

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Impressora 3D de baixo custo – Projeto Mecânico

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Bruno Caldas de Souza
Julio Cesar Candia Nishida

Orientador: Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barreto

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

**Souza, Bruno Caldas de
Impressora 3D de baixo custo / B.C. de Souza. – São Paulo,
2009.**

50 p.

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Impressora 2. Fresadoras (Protótipo) I. Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecânica II. t.**

Resumo

Atualmente nota-se uma grande demanda por máquinas ferramentas compactas e baratas capazes de gerar formas tridimensionais.

O objetivo do presente trabalho é o projeto e construção de uma impressora que gere formas tridimensionais de baixo custo com dimensões bem compactas (compatível com o tamanho de impressoras tradicionais). Além disso, é interessante que ela possa ser usada por projetistas para a geração de peças ou até mesmo por crianças na criação de brinquedos personalizados.

Para a geração dessas peças, essa máquina fará a usinagem (fresamento e furação) de materiais pré-definidos de fácil usinabilidade através de uma interface computacional simples e amigável

O trabalho foi dividido, essencialmente, em parte mecânica e elétrico-eletrônica. A primeira parte foi de responsabilidade do autor Bruno Souza, a segunda pelo Julio Nishida.

O presente trabalho refere-se ao trabalho de Bruno Souza.

O produto a ser desenvolvido com uma interface simples e de fácil manuseio poderá, portanto, ser de grande utilidade pra projetistas e crianças. Além disso, os autores deste trabalho terão a possibilidade de entrarem no mercado com um produto bem diferenciado.

Abstract

Nowadays there is a large demand for compact and inexpensive machine tools that can generate three-dimensional forms.

The objective of this work is to design and to construct a low cost printer that generates three-dimensional forms and that has a compact size (compatible with the size of traditional printers). It is also interesting that it can be used by designers to create pieces or even for children in the creation of custom toys.

For the generation of these parts, this machine will do the machining (milling and drilling) of pre-defined materials with easy machinability computer through an interface simple and friendly

The work was divided mainly on the mechanical, electrical and electronics. The first part was the responsibility of the author Bruno Souza, the second one of Julio Nishida and third one for both.

This work refers to the part made by Bruno Souza.

The product with a simple interface and easy handling may therefore be very useful for designers and children. Furthermore, the authors of this work will be able to enter the market with a well differentiated product.

Lista de Figuras

Figura 1 - Quarto eixo no spindle da máquina.....	6
Figura 2 - Fresadora de três eixos com porta ferramentas	6
Figura 3 - Exemplo de ferramentas diferenciadas para usinagem de geometrias complexas.....	7
Figura 4 – Fresadora com quarto eixo como uma placa móvel	7
Figura 5 - Esquema de movimentação	9
Figura 6 - Fixação do Spindle da Máquina	9
Figura 7 - Máquina Montada com tampa plástica de segurança.....	10
Figura 8 - Modelo do Quarto Eixo.....	10
Figura 9 – Motor de passo de baixo custo	12
Figura 10 – Gráfico do comportamento do motor de passo de baixo custo.....	13
Figura 11 - Solução ruim de guias lineares	18
Figura 12 - Solução adotada de guias lineares	19
Figura 13 - Representação esquemática das guias	20
Figura 14 – Diagramas de força cortante e momento fletor.....	22
Figura 15 – Modelo da estrutura do eixo z	25
Figura 16 - Modelo em CAD do eixo z construído.....	26
Figura 17 - Análise elástico linear do eixo z.....	27
Figura 18 - Solução de desalinhamento das barras	28
Figura 19 - Protótipo construído	29

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros de projeto	8
Tabela 2 - Especificações gerais do motor de baixo custo.....	12
Tabela 3 – Custos para o protótipo	30

Sumário

FICHA CATALOGRÁFICA	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	V
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. SUMÁRIO EXECUTIVO	4
4. ESTUDO DE ALTERNATIVAS	6
5. RESTRIÇÕES DA MÁQUINA	8
6. ESQUEMA GERAL DE FUNCIONAMENTO	9
7. CARACTERÍSTICAS DE USINAGEM	11
8. SELEÇÃO DO MOTOR	12
9. SELEÇÃO DO FUSO DE MOVIMENTAÇÃO DOS EIXOS PRINCIPAIS (X, Y, Z)	14
10. CARACTERÍSTICAS DO SPINDLE	16
11. QUARTO EIXO	17
12. GUIAS LINEARES DE MOVIMENTAÇÃO	18
13. FLEXÃO DAS HASTES GUIAS E DOS FUSOS	20
14. FLEXÃO DO EIXO Z	25
15. PROBLEMA DO ALINHAMENTO DAS GUIAS LINEARES	28
16. PROTÓTIPO	29
17. CUSTOS	30
18. CONCLUSÕES	31
19. ANEXOS I - DESENHOS DE FABRICAÇÃO	32

1. INTRODUÇÃO

Grande parte de projetistas e estudantes de engenharia sentem a necessidade de máquinas ferramentas compactas e baratas capazes de gerar formas tridimensionais.

Máquinas de prototipagem rápida utilizam tecnologias do tipo estereolitografia, sinterização seletiva a laser ou deposição por jato de cera. Apesar de cumprirem o papel, possuem custos altíssimos da ordem de dezenas de milhares de dólares, são equipamentos volumosos, difícil transporte e ainda inacessíveis ao usuário comum.

Os autores deste trabalho tiveram a idéia de projetar e construir uma máquina de prototipagem rápida de baixo custo que gere formas tridimensionais através de usinagem.

Para a geração dessas peças, essa máquina fará o fresamento e a furação de materiais pré-definidos (de fácil usinabilidade) em quatro eixos (os três ortogonais: X, Y e Z; e um de rotação: Rot(X)) através de uma interface computacional simples e amigável.

O produto a ser construído possui características tão diferentes da concorrência que trazem aos autores grandes chances de terem sucesso no mercado de máquinas de prototipagem rápida.

Esta máquina, denominada “Impressora 3D”, é composta por uma micro fresadora, de dimensões reduzidas, que se comunica com um PC, onde está sua interface com o usuário.

No primeiro semestre com relação ao projeto mecânico foi feito todo seu projeto. Este, porém, teve a necessidade de ser modificado no segundo semestre devido a limitações de materiais baratos e que não demandassem trabalhos sofisticados de manufatura pela escassez de máquinas operatrizes disponíveis.

Além disso, no segundo semestre foi feita também a construção do protótipo que demandou muita originalidade dos integrantes devido ao objetivo de baixo custo e a escassez anteriormente descrita.

O projeto eletrônico da máquina também foi alterado de forma a permitir uma maior flexibilidade com relação ao controle dos motores de passo que acionam os eixos do equipamento e à comunicação com o PC.

Foi utilizado um microcontrolador com maior capacidade computacional, mais memória e um número maior de portas de entrada e saída. Esse microcontrolador pertence à mesma família do anteriormente proposto e possui um custo muito próximo.

Sendo assim, o subsistema eletrônico foi completamente especificado e construído com sucesso.

O subsistema que envolve a programação do microcontrolador, a interface com a máquina no PC e a comunicação entre estes foi especificada e, conforme planejado no cronograma, está em fase final de implementação.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é o projeto e a construção de uma máquina, denominada “Impressora 3D”, de baixo custo, com dimensões bem compactas (compatível com o tamanho de impressoras tradicionais), capaz de gerar formas tridimensionais, que possa ser usada por projetistas para a geração de peças ou até mesmo por crianças e adolescentes para a criação de brinquedos personalizados. Para a geração dessas peças, essa máquina fará a usinagem (fresamento e furação) de materiais pré-definidos (de fácil usinabilidade) em quatro eixos (os três ortogonais: X, Y e Z; e um de rotação: Rot(X)) através de uma interface computacional simples e amigável.

3. SUMÁRIO EXECUTIVO

Este sumário executivo tem como objetivo apresentar os estudos e análise de viabilidade técnico e econômica da criação, construção e produção seriada de uma impressora de objetos tridimensionais de baixo custo com dimensões compactas.

3.1 Visão geral do produto

O produto proposto é composto de um módulo, a impressora 3D, e uma interface computacional simples e amigável.

As dimensões externas máximas da impressora são de: 600mm(L) x 400mm(A) x 300mm(P) = 72L. O volume de trabalho interno, isto é, o tamanho máximo das peças geradas é de: 200mm(L) x 100mm(A) x 100mm(P) = 2L.

3.2 Mercado potencial e público alvo

O público alvo deste produto se divide em dois grupos principais e com características diferenciadas: projetistas e crianças e/ou adolescentes.

O grupo de projetistas é composto por estudantes de engenharia e outras pessoas ligadas à tecnologia e produção industrial em geral. Para esse grupo a impressora 3D é utilizada como uma máquina de prototipagem rápida acessível, portátil e versátil. Ela permite a geração rápida de peças projetadas e pequenos protótipos funcionais.

O grupo de crianças e adolescentes é composto por jovens de 7 a 15 anos e representa a maior parte do mercado consumidor para este produto. Para estes a impressora 3D é utilizada para a criação de brinquedos de forma instantânea. Ela pode ser vista como uma “Fábrica de Brinquedos” e possui enorme apelo para esse público. Exemplos desses brinquedos criados são: medalhões, buttons, mini bonecos e bonecas, carrinhos, trenzinhos, pequenos “bichinhos”, como cães, gatos, peixes, dinossauros, casinhas, mesinhas, cadeirinhas, entre outros.

3.3 Elementos de diferenciação da concorrência

Para a criação desses objetos tridimensionais já existem disponíveis no mercado máquinas de prototipagem rápida, que utilizam várias tecnologias como estereolitografia, sinterização seletiva a laser, deposição por jato de cera entre outros, mas estas têm valores altíssimos (da ordem de dezenas de milhares de dólares), são equipamentos volumosos, difícil transporte e ainda inacessíveis ao usuário comum. Um exemplo de uma das máquinas de prototipagem rápida disponível no mercado é a *Desktop Factory* que custa cerca de US\$5.000,00 nos EUA.

O grande diferencial da impressora 3D proposta é a geração dessas peças por processos de usinagem: fresamento e furação de materiais pré-definidos (de fácil usinabilidade). Isso diminui drasticamente o custo de produção e operação do equipamento.

4. ESTUDO DE ALTERNATIVAS

Foi definido que a máquina a ser desenvolvida deverá obter peças usinadas de certa complexidade, sendo que a precisão não é prioridade, podendo até a chegar a um milímetro de tolerância, a fim de não encarecer muito a impressora 3D.

As soluções ilustradas pelas figuras 1, 2 e 4 mostram a preocupação de formar geometrias complexas. Para sua realização foi pensado em um quarto eixo nas figuras 1 e 4 ou utilizando ferramentas especiais para formar peças complexas nas figuras 2 e 3.

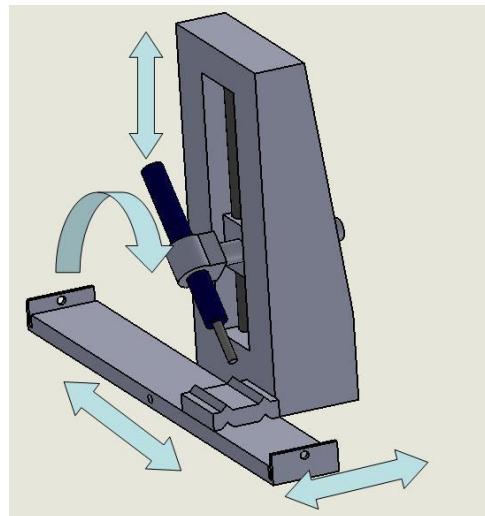


Figura 1 - Quarto eixo no spindle da máquina

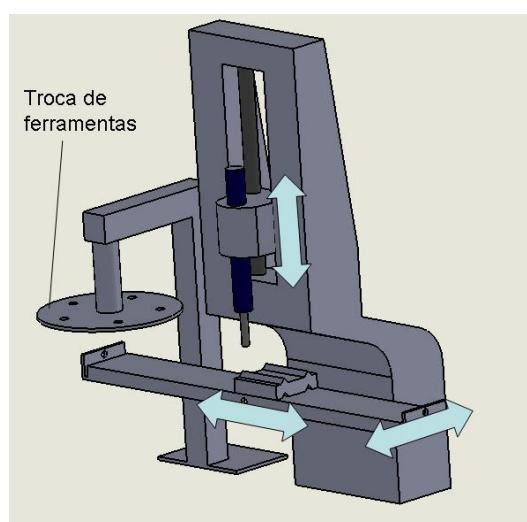


Figura 2 - Fresadora de três eixos com porta ferramentas



Figura 3 - Exemplo de ferramentas diferenciadas para usinagem de geometrias complexas

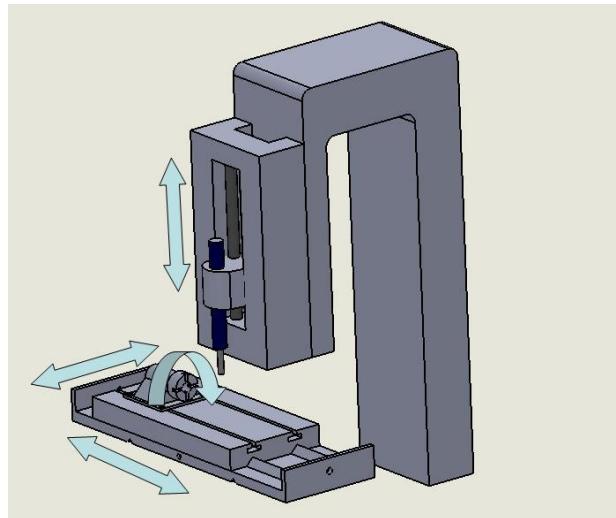


Figura 4 – Fresadora com quarto eixo como uma placa móvel

A solução escolhida foi a da figura 4, porque apesar da inserção de uma placa com castanhas aumente um pouco o custo do projeto, não haveria necessidade do grupo trabalhar na transformação do objeto CAD para a programação em código G e já existência de softwares CAD/CAM para este tipo de máquina.

5. RESTRIÇÕES DA MÁQUINA

Para o início do dimensionamento, pensou-se nas seguintes condições desejadas:

Tabela 1 - Parâmetros de projeto

Material a ser usinado:	Madeira do tipo carvalho
Diâmetro da ferramenta(d):	3,2mm
Profundidade de corte(p):	0,6mm
Velocidade de corte:	50m/min
Rotação do quarto eixo:	80rpm

6. ESQUEMA GERAL DE FUNCIONAMENTO

Para melhor entendimento da máquina segue as seguintes figuras que ilustram onde ficam localizadas as peças e como a impressora se movimenta. Para mais detalhes consultar os anexos.

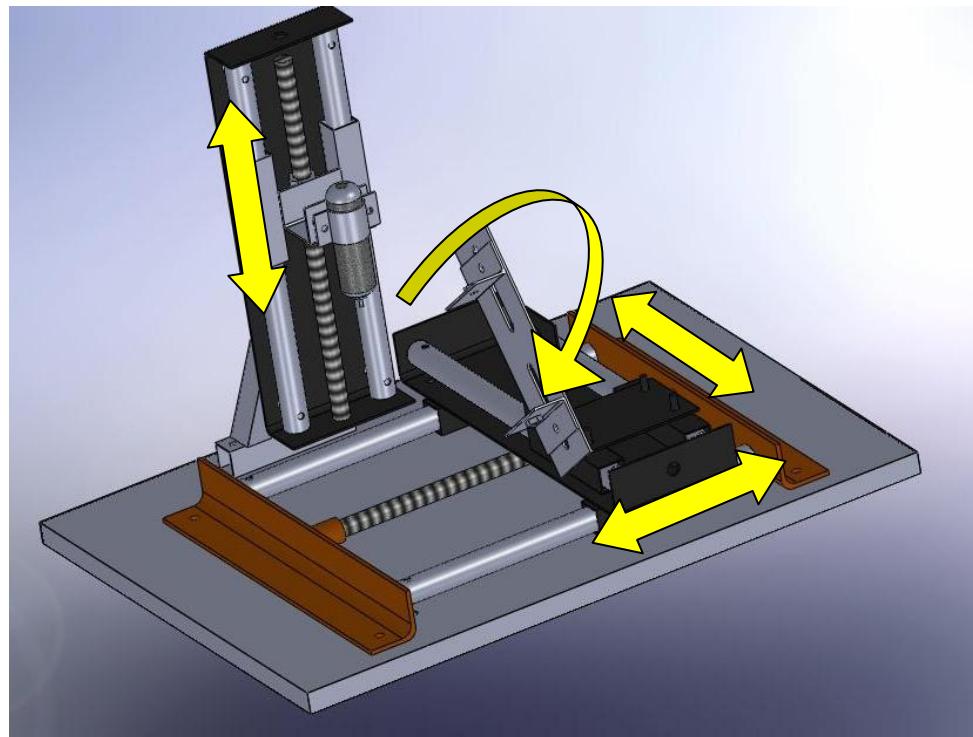


Figura 5 - Esquema de movimentação

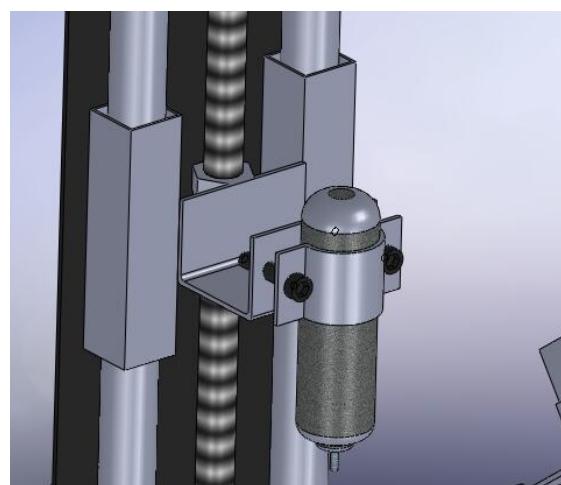


Figura 6 - Fixação do Spindle da Máquina

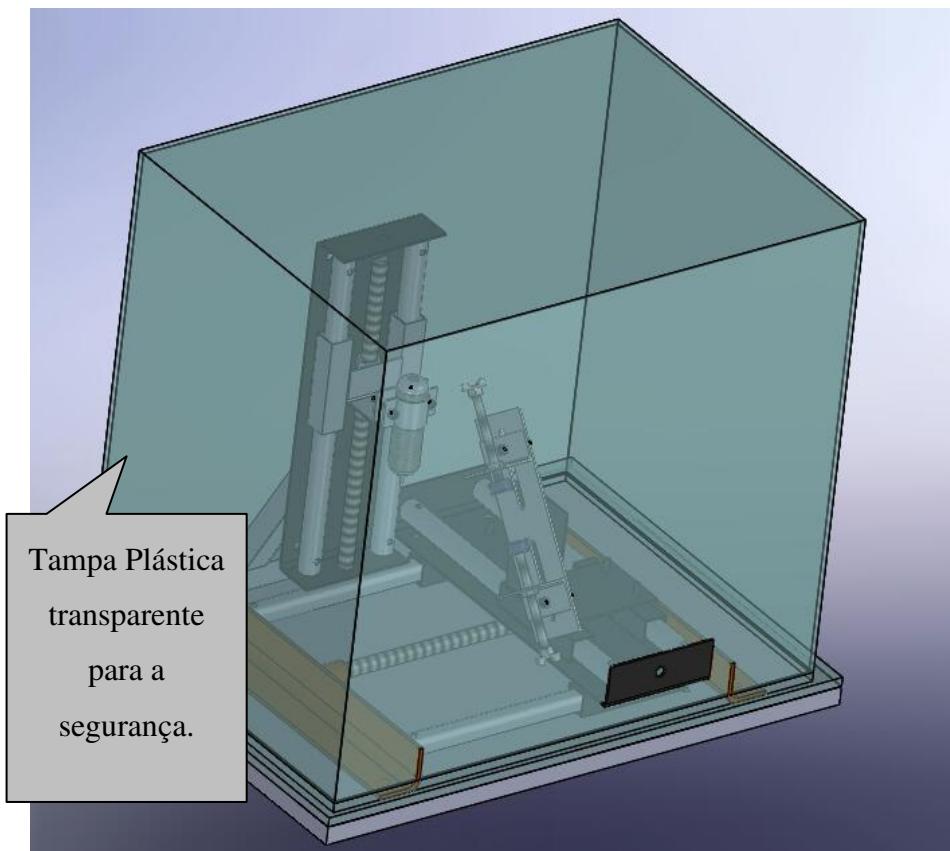


Figura 7 - Máquina Montada com tampa plástica de segurança

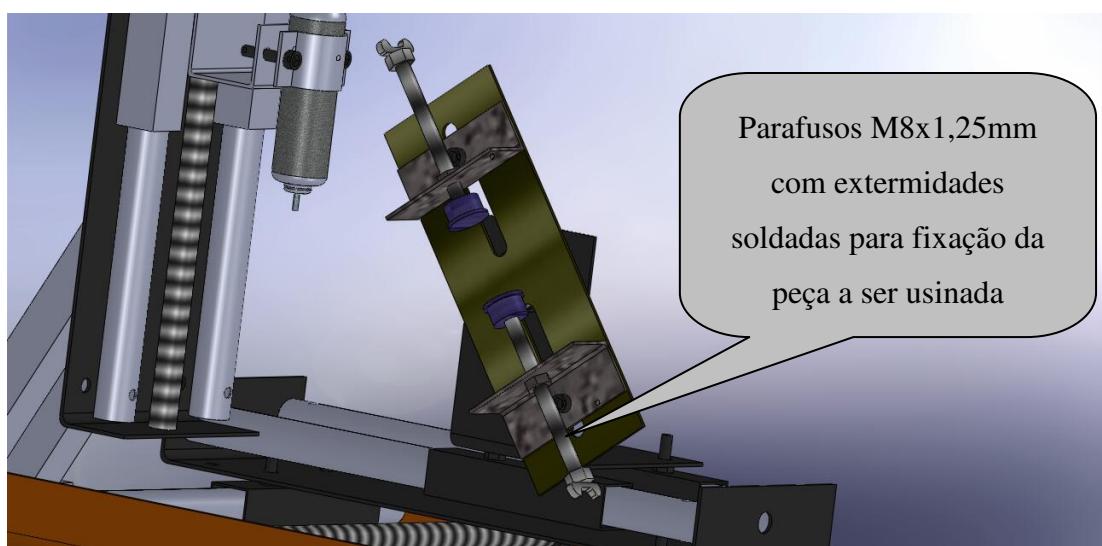


Figura 8 - Modelo do Quarto Eixo

7. CARACTERÍSTICAS DE USINAGEM

Após definido os parâmetros anteriores pôde-se calcular qual a força de usinagem que surge durante tal operação.

$$F = \frac{p \cdot b \cdot v_a \cdot r_e}{1000 \cdot v} \quad (1)$$

Onde:

F = Força de corte

p = Profundidade de corte

b = Largura de corte

v_a = Velocidade de avanço

r_e =resistência específica de corte

v = Velocidade de corte

A resistência específica de corte é estimada como sendo de 3 a 4 vezes a tensão de ruptura do material, temos que:

$$r_e = 4 \cdot \sigma_R \approx 240 MPa \quad (2)$$

A relação da força de avanço com a força de fresamento depende de uma série de fatores como o material da peça, área da seção de corte, espessura de corte, afiação da ferramenta e geometria da ferramenta. Sabe-se, porém que a força de avanço nunca será maior do que a força de corte. Portanto, esta será usada como parâmetro de projeto de força de avanço.

$$F_a = F = \frac{p \cdot b \cdot v_a \cdot r_e}{1000 \cdot v} \Rightarrow F_a = \frac{0,6 \cdot 3,2 \cdot 500 \cdot 240}{1000 \cdot 50,26} \quad (3)$$

$$F_a = 5,4 N \quad (4)$$

8. SELEÇÃO DO MOTOR

Para escolhermos um motor adequado de baixo custo é necessário verificar sua potência em relação a potência de corte.

$$P_{motor} > P_{corte} = F_{corte} \cdot v_{corte} \approx 4,5W \quad (5)$$

A partir disso, foi feita uma busca por motores de passo de baixo custo com alguma especificação técnica. O motor mais adequado foi o MINEBEA Co., Inc - ASTROSYN 23LM-C701-01.



Figura 9 – Motor de passo de baixo custo

As características mais relevantes deste motor para o projeto mecânico da máquina são mostradas na Tabela 1.

Tabela 2 - Especificações gerais do motor de baixo custo

Comprimento (do topo do flange ao fundo da carcaça)	75 mm
Diâmetro	57 mm
Comprimento da haste	14 mm
Diâmetro da haste	5.9 mm

Tipo da haste	Simples com dois rolamentos
Passos por volta	200
Ângulo do passo	1.8 graus
Torque a velocidade zero	7.3 kgf.cm = 0,72 N.m
Tensão por fase	5.2 VDC
Potência máxima	5 W

Além disso, com base em motores similares foi estimada uma curva de torque para melhor dimensionamento da máquina e ela é mostrada na figura 6.

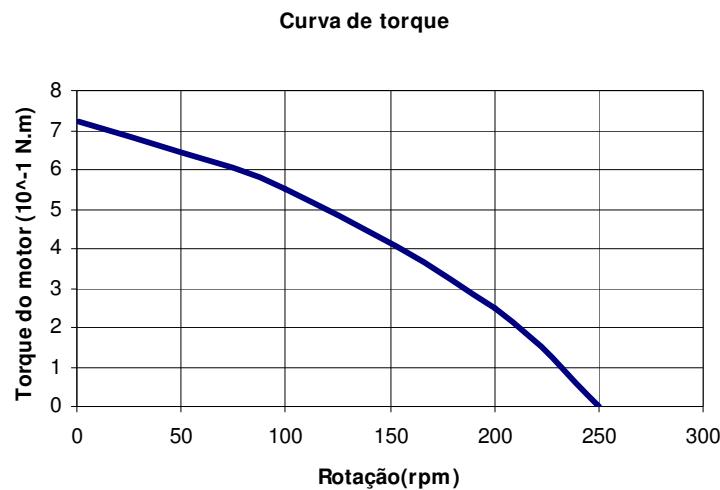


Figura 10 – Gráfico do comportamento do motor de passo de baixo custo

É importante ressaltar que a curva anterior não é uma curva real do motor, pois em motores de baixo custo é muito difícil encontrar tal documentação.

9. SELEÇÃO DO FUSO DE MOVIMENTAÇÃO DOS EIXOS PRINCIPAIS (X, Y, Z)

Utilizando um fuso de M18 x 2,5 mm e com um comprimento estimado de 500mm, pode-se calcular o torque máximo necessário do motor de passo e comparar o que o motor escolhido pode oferecer. Com o auxílio das equações de SHIGLEY, temos:

$$l = n \cdot p = 2,5\text{mm} \quad (6)$$

$$dm \approx d - 0,649p = 16,4\text{mm} \quad (7)$$

$$T_R = \frac{F \cdot d_m}{2} \cdot \left(\frac{l + \pi \cdot f \cdot d_m}{\pi \cdot d_m - f \cdot l} \right) \quad (8)$$

$$T_R = \frac{5,4 \cdot 16,4}{2} \cdot \left(\frac{1 + \pi \cdot 0,1 \cdot 16,4}{\pi \cdot 16,4 - 0,1 \cdot 2,5} \right) = 5N \cdot mm \quad (9)$$

n = número de entradas do fuso

p = passo (mm)

d_m = Diâmetro médio

d = Diâmetro maior

F = Força axial do fuso

f = coeficiente de atrito fuso - porca

T_R = Torque do fuso

O torque necessário para mover o fuso é, portanto, menor do que o que pode ser oferecido pelo motor de passo.

Quanto a resistência do fuso, foi calculada a tensão estática(σ) no fuso devido à tração, segundo:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

No cálculo anterior, a tensão no parafuso fica bem abaixo do limite de escoamento tabelado em SHIGLEY.

É necessário também verificar se o fuso anteriormente escolhido resiste à flambagem. Segundo GERE a carga crítica de flambagem pode ser calculada como:

$$P_{critica} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \Rightarrow \quad (11)$$

$$\Rightarrow P_{critica} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot (\frac{\pi \cdot 16,4^4}{32})}{500^2} = 55,7N \quad (12)$$

O cálculo da seção anterior mostra que na pior situação a força exigida pelo sistema na operação de usinagem é 5,4 N. Pode-se dizer, portanto, que o fuso não corre perigo de flambar.

10. CARACTERÍSTICAS DO SPINDLE

Devido a uma complexa modelagem da força de avanço vertical, essa foi estimada por testes. Percebeu-se que o simples peso do *spindle* pode penetrar a madeira na espessura anteriormente determinada (0,6mm). Esse valor de força de avanço foi utilizado no dimensionamento:

$$F_{a,vertical} \approx m_{spindle} \cdot g = 0,2 * 9,8 \approx 2N \quad (13)$$

Com essa força de avanço necessária e a fim de baratear uma produção seriada, foi utilizado como fuso vertical o mesmo escolhido para a movimentação da mesa: M18 X 2,5 mm.

O fuso escolhido, também, resiste à flambagem, pois a carga está bem abaixo da crítica anteriormente calculada (55,7N). Quanto à tensão estática este fuso também ficou bem abaixo do limite de escoamento.

Foi verificado, também, se a potência de corte não supera a potência oferecida pelo *Spindle* que é em torno de 100W:

$$P_{spindle} \approx 100 \Rightarrow P_{spindle} > P_{corte} = F_{corte} \cdot v_{corte} \quad (14)$$

11. QUARTO EIXO

Para o quarto eixo, será tomada como torque no eixo, a força de fresamento multiplicada pelo maior raio possível da peça a ser usinada.

$$T = F_{fresamento} \cdot r_{peça} = 5,4 \cdot \frac{0,2}{2} \approx 0,5N \cdot m \quad (15)$$

O torque anteriormente encontrado, também pode parecer muito grande perto do oferecido pelo motor (0,7N.m), porém vale lembrar o que a força de avanço foi considerada igual à de fresamento.

Pela potência máxima do motor, pode-se calcular a máxima rotação permitida no quarto eixo:

$$n_{4eixo} = \frac{60 \cdot P_{4eixo}}{F \cdot r_{peça} \cdot 2 \cdot \pi} \Rightarrow \quad (16)$$

$$n_{4eixo} = \frac{60 \cdot 5}{5,4 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot \pi} = 88,4 rpm \quad (17)$$

12. GUIAS LINEARES DE MOVIMENTAÇÃO

O maior problema encontrado na construção da máquina foi como encontrar guias lineares de baixo custo. A primeira tentativa foi o uso de cantoneiras encontradas em ferro velho, porém não houve sucesso nesta primeira tentativa ilustrada na figura seguinte:



Figura 11 - Solução ruim de guias lineares

Depois de muitas tentativas o problema das guias foi solucionado de uma forma inovadora através de tubos padrões disponíveis. Percebeu-se que se usarmos um tubo quadrado de 25x25x1,2 e um tubo redondo de 7/8" com 0,9 de espessura, um tubo entraria dentro do outro com uma folga de três décimos de milímetro. Isso não significa que a mesa teria toda essa folga, pois na construção foi pressionada uma guia contra a outra a fim de eliminar qualquer folga. Tal solução está representada pela figura seguinte.

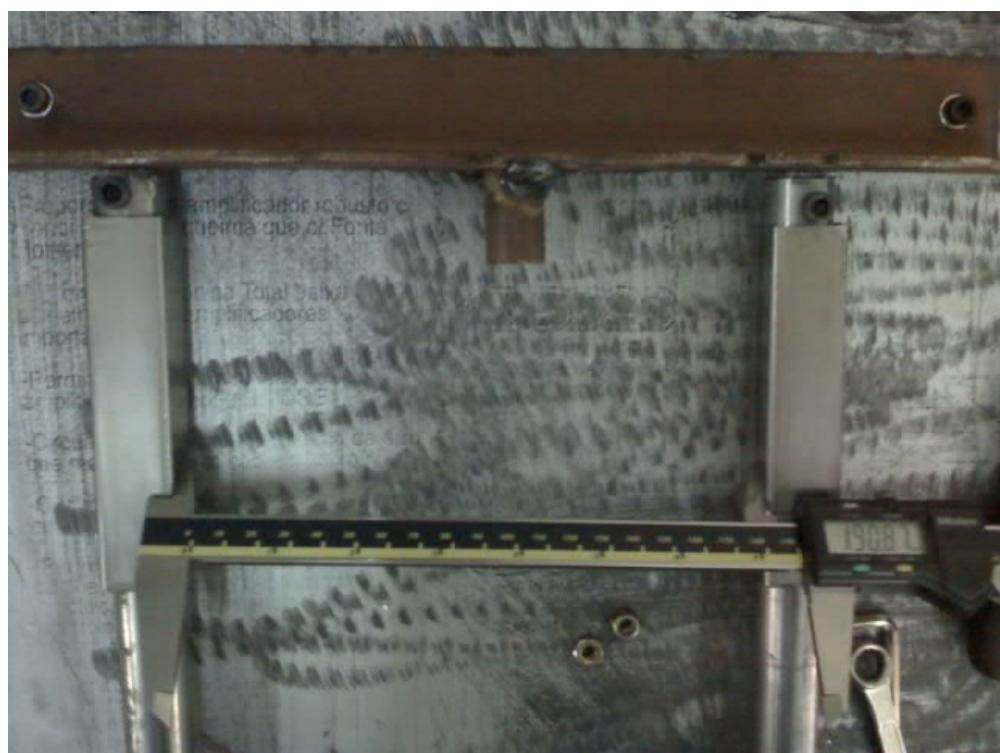


Figura 12 - Solução adotada de guias lineares

13. FLEXÃO DAS HASTES GUIAS E DOS FUSOS

Ao invés de guias lineares comerciais, serão utilizadas duas hastes por eixo de movimentação linear. Deve-se, portanto verificar se estas resistem aos esforços da operação de usinagem. Adota-se inicialmente hastes de 12mm de diâmetro.

Sabe-se que na disposição da Figura 13¹ a deflexão das três vigas(fuso e hastes) devem ser iguais e:

$$R_A = R_B = \frac{F_1}{2} \quad (\text{Simetria}) \quad (18)$$

R_A : Reação no mancal A

R_B : Reação no mancal B

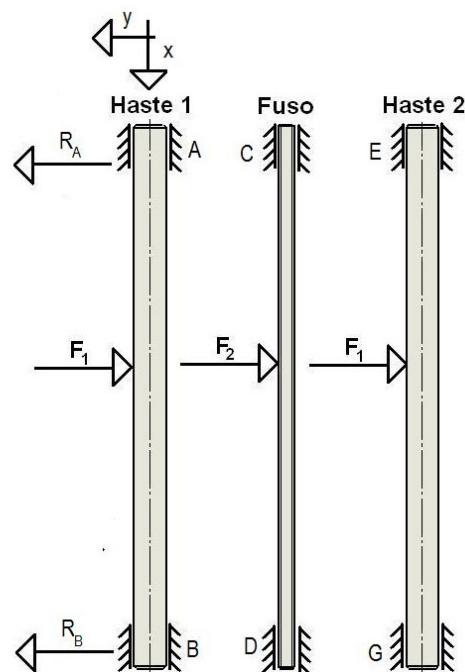


Figura 13 - Representação esquemática das guias

A equação diferencial da viga Haste 1 é:

¹ Estão apenas representadas nesta figura as reações nos mancais A e B, mas pode-se fazer para R_C e R_G , por exemplo.

$$EIv'''' = -q = 0 \quad (19)$$

$$EIv''' = C_1 \quad (20)$$

$$EIv'' = C_1 \cdot x + C_2 \quad (21)$$

$$EIv' = \frac{C_1 \cdot x^2}{2} + C_2 \cdot x + C_3 \quad (22)$$

$$EIv = \frac{C_1 \cdot x^3}{6} + \frac{C_2 \cdot x^2}{2} + C_3 \cdot x + C_4 \quad (23)$$

E: Módulo de elasticidade

I: Momento de inércia no eixo x

v: Função na variável x da deflexão da viga em y

V: força cortante

M: momento fletor

δ : deflexão da viga em y em um determinado ponto x

x: abscissa representada na figura 7

y: coordenada representada na figura 7

C: constantes de integração

q: carregamento distribuído

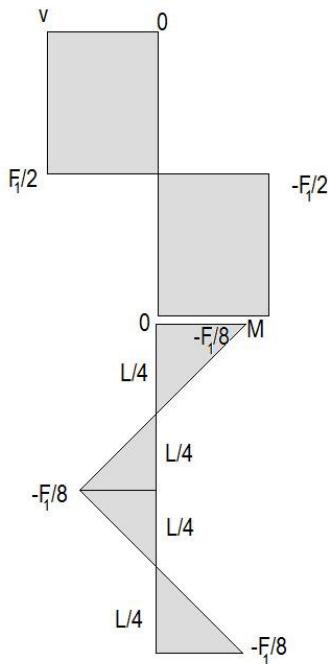


Figura 14 – Diagramas de força cortante e momento fletor

Com o auxílio dos diagramas da figura 8, tem-se:

$$EIv''' = V = \frac{F_1}{2} \quad (24)$$

$$EIv'' = M = -MA \text{ em } x=0 \quad (25)$$

$$M_A = M_B = \frac{F_1 \cdot L}{8} \quad (26)$$

Utilizando as equações anteriores, pode-se achar as constantes de integração:

$$C_1 = \frac{F_1}{2} \quad C_2 = -\frac{F_1 \cdot L}{8} \quad C_3 = 0 \quad C_4 = 0 \quad (27)$$

Logo, a deflexão da haste 1 é:

$$v = -\frac{F_1 \cdot x^2 \cdot (3 \cdot L - 4 \cdot x)}{48EI_1} \Rightarrow \delta_{\max} = \frac{F_1 \cdot L^3}{192EI_1} \quad (28)$$

Considera-se um modelo onde as três vigas tem a mesma deflexão e portanto:

$$\delta_{\max,1} = \delta_{\max,2} \Leftrightarrow \frac{F_1 \cdot L^3}{192EI_1} = \frac{F_2 \cdot L^3}{192EI_2} \Leftrightarrow F_2 = F_1 \cdot \frac{I_2}{I_1} \Leftrightarrow F_2 = F_1 \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \quad (29)$$

$$F_2 = F_1 \cdot \left(\frac{18}{22} \right)^4 \Leftrightarrow F_2 = 0,448F_1 \quad (30)$$

Considerando a força de fresamento de 5,4N:

$$F = 2F_1 + F_2 \Leftrightarrow \begin{cases} 5,4 = 2F_1 + 0,448F_1 \Leftrightarrow F_1 = 2,2N \\ F_2 = 1N \end{cases} \quad (31)$$

Com isso e com o auxílio da figura 8, sabe-se que a metade da viga é o ponto mais solicitado. Analisando a seção transversal da viga, sabe-se que na região da linha neutra ocorre cisalhamento máximo e onde $y=d/2$ ou $y=-d/2$ ocorre tensão normal máxima.

A deflexão máxima neste caso é, portanto:

$$\delta_{\max} = \frac{F_1 \cdot L^3}{192EI_1} = \frac{2,2 \cdot 500^3}{192 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot 22^4 / 64} \Rightarrow \delta_{\max} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (32)$$

É importante notar que a deflexão causada pelo fresamento não afeta muito a precisão do equipamento.

Calcula-se agora a resistência a flexão dos fusos e hastas:

$$\sigma = -\frac{M \cdot y}{I} = -\frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3} \quad (33)$$

$$\tau_{\max \text{imo}} = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} = \frac{4 \cdot V}{3 \cdot A} \quad (34)$$

Efetuando o cálculo anterior no fuso, obtém-se $\sigma = -8,3 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$ e $\tau_{\max \text{imo}} = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$. Analogamente para as hastes: $\sigma = -1 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$ e $\tau_{\max \text{imo}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$. Tais valores estão bem distantes do limite de escoamento (em torno de 340 MPa) o que aprova seu uso no equipamento.

14. FLEXÃO DO EIXO Z

É importante também calcular quanto o eixo z pode fletir devido a uma força de usinagem. Nesta seção deverá ser obtido um momento de inércia mínimo para uma deflexão de 0,1mm, pois a partir deste resultado será utilizado a viga que é facilmente disponível nas lojas de recicláveis.

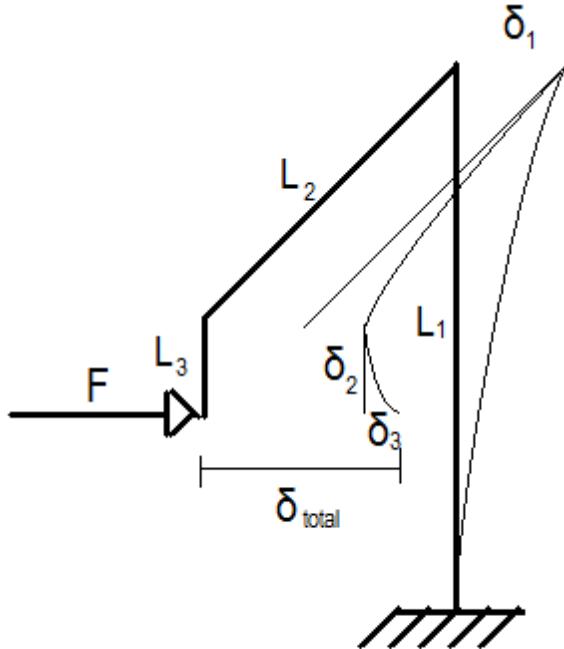


Figura 15 – Modelo da estrutura do eixo z

Utilizando a equação diferencial das vigas:

$$EIv'''' = -q = 0 \quad (35)$$

$$EIv''' = C_1 \quad (36)$$

$$EIv'' = C_1 \cdot x + C_2 \quad (37)$$

$$EIv' = \frac{C_1 \cdot x^2}{2} + C_2 \cdot x + C_3 \quad (38)$$

$$EIv = \frac{C_1 \cdot x^3}{6} + \frac{C_2 \cdot x^2}{2} + C_3 \cdot x + C_4 \quad (39)$$

A viga 1 será fletida devido a força F em x e um momento FxL₃ em y.

$$EIv''' = V = F \quad (40)$$

$$EIv'' = M = -F \cdot L_3 \text{ em } x = L_3 \quad (41)$$

$$EIv' = 0 \text{ e } EIv = 0 \text{ em } x = 0 \quad (42)$$

Manipulando as equações anteriores e com a exigência de $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ser menor do que 0,04mm, temos que:

$$EI \cdot \delta_1 = \frac{F \cdot L_1^3}{6} - \frac{(FL_3 + FL_1) \cdot L_1^2}{2} \Rightarrow I_1 = 2,22 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad (43)$$

Esse momento de inércia equivale a um tubo com um milímetro de parede e 30mm de diâmetro.

Para a viga 2 que sofre torção de $F \times L_3$ e Flexão de F e a viga 3 Flexão de F. Analogamente:

$$EI \cdot \delta_2 = \frac{F \cdot L_2^3}{6} - \frac{(FL_2) \cdot L_2^2}{2} \Rightarrow I_2 = 5,37 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 \quad (44)$$

$$EI \cdot \delta_3 = \frac{F \cdot L_3^3}{6} - \frac{(FL_3) \cdot L_3^2}{2} \Rightarrow I_3 = 1,59 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 \quad (45)$$

Após os cálculos anteriores, pôde-se ter uma idéia do momento de inércia necessário do material a ser comprado em ferro velho ou em outros lugares disponíveis. A figura seguinte ilustra a construção do eixo z com os materiais encontrados.

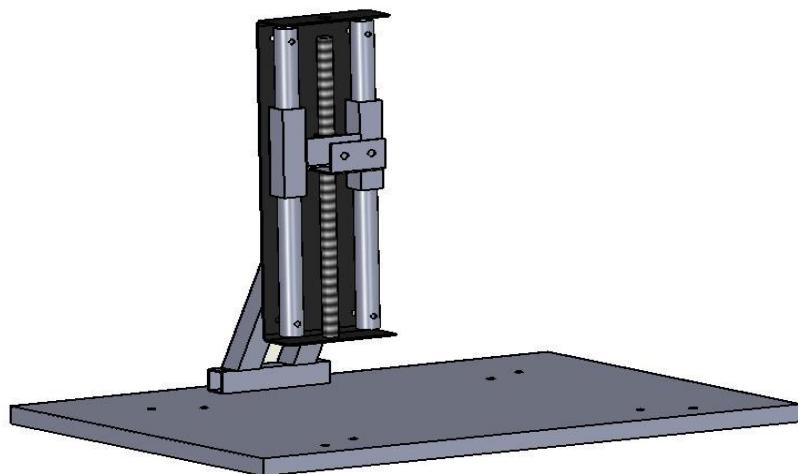


Figura 16 - Modelo em CAD do eixo z construído

A forma construtiva da figura anterior possui uma geometria muito complexa onde seu dimensionamento através das equações de mecânica dos sólidos seriam muito complexas.

Como solução a este problema foi feito uma análise simplificada em elementos finitos do eixo z, levando-se em conta o peso da estrutura com spindle e forças de usinagem para saber a deflexão desta estrutura. A análise a seguir possui unidades expressas em milímetros.

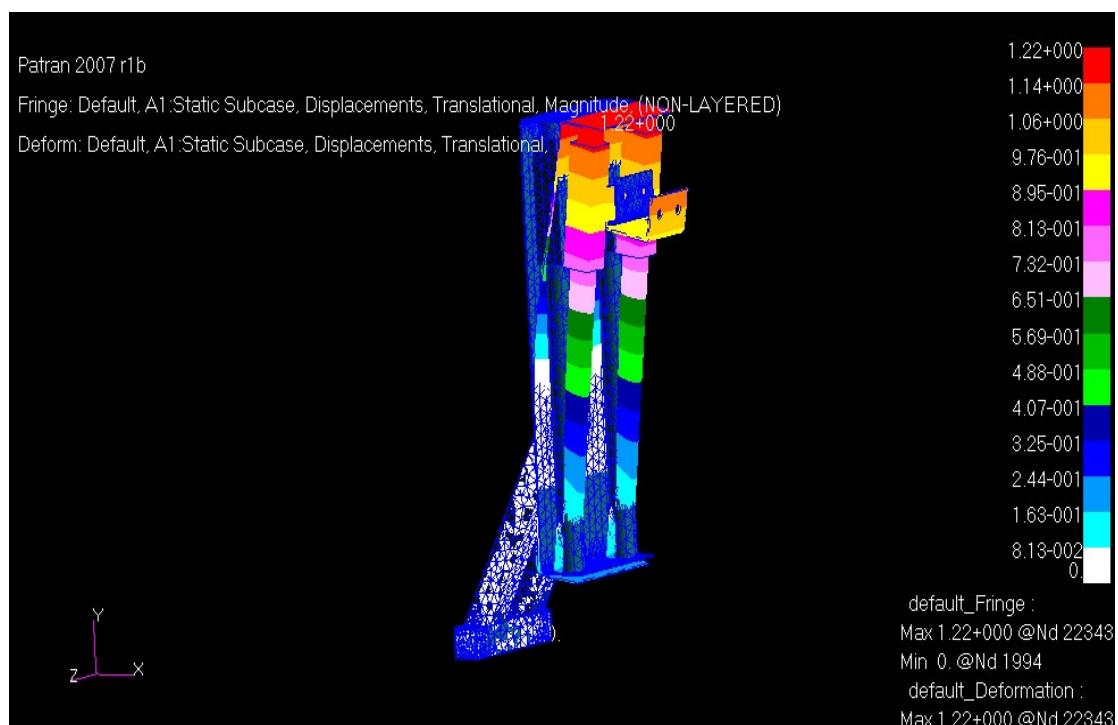


Figura 17 - Análise elástico linear do eixo z

O resultado da simulação mostra que a deflexão máxima gira em torno de um milímetro. Apesar de não ser muito grande, já pode apresentar complicações na usinagem e por isso pensou-se em mais um reforço para esta estrutura.

15. PROBLEMA DO ALINHAMENTO DAS GUIAS LINEARES

Como forma de solucionar o problema das guias lineares na construção do protótipo foi feito furos nos tubos-guias e furos maiores na chapa-base. Assim o parafuso que passa entre eles pode ser reposicionado sempre que possível.

Um paquímetro como o mostrado na figura pode medir os dois extremos da barra e verificar o paralelismo entre as guias.



Figura 18 - Solução de desalinhamento das barras

16. PROTÓTIPO

O Protótipo de uma maneira geral não funcionou satisfatoriamente, porém vários pontos puderam ser analisados:

- Guias lineares inovadoras são uma boa idéia, porém necessitam de aperfeiçoamento uma vez que elas enferrujam e o uso de graxas traz o problema de acúmulo de poeira
- Eixo z possuía deflexão maior do que o calculado uma vez que a chapa não apresentava engastamento perfeito por ser muito fina.
- Barras rosadas até podem servir como fuso de movimentação, porém são muito imperfeitas e movimentam com muita lentidão no sentido longitudinal
- A idéia de parafusos para melhorar o alinhamento das barras foi muito boa por poderem ser ajustadas sempre que necessário.

A foto a seguir ilustra a construção do protótipo.



Figura 19 - Protótipo construído

17. CUSTOS

Os custos para o protótipo foram cerca de R\$400,00 como mostra a tabela a seguir, porém imaginamos que o custo para uma produção seriada tenha redução de mais de 50% atingindo o valor de U\$100,00 aproximadamente.

Tabela 3 – Custos para o Protótipo

ESTRUTURA / MECÂNICA:			
	CUSTO PARA PROTÓTIPO		
DESCRIÇÃO	PREÇO/UNID	QUANT	TOTAL
MICRO RETÍFICA	R\$ 35	1	R\$ 35
TUBOS PARA GUIAS	R\$ 0,50	48	R\$ 24
EIXOS PARA GUIAS	R\$ 5	6	R\$ 30
MESA	R\$ 20	1	R\$ 20
SUPORTE PARA MESA	R\$ 30	1	R\$ 30
SUPORTE DO SPINDLE	R\$ 10	1	R\$ 10
ESTRUTURA DA MÁQUINA	R\$ 30	1	R\$ 30
SOLDAGEM DA ESTRUTURA			R\$ 0
BARRAS ROSCADAS (M4)	R\$ 5	3	R\$ 15
PARAFUSOS M3, M4 E M5	R\$ 0,25	30	R\$ 7,5
TOTAL			R\$ 201,50
ELETRO-ELETRÔNICA:			
	CUSTO PARA PROTÓTIPO		
DESCRIÇÃO	PREÇO/UNID	QUANT	TOTAL
Microcontrolador PIC16F877A	R\$ 17,00	1	R\$ 17,00
CI MAX232	R\$ 2,50	1	R\$ 2,50
Regulador de tensão LM7805	R\$ 1,00	1	R\$ 1,00
Micro motor de passo	R\$ 30,00	4	R\$120,00
Micro driver para motor de passo (c/ UNL2803)	R\$ 8,00	4	R\$ 32,00
Leds, resistores, diodos, capacitores e fios	R\$ 10,00	1	R\$ 10,00
Micro chaves (para fim de curso)	R\$ 1,50	3	R\$ 4,50
TOTAL			R\$187,00
TOTAL GERAL			R\$388,50

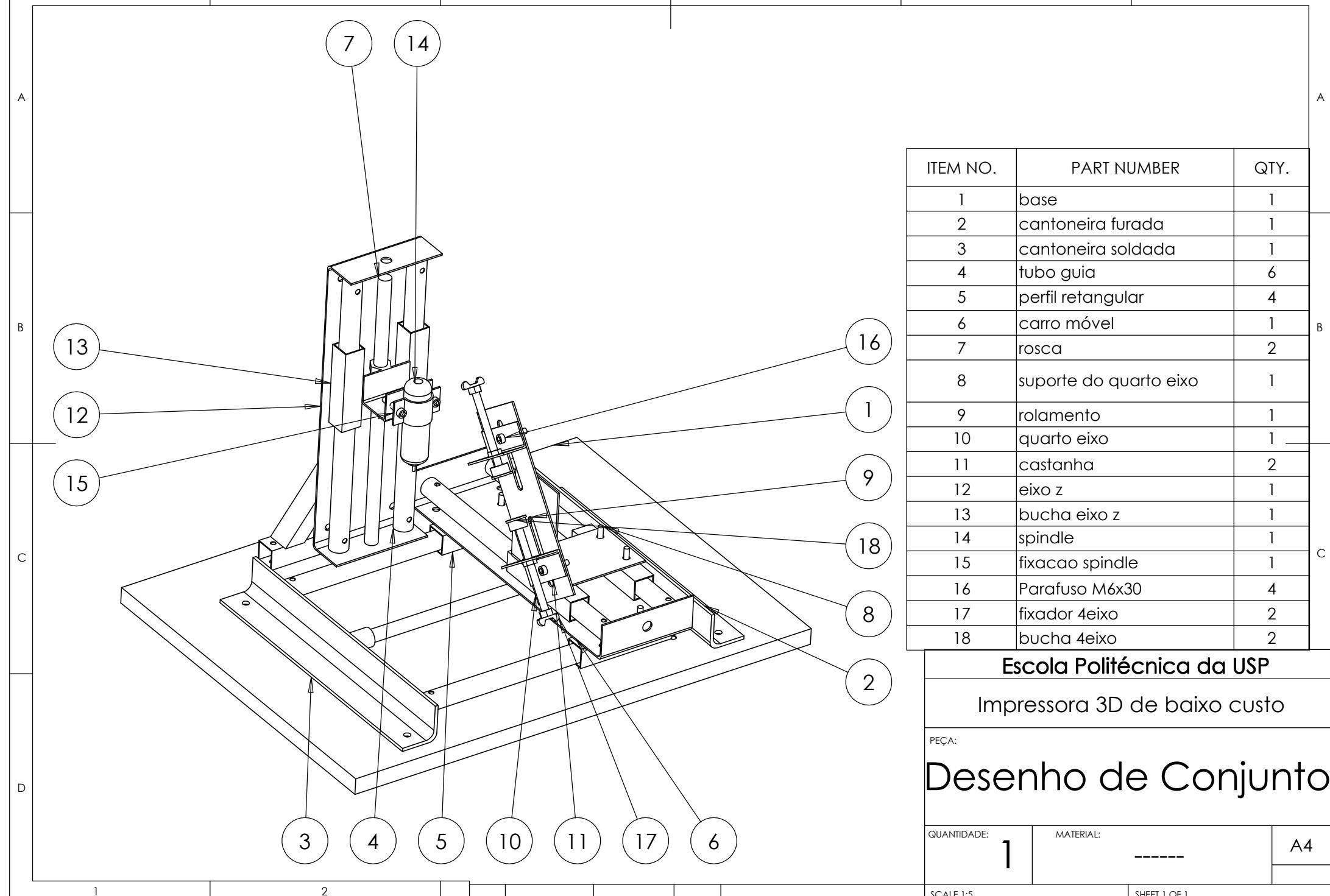
18. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é projetar e construir um protótipo de um produto diferenciado não existente no mercado.

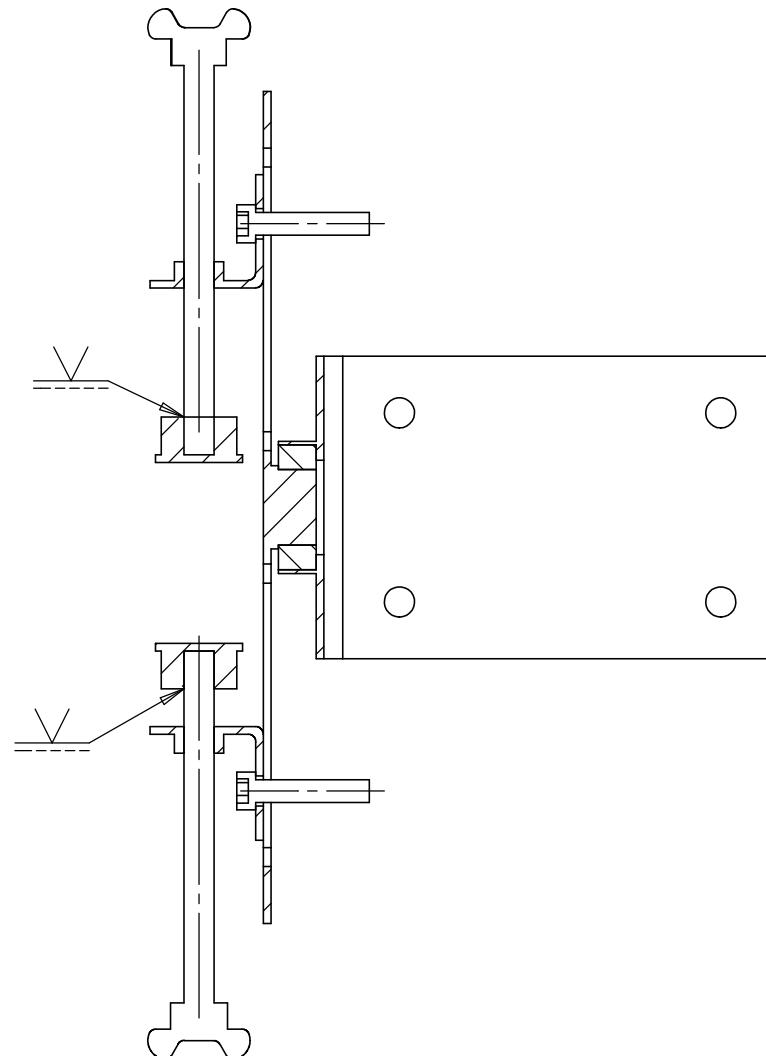
Houve o problema de atraso na parte eletrônica e não pôde-se concluir este projeto como um único documento, porém pode-se validar diversos parâmetros mostrados no seção 16 – Protótipo.

Além disso, conseguiu-se construir uma máquina que pode chegar a um preço de U\$100,00, sendo extremamente apelativa comercialmente e acessível a qualquer pessoa física e jurídica.

19. ANEXOS I - DESENHOS DE FABRICAÇÃO



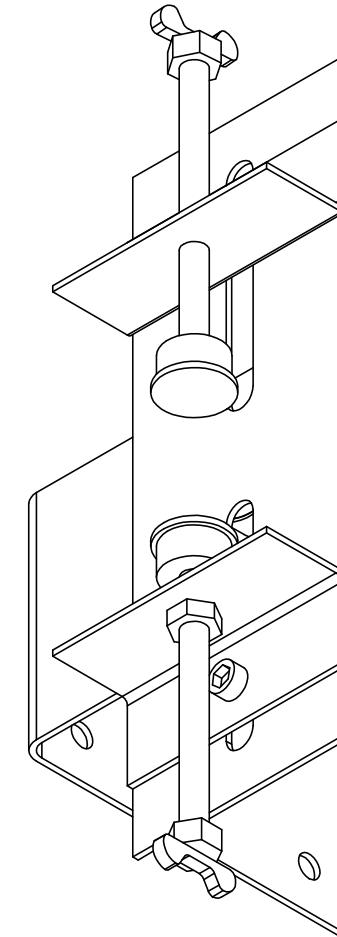
A



B

C

D



Escola Politécnica da USP
Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

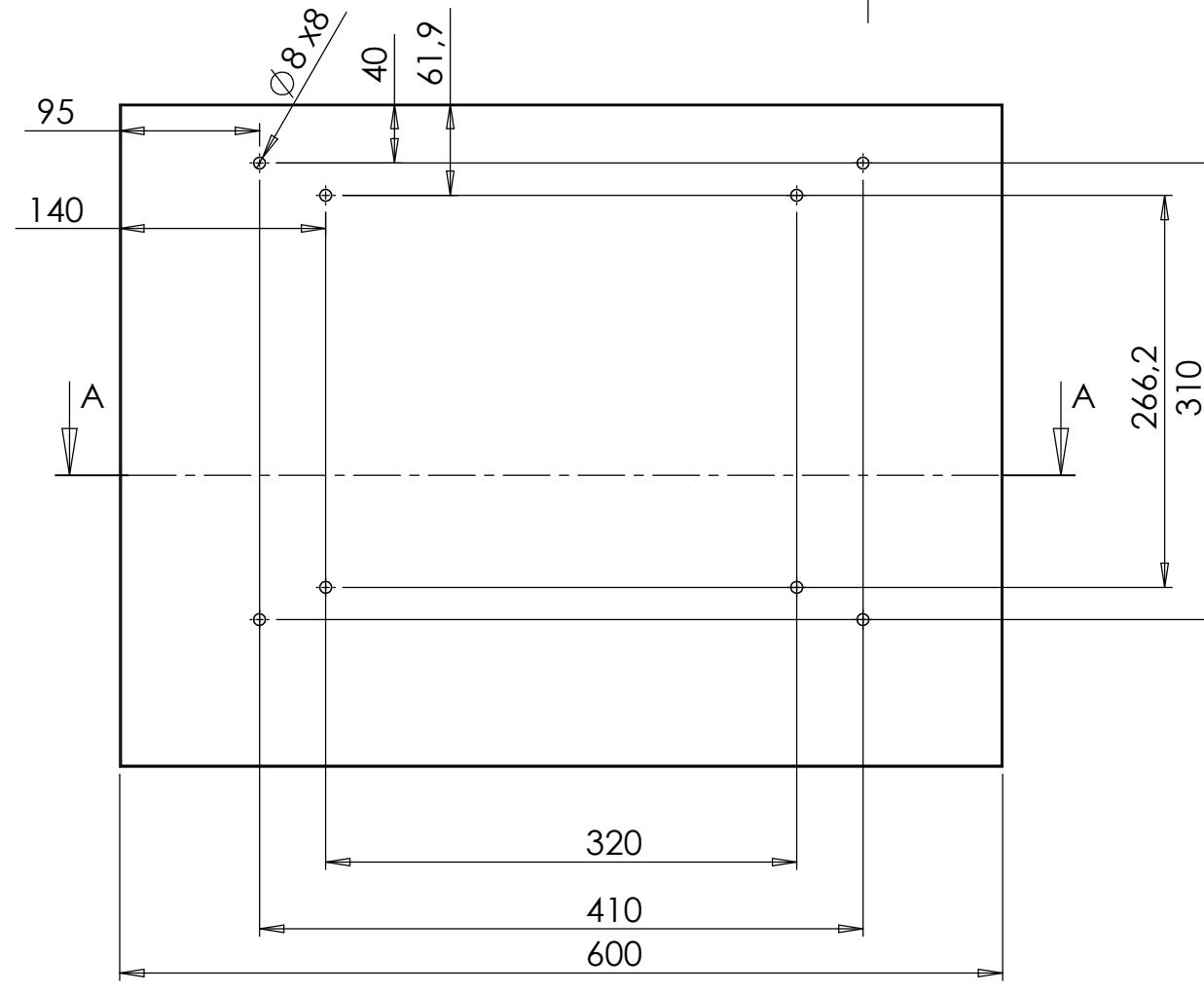
Quarto eixo

QUANTIDADE:

1

MATERIAL:

----**A4**



SEÇÃO A-A

1

Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

BASE

QUANTIDADE:

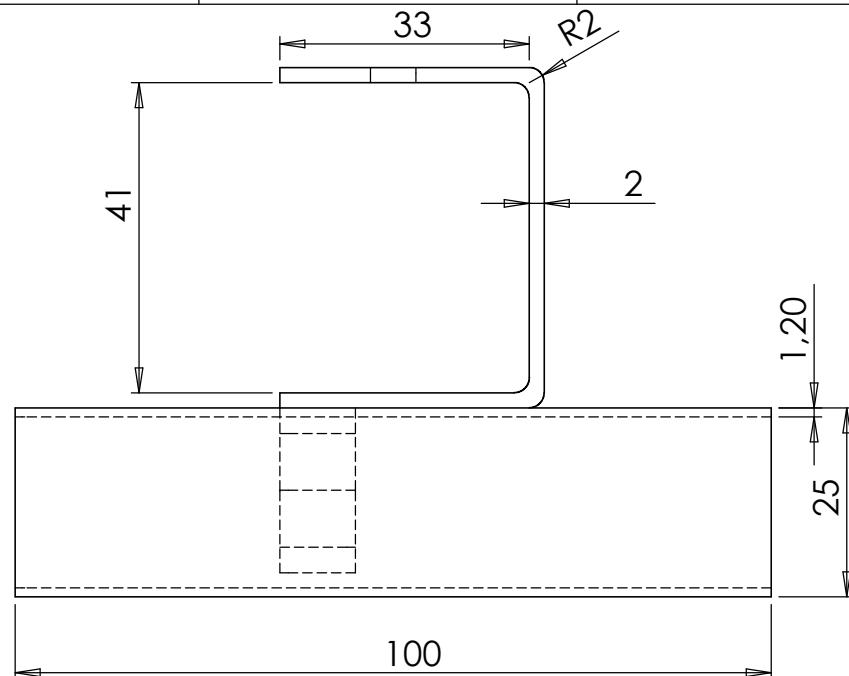
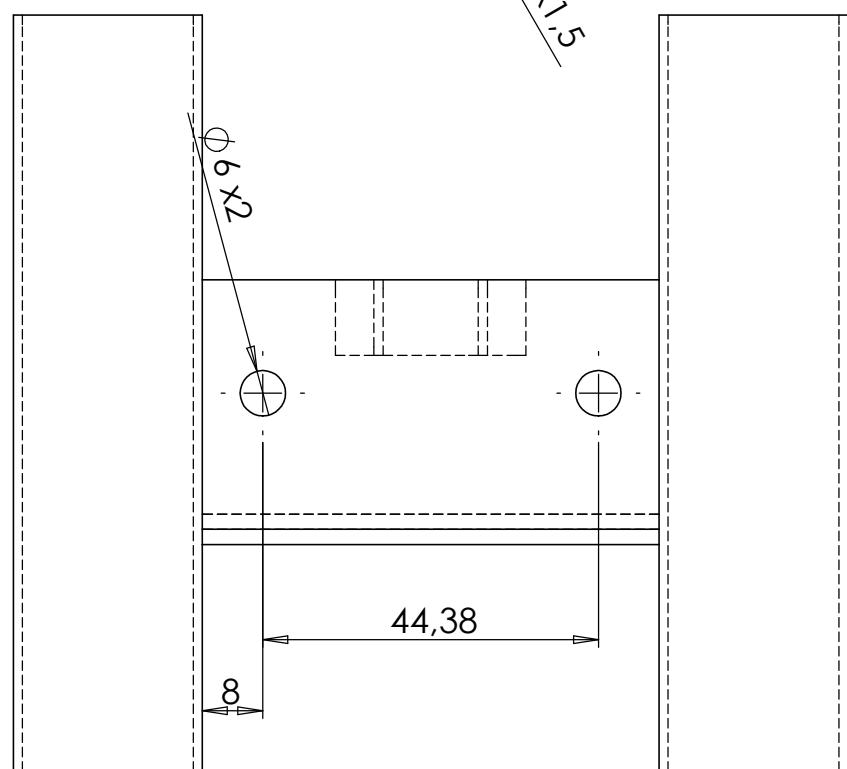
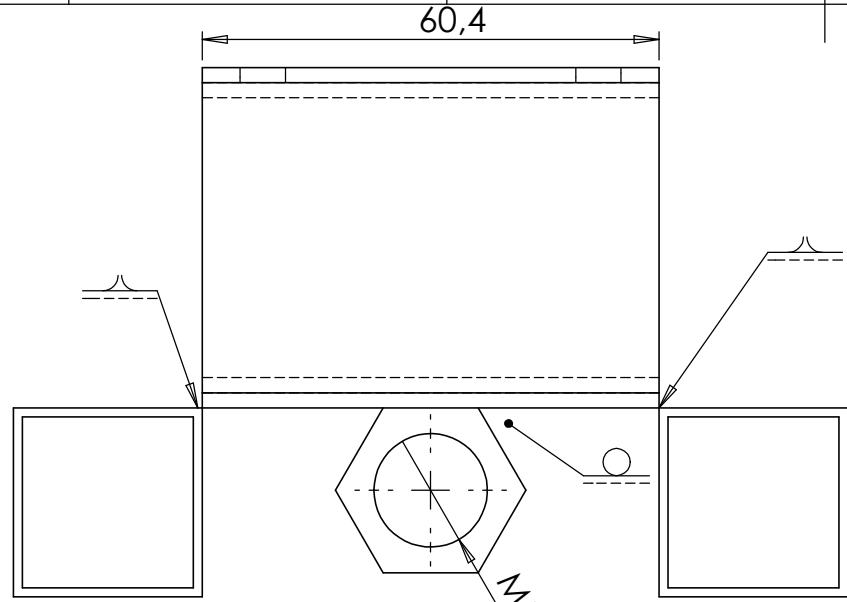
1

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

A4

1 2 3 4 5 6



Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

Bucha eixo z

QUANTIDADE:

1

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

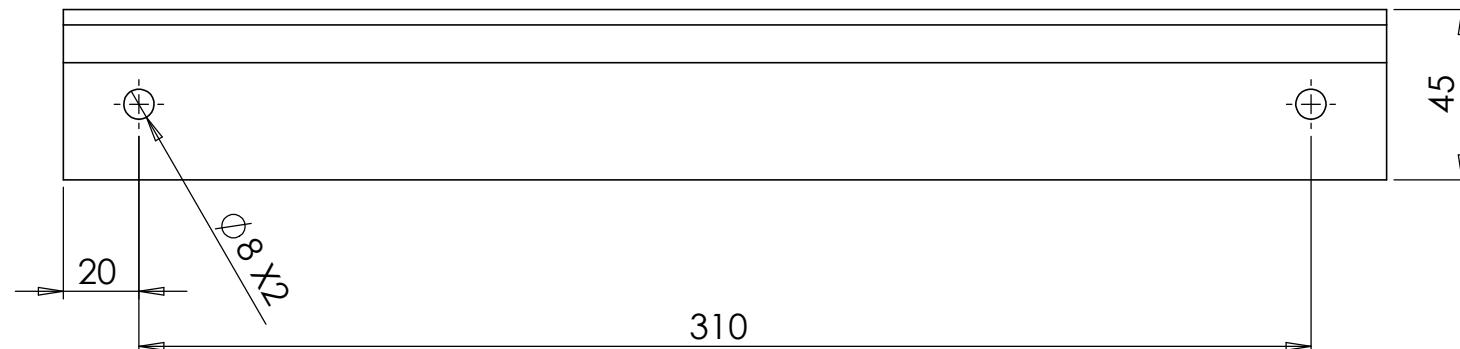
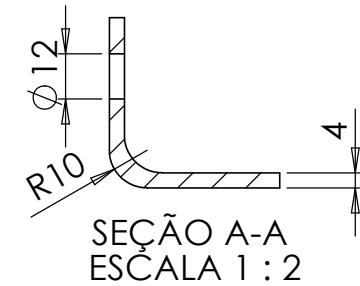
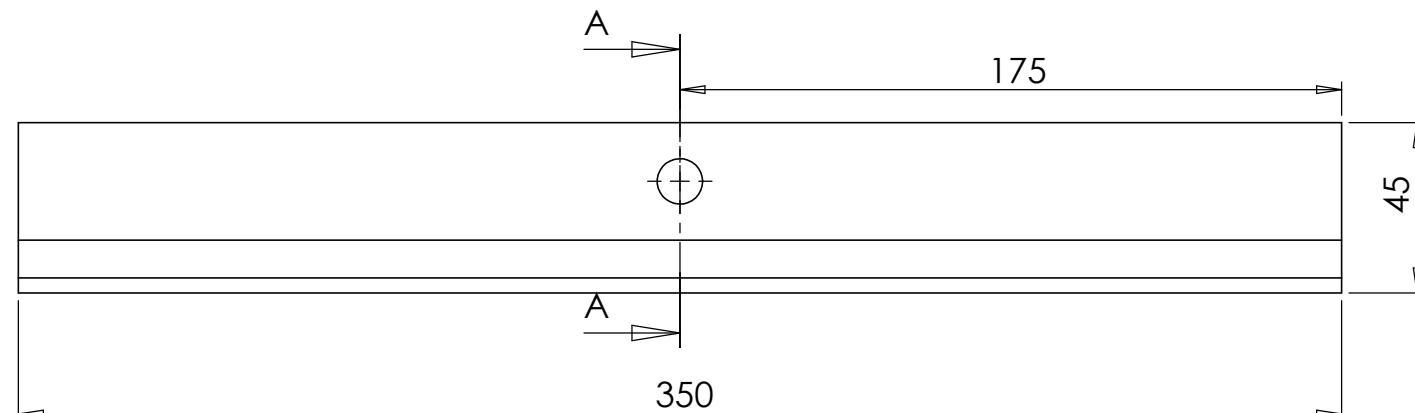
A4

1 2 3 4 5 6

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

1 2 3 4 5 6



Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

CANTONEIRA FURADA

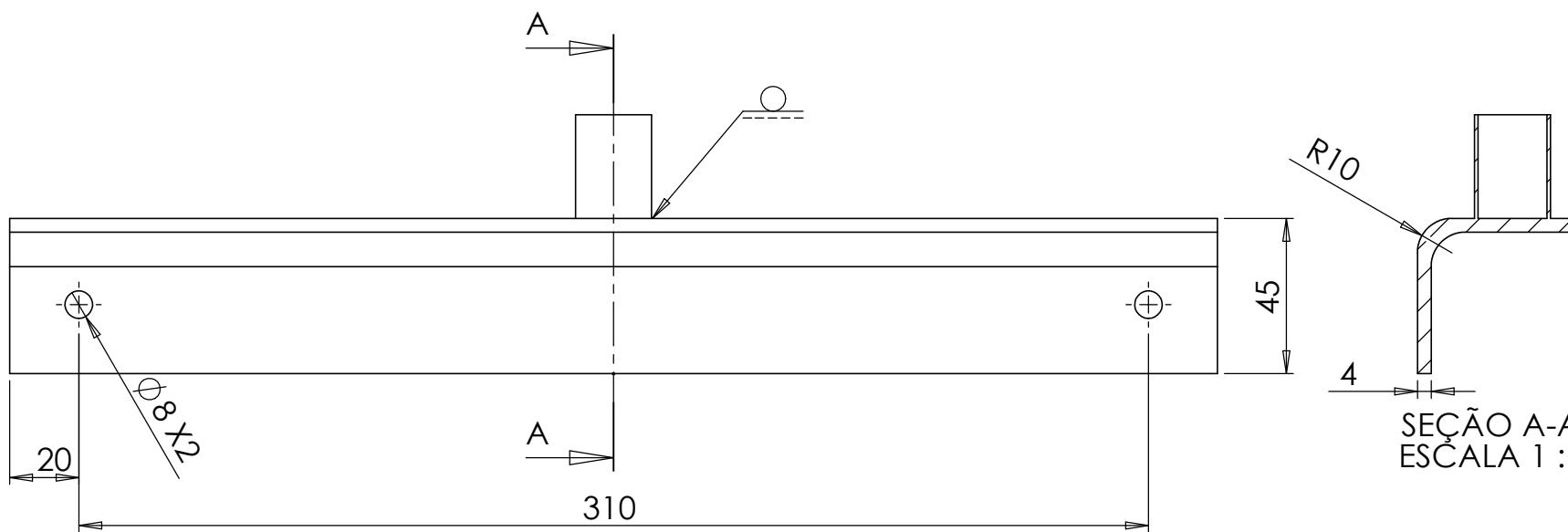
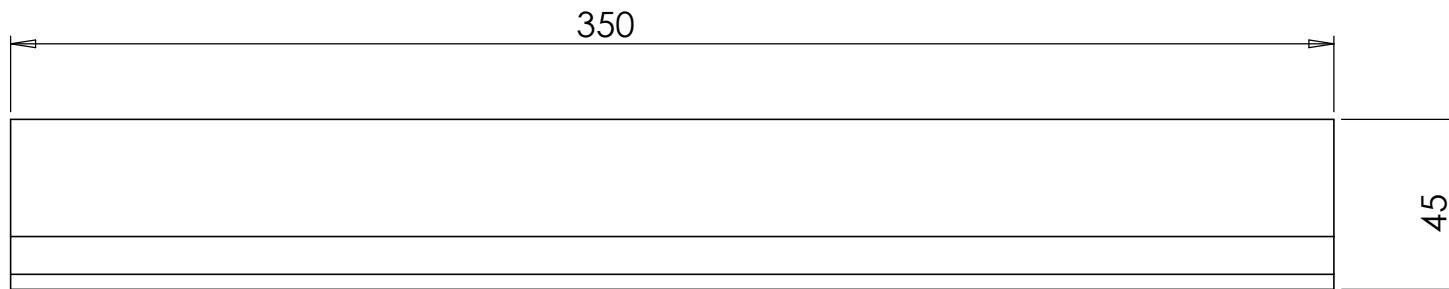
QUANTIDADE:

1

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

A4



Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

CANTONEIRA SOLDADA

QUANTIDADE:

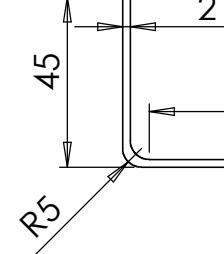
1

MATERIAL:

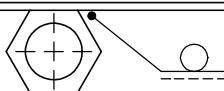
AÇO SAE 1020

A4

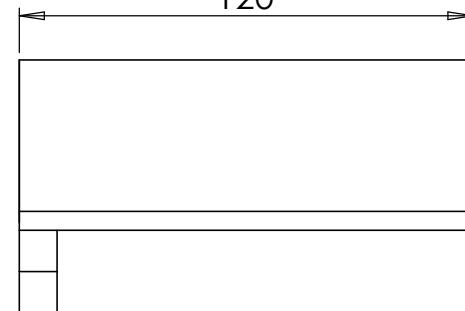
1 2 3 4 5 6



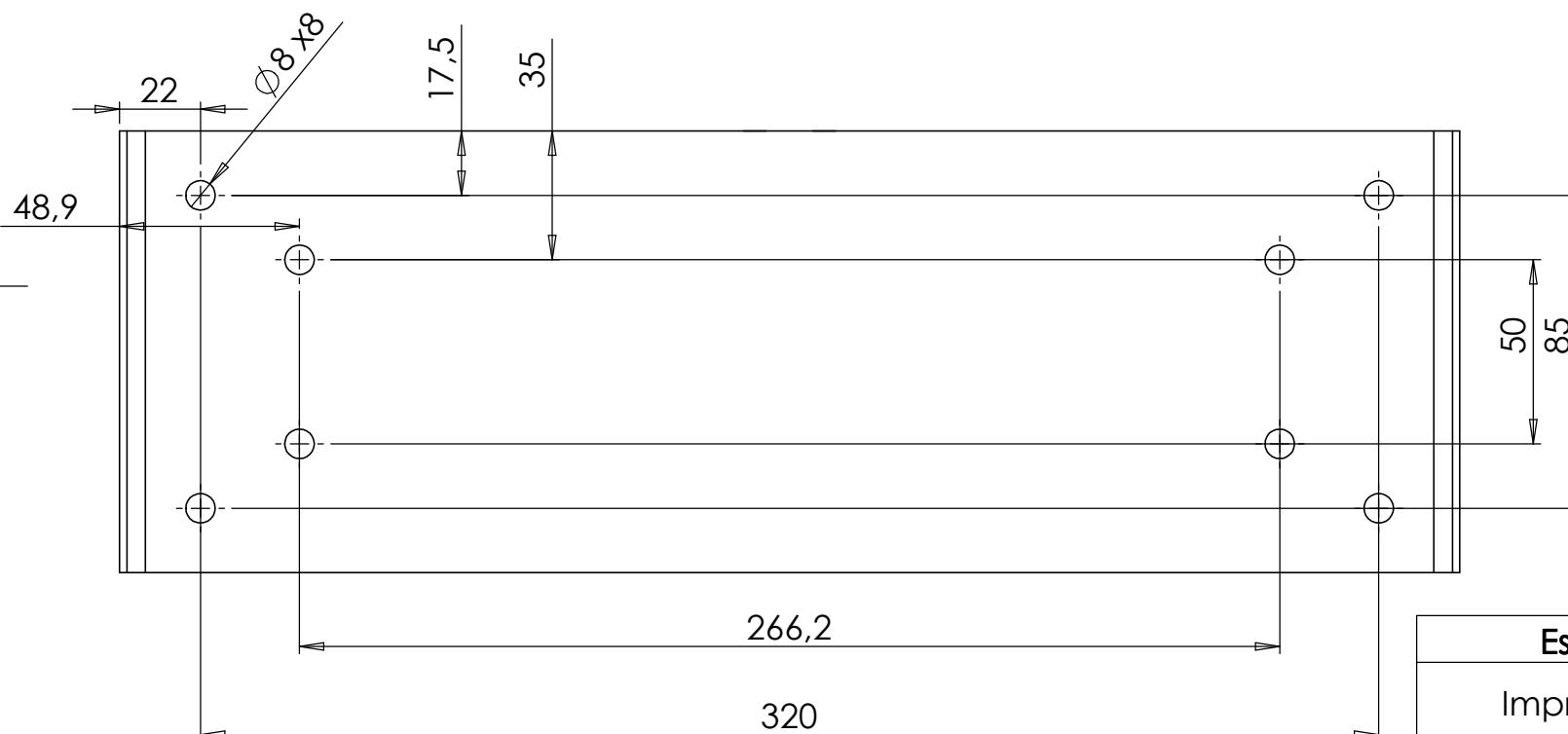
350



120



A B C D



Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

Carro móvel

QUANTIDADE:

1

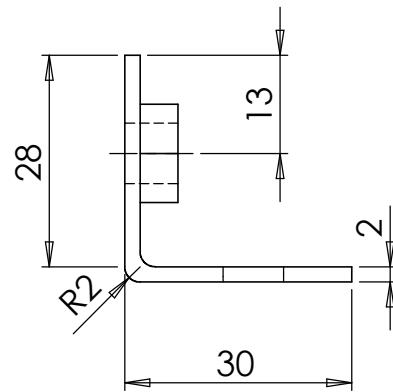
MATERIAL:

AÇO SAE 1020

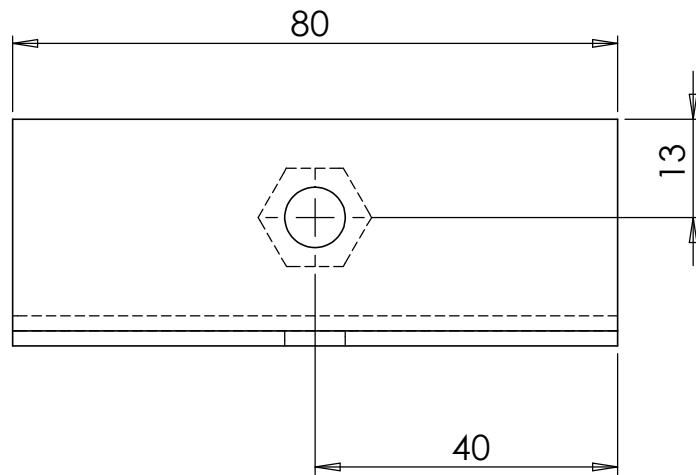
A4

1 2 3 4 5 6

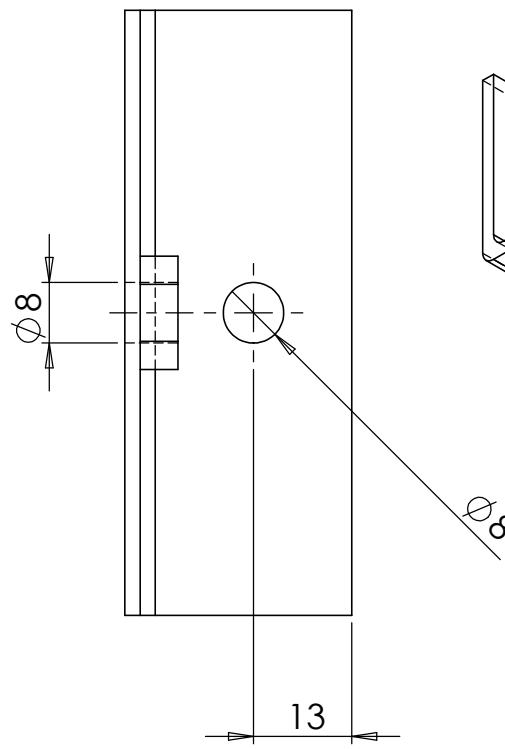
A



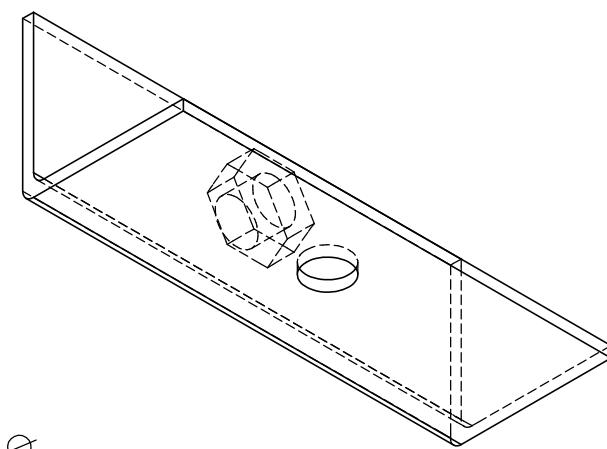
B



A



C



D

Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

CASTANHA DO QUARTO EIXO

QUANTIDADE:

2

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

A4

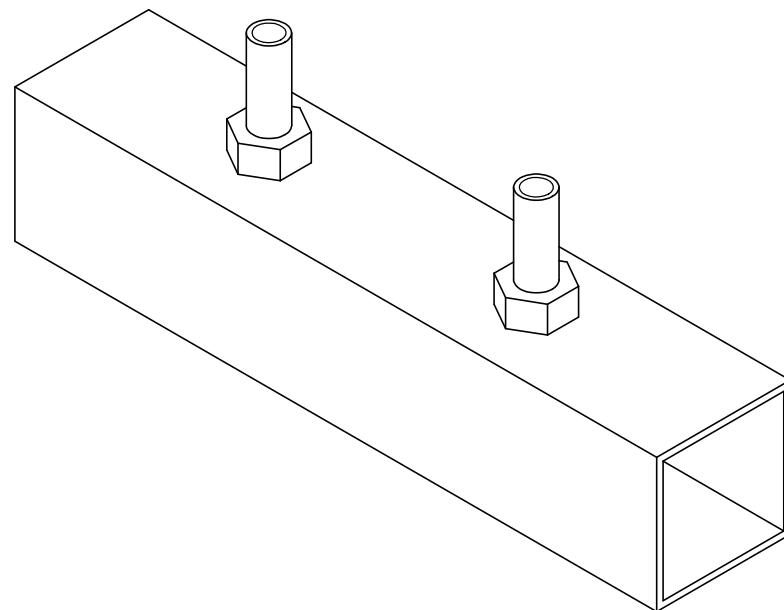
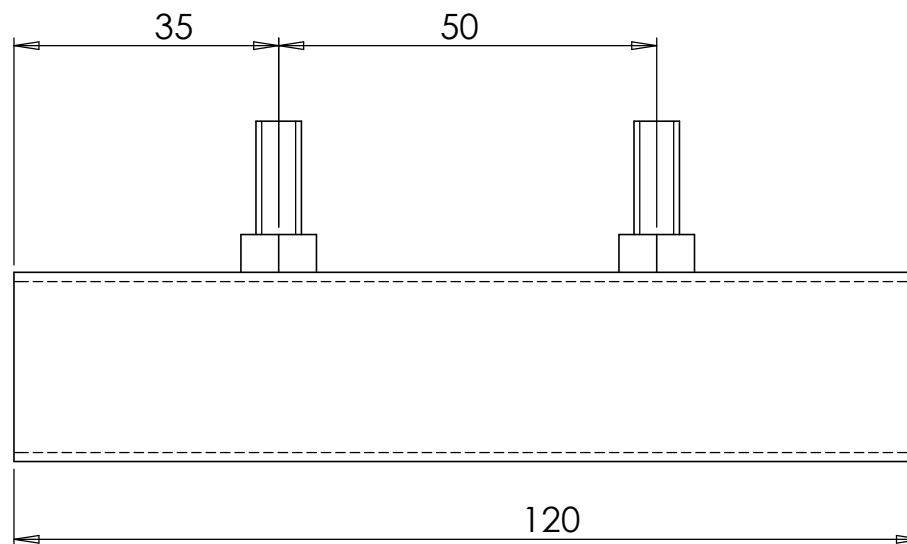
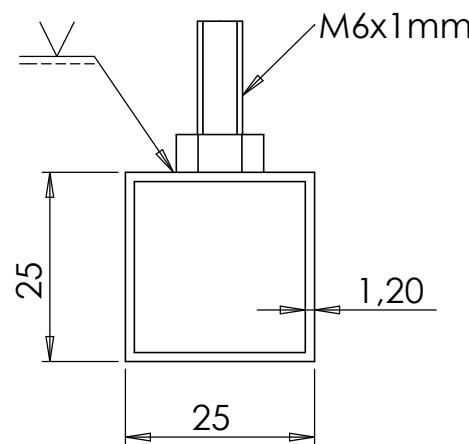
1

2

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

1 2 3 4 5 6



Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

PARTE DA GUIA LINEAR

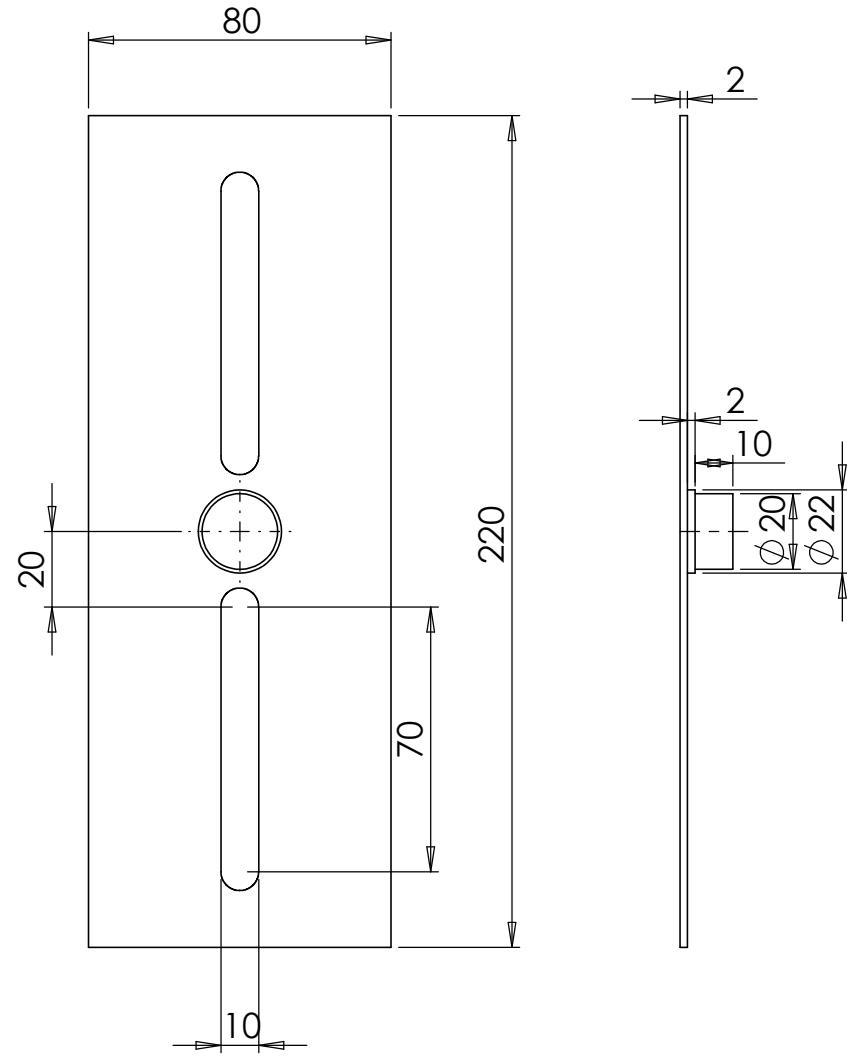
QUANTIDADE:

4

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

A4



Se for torneado pode-se deixar o flange redondo, desde que atenda às dimensões do rasgo. Caso contrário, haverá problemas de centralização da peça.

Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

QUARTO EIXO

QUANTIDADE:

1

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

A4

1

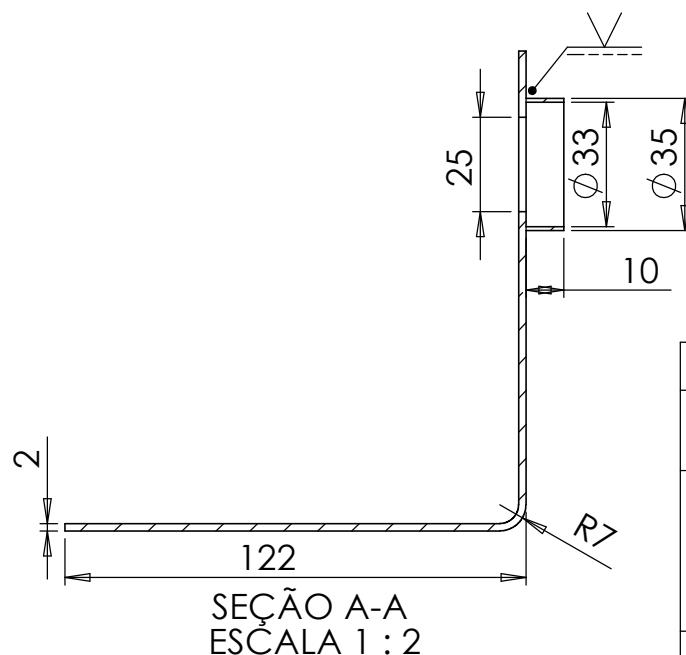
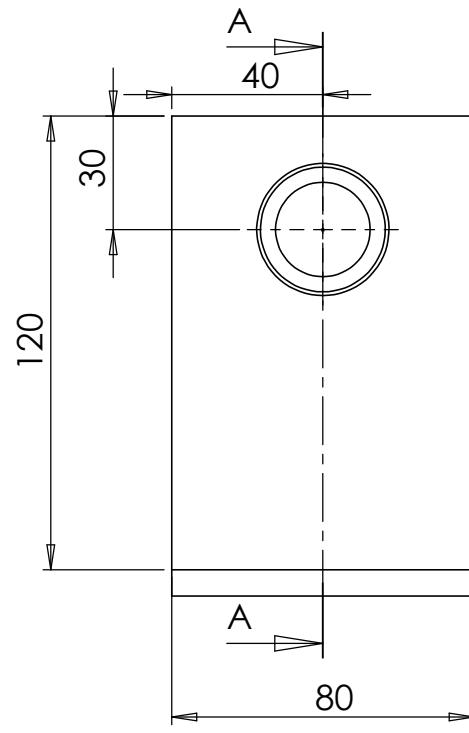
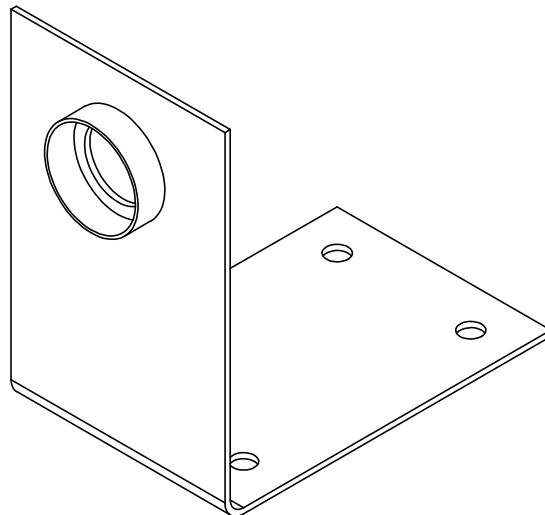
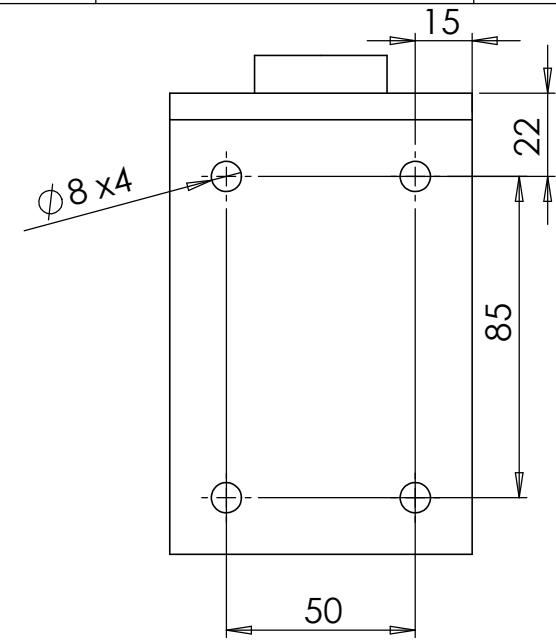
2

3

4

5

6



Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

Suporte do quarto eixo

QUANTIDADE:

1

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

A4

A

A

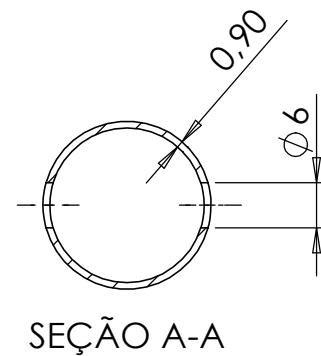
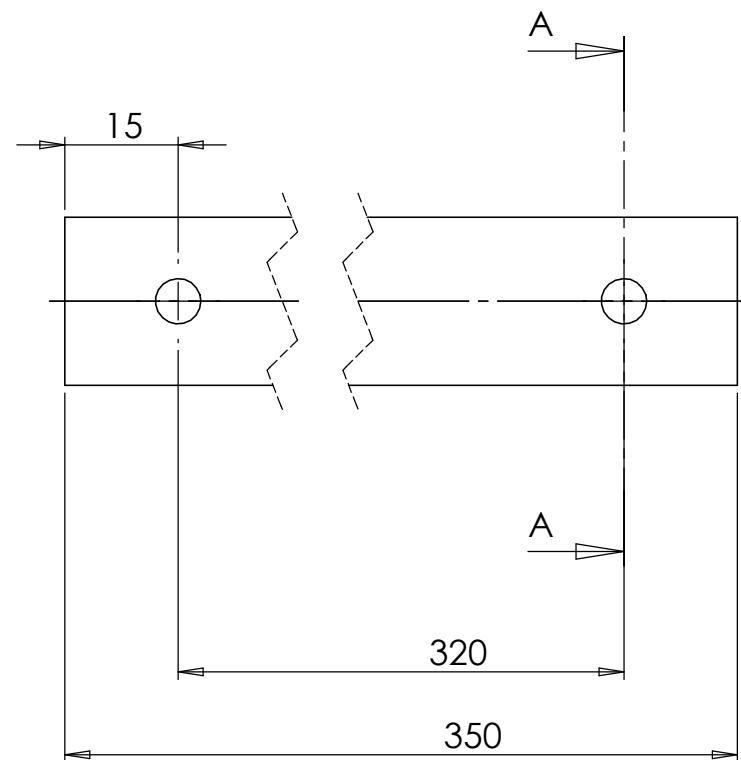
B

B

C

C

D



Escola Politécnica da USP

Impressora 3D de baixo custo

PEÇA:

TUBO GUIA

QUANTIDADE:

6

MATERIAL:

AÇO SAE 1020

A4