

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Eduardo Martins de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE FRESADORA DE PEQUENO PORTE COM  
ESTRUTURA EM COMPÓSITO PARTICULADO DE MATRIZ POLIMÉRICA**

Belo Horizonte

2013

Eduardo Martins de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE FRESADORA DE PEQUENO PORTE COM  
ESTRUTURA EM COMPÓSITO PARTICULADO DE MATRIZ POLIMÉRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio

Belo Horizonte

2013

Eduardo Martins de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE FRESADORA DE PEQUENO PORTE COM  
ESTRUTURA EM COMPÓSITO PARTICULADO DE MATRIZ POLIMÉRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

---

Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio (Orientador) – UFMG

---

Prof. Dr. Antônio Augusto Torres Maia – UFMG

---

Prof. Dr. Juan Carlos Horta Gutiérrez – UFMG

---

Prof. Dr. Paulo Eustáquio de Faria - UFMG

Belo Horizonte, 27 de março de 2013

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os que me apoiaram ao longo deste período.

Ao Prof. Juan Rubio, de quem veio o estímulo para o mestrado, e me norteou durante esta fase.

Aos professores da banca examinadora, quem me honraram aceitando o convite para avaliação da dissertação.

Aos graduandos Paris Anderson , Eduardo Rodrigues Ferreira e Caio Henrique, pelas madrugadas, sábados e domingos no laboratório.

À minha irmã Beatriz, pelo apoio incondicional, estímulo e alegria com meus sucessos.

À minha esposa, Roserli. Mãe, companheira, amiga em todos os momentos.

## RESUMO

A evolução da manufatura está intimamente relacionada com a evolução da sociedade. O uso intensivo da tecnologia de informação e da eletrônica no comando e controle de equipamentos de manufatura quebrou o paradigma da necessidade de grandes lotes de produção para a obtenção de custos acessíveis da mesma. Estes fatores associados à crescente demanda por componentes miniaturizados para equipamentos com dimensões cada vez mais reduzidas para aplicações médicas, na indústria microeletrônica, militar e etc., tem aumentado a demanda por equipamentos capazes de usinar componentes mecânicos com detalhes cujas dimensões estão abaixo do décimo de milímetro, com rapidez e versatilidade, o que nos leva a necessidade de aplicação de conceitos como micro usinagem e da usinagem a alta velocidade (HSM). Esta dissertação aborda a possibilidade da construção de um equipamento de baixo custo, com estrutura em concreto polimérico e componentes mecânicos e eletroeletrônicos comerciais, que seja capaz de produzir componentes de dimensões reduzidas, com precisão e desempenho satisfatórios. Os resultados apontam na possibilidade de se obter um equipamento com estas características sem a necessidade de investimentos vultosos.

Palavras-chave: Micro usinagem, HSM, mini fresadora, concreto polimérico, CNC.

## ABSTRACT

The manufacturing processes evolution is closely tied to the society evolution. The intense use of information technology and electronics in the command and control of manufacturing equipments has broken the need of large production batches to obtain profitable processes paradigm. This reality, in addition to the increasing need for miniaturized parts for smaller and smaller devices for medical, microelectronics, military and other applications has increased the demand for equipments able to produce mechanical parts which details have dimensions about a tenth of millimeter, always ensuring speed and dimensional reliability. This leads us to the need of application of concepts such micro machining and high speed machining (HSM). This master thesis deals with the possibility of building a low cost equipment, which has a polymeric concrete structure and commercial mechanical and electro electronic parts, and is capable of producing small parts with accuracy and good performance. The results show the possibility of obtaining an equipment with these features without the need for major investments.

Keywords: Micro machining. HSM. Mini milling machine. polymeric concrete, CNC.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fresadora de pórtico.....	21
Figura 2 - Sistema com um grau de liberdade e amortecimento viscoso .....	26
Figura 3 - Curva de resposta típica de um sistema subamortecido .....	26
Figura 4 – Curva de resposta típica de uma viga de granito-epóxi .....	27
Figura 5 - Eixo-árvore .....	27
Figura 6 - (a) Mancal radial. (b) Mancal axial .....	29
Figura 7 - Típica guia de deslizamento para torno .....	31
Figura 8 – Diagrama de uma guia linear .....	32
Figura 9 - Guias de escoamento fluídico (a) Guia hidrostática para uma máquina de ultra precisão. (b) Torno de ultraprecisão com uma guia hidrostática.....	33
Figura 10 - Princípio do fuso de esferas: O atrito de deslizamento é substituído pelo de rolamento pela inserção de esferas entre a porca e o fuso.....	34
Figura 11 - Folga axial em relação à carga.....	35
Figura 12 – Sentido de giro do rotor: (a) indeterminado, e (b) determinado .....	36
Figura 13 – Posição do rotor determinada.....	37
Figura 14 – Rotor e estator com dentes usinados .....	37
Figura 15 – Motor de passo padrão de três terminais.....	38
Figura 16 – Chaveamento de um quarto de passo .....	39
Figura 17 – Chaveamento de um quarto de passo .....	40
Figura 18 - Arquitetura de um módulo de controle WEBOxiCorte .....	41
Figura 19 - Interface gráfica e controle remoto de um Torno Galaxy.....	41
Figura 20 - Projeto de fresadora 3 eixos.....	42
Figura 21 - Síntese dos mecanismos.....	43
Figura 22 - Seleção de materiais .....	44
Figura 23 - Fuso de esferas recirculantes do eixo Y.....	46
Figura 24 - Principais dimensões do fuso do eixo Y.....	47
Figura 25 - Mesa da com a porca do fuso do eixo Y.....	47
Figura 26 - Curva de torque do motor de passo .....	48
Figura 27 - Sistema utilizado no projeto original, não prevê ajuste da pré-carga do rolamento. .....	54
Figura 28 - Flambagem causada por pré-carga, com restrição nas extremidades .....	55
Figura 29 - Mecanismo de ajuste da pré-carga do rolamento axial.....	55
Figura 30 - Deficiência do projeto: A ferramenta não cabe no furo.....	56

Figura 31 - Sugestão de melhoria: oblongar os furos.....	56
Figura 32 - Sugestão de melhoria: reforço no suporte das porcas dos fusos.....	57
Figura 33 - A estrutura da fresadora polimérico termorrígido, conforme projeto.....	57
Figura 34 – Molde de acrílico para a estrutura da fresadora .....	58
Figura 35 – Vazamento do concreto polimérico no molde de acrílico.....	58
Figura 36 - Deformação na coluna da estrutura .....	59
Figura 37 - Deformação na superfície de assentamento do eixo Y.....	59
Figura 38 - Sistema de funcionamento dos parafusos de nivelamento e ajuste da mesa do eixo X.....	60
Figura 39 - Parafusos de nivelamento e ajuste da mesa do eixo X .....	61
Figura 40 – Tentativa de adequação: Abraçadeiras para fixação do eixo Y .....	61
Figura 41 - Correção do desvio no assentamento do eixo Y .....	62
Figura 42 - Superfícies de assentamento do eixo Y, já traçadas .....	63
Figura 43 - (a) Alinhamento da estrutura. (b) Medição das coordenadas em X dos pontos da malha. ....	63
Figura 44 - Construção das superfícies 3D, simulando as superfícies deformadas de.....	64
Figura 45 - Confecção do inserto para correção da deformação. (a) Modelagem 3D. (b) Simulação da usinagem do inserto no CAM .....	64
Figura 46 - Insertos para assentamento da mesa do eixo Y, com a mesa do eixo Y já montada .....	65
Figura 47 – Guia linear NSK LH30 NA.....	66
Figura 48 – Linhas de contato da guia linear NSK LH30-Z .....	66
Figura 49 – Estratégia para aumento da resistência a impactos .....	67
Figura 50 – Representação da exatidão dos fusos de esferas NSK .....	67
Figura 51 – (a) Fuso e porca do eixo Z, (b) Fuso montado na estrutura .....	68
Figura 52 – Acoplamento tipo Oldham .....	69
Figura 53 - Motor de passo Astrosyn Y259 .....	70
Figura 54 - Acionamento Geckodrive G212 .....	71
Figura 55 - Configuração dos jumpers do Geckodrive G212.....	72
Figura 56 - Motor de alta frequência Tecmaf TMO 01-WC01 .....	73
Figura 57 – Montagem do sistema de refrigeração do eixo-árvore.....	74
Figura 58 - Inversor WEG CFW10 .....	75
Figura 59 - Placa de interface PC/Acionamentos .....	76
Figura 60 – Detal .....	76



Figura 61 – Projeto do painel elétrico para a fresadora.....	77
Figura 62 – Acesso aos botões do inversor de frequência mesmo com a porta fechada.....	78
Figura 63 – Painel para conexão dos motores.....	78
Figura 64 – Padronização nas cores dos fios de alimentação dos motores.....	79
Figura 65 – Linha de emergência: (a) Passando pelos fins de curso. (b) Passando pelo botão de emergência.....	80
Figura 66 - Habilitação da porta paralela DB25 no software Mach3.....	82
Figura 67 - Configuração dos sinais de saída para comando dos eixos no Mach3.....	83
Figura 68 – Como acessar a janela “ <i>Motor Tuning</i> ”.....	83
Figura 69 – Ajustes feitos para o eixo X, no Mach3.....	84
Figura 70 – Ajustes feitos para o eixo Y, no Mach3.....	85
Figura 71 - Sintonia fina do eixo Y, no Mach3.....	86
Figura 72 – Acesso à página de compensação da histerese dos eixos.....	86
Figura 73 –Valores ajustados para os eixos da máquina.....	87
Figura 74 - Relógio comparador posicionado para medição da histerese do eixo.....	87
Figura 75 – Seqüência de movimentos para levantamento da histerese do eixo.....	88
Figura 76 – Seqüência para acessar a janela “ <i>Screw Mapping</i> ”.....	88
Figura 77 - Janela de mapeamento de erros do fuso.....	89
Figura 78 - Posicionamento do relógio comparador eletrônico para teste de repetibilidade no eixo Z.....	90
Figura 79 - (a) Dimensões da Peça 1, (b) Representação 3D.....	92
Figura 80 - Usinagem da Peça 1.....	92
Figura 81 - (a) Dimensões da Peça 2, (b) Representação 3D.....	93
Figura 82 – (a) Peça 1, para conferência do perpendicularismo e retilneidade. (b) Peça 2, para conferência de perpendicularismo, retilneidade e circularidade.....	93
Figura 83 - Peça de pequenas dimensões à semelhança de uma engrenagem.....	94
Figura 84 - Simulação da usinagem de micro componente.....	94
Figura 85 - Detalhe da ponta da fresa, observar o desgaste das arestas.....	95
Figura 86 - Peça usinada.....	95
Figura 87 - Detalhes da micro peça usinada.....	96
Figura 88 - Detalhes da micro peça usinada.....	96
Figura 89 - Detalhes do fundo do dente.....	97
Figura 90 - Detalhe a ser usinado na peça.....	98
Figura 91 - Detalhe a ser usinado na peça, em perspectiva.....	98

Figura 92 - Assumindo o controle da máquina anexa ao CNC, via TeamViewer®. ....	98
Figura 93 - Inicializando o Mach3® na máquina hospedeira.....	99
Figura 94 - Inserindo o programa para execução da usinagem a partir do computador-mestre. .....	99
Figura 95 - Ativando a captura de imagens através da câmera. ....	100
Figura 96 - Webcam ativada. Sistema pronto para execução do programa de usinagem comandada e monitorada remotamente. ....	100
Figura 97 - Execução do programa de usinagem comandada e monitorada remotamente. ...	101
Figura 98 - Diagrama representativo do teste.....	101
Figura 99 - Operação de retífica com corte tangencial.....	102
Figura 100 - Retífica plana .....	102
Figura 101 - Medição da rugosidade superficial .....	103
Figura 102 - Máquina construída anexa ao armário elétrico e PC. ....	104
Figura 103 - Principais dimensões de projeto (em mm).....	105
Figura 104 – Resposta das vigas .....	109
Figura 105 - Medição da rugosidade superficial .....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do ferro fundido e do concreto polimérico .....	23
Tabela 2 - Propriedades do Fofó 40, aço carbono e SA610 .....	24
Tabela 3 - Características do motor de passo Astrosyn.....	70
Tabela 4 - Principais características do motor de alta frequência Tecmaf TMO 01-WC01 ....	73
Tabela 5 - Principais características do inversor de frequência WEG .....	75
Tabela 6 - Resultados da medição de repetibilidade para o eixo X.....	91
Tabela 7 - Resultados da medição de repetibilidade para o eixo Y.....	91
Tabela 8 - Resultados da medição de repetibilidade para o eixo Z. ....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS

3D – Em três dimensões

CNC - *Computerized Numerical Control* – Controle numérico computadorizado

CPU - *Central Processor Unit* – Unidade de processamento central

CAD - *Computer-Aided Design* – Desenho assistido por computador

CAM - *Computer-Aided Manufacturing* – Manufatura assistida por computador

GUI - *Graphical User Interface* – Interface gráfica com o usuário

HSM – *High Speed Machining* – Usinagem a alta velocidade

HMI – *Human Machine Interface* – Interface ser humano/máquina

HTTP – *Hypertext Transfer Protocol* - Protocolo de transferência de hipertexto

IBM-PC - *International Business Machines – Personal Computer* – Computador pessoal IBM

MDI – *Manual Data Input* – Entrada manual de dados

NC - *Numerical Control* – Controle Numérico

NCK - *Numerical Control Kernel* – Kernel do Controle Numérico

PC - *Personal Computer* – Computador pessoal

PLC - *Programmable Logic Controller* – Controlador lógico programável

RTO – *Real Time Operating Systems* – Sistema operacional de tempo real

SO - Sistema Operacional

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

WWW- *World Wide Web* – Rede mundial (de computadores) – às vezes abreviada para *Web*

## LISTA DE SÍMBOLOS

A = ampère

$C_a$  = Carga axial

$C_r$  = carga no rolamento

$d_{fr}$  = diâmetro do furo do rolamento

E = módulo de elasticidade

f = frequência natural

$f_c$  = fator de correção

$F_{ad}$  = força devido ao atrito dinâmico

$f_m$  = frequência de rotação do eixo do motor

Hz = Hertz

i = coeficiente de contato

J = momento de inércia aplicado ao motor

$J_f$  = momento de inércia do fuso

$J_m$  = momento de inércia do motor

K = Kelvin, coeficiente de torque de um fuso de esferas

kg = quilograma

kW = quilowatts

m = metro, massa

°C = graus Célsius

$p_c$  = pré carga

$P_f$  - passo do fuso

$P_s$  = Alimentação do motor em pulsos por segundo

$R_p$  = Pulsos para uma rotação do motor

RPM = rotações por minuto

$T_{ac}$  = torque durante aceleração

$T_{am}$  = Torque devido ao atrito no rolamento

$T_{mvc}$  = torque no motor a velocidade constante

$T_{mpc}$  = Torque máximo devido à pré carga

$T_{op}$  = torque de operação do fuso

$T_{rpc}$  = torque de referência devido à pré carga do fuso

V = volts

$V_m$  = velocidade da mesa

$V_u$  = variação para todo o curso do fuso

$V_{2\pi}$  = variação máxima do curso em uma revolução do fuso

$V_{300}$  = variação máxima do deslocamento em 300 mm de curso do fuso

W – watt

$\alpha$  = ângulo da hélice da rosca do fuso

$\rho$  = densidade

$\Delta$  = decremento logarítmico

$\mu\text{m}$  = micrometro

$\mu_r$  = coeficiente de atrito no rolamento

$\eta_f$  = rendimento do fuso

$\dot{\omega}$  = aceleração angular do motor

$\Omega$  = ohm

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivos do trabalho.....	19
1.3	Estrutura do trabalho.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Arquitetura básica de uma máquina-ferramenta.....	20
2.2	Projeto de fresadora.....	21
2.3	Estruturas.....	22
2.3.1	Propriedades da estrutura de concreto polimérico.....	24
2.4	Identificação do amortecimento pela análise do decremento logarítmico.....	25
2.5	Cabeçote principal ou eixo-árvore.....	27
2.6	Mancais.....	28
2.7	Guias ou barramentos.....	30
2.8	Sistemas de transmissão e conversão de movimento.....	33
2.9	Fusos de esferas.....	33
2.9.1	Características dos fusos de esferas:.....	34
2.10	Motores.....	35
2.10.1	Teoria de operação dos motores de passo.....	36
2.10.2	Enrolamentos.....	38
2.10.3	Chaveamento de um quarto de passo.....	38
2.10.4	Acionamentos de micro passos.....	39
2.11	Telemanufatura - ambiente colaborativo.....	40
3	METODOLOGIA.....	42
4	MEMÓRIA DE CÁLCULO.....	46
4.1	Dados para dimensionamento do motor do eixo Y.....	46

4.1.1	Propriedades do conjunto fuso e porca de esferas recirculantes.....	46
4.1.2	Propriedades da mesa .....	47
4.1.3	Propriedades do motor de passo do eixo Y .....	48
4.1.4	Propriedades dos rolamentos dos mancais .....	48
4.1.5	Propriedades das guias lineares .....	49
4.2	Condições de projeto para a operação do motor de passo .....	49
4.2.1	Torque de operação do fuso.....	49
4.2.2	Momento de inércia aplicado ao motor .....	49
4.2.3	Força devido ao atrito dinâmico, para guias lineares .....	50
4.2.4	Coefficiente de torque do fuso de esferas .....	50
4.2.5	Torque de referência devido á pré carga.....	50
4.2.6	Torque máximo devido à pré carga .....	51
4.2.7	Torque devido ao atrito nos mancais de rolamento .....	51
4.2.8	Torque no motor à velocidade constante .....	52
4.2.9	Rotação máxima do motor de passo .....	52
4.2.10	Torque durante a aceleração .....	53
5	ADEQUAÇÕES DE COMPONENTES MECÂNICOS.....	54
5.1	Adequações devido aos desvios geométricos na estrutura da máquina.....	57
5.2	Adequação do assentamento da mesa do eixo X.....	60
5.3	Adequação do assentamento da mesa do eixo Y.....	61
6	DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES MECÂNICOS .....	66
6.1	Guias lineares.....	66
6.2	Porca e fusos de esferas .....	67
6.3	Fuso do eixo Z.....	68
6.4	Acoplamentos .....	68
7	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES ELETROELETRÔNICOS .....	70
7.1	O motor de passo .....	70



7.2	Os acionamentos dos motores .....	71
7.3	Motor do eixo-árvore.....	72
7.4	Acionamento do eixo-árvore .....	74
7.5	Interface com PC .....	75
7.6	Montagem elétrica .....	77
7.7	Linha de emergência.....	80
8	CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA CNC.....	81
8.1	O Software Mach3 .....	81
8.2	Configuração do programa .....	81
8.3	Habilitação da porta paralela .....	81
8.4	Habilitação dos eixos.....	82
8.5	Sintonia dos eixos .....	83
8.6	Correção das folgas.....	86
8.7	Mapeamento de erro de passo dos fusos.....	88
9	TESTES EXPERIMENTAIS .....	90
9.1	Teste de repetibilidade e precisão de posicionamento.....	90
9.2	Usinagem de peças para conferência da geometria da máquina.....	91
9.3	Usinagem de micro componentes .....	94
9.4	Aplicação em telemanufatura .....	97
9.5	Análise de vibrações no concreto polimérico.....	101
9.6	Aplicação em retífica.....	102
10	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	104
10.1	O equipamento.....	104
10.2	Teste de repetibilidade e precisão de posicionamento.....	105
10.3	Usinagem de peças para conferência da geometria da máquina.....	106
10.4	Usinagem de micro componentes .....	106
10.5	Aplicação em telemanufatura .....	107

10.6	Análise de vibrações no concreto polimérico.....	109
10.7	Aplicação em retífica.....	110
11	CONCLUSÕES .....	111
12	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	112
	REFERÊNCIAS .....	113
	ANEXOS.....	116

## 1 INTRODUÇÃO

A dinâmica de desenvolvimento de produtos de alta precisão que vão desde áreas como medicina à indústria aeroespacial têm gerado uma demanda crescente por equipamentos que viabilizem a produção de componentes miniaturizados em lotes que vão desde protótipos a milhares de peças, participando de todas as fases do ciclo de desenvolvimento do produto, com precisão, rapidez e baixo custo. Uma mini fresadora de precisão CNC caracterizada pela modularidade, razão tamanho da máquina/tamanho da peça mais otimizada e precisão de fabricação se apresenta como uma ferramenta ideal para atender a estes requisitos.

A aplicação do concreto polimérico em estruturas de máquinas operatrizes apresenta grandes oportunidades de impulso para a sua popularização. Além das propriedades mecânicas favoráveis ao processo de usinagem, a construção de uma estrutura com este material exige recursos disponíveis fora do ambiente industrial. O presente trabalho explora a abordagem de soluções para alguns problemas que podem surgir durante a construção de uma estrutura deste material.

### 1.1 Justificativa

A taxa de evolução do conhecimento aumenta na proporção de sua popularização. Com o baixo custo atual de componentes mecânicos e eletroeletrônicos de desempenho satisfatório atingindo patamares que permitem sua aquisição sem investimentos de grande monta, a evolução dos PC's e o surgimento de programas de baixíssimo custo que podem transformar um computador com poucos recursos em um controlador CNC, torna-se mais fácil despertar o interesse de pessoas para esta atividade, o que pode adquirir até mesmo um cunho social, pois é um tema de grande apelo, principalmente entre os jovens, e que pode e deve ser utilizado para atraí-los para os ambientes de pesquisa. O presente trabalho demonstra a viabilidade de construção de uma fresadora CNC de pequeno porte totalmente funcional, com a possibilidade de operação via internet utilizando programas gratuitos disponíveis na rede.

O presente trabalho demonstra a viabilidade de se construir uma fresadora CNC de pequeno porte com estrutura de concreto polimérico, totalmente funcional e com aplicações tanto comerciais quanto didáticas.

## 1.2 Objetivos do trabalho

**Objetivo global:** Desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC que permita a integração com ferramentas computacionais de auxílio à manufatura, assim como a possibilidade de compartilhamento através de protocolo HTTP (rede mundial de computadores).

### Objetivos específicos:

- ✓ Construção de uma fresadora CNC de precisão a baixo custo;
- ✓ uso de metodologias de projeto de precisão;
- ✓ uso de plataforma IBM-PC para automação de máquina CNC;
- ✓ construção de um equipamento que sirva de plataforma para posteriores experimentos científicos e com alto potencial pedagógico.

## 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira: Uma introdução abrangida pelo capítulo 1, seguido de uma revisão bibliográfica (capítulo 2), metodologia (capítulo 3), um capítulo contendo os cálculos de projeto para caracterização da máquina (capítulo 4), adequações necessárias no projeto inicial caracterização da máquina (capítulo 5), descrição dos principais componentes mecânicos (capítulo 6), os principais componentes eletroeletrônicos aplicados (capítulo 7), descrição e configuração do software CNC adotado (capítulo 8), testes experimentais (capítulo 9), resultados práticos obtidos e discussões (capítulo 10) conclusões (capítulo 11) e, finalmente, algumas sugestões para melhoria do desempenho da máquina e pesquisas futuras (capítulo 12).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Arquitetura básica de uma máquina-ferramenta

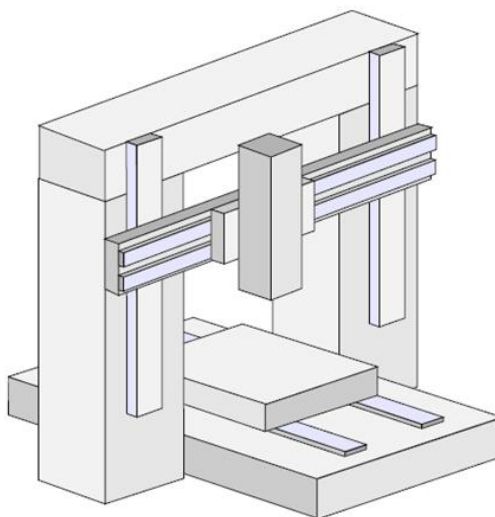
O desenvolvimento de máquinas através dos tempos tem sido feito com diferentes abordagens através dos tempos. O sucesso ou falha de uma máquina de precisão pode ser avaliado conforme seis grandes temas (DORNFELD; DAE-EUN, 2008):

- a) Precisão dimensional;
- b) precisão angular;
- c) precisão de forma;
- d) rugosidade de forma;
- e) precisão cinemática;
- f) alterações de camadas superficiais.

Uma máquina de precisão típica pode ser considerada como o conjunto de cinco subsistemas principais: estrutura mecânica, eixo-árvore e sistema de acionamento, ferramentas e sistemas de fixação, sistema de controle e inspeção. Estes cinco, juntamente com a dinâmica dos esforços de usinagem interagem dinamicamente e determinam o desempenho do equipamento. Os desafios para o pleno desenvolvimento da usinagem de alta velocidade são, principalmente: tecnologia de acionamento e controle, redução no peso da máquina-ferramenta e nova cinemática das máquinas. Estes são tanto elementos que devem ser inseridos no projeto quanto características de desempenho de máquina que devem ser medidas. Existem métodos para se assegurar que as soluções propostas no projeto e implementação dos requisitos funcionais da máquina ou sistema podem ser obtidas de modo econômico e eficiente. Para tal existem princípios de projeto que conduzem a uma obtenção dos quatro requisitos básicos funcionais: existência de uma referência cinemática perfeita; existência de um par cinemático perfeito que execute um movimento perfeito em relação a tal referência; construção da estrutura de modo a prevenir ruídos e distúrbios na operação e uma habilidade por parte do equipamento de detectar movimentos com acuracidade.

## 2.2 Projeto de fresadora

Resumidamente, uma fresadora é uma máquina onde a ferramenta de corte, que é fixada em um eixo-árvore, gira e se movimenta em relação à peça, conforme três eixos ortogonais (Figura 1).



**Figura 1 - Fresadora de pórtico**

Fonte: STOETERAU, 2004

O mecanismo se compõe basicamente da estrutura da máquina onde estão fixos os barramentos e de três conjuntos, movimentados através de fusos.

A ferramenta possui, assim quatro graus de liberdade: um rotacional e três de translação. Cada eixo da máquina confere um grau de liberdade, e para que o eixo possua esta restrição adotam-se estruturas denominadas barramentos, que podem ter guias: de deslizamento, de elementos rolantes, fluido estáticas (óleo, água, ar, etc.), de elementos elásticos e de levitação magnética (STOETERAU, 2004).

Todos os componentes da fresadora, tanto as guias quanto motores e outros, necessitam de uma estrutura rígida sobre a qual serão assentados. Esta estrutura deve preencher a requisitos de rigidez, requisitos geométricos e o seu material deve possuir propriedades que otimizem o processo de corte. O material mais comumente usado em máquinas operatrizes tradicionais é o ferro fundido, pelo seu alto coeficiente de amortecimento, facilidade de usinagem e por ter a tecnologia de seus processos de fabricação e usinagem bastante amadurecida. Uma das desvantagens das estruturas de ferro fundido é a necessidade de se desenvolver todo um processo de fundição para cada novo projeto, o que inviabiliza em muito a fabricação de lotes pequenos ou unitários. O desenvolvimento de

materiais alternativos para estruturas das máquinas tem sido objeto de trabalho de muitos centros de pesquisa, dentre estes materiais encontra-se o concreto polimérico.

### 2.3 Estruturas

As estruturas de máquinas-ferramenta são componentes sobre os quais todos os serão montados. O projeto de toda a estrutura deve levar em conta principalmente os seguintes requisitos (STOETERAU, 2004):

- ✓ Rigidez estática;
- ✓ rigidez dinâmica;
- ✓ estabilidade térmica;
- ✓ estabilidade química;
- ✓ facilidade de manipulação;
- ✓ acessibilidade aos componentes internos;
- ✓ custo.

O material para uma estrutura de máquinas ferramenta deve possuir altos valores de rigidez estática e de amortecimento de maneira que possa melhorar tanto seu desempenho dinâmico quanto estático. A melhor maneira de aumentar a capacidade de amortecimento de uma máquina de ultraprecisão é usando um material compósito, composto por um material com alta rigidez e baixo amortecimento e outro material com baixa rigidez e alto amortecimento. O compósito resultante pode possuir ambos: módulo de elasticidade e amortecimento moderados. Entre os vários tipos de compósitos materiais disponíveis, materiais de concreto de matriz polimérica têm sido utilizados com materiais base para estruturas de máquinas ferramenta por pesquisadores e fabricantes. O concreto polimérico é produzido pela mistura de um monômero de resina com agregados e polimerizadores ou materiais de cura. Poliéster insaturado, epóxi e resinas acrílicas são usadas em matrizes de materiais, com seixo e areia servindo de materiais de agregado do concreto polimérico. Kim, Jeong e Lee (1997) conduziram vários experimentos para obter materiais com propriedades ótimas, e a melhor fração de peso do concreto polimérico para as bases de retíficas de precisão foi determinada por resultados experimentais como 50% seixo, 42,5% areia e 7,5% resina. Os materiais epóxi utilizados no experimento foram a resina IPCO 410 e o endurecedor IPCO 183. Para se avaliar as propriedades da base de concreto polimérico, em

comparação com aquelas de ferro fundido, foram manufaturadas duas bases: uma de cada material. A tabela 1 mostra o comparativo das propriedades.

	<b>Ferro Fundido</b>	<b>Concreto Polimérico</b>
<b>Frequência Natural (f)</b>	750 Hz	830 Hz
<b>Fator de amortecimento</b>	0,04 – 0,05%	1,3 – 1,4 %
<b>Módulo (E)</b>	97 GPa	25 GPa
<b>Gravidade específica (<math>\rho g</math>)</b>	71,97 kNm <sup>-3</sup>	21,66 kNm <sup>-3</sup>
<b>Rigidez Específica (E/ <math>\rho g</math>)</b>	1,35 x 10 <sup>6</sup> m	1,15 x 10 <sup>6</sup> m
<b>Calor Específico</b>	0,43 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,6 – 0,8 kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
<b>Coefficiente de expansão térmica</b>	12 $\mu\text{m m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	8,1 - 17 $\mu\text{m m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
<b>Condutividade térmica</b>	75 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	1,9 – 2,1 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

**Tabela 1 - Propriedades do ferro fundido e do concreto polimérico.**

Fonte: KIM; JEONG; LEE, 1997

Quando a fração de peso do concreto polimérico foi 7,5%, o coeficiente de expansão térmica foi o mesmo que o do ferro fundido e a taxa de amortecimento foi nove vezes aquela do ferro fundido. Uma vez que o módulo específico do concreto polimérico foi um pouco menor que o do ferro fundido, o concreto poderia ser projetado um pouco mais pesado para obter a mesma rigidez. Entretanto, neste caso, o módulo dinâmico do concreto seria muito maior devido ao fato deste ser proporcional ao produto do módulo pelo amortecimento (KIM; JEONG; LEE, 1997).

O projeto apropriado de máquinas-ferramenta requer um conhecimento profundo dos materiais disponíveis para a construção, suas formas ou propriedades, a dinâmica do processo de usinagem em particular e a magnitude e natureza das forças envolvidas. Os materiais ideais para os componentes de máquinas ferramenta devem ter alta rigidez, baixo coeficiente de expansão térmica, boa estabilidade dimensional, boa capacidade de amortecimento e facilidade de fundição. Materiais como concreto, concreto acrílico, compósitos de aço forjado granito-epóxi e concreto de resina cerâmica têm demonstrado que possuem uma ou mais propriedades superiores às daquelas do ferro fundido. O comportamento dinâmico investigado por análise modal mostrou que bases de ferrocimento possuem uma capacidade de amortecimento e primeira frequência natural maiores do que o ferro fundido. Conforme o desgaste de ferramentas de carboneto cementado sem cobertura durante torneamento a seco em dois tipos de tornos, um com base em ferrocimento e outro com com base de ferro fundido indicou que a vida da ferramenta foi mais alta quando o corte foi executado no torno com base de ferrocimento (RAHMAN; MANSUR; LAU, 2001).

Sawada, Takeuchi e Sata (1995) afirmam que um protótipo de fresadora composta de três eixos translacionais poderia não atingir necessariamente o desempenho necessário para



executar usinagem com uma boa rugosidade superficial devido à relativa baixa rigidez. Para superar o problema foi projetada uma fresadora com três eixos e estrutura tipo torno, com alta rigidez e cuja estrutura seja facilmente construída. Foi feita uma melhoria adicional na rigidez pela adição de uma estrutura em circuito fechado que elimina a inclinação do cabeçote sobre as guias no momento em que são aplicadas as forças de corte. Esta ação aumentou a rigidez em 2,4 vezes.

Materiais com uma boa razão resistência/peso devem ser considerados para obtenção de boa estabilidade estática e dinâmica. As propriedades da cerâmica de alumina a tornam uma alternativa de alta tecnologia (e alto custo) para aplicação em estruturas de máquinas ferramenta. São cerâmicas com excelentes propriedades de resistência, térmicas e químicas. As propriedades da cerâmica SA610 e de mais dois materiais largamente utilizados em máquinas de precisão são listados na tabela 2. Embora estes dois materiais tenham uma boa condutividade térmica, sua razão resistência/peso é muito menor que aquelas do SA610 (WANG, et al., 2010).

<b>Material</b>	<b>Densidade (x 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Coef. Exp. Térmica (10<sup>-6</sup> m/°C)</b>	<b>Condutividade Térmica (W/m.K)</b>
<b>Ferro fundido 40</b>	7,3	120	11,0	52
<b>Aço 1018</b>	7,9	200	11,7	60
<b>SA610</b>	3,5	280	5,7	13,8

**Tabela 2 - Propriedades do Fofó 40, aço carbono e SA610**

Fonte: WANG, et al., 2010

### 2.3.1 Propriedades da estrutura de concreto polimérico

Panzer (2003) utilizou modelos micro mecânicos e métodos computacionais para prever as propriedades mecânicas de compósitos particulados de esferas de sílica envolvidos por matriz polimérica, utilizou grãos de sílica de forma arredondada com alto índice de pureza, vários tamanhos de grão, graus de empacotamento e porcentagens de matriz polimérica. Seus experimentos mostraram que as propriedades mecânicas destes compósitos sofrem grandes alterações com a modificação das propriedades das fases, principalmente a fase dispersa e que dentre as variáveis mais importantes estavam o tamanho, a forma e o quociente entre os diâmetros maiores e menores das partículas. Os melhores resultados para estudo do módulo de elasticidade foram obtidos em amostras com fração em peso de 80% de matriz epóxi e 20% de particulado da fase dispersa de sílica, onde a matriz epóxi foi

composta por Araldite®-M e catalisador HY956, e a fase dispersa foi composta por areias de sílica. Para a obtenção de um fator de empacotamento ótimo, os grãos de sílica foram dispostos numa mistura tri modal, onde 30% das partículas tinham classificação conforme escala granulométrica U.S. Tyler nº 30, 40% das partículas tinham classificação U.S. Tyler nº 40 e 30% das partículas classificadas U.S. Tyler nº 140, apresentando um módulo de elasticidade médio de 7,6 GPa.

Segundo Piratelli Filho e Levy Neto (2010), a capacidade de amortecimento de vibrações mecânicas é uma das propriedades mais importantes dos compósitos de granito-epóxi, superiores às do ferro fundido, inclusive. Eles estudaram o comportamento de amostras deste material preparadas com diferentes combinações das variáveis de processo, como fração do peso do epóxi na mistura e tamanho das distribuições das partículas de granito e investigaram o comportamento do fator de amortecimento do material pelo método do decremento logarítmico, demonstrando que amostras com fração de peso em torno de 80% para o granito e 20% para o epóxi apresentavam fatores de amortecimento aproximadamente três vezes maiores que o ferro fundido.

Lee e outros (2004), numa outra linha de pesquisa e com objetivo de melhorar as características dinâmicas de uma máquina HSM de grande porte, obtiveram uma redução de até 34% na massa da mesa do eixo Y, com ganho do fator de amortecimento em até 5,7 vezes, comparado com estruturas convencionais, pela aplicação de estruturas obtidas pela junção de um “sanduiche” de compósitos de fibras de carbono e epóxi a estruturas soldadas de aço, com a aplicação de adesivos e parafusos, sem sacrifício da rigidez.

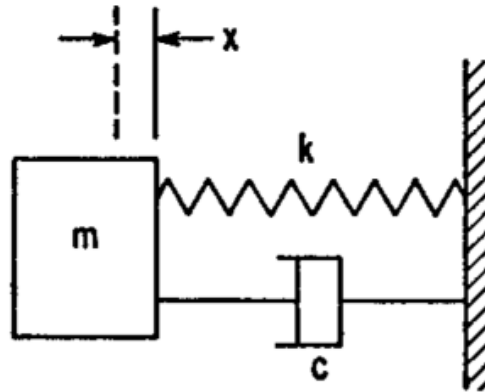
## **2.4 Identificação do amortecimento pela análise do decremento logarítmico**

A técnica do decremento logarítmico é um dos métodos mais comuns para estimativa do amortecimento no domínio do tempo. Ela expressa a taxa na qual a amplitude de uma vibração livre amortecida decai.

A figura 2 mostra um sistema com um grau de liberdade e amortecimento viscoso.

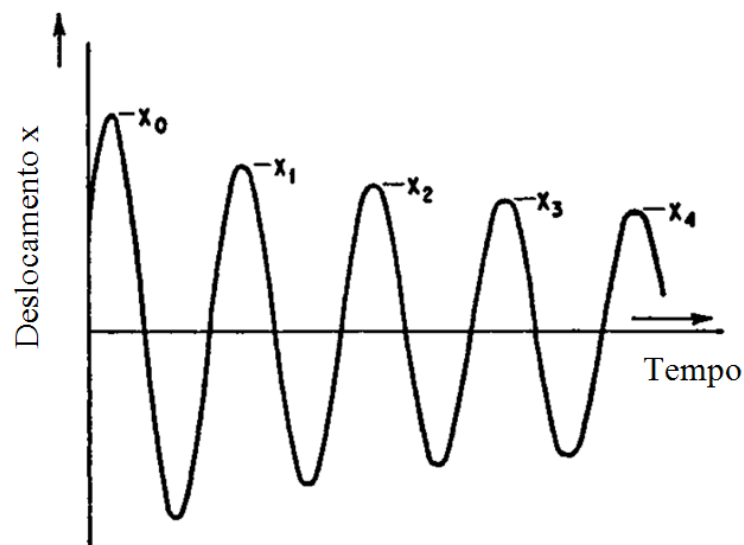
Para sistemas subamortecidos, que possuem um curva de resposta similares aquela mostrada na figura 3, o decremento logarítmico  $\Delta$ , dado pela equação 1, é o logaritmo natural da razão das amplitudes de dois ciclos sucessivos:

$$\Delta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} \quad (1)$$



**Figura 2 - Sistema com um grau de liberdade e amortecimento viscoso**

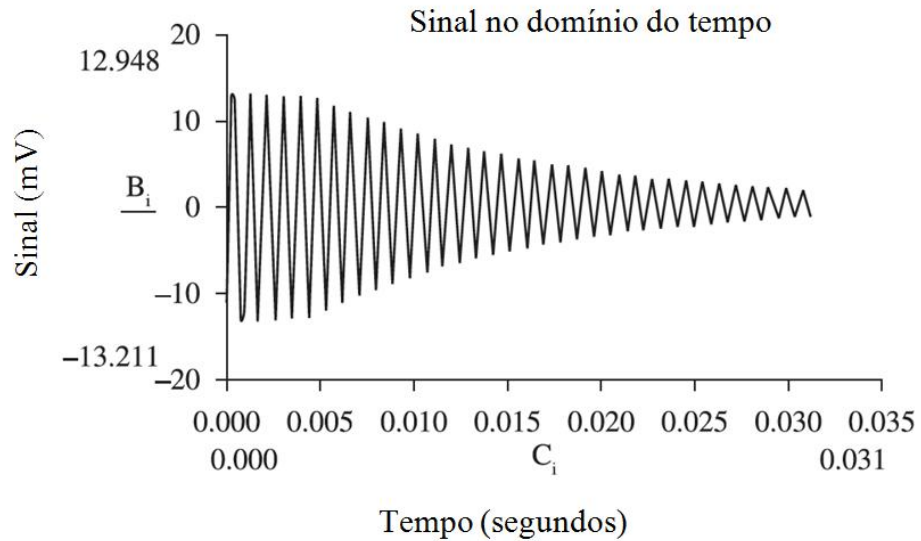
Fonte: PIERSOL; PAEZ, 2010



**Figura 3 - Curva de resposta típica de um sistema subamortecido**

Fonte: PIERSOL; PAEZ, 2010

A capacidade de amortecimento de vibrações mecânicas de vigas feitas de compósitos de granito-epóxi é objeto de estudos e foi constatado experimentalmente que estas vigas possuem um fator de amortecimento significativamente maior que aquelas fabricadas em ferro fundido, para o mesmo volume de material (PIRATELLI FILHO; LEVY NETO, 2010)(Figura 4).



**Figura 4 – Curva de resposta típica de uma viga de granito-epóxi**

Fonte: PIRATELLI FILHO e LEVY NETO, 2010

## 2.5 Cabeçote principal ou eixo-árvore

Os elementos que sustentam principalmente cargas de flexão, com pouca ou nenhuma torção são denominados eixos. Elementos que transmitem considerável torque são chamados árvores e são normalmente montados com transmissores de torque, como engrenagens, polias e rodas dentadas para correntes. Eixos-árvore são árvores que suportam ferramentas ou peças a serem usinadas e seus fixadores (Figura 5). Os eixos-árvore devem exercer as seguintes funções (JOSHI, 2007):



**Figura 5 - Eixo-árvore**

Fonte: INDÚSTRIAS ROMI, 2012

- ✓ Segurar a peça a ser usinada ou a ferramenta de corte;
- ✓ posicionar (centrando) a peça a ser usinada/ferramenta;
- ✓ conferir movimento rotativo (torque) à peça a ser usinada/ferramenta.

Para exercer estas funções satisfatoriamente, um eixo-árvore deveria preencher os seguintes requisitos:

- ✓ Montagem precisa, com mínimo de jogo radial e axial;
- ✓ rigidez dinâmica e estática adequada, para minimizar distorções resultantes das forças de corte;
- ✓ resistência ao desgaste por endurecimento superficial, ou mancais anti-fricção intercambiáveis;
- ✓ dissipação de calor através de seleção de mancais adequados;
- ✓ superfícies de montagem precisas para posicionamento de fixadores de peças, como placas e porta-pinças ou ferramentas de corte;
- ✓ vida longa sob fadiga, pela limitação das tensões de flexão.

## 2.6 Mancais

As partes móveis em maquinaria envolvem movimentos relativos de deslizamento ou rolamento. Exemplos de movimentos relativos são movimentos de deslizamento, como em máquinas-ferramenta, e movimentos de rotação, como em volantes em motores de combustão interna (HARNOY, 2002).

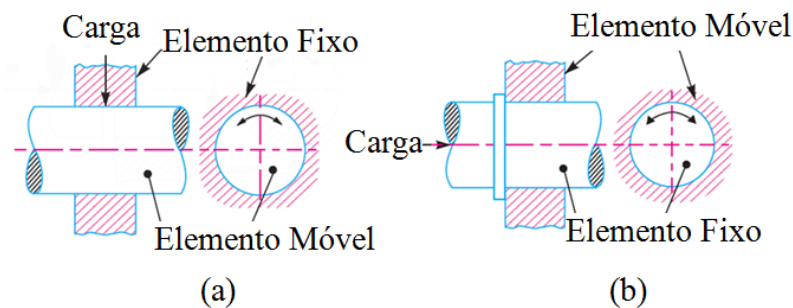
Um mancal é um elemento de máquina que suporta outro elemento dotado de movimento. Ele permite um movimento relativo entre as faces de contato dos elementos enquanto suporta uma carga. Graças ao movimento relativo entre as superfícies de contato, certa quantia de energia é perdida pela resistência devido ao atrito e se as superfícies estiverem em contato direto haverá um desgaste rápido. Para se reduzir tal desgaste e perdas por atrito e, em alguns casos, para auxiliar na retirada do calor, uma camada de fluido (conhecido como lubrificante) deve ser providenciada (KHURMI; GUPTA, 2005).

Um projeto apropriado de mancal pode minimizar a fricção e o desgaste e também uma posterior falha no equipamento. O mais importante objetivo no projeto do mancal é estender sua vida útil, reduzir perdas por fricção e desgaste, minimizar custos com manutenção e paradas de equipamento. Em alguns casos, como em aeronaves, existem muitas considerações de segurança, e falhas inesperadas em mancais que devem ser prevenidas a

qualquer custo. Durante o século passado, houve um interesse crescente nos parâmetros de fricção e desgaste característicos de vários projetos de mancais, lubrificantes e materiais de mancais. Esta disciplina científica, denominada Tribologia, aborda a fricção, lubrificação e desgaste de superfícies que interagem em movimento relativo. Os esforços envolvidos resultaram em avanços significativos em tecnologia de mancais, particularmente em lubrificação, materiais de mancais e com a introdução de mancais de rolamento e mancais suportados por filmes lubrificantes, que resultaram na redução de fricção, desgaste, custos com manutenção e aumento da vida dos equipamentos (HARNOY, 2002).

**Classificação:** Existem várias maneiras de se classificar os mancais (KHURMI; GUPTA, 2005) , dentre elas:

- a) Dependendo da direção da carga a ser suportada os mancais deste grupo são classificados como:
- ✓ **Mancais radiais**, onde a carga age perpendicularmente à direção do movimento do elemento móvel (figura 6-a).
  - ✓ **Mancais de encosto**: a carga age ao longo do eixo de rotação , como mostrado na (figura 6-b)



**Figura 6 - (a) Mancais radiais. (b) Mancais axiais**

Fonte: KHURMI; GUPTA, 2005

- b) Dependendo da natureza do contato os mancais podem ser classificados como:
- ✓ **Mancais de contato com deslizamento**: O deslizamento ocorre ao longo das superfícies de contato entre os elementos móveis e os fixos.
  - ✓ **Mancais de contato com rolamento**: Nestes mancais ou rolos de aço são colocados entre as partes móvel e fixa. Estes geram fricção de rolamento em dois pontos para cada esfera ou rolo (KHURMI; GUPTA, 2005). A vantagem

do movimento de rolamento é que este envolve muito menos fricção e desgaste, em comparação com o movimento de deslizamento.

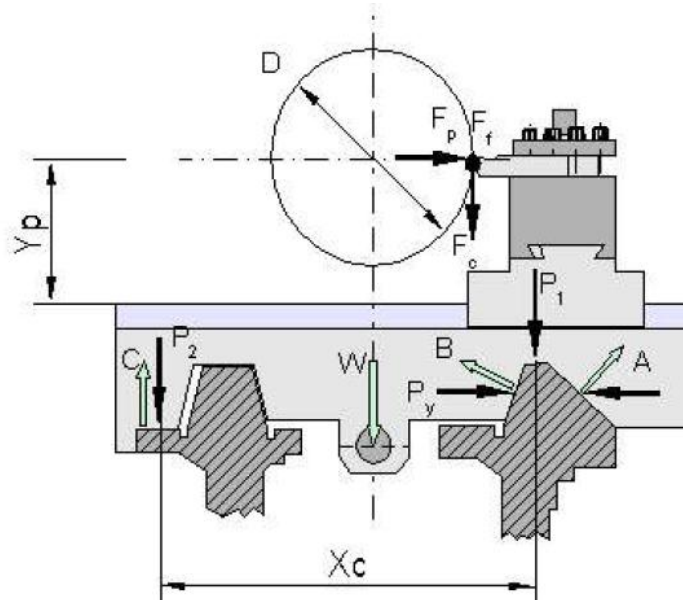
- ✓ **Mancais lubrificados hidrodinamicamente:** Nestes mancais há um filme de lubrificante entre a parte móvel e o mancal. Quando o mancal é abastecido com lubrificante em quantidade suficiente é criada uma pressão positiva na folga quando o eixo entra em rotação sobre um eixo que é excêntrico em relação ao eixo do mancal. A carga pode ser suportada por este fluido sem nenhum contato entre as partes. A capacidade de carga deste tipo de mancal surge simplesmente porque um fluido viscoso resiste ao movimento que lhe é imposto. Sob condições apropriadas, esta resistência ao movimento desenvolverá uma distribuição de pressão no filme lubrificante que possa suportar uma carga útil (KHURMI; GUPTA, 2005).
- ✓ **Mancais hidrostáticos:** Em contraste com os mancais hidrodinâmicos, os hidrostáticos se referem a uma configuração onde a pressão no filme fluido é gerada por uma bomba externa de alta pressão. O lubrificante a alta pressão é alimentado na folga entre o mancal e o eixo e o fluido transmite a carga necessária para separar as superfícies, prevenindo a fricção e desgaste.
- ✓ **Mancais eletromagnéticos:** Ainda em desenvolvimento ,mas já aplicados em aplicações especiais. O conceito de operação é o de que forças magnéticas são usadas para suportar as cargas no mancal. Vários eletroímãs são montados no lado do mancal (polos do estator). A capacidade de carga do mancal é gerada pelo campo magnético entre as lâminas em rotação, montadas no eixo, e os pólos do estator, montados no lado fixo do mancal. Um controle de realimentação ativo mantém o eixo flutuando sem qualquer contato com a superfície do mancal. A vantagem é que não existe nenhum contato entre as partes deslizantes, e o desgaste é completamente eliminado, desde que haja levitação magnética (HARNOY, 2002).

## 2.7 Guias ou barramentos

As guias de deslizamento (figura 7) tiveram durante muito tempo a sua presença garantida na quase totalidade das máquinas operatrizes, devido à sua robustez, facilidade de fabricação, ausência de necessidade de manutenção, etc., mas não atendem mais às

necessidades altas velocidades atuais. Como estas envolvem a necessidade de contato entre grandes áreas, trazem junto o problema do atrito e da impossibilidade de se manter uma lubrificação adequada em velocidades da ordem de 50 metros por minuto, adotadas por máquinas atuais. Alguns fabricantes de máquinas ainda tentam melhorar seu desempenho, adotando revestimentos anti-atrito, como o TURCITE®, mas mesmo este recurso se mostra limitado.

Outra desvantagem das guias de deslizamento é a inviabilidade econômica de se fazer perfis personalizados para pequenos lotes, uma vez que estes implicam em fundição, cementação, tratamento térmico e retífica de grandes superfícies.



**Figura 7 - Típica guia de deslizamento para torno**

Fonte: STOETERAU, 2004

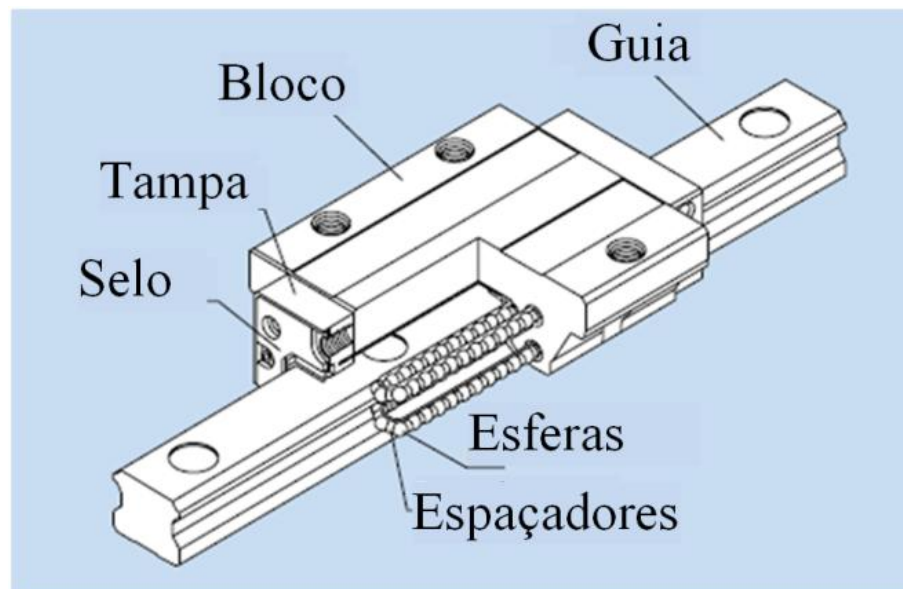
Uma alternativa que tem se tornado cada vez mais atraente às guias de deslizamento são as guias de rolamento, tais como as guias lineares. Possuem inúmeras vantagens: são componentes padronizados, com várias configurações disponíveis para carga e velocidade, normalmente disponíveis para pronta entrega, com custo bem menor que uma guia de rolamento, são próprias para altas velocidades de deslocamento, fáceis de instalar, podem ser substituídas em caso de falha. Seu principal inconveniente é a alta sensibilidade a impactos.

Para que os componentes deslizem sobre os barramentos realizando um movimento linear. Segundo Stoeterau (2004), a grande parte dos acionamentos em máquinas-ferramentas utilizam o princípio da rotação, e com exceção do movimento rotação da árvore, a maioria dos deslocamentos sofridos tanto por parte da peça quanto pela ferramenta são lineares. Essa



diferença entre o padrão de movimento dos acionamentos e aquele necessário para o movimento leva à necessidade de uma conversão do movimento rotativo em linear, que é feita por elementos de máquinas específicos, entre os quais podemos citar pinhão/cremalheira, fusos trapezoidais, fusos de esferas recirculantes, fusos epicicloidais, fusos hidrostáticos, polias, rodas de atrito, entre outros. Os fusos de maneira geral podem ser classificados quanto a forma do atrito entre porca e parafuso em fusos de escorregamento, de elementos rolantes, epicicloidais ou hidrostáticos. As atuais máquinas-ferramentas controladas numericamente não admitem que haja folgas ou atrito excessivo nas porcas dos fusos, o que leva a uma predominância dos fusos de esferas recirculantes, que têm alcançado um padronização equiparada aquela encontrada nos mancais de rolamento, tornando-se os elementos de conversão mais comumente utilizados em máquinas-ferramenta.

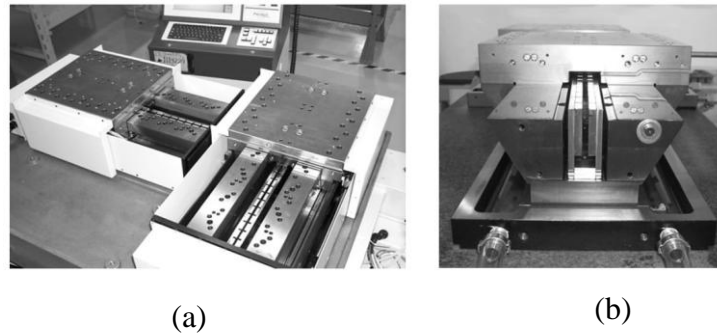
Um modelo de guia linear aplica rolos, ao invés de esferas, conforme esquematizado na figura 8. A aplicação de guias com rolos proporciona um movimento com menor fricção, movimento suave e menor necessidade de manutenção. Para se garantir uma rigidez extremamente alta, rolos com uma pequena deformação elástica podem ser utilizados, permitindo um melhor aproveitamento do diâmetro e comprimento dos rolos (THK , 2007).



**Figura 8 – Diagrama de uma guia linear**

Fonte: THK , 2007

**Guias de escoamento fluido:** Algumas máquinas de ultraprecisão utilizam guias com apenas um grau de liberdade para garantir um alto grau de rigidez, amortecimento de vibração, suavidade no movimento e precisão geométrica. (Figura 9).



(a) (b)  
**Figura 9 - Guias de escoamento fluídico (a) Guia hidrostática para uma máquina de ultra precisão. (b) Torno de ultraprecisão com uma guia hidrostática.**

Fonte: VENKATESH; IZMAN, 2007

Características como resolução de posicionamento na casa de 8,6 nm, proporcionada por uma escala de baixa expansão ultra fina, linearidade no deslocamento horizontal entre 0,2 e 0,3  $\mu$  m são possíveis com a aplicação destas guias. Precisões de deslocamento como estas só podem ser obtidas com o uso de mancais hidrostáticos, associados com guias de escoamento fluídico, que empregam um filme de óleo (mantido sob pressão) entre as partes móveis (VENKATESH; IZMAN, 2007).

## 2.8 Sistemas de transmissão e conversão de movimento

Os motores de movimento rotativo são os mais empregados em equipamentos. Por ser uma tecnologia em constante desenvolvimento desde o início da revolução industrial, apresenta alternativas de aplicação para praticamente todos os ramos de indústria. Por ser tão difundido e devido ao fato dos motores lineares ainda se encontrarem num estágio de desenvolvimento que demandará tempo para se tornarem viáveis, surge a necessidade da adoção de mecanismos que convertam movimentos rotativos em lineares.

Os parafusos de transmissão de potência (também conhecidos como parafusos de translação) são utilizados para converter movimento rotativo em movimento de translação. Por exemplo, no caso de um fuso de um torno, o movimento rotativo está disponível mas a ferramenta deve avançar na direção de corte contra a resistência do material. No caso de um macaco de rosca, uma pequena força aplicada no plano horizontal é usada para levantar ou abaixar uma grande carga (KHURMI; GUPTA, 2005).

## 2.9 Fusos de esferas

A corrida pela redução de custos e aumento de eficiência nos processos produtivos gera uma demanda sempre crescente por velocidades maiores nos equipamentos em

desenvolvimento. Os parafusos possuem uma séria restrição devido ao atrito, o que compromete tanto a eficiência energética quanto a máxima velocidade relativa entre fuso e porca. Uma das alternativas para superar este obstáculo é substituir o atrito de deslizamento pelo atrito de rolamento no conjunto parafuso/porca. O contato direto entre estes dois componentes é eliminado pela inserção de esferas. (Figura 10) Este é o conceito dos fusos de esferas.



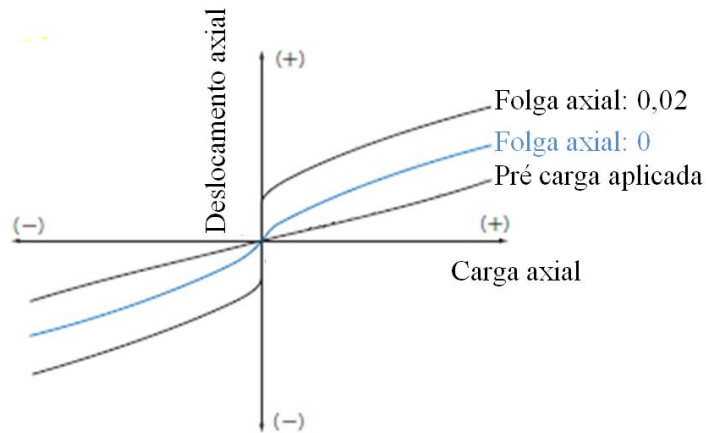
**Figura 10 - Princípio do fuso de esferas: O atrito de deslizamento é substituído pelo de rolamento pela inserção de esferas entre a porca e o fuso**

Fonte: NSK, 2011

### 2.9.1 Características dos fusos de esferas:

- a) **O torque de acionamento é um terço do torque em fusos de deslizamento:** Nos fusos de esferas estas rodam entre a porca e o fuso, aumentando a eficiência e reduzindo a o torque de acionamento em dois terços. Como resultado o fuso de esferas é capaz de converter não somente movimento rotacional em movimento linear (desempenho positivo), mas também de converter movimento linear em movimento de rotação (desempenho reverso) (THK , 2007).
- b) **Capacidade de micro deslocamentos:** O fuso de esferas requer um torque de partida mínimo graças ao movimento de rolamento, isto torna desprezível a tendência de movimentos bruscos típicos da transição de atrito estático para dinâmico (THK , 2007).
- c) **Alta rigidez, sem folga:** Uma vez que o fuso de esferas é capaz de receber pré-carga, a folga axial pode ser reduzida a valores próximo de zero e uma alta rigidez pode ser obtida pela aplicação de pré cargas. Quando a carga axial é invertida, a mesa inverte o sentido do movimento. A figura 11 mostra a relação entre carga deslocamento axiais de eixos com e sem pré carga. No eixo sem a pré carga a mudança de direção no sentido do carregamento causa um erro de histerese. O eixo pré carregado ganha uma rigidez mais elevada e o erro é praticamente eliminado.

- d) **Capacidade de deslocamentos rápidos:** A redução do atrito e consequentes perdas possibilita acelerações impossíveis em fusos de deslizamento e consequentemente altas velocidades finais.



**Figura 11 - Folga axial em relação à carga.**

Fonte: THK , 2007

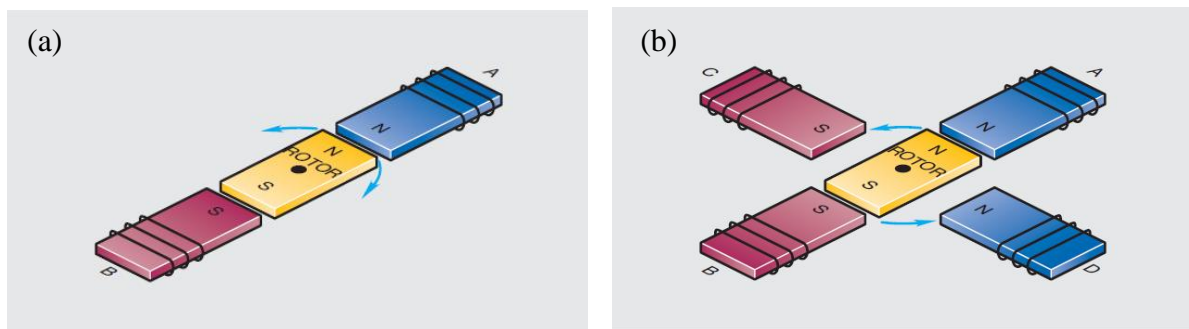
## 2.10 Motores

Funcionalmente o motor é o elemento que realiza uma conversão de sinais e, sobretudo, de energia entre o sistema elétrico e o mecânico. Dentre os vários tipos de motores existentes os motores de passo se destacam como solução para sistemas onde é necessário um controle preciso de ângulos de rotação, velocidade, posição e sincronismo e é possível trabalhar a baixas velocidades, em malha aberta e com o valor máximo de torque conhecido. Apresentam como pontos fortes os fatos de seguirem uma lógica digital, possuírem alta precisão em seu posicionamento e no torque aplicado e possuírem excelente resposta à aceleração e desaceleração e são recomendados em aplicações que exigem um posicionamento preciso de erro pequeno e não cumulativo, ou que exijam altas acelerações. Como pontos fracos apresentam baixo desempenho em altas velocidades, requer um certo grau de complexidade para ser operado e entra facilmente em ressonância se o controle for inadequado, sendo inadequados para aplicações que requeiram em altas velocidades ou um torque muito grande. Os motores de passo podem ser definidos como dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos, gerando variações angulares discretas (BRITES E SANTOS, 2008).

Os motores de passo diferem de outros tipos de motores como os de corrente contínua e os de corrente alternada, por apresentarem deslocamentos angulares específicos como resposta a pulsos apropriados aplicados aos seus terminais. A cada pulso recebido o eixo do motor gira um ângulo pré-determinado. Eles permitem o controle de uma carga com respeito à sua velocidade, distância ou posição e são muito precisos, apresentando geralmente um erro menor que 5% por ângulo de rotação, sendo que este erro não é acumulativo, independentemente do número de rotações (HERMAN, 2010).

### 2.10.1 Teoria de operação dos motores de passo

Os motores de passo operam pelo princípio de atração e repulsão dos polos magnéticos. Considerando o circuito mostrado na figura 12-a, o rotor é um ímã permanente e os enrolamentos do estator são dois eletroímãs. A corrente flui através do polo do estator A de modo a criar um polo norte magnético, e através de B de modo a criar um polo sul magnético. É impossível determinar a direção de rotação. Nestas condições, o rotor poderia girar em qualquer direção. Considerando o circuito da figura 12-b, onde o motor possui quatro polos, a direção da corrente produz um polo norte magnético nos estatores A e B e um polo sul magnético nos estatores B e C. Aqui não há dúvidas com respeito à direção do giro. Neste caso o motor girará 90 graus no sentido anti-horário.

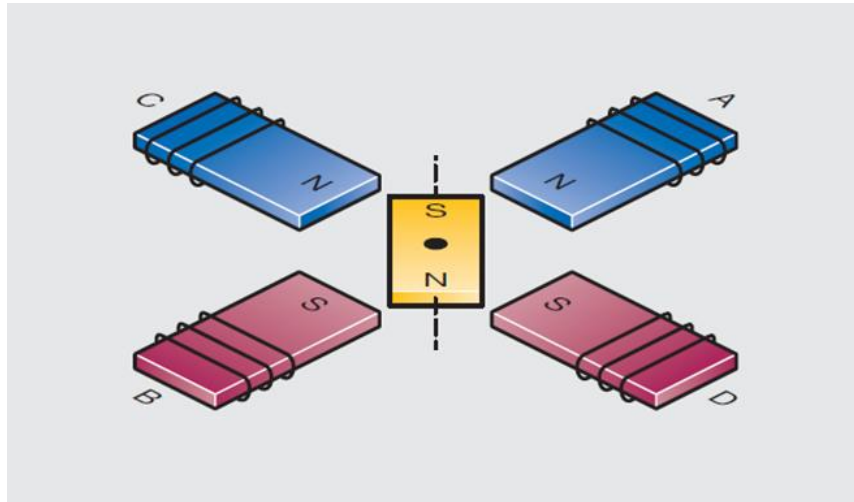


**Figura 12 – Sentido de giro do rotor: (a) indeterminado, e (b) determinado**

Fonte: HERMAN, 2010

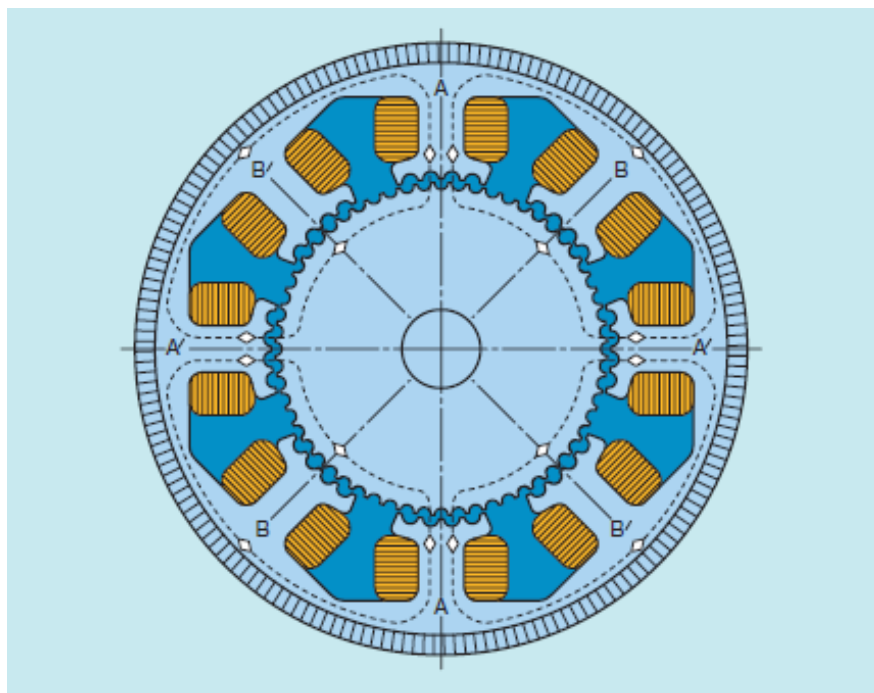
A figura 13 mostra outra condição. Neste exemplo, a corrente flui através dos polos A e C de forma a gerar um polo norte magnético, formando nos polos B e D um polo sul. Nesta ilustração o ímã permanente do rotor já girou para uma posição entre os polos induzidos dos estatores.

Para garantir uma melhor resolução de passo, a maioria dos motores de passo possuem oito polos de estatores, e tanto os polos quanto os rotor têm dentes usinados, como mostrado na figura 14. Na prática, o número de dentes usinados no estator e no rotor determina o incremento angular por pulso do motor, sendo o incremento angular por pulso (em graus) igual a 360 dividido pelo número de dentes. A figura 14 mostra um conjunto que produz um incremento de rotação de 1,8 graus por pulso.



**Figura 13 – Posição do rotor determinada**

Fonte: HERMAN, 2010

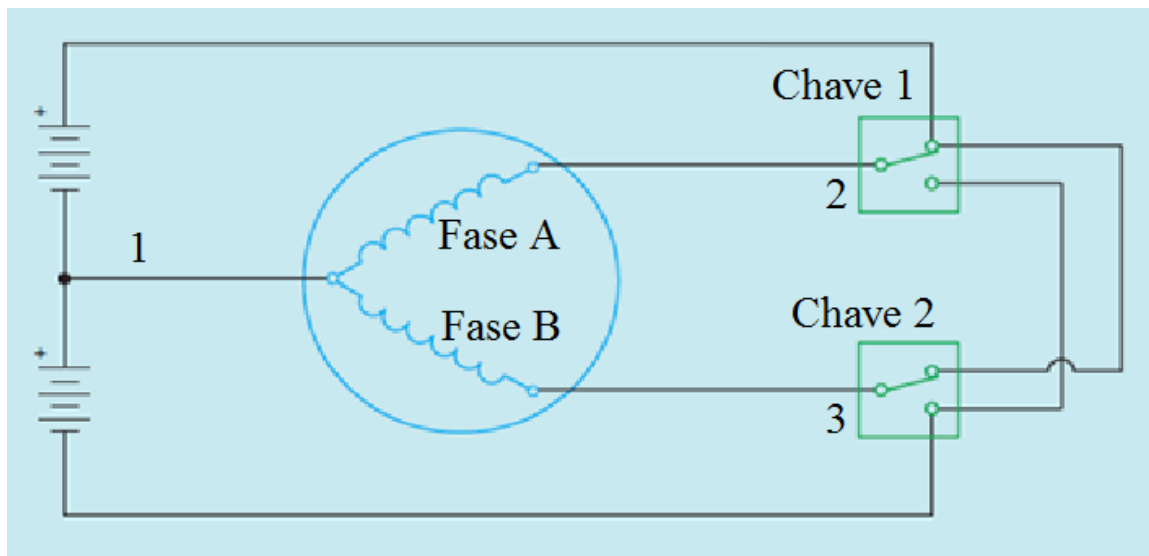


**Figura 14 – Rotor e estator com dentes usinados**

Fonte: HERMAN, 2010

### 2.10.2 Enrolamentos

Existem diferentes tipos de enrolamentos para os motores de passo. Um motor padrão de três terminais é mostrado na figura 15. O terminal 1, comum das duas bobinas, é conectado a um terminal da fonte conforme mostrado. Os terminais 2 e 3 são conectados aos comuns de chaves unipolares de duas posições. A polaridade de cada bobina é determinada pela configuração do chaveamento (HERMAN, 2010).



**Figura 15 – Motor de passo padrão de três terminais**

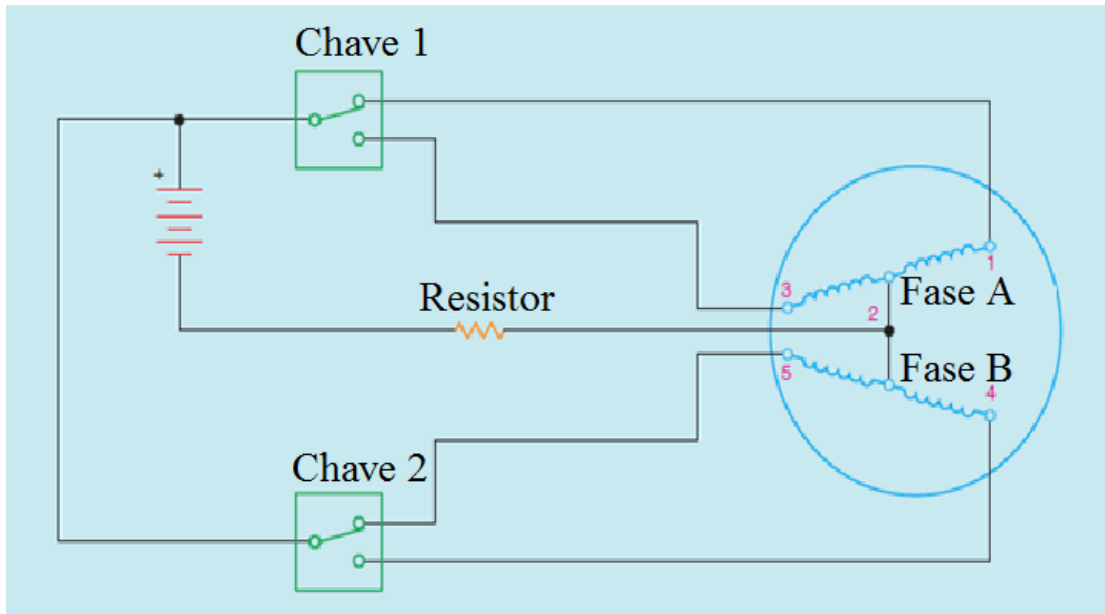
Fonte: HERMAN, 2010

Os motores de passo também podem ter uma configuração bifilar. Este termo se refere ao fato de existirem duas bobinas conectadas. Os motores de passo bifilares possuem duas vezes mais enrolamentos que um motor de três terminais, o que faz necessário o uso de fios de menor dimensão nos enrolamentos. Isto resulta numa resistência maior na bobina, produzindo uma constante indutiva-resistiva ( $L/R$ ) melhor para o motor. O aumento do valor desta constante melhora o desempenho do motor. O uso desta configuração também reduz a complexidade do circuito de acionamento. Como regra geral, a fonte deve ter uma tensão cerca de cinco vezes a do motor, para um bom desempenho do sistema (HERMAN, 2010).

### 2.10.3 Chaveamento de um quarto de passo

O chaveamento mostrado na figura 16 pode ser usado para uma sequência de quatro passos. Cada vez que uma das chaves muda de posição, o rotor avançará um quarto de um dente. Após quatro pulsos, o rotor terá girado o equivalente a um dente. Se o rotor e o estator

possuírem cinquenta dentes, serão necessários 200 pulsos para uma revolução completa. Isto corresponde a um ângulo de 1,8 graus por pulso. Procedimento similar pode ser aplicado para a obtenção de incrementos de um oitavo de passo (HERMAN, 2010).



**Figura 16 – Chaveamento de um quarto de passo**

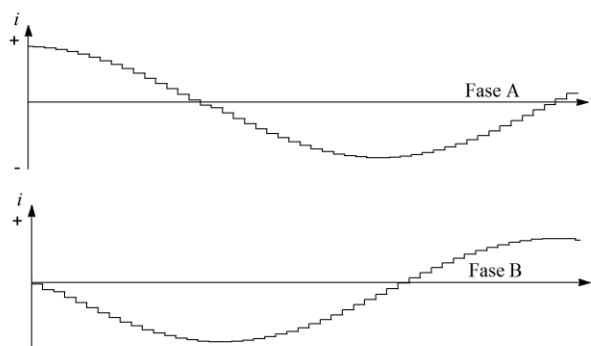
Fonte: HERMAN, 2010

#### 2.10.4 Acionamentos de micro passos

Um passo de um motor de passo pode ser dividido em incrementos ainda menores pela excitação parcial de várias fases dos enrolamentos. Um acionamento de micro passos controla a corrente nas bobinas em muitos níveis, de forma que o rotor se mova em incrementos proporcionais à subdivisão de um passo, cada incremento correspondendo à mudança de um nível na corrente da bobina. Durante um ciclo de excitação a corrente em uma fase passa duas vezes por cada nível e o motor gira um micro passo. (IET, 2007). A baixas velocidades e durante a operação no modo de passo inteiro o motor tem a tendência de se mover de forma irregular, aos “arrancos”. O uso de micro passos propicia um deslocamento mais suave. A corrente pode ser ajustada de modo que se torne similar a uma senóide. A figura 17 mostra variação da corrente em cada fase, em forma de onda. A partir da figura pode-se ver que a corrente enviada para cada grupo de bobinas é controlada no tempo de modo que haja sempre uma diferença de fase entre uma e outra. O fato da corrente em cada fase individual crescer e diminuir á semelhança de uma onda senoidal que está sempre defasada em relação à outra permitirá que o motor atinja centenas de passos intermediários. De fato, é possível para um



controlador atingir cerca de 500 micro passos para uma seqüência de um incremento, o que proporcionará 100 000 passos para cada revolução (DILEEP, 2006) .



**Figura 17 – Chaveamento de um quarto de passo**

Fonte: Adaptado de DILEEP, 2006

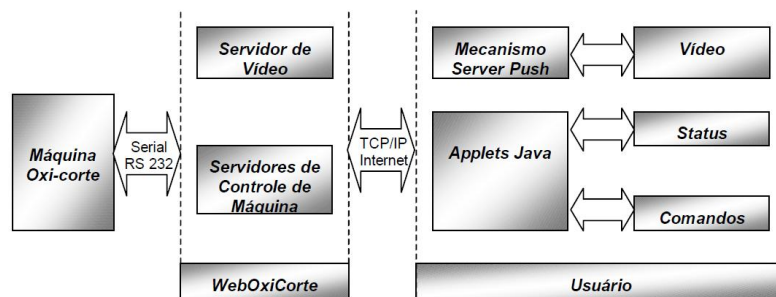
## 2.11 Teleanufatura - ambiente colaborativo

A globalização da economia trouxe novas formas de desenvolvimento de produtos. Equipes são formadas por pessoas e instituições dispersas geograficamente e dispersas muitas vezes por vários continentes. Áreas com atividades distintas no processo de projeto e fabricação devem compreender as limitações dos e peculiaridades dos outros setores envolvidas na empreitada. Este contexto abre as portas para novas formas de interação. Podemos pensar, por exemplo, em uma equipe de engenharia situada em um determinado país, tendo acesso a uma máquina operatriz via vídeo e operação remota de uma fábrica situada em outro continente, para melhor assimilar as potencialidades do equipamento, ao passo que a equipe de produção gestora do equipamento teria acesso aos componentes em modelagem, interagindo com os projetistas. Novas realidades como esta trazem novos conceitos, como o de teleanufatura e teleoperação.

A teleanufatura implica na disponibilização de recursos necessários para o projeto e produção de bens via Internet em centros especializados e operados a distância pelo cliente. A teleoperação pode ser definida como a operação remota de modo contínuo de uma máquina. O desenvolvimento satisfatório destes conceitos passa pelo desenvolvimento de interfaces confiáveis (contendo todas as informações necessárias para uma operação segura, como imagens de vídeo, modelos virtuais, páginas gráficas, etc.), que proporcionem uma interação sinérgica entre homem e máquina. A teleoperação pode ser feita com variados graus de autonomia, podendo ser classificada da seguinte maneira (ÁLVARES, et al, 2002):

- ✓ Controle manual sem auxílio computacional;
- ✓ controle manual com significativo auxílio ou transformação computacional;
- ✓ controle supervisorio com predomínio do controle realizado pelo operador humano;
- ✓ controle supervisorio com predomínio do controle realizado pelo computador;
- ✓ controle completamente automático, onde os operadores humanos observam o processo sem intervenções.

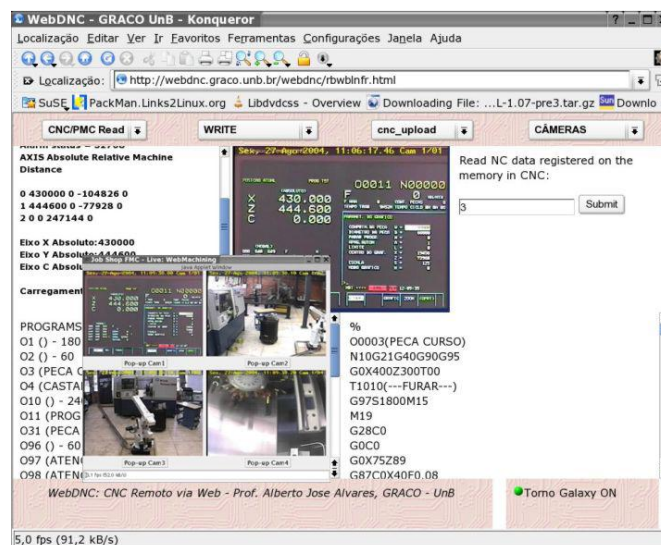
A figura 18 apresenta a arquitetura de um módulo proposto de sistema de telemanufatura baseado na WEB e orientado ao processo de oxicorte WebOxiCorte.



**Figura 18 - Arquitetura de um módulo de controle WEBOxiCorte**

Fonte: ÁLVARES, et al., 2002

A figura 19 apresenta a interface gráfica do usuário para um sistema de teleoperação de um centro de torneamento Galaxy 15M da Universidade de Brasília (ÁLVARES; SILVA; FERREIRA, 2006).



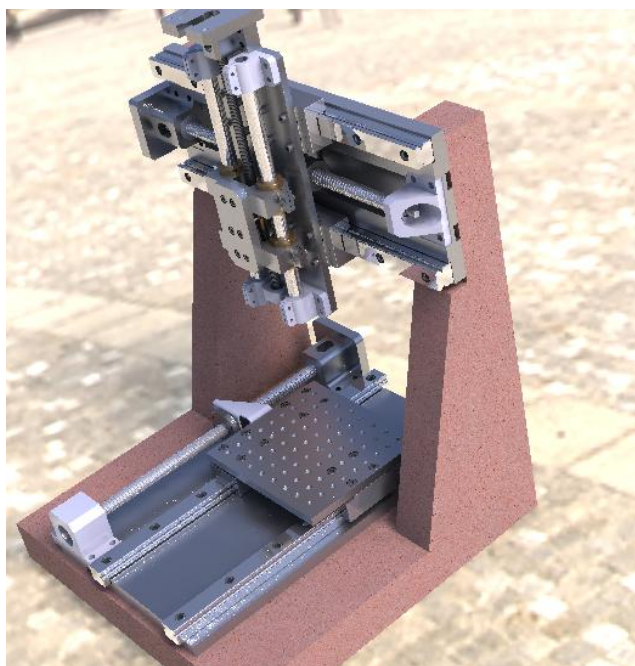
**Figura 19 - Interface gráfica e controle remoto de um Torno Galaxy**

Fonte: ÁLVARES; SILVA; FERREIRA, 2006

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho aborda a construção de um posicionador translativo, uma máquina de três eixos com comando numérico computadorizado baseado em PC (figura 20). Esta máquina é fruto da convergência de esforços de várias pessoas, que trabalharam em períodos distintos e em pontos específicos do projeto. A fase abordada pelo presente estudo refere-se à finalização da parte mecânica da máquina, com devidas adequações, projeto e montagem da parte eletro eletrônica, montagem final e comissionamento.

Na fase inicial do presente trabalho, constatou-se a existência de vários desvios geométricos e desalinhamentos, que inviabilizaram a utilização do equipamento como um instrumento didático no laboratório.



**Figura 20 - Projeto de fresadora 3 eixos**

Verificou-se a necessidade de desmontar, inspecionar, adequar e novamente montar os três eixos de forma a garantir características geométricas mínimas da máquina, como perpendicularismo entre os eixos e paralelismo entre as guias.

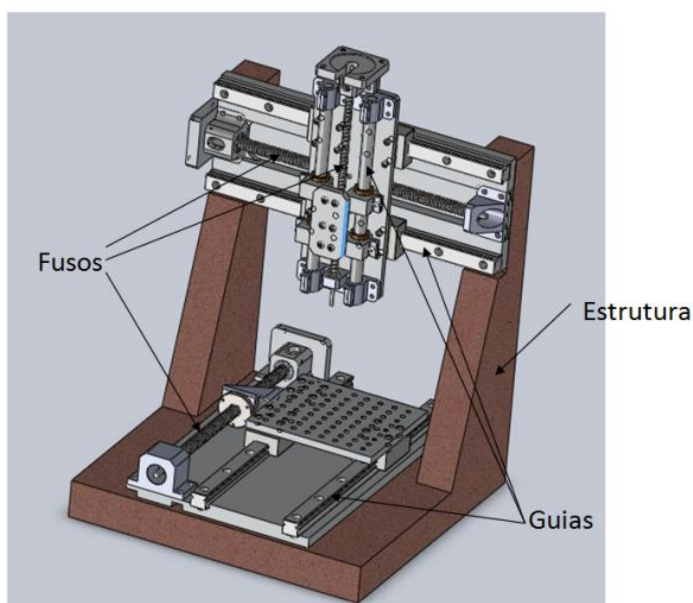
Seguindo a metodologia sugerida por Khurmi e Gupta (2005), foram realizadas as seguintes etapas :

- a) **Levantamento da necessidade:** O escopo do trabalho é o projeto e construção de uma máquina fresadora e a implementação na mesma de ferramentas

computacionais tais como comando numérico computadorizado (CNC) computadorizado e programação assistida por computador (CAD/CAM). A criteriosa avaliação das características da máquina ou equipamento a ser desenvolvido é de fundamental importância para o sucesso do trabalho de projeto, construção e automação de uma máquina-ferramenta, de forma a obter um equipamento confiável dentro dos parâmetros estipulados e ao menor custo possível. Além da montagem definitiva dos três (3) eixos coordenados na máquina fresadora CNC, várias partes dos conjuntos mecânicos e eletromecânicos merecem uma especial atenção na análise de escolha dos diversos subconjuntos. Finalmente, a implementação do CNC baseado na plataforma IBM-PC tornará a máquina fresadora um equipamento muito útil para treinamento de alunos, tanto nas áreas de programação manual e assistida, como também na implementação de técnicas de prototipagem rápida por retirada de material. Um ponto adicional de interesse é a disponibilização de recursos que possibilitem o acesso remoto ao equipamento, permitindo seu acionamento através da rede mundial de computadores.

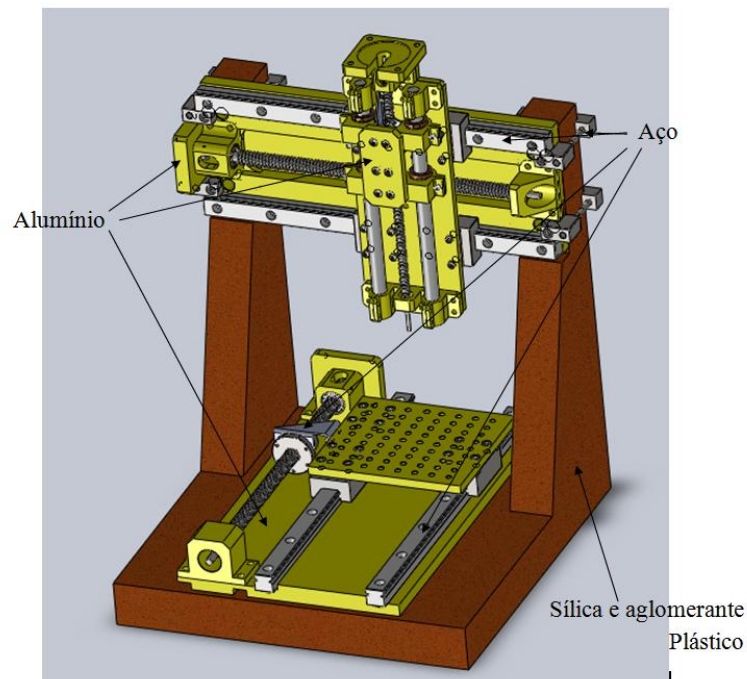
**b) Síntese (Mecanismos):** A parte mecânica da máquina possui três componentes básicos (Figura 21):

- ✓ Estrutura da máquina;
- ✓ Guias para garantir o grau de liberdade adequado;
- ✓ Conversores de movimento (fusos).



**Figura 21 - Síntese dos mecanismos**

- c) **Análise das forças:** O principal foco na análise das forças envolvidas no funcionamento do equipamento foi o torque necessário nos motores de passo para a sua operação (SHOJI, 2002). O capítulo 46 é dedicado aos cálculos para dimensionamento do motor do eixo Y, que é acoplado à mesa sobre a qual as peças serão usinadas. Estes dados foram usados como referência para os demais eixos.
- d) **Seleção de materiais:** Estrutura da máquina (Figura 22): Estrutura de compósito particulado de matriz polimérica. Guias: guias lineares comerciais, devido a sua viabilidade econômica, facilidade de montagem, precisão e leveza. Fusos: fusos de esferas comerciais para eixos X e Y, pelos mesmos motivos descritos na seleção das guias lineares, e um fuso com rosca quadrada para eixo Z, selecionado pela necessidade de redução de custos do projeto. Os elementos de conexão e suporte, como mancais e mesas dos eixos construídos em alumínio por ter baixa densidade se comparado com o aço (um terço), mantendo razoável resistência e rigidez, embora seu custo seja o triplo do aço. o peso do conjunto foi o fator prioritário de modo que a solicitação do motor de passo fosse o menor possível. (SHOJI, 2002), com o objetivo de reduzir o peso do equipamento, sem sacrificar as características mecânicas de resistência do equipamento. O peso do conjunto foi fator priorizado para reduzir as solicitações sobre os motores.



**Figura 22 - Seleção de materiais**

- e) **Projeto dos componentes:** As características técnicas e dados dos componentes utilizados serão abordadas detalhadamente no capítulo 6.
- f) **Modificações:** Durante a análise do projeto, foram levantadas sugestões de modificações, expostas no capítulo 5.
- g) **Detalhamento de projeto:** Cada componente e o conjunto forma desenhados detalhadamente, com especificações completas para os processos de manufatura.
- h) **Produção:** O equipamento foi produzido com os recursos do Laboratório de Usinagem e Automação da Escola de Engenharia da UFMG.

## 4 MEMÓRIA DE CÁLCULO

### 4.1 Dados para dimensionamento do motor do eixo Y.

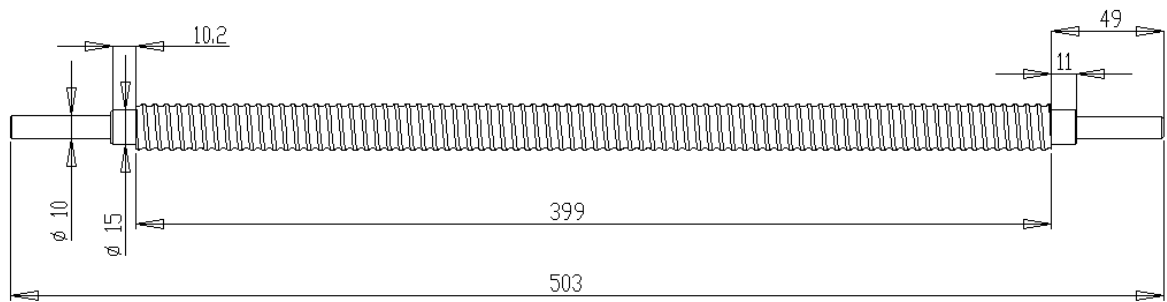
#### 4.1.1 Propriedades do conjunto fuso e porca de esferas recirculantes

O fuso do eixo Y (figura 23 e figura 24) possui as seguintes características, conforme NSK (2011) e dados do projeto:



**Figura 23 - Fuso de esferas recirculantes do eixo Y**

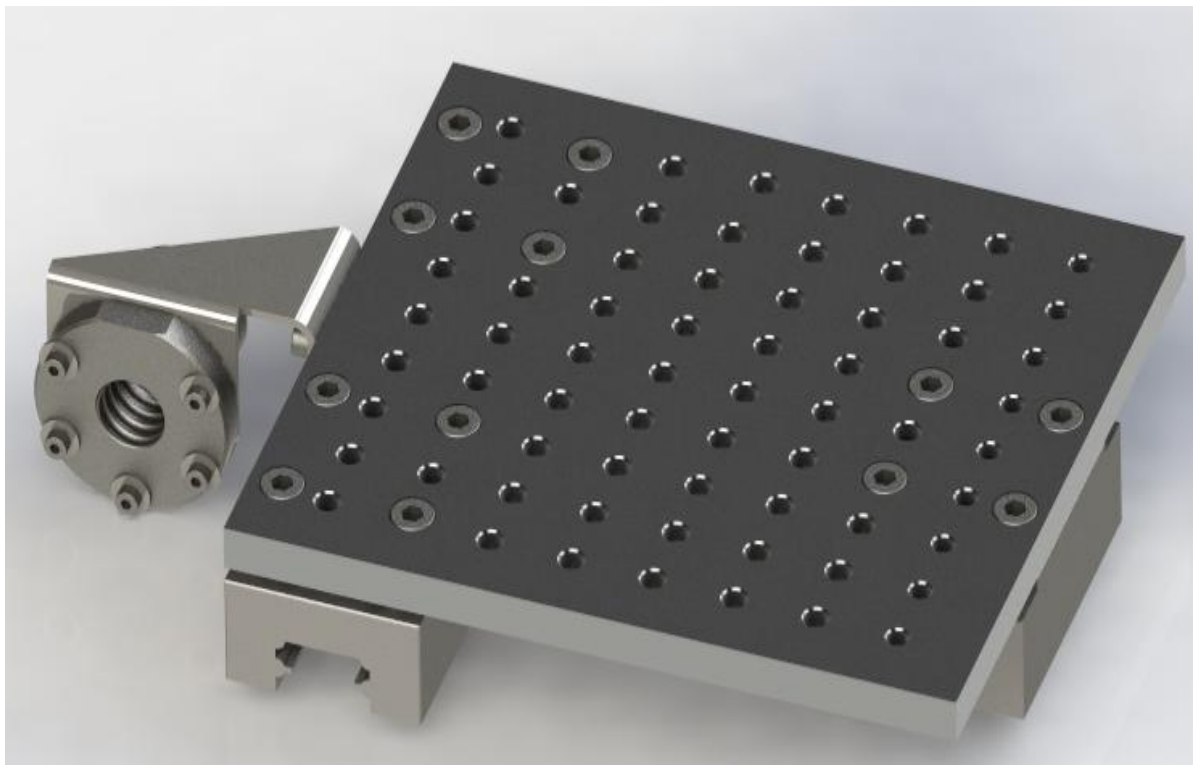
- ✓ Comprimento total do fuso: 503 mm;
- ✓ comprimento da rosca do fuso: 399 mm;
- ✓ diâmetro externo do fuso: 20 mm;
- ✓ diâmetro do círculo das esferas: 20,5 mm;
- ✓ passo do fuso: 5mm;
- ✓ ângulo da hélice:  $4,439^\circ = 0,077 \text{ r}$ ;
- ✓ momento de inércia do fuso (considerando  $\text{Ø } 20 \times 503 \text{ mm}$ ):  $6,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  ;
- ✓ eficiência da porca de esferas recirculantes: 90%;
- ✓ massa do fuso:  $0,99 \cong 1,0 \text{ kg}$ ;
- ✓ densidade do fuso (aço):  $7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;
- ✓ capacidade de carga dinâmica:  $650 \text{ kgf} = 6374,32 \text{ N}$ ;
- ✓ capacidade de carga estática:  $1450 \text{ kgf} = 14\,219,6 \text{ N}$ .



**Figura 24 - Principais dimensões do fuso do eixo Y**

#### 4.1.2 Propriedades da mesa

A mesa da máquina, anexa ao fuso do eixo Y (Figura 25) possui as seguintes características (fonte: Dados do projeto):



**Figura 25 - Mesa da com a porca do fuso do eixo Y**

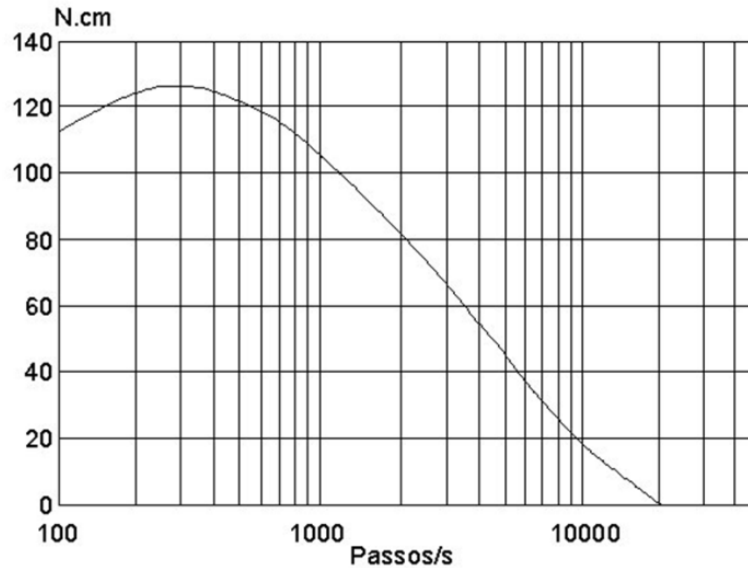
- ✓ Dimensões da mesa: 306×200×61mm;
- ✓ massa da mesa:5,1 kg;
- ✓ massa máxima da peça a usinar: 5,0 kg.



### 4.1.3 Propriedades do motor de passo do eixo Y

O motor de passo do eixo Y possui as seguintes características (SHOJI, 2002):

- ✓ Momento de inércia:  $0,64 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ;
- ✓ curva de torque (Figura 26);



**Figura 26 - Curva de torque do motor de passo**

Fonte: SHOJI, 2002

### 4.1.4 Propriedades dos rolamentos dos mancais

Os mancais possuem dois rolamentos radiais 6202 ZZ e um rolamento axial 51201 com as seguintes características (NTN, 2009):

Rolamentos radiais:

- ✓ Coeficiente de atrito: 0,0015;
- ✓ capacidade de carga dinâmica: 7 750 N;
- ✓ capacidade de carga estática: 3 600 N;
- ✓ diâmetro do furo: 15 mm;
- ✓ rolamento com dupla blindagem.

Rolamento axial:

- ✓ Coeficiente de atrito: 0,0015;
- ✓ capacidade de carga dinâmica: 13 200 N;

- ✓ capacidade de carga estática: 19 0000 N;
- ✓ diâmetro do furo: 12 mm.

#### 4.1.5 Propriedades das guias lineares

As guias lineares apresentam as seguintes características, conforme NSK (2011):

- ✓ Coeficiente de atrito: 0,01;
- ✓ sistema de pré carga para aumento da precisão de posicionamento;
- ✓ capacidade de carga dinâmica: 31 000 N;
- ✓ capacidade de carga estática: 51 500 N .

## 4.2 Condições de projeto para a operação do motor de passo

### 4.2.1 Torque de operação do fuso

O torque de operação, quando o movimento rotacional é convertido em movimento linear, numa operação normal, é calculado pela equação 2 (NSK, 2011):

$$T_{op} = \frac{C_a \times P_f}{2\pi \times \eta_f} = \frac{30 \times 0,5}{2\pi \times 0,9} = 2,65 \text{ N.cm} \quad (2)$$

Onde:

- ✓  $T_{op}$  = Torque de operação do fuso (N.cm);
- ✓  $C_a$  = Carga axial (N) (estimada);
- ✓  $P_f$  = passo do fuso (cm);
- ✓  $\eta_f$  = rendimento do fuso .

### 4.2.2 Momento de inércia aplicado ao motor

O momento de inércia aplicado ao motor é calculado pela equação 3 (NSK, 2011) (ASTROSYN, 2012):

$$J = J_m + J_f + m \left( \frac{P_f}{2\pi} \right)^2 = 1,3 \times 10^{-4} + 0,62 + 5,1 \times \left( \frac{0,5}{2\pi} \right)^2 = 0,65 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad (3)$$

Onde:

- ✓  $J$  = momento de inércia aplicado ao motor (kg.m<sup>2</sup>);

- ✓  $J_m$  = momento de inércia do motor ( $\text{kg.m}^2$ );
- ✓  $J_f$  = momento de inércia do fuso ( $\text{kg.m}^2$ );
- ✓  $m$  = massa da carga (kg);
- ✓  $P_f$  = passo do fuso (cm).

#### 4.2.3 Força devido ao atrito dinâmico, para guias lineares

A força de atrito é calculada pela equação 4 , conforme NSK (2011):

$$F_{ad} = i \times p_c = 0,004 \times 2\,350 = 9,4 \text{ N} \quad (4)$$

Onde:

- ✓  $F_{ad}$  = força devido ao atrito dinâmico (N);
- ✓  $i$  = coeficiente de contato (0,004 para guias lineares série LH);
- ✓  $p_c$  = pré carga (2350 N para guias lineares série LH).

A força de atrito atuante no início do movimento pode ser estimada como sendo de 1,5 a 2 vezes a força de atrito dinâmico.

#### 4.2.4 Coeficiente de torque do fuso de esferas

O coeficiente de torque do fuso de esferas é calculado pela equação 5 (NSK, 2011):

$$K = \frac{0,05}{\sqrt{\text{tg}\alpha}} = \frac{0,05}{\sqrt{\text{tg } 4,439}} = 0,179 \quad (5)$$

Onde:

- ✓  $K$  = coeficiente de torque de um fuso de esferas;
- ✓  $\alpha$  = ângulo da hélice da rosca do fuso (graus).

#### 4.2.5 Torque de referência devido á pré carga

O torque de referência é calculado pela equação 6 (NSK, 2011):

$$T_{rpc} = K \frac{P_c \times P_f}{2\pi} = 0,179 \frac{64 \times 0,5}{2\pi} = 0,91 \text{ N} \cdot \text{cm} \quad (6)$$

Onde:

- ✓  $T_{rpc}$  = torque de referência devido à pré carga do fuso
- ✓  $K$  = coeficiente de torque de um fuso de esferas;
- ✓  $P_c$  = pré carga (N). A literatura recomenda para máquinas com alta precisão de posicionamento um valor entre 0,01 a 0,04 o valor da capacidade de carga dinâmica ( $C_a$ ), que é 6 360 N para o fuso adotado. Adotando o valor mínimo de pré carga é obtido  $63,6 \cong 64 \text{ N}$  ;
- ✓  $P_f$  = passo do fuso (cm).

#### 4.2.6 Torque máximo devido à pré carga

O torque máximo devido à pré carga calculado pela equação 7 (NSK, 2011):

$$T_{mpc} = T_{rpc} \times (1 + f_c) = 0,91 \times (1 + 0,6) = 1,45 \text{ N} \cdot \text{cm} \quad (7)$$

Onde:

- ✓  $T_{mpc}$  = Torque máximo devido à pré carga (N.cm);
- ✓  $f_c$  = fator de correção. Para torque de referência entre 20 e 40 N.cm; eixos com a razão entre o comprimento da rosca do fuso e o diâmetro do fuso menor ou igual a 40 e grau C5, é fixado em  $\pm 50\%$ . Para o grau C10, estimado em  $\pm 60\%$ .

#### 4.2.7 Torque devido ao atrito nos mancais de rolamento

O torque devido ao atrito nos mancais de rolamento é calculado pela equação 8 (NSK, 2011):

$$T_{am} = \sum \frac{\mu_r \times C_r \times d_{fr}}{2} \quad (8)$$

Onde:

- ✓  $T_{am}$  = Torque devido ao atrito no rolamento (N.cm);
- ✓  $\mu_r$  = coeficiente de atrito no rolamento ;

- ✓  $C_r$  = carga no rolamento (N);
- ✓  $d_{fr}$  = diâmetro do furo do rolamento (cm).

Assim, para o rolamento radial, a carga foi obtida dividindo-se o peso da mesa por dois:

$$T_{am1} = \frac{0,0015 \times 4,89 \times 1,5}{2} = 0,0055 \text{ N.cm} \quad (10)$$

Assim, para o rolamento axial a carga foi considerada como a pré carga aplicada, estimada em 50 N:

$$T_{am2} = \frac{0,0015 \times 50 \times 1,2}{2} = 0,0045 \text{ N.cm} \quad (11)$$

$$T_{am} = T_{am1} + T_{am2} = 0,0505 \text{ N.cm} \quad (12)$$

#### 4.2.8 Torque no motor à velocidade constante

O torque de acionamento à velocidade constante é calculado pela equação 13 (NSK, 2011):

$$T_{mvc} = T_{op} + T_{mpc} + T_{am} = 2,65 + 1,45 + 0,0505 = 4,16 \text{ N.cm} \quad (13)$$

Onde:

- ✓  $T_{mvc}$  = torque no motor a velocidade constante (N.cm);
- ✓  $T_{op}$  = torque de operação (N.cm);
- ✓  $T_{mpc}$  = torque máximo devido ao atrito da pré carga (N.cm);
- ✓  $T_{am}$  = torque devido ao atrito nos mancais (N.cm).

#### 4.2.9 Rotação máxima do motor de passo

Como uma primeira aproximação e a partir da curva de torque do motor, um primeiro valor para a velocidade máxima do motor (a ser usada em avanço rápido) aquele que propiciar 50% do torque máximo, de aproximadamente 125 N.cm, o que gera um valor de torque em

torno de 62 N, que é obtido com aproximadamente 3000 pulsos por segundo. A frequência de rotação do motor de passo é obtida pela equação 14:

$$f_m = \frac{P_s}{200} = \frac{3000}{200} = 15Hz \quad (14)$$

A velocidade da mesa é dada por:

$$V_m = f_m \times P_f = 15 \times 0,5 = 7,5 \text{ cm/seg} \quad (15)$$

Onde:

- ✓  $V_m$  = velocidade da mesa (mm/segundo);
- ✓  $f_m$  = frequência de rotação do eixo do motor (Hz);
- ✓  $P_f$  = passo do fuso (mm);
- ✓  $P_s$  = Alimentação do motor em pulsos por segundo;
- ✓  $R_p$  = Pulsos para uma rotação do motor.

#### 4.2.10 Torque durante a aceleração

O torque durante a aceleração é calculado pela equação 16 (NSK, 2011):

$$T_{ac} = T_{mvc} + J \times \dot{\omega} = 4,16 + 0,65 \times 47,12 = 34,91 \text{ N} \cdot \text{cm} \quad (16)$$

Onde:

- ✓  $T_{ac}$  = torque durante aceleração(N.cm);
- ✓  $T_{mvc}$  = torque no motor a velocidade constante (N.cm);
- ✓  $J$  = momento de inércia aplicado no motor (kg.m<sup>2</sup>);
- ✓  $\dot{\omega}$  = aceleração angular do motor (rad/s<sup>2</sup>).

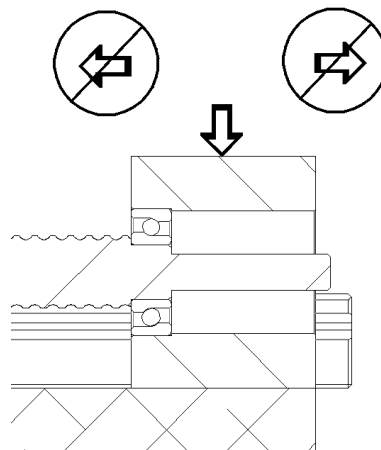
## 5 ADEQUAÇÕES DE COMPONENTES MECÂNICOS

Durante a desmontagem do conjunto para avaliação, as seguintes necessidades de adequação foram levantadas:

- a) Recondicionamento das sedes dos rolamentos do fuso de esferas recirculantes;
- b) usinar novamente as superfícies verticais de apoio das guias lineares. As mesmas não encontram-se paralelas;
- c) refazer os furos dos parafusos de fixação da mesa nas guias lineares. Os furos executados estão excêntricos, gerando esforços de torção indesejáveis durante a montagem;
- d) alinhar o fuso de esferas recirculantes com as guias lineares. O mesmo encontra-se desalinhado, causando travamento da mesa;
- e) padronizar as porcas de fixação com rosca M8. Foram utilizadas porcas do sistema inglês com o furo adaptado para sistema métrico através do uso de machos;
- f) adequar o assentamento da mesa do eixo Y.

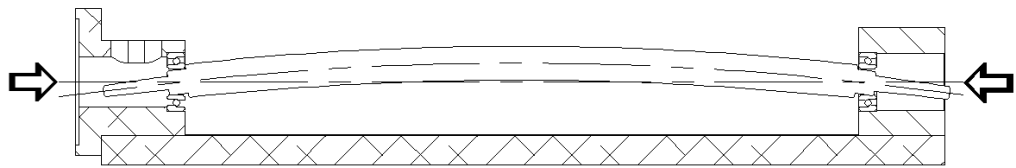
A montagem do equipamento foi feita com acréscimo das peças sugeridas para adequação do projeto e da correção de alguns itens na fabricação, descritos a seguir:

- a) **A substituição dos rolamentos de contato angular dos fusos por um conjunto de rolamentos radiais e um rolamento axial:** A configuração original não prevê um mecanismo de aplicação de pré-carga durante a montagem (Figura 27).



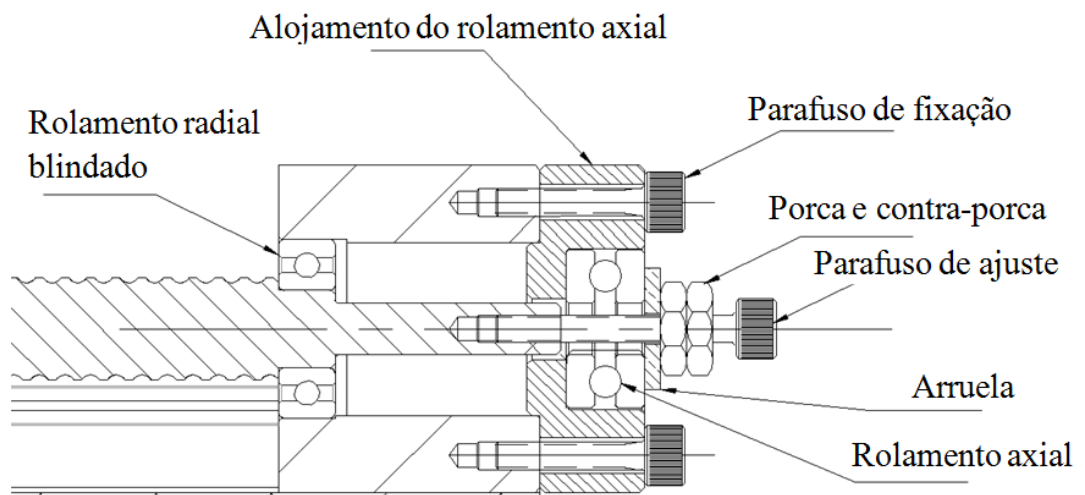
**Figura 27 - Sistema utilizado no projeto original, não prevê ajuste da pré-carga do rolamento.**

Com esta configuração a precisão do ajuste dos rolamentos fica condicionada à precisão da usinagem dos componentes, o que é economicamente inviável. Além disso, as esferas dos rolamentos ficam expostas, ficando sujeitas a precipitação de cavacos que tendem a travar os rolamentos. Outra desvantagem desta estratégia é que se for aplicada uma pré-carga nas extremidades do eixo, ou se o mesmo se expandir termicamente, haverá uma tendência de flambagem, conforme figura 28.



**Figura 28 - Flambagem causada por pré-carga, com restrição nas extremidades**

A solução sugerida está apresentada na figura 29, com a inclusão de rolamento axial, parafusos e uma tampa. Estes elementos que compõem o mecanismo para ajuste de folga axial, que faz a pré-carga do sistema.



**Figura 29 - Mecanismo de ajuste da pré-carga do rolamento axial.**

- b) Aumentar o diâmetro da sede das porcas de fixação das guias lineares:** As mesmas apresentam um diâmetro muito pequeno, o que impede o uso de chaves adequadas para o aperto (Figura 30);





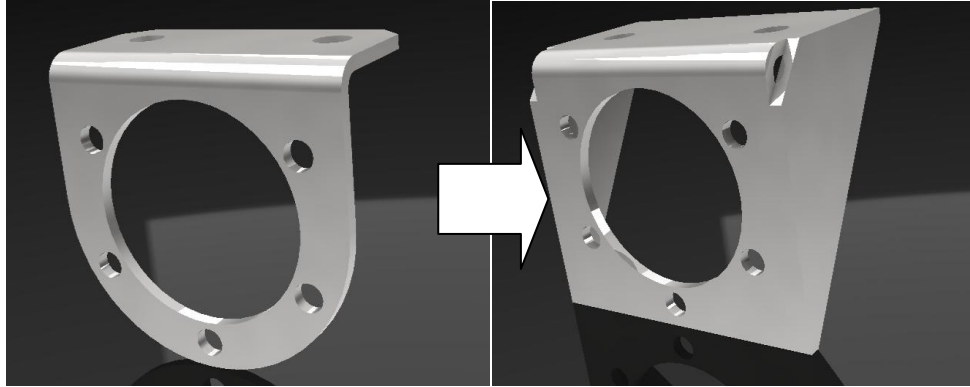
**Figura 30 - Deficiência do projeto: A ferramenta não cabe no furo**

- c) **Oblongar os furos de fixação das guias lineares:** É necessário prever uma folga nos furos destinados ao alojamento dos parafusos, para compensação de pequenos erros de fabricação e o ajuste do equipamento na montagem (Figura 31);



**Figura 31 - Sugestão de melhoria: oblongar os furos**

- d) **Adequar o suporte da porca de esferas recirculantes:** O mesmo foi feito em chapa fina e apresenta deformação elástica ao menor esforço, comprometendo a precisão de posicionamento do equipamento (Figura 32).

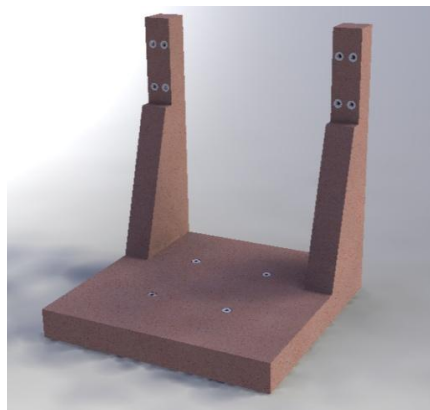


**Figura 32 - Sugestão de melhoria: reforço no suporte das porcas dos fusos**

### **5.1 Adequações devido aos desvios geométricos na estrutura da máquina**

Houve dificuldades principalmente na resolução do problema de desalinhamento da face de apoio e dos furos de fixação da base do eixo Y, o que foi superado com a adoção das correções descritas a seguir.

A construção da mini fresadora com estrutura de concreto termorrígido polimérico para o Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG (Figura 33) apresentou como etapa de sua construção a correção dos assentos para os eixos X e Y. Os compósitos cerâmicos apresentam características desejáveis para estruturas de máquinas ferramentas, dentre elas estabilidade térmica e absorção de vibrações, etc. Uma das desvantagens desta metodologia é a possibilidade da existência da deformação do compósito durante a cura, dependendo da técnica adotada no processo de moldagem. Estas deformações podem gerar geometrias com um grau de não conformidade muito grande. A estrutura da máquina foi construída a partir de um molde de acrílico, dentro do qual o concreto polimérico foi despejado (figura 34 e figura 35).



**Figura 33 - A estrutura da fresadora polimérico termorrígido, conforme projeto**



**Figura 34 – Molde de acrílico para a estrutura da fresadora**  
Fonte: SHOJI, 2002



**Figura 35 – Vazamento do concreto polimérico no molde de acrílico**  
Fonte: SHOJI, 2002

Durante a cura do concreto houve uma liberação de calor de tal monta que, além de reduzir a rigidez do acrílico do molde gerou tensões internas suficientemente grandes para deformar o molde e deslocar os inserts metálicos roscados, destinados à fixação das mesas. O resultado foi a deformação da estrutura com desvios dimensionais na ordem de 20 mm e ilustrados na figura 36 e figura 37 (as deformações mostradas foram acentuadas, para melhor

visualização). Os desvios existentes inviabilizariam completamente a montagem dos componentes mecânicos.



**Figura 36 - Deformação na coluna da estrutura**

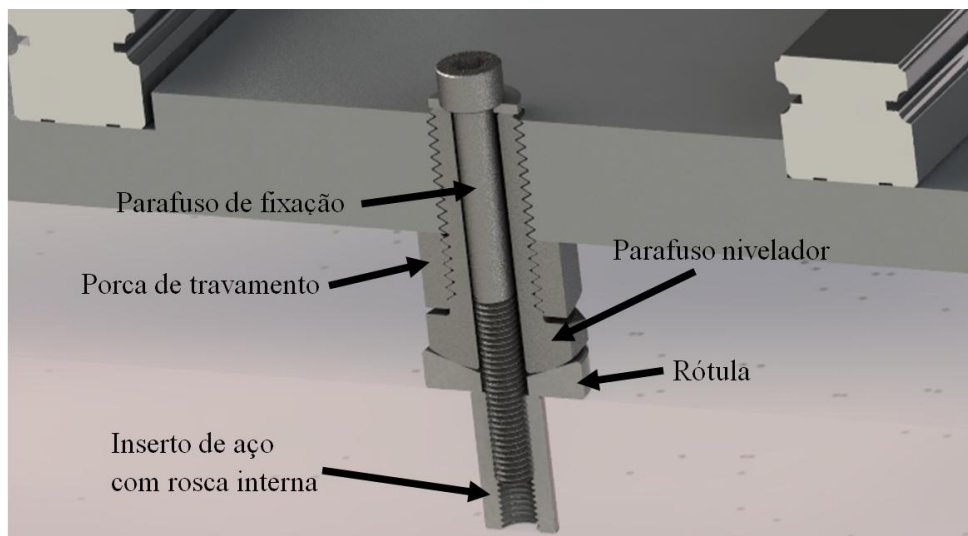


**Figura 37 - Deformação na superfície de assentamento do eixo Y**

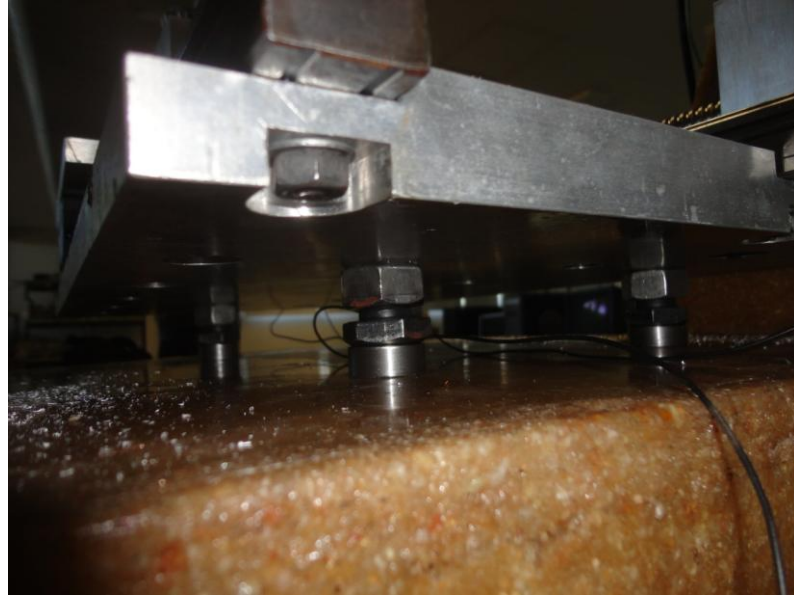
Devido a magnitude dos desvios ocorridos durante a cura do material o assentamento da base do eixo Y diretamente na estrutura conforme o projeto, tornou-se completamente inviável. Surgiu assim a necessidade de se desenvolver um sistema de niveladores para a estrutura da mesa do eixo X e também uma peça para interface entre a estrutura de compósito particulado de sílica e o suporte do eixo Y.

## 5.2 Adequação do assentamento da mesa do eixo X

O projeto inicial previa a fixação da mesa do eixo X diretamente sobre a estrutura da máquina, o que se revelou completamente inviável devido à falta de planicidade da superfície de apoio. Os insertos de aço com furos rosqueados inseridos na matriz polimérica, para fixação da mesa do eixo X sofreram deslocamentos aleatórios durante o preenchimento do molde e a cura do concreto. Os pontos representados pelos centros dos furos, que deveriam formar os vértices de um retângulo, passaram a formar uma figura totalmente irregular. A solução encontrada foi a adoção de um sistema que permitisse não só o travamento da mesa, como também seu nivelamento, com uma certa compensação dos desalinhamentos da estrutura e o ajuste fino dos posicionamentos dos eixos. A mesa do eixo X foi então posicionada sobre quatro parafusos que permitem o seu nivelamento preciso (Figura 38 e figura 39). Os furos roscados na mesa do eixo X foram feitos de modo a coincidir com os furos da estrutura.



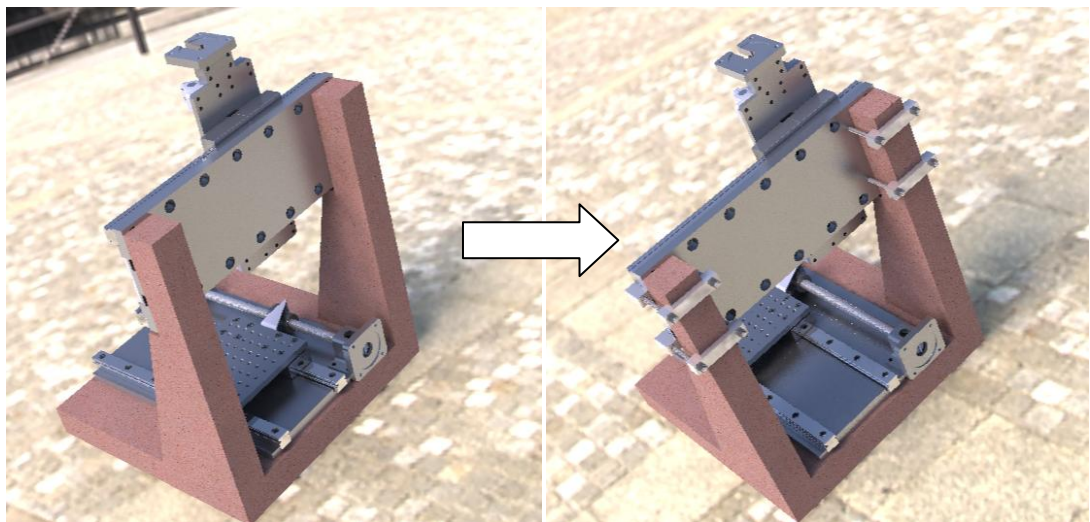
**Figura 38 - Sistema de funcionamento dos parafusos de nivelamento e ajuste da mesa do eixo X**



**Figura 39 - Parafusos de nivelamento e ajuste da mesa do eixo X**

### 5.3 Adequação do assentamento da mesa do eixo Y

A primeira alternativa desenvolvida para o ajuste da base do eixo Y foi u sistema de niveladores em conjunto com um conjunto de abraçadeiras (Figura 40).

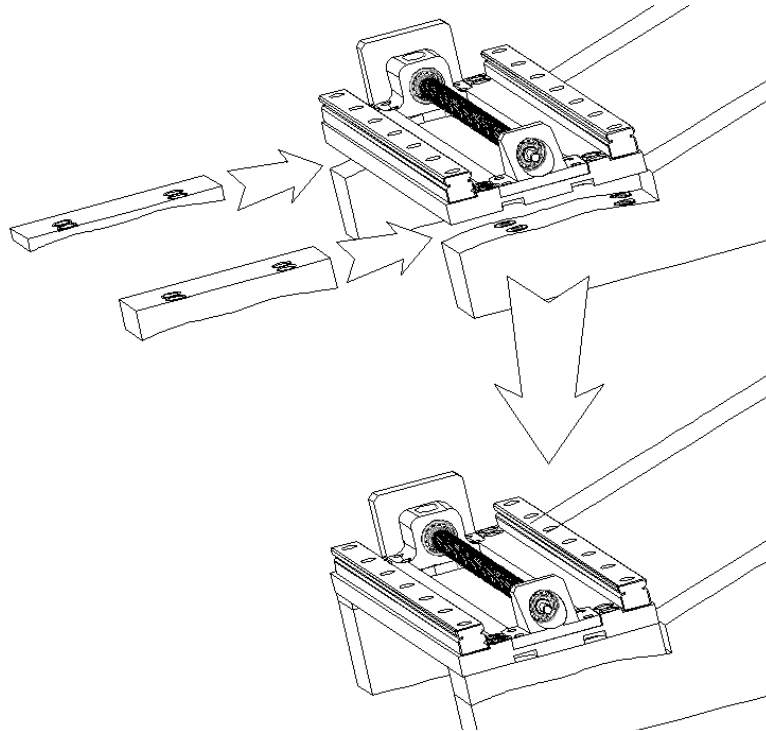


**Figura 40 – Tentativa de adequação: Abraçadeiras para fixação do eixo Y**

Percebeu-se que este sistema não funcionaria, pois o ajuste dos niveladores poderia gerar uma tensão grande o suficiente para quebrar a estrutura. Uma alternativa seria necessária.

A solução encontrada foi a construção de dois insertos fabricados de tal maneira que quando um de seus lados se ajustassem perfeitamente às superfícies distorcidas da estrutura, o

outros dois lados ficassem coplanares, permitindo o assentamento da base do eixo Y (Figura 41).



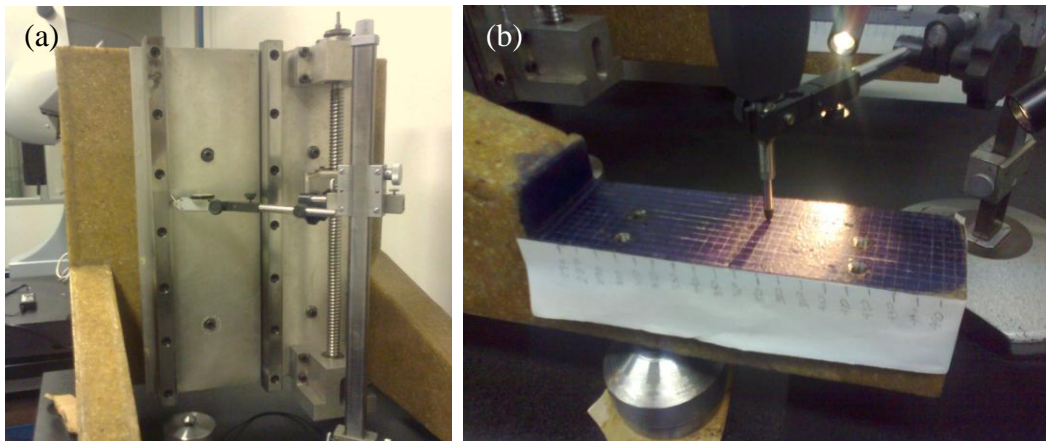
**Figura 41 - Correção do desvio no assentamento do eixo Y**

Foi necessário então mapear a topologia das superfícies tomando como referência a mesa do eixo X, já montada na estrutura. O mapeamento consistiu no levantamento de uma malha de pontos representando as superfícies distorcidas, tendo como referência a mesa do eixo X, já montada. Como o peso da estrutura excedia a capacidade do medidor tridimensional do laboratório, foi necessário fazer o mapeamento com o uso de um paquímetro traçador de altura Feinmesszeugfabrik-Suhl, modelo TGL 12016, uma mesa de desempenho de granito, parafusos niveladores, um relógio comparador digital Mitutoyo código 575-121 e um relógio apalpador Digimess 121.342. A primeira etapa foi o nivelamento da estrutura sobre a mesa de granito, tendo como referência o topo das guias lineares do eixo X. Com a estrutura assim referenciada foram traçadas linhas paralelas ao plano XY nas superfícies de assentamento do eixo Y, espaçadas 5,0 mm. A estrutura foi então reposicionada de modo que as laterais das guias lineares do eixo X ficassem na posição horizontal. Isto possibilitou a traçagem de linhas paralelas ao plano XZ nas superfícies a serem mapeadas. O resultado está exposto na figura 42.



**Figura 42 - Superfícies de assentamento do eixo Y, já traçadas**

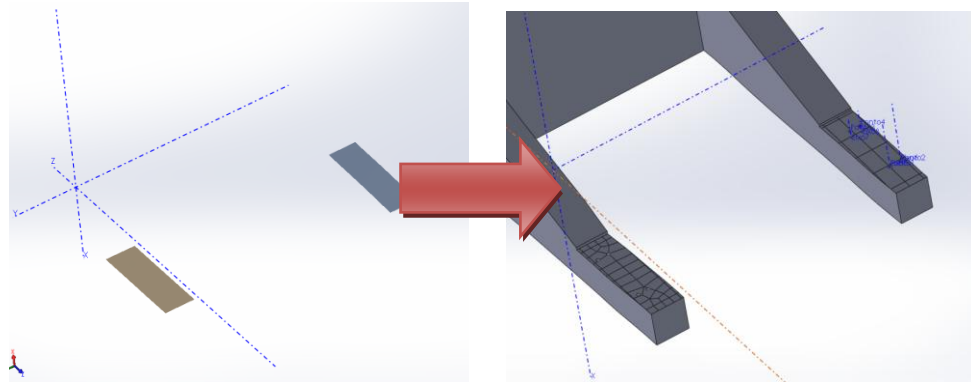
Com as superfícies de assentamento traçadas, a estrutura foi reposicionada e alinhada conforme figura 43-a, para medição das coordenadas X de cada ponto da malha, com o uso de relógio apalpador (Figura 43-b).



**Figura 43 - (a) Alinhamento da estrutura. (b) Medição das coordenadas em X dos pontos da malha.**

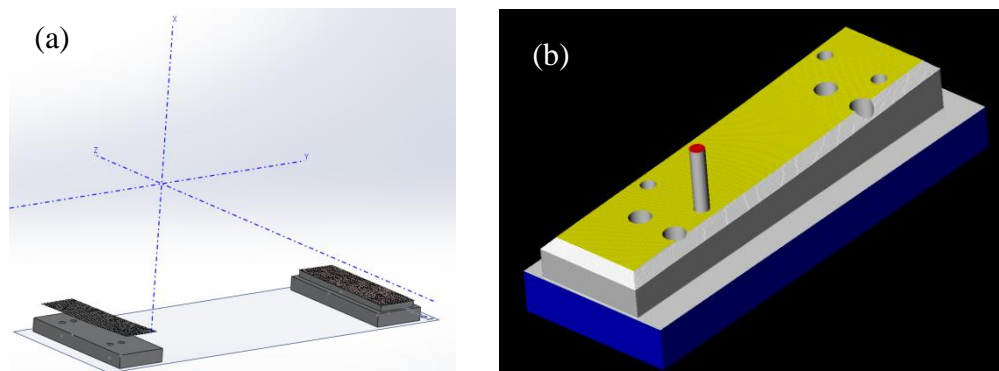
Cada ponto foi medido três vezes e a média aritmética introduzida em uma tabela. Com a nuvem de pontos levantada foram então geradas duas superfícies em 3D simulando as superfícies deformadas de assentamento da mesa do eixo Y, conforme ilustrado na figura 44.





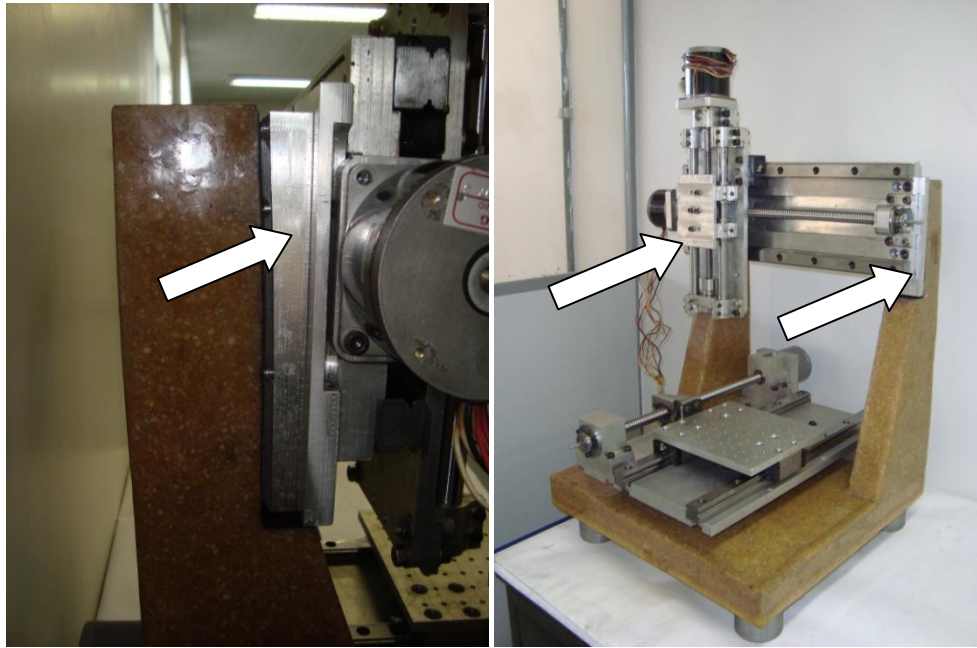
**Figura 44 - Construção das superfícies 3D, simulando as superfícies deformadas de**

A mesma metodologia foi usada para gerar as superfícies dos insertos (Figura 45-a). Após tratamento dos dados no CAD/CAM (Figura 45-b) os insertos foram usinados e inseridos no equipamento, corrigindo os erros de alinhamento das superfícies de apoio do eixo Y. Os insertos foram montados na estrutura e foi verificado a planicidade das faces de referência para montagem da mesa do eixo Y com o uso do paquímetro traçador de altura e do relógio apalpador, sendo então encontrado um erro de planicidade de 30  $\mu\text{m}$ . Este erro foi considerado aceitável, pois durante a montagem da mesa do eixo Y seria absorvido tranquilamente por uma pequena deformação da estrutura de concreto polimérico, sem gerar tensões perigosas.



**Figura 45 - Confeção do inserto para correção da deformação. (a) Modelagem 3D. (b) Simulação da usinagem do inserto no CAM**

Após todas as conferências dimensionais e uma limpeza cuidadosa das superfícies de contato, os insertos foram finalmente afixados na estrutura com o uso de parafusos. A mesa de apoio do eixo Y foi montada sobre os insertos e também afixada sobre eles por meio de parafusos. O resultado pode ser visto na figura 46 (as setas indicam a posição dos mesmos).

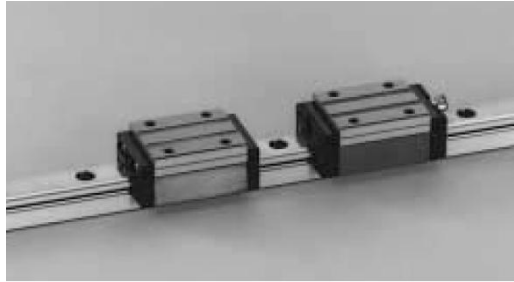


**Figura 46 - Insertos para assentamento da mesa do eixo Y, com a mesa do eixo Y já montada**

## 6 DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES MECÂNICOS

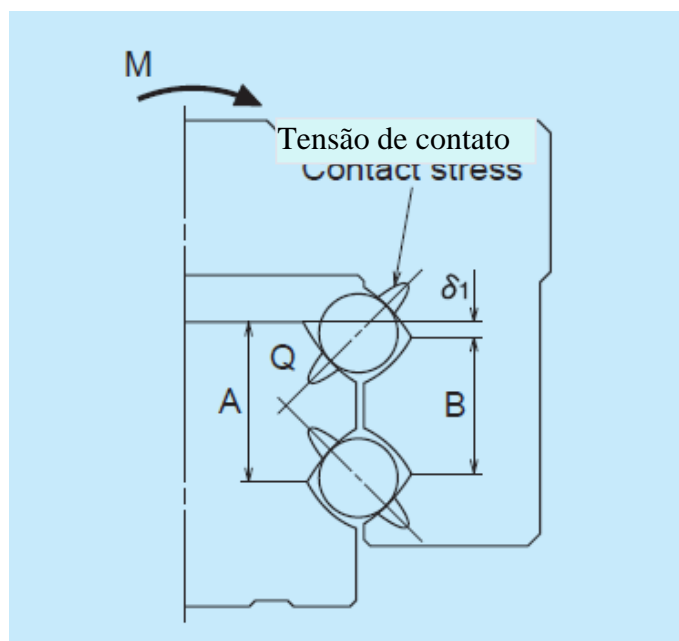
### 6.1 Guias lineares

As guias lineares ref. NSK LH30 NA (figura 47) possuem retitude de  $18\ \mu\text{m}$  para um curso de 315 a 400 mm e capacidade de carga dinâmica de 2620 kgf (SHOJI, 2002).



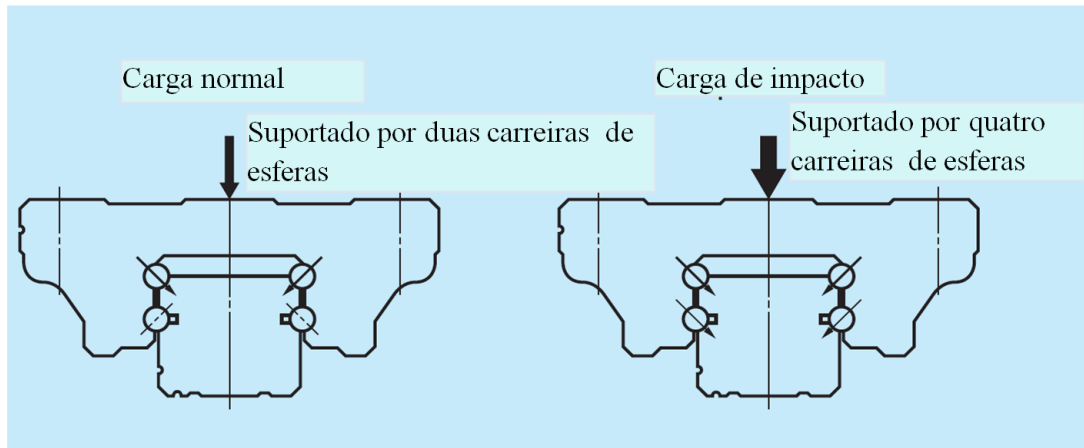
**Figura 47 – Guia linear NSK LH30 NA**  
Fonte: NSK, 2002

Estas guias são projetadas para trabalhar em velocidades inferiores a 100m/min e possuem o princípio do contato angular, onde as linhas que passam pelos pontos de contato entre esferas e canais formam um “V” (Figura 48). O fato do ponto de interseção destas linhas estar próximo aos pontos de contato reduz a resistência ao momento  $M$  ilustrado na figura 48 e aumenta a capacidade de absorção de erros de montagem (NSK, 2005).



**Figura 48 – Linhas de contato da guia linear NSK LH30-Z**  
Fonte: NSK, 2002

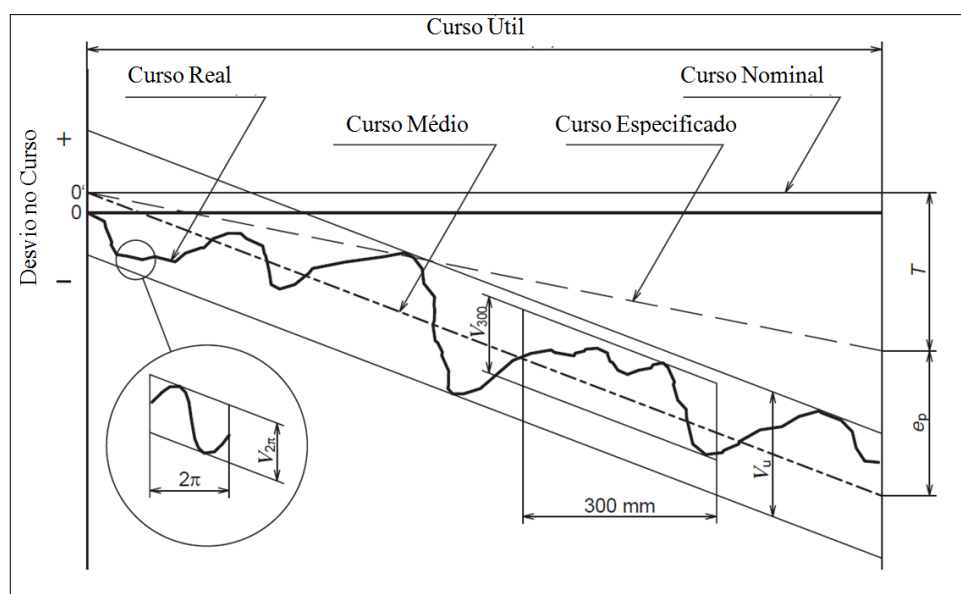
Os canais inferiores de deslizamento das esferas têm um formato que permite que as cargas verticais sejam suportadas pelas carreiras de esferas superiores, onde estas fazem contato em dois pontos. As linhas de esferas inferiores receberão carga somente se houver uma carga e impacto. Isto assegura alta resistência a impactos (Figura 49) (NSK, 2011).



**Figura 49 – Estratégia para aumento da resistência a impactos**  
Fonte: NSK, 2011

## 6.2 Porca e fusos de esferas

A porca utilizada é do modelo NSK RS 20 05 A, e o fuso do modelo NSK RN FTL 20 05 A 2.5. A exatidão do passo dos fusos de esferas NSK para as suas classes mais precisas (C0 a C5) é especificada conforme a figura 50:



**Figura 50 – Representação da exatidão dos fusos de esferas NSK**  
Fonte: NSK, 2011

Onde:  $V_{2\pi}$  = variação máxima em uma revolução;  $V_{300}$  = variação máxima em 300 mm de curso, e  $V_u$  = variação para todo o curso.

O fuso é laminado e possui diâmetro externo 20 mm e passo 5,0 mm, classe de precisão C10. Capacidade de carga dinâmica de 6,4 kN e carga estática de 14 kN. Com um erro acumulativo máximo no passo de  $\pm 0,21$  mm em 300 mm (NSK, 2005).

É importante ressaltar que, baseado na figura acima, são previstos três tipos principais de erros na construção do fuso associados à diferença entre o deslocamento efetivo e o deslocamento nominal: O erro relacionado ao comprimento rosqueado total, o erro relacionado a um comprimento rosqueado de 300 mm, e o erro associado a um passo (que pode variar ao longo do fuso) O conhecimento do valor real deste erro e a existência de meios para sua correção é muito importante na obtenção de deslocamentos precisos.

### 6.3 Fuso do eixo Z

O fuso do eixo Z possui rosca quadrada M16 x 4, com porca de bronze (Figura 51-a e figura 51 -b).

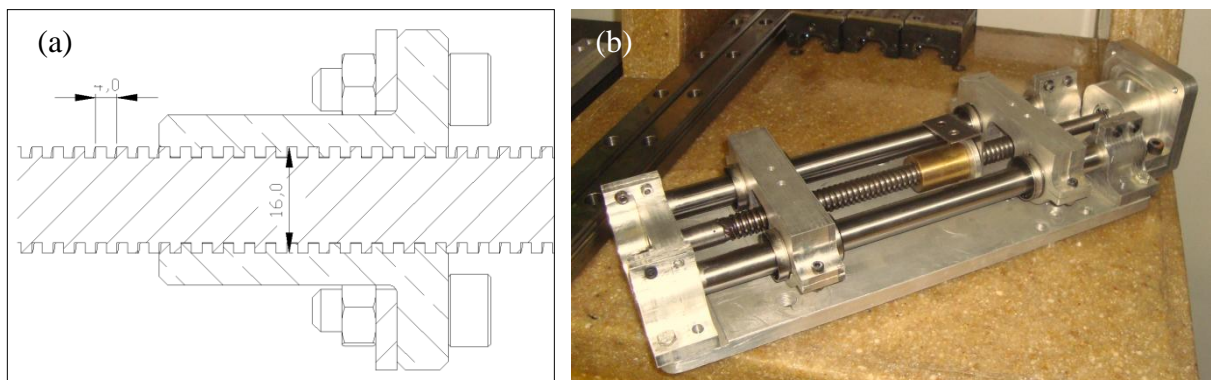


Figura 51 – (a) Fuso e porca do eixo Z, (b) Fuso montado na estrutura

### 6.4 Acoplamentos

Os acoplamentos são do modelo *Oldham* (Figura 52) , compostos por três peças: dois cubos de alumínio com rasgos onde se encaixam as guias de um disco central de plástico. Estas guias são posicionadas perpendicularmente, uma em relação à outra. Durante a operação as guias do disco central deslizam nos rasgos, compensando um pequeno grau de

desalinhamentos angular e axial. São muito úteis especialmente em casos de desalinhamentos paralelos (TECHDRIVES, 2013).

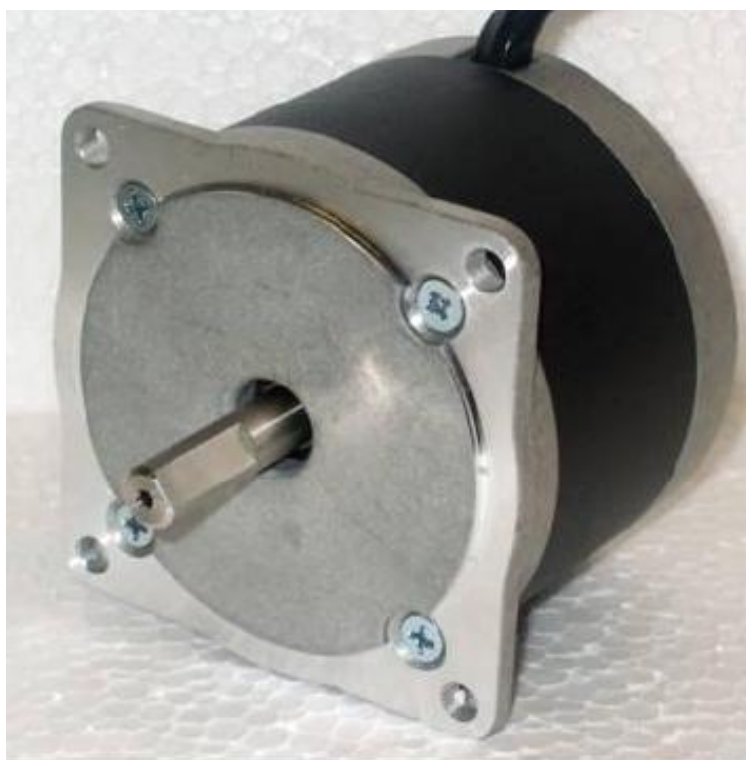


**Figura 52 – Acoplamento tipo Oldham**  
Fonte: TECHDRIVES, 2013

## 7 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES ELETROELETRÔNICOS

### 7.1 O motor de passo

O motor de passo selecionado foi o ASTROSYN Y259 (Figura 53), cujas principais características estão descritas na tabela 3. Este motor foi escolhido devido ao torque, baixo nível de ruído, aceleração e por permitir modos unipolar e bipolar (ASTROSYN, 2012).



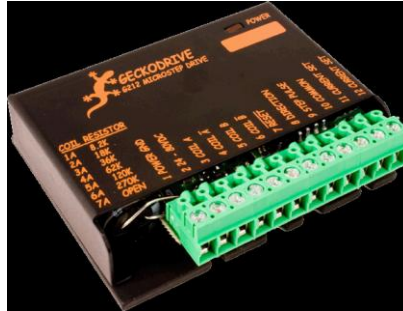
**Figura 53 - Motor de passo Astrosyn Y259**  
Fonte: ASTROSYN , 2012

Especificações		
Ângulo de passo:	1,8	Graus
Precisão do ângulo de passo:	5	%
Corrente nominal de fase:	4,6	A
Resistência de fase:	0,55	$\Omega$
Indutância de fase:	2,5	mH
Torque de retenção:	230	N.cm
Torque residual:	18	N.cm
Inércia do rotor:	1300	gr/cm <sup>2</sup>
Massa	2,4	Kg
Classe de isolamento:	8	-

**Tabela 3 - Características do motor de passo Astrosyn**  
Fonte: ASTROSYN , 2012

## 7.2 Os acionamentos dos motores

Foi adotado o acionamento próprio para motores de passo Geckodrive G212 Microstep Drive (Figura 54):



**Figura 54 - Acionamento Geckodrive G212**  
**Fonte: GECKODRIVE , 2008**

Na configuração do drive do motor Geckodrive G212 Microstep drive foram levadas em conta principalmente as seguintes orientações do fabricante (GECKODRIVE , 2008):

- ✓ a corrente nominal de fase do motor deve permanecer entre 1A e 7A. O motor adotado possui corrente nominal de 4,6 A;
- ✓ a fonte de tensão deve fornecer de 4 a 20 vezes a tensão nominal de fase do motor. O motor pode não rodar suavemente se a fonte de tensão for menos que quatro vezes a do motor. Uma tensão acima de 25 vezes a do motor poderá superaquecê-lo e queimá-lo, mesmo que ele esteja parado;
- ✓ o resistor de ajuste da corrente deve ser de 1/4W, +/- 5%;
- ✓ indutância do enrolamento do motor deve ser de pelo menos 500  $\mu$ H;
- ✓ existem dois jumpers no acionamento que foram ajustados conforme a figura 55;
- ✓ A tensão da fonte pode ser calculada pela equação 17;

$$\text{Tensão da fonte(V)} = 32 \times \sqrt{\text{Indutância do motor (mH)}} \quad (17)$$

No caso do Astrosyn Y259 a tensão é encontrada pela equação 18:

$$\text{Tensão da fonte} = 32 \times \sqrt{2,5 \text{ (mH)}} \approx 50 \text{ V.} \quad (18)$$

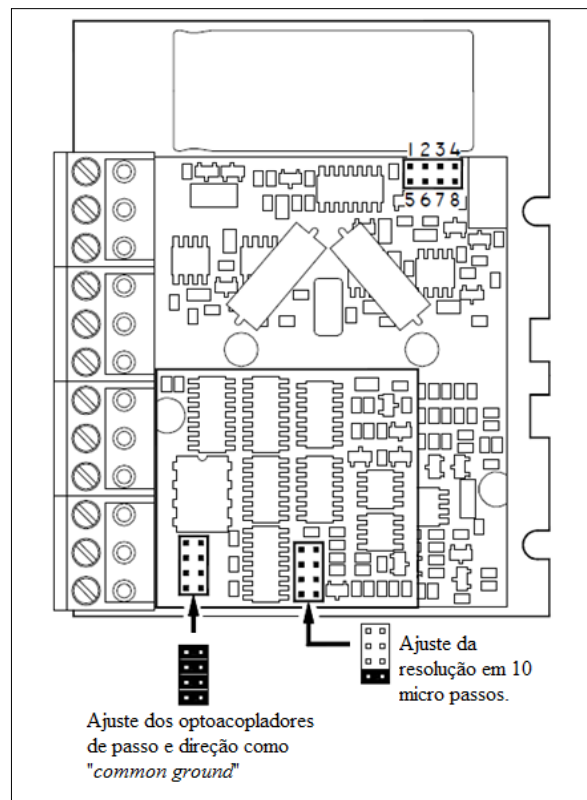


- ✓ Ajustes para correntes do motor acima de 3 A sem dissipadores de calor causarão superaquecimento e danos ao acionamento;
- ✓ A corrente no enrolamento do motor é determinada pelo resistor de ajuste da mesma. O seu valor, em  $k\Omega$ , pode ser determinado pela equação 19;

$$R(k\Omega) = 47 \times \frac{I(A)}{(2 - I(A))} \quad (19)$$

Considerando a corrente desejada igual a 3,0 A, calculamos a resistência aplicada pela equação 20.

$$R(k\Omega) = 47 \times \frac{3,0A}{(2 + 3,0A)} \cong 28 k\Omega \quad (20)$$



**Figura 55 - Configuração dos jumpers do Gecko Drive G212**  
**Fonte: Adaptado de GECKODRIVE , 2008**

### 7.3 Motor do eixo-árvore

Foi adotado um motor de alta frequência com eixo-árvore integrado Tecmaf TMO 01-WC01 (Figura 56), com carcaça de alumínio que dissipa com maior eficiência o calor

produzido pelo conjugado do motor, que é refrigerado a água. A classe de isolamento H , conforme NBR-7034, o que significa que pode operar até um limite de 180 °C. O fabricante recomenda uma temperatura ideal de trabalho de 30 a 35 °C, para evitar condensação no interior do equipamento. O sistema de fixação é através de pinças ER-16. A tabela 4 apresenta as principais características do motor.



**Figura 56 - Motor de alta frequência TecmaF TMO 01-WC01**  
Fonte: (TECMAF, 2011)

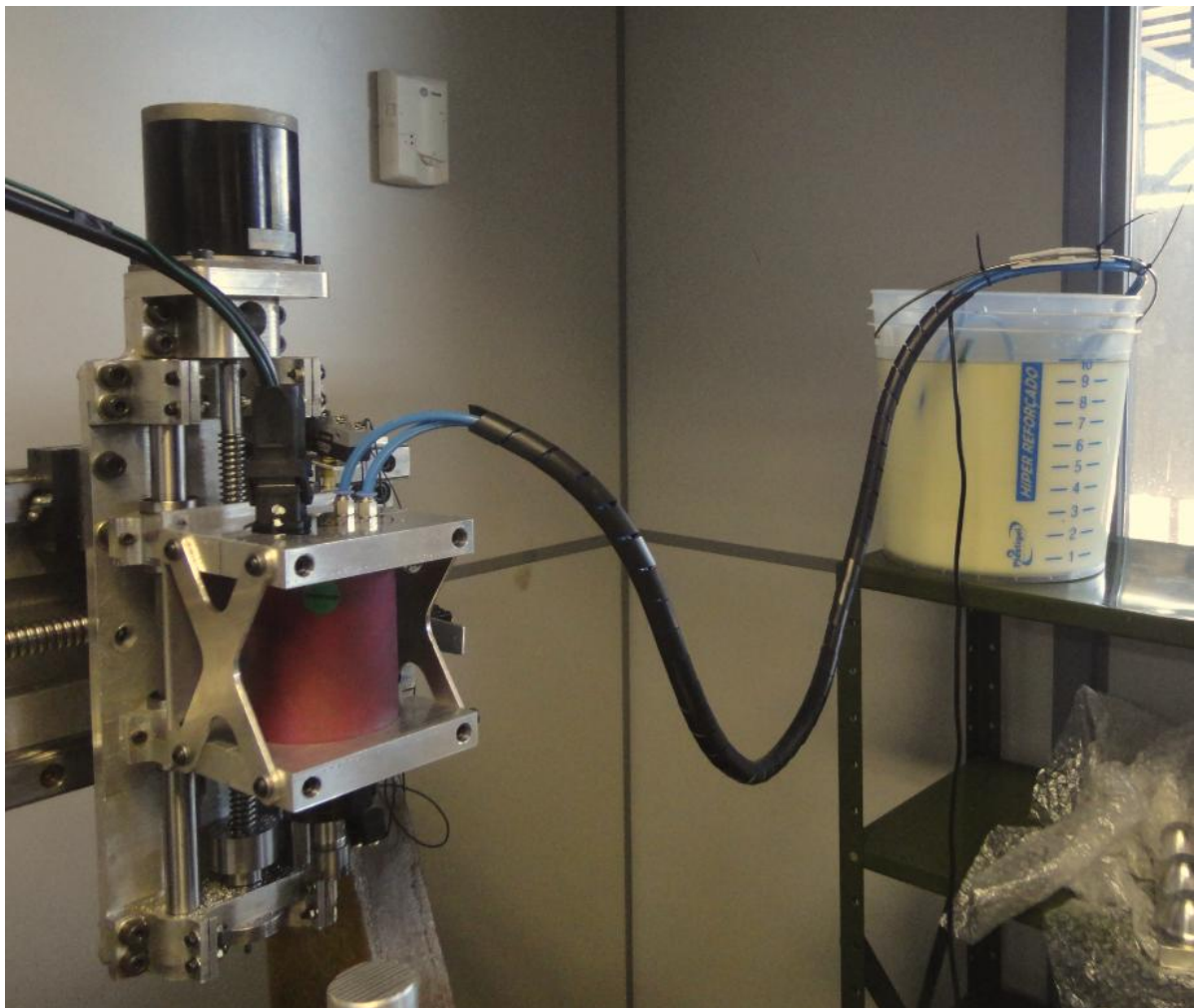
Característica	Valor	Unidade
Rotação Nominal	18 000	RPM
Frequência Nominal	300	Hz
Tensão Nominal	220	V
Potência Nominal	0,9	kW
Corrente Nominal	3,6	A
Peso	2	Kg
Número de Pólos	2	-
Mandril porta-pinças	ER-16	-
Classe IP	IP 65	-
Classe de Isolamento	H	-
Precisão de Usinagem	0,01	mm

**Tabela 4 - Principais características do motor de alta frequência TecmaF TMO 01-WC01**  
Fonte: (TECMAF, 2011)

A instalação do eixo-árvore exigiu a instalação de um sistema de refrigeração do motor a água, composto basicamente de um reservatório, uma bomba e mangueiras de conexão. O fabricante recomenda a instalação de um sistema de resfriamento com controle de temperatura do líquido refrigerante com os seguintes requisitos:

- ✓ Temperatura do Líquido – saída 20 à 25° C;
- ✓ temperatura Limite do sistema de resfriamento 30° C;
- ✓ líquido Refrigerante 80% água / 20% fluído anticorrosivo;
- ✓ volume 3 litros / min. a 2 Bar.

Foi feita uma montagem do eixo-árvore com a aplicação de um reservatório de 10 litros de óleo solúvel, uma bomba submersa para recirculação do fluido e mangueiras (Figura 57).



**Figura 57 – Montagem do sistema de refrigeração do eixo-árvore**

#### **7.4 Acionamento do eixo-árvore**

Para acionamento do eixo-árvore foi adotado um inversor WEG CFW10 0040 S2024 POCLZ (Figura 58), cujas principais características estão descritas na tabela 5.



**Figura 58 - Inversor WEG CFW10**  
 Fonte: WEG, 2012

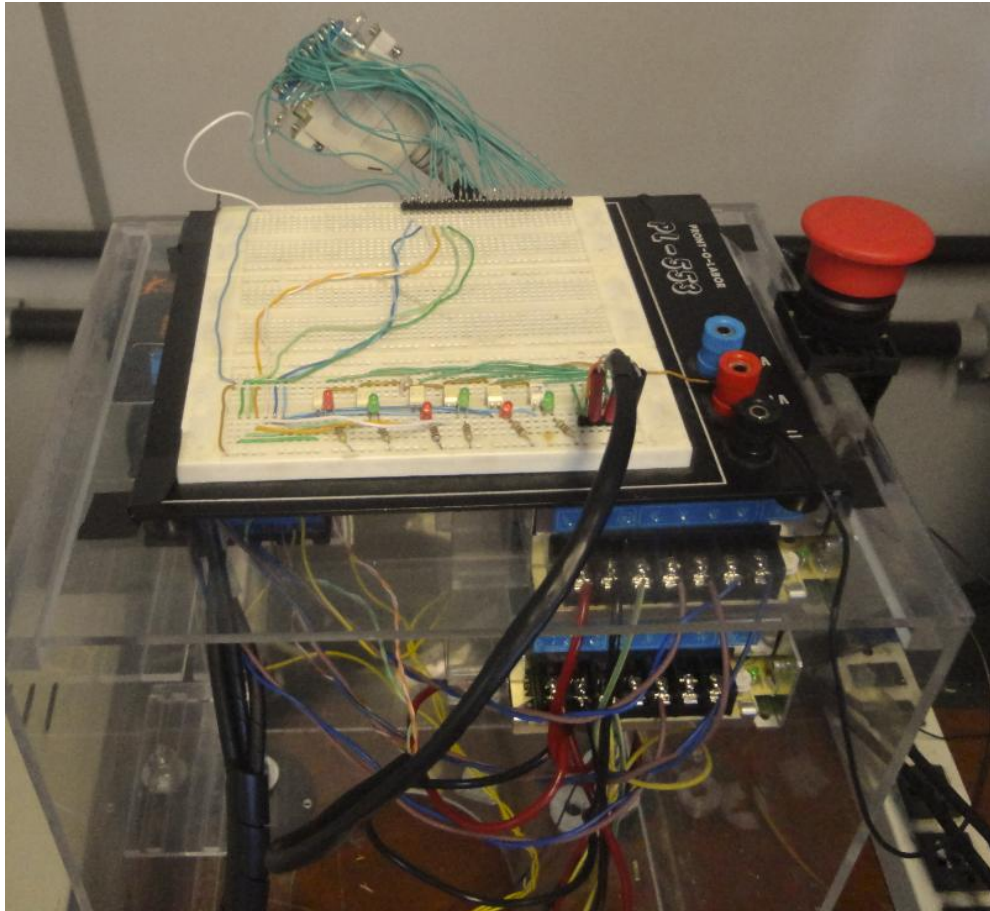
Característica	Valor	Unidade
Tensão de Entrada	200 ~ 240	V
Corrente Nominal de Entrada	4	A
Frequência Nominal	50 ~60	Hz
Tensão Nominal de Saída	4	A
Número de Fases Na Alimentação	Monofásico	-

**Tabela 5 - Principais características do inversor de frequência WEG**  
 Fonte: WEG, 2012

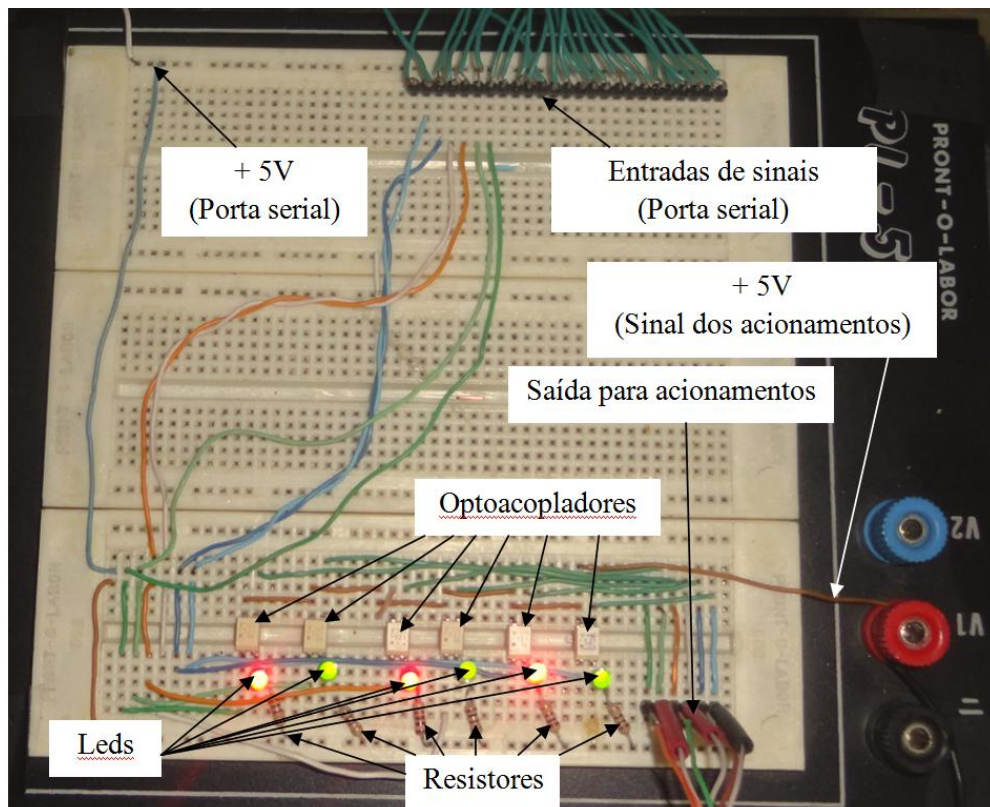
A parametrização do inversor encontra-se no Anexo A e o diagrama elétrico da fresadora encontra-se no Anexo B.

### 7.5 Interface com PC

A interface PC/Acionamentos é feita a partir da porta paralela do computador. A comunicação é feita através de optoisoladores, para se evitar que haja qualquer contato elétrico entre o PC e as partes de potência e controle (Figura 59 e figura 60).



**Figura 59 - Placa de interface PC/Acionamentos**

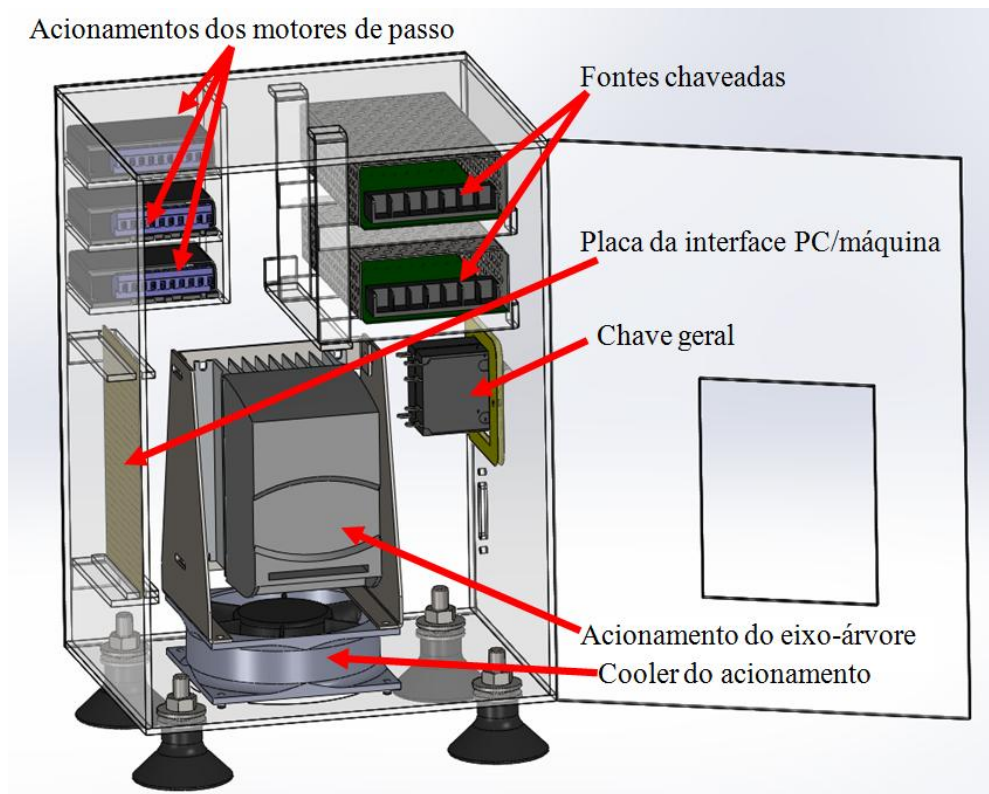


**Figura 60 - Detalhe da placa de interface PC/Acionamentos**

O diagrama elétrico da placa encontra-se inserido no Anexo B: “Diagrama elétrico da Fresadora”.

## 7.6 Montagem elétrica

Foi feito um projeto de um armário elétrico em acrílico, que permitisse a acomodação da placa de interface, fontes chaveadas, acionamento do eixo-árvore e acionamentos dos motores de passo. O fato de ser em acrílico favoreceria o propósito didático do equipamento, ao permitir a visualização de cada componente (Figura 61). O projeto previa que, mesmo com a porta do painel fechada, haveria acesso aos botões de comando do acionamento (Figura 62). Durante os testes de funcionamento, entretanto, foram observadas várias anomalias no equipamento, devidas a interferências do forte campo eletromagnético gerado pelo acionamento do motor do eixo-árvore. Foi necessário, portanto, separá-lo dos demais componentes e tomar um cuidado adicional para separar todos os cabos de alimentação elétrica (127V) dos cabos de alimentação dos motores de passo. Durante o funcionamento da fresadora notou-se também um aquecimento que, embora não fosse excessivo, certamente implicará na redução da vida útil dos acionamentos dos motores de passo.



**Figura 61 – Projeto do painel elétrico para a fresadora**



**Figura 62 – Acesso aos botões do inversor de frequência mesmo com a porta fechada**

Os cabos elétricos dos motores de passo que saem do armário elétrico foram conduzidos a uma região na parte posterior da máquina, onde foram montados conectores. As (Figura 63).

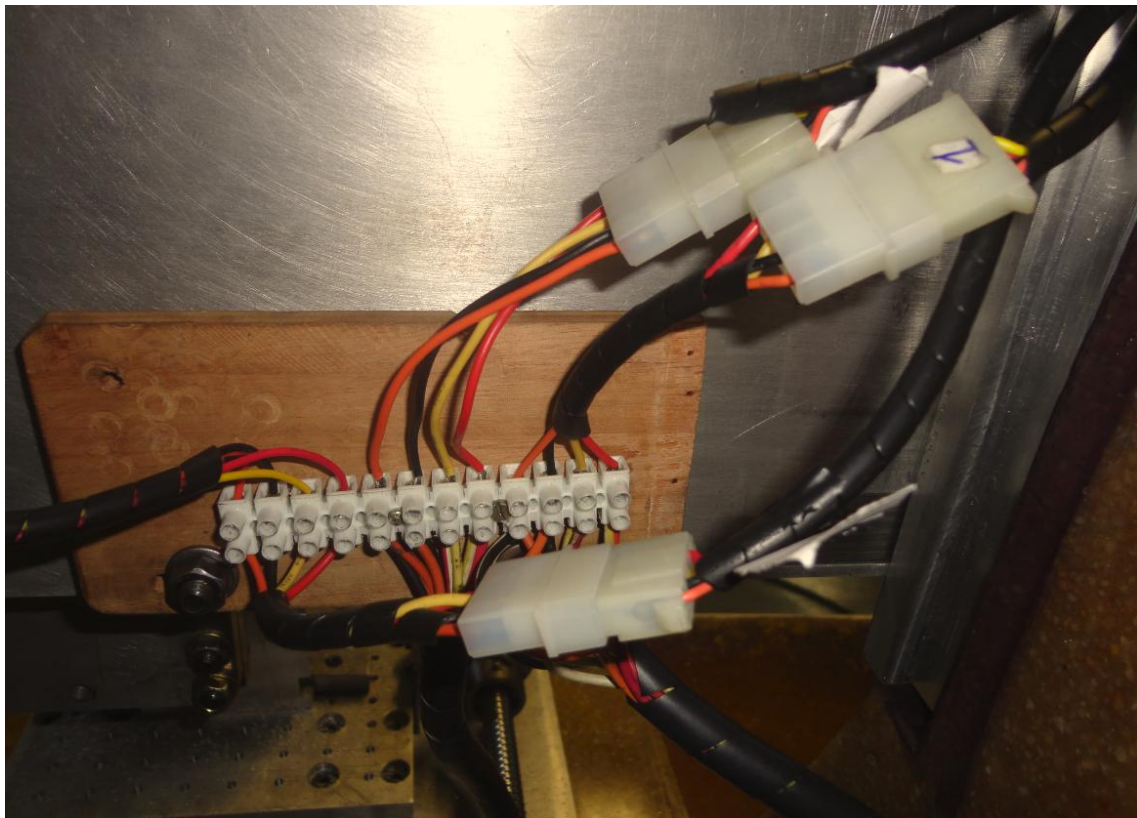


**Figura 63 – Painel para conexão dos motores**

As cores dos fios foram padronizadas (Figura 64), obedecendo à seguinte lógica:

- ✓ bobina  $A$  do motor de passo, fio laranja;
- ✓ bobina  $\bar{A}$ , fio preto;
- ✓ bobina  $B$ , fio amarelo;
- ✓ bobina  $\bar{B}$ , fio vermelho.

Este recurso é muito útil quando há um mau funcionamento de um eixo e existe dúvidas sobre a sua causa, que pode estar na porta paralela, na placa de interface, no acionamento do eixo (Geckodrive®), num mau contato do cabo, ou , ainda no motor do eixo. Há uma certa facilidade em intercambiar as conexões entre os acionamentos e os motores. Por exemplo, caso haja um mau funcionamento no eixo X, é possível desconectar o motor de seu acionamento e conectá-lo, por exemplo, ao acionamento do eixo Y e então fazer um teste. Nestas circunstâncias, caso o defeito do eixo X desapareça fica praticamente descartada a hipótese de mau funcionamento do motor. Este tipo de recurso facilita em muito a manutenção do equipamento. É extremamente importante ressaltar a necessidade de se desligar a alimentação do acionamento do eixo antes de se conectar ou desconectar o motor, sob pena de queima dos componentes.

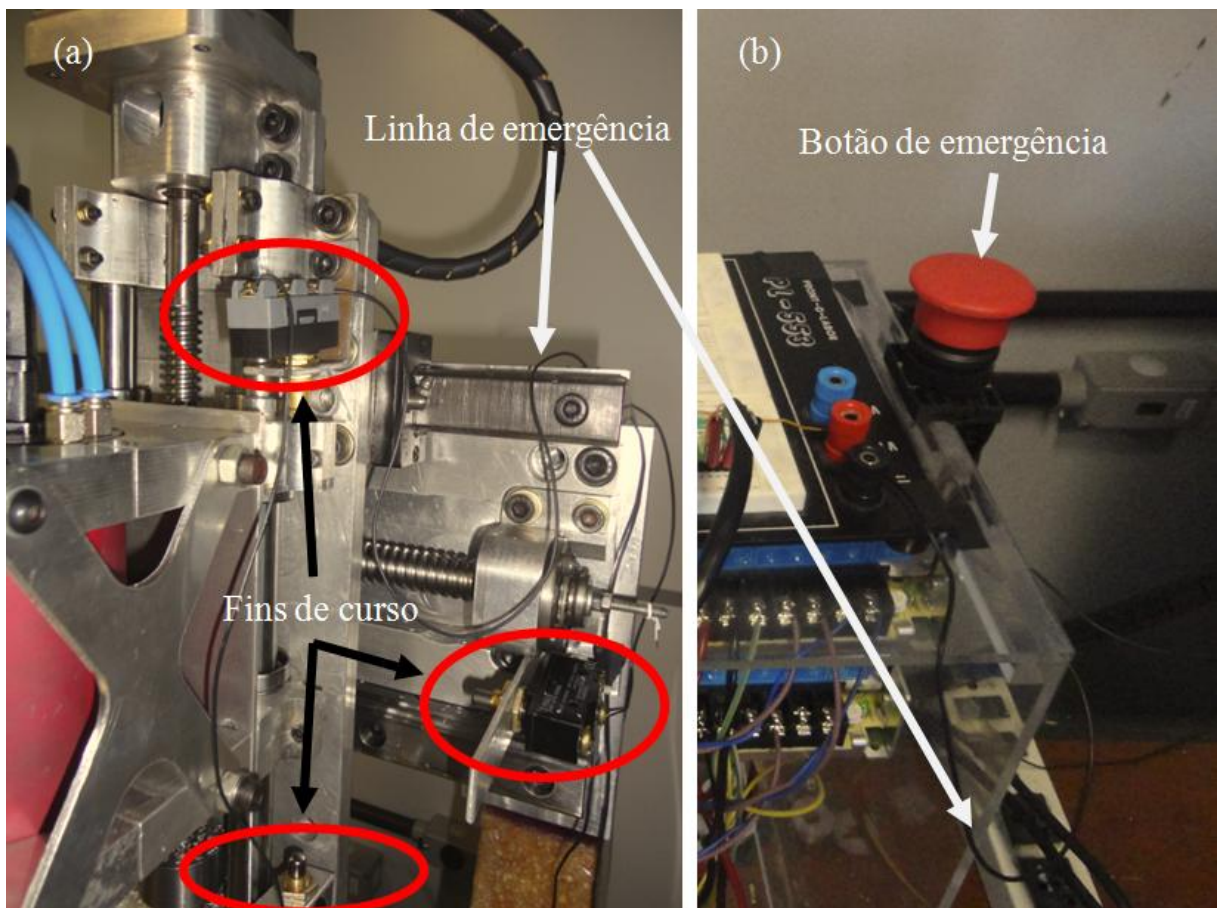


**Figura 64 – Padronização nas cores dos fios de alimentação dos motores**



## 7.7 Linha de emergência

Foi criada uma linha de emergência para desativar a movimentação dos eixos caso a máquina se aproxime de um fim de curso de qualquer eixo ou caso um botão de emergência seja pressionado. Esta linha leva um sinal de 5V da fonte até a alimentação dos opto acopladores, fazendo uma ligação em série de todas as chaves fim de curso (Figura 65-a) e do botão de emergência (Figura 65-b). Caso qualquer um deles seja acionado, o sinal de 5V é interrompido e com ele a alimentação dos opto acopladores, o que faz com que os sinais de pulso e direção não mais cheguem aos acionamentos e todo o movimento cesse. O cabo que leva este sinal foi cuidadosamente isolado dos cabos de alimentação de 127V e dos cabos de alimentação do motor de passo, para evitar interferência.



**Figura 65 – Linha de emergência: (a) Passando pelos fins de curso. (b) Passando pelo botão de emergência**

## 8 CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA CNC

### 8.1 O Software Mach3

Dentre os vários softwares disponíveis, foi selecionado o MACH3, um software desenvolvido pela Artsoft, originalmente desenvolvido para uso doméstico como hobby, mas atualmente largamente utilizado em aplicações industriais.

A escolha do software foi baseada em algumas de suas características que o tornam propício para aplicações didáticas:

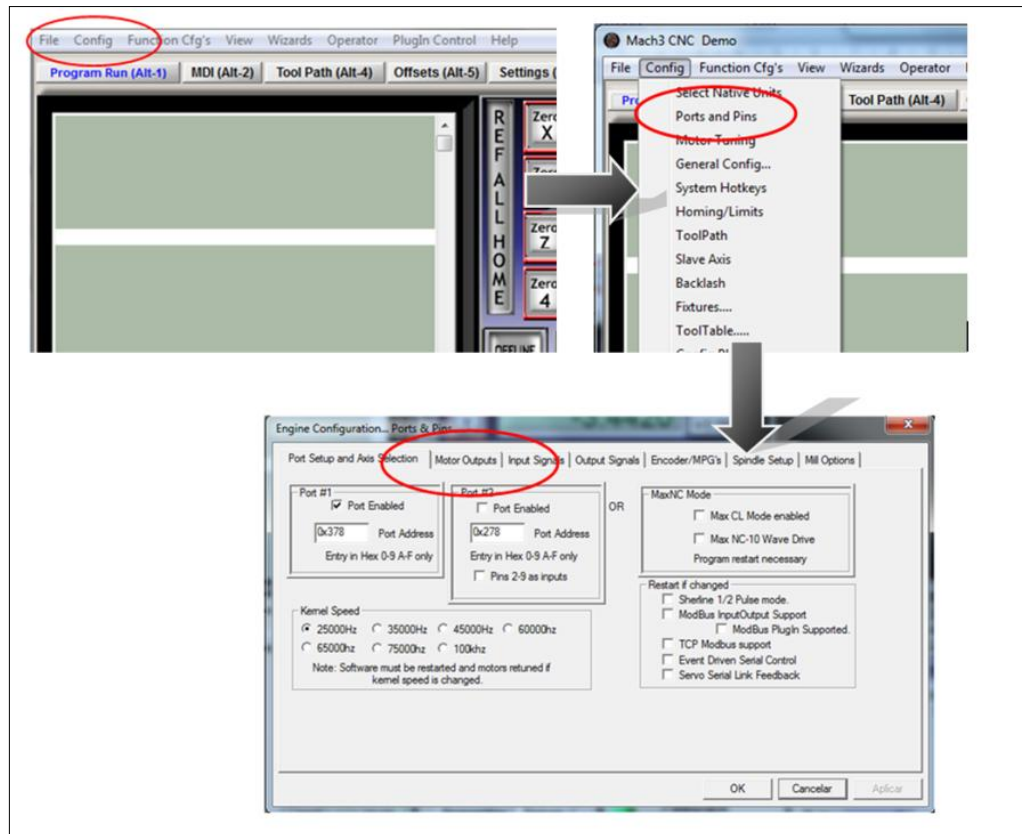
- ✓ converte um PC convencional em um controlador CNC completo, de até 6 eixos;
- ✓ permite a importação direta de arquivos DXF, BMP, JPG E HPGL, através do LazyCam;
- ✓ mostrador visual de códigos G;
- ✓ gera códigos G via LazyCam (um CadCam gratuito que acompanha o pacote) ou tutoriais;
- ✓ interface totalmente adaptável;
- ✓ códigos M customizáveis e macros com aplicação de VBscripts
- ✓ permite execução do programa passo a passo, em modo contínuo e a movimentação dos eixos em modo manual e ainda permite a entrada manual de comandos simples (MDI);
- ✓ permite a visualização do caminho da ferramenta, gerado pelo código G a ser executado.

### 8.2 Configuração do programa

Basicamente, a configuração do programa envolve a habilitação da porta paralela, dos eixos, sintonia dos motores, correção de folgas mecânicas do sistema (histerese, ou, em inglês, “Backlash”) e mapeamento de erros do fuso.

### 8.3 Habilitação da porta paralela

A partir do menu principal seguir o caminho: *config* → *ports and pins*, selecionar a aba “*motor outputs*”. Na caixa “*Port #1*” verificar que a caixa de verificação “*Port Enabled*” esteja habilitada e conferir o endereço da porta paralela DB25 na caixa de texto “*Port Address*”. O procedimento está ilustrado na figura 66.



**Figura 66 - Habilitação da porta paralela DB25 no software Mach3**

#### 8.4 Habilitação dos eixos

A partir da etapa anterior, foi selecionada a aba “*Motor Outputs*”. Os eixos X, Y e Z foram habilitados, clicando nos respectivos campos da coluna “*Enabled*”.

Foram selecionados os pinos da porta paralela de pulso e direção (respectivamente: “*step pin#*” e “*dir pin#*”) para cada eixo, da seguinte maneira:

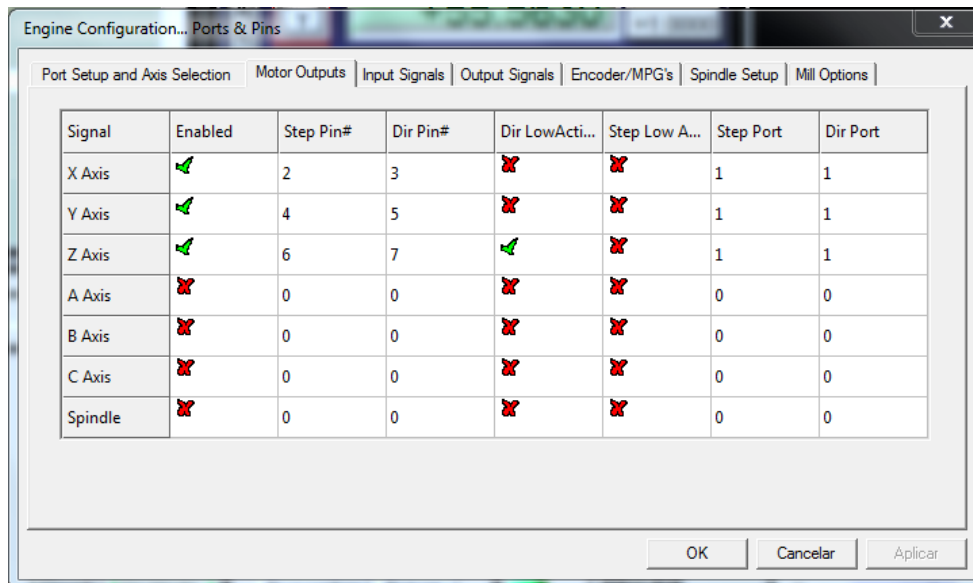
- ✓ eixo X: pino 2 para pulso e pino 3 para direção de giro do motor;
- ✓ eixo Y: pino 4 para pulso e pino 5 para direção de giro do motor;
- ✓ eixo Z: pino 6 para pulso e pino 7 para direção de giro do motor.

A coluna “*Dir Low Active*” é utilizada para determinar se o motor girará para gerar um deslocamento do eixo no sentido positivo quando o nível lógico do pino for zero ou um. Desta maneira, caso seja dado um comando ao eixo para se deslocar no sentido positivo, por exemplo, e ele se deslocar no sentido negativo, basta alterar o estado deste campo. Este procedimento foi adotado com relação ao eixo Z. A coluna “*Step Low Active*” é utilizada para determinar quando o acionamento do eixo deverá gerar um incremento do motor. Se este

campo for ajustado para “*low active*”, haverá um incremento a cada vez que o nível lógico do pino da porta paralela for alterado para zero. Se o campo for ajustado para “*high active*”, haverá um incremento a cada vez que o nível lógico for alterado para um.

Os campos “*step port*” e “*dir port*” dos eixos X, Y e Z foram ajustados para 1 (um).

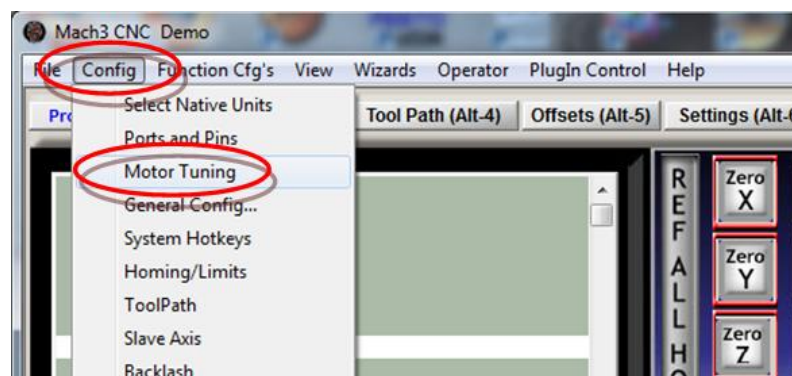
Após estes ajustes, a janela de configuração ficou como ilustrado na figura 67:



**Figura 67 - Configuração dos sinais de saída para comando dos eixos no Mach3**

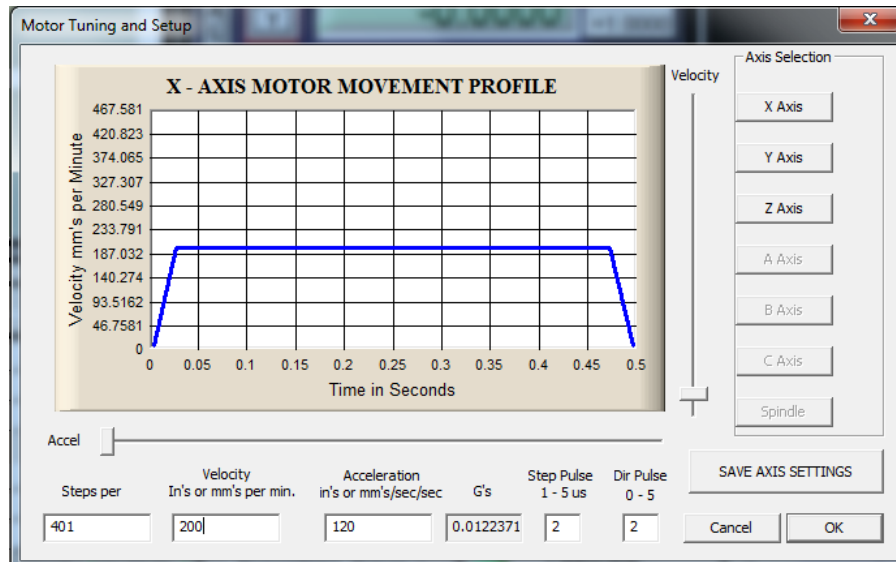
## 8.5 Sintonia dos eixos

O ajuste dos eixos com respeito à velocidade máxima, aceleração e quantidade de pulsos necessários para que a mesa se desloque por uma unidade de medida (no nosso caso, um milímetro) é feito através da janela “*Motor Tuning and Setup*”. Esta janela pode ser acessada a partir da tela principal da seguinte maneira: A partir do menu principal, clicar em “*Config*” e depois em “*Motor Tuning*”, conforme ilustrado na figura 68.



**Figura 68 – Como acessar a janela “*Motor Tuning*”.**

Após este procedimento, a janela é acessada. A figura 69 mostra o aspecto da mesma após os ajustes realizados para o eixo X.



**Figura 69 – Ajustes feitos para o eixo X, no Mach3**

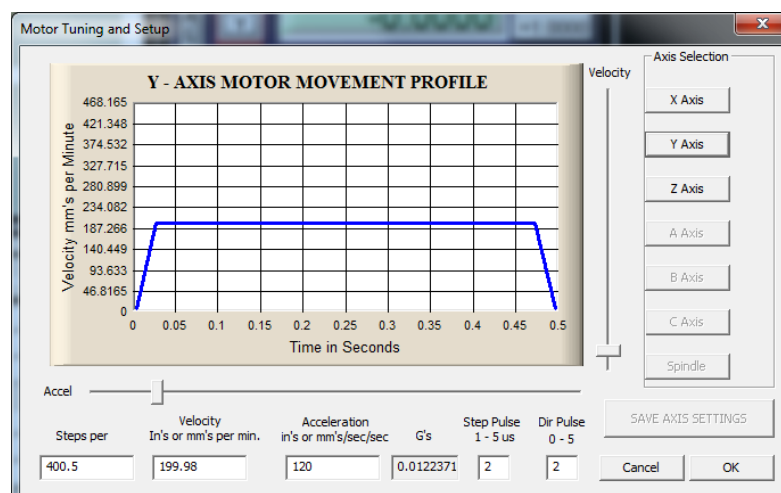
Esta janela apresenta as seguintes entradas:

- ✓ “*Steps per (unit)*” : Neste campo deve ser inserido o valor de pulsos necessários para que o eixo se desloque uma unidade (polegadas ou milímetros), dependendo do sistema adotado. O valor inicial a ser inserido corresponde, então, no caso do presente experimento, à quantidade de pulsos necessária para que a mesa se desloque um milímetro. Considerando-se que o motor adotado dá um giro completo a cada 200 pulsos e que o fuso de esferas recirculantes tem um passo de 5,0 mm, logo conclui-se que para o deslocamento pretendido será obtido quando o fuso der um quinto de volta. Isto equivale, então a 40 pulsos. Como o acionamento do motor tem o recurso que permite subdividir cada passo em dez micro passos, são necessários então 400 pulsos para um deslocamento de 1,0 mm da mesa. Um ajuste final foi feito com o uso de um relógio comparador digital Mitutoyo código 575-121, que tem o curso de 25 mm da seguinte maneira. Foi programado um incremento de 20 mm, medido pelo relógio comparador. A quantidade de pulsos foi então sendo alterada e o procedimento repetido até que o deslocamento medido pelo relógio se ajustasse àquele pretendido.
- ✓ “*Velocity – In’s or mm’s per min.*” : Neste campo é ajustada a velocidade de avanço rápido do eixo. Este parâmetro depende muito da potência do acionamento, da

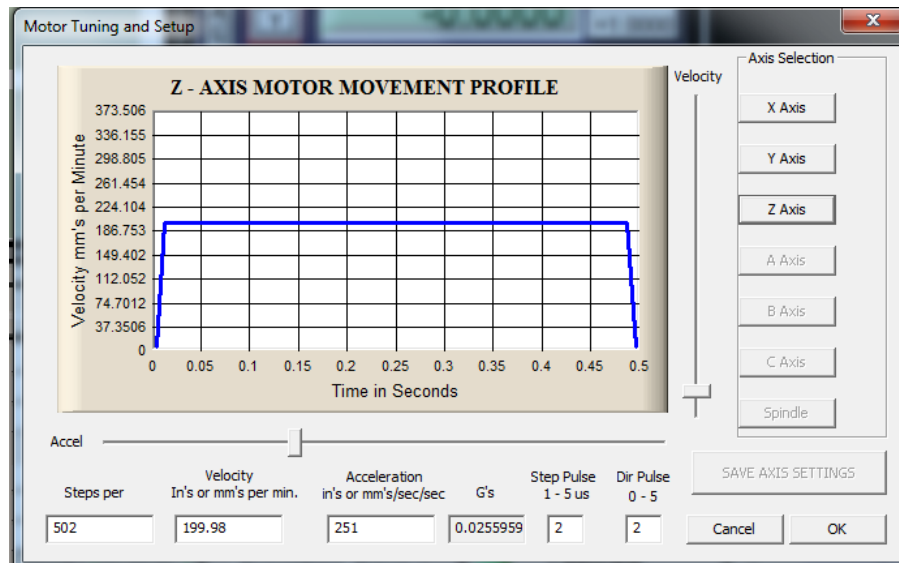
potência do motor e das condições de refrigeração de ambos. Caso seja ajustado um valor muito alto, poderá haver queima dos componentes. Recomenda-se ajustar um valor mais baixo e iniciar um ciclo de repetições de movimento com um acompanhamento da variação na temperatura dos componentes. Caso não haja superaquecimento, aumentar gradualmente o valor até que a temperatura do acionamento atinja uma temperatura em regime permanente de, no máximo, 50° C. No caso do presente estudo a velocidade máxima do eixo X foi ajustada para 200 mm/minuto.

- ✓ “*Acceleration In’s or mm’s/sec/sec*”: Neste campo é ajustada a rampa de aceleração do motor. Durante um ciclo de usinagem a velocidade dos eixos varia constantemente. Este parâmetro influencia no tempo necessário para se atingir a velocidade final programada. Valores muito altos gerarão sobrecargas elétricas e mecânicas, sobre passagem dos pontos de deslocamento programados e desgaste prematuro do equipamento. No caso presente estudo foi ajustado em  $200 \text{ mm/s}^2$  para o eixo X (é normal que o programa altere ligeiramente o valor, após inserção de um número).
- ✓ “*G’s*”: Este campo não pode ser alterado. Muda automaticamente quando o valor da aceleração é inserido.
- ✓ “*Step Pulse 0 - 5μs*” e “*Dir Pulse 0 - 5μs*”: Estes campos informam qual deve ser a duração dos pulsos, em microssegundos.

Os parâmetros de aceleração e velocidade podem ser alterados também através das guias deslizantes disponíveis na base e na lateral do gráfico. Após o ajuste dos eixos Y e Z, as respectivas janelas ficaram conforme mostrado na figura 70 e na figura 71.



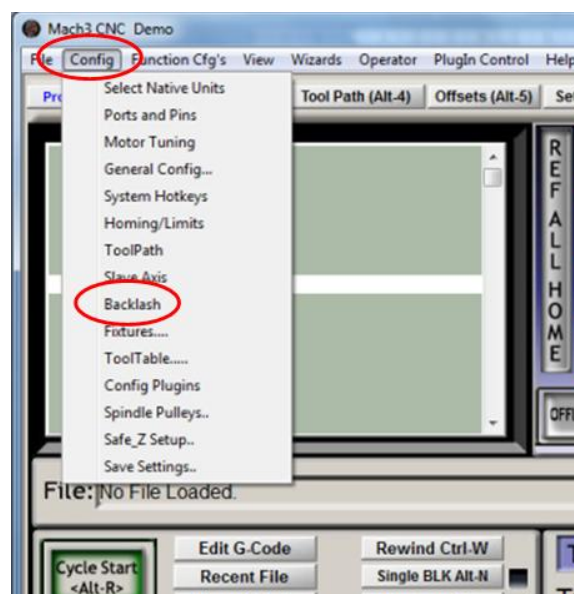
**Figura 70 – Ajustes feitos para o eixo Y, no Mach3**



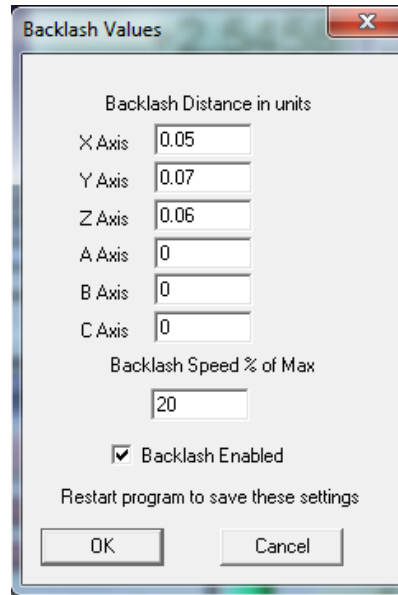
**Figura 71 - Sintonia fina do eixo Y, no Mach3**

## 8.6 Correção das folgas

É comum que haja alguma folga mecânica nos componentes, desde o motor, passando pelos acoplamentos e inclusive nos fusos de esferas recirculantes, que não são absolutamente rígidos. Este fenômeno causa um erro de posicionamento que depende do sentido do deslocamento e é denominado histerese. A histerese pode ter também origem nos componentes eletro eletrônicos do equipamento. É possível fazer eletronicamente uma compensação, pelo menos parcial, da histerese. A partir do menu principal seguir o caminho: “*config*” → “*backlash*” (Figura 72 e figura 73).

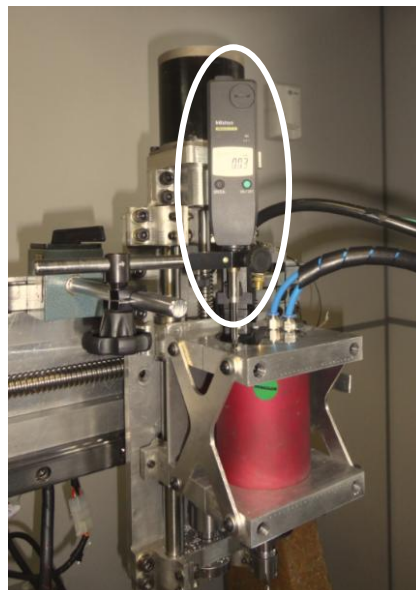


**Figura 72 – Acesso à página de compensação da histerese dos eixos**



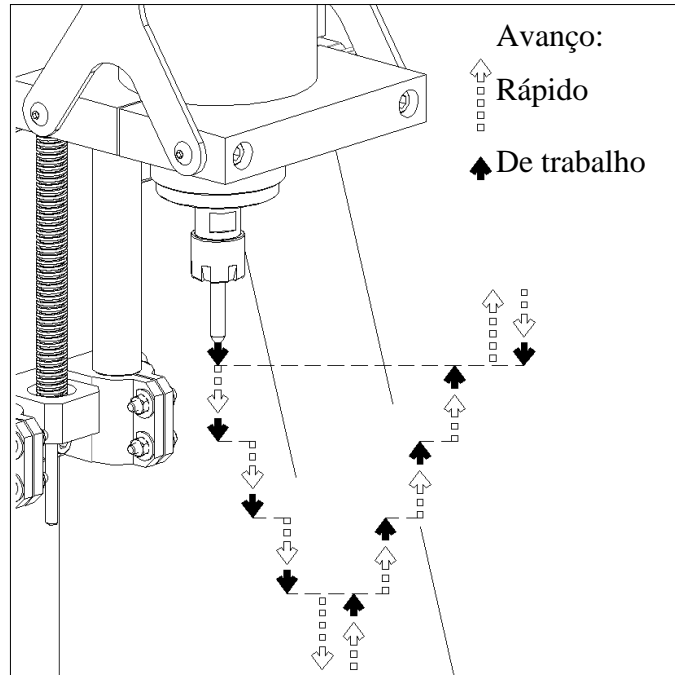
**Figura 73 –Valores ajustados para os eixos da máquina**

A determinação da histerese de cada eixo foi feita com o uso de um relógio comparador Mitutoyo código 575-121. A figura 74 mostra o posicionamento do mesmo para medição da histerese no eixo Z. O valor da histerese para cada eixo foi obtido por sucessivos posicionamentos programados, em intervalos de 5,0 mm, conforme figura 75. A cada posicionamento em avanço de trabalho houve uma parada programada para que o valor das coordenadas apresentadas pelo relógio comparador fossem registradas em uma tabela. O ciclo foi repetido três vezes e a média das diferenças entre o deslocamento programado e o registrado pelo relógio comparador foi lançada no campo do respectivo eixo. É importante ressaltar a necessidade de se reiniciar o programa a cada alteração dos parâmetros.



**Figura 74 - Relógio comparador posicionado para medição da histerese do eixo**

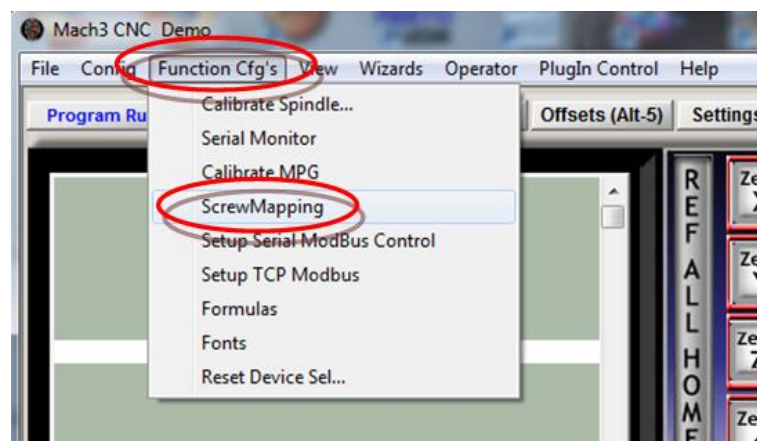




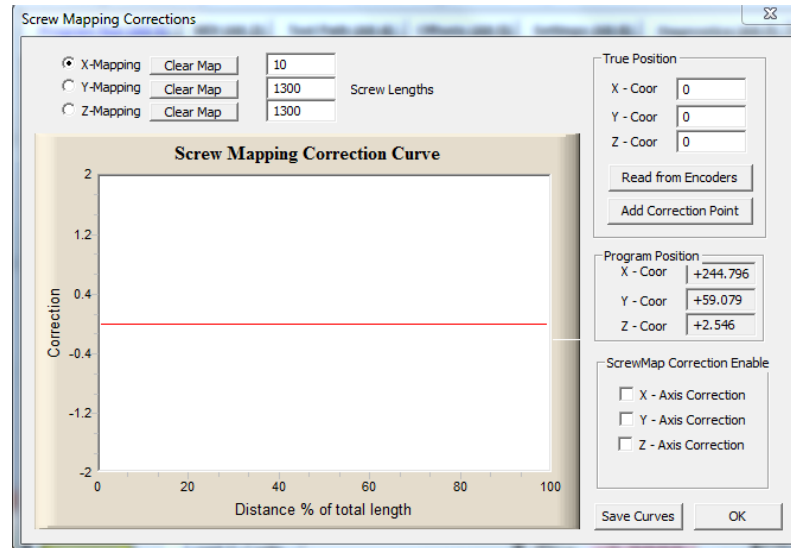
**Figura 75 – Sequência de movimentos para levantamento da histerese do eixo.**

### 8.7 Mapeamento de erro de passo dos fusos

Os fabricantes de fusos de esferas recirculantes preveem variações, por menores que sejam, no passo da rosca. Para um posicionamento mais preciso, é muito importante que o CNC tenha o recurso de mapeamento de erros do fuso. Este recurso permite que a diferença entre deslocamentos comandados e efetivos em vários pontos ao longo do fuso sejam armazenados na memória do comando, para que este faça correções automáticas. No Mach3® este recurso é acessado, a partir da página principal pela sequência de comandos: “*Function Cfgs*” → “*ScrewMapping*” (Figura 76). A janela de ajustes está representada na Figura 77.



**Figura 76 – Sequência para acessar a janela “Screw Mapping”.**



**Figura 77 - Janela de mapeamento de erros do fuso.**

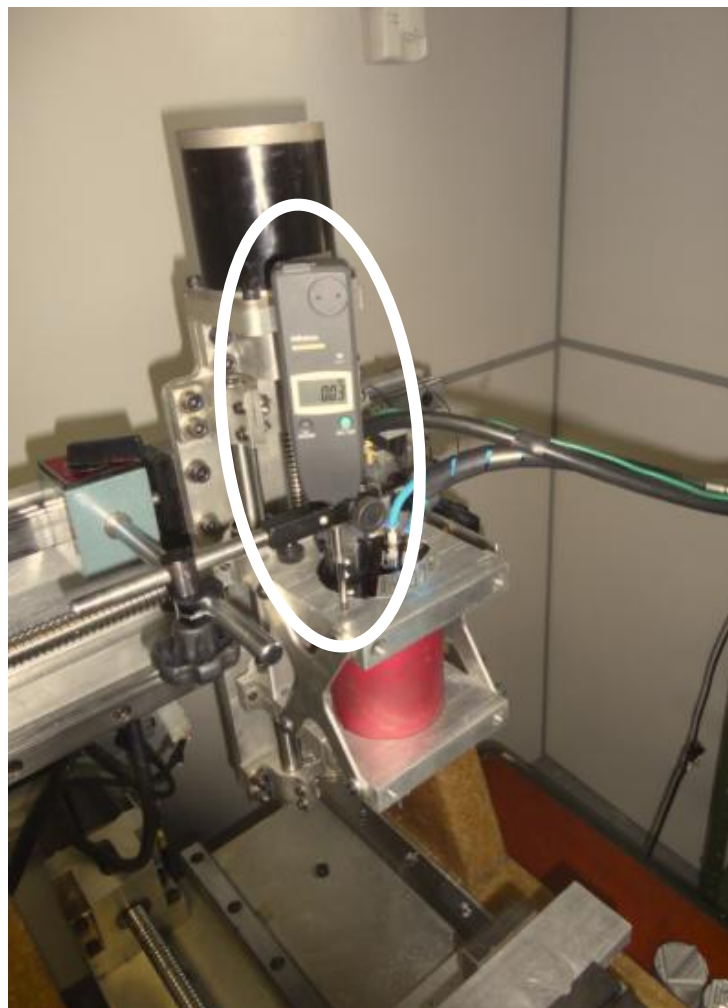
As tentativas para aplicar este recurso não foram bem sucedidas. Sua aplicação não está claramente explicada nos manuais adotados e ao buscar auxílio em fóruns do programa nota-se uma demanda por melhores orientações acerca de como aplicar o recurso, havendo usuários que o fazem, aparentemente sem problemas, e muitos outros que não o conseguem.

## 9 TESTES EXPERIMENTAIS

### 9.1 Teste de repetibilidade e precisão de posicionamento.

Foram feitos três testes de repetibilidade e precisão de posicionamento (um para cada eixo). O teste consistiu em zerar as coordenadas em um ponto conveniente, posicionar o instrumento de medição e depois posicionar cada eixo, via programa, nas coordenadas -1 mm, 0 (zero) mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, 5 mm, 0 (zero) mm. Após cada posicionamento foi programada uma pausa para anotação do resultado obtido pelo instrumento de medição e ciclo repetido dez vezes. O programa utilizado para realização deste procedimento no eixo X está no Anexo C.

Foi utilizado um relógio comparador digital Mitutoyo código 575-121, com resolução de 0,01 mm e curso útil de 25 mm (Figura 78).



**Figura 78 - Posicionamento do relógio comparador eletrônico para teste de repetibilidade no eixo Z.**

Durante o teste de os valores foram anotados em uma planilha eletrônica, de onde foram extraídos dados como valores máximo e mínimo de erro para deslocamentos no sentido positivo e negativo do eixo e desvio padrão de cada amostragem. Os resultados das medições estão expressos nas tabelas 6, 7 e 8, respectivamente para os eixos X, Y e Z.

Ponto de Medição	Erro, sentido +			Erro, sentido -		
	Valor Máximo	Valor Mínimo	Desvio Padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo	Desvio Padrão
0	0,01	-0,02	0,010328	0	-0,01	0,005164
5	4,99	4,98	0,004216	4,99	4,99	0,000000
10	10	10	0,000000	10	9,99	0,004830
15	15	14,99	0,005164	15	14,97	0,008433
20	20,01	20,01	0,000000	20	19,99	0,005270

**Tabela 6 - Resultados da medição de repetibilidade para o eixo X.**

Ponto de Medição	Erro, sentido +			Erro, sentido -		
	Valor Máximo	Valor Mínimo	Desvio Padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo	Desvio Padrão
0	0	0	0,000000	-0,02	-0,02	0,000000
5	4,99	4,99	0,000000	4,98	4,98	0,000000
10	10	9,99	0,003162	9,99	9,99	0,000000
15	15	15	0,000000	14,99	14,99	0,000000
20	20	20	0,000000	19,99	19,99	0,000000

**Tabela 7- Resultados da medição de repetibilidade para o eixo Y.**

Ponto de Medição	Erro, sentido +			Erro, sentido -		
	Valor Máximo	Valor Mínimo	Desvio Padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo	Desvio Padrão
0	0	0	0,000000	0	0	0,000000
5	4,96	4,95	0,004830	4,95	4,94	0,005270
10	9,95	9,95	0,000000	9,97	9,95	0,005676
15	15,02	15,01	0,005164	15,01	15,01	0,000000
20	20	19,99	0,003162	19,98	19,97	0,004830

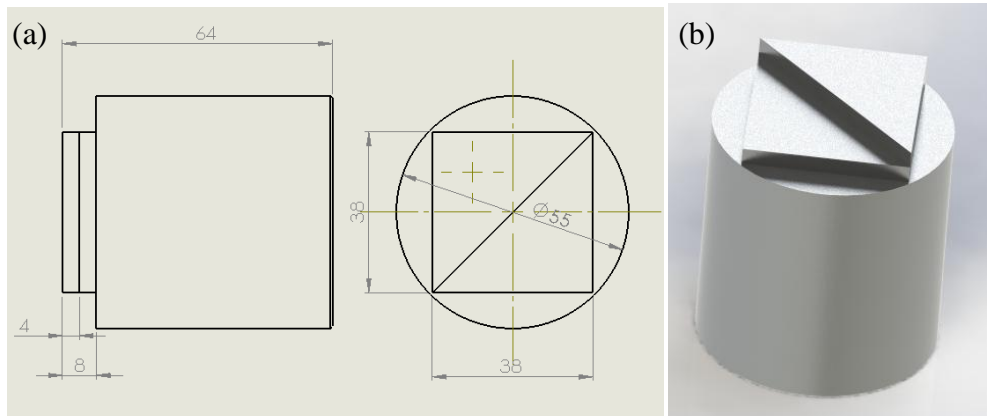
**Tabela 8 – Resultados da medição de repetibilidade para o eixo Z.**

## 9.2 Usinagem de peças para conferência da geometria da máquina

Duas peças em alumínio 6262T6 foram usinadas para avaliação da geometria da máquina. O formato foi projetado de forma a proporcionar superfícies favoráveis à medição

de retilidade, paralelismo e ângulo entre faces usinadas no equipamento, além de circularidade.

A peça 1 consiste basicamente em um quadrado e um triângulo usinados a partir de um corpo cilíndrico. As medidas do corpo de prova são apresentadas na figura 79-a. A figura 79-b mostra uma representação 3D em perspectiva da peça.



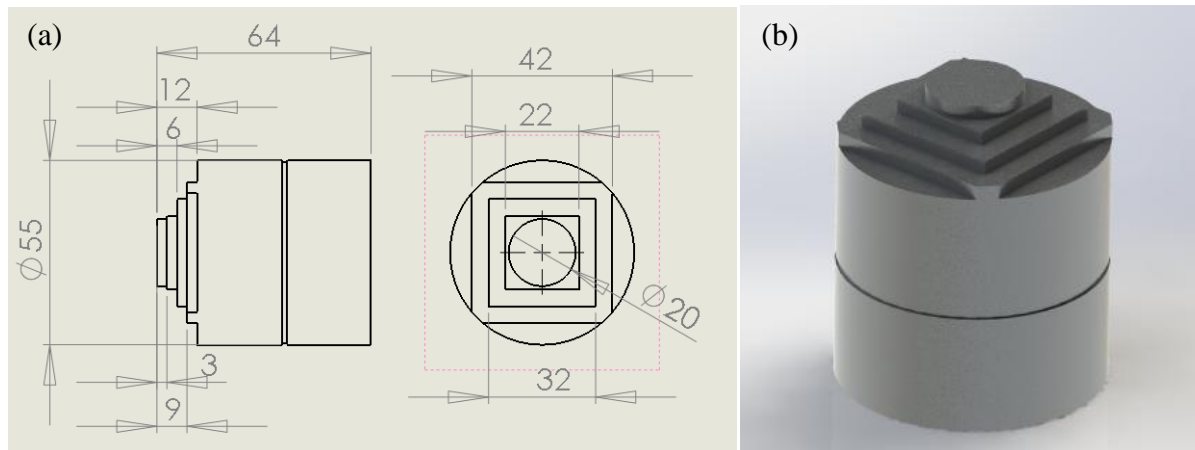
**Figura 79 - (a) Dimensões da Peça 1, (b) Representação 3D.**

A usinagem foi feita de modo que os lados do quadrado fossem alinhados com os eixos X e Y. Isso permite a medição da retilidade da usinagem de superfícies geradas pelo deslocamento de um único eixo, e a medição da perpendicularidade entre as faces e, conseqüentemente, entre os eixos. A diagonal do quadrado, que coincide com a hipotenusa do triângulo, permite a medição da retilidade de uma superfície gerada pelo deslocamento dos eixos X e Y coordenadamente. A usinagem foi feita com uma fresa de 5,0 mm de aço rápido, com rotação de 5000 RPM e avanço de 200 mm/min. (Figura 80).



**Figura 80 - Usinagem da Peça 1**

A peça 2 consiste em 03 quadrados concêntricos escalonados, com uma circunferência no topo. As medidas estão na figura 81-a, com uma representação 3D em perspectiva na figura 81-b.

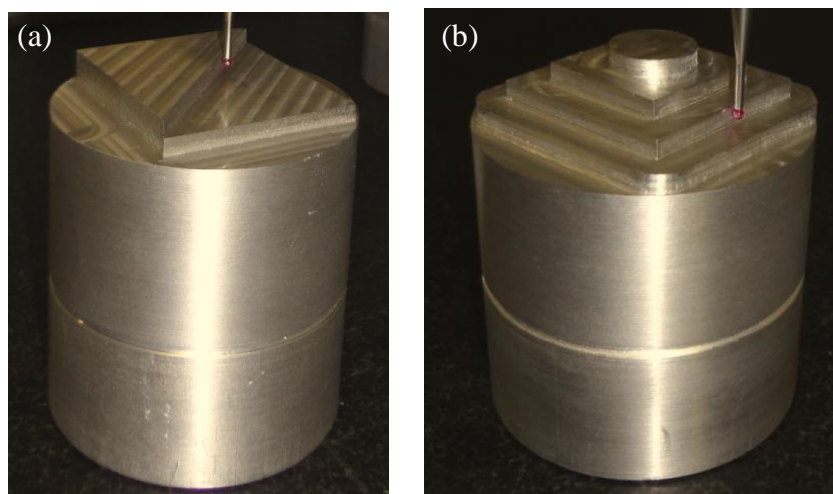


**Figura 81 - (a) Dimensões da Peça 2, (b) Representação 3D.**

Esta peça foi projetada de forma a permitir a medição da linearidade de superfícies geradas pela movimentação de um eixo somente, a medição do erro de deslocamento ao longo de um eixo, perpendicularismo entre as faces e a medição da circularidade de um corpo gerado pela interpolação circular dos eixos X e Y.

A usinagem foi feita com uma fresa de 5,0 mm de aço rápido, com rotação de 5000 rpm e avanço de 200 mm/min..

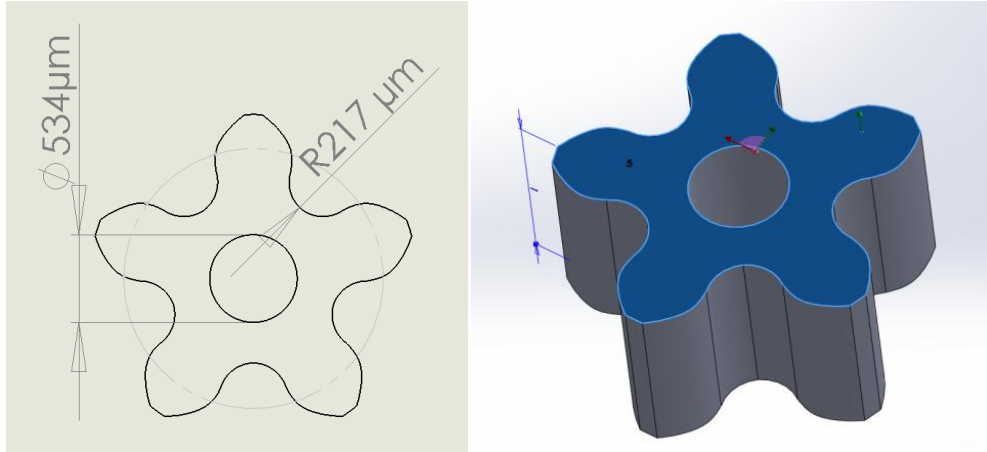
As medições foram realizadas num medidor tridimensional TESA Micro-Hite® 3D (Figura 82-a e b).



**Figura 82 – (a) Peça 1, para conferência do perpendicularismo e retilneidade. (b) Peça 2, para conferência de perpendicularismo, retilneidade e circularidade.**

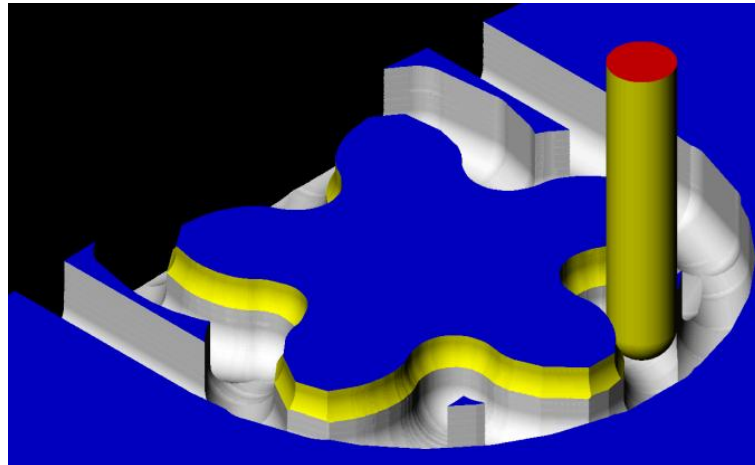
### 9.3 Usinagem de micro componentes

Foi usinada também uma peça de pequenas dimensões, à semelhança de uma engrenagem. (Figura 83).



**Figura 83 - Peça de pequenas dimensões à semelhança de uma engrenagem.**

Foi utilizada uma fresa de aço rápido, topo esférico e diâmetro 400 μm, com rotação de 15000 RPM e avanço 12 μm/aresta, sendo a peça usinada em alumínio 6262T6. O programa foi gerado com o auxílio de uma ferramenta CAM (Figura 84).

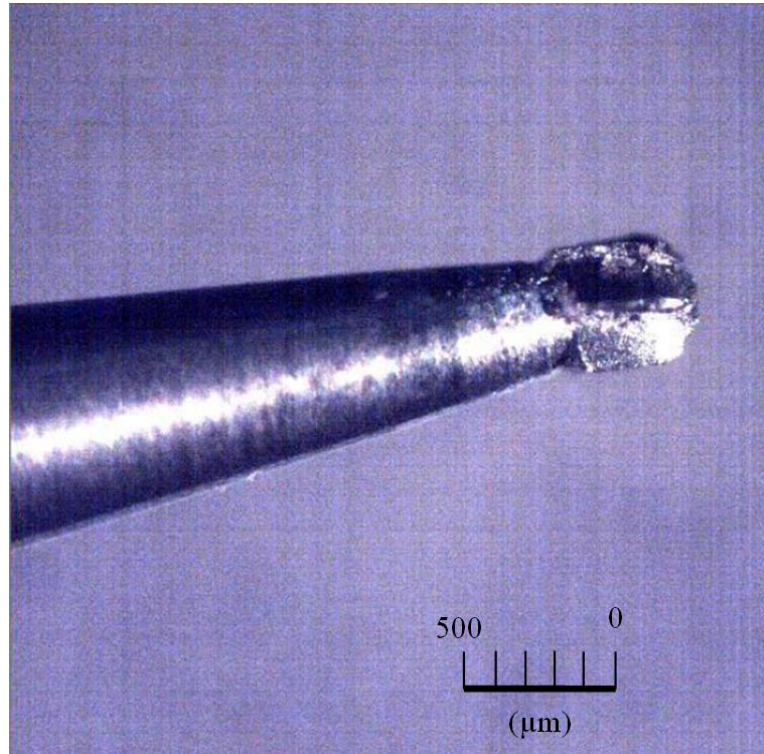


**Figura 84 - Simulação da usinagem de micro componente.**

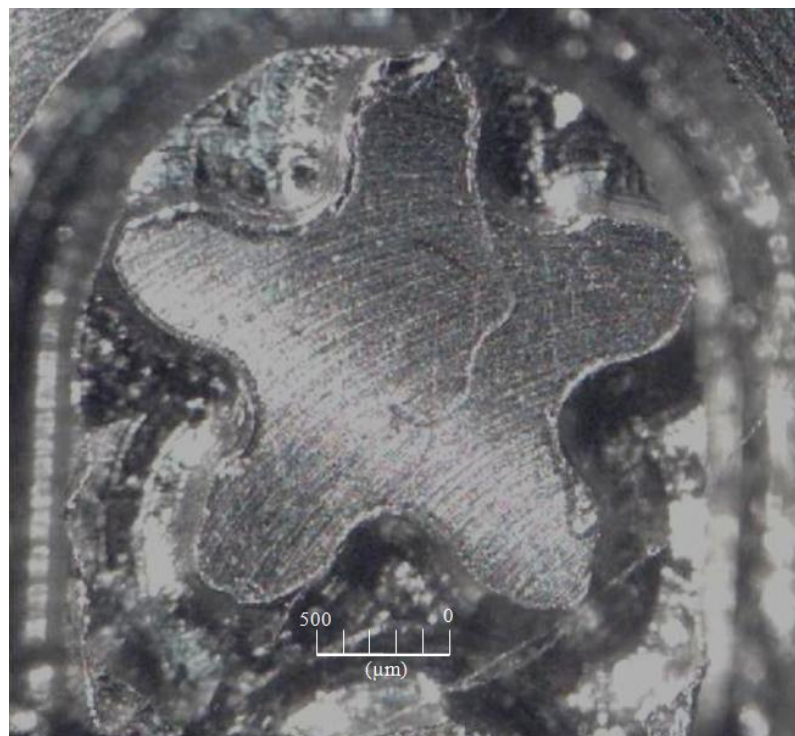
A figura 85 mostra a ponta da fresa em detalhe, após a execução da usinagem. Nota-se ali desgaste nas arestas de corte.

Após a usinagem o corpo de prova foi fotografado com um Olympus S261, (foto na Figura 86). Um detalhe que chama a atenção é a formação de rebarbas geradas logo no início

da usinagem (Figura 87 e figura 88). É perceptível no plano de fundo da usinagem um mecanismo de retirada do material que envolveu não só o corte, mas também o esmagamento do material, caracterizado pelo aspecto de escamas da superfície (Figura 89).

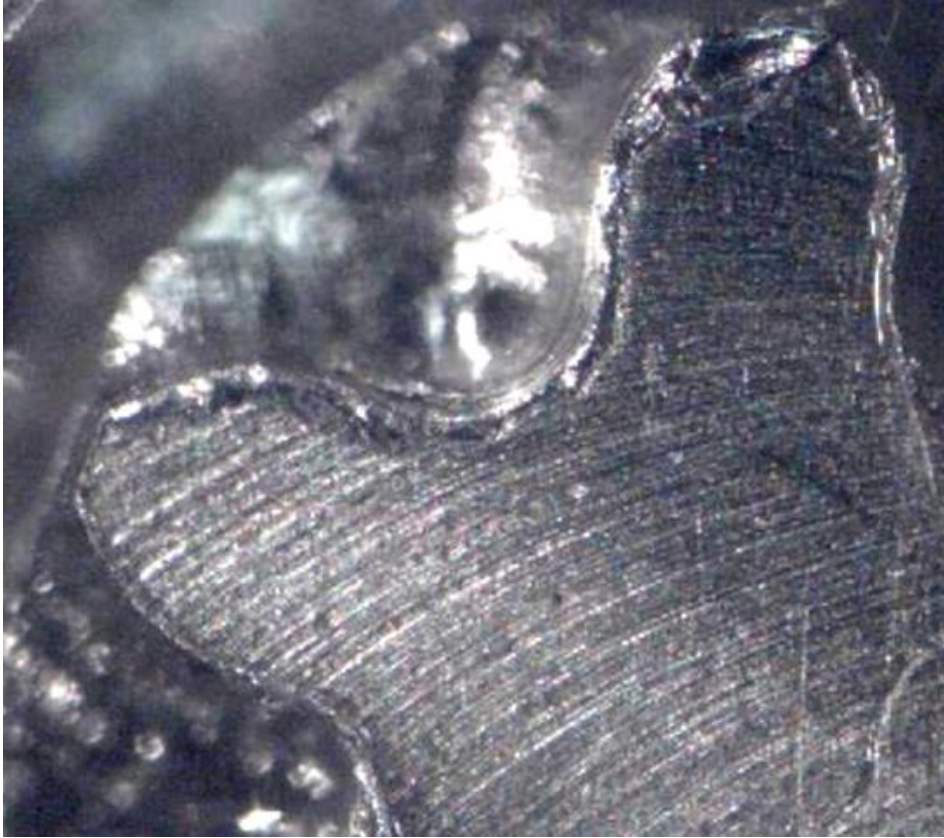


**Figura 85 - Detalhe da ponta da fresa, observar o desgaste das arestas.**

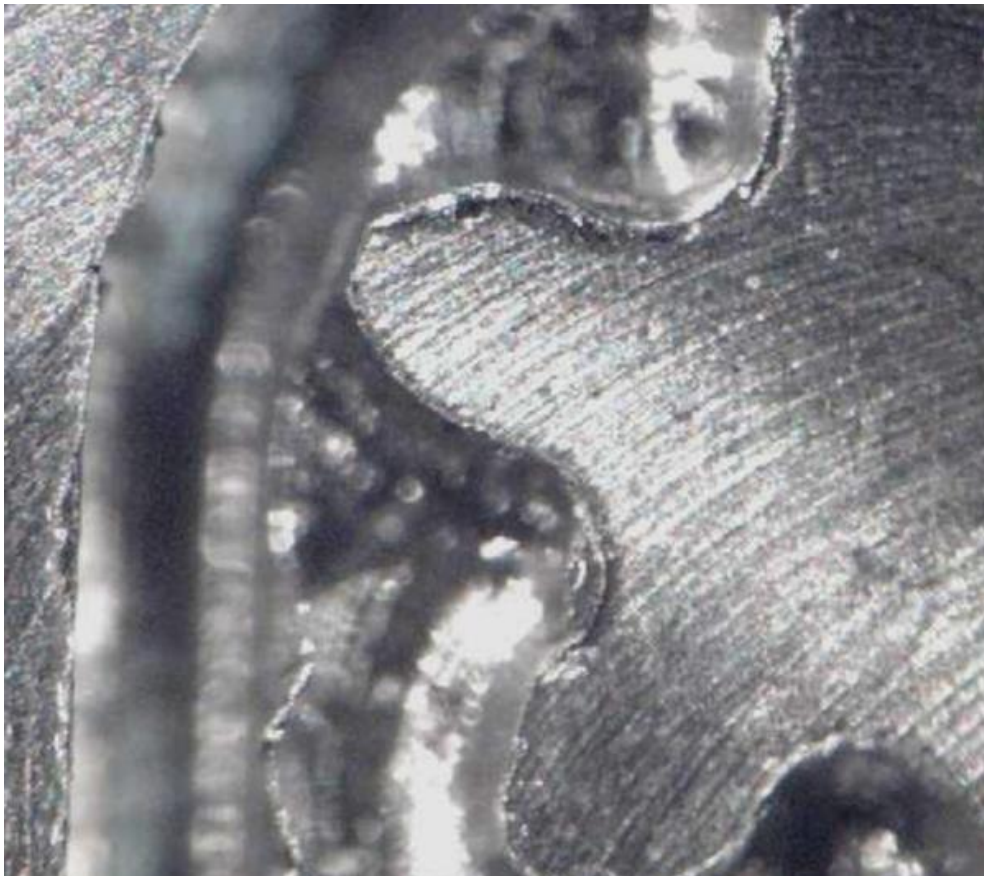


**Figura 86 - Peça usinada.**

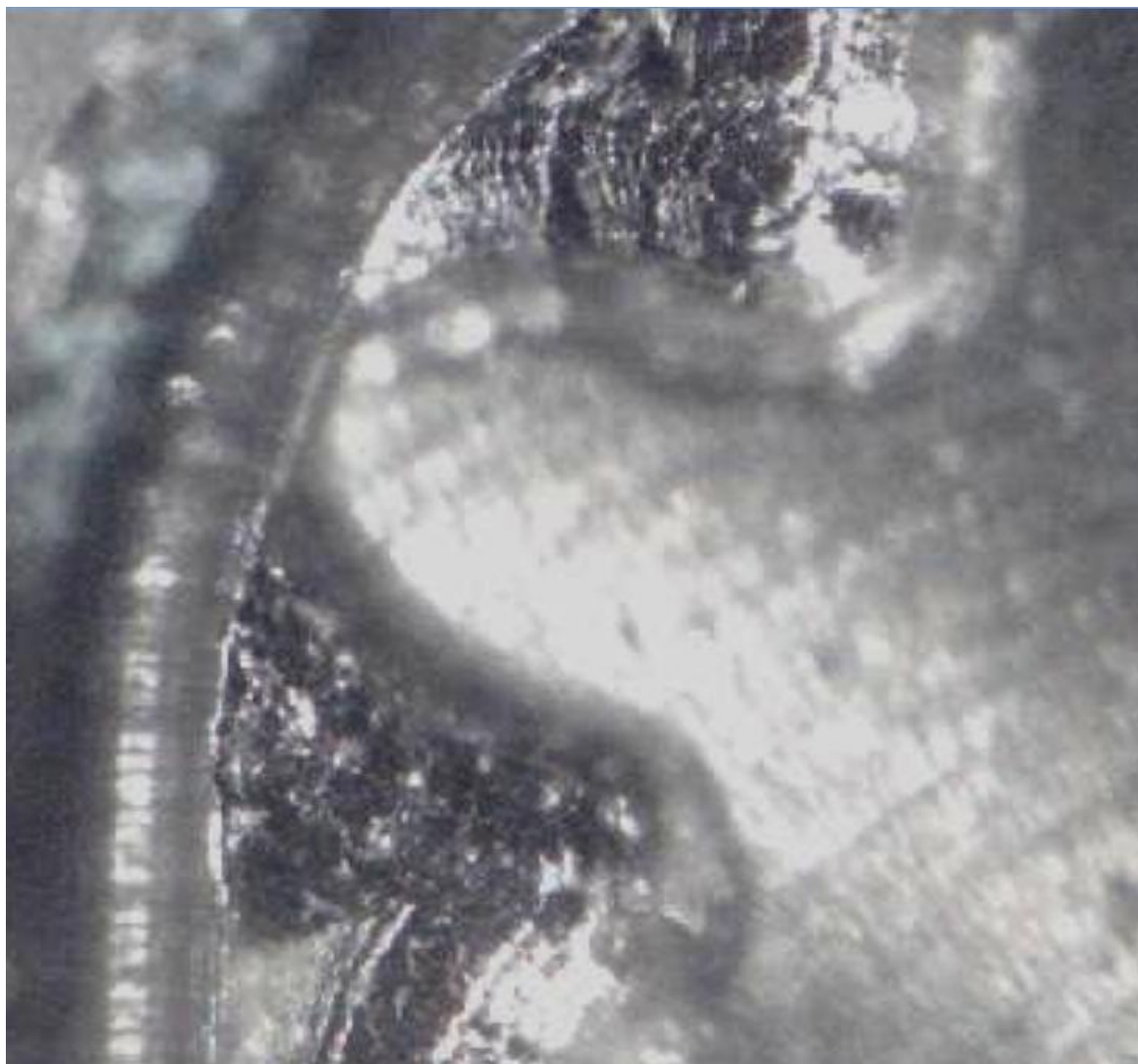




**Figura 87 - Detalhes da micro peça usinada.**



**Figura 88 - Detalhes da micro peça usinada.**

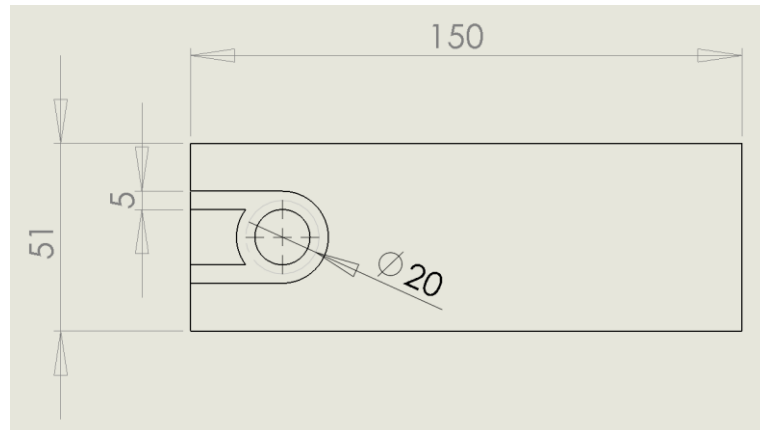


**Figura 89 - Detalhes do fundo do dente.**

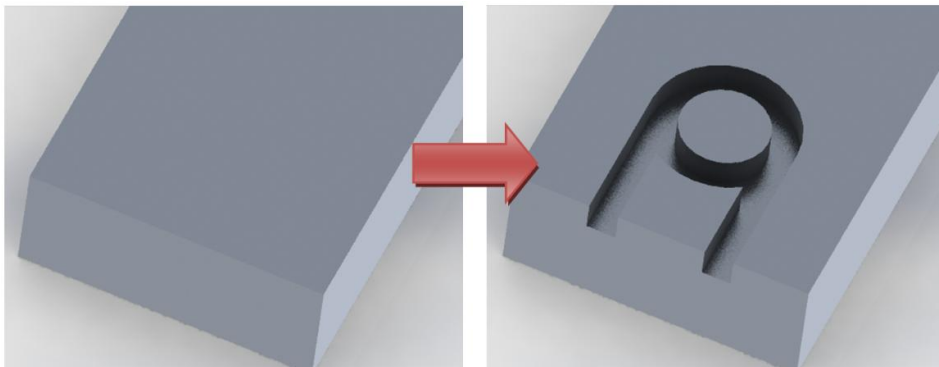
#### **9.4 Aplicação em telemanufatura**

A fim de se verificar o potencial do equipamento em operações de telemanufatura, foi montada uma estrutura composta pelo próprio computador utilizado para comando da máquina, uma vídeo câmera comum e programas baixados gratuitamente na internet. Para acesso e comando remoto do computador foi instalado o software TeamViewer®, que permite, perante senha que um computador remoto assuma o controle da máquina local. Para visualização das imagens foi utilizado o programa Labtec WebCam®.

A partir de uma máquina remota, o programa para execução de uma peça (Figura 90 e figura 91) foi gerado.

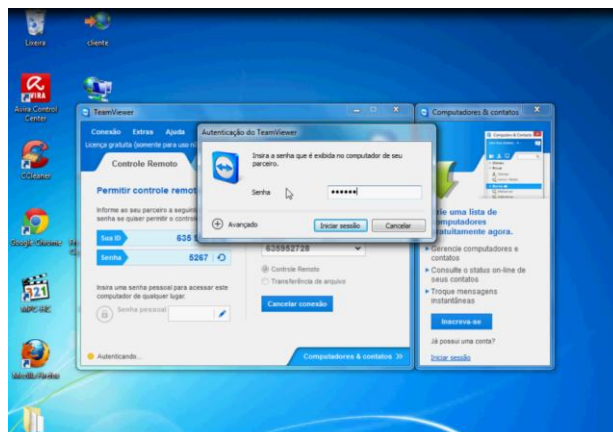


**Figura 90 - Detalhe a ser usinado na peça.**



**Figura 91 - Detalhe a ser usinado na peça, em perspectiva.**

A partir deste ponto o computador anexo à fresadora foi acessado e seu controle assumido pela máquina remota, via TeamViewer® (Figura 92). É necessário que este programa seja instalado nas duas máquinas, na “máquina mestre” e na “máquina serva”. A cada vez que o programa é iniciado na máquina serva é gerada uma nova senha, que deve ser digitada na máquina mestre para que esta tenha acesso e controle sobre a outra. Uma vez conectadas e feito o login o acesso é liberado.



**Figura 92 - Assumindo o controle da máquina anexa ao CNC, via TeamViewer®.**

O programa Mach3® foi então inicializado (Figura 93).

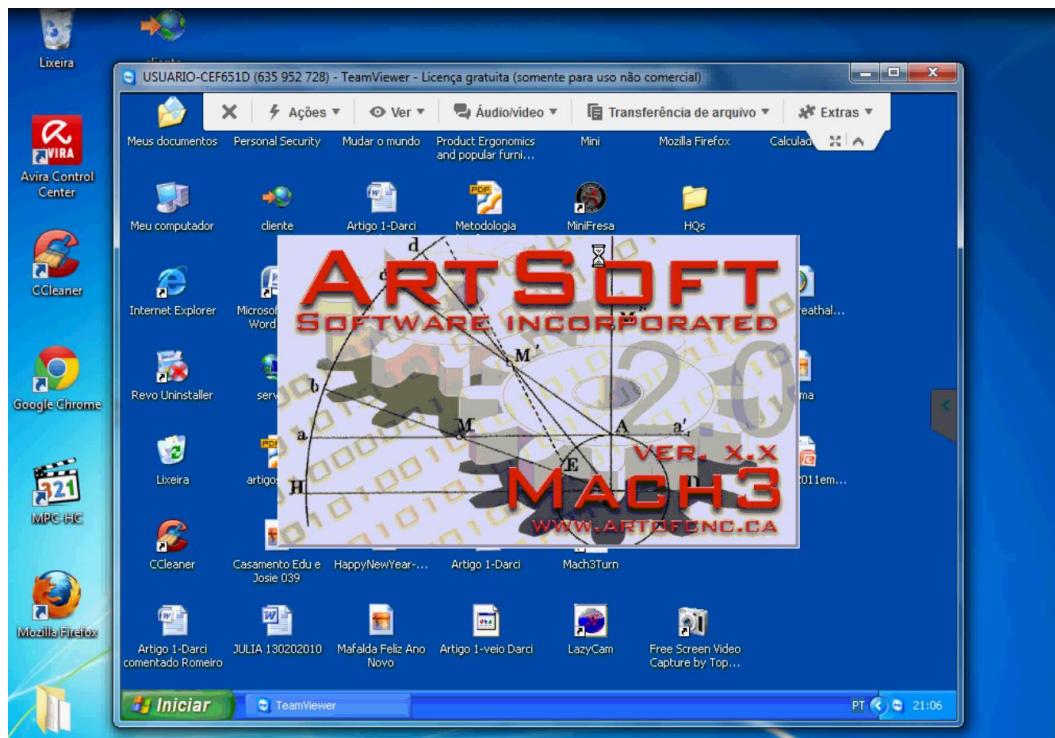


Figura 93 - Inicializando o Mach3® na máquina hospedeira.

O programa para execução da usinagem foi introduzido e visualizado graficamente no Mach3 (Figura 94).

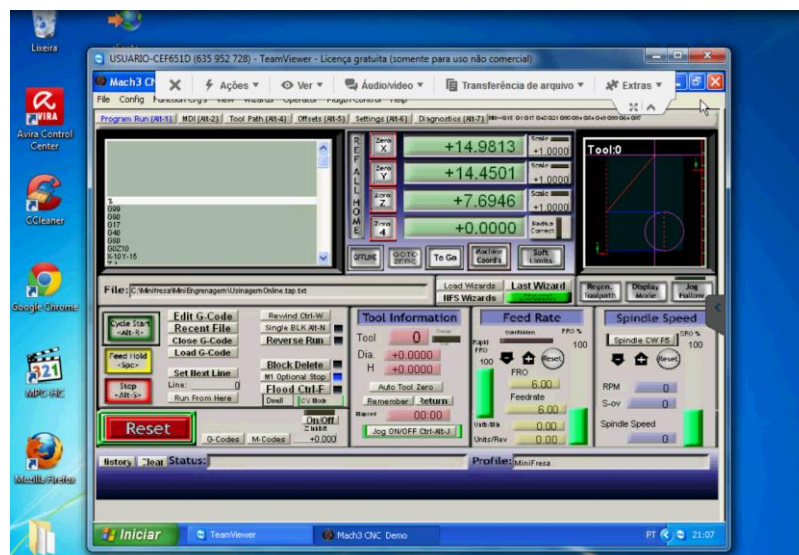
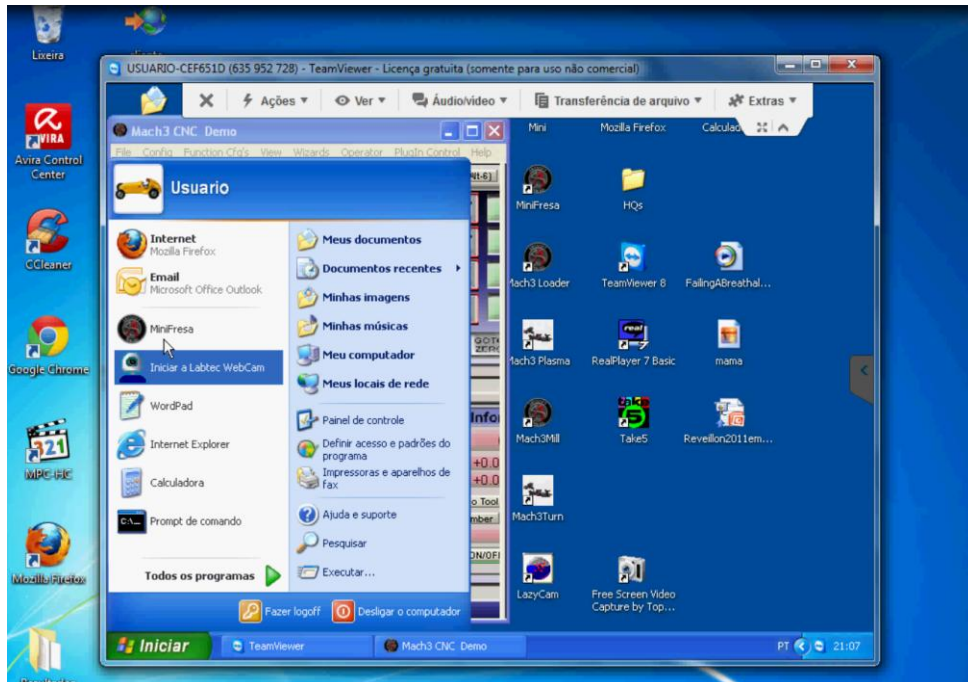


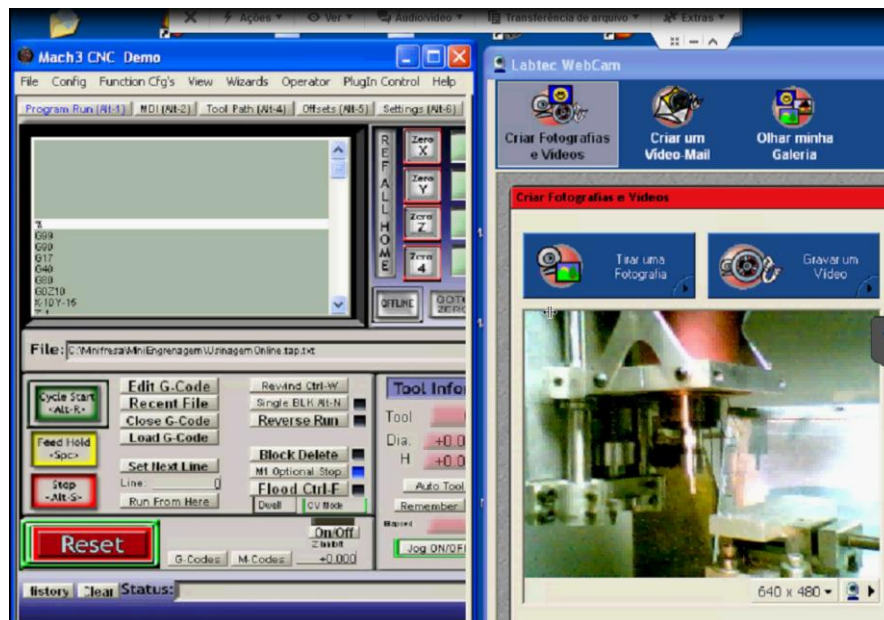
Figura 94 - Inserindo o programa para execução da usinagem a partir do computador-mestre.

As câmeras ativas para que se pudesse visualizar a operação remotamente (Figura 95).



**Figura 95 - Ativando a captura de imagens através da câmera.**

A figura 96 mostra o sistema pronto para início da operação, com a webcam ativada e programa carregado, pronto para início da operação de usinagem.



**Figura 96 - Webcam ativada. Sistema pronto para execução do programa de usinagem comandada e monitorada remotamente.**

O programa para execução da peça foi introduzido no Mach3® e os comandos necessários para a execução da peça foram realizados. A operação de usinagem foi completamente realizada a partir de um terminal remoto (Figura 97)

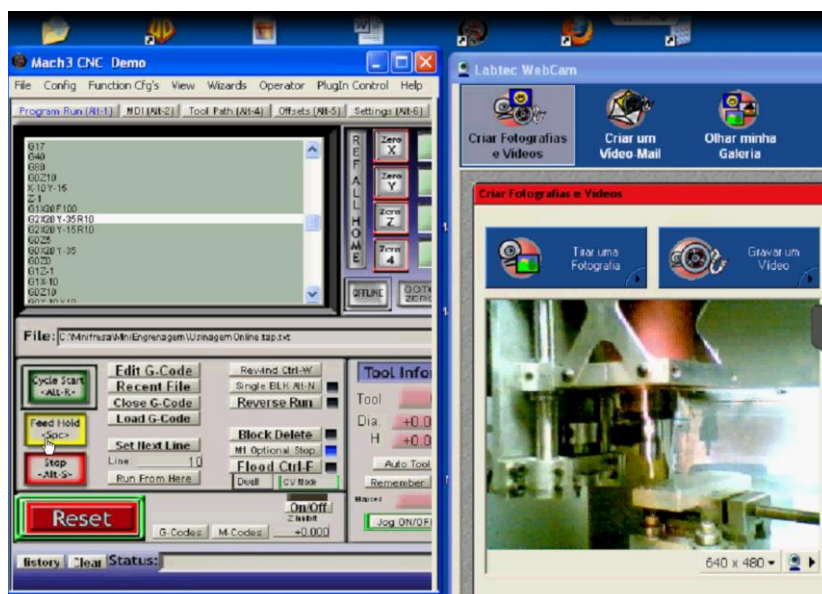


Figura 97 - Execução do programa de usinagem comandada e monitorada remotamente.

### 9.5 Análise de vibrações no concreto polimérico

Foi conduzido um experimento para avaliação da capacidade de amortecimento de vibrações da estrutura de concreto polimérico. Os testes foram realizados em um corpo de prova feito de concreto polimérico idêntico ao da estrutura da máquina e em um corpo de prova de mesmas dimensões e de alumínio. Os corpos de prova foram montados na configuração de uma viga em balanço (Figura 98).

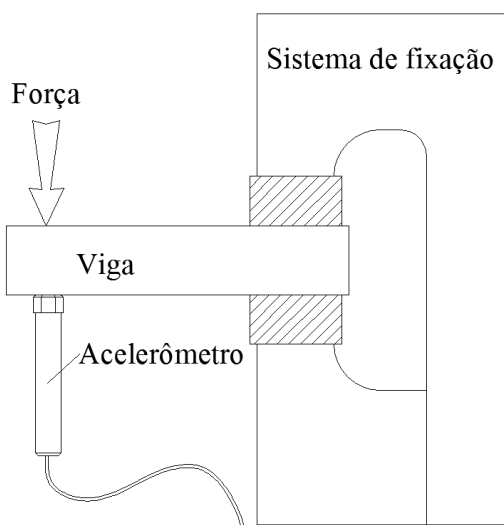


Figura 98 - Diagrama representativo do teste

As duas vigas foram submetidas a cargas de impacto de mesma magnitude e a resposta das vigas coletada via um acelerômetro ICP 623C01 SN447 conectado a um osciloscópio

Tektronix TDS 1001C-EDU. A unidade amplificadora do acelerômetro foi ajustada na unidade x10 e a escala do osciloscópio ajustada na escala vertical em 1 volt por divisão e na escala horizontal em 50 ms.

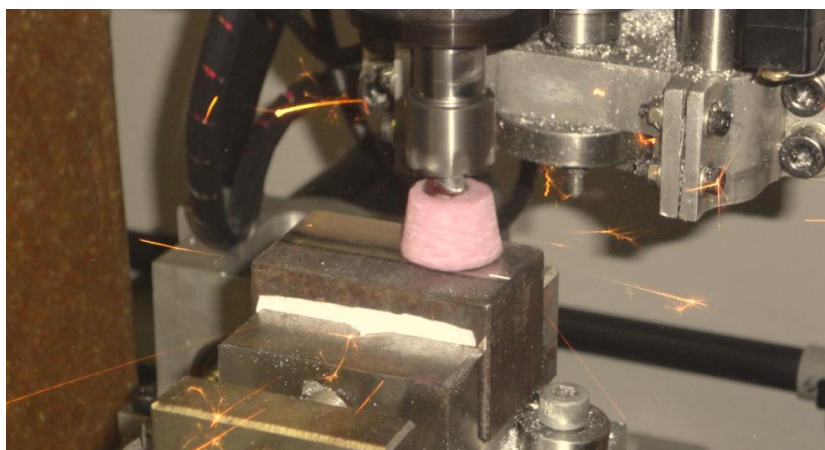
### 9.6 Aplicação em retífica

Foram conduzidos alguns experimentos a fim de se verificar o comportamento dinâmico e a rigidez da máquina com o uso do cabeçote de alta velocidade em operação de corte com material abrasivo. Foi feita uma operação com corte tangencial e rotação de 12 000 rpm (Figura 99).



**Figura 99 - Operação de retífica com corte tangencial**

Foi realizada também uma operação de retífica plana com rotação de 15 000 rpm (Figura 100).



**Figura 100 - Retífica plana**

Após a operação foi feita uma análise da superfície retificada. A rugosidade superficial foi medida com um rugosímetro Taylor Robson modelo Surtronic25 (Figura 101 ) e foi obtido o valor de rugosidade Ra igual a  $0,12 \mu\text{m}$



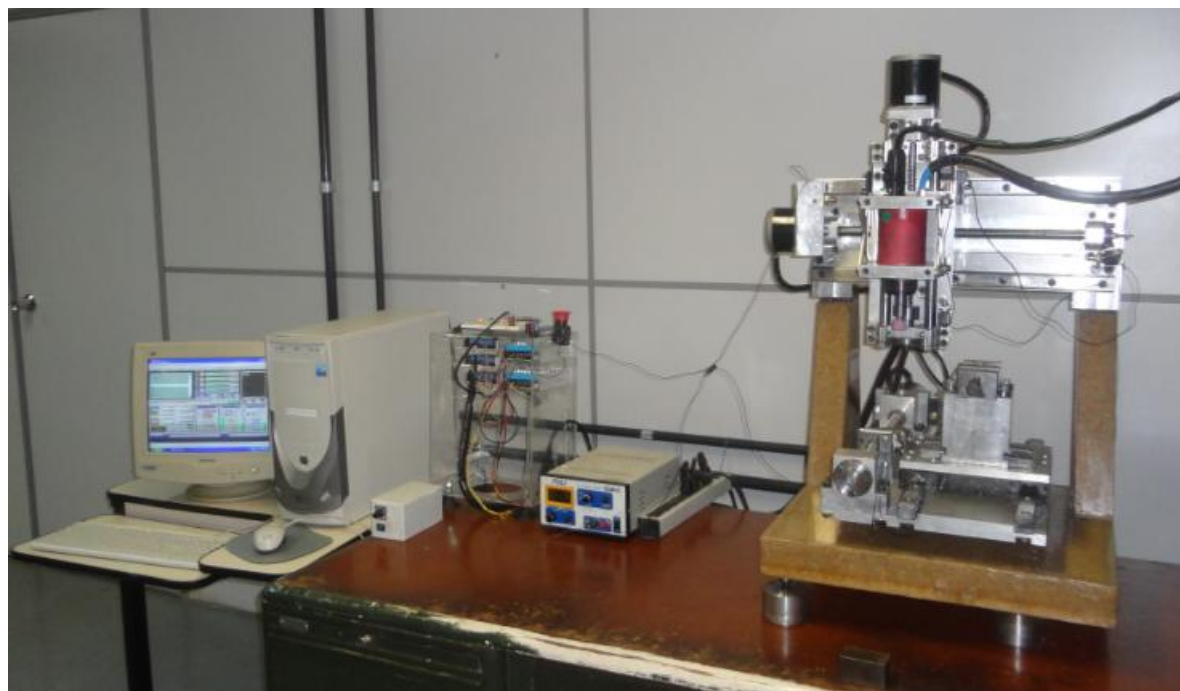
**Figura 101 - Medição da rugosidade superficial**



## 10 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 10.1 O equipamento

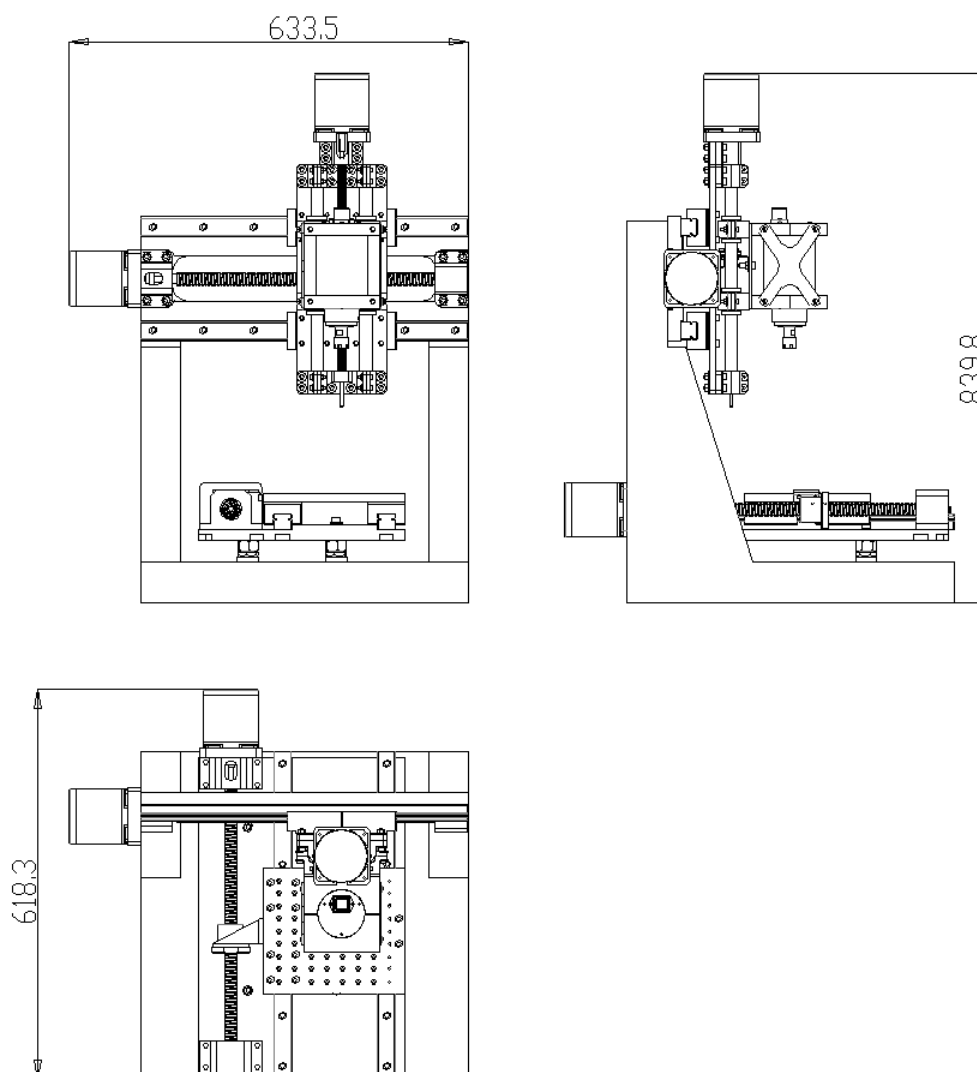
Foi construída uma fresadora CNC de precisão a baixo custo e com a aplicação de uma plataforma IBM-PC para sua automação (Figura 102).



**Figura 102 - Máquina construída anexa ao armário elétrico e PC.**

O equipamento possui curso de 300 mm no eixo X, 315 mm no eixo Y e 130 mm no eixo Z. O motor do eixo árvore com 0,9 kW com rotação máxima de 18 000 RPM, refrigerado a água. Estrutura em concreto polimérico. A plataforma CNC é composta por um computador IBM/PC com processador Pentium®D, 504 MB de RAM, e 80GB de HD, sistema operacional Windows® XP, e o programa Mach3®.

As principais medidas da máquina estão expostas na figura 103.



**Figura 103 - Principais dimensões de projeto (em mm)**

## 10.2 Teste de repetibilidade e precisão de posicionamento.

Os dados mostram que a precisão do eixo X foi a pior dos três eixos (os pontos obtidos são os mais dispersos), com os piores valores de desvio padrão. O fato do eixo Z, que possui fuso com rosca quadrada, apresentar melhores resultados que o do eixo X, que possui fuso de esferas recirculantes, pode ser em parte explicado pelo fato da histerese do eixo Z ser substancialmente reduzida pela atuação constante do peso do conjunto deste sobre o sistema porca e fuso, o que tende a anular qualquer folga mecânica. O eixo Y, com fusos de esferas recirculantes, apresentou uma precisão satisfatória, se considerarmos os recursos aplicados (o fuso é laminado e de classe C10, recomendada para transporte e não para posicionamento). Aqui, só a aplicação do recurso de mapeamento de erros de passo sozinha reduziria o erro da exatidão de posicionamento para 0,005 mm). Um outro fator que pode aumentar a precisão do

posicionamento é a reavaliação do projeto dos mancais de encosto (notadamente o sistema de ajuste da pré carga do rolamento axial). O projeto inicial da máquina não previa mancais de encosto e este recurso foi introduzido no sistema com um máximo aproveitamento das geometria existente dos componentes. Um remodelamento total do mancal permitirá um dimensionamento mais efetivo. Para o eixo Z, com fuso de rosca trapezoidal em aço e porca de bronze, a precisão foi equivalente aos demais eixos, mas a exatidão foi muito grande, com desvios em relação ao valor esperado de até 0,05 mm (o que já era esperado). Neste ponto, como foi citado anteriormente a aplicação do recurso de mapeamento de erros de passo também reduziria o erro de exatidão de posicionamento para 0,005 mm.

### **10.3 Usinagem de peças para conferência da geometria da máquina**

A medição da primeira peça por medidor tridimensional revelou uma retilidade média de 0,015 mm, e um desvio na perpendicularidade de  $0^{\circ}01'41''$ .

A usinagem da diagonal a  $45^{\circ}$  obteve erro de retilidade médio de 0,035 mm, com um erro médio de  $0^{\circ}2'53''$  na inclinação da reta.

Os resultados das medições em medidor tridimensional na segunda peça revelaram o seguinte:

- ✓ Retilidade média de 0,022 mm;
- ✓ desvio médio na perpendicularidade de  $0^{\circ}02'54''$ ;

A circunferência, num diâmetro de 13,7mm, apresentou erro de circularidade médio de 0,083 mm.

Embora estes resultados sejam insatisfatórios para uma máquina de precisão, foram considerados aceitáveis no atual estágio de desenvolvimento do equipamento, onde a máquina foi montada e os testes feitos, sem nenhuma readequação. Acredita-se que pelo menos parte dos desvios está relacionada com a interação entre o desvio de retilidade de 18  $\mu\text{m}$  das guias lineares e a precisão de usinagem de 10  $\mu\text{m}$  do eixo-árvore, ambos previstos pelos respectivos fabricantes.

### **10.4 Usinagem de micro componentes**

Fotos tiradas com auxílio de um microscópio revelaram a formação de rebarbas, as quais apontam para a ocorrência do esmagamento do material, que ocorre quando a usinagem não é feita com uma profundidade mínima necessária para que haja o corte. A ocorrência de

rebarbas na usinagem de micro peças se torna um sério empecilho, dada a impossibilidade de remoção, por processos economicamente viáveis, das mesmas sem danificar a peça usinada.

Detalhes do fundo do dente (Figura 89) revelam presença de vibração e macro processos de corte caracterizados pelo esmagamento do material, sem corte. A provável causa deste processo onde o corte do material deu lugar ao seu esmagamento pode ser primeiramente associado à perda da aresta de corte (claramente visualizado na foto da ferramenta após usinagem) mas, além deste fator, há a necessidade crescente de pesquisas para um melhor entendimento do mecanismo de formação do cavaco e da formação da superfície na micro usinagem, sendo necessário investigar o efeito na micro estrutura do material na formação do cavaco e nas forças de corte e a influência da relação entre o raio da ferramenta e a espessura mínima de corte. A investigação das rebarbas na parte superior apontam para a sua geração por uma profundidade de corte inadequada na micro usinagem, enquanto que as imperfeições no fundo do dente podem ser geradas por uma característica inerente ao fresamento em máquinas de três eixos, que é a pela velocidade de corte igual a zero no centro da ferramenta de corte esmagamento do material. Nota-se aqui a possibilidade de estudo da otimização de parâmetros para micro usinagem, a influência da mínima espessura de corte na qualidade dimensional, acabamento superior, redução de rebarbas, etc. Uma máquina com baixa razão tamanho do equipamento e tamanho da peça proporciona condições mais ideais para a realização deste tipo de pesquisa.

As usinagens ultra precisas e complexas micro partes não pode ser satisfeita por máquinas convencionais, uma vez que estão limitadas em sua precisão ou rigidez por um lado e na sua dinâmica por outro (BRECHER, et al., 2009). Um projeto compacto de máquina se traduz em inúmeras vantagens, como a redução da inércia do sistema, facilidade de construção, redução na exigência sobre motores e acionamentos, o que permite altas acelerações com uma maior precisão de posicionamento, com a redução de desvios dimensionais que, se por um lado são normais em máquinas em escala convencional, tornam-se inaceitáveis em escalas reduzidas.

## **10.5 Aplicação em telemanufatura**

O ensaio demonstra a possibilidade de uma operação remota, com relativa qualidade e uso de recursos baratos. Se o uso de recursos tão parcos permitiu tamanha flexibilidade, a pesquisa do uso de sistemas especializados e câmeras com melhor resolução pode abrir

muitas portas e aplicações industriais para a tecnologia. Um dos recursos necessários para uma aplicação séria da tecnologia seria a detecção de colisões, que monitoraria a geometria da máquina, da ferramenta e da peça e bloquearia os movimentos do equipamento, mesmo que comandos errôneos (manuais ou via programa) fossem implementados. Este sistema deve obrigatoriamente atuar “dentro” do CNC, ou entre este e a máquina operatriz, pois seria a última barreira entre comandos errôneos e resultados catastróficos, tendo em vista que uma colisão pode danificar irreversivelmente o eixo árvore, quebrar a ferramenta e inutilizar a matéria-prima da peça.

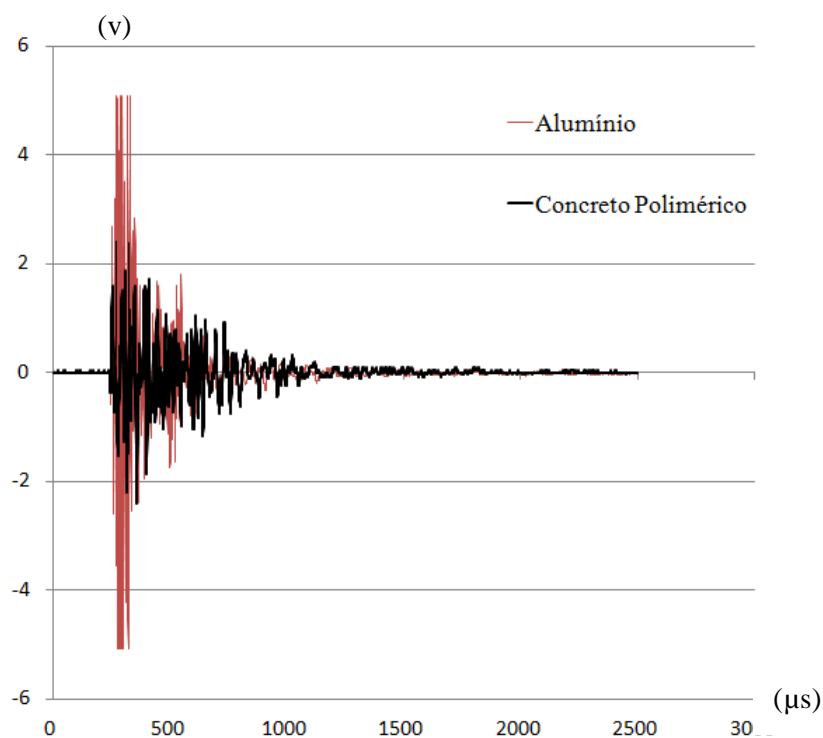
Um outro recurso indispensável para o prosseguimento desta linha de pesquisa é um sistema de segurança que realmente impossibilite o acesso de pessoas não autorizadas à operação da máquina. A disponibilidade de operação de um equipamento tão sensível por uma pessoa não autorizada, inabilitada ou com atitudes inconsequentes pode comprometer irreversivelmente o avanço de qualquer experimento e a integridade do equipamento.

Uma das principais dificuldades neste tipo de operação são os atrasos entre os comandos realizados no computador-mestre e os movimentos realizados na máquina-hospedeira e a visualização remota do resultado. A rede de alta velocidade da UFMG providenciou uma velocidade aceitável durante a operação. Um fato interessante observado: a princípio optou-se por um sistema independente de visualização da área de serviço (a webcam e o programa PersonalSecurity®), mas o atraso entre a visualização da imagem e o evento real foi insatisfatório (cerca de 1,5 segundos). Isto torna a operação incômoda e perigosa. Quando optou-se por abrir o software gerenciador da câmera no próprio desktop da máquina e visualizar a tela inteira remotamente pelo TeamViewew®, o resultado foi bem melhor, com um atraso quase imperceptível.

O experimento de operação remota permitiu acessar todas as funcionalidades do sistema com o uso de recursos não especializados, como uma webcam comum de baixa resolução e programas baixados gratuitamente na web. O maior obstáculo para o prosseguimento do ensaio, com os recursos inicialmente aplicados, foi a ausência de um sistema detector de colisões.

## 10.6 Análise de vibrações no concreto polimérico

O concreto polimérico aplicado na estrutura da máquina apresentou um comportamento superior, se comparado ao alumínio, com respeito ao amortecimento de vibrações. A figura 104 mostra os gráficos sobrepostos ilustrando o comportamento das duas vigas após estímulo.

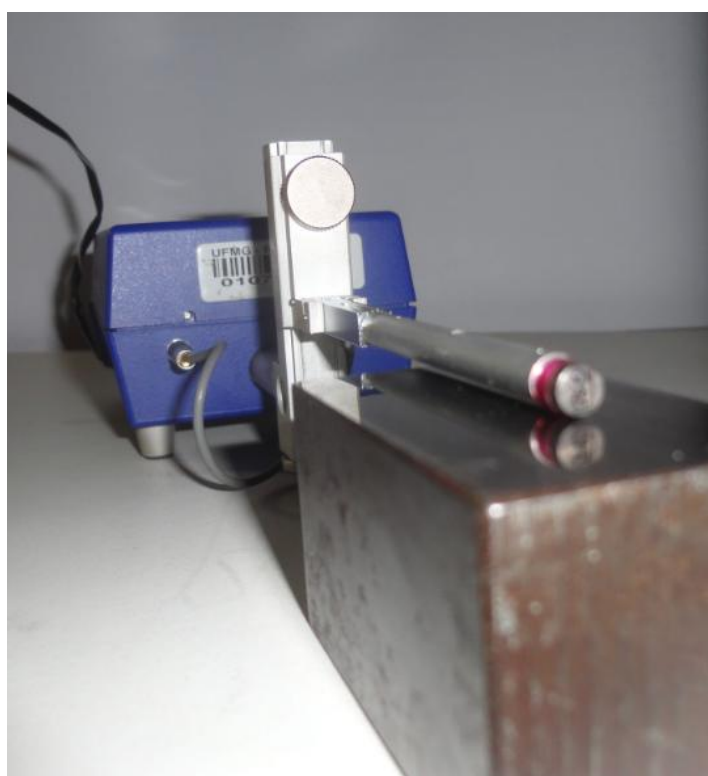


**Figura 104 – Resposta das vigas**

O concreto polimérico aplicado na estrutura da máquina apresentou uma menor amplitude de resposta e é possível observar perfeitamente a diferença no comportamento dos dois materiais. O alumínio apresenta uma amplitude inicial bem maior com valor máximo de pico igual a 5,08 V, enquanto que o concreto polimérico apresentou um valor máximo de pico igual a 1,88V. O tempo de estabilização para 10 % do sinal de pico do concreto polimérico foi de 754 μs, comparado ao tempo de 1119 μs do alumínio. Nota-se também a presença de batimento de frequência nos dois materiais, produzido por duas ou mais frequências de valores bem próximos. Embora o tempo para se chegar a valores reduzidos de vibração seja similar para os dois materiais, o concreto polimérico demonstrou uma maior capacidade de absorção das vibrações.

## 10.7 Aplicação em retífica

A operação com corte abrasivo exigiu muitos cuidados para a sua conclusão. Foi constatada uma tendência muito grande ao surgimento de vibrações, principalmente na retífica de face e após o rebolo entrar totalmente na peça. Após vários ajustes na rotação do rebolo, velocidade da mesa e profundidade de corte, a operação foi realizada e o resultado considerado satisfatório, com a obtenção de uma rugosidade Ra de  $0,12 \mu\text{m}$  e um certo grau de espelhamento da superfície sem necessidade de tratamento posterior (Figura 105).



**Figura 105 - Medição da rugosidade superficial**

A vibração pode ser atribuída principalmente ao fato do eixo Z utilizar um fuso com rosca quadrada e suas folgas inerentes. A solução deste problema requer, no mínimo, a instalação de um fuso de esferas recirculantes e um freio acoplado ao eixo e programado para entrar em ação sempre que o eixo cessar seu movimento. A substituição das guias lineares cilíndricas do eixo Z por guias similares àsquelas dos demais eixos finalizaria o pacote de providências necessárias para conferir ao equipamento a rigidez e estabilidade necessárias para a realização deste tipo de operação com eficiência e rapidez.

## 11 CONCLUSÕES

Com a conclusão deste estudo o Laboratório de Usinagem e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais passa a contar com uma fresadora CNC de pequeno porte totalmente funcional, com imensos potenciais didáticos. Os aspectos de sua construção podem ser aproveitados em disciplinas relacionadas à automação, projetos de máquinas e outras. O equipamento é uma plataforma onde inúmeras linhas de pesquisa podem ser aplicadas, com várias possibilidades de melhorias, frutos de pesquisas futuras.

Um dos objetivos do experimento foi a obtenção de uma máquina de precisão através do uso de componentes comerciais e de custo acessível, e a relação custo-benefício foi considerada satisfatória.

A concepção primária apresentou boa qualidade, sendo necessárias poucas modificações para a viabilidade do equipamento. Com a substituição dos rolamentos de contato angular dos fusos por um conjunto de rolamentos radiais blindados e um rolamento axial, espera-se reduzir as folgas axiais nos fusos de esferas recirculantes para, no máximo, 0,01 mm, além de eliminar a possibilidade de travamento dos rolamentos radiais devido a cavacos projetados. O aumento do diâmetro da sede dos parafusos de fixação das guias permitira o uso de ferramentas mais apropriadas na montagem e manutenção do conjunto. O oblongar dos furos de fixação das guias lineares adiciona um grau de liberdade facilitador da montagem. A adequação dos suportes das porcas de esferas recirculantes deverá eliminar a deformação elástica deste corpo, eliminando o erro de posicionamento dos eixos devido a este componente. Os tirantes de fixação da mesa do eixo Y eliminarão a necessidade de uso dos furos roscados das superfícies de referência, que ficaram completamente desalinhados e inviáveis. O equipamento é totalmente viável e todas as características definidas no levantamento de necessidades são totalmente viáveis.



## 12 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Várias melhorias podem ser feitas, para melhorar o desempenho do equipamento, dentre eles:

- ✓ Desenvolvimento e instalação de 4° e 5° eixos;
- ✓ implementar sistema em malha fechada;
- ✓ melhorar projeto eixo Z (aumentar fuso de esferas e aumentar curso útil, eliminando as potenciais interferências entre a peça e as guias do eixo X, existentes na configuração atual;
- ✓ alterar motorização e acionamentos para aumentar velocidade e aceleração da fresadora;
- ✓ construção de uma base apropriada, com maior massa e rigidez;
- ✓ alterar relação de transmissão motor/fuso de esferas. Atualmente o eixo do motor é conectado diretamente ao fuso numa relação 1:1 o que aumentará o torque e precisão de posicionamento;
- ✓ alterar armário elétrico, com cooler para acionamentos e espaço para inversor de frequência.

Vários trabalhos de pesquisa podem ser implementados a partir do equipamento, dentre eles:

- ✓ Implementação de um sistema detector de colisões;
- ✓ uso do equipamento na telemanufatura.

## REFERÊNCIAS

- ÁLVARES, Alberto José, et al. 2002. Um sistema de telemanufatura baseado na WEB orientado ao processo de oxicorte. Curitiba : XXII ENEGEP, 2002.
- ÁLVARES, Alberto José; SILVA, Fábio Benites F.; FERREIRA, João Carlos Espíndola. WebTurning: Teleoperação de Um Centro de Torneamento Via Internet. Brasília, Universidade Federal de Brasília 2006.
- Astrosyn International Technology Ltd . Astrosyn Y259/260 technical data. Disponível em <<http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/000/Y259.php>>, Acesso em: 20 de mar. de 2012.
- BRECHER, P., et al. 2009. Compact design for high precision machine tools. Aachen : Elsevier, 2009.
- BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vínicius de Almeida. Motor de Passo. Niterói , Universidade Federal Fluminense, 2008.
- Dileep C. C. - Department of Humanities & Science Fr. Conceicao Rodrigues College of Engineering. Disponível em : < <http://gyan.fragnel.ac.in/~dileep/stepperworking.pdf>>. Acessado em : 22 de 05 de 2013.
- DORNFELD, David; LEE, Dae-Eun. Precision manufacturing. LLC : Springer Science Business Media, 2008.
- Geckodrive Incorporation. G212 Instalation Notes. Tustin : Geckodrive Inc., 2008.
- Harnoy, Avraham. 2002. Bearing design in machinery: engineering tribology and lubrication. Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
- Herman, Stephen L. 2010. Industrial Motor Control - 6th edition. Clifton Park : Cengage Learning Products, 2010.
- IET Control Engineering Series. Stepping motors, a guide to theory and practice - 4th edition. London : IET, 2007.
- INDÚSTRIAS ROMI. Centros de Usinagem Vertical - Linha ROMI D. Santa Bárbara D'oeste : Indústrias ROMI Ltda., 2012.
- JOSHI, P. H.; Machine tools handbook – design and operation. McGraw-Hill, New Delhi, 2007
- KHURMI, R. S.; GUPTA, J. K. 2005. A textbook of machine design (S.I. Units). New Delhi : Eurasia Publishing House (PVT.) LTD., 2005.
- KIM, H.; JEONG, K.; LEE, D. I. Design and manufacture of a three-axis ultra-precision CNC grinding machine. Journal of Materials Processing Technology. Taejon, 1997.

LEE, Dai Gil, et al. 2004. Design and manufacture of composite high speed machine tool structures. Composites Science and Technology. 12 de Fevereiro de 2004, p. 8.

NSK MOTION & CONTROL. NSK Rolled ball screws and support units. s.l. : NSK Ltd, 2005.

NSK Motion & Control. Precision Machine Components. Tokyo, NSK Ltd, 2011.

NTN Corporation. Ball and roller bearings - Cat. No. 2202- IX/E. Osaka : NTN Corporation, 2009.

PANZERA, Túlio Hallak. Estudo do comportamento mecânico de um compósito particulado de matriz polimétrica (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia , 2003.

PIERSOL, Allan G.; PAEZ, Thomas L. Harris' shock and vibration handbook - 6th edition. New York : McGraw-Hill, 2010.

PIRATELLI FILHO, Antonio; LEVY NETO, Flamínio. Behavior of granite-epoxy composite beams subjected to mechanical vibrations. Materials Research. outubro de 2010.

RAHMAN, M., MANSUR, M. A.; LAU, S. H. Tool wear study in a lathe made of cementitious material. Elsevier - Journal of Materials Processing Technology. Singapore, 2001.

SAWADA, Kiyoshi; TAKEUCHI, Yoshimi; SATA, Toshio. Development of ultra precision machining center with closed-loop structure and its control. Annals of The CIRP. 1995, Vol. 44.

SHOJI, Aroldo Akira. Projeto e construção de um posicionador translativo para uma fresadora CNC de pequeno porte (Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica). Belo Horizonte , Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

STOETERAU, Rodrigo Lima. Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas. Florianópolis. Editora UFSC, 2004.

TECHDRIVES CORPORATION. Ruland oldham type shaft flexible couplings. Disponível em < [http://www.techdrives.co.uk/html/oldham\\_type\\_shaft\\_couplings.html](http://www.techdrives.co.uk/html/oldham_type_shaft_couplings.html)>, Acesso em: 15 de fev. de 2013.

TECMAF. Catálogo Motores e Cabeçotes de Alta Frequência. Santa Bárbara d'Oeste : TECMAF, 2011.

THK CORPORATION, Ltd. Caged ball lm guide (Catalog 235-13E),. Tokyo, THK Co, Ltd. 2007.

VENKATESH, V. C.; IZMAN, Sudin, Precision Engineering. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2007.

WANG, Z. G., et al. Design and development of a precision machine tool using counter motion mechanisms. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 50, 2010.

WEG MOTORES. Inversor de Frequência CFW-10 - Manual do Usuário. s.l. : WEG, 2012`

## ANEXOS

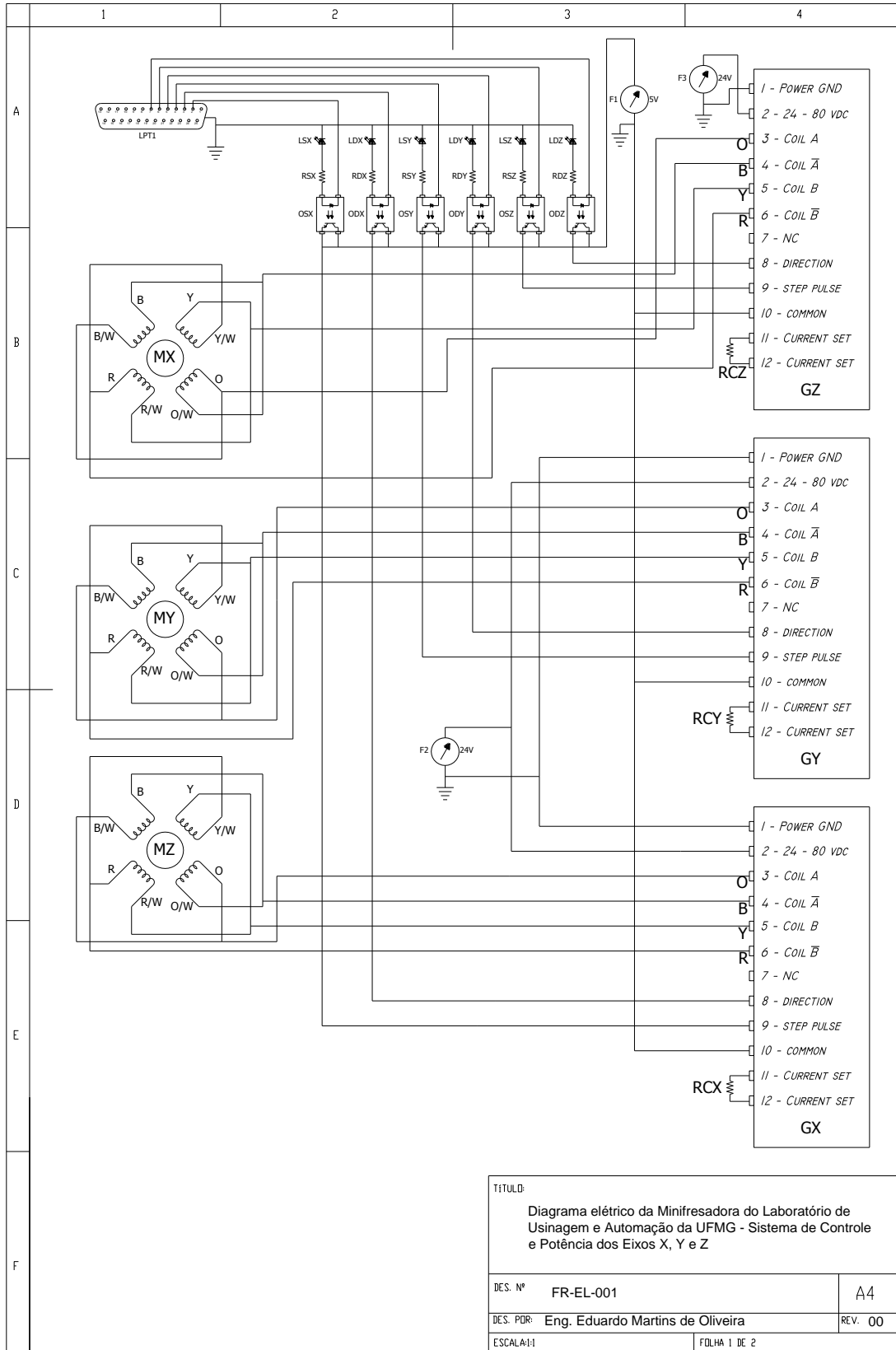
## ANEXO A – PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA WEG CFW10

Parâmetro	Função	Valor Ajustado	Unidade
100	Tempo de aceleração	5	s
101	Tempo de desaceleração	10	s
102	Tempo Aceleração - 2aRampa	5	s
103	Tempo Desaceleração - 2a Rampa 0.1	5	s
104	Rampa S	1	%
120	Backup da Referência Digital	1	-
121	Referência de Frequência pelas Teclas HMI	3.0	Hz
122	Referência JOG	5.0	Hz
124	Referência 1 Multispeed	3.0	Hz
125	Referência 2 Multispeed	10.0	Hz
126	Referência 3 Multispeed	20.0	Hz
127	Referência 4 Multispeed	30.0	Hz
128	Referência 5 Multispeed	40.0	Hz
129	Referência 6 Multispeed	50.0	Hz
130	Referência 7 Multispeed	60.0	Hz
131	Referência 8 Multispeed	66.0	Hz
133	Frequência Mínima	3.0	
134	Frequência Máxima	66.0	
136	Boost de Torque Manual (Compensação IxR)	20.0	%
137	Boost de Torque Automático (Compensação IxR Automática)	0.0	%
138	Compensação de Escorregamento	0.0	%
142	Tensão de Saída Máxima	100	%
145	Frequência de Início de Enfraquecimento de Campo	60.0	HZ
151	Nível de Atuação da Regulação da Tensão de Circuito Intermediário	430	V
156	Corrente de Sobrecarga do Motor		A
169	Corrente Máxima de Saída		A
202	Tipo de Controle	0	-
203	Seleção de Funções Especiais	0	-
204	Carrega Parâmetros com Padrão de Fábrica	0	-
206	P206 Tempo de Auto-Reset	0	s
208	Fator de Escala da Referência	0.4	-
219	Ponto de Início da Redução da Frequência de Chaveamento	15	Hz

**ANEXO A (CONTINUAÇÃO) - PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR DE  
FREQUÊNCIA WEG CFW10**

221	Seleção da Referência - Situação Local	0	-
222	Seleção da Referência - Situação Remoto	0	-
229	Seleção de Comandos - Situação Local	0	-
230	Seleção de Comandos - Situação Remoto	0	-
231	Seleção do Sentido de Giro - Situação Local e Remoto	0 = Horário 1 = Anti-horário	-
234	Ganho da Entrada Analógica AI1	100	%
235	Sinal da Entrada Analógica AI1	0	-
236	Offset da Entrada Analógica AI1	0	%
238	Ganho da Entrada (Potenciômetro HMI)	100	%
240	Offset da Entrada (Potenciômetro HMI)	0	%
248	Constante de Tempo do Filtro da Entrada Analógica (AI1)	200	ms
263	Função da Entrada Digital DI1	1	-
264	Função da Entrada Digital DI2	5	-
265	Função da Entrada Digital DI3	6	-
266	Função da Entrada Digital DI4	4	-
271	Ganho da Entrada em Frequência	200	%
277	Função da Saída a Relé RL1	7	-
288	Frequência Fx	3.0	Hz
290	Corrente Ix		A
297	Frequência de Chaveamento	5.0	kHz
300	Duração da Frenagem CC	0.0	s
301	Frequência de Início da Frenagem CC	1.0	Hz
302	Torque de Frenagem	50.0	%
520	Ganho proporcional PID	100	%
521	Ganho integral PID	100	%
522	Ganho diferencial PID	0	%
525	Setpoint via teclas Regulador PID	0	%
526	Filtro da Variável de Processo	0	%
527	Tipo de Ação do Regulador PID	0	-
528	Fator Escala Var. Proc.	100	%
536	Ajuste Automático de P525	0	-

**ANEXO B: DIAGRAMA ELÉTRICO DA FRESADORA (FOLHA 1 DE 2)**



## ANEXO B: DIAGRAMA ELÉTRICO DA FRESADORA (FOLHA 2 DE 2)

	1	2	3	4																																																																																																																			
A	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">Tabela dos Componentes</th> </tr> <tr> <th style="width: 5%;">Item</th> <th style="width: 10%;">Código</th> <th style="width: 55%;">Descrição</th> <th style="width: 30%;">Ref. Comercial</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>LSX</td> <td>Led verde, indicador do sinal de step do eixo X</td> <td>Led 3mm difuso verde</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>LDX</td> <td>Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X</td> <td>Led 3mm difuso vermelho</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>LSY</td> <td>Led verde, indicador do sinal de step do eixo X</td> <td>Led 3mm difuso verde</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>LDY</td> <td>Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X</td> <td>Led 3mm difuso vermelho</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>LSZ</td> <td>Led verde, indicador do sinal de step do eixo X</td> <td>Led 3mm difuso verde</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>LDZ</td> <td>Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X</td> <td>Led 3mm difuso vermelho</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>RSX</td> <td>Resistência limitadora de corrente do LSX</td> <td rowspan="6" style="text-align: center;">Resistor 100Ω, <math>\frac{1}{4}</math>W</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>RDX</td> <td>Resistência limitadora de corrente do LDX</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>RSY</td> <td>Resistência limitadora de corrente do LSY</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>RDY</td> <td>Resistência limitadora de corrente do LDY</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>RSZ</td> <td>Resistência limitadora de corrente do LSZ</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>RDZ</td> <td>Resistência limitadora de corrente do LDZ</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>OSX</td> <td>Optoacoplador do sinal de step eixo X</td> <td rowspan="6" style="text-align: center;">TLP521-1</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>ODX</td> <td>Optoacoplador do sinal de direção eixo X</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>OSY</td> <td>Optoacoplador do sinal de step eixo Y</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>ODY</td> <td>Optoacoplador do sinal de direção eixo y</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>OSZ</td> <td>Optoacoplador do sinal de step eixo Z</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>ODZ</td> <td>Optoacoplador do sinal de direção eixo z</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>GX</td> <td>Acionamento do motor do eixo X</td> <td rowspan="3" style="text-align: center;">Geckodrive G212 Microstep Drive</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>GY</td> <td>Acionamento do motor do eixo Y</td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>GZ</td> <td>Acionamento do motor do eixo Z</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>MX</td> <td>Motor de passo do eixo X</td> <td rowspan="3" style="text-align: center;">Astrosyn Y259</td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>MY</td> <td>Motor de passo do eixo Y</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>MZ</td> <td>Motor de passo do eixo Z</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>F1</td> <td>Fonte 5V alimentação do sinal de comando dos acionamentos</td> <td>Fonte 5V CC, 100W, entrada 127/220V CA</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>F2</td> <td>Fonte chaveada de 12 V e 4,16A para eixos X e Y</td> <td rowspan="2" style="text-align: center;">PSK8 - P/N: PMC24V100W1AA</td> </tr> <tr> <td>27</td> <td>F3</td> <td>Fonte chaveada de 12 V e 4,16A para eixo Z</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>RCX</td> <td>Resistor limitador de corrente do motor do eixo X</td> <td rowspan="3" style="text-align: center;">Resistor 28 kΩ, <math>\frac{1}{4}</math>W</td> </tr> <tr> <td>29</td> <td>RCY</td> <td>Resistor limitador de corrente do motor do eixo Y</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>RCZ</td> <td>Resistor limitador de corrente do motor do eixo Z</td> </tr> <tr> <td>31</td> <td>LPT1</td> <td>Porta paralela do PC</td> <td style="text-align: center;">-</td> </tr> </tbody> </table>				Tabela dos Componentes				Item	Código	Descrição	Ref. Comercial	1	LSX	Led verde, indicador do sinal de step do eixo X	Led 3mm difuso verde	2	LDX	Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X	Led 3mm difuso vermelho	3	LSY	Led verde, indicador do sinal de step do eixo X	Led 3mm difuso verde	4	LDY	Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X	Led 3mm difuso vermelho	5	LSZ	Led verde, indicador do sinal de step do eixo X	Led 3mm difuso verde	6	LDZ	Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X	Led 3mm difuso vermelho	7	RSX	Resistência limitadora de corrente do LSX	Resistor 100Ω, $\frac{1}{4}$ W	8	RDX	Resistência limitadora de corrente do LDX	9	RSY	Resistência limitadora de corrente do LSY	10	RDY	Resistência limitadora de corrente do LDY	11	RSZ	Resistência limitadora de corrente do LSZ	12	RDZ	Resistência limitadora de corrente do LDZ	13	OSX	Optoacoplador do sinal de step eixo X	TLP521-1	14	ODX	Optoacoplador do sinal de direção eixo X	15	OSY	Optoacoplador do sinal de step eixo Y	16	ODY	Optoacoplador do sinal de direção eixo y	17	OSZ	Optoacoplador do sinal de step eixo Z	18	ODZ	Optoacoplador do sinal de direção eixo z	19	GX	Acionamento do motor do eixo X	Geckodrive G212 Microstep Drive	20	GY	Acionamento do motor do eixo Y	21	GZ	Acionamento do motor do eixo Z	22	MX	Motor de passo do eixo X	Astrosyn Y259	23	MY	Motor de passo do eixo Y	24	MZ	Motor de passo do eixo Z	25	F1	Fonte 5V alimentação do sinal de comando dos acionamentos	Fonte 5V CC, 100W, entrada 127/220V CA	26	F2	Fonte chaveada de 12 V e 4,16A para eixos X e Y	PSK8 - P/N: PMC24V100W1AA	27	F3	Fonte chaveada de 12 V e 4,16A para eixo Z	28	RCX	Resistor limitador de corrente do motor do eixo X	Resistor 28 kΩ, $\frac{1}{4}$ W	29	RCY	Resistor limitador de corrente do motor do eixo Y	30	RCZ	Resistor limitador de corrente do motor do eixo Z	31	LPT1	Porta paralela do PC	-
Tabela dos Componentes																																																																																																																							
Item	Código	Descrição	Ref. Comercial																																																																																																																				
1	LSX	Led verde, indicador do sinal de step do eixo X	Led 3mm difuso verde																																																																																																																				
2	LDX	Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X	Led 3mm difuso vermelho																																																																																																																				
3	LSY	Led verde, indicador do sinal de step do eixo X	Led 3mm difuso verde																																																																																																																				
4	LDY	Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X	Led 3mm difuso vermelho																																																																																																																				
5	LSZ	Led verde, indicador do sinal de step do eixo X	Led 3mm difuso verde																																																																																																																				
6	LDZ	Led vermelho, indicador do sinal de direção do eixo X	Led 3mm difuso vermelho																																																																																																																				
7	RSX	Resistência limitadora de corrente do LSX	Resistor 100Ω, $\frac{1}{4}$ W																																																																																																																				
8	RDX	Resistência limitadora de corrente do LDX																																																																																																																					
9	RSY	Resistência limitadora de corrente do LSY																																																																																																																					
10	RDY	Resistência limitadora de corrente do LDY																																																																																																																					
11	RSZ	Resistência limitadora de corrente do LSZ																																																																																																																					
12	RDZ	Resistência limitadora de corrente do LDZ																																																																																																																					
13	OSX	Optoacoplador do sinal de step eixo X	TLP521-1																																																																																																																				
14	ODX	Optoacoplador do sinal de direção eixo X																																																																																																																					
15	OSY	Optoacoplador do sinal de step eixo Y																																																																																																																					
16	ODY	Optoacoplador do sinal de direção eixo y																																																																																																																					
17	OSZ	Optoacoplador do sinal de step eixo Z																																																																																																																					
18	ODZ	Optoacoplador do sinal de direção eixo z																																																																																																																					
19	GX	Acionamento do motor do eixo X	Geckodrive G212 Microstep Drive																																																																																																																				
20	GY	Acionamento do motor do eixo Y																																																																																																																					
21	GZ	Acionamento do motor do eixo Z																																																																																																																					
22	MX	Motor de passo do eixo X	Astrosyn Y259																																																																																																																				
23	MY	Motor de passo do eixo Y																																																																																																																					
24	MZ	Motor de passo do eixo Z																																																																																																																					
25	F1	Fonte 5V alimentação do sinal de comando dos acionamentos	Fonte 5V CC, 100W, entrada 127/220V CA																																																																																																																				
26	F2	Fonte chaveada de 12 V e 4,16A para eixos X e Y	PSK8 - P/N: PMC24V100W1AA																																																																																																																				
27	F3	Fonte chaveada de 12 V e 4,16A para eixo Z																																																																																																																					
28	RCX	Resistor limitador de corrente do motor do eixo X	Resistor 28 kΩ, $\frac{1}{4}$ W																																																																																																																				
29	RCY	Resistor limitador de corrente do motor do eixo Y																																																																																																																					
30	RCZ	Resistor limitador de corrente do motor do eixo Z																																																																																																																					
31	LPT1	Porta paralela do PC	-																																																																																																																				
B																																																																																																																							
C																																																																																																																							
D																																																																																																																							
E																																																																																																																							
F	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="padding: 5px;">TÍTULO:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 5px;">Diagrama elétrico da Minifresadora do Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG - Sistema de Controle e Potência dos Eixos X, Y e Z</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">DES. Nº</td> <td style="padding: 5px;">FR-EL-001</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">DES. POR:</td> <td style="padding: 5px;">Eng. Eduardo Martins de Oliveira</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">ESCALA:1:1</td> <td style="padding: 5px;">FOLHA 2 DE 2</td> </tr> </table>				TÍTULO:		Diagrama elétrico da Minifresadora do Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG - Sistema de Controle e Potência dos Eixos X, Y e Z		DES. Nº	FR-EL-001	DES. POR:	Eng. Eduardo Martins de Oliveira	ESCALA:1:1	FOLHA 2 DE 2																																																																																																									
TÍTULO:																																																																																																																							
Diagrama elétrico da Minifresadora do Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG - Sistema de Controle e Potência dos Eixos X, Y e Z																																																																																																																							
DES. Nº	FR-EL-001																																																																																																																						
DES. POR:	Eng. Eduardo Martins de Oliveira																																																																																																																						
ESCALA:1:1	FOLHA 2 DE 2																																																																																																																						



**ANEXO C – PROGRAMA UTILIZADO PARA TESTE DE REPETIBILIDADE NO EIXO X.**

G40 ; (CANCELA COMPENSAÇÃO DO RAI0 DA FERRAMENTA)  
G50 ; (AJUSTA OS FATORES DE ESCALA DOS EIXOS PARA 1,0)  
G21 ; (COORDENADAS EM MM)  
G17 ; (SELEÇÃO DO PLANO XY)  
G90; (COORDENADAS ABSOLUTAS)  
G94;(AVANÇO EM UNIDADES POR MINUTO)

G0 X-1 Y0 Z0 ; (POSICIONAMENTO RÁPIDO)  
G1 X0 ; (POSICIONAMENTO EM X=0, SENTIDO POSITIVO)  
G4 P2 ; (TEMPO DE ESPERA)  
G0 X4.  
G1 X5. ; (POSICIONAMENTO EM X=5, SENTIDO POSITIVO)  
G4 P2.

G0 X9  
G1 X10. ; (POSICIONAMENTO EM X=10, SENTIDO POSITIVO)  
G4 P2.

G0 X14.  
G1 X15. ; (POSICIONAMENTO EM X=15, SENTIDO POSITIVO)  
G4 P2.

G0 X19.  
G1 X20. ; (POSICIONAMENTO EM X=20, SENTIDO POSITIVO)  
G4 P2.

G0 X21.  
G1 X20. ; (POSICIONAMENTO EM X=20, SENTIDO NEGATIVO)  
G4 P2.

G0 X16.  
G1 X15. ; (POSICIONAMENTO EM X=15, SENTIDO NEGATIVO)  
G4 P2.

G0 X11.  
G1 X10. ; (POSICIONAMENTO EM X=10, SENTIDO NEGATIVO)  
G4 P2.

G0 X6.  
G1 X5. ; (POSICIONAMENTO EM X=5, SENTIDO NEGATIVO)  
G4 P2.

G0 X1.  
G1 X0. ; (POSICIONAMENTO EM X=0, SENTIDO NEGATIVO)  
G4 P2.  
M30