

Breno Martins Braga — NUSP 12556288  
Constanza Maria Reis da Silva Mariano — NUSP 11257884  
Douglas Oliveira de Carvalho — NUSP 14637740  
Fernanda Quelho Kaiser Saliba Andrade — NUSP 11258162  
Gabriel Morth Cursino NUSP — 12553250  
Gabriel Silva de Carvalho – NUSP 12730737  
Hassan Mohamad Vilela — NUSP 11257904  
Jhonatan Ribeiro dos Santos — NUSP 12554477  
Mario Lourenço Fernandes — NUSP 11807730  
Soitiro Oura — NUSP 12554265  
Vinícios de Andrade Cardozo — NUSP 12554290

## **Projeto de Máquinas: Torno CNC**

PMR3411 - Projeto de Máquinas  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

17 de novembro, 2024

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Curva de torque do motor de passo KTC-HT23-400 (CATÁLOGO MOTORES DE PASSO KALATEC..., s.d.). . . . .	3
Figura 2 – Representação gráfica do cálculo de volume de trabalho. Fonte: Autor. . . . .	7
Figura 3 – Tabela de velocidade de corte para o torno (m/min). . . . .	12
Figura 4 – Avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça. . . . .	13
Figura 5 – Modelos de viga esbelta com massa central. Fonte: (BLEVINS, 2001) . . . . .	14
Figura 6 – Esboço manual da primeira solução. Fonte: Autor. . . . .	16
Figura 7 – Esboço manual da segunda solução. Fonte: Autor. . . . .	17
Figura 8 – Esboço da terceira solução. Fonte: Autor. . . . .	18

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Correlação entre Massa Móvel, Torque e Velocidade Angular . . . . .	10
--	----

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Subgrupos</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES DE MÁQUINA</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>Eixo árvore</b>	<b>2</b>
2.2.1	Potência	2
2.2.2	Rotação	3
<b>2.3</b>	<b>Especificações Elétricas</b>	<b>4</b>
2.3.1	Tensão e Corrente	4
2.3.2	Controlador	4
2.3.3	Resolução	4
2.3.4	Avanço rápido	5
2.3.5	Driver e Motor de Passo	5
<b>2.4</b>	<b>Precisão e Acurácia</b>	<b>5</b>
<b>2.5</b>	<b>Dimensões e Peso da Máquina</b>	<b>5</b>
<b>2.6</b>	<b>Cursos e velocidades dos eixos</b>	<b>7</b>
2.6.1	Cursos dos Eixos	7
<b>2.7</b>	<b>Volume de trabalho</b>	<b>7</b>
2.7.1	Velocidades dos Eixos	8
<b>2.8</b>	<b>Frequência Crítica do Laço Estrutural</b>	<b>11</b>
<b>2.9</b>	<b>Tipo de sincronização entre os eixos</b>	<b>11</b>
<b>2.10</b>	<b>Parâmetros de usinagem</b>	<b>11</b>
2.10.1	Velocidade de corte	11
2.10.2	Avanço de corte	13
<b>3</b>	<b>ESTUDO DAS SOLUÇÕES</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Parâmetros avaliados</b>	<b>14</b>
3.1.1	Ergonomia	14
3.1.2	Frequência Natural das Soluções	14
3.1.3	Rigidez (Loop Estrutural)	16
<b>3.2</b>	<b>Solução 1</b>	<b>16</b>
3.2.1	Peso	16
<b>3.3</b>	<b>Solução 2</b>	<b>17</b>
3.3.1	Peso	18
<b>3.4</b>	<b>Solução 3</b>	<b>18</b>

3.4.1	Peso . . . . .	18
4	<b>PRÓXIMOS PASSOS . . . . .</b>	<b>20</b>
	Referências . . . . .	21
5	<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>22</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Subgrupos

Para obter uma otimização na organização do projeto, e garantir uma divisão justa e igual para todos os membros, o grupo se dividiu em subgrupos, cada um responsável por uma parte importante do projeto. É importante ressaltar que os membros da equipe são responsáveis por ajudar em todas as partes do trabalho, não somente o subgrupo em que está inserido, de forma que seja possível uma boa comunicação entre os times. A divisão dos subgrupos escolhida foi a seguinte:

- **Gerência:** a gerente do grupo é responsável por garantir uma boa organização do trabalho como um todo, além de verificar se todos os membros do grupo estão participando do projeto.
- **Mecânica:** este subgrupo tem como função garantir o bom funcionamento da parte estrutural da máquina: desde o esboço inicial, passando pela escolha de materiais, até a montagem do protótipo.
- **Eletrônica:** esta equipe cuida de todos os componentes elétricos do torno, suas conexões e seu bom funcionamento.
- **Programação:** Este time deve realizar a parte da lógica de funcionamento e do código Linux CNC da máquina.

É notável que todos os subgrupos devem se comunicar entre si para o bom funcionamento do projeto, e é claro, trabalhar em conjunto para que a máquina funcione da maneira desejada.

## 2 Especificações de máquina

Neste capítulo, são apresentados os materiais escolhidos e as especificações da máquina, como por exemplo o volume de trabalho, a precisão e a velocidade de usinagem, parâmetros essenciais para a compreensão do funcionamento de um torno.

### 2.1 Materiais

Dentre os materiais disponíveis, esse grupo selecionou os seguintes:

- Inversor CFM 500
- Correia sincronizadora Optibelt ZR 345L
- Polia 26 L 075
- Polia 48 L 075
- Mesa deslizante 3 (430 mm) e 4 (280 mm)
- 2x Motor KTC HT-23-400
- 2x Acoplamento fole (tipo 3)

### 2.2 Eixo árvore

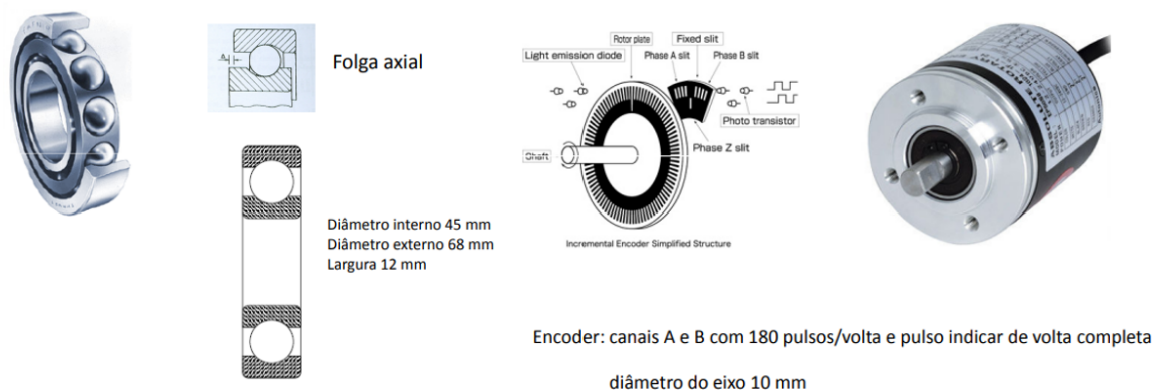
O eixo árvore especificado para a máquina é composto por uma placa de três castanhas para fixação da peça, perfil tubular de aço com seção quadrada de 100 mm de lado e 3,18 mm de parede, rolamentos radiais de esferas, polia para correia sincronizadora e encoder óptico.

Seguem as imagens que especificam o funcionamento do encoder óptico e também o rolamento de esferas:

#### 2.2.1 Potência

De acordo com as especificações iniciais do motor CA que transmitirá movimento à máquina por meio da transmissão por correia, a sua potência fornecida é de 0,5 HP, dada uma tensão de 220V e uma rotação de 1720rpm.

As potências fornecidas pelo motor de passo, no entanto, variam de modelo para modelo. Considerando o motor KTC-HT23-401, temos diferentes valores a depender da operação (torque transmitido e respectiva velocidade angular).



O motor KTC-HT23-400 possui uma curva de torque dada o valor do par revoluções por segundo e torque que transmite a maior potência para o sistema é um torque de 0,67Nm a uma rotação de 15 revoluções por segundo, que gera uma potência de 0,08468 HP.

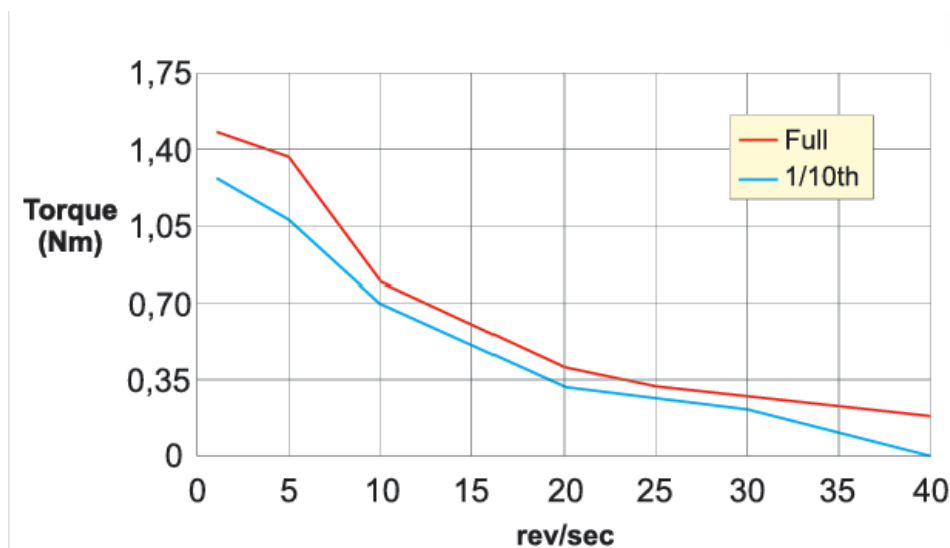


Figura 1 – Curva de torque do motor de passo KTC-HT23-400 (CATÁLOGO MOTORES DE PASSO KALATEC..., s.d.).

## 2.2.2 Rotação

Levando em consideração a tabela e sabendo que o inversor a ser utilizado armazena até 8 velocidades, podemos escolhê-las de acordo com a ferramenta, que será de aço rápido, e o material usinado, que será de material mole (para as presentes especificações utiliza-se o Nylon). Deve-se levar também em conta que a placa de castanhas possui limitação de rotação de 900 RPM.

Considerando um peça de nylon de diâmetro máximo 100mm a rotação do eixo necessária, de acordo com a equação 21, na seção 13.1, para as operações de usinagem é



	Pot [KW]	Tensão [V]	Corrente [A]		
KTC-HT-23-400	0,063	31,5	2,80	2,00	1,40
Motor CA 0.5 HP	0,373	220	-	1,69	-

955 RPM. Esse valor aumentará de forma inversamente proporcional ao diâmetro a peça.

As demais 8 rotações serão ainda escolhidas para cada processo (acabamento, desbaste e rosqueamento) e diâmetro disponível da peça. Em seguida, elas serão programadas no inversor para a usinagem das peças.

## 2.3 Especificações Elétricas

Para as especificações elétricas foram analisados dados elétricos dos 2 tipos de motores utilizados: KTC - HT -23 - 400 e Motor CA 0,5 HP.

### 2.3.1 Tensão e Corrente

A máquina será alimentada com tensão e corrente adequadas para suportar os motores e outros componentes eletrônicos, garantindo a eficiência energética e a segurança operacional.

### 2.3.2 Controlador

O controlador escolhido para a máquina é o Linux CNC, que permitirá um controle preciso das operações. Será configurado para suportar a interface com os motores de passo e demais componentes eletrônicos.

As principais atividades que o dispositivo desempenhará serão:

- Comunicação por portas paralelas
- Controle automático por código G
- Controle automático dos motores de passo sem feedback
- Controle automático da velocidade do eixo árvore com feedback de um encoder
- Controle manual utilizando um joystick

### 2.3.3 Resolução

Os motores de passo selecionados realizam 200 passos por volta, ou seja 1.8° por passo; Com o driver de micropasso temos 10x o número de passos por volta, logo 0.18° por passo.

Para ambas as nossas mesas deslizantes temos que seus fusos tem passo igual a 5mm ou uma volta completa, move a mesa 5mm.

$$Resolução = \frac{\text{Passo}}{\text{Resolução do conjunto}} = \frac{5mm/volta}{2000steps/volta} = 2.5\mu m/volta \quad (2.1)$$

Portanto, a resolução máxima de movimentação de ambas as mesas deslizantes é de  $2,5\mu m$ . Ou seja, esse valor corresponde ao menor incremento que o controle é capaz de executar.

### 2.3.4 Avanço rápido

O avanço foi dimensionado para permitir deslocamentos ágeis entre os ciclos de usinagem, sem comprometer a precisão.

### 2.3.5 Driver e Motor de Passo

Será utilizado um driver de motor de passo do tipo micro passo com 2000 posições por volta, o que resulta em uma resolução angular de  $0.18^\circ$  por passo.

## 2.4 Precisão e Acurácia

Para o projeto da máquina busca-se uma precisão de usinagem de décimo de milímetro. Ambos fatores dependerão da construção da máquina como um todo.

## 2.5 Dimensões e Peso da Máquina

Os materiais possuem os pesos listados abaixo, sendo que as diferentes soluções podem utilizar diferentes elementos, variando o seu peso total. Caso todos os componentes sejam usados, o peso total assume 25.25 kg.

- Mesas Deslizantes: 5 Kg (extraído do Catalogo do produto)
- Motores de passo: 2 Kg (extraído do Manual)
- Encoder: 0,4 Kg (extraído do datasheet)
- Motor CA: 10 Kg (Retirado do Catalogo do produto)
- Inversor: 1 Kg (extraído do Manual do usuário)
- Polias: 2,9 Kg (extraído do Manual)

- Rolamento eixo árvore: 0,15 Kg (Catálogo)
- Acoplamento Tipo Fole: 0,1 Kg
- Correias Sincronizadoras: 0,5 Kg (material é feito de borracha)
- Placa de três castanhas: 3,2 Kg (Especificação da peça)

## 2.6 Cursos e velocidades dos eixos

Os cursos e as velocidades dos eixos da máquina foram projetados para garantir uma usinagem eficiente e precisa. Abaixo estão as especificações para cada eixo:

### 2.6.1 Cursos dos Eixos

O torno utilizará blocos deslizantes nos eixos Z e X com comprimentos 540mm e 430mm, respectivamente. Os cursos máximos de fim de curso é descrito na seção abaixo.

Nos dois eixos o movimento será realizado por um fuso de esferas recirculantes (com passo de 5mm) acoplado a um motor de passo.

## 2.7 Volume de trabalho

Corresponde a área máxima que a peça poderia dentro de uma área útil de trabalho.

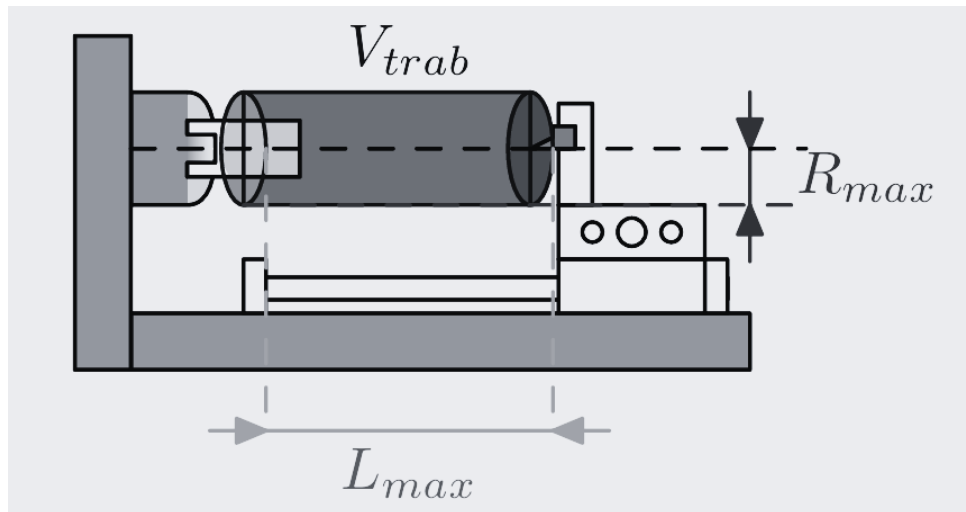


Figura 2 – Representação gráfica do cálculo de volume de trabalho. Fonte: Autor.

$$V_{trab} = (\pi R_{Max}^2) \cdot L_{Max}$$

$$R_{Max} = 50[mm]$$

$$L_{Max} = \text{Distância entre furos} - \text{Comprimento da mesa} - \text{Tamanho de um apoio}$$

$$L_{Max} = 430[mm] - 130[mm] - 20[mm]$$

$$L_{Max} = 280[mm]$$

$$V_{trab} = (\pi \cdot 502) \cdot 280 = 2.199.114,86[mm^3]$$

$$V_{trab} = 0,0022[m^3]$$

### 2.7.1 Velocidades dos Eixos

O motor de passo KTC-HT23-400 apresenta uma relação inversa entre torque e velocidade, ou seja, à medida que o torque aumenta, a velocidade de rotação diminui. Quando se exige mais torque, a inércia do sistema também precisa ser minimizada para evitar perdas de eficiência e garantir que o motor funcione de maneira adequada.

A seguir, apresenta-se uma tabela que correlaciona os valores de velocidade e torque em função da massa móvel. Essa tabela fornece uma visão clara de como diferentes massas e torques impactam a velocidade e, consequentemente, a aceleração do sistema. A partir desses dados, será possível determinar os coeficientes de aceleração ideais para cada situação, garantindo que o motor funcione de forma eficiente e segura.

Para a obtenção da tabela, usaram as seguintes fórmulas:

$$J_{massa} = (m_{mesa} + m_{peca}) \cdot \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2 \quad (2.2)$$

, para o cálculo do momento de inércia da carga.

$$J_{fuso} = \frac{1}{2} \cdot m_{fuso} \cdot \left(\frac{d_{fuso}}{2}\right)^2 \quad (2.3)$$

, para o cálculo do momento de inércia do fuso.

Baseado na curva de torque da Seção 4.1, percebe-se que a velocidade do motor estará bem próxima da máxima, ou seja, 40[rev/s] e como o passo é 5[mm] temos que a velocidade dos eixos x e z em m/s é 0.2[m/s]. A velocidade média é de 0.1[m/s].

Para estimar o momento de inércia do motor a partir da curva de torque versus velocidade, usou-se a relação entre o torque e a aceleração angular, dada pela equação:

$$T = J \cdot \dot{\omega} \quad (2.4)$$

Onde:

- $T$  é o torque (Nm),

- $J$  é o momento de inércia (em  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ),
- $\dot{\omega}$  é a aceleração angular (em  $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ ).

A partir da curva, podemos identificar que o torque máximo  $T$  no modo Full Step é aproximadamente 1.4 Nm, e a velocidade máxima do motor é 40 rev/s. Para converter a velocidade em rad/s, usamos a seguinte fórmula:

$$\omega = 2\pi \cdot 40 = 251.2 \text{ rad/s} \quad (2.5)$$

Supondo que o motor acelere de 0 rad/s até 251.2 rad/s em 2 segundos. A aceleração angular é então dada por:

$$\dot{\omega} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{251.2}{2} \text{ rad/s}^2 = 125.6 \text{ rad/s}^2 \quad (2.6)$$

Substituindo os valores de  $T$  e  $\dot{\omega}$  na equação para o torque:

$$1.4 = J \cdot 125.6 \quad (2.7)$$

Agora, resolvemos para  $J$ :

$$J = \frac{1.4}{125.6} = 0.01114 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.8)$$

Assim, o momento de inércia estimado do motor é aproximadamente:

$$J_{motor} \approx 0.011 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.9)$$

A inércia acelerada será, portanto,

$$J_{carga} = J_{massa} + J_{fuso} + J_{motor} + J_{acoplamento} \quad (2.10)$$

Por fim, o torque de acionamento será obtido através da expressão:

$$T_{acionamento} = J_{carga} \cdot \dot{\omega} + T_{atrito} \quad (2.11)$$

Para o cálculo do torque de atrito, consideram-se aqueles gerados pelas guias lineares, os mais de rolamento e os fusos.

$$T_{guias} = \frac{p}{2\pi} \cdot \mu_{guias} \cdot [g(m_{mesa} + m_{peca}) + F_{NormalCorte}] \quad (2.12)$$

$$T_{mancal} = \mu \cdot \frac{d_{internoMancal}}{2} \cdot (F_{corte} + F_{préCarga}) \quad (2.13)$$

$$T_{fuso} = \frac{p}{2\pi} \cdot F_{corte} \quad (2.14)$$

$$(2.15)$$

O torque de atrito final, portanto, será dado pela expressão:

$$T = T_{guia} + T_{mancais} + T_{fuso} \quad (2.16)$$

Por fim, chegou-se nos resultados da tabela abaixo.

Massa móvel [kg]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rad/s]
5	0,65	180
8	0,80	160
10	1,05	130
12	1,25	110

Tabela 1 – Correlação entre Massa Móvel, Torque e Velocidade Angular

A partir da análise da tabela, percebe-se que uma velocidade mais baixa requer um torque mais elevado, pois a resistência mecânica ou a carga aplicada ao motor aumenta. Nesses casos, o motor precisa aplicar mais força (torque) para continuar girando, o que pode comprometer a velocidade máxima atingível. Portanto, ao projetar a dinâmica do sistema, é essencial encontrar um equilíbrio entre torque, inércia e velocidade, ajustando os parâmetros de aceleração para que o motor atinja o torque necessário sem prejudicar a eficiência do sistema.

## 2.8 Frequência Crítica do Laço Estrutural

A frequência máxima de operação é de 30 Hz, limitada pelos motores utilizados, garantindo que a máquina opere abaixo de sua frequência natural para evitar ressonâncias.

## 2.9 Tipo de sincronização entre os eixos

Os movimentos dos eixos de uma máquina (como um torno ou fresadora) são coordenados para garantir que eles trabalhem em harmonia durante a operação. A sincronização é essencial para garantir a precisão nos processos de usinagem, já que o movimento de um eixo pode afetar diretamente o movimento do outro, especialmente em operações que requerem alta precisão.

A sincronização entre os eixos será feita por meio de uma **correia sincronizadora**. Ela é responsável por transmitir o movimento de forma simultânea entre os eixos, mantendo uma relação de velocidade constante.

No presente projeto, a correia Optibelt ZR 345L cumpre essa função ao garantir que o movimento de um eixo seja replicado em outro de forma precisa, sem escorregamento, já que as correias sincronizadoras possuem dentes que se encaixam perfeitamente nas polias, evitando desvios.

Dentre as vantagens de utilizar esse tipo de sincronização entre eixos, é que esse é silencioso, requer pouca manutenção e oferece bom desempenho em termos de durabilidade e precisão.

## 2.10 Parâmetros de usinagem

### 2.10.1 Velocidade de corte

A velocidade de corte refere-se à distância que a ferramenta percorre ao cortar o material em um determinado período de tempo. Esse parâmetro é crucial na operação de usinagem em um torno, pois permite calcular a rotação, em RPM, da placa de castanha, responsável por gerar a velocidade de corte no material. A velocidade de corte é determinada pela seguinte fórmula:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi d} \quad (2.17)$$

Onde:

- $n$  = rotação da máquina, em RPM;
- $V_C$  = velocidade de corte, em m/min;



- d = diâmetro da peça, em mm.

Embora existam fórmulas para calcular a velocidade de corte, ela é frequentemente obtida em tabelas que já relacionam a operação, o material a ser usinado e o tipo de ferramenta de corte utilizada.

Tabela de Velocidade de Corte (Vc) para o torno (em metros por minuto)					
Materiais	Ferramenta de Aço Rápido			Ferramentas de Carboneto Metálico	
	Desbaste	Acabamento	Roscar e Recartilhar	Desbaste	Acabamento
1020 - 1030 Aço Carbono Macio	25	30	10	200	300
1045 - 1050 Aço Carbono Duro	15	20	8	120	160
1060 - 1070 Aço Carbono Extraduro	12	16	6	40	60
Ferro Fundido Maleável	20	25	8	70	85
Ferro Fundido Cinzento	15	20	8	65	95
Ferro Fundido Duro	10	15	6	30	50
Bronze	30	40	10 a 25	300	380
Latão e Bronze	40	50	10 a 25	350	400
Alumínio	60	90	15 a 35	500	700
Fibra e Ebonite	25	40	10 a 20	120	150

Figura 3 – Tabela de velocidade de corte para o torno (m/min).

O Nylon 6.0 não está especificado na tabela acima, portanto, realizou-se uma pesquisa em sites de fabricantes de Nylon 6.0. De acordo com essas fontes, a velocidade de corte recomendada para o material varia entre 50 e 500 m/min, dependendo da operação realizada. Para o desbaste, utilizaremos uma velocidade de corte de 300 m/min. Com base nesse valor, é possível calcular a rotação necessária para usinar três tarugos de diferentes diâmetros: 25 mm, 50 mm e 100 mm.

Abaixo estão os cálculos da rotação necessária para manter a velocidade de corte de 300 m/min em cada um dos casos (NYLON 6..., s.d.):

Para 25mm de diâmetro:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi d} = \frac{300 \cdot 1000}{\pi \cdot 25} = 3822 \text{rpm} \quad (2.18)$$

Para 50mm de diâmetro:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi d} = \frac{300 \cdot 1000}{\pi \cdot 50} = 1911 \text{rpm} \quad (2.19)$$

Para 100mm de diâmetro:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi d} = \frac{300 \cdot 1000}{\pi \cdot 100} = 955 \text{rpm} \quad (2.20)$$

Esses valores são fundamentais, pois a utilização de velocidades de corte inadequadas na usinagem pode gerar diversos problemas. Quando a velocidade de corte está acima da recomendada, pode ocorrer o superaquecimento tanto da peça quanto da ferramenta, além da perda do fio de corte da ferramenta. Por outro lado, uma velocidade de corte abaixo do recomendado pode causar o travamento da ferramenta, muitas vezes resultando em sua quebra.

### 2.10.2 Avanço de corte

O avanço de corte representa a relação entre a velocidade de deslocamento da ferramenta e a velocidade da peça por rotação do eixo da máquina (mm/rotação). Ele depende diretamente da escolha da velocidade de corte, e, após essa definição, é necessário selecionar o avanço de corte adequado. Assim como a velocidade de corte, o avanço de corte é fornecido por meio de tabelas disponibilizadas pelos fabricantes de ferramentas. Essas tabelas relacionam o material a ser usinado, o material da ferramenta e o tipo de operação a ser realizada. Abaixo está um exemplo de tabela de avanços de corte:

<b>Avanços recomendados de acordo com diâmetro da peça.</b>			
<b>Diâmetro em mm</b>	<b>Avanços para desbaste</b>	<b>Avanços para acabamentos</b>	<b>Avanços para: Sangrar, Torneamento interno.</b>
	<b>Em mm/rotação</b>	<b>Em mm/rotação</b>	<b>Em mm/rotação</b>
10 a 25	0,1	0,05	0,05
26 a 50	0,2	0,1	0,1
51 a 75	0,25	0,15	0,1
76 a 100	0,3	0,2	0,1
101 a 150	0,45	0,3	0,2
151 a 300	0,5	0,3	0,2
301 a 500	0,6	0,4	0,3

Figura 4 – Avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça.

Para o caso do Nylon 6.0, os fabricantes recomendam um avanço de corte de 0,5 mm/rotação para operações de desbaste e 0,05 mm/rotação para operações de acabamento. Essas recomendações visam otimizar a qualidade do corte e a durabilidade da ferramenta, garantindo um bom equilíbrio entre eficiência e precisão durante o processo de usinagem.

## 3 Estudo das soluções

### 3.1 Parâmetros avaliados

Durante o desenvolvimento do projeto, serão analisadas diferentes topologias e soluções para maximizar o desempenho da máquina, considerando parâmetros como frequência natural, rigidez, consumo de materiais e velocidade máxima.

#### 3.1.1 Ergonomia

A máquina foi projetada para facilitar o acesso aos seus componentes e o ajuste manual, quando necessário, considerando a segurança e o conforto do operador.

#### 3.1.2 Frequência Natural das Soluções

O primeiro passo para verificar se a frequência natural de uma máquina está assumindo um valor coerente com a aplicação é comparando-a com a frequência de operação dela. Dessa forma, utilizando uma frequência de operação de 30 MHz — proveniente dos motores e definida nas especificações de projeto, é preciso garantir que a frequência natural de vibração da solução seja maior que essa.

Dada a complexidade da estrutura detalhada e da definição de uma equação do movimento que poderia ser proveniente da situação real das guias e das mesas, será utilizado um modelo de simplificação, com algumas hipóteses assumidas. O livro (BLEVINS, 2001) foi utilizado como base para definição desse modelo estrutural para este cálculo. Assim, a versão simplificada do elemento crítico vibrante — guia e mesa — foi considerada como uma barra esbelta com uma massa apoiada no centro. Duas alternativas foram consideradas, representadas na Fig. 5.

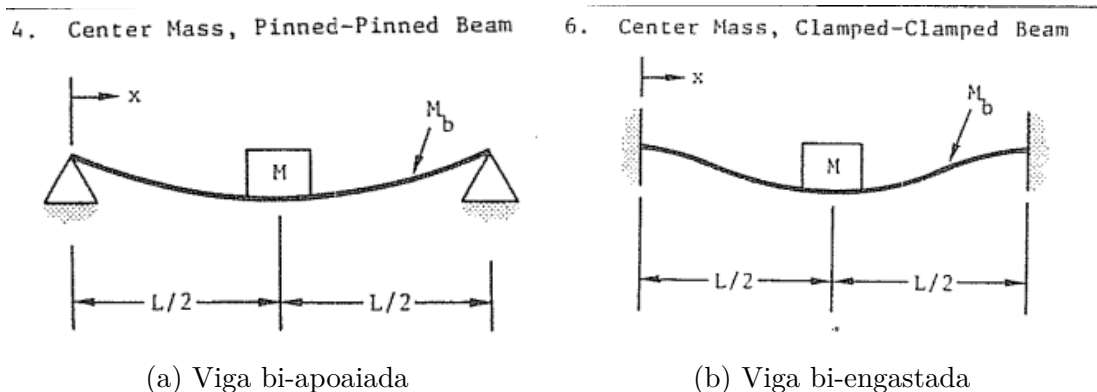


Figura 5 – Modelos de viga esbelta com massa central. Fonte: (BLEVINS, 2001)

Para o modelo representado em 5(a), a frequência natural pode ser sintetizada pela Eq. 3.1, enquanto o modelo em 5(b) pela Eq. 3.2.

$$\frac{2}{\pi} \left[ \frac{3EI}{L^3(M + 0.49M_b)} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

$$\frac{4}{\pi} \left[ \frac{3EI}{L^3(M + 0.37M_b)} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Considerando o pior caso, em que a frequência natural de vibração é menor e, portanto, mais próxima da frequência mínima limitada pelas especificações do projeto, foi selecionado o modelo da Eq. 3.1: a viga bi-apoiada.

Uma vez selecionado o modelo, é possível estudar a expressão para que sejam especificados os parâmetros utilizados. Destrinchando-os, é preciso conhecer propriedades mecânicas, estruturais e geométricas dos elementos da composição — guias e a massa móvel:

- E — módulo de elasticidade do perfil
- I — segundo momento de inércia do perfil quando uma carga é aplicada e ha deflexão
- L — comprimento do perfil
- M — massa móvel posicionada no centro do perfil
- $M_b$  — massa dos perfis/guias

Adicionalmente, é possível detalhar o momento de inércia e a massa móvel, definindo-os respectivamente a partir das Eqs. 3.3 e 3.1.2. O momento de inércia é como o momento de inércia a flexão para duas barras cilíndricas, no caso do eixo das guias. Como a seção é formada por duas barras, deve-se multiplicar o valor de  $I$  por dois. Vale ressaltar que esse cálculo pode ser aplicado para as soluções convencionais onde a seção mais propensa a vibração por flexão é a das guias lineares. Posteriormente, na análise de cada uma das soluções, são propostos cálculos de momentos de inércia e massas móveis específicas para cada um dos modelos.

$$I = \frac{\pi R^4}{4} \quad (3.3)$$

$M_{\text{móvel}} = (\text{Massa da mesa deslizante}) \times 2 + \text{Massa dos perfis da mesa superior} + \text{Massa do porta ferramenta}$

A partir dessas expressões, é necessário fornecer o valor de mais parâmetros, sendo eles:

- $R$  — raio dos perfis
- $\rho$  — massa específica do material que compõe o perfil e a mesa (nessa aplicação, esse material é aço)

Dessa maneira, é possível determinar, baseado no posicionamento e na escolha das mesa deslizantes assim como sua fixação e adição de massas móveis, qual será a frequência crítica de vibração natural.

Em adição, é também possível determinar outro tipo de frequência natural de vibração, sendo ela a vibração torsional, que pode ocorrer entre as guias e a mesa. Mas, como essa seria menos crítica em relação à frequência de operação, não será limitante para este projeto.

### 3.1.3 Rigidez (Loop Estrutural)

A rigidez estrutural foi analisada para minimizar deformações durante a operação, garantindo precisão e acurácia nas usinagens. O material mole impacta a rigidez.

## 3.2 Solução 1

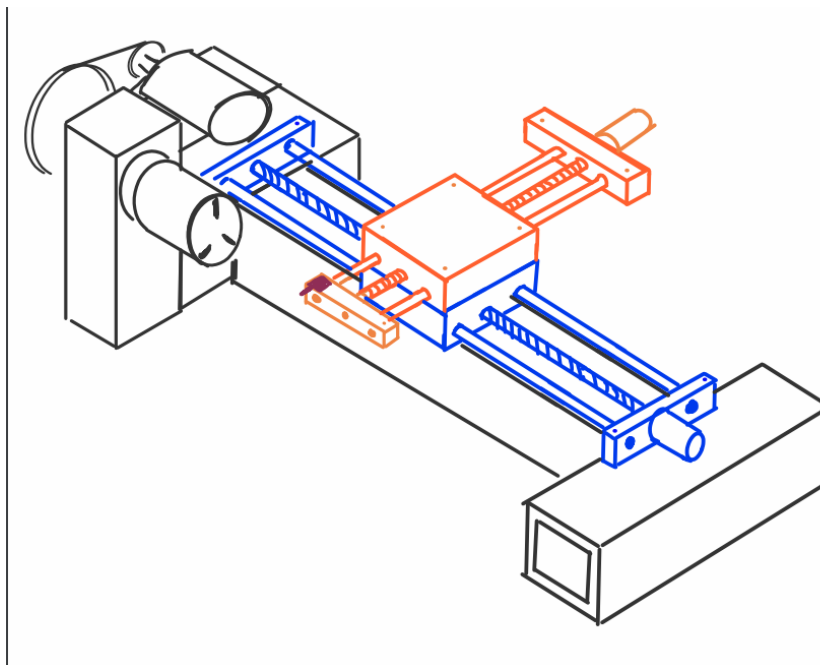


Figura 6 – Esboço manual da primeira solução. Fonte: Autor.

### 3.2.1 Peso

Considerando 3 perfis de 100mmx100mm e tendo como base a estimativa de dimensão:

- 860mm de comprimento: 8,3kg
- 400mm de largura: 3,9kg
- 270mm de altura: 2,6kg

Com uma chapa de aço 3,2mm entre as mesas considerava-se 290mm de comprimento e 150mm de largura, dimensões suficientes para fixação da guia.

Peso: 0,824 kg

Peso extra relacionado a solução 2: 15,7kg

**Peso total:** 40,9kg

### 3.3 Solução 2

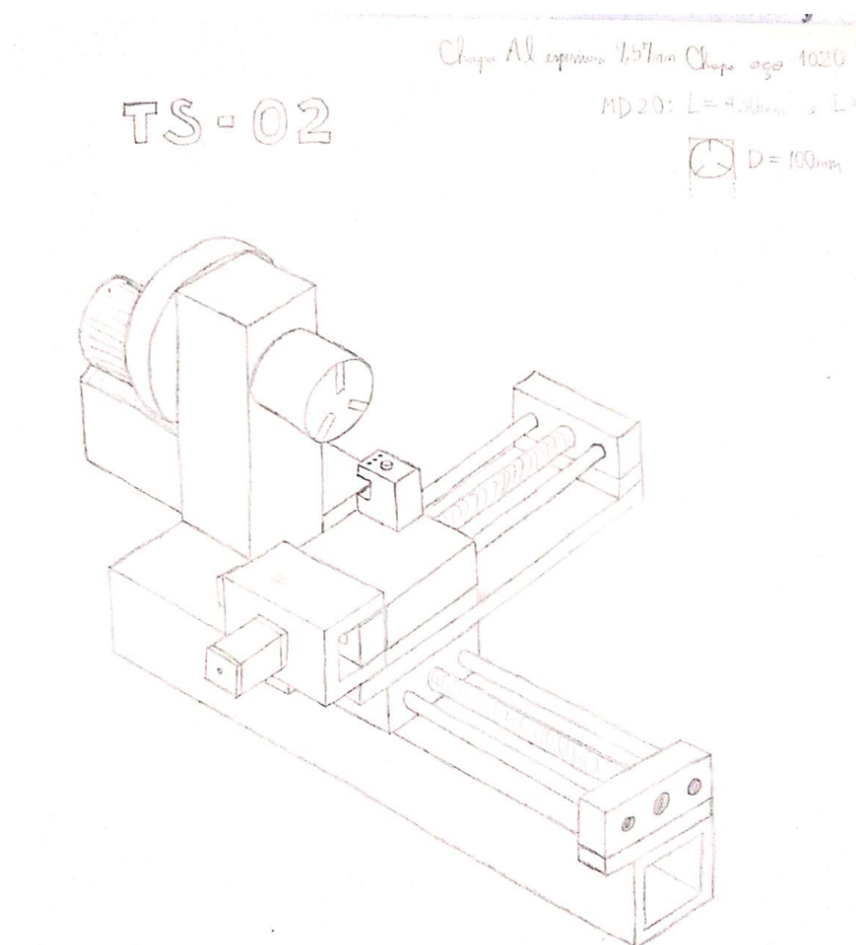


Figura 7 – Esboço manual da segunda solução. Fonte: Autor.

### 3.3.1 Peso

## 3.4 Solução 3

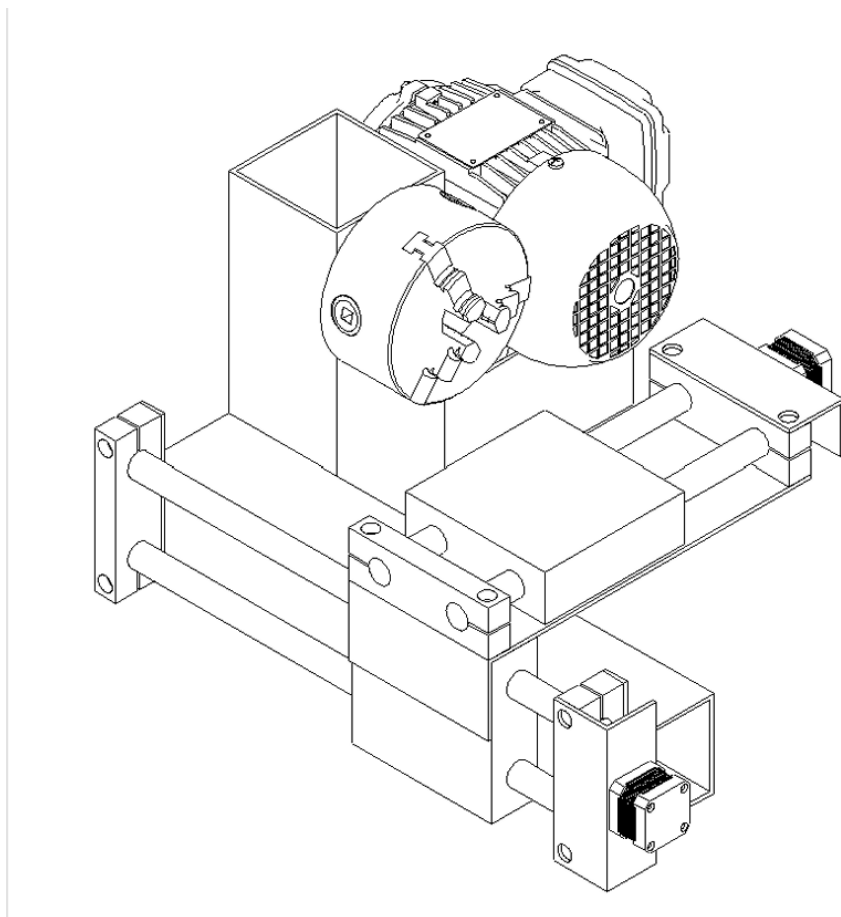


Figura 8 – Esboço da terceira solução. Fonte: Autor.

### 3.4.1 Peso

- 2x chapas fixação eixo Z: 0.126 kg
- 2x placa motor de passo: 0.586 kg
- Eixo árvore: 2.54 kg
- Eixo Z : 3.473 kg
- Placa mesa de cima : 1.181 kg
- Chapa do motor: 0.372 kg
- Base do motor : 1.702 kg
- Porta ferramentas: 0.37 kg

**Peso total:** 10.35 kg



## 4 Próximos passos

## Referências

BLEVINS, R.D. **Formulas for Natural Frequency and Mode Shape**. [S.l.]: Krieger Publishing Company, 2001. ISBN 9781575241845. Disponível em:  
<[https://books.google.com.br/books?id=ee1\\_AAAACAAJ](https://books.google.com.br/books?id=ee1_AAAACAAJ)>.

NYLON 6.0 DATASHEET. [S.l.: s.n.]. /mnt/data/datasheet-nylon60-roc.pdf.  
Revisão 1.0, Julho/2018, Accessed: 2024-09-12.

CATÁLOGO MOTORES DE PASSO KALATEC. [S.l.: s.n.].  
/mnt/data/1586457700Catalogo-Motores-de-Passo-Kalatec-100420.pdf. Revisão  
1.0, Abril/2020, Accessed: 2024-09-12.

## 5 Anexos