

**FERNANDA CRISTINA DE MORAES TAKAFUJI**  
**RUBENS BARDELLI JUNIOR**

*nota final*  
*10,0 (dez)*

*[Signature]*  
*22/01/04*

**PROJETO DE UMA MINI FRESADORA PARA USINAR  
AS TRILHAS DE UMA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título de  
Engenheiro

**São Paulo**  
**2003**

**FERNANDA CRISTINA DE MORAES TAKAFUJI**  
**RUBENS BARDELLI JUNIOR**

**PROJETO DE UMA MINI FRESADORA PARA USINAR  
AS TRILHAS DE UMA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título de  
Engenheiro

Professor orientador:  
Julio César Adamowski

**São Paulo**  
**2003**

Aos nossos pais e irmãos, que sempre nos apoiaram e acreditaram em nosso potencial e na realização desse trabalho

## AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador Prof. Dr. Julio Cesar Adamowski, por nos ajudar e nos transmitir o conhecimento essencial para a realização deste trabalho e para nosso crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha pela competência e disposição.

Aos demais professores, que de alguma forma contribuíram para o nosso crescimento como engenheiros.

Aos nossos amigos, pelo apoio e ombro amigo até nos momentos mais difíceis.

Aos nossos pais, pelo carinho, compreensão e apoio constante, e por nos ter acompanhado e incentivado sempre nesta caminhada.

À Escola Politécnica, por tudo que nos ensinou e que nos ajudou a ser o que somos hoje.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e a conclusão do nosso curso.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. DESCRIÇÃO DO PROJETO BÁSICO.....	2
3. METODOLOGIA DO PROJETO.....	3
3.1 Projeto Mecânico.....	5
3.2 Projeto eletrônico.....	5
3.3 Projeto do interpretador.....	5
4. DESCRIÇÃO DOS REQUISITOS PRINCIPAIS .....	6
4.2. Requisitos construtivos.....	6
5. PROJETO MECÂNICO .....	7
5.1. Escolha da melhor solução .....	7
5.2. Projeto da máquina escolhida .....	10
5.3. Cálculo dos Motores.....	33
5.4. Elementos Finitos .....	34
6. FABRICAÇÃO .....	37
6.1. Estrutura mecânica.....	37
6.2. Ligação Física Máquina – Computador .....	40
6.3. Componentes Auxiliares.....	41
6.3.1. Fonte de Tensão .....	41
6.3.2. Acoplamentos Flexíveis.....	41
6.3.3. Motores de Passo .....	42
7. REQUISITOS DE CONTROLE.....	44
7.1. Projeto Eletrônico .....	44
7.1.1. Placa acionadora de motor de passo .....	44
7.2. Parâmetros de usinagem .....	45
8. PROJETO DO INTERPRETADOR.....	47
8.1. Linguagem HP-GL.....	47
8.1.1. Usando o software Eagle .....	47
8.2. Porta paralela .....	49

8.3. Algoritmo de Bresenham .....	51
8.4. Desenvolvimento do interpretador .....	53
8.4.1. Implementação no Visual C++ .....	55
9. TESTES.....	59
10. CONCLUSÃO .....	60
Anexo 1.....	61
Referências bibliográficas.....	75

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 3.1 - Cronograma de atividades.....	4
Fig. 5.1.1 – Desenho da solução 1 .....	7
Fig. 5.1.2 – Desenho da solução 2 .....	7
Fig. 5.1.3 – Desenho da solução 3 .....	8
Fig. 5.2.1 - Esquema de uma guia linear com uma força aplicada na direção de z.....	16
Fig. 5.2.2 - Esquema de uma guia linear com uma força aplicada na direção de y.....	17
Fig. 5.2.3 - Esquema de uma guia linear com uma força aplicada na direção de x.....	17
Fig. 5.2.4 - Esquema da guia de movimentação da mesa.....	21
Fig. 5.2.5 - Esquema da guia de movimentação vertical da ferramenta.....	25
Fig. 5.2.6 - Esquema da guia de movimentação horizontal da ferramenta.....	29
Fig. 6.1.1 - Mesas de suporte em alumínio.....	37
Fig. 6.1.2 - Montagem da estrutura.....	38
Fig. 6.1.3 - Mesa onde será presa a placa de fenolite .....	38
Fig. 6.1.4 - Suporte da Dremmel.....	39
Fig. 6.1.5 - Mesa de alumínio .....	39
Fig. 6.2.1 - Layout da placa que interliga motores ao PC .....	40
Fig. 6.3.1.1 - Fonte de tensão.....	41
Fig. 6.3.2.1 - Acoplamentos flexíveis .....	42
Fig. 6.3.3.1 - Motor de passo .....	43
Fig. 7.1.1.1 - Circuito básico do driver dos motores.....	44
Fig. 8.1.1.1 - Placa gerada no Eagle .....	48
Fig. 8.1.1.2 - Gerar furos em HPGL.....	48
Fig. 8.1.1.3 - Gerar trilhas em HPGL .....	49
Fig. 8.2.1 - Conector DB25 macho .....	49
Fig. 8.2.2 - Pinos do conector DB25 .....	50
Fig. 8.3.1 - Método de Bresenham .....	51
Fig. 8.4.1 - Janela do Interpretador.....	53

Fig. 8.4.2 - Digitar a velocidade .....	54
Fig. 8.4.3 - Controle Manual .....	55



## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1.1 - Tabela de decisão .....	9
Tabela 8.1.1 - Alguns comandos HP-GL .....	47

## RESUMO

O presente trabalho apresenta o projeto e sua implementação para a construção de uma mini fresadora CNC para usinar as trilhas de placas de circuito impresso.

O trabalho foi dividido em duas partes para serem executadas em paralelo pelos dois alunos. Essas partes são o projeto mecânico e o projeto e implementação do software de controle, ao final elas se juntaram para que fossem feitos a fabricação da máquina e todos os testes necessários.

O projeto mecânico foi feito levando-se em consideração as forças atuantes, e na medida do possível é desejável que a estrutura seja rígida. Para isso foram verificadas as tensões, deformações, rigidez e frequências naturais do sistema em softwares de elementos finitos.

O software de controle foi implementado em Visual C++, há uma interface gráfica simples, porém sua principal função é ler o arquivo em HP-GL e mandar comandos pela porta paralela do PC.

## **ABSTRACT**

This work presents the project and its implementation to construct a small CNC milling machine which will make printed circuits boards.

The task were divided in two parts to be executed at the same time by both of the members of the group. The parts are the mechanical project and the project and implementation of the control software. At the end, these parts became one in order to build the machinery and make all the necessary tests.

The mechanical project considered the stress on the structure and the stiffness. To achieve the aims, the analysis of stress, strain, stiffness and natural frequencies were made in finite element software.

The control software were built in Visual C++. There is a simple graphic interface, however, the main function is to read the HP-GL file and send the commands to the parallel port of the PC.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, placas de circuito impresso são cada vez mais usadas, pois elas facilitam a montagem e reduzem o tamanho de um circuito eletrônico. Embora existam vários métodos para a fabricação das trilhas em placa de fenolite, há uma grande dificuldade neste país de se encontrar empresas que construam placas de circuito impresso, em pequenas quantidades e ainda por cima a preços baixos. Por isso, é proposto como projeto de formatura por esses dois alunos, o projeto de uma mini fresadora de comando numérico que seja capaz de usinar em uma placa de fenolite, as trilhas e os furos de um circuito eletrônico que é projetado a partir de CADs que são vendidos comercialmente para esta finalidade.

Esta será, certamente, uma ferramenta muito útil para pessoas que projetam dispositivos que envolvam eletrônica, pois ela poderá fabricar as placas em pequena quantidade e a custos baixos.

Da maneira que será projetada a máquina, além de placas de circuito impresso, ela será capaz de usinar materiais moles e de pequenas dimensões, tais como plástico e madeira, a fim de fornecer peças que sejam de uso comum no dia a dia.

## **2. DESCRIÇÃO DO PROJETO BÁSICO**

Essa mini fresa, consiste de uma máquina que será capaz de se mover nas três direções x, y e z. O movimento será dado através de um carro que será montado sobre uma guia linear e posicionado por um sem fim, que por sua vez será acionado por um motor de passo de 400 meio-passos por volta.

A comunicação do sistema será feita diretamente pela porta paralela de um PC, sem o intermédio de qualquer microcontrolador.

A linguagem utilizada para a comunicação do computador e a mini fresadora é a linguagem HP-GL, que é característica dos plotters Hewlett Packard.

Para a usinagem do material, será usada uma microretífica DREMEL modificada para uma melhor precisão.

### **3. METODOLOGIA DO PROJETO**

O trabalho foi dividido entre os dois componentes de tal maneira que o projeto possa ter duas partes diferentes caminhando em paralelo, assim o tempo disponível pode ser mais bem aproveitado.

Pretende-se concluir toda a parte de projeto até o final do primeiro semestre para que o segundo semestre seja somente para construção e testes da máquina projetada.

Como mostra o cronograma da figura 3.1.

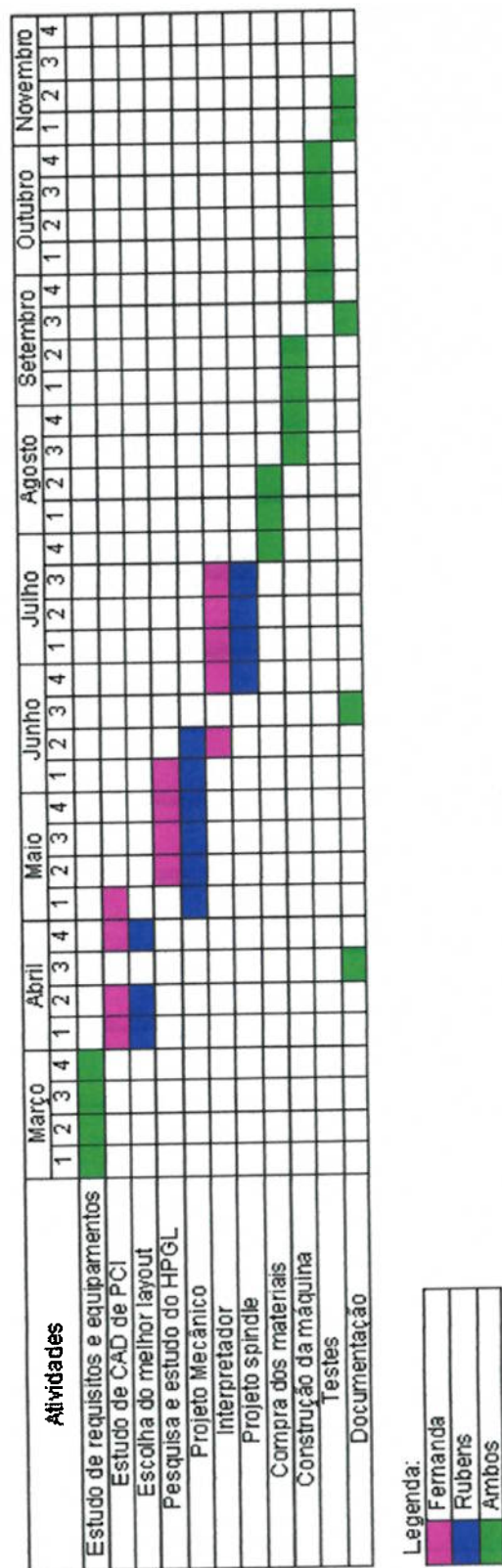


Fig. 3.1 - Cronograma de atividades

### **3.1 Projeto Mecânico**

Em primeiro lugar, algumas alternativas serão estudadas, para que depois de analisadas possa ser escolhida a mais adequada para o projeto, incluindo o custo, a facilidade de montagem, peso entre outros fatores.

Com base nessa escolha, serão feitos todos os cálculos necessários para o projeto mecânico. E depois de fazer algumas verificações em software de MEF, serão feitos os desenhos de conjunto e de fabricação, para que se possa construir a máquina no segundo semestre.

### **3.2 Projeto eletrônico**

O projeto eletrônico é constituído dos drivers de controle dos motores. Aqui será feito um estudo para que se escolha a melhor maneira de controlar os motores..

### **3.3 Projeto do interpretador**

Após o estudo do CAD de PCI, que neste caso será usado o software Eagle, um interpretador será feito. Esse interpretador deverá ler a saída em HP-GL do Eagle e mandar os sinais interpretados para os motores.



## **4. DESCRIÇÃO DOS REQUISITOS PRINCIPAIS**

### **4.1. Características Gerais**

As características gerais da máquina são:

- Área útil de usinagem na horizontal: 300 mm x 300 mm;
- Resolução: 0,0125 mm;
- Precisão: 0,05 mm;
- Curso vertical da ferramenta: 150 mm.

### **4.2. Requisitos construtivos**

As tolerâncias geométricas devem garantir o perpendicularismo entre as guias lineares e as tolerâncias dimensionais devem garantir uma determinação precisa do posicionamento.

A estrutura da máquina deve ter alta rigidez e ser pouco suscetível a vibrações, a fim de eliminar grandes deformações que possam influenciar negativamente a posição da ferramenta.

## 5. PROJETO MECÂNICO

### 5.1. Escolha da melhor solução

Para o projeto mecânico, foram propostas três soluções, cujos esboços estão mostrados nas figuras a seguir:

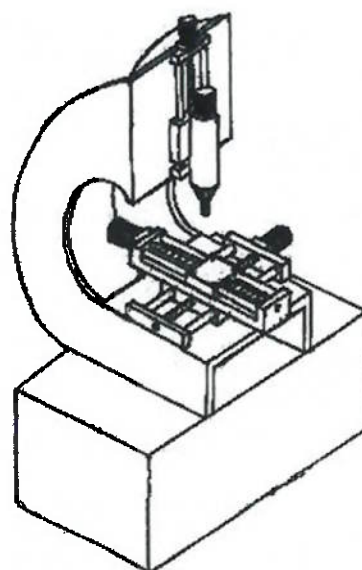


Fig. 5.1.1 – Desenho da solução 1

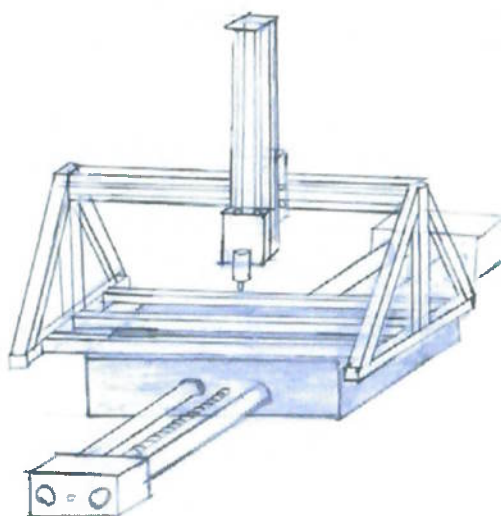
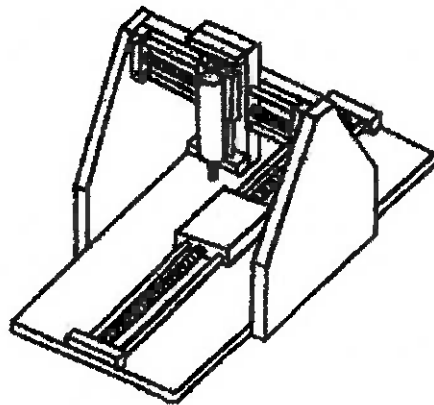


Fig. 5.1.2 – Desenho da solução 2



**Fig. 5.1.3 – Desenho da solução 3**

A tabela a seguir mostra as vantagens e desvantagens de uma solução comparada com a outra, foram atribuídos “pesos” para os atributos analisados conforme sua importância no projeto.

Atributo Analisado	Solução 1			Solução 2			Solução 3		
	Nota	Peso	Total	Nota	Peso	Total	Nota	Peso	Total
Peso da máquina	1	0,5	0,5	2	0,5	1	3	0,5	1,5
Facilidade de execução	1	0,5	0,5	2	0,5	1	3	0,5	1,5
Facilidade de montagem	2	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	1
Facilidade de manter o perpendicularismo / paralelismo das guias x e y	3	1,5	4,5	2	1,5	3	2	1,5	3
Facilidade de manter o perpendicularismo / paralelismo da guia z	2	1,5	3	2	1,5	3	2	1,5	3
Susceptibilidade a vibrações	2	1	2	1	1	1	2	1	2
Possibilidade de ocorrer problemas na fabricação devido à ausência de certas máquinas / ferramentas / materiais	1	1	1	2	1	2	3	1	3
Facilidade de controle	2	1	2	2	1	2	2	1	2
Capacidade quanto ao peso das futuras peças a usar	1	0,5	0,5	2	0,5	1	2	0,5	1
Custo financeiro	1	0,5	0,5	2	0,5	1	2	0,5	1
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>15,5</b>	-	-	<b>16</b>	-	-	<b>19</b>

Tabela 5.1.1 - Tabela de decisão

- **Legenda de Notas:**
  - 1 – Ruim
  - 2 – Médio
  - 3 – Bom
  
- **Legenda de Pesos:**
  - 0,5 – Pouco relevante
  - 1,0 – Relevante
  - 1,5 – Muito relevante
  
- **Cálculo das notas:**
  - Valor da Nota x Respectivo Peso do atributo

De acordo com a tabela de decisão, a melhor solução é a terceira, embora a diferença não seja tão grande. O projeto mecânico da mini fresadora será baseado no layout do desenho fig 5.1.3.

## **5.2. Projeto da máquina escolhida**

Como o layout já foi escolhido anteriormente, agora é necessário fazer a estimativa das forças máximas de usinagem.

### **Furação:**

Devido a algumas limitações do projeto (pouca potência do Dremel), foram adotados os seguintes critérios para o projeto:

Diâmetro máximo da broca = 1,5mm

Rotação mínima da máquina = 25000 rpm

Rendimento do motor = 0,8

### **Velocidade de corte:**

Para escolher os materiais que serão usinados pela máquina, foi verificado quais deles ofereciam velocidades de cortes que poderia ter rotações maiores que 5000 rpm. Segundo a equação abaixo, tem-se:

$$sfm = 0,26.d.n$$

onde:

sfm : velocidade de corte (surface feet per minute)

d : diâmetro da broca (pol)

n: rotação (rpm)

$$sfm = 0,26.0,059.25000 = 383.sfp = 383.0,3084 \approx 118m / \min$$

Dessa forma, obteve-se os possíveis materiais que atendem o requisito de velocidade de corte.

### Potência:

Neste caso, escolhe-se os materiais nos quais a potência requerida para furação não ultrapasse a potência máxima do Dremel (125W).

Assim, utiliza-se as equações abaixo:

$$C = P \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) FN \quad M = \frac{C}{e}$$

onde

C: potência de corte (HP)

F: avanço (pol/volta)

d: diâmetro da broca (pol)

N: rotação do motor (rpm)

P: fator de força do material usinado (HP/pol<sup>3</sup>/min)

e: eficiência do motor

M: Potência requerida para o motor

Além disso, também foram calculados os momentos e forças de furação, segundo as equações:

$$T = 148500PFd \qquad M = \frac{T.d}{3}$$

Onde:

T: força de avanço (lbf)

P: fator de potência do material (HP/pol<sup>3</sup>/min)

F: avanço (pol/volta)

d: diâmetro da broca (pol)

M: momento (in.-lb)

**Dremel:**

Dados do Dremel:

Potência: 125 W

Rotação: 5000 – 30000 rpm (5 velocidades)

Cálculo da velocidade de corte:

$$v = \frac{\pi.d.n}{1000}$$

onde:  $v$  = velocidade de corte (m / min)

$d$  = diâmetro da ferramenta (mm)

$n$  = rotação do motor (rpm)

Utilizando o Dremel em sua mínima rotação ( $n = 25000$  rpm) e uma ferramenta com 1 mm de diâmetro, tem-se:

$$v = \frac{\pi.1.20000}{1000} \Rightarrow v = 62,83 \text{ m / min}$$

**Forças e Potência De Fresamento:**

Cálculo da força de corte:

$$F = \frac{p.b.v_a.r_e}{1000.v}$$

onde:  $F$  = força de corte (kgf)

$p$  = profundidade de corte (mm)

$b$  = largura de corte (mm)

$v_a$  = velocidade de avanço (mm/min)

$r_e$  = resistência específica de corte (kgf/mm<sup>2</sup>)

$v$  = velocidade de corte (m/min)

A resistência específica de corte pode ser estimada como de 3 a 4 vezes o valor da resistência à ruptura por tração ( $\sigma_r$ ) do material sendo usinado.

Cálculo da força de avanço da ferramenta:

$$F_a = 0,40.F$$

onde:  $F_a$  = força de avanço (kgf)

Cálculo do momento torsor:

$$M_t = \frac{F.d}{2}$$

onde:  $M_t$  = momento torsor (kgf.mm)

$d$  = diâmetro da ferramenta (mm)

Cálculo da potência de corte:

$$P = \frac{F.v}{75} \quad \text{onde: } P = \text{potência de corte absorvida (HP)}$$

$v$  = velocidade de corte em m/s

Cálculo da potência do motor:



$$P_m = \frac{P}{\eta_m \cdot \eta_{maq}} \quad \text{onde: } P_m = \text{potência fornecida pelo motor (HP)}$$

$\eta_m$  = rendimento do motor

$\eta_{maq}$  = rendimento da máquina

Considerando o diâmetro da ferramenta  $d = 1$  mm, a largura de corte como a máxima para esta ferramenta ( $b = b_{\max} = d = 1$  mm), rendimentos  $\eta_m = \eta_{maq} = 0,90$  e utilizando todas as unidades no S.I., temos:

$$F = \frac{p \cdot b \cdot v_a \cdot r_e}{1000 \cdot v}$$

$$F_a = 0,4 \cdot F$$

$$M_t = 0,0015 \cdot F$$

$$P_m = 1,170 \cdot F \cdot v$$

Lembrando:

$F$  = força de corte (kgf)

$p$  = profundidade de corte (mm)

$b$  = largura de corte (mm)

$v_a$  = velocidade de avanço (mm/min)

$r_e$  = resistência específica de corte (kgf/mm<sup>2</sup>)

$v$  = velocidade de corte (m/min)

$F_a$  = força de avanço (N)

$M_t$  = momento torsor (N.m)

$P_m$  = potência do motor (W)

Dessa maneira, conhecendo-se do material a ser usinado, a profundidade de corte e as velocidades de corte e avanço recomendadas, estimam-se a força de corte e o momento torsor que surgem durante o fresamento, e a potência necessária no motor.

**Cálculo das forças máximas:**

Para  $v = 62,83 \text{ m/min}$ ,  $p=0.5 \text{ mm}$ ,  $b=1\text{mm}$ ,  $v_a=200 \text{ mm/min}$   
 $Re=1750 \text{ kg/mm}^2$  temos:

$$F = \frac{p \cdot b \cdot v_a \cdot r_e}{1000 \cdot v} \rightarrow F_{max} = 28 \text{ N}$$

$$F_a = 0,4 \cdot F \Rightarrow F_{a_{max}} = 11,2 \text{ N}$$

$$M_t = 0,0015 \cdot F \Rightarrow M_{t_{max}} = 0,042$$

**Cálculo da capacidade das guias lineares:**

**Guias Lineares**

Guia I e III (MDM20-AL-880):

Diâmetro das guias: 20 mm

Diâmetro do fuso: 14 mm

Passo: 5 mm

Curso: 300 mm

Guia II (MDM20-AL-500):

Diâmetro das guias: 20 mm

Diâmetro do fuso: 14 mm

Passo: 5 mm

Curso: 150 mm

**Cálculo das cargas estáticas admissíveis:**

As cargas estáticas admissíveis na guia estão relacionadas a dois tipos básicos de carregamento: carregamento radial (limitado pela capacidade de carga estática do rolamento da guia) e carregamento axial (limitado pela carga de flambagem do fuso). Além disso, há uma carga vertical máxima admissível

sobre o bloco da guia, de acordo com o catálogo do fabricante. Para uma melhor análise do problema, consideremos os seguintes casos de carregamento, que serão utilizados para calcular as cargas máximas nas guias da máquina.

Força aplicada na direção do eixo z

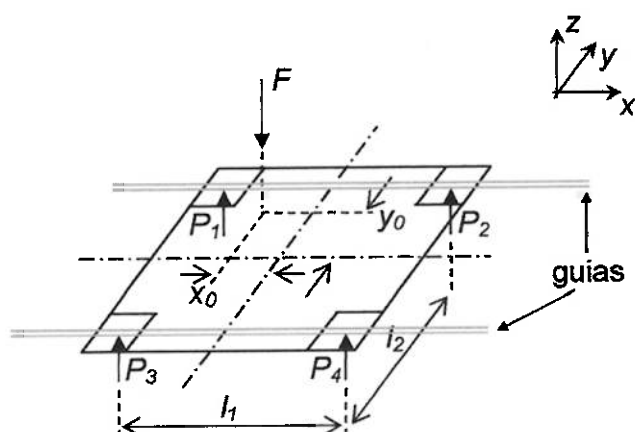


Fig. 5.2.1 - Esquema de uma guia linear com uma força aplicada na direção de z.

-Força aplicada:  $F$

- Reações nos Rolamentos:  $P_1 = \frac{F}{4} + \frac{Fy_0}{2l_2} + \frac{Fx_0}{2l_1}$   $P_2 = \frac{F}{4} + \frac{Fy_0}{2l_2} - \frac{Fx_0}{2l_1}$

$P_3 = \frac{F}{4} - \frac{Fy_0}{2l_2} + \frac{Fx_0}{2l_1}$   $P_4 = \frac{F}{4} - \frac{Fy_0}{2l_2} - \frac{Fx_0}{2l_1}$

Força aplicada na direção do eixo y:

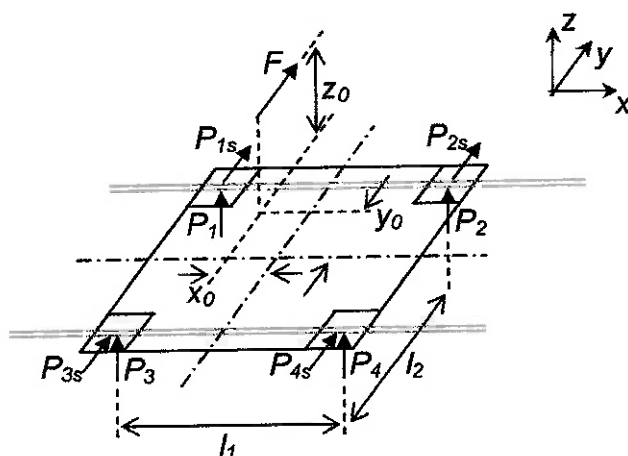


Fig. 5.2.2 - Esquema de uma guia linear com uma força aplicada na direção de  $y$ .

-Força aplicada:  $F$

-Reações nos Rolamentos:  $P_1 = P_2 = \frac{Fz_0}{2l_2}$   $P_3 = P_4 = -\frac{Fz_0}{2l_2}$

$$P_{1s} = P_{3s} = -\frac{F}{4} - \frac{Fx_0}{2l_1}$$

$$P_{2s} = P_{4s} = -\frac{F}{4} + \frac{Fx_0}{2l_1}$$

Força aplicada na direção do eixo  $x$ :

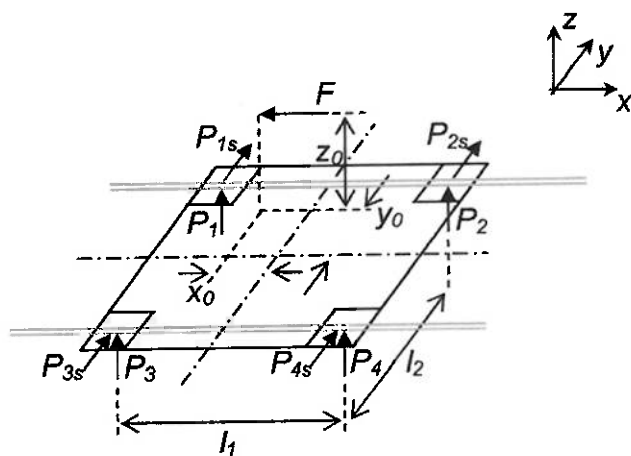


Fig. 5.2.3 - Esquema de uma guia linear com uma força aplicada na direção de  $x$ .

-Força aplicada:  $F$

- Reações nos Rolamentos:  $P_1 = P_3 = \frac{Fz_0}{2l_1}$   $P_2 = P_4 = -\frac{Fz_0}{2l_1}$   $P_{1s} = P_{3s} = \frac{Fy_0}{2l_1}$

$$P_{2s} = P_{4s} = -\frac{Fy_0}{2l_1}$$

Neste caso, deve-se também analisar o efeito da força aplicada no que se refere à flambagem do fuso:

$$F_{flamb} = \frac{1,2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad \text{onde:}$$

$F_{flamb}$  = carga máxima de flambagem (N)

$E$  = módulo de elasticidade (Pa)

$I$  = momento de inércia do fuso (m)

$l$  = comprimento de flambagem (m)

Sabendo que  $E = 207$  GPa (aço),  $I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$  (onde  $d$  é o diâmetro do fuso) e considerando o pior caso em que  $l$  = curso máximo (C), temos:

$$F_{flamb} = 1,2034 \cdot 10^{11} \frac{d^4}{C^2}$$

- Guia I ( $d = 20$  mm,  $C = 680$  mm):

$$F_{flamb}^I = 1,2034 \cdot 10^{11} \frac{(20 \cdot 10^{-3})^4}{(680 \cdot 10^{-3})^2} \Rightarrow 41640,13 \text{ N}$$

Guia II e III ( $d = 20$  mm,  $C = 300$  mm):

$$F_{flamb}^{II} = 1,2034 \cdot 10^{11} \frac{(20 \cdot 10^{-3})^4}{(300 \cdot 10^{-3})^2} \Rightarrow 213937,77 \text{ N}$$

Logo, compara-se o valor da força aplicada a uma certa guia ao valor correspondente obtido acima.

Portanto, a partir do Princípio de Superposição de Efeitos, um carregamento qualquer nas guias pode ser decomposto em casos semelhantes aos apresentados, sendo que o resultado global é obtido somando-se os efeitos de cada componente.

Observação: Todo o equacionamento acima para as guias lineares foi obtido com base em catálogos da NSK. Entretanto, a formulação presente nestes catálogos considera a aplicação de duas forças externas: uma força aplicada na direção de um dos eixos (como foi mostrado neste relatório) e uma força vertical (na direção de z) adicional, que provavelmente corresponderia ao peso de uma estrutura sobre o bloco da guia. Como esta última pode ser decomposta em um caso semelhante ao caso "a", esta força foi desconsiderada, ou seja, a formulação fornecida anteriormente foi obtida a partir do equacionamento presente nos catálogos assumindo o valor da força vertical adicional igual a zero.

Cálculo do coeficiente de segurança devido ao carregamento estático:

$$n_{est} = \frac{P_{adm}}{P_a}$$

onde:  $n_{est}$  = coeficiente de segurança devido ao carregamento estático

$P_{adm}$  = carga estática admissível no rolamento

$P_a$  = carga estática aplicada

Cálculo do coeficiente de segurança devido à carga de flambagem:

$$n_{flamb} = \frac{P_{adm}}{P_a} \quad \text{onde: } n_{flamb} = \text{coeficiente de segurança devido à carga de}$$

flambagem

$P_{adm}$  = carga de flambagem admissível no fuso

$P_a$  = carga axial aplicada no fuso

Cálculo da vida útil dos rolamentos:

$$L = \left( \frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C}{f_W} \cdot \frac{C}{P} \right)^3 \cdot 50 \quad \text{onde:}$$

$L$  = vida útil em km

$f_H$  = coeficiente de dureza

$f_T$  = coeficiente de temperatura

$f_C$  = coeficiente de contato

$f_W$  = coeficiente de carga

$P$  = carga aplicada (N)

$C$  = capacidade de carga dinâmica (N)

Assumindo  $f_H$ ,  $f_T$ ,  $f_C$  e  $f_W$  todos unitários, temos:

$$L = \left( \frac{C}{P} \right)^3 \cdot 50$$

onde:  $L$  = vida útil em km

$P$  = carga aplicada (N)

$C$  = capacidade de carga dinâmica (N)

Analisemos agora os carregamentos a que as guias estão sujeitas na estrutura da máquina.

a) Guia de movimentação da mesa (tipo I)

O caso mais crítico corresponde à situação em que a ferramenta se situa em um vértice da mesa, e em sua posição mais alta.

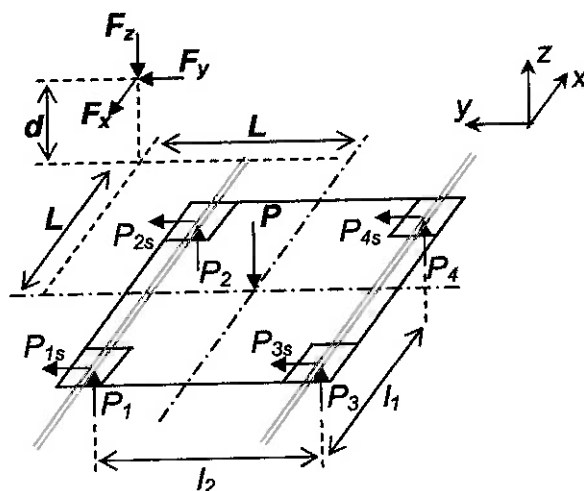


Fig. 5.2.4 - Esquema da guia de movimentação da mesa.

distância entre os planos centrais  
onde:  $l_1$  = transversais de dois rolamentos de uma = 85mm  
mesma guia

$l_2$  = distância entre os planos centrais = 72 mm  
logitudinais de dois rolamentos de guias  
diferentes

$L$  = metade do comprimento do lado da mesa = 150 mm

distância entre a ponta da ferramenta em  
 $d$  = sua posição mais alta e o plano central = 136mm  
da guia

$P$  = peso do bloco da guia + peso da mesa

dimensões do bloco: 300 mm × 300 mm × 10 mm

diâmetro dos furos: 32 mm

peso específico do material: 26700 N/m<sup>3</sup> (alumínio)

peso do bloco: 24,00N

dimensões da mesa: 300 mm × 300 mm × 5 mm

peso específico do material: 26700 N/m<sup>3</sup> (alumínio)

peso da mesa:  $(300 \cdot 300 \cdot 5) \cdot 10^{-9} \cdot (26700) = 12,015 \text{ N}$

(desprezando o volume dos furos)

Logo,  $P = 24,00 + 12,015 = 36,23 \text{ N}$



$F_x$  = força de corte máxima na direção x = 11,2 N

$F_y$  = força de corte máxima na direção y = 11,2 N

$F_z$  = força de corte máxima na direção z = 28 N

I) Carregamento devido à carga  $P$ :

$$P_1^I = \frac{P}{4} + \frac{P \cdot 0}{2l_2} + \frac{P \cdot 0}{2l_1} = \frac{36,23}{4} + \frac{0}{2,72 \cdot 10^{-3}} + \frac{0}{2,85 \cdot 10^{-3}} = 9,06 \text{ N}$$

$$P_2^I = \frac{P}{4} + \frac{P \cdot 0}{2l_2} - \frac{P \cdot 0}{2l_1} = 9,06 \text{ N}$$

$$P_3^I = \frac{P}{4} - \frac{P \cdot 0}{2l_2} + \frac{P \cdot 0}{2l_1} = 9,06 \text{ N}$$

$$P_4^I = \frac{P}{4} - \frac{P \cdot 0}{2l_2} - \frac{P \cdot 0}{2l_1} = 9,06 \text{ N}$$

II) Carregamento devido à carga  $F_x$ :

$$P_1^{II} = P_3^{II} = \frac{F_x d}{2l_1} = \frac{11,2 \cdot 136 \cdot 10^{-3}}{2,85 \cdot 10^{-3}} = 8,96 \text{ N}$$

$$P_2^{II} = P_4^{II} = -\frac{F_x d}{2l_1} = -8,96 \text{ N}$$

$$P_{1s}^{II} = P_{3s}^{II} = \frac{F_x L}{2l_1} = 9,88 \text{ N}$$

$$P_{2s}^{II} = P_{4s}^{II} = -\frac{F_x L}{2l_1} = -9,88 \text{ N}$$

$$\text{Logo, } P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{II})^2 + (P_{1s}^{II})^2} = 20,55$$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{II})^2 + (P_{2s}^{II})^2} = 9,88 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{II})^2 + (P_{3s}^{II})^2} = 20,55 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{II})^2 + (P_{4s}^{II})^2} = 9,88 \text{ N}$$

III) Carregamento devido à carga  $F_y$ :

$$P_1^{III} = P_2^{III} = \frac{F_y d}{2l_2} = \frac{101,148.136.10^{-3}}{2.72.10^{-3}} = 10,58 \text{ N}$$

$$P_3^{III} = P_4^{III} = -\frac{F_y d}{2l_2} = -10,58 \text{ N}$$

$$P_{1s}^{III} = P_{3s}^{III} = -\frac{F_y}{4} - \frac{F_y(-L)}{2l_1} = 7,08 \text{ N}$$

$$P_{2s}^{III} = P_{4s}^{III} = -\frac{F_y}{4} + \frac{F_y(-L)}{2l_1} = -12,68 \text{ N}$$

Logo,  $P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{III})^2 + (P_{1s}^{III})^2} = 20,87 \text{ N}$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{III})^2 + (P_{2s}^{III})^2} = 23,37 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{III})^2 + (P_{3s}^{III})^2} = 7,24 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{III})^2 + (P_{4s}^{III})^2} = 12,77 \text{ N}$$

#### IV) Carregamento devido à carga $F_z$ :

$$P_1^{IV} = \frac{F_z}{4} + \frac{F_z \cdot L}{2l_2} + \frac{F_z \cdot (-L)}{2l_1} = 11,47 \text{ N}$$

$$P_2^{IV} = \frac{F_z}{4} + \frac{F_z \cdot L}{2l_2} - \frac{F_z \cdot (-L)}{2l_1} = 60,87 \text{ N}$$

$$P_3^{IV} = \frac{F_z}{4} - \frac{F_z \cdot L}{2l_2} + \frac{F_z \cdot (-L)}{2l_1} = -46,87 \text{ N}$$

$$P_4^{IV} = \frac{F_z}{4} - \frac{F_z \cdot L}{2l_2} - \frac{F_z \cdot (-L)}{2l_1} = 2,53 \text{ N}$$

$$\text{Logo, } P_1 = |P_1^I + P_1^{IV}| = 20,53 \text{ N}$$

$$P_2 = |P_2^I + P_2^{IV}| = 69,93 \text{ N}$$

$$P_3 = |P_3^I + P_3^{IV}| = -37,81 \text{ N}$$

$$P_4 = |P_4^I + P_4^{IV}| = 11,59 \text{ N}$$

Portanto, o rolamento mais carregado é o nº 2 ( $P_{m\acute{a}x} = 69,93 \text{ N}$ , sob furação na direção z).

Carga normal sobre o bloco =  $P + F_z = 97,93 \text{ N} < 2276 \text{ N}$  (carga admissível sobre o bloco dada no catálogo)

Carga estática admissível no rolamento:  $C_o = 1370 \text{ N}$  (catálogo)

Capacidade de carga dinâmica do rolamento:  $C = 862 \text{ N}$  (catálogo)

Carga axial máxima aplicada no fuso:  $F_{axial} = F_x = 11,2 \text{ N}$

$$\text{Coeficiente de segurança estático: } n_{est} = \frac{C_o}{P_{m\acute{a}x}} = \frac{1370}{69,93} = 19,59$$

$$\text{Coeficiente de segurança à flambagem: } n_{flamb} = \frac{F_{flamb}^I}{F_{axial}} = \frac{41640,13}{11,2} = 3717,87$$

Vida útil mínima:  $L = \left( \frac{C}{P_{máx}} \right)^3 . 50 = \left( \frac{862}{69,93} \right)^3 . 50 = 93648,59 \text{ km}$

### Guia de movimentação vertical da ferramenta

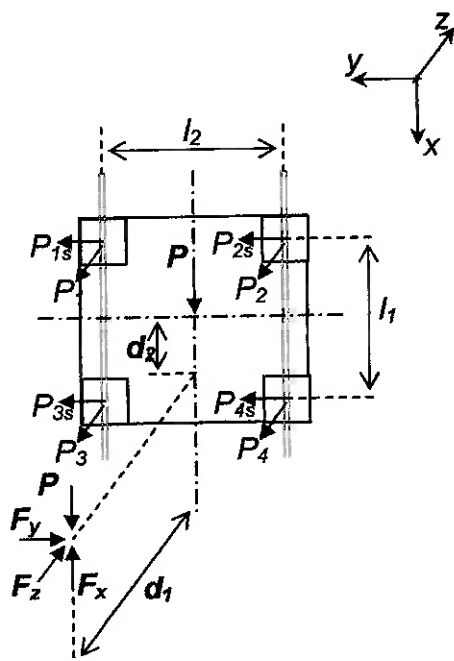


Fig. 5.2.5 - Esquema da guia de movimentação vertical da ferramenta.

distância entre os planos centrais transversais de dois rolamentos de uma mesma guia	= 64 mm
onde: $l_1 =$	
$l_2 =$ distância entre os planos centrais longitudinais de dois rolamentos de guias diferentes	= 52 mm
$d_1 =$ distância entre o eixo de simetria da ferramenta e o plano central do bloco da guia	= 58,1 mm
$d_2 =$ distância vertical entre a ponta da ferramenta e o plano central horizontal da guia	= 110 mm

$P =$  peso do bloco da guia

dimensões do bloco: 100 mm × 100 mm × 36 mm

diâmetro dos furos: 26 mm

peso específico do material: 26600 N/m<sup>3</sup> (alumínio)

$$\text{Logo, } P = \left[ (100 \cdot 100 \cdot 36) - 2 \cdot \pi \left( \frac{26}{2} \right)^2 \cdot 100 \right] \cdot 10^{-9} \cdot (26600) = 6,75 \text{ N}$$

$P_d$  = peso do Dremel = 25 N

$F_x$  = força de corte máxima na direção x = 28,00N

$F_y$  = força de corte máxima na direção y = 11,2N

$F_z$  = força de corte máxima na direção z = 11,2N

I) Carregamento devido à carga  $P_d$  (carga  $P$  só age axialmente):

$$P_1^I = P_3^I = \frac{(-P_d)(-d_1)}{2l_1} = 6,8 \text{ N}$$

$$P_2^I = P_4^I = -\frac{(-P_d)(-d_1)}{2l_1} = -6,8 \text{ N}$$

$$P_{1s}^I = P_{3s}^I = \frac{(-P_d) \cdot 0}{2l_1} = 0$$

$$P_{2s}^I = P_{4s}^I = \frac{(-P_d) \cdot 0}{2l_1} = 0$$

II) Carregamento devido à carga  $F_x$ :

$$P_1^{II} = P_3^{II} = \frac{F_x(-d_1)}{2l_1} = -12,70 \text{ N}$$

$$P_2^{II} = P_4^{II} = -\frac{F_x(-d_1)}{2l_1} = 12,70 \text{ N}$$

$$P_{1s}^{II} = P_{3s}^{II} = \frac{F_x \cdot 0}{2l_1} = 0$$

$$P_{2s}^{II} = P_{4s}^{II} = -\frac{F_x \cdot 0}{2l_1} = 0$$

$$\text{Logo, } P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{II})^2 + (P_{1s}^I + P_{1s}^{II})^2} = 5,9 \text{ N}$$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{II})^2 + (P_{2s}^I + P_{2s}^{II})^2} = 5,9 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{II})^2 + (P_{3s}^I + P_{3s}^{II})^2} = 5,9 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{II})^2 + (P_{4s}^I + P_{4s}^{II})^2} = 5,9 \text{ N}$$

III) Carregamento devido à carga  $F_y$ :

$$P_1^{III} = P_2^{III} = \frac{(-F_y)(-d_1)}{2l_2} = 6,25 \text{ N}$$

$$P_3^{III} = P_4^{III} = -\frac{(-F_y)(-d_1)}{2l_2} = -6,25 \text{ N}$$

$$P_{1s}^{III} = P_{3s}^{III} = -\frac{(-F_y)}{4} - \frac{(-F_y)(-d_2)}{2l_1} = -6,825 \text{ N}$$

$$P_{2s}^{III} = P_{4s}^{III} = -\frac{(-F_y)}{4} + \frac{(-F_y)(-d_2)}{2l_1} = 12,425 \text{ N}$$

Logo,  $P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{III})^2 + (P_{1s}^I + P_{1s}^{III})^2} = 14,73 \text{ N}$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{III})^2 + (P_{2s}^I + P_{2s}^{III})^2} = 12,43 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{III})^2 + (P_{3s}^I + P_{3s}^{III})^2} = 6,85 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{III})^2 + (P_{4s}^I + P_{4s}^{III})^2} = 12,43 \text{ N}$$

IV) Carregamento devido à carga  $F_z$ :

$$P_1^{IV} = \frac{(-F_z)}{4} + \frac{(-F_z).0}{2l_2} + \frac{(-F_z)(-d_2)}{2l_1} = 6,825 \text{ N}$$

$$P_2^{IV} = \frac{(-F_z)}{4} + \frac{(-F_z).0}{2l_2} - \frac{(-F_z)(-d_2)}{2l_1} = -12,425 \text{ N}$$

$$P_3^{IV} = \frac{(-F_z)}{4} - \frac{(-F_z).0}{2l_2} + \frac{(-F_z)(-d_2)}{2l_1} = 6,825 \text{ N}$$

$$P_4^{IV} = \frac{(-F_z)}{4} - \frac{(-F_z).0}{2l_2} - \frac{(-F_z)(-d_2)}{2l_1} = -12,425 \text{ N}$$

$$\text{Logo, } P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{IV})^2 + (P_{1s}^I)^2} = 13,625 \text{ N}$$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{IV})^2 + (P_{2s}^I)^2} = 5,625 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{IV})^2 + (P_{3s}^I)^2} = 13,625 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{IV})^2 + (P_{4s}^I)^2} = 5,625 \text{ N}$$

Portanto, os rolamentos mais carregados são os para fresamento na direção y ( $P_{máx} = 14,73 \text{ N}$ ).

Carga normal sobre o bloco =  $F_z = 11,2 \text{ N} < 1526 \text{ N}$  (carga admissível sobre o bloco dada no catálogo)

Carga estática admissível no rolamento:  $C_o = 892 \text{ N}$  (catálogo)

Capacidade de carga dinâmica do rolamento:  $C = 578 \text{ N}$  (catálogo)

Carga axial máxima aplicada no fuso:  $F_{axial} = F_x - P - P_d = 3,75 \text{ N}$

$$\text{Coeficiente de segurança estático: } n_{est} = \frac{C_o}{P_{máx}} = \frac{892}{131,13} = 60,55$$

$$\text{Coeficiente de segurança à flambagem: } n_{flamb} = \frac{F_{flamb}^{II}}{F_{axial}} = \frac{213937,77}{3,75} = 57050,072$$

$$\text{Vida útil mínima: } L = \left( \frac{C}{P_{máx}} \right)^3 \cdot 50 = \left( \frac{578}{14,73} \right)^3 \cdot 50 = 3020962 \text{ km}$$

c) Guia de movimentação horizontal da ferramenta (tipo I)

O caso mais crítico corresponde à ferramenta em sua posição mais baixa.

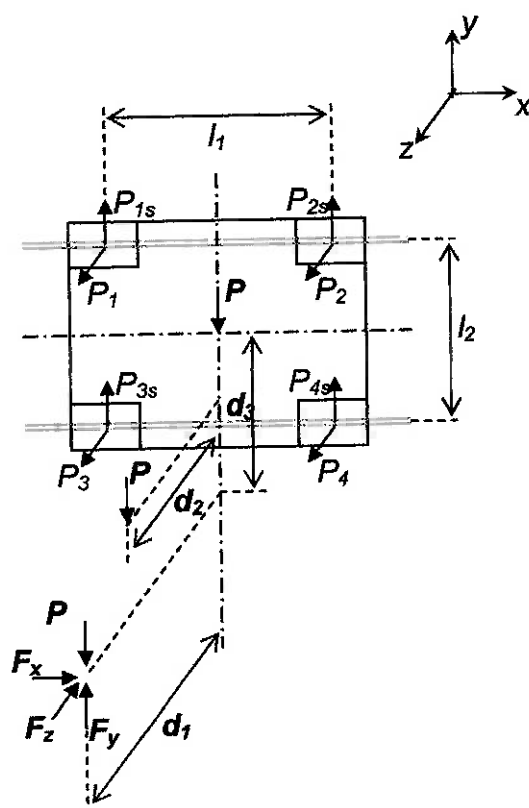


Fig. 5.2.6 - Esquema da guia de movimentação horizontal da ferramenta.

distância entre os planos centrais transversais de dois rolamentos de uma mesma guia	= 85 mm
onde: $l_1 =$	
distância entre os planos centrais longitudinais de dois rolamentos de guias diferentes	= 72 mm
$l_2 =$	
distância entre o eixo de simetria da ferramenta e o plano central do bloco da guia	= 111,8 mm
$d_1 =$	
distância entre os planos centrais das guias de movimentação horizontal e vertical da ferramenta	= 53,7 mm
$d_2 =$	
distância vertical entre a ponta da ferramenta em sua posição mais baixa e o plano central horizontal da guia	= 170,2 mm
$d_3 =$	

$P =$  peso do bloco da guia = 15,12 N

$P_d =$  peso do Dremel = 25 N



$P_g$  = peso da guia de movimentação vertical da ferramenta e do motor = 21,60 N

$F_x$  = força de corte máxima na direção x = 11,2 N

$F_y$  = força de corte máxima na direção y = 28 N

$F_z$  = força de corte máxima na direção z = 11,2 N

I) Carregamento devido à carga  $P_g$ :

$$P_1^I = P_2^I = \frac{(-P_g).d_2}{2l_2} = -8,06 \text{ N}$$

$$P_3^I = P_4^I = -\frac{(-P_g).d_2}{2l_2} = 8,06 \text{ N}$$

$$P_{1s}^I = P_{3s}^I = -\frac{(-P_g)}{4} - \frac{(-P_g).0}{2l_1} = 5,40 \text{ N}$$

$$P_{2s}^I = P_{4s}^I = -\frac{(-P_g)}{4} + \frac{(-P_g).0}{2l_1} = 5,40 \text{ N}$$

II) Carregamento devido à carga  $P_d$ :

$$P_1^{II} = P_2^{II} = \frac{(-P_d).d_1}{2l_2} = -11,64 \text{ N}$$

$$P_3^{II} = P_4^{II} = -\frac{(-P_d).d_1}{2l_2} = 11,64 \text{ N}$$

$$P_{1s}^{II} = P_{3s}^{II} = -\frac{(-P_d)}{4} - \frac{(-P_d).0}{2l_1} = 3,75 \text{ N}$$

$$P_{2s}^{II} = P_{4s}^{II} = -\frac{(-P_d)}{4} + \frac{(-P_d).0}{2l_1} = 3,75 \text{ N}$$

III) Carregamento devido à  $P$ :

$$P_1^{III} = P_2^{III} = \frac{(-P).0}{2l_2} = 0$$

$$P_3^{III} = P_4^{III} = -\frac{(-P).0}{2l_2} = 0$$

$$P_{1s}^{III} = P_{3s}^{III} = -\frac{(-P)}{4} - \frac{(-P).0}{2l_1} = 3,78 \text{ N}$$

$$P_{2s}^{III} = P_{4s}^{III} = -\frac{(-P)}{4} + \frac{(-P).0}{2l_1} = 3,78 \text{ N}$$

**IV) Carregamento devido à carga  $F_x$ :**

$$P_1^{IV} = P_3^{IV} = \frac{(-F_x).d_1}{2l_1} = -7,37 \text{ N}$$

$$P_2^{IV} = P_4^{IV} = -\frac{(-F_x).d_1}{2l_1} = 7,37 \text{ N}$$

$$P_{1s}^{IV} = P_{3s}^{IV} = \frac{(-F_x).(-d_3)}{2l_1} = 11,21 \text{ N}$$

$$P_{2s}^{IV} = P_{4s}^{IV} = -\frac{(-F_x).(-d_3)}{2l_1} = -11,21 \text{ N}$$

$$\text{Logo, } P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{II} + P_1^{III} + P_1^{IV})^2 + (P_{1s}^I + P_{1s}^{II} + P_{1s}^{III} + P_{1s}^{IV})^2} = 36,27 \text{ N}$$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{II} + P_2^{III} + P_2^{IV})^2 + (P_{2s}^I + P_{2s}^{II} + P_{2s}^{III} + P_{2s}^{IV})^2} = 12,45 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{II} + P_3^{III} + P_3^{IV})^2 + (P_{3s}^I + P_{3s}^{II} + P_{3s}^{III} + P_{3s}^{IV})^2} = 27,10 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{II} + P_4^{III} + P_4^{IV})^2 + (P_{4s}^I + P_{4s}^{II} + P_{4s}^{III} + P_{4s}^{IV})^2} = 27,12 \text{ N}$$

**V) Carregamento devido à carga  $F_y$ :**

$$P_1^V = P_2^V = \frac{F_y.d_1}{2l_2} = 21,74 \text{ N}$$

$$P_3^V = P_4^V = -\frac{F_y.d_1}{2l_2} = -21,74 \text{ N}$$

$$P_{1s}^V = P_{3s}^V = -\frac{F_y}{4} - \frac{F_y.0}{2l_1} = -7 \text{ N}$$

$$P_{2s}^V = P_{4s}^V = -\frac{F_y}{4} + \frac{F_y \cdot 0}{2l_1} = -7 \text{ N}$$

$$\text{Logo, } P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{II} + P_1^{III} + P_1^V)^2 + (P_{1s}^I + P_{1s}^{II} + P_{1s}^{III} + P_{1s}^V)^2} = 6,27 \text{ N}$$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{II} + P_2^{III} + P_2^V)^2 + (P_{2s}^I + P_{2s}^{II} + P_{2s}^{III} + P_{2s}^V)^2} = 6,27 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{II} + P_3^{III} + P_3^V)^2 + (P_{3s}^I + P_{3s}^{II} + P_{3s}^{III} + P_{3s}^V)^2} = 6,27 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{II} + P_4^{III} + P_4^V)^2 + (P_{4s}^I + P_{4s}^{II} + P_{4s}^{III} + P_{4s}^V)^2} = 6,27 \text{ N}$$

VI) Carregamento devido à carga  $F_z$ :

$$P_1^{VI} = \frac{F_z}{4} + \frac{F_z \cdot (-d_3)}{2l_2} + \frac{F_z \cdot 0}{2l_1} = -10,43 \text{ N}$$

$$P_2^{VI} = \frac{F_z}{4} + \frac{F_z \cdot (-d_3)}{2l_2} - \frac{F_z \cdot 0}{2l_1} = -10,43 \text{ N}$$

$$P_3^{VI} = \frac{F_z}{4} - \frac{F_z \cdot (-d_3)}{2l_2} + \frac{F_z \cdot 0}{2l_1} = 16,03 \text{ N}$$

$$P_4^{VI} = \frac{F_z}{4} - \frac{F_z \cdot (-d_3)}{2l_2} - \frac{F_z \cdot 0}{2l_1} = 16,03 \text{ N}$$

$$\text{Logo, } P_1 = \sqrt{(P_1^I + P_1^{II} + P_1^{III} + P_1^{VI})^2 + (P_{1s}^I + P_{1s}^{II} + P_{1s}^{III})^2} = 32,78 \text{ N}$$

$$P_2 = \sqrt{(P_2^I + P_2^{II} + P_2^{III} + P_2^{VI})^2 + (P_{2s}^I + P_{2s}^{II} + P_{2s}^{III})^2} = 32,78 \text{ N}$$

$$P_3 = \sqrt{(P_3^I + P_3^{II} + P_3^{III} + P_3^{VI})^2 + (P_{3s}^I + P_{3s}^{II} + P_{3s}^{III})^2} = 38,00 \text{ N}$$

$$P_4 = \sqrt{(P_4^I + P_4^{II} + P_4^{III} + P_4^{VI})^2 + (P_{4s}^I + P_{4s}^{II} + P_{4s}^{III})^2} = 38,00 \text{ N}$$

Portanto, os rolamentos mais carregados são os para furação na direção y

( $P_{máx} = 38,00 \text{ N}$ ).

Carga normal sobre o bloco =  $F_z = 11,2\text{ N} < 2276\text{ N}$  (carga admissível sobre o bloco dada no catálogo)

Carga estática admissível no rolamento:  $C_o = 1370\text{ N}$  (catálogo)

Capacidade de carga dinâmica do rolamento:  $C = 862\text{ N}$  (catálogo)

Carga axial máxima aplicada no fuso:  $F_{axial} = F_x = 11,2\text{ N}$

$$\text{Coeficiente de segurança estático: } n_{est} = \frac{C_o}{P_{máx}} = \frac{1370}{38,00} = 36,05$$

$$\text{Coeficiente de segurança à flambagem: } n_{flamb} = \frac{F_{flamb}^I}{F_{axial}} = \frac{41640,13}{36,05} = 1155,066$$

$$\text{Vida útil mínima: } L = \left( \frac{C}{P_{máx}} \right)^3 \cdot 50 = \left( \frac{862}{38} \right)^3 \cdot 50 = 583634,57\text{ km}$$

### 5.3. Cálculo dos Motores

**Motor I (Motor que aciona fuso que contém a mesa com a placa)**

Inércia do Fuso

$$J_f = \frac{1}{2} \rho \cdot r^4 \cdot l \cdot \pi \rightarrow J_f = 3900 \cdot 0,55 \cdot \left( \frac{14}{1000} \right)^4 \cdot \pi \rightarrow J_f = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$$

Inércia da Massa

$$J_m = \frac{m}{\eta} \left( \frac{p}{2 \cdot \pi} \right)^2 \rightarrow J_m = \frac{3}{0,9} \left( \frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 2,11 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

$$J_{motor} = 0,18 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

$$J_{total} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$$

$$\text{Torque} = J_{total} \cdot \alpha \rightarrow 0,350 = 2,58 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha$$

$$\alpha = 1268,11 \text{ rad/s}^2$$

**Motor II ( Motor que movimenta o fuso do eixo Y)**

Para o motor II, vemos que a única alteração é a inércia da massa em relação ao sistema do motor I, porém a contribuição da inércia da massa é muito

pequena frente as outras grandezas, assim podemos despreza-la e adotar que o sistema do Motor I = Sistema Motor 2.

### **Motor III (Aciona o fuso da guia que contém a Dremel)**

$$J_f = \frac{1}{2} \rho \cdot r^4 \cdot l \cdot \pi \rightarrow J_f = 2145.0,173 \left( \frac{9}{1000} \right)^4 \cdot \pi \rightarrow J_f = 7,65 \cdot 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$$

**Inércia da Massa**

$$J_m = \frac{m}{\eta} \left( \frac{p}{2 \cdot \pi} \right)^2 \rightarrow J_m = \frac{5}{0,9} \left( \frac{0,003}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 1,27 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

**Inércia do Motor**

$$J_{motor} = 0,18 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

**Inércia Total**

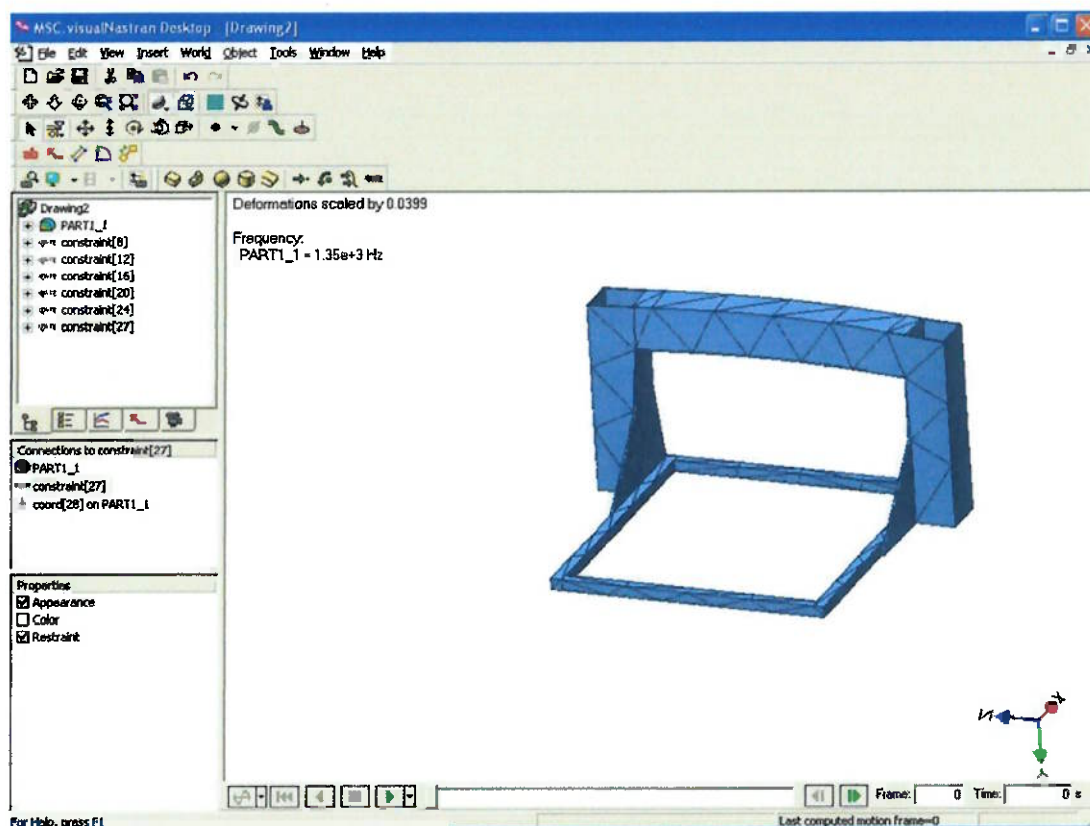
$$J_{total} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ Kg.m}^2$$

$$Torque = J_{total} \cdot \alpha \rightarrow 0,3 = 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha$$

$$\alpha = 11111,11 \text{ rad} / \text{s}^2$$

## **5.4. Elementos Finitos**

Para realizar os cálculos de elementos finitos, foi usado o software da empresa MSC, chamado VISUAL NASTRAN. Foram feitos 2 tipos de cálculos, primeiramente foi achado as frequências de ressonância da estrutura. A estrutura projetada não poderia ter nenhuma frequência de ressonância na faixa de 0 a 500 Hz, pois essa é a faixa de operação da máquina. Ao realizarmos os cálculos, achamos que a primeira frequência de ressonância da máquina é de 1350 Hz.



**Figure 5.4.1 – Frequência de ressonância da estrutura**

O segundo tipo de cálculo realizado foi o cálculo de rigidez da estrutura. Foi adicionado uma força de 10 Kg em um lugar estratégico da estrutura, onde causaria uma deformação máxima, e foram calculadas as deformações da estrutura inteira. O requisito da estrutura nesse caso é a de ter a menor deformação possível.

Deformations scaled by  $1.67 \times 10^3$

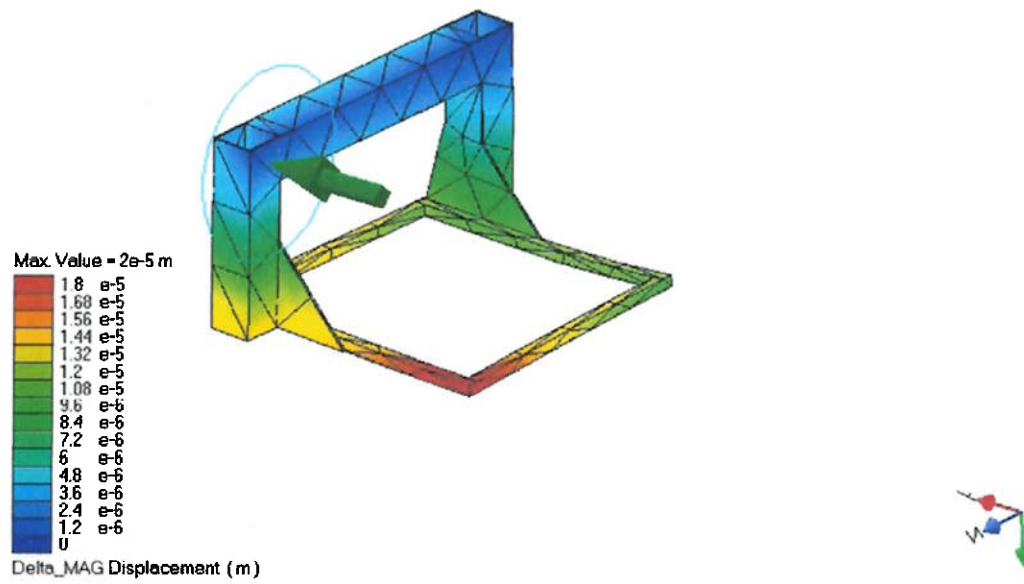


Figure 5.4.2 - Deformação da estrutura

Nesse caso a deformação máxima da estrutura foi de 0.02 mm, o que atende bem os requisitos da máquina.

## 6. FABRICAÇÃO

### 6.1. Estrutura mecânica

Depois de terminado o projeto mecânico, com todas tensões, deformações e frequências de ressonância verificadas em elementos finitos, deu-se início a fase da fabricação mecânica.

Algumas peças foram compradas prontas, entre elas estão as guias lineares com fusos de esferas recirculantes, os acoplamentos dos motores, e rolamentos para o eixo de precisão.

As fotos abaixo mostram a montagem da fresadora ao longo do semestre.



Fig. 6.1.1 - Mesas de suporte em alumínio





**Fig. 6.1.2 - Montagem da estrutura**



**Fig. 6.1.3 - Mesa onde será presa a placa de fenolite**



**Fig. 6.1.4 - Suporte da Dremmel**



**Fig. 6.1.5 - Mesa de alumínio**

## 6.2. Ligação Física Máquina – Computador

Para interligar o computador e a máquina, foi necessário construir um pequeno hardware que transmitisse o sinal da porta paralela do PC para os drivers de acionamento dos motores. Essa placa consiste de interligar os 8 Bits da porta 378 e o bit 1 da porta 37A que fazem parte da porta paralela do PC. Para tal tarefa foram escolhidos resistores de 330 Ohms e  $\frac{1}{4}$  W que mantém a corrente de saída da porta paralela em um tal nível que a porta não queime e ainda por cima mantenha uma certa magnitude no sinal para que o driver consiga detectá-lo. Por fim foi feito na placa, uma estação que serve como terra geral do Computador e Drivers. A seguir segue o Layout da placa:

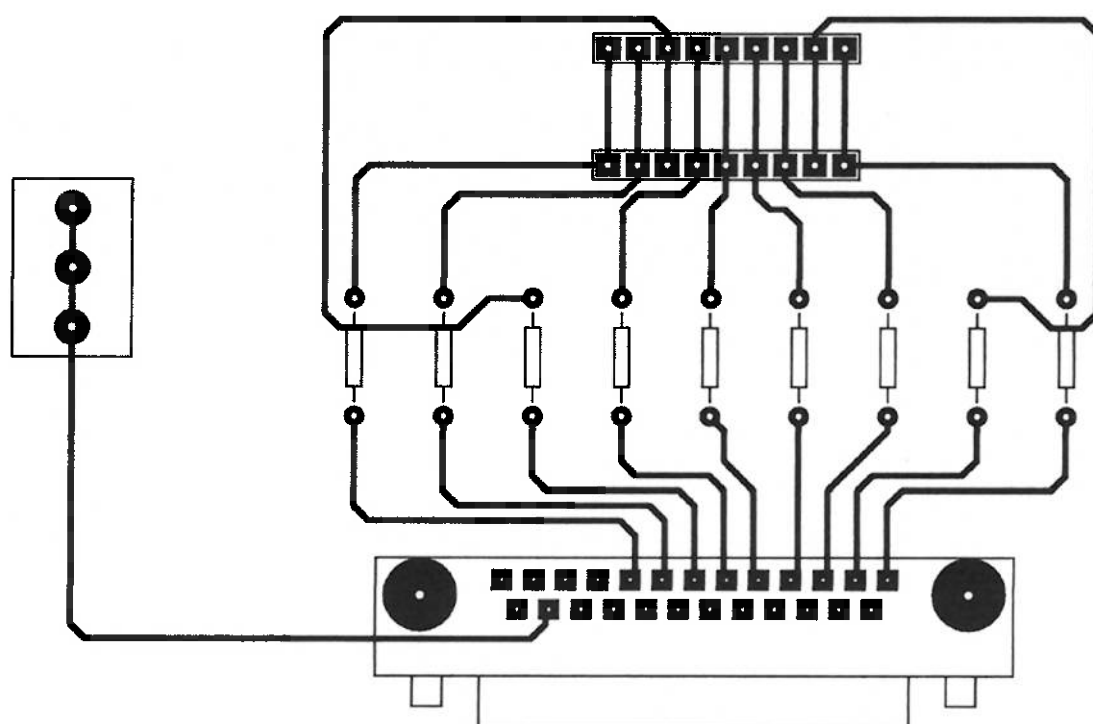


Fig. 6.2.1 - Layout da placa que interliga motores ao PC



## 6.3. Componentes Auxiliares

### 6.3.1. Fonte de Tensão

Para alimentar os motores de passo, foi necessário comprar uma fonte chaveada de 110V / 12V – 15 A.

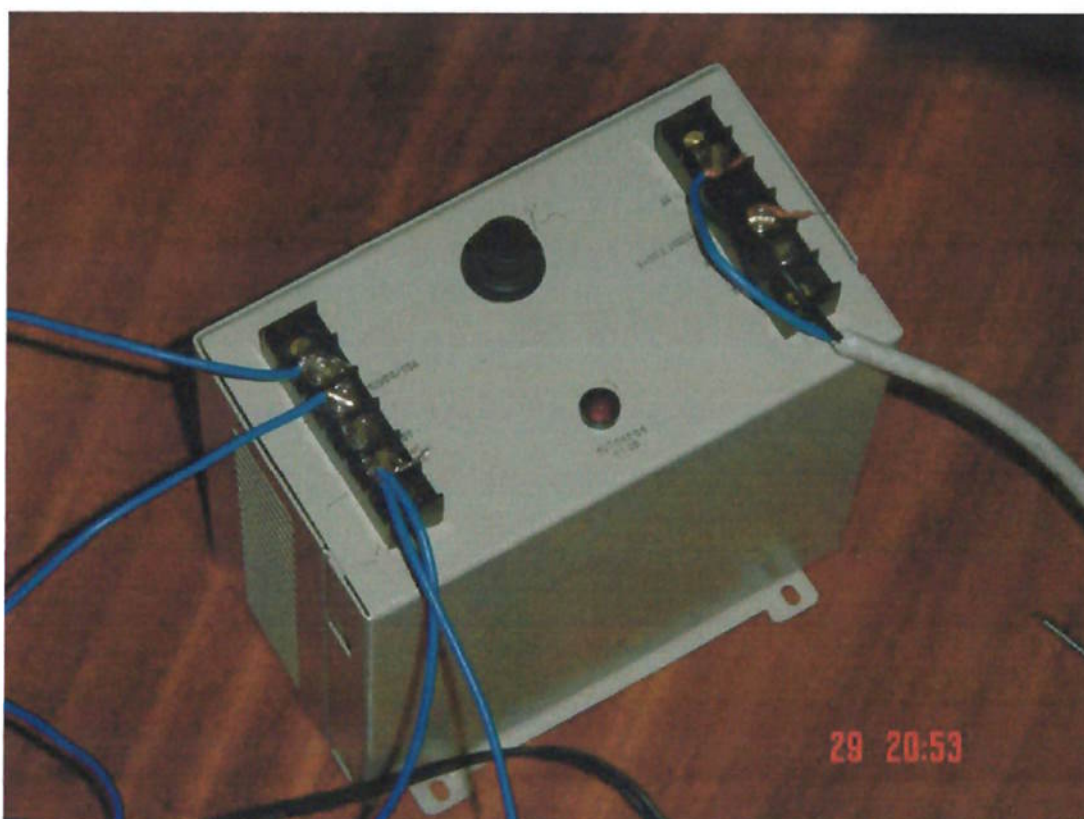
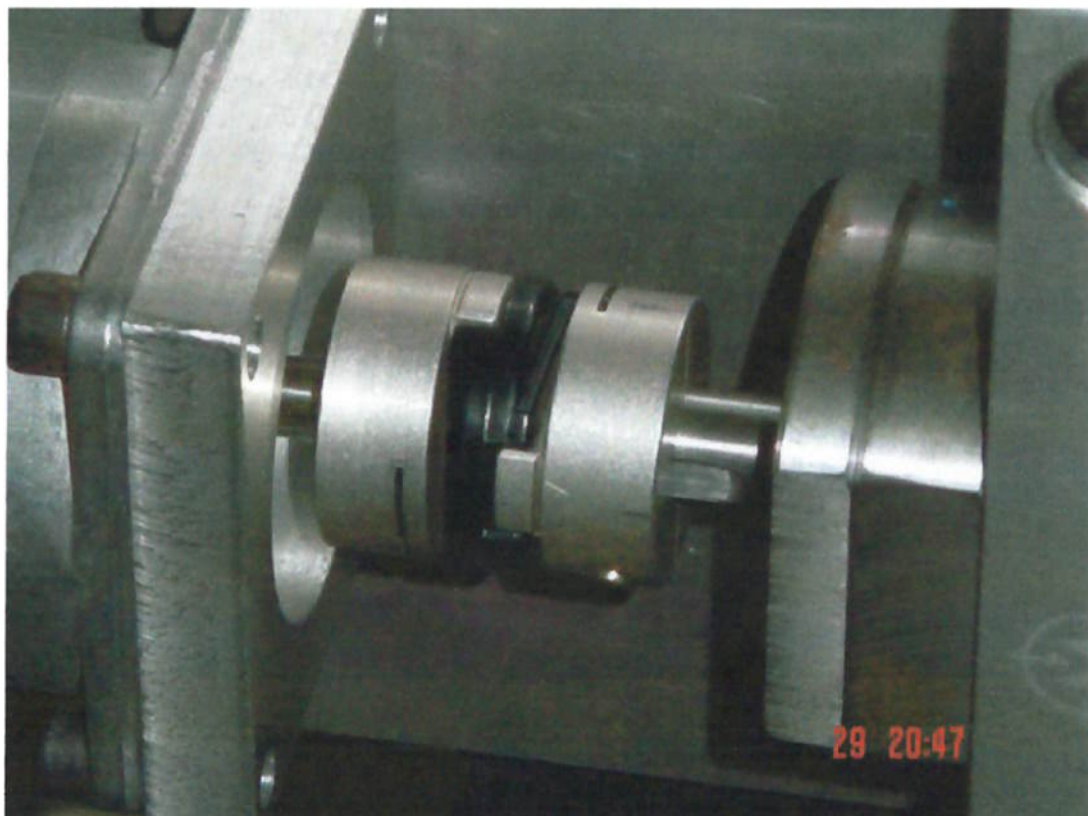


Fig. 6.3.1.1 - Fonte de tensão

### 6.3.2. Acoplamentos Flexíveis

É indispensável o uso de acoplamentos elásticos para acoplar guias lineares com os motores de passo. O motivo para isso, é que sempre há um desalinhamento entre os motores de passo e o eixo do fuso da guia, se usarmos acoplamentos rígidos, provavelmente não poderíamos utilizar os motores de passo na velocidade planejada, pois ocorreria perda de passos no

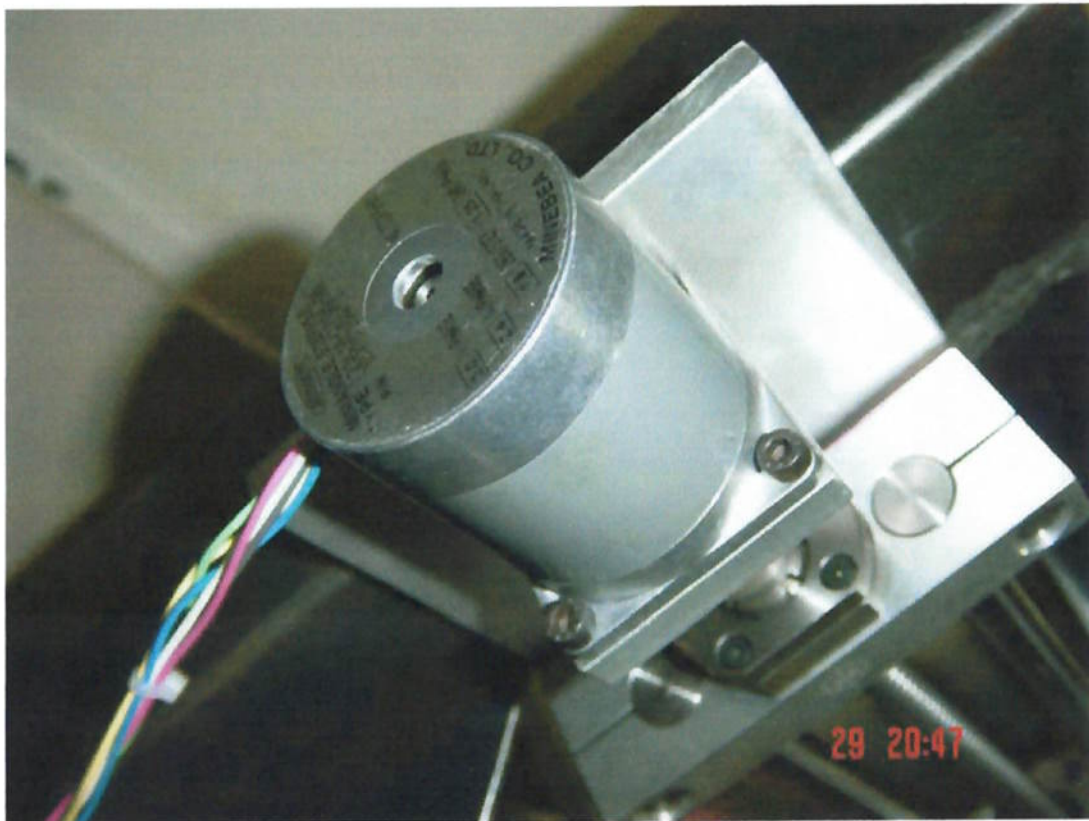
motor. O acoplamento usado em questão é da marca Guardian e o modelo é Oldham .



**Fig. 6.3.2.1 - Acoplamentos flexíveis**

### **6.3.3. Motores de Passo**

Para esse Projeto foram usados 3 motores de passo da marca Astrosyn. As características desses motores são 400 passos por volta, alimentação 3,2 V e 2,4 A por fase.



**Fig. 6.3.3.1 - Motor de passo**

## 7. REQUISITOS DE CONTROLE

### 7.1. Projeto Eletrônico

#### 7.1.1. Placa acionadora de motor de passo

Para o acionamento dos motores, são usados dois circuitos integrados, um circuito de lógica que é o L297 e o circuito de potencia L298. O datasheet do L297 fornece um circuito recomendado para acionamento de motores de passo, como mostra a figura abaixo:

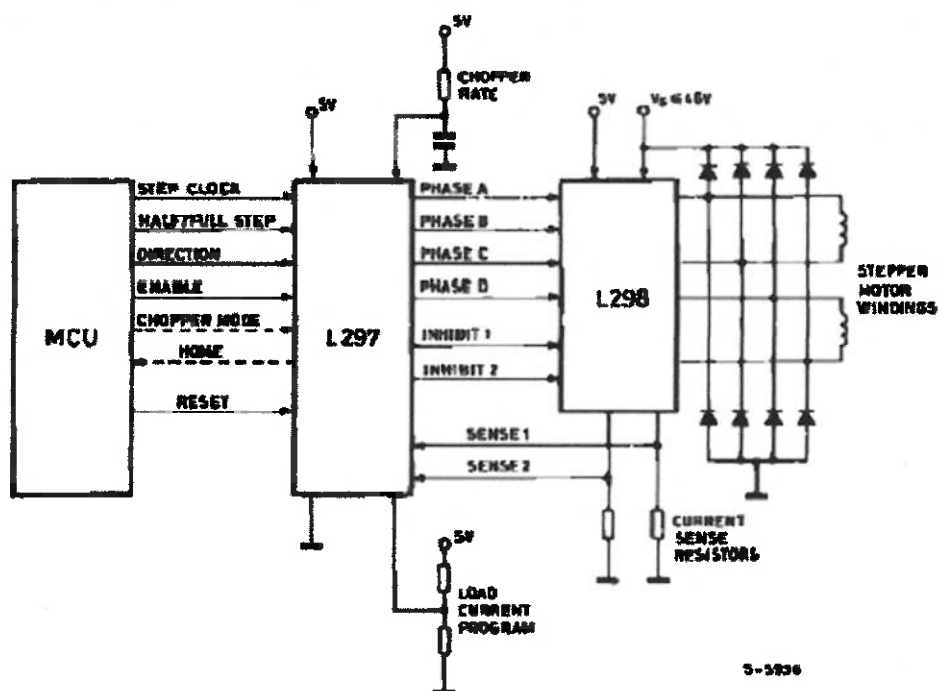


Fig. 7.1.1.1 - Circuito básico do driver dos motores

OBS: Os drivers usados neste projeto foram emprestados pela EPUSP

## 7.2. Parâmetros de usinagem

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \cdot f_z \cdot \sin(\chi_r) \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)$$

onde,

$h_m$  é a espessura do cavaco

$\varphi_1$  é o ângulo entre o ponto de entrada e a vertical

$\varphi_2$  é o ângulo entre o ponto de saída e a vertical

$f_z$  é o avanço por dente

$\chi_r$  é o ângulo de posição

Considerando que para fresamento frontal a espessura do cavaco deve ser maior que 0,1 mm e que os parâmetros para este caso são:  $\chi_r=90^\circ$ ,  $\varphi_1=0$ ,  $\varphi_2=\pi$ , tem-se:

$$h_m = \frac{1}{\pi - 0} \cdot f_z \cdot \sin(90^\circ) \cdot (\cos 0 - \cos \pi) > 0,1mm$$

isso resulta em:  $f_z > 0,16mm$

Como a ferramenta é feita de metal duro e o material a ser usinado é cobre, foi procurada uma tabela com valores para esses materiais (vide [1]). Assim, foi possível calcular as velocidades de corte, avanço e a potência:

Da tabela:

$f_z = 0,007 \text{ in}$

$K = 0,84$ , que é uma constante do cobre

Outros parâmetros:

$W = \frac{1}{32} \text{ in}$ , que é largura do corte, neste caso é o diâmetro da ferramenta

$H = 0,004 \text{ in}$ , que é a profundidade do corte

$N = 30000 \text{ rpm}$ , rotação máxima da Dremel

$n = 2$  dentes, número de dentes da ferramenta

- Velocidade de corte:

$$V_c = \frac{\pi DN}{12} = \frac{\pi \cdot 0,03 \cdot 30000}{12} = 235,6 \text{ fpm} = 71,8 \text{ m/min}$$



- Velocidade de avanço:

$$V_f = f_z n N = 0,007.2.30000 = 420 \text{ in/min} = 10,7 \text{ m/min}$$

- Potência:

$$h_{pc} = \frac{f_z n N W H}{K} = \frac{0,007.2.30000.0,03.0,004}{0,84} = 0,06 \text{ HP} = 45 \text{ W}$$

Por questões de segurança e para garantir que os motores de passo não perderão passo, serão usadas velocidades bem menores que estas.

## 8. PROJETO DO INTERPRETADOR

Depois de desenhada e roteada a placa em um software apropriado, o desenho será salvo em um arquivo usando a linguagem HP-GL, como já dito antes. A finalidade do interpretador é ler os dados contidos neste arquivo, que são as informações sobre o layout da placa, interpretá-los e mandar os comandos diretamente para os atuadores através da porta paralela.

### 8.1. Linguagem HP-GL

É uma linguagem desenvolvida pela Hewlett-Packard para armazenar informações gráficas para serem usadas em plotters HP. Pelo fato de ser formada por uma série de comandos, ela será muito útil para esse projeto.

Os comandos usados pelo software EAGLE são:

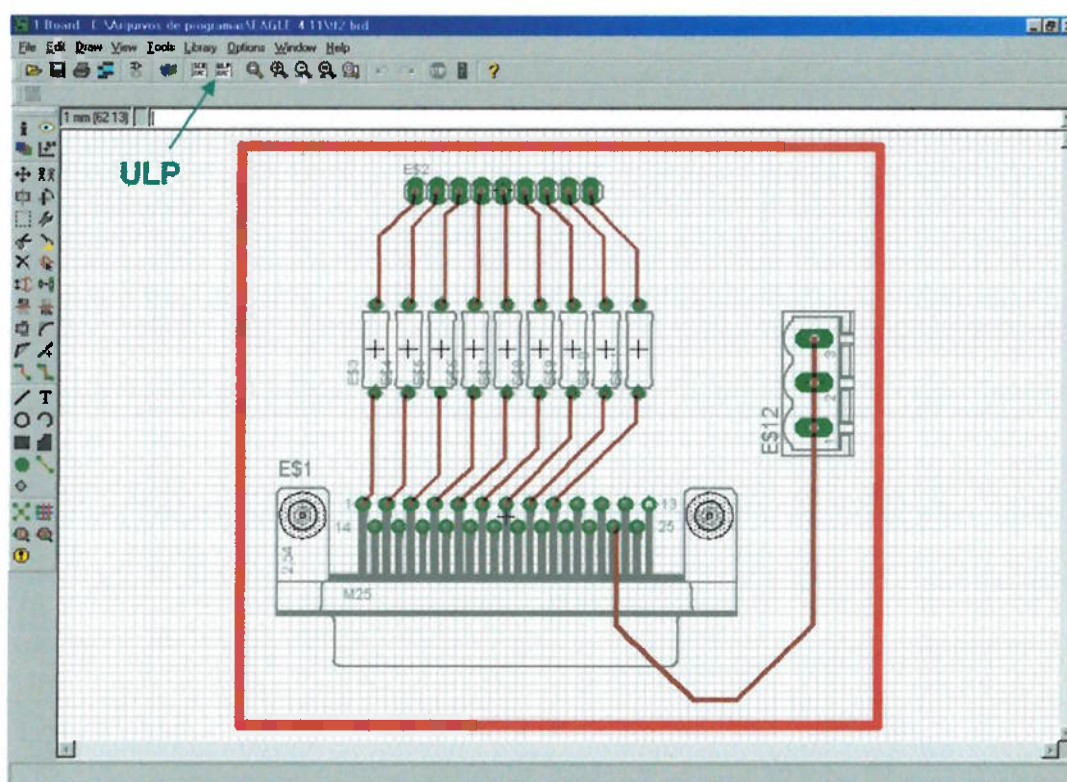
Comando	Significado
PA(x, y, ...);	<p>"Plot Absolute"</p> <p>Se não tiver com coordenadas (x, y), ele simplesmente indica que serão usadas coordenadas absolutas. Se ele estiver acompanhado com as coordenadas, ele se moverá para a posição (x, y) em coordenadas absolutas</p>
PU;	Levanta a ferramenta
PD;	Abaixa a Ferramenta

Tabela 8.1.1 - Alguns comandos HP-GL

#### 8.1.1. Usando o software Eagle

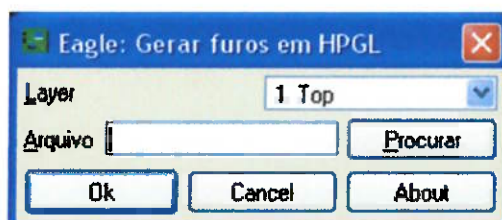
Foram feitos, pelo grupo, dois programas diferentes no Eagle para gerar as trilhas e os furos em HPGL, usando o *User Language Program*, que é uma

linguagem parecida com C. Assim quando uma placa está pronta, para gerar os arquivos com as trilhas ou os furos, basta clicar em ULP, como mostra a figura abaixo.



**Fig. 8.1.1.1 - Placa gerada no Eagle**

As figuras abaixo mostram as interfaces do gerador de trilhas e furos em HPGL, quando selecionados os arquivos trilhas.ulp e furos.ulp no ULP mostrado na fig 8.1.1.1.



**Fig. 8.1.1.2 - Gerar furos em HPGL**

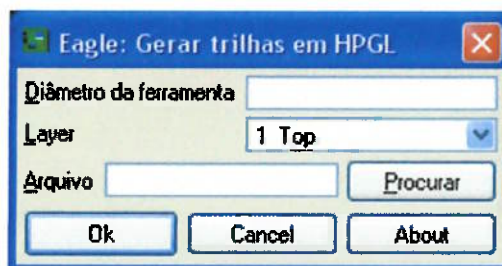


Fig. 8.1.1.3 - Gerar trilhas em HPGL

## 8.2. Porta paralela

A comunicação entre o PC e os motores será feita através de um cabo com dois conectores DB25 macho nas extremidades, como mostra a figura 8.2.1. Um deles será ligado diretamente a porta paralela do PC e o outro lado será ligado em uma placa feita pelo grupo, que por sua vez estará ligada as placas de acionamento de motor de passo.



Fig. 8.2.1 - Conector DB25 macho

A figura 8.2.2 mostra os pinos e seus significados. O conector DB25 é formado por 25 pinos, onde são: 8 saídas de dados, 4 saídas de controle, 5 entradas de *status* e os 8 restantes são aterrados. Os pinos 1, 11, 14 e o 17 tem a lógica invertida.

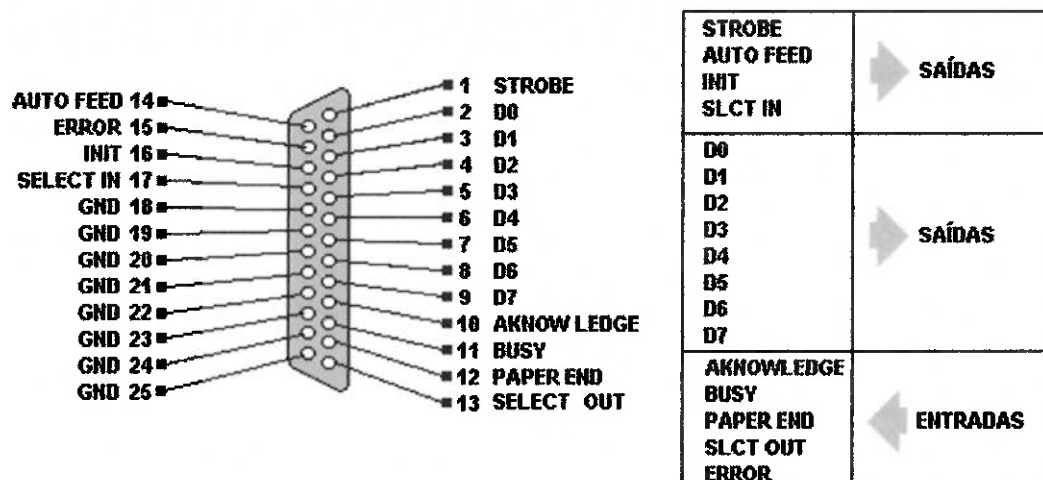


Fig. 8.2.2 - Pinos do conector DB25

Para o acionamento, estão sendo usados os 8 pinos de dados, que são de D0 até D7 e o *Strobe*, que é um pino de controle.

Usando o Visual C++, o comando para mandar os dados através desta porta é `_outp(porta, dado)`, onde `porta` significa a porta que podem ser 0x378 para os 8 pinos de dados e 0x37A para os pinos de controle e `dado` significa quais são os pinos em 1 e quais estão em zero, em decimal.

Por exemplo, na porta 0x378, estamos usando os 8 pinos, que são lidos como um binário: 0 0 0 1 0 0 0 1, isso significa em decimal 17, então no campo `dado` coloca-se 17. Fisicamente, isso significa que D0 e D4 estão em 5V e os outros estão em 0V. Já na porta 0x37A, estamos usando apenas o primeiro pino, então ele será apenas 0 ou 1, que é a mesma coisa em decimal.

Neste caso, está sendo usado a seguinte seqüência na porta 0x378:

Ey	Cy	Sy	Ex	Cx	Sx	Ez	Cz
----	----	----	----	----	----	----	----

onde, E é o enable (1-ligado e 0-desligado), C é *clock*, ou seja, a cada borda de descida o motor gira um passo, e finalmente, o S é o sentido horário e anti-horário que o motor deve girar, x, y e z são os eixos da fresadora.

Neste esquema ficou faltando o Sz, que é o sentido do eixo z, ele é escolhido no primeiro pino da porta 0x37A.

### 8.3. Algoritmo de Bresenham

Como a linguagem HP-GL usa comandos que indicam apenas o ponto inicial e final de cada reta, foi necessário o uso de algum método para fazer a interpolação linear. Para isso foi usado o algoritmo de Bresenham linear, que consiste em somar sempre um incremento no eixo de maior distância entre os pontos e no outro soma de acordo com a maior proximidade da reta real, como mostra a figura 7.3.1.

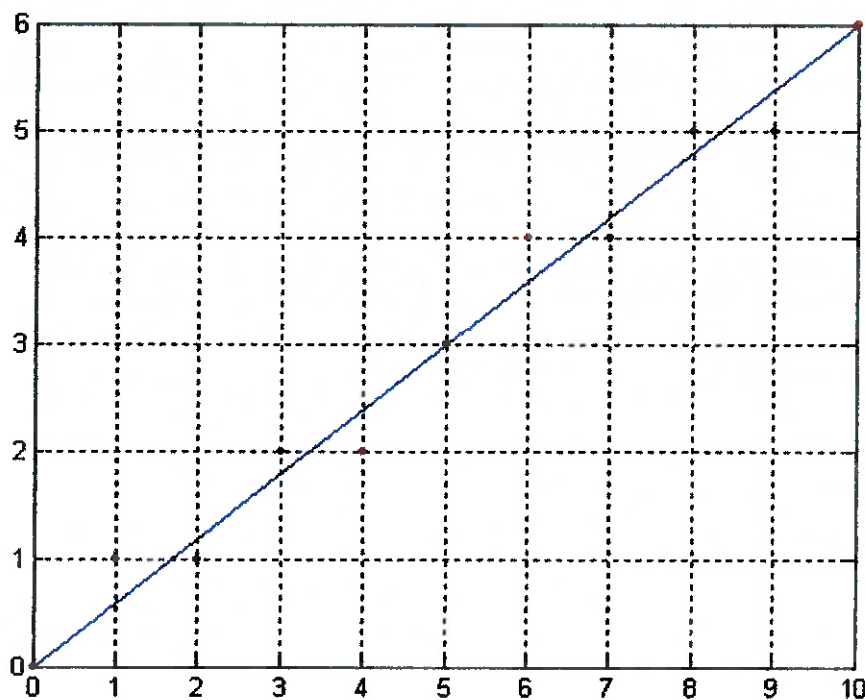


Fig. 8.3.1 - Método de Bresenham

O exemplo acima mostra como isso funciona, a reta em azul é a reta real de (0,0) até (10,6) e os pontos em vermelho é a reta de Bresenham com

discretização 1. O algoritmo pega a inclinação da reta, que neste exemplo, é de  $\frac{6}{10}$  e de acordo com x verifica y.

Por exemplo, quando  $x = 1$ , o  $y = \frac{6}{10}$  que está mais próximo de 1 do que de 0, por isso  $y = 1$ , quando  $x = 2$ ,  $y = \frac{12}{10}$  que está entre 1 e 2, porém mais próximo de 1, então não incrementa, ou seja,  $y = 1$  novamente.

Basicamente o algoritmo fica assim:

*DesenhaLinha(int x1, int y1, int x2, int y2)*

```
{
    int x = x1;
    int y = y1;
    float deltax = x2 - x1;
    float deltay = y2 - y1;
    float e = 2*deltax - deltay;
    for(i = 1; i <= deltax; i++)
    {
        plot(x,y);
        if(e > 0)
        {
            y ++;
            e -= 2*deltax;
        }
        x ++;
        e += 2*deltay;
    }
}
```

Algumas modificações foram feitas para que a reta possa estar em qualquer direção e também, ao invés, de incrementar 1, é incrementado o passo do motor.

#### 8.4. Desenvolvimento do interpretador

O interpretador foi desenvolvido no Visual C++, e ele gera os sinais de comando para os motores através da porta paralela de um PC, baseado nas instruções de um arquivo em HPGL. Para isso o interpretador contém funções de leitura de arquivos, informações sobre o passo da máquina, dados sobre parâmetros de usinagem e ainda por cima estabelece uma comunicação paralela com a máquina.

Há uma interface gráfica simples, como mostra a figura abaixo:

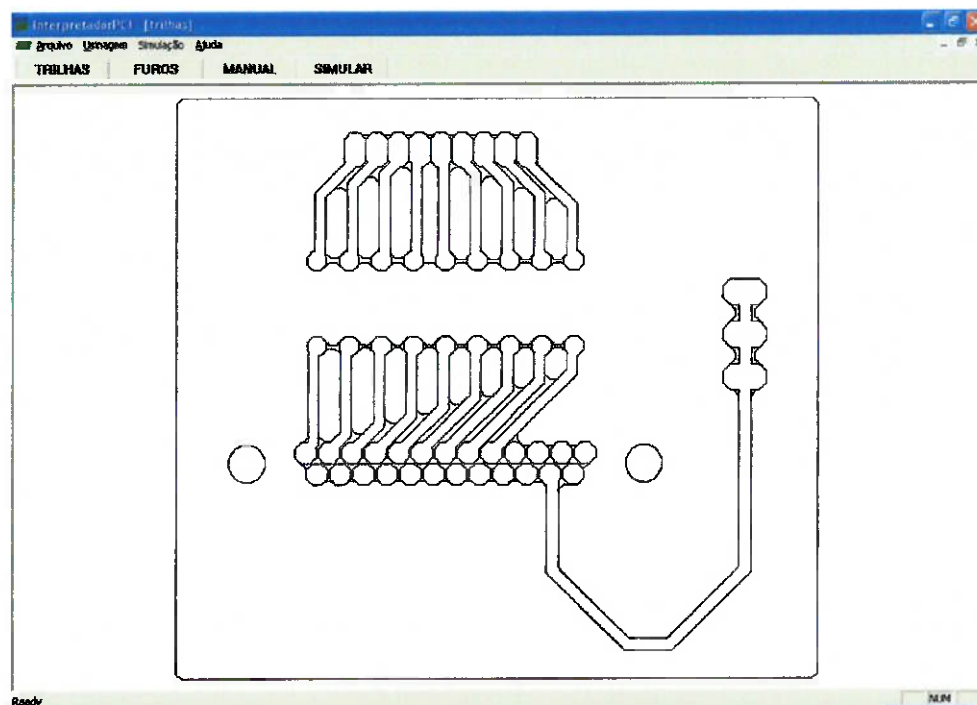


Fig. 8.4.1 - Janela do Interpretador



Clicando em “Arquivo”, o usuário terá as opções de abrir, fechar um arquivo e sair do programa. Assim que um arquivo é escolhido, é mostrada uma figura, para que o usuário veja qual é o formato da placa que será usinada.

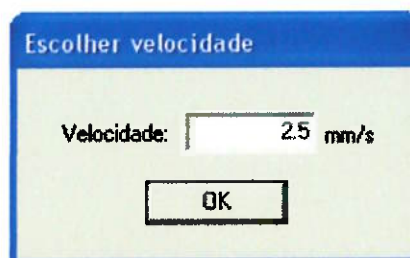
Na opção “Usinagem”, o usuário pode iniciar a usinagem ou escolher o controle manual, que, como mostrado na figura 8.2.2 movimenta a ferramenta na direção que se queira para um melhor posicionamento. O usuário digita em milímetros a distância que quer movimentar e escolhe qual é o eixo.

Existem dois tipos de usinagem, trilhas e furos. Deve-se tomar cuidado para quando abrir o arquivo de trilhas, selecionar a opção “usinar trilhas” e quando abrir o arquivo dos furos, selecionar “usinar furos”, para que a usinagem seja bem sucedida.

Clicando em “Simulação”, é possível visualizar uma simulação da usinagem das trilhas, podendo saber qual serão os passos feitos pela ferramenta.

Na opção “Ajuda”, há apenas informações sobre o programa.

Ao selecionar o controle manual, deverá ser selecionada a velocidade, que será a mesma para todos os eixos, o mesmo acontece quando a usinagem das trilhas ou dos furos é selecionada. O valor da velocidade deve estar entre 2,5 e 25 mm/s.



**Fig. 8.4.2 - Digitar a velocidade**

A distância deve ser um número maior que zero, e deve ser escolhido apenas um dos eixos. Os botões avançar e retornar mandam os comandos para a movimentação da ferramenta de um lado e do outro.

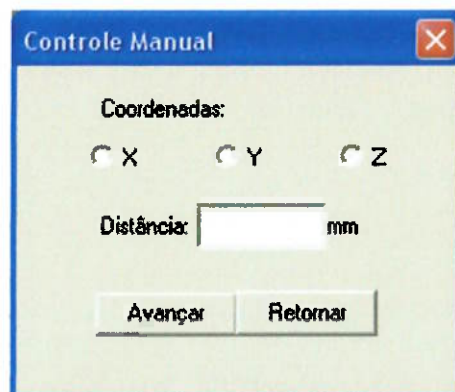


Fig. 8.4.3 - Controle Manual

#### 8.4.1. Implementação no Visual C++

Foi criado um novo projeto no Visual C++, e como a intenção era criar um programa com um arquivo executável e uma interface gráfica, foi escolhido o *MFC App Wizard*, como mostra a figura 8.4.1.1

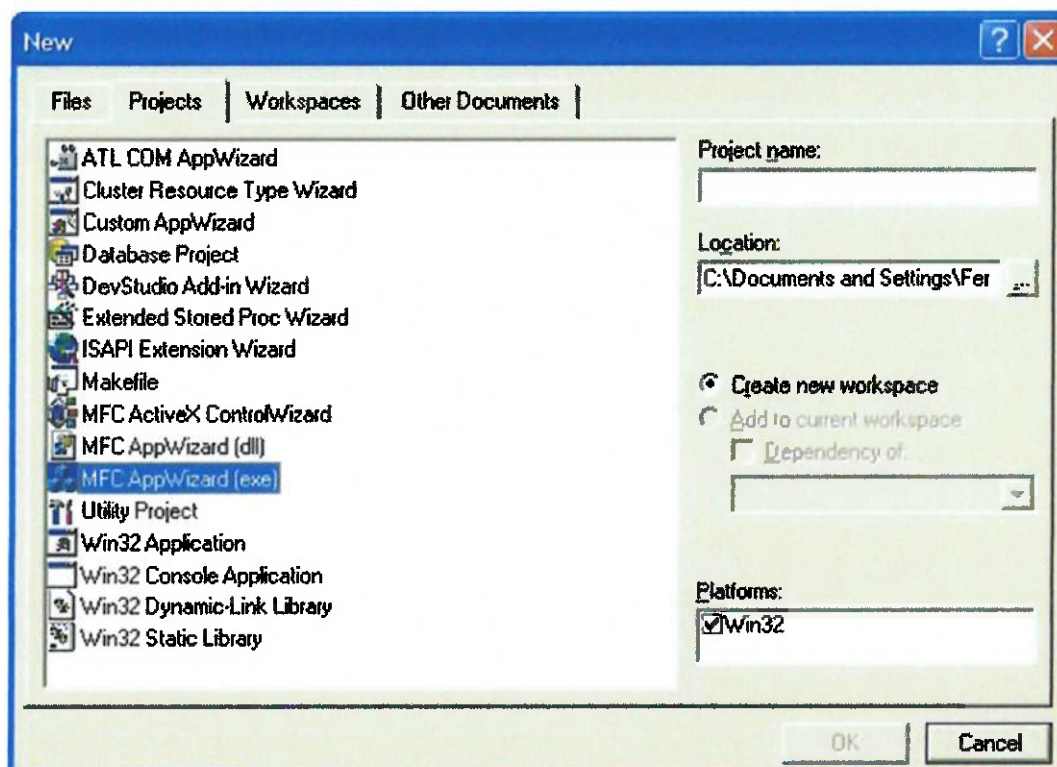


Figure 8.4.1.1 - Criando novo projeto no Visual C++

Em primeiro lugar, quando um arquivo em HPGL é escolhido para ser aberto, o programa pega somente os comandos que são importantes, neste caso, são somente os de movimentação já mostrados na seção 8.1., pois não haverá troca de ferramentas. Assim que ele é aberto o desenho da placa aparece em uma janela para que possa ser visualizado, o que é importante para saber se o arquivo aberto é realmente o qual se desejava abrir. Para fazer esse desenho na tela, foram usados apenas comandos de desenho do próprio Visual C++, ou seja, não foi usado o algoritmo de Bresenham.

Existe uma outra ferramenta desenvolvida que é a Simulação. Quando o usuário aperta este botão, o programa lê o arquivo novamente e, desta vez, chama uma função onde está implementado o algoritmo de Bresenham, para desenhar em outra janela o layout da placa. Essa ferramenta foi importante para testar o funcionamento do algoritmo de Bresenham antes da estrutura mecânica ficar pronta, porém ela continuou na versão final, pois serve também para que o usuário veja qual o caminho da ferramenta que o Eagle gerou. É possível ver a placa sendo desenhada em uma janela menor, mas deve ser ressaltado que o tempo que ela simula não é o mesmo que o tempo de usinagem e também não deve ser rodada em paralelo com a usinagem, para que não atrapalhe o programa acessar a porta paralela.

Quando o botão de trilhas é apertado, o arquivo é lido, e desta vez, também usando o algoritmo de Bresenham, os comandos são mandados para os motores.

O código abaixo mostra como foram lidos os comandos do arquivo HPGL:

```
while(!feof(entrada))
{
    xant=x;
    yant=y;
    fscanf(entrada, "%s", &comandos);
    if (!strcmp(comandos,"PU"))
```

```

    {
        aux=1;
    }
    if (!strcmp(comandos,"PD"))
    {
        aux=0;
    }
    if (!strcmp(comandos,"PA"))
    {
        fscanf(entrada, "%lf", &x);
        fscanf(entrada, "%lf", &y);
        interp->linhamotor(xant, yant, x, y, aux);
    }
}

```

A variável entrada é o arquivo de entrada de onde estão saindo os comandos HPGL, que são lidos até o fim do arquivo. Se o comando for PU, aux =1 fará a ferramenta subir, quando for chamado o algoritmo de Bresenham. Se o comando for PD, aux=0, fará a ferramenta descer quando o algoritmo de Bresenham for chamado. Se o comando for PA, são lidas duas variáveis (x e y), que são as coordenadas do ponto final, logo em seguida é chamada a função linhamotor, que é justamente o algoritmo de Bresenham, onde as variáveis xant e yant são a posição atual e x e y, são para onde a ferramenta deve ir em linha reta, aux indica apenas se ela deverá ir por cima (sem usinar) ou por baixo (usinando a placa).

Dentro do algoritmo de Bresenham, são chamadas as funções que mandam os comandos para os motores, cada vez que a função é chamada, o motor dá um passo. Isso significa que o passo do algoritmo de Bresenham é exatamente o passo de uma volta dos motores.

O funcionamento dos furos é análogo ao das trilhas, o que muda é o arquivo de entrada gerado pelo Eagle.

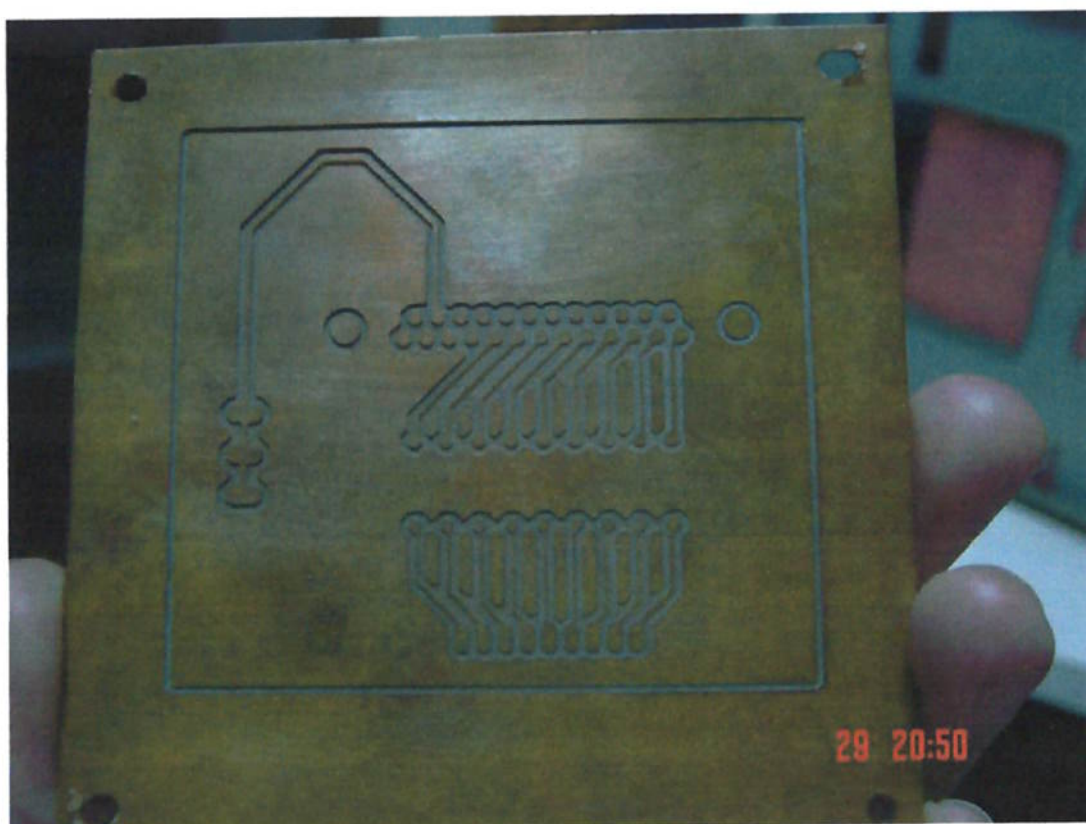
Já o controle da velocidade é feito através da função timer mostrada abaixo:

```
void CTimer::timer(int j)
{
    /***1 significa 100 micro segundos***/
    int i;
    for (i=0; i<j; i++)
    {
        _outp(0x43, 0xb0);
        _outp(0x42, 0x78&0xff);
        _outp(0x42, (0x78&0xf00)>>8);
        _outp(0x61, 0x01);
        while((_inp(0x61)&32)==0)
        {
        }
    }
}
```

O valor de i é multiplicado por 100 microsegundos, ou seja, quando se deseja esperar 1 milissegundo, i=10. Assim foi feito o controle da velocidade, cada vez que o motor dá um passo ele espera um certo tempo variável conforme a velocidade escolhida. Deve-se notar que o valor da velocidade é aproximado, pois essa função aceita apenas valores inteiros, ou seja, vai de 100 em 100 microsegundos.

## 9. TESTES

Como teste do funcionamento da fresadora CNC, foi usinada as trilhas da placa que liga os motores ao PC, já foi mencionada anteriormente. A figura abaixo mostra a placa usinada.



**Fig. 9.1 - Placa teste**

Os resultados foram muito bons, dentro do que era esperado pelo grupo. Pode ser observado que as trilhas ficaram como projetado no software Eagle, o que comprova o funcionamento tanto da estrutura mecânica, que é rígida o suficiente para manter a precisão exigida, e do software interpretador, que manda os sinais corretamente para a porta paralela do PC.

## 10. CONCLUSÃO

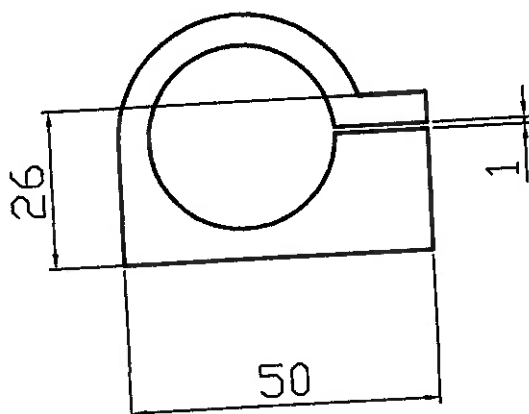
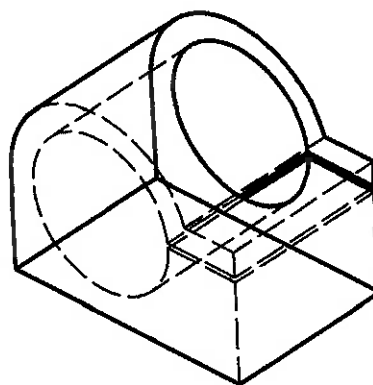
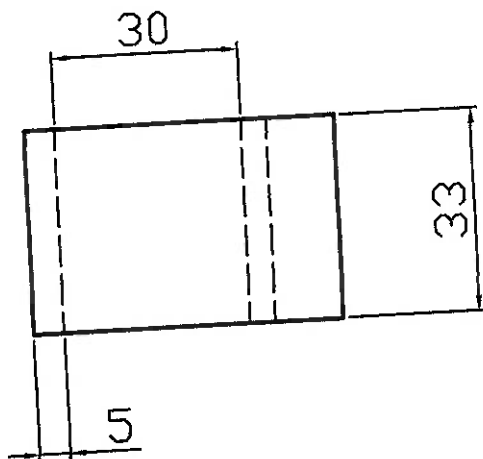
O trabalho foi concluído no tempo previsto sem grandes mudanças no cronograma, o que significa que a divisão feita entre os dois membros para que duas partes do trabalho caminhassem em paralelo foi realizada com sucesso.

A implementação, que foi feita durante o segundo semestre, foi a parte mais importante, e apesar de terem sido encontradas algumas dificuldades, elas foram superadas, fazendo com que o aprendizado fosse ainda maior. Essas dificuldades e suas soluções fazem parte de projetos de engenharia, portanto esse projeto desenvolvido durante o ano nos ajudou a trabalhar em equipe e vivenciar a realidade da engenharia.

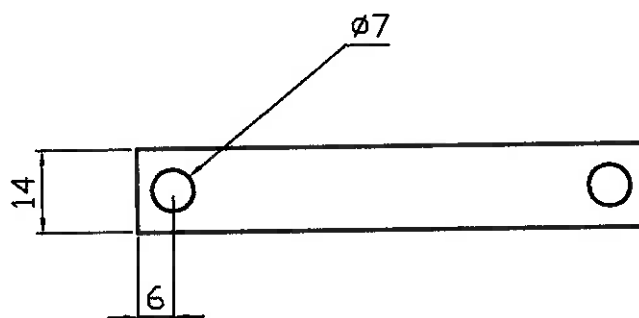
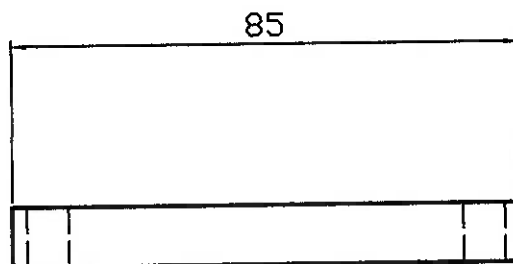
A mini fresadora CNC funcionou exatamente como o esperado, e as placas feitas como testes estão funcionando perfeitamente.

**Anexo 1**  
**(Desenhos de Fabricação)**

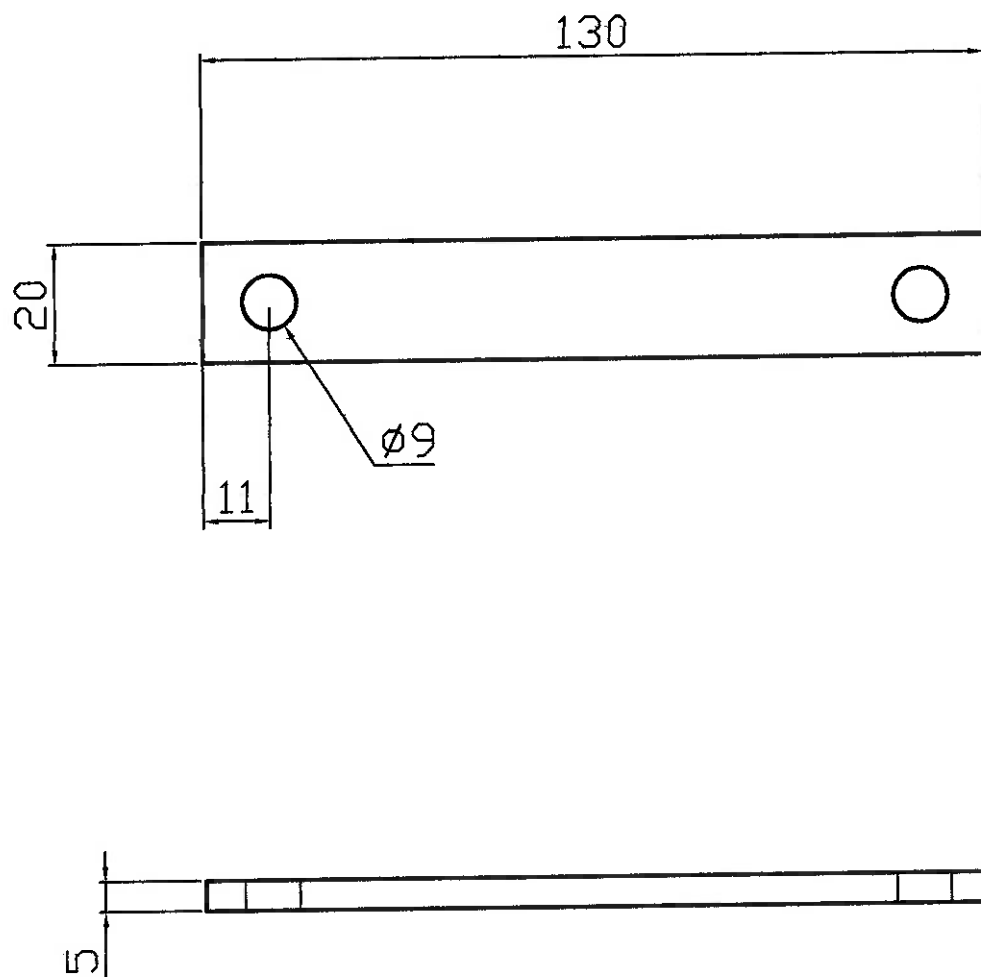




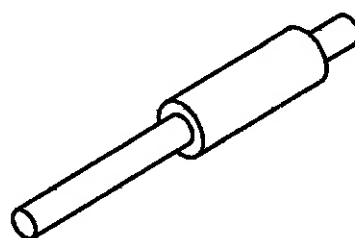
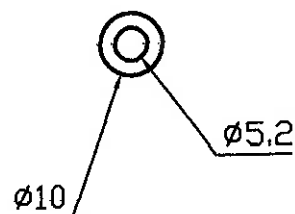
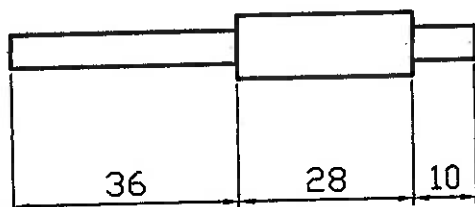
0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title <i>Caixa dos Rolamentos</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
MATERIAL		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Calço Guia Z</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Des. Rubens	Date 20/08/03
MATERIAL		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	




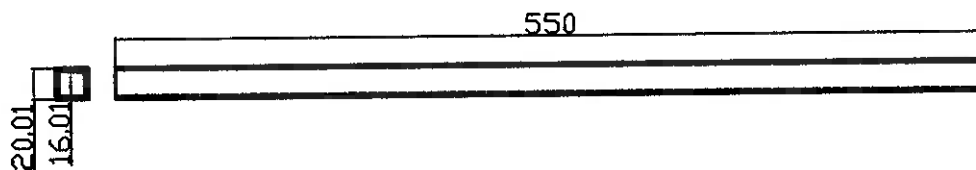
0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title <i>Calço Guias Maiores</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
		DIMENSÕES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
MATERIAL		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



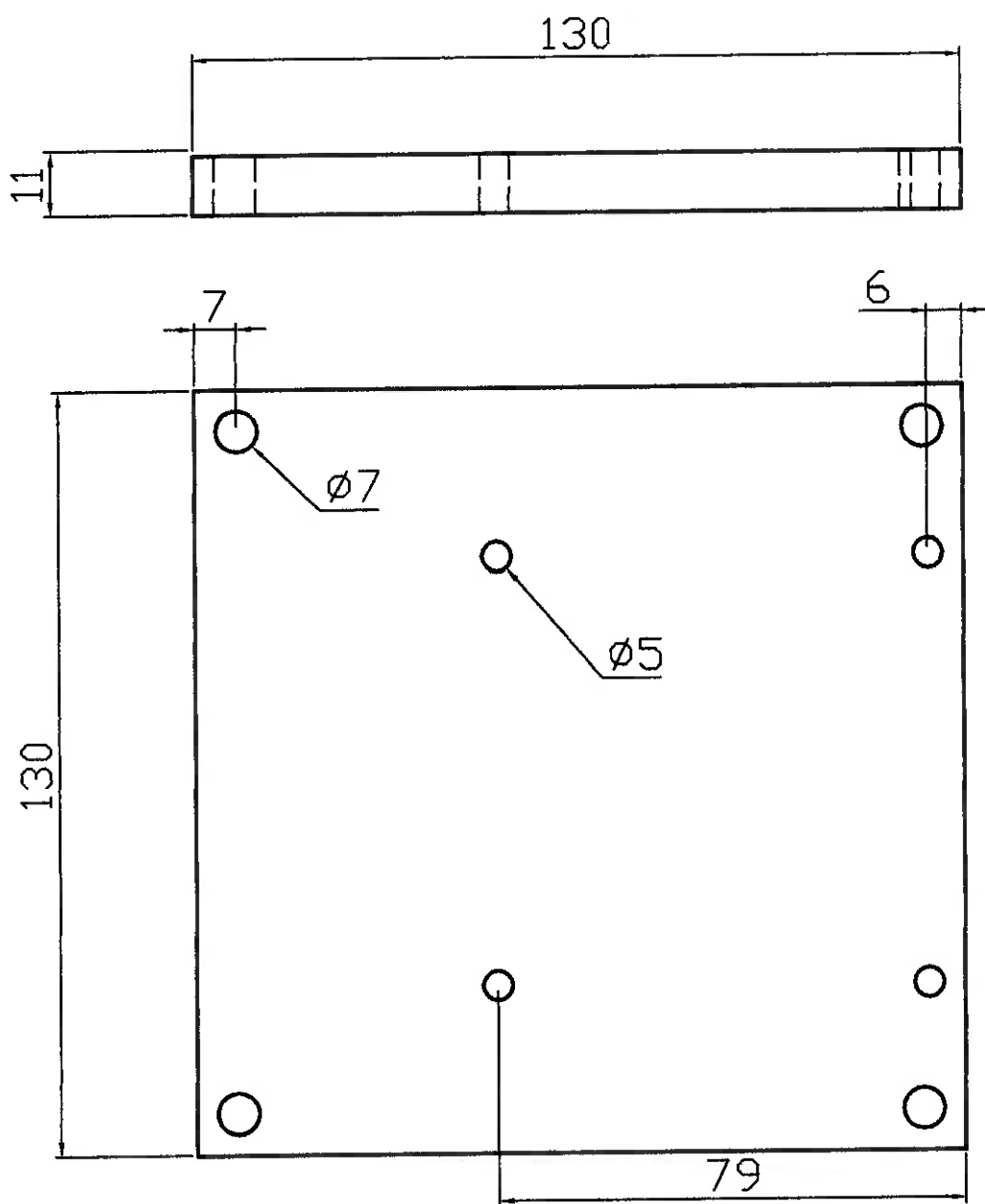
0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title <i>Eixo de Acoplamento da Ferramenta</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
MATERIAL		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



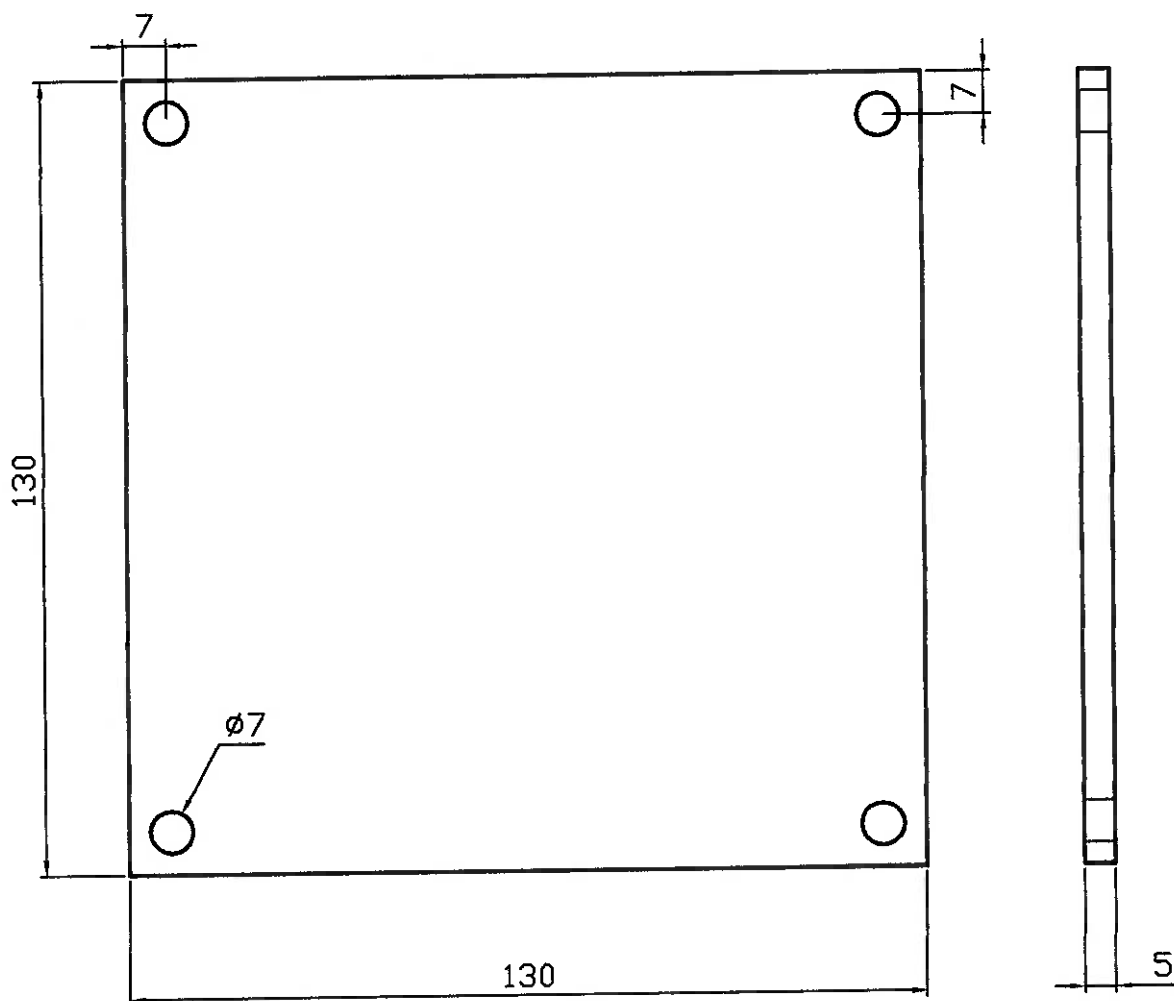
0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Perfil 510 da Estrutura</i>		TOL $\pm 0.1$	 1° DIEDRO	
		ESC. 1:4	Draw Rubens	Date 20/08/03
		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
MATERIAL		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>perfil 550</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DEEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
MATERIAL		DIMENSOES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	

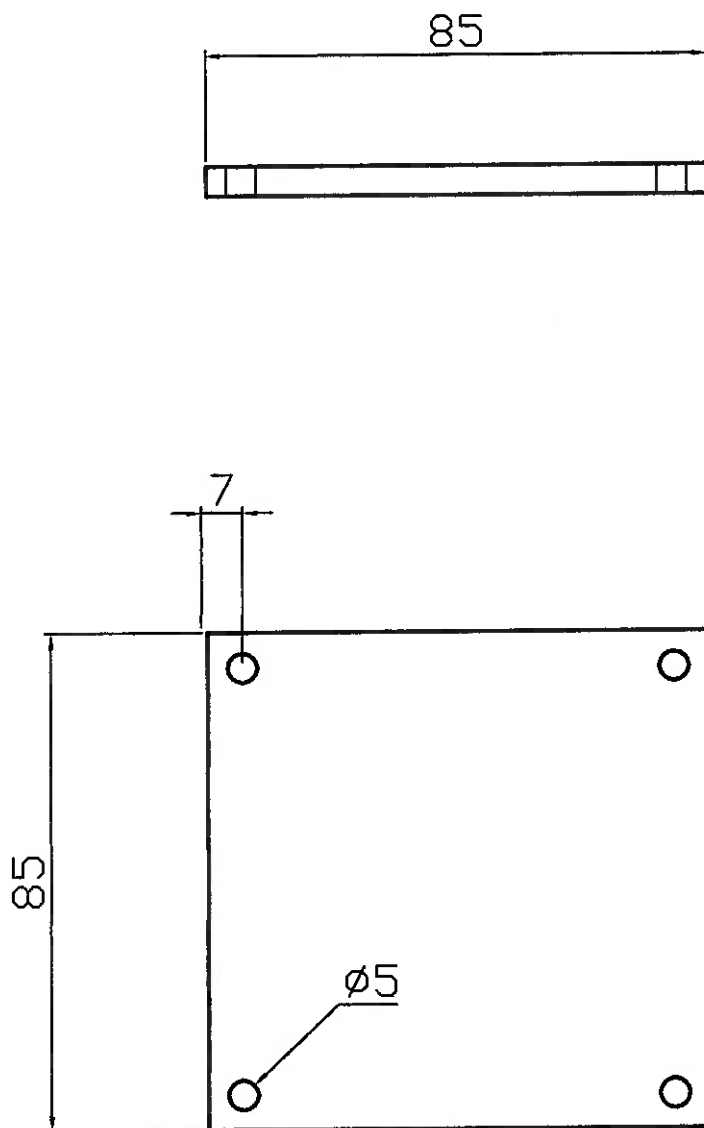


0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Placa Eixo Y</i>		TOL $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
MATERIAL		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	

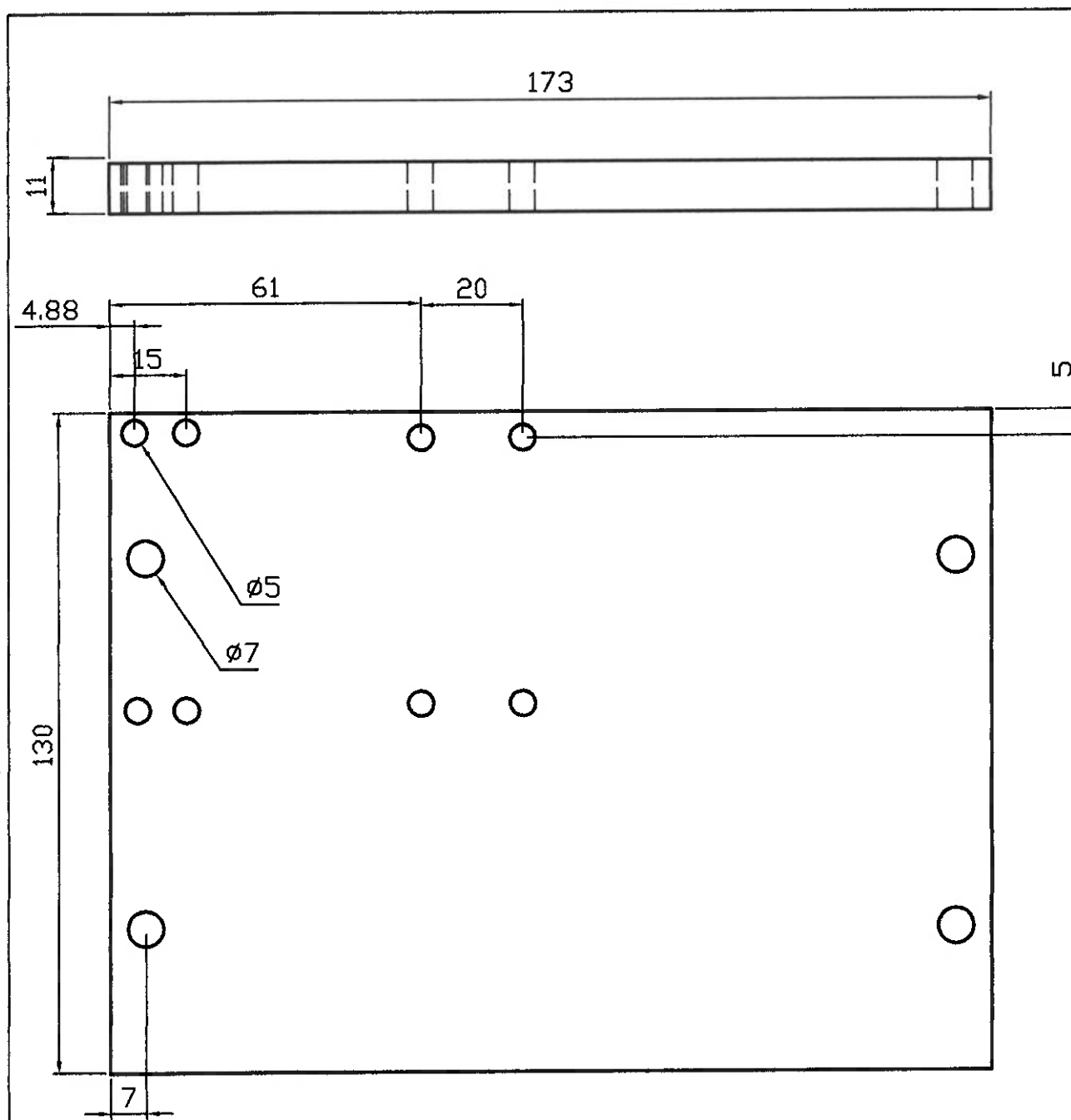


0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Placa de Base Guia X</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DIE.DRG	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
MATERIAL		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	

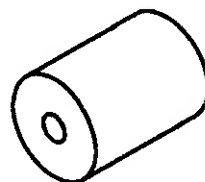
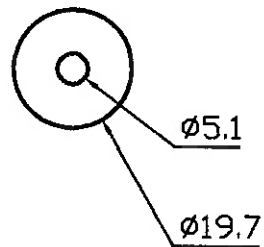





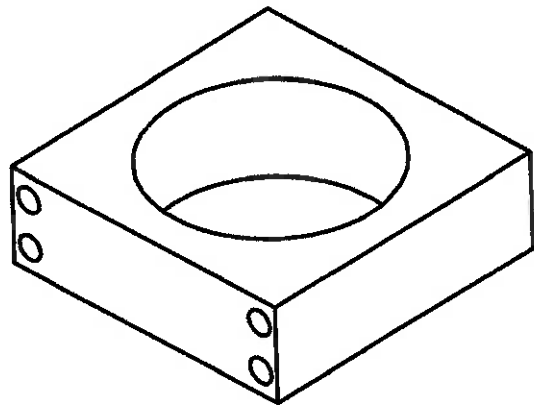
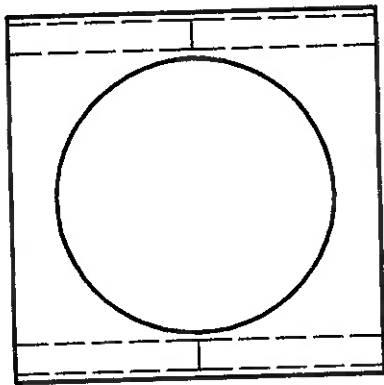
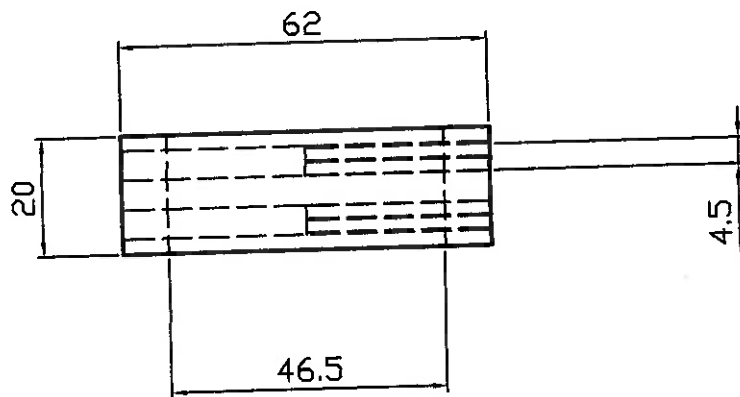
0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Placa Suporte Guia Z</i>		TOL $\pm 0.1$	1° BIEIRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
MATERIAL		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



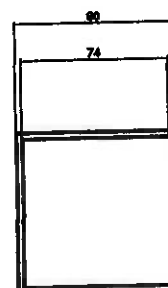
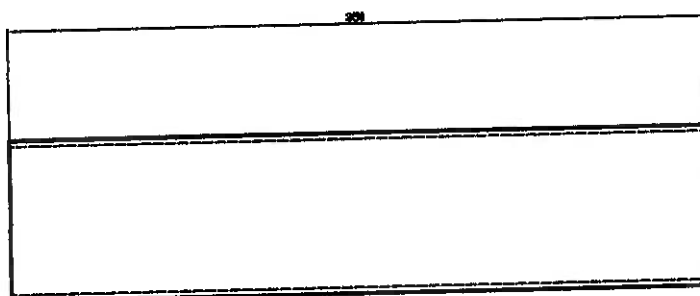
0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Suporte Superior Dremel</i>		TOL $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
MATERIAL		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Polia de Precisão</i>		TOL. $\pm 0.1$	 1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
MATERIAL		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title <i>Suporter Dremel</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
MATERIAL		DIMENSÖES MM	Aprov. Fernanda	Date 20/08/03
		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	



0	--	Issue	W.M.A	28/08/03
Rev.	NRM	UP DATE	Resp.	Date
Fresadora CNC de Circuito Impresso				SISTEMA CAD
Title  <i>Vigas Mestras da Estrutura</i>		TOL. $\pm 0.1$	1° DIEDRO	
		ESC. 1:1	Draw Rubens	Date 20/08/03
		DIMENSÖES MM	Apror. Fernanda	Date 20/08/03
MATERIAL		Sheet 1 DE 1	Part number 421.301.0	

## Referências bibliográficas

- [1] ASTM, *Machining with Carbides and Oxides*. McGraw-Hill Book Company, 1962. 524p.
- [2] DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 2.ed. São Paulo: Art Líber Editora, 2000. 244p.
- [3] MACHINABILITY DATA CENTER, *Machining data handbook*. 3.ed. Cincinnati, Ohio : MDC, 1980.
- [4] SHIGLEY, J. E., MISCHEKE, C.R., *Mechanical Engineering Design*, 5.ed. McGraw-Hill, 2002.