O modelo final, mostrado nas figuras 54, não ficou parecido com o que foi concebido inicialmente devido a alterações de algumas peças devido a disponibilidade de matéria prima e tempo, além de fatores como a seleção dos motores. Isso não afetou os cálculos e nem fez com que houvesse alguma mudança nos parâmetros e forças de usinagem, sendo apenas uma mudança na estética da máquina.

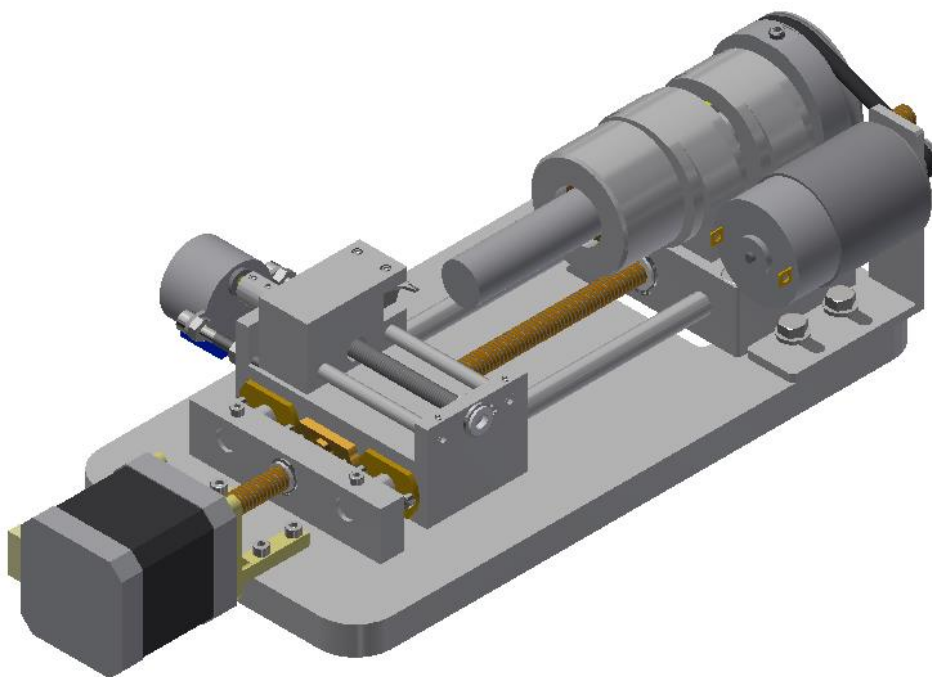


Figura 54: montagem do conjunto CAD (Fonte: acervo próprio).

As figuras 55 e 56 mostram os detalhes do conjunto do carro transversal e longitudinal e o sistema de acionamento do eixo-árvore, respectivamente.

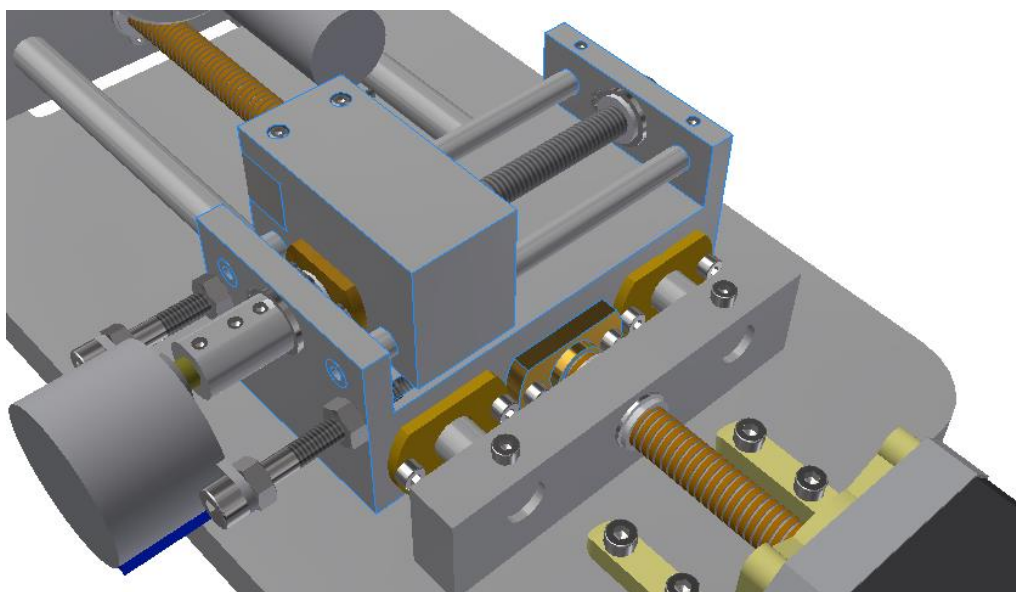


Figura 55: detalhe do conjunto do carro transversal e longitudinal em CAD
(Fonte: acervo próprio).

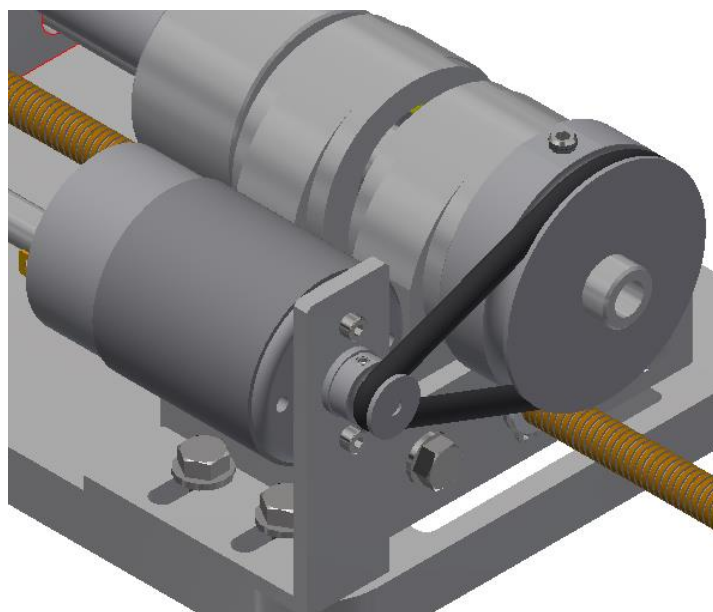


Figura 56: detalhe em CAD do sistema de acionamento do eixo-árvore (Fonte: acervo próprio).

A tabela 7 abaixo mostra uma lista de todas as peças que fazem parte da máquina, tanto partes mecânicas como elétrica, e a quantidade necessária de cada uma. Desse total, 26 peças foram fabricadas pelos alunos.

Lista de peças			
Descrição	Quantidade	Descrição	Quantidade
Eixo árvore	1	Fuso longitudinal	1
Pinça	1	Porca do fuso longitudinal	1
Porca da pinça	1	Bucha do fuso longitudinal	2
Mancais de rolamento	2	Motor de passo longitudinal	1
Alojamento dos rolamentos	2	Apoio do motor de passo long	1
Apoio dos alojamentos	1	Motor de passo transversal	1
Polias	2	Motor do eixo árvore	1
Correia	1	Apoio do motor de passo long	1
Carro transversal	1	Ferramenta de corte	1
Castelo	1	Rolamentos lineares	2
Guias lineares transversais	2	Arduino	1
Fuso transversal	1	CNC Shield	1
Porca do fuso transversal	1	Driver A4988	2
Acoplamento	1	Parafusos M3	17
Buchas do fuso transversal	2	Parafusos M4	16
Tampa dos rolamentos lineares	2	Parafusos M5	6
Base	1	Arruela M5	2
Guias lineares longitudinais	2	Anél elástico 10mm	6
Apoio das guias longitudinais	1	Anél elástico 12mm	3
Total			92

Tabela 7: quantidade de peças da máquina.

O custo final da máquina ficou um pouco acima do objetivo desejado, como mostra a tabela 8 abaixo.

Tabela de custo			
Item	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Motor de passo com fuso	1	205	205
Motor de passo 28BYJ-48	1	15	15
Motor do eixo árvore	1	38	38
Rolamento linear	2	12	24
Rolamento 61802	2	35,8	71,6
Arduino + cabo USB	1	50	50
CNC Shield V3.0	1	12,85	12,85
Driver A4988 + dissipador de calor	2	12,5	25
Kit Cabo jumper MachoxFêmea 20cm - 20 un	1	12,8	12,8
Kit Cabo jumper FêmeaxFêmea 20cm - 20 un	1	12,8	12,8
Modulo Rele 1 saída 10A - 5v	1	12,8	12,8
Fonte 12V - 8,5A S-100-12	1	60	60
Aço 1020	5 kg	5 R\$/kg	25
Total			564,85

Tabela 8: tabela de custo dos componentes da máquina.

6 CONCLUSÃO

Após estudar alguns modelos de torno existentes foi possível desenvolver um conceito de máquina que guiou projeto. O modelo final, apesar de não ser o mesmo que o proposto inicialmente, tem capacidade de funcionar da mesma forma, ou até melhor.

A máquina atende aos requisitos de usinar um tarugo de 16 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento com uma rotação de 1000 rpm.

Todos os elementos de máquina foram dimensionados de forma a garantir um bom funcionamento da máquina durante a operação de usinagem. A máquina deve funcionar estritamente dentro dos parâmetros pré-definidos. Os motores de passo se mostraram muito eficientes durante os testes, respondendo bem aos comandos passados pelo *software* de controle.

A combinação dos *softwares* de desenho, pós-processamento, e controle junto com o Arduino-GRBL mostrou-se funcional e prático e foi uma excelente solução para o projeto, principalmente por não gerar nenhum custo para ele.

O principal objetivo, de ser um projeto integrador, foi alcançado se mostra um excelente projeto para ser aplicado nos cursos de engenharia da UPM, pois envolve muitos conhecimentos multidisciplinares e necessita de uma cooperação muito bem coordenada por parte dos integrantes, de forma que o projeto tenha frentes andando em paralelo e interagindo umas com as outras para que se conclua a máquina.

Apesar de ter características que são mais fortes para as engenharias mecânica, mecatrônica, elétrica e de produção, os alunos e alunas da engenharia civil também seriam beneficiados ao aprenderem sobre *design* de produto e teriam espaço para aplicar boa parte do que lhes é ensinado.

Para o próximo grupo que for desenvolver esse projeto, outras máquinas e soluções podem e devem ser testadas. Seria interessante testar as alternativas que não foram utilizadas e até mesmo mudar o projeto, deixando-o menor ou até mesmo maior. Ou então se pensar em outro modelo de máquina CNC para ser projetado, com outros parâmetros de corte.

REFERÊNCIAS

ARDUINO. *What is Arduino?* Disponível em:

<<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 7 mar. 2017.

BANZI, Massimo. *Getting Started with Arduino*. 1. ed. O' Reilly, 2009

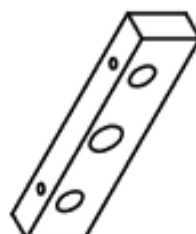
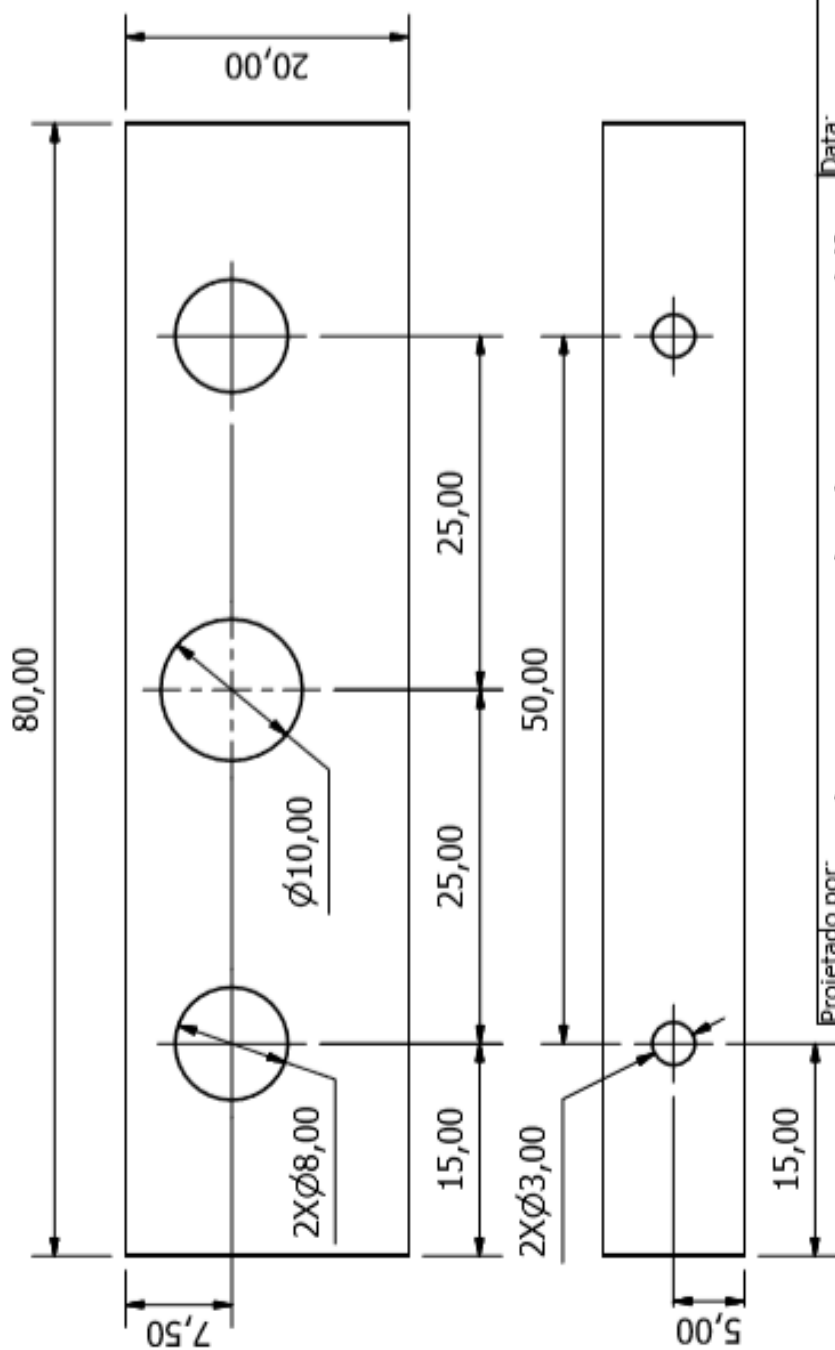
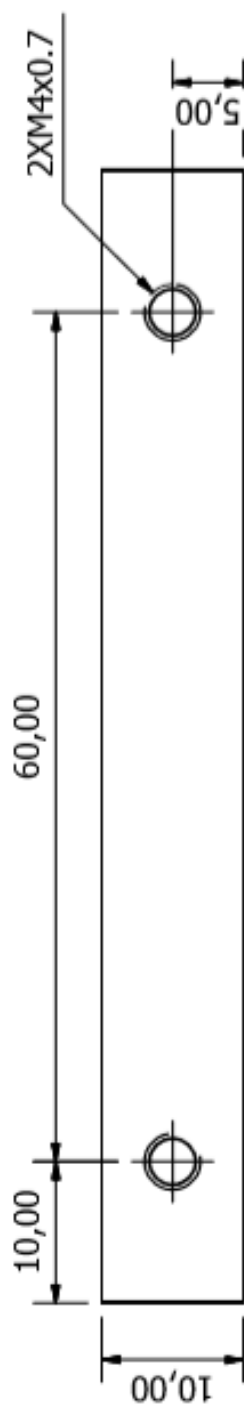
FERRARESI, Dino. *Usinagem dos metais*. São Paulo. Edgard Blucher, 1977.

MOTT, Robert L. *Elementos de máquinas em projetos mecânicos*. 5. Ed. São Paulo: Pearson.

ROSSI, Mario. *Maquinas Herramientas Modernas*. Milan: Ulrico Hoepli, 1981.

SHIGLEY, Joseph E; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. *Projeto de elementos de máquina*. 7. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

Apêndice A – desenhos de fabricação



Projetado por: Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moio

Data:

Folha nº:

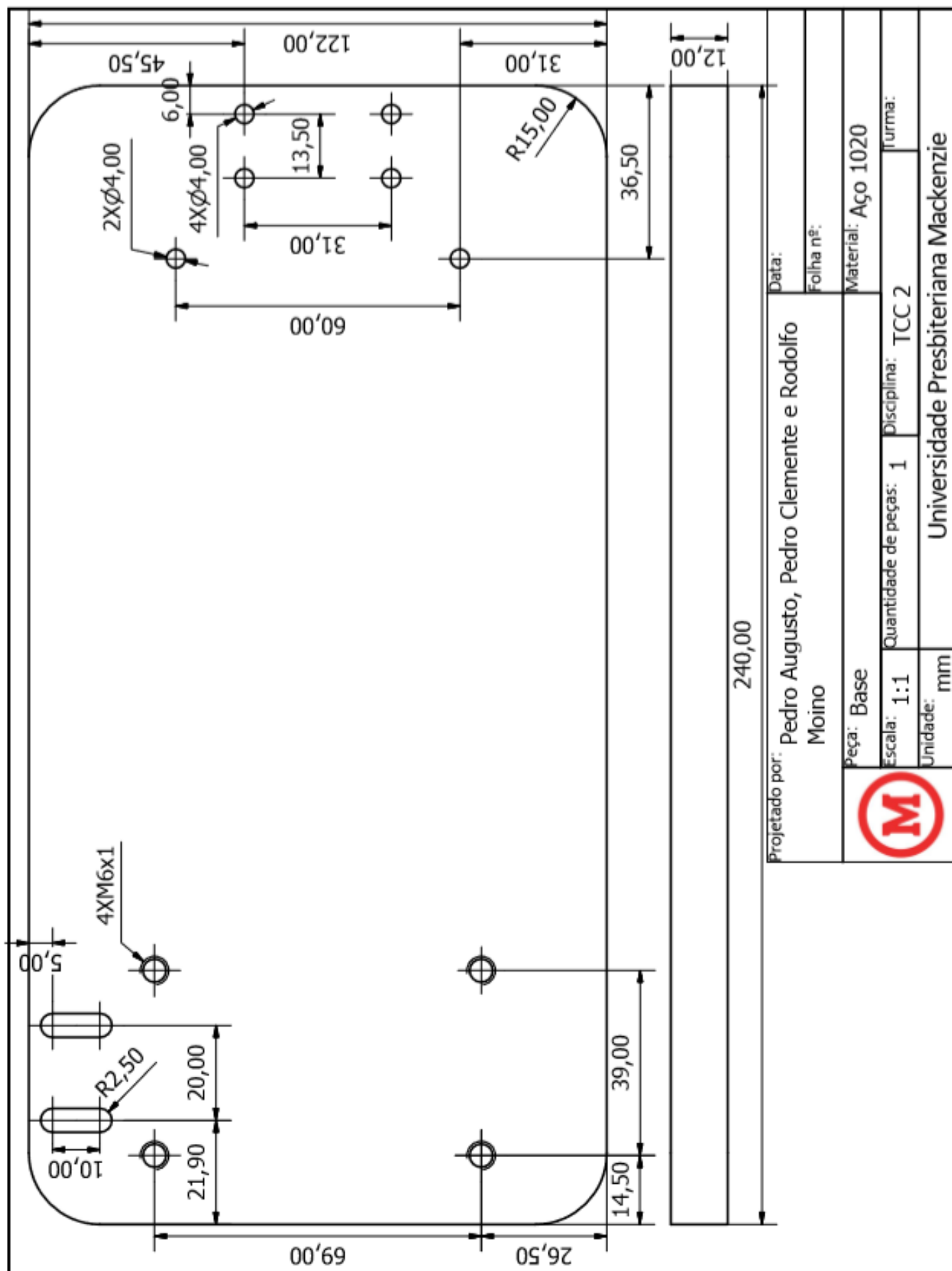
Material: Aço 1020

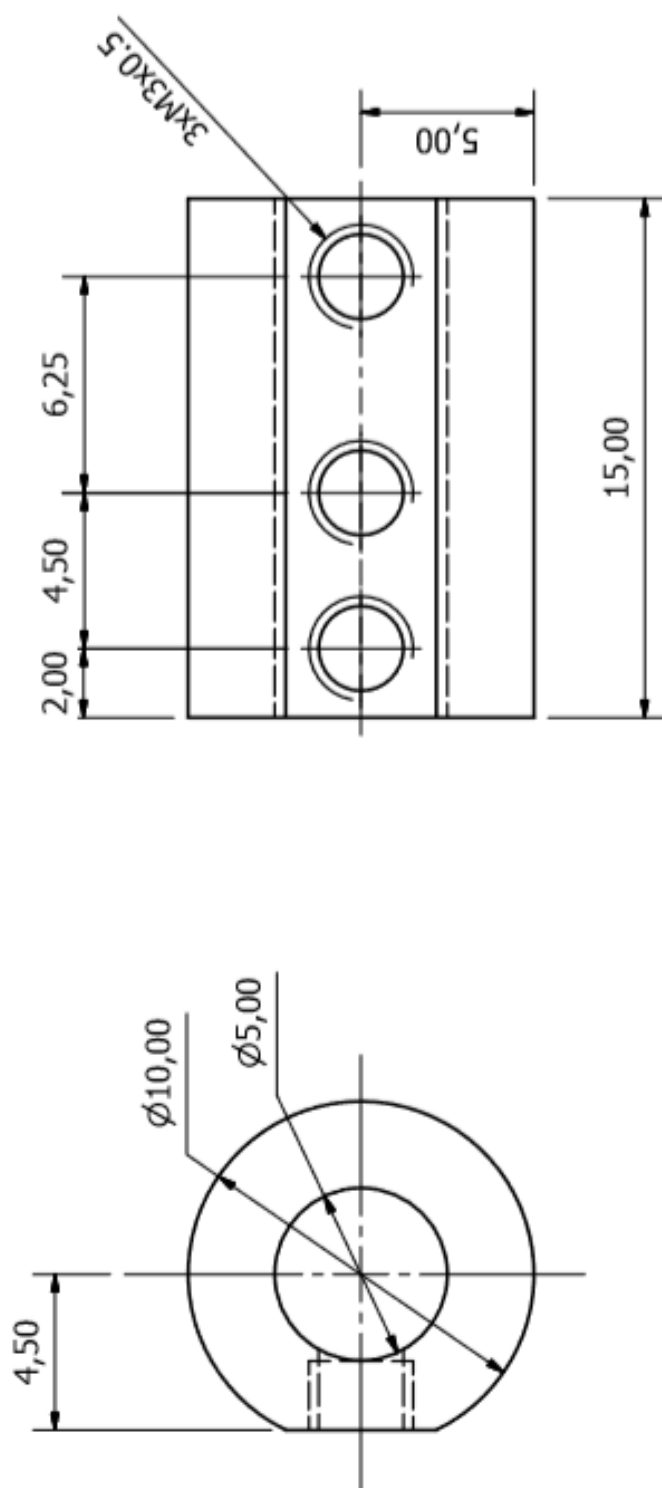
Peça: Apoio das guias

Escala: 2:1 Quantidade de peças: 1 Disciplina: TCC 2 Turma:

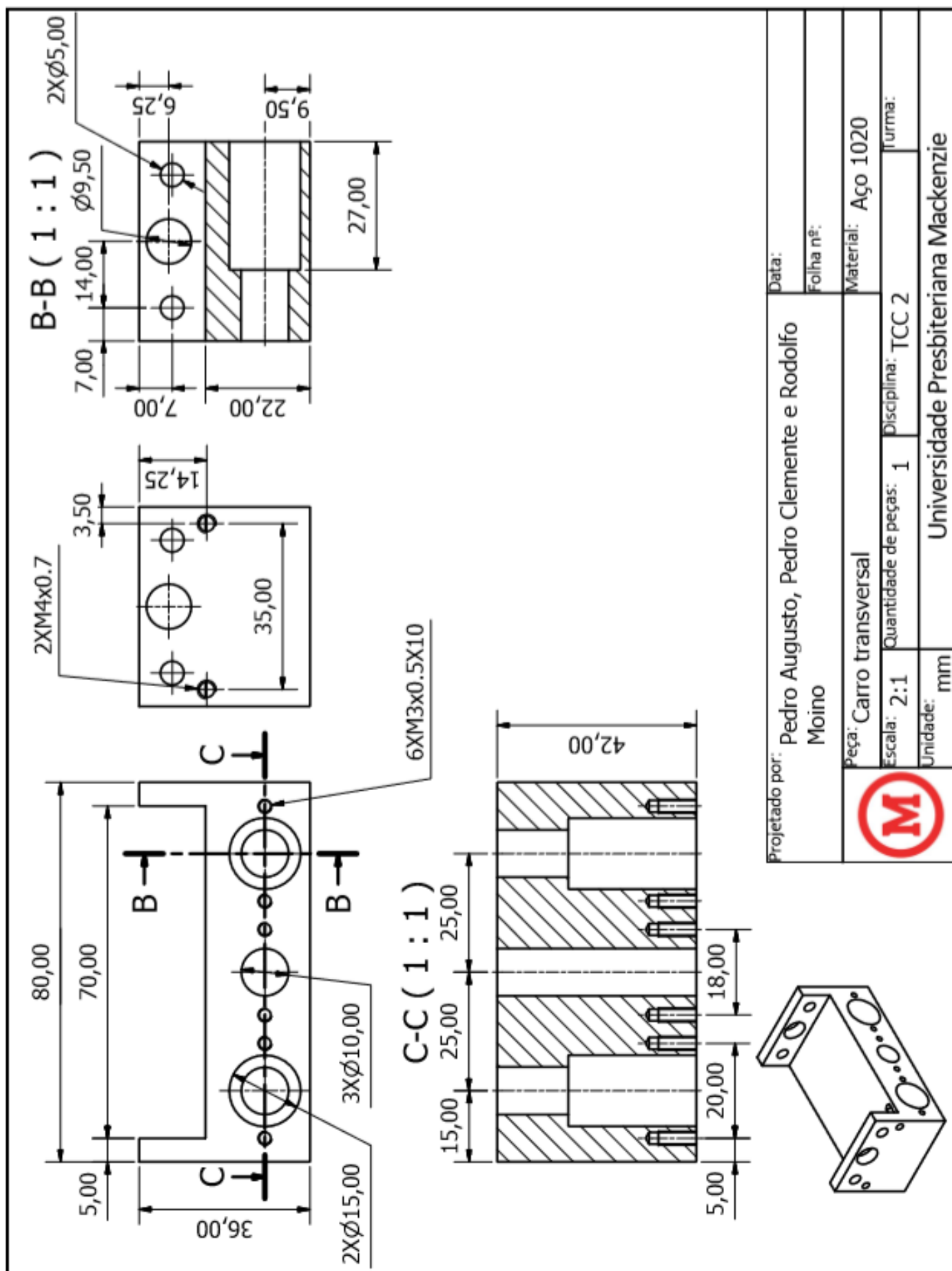


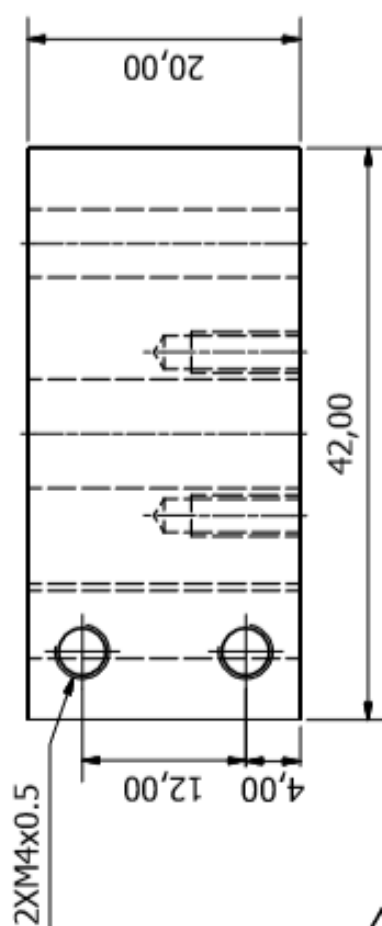
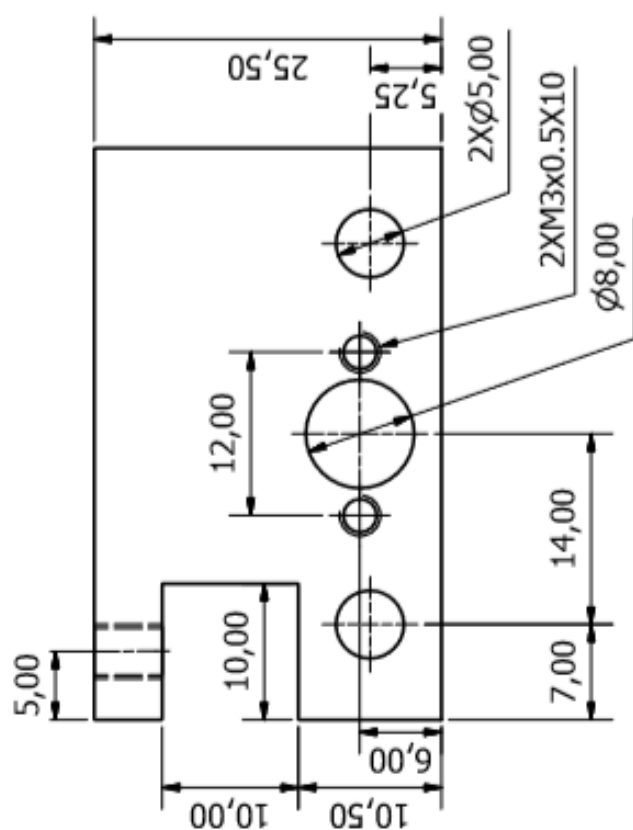
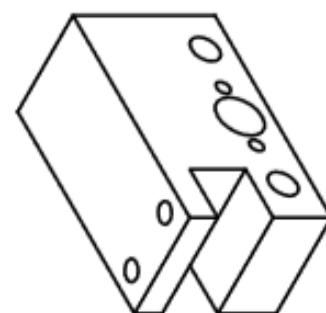
Universidade Presbiteriana Mackenzie




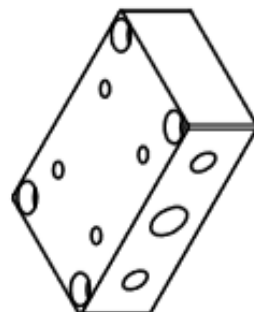
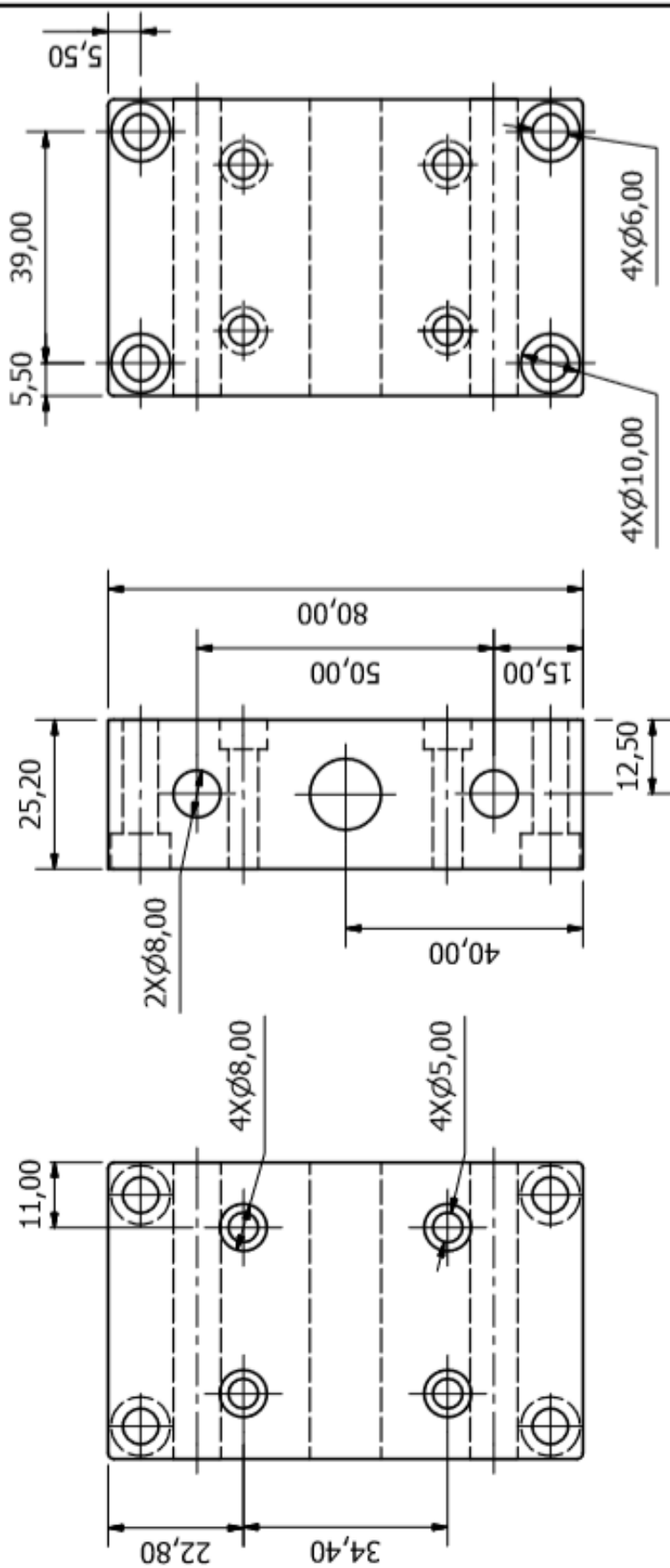



Projetado por: Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moino		Data:	
		Folha nº:	
Peça: Acoplamento		Material: Aço	
Escala: 5:1	Quantidade de peças: 1	Disciplina: TCC 2	Turma:
Unidade: mm	Universidade Presbiteriana Mackenzie		





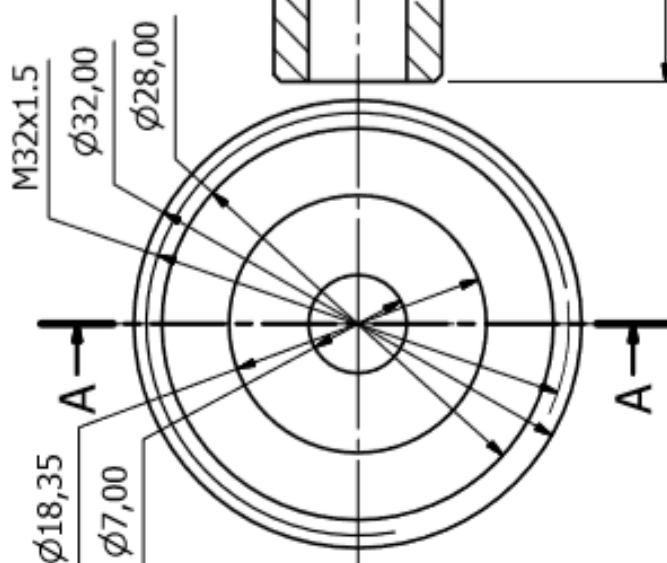
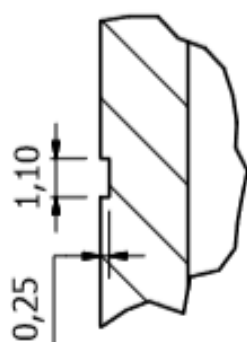
Projeto por: Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moino		Data:	
		Folha nº:	
		Material: Aço 1020	
	Peça: Castelo		
	Escala: 2:1	Quantidade de peças: 1	Disciplina:
	Unidade: mm		
	Universidade Presbiteriana Mackenzie		



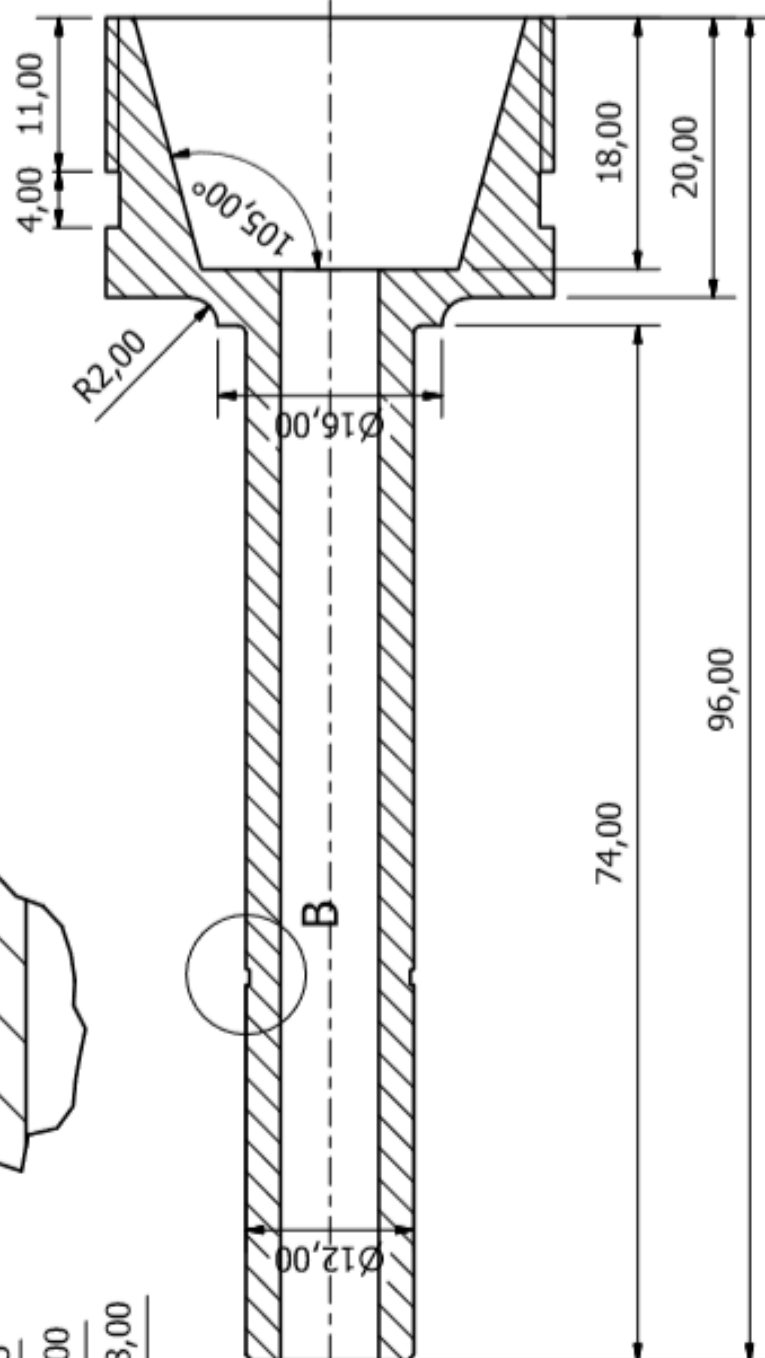
	Projetado por: Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moino			Data:	
				Folha nº:	
				Material: Aço 1020	
				Turma:	
Peça: Base dos mancais					
Escala: 1:1	Quantidade de peças: 1	Disciplina: TCC 2			
Unidade: mm					
Universidade Presbiteriana Mackenzie					



B (5 : 1)



A-A (2 : 1)



Projetado por:

Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo
Moino

Data:

Folha nº:

Peça: Eixo árvore

Material: Aço

Escala: 2:1

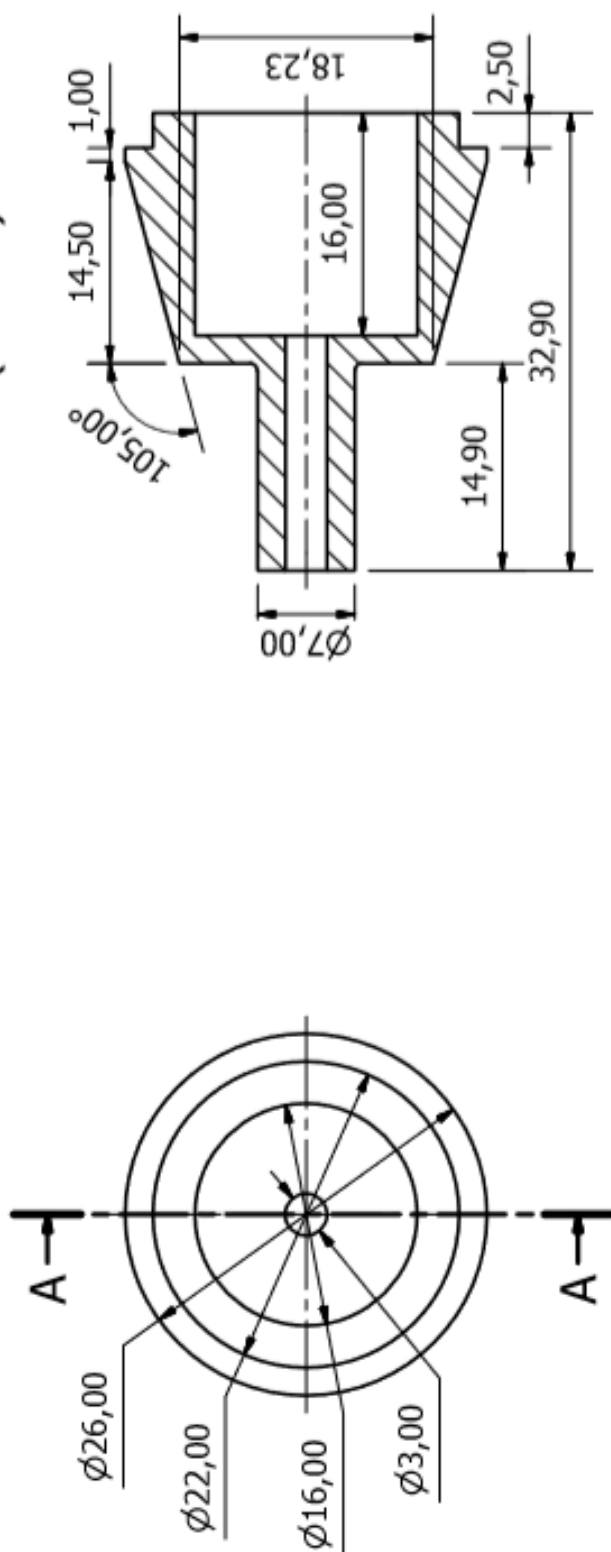
Quantidade de peças: 1

Disciplina: TCC 2

Turma:

Universidade Presbiteriana Mackenzie

A-A (2 : 1)



Projetado por:

Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moino

Data:

Folha nº:

Peça: Pinça

Material: Latão



Escala: 2:1

Quantidade de peças: 1

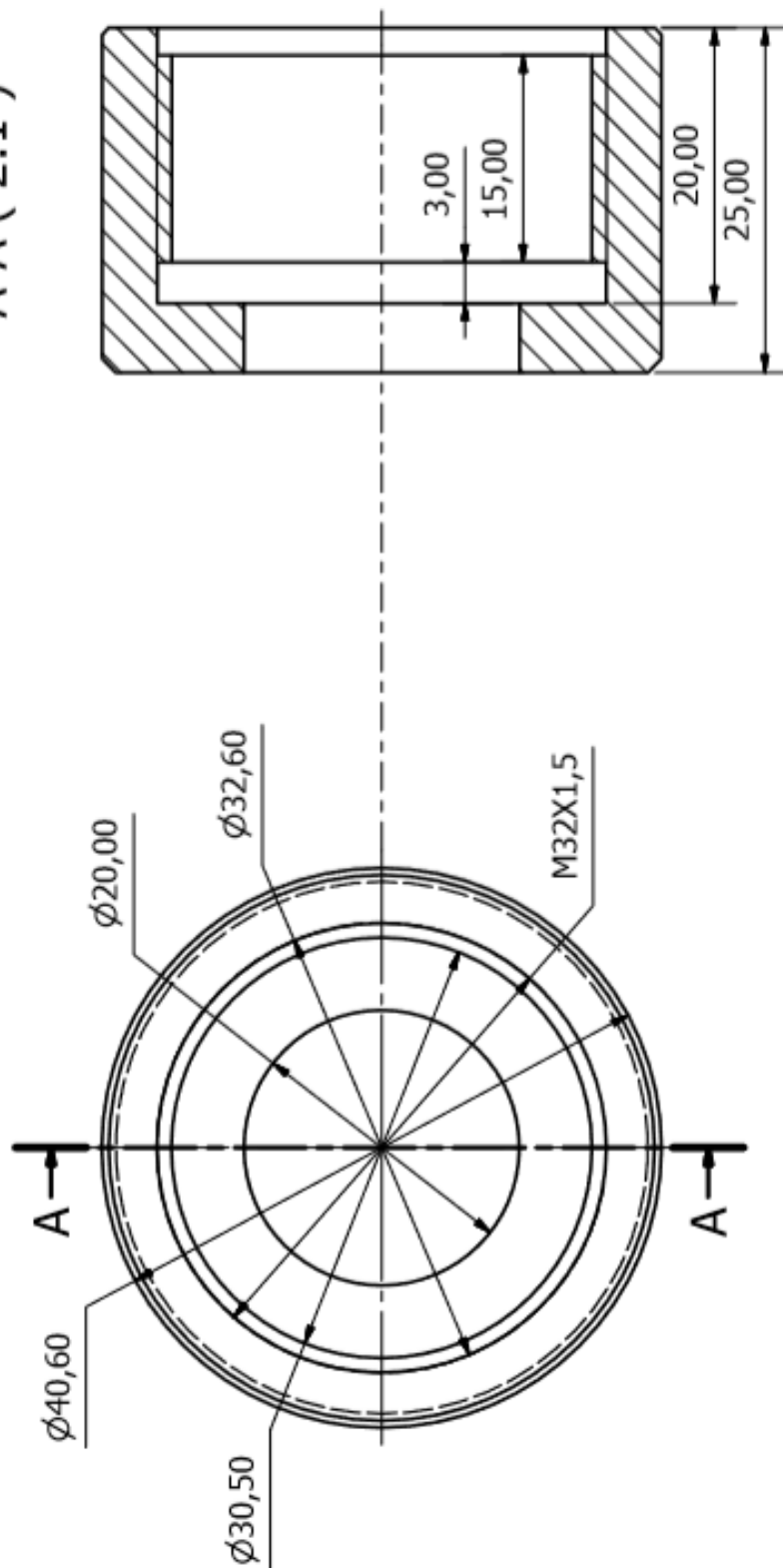
Disciplina: TCC 2

Turma:

Unidade: mm

Universidade Presbiteriana Mackenzie

A-A (2:1)



Projetado por:

Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moino

Data:

Folha nº:

Peça: Porca da pinça

Escala: 2:1

Quantidade de peças: 1

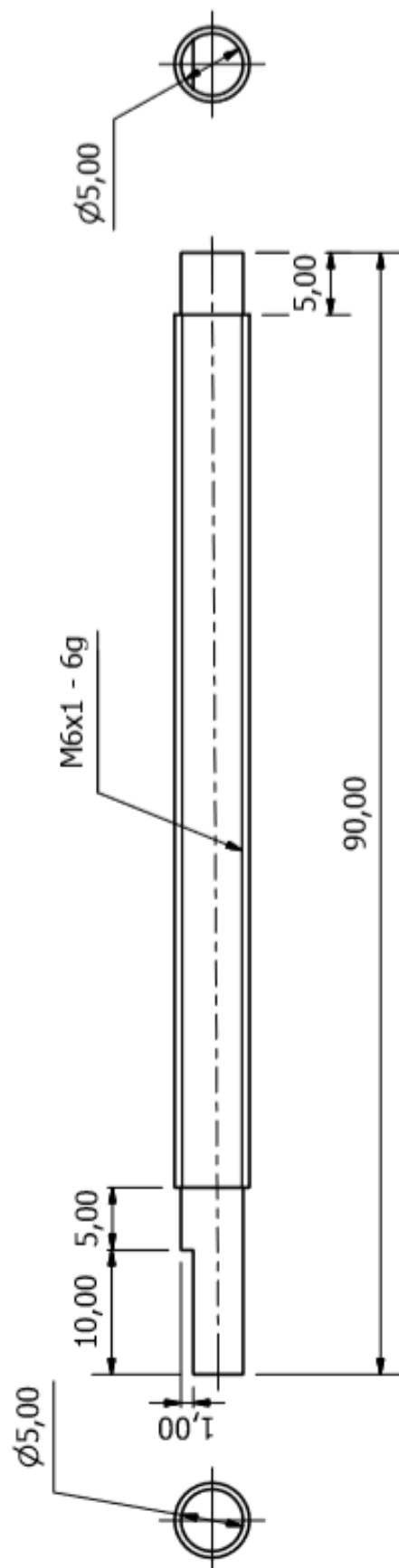
Disciplina:


Material: Aço 1020

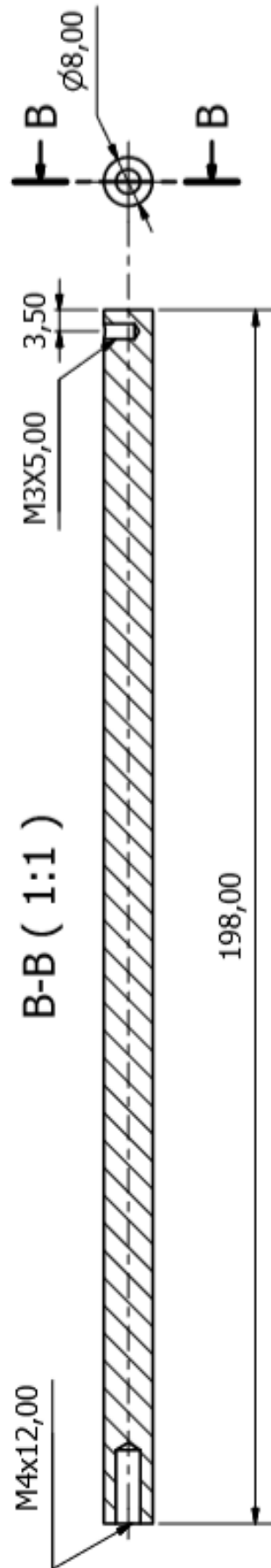
Turma:



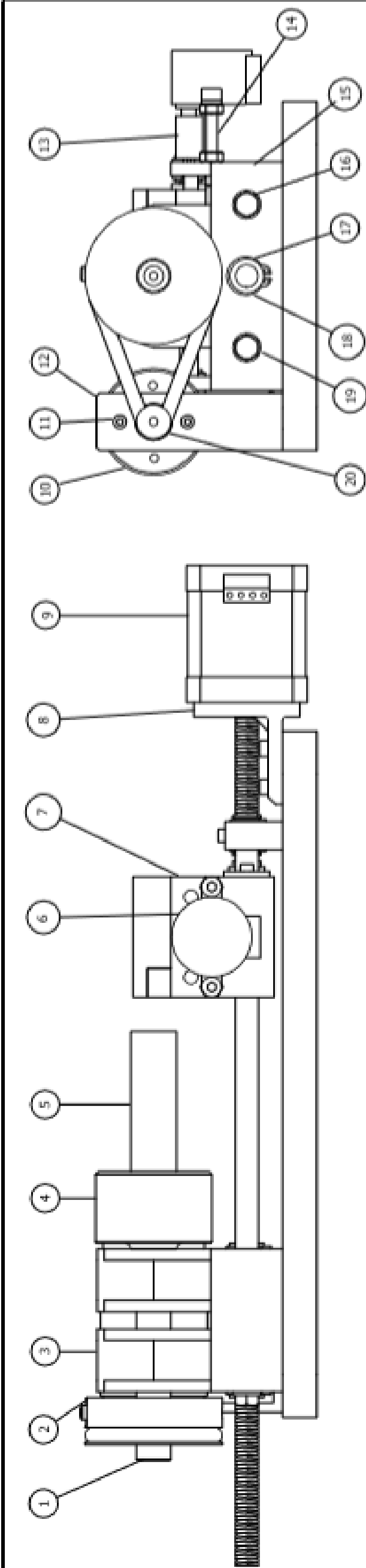
Universidade Presbiteriana Mackenzie



Projetado por: Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moino		Data:	
		Folha nº:	
		Material: Aço	
	Peça: Fuso transversal		Turma:
	Escala: 2:1	Quantidade de peças: 1	
	Unidade: mm	Disciplina: TCC 2	
Universidade Presbiteriana Mackenzie			

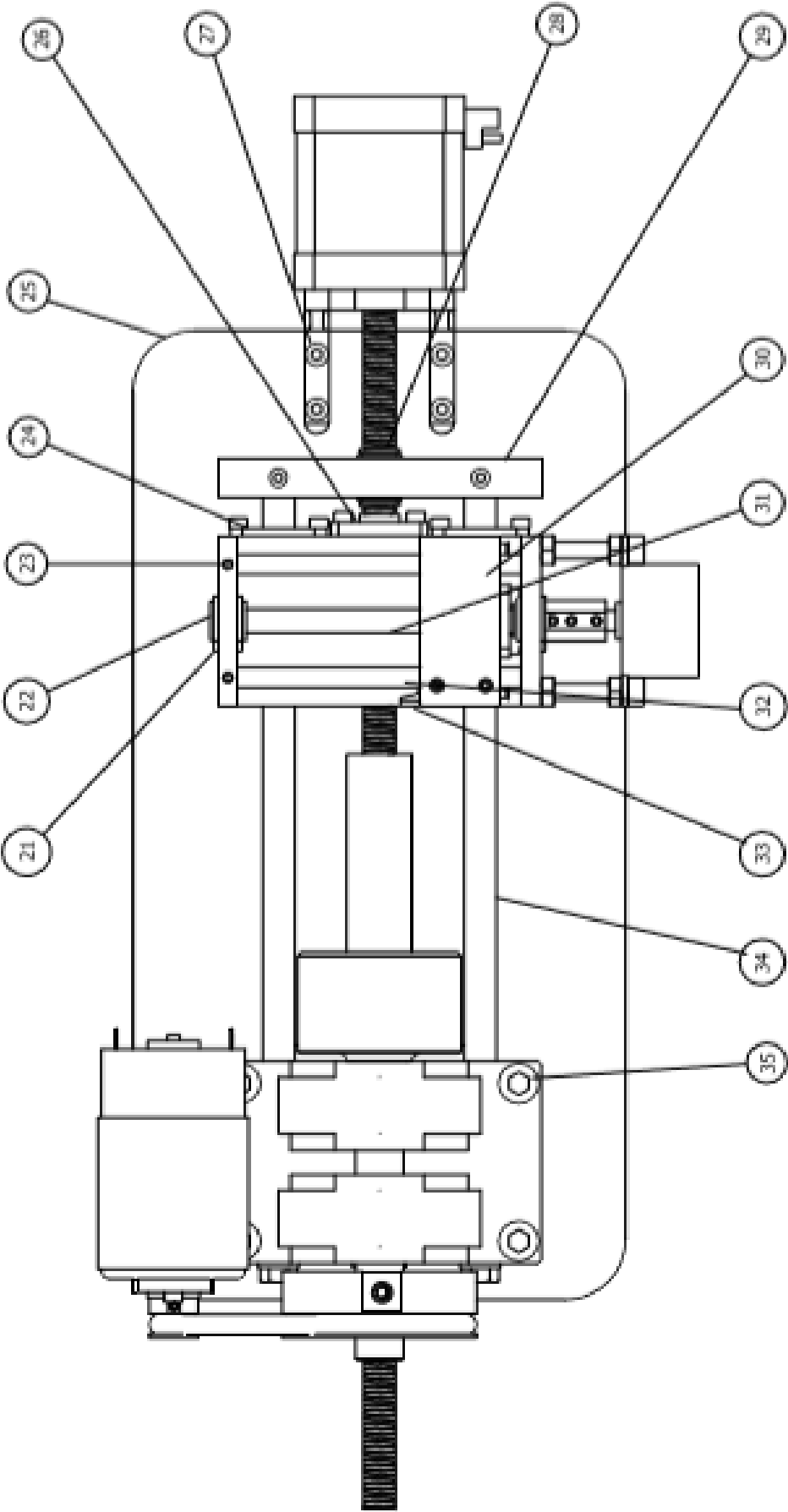


Projeto por: Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo Moio		Data:	
		Folha nº: 1/1	
Peça: Guia linear longitudinal		Material: Aço 1020	
Escala: 1:1	Quantidade de peças: 2	Disciplina: TCC 2	Turma: 10D
Unidade: mm	Universidade Presbiteriana Mackenzie		



TABELA

Item	Quantidade	Descrição	Material
1	1	Eixo-âncora	Aço 1020
2	1	Polia do eixo-âncora	Alumínio
3	2	Alojamento do rolamento	Aço 1020
4	1	Forca da pinça	Aço 1020
5	1	Tarugo	
6	1	Motor 288YJ-48	
7	1	Carro longitudinal	Aço 1020
8	1	Apoio do motor de passo	
9	1	Motor de passo longitudinal	
10	1	Motor do eixo-âncora	
11	12	Parafuso MDX10	
12	2	Apoio do motor	Aço 1020
13	1	Acoplamento	Aço 1020
14	6	Parafuso H40C30	
15	1	Apoio do cabeçote	Aço1020
16	2	Arruela M5	
17	2	Anel elástico M12	
18	1	Bucha de 48mm	Nylon
19	2	Parafuso sextavadoMSX10	
20	1	Polia do motor	Alumínio
21	6	Anel elástico M8	
22	2	Bucha do fuso transversal	Nylon
23	4	Parafuso q/ cabeça MBX10	
24	2	Tapa do rolamento linear	Latão
25	1	Base da máquina	Aço 1020
26	12	Porca M4	
27	1	Bucha de 12mm	Nylon
28	6	Anel elástico M10	
29	1	Apoio do fuso longitudinal	Aço 1020
30	1	Castelo	Aço 1020
31	1	Fuso transversal	
32	2	Guia transversal	
33	1	Ferramenta de corte	Aço rápido
34	2	Guia longitudinal	Aço 1020
35	4	Parafuso MSX30	



Projetado por: Pedro Augusto, Pedro Clemente e Rodolfo

Maquina

Desenho de conjunto

Escala: 1:1

Unidade de projeto: milímetros

Unidade: mm

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Revisão:

Revisão:

Revisão:

Anexo B – Lista de códigos G suportados pelo GRBL

- **G0, G1:** *Movimento linear*
- **G2, G3:** *Geração de arco*
- **G4:** *Tempo de permanência*
- **G10 L2, G10 L20:** *Conjunto de coordenadas de trabalho*
- **G17, G18, G19:** *Plane Selection*
- **G20, G21:** *Referência de unidade de medida; polegada e métrico, respectivamente*
- **G28, G30:** *Retorna eixos para referência da máquina*
- **G28.1, G30.1:** *Define a posição de referência*
- **G38.2:** *Sondagem*
- **G38.3, G38.4, G38.5:** *Sondagem*
- **G40:** *Cancela a compensação de raio da máquina*
- **G43.1, G49:** *Definição do comprimento da ferramenta dinâmica*
- **G53:** *Movimento em coordenadas absolutas*
- **G54, G55, G56, G57, G58, G59:** *Sistemas de coordenadas de trabalho*
- **G61:** *Modo de controle*
- **G80:** *Cancela o modo de controle*
- **G90, G91:** *Sistema de coordenadas absoluta e incremental, respectivamente*
- **G91.1:** *Modo de distância em IJK para arcos*
- **G92:** *Definição de coordenada*
- **G92.1:** *Limpa as definições do sistema de coordenadas*
- **G93, G94:** *Modos de avanço*
- **M0, M2, M30:** *Parada de programa, final de programa e final de programa com retorno*
- **M3, M4, M5:** *Controle do spindle*
- **M7*, M8, M9:** *Controle do fluido de resfriamento*
- **M56*:** *Controle de movimento de parada*