



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**“DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO MECÂNICO
COM CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO PARA
PRODUÇÃO DE PROTÓTIPOS EM ESCALA”**

RICARDO CÉSAR ALVES SILVEIRA

Belo Horizonte, 04 de abril de 2007

Ricardo César Alves Silveira

**“DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO MECÂNICO
COM CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO PARA
PRODUÇÃO DE PROTÓTIPOS EM ESCALA”**

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

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Antônio Eustáquio de Melo Pertence

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Abril de 2007



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – 31.270-901 – Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 – Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**“DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO MECÂNICO
COM CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO PARA
PRODUÇÃO DE PROTÓTIPOS EM ESCALA”**

RICARDO CÉSAR ALVES SILVEIRA

Dissertação defendida e aprovada em (dia), de (mês) de 2007, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**”, na área de concentração de “**Projeto Mecânico**”.

Prof. Dr. Antônio Eustáquio de Melo Pertence – UFMG - Orientador

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão – UFMG - Examinador

Prof. Dr. Danilo Amaral – UFMG - Examinador

Prof. Dr. Eduardo Romeiro Filho – UFMG - Examinador

A Deus e à minha família

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família, pelo apoio imprescindível em todos os momentos.

A minha esposa, pela paciência, compreensão, apoio e amor dedicado durante todos os momentos da nossa vida.

Ao meu Professor e Orientador Antônio Eustáquio de Melo Pertence, por todos os ensinamentos, sugestões e amizade durante o desenvolvimento desse trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Projetos Mecânicos, em especial ao José Renato.

Ao Roberto - Usinex Ltda., pelas sugestões e apoio.

Meus sinceros agradecimentos.

“Acredito que o objetivo da nossa vida seja a busca da felicidade. Isso está claro. Quer se acredite em religião ou não, quer se acredite nesta religião ou naquela, todos nós buscamos algo melhor na vida. Portanto, acho que a motivação da nossa vida é a felicidade.”

Dalai Lama *in* A Arte da Felicidade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
NOMENCLATURA.....	17
RESUMO	20
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Uso de Protótipos	23
2.2 Uso de softwares na automação.....	33
2.3 Máquinas-Ferramentas	37
2.3.1 Introdução.....	37
2.3.2 Principais máquinas-ferramentas.....	39
2.3.2.2 Máquinas que utilizam ferramentas com arestas cortantes múltiplas.....	40
2.3.2.3 Máquinas em que o movimento de corte é circular.....	42
2.3.2.4 Máquinas que trabalham com ferramentas abrasivas	44
2.4 História do CNC	45
2.4.1 Os primórdios das máquinas ferramentas.....	45
2.4.2 O desenvolvimento dos primeiros controles	45
2.4.3 O desenvolvimento dos computadores	46
2.4.4 O aparecimento e aperfeiçoamento dos Controles Numéricos.....	47
2.4.5 A padronização	48
2.4.6 As máquinas CNC no Brasil.....	49
2.5 Benefícios do uso de máquinas ferramentas CNC	49
2.6 Fundamentos dos Comandos Numéricos	51
2.6.1 Introdução.....	51
2.6.2 O Controle dos Movimentos	52
2.6.3 O Sistema de eixos coordenados	53
2.6.4 Programação CNC.....	55
2.7 Principais componentes de uma máquina CNC	57
2.7.1 Fusos.....	57
2.7.2 Guias lineares	58
2.7.3 Comando ou Controle Numérico.....	59
2.7.4 Motor a passo	60
2.7.5 Sistemas de eixos.....	61
2.8 Forças e potências de usinagem.....	63
2.8.1 Forças durante a usinagem	63
2.8.2 Força de Corte	64
2.8.2.1 Pressão específica de corte	64
2.8.3 Potências de usinagem.....	65

2.8.3.3 Relação entre as potências de corte e de avanço	66
2.8.3.4 Potência do motor	67
2.8.4 Fresamento	68
2.8.4.1 Cálculo da potência de corte.....	68
2.8.4.2 Cálculo da espessura média de corte	69
2.9 Dimensionamento de elementos mecânicos.....	70
2.9.1 Parafuso de rosca quadrada	70
2.9.2 Parafuso de rosca trapezoidal ou triangular.....	72
2.9.3 Dimensionamento estático da rosca de movimento	73
2.9.4 Dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	74
2.9.4.1 Critério de desgaste	74
2.9.4.2 Critério de resistência	76
2.10 Dimensionamento de barras submetidas a carregamento transversal	77
3 METODOLOGIA.....	80
3.1 Introdução.....	80
3.2 Configuração	81
3.2.1 Definição do volume disponível.....	81
3.2.2 Definição do sistema de controle numérico	82
3.2.3 Acionamento da ferramenta de corte.....	84
3.2.4 Configuração inicial	85
3.2.5 Cabeçote de movimentação da ferramenta.....	88
3.3 Desenvolvimento	90
3.3.1 Desenvolvimento da mesa.....	91
3.3.2 Desenvolvimento do cabeçote.....	93
3.3.2.1 Suporte da micro-retífica e mecanismo de rotação no eixo C.....	93
3.3.2.2 Mecanismo de rotação do suporte da micro-retífica no eixo B.....	94
3.3.2.3 Estrutura do cabeçote de movimentação	96
3.3.3 Desenvolvimento da estrutura lateral	98
3.3.4 Desenvolvimento dos mancais para as guias circulares	99
3.3.5 Desenvolvimento dos fusos.....	100
3.3.6 Desenvolvimento dos mancais dos fusos de translação	101
3.3.7 Desenvolvimento do conjunto mancal porca.....	103
3.3.8 Desenvolvimento da estrutura inferior suporte do conjunto de porcas	104
3.3.9 Alterações realizadas no equipamento	105
3.3.9.1 Desenvolvimento das guias laterais.....	107
3.3.9.2 Desenvolvimento dos redutores de velocidade	109
3.3.9.3 Desenvolvimento do suporte para transporte da fresadora.....	111
3.3.9.4 Desenvolvimento do mancal guia do eixo de movimentação Z.....	112
3.3.9.5 Desenvolvimento da chapa de acionamento do fim de curso.....	112
3.3.9.6 Introdução dos fins de curso.....	113
3.4 Desenvolvimento final.....	115

3.5 Verificação dimensional da fresadora	116
3.5.1 Verificação da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa	116
3.5.2 Verificação da variação entre a posição numérica indicada no comando e a posição física atingida pelo equipamento nas direções X, Y e Z.	116
3.6 Construção de protótipos	119
3.6.1 Protótipo logomarca	120
3.6.2 Protótipo peça 3D	122
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	124
4.1 A fresadora	124
4.2 Avaliação da fresadora	125
4.2.1 Resultados da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa	125
4.2.2 Resultados da variação entre a posição numérica indicada no comando e a posição física atingida pelo equipamento nas direções X, Y e Z.	126
4.3 Confeção de protótipos	127
4.4 Verificação dos dimensionamentos dos elementos mecânicos	129
4.4.1 Verificação dos dimensionamentos dos fusos	129
4.4.2 Verificação dos dimensionamentos das guias circulares do eixo X.....	131
4.4.3 Verificação dos dimensionamentos das engrenagens do redutor	133
4.4.4 Verificação do dimensionamento da potência de usinagem.....	135
4.4.4.1 Potência de usinagem para o aço	135
4.4.4.2 Potência de usinagem para o alumínio	136
4.4.4.3 Potência de usinagem para o bronze e cobre.....	138
5 CONCLUSÕES	140
ABSTRACT	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
BIBLIOGRAFIA	146

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Esquema dos eixos de translação (X, Y e Z) e rotação (A, B, C e W).....	21
FIGURA 2.1 - Protótipo virtual e físico.....	23
FIGURA 2.2 – Exemplo de modelos desenvolvidos em trabalhos artísticos.....	24
FIGURA 2.3 – Modelos para estudos arqueológicos da evolução humana.....	25
FIGURA 2.4 – Modelos utilizados em treinamentos de procedimentos médicos.....	25
FIGURA 2.5 – Modelo usado para análise de abordagem durante uma operação.....	26
FIGURA 2.6 – Uso de maquete em arquitetura.....	26
FIGURA 2.7 – Modelo em escala reduzida de usina hidroelétrica.....	27
FIGURA 2.8 – Protótipo de turbina tipo Kaplan.....	27
FIGURA 2.9 – Uso de protótipo em engenharia aeronáutica.....	28
FIGURA 2.10 – Uso de protótipos em engenharia naval.....	28
FIGURA 2.11 – Construção de Mock-up para teste ergonômico e design.....	29
FIGURA 2.12 – Ensaio aerodinâmico de automóvel em escala natural.....	29
FIGURA 2.13 – Construção de protótipos de blocos de motores para análise e desenvolvimento do projeto de fabricação.....	30
FIGURA 2.14 – Protótipo de uma serra tico-tico para avaliação de forma e design.....	30
FIGURA 2.15 – Protótipo para avaliação de montagem e interferências.....	31
FIGURA 2.16 – Protótipo de matriz de estampagem.....	31
FIGURA 2.17 – Protótipo desenvolvido como modelo para fundição em areia.....	32
FIGURA 2.18 – Protótipo desenvolvido como modelo para fundição em cera perdida.....	32
FIGURA 2.19 – Processo de digitalização de protótipos.....	32
FIGURA 2.20 – Fabricação de sólidos usando o paradigma da fabricação por camadas.....	33
FIGURA 2.21 – Tela do AutoCad® 2000.....	34
FIGURA 2.22 – Tela do SolidWorks® 2005.....	34
FIGURA 2.23 – Tela de entrada do 3DFORM® 2.0.....	35
FIGURA 2.24 – Tela principal do 3DFORM® 2.0.....	35
FIGURA 2.25 – Tela do Gcode® 2000.....	36
FIGURA 2.26 – Tela do MaxNC® CL2.....	36
FIGURA 2.27 – Exemplos de operações de usinagem.....	38
FIGURA 2.28 – Exemplos de máquinas-ferramentas rotativas: A) Furadeira; B) Torno.....	39
FIGURA 2.29 – Exemplos de máquinas-ferramentas alternativas: A) Plaina limadora.....	39
FIGURA 2.30 – Plaina limadora horizontal.....	40
FIGURA 2.31 – Plaina limadora vertical.....	40
FIGURA 2.32 – Máquina de Serrar de fita.....	41
FIGURA 2.33 – Esquema de uma máquina de serrar alternativa.....	41
FIGURA 2.34 – Esquema de uma brochadeira vertical.....	42
FIGURA 2.35 – Esquema de um torno mecânico.....	42
FIGURA 2.36 – Esquema de uma Mandrilhadora.....	43

FIGURA 2.37 – Fresadora Universal	44
FIGURA 2.38 – James Watt e sua máquina.....	45
FIGURA 2.39 – A máquina de Jaquard	46
FIGURA 2.40 – Máquina de cartões perfurados de Herman Hollerith.....	47
FIGURA 2.41 – O movimento da mesa de uma máquina convencional.	52
FIGURA 2.42 – Sistema de acionamento de uma máquina CNC.....	52
FIGURA 2.43 – O sistema de coordenada retangular para o plano XY.	53
FIGURA 2.44 – Quadrantes	54
FIGURA 2.45 – Fusos de esferas da LK [®]	57
FIGURA 2.46 – Fusos de rosca trapezoidal da TEKKNO [®]	58
FIGURA 2.47 – Exemplo de uma guia linear	58
FIGURA 2.48 – Guia linear dupla em “V”	59
FIGURA 2.49 – Exemplo de “display” do controle numérico.....	59
FIGURA 2.50 – Exemplo de motor a passo de máquina CNC	60
FIGURA 2.51 – Esquema de sistema de eixos de uma mandrilhadora e fresadora	61
FIGURA 2.52 – Sistema de controle de velocidade de motores	62
FIGURA 2.53 – Esquema de fusos e guias usados em máquinas CNCs	63
FIGURA 2.54 – Componentes da força de usinagem	64
FIGURA 2.55 – Ângulos de contato no fresamento frontal.....	69
FIGURA 2.56 – Ângulo de posição da ferramenta	69
FIGURA 2.57 – Esquema de um parafuso de rosca quadrada	70
FIGURA 2.58 – Esquema do parafuso de rosca trapezoidal.....	72
FIGURA 2.59 – Força tangencial no dente da engrenagem.....	76
FIGURA 2.60 – Barra sob carregamento transversal.....	77
FIGURA 2.61 – Esquema da flecha em uma barra sob carregamento transversal	79
FIGURA 3.1 – Desenvolvimento da fresadora	81
FIGURA 3.2 – Motor a passo modelo 5718-05D-05	82
FIGURA 3.3 – Esquema do motor a passo modelo 5718-05D-05	82
FIGURA 3.4 – Mesa divisora da MaxNC [®]	83
FIGURA 3.5 – Kit de automação da MaxNC [®]	84
FIGURA 3.6 – Ferramenta rotativa de alta velocidade MultiPro da Dremel [®]	85
FIGURA 3.7 – Esquema estrutural da fresadora.....	86
FIGURA 3.8 – Esquema da fresadora com rasgos para fixação de prisioneiros.....	87
FIGURA 3.9 – Esquema do cabeçote de movimentação	88
FIGURA 3.10 – Esquema de giro do suporte da micro-retífica em torno do.....	89
FIGURA 3.11 – Esquema de giro do suporte da micro-retífica em torno.....	89
FIGURA 3.12 - Montagem preliminar dos componentes desenvolvidos da fresadora.....	90
FIGURA 3.13 – Estrutura de cantoneira da mesa da fresadora.....	91
FIGURA 3.14 – Perfil estrutural em “T”	92
FIGURA 3.15 – Desenvolvimento da mesa da fresadora	92
FIGURA 3.16 – Suporte da micro-retífica e mecanismo de rotação no eixo C.....	93

FIGURA 3.17 – Esquema de giro do suporte da micro-retífica no eixo C	94
FIGURA 3.18 – Mecanismo de rotação do suporte	95
FIGURA 3.19 – Mecanismo de rotação com o	95
FIGURA 3.20 – Movimento de rotação do suporte da micro-retífica em torno do eixo B.....	96
FIGURA 3.21 – Estrutura do cabeçote de movimentação	97
FIGURA 3.22 – Cabeçote de movimentação da fresadora	98
FIGURA 3.23 – Desenvolvimento da estrutura lateral	99
FIGURA 3.24 – Desenvolvimento do conjunto mancais guia	100
FIGURA 3.25 - Desenvolvimento do fuso com rosca trapezoidal.....	101
FIGURA 3.26 – Desenvolvimento dos suportes de fixação dos mancais de rolamento dos fusos X e Y	102
FIGURA 3.27 – Montagem do fuso Y nos mancais de rolamentos e suportes dos mancais .	102
FIGURA 3.28 – Desenvolvimento do conjunto de porcas com sistema de eliminação de folgas para o fuso trapezoidal.....	103
FIGURA 3.29 – Desenvolvimento da estrutura inferior suporte do conjunto de porca do eixo X	104
FIGURA 3.30 – Montagem da estrutura inferior com as estruturas laterais.....	105
FIGURA 3.31 – Avaliação preliminar da fresadora.....	106
FIGURA 3.32 – Desenvolvimento do perfil para guia lateral.....	107
FIGURA 3.33 – Desenvolvimento do eixo excêntrico do rolamento da guia lateral.....	108
FIGURA 3.34 – Desenvolvimento do conjunto eixo rolamento da guia lateral	108
FIGURA 3.35 – Montagem dos rolamentos e perfil “U”	109
FIGURA 3.36 – Desenvolvimento do redutor de velocidade de acionamento dos fusos	110
FIGURA 3.37 – Desenvolvimento do suporte para transporte da fresadora.....	111
FIGURA 3.38 – Desenvolvimento do mancal guia do eixo de movimentação Z.....	112
FIGURA 3.39 – Montagem do mancal guia e da chapa de acionamento de fim de curso.....	113
FIGURA 3.40 – Fim de curso do eixo X.....	114
FIGURA 3.41 – Fim de curso do eixo Y.....	114
FIGURA 3.42 – Fim de curso do eixo Z	114
FIGURA 3.43 – Desenvolvimento da configuração final da fresadora	115
FIGURA 3.44 – Resultado do desenvolvimento da configuração final da fresadora	115
FIGURA 3.45 – Verificação da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa fixa.....	116
FIGURA 3.46 – Ensaio de calibração de posição na direção X.....	117
FIGURA 3.47 – Ensaio de calibração de posição na direção Y	118
FIGURA 3.48 – Ensaio de calibração de posição na direção Z	118
FIGURA 3.49 – Ensaio de calibração da parte superior do cabeçote na direção Y	119
FIGURA 3.50 – Logomarca gerada no AutoCad®	120
FIGURA 3.51 – Geração de parte do código CNC do protótipo	120
FIGURA 3.52 – Simulação da trajetória da ferramenta no software Gcode 2000.....	121
FIGURA 3.53 – Seqüência de fresamento do protótipo logomarca.....	121
FIGURA 3.54 – Geração da peça 3D no AutoCad®	122

FIGURA 3.55 – Geração de parte do código CNC do protótipo 3D.....	122
FIGURA 3.56 – Sequência de fresamento do protótipo peça 3D	123
FIGURA 4.1 – Fresadora	124
FIGURA 4.2 – Esquema de pontos marcados na mesa para verificação da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa	125
FIGURA 4.3 – Protótipo Logomarca	127
FIGURA 4.4 – Protótipo peça 3D	127
FIGURA 4.5 – Variação de geometria na confecção do protótipo Logomarca	128
FIGURA 4.6 – Esquema de parafuso sob torção e força axial.....	129
FIGURA 4.7 – Componentes que atuam como carga sobre as guias circulares do	132
FIGURA 4.8 – Carregamento na guia circular do eixo X.....	132

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 – Curva de torque do motor a passo modelo 5718M-05P e 5718M-05S da Linengineering®	83
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

QUADRO 2.1 – Blocos de comando e descrição.....	55
QUADRO 2.2 – Pressões admissíveis de contato	74
TABELA 2.1 – Tabela de dureza Brinell	75
QUADRO 3.1 – Especificações da micro-retífica DREMEL® MultiPro.....	84
QUADRO 4.1 – Características principais da fresadora	124
TABELA 4.1 – Variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa.....	125
TABELA 4.2 – Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção X	126
TABELA 4.3 – Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção Y	126
TABELA 4.4 – Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção Y (parte superior).....	126
TABELA 4.5 – Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção Z.....	126
QUADRO 4.2 – Dimensões principais do fuso Z	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADAPT	Automatic Programming of Machine Tools
APT	Automatically Programmed Tools
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWF	Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung
CAD	Computer Assist Design
CN	Controle Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Deutsches Institut für Normung
EIA	Electronic Industries Association
EUA	Estados Unidos da América
HSS	High Speed Steel
ISSO	International Organization for Standardization
MDF	Medium Density Fiberboard
MIT	Massachusetts Institute Technologies
PLC	Program Logical Control
RP	Rapid Prototyping
SAE	Society of Automotive Engineers
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USAF	United States of Air Force

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Eixo de rotação da peça
B	Eixo de rotação vertical do cabeçote de movimentação
C	Eixo de rotação horizontal do cabeçote de movimentação
W	Eixo de rotação da ferramenta de corte
X	Direção X
Y	Direção Y
Z	Direção Z
a	Avanço [mm]
a_e	Penetração trabalho [mm]
a_p	Profundidade ou largura de usinagem [mm]
b	Largura do dente do pinhão [mm]
d	Diâmetro primitivo do pinhão [mm]
d	Diâmetro da ferramenta [mm]
d	Diâmetro interno da rosca [mm]
d	Diâmetro da seção da barra [mm]
D	Diâmetro externo da rosca [mm]
E	Módulo de elasticidade do material [N/mm ²]
f	Avanço por volta [mm/volta]
f	Coefficiente de atrito [adimensional]
F_{ap}	Força de apoio [N]
F_c	Força de corte [N]
F_f	Força de avanço [N]
F_p	Força passiva [N]
F_t	Força ativa [N]
F_t	Força tangencial no dente da engrenagem [N]
F_u	Força de usinagem [N]
f_z	Avanço por dente da ferramenta [mm/dente]
h	Duração da engrenagem [horas]
h	Altura do filete de rosca [mm]

h	Espessura de corte [mm]
h_m	Espessura média de corte no fresamento [mm]
HB	Dureza Brinell [N/mm ²]
i	Relação de transmissão ou redução [Adimensional]
i	Número de entradas da rosca [Adimensional]
J_x	Momento de inércia a flexão relativo ao eixo de simetria XX [mm ⁴]
K_s	Pressão específica de corte [N/mm ²]
K_{S_m}	Pressão média específica de corte [N/mm ²]
K_{s_1}	Constante específica do material para uma secção de corte de 1mm de espessura por 1mm de largura [N/mm ²]
L	Comprimento total da viga [mm]
m	Módulo normalizado [mm]
M_f	Momento fletor [Nmm]
M_t	Momento torçor [Nmm]
n	Rotação [rpm]
n	Número de filetes em contato [Adimensional]
n_p	Rotação do pinhão [rpm]
N	Módulo da força Normal [N]
p	Pressão de contato [N/mm ²]
p	Passo da rosca [mm]
P	Módulo da força axial [N]
P	Carga aplicada no centro do comprimento da viga [N]
P_{adm}	Pressão admissível [N/mm ²]
P_c	Potência de corte [kW]
P_f	Potência de avanço [kW]
P_m	Potência do motor [kW]
q	Fator de forma [adimensional]
S	Área da seção [mm ²]
T	Módulo da força de atrito [N]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
V_e	Velocidade efetiva [m/min]
V_f	Velocidade de avanço [m/min]
W	Fator de durabilidade [adimensional]

W_f	Módulo de rigidez a flexão [mm^3]
y	Distância linear da fibra neutra a uma dada fibra qualquer [mm]
y_0	Distância linear da fibra neutra a fibra mais externa [mm]
z	Coefficiente angular da reta [adimensional]

Letras Gregas

α	Ângulo de hélice da rosca [rad]
α	Ângulo de pressão [rad]
χ	Ângulo de posição da ferramenta [rad]
ϕ	Semi-ângulo da rosca [rad]
η	Rendimento [adimensional]
φ_1	Ângulo entre o ponto de saída (ou entrada no fresamento concordante) do dente e a vertical [rad]
φ_2	Ângulo entre o ponto de entrada (ou saída no fresamento concordante) do dente e a vertical [rad]
φ	Fator de serviço [adimensional]
σ_c	Tensão de compressão [N/mm^2]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima atuante na base do dente [N/mm^2]

Sobrescritos

®	Marca registrada
©	Direitos de cópia

RESUMO

A produção de equipamentos mecânicos corresponde a uma parcela importante da geração de bens de capital. Para a melhoria da produtividade e respostas mais rápidas às necessidades técnicas, lança-se mão de protótipos em escala que podem ser utilizados na avaliação do “design”, propriedades mecânicas, aspectos de fabricação, desempenho e funcionalidade na produção de peças e ou conjuntos. A produção de protótipos físicos pode ser feita através da utilização de equipamentos mecânicos com comando numérico computadorizado. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um equipamento mecânico controlado numericamente por computador (CNC) para produção de protótipos em escala, principalmente para fins didáticos. Tal equipamento mecânico poderá ser utilizado tanto no aprendizado em laboratório de sistemas CNC, quanto na criação de protótipos em escala para as áreas de Desenho Mecânico, Elementos de Máquinas e Projetos Mecânicos. Para o desenvolvimento do equipamento mecânico com controle por comando numérico utilizou-se um kit de controle numérico constituído de 03 motores a passo com encoders, controlador lógico em malha fechada (close loop), software CNC e mesa divisora com rotação (A). A concepção do equipamento mecânico foi feita a partir da avaliação de equipamentos disponíveis no mercado. O equipamento desenvolvido foi uma fresadora do tipo “Router” onde a mesa principal é fixa e o cabeçote de movimentação da ferramenta de corte pode transladar nos eixos X, Y e Z e girar em torno dos eixos B e C, conferindo maior possibilidade na confecção de superfícies complexas. O eixo de rotação (W) da ferramenta de corte corresponde ao mandril de uma micro-retífica Dremel[®] fixada no cabeçote de movimentação da ferramenta. Como filosofia de concepção e desenvolvimento dos componentes mecânicos do equipamento mecânico utilizou-se sistema mecânicos de mais fácil aquisição e fabricação convencional.

Palavras Chaves: *Fresadora, Máquina-ferramenta, CNC, Comando Numérico, Protótipos em escala.*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos produtos está intimamente ligado à criação e teste de modelos, considerando-se seu uso desde a aplicação conceitual até a avaliação funcional. Estes modelos, classicamente chamados de protótipos, têm sido utilizados em diversas áreas, tais como engenharia, arquitetura, medicina, artes, arqueologia, etc. Na engenharia são largamente aplicados para avaliação de “design”, propriedades mecânicas, aspectos de fabricação, desempenho e funcionalidade na produção de peças e ou conjuntos.

Os protótipos podem ser virtuais ou físicos, representam a possibilidade da pré-avaliação de um dado elemento, ou seja, no primeiro caso os protótipos são utilizados somente para avaliações computacionais, e no segundo caso os protótipos são usados em simulações e avaliações físicas. Os protótipos físicos, dependendo da área de utilização, podem também ser denominados de modelos, maquetes e “mock-ups”.

Os protótipos físicos podem ser fabricados em escala natural, reduzida ou expandida, dependendo dos custos envolvidos, maquinário disponível para construção e as necessidades da avaliação exigida. Em alguns casos os elementos têm que ser feitos em partes para o cumprimento da escala escolhida. Quanto ao tipo de material, observam-se a construção de protótipos com os mais variados materiais, tais como papel, isopor, madeira, resinas, ceras, polímeros, metais, etc.

Observam-se também o uso de protótipos no desenvolvimento de ferramentas utilizadas em pré-séries de peças fabricadas por estampagem, forjamento, injeção e fundição.

Na engenharia reversa, os protótipos físicos são utilizados para a digitalização, criação e recuperação de protótipos virtuais, visando alterações e desenvolvimento de novos projetos com a construção de novos protótipos.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um equipamento mecânico controlado numericamente por computador (CNC) para produção de protótipos em escala, principalmente para fins didáticos. Tal equipamento mecânico poderá ser utilizado tanto no aprendizado de sistemas CNC, quanto na criação de protótipos em escala para as áreas de Desenho Mecânico, Elementos de Máquinas e Projetos Mecânicos.

Partindo-se inicialmente da concepção de alguns equipamentos existentes no mercado, onde a grande maioria possui 03 eixos de translação (X, Y e Z) e 01 eixo de rotação da ferramenta de corte (W). Foi desenvolvido um equipamento com 03 eixos de translação da ferramenta (X, Y e Z) e 01 eixo de rotação (A) que são automatizados utilizando kit de

controle numérico (03 motores a passo com encoders, controlador lógico em malha fechada, software CNC e mesa divisora da MaxNC[®]) 02 eixos de rotação do suporte da ferramenta de corte que são acionados manualmente (B, C), e 01 eixo da rotação da ferramenta de corte (W). A ferramenta de corte foi montada no mandril de uma micro-retífica Dremel[®] (capacidade 130W, rotação de 5000 até 35000 rpm) fixada no cabeçote de movimentação da ferramenta tendo alimentação elétrica independente. O equipamento desenvolvido pode ser classificado como uma fresadora do tipo “Router” onde a mesa principal (área de trabalho útil da mesa de 950 mm x 450 mm) é fixa e o cabeçote de movimentação pode transladar nos eixos X, Y, Z e girar em torno dos eixos B e C, conferindo maior possibilidade na confecção de superfícies complexas.

A FIG 1.1 apresenta o esquema dos eixos utilizados no equipamento. Os eixos X, Y e Z são movimentos de translação da ferramenta. O eixo A é o movimento de rotação da peça, também chamado de “quarto eixo” nas máquinas-ferramenta convencionais ou CNC. O eixo W é o movimento de rotação da ferramenta de corte, que neste caso é acionado pela micro-retífica. Os eixos B e C são movimentos de rotação do suporte da micro-retífica, o que possibilita trabalhar com a ferramenta de corte em vários ângulos em relação a estes eixos.

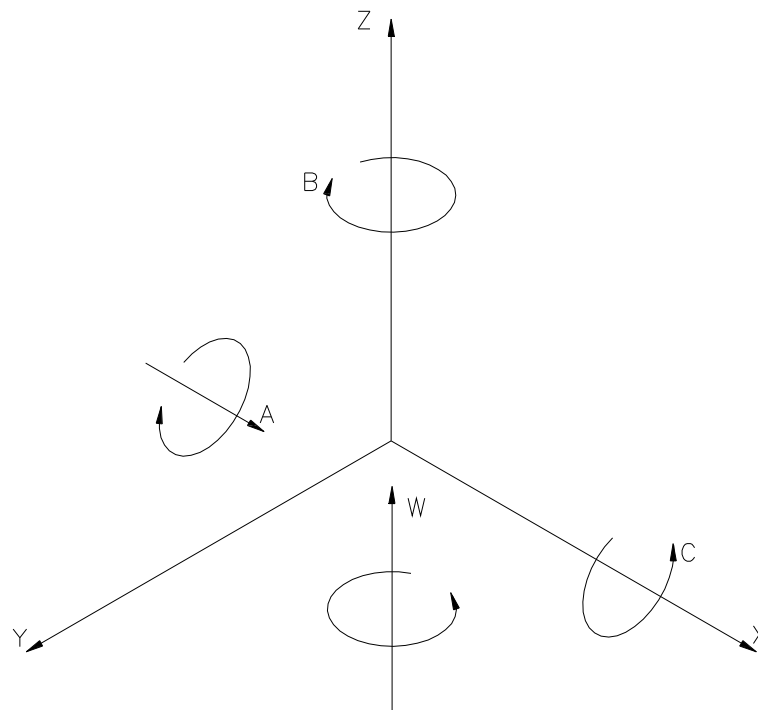


FIGURA 1.1 – Esquema dos eixos de translação (X, Y e Z) e rotação (A, B, C e W).

Os sistemas de translação utilizaram fusos convencionais de transmissão com perfil trapezoidal e porca em bronze com lubrificação por graxa e sistema para eliminar a folga por meio de molas helicoidais de expansão. Os fusos utilizados nos eixos X e Y são bi-apoiados utilizando mancais de rolamento rígidos blindados de uma carreira de esferas. No eixo Z o sistema funciona em balanço, possibilitando a fixação e giro do suporte da ferramenta (eixos B e C). Para aumentar capacidade de transmissão foram desenvolvidos redutores de velocidade com redução de 25:1 utilizando dois trens de engrenagens cilíndricas retas. Os sistemas de translação utilizam guias de seção circular com mancais de deslizamento lineares em bronze lubrificados com graxa. São utilizados também duas guias laterais destinadas a suportar as chapas laterais e o sistema do cabeçote de movimentação utilizando eixos de rolagem com regulagem excêntrica.

Como filosofia básica na concepção e desenvolvimento dos componentes mecânicos do equipamento mecânico utilizou-se sistema mecânicos de mais fácil aquisição e produção convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Uso de Protótipos

“Os protótipos, sejam virtuais ou físicos, representam a possibilidade da pré-avaliação de um dado elemento, ou seja, no primeiro caso os protótipos são utilizados somente para avaliações computacionais e, no segundo caso, os protótipos são usados em simulações e avaliações físicas. A FIG 2.1 apresenta um protótipo virtual e o seu correspondente protótipo físico.



FIGURA 2.1 - Protótipo virtual e físico.
FONTE – DELFT, 1998 (adaptado).

Os protótipos têm sido aplicados nas mais variadas áreas da produção, ensino e pesquisa, considerando-se os mais diversos setores, tais como engenharia, arquitetura, medicina, artes, arqueologia, etc. Dependendo da área de utilização os protótipos podem também ser denominados de modelos, maquetes e “mock-ups”.

O uso de protótipos físicos se presta desde a avaliação de formas e “design” (verificação do comportamento do consumidor frente ao produto), quando são chamados de protótipos conceituais, até à situação em que são avaliadas a intercambialidade entre peças, analisando aspectos construtivos individuais e de conjunto (condições de temperatura, isolamento elétrico, aspectos aero e hidrodinâmicos e análise de possíveis pontos de concentração de tensões), além da fabricabilidade destas peças (dificuldades frente aos processos de fabricação envolvidos), sendo então denominados protótipos funcionais.

Os protótipos podem ser fabricados em escala natural, reduzida ou expandida, dependendo dos custos envolvidos, maquinário disponível para construção e as necessidades da avaliação exigida. Em alguns casos, os elementos têm que ser feitos em partes para o cumprimento da escala escolhida. Quanto ao tipo de material, observam-se a construção de protótipos com os mais variados materiais, tais como papel, isopor, madeira, resinas, ceras, polímeros, metais, etc. Normalmente, quando se trata de protótipos conceituais, podem-se utilizar materiais com características compatíveis com o original, tais como consistência, textura, cor, etc. Entretanto, para os protótipos funcionais, onde a avaliação do elemento considera aspectos de resistência mecânica e/ou características térmicas e elétricas entre outras, o material a ser utilizado geralmente é o mesmo do produto final.

Os protótipos podem ser desenvolvidos, não só visando os elementos que compõem o produto propriamente dito, mas também as ferramentas para sua fabricação, tais como modelos para fundição, matrizes de conformação, de estampagem e de injeção. Assim, através de pré-séries de elementos fabricados com estas ferramentas pode-se construir produtos para avaliação. De um modo geral o uso de protótipos possibilita a redução de erros e o tempo de execução de projeto e fabricação de um dado produto.

Considerando-se os vários usos de protótipos, no campo das artes e arqueologia as FIG 2.2 e 2.3 ilustram respectivamente exemplos de modelos desenvolvidos em trabalhos artísticos e para estudos arqueológicos da evolução humana.



FIGURA 2.2 – Exemplo de modelos desenvolvidos em trabalhos artísticos.
FONTE – ROLANDDG, 2002. (Adaptado)

Os modelos representados na imagem são réplicas fiéis de modelos encontrados em vários pontos do Mundo. Modelos na parte superior da imagem, da esquerda para a direita: Crânio *Sinanthropus* (400.000 anos), Crânio *Cro Magnon* (30.000 anos), Crânio *Broken Hill* (40.000 anos). Modelos na parte inferior da imagem, da esquerda para a direita: Crânio *La Chapelle aus Saints* (40.000 anos), Crânio *Steinheim* (200.000 anos), Crânio *Oldoway H5* (1.750.000 anos).



FIGURA 2.3 – Modelos para estudos arqueológicos da evolução humana.
FONTE – ROMA, 2001. (Adaptado)

Na medicina é comum o uso de protótipos para ensino, tais como esqueleto humano, sistemas e órgãos do corpo humano, podendo utilizar-se ainda de modelos para treinamento na simulação de acidentes, resgate, traqueotomia, prática de pneumotórax, traumatismos, partos, etc. A FIG 2.4 mostra alguns modelos utilizados em treinamentos de procedimentos médicos.

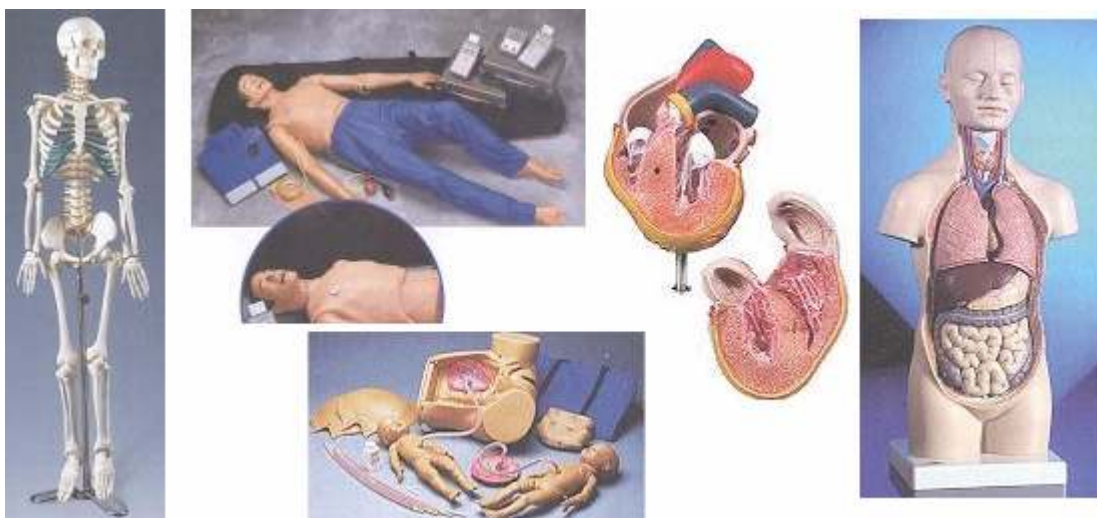


FIGURA 2.4 – Modelos utilizados em treinamentos de procedimentos médicos.
FONTE – ROMA, 2001. (Adaptado).

Outro uso que vem crescendo é a utilização de modelos criados a partir de casos reais para avaliações visando a realização de procedimentos cirúrgicos. A FIG 2.5 ilustra o modelo de um crânio usado para avaliação de procedimentos cirúrgicos de partes de reconstituição óssea.



FIGURA 2.5 – Modelo usado para análise de abordagem durante uma operação.
FONTE – Z CORPORATION, 2002. (Adaptado)

Na engenharia civil e arquitetura os protótipos, em escala reduzida, são usualmente chamados de maquetes, e são utilizados para avaliação e apresentação ao público consumidor, visando uma previsão do resultado final da obra. A FIG 2.6 mostra dois exemplos de maquetes utilizados.



FIGURA 2.6 – Uso de maquete em arquitetura.
FONTE – Z CORPORATION, 2002; AF MAQUETE, 1999 (Adaptado).

Utilizam-se também modelos de barragem, canais e usinas hidrelétricas para avaliação de desempenho hídrico e impacto ambiental durante a fase de projeto, antes e durante a construção destes empreendimentos. Além disso, os próprios protótipos de turbinas também são utilizados para avaliação de eficiência em regime de trabalho e coletas de dados experimentais para confronto com a previsão de resultados teóricos. As FIG 2.7 e 2.8 ilustram o exposto acima.



FIGURA 2.7 – Modelo em escala reduzida de usina hidroelétrica.
FONTE – MAESA, 2002. (Adaptado)



FIGURA 2.8 – Protótipo de turbina tipo Kaplan.
FONTE – FILHO, 2002. (Adaptado)

Na engenharia aeronáutica utilizam-se protótipos para avaliação de desempenho aerodinâmico, onde um protótipo em escala reduzida ou natural é testado em túnel de vento. A FIG 2.9 mostra um modelo de avião em escala natural sendo ensaiado em túnel de vento. De modo análogo, em engenharia naval utilizam-se protótipos de embarcações para verificação de características de estabilidade, como mostra a FIG 2.10.



FIGURA 2.9 – Uso de protótipo em engenharia aeronáutica.
FONTE – FOX, 1992. (Adaptado)



FIGURA 2.10 – Uso de protótipos em engenharia naval.
FONTE – D.E.N., 2001. (Adaptado)

Na engenharia automobilística os protótipos são largamente utilizados, em escalas reduzidas e/ou naturais desde a fase de concepção onde são analisados aspectos relacionados ao design, até a construção de “mock-ups” para avaliação de aspectos ergonômicos, passando-se por ensaios aerodinâmicos. As FIG 2.11 e a FIG 2.12, ilustram o exposto acima.



FIGURA 2.11 – Construção de Mock-up para teste ergonômico e design.
FONTE – VANTICO, 2001. (Adaptado).

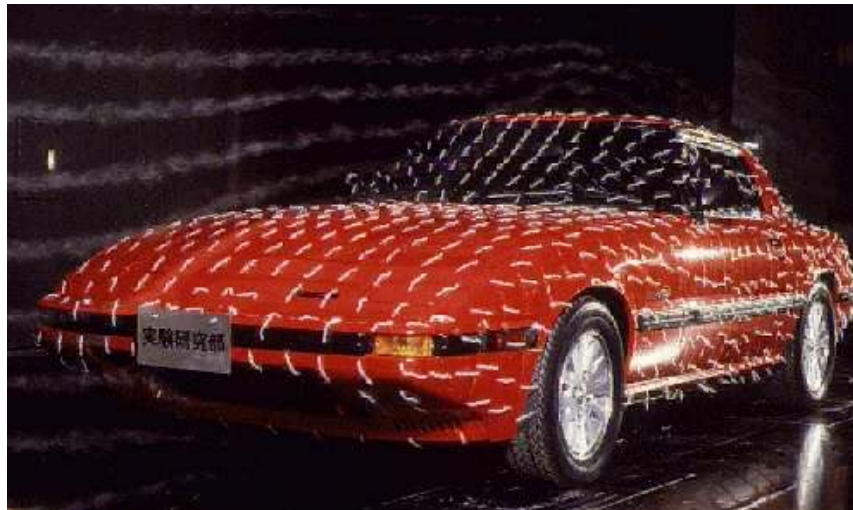


FIGURA 2.12 – Ensaio aerodinâmico de automóvel em escala natural.
FONTE – EXPOENTE, 2002. (Adaptado).

A FIG 2.13 mostra a construção de protótipos de blocos de motores para análise e desenvolvimento do projeto de fabricação.

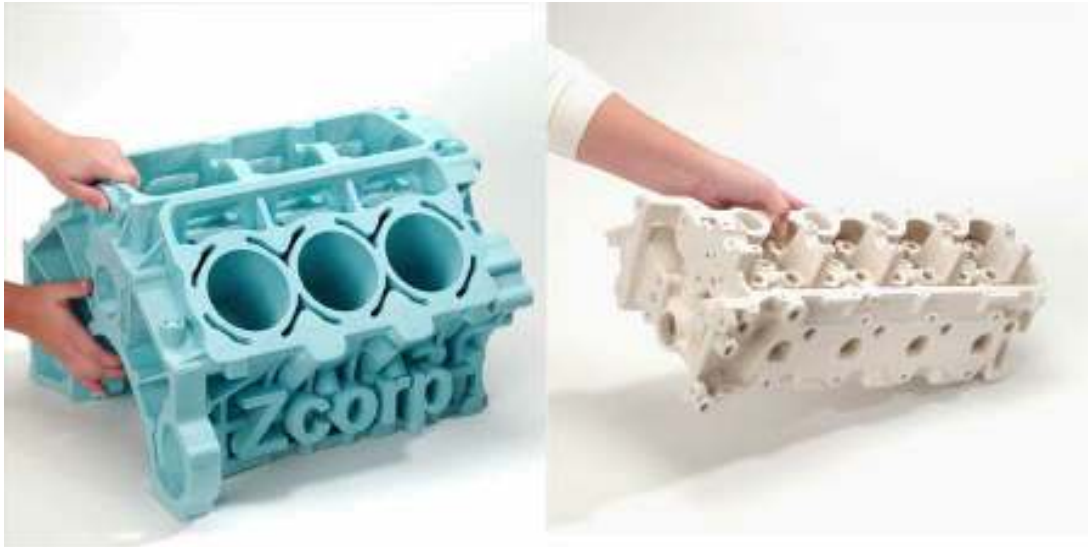


FIGURA 2.13 – Construção de protótipos de blocos de motores para análise e desenvolvimento do projeto de fabricação.
FONTE – Z CORPORATION, 2002. (Adaptado)

Na engenharia mecânica, em geral encontra-se a maior utilização de protótipos para desenvolvimento de produtos, indo desde a avaliação de forma e design como mostra a FIG 2.14 até a verificação de várias características elétricas, térmicas e mecânicas, tais como montagem e interferência, como ilustra a FIG 2.15.



FIGURA 2.14 – Protótipo de uma serra tico-tico para avaliação de forma e design.
FONTE – STRATASYS, 2001. (Adaptado)

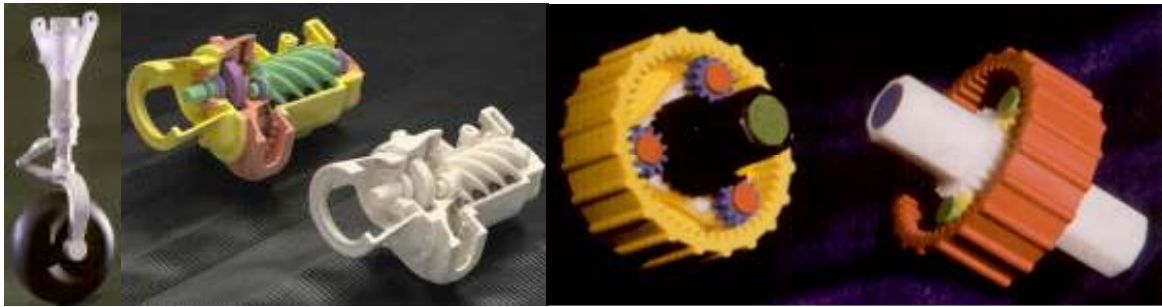


FIGURA 2.15 – Protótipo para avaliação de montagem e interferências.
FONTE – Z CORPORATION, 2002; STRATASYS, 1999. (Adaptado)

Observam-se também o uso de protótipos no desenvolvimento de ferramentas utilizados em pré-séries de peças fabricadas por estampagem, forjamento, injeção e fundição. As FIG 2.16 a 2.19 indicam protótipos utilizados como modelos respectivamente para matriz de estampagem, fundição em areia e em cera perdida.



FIGURA 2.16 – Protótipo de matriz de estampagem.
FONTE – VANTICO, 1999. (Adaptado)



FIGURA 2.17 – Protótipo desenvolvido como modelo para fundição em areia.
 FONTE – HELISYS, 1998. (Adaptado)

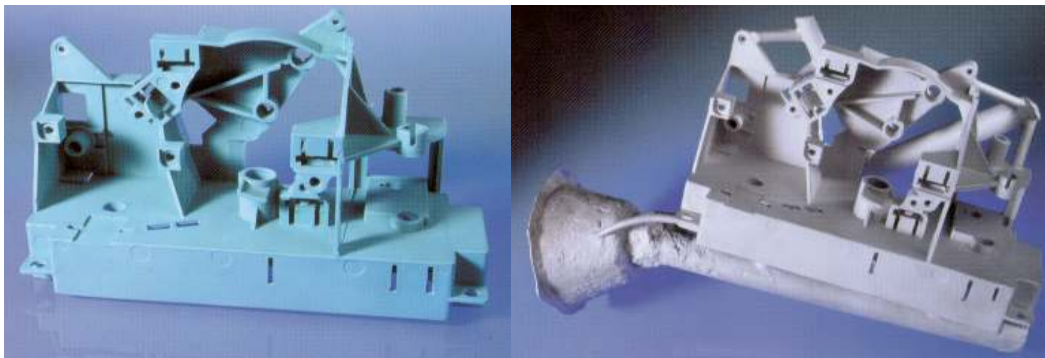


FIGURA 2.18 – Protótipo desenvolvido como modelo para fundição em cera perdida.
 FONTE – MCP, 2000. (Adaptado)

Na engenharia reversa os protótipos físicos são utilizados para a digitalização, criação e recuperação de protótipos virtuais, visando alterações e desenvolvimento de novos projetos com a construção de novos protótipos.” (SANTOS, 2002).



FIGURA 2.19 – Processo de digitalização de protótipos.
 FONTE – GOM, 2000. (Adaptado)

2.2 Uso de softwares na automação

A tecnologia da Prototipagem Rápida (RP) originou-se aproximadamente 17 anos atrás, com o aparecimento do sistema de estereolitografia. Esse processo causou um grande impacto tecnológico e é baseado em sistemas de CAD (Projeto Assistido por Computador) 3D. A estereolitografia é um processo que se baseia no uso de fonte de raio laser e polímeros fotossensíveis. Fundamentalmente, a tecnologia de prototipagem rápida considera a passagem automática de um modelo CAD 3D para um modelo físico através da construção de numerosas camadas de material (LENNINGS, 2006).

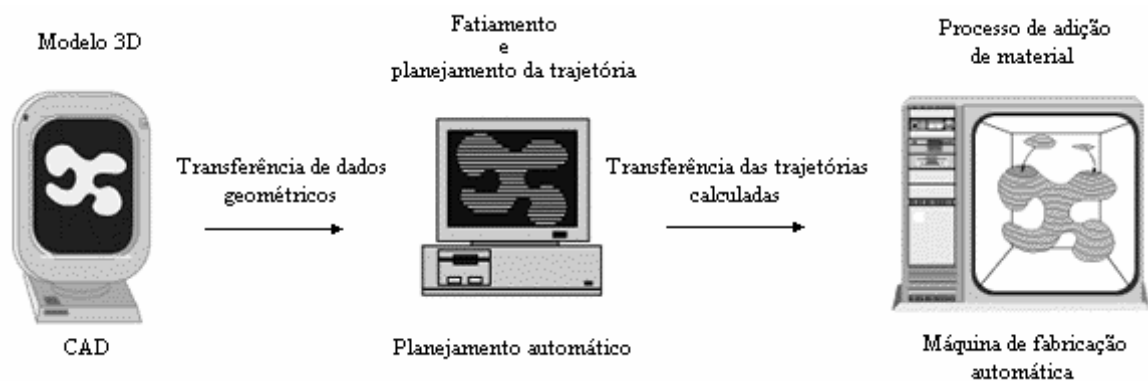


FIGURA 2.20 – Fabricação de sólidos usando o paradigma da fabricação por camadas.
 FONTE – SANTOS, 2002. (Adaptado)

Pode-se considerar dois tipos de processos a saber : processo de fabricação por adição e por retirada de material. Os sistemas que empilham camadas são de adição, isto é, começam com um espaço vazio e adicionam material até a geometria do modelo está completamente preenchida, exemplos são estereolitografia, Sinterização Seletiva por Laser, etc. Sistemas como o de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) são um exemplo de processos de retirada de material, onde começam com um bloco sólido e retiram material até atingir a geometria final do modelo.

Os processos de retirada de material eram considerados menos competitivos que os processos por adição de material (WALTERS, 1992). Contudo, a evolução dos equipamentos mecânicos, juntamente com o desenvolvimento e popularização de *software* de computação gráfica e programação visual, tem atualmente tornado os processos por retirada de material utilizando sistema de usinagem CNC mais competitivos, como explica Lennings et al. (LENNINGS, 2006).

Sendo assim, a fabricação de um protótipo físico por meio de usinagem em uma máquina CNC se torna mais produtiva utilizando-se softwares para gerar o código CNC, que é a linguagem que o equipamento interpreta.

Uma das maneiras de utilização de softwares para gerar o protótipo físico em uma máquina CNC é inicialmente gerar um sólido virtual em software com sistema CAD, que é exportado para outro software para gerar o programa CNC. Pode-se utilizar outro software para simular a trajetória da ferramenta para corrigir ou editar o programa.

Neste trabalho foram utilizados vários softwares, dentre os principais podemos citar o AutoCad® 2000, SolidWorks® 2005, 3D FORM® 2.0, Gcode® 2000, MaxNC® CL2 entre outros auxiliares como o editor de texto, sistema operacional, etc.

O AutoCad® 2000 e SolidWorks® 2005 são softwares para gerar desenhos 2D, 3D e sólidos virtuais. A FIG 2.21 apresenta a tela do AutoCad® 2000 e a FIG 2.22 a tela do SolidWorks® 2005.

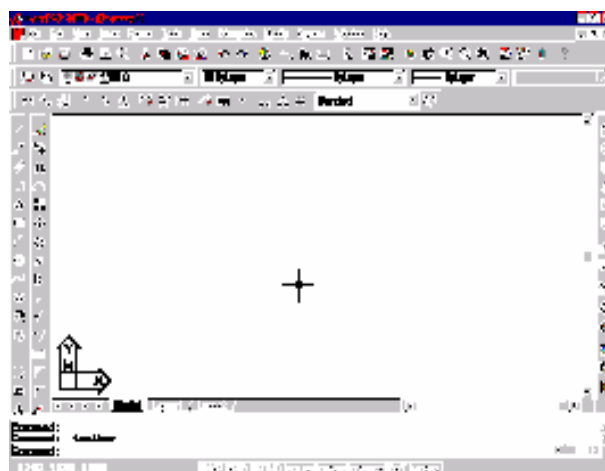


FIGURA 2.21 – Tela do AutoCad® 2000



FIGURA 2.22 – Tela do SolidWorks® 2005

O programa “3DFORM” é um modelador de sólidos que utiliza plataforma CAD (AutoCAD® versão 2000) com interface gráfica em linguagem estruturada (Visual Basic® versão 6). A modelagem é baseada no uso de sólidos elementares pré-selecionados que podem ser trabalhados através de operações booleanas para obtenção do modelo sólido final. Com o programa “3DFORM” pode-se promover o fatiamento deste modelo utilizando o conceito de prototipagem rápida para criar as trajetórias que delimitam cada plano e assim gerar o código de comando numérico para a construção da peça por retirada de material (Santos, 2002). A FIG 2.23 apresenta a tela de entrada e FIG 2.24 apresenta a tela principal do software 3DFORM® 2.0.



FIGURA 2.23 – Tela de entrada do 3DFORM® 2.0
 FONTE: Santos, 2002, p. 82 (adaptado)

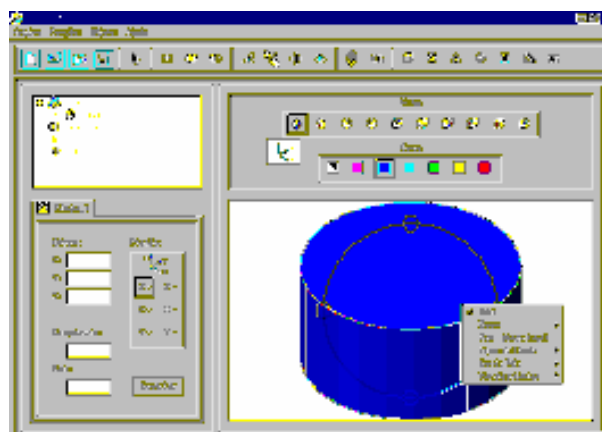


FIGURA 2.24 – Tela principal do 3DFORM® 2.0
 FONTE: Santos, 2002, p. 82 (adaptado)

O Gcode[®] 2000 é um software para simular a trajetória da ferramenta de corte após gerado o programa CNC. Com isso é possível verificar possíveis erros no programa ou mesmo uma adequação do mesmo. A FIG 2.25 apresenta a tela do software.

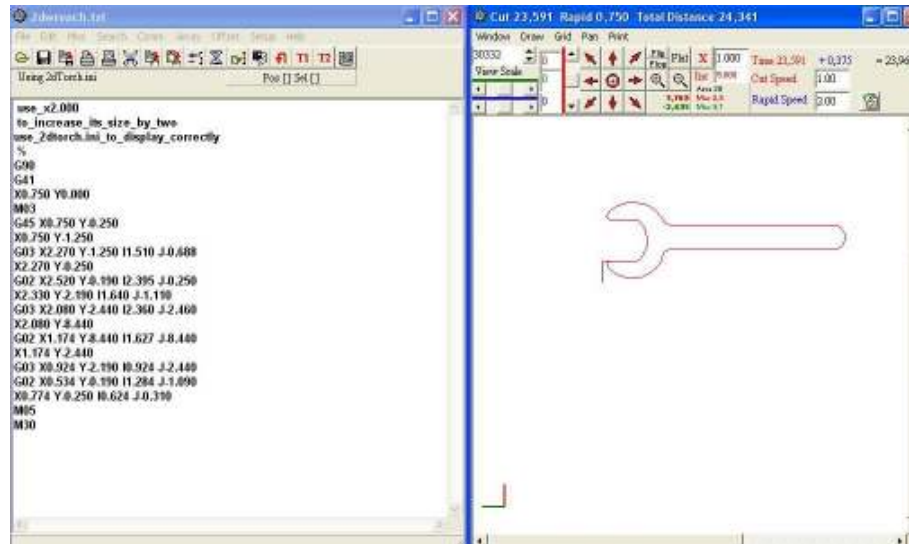


FIGURA 2.25 – Tela do Gcode[®] 2000
 FONTE: www.home.carolina.rr.com, 2007 (adaptado)

O software MaxNC[®] CL2 é o responsável pelo comando dos motores a passo utilizado neste trabalho. Como foi dito anteriormente, este foi adquirido juntamente com o kit de automação: 03 motores a passo, controlador lógico programável e o software. Com o programa CNC elaborado, por meio desse software é possível então, proceder a usinagem do protótipo na fresadora CNC. A FIG 2.26 apresenta a tela do software MaxNC[®] CL2.



FIGURA 2.26 – Tela do MaxNC[®] CL2.

2.3 Máquinas-Ferramentas

2.3.1 Introdução

As máquinas-ferramentas, também denominadas máquinas operatrizes, são destinadas à realização de qualquer trabalho de acabamento mecânico no material, como por exemplo, as prensas, tesouras, martelos, punções, tornos, fresadoras, plainas, entre outras.

Constituem o marco do grau de civilização de um país. Sem elas, não seria possível a produção em larga escala dos variados produtos que nosso padrão de vida tem indicado e aceito para o bem da coletividade.

São essenciais na confecção de todos os produtos, como turbinas gigantes, instrumentos de aeronáutica, etc. O automóvel, o rádio, a máquina de lavar, a de escrever, os refrigeradores e condicionadores de ar, os instrumentos científicos e uma série de outras utilidades não existiriam, hoje, se não houvesse o grande progresso da indústria de máquinas-ferramentas.

É das máquinas-ferramentas que o engenheiro depende quando projeta um produto. A capacidade da máquina executar certas operações habilita o engenheiro a adaptar o projeto a essa capacidade e assegurar a rápida e econômica produção de utilidades.

As máquinas-ferramentas se caracterizam pelo modo de ação de suas ferramentas. Podem agir por deformação ou desagregação do material a ser trabalhado. A deformação pode ser produzida por choque, compressão ou estiramento, a quente ou a frio.

As máquinas que trabalham o material por deformação, a quente ou a frio, são os martelos, as prensas, os laminadores, os bancos de estiramento, etc.

A desagregação pode ser realizada por cisalhamento ou arrancamento. As tesouras e os punções são exemplos de máquinas que trabalham por cisalhamento. Nessas máquinas, o material em excesso é destacado por pedaços mais ou menos consideráveis.

A desagregação por arrancamento é comum nas máquinas de usinagem, como tornos mecânicos, fresadoras, etc, quando trabalham materiais duros e quebradiços. De acordo com a natureza do material essas máquinas podem produzir cavacos cisalhados. A FIG 2.27 ilustra exemplos de operações de usinagem, torneamento, fresamento e furação.



FIGURA 2.27 – Exemplos de operações de usinagem
 FONTE: FREIRE, 1989, p. 4 (adaptado)

Nas máquinas-ferramentas há a considerar três espécies de movimentos essenciais:

- movimento de preparação;
- movimento principal, de trabalho ou de corte;
- movimento secundário, de avanço ou de alimentação.

O movimento ou movimentos de preparação são necessários para por a máquina em movimento e podem ser efetuados manual ou mecanicamente. São constituídos, pois, por tudo aquilo que é preciso fazer para que a máquina fique em condições de iniciar seu trabalho.

O movimento principal é aquele que produz o corte do material. É também chamado movimento de trabalho ou de corte. O movimento de trabalho pode ser executado indistintamente pela ferramenta ou pela peça que se trabalha.

Sob o ponto de vista da classe de movimento, este pode ser:

- de rotação;
- retilíneo – alternativo;
- retilíneo – contínuo.

Entre as máquinas-ferramentas rotativas temos as furadeiras, tornos, fresadoras, escariadoras, broqueadoras, etc. São retilíneas alternativas as plainas, limadoras, ranhuradoras, broheadoras, serras alternativas, etc. Entre as máquinas retilíneas contínuas podemos citar as serras de fita, horizontal e vertical.

A FIG 2.28 ilustra exemplos de máquinas-ferramentas rotativas e a FIG 2.29 ilustra exemplos de máquinas-ferramentas alternativas.

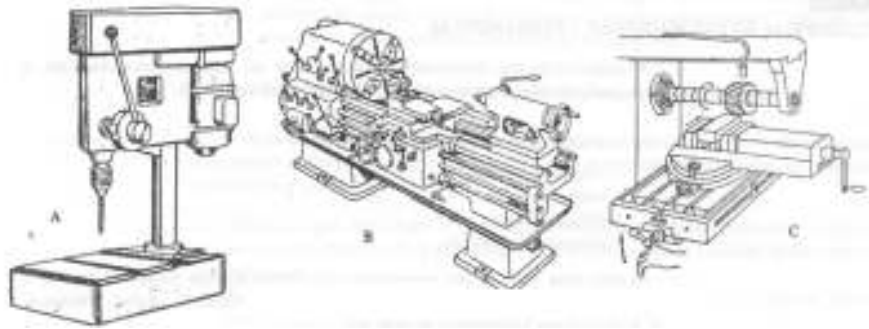


FIGURA 2.28 – Exemplos de máquinas-ferramentas rotativas: A) Furadeira; B) Torno Mecânico; C) Fresadora.
 FONTE: FREIRE, 1989, p. 5 (adaptado)

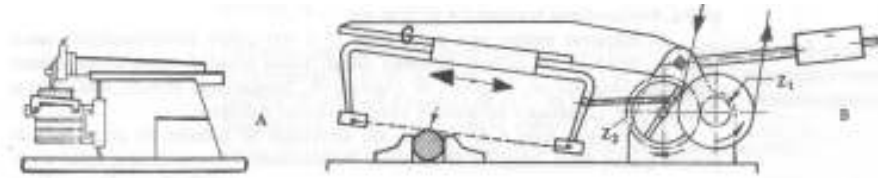


FIGURA 2.29 – Exemplos de máquinas-ferramentas alternativas: A) Plaina limadora B) Máquina de serrar alternativa.
 FONTE: FREIRE, 1989, p. 5 (adaptado)

O movimento secundário é aquele que produz o avanço de ferramenta ou da peça. Poderá haver um ou mais movimentos conforme a complexidade do trabalho realizado pela máquina. São denominados também movimentos secundários, de avanço ou de alimentação. Estes movimentos de translação ou de avanço podem ser transmitidos tanto à ferramenta como à peça e realizar-se em uma, duas ou três direções normais entre si.

2.3.2 Principais máquinas-ferramentas

2.3.2.1 Máquinas que utilizam ferramentas com uma só aresta de corte

A ferramenta é animada de movimento de corte e a peça de movimento de avanço:

- plaina limadora horizontal;
- plaina limadora vertical.

O processo de usinagem executado por esta máquina-ferramenta é também conhecido como aplainamento: “Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies regradas, geradas por um movimento retilíneo alternativo da peça ou ferramenta.” (FERRARESI, 1977, p.29).

A FIG 2.30 apresenta uma plaina limadora horizontal e a FIG 2.31 apresenta uma plaina limadora vertical.

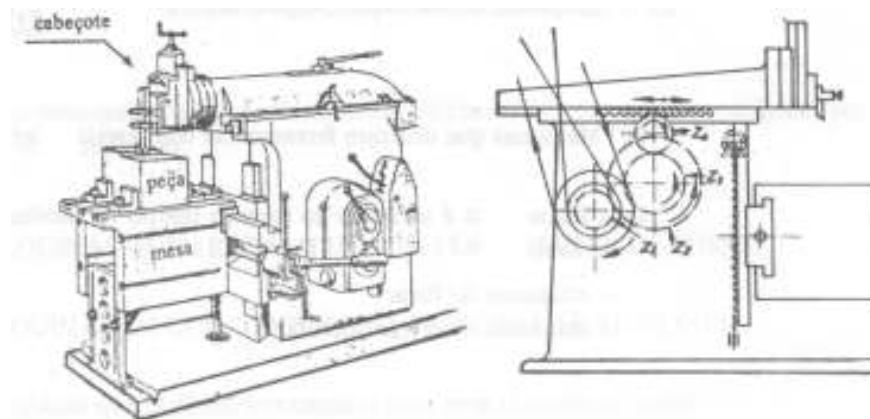


FIGURA 2.30 – Plaina limadora horizontal
 FONTE: FREIRE, 1989, p.16 (adaptado)

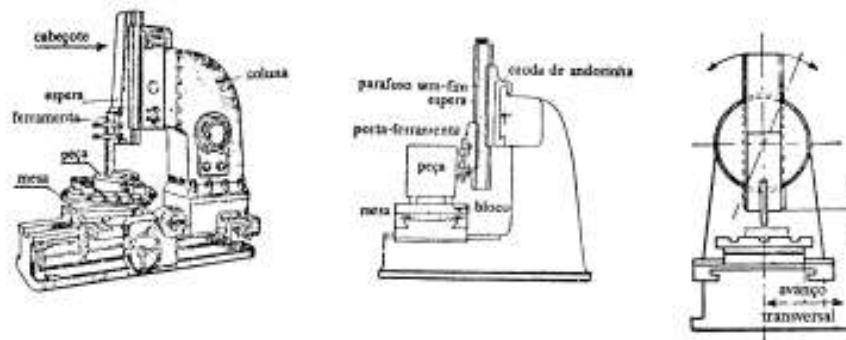


FIGURA 2.31 – Plaina limadora vertical
 FONTE: FREIRE, 1989, p.17 (adaptado)

2.3.2.2 Máquinas que utilizam ferramentas com arestas cortantes múltiplas

A ferramenta é acionada de movimento de corte e a peça de movimento de avanço:

- máquina de serrar de fita.

A FIG 2.32 apresenta uma máquina de serrar de fita.

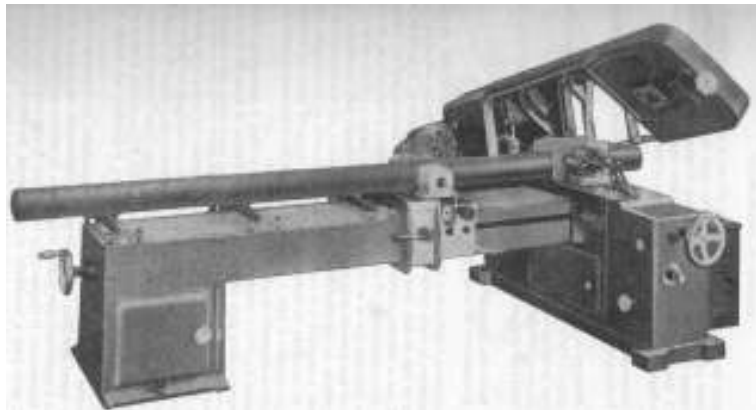


FIGURA 2.32 – Máquina de Serrar de fita.
FONTE: ROSSI, 1970, p. 733 (adaptado)

A ferramenta é acionada ao mesmo tempo por dois movimentos, de corte e de avanço:

- máquina de serrar alternativa

A FIG 2.33 apresenta o esquema de uma máquina de serrar alternativa.

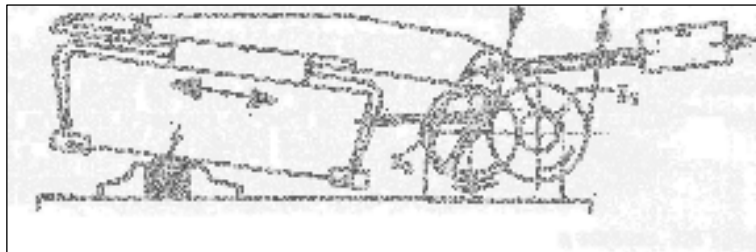


FIGURA 2.33 – Esquema de uma máquina de serrar alternativa
FONTE: FREIRE, 1989, p. 5, (adaptado)

O serramento pode ser definido como “processo mecânico de usinagem destinado ao seccionado ou recorte com auxílio de ferramentas multicortantes de pequena espessura.” (FERRARESI, 1977, p.35).

A ferramenta ou a peça animada ao mesmo tempo dos dois movimentos, de corte e de avanço:

- brochadeira.

A FIG 2.34 apresenta o esquema de uma brochadeira vertical.

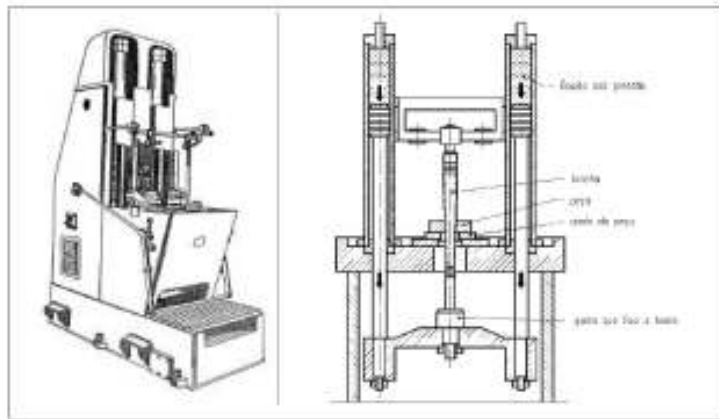


FIGURA 2.34 – Esquema de uma brochadeira vertical
 FONTE: HAMILTON, 2002 (adaptado)

2.3.2.3 Máquinas em que o movimento de corte é circular

A peça é animada de movimento de corte e a ferramenta de movimento de avanço:

- torno horizontal;
- torno vertical;
- torno de placa.

O processo de usinagem de torneamento pode ser definido como “processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes.” (FERRARESI, 1977, p.26).

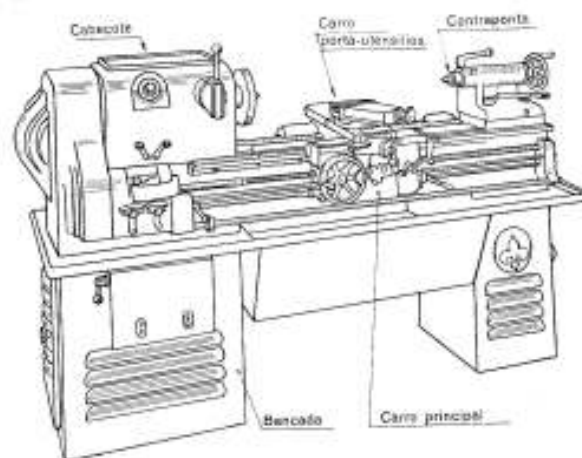
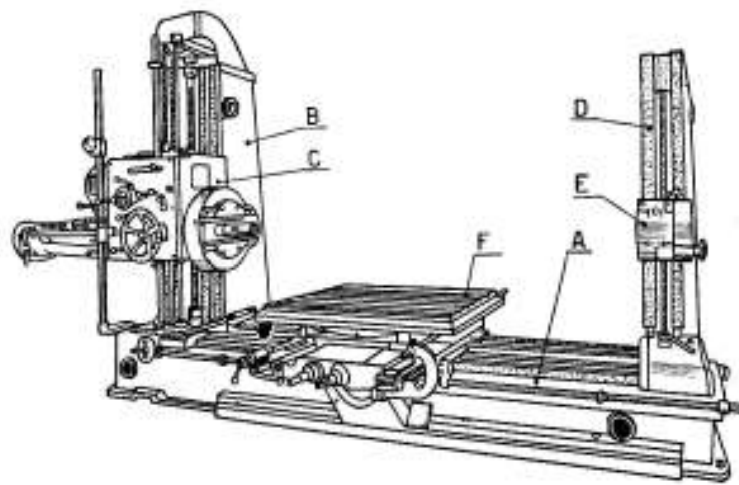


FIGURA 2.35 – Esquema de um torno mecânico
 FONTE: ROSSI, 1970, p. 238. (adaptado)

A ferramenta é animada às vezes de movimento de corte e de movimento de avanço:

- máquinas de mandrilhar ou mandrilhadora.

O mandrilhamento pode ser definido como “processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução, como auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam simultaneamente segundo uma trajetória determinada.” (FERRARESI, 1977, p.28).



A. mandril; B. cabeçalho; C. cabeçalho rotacionável; D. suporte da barra; E. barra; F. peça.

FIGURA 2.36 – Esquema de uma Mandrilhadora
 FONTE: ROSSI, 1970, p. 477 (adaptado).

A ferramenta é animada de movimento de corte e a peça de movimento de avanço:

- máquinas de fresar ou fresadoras.

O fresamento pode ser definido como “processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer como auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer.” (FERRARESI, 1977, p.28).

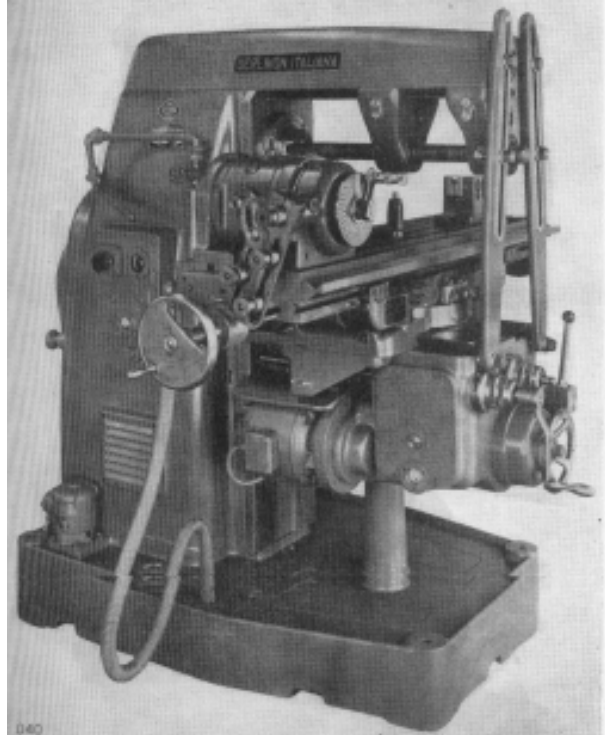


FIGURA 2.37 – Fresadora Universal
 FONTE: ROSSI, 1970, p. 653, (adaptado).

A ferramenta é animada ao mesmo tempo de movimento de corte e de movimento de avanço:

- máquinas de furar;
- máquinas de serrar (circulares).

O processo de furar pode ser definido como “processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina.” (FERRARESI, 1977, p.29).

2.3.2.4 Máquinas que trabalham com ferramentas abrasivas

As máquinas mais conhecidas que usam ferramentas abrasivas são conhecidas como retificadoras, podendo ser planas ou cilíndricas. A retificação pode ser definido como “processo de usinagem por abrasão destinado à obtenção de superfícies com auxílio de ferramenta abrasiva de revolução. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória determinada, podendo a peça girar ou não.”(FERRARESI, 1977, p.37).

2.4 História do CNC

2.4.1 Os primórdios das máquinas ferramentas

“A Revolução Industrial pode ser dita que se iniciou com o escocês James Watt (projetando a máquina a vapor), deste modo ele também criou a necessidade pela indústria de máquinas ferramentas, pois ficou bastante óbvio que sem uma máquina ferramenta que usinasse cilindros com razoável precisão ele não poderia construir motores, porque não havia meios de usinar cilindros nos seus primeiros empenhos.” (AZEVEDO, 2006).



FIGURA 2.38 – James Watt e sua máquina
FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

2.4.2 O desenvolvimento dos primeiros controles

“Durante a Revolução Industrial houve outro desenvolvimento necessário para a introdução das ferramentas controladas por números, o desenvolvimento de controles automáticos. O controle do som, um dos esforços iniciais no controle automático ocorreu em torno de 1650 na Holanda quando tambores rotativos foram equipados com pinos para tocar carrilhões automáticos. Estes foram mais tarde miniaturizados e aperfeiçoados nas populares caixinhas de música. O primeiro tocador automático de piano, patenteado por M. Fourneau em 1863 utilizava um grande rolo de papel com 12 polegadas de largura, perfurado de modo que o ar pudesse passar pelos furos para ativar teclas apropriadamente. Este piano podia produzir apenas notas de intensidade uniforme, em 1930, porém, eles estavam tão desenvolvidos que podiam simular controles de pedais, variações amplificadas, e deste modo produzir músicas que certamente podiam se perceber as diferenças das tendências dos autores pianistas. Um dos últimos produzido continha oito furos extras de cada lado de modo a regular 82 canais das teclas. Estes canais extras possibilitaram o controle da intensidade do som, o tom da atuação dos pedais, velocidade da fita e muitas outras variáveis. Isto sem

dúvida foi muito importante para o desenvolvimento das máquinas CNC, pois o sistema de fita perfurada com passagem de ar pelos furos foi largamente usado e até a década de 80 podiam se encontrar máquinas CNC com sistema semelhante.

No início de 1700, M. Falcon inventou uma máquina de tricotar controlada por cartões perfurados. Cada um dos muitos cartões era sincronizado em uma seqüência para atuar na máquina de tricotar. Cada furo em um dado cartão atuava um acoplamento mecânico o qual impulsionava uma agulha associada com uma coluna particular no cartão para puxar uma linha colorida através do tecido naquele certa posição.

Em 1807, J. M. Jacquard inventou um cartão de controle melhorado para máquinas de tricotar e permitiu a máquina de tecer uma alta produtividade e baixo custo por unidade, o qual ainda é usado em produções modernas. Para alto volume de produção as máquinas de tricotar usavam discos de engrenagens com padrão de dentes periféricos, tais máquinas são análogas a máquinas automáticas de parafusos ou máquinas de traçagem nas indústrias de corte de metais.” (AZEVEDO, 2006).

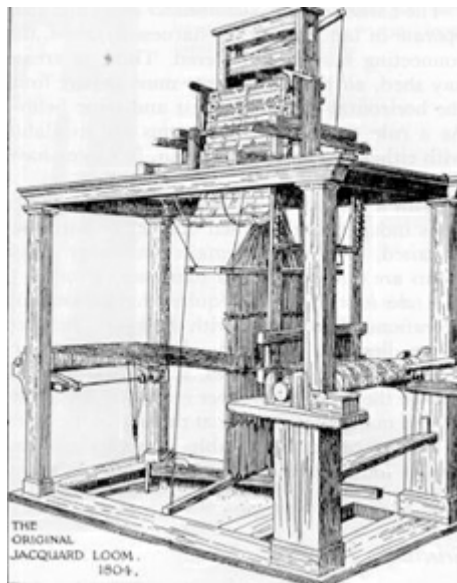


FIGURA 2.39 – A máquina de Jacquard
FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

2.4.3 O desenvolvimento dos computadores

“O computador apareceu em 1945 quando o ENIAC foi desenvolvido pelo departamento de ordenação do exército dos EUA. Esta era uma máquina bastante lenta e não possuía programas armazenados em memória. E as informações seqüenciais precisavam ser inseridas por meios externos.

Nos primórdios de 1900 Herman Hollerith desenvolveu um sistema de armazenamento de dados por cartões perfurados para o departamento de recenseamento dos EUA. Durante a segunda guerra mundial, John Von Neumann projetou o computador de programas armazenados digitalmente o qual se tornou uma peça essencial para o comércio e indústria complexa.” (AZEVEDO, 2006).



FIGURA 2.40 – Máquina de cartões perfurados de Herman Hollerith
FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

2.4.4 O aparecimento e aperfeiçoamento dos Controles Numéricos

“No curso da revolução industrial, tinham sido achados meios para reduzir o esforço físico exigido para se desenvolver o processo industrial. Computadores para fácil acumulação, armazenagem, e processamento de dados poderiam aliviar as memórias dos homens e ajudar no exercício do poder da lógica. Reconhecidamente, foi inevitável o desejo de prover uma ligação entre estes dois desenvolvimentos. Deste modo o que por alguns foi chamado de segunda revolução industrial, tinha começado. Em 1912, Scheyer solicitou a patente da máquina de cortar algodão aos E.U.A. o qual tinha como objetivo prover os meios para ou controlar movimento em qualquer direção ou espaço em um ou vários planos para movimentos angulares por meio de uma gravação preparada previamente em uma folha perfurada de papel ou outro material. Em 1949, a força aérea dos E.U.A. estava certa que máquinas ferramentas convencionais manuais não poderiam ser confiáveis para manter lado a lado as freqüentes mudanças e ao mesmo tempo prover adequada produção de componentes de aviões em uma emergência. Baseado na experiência de uma pequena empresa fabricante de hélices e rotores de helicópteros na época a Parsons Corporation®, que em 1947 havia experimentado colocar uma forma rudimentar de controle por números em uma máquina de usinagem convencional, ligando esta máquina a um computador que era alimentado por informações via cartões perfurados. A USAF, força aérea norte americana, então ao

reconhecer um possível grande avanço na fabricação de aviões e material bélico, contratou a Parsons e patrocinou estudos e desenvolvimento do controle numérico, e assim planejaram e executaram as adaptações de controle numérico para uma máquina ferramenta convencional da Cincinnati Milling Machine Company® (atualmente um dos maiores fabricantes de Máquinas CNC). Foi adotada naquela ocasião uma fresadora de três eixos, a Hydrotel, como alvo das novas experiências, e deste modo criaram o protótipo de uma máquina CN. A demonstração prática da máquina ocorreu em março de 1952 no MIT, Instituto de Tecnologia de Massachusetts, e o relatório final do novo sistema somente foi publicado em maio de 1953. Estes estudos foram estendidos para incluir o desenvolvimento de sofisticadas rotinas computacionais por fitas perfuradas e os estudos da evolução do controle numérico. Os resultados foram excepcionais e demonstraram uma mudança revolucionária nas indústrias de transformação. O ímpeto dado pela força aérea norte americana permitiu um rápido desenvolvimento de uma variedade de controle de máquinas e sistemas de armazenamento de dados. Muitos formatos diferentes foram aplicados, fita magnética, cartão perfurado, fita perfurada, e mais atualmente, disquetes e sistemas de dados centralizados.” (AZEVEDO, 2006).

2.4.5 A padronização

“A partir de 1957, houve nos Estados Unidos, uma grande corrida na fabricação de máquinas comandadas por CN. Até então os industriais investiam em adaptações do CN em máquinas convencionais. Este novo processo foi cada vez mais usado na rotina de manufatura, que a partir deste ano, com todos os benefícios que haviam obtido deste sistema, surgiram novos fabricantes que inclusive já fabricavam seus próprios comandos.

Devido ao grande número de fabricantes, começaram a surgir os primeiros problemas, sendo o principal a falta de uma linguagem única e padronizada. A falta de padronização era bastante sentida nas empresas com mais de uma máquina, fabricadas por diferentes fornecedores, cada um deles tinha uma linguagem própria, com a necessidade de uma equipe técnica especializada para cada tipo de comando, elevando os custos de fabricação.

Em 1958, por intermédio da EIA (Electronic Industries Association) organizaram-se estudos no sentido de padronizar os tipos de linguagem. Houve então a padronização de entrada conforme padrão RS-244 que depois passou a EIA244A ou ASC II.

A linguagem destinada à programação de máquinas era a APT (Automatically Programmed Tools), desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1956. Daí para frente foram desenvolvidas outras linguagens para a geração contínua de contornos como AutoPrompt (Automatic Programming of Machine Tools), ADAPT, Compact II, Action, e outros que surgiram e continuam surgindo para novas aplicações.

Atualmente a ISO (International Organization for Standardization), entidade de padronização de maior aceitação mundial regulariza o maior e mais aceito conjunto de normas para se usar na tecnologia CNC.” (AZEVEDO, 2006).

2.4.6 As máquinas CNC no Brasil

Em 1967, as primeiras máquinas controladas numericamente chegaram ao Brasil, vindas dos Estados Unidos. No início da década de 70, surgem no Brasil as primeiras máquinas CN de fabricação nacional (MACHADO, 1990).

A partir daí, observa-se uma evolução contínua e notável concomitantemente com os computadores em geral, fazendo com que os comandos (CNC) mais modernos empreguem em seu conceito físico (hardware) tecnologia de última geração (AZEVEDO, 2006).

2.5 Benefícios do uso de máquinas ferramentas CNC

Usar uma máquina CNC não significa substituir o operador por um computador. Pode-se fazer qualquer coisa que se faz em uma máquina CNC em máquinas convencionais. As únicas diferenças em questão de produtividade são o tempo de produção e a repetibilidade das peças, sendo que em alguns casos a diferença de tempos pode ser considerada infinita, pois a complexidade das peças pode exigir um empenho sobre-humano do operador.

O primeiro benefício oferecido por todas as formas de máquinas ferramentas CNC é sem dúvida a automatização. A intervenção de operador relacionada a peças produto é drasticamente reduzida ou eliminada. Muitas máquinas CNC podem rodar sem nenhum acompanhamento humano durante um ciclo de usinagem completo, permitindo ao operador tempo livre para desempenhar outras tarefas. Isto permite ao usuário CNC vários benefícios que incluem fadiga de operador reduzida, menos enganos causados por erro humano, usinagem consistente e em tempo previsível para cada produto. Considerando que a máquina estará correndo sob controle de um programa, o nível de habilidade requerido do operador de

CNC (relacionado à prática de usinagem é básico) também é reduzido quando comparado a um operador de máquinas ferramentas convencionais.

O segundo benefício da tecnologia CNC é a produção de peças consistentes e precisas. As máquinas CNCs de hoje ostentam precisão incrível ao seguir especificações e também quanto a repetitividade. Isto significa que uma vez que um programa esteja testado e aprovado, podem ser produzidos dois, dez, ou mil produtos com precisão e consistência adequadas.

Um terceiro benefício oferecido pela maioria das máquinas ferramentas CNCs é a flexibilidade. Uma vez que um programa foi verificado e foi executado para produção, pode ser substituído facilmente por um próximo tipo de peça a ser cortada. Isto nos leva a outro benefício, o de trocas rápidas de "setup". Isto é imperativo com as exigências de produção dos nossos dias. Além destes ainda podemos citar outros benefícios (AZEVEDO, 2006):

- Enorme conforto operacional.
- Os programas podem ser feitos, tanto ao pé da máquina, como no escritório, com o apoio de computadores.
- Gerenciamento do trabalho de diversas máquinas interligadas em rede a um computador.
- Capacidade de realizar cálculos geométricos.
- Realizar simulações gráficas.
- Dispor de banco de dados tecnológico, ou seja, indicando-se o material a ser usinado obtém-se os valores dos avanços e velocidades de corte, além da indicação do tipo de ferramenta de corte.
- Sistemas para medição automática das coordenadas das ferramentas de corte.
- Sistemas para medição automática de peças em processo.
- Sistemas para diagnósticos de falhas.

O Comando Numérico é largamente usado em máquinas de usinagem, porém sua aplicação vem se ampliando de tal forma que praticamente não existe campo nos meios fabris que não tenham sido atingidos por esta tecnologia. Empresas, principalmente as de transformação de metais, não podem deixar de planejar suas atividades sem considerar a tecnologia CNC, pois isso pode significar a diferença entre a continuidade e a extinção.

Aqui estão relacionadas algumas áreas de aplicações industriais para máquinas CNCs:

- Usinagem;
- Soldagem;
- Corte (puncionadeiras, prensas, etc.);
- Injeção de materiais;
- Inspeção e medição;
- Sistemas de montagem;
- Manuseio de materiais;
- Alimentadores de material

2.6 Fundamentos dos Comandos Numéricos

2.6.1 Introdução

O Controle Numérico (CN), em sua definição mais simples, é toda a informação geométrica e dimensional contida em uma peça, conhecida por meio de desenhos e cotas. Estas seriam entendidas e processadas pela máquina CNC, possibilitando a automação da operação. Atualmente, a utilização do Controle Numérico Computadorizado (CNC), é a saída mais apropriada para a solução dos mais complexos problemas de usinagem. Onde anteriormente se exigia uma máquina ou uma ferramenta especial, atualmente é feito com o CNC de uma forma muito simples (AZEVEDO, 2006).

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) é um equipamento eletrônico que recebe informações da forma em que a máquina vai realizar uma operação, por meio de linguagem própria, denominada programa CNC, processa essas informações e devolve-as ao sistema através de impulsos elétricos.

Os sinais elétricos são responsáveis pelo acionamento dos motores que darão à máquina os movimentos desejados com todas as características da usinagem, realizando a operação na seqüência programada sem a intervenção do operador.

2.6.2 O Controle dos Movimentos

“A função básica de qualquer máquina CNC é o controle de movimento automático, preciso, e consistente. Todo equipamento CNC tem duas ou mais direções de movimento, os chamados eixos. Estes eixos podem ser preciso e automaticamente posicionados ao longo dos seus movimentos de translação. Em vez de serem movimentadas virando manivelas manualmente como é feito em máquinas ferramentas convencionais, as máquinas CNCs têm seus eixos movimentados sob controle de servos motores ou motores a passo guiados pelo programa de peça. Em geral, o tipo de movimento (rápido, linear e circular) para os eixos se moverem, a quantidade de movimento e a taxa de avanço (feed rate) são programáveis em quase todas as máquinas ferramentas CNC. A FIG 2.41 mostra o controle de movimento de uma máquina convencional. A FIG 2.42 mostra um movimento de eixo linear de uma máquina CNC.” (AZEVEDO, 2006).

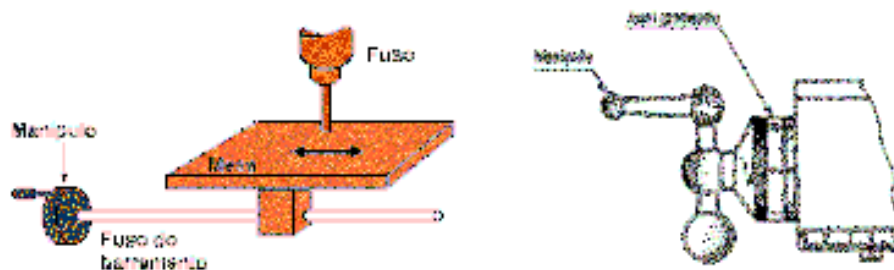


FIGURA 2.41 – O movimento da mesa de uma máquina convencional.
FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

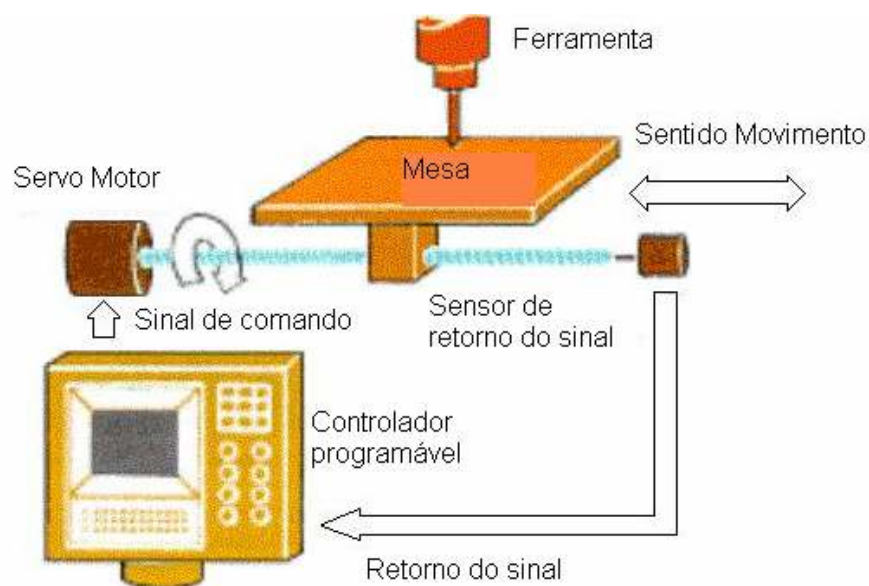


FIGURA 2.42 – Sistema de acionamento de uma máquina CNC.
FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

“Um comando CNC executado dentro do controle (comumente por um programa) diz para o servo motor girar um número preciso de vezes, girando o fuso que passa em um suporte da mesa que está montada sobre o barramento (guias), quando o fuso gira os sulcos do mesmo, força a mesa em uma direção e esta desliza sobre o barramento de apoio gerando movimento em uma direção. Este fuso movimentava o eixo linear. Um dispositivo de avaliação no final oposto deste fuso roscado permite o controle para confirmar que o número comandado de rotações aconteceu.” (AZEVEDO, 2006).

2.6.3 O Sistema de eixos coordenados

Todos os controles CNC permitem comandar o movimento do eixo de um modo muito mais simples e mais lógico utilizando alguma forma de sistema de coordenada. Os dois sistemas de coordenadas mais populares da maioria, usados nas máquinas CNCs é o sistema de coordenada cartesiano ou coordenada retangular e o sistema de coordenada polar.

O programador de CNC plotará os pontos do final físico para cada movimento de eixo. Cada eixo linear da máquina ferramenta pode ser pensado como uma linha básica do gráfico. Cada eixo linear do sistema de coordenada retangular de uma máquina CNC está dividido em incrementos mensuráveis em mm (medida de distância). No modo de polegadas, o incremento menor pode ser 0.0001 polegada. No modo métrico, o incremento menor pode ser 0.001 milímetro. (A propósito, para eixo rotativo o incremento chega a 0.001 graus).

O ponto de origem é chamado comumente de ponto zero (também chamado de zero de trabalho, zero peça, ou origem do programa).

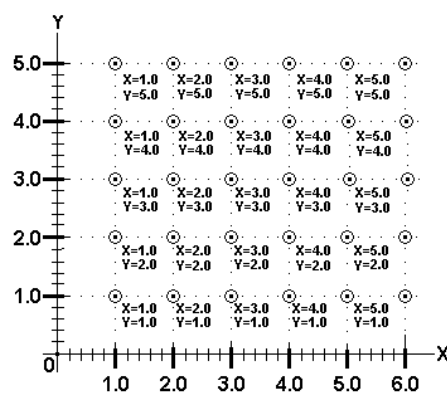


FIGURA 2.43 – O sistema de coordenada retangular para o plano XY.
FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

O ponto zero estabelece a referência para movimento comandado em um programa de CNC. A FIG 2.47 mostra como são comandados os movimentos de eixo. Como por exemplo, os dois eixos que está sendo mostrado são chamados de X e Y, mas lembrando que no programa o zero pode ser aplicado a qualquer eixo. Embora o nome de cada eixo mude para cada tipo de máquina CNC, há outros (outros nomes comuns incluem Z, A, B, C, U, V, e W). Como pode ser observado a posição mais baixa no canto e mais a esquerda da peça será correspondente à posição zero para cada eixo. Antes de escrever o programa, o programador deverá determinar a posição zero do programa. Tipicamente, o ponto zero do programa é escolhido como o ponto onde todas as dimensões se iniciam.

Com esta técnica, se o programador deseja enviar a ferramenta a uma posição 10 milímetros à direita do ponto zero do programa, X10.0 é comandado. Se o programador deseja que a ferramenta mova-se a uma posição de 10 milímetros sobre o ponto zero do programa, Y10.0 é comandado.

O controle determinará quantas vezes automaticamente irá girar o servo motor de cada eixo e assim fazer o eixo alcançar o ponto de destino comandado. Isto faz com que o programador comande o movimento de eixo de uma maneira muito lógica.

Com o exemplo dado, todos os pontos aconteceram para cima e à direita do ponto zero do programa. Esta área acima e à direita do ponto zero do programa é chamado de primeiro quadrante (neste caso, quadrante número um). Não são raras máquinas CNC que trabalhem em outros quadrantes. Quando isto acontecer, pelo menos uma das coordenadas deve ser especificada como negativa. A FIG 2.44 mostra a relação dos quatro quadrantes como também as representações "mais e menos" que requereram para cada (AZEVEDO, 2006).

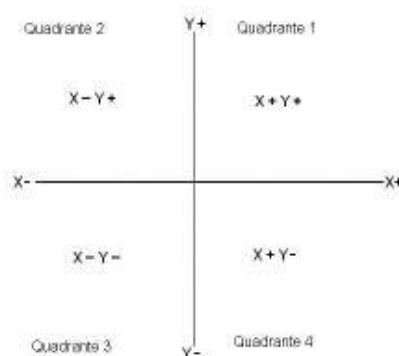


FIGURA 2.44 – Quadrantes

FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

2.6.4 Programação CNC

Quase todos os controles de CNCs atualmente usam um único formato de endereço de palavra para se programar. As únicas exceções para isto são certos controles sociáveis. Através deste formato de endereço de palavra, queremos dizer que o programa CNC é feito sobre sentenças de comandos. Cada comando é composto de palavras CNC e cada qual têm seu endereço de letras e valores numéricos. O endereço de letra (X, Y, Z, etc.) diz ao controle o tipo de palavra e o valor numérico diz ao controle o valor da palavra. Usado como palavras e sentenças no idioma português, palavras em um comando CNC dizem às máquinas CNCs o que é que desejamos fazer, usando este bloco de comando em linguagem CNC.

O QUADRO 2.1 apresenta um exemplo de um programa curto onde se deseja executar dois furos em uma peça em um centro de usinagem CNC.

QUADRO 2.1
Blocos de comando e descrição

O0001	Número de Programa
N005 G54 G90 S400 M03	Seleciona as coordenadas, sistema absoluto e o fuso devem girar no sentido horário a 400 RPM.
N010 G00 X1. Y1.	Rápido para o local de XY do primeiro furo.
N015 G43 H01 Z.1 M08	Inicia a compensação de comprimento de ferramenta, rápido em Z para posição acima da superfície para furar, liga o refrigerante.
N020 G01 Z-1.25 F3.5	Avance para o primeiro furo a 3,5 polegadas por minutos.
N025 G00 Z.1	Rápido para fora do furo.
N030 X2.	Rápido para o Segundo furo.
N035 G01 Z-1.25	Avance para o Segundo furo
N040 G00 Z.1 M09	Rápido para fora do segundo furo, desliga o refrigerante.
N045 G91 G28 Z0	Retorno para posição de referência em Z.
N050 M30	Fim de programa, rebobinar a fita.

FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

Os programas são compostos de comandos e comandos são compostos de palavras. Cada palavra tem um endereço de letra e um valor numérico. O endereço de letra diz para o controle o tipo de palavra. Os fabricantes de controle CNC variam com respeito a como eles determinam os nomes das palavras (letra e direção) e os significados delas.

Aqui está uma lista breve de algumas dos tipos de palavras e as especificações de endereço de letra mais comuns:

O - Número de Programa (Usado para identificação de programa)

N - Número de Sucessão (Usado para identificação de linha)

G - Função Preparatória (Veja abaixo)

X - Eixo X

Y - Eixo Y

Z - Eixo Z

R - Raio

F - Taxa de avanço

S - Rotação do fuso

H - Compensação de comprimento da ferramenta.

D - Compensação de raio da ferramenta.

T - Ferramenta

M - Função miscelânea

Como se pode ver, muitos dos endereços de letra são escolhidos de uma maneira lógica (T para ferramenta “tool”, S para fuso “spindle”, F para taxa de alimento “feedrat”, etc. Há duas letras diretoras (G e M) que permitem designar funções especiais. A função preparatória (G) especificamente é usada para fixar modos de atuação da máquina: O modo absoluto é especificado por G90 e modo incremental especificado por G91.

Como as funções preparatórias, as funções miscelâneas (M) permitem uma variedade de funções especiais. Funções miscelâneas são tipicamente usadas como interruptores programáveis (como liga e desliga do fuso, liga e desliga o refrigerante, e assim por diante). Estas funções também são usadas para permitir programação de muitas outras funções das máquinas ferramenta CNC.

Certas letras dos programas CNC permitem a especificação de números reais (números que requerem porções de um número inteiro). Exemplos incluem eixo X (X), o eixo Y(Y), e raio (R). Quase todos os modelos de controles CNC atuais permitem usar um ponto decimal dentro da especificação de cada endereço de letra. Por exemplo, X3.0625 pode ser usado para especificar uma posição ao longo do eixo de X.

Por outro lado, alguns endereços de letra são usados para especificar números inteiros. Os exemplos incluem: o número da ferramenta (T), sucessão dos números dos blocos (N), funções preparatórias (G), e funções miscelâneas (M). Para estes tipos, a maioria dos controles não permite usar um ponto decimal. Nos manuais dos fabricantes, estarão especificadas as letras que por ventura possuam pontos decimais (AZEVEDO, 2006).

2.7 Principais componentes de uma máquina CNC

A parte mecânica da máquina é similar a uma máquina-ferramenta convencional, com os mesmos componentes usuais: guias, barramentos, fusos, porta-ferramenta e etc. Porém, apresentam outros componentes que são descritos a seguir.

2.7.1 Fusos

Fusos de esferas são elementos de transformação de movimento de rotação em movimento linear e vice-versa com alta eficiência, por meio de transmissão por esferas. A FIG 2.45 apresenta exemplos de fusos de esferas.



FIGURA 2.45 – Fusos de esferas da LK[®]
FONTE: www.lk.ind.br, 2007 (adaptado)

Os fusos de rosca trapezoidal apresentam menor precisão de deslocamento e menor rendimento. No entanto, geralmente apresentam menores custos e podem ser utilizados

com dispositivos eliminadores de folga para aumentar a precisão de deslocamento. A FIG 2.60 apresenta exemplos de fusos de rosca trapezoidal.

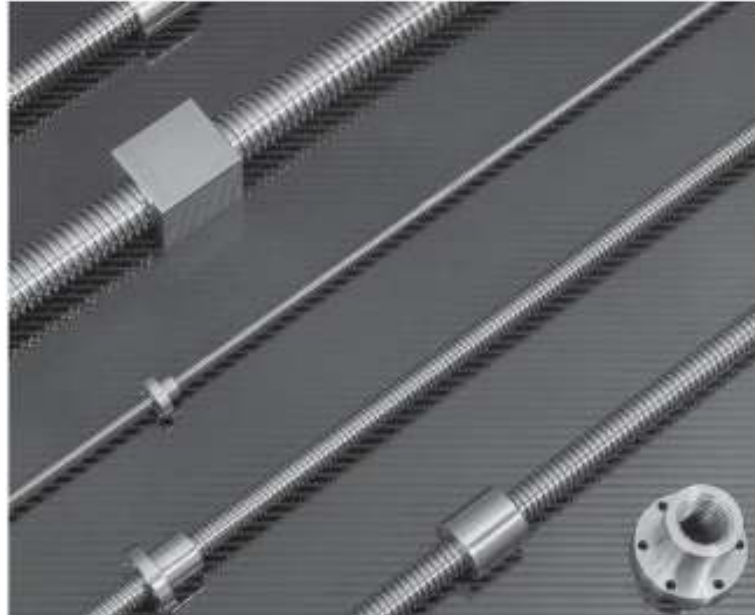


FIGURA 2.46 – Fusos de rosca trapezoidal da TEKKNO®
FONTE: www.mercadobr.com.br, 2007 (adaptado)

2.7.2 Guias lineares

O sistema de guias lineares são muito utilizados em máquinas CNC ou em dispositivos de automação. Apresentam menor coeficiente de atrito e maior precisão. No entanto, apresentam menor rigidez que o sistema de guias usados em máquinas-ferramentas convencionais. A FIG 2.47 apresenta um exemplo de guia linear.

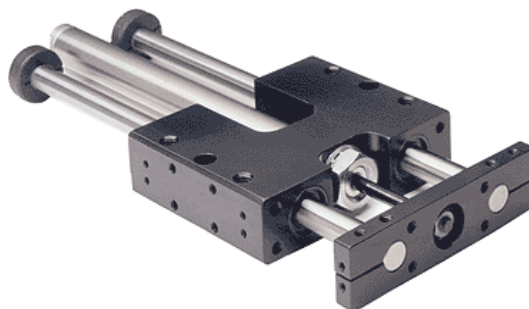


FIGURA 2.47 – Exemplo de uma guia linear
FONTE: www.cobrasmam.com.br, 2006 (adaptado)

A FIG 2.48 apresenta um outro exemplo de guias lineares utilizados em equipamentos de automação, conhecido como guia linear dupla em “V”.

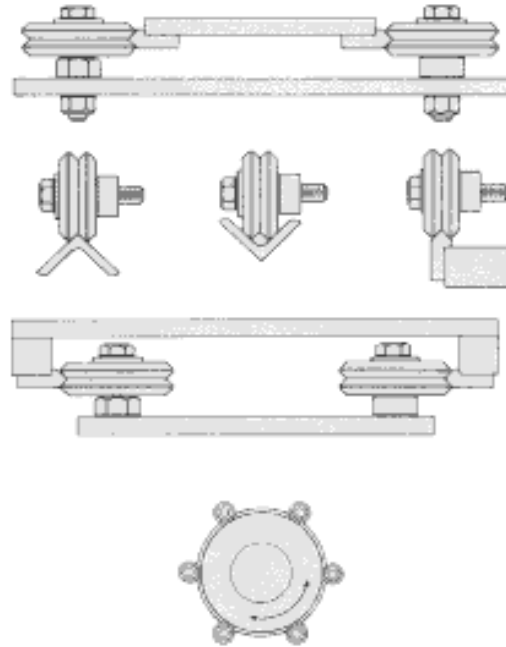


FIGURA 2.48 – Guia linear dupla em “V”
FONTE: www.cobrasmam.com.br, 2006 (adaptado)

2.7.3 Comando ou Controle Numérico

O Comando ou Controle Numérico é o equipamento responsável pela interpretação do programa CNC e tradução em comandos que são enviados ao PLC e aos *microswitches* para acionamento dos eixos. É ainda responsável pelo gerenciamento da interface da máquina com o operador – *display*, botões, acionadores, etc.

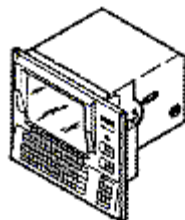


FIGURA 2.49 – Exemplo de “display” do controle numérico
FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

Os PLCs auxiliam os controles nos cálculos matemáticos, controlador lógico programável, também chamado CLP ou controlador programável, é um dispositivo de computador que controla equipamentos em oficinas industriais. A quantidade de equipamentos que os PLCs podem controlar são tão variados quanto as instalações industriais em que estão presentes. Sistemas de transportador, linhas de máquinas de processamento de alimentos, máquinas CN e até mesmo em um sistema de elevadores prediais, provavelmente haverá um PLC para controlar estas coisas. Em um sistema de controle industrial tradicional, todos os dispositivos de controle são enviados eletrônica e diretamente de um para outro de acordo como é suposto que o sistema opera (AZEVEDO, 2006).

2.7.4 Motor a passo

O motor a passo gira na velocidade e tempo necessários para que cada eixo atinja os valores de posição e velocidades, estipulados em cada bloco do programa CNC. A FIG 2.50 apresenta um motor a passo utilizado em máquinas CNC.

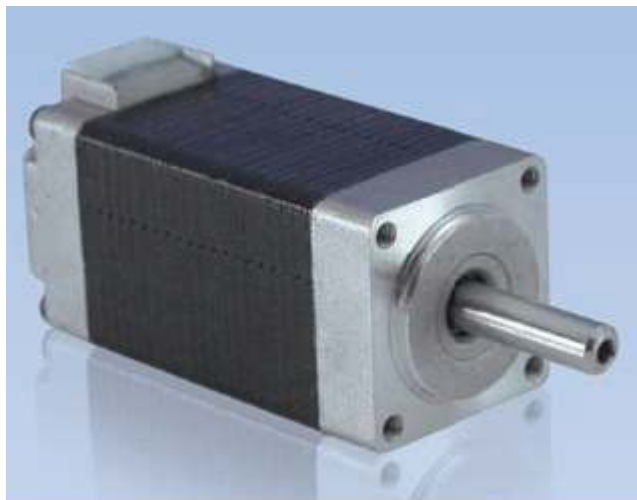


FIGURA 2.54 – Exemplo de motor a passo de máquina CNC
FONTE: www.linengineering.com, 2006 (adaptado)

2.7.5 Sistemas de eixos

Uma máquina pode possuir vários movimentos, normalmente classificados em movimentos de translação ou rotação. Costuma-se dizer que cada um desses movimentos é um “eixo” da máquina, associando-se uma letra a ele. Na FIG 2.51 a seguir, temos uma mandriladora com os eixos X, Y e Z, correspondendo respectivamente aos movimentos longitudinal, vertical e transversal, e uma fresadora com quatro eixos lineares, X, Y, Z e W, e dois eixos rotativos, B e C.

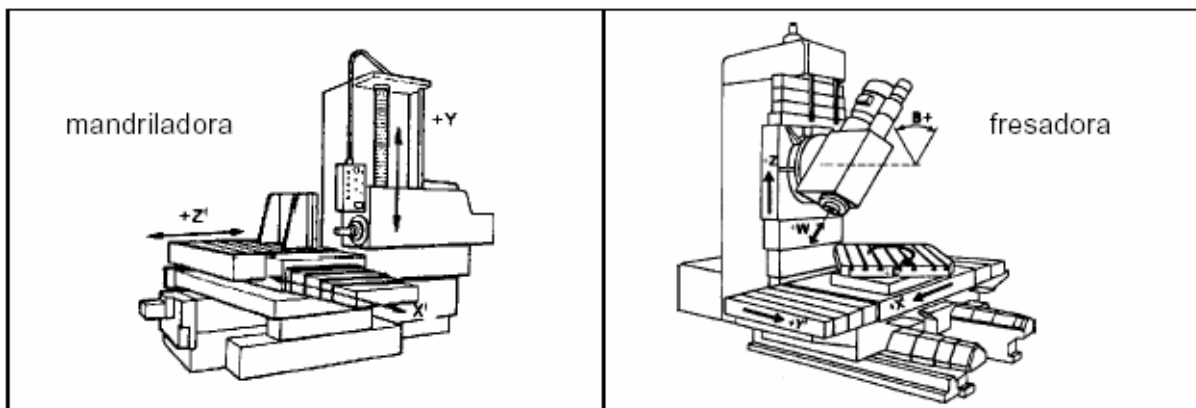


FIGURA 2.51 – Esquema de sistema de eixos de uma mandriladora e fresadora
 FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

Embora uma máquina possa apresentar vários movimentos, nem sempre ela é capaz de realizar todos ao mesmo tempo. Assim, a mandriladora da FIG 2.51, embora possua três eixos, pode, devido a restrições de *hardware* e *software*, ser capaz apenas de realizar dois movimentos ao mesmo tempo. Assim, costuma-se dizer nesse caso que, embora a máquina possua fisicamente três, ela é na realidade uma máquina de dois eixos. Logo, “eixo” pode ser um conceito relacionado a quantos movimentos a máquina tem ou a quantos movimentos ela pode realizar ao mesmo tempo. O significado depende da situação descrita naquele momento.

A cada um dos eixos da máquina associa-se um servo-motor ou motor a passo, com velocidade e aceleração que podem ser controladas pelo comando numérico e por *drivers*. O servo-motor representa o elo entre a mecânica e a eletrônica.

A eletrônica, num primeiro momento, simplificou a estrutura mecânica da máquina. Muitas peças deixaram de ser utilizadas graças à presença do servo-motores. Esses motores fizeram com que as caixas de mudança de velocidade, compostas por um grande número de engrenagens, praticamente desaparecessem. Num torno ou numa fresadora CNC, a rotação da placa ou do cabeçote, bem como as velocidades de translação ou rotação dos eixos, é

estabelecida simplesmente por meio de funções de programação, como já vimos. O comando numérico da máquina envia uma ordem ao *driver*, encarregado do acionamento do motor. Mecanicamente, isso é muito mais simples, como pode ser visto na FIG 2.52.

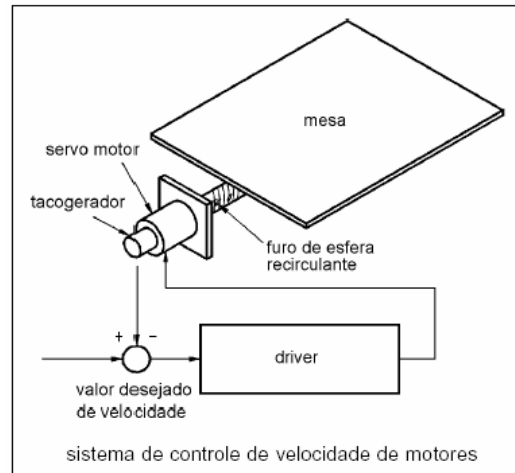


FIGURA 2.52 – Sistema de controle de velocidade de motores
 FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

A tecnologia eletrônica, além de permitir simplificar a estrutura mecânica, criando comandos numéricos cada vez mais compactos, confiáveis, econômicos e precisos, forçou o aprimoramento dos componentes mecânicos. Para evitar que atritos e folgas afetem a precisão da máquina, a indústria mecânica desenvolveu componentes cada vez mais sofisticados. Assim, os fusos de perfil trapezoidal deram lugar aos fusos de esferas recirculantes. Na FIG 2.53 apresenta um esquema dos fusos e guias usados em máquinas CNC. Esses fusos apresentam maior rendimento na transmissão de esforços mecânicos, pois é pequeno o atrito entre as esferas e as pistas da castanha e do fuso.

As guias de deslizamento das máquinas também foram substituídas por guias lineares, mais precisas e eficientes. A confiabilidade e vida útil desses componentes também são maiores em relação aos fusos e guias tradicionais.



FIGURA 2.53 – Esquema de fusos e guias usados em máquinas CNCs
 FONTE: www.mundocnc.com.br, 2006 (adaptado)

Outro aspecto importante sobre os eixos de máquinas CNC seria onde estes eixos se movimentam, ou seja, os eixos podem movimentar o cabeçote da máquina e a mesa fica parada ou vice-versa, ou então alguns eixos movimentam a mesa e outros o cabeçote, as combinações podem ser muitas (AZEVEDO, 2006).

2.8 Forças e potências de usinagem

No desenvolvimento do projeto é fundamental conhecer as forças e potências necessárias para usinagem dos materiais, para dimensionamento dos motores e componentes estruturais da máquina-ferramenta (DINIZ et al, 2001).

Existem pelo menos duas abordagens para o cálculo das forças e potências de usinagem. A primeira delas é teórica, onde é utilizada a teoria de formação do cavaco e utilizando-se de algumas simplificações como a suposição de corte ortogonal. Na segunda abordagem, utiliza-se o método empírico, onde se consegue equações e coeficientes através de procedimentos experimentais (DINIZ et al, 2001).

Neste trabalho utilizaremos a segunda abordagem, devido ao fato de ser satisfatoriamente precisa e pela relativa simplicidade de seu uso.

2.8.1 Forças durante a usinagem

A força total atuante na cunha cortante da ferramenta durante a usinagem é chamada força de usinagem (F_u). Inicialmente, como não é conhecido a direção nem o sentido dessa força, torna-se necessário trabalhar com suas componentes conhecidas: força ativa (F_t), força passiva (F_p) e força de apoio (F_{ap}). No entanto, a força ativa pode ser decomposta em força de corte (F_c) e força de avanço (F_f) que são as forças principais que atuam no plano de

trabalho (plano formado pela velocidade de corte e pela velocidade de avanço). Na FIG 2.54 podemos ver as referidas forças, velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f) e a velocidade efetiva (V_e).

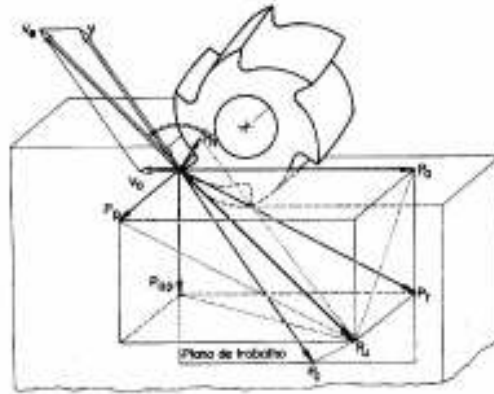


FIGURA 2.54 – Componentes da força de usinagem
 FONTE: FERRARESI, 1977, p. 74 (adaptado)

2.8.2 Força de Corte

A força de corte pode ser dada pela relação:

$$F_c = K_s \cdot S \quad (2.6)$$

Onde:

K_s = pressão específica de corte [N/mm^2], isto é, força de corte por unidade de área da secção de corte. E,

S = área da secção de corte [mm^2].

2.8.2.1 Pressão específica de corte

Vários pesquisadores propuseram fórmulas analíticas para o cálculo da pressão específica de corte (K_s), como Taylor, Schlesinger, Friedrich, Hippler, AWF, ASME, Kronenberger, dentre outros. No entanto, Kienzle apresentou em 1951 uma relação relativamente simples e suficientemente precisa para determinar a pressão específica de corte em função da espessura de corte (h). Kienzle observou no gráfico, em coordenadas bilogarítmicas, o comportamento da pressão específica de corte em função da espessura de

corte (h) para um par ferramenta-peça, que os pontos se alinhavam numa reta. Assim, ele pode estabelecer a relação (FERRARESI, 1977):

$$y = a + bx,$$

ou seja,

$$\log K_s = \log K_{s_1} - z \cdot \log h,$$

então,

$$K_s = \frac{K_{s_1}}{h^z} \quad (2.7)$$

Onde:

K_{s_1} = constante específica do material para uma secção de corte de 1mm de espessura por 1mm de largura [N/mm^2],

z = coeficiente angular da reta [adimensional] e

h = espessura de corte [mm].

2.8.3 Potências de usinagem

A força ativa composta pela força de corte e pela força de avanço é responsável pelo dimensionamento dos motores das máquinas-ferramenta, para realização do movimento de corte e pelo movimento de avanço.

2.8.3.1 Potência de corte

Potência de corte pode ser expressa pela seguinte equação:

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \text{ [kW]} \quad (2.1)$$

Onde:

F_c = força de corte [N] e

V_c = velocidade de corte [m/min].

2.8.3.2 Potência de avanço

Potência de avanço pode ser expressa pela seguinte equação:

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} [\text{kW}] \quad (2.2)$$

Onde,

F_f = força de avanço [N] e

V_f = velocidade de avanço [mm/min].

2.8.3.3 Relação entre as potências de corte e de avanço

Das EQUAÇÕES 2.1 e 2.2, tem-se:

$$\frac{P_c}{P_f} = \frac{1000 \cdot F_c \cdot V_c}{F_f \cdot V_f}$$

Sendo,

$$V_f = f \cdot n \text{ [mm/min] e} \quad (2.3)$$

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2.4)$$

Onde:

f = avanço por volta [mm/volta];

n = rotação da ferramenta [rpm] e

d = diâmetro da ferramenta [mm].

Substituindo na relação entre P_c / P_f pelas EQ. 2.3 e 2.4, temos:

$$\frac{P_c}{P_f} = \frac{F_c}{F_f} \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot n}{f \cdot n} = \pi \cdot \frac{F_c}{F_f} \cdot \frac{d}{f}$$

Para o torneamento é conhecido que $F_c = 4,5 \cdot F_f$ (Ferraresi, 1977). Para exemplificar uma situação extrema podemos adotar o diâmetro (d) igual a 10 mm e avanço (f) igual a 1 mm/volta, isto é, sendo d muito pequeno e f muito grande, tornamos a relação P_c / P_f muito pequena para essa situação. Neste caso, teremos:

$$\frac{P_c}{P_f} = \pi \cdot 4,5 \cdot 10 \cong 140$$

Isto demonstra que a potência de avanço é cerca de 140 vezes menor que a potência de corte. Concluímos que, na maioria das situações de dimensionamento do motor da máquina-ferramenta, quando este é responsável pela potência de corte e de avanço, pode-se desprezar a parcela de potência para o movimento de avanço, já que, no dimensionamento do motor, o fator de carga de funcionamento compensa essa parcela de potência desprezada.

2.8.3.4 Potência do motor

A potência do motor (P_m) é dada pela relação:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \tag{2.5}$$

Onde:

η = rendimento da máquina.

2.8.4 Fresamento

Diniz, et al (2001) definem o fresamento como uma operação de usinagem que apresenta como características principais, o corte feito pela ferramenta chamada fresa, que apresenta arestas de corte dispostas em torno de seu eixo, o movimento de corte é feito pela rotação da fresa e o movimento de avanço, geralmente é feito pela mesa da máquina-ferramenta, onde é fixada a peça.

2.8.4.1 Cálculo da potência de corte

“Devido às características de uma operação de fresamento, a potência de corte consumida varia a todo instante devido à variação do número de dentes no corte e da espessura do cavaco.” (DINIZ et al, 2001, p.218).

Assim, ao invés de calcularmos a potência exata em um dado instante, calculamos uma potência média de corte utilizando um valor médio da pressão específica de corte (K_{S_m}). Analogamente, o cálculo do valor médio da pressão específica de corte é feito utilizando-se um valor médio da espessura de corte (h_m).

Assim, temos a expressão da potência de corte:

$$P_c = \frac{K_{S_m} \cdot a_e \cdot a_p \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \text{ [kW]} \quad \text{e} \quad (2.8)$$

$$K_{S_m} = K_{S_1} \cdot h_m^{-z} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.9)$$

onde:

P_c = potência média de corte no fresamento [kW];

K_{S_m} = pressão média específica de corte [N/mm²];

a_e = penetração trabalho [mm];

a_p = profundidade ou largura de usinagem [mm];

V_f = velocidade de avanço da mesa [mm/min];

K_{S_1} = pressão específica de corte [N/mm²];

h_m = espessura média de corte no fresamento [mm];

z = coeficiente angular de corte [adimensional].

2.8.4.2 Cálculo da espessura média de corte

A espessura média de corte é dada em função dos ângulos de contato (φ_1 e φ_2) entre a fresa e a peça, e, em função do ângulo de posição (χ) da ferramenta em relação à peça conforme representados nas FIG 2.55 e 2.56.

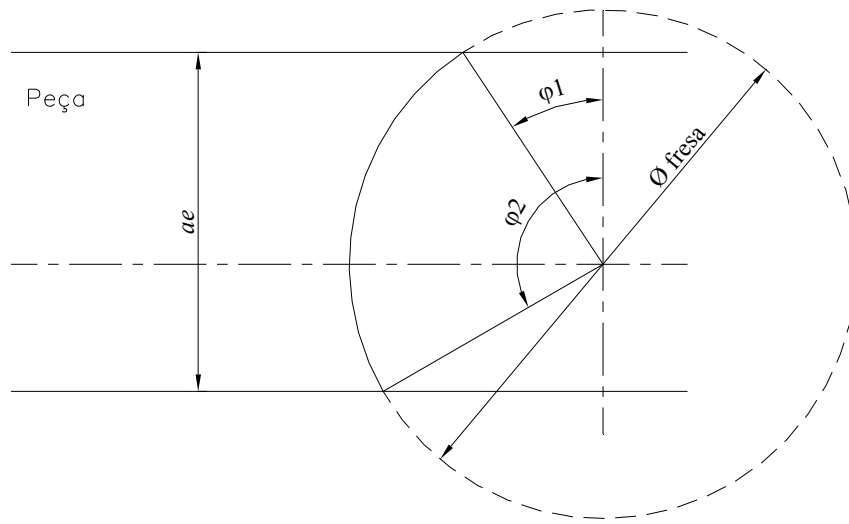


FIGURA 2.55 – Ângulos de contato no fresamento frontal

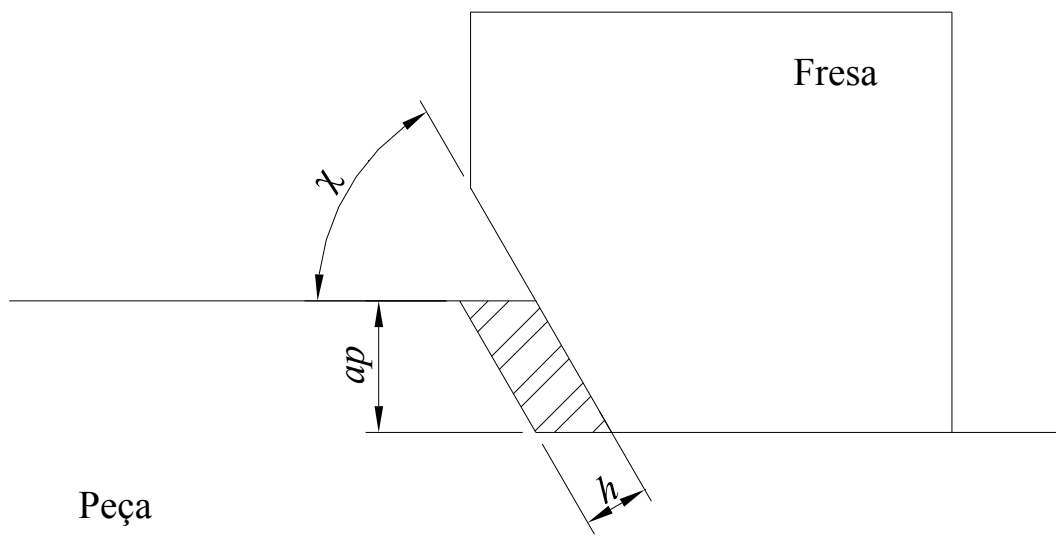


FIGURA 2.56 – Ângulo de posição da ferramenta

A espessura média de corte pode ser dada pela equação:

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cdot \text{sen} \chi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \text{ [mm]} \quad (2.10)$$

Onde:

φ_1 = ângulo entre o ponto de saída (ou entrada no fresamento concordante) do dente e a vertical;

φ_2 = ângulo entre o ponto de entrada (ou saída no fresamento concordante) do dente e a vertical;

χ = ângulo de posição da ferramenta;

f_z = avanço por dente da ferramenta [mm/dente].

2.9 Dimensionamento de elementos mecânicos

2.9.1 Parafuso de rosca quadrada

“Designa-se por parafuso de rosca quadrada aquele em que a rosca é gerada por um quadrado, deslocando-se com um lado apoiado sobre a geratriz do cilindro do núcleo e com movimento helicoidal.” (ALBUQUERQUE, 1974, p. 42).

A FIG 2.57 apresenta o esquema do parafuso de rosca quadrada com as principais forças atuantes e variáveis.

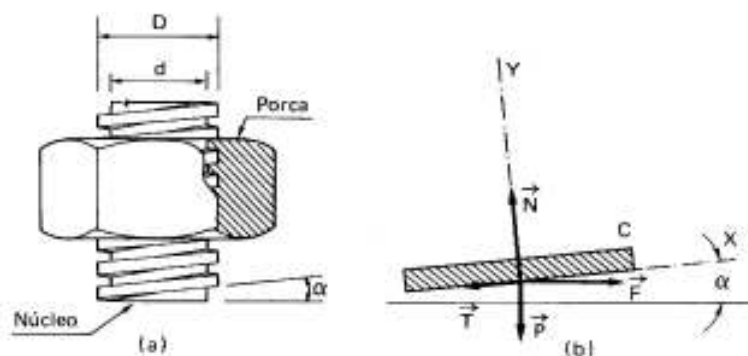


FIGURA 2.57 – Esquema de um parafuso de rosca quadrada
 FONTE: ALBUQUERQUE, 1974, p. 42

O módulo da força \vec{F} que atua no filete da rosca do parafuso pode ser expresso pela EQUAÇÃO (2.2.11) a seguir:

$$F = \frac{f + tg\alpha}{1 - f \cdot tg\alpha} \cdot P \quad (2.11)$$

Onde:

F = módulo da força que atua no diâmetro médio da rosca;

f = coeficiente de atrito entre a porca e o parafuso;

α = ângulo de hélice da rosca;

P = módulo da força axial;

D = diâmetro externo da rosca;

d = diâmetro interno da rosca;

N = módulo da força Normal;

T = módulo da força de atrito.

Sendo o diâmetro médio da rosca dado pela EQUAÇÃO (2.12) a seguir:

$$D_m = \frac{D + d}{2} \quad (2.12)$$

O módulo do momento torçor atuante no diâmetro médio do parafuso é dado pela EQUAÇÃO (2.13) a seguir:

$$M_t = F \cdot D_m / 2 \quad (2.13)$$

Ao dar-se uma volta completa acompanhando-se a hélice da rosca, observa-se que há um deslocamento axial de um determinado valor. Assim é possível desenvolver-se uma proporção entre o movimento de rotação e translação conhecida como relação fundamental a seguir:

$$\tan \alpha = \frac{a}{\pi \cdot D_m}, \quad (2.14)$$

Sendo:

$$a = i \cdot p \quad (2.15)$$

Onde:

a = avanço;

p = passo da rosca;

i = número de entradas da rosca.

2.9.2 Parafuso de rosca trapezoidal ou triangular

Devido à geometria da rosca, gerada por um trapézio ou por um triângulo, a reação normal \vec{N} não será axial.

Seja um triedro XYZ, onde Z é paralelo ao eixo geométrico do parafuso, Y tangencial à circunferência média e X radial.

Desta maneira, \vec{N} fará o ângulo ϕ (semi-ângulo da rosca) com o plano ZY e N' o ângulo α (inclinação da rosca) com o plano ZX.

A FIG 2.58 apresenta o esquema de um parafuso com rosca trapezoidal com as principais forças e variáveis.

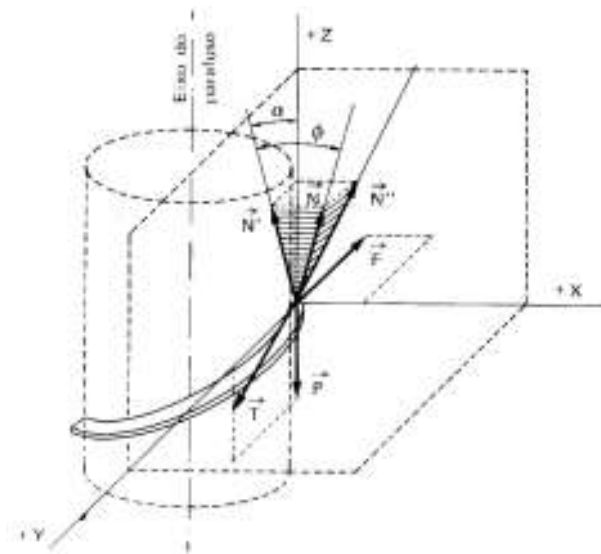


FIGURA 2.58 – Esquema do parafuso de rosca trapezoidal
FONTE: ALBURQUEQUE, 1974, p. 43

Sejam ainda:

\vec{F} = força tangencial motora, tangente à circunferência média e de direção Y;

\vec{P} = resultante das forças axiais exteriores na direção Z;

\vec{T} = força de atrito, tangente à rosca e, portanto, no plano ZY.

As equações de equilíbrio são:

$$\sum Z = 0 \therefore N \cdot \cos \phi \cdot \cos \alpha - P - T \cdot \sin \alpha = 0;$$

$$\sum Y = 0 \therefore F - N \cdot \cos \phi \cdot \sin \alpha - T \cdot \cos \alpha = 0.$$

Considerando que $T = f \cdot N$, temos:

$$F = \frac{\cos \phi \cdot \tan \alpha + f}{\cos \phi - f \cdot \tan \alpha} \cdot P \quad (2.16)$$

2.9.3 Dimensionamento estático da rosca de movimento

O dimensionamento do parafuso pode ser dado pelo dimensionamento do núcleo conforme relação a seguir:

$$\sigma_c = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2}, \quad (2.17)$$

Onde:

σ_c = tensão de compressão.

O dimensionamento também deve observar a pressão de contato entre os filetes de rosca:

$$p = \frac{P}{\pi \cdot D_m \cdot n \cdot h} \quad (2.18)$$

Onde:

p = pressão de contato;

n = número de filetes em contato;

h = altura do filete de rosca.

O QUADRO (2.2) apresenta as pressões admissíveis de contato.

QUADRO 2.2
Pressões admissíveis de contato

PARAFUSO	PORCA	PRESSÃO kgf/mm ²
Aço	Ferro Fundido	Máximo 1
Aço	Bronze	Máximo 1,75

FONTE: PROVENZA, 1996, p. 3-31.

2.9.4 Dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos

2.9.4.1 Critério de desgaste

A expressão seguinte deve ser utilizada no dimensionamento de pinhões com ângulo de pressão $\alpha = 20^\circ$, número de dentes entre 18 a 40 e material Aço.

$$b \cdot d^2 = 5,72 \cdot 10^5 \cdot \frac{M_t}{P_{adm}^2} \cdot \frac{i \pm 1}{i \pm 0,14} \cdot \varphi \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2.19)$$

O sinal positivo “+” é utilizado em engrenamentos externos.

O sinal negativo “-” é utilizado em engrenamentos internos (planetários).

Sendo:

b = largura do dente do pinhão [mm];

d = diâmetro primitivo do pinhão [mm];

M_t = momento torçor no pinhão [Nmm];

P_{adm} = pressão admissível [N/mm²];

i = relação de transmissão [adimensional];

φ = fator de serviço [adimensional].

Onde a pressão admissível é dada pela expressão:

$$P_{adm} = \frac{0,487 \cdot HB}{W^{1/6}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.20)$$

Em que:

$$W = \frac{60 \cdot n_p \cdot h}{10^6} \quad (2.21)$$

Onde:

P_{adm} = pressão admissível no pinhão [N/mm²];

W = fator de durabilidade [adimensional];

n_p = rotação do pinhão [rpm];

h = duração do par [horas];

HB = dureza Brinell [N/mm²].

A TAB 2.1 apresenta a dureza Brinell de alguns aços.

TABELA 2.1
Tabela de dureza Brinell

Material	Dureza Brinell (N/mm²)
Aço fundido tipo 2	1700 – 2500
Aço fundido tipo B ₂	1250 – 1500
Aço SAE 1020	1400 – 1750
Aço SAE 1040	1800 – 2300
Aço SAE 1050	2200 – 2600
Aço 3145/3150	1900 – 2300
Aço SAE 4320	2000 – 4200
Aço SAE 4340	2600 – 6000
Aço SAE 8620	1700 – 2700
Aço SAE 8640	2000 – 6000
Aço fundido cinzento	1200 – 2400
Aço fundido nodular	1100 - 1400

FONTE: MELCONIAN, 2000, p.82

Os aços SAE 4320, SAE 4340, SAE 8620 e SAE 8640, quando submetidos a tratamento térmico, podem atingir dureza superior à especificada na TAB 2.1, sendo necessária a utilização da escala Rockwell C (HRC), uma vez que o limite máximo da escala

Brinell é 600 N/mm^2 . Nestes casos, utiliza-se a escala de conversão de dureza, mesmo tendo-se conhecimento de que o valor de dureza equivalente na escala Brinell é apenas comparativo (MELCONIAN, 2000).

Para que uma engrenagem esteja bem dimensionada, é necessário que sejam obedecidas as seguintes relações entre a largura da engrenagem e o diâmetro primitivo (b/d):

- a) engrenagem bi apoiada: $b/d \leq 1,2$;
- b) engrenagem em balanço: $b/d \leq 0,75$ (MELCONIAN, 2000).

2.9.4.2 Critério de resistência

A carga tangencial (F_t) é responsável pelo movimento das engrenagens, sendo também a carga que origina o momento fletor, tendendo a romper por flexão o pé do dente conforme apresentado na FIG 2.59.

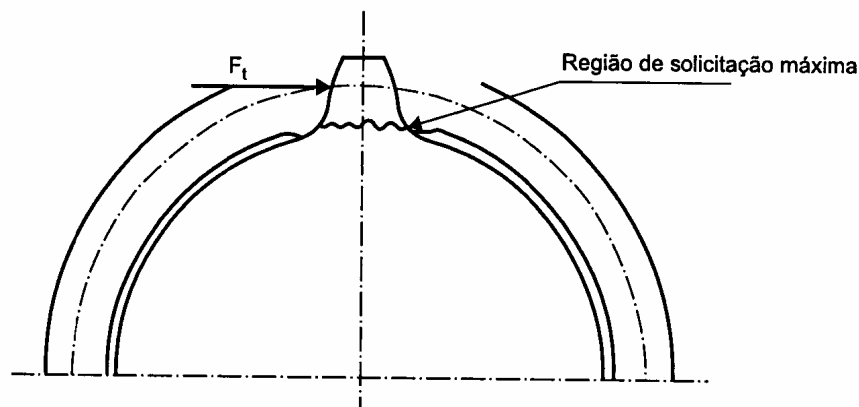


FIGURA 2.59 – Força tangencial no dente da engrenagem
 FONTE: MELCONIAN, 2000, p. 85

A força tangencial pode ser expressa pela expressão:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_t}{d} \quad (2.22)$$

Onde:

F_t = Força tangencial [N];

M_t = Torque ou momento fletor [Nmm];

d = Diâmetro primitivo da engrenagem.

A tensão atuante no pé do dente deve ser menor ou igual à tensão admissível do material. A tensão pode ser calculada pela expressão:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_t \cdot q \cdot \varphi}{b \cdot m} \quad (2.23)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Tensão máxima atuante na base do dente [N/mm²];

F_t = Força tangencial [N/mm²];

m = Módulo normalizado [mm];

b = Largura do dente do pinhão [mm];

φ = Fator de serviço [adimensional];

q = Fator de forma [adimensional].

Como referência, temos o valor para o fator de forma q , para engrenamento externo e número de dentes da engrenagem igual a 18, o valor de 3,5. E o fator de serviço φ para máquinas de laboratório operando com carga uniforme o valor de 1,00 (MELCONIAN,2000, p.86 e 90).

2.10 Dimensionamento de barras submetidas a carregamento transversal

As barras quando estão submetidas a um carregamento transversal apresentam tensões normais e tensões de cisalhamento. As tensões são ocasionadas pelo momento fletor e pelo esforço cortante na barra. A FIG 2.60 apresenta uma barra submetida a carregamento transversal.

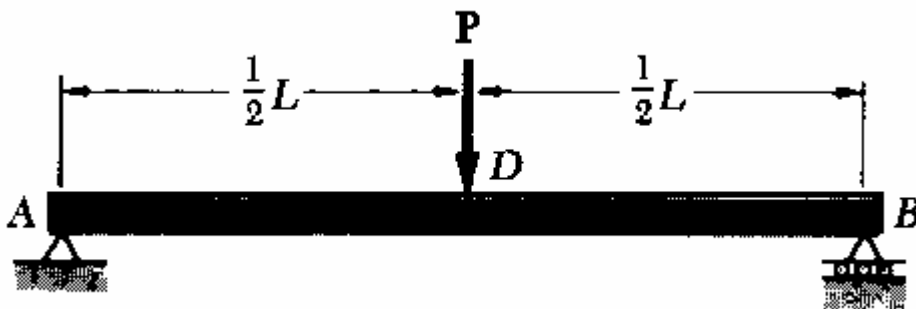


FIGURA 2.60 – Barra sob carregamento transversal
FONTE: BEER et al, 1989, p. 391.

As tensões normais devido ao momento fletor podem ser relacionadas como a seguir:

$$\sigma = \frac{M_f}{J_x} \cdot y, \quad (2.23)$$

Onde:

M_f = momento fletor;

J_x = momento de inércia a flexão relativo ao eixo de simetria XX;

y = distância linear da fibra neutra a uma dada fibra qualquer.

Para o caso da FIG 2.60, temos:

$$M_f = \frac{P \cdot L}{4} \quad (2.24)$$

$$J_x = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \text{ (para seção maciça circular)} \quad (2.25)$$

Onde:

d = diâmetro da seção.

Para o dimensionamento da barra, utilizamos módulo de rigidez a flexão (W_f):

$$W_f = \frac{J_x}{y_0} \quad (2.26)$$

Onde:

y_0 = distância linear da fibra neutra a fibra mais externa.

A FIG 2.61 apresenta o esquema da flecha de uma barra sob carregamento transversal.

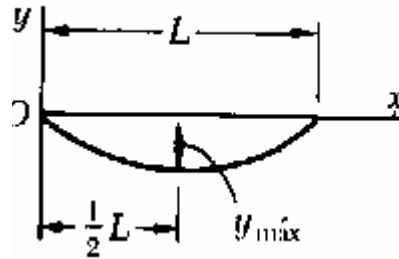


FIGURA 2.61 – Esquema da flecha em uma barra sob carregamento transversal
 FONTE: BEER et al., 1989, apêndice D.

A flecha máxima para uma viga sobre apoio nas extremidades com carga centrada, desconsiderando o peso próprio, pode ser dada por:

$$y_{máx} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot J_x} \quad (2.27)$$

onde:

P = carga aplicada no centro do comprimento da viga;

L = comprimento da viga;

E = módulo de elasticidade do material;

J_x = momento de inércia em relação ao eixo X.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Inicialmente buscou-se definir tipo do equipamento a ser desenvolvido através da avaliação da configuração de movimento dos principais tipos de máquinas-ferramentas: torno mecânico, fresadora, mandrilhadora, furadeira radial, entre outras e tipos de operações usinagem possíveis com estes equipamentos. A configuração da fresadora foi escolhida por ser uma máquina-ferramenta com 03 eixos de translação X, Y, Z e 01 eixo de rotação da ferramenta de corte (W). A fresadora é capaz executar diversas operações de usinagem feitas por outros equipamentos, além de obter superfícies com geometrias diversas e complexas.

A partir da utilização do kit de controle numérico (03 motores a passo com encoders, controlador lógico em malha fechada, software CNC e mesa divisora da MaxNC[®]), ficou definido o desenvolvimento de uma fresadora controlada numericamente por computador com automatização de 03 eixos de translação da ferramenta (X, Y e Z) e 01 eixo de rotação (A). Os 02 eixos de rotação do suporte da ferramenta de corte seriam acionados manualmente (B, C), e 01 eixo da rotação da ferramenta de corte (W) seria montado no mandril de uma micro-retífica Dremel[®] fixada no cabeçote de movimentação e tem alimentação elétrica independente.

O equipamento desenvolvido pode ser classificado com uma fresadora do tipo “Router” onde a mesa principal é fixa e o suporte da ferramenta de corte pode transladar nos eixos X, Y, Z e girar em torno dos eixos B e C, conferindo maior possibilidade na confecção de superfícies complexas. A FIG 3.1 apresenta o desenvolvimento da fresadora.

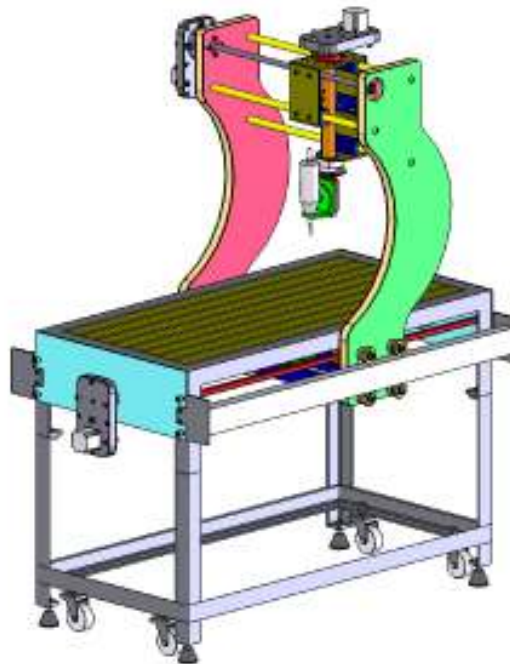


FIGURA 3.1 – Desenvolvimento da fresadora

3.2 Configuração

3.2.1 Definição do volume disponível

Como o objetivo é o desenvolvimento de um equipamento mecânico CNC para produção de protótipos em escala, principalmente para fins didáticos, optou-se por um equipamento cuja área de trabalho possibilitasse a construção de peças de tamanho médio e ao mesmo tempo poderia ser de fácil transporte, podendo ser deslocado para outros locais para demonstração. Assim definiram-se as dimensões da mesa de trabalho de 600 x 1200 mm. Após uma pesquisa e análise das dimensões de equipamentos de mesmo porte de mesa, conclui-se que a altura compatível entre o mandril da ferramenta e a base da mesa seria de 300 mm.

3.2.2 Definição do sistema de controle numérico

Utilizou-se o kit de controle numérico constituído por 03 motores a passo com encoders para os eixos de translação (X, Y, Z), controlador lógico em malha fechada (close loop), software CNC e mesa divisora com eixo de rotação (A) da marca MaxNC[®], concentrando-se a concepção e o desenvolvimento do equipamento na parte mecânica. Para maior possibilidade na confecção de superfícies complexas optou-se pelo desenvolvimento de um cabeçote com dois eixos de rotação acionados manualmente (B, C). A FIG 3.2 apresenta o motor a passo modelo 5718-05D-05 da Lin Engineering de 130 oz.in de torque de acionamento e a FIG 3.3 apresenta as suas principais dimensões.



FIGURA 3.2 – Motor a passo modelo 5718-05D-05
FONTE - www.linengineering.com, 2006 (adaptado)

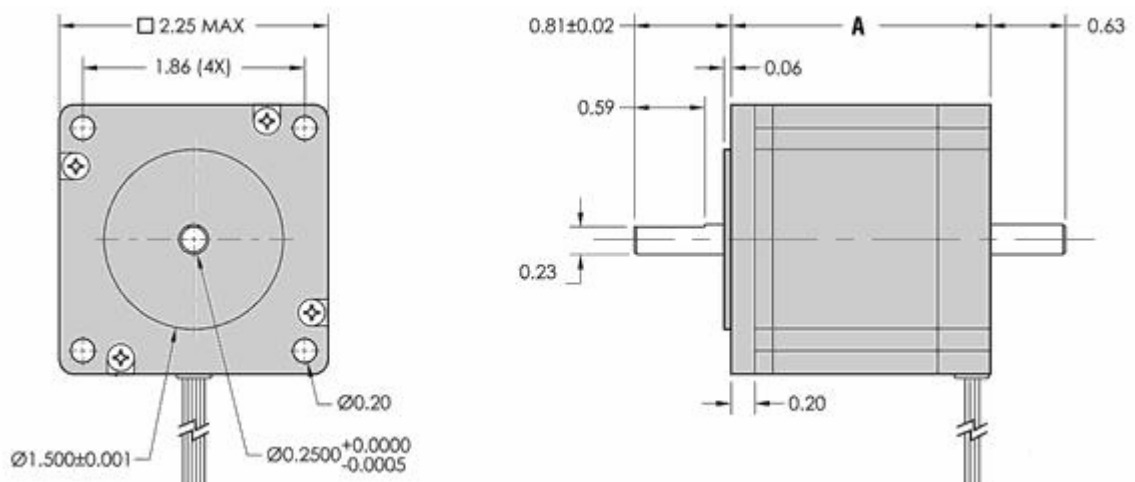


FIGURA 3.3 – Esquema do motor a passo modelo 5718-05D-05
FONTE - www.linengineering.com, 2006 (adaptado)

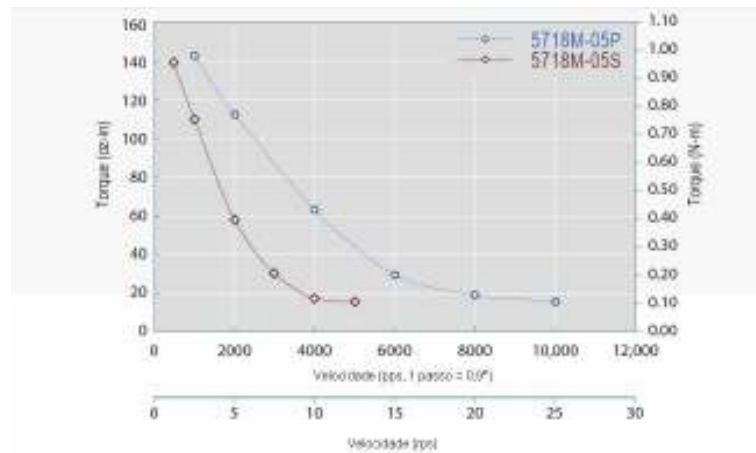


GRÁFICO 3.1 – Curva de torque do motor a passo modelo 5718M-05P e 5718M-05S da Linengineering®
 FONTE - www.linengineering.com, 2006 (adaptado)

A FIG 3.4 apresenta a mesa divisora acoplada ao motor a passo, o qual se refere sendo o eixo de rotação A.



FIGURA 3.4 – Mesa divisora da MaxNC®
 FONTE – www.maxnc.com, 2006 (adaptado)

A FIG 3.5 apresenta o kit de controle numérico com os três motores a passo com encoders, controladora lógico programável em malha fechada (close loop) e o software MaxNC® CL2 para formato em código “G”.



FIGURA 3.5 – Kit de automação da MaxNC®
 FONTE – www.maxnc.com, 2006 (adaptado)

3.2.3 Acionamento da ferramenta de corte

Como o equipamento deveria ser de baixo custo, a ferramenta de corte foi montada no mandril de uma micro-retífica Dremel® (capacidade 130W, rotação de 5000 até 35000 rpm) fixada no cabeçote de movimentação tendo alimentação elétrica independente. Além disso, foi possível eliminar o desenvolvimento de alguns mecanismos obtendo se um sistema de acionamento da ferramenta de corte compacto. As especificações da micro-retífica utilizada no equipamento estão listada no QUADRO 3.1.

QUADRO 3.1
 Especificações da micro-retífica DREMEL® MultiPro

Designação	Ferramenta Rotativa de Alta Velocidade
Fabricante	DREMEL®
Modelo	MultiPro 3962-02 / F0130395BS
Potência	130 W
Rotação	5.000 a 35.000 rpm
Capacidade de pinça	0,8 a 3,2 mm
Peso	0,55 kgf
Tensão	120 V
Corrente	1,15 A
Frequência	50-60 Hz

FONTE: www.dremel.com, (2006)

A FIG 3.6 apresenta a ferramenta rotativa de alta velocidade (micro-retífica) utilizada para o acionamento da ferramenta de corte.



FIGURA 3.6 – Ferramenta rotativa de alta velocidade MultiPro da Dremel®
FONTE – www.dremel.com, 2006 (adaptado)

3.2.4 Configuração inicial

O equipamento desenvolvido pode ser classificado com uma fresadora do tipo “Router” onde a mesa principal (área de trabalho útil da mesa de 950 mm x 450 mm) é fixa e o cabeçote de movimentação pode transladar nos eixos X, Y e Z e girar em torno dos eixos B e C. A mesa foi desenvolvida utilizando-se chapas e perfis estruturais, o cabeçote de movimentação e as estruturas laterais também foram desenvolvidos com chapas. As guias de translação eram de seção circular com mancais de deslizamento lineares de bronze lubrificados com graxa. A FIG 3.7 apresenta o esquema estrutural do equipamento mecânico.

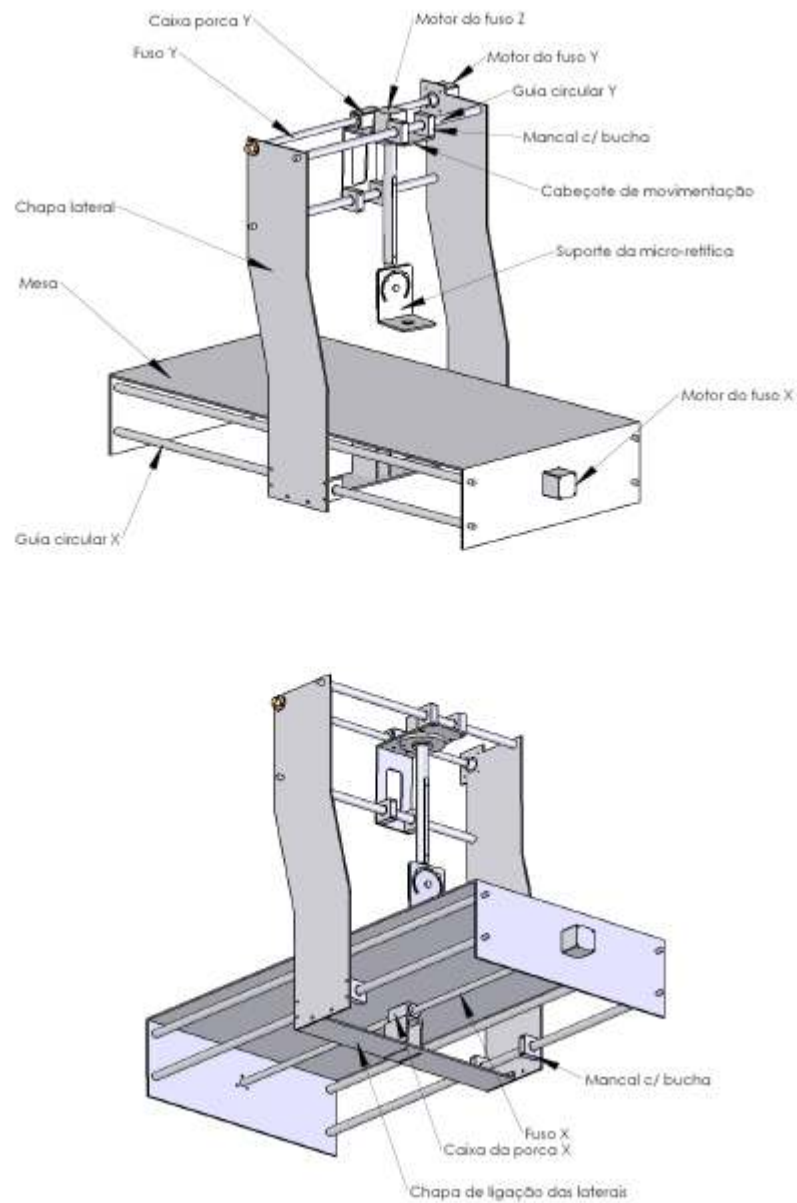


FIGURA 3.7 – Esquema estrutural da fresadora

Inicialmente foi adotado um fuso central, acionado por um motor de passo, abaixo da mesa que será responsável pela translação no eixo X. O motor de passo colocado na chapa lateral acoplado a um fuso seria responsável pela translação do cabeçote de movimentação e o suporte da ferramenta no eixo Y. Escolheu-se guias de seção circular pelo fato de serem de fácil construção e baixo custo. Pelo mesmo motivo, definimos que os fusos seriam de rosca trapezoidal e a porca seria com dispositivo eliminador de folga. As placas laterais foram desenvolvidas com o objetivo de posicionar a ferramenta de corte na mesma linha de centro vertical com a porca do eixo de translação X. A movimentação no eixo de translação Z é feita por meio de um fuso de perfil trapezoidal acionado, também, por um motor de passo.

Após definido o esquema da configuração estrutural, o passo seguinte foi definir como as peças seriam fixadas na mesa. Basicamente, as fresadoras encontradas no mercado, utilizam rasgos em “T” na mesa ou utilizam base magnética. Como a base magnética possui alto custo e fixa somente materiais ferromagnéticos, a opção de colocarmos os rasgos em “T” seria a mais indicada para o equipamento.

A FIG 3.8 apresenta um esquema da fresadora onde a mesa apresenta os rasgos para fixação de prisioneiros. Como pode ser observado na FIG 3.7, a primeira concepção da mesa com os rasgos em “T”, foi utilizar chapas em aço-carbono e madeira com a largura menor a das chapas, fixadas por meios de parafusos na base da mesa da máquina. Foi definido também, estruturar as chapas laterais da seguinte maneira: utilizamos 02 chapas em aço carbono com espessura relativamente fina e, entre elas, uma peça de madeira com mesma geometria. Isso possibilitaria um ganho na resistência mecânica satisfatória, em relação ao porte do equipamento, e não acrescentaria muito peso. Optou-se colocar nos pés da máquina, eliminador de vibração mecânica, peça que é encontrada em lojas de ferramentas.

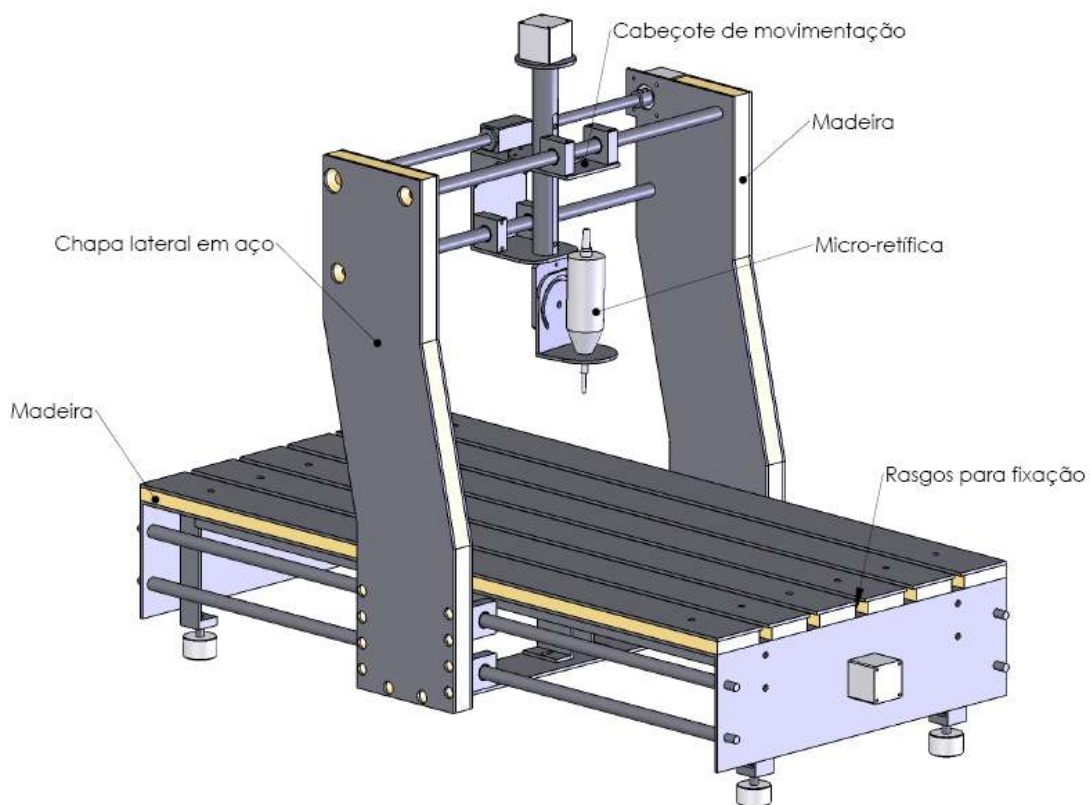


FIGURA 3.8 – Esquema da fresadora com rasgos para fixação de prisioneiros

3.2.5 Cabeçote de movimentação da ferramenta

A partir da utilização da micro-retífica como elemento de acionamento da ferramenta de corte desenvolveu-se um cabeçote de movimentação que possibilitasse a fixação da micro-retífica, sendo acionado pelos eixos de translação X, Y, Z, contendo o eixo de rotação da ferramenta W e podendo girar manualmente de 90° , tanto no sentido horário ou anti-horário, em torno do eixo vertical B e do eixo horizontal C. A FIG 3.9 apresenta esquematicamente o cabeçote de movimentação com os principais componentes.

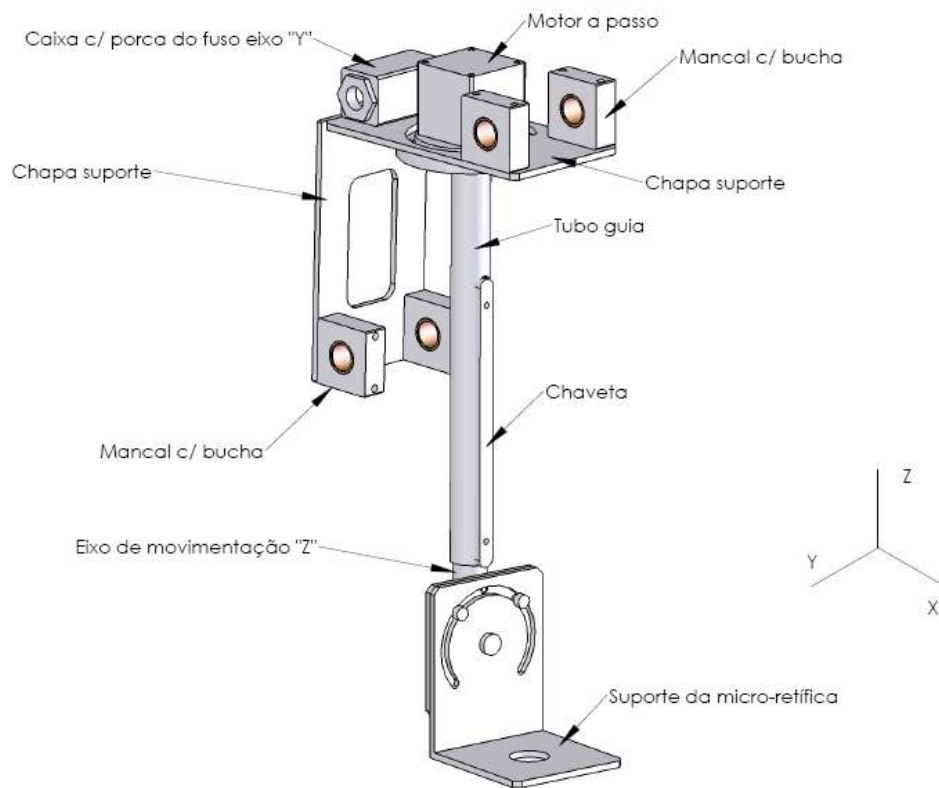


FIGURA 3.9 – Esquema do cabeçote de movimentação

A FIG 3.10 e a FIG 3.11 apresentam o esquema de giro dos eixos C e B no cabeçote de movimentação. Estes movimentos são feitos manualmente em qualquer sentido.

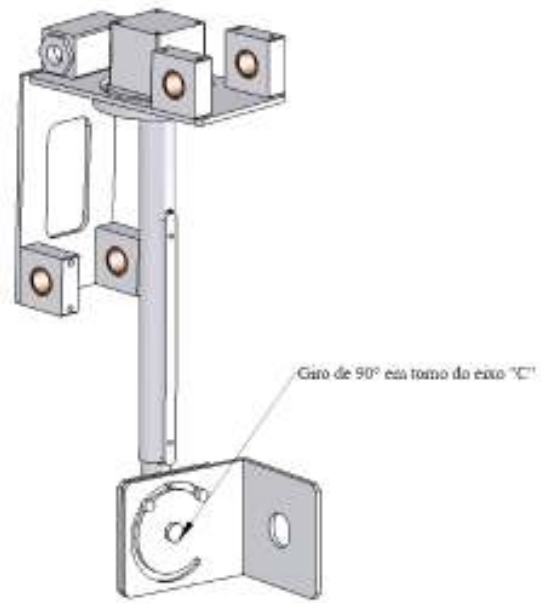


FIGURA 3.10 – Esquema de giro do suporte da micro-retífica em torno do eixo C.

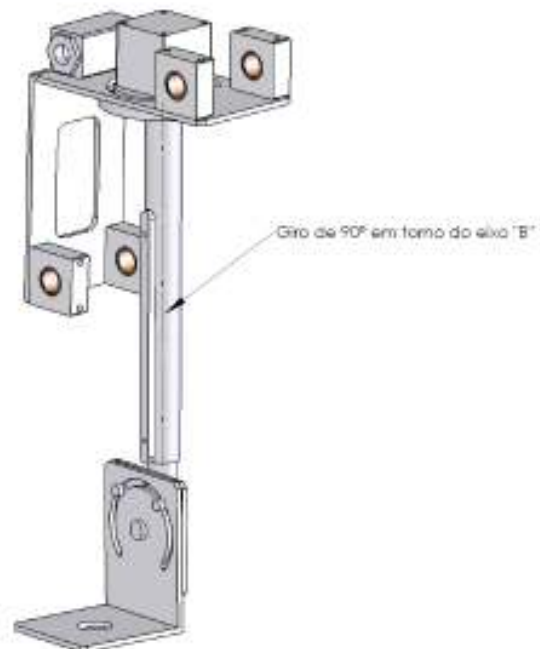


FIGURA 3.11 – Esquema de giro do suporte da micro-retífica em torno do eixo B.

3.3 Desenvolvimento

Após a definição da configuração básica do equipamento, o próximo passo foi o desenvolvimento das peças, componentes, mecanismos e outros. O equipamento teria a sua maior parte feita de material em aço-carbono. A mesa, as laterais e o cabeçote, onde está o suporte da micro-retífica, as guias, os fusos e o suporte inferior da porca do eixo X, basicamente seriam desenvolvidos a partir de bitolas de materiais facilmente encontrados para a aquisição. Isto propiciaria menor custo ao equipamento.

Depois de desenvolvidos os principais componentes da fresadora, foi feita uma montagem do conjunto para avaliação do equipamento. A FIG 3.12 apresenta a primeira montagem da fresadora. Conclui-se, inicialmente, que esta configuração apresentava um resultado satisfatório com o objetivo do trabalho. Passou-se ao detalhamento das partes para a fabricação conforme o desenvolvimento.

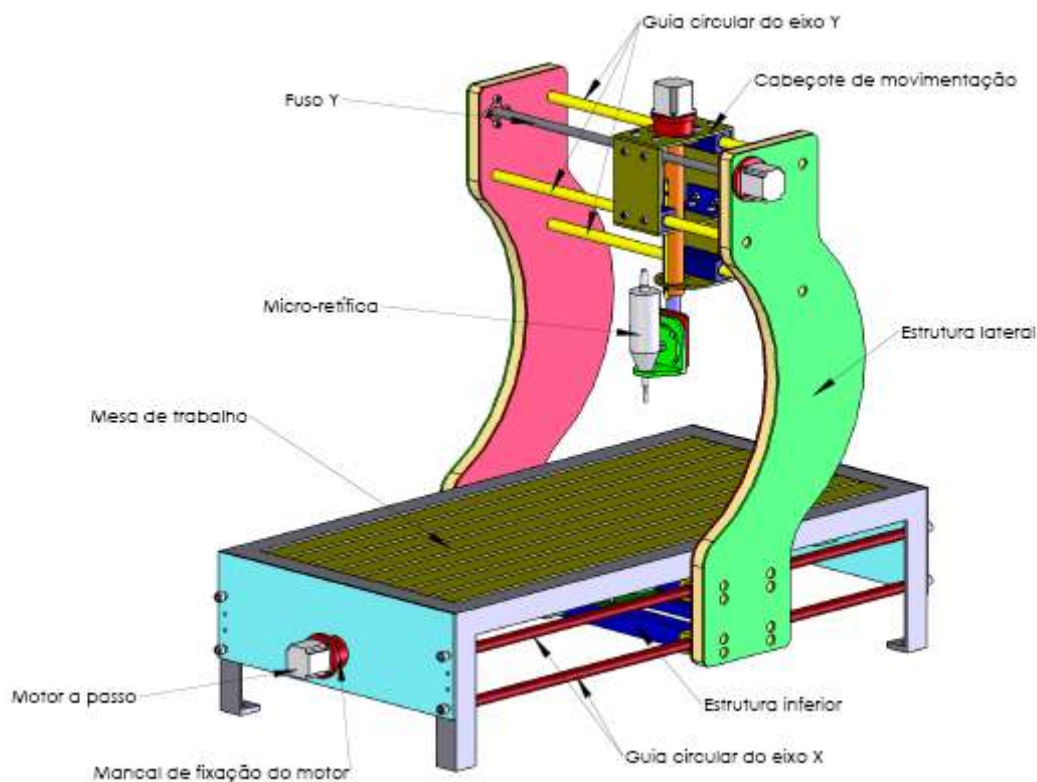


FIGURA 3.12 - Montagem preliminar dos componentes desenvolvidos da fresadora

3.3.1 Desenvolvimento da mesa

Conforme a concepção já definida, a mesa seria fixa e com rasgos para fixação de prisioneiros, o que possibilitaria a fixação das peças a serem fresadas. Iniciou-se o desenvolvimento da mesa, a partir de uma estrutura de cantoneira com a seguinte bitola: 50 x 50 x 5 mm, razoável para o porte do equipamento. Foi definido um curso útil de 450 x 950 mm para os eixos Y e X respectivamente. Adotou-se as dimensões para esta estrutura de 600 x 1200 mm, com altura (“pés”) de 300 mm para a montagem das guias de perfis circular.

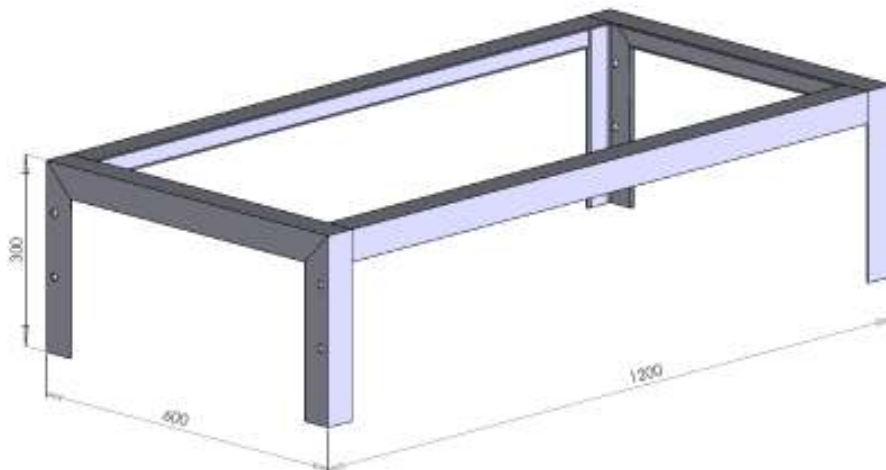


FIGURA 3.13 – Estrutura de cantoneira da mesa da fresadora

Em seguida, o objetivo era definir como seriam os rasgos em “T” para a fixação dos prisioneiros. No primeiro momento, adotou-se, conforme pode ser observado na FIG 3.8, que seria colocado chapas de aço com a madeira, com largura menor, sobre a mesa. Entretanto, definiu-se que seria mais adequado e de mais fácil construção, utilizar perfil estrutural em “T” com a bitola 2” x 3/16” deixando um espaçamento entre eles, formando assim, os rasgos para fixação dos prisioneiros e proporcionando boa rigidez e resistência para a fixação das peças na mesa. A FIG 3.14 apresenta o perfil adotado.

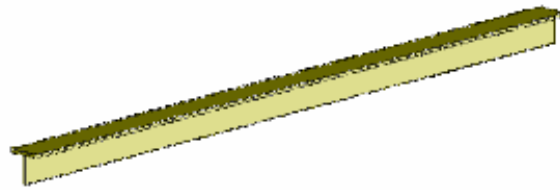


FIGURA 3.14 – Perfil estrutural em “T”

Para a fixação do motor de passo, responsável pelo acionamento no eixo X, e suporte do fuso, foi fixado duas chapas em aço com espessura de 5 mm na estrutura de cantoneira. A FIG 3.15 apresenta a configuração da mesa da fresadora.

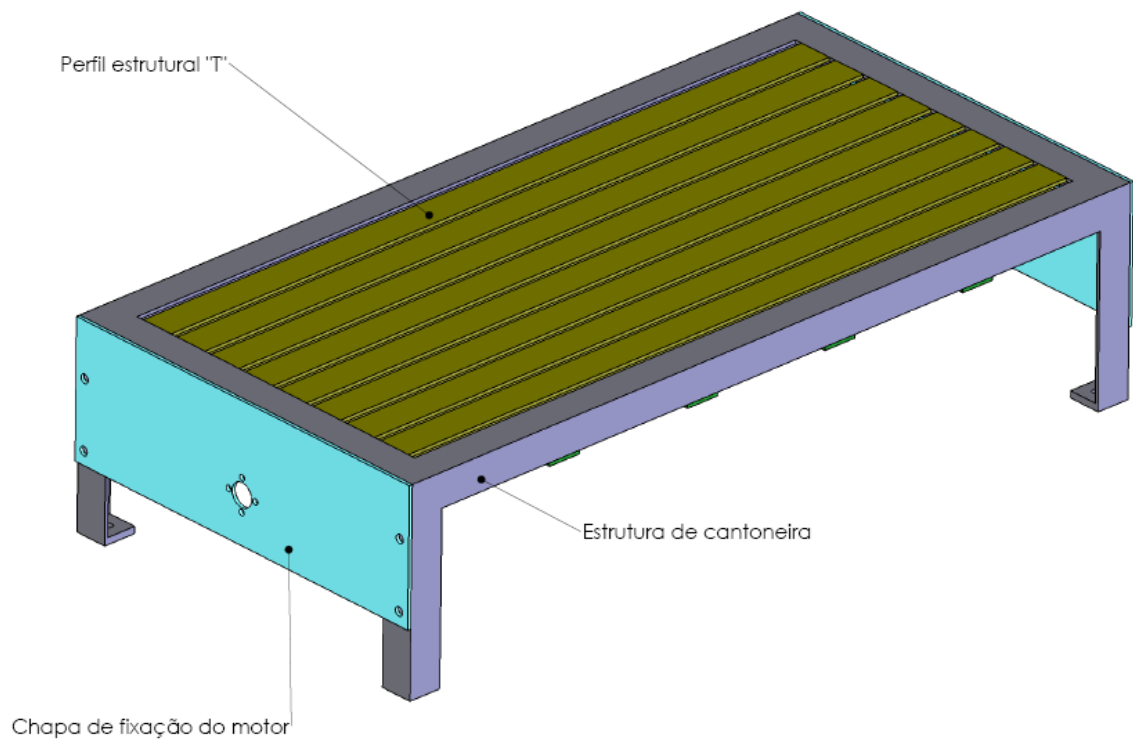


FIGURA 3.15 – Desenvolvimento da mesa da fresadora

3.3.2 Desenvolvimento do cabeçote

O cabeçote é uma estrutura feita em chapa de aço de 5 mm de espessura e é responsável pela translação no eixo Y e rotação do suporte da micro-retífica nos eixos horizontal C e vertical B. Primeiramente, partiu-se para o desenvolvimento do mecanismo responsável rotação do suporte da micro-retífica (ferramenta de corte) no eixos horizontal C e vertical B.

3.3.2.1 Suporte da micro-retífica e mecanismo de rotação no eixo C

Como foi definido utilizar uma ferramenta manual elétrica de alta rotação (micro-retífica) para ser o acionamento da ferramenta de corte, foi necessário desenvolver o suporte da mesma e os mecanismos de rotação nos eixos B e C. Para o suporte da micro-retífica, utilizou-se uma chapa em aço em “L” e para a rotação no eixo C, utilizou-se uma chapa de aço fixa com eixo central, onde o suporte em “L” pode girar manualmente de 90° no sentido horário ou anti-horário. A FIG 3.16 apresenta o desenvolvimento do suporte da micro-retífica e do mecanismo de giro no eixo horizontal C.

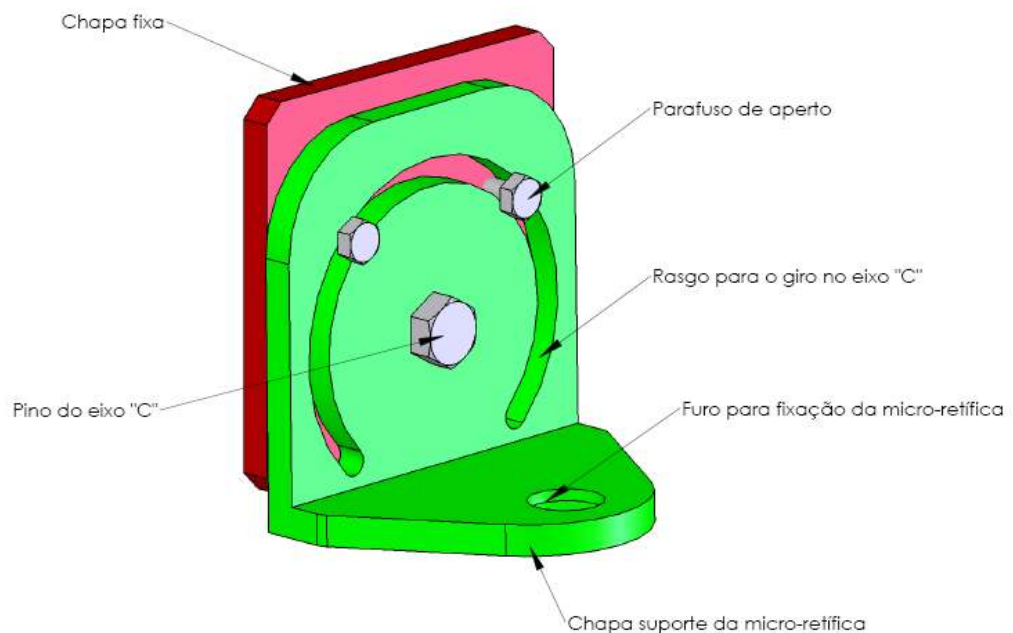


FIGURA 3.16 – Suporte da micro-retífica e mecanismo de rotação no eixo C

A FIG 3.17 apresenta o esquema de giro do suporte da micro-retífica em torno do eixo C no sentido horário e anti-horário.

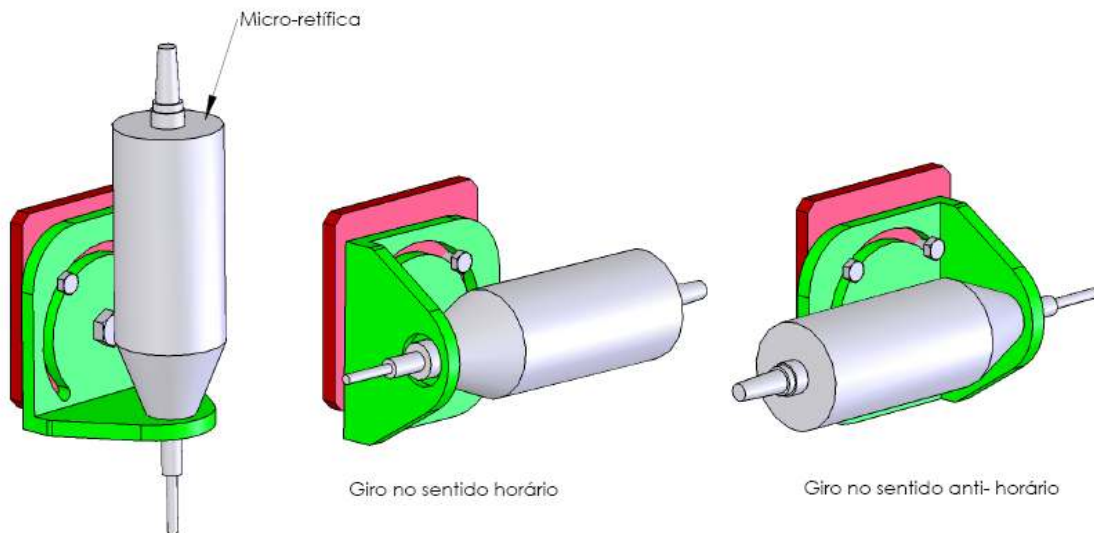


FIGURA 3.17 – Esquema de giro do suporte da micro-retífica no eixo C

3.3.2.2 Mecanismo de rotação do suporte da micro-retífica no eixo B

Para rotação do suporte da micro-retífica em torno do eixo B, foi desenvolvido um mecanismo composto por um tubo com flange em uma extremidade, onde em seu interior movimenta um eixo, guiado por duas chavetas, acionado pelo fuso do eixo Z. O mecanismo suporte da micro-retífica é fixado neste eixo de movimentação Z. Quando giramos o tubo, por meio de seu flange, o eixo de movimentação Z também gira devido às chavetas. O flange do tubo é fixado na chapa do cabeçote por meio de parafusos. Esta chapa do cabeçote possui rasgo circular que, quando desapertamos os parafusos, podemos girar tubo, que gira o eixo de movimentação Z, que por sua vez, gira o suporte da micro-retífica. A FIG 3.18 apresenta o mecanismo de rotação de rotação em torno do eixo B, mostrando o tubo com flange, o eixo central de movimentação Z e as chavetas que guiam o eixo. A FIG 3.19 apresenta o mecanismo com o suporte da micro-retífica.

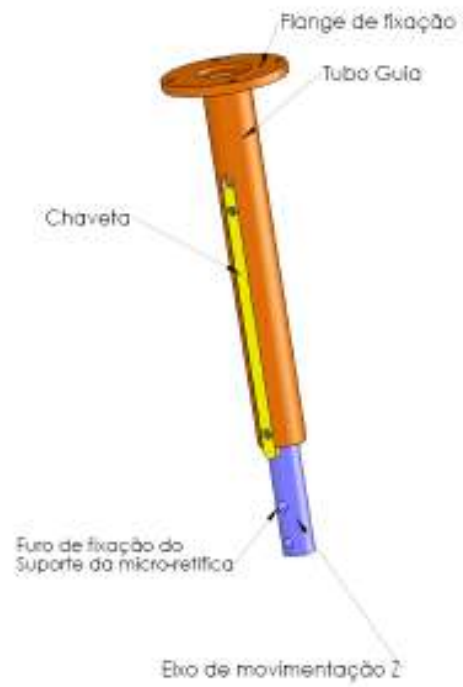


FIGURA 3.18 – Mecanismo de rotação do suporte da ferramenta no eixo vertical B.



FIGURA 3.19 – Mecanismo de rotação com o suporte da ferramenta.

A FIG 3.20 ilustra o movimento de rotação do suporte da micro-retífica em torno do eixo B. O movimento pode ser no sentido horário ou anti-horário, feito manualmente por meio dos parafusos de fixação do flange do tubo guia.

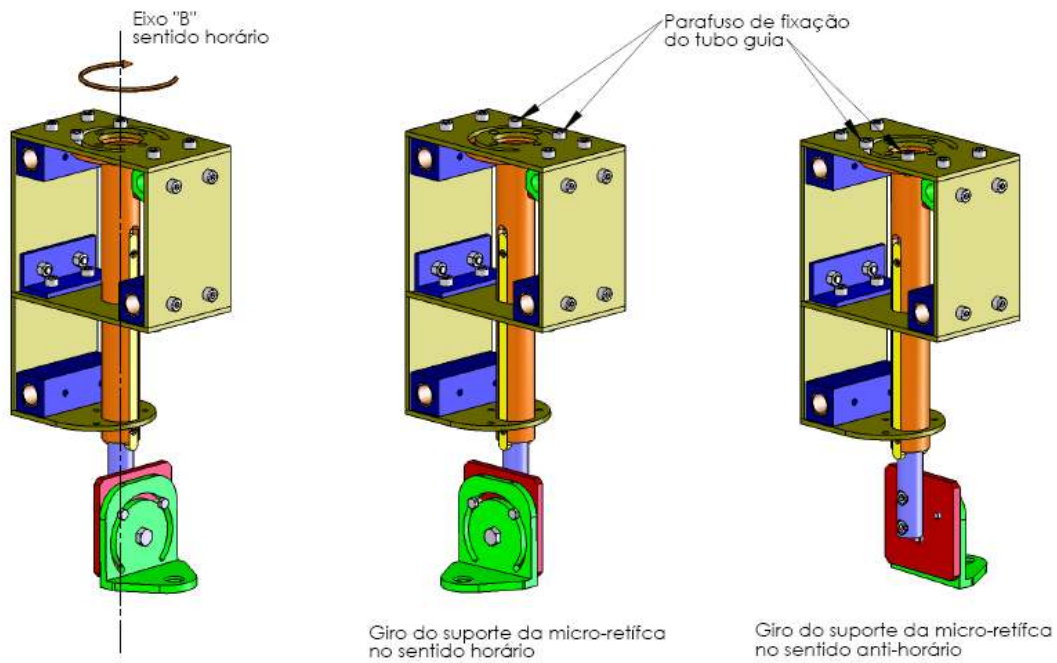


FIGURA 3.20 – Movimento de rotação do suporte da micro-retífica em torno do eixo B.

3.3.2.3 Estrutura do cabeçote de movimentação

Tendo desenvolvido o mecanismo responsável pela rotação da micro-retífica nos eixos horizontal C e vertical B, passou-se para o desenvolvimento da estrutura do cabeçote. Inicialmente, foi definido que o cabeçote seria acionado por um sistema de fuso com rosca trapezoidal e porca, guiado por um sistema de duas guias de perfil circular com mancais com bucha de bronze. Entretanto, após analisar as forças e momentos atuantes no cabeçote, definimos adotar três guias circulares, o que possibilitaria mais rigidez ao conjunto. A estrutura do cabeçote foi então projetada utilizando-se chapas de aço com espessura de 5 mm, sendo as chapas montadas e fixadas por meio de cantoneiras e também por meio dos mancais guias e da caixa da porca do fuso Y. A geometria das chapas, os furos para fixação e demais detalhes foram concebidos por meio de corte a laser em máquina CNC, o que propiciou maior precisão das dimensões projetadas. A FIG 3.21 apresenta o desenvolvimento da estrutura do cabeçote movimentação.

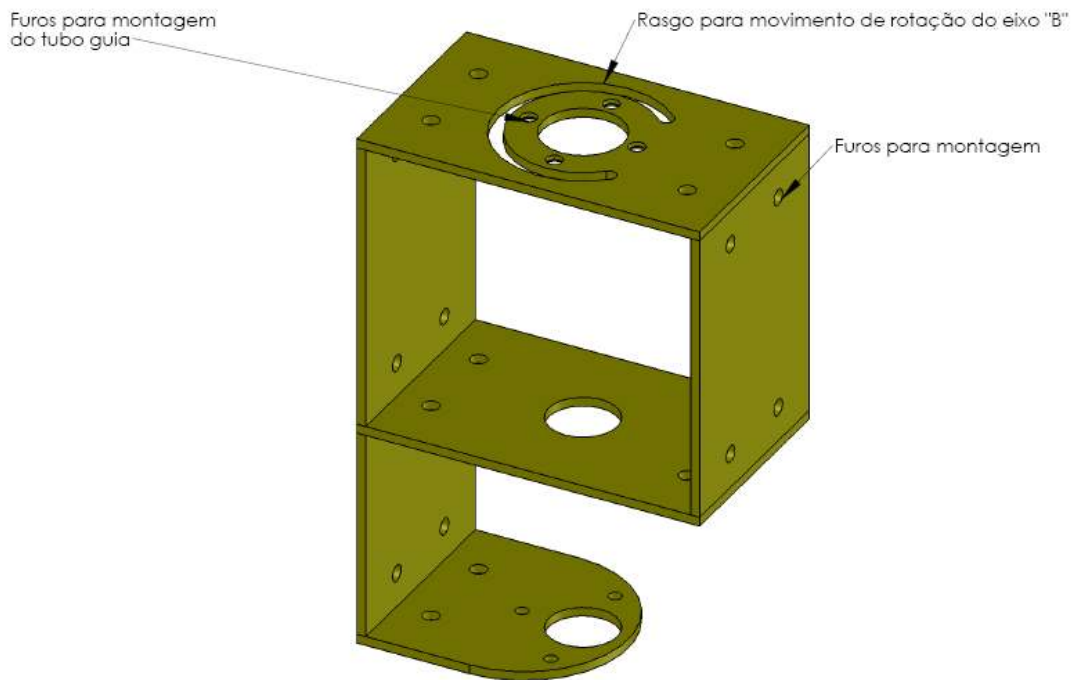


FIGURA 3.21 – Estrutura do cabeçote de movimentação

A FIG 3.22 apresenta o desenvolvimento do cabeçote da fresadora, com os principais componentes e peças desenvolvidas. A montagem das chapas não apresenta soldas, sendo utilizados como elementos de fixação, uma cantoneira, os mancais guias e conjunto mancal-porca do fuso. O tubo guia pode girar livremente, possibilitando o movimento no eixo vertical B. O suporte da micro-retífica também pode girar livremente, possibilitando o movimento no eixo horizontal C. O fuso Z ao ser acionado, movimenta o eixo Z que é guiado pelo tubo guia e também pelas chavetas. O tubo guia é fixado na estrutura do cabeçote por meios de parafusos, que ao desapertarmos, pode-se gira-lo manualmente e, devido às chavetas fixadas no eixo de movimentação Z, ocasiona o giro do mesmo. Como o suporte da micro-retífica está fixado nesse eixo, ele também gira. Assim, ao girar o tubo guia, gira-se também a micro-retífica em torno do eixo B.

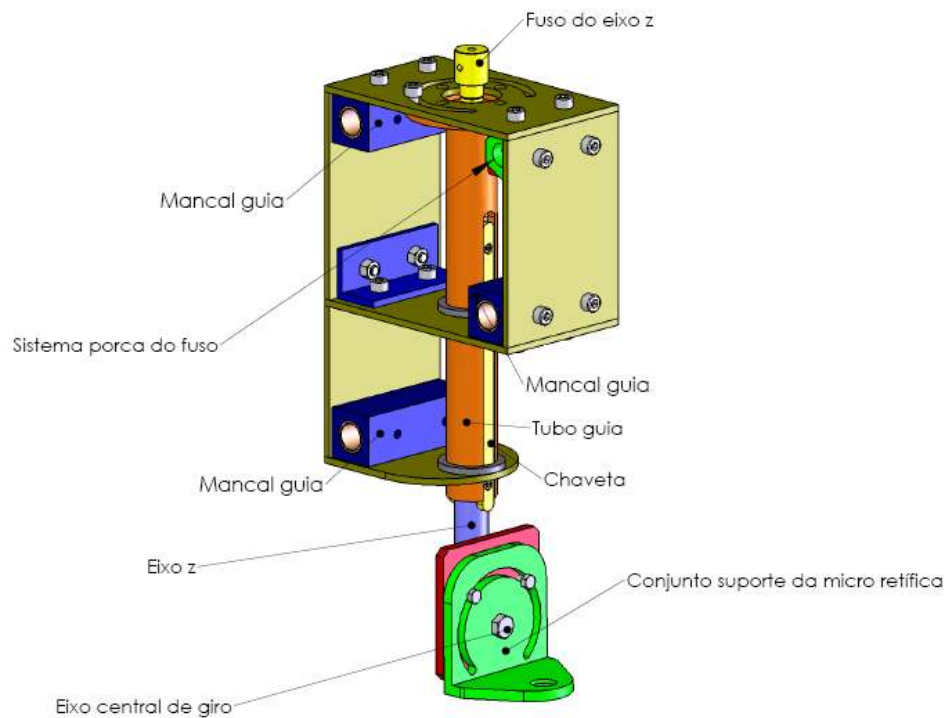


FIGURA 3.22 – Cabeçote de movimentação da fresadora

3.3.3 Desenvolvimento da estrutura lateral

A estrutura lateral é responsável pela sustentação das três guias de perfil circular do cabeçote de movimentação, dos mancais do fuso Y e liga o conjunto ao sistema de translação no eixo X. A estrutura seria composta de 02 chapas com espessura de 5 mm em aço-carbono, com uma chapa de madeira (MDF) com espessura de 25 mm entre elas para aumentar a rigidez sem aumentar muito o peso e criando assim uma estrutura de mais baixo custo. Foi considerada uma estrutura de cada lado da mesa.

As chapas de aço foram produzidas por meio de corte a laser em máquina CNC que, além de maior precisão nas dimensões, o custo é inferior quando comparado a uma usinagem convencional ou em máquina CNC. A geometria da estrutura lateral foi desenvolvida de tal forma que o centro da ferramenta de corte coincidissem com o centro do conjunto caixa-porca do fuso do eixo X. Além disso, foi desenvolvido um perfil que evitasse a interferência da micro-retífica com as estruturas laterais em situações de giro do eixo C. A FIG 3.23 apresenta o desenvolvimento dessa estrutura lateral.

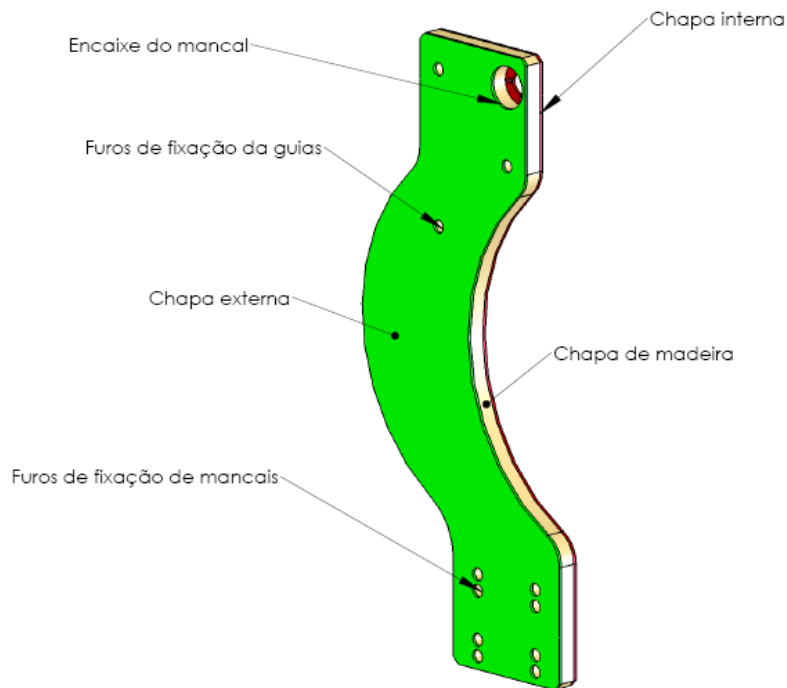


FIGURA 3.23 – Desenvolvimento da estrutura lateral

3.3.4 Desenvolvimento dos mancais para as guias circulares

Definido que as guias para os movimentos de translação seriam de geometria circular, pela facilidade de construção e baixo custo. Decidiu-se que seriam utilizados mancais com bucha em bronze. Para facilitar a construção, adotou-se para o mancal, um tarugo de seção quadrada de 1.1/2”, bitola comercialmente encontrada para venda, e para as guias circulares, adotou-se um diâmetro de 20 mm. A seção quadrada do mancal facilita a fixação e a usinagem das roscas de fixação. A FIG 3.24 apresenta o desenvolvimento do conjunto de mancais guia para os eixos X e Y.

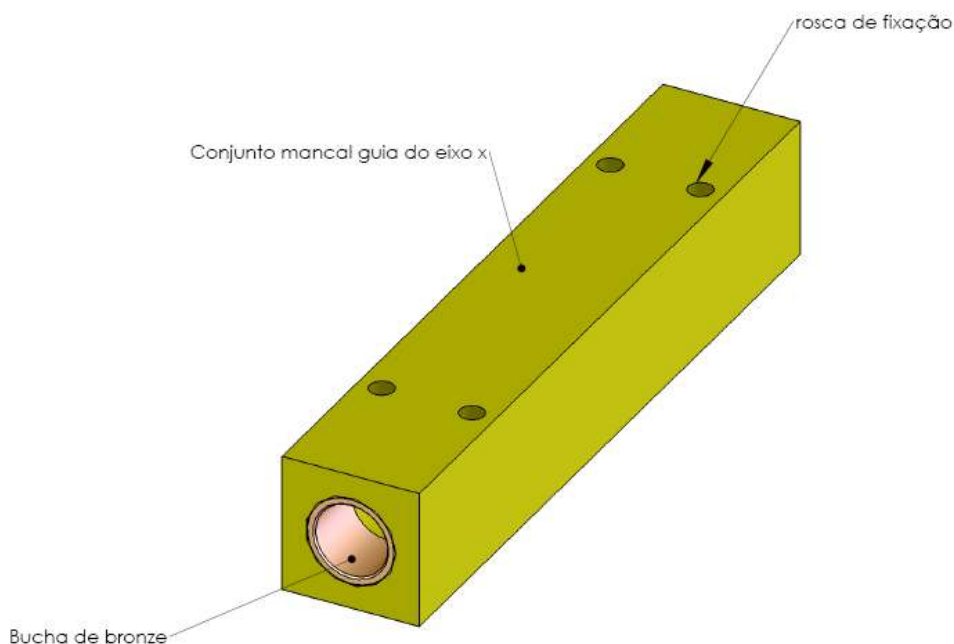


FIGURA 3.24 – Desenvolvimento do conjunto mancais guia

3.3.5 Desenvolvimento dos fusos

Adotou-se para movimento de translação do cabeçote e das estruturas laterais, um sistema de fusos à rosca trapezoidal com dispositivo eliminador de folga. Apesar de existirem outras concepções de fusos, como o sistema de esferas re-circulantes, adotou-se o de rosca trapezoidal, pela maior facilidade de fabricação e menor custo em geral apesar do maior atrito em parte resolvido com lubrificação adequada. Para garantir maior precisão nos movimentos, desenvolveu-se um conjunto de porcas com eliminador de folga. Para os eixos X e Y, adotou-se o diâmetro de 16mm, sendo razoável pelo porte do equipamento. Para o eixo Z, adotou-se o diâmetro de 12mm, tendo em vista que os esforços sobre ele são menores e, o diâmetro deveria ser o menor possível para minimizar as dimensões do cabeçote. Deve-se ressaltar que as dimensões adotadas atendem satisfatoriamente aos critérios de resistência e rigidez propostos ao equipamento. A FIG 3.25 apresenta o desenvolvimento do fuso com rosca trapezoidal.

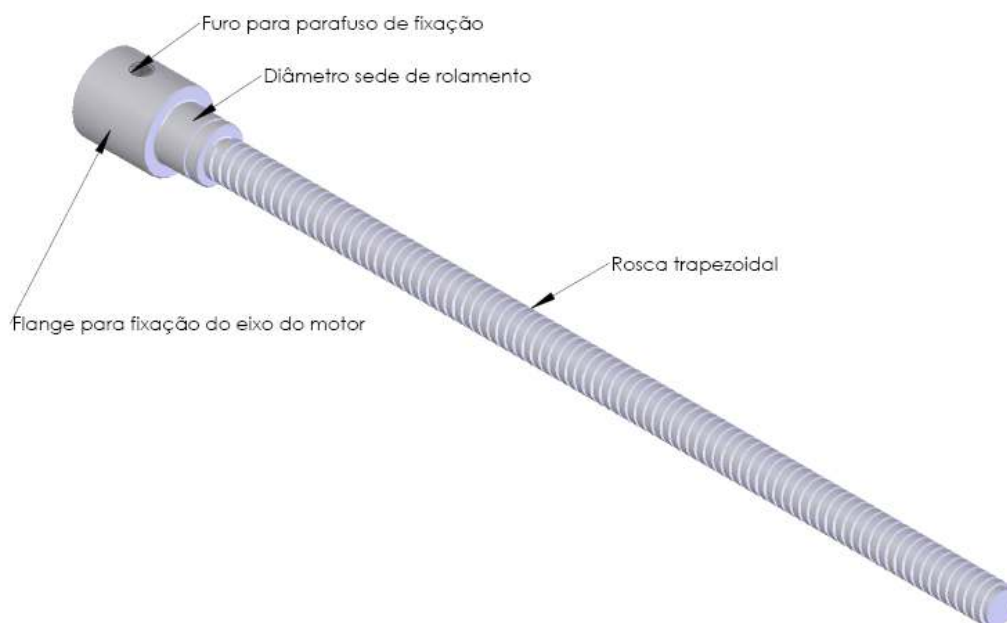


FIGURA 3.25 - Desenvolvimento do fuso com rosca trapezoidal

3.3.6 Desenvolvimento dos mancais dos fusos de translação

O próximo passo foi desenvolver uma fixação para os fusos. Inicialmente, decidiu-se fixar o motor diretamente na chapa da estrutura da máquina e, o fuso seria fixado no eixo do motor e apoiado na outra extremidade. Concluiu-se posteriormente que isso não seria viável, porque todos os esforços, axial, radial e momento fletor no fuso seriam transferidos diretamente para os mancais de rolamento do motor, o que ocasionaria danos a ele. Então, decidiu-se adotar a solução de desenvolver mancais para fixação dos fusos, que trabalhariam bi-apoiado para fuso X e fuso Y, e em balanço para o fuso Z, sendo que os motores a passo seriam fixados nestes mancais. Posteriormente, os motores seriam acoplados aos fusos, exercendo apenas o esforço de torção. Suportes foram fixados por meio de parafusos nas chapas da estrutura da fresadora. Utilizaram-se rolamentos rígidos de uma carreira de esferas no interior do mancal para minimizar as perdas de potência ocasionada pelo atrito. A FIG 3.26 apresenta o desenvolvimento dos suportes dos mancais de rolamento dos fusos.

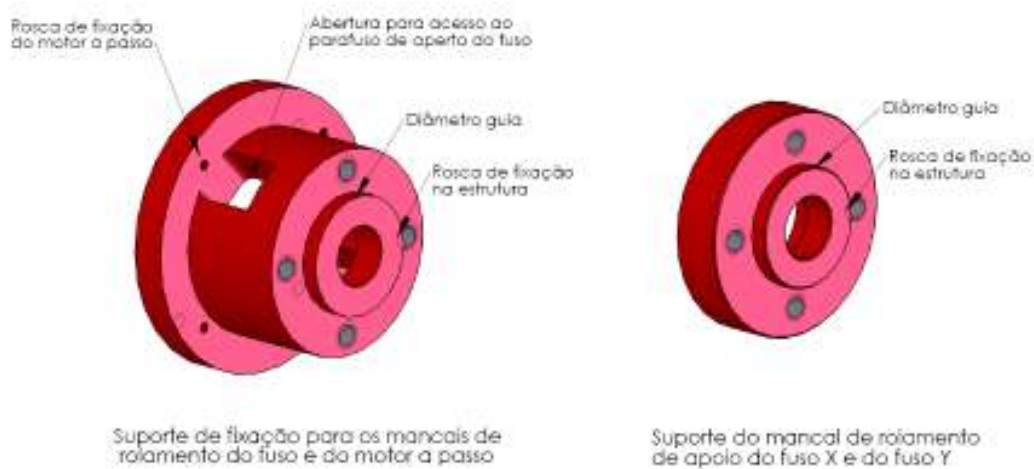


FIGURA 3.26 – Desenvolvimento dos suportes de fixação dos mancais de rolamento dos fusos X e Y

A FIG 3.27 apresenta a montagem do fuso Y nos mancais de rolamento conjuntamente com os respectivos suportes apresentados para exemplificar o funcionamento do conjunto mancais e fuso.

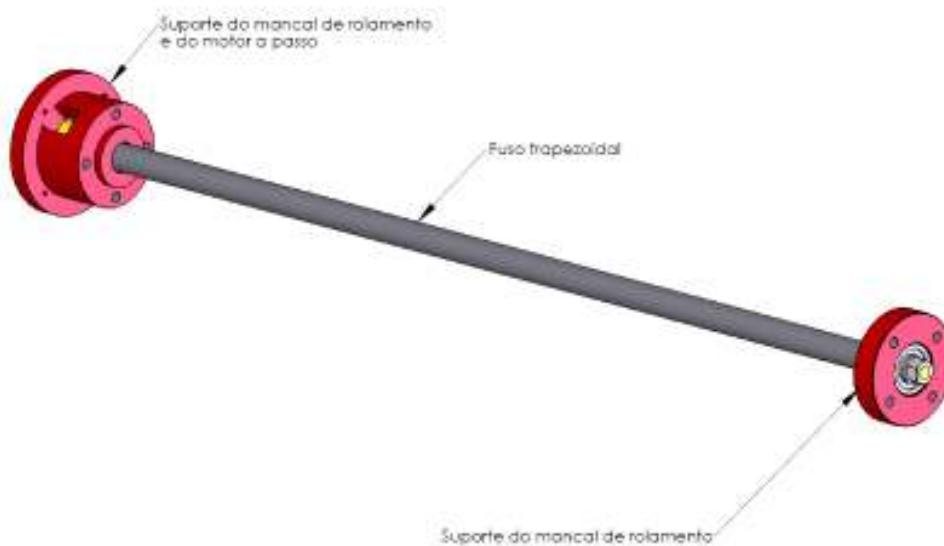


FIGURA 3.27 – Montagem do fuso Y nos mancais de rolamentos e suportes dos mancais

3.3.7 Desenvolvimento do conjunto mancal porca

Para o desenvolvimento de um dispositivo que eliminasse continuamente as folgas, projetou-se uma caixa com duas porcas de bronze com uma mola entre elas. A FIG 3.28 apresenta o desenvolvimento do conjunto mancal porca para o fuso com rosca trapezoidal. O objetivo de eliminar a folga é garantir uma maior precisão no deslocamento das partes móveis da fresadora. A caixa das porcas foi desenvolvida a partir de tarugo de aço-carbono com seção quadrada de 1.1/2" (38,1 mm) para facilitar a montagem na chapas estruturais do equipamento. Internamente, apresenta furo de seção quadrada onde são montadas as porcas de bronze, também de seção quadrada, o que evita o giro da porca. Foi utilizado processo de usinagem por eletroerosão na confecção deste furo quadrado interno da caixa da porca, o que possibilitou maior precisão nas dimensões. A função da mola é manter sempre em contato as porcas com o fuso.

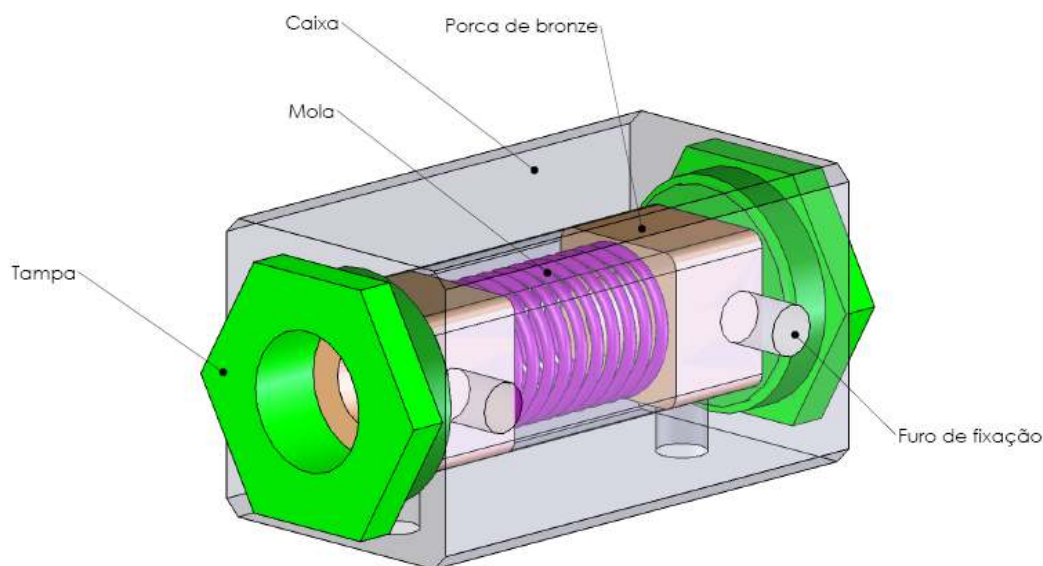


FIGURA 3.28 – Desenvolvimento do conjunto de porcas com sistema de eliminação de folgas para o fuso trapezoidal

3.3.8 Desenvolvimento da estrutura inferior suporte do conjunto de porcas

As duas estruturas laterais são movimentadas por meio do sistema de fuso e porcas, o que torna necessária uma estrutura que as fixe conjuntamente. O conjunto de porcas do eixo X posiciona-se no centro entre as duas estruturas laterais do equipamento. A FIG 3.29 apresenta o desenvolvimento desta estrutura.

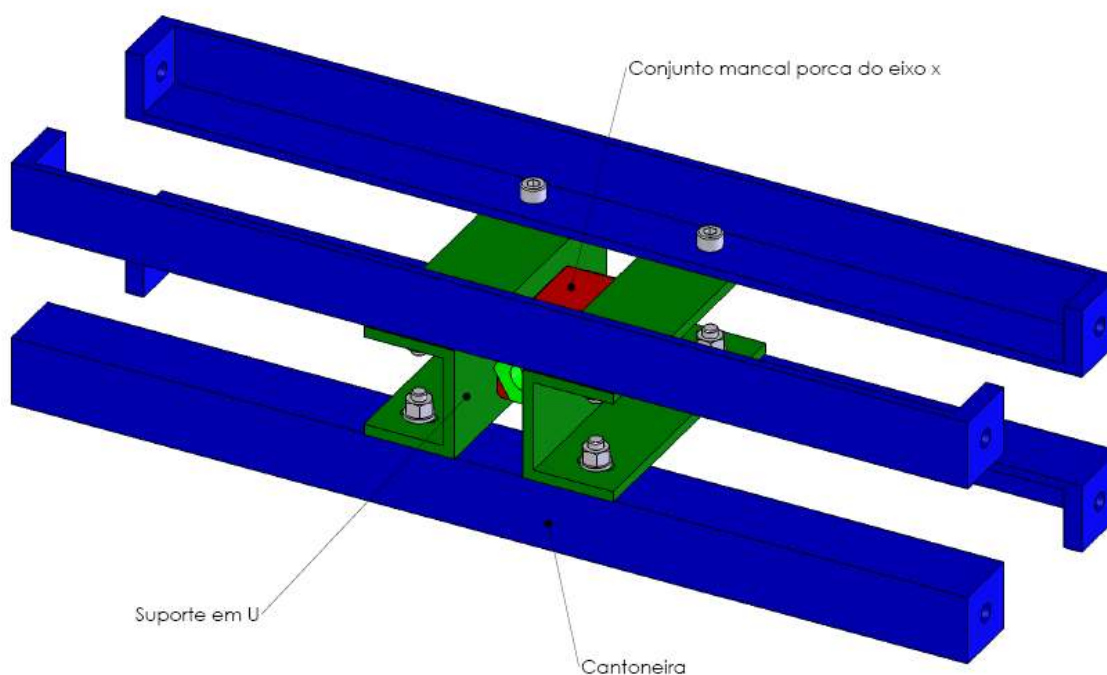


FIGURA 3.29 – Desenvolvimento da estrutura inferior suporte do conjunto de porca do eixo X

Adotaram-se quatro cantoneiras para interligar e fixar as duas laterais da máquina e, entre elas, desenvolveu-se dois suportes em “U”, que possui regulagem por meio de furos obilongos para a fixação do conjunto mancal porca do fuso X. Esta configuração possibilitou uma rigidez bastante satisfatória e, além disso, é de fácil construção e montagem.

A FIG 3.30 apresenta o conjunto da estrutura inferior montada com as estruturas laterais da fresadora. Este conjunto se movimenta ao longo do eixo X por meio do acionamento do sistema de transmissão fuso/porcas.

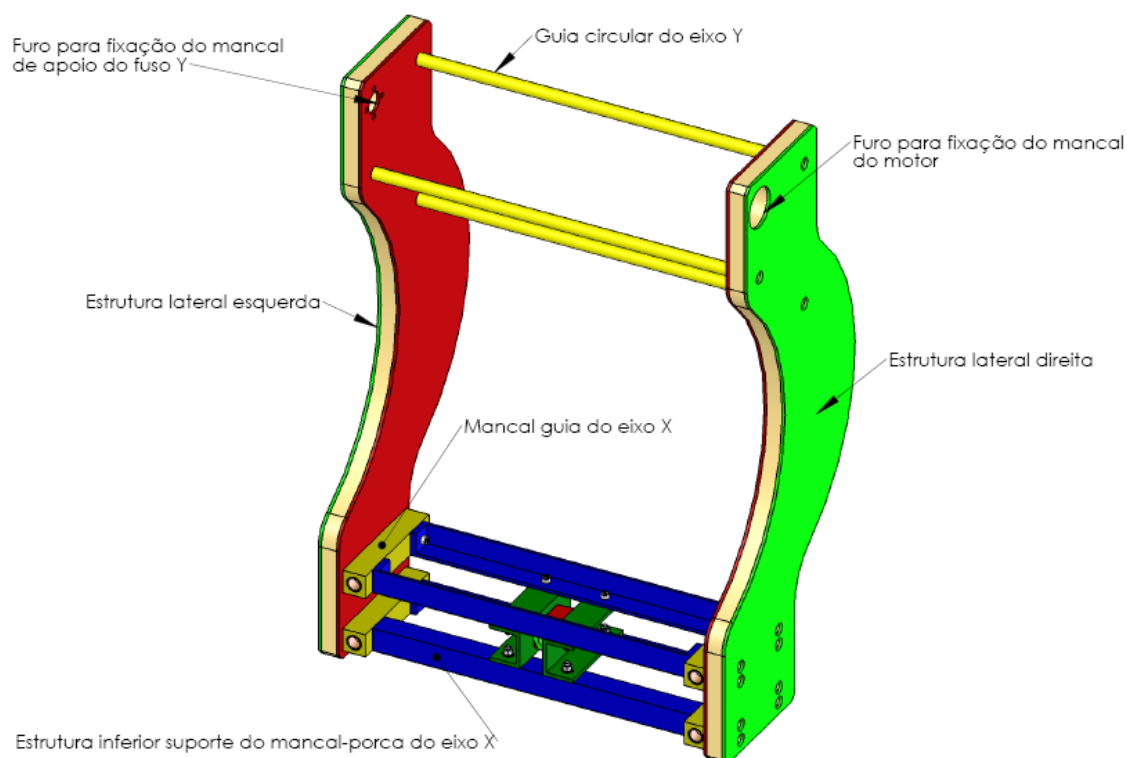


FIGURA 3.30 – Montagem da estrutura inferior com as estruturas laterais

3.3.9 Alterações realizadas no equipamento

Após a fabricação das peças e montagem do equipamento fez-se uma avaliação inicial de funcionamento e optou-se em alterar algumas partes do equipamento.

As guias de perfil circular do eixo X, não apresentavam rigidez suficientemente satisfatória, devido ao peso registrado no conjunto da estrutura inferior montada com as estruturas laterais da fresadora, apesar das baixas tensões atuantes devido aos esforços aos quais eram solicitadas. A solução adotada para essa situação, foi desenvolver um sistema de guias laterais mais rígidas.

Devido ao baixo torque desenvolvido pelos motores a passo, optou-se por segurança utilizar redutores de velocidade, redução 1:25, assim aumentou-se o torque transmitido aos fusos, para melhor deslocar as partes móveis da fresadora sem o perigo de sobrecarga no sistema de comando numérico.

O eixo de movimentação Z conjuntamente com o tubo guia do cabeçote não apresentaram rigidez satisfatória. Adotou-se a solução de desenvolver uma guia em material nylon para o eixo de movimentação com o objetivo de melhorar a rigidez do conjunto.

Inicialmente pensou-se em colocar a fresadora sobre uma mesa para operá-la. Entretanto, observou-se que seria conveniente desenvolver uma estrutura para colocar o equipamento e possibilitar o deslocamento mais facilmente. Então, desenvolveu-se uma estrutura feita de cantoneiras com rodízios para o seu deslocamento.

Decidiu-se colocar dispositivo conhecido como “fim de curso” nos movimentos dos eixos X, Y e Z, para aumentar a segurança na operação do equipamento.

A FIG 3.31 ilustra os pontos de deficiência avaliados preliminarmente.

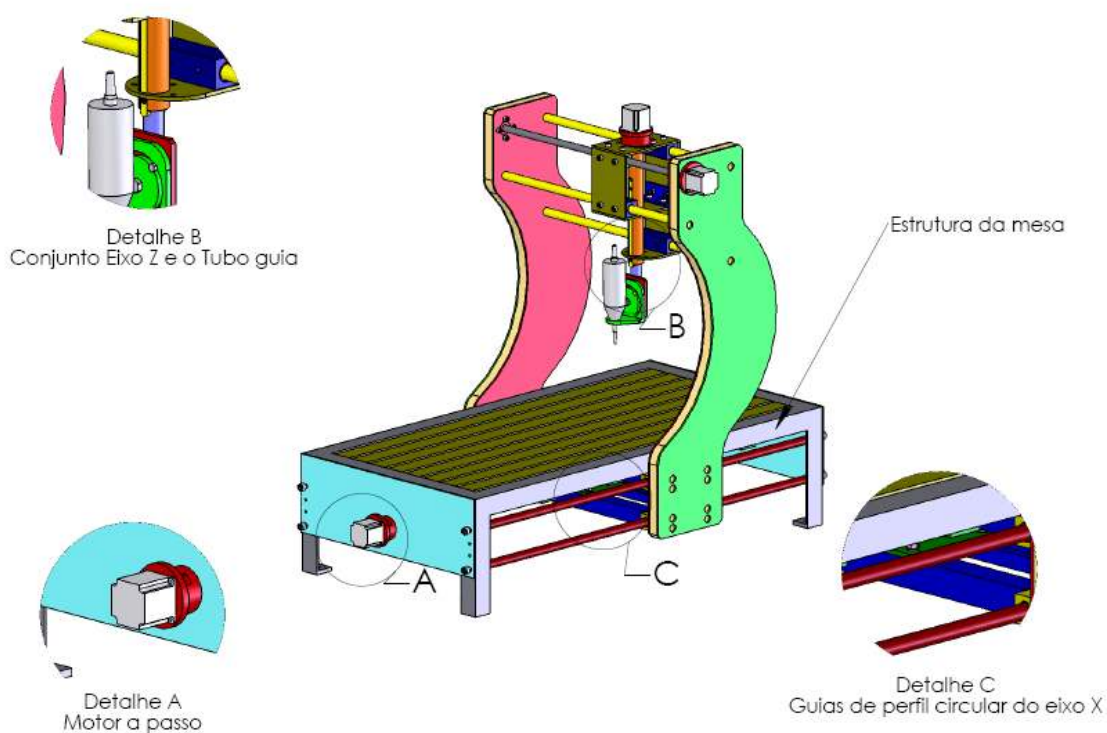


FIGURA 3.31 – Avaliação preliminar da fresadora

A seguir passamos para o desenvolvimento das soluções adotadas para as deficiências observadas.

3.3.9.1 Desenvolvimento das guias laterais

Pensando em melhorar a rigidez das estruturas laterais do equipamento, várias soluções foram propostas. Adotou-se uma solução viável e satisfatória, fixou-se um perfil estrutural no sentido do eixo X, onde, um conjunto de rolamentos fixados nas estruturas laterais da máquina seria guiado por este perfil. O primeiro passo foi definir o perfil estrutural a ser usado. Adotou-se um perfil estrutural “U” laminado com a bitola de 3” (75mm). Fixou-se duas chapas nas faces do perfil para possibilitar a montagem na fresadora. A FIG 3.32 apresenta o desenvolvimento do perfil “U”.

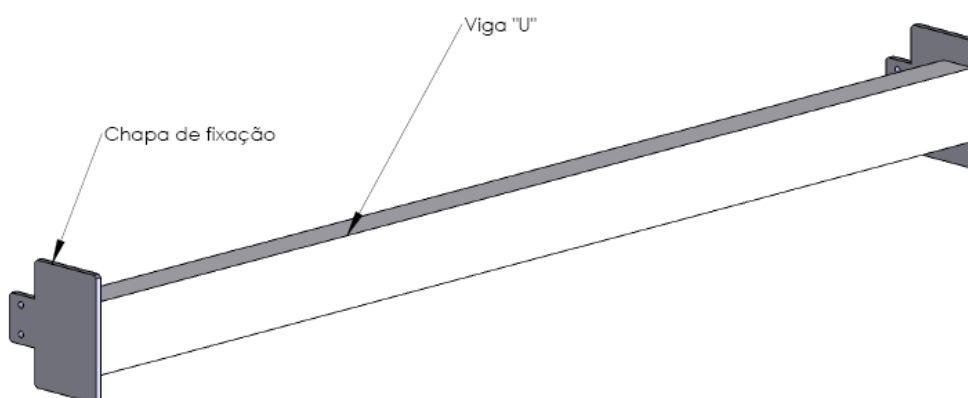


FIGURA 3.32 – Desenvolvimento do perfil para guia lateral

A seguir, desenvolveram-se os eixos com rolamentos que seriam fixados nas laterais da fresadora. Decidiu-se utilizar quatro rolamentos em cada lateral, dois na face superior e dois na face inferior. Os eixos dos rolamentos apresentam dois diâmetros, sendo excêntricos entre eles. Esta excentricidade foi adota para facilitar a regulagem dos rolamentos. Assim, ao girarmos o eixo, o rolamento se deslocaria até apoiar na face do perfil “U”. A FIG 3.33 apresenta o desenvolvimento do eixo excêntrico e a FIG 3.34 apresenta o eixo montado no rolamento.

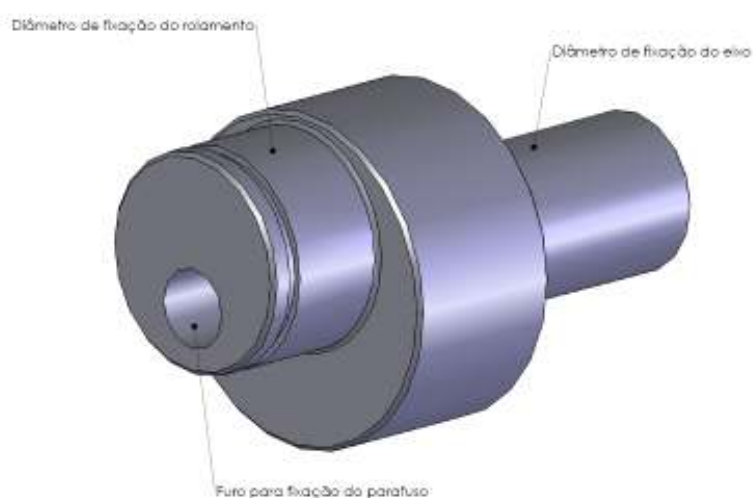


FIGURA 3.33 – Desenvolvimento do eixo excêntrico do rolamento da guia lateral

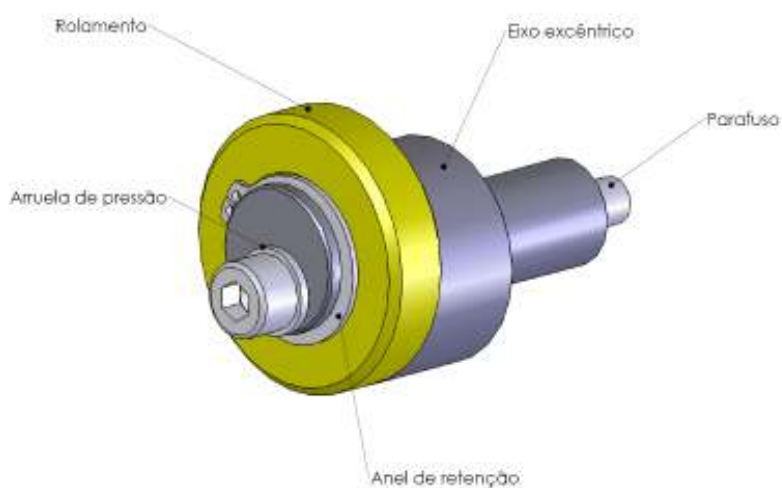


FIGURA 3.34 – Desenvolvimento do conjunto eixo rolamento da guia lateral

A FIG 3.35 apresenta a montagem do conjunto eixos rolamentos e o perfil “U” na estrutura lateral da fresadora. Como podemos observar, este mecanismo apresentou uma rigidez das laterais satisfatória, transferindo os esforços que estavam antes nas guias de perfil circular do eixo X para o perfil “U”. Assim, decidiu-se retirar a guia de perfil circular inferior

de cada lado da mesa, uma vez que o perfil “U” era suficiente para suportar os esforços verticais e com objetivo de diminuir as perdas por atrito na movimentação das estruturas laterais.

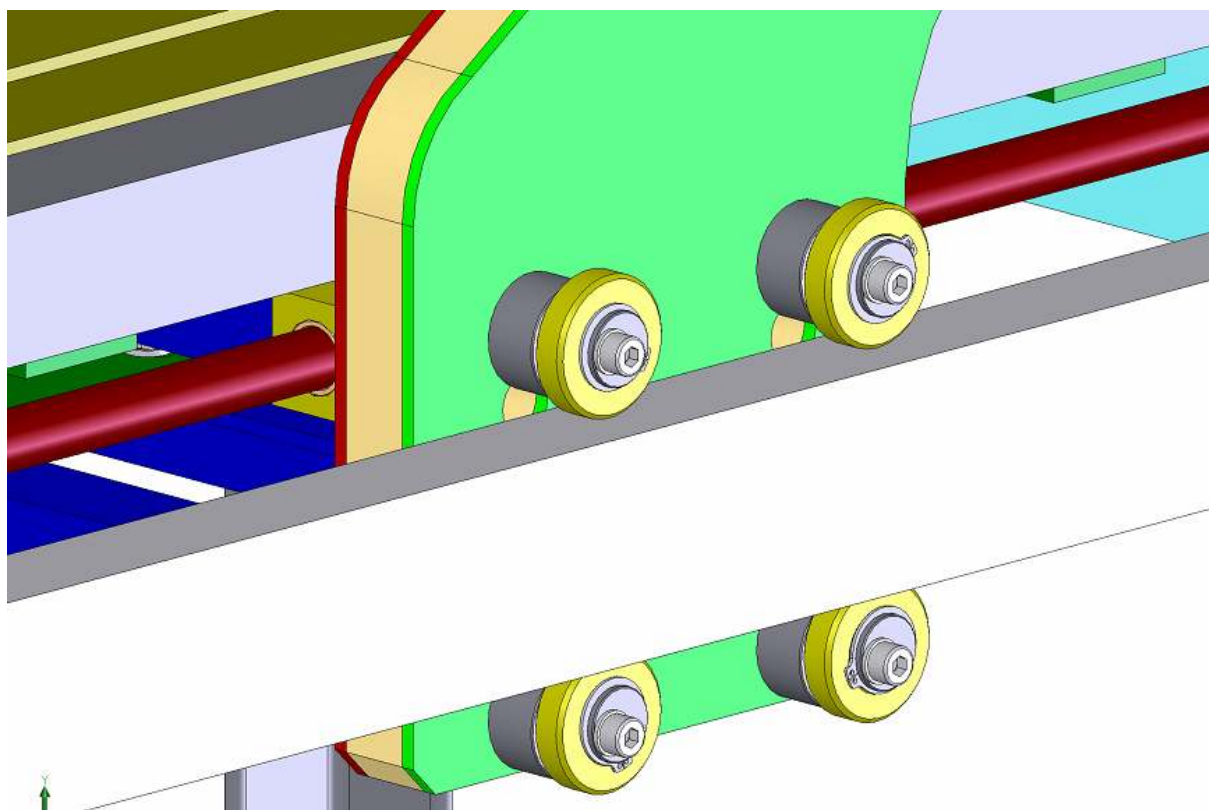


FIGURA 3.35 – Montagem dos rolamentos e perfil “U”

3.3.9.2 Desenvolvimento dos redutores de velocidade

Decidiu-se utilizar redutores de velocidade nos acionamentos dos fusos X, Y e Z para aumentar a capacidade de translação das estruturas laterais e do cabeçote suporte da micro-retífica. Além disso, os motores de passo trabalhariam com uma carga menor, visto que os mesmos são de baixa potência, aumentando a vida útil deles.

Dentre as várias configurações de redutores de velocidade, decidimos adotar o que utiliza trem de engrenagens pela maior facilidade de construção e menor custo. Conhecendo a potência do motor de passo, definimos que uma relação de redução de 1:25 atenderia satisfatoriamente o objetivo de aumentar o torque nos fusos. Adotamos então engrenagens de dentes retos no sistema módulo, sendo 04 engrenagens no total, 02 pinhões com 18 dentes e 02 coroas com 90 dentes. Pensando nas dimensões do redutor de velocidade adotamos o módulo de 1 mm para a fabricação das engrenagens, pois atenderia aos critérios de resistência

e de vida. A FIG 3.36 apresenta o desenvolvimento do redutor de velocidade para acionamento dos fusos.

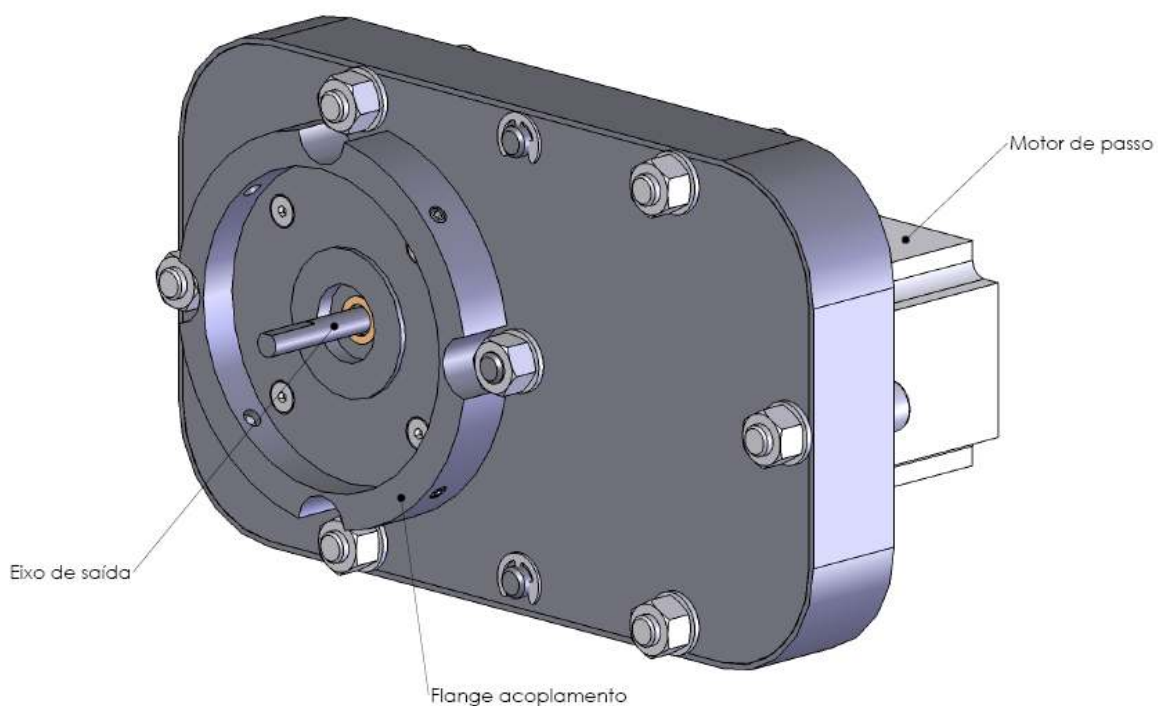


FIGURA 3.36 – Desenvolvimento do redutor de velocidade de acionamento dos fusos

Pensando em minimizar os custos na fabricação do redutor, utilizou-se na fabricação da caixa do redutor 02 chapas em aço-carbono de espessura 5 mm e para o fechamento lateral, utilizamos uma chapa fina de espessura 2 mm. O conjunto foi fixado por meio de parafusos, facilitando a desmontagem e montagem para manutenção.

3.3.9.3 Desenvolvimento do suporte para transporte da fresadora

Desenvolveu-se um suporte para movimentação da fresadora, pensando tanto em seu transporte e movimentação, quanto na opção de ser usado como base da mesa. Sendo fixado por meio de parafuso, esse suporte pode ser retirado e a fresadora pode ser colocada em cima de uma bancada, por exemplo. Utilizou-se uma estrutura de cantoneira igual aquela utilizada na fabricação da mesa, e colocou-se 04 rodízios onde a altura pode ser regulada. Assim, quando desejamos movimentar a fresadora, regulamos os rodízios até apoiarem no chão. Como foi citado anteriormente, utilizou-se para os pés da fresadora, eliminadores de vibração, conhecidos como “vibra stop®”. A FIG 3.37 apresenta o desenvolvimento do suporte para movimentação da fresadora.

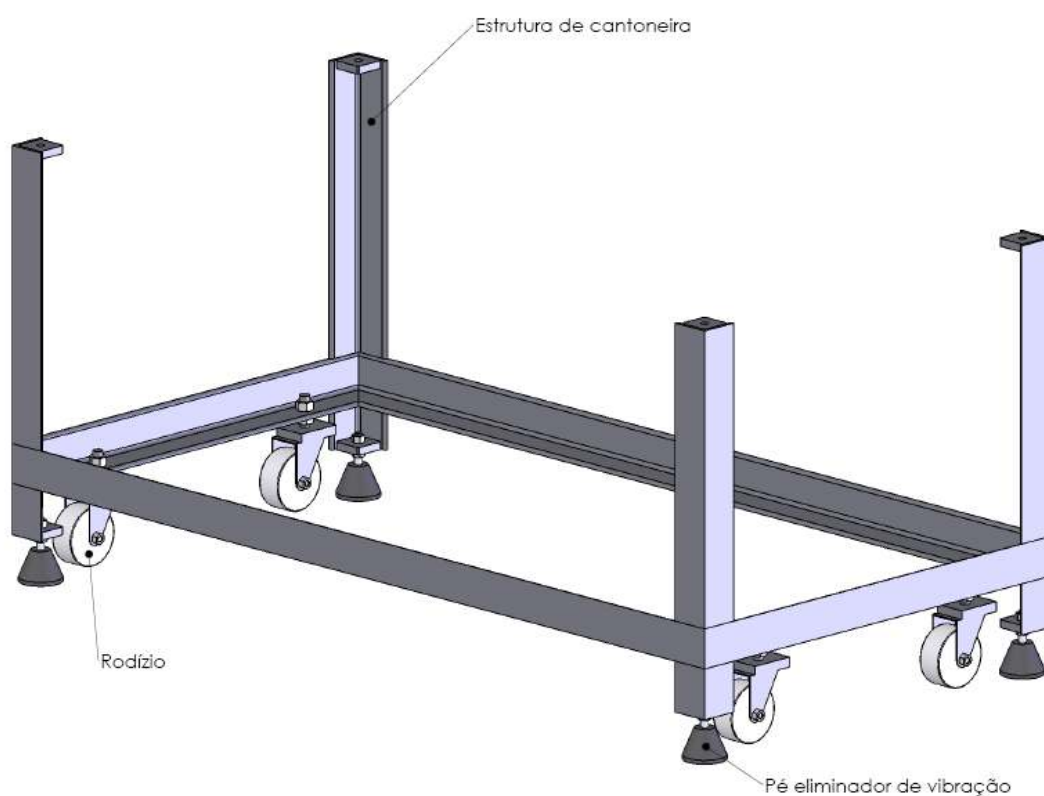


FIGURA 3.37 – Desenvolvimento do suporte para transporte da fresadora

3.3.9.4 Desenvolvimento do mancal guia do eixo de movimentação Z

Para melhorar a rigidez do eixo de movimentação Z, desenvolveu-se um mancal de deslizamento feito em nylon, que foi montado na chapa inferior da estrutura do cabeçote. Assim, quando o eixo de movimentação Z é acionado, além de ser guiado pelo tubo guia, ele também é guiado por este mancal. A FIG 3.38 apresenta o desenvolvimento do mancal guia do eixo de movimentação Z.

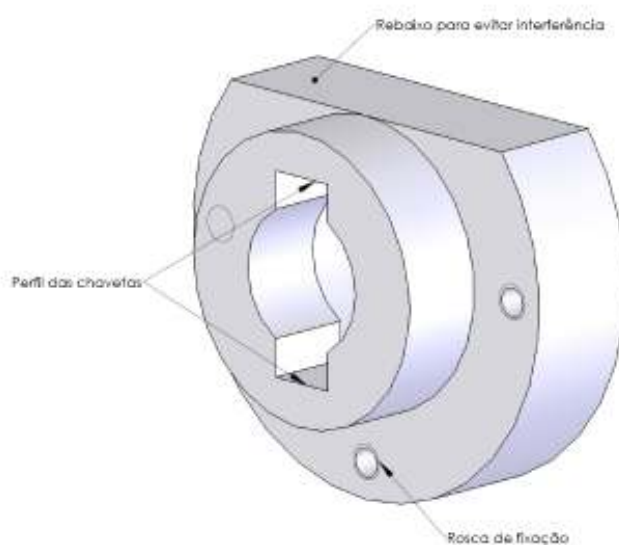


FIGURA 3.38 – Desenvolvimento do mancal guia do eixo de movimentação Z

3.3.9.5 Desenvolvimento da chapa de acionamento do fim de curso

Foi desenvolvido uma chapa para acionamento do fim de curso do eixo Z. A chapa foi fixada no eixo de movimentação Z e o fim de curso foi fixado por meio de um suporte no mancal guia. A FIG 3.39 apresenta a montagem destes componentes no cabeçote de movimentação da fresadora.

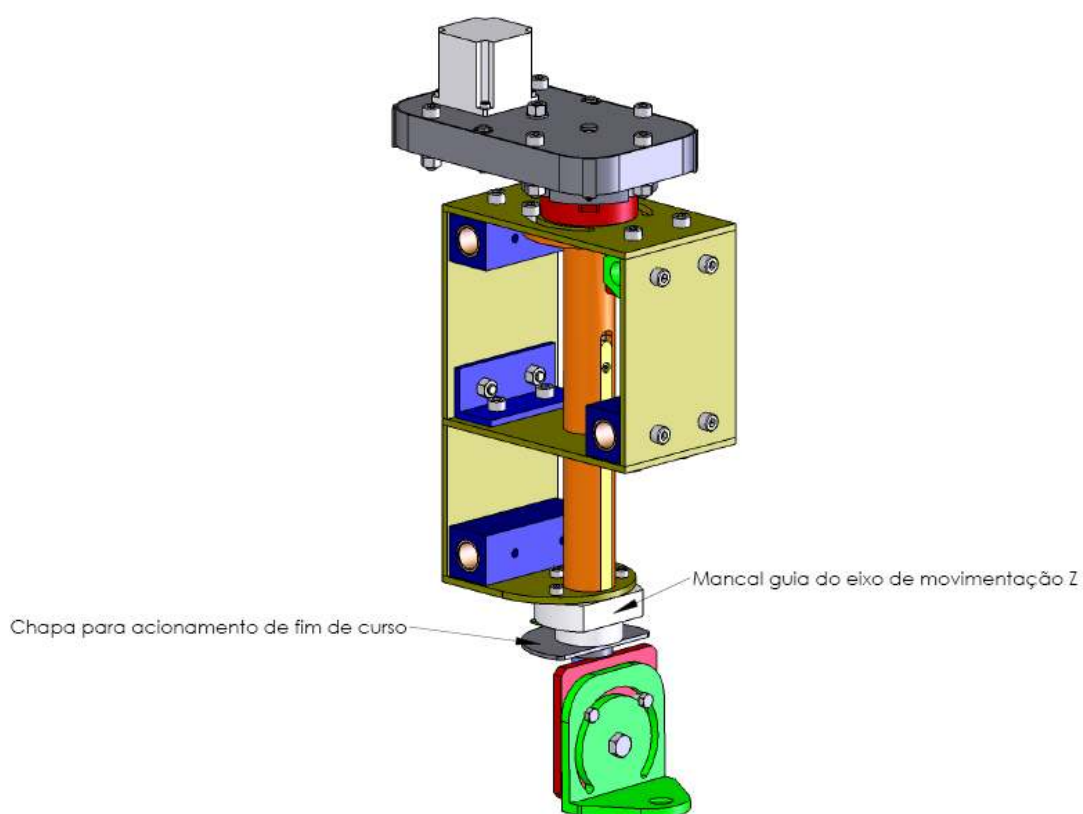


FIGURA 3.39 – Montagem do mancal guia e da chapa de acionamento de fim de curso

3.3.9.6 Introdução dos fins de curso

O objetivo da colocação dos fins de curso é aumentar a segurança na operação do equipamento. Em uma situação na falha do programa ou do operador, o fim de curso evita colisões das partes móveis com as fixas. É um dispositivo de segurança, ao ser acionado ele imediatamente interrompe os movimentos de translação da fresadora. As FIG 3.40, 3.41 e 3.42 apresentam a introdução do fim de curso do eixo X, Y e Z, respectivamente.



FIGURA 3.40 – Fim de curso do eixo X.



FIGURA 3.41 – Fim de curso do eixo Y.



FIGURA 3.42 – Fim de curso do eixo Z

3.4 Desenvolvimento final

Após o desenvolvimento de todas as peças e mecanismos, a FIG 3.43 apresenta o desenvolvimento final da fresadora com a configuração proposta. A FIG 3.44 apresenta o resultado do desenvolvimento.

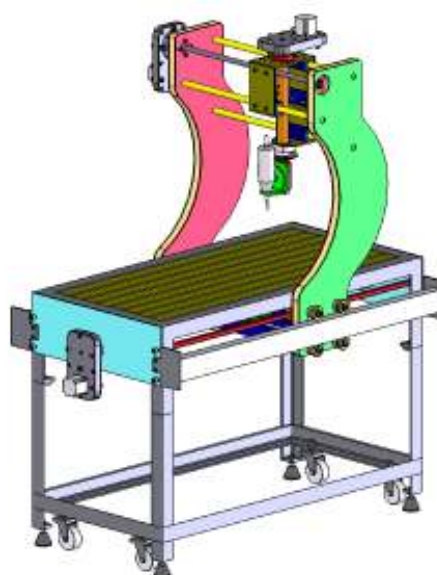


FIGURA 3.43 – Desenvolvimento da configuração final da fresadora



FIGURA 3.44 – Resultado do desenvolvimento da configuração final da fresadora

3.5 Verificação dimensional da fresadora

3.5.1 Verificação da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa

Para verificação da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa durante a translação do cabeçote, utilizou-se um relógio comparador com resolução 0,01 mm acoplado a uma base magnética. Foram definidos pontos ao longo da mesa e a partir de um ponto referencial, foram feitas as medições e compilados os valores. A FIG 3.45 ilustra como foram feitas as medições.

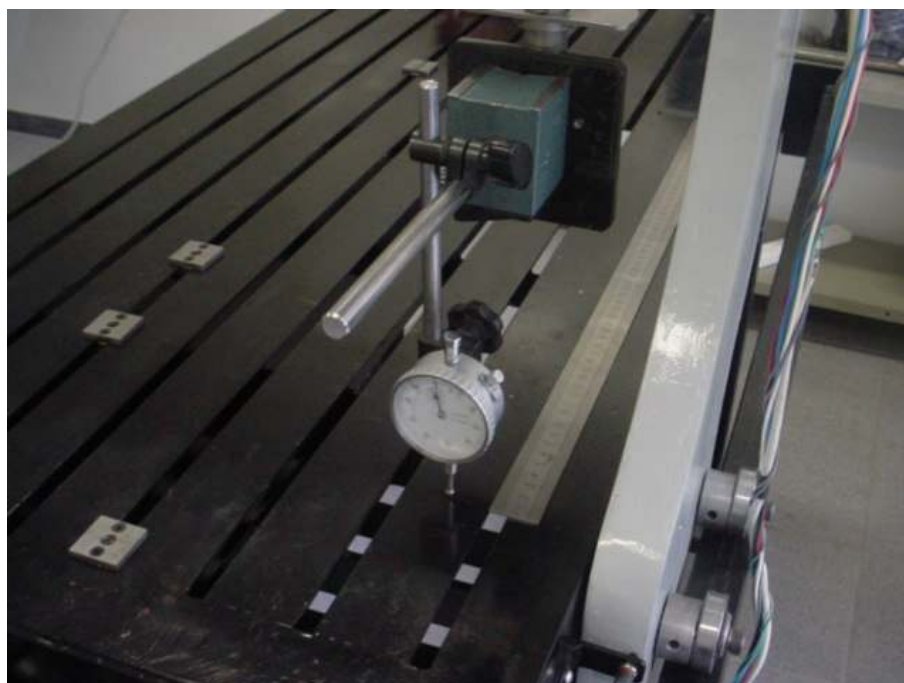


FIGURA 3.45 – Verificação da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa fixa

3.5.2 Verificação da variação entre a posição numérica indicada no comando e a posição física atingida pelo equipamento nas direções X, Y e Z.

Utilizou-se um relógio comparador de resolução 0,01 mm acoplado a uma base magnética para verificar a variação entre posição numérica indicada no comando (software) e a posição física real nas direções X, Y e Z atingida pelo cabeçote ou suporte da micro-retífica na movimentação.

Antes de fazerem-se os ensaios propriamente ditos procurou-se ajustar os parâmetros do software relacionados à resolução do sistema, tentando minimizar os erros advindos do software de controle do comando numérico.

Foram feitos três ensaios para as direções X, Y e Z. A média dos valores encontrados foi compilado em uma tabela.

Fixou-se a base magnética com o relógio comparador na mesa da fresadora, posicionou-se o cabeçote de movimentação em contato com o relógio, então era conduzido ao ponto zero tanto o relógio comparador como o comando (software). Iniciou-se o movimento do cabeçote por meio do sistema manual de movimentação JOG na direção positiva continuamente e, a cada 01 mm indicado no sistema de coordenadas do software MaxNC[®] CL2, verificou-se o valor indicado no relógio comparador, em curso total de 05 mm (devido ao pequeno curso do relógio comparador). Para as duas primeiras direções (X, Y) foram consideradas posições externas e centrais da mesa. No caso da direção Z, os ensaios foram feitos na posição mais baixa do suporte da ferramenta. A FIG 3.46 apresenta o ensaio feito na direção X e as FIG 3.47 e 3.48 para as direções Y e Z, respectivamente.



FIGURA 3.46 – Ensaio de calibração de posição na direção X

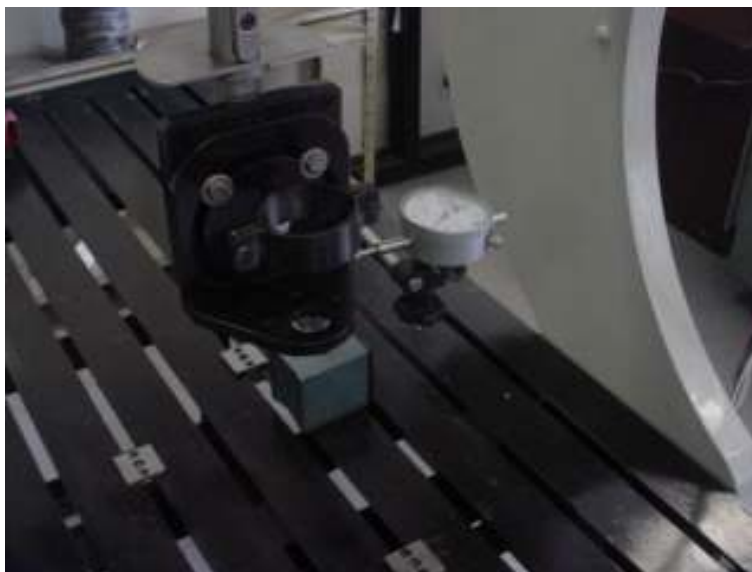


FIGURA 3.47 – Ensaio de calibração de posição na direção Y

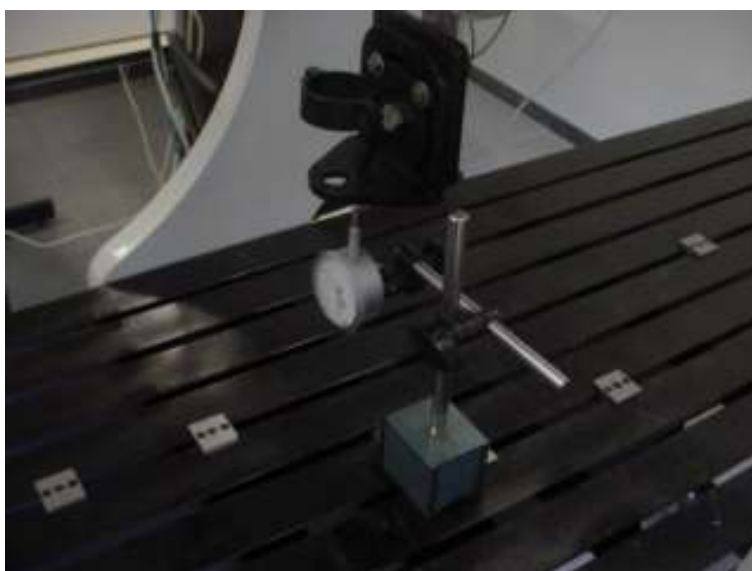


FIGURA 3.48 – Ensaio de calibração de posição na direção Z

No caso da direção Y foram feitos ensaios considerando-se também a movimentação da parte superior do cabeçote, sendo que a base magnética foi fixada nas chapas laterais conforme apresentado na FIG 3.49.



FIGURA 3.49 – Ensaio de calibração da parte superior do cabeçote na direção Y

3.6 Construção de protótipos

Foram definidos dois tipos de protótipos: um protótipo para avaliação dos movimentos do equipamento nas direções X, Y e Z considerando-se o plano de trabalho XY e outro protótipo para avaliação do desempenho do equipamento no fresamento nos plano de trabalho XY, XZ e YZ.

A partir da geração de um sólido desejado utilizando-se o AutoCAD 2000, o objeto gravado em extensão DXF é importado para o software 3DForm release 2 que promove o fatiamento do referido sólido no plano e no número de camadas desejadas. Em seguida promove-se a geração do código CNC. Este código apresenta-se na extensão DAT e pode ser editado. Utilizando-se o software Gcode 2000 pode-se simular a trajetória da ferramenta e corrigir possíveis erros. Posteriormente utilizando-se o software MaxNC[®] CL2 que corresponde a interface do sistema de controle numérico do equipamento desenvolvido procede-se o fresamento das peça.

Os protótipos foram construídos utilizando-se como material o poliestireno expandido, conhecido como isopor[®], por ser um material de baixa resistência mecânica, que oferece segurança nos testes para não danificar a ferramenta de corte ou a Fresadora, e, por ser um material de baixo custo. Utilizou-se como ferramenta corte uma ferramenta de material abrasivo, conhecido como ponta montada, com diâmetro de 3 mm, devido ao melhor acabamento de usinagem proporcionado. Os parâmetros de usinagem foram ajustados empiricamente até se conseguir os resultados desejáveis de acabamento superficial.

3.6.1 Protótipo logomarca

O primeiro protótipo definido foi uma logomarca do Laboratório de Projetos Mecânicos da UFMG. O objetivo é avaliar o funcionamento da fresadora no plano XY. Utilizou-se o AutoCad[®] para gerar o sólido desejado conforme apresentado na FIG 3.50.

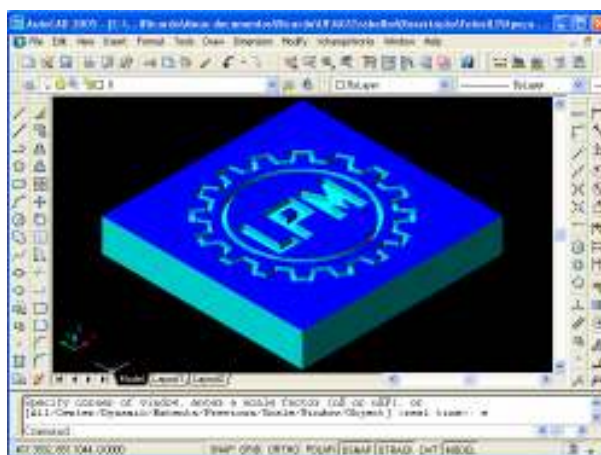


FIGURA 3.50 – Logomarca gerada no AutoCad[®]

Em seguida, utilizando-se o software 3D FORM Release 2 (Santos, 2002) é possível gerar o código CNC importando o sólido gerado no AutoCad[®] como mostra a FIG 3.51.

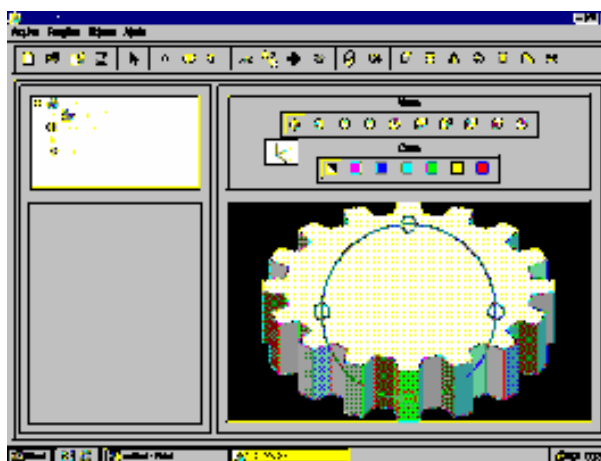


FIGURA 3.51 – Geração de parte do código CNC do protótipo logomarca no software 3D FORM Release 2

Depois de gerado o código CNC, é possível simular a trajetória da ferramenta utilizando o software Gcode 2000 como ilustra a FIG 3.52. À direita na figura é apresentado o código CNC e a direita a simulação da trajetória da ferramenta de corte.

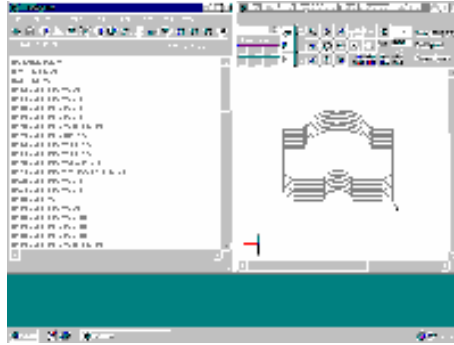


FIGURA 3.52 – Simulação da trajetória da ferramenta no software Gcode

2000

Com código CNC editado, e, utilizando o software MaxNC[®] CL2, procedeu-se a usinagem do protótipo conforme apresentado nas FIG 3.53.



FIGURA 3.53 – Sequência de fresamento do protótipo logomarca

3.6.2 Protótipo peça 3D

O segundo protótipo definido teve como objetivo avaliar o fresamento nos planos de trabalho XY, XZ e YZ. A metodologia do desenvolvimento utilizada foi a mesma no protótipo da logomarca, porém, para o fresamento nos planos de trabalho XZ e YZ houve a giro do cabeçote de movimentação nos eixos B e C. A FIG 3.54 apresenta a geração do sólido no AutoCad®, a FIG 3.55 apresenta a geração do código CNC e a FIG 3.56 apresenta o fresamento do protótipo peça 3D.

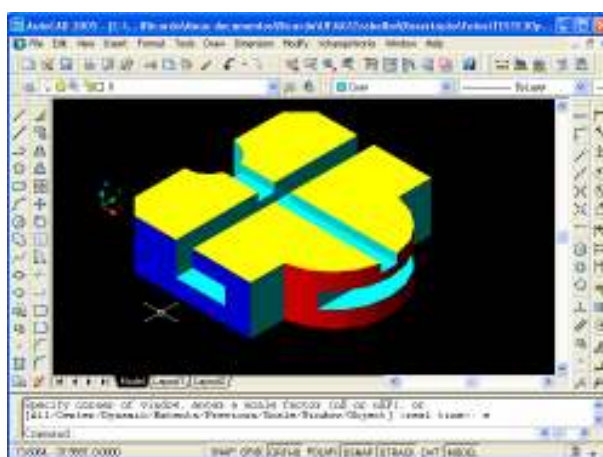


FIGURA 3.54 – Geração da peça 3D no AutoCad®

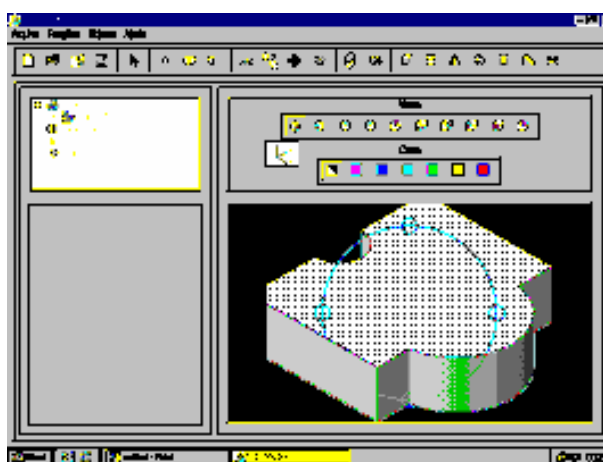


FIGURA 3.55 – Geração de parte do código CNC do protótipo 3D no software 3D FORM Release 2

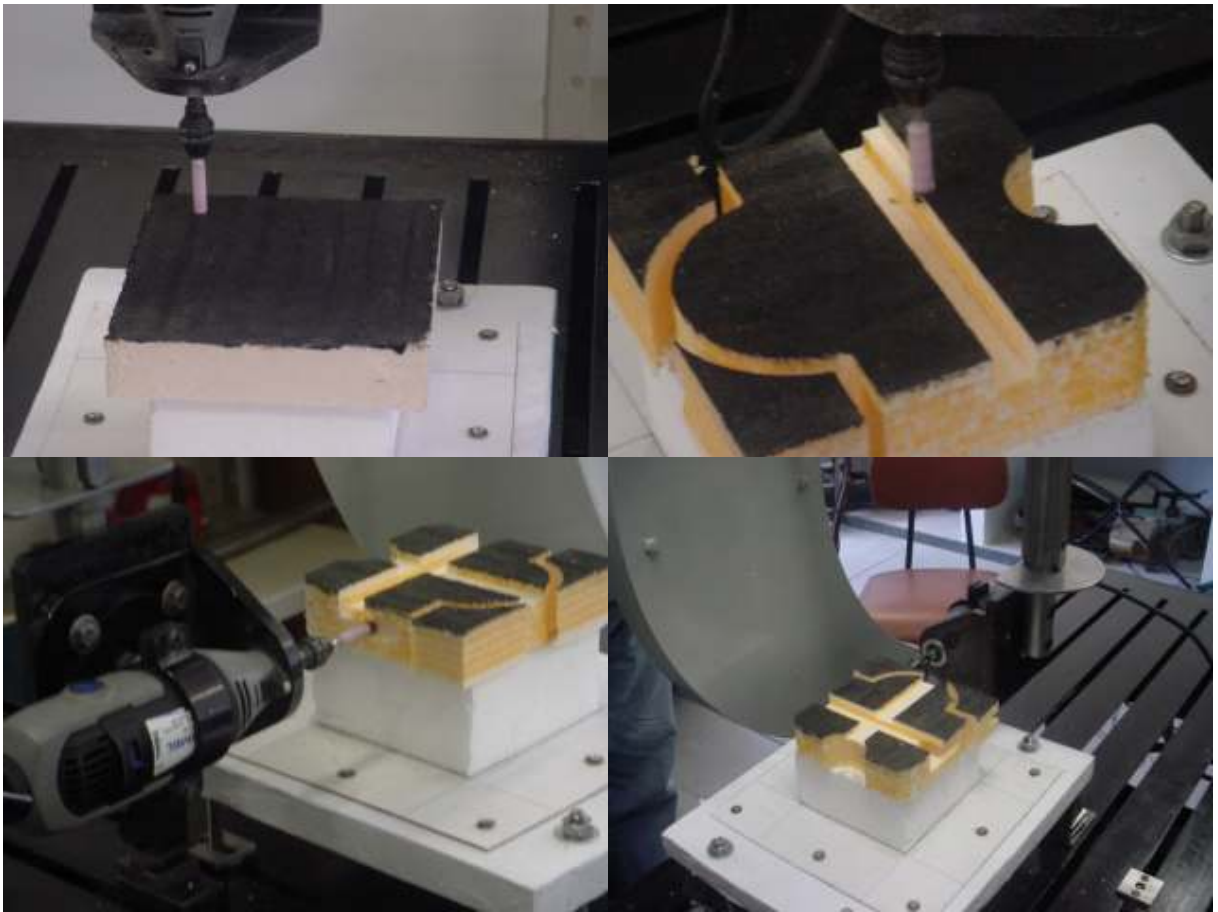


FIGURA 3.56 – Seqüência de fresamento do protótipo peça 3D

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 A fresadora

O resultado final do desenvolvimento do equipamento é uma fresadora do tipo “Router” controlada numericamente por computador. A fresadora possui a mesa fixa e a ferramenta de corte translada nos eixos X, Y e Z. Além desses eixos, possui também os eixos A, também automatizado, os eixos B e C de rotação do suporte da micro-retífica, acionados manualmente e, o eixo W de rotação da ferramenta de corte. A FIG 4.1 apresenta o desenvolvimento da fresadora.



FIGURA 4.1 – Fresadora

QUADRO 4.1
Características principais da fresadora

Cursos X/Y/Z	950/450/200 mm
Mesa	600 x 1200 mm
Potência de corte	130 W
Dimensões comp./larg./alt.	1350/780/1700 mm
Peso total	215 kgf
Avanço rápido	150 mm / min
Tensão	127 V
Eixos de translação	X, Y e Z
Eixos de rotação	A, B, C e W

4.2 Avaliação da fresadora

4.2.1 Resultados da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa

Para verificar a variação de altura entre o cabeçote de movimentação foram definidos pontos na mesa da fresadora, como mostra a FIG 4.2, como referência para a calibração da planicidade do fresamento.

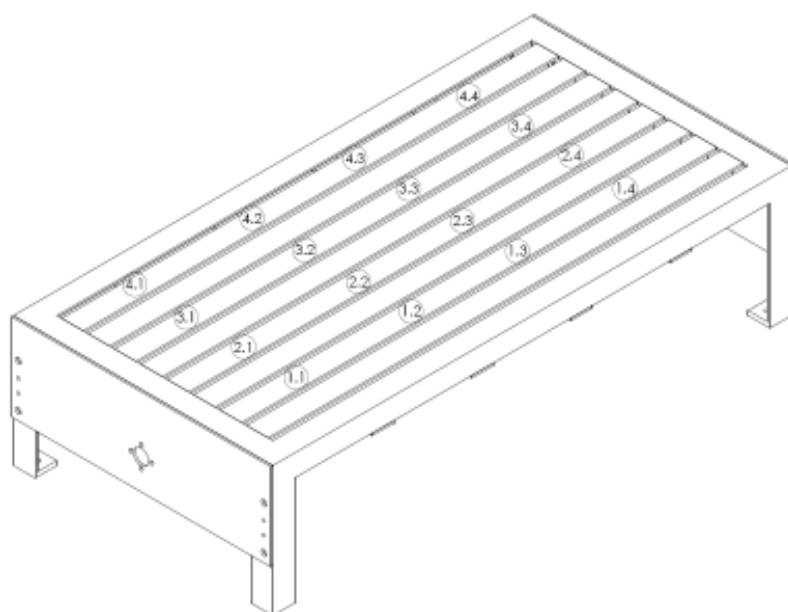


FIGURA 4.2 – Esquema de pontos marcados na mesa para verificação da variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa.

Após serem feitas três ensaios, a média das variações foi compilada em uma tabela. A TAB 4.1 apresenta os valores encontrados nas medições.

TABELA 4.1
Variação de altura entre o cabeçote de movimentação e a mesa

Ponto	Var. (mm)	Ponto	Var. (mm)	Ponto	Var. (mm)	Ponto	Var. (mm)
1.1	0.00	2.1	0.08	3.1	0.06	4.1	0.00
1.2	0.12	2.2	0.15	3.2	0.14	4.2	0.20
1.3	0.09	2.3	0.08	3.3	0.16	4.3	0.24
1.4	0.30	2.4	0.35	3.4	0.40	4.4	0.37

4.2.2 Resultados da variação entre a posição numérica indicada no comando e a posição física atingida pelo equipamento nas direções X, Y e Z.

Os resultados apresentados são a média dos valores dos três ensaios realizados nas direções X, Y, e Z.

TABELA 4.2
Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção X

Direção X - Positivo					
MaxNC Jog (mm)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Rel. Comp. (mm)	0.98	1.98	2.99	3.98	5.01
Direção X - Negativo					
MaxNC Jog (mm)	4.00	3.00	2.00	1.00	0.00
Rel. Comp. (mm)	4.56	3.58	2.55	1.57	0.56

TABELA 4.3
Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção Y

Direção Y – Positivo					
MaxNC Jog (mm)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Rel. Comp. (mm)	0.95	1.98	3.01	3.98	5.08
Direção Y – Negativo					
MaxNC Jog (mm)	4.00	3.00	2.00	1.00	0.00
Rel. Comp. (mm)	4.92	3.93	2.93	1.95	0.92

TABELA 4.4
Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção Y (parte superior)

Direção Y – Positivo (Parte Superior Cabeçote)					
MaxNC Jog (mm)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Rel. Comp. (mm)	0.96	1.96	2.93	3.93	4.95
Direção Y – Negativo (Parte Superior Cabeçote)					
MaxNC Jog (mm)	4.00	3.00	2.00	1.00	0.00
Rel. Comp. (mm)	4.56	3.54	2.58	1.59	0.57

TABELA 4.5
Valores da avaliação de movimentação do cabeçote na direção Z

Direção Z – Positivo					
MaxNC Jog (mm)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Rel. Comp. (mm)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Direção Z – Negativo					
MaxNC Jog (mm)	4.00	3.00	2.00	1.00	0.00
Rel. Comp. (mm)	4.10	3.15	2.16	1.16	0.16

Acredita-se que as variações encontradas nas direções X, Y e Z principalmente no movimento no sentido negativo se referem à folga no sistema de transmissão por engrenagens

cilíndricas retas quando há inversão da rotação e no caso da direção Y acrescenta-se a perda de rigidez entre o cabeçote de movimentação e o suporte da ferramenta.

4.3 Confeção de protótipos

O resultado do teste de fresamento são os protótipos da logomarca e a peça 3D apresentados nas FIG 4.3 e 4.4.



FIGURA 4.3 – Protótipo Logomarca



FIGURA 4.4 – Protótipo peça 3D

Analisando os protótipos usinados pela fresadora, foi constatado pequenas variações dimensionais, atingindo variações da ordem de 0,5 mm, em relação ao sólido gerado no AutoCad[®]. Pode-se atribuir estas variações, principalmente, à folga existente no engrenamento do redutor utilizado, já que o mesmo é composto por engrenagens cilíndricas de dentes retos. E também, a insuficiência de rigidez no cabeçote de movimentação.

Em relação ao engrenamento, como existe folga entre os dentes das engrenagens, quando é feito a inversão de rotação do motor a passo, o comando (software) interpreta que o sentido do movimento também foi invertido imediatamente. Porém, fisicamente, a inversão do sentido do movimento não acontece imediatamente, devido a engrenagem girar um pequeno ângulo até acontecer o contato novamente entre os dentes. A FIG 4.5 ilustra a variação de geometria e dimensão na confecção do protótipo Logomarca.



FIGURA 4.5 – Variação de geometria na confecção do protótipo Logomarca

Com relação à rigidez do cabeçote, o sistema eixo e tubo guia Z não apresentaram rigidez suficientemente satisfatória para não interferir significativamente no dimensional do protótipo, ocorrendo variação dimensional da ordem de 0,2 mm.

4.4 Verificação dos dimensionamentos dos elementos mecânicos

4.4.1 Verificação dos dimensionamentos dos fusos

A verificação do dimensionamento dos fusos, pode ser feita verificando somente o fuso Z que apresenta menor diâmetro. Os fusos X e Y apresentam o mesmo diâmetro.

O fuso Z está sujeito a um momento de torção e a uma força axial conforme apresentado na FIG 4.6.

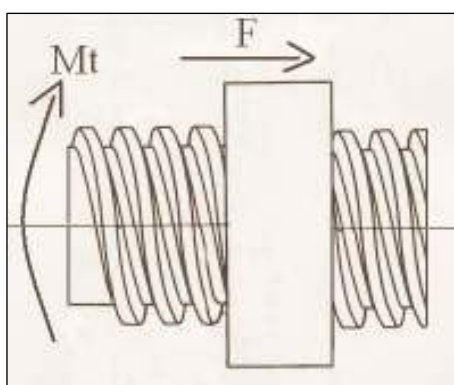


FIGURA 4.6 – Esquema de parafuso sob torção e força axial
 FONTE: FERRARESI, 1977 (adaptado)

O fuso Z projetado possui as seguintes dimensões principais apresentada no QUADRO (4.2).

QUADRO 4.2
 Dimensões principais do fuso Z

Diâmetro nominal	12 mm
Passo da rosca trapezoidal	2 mm
Número de entradas	1
Ângulo de inclinação do filete ϕ	15°
Diâmetro externo	12 mm
Diâmetro interno	10 mm
Material	Aço ABNT 1045
Material da porca	Bronze SAE 620

Temos ainda os seguintes dados para o dimensionamento:

Torque do motor a passo (M_{t1}): 1 N x m;

Relação de transmissão (i): 25;

Coefficiente de atrito entre o fuso e porca (f): 0,152 (ALBUQUERQUE, 1974, p.7);

Considerando as perdas de potência na transmissão pelo redutor a engrenagens em 0,08 da potência do motor a passo, teremos um torque na saída do redutor de:

$$i = \frac{M_{t_2}}{M_{t_1}} \therefore M_{t_2} = 23 \text{ N x m.}$$

Cálculo do diâmetro médio

$$D_m = \frac{D + d}{2} \therefore D_m = 11 \text{ mm.}$$

Cálculo do avanço

$$a = i \cdot p \therefore a = 2 \text{ mm.}$$

Cálculo do ângulo de hélice

$$\tan \alpha = \frac{a}{\pi \cdot D_m} \therefore \alpha = 3,3123^\circ.$$

Cálculo da força que atua no diâmetro médio da rosca

$$M_t = F \cdot D_m / 2 \therefore F \cong 4 \cdot 10^3 \text{ N.}$$

Cálculo da resultante axial

$$F = \frac{\cos \phi \cdot \tan \alpha + f}{\cos \phi - f \cdot \tan \alpha} \cdot P \therefore P \cong 18 \cdot 10^3 \text{ N.}$$

Cálculo da tensão atuante no núcleo

$$\sigma_c = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2} \therefore \sigma_c = 229 \text{ N/mm}^2.$$

Adotando uma tensão de compressão admissível para aço ABNT 1045 de 240 N/mm² (PROVENZA, 1996, p. 3-15), concluímos que o fuso atende ao critério de tensão de compressão e tração.

Cálculo da pressão de contato

$$p = \frac{P}{\pi \cdot D_m \cdot n \cdot h} \therefore p = 13 \text{ N/mm}^2 \text{ ou } 1,3 \text{ kgf/mm}^2.$$

Como a pressão admissível é 1,5 kgf/mm² conforme QUADRO 2.2, o fuso atende ao critério de pressão de contato.

Conclui-se que o fuso Z atende aos critérios de resistência. Como esse apresenta menor diâmetro que os fusos X e Y, conclui-se que os mesmos também atendem aos mesmos critérios, pois as solicitações são as mesmas do fuso Z.

4.4.2 Verificação dos dimensionamentos das guias circulares do eixo X

Utilizaram-se quatro barras de seção circular com diâmetro de 20 mm como guia na direção do eixo X. Estas barras além de terem a função de guiar os componentes móveis da máquina, também são responsáveis pela sustentação de várias estruturas. Posteriormente, foram adotadas duas vigas de perfil “U”, também como guias da direção X, para garantir maior rigidez ao conjunto. A FIG 4.7 apresenta todos os componentes e peças que as guias circulares sustentam.

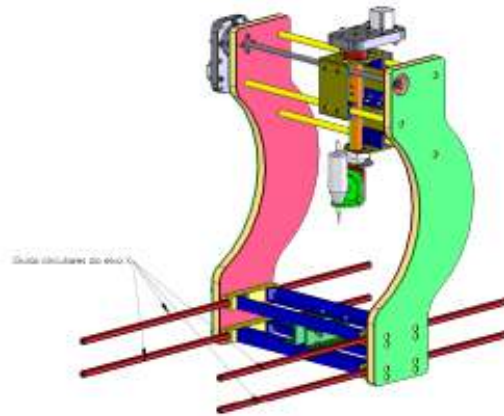


FIGURA 4.7 – Componentes que atuam como carga sobre as guias circulares do eixo X.

A soma de todos os pesos dos componentes que atuam como carga sobre as guias é aproximadamente de 99,642 Kgf. Podem-se desconsiderar os esforços e momentos atuantes durante a usinagem, porque como já foi demonstrado, o esforço significativo durante a usinagem é o de corte e não o de avanço. Para o dimensionamento, será considerada uma carga de 25 kgf centrada no comprimento de cada guia conforme apresentado na FIG 4.8.

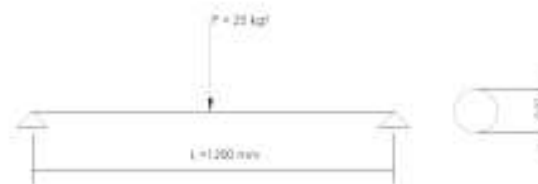


FIGURA 4.8 – Carregamento na guia circular do eixo X

Cálculo do momento fletor máximo:

$$M_f = \frac{P \cdot L}{4} \therefore M_f = 7500 \text{ kgf} \cdot \text{mm}.$$

Cálculo do momento de inércia da barra:

$$J_x = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \therefore J_x \cong 7854 \text{ mm}^4.$$

Cálculo da tensão de flexão:

$$\sigma = \frac{M_f}{J_x} \cdot y \therefore \sigma \cong 10 \text{ kgf} / \text{mm}^2.$$

Adotando-se uma tensão admissível para o material aço ABNT 1045 trefilado de 21 kgf / mm² (PROVENZA, 1996, p. 3-15), a barra atende ao critério de resistência a flexão.

Cálculo da flecha máxima:

$$y_{\text{máx}} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot J_x} \therefore y_{\text{máx}} \cong 6 \text{ mm}.$$

Adotando-se um módulo de rigidez de 20.000 kgf / mm² (PROVENZA, 1996, p. 3-15), concluímos que o valor teórico encontrado da flecha máxima não atende ao critério de rigidez. Por isso, a solução adotada foi projetar duas guias de perfil laminado “U” de bitola 75 mm para aumentar a rigidez na translação do eixo X. Sendo consideradas pequenas as cargas para estas barras. O que dispensa o cálculo das tensões e deformações nelas.

4.4.3 Verificação dos dimensionamentos das engrenagens do redutor

O motor a passo atinge seu torque máximo de 1 N x m em uma rotação aproximada de 150 rpm. O dimensionamento é feito a partir do pinhão que é a engrenagem mais solicitada. O pinhão do redutor possui os seguintes dados:

Material = Aço ABNT 1040 (1800 HB)

diâmetro primitivo = 18 mm;

número de dentes = 18;

módulo = 1 mm;

largura = 8 mm;

redução = 1:5;

fator de serviço = 1;

fator de forma = 3,5.

A partir das equações que definem o critério de vida da engrenagem, verifica-se o número de horas teórico que o pinhão atingirá.

Cálculo da pressão de contato admissível:

$$b \cdot d^2 = 5,72 \cdot 10^5 \cdot \frac{M_t}{P_{adm}^2} \cdot \frac{i \pm 1}{i \pm 0,14} \cdot \varphi \therefore P \cong 507 \text{ N/mm}^2.$$

Cálculo do fator de durabilidade do pinhão:

$$P_{adm} = \frac{0,487 \cdot HB}{W^{1/6}} \therefore W \cong 27.$$

Cálculo do número de horas teórico de trabalho do pinhão:

$$W = \frac{60 \cdot n_p \cdot h}{10^6} \therefore h = 3000 \text{ horas.}$$

O pinhão também satisfaz as condições de montagem onde $b/d \leq 0,75$. Neste caso, $b/d \cong 0,44$.

É importante verificar também se a engrenagem atende também o critério de resistência.

Cálculo da força tangencial atuante no pinhão:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_t}{d} \therefore F_t \cong 111 \text{ N.}$$

Cálculo da tensão de flexão atuante no pinhão:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_t \cdot q \cdot \varphi}{b \cdot m} \therefore \sigma_{m\acute{a}x} \cong 49 \text{ N/mm}^2.$$

Adotando-se uma tensão admissível de 120 N/mm^2 (MELCONIAN, 2000, p. 94), conclui-se que as engrenagens atendem ao critério de resistência a flexão.

4.4.4 Verificação do dimensionamento da potência de usinagem

4.4.4.1 Potência de usinagem para o aço

O cálculo a seguir é para um aço ABNT 1020 com dureza 125 HB para fresamento de topo. Adotando alguns dados iniciais, temos:

- a) Ferramenta de corte: fresa de topo DIN 844 em Aço rápido HSS M2 com Ø3 mm e com 02 cortes ($Z_n = 2$);
- b) Velocidade de corte para desbaste (V_c): 16 m/min. (www.indufresa.com.br, 2006);
- c) Avanço por dente (f_z): 0,22 mm/dente. (www.indufresa.com.br, 2066);
- d) Profundidade de corte adotado (a_p): 1 mm;
- e) Pressão específica de corte sem correção (K_{s1}): 1500 N/mm². (Sandvik Coromant, 2002);
- f) Coeficiente angular de corte (z): 0,25. (Sandvik Coromant, 2002).
- g) ângulo entre o ponto de entrada do dente e a vertical (φ_2): 180°;
- h) ângulo entre o ponto de saída do dente e a vertical (φ_1) 0°;
- i) ângulo de posição da ferramenta (χ): 90°.

Cálculo da espessura média

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cdot \text{sen} \chi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \therefore h_m = 0,14 \text{ mm.}$$

Cálculo da pressão específica de corte corrigida

$$K_{s_m} = K_{s_1} \cdot h_m^{-z} \therefore K_{s_m} = 2450 \text{ N/mm}^2.$$

Cálculo da rotação da fresa

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{d_c \cdot \pi} \therefore n = 1700 \text{ rpm.}$$

Cálculo da velocidade de avanço

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n \therefore V_f = 750 \text{ mm/min.}$$

Cálculo da potência de corte

$$P_c = \frac{Ks_m \cdot a_e \cdot a_p \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \therefore P_c = 0,10 \text{ kW ou } 100 \text{ W.}$$

Como a potência da micro-retífica é de 130 W, conclui-se que com estes parâmetros adotados, é possível fresar esse material.

4.4.4.2 Potência de usinagem para o alumínio

O cálculo a seguir é para um alumínio fundido com dureza 75 HB para fresamento de topo. Adotando alguns dados iniciais, temos:

- a) Ferramenta de corte: fresa de topo DIN 844 em Aço rápido HSS M2 com Ø3 mm e com 02 cortes ($Z_n = 2$);
- b) Velocidade de corte para desbaste (V_c): 220 m/min. (www.indufresa.com.br, 2006);
- c) Avanço por dente (f_z): 0,16 mm/dente. (www.indufresa.com.br, 2006);
- d) Profundidade de corte adotado (a_p): 1 mm;
- e) Pressão específica de corte sem correção (K_{s1}): 600 N/mm². (Sandvik Coromant, 2002);
- f) Coeficiente angular de corte (z): 0,25. (Sandvik Coromant, 2002).
- g) ângulo entre o ponto de entrada do dente e a vertical (φ_2): 180°;
- h) ângulo entre o ponto de saída do dente e a vertical (φ_1): 0°;
- i) ângulo de posição da ferramenta (χ): 90°.

Cálculo da espessura média:

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cdot \text{sen} \chi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \therefore h_m = 0,10 \text{ mm.}$$

Cálculo da pressão específica de corte corrigida:

$$Ks_m = Ks_1 \cdot h_m^{-z} \therefore Ks_m = 1067 \text{ N/mm}^2.$$

Cálculo da rotação da fresa:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{d_c \cdot \pi} \therefore n = 23300 \text{ rpm.}$$

Cálculo da velocidade de avanço:

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n \therefore V_f = 7456 \text{ mm/min.}$$

Cálculo da potência de corte:

$$P_c = \frac{K_{s_m} \cdot a_e \cdot a_p \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \therefore P_c = 0,4 \text{ kW ou } 400 \text{ W.}$$

Como a potência da micro-retífica é de 130 W, conclui-se que com estes parâmetros adotados, não é possível fresar esse material.

O cálculo a seguir é para um alumínio com dureza 75 HB para fresamento de topo. Adotando alguns dados iniciais, temos:

- a) Ferramenta de corte: fresa de topo DIN 844 em Aço rápido HSS M2 com Ø3 mm e com 02 cortes ($Z_n = 2$);
- b) Velocidade de corte para acabamento (V_c): 400 m/min. (www.indufresa.com.br, 2006);
- c) Avanço por dente (f_z): 0,06 mm/dente. (www.indufresa.com.br, 2066);
- d) Profundidade de corte adotado (a_p): 0,25 mm;
- e) Pressão específica de corte sem correção (K_{s1}): 600 N/mm². (Sandvik Coromant, 2002);
- f) Coeficiente angular de corte (z): 0,25. (Sandvik Coromant, 2002).
- g) ângulo entre o ponto de entrada do dente e a vertical (φ_2): 180°;
- h) ângulo entre o ponto de saída do dente e a vertical (φ_1) 0°;
- i) ângulo de posição da ferramenta (χ): 90°.

Cálculo da espessura média

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cdot \text{sen} \chi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \therefore h_m = 0,04 \text{ mm.}$$

Cálculo da pressão específica de corte corrigida

$$K_{S_m} = K_{S_1} \cdot h_m^{-z} \therefore K_{S_m} = 1340 \text{ N/mm}^2.$$

Cálculo da rotação da fresa

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{d_c \cdot \pi} \therefore n = 42400 \text{ rpm.}$$

Adotaremos 35.000 rpm, por ser a rotação máxima da micro-retífica.

Cálculo da velocidade de avanço

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n \therefore V_f = 4200 \text{ mm/min.}$$

Cálculo da potência de corte

$$P_c = \frac{K_{S_m} \cdot a_e \cdot a_p \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \therefore P_c = 0,070 \text{ kW ou } 70 \text{ W.}$$

Como a potência da micro-retífica é de 130 W, conclui-se que com estes parâmetros de acabamento adotados, é possível fresar esse material.

4.4.4.3 Potência de usinagem para o bronze e cobre

O cálculo a seguir é para bronze e cobre sem chumbo para fresamento de topo.

Adotando alguns dados iniciais, temos:

- a) Ferramenta de corte: fresa de topo DIN 844 em Aço rápido HSS M2 com Ø3 mm e com 02 cortes ($Z_n = 2$);
- b) Velocidade de corte para desbaste (V_c): 80 m/min. (www.indufresa.com.br, 2006);
- c) Avanço por dente (f_z): 0,10 mm/dente. (www.indufresa.com.br, 2006);
- d) Profundidade de corte adotado (a_p): 0,25 mm;
- e) Pressão específica de corte sem correção (K_{s1}): 1350 N/mm². (Sandvik Coromant, 2002);

- f) Coeficiente angular de corte (z): 0,25. (Sandvik Coromant, 2002).
 g) ângulo entre o ponto de entrada do dente e a vertical (φ_2): 180° ;
 h) ângulo entre o ponto de saída do dente e a vertical (φ_1): 0° ;
 i) ângulo de posição da ferramenta (χ): 90° .

Cálculo da espessura média

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cdot \text{sen} \chi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \therefore h_m = 0,06 \text{ mm.}$$

Cálculo da pressão específica de corte corrigida

$$Ks_m = Ks_1 \cdot h_m^{-z} \therefore Ks_m = 2700 \text{ N/mm}^2.$$

Cálculo da rotação da fresa

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{d_c \cdot \pi} \therefore n = 8500 \text{ rpm.}$$

Cálculo da velocidade de avanço

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n \therefore V_f = 1700 \text{ mm/min.}$$

Cálculo da potência de corte

$$P_c = \frac{Ks_m \cdot a_e \cdot a_p \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \therefore P_c = 0,06 \text{ kW ou } 60 \text{ W.}$$

Como a potência da micro-retífica é de 130 W, conclui-se que com estes parâmetros adotados, é possível fresar esse material.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento mecânico controlado numericamente por computador, para a produção de protótipos em escala. Tendo em vista que foi possível realizar a confecção de protótipos previamente estabelecidos, apesar das pequenas variações dimensionais, conclui-se que o resultado do desenvolvimento se mostrou satisfatório com o objetivo do trabalho.

A introdução dos movimentos de rotação nos eixos B e C demonstraram uma vantagem em relação a equipamentos encontrados no mercado, sendo a possibilidade de fresar nos planos XY, XZ e YZ. Este recurso possibilita a fresagem de geometrias mais complexas dos protótipos.

Porém, observou-se que algumas partes do equipamento não apresentaram rigidez pré-definida, tais como: o eixo de movimentação Z e o tubo guia do cabeçote.

Como houve uma pequena variação de movimento de posição, devido à folga entre as engrenagens do redutor, sugere-se adotar um redutor de precisão ou, acoplar o encoder do motor a passo diretamente no fuso para garantir a leitura de posição real pelo software.

O cabeçote pode ser redimensionado para possibilitar a produção de protótipos com dimensões mais precisas.

Como sugestão para trabalhos futuros, a automação dos movimentos de rotação dos eixos B e C do cabeçote da fresadora possibilitaria ganho em produtividade e qualidade.

A pesquisa de novos equipamentos ou o aperfeiçoamento dos existentes para a produção de produtos é uma necessidade constante da sociedade, devido a novas demandas que surgem constantemente.

ABSTRACT

The mechanical equipment production corresponds to an important parcel of generation of capital goods. For the improvement of the productivity and faster answers to the techniques necessities, it is possible to launch prototype in scale that can be used in evaluation of design, mechanicals proprieties, aspects of manufacture, performance e functionality in the production of parts and assemblies. The production of physics prototypes can be made through of utilization of mechanical equipments with Computerized Numeric Command. The purpose of this work was the development a mechanical equipment controlled numeric by computer to produce prototypes in scale, mainly to didactics ends. Such mechanical equipment can be utilized even to learn in laboratory of CNC systems, even in creation of prototypes in scale to areas of mechanical design, machines elements and mechanical projects. To the development of mechanical equipments with control formed of 03 step motors with encoders, logical controller in closed loop, software CNC and dividing table with rotation (A). The conception of mechanical equipment was made from the evaluation of equipments founded in market. The developed equipment was a milling machine of the type router, where the main table is fixed and the movement headstock of cutting tool can move on axis X, Y and Z and to turn around of axis B and C, conferring bigger possibility in the confection of complex surfaces. The rotation axle (W) of cut tool corresponds to the mandrel of a rotary tool DREMEL[®] fixed in a movement headstock of the tool. As philosophy of conception and development of mechanical components of the equipment, was used mechanical systems that it is easier to find and to convectional production.

Keys words: Milling machine, machine-tool, CNC, Numeric Command, Prototypes in scale.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AF Maquetes, **AF Maquetes e Arquitetura Ltda.** Disponível em www.afmaquetes.cjb.net. Acesso em 2002.

ALBURQUERQUE, Olavo A. L. Pires. **Dinâmica das Máquinas.** São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1974.

AMORIM, Heraldo José de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidades e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** 2002. 131f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre.

AZEVEDO, Américo Luiz de. **Conceitos Básicos do CNC.** Disponível em www.mundocnc.com.br. Acesso em: 15 jul. 2006.

AZEVEDO, Américo Luiz de. **Os primórdios do controle numérico.** Disponível em www.mundocnc.com.br. Acesso em: 15 jul. 2006.

BEER, Ferdinand P.; RUSSEL JOHNSTON, Jr. **Resistência dos Materiais.** 2. ed. São Paulo: Ed. MacGraw-Hill, 1989.

CASSANIGA, Fernando A. **História e Aplicações do CNC.** Disponível em www.usinagem-brasil.com.br. Acesso em 12 set de 2006.

COBRASMAN EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS. **Catálogo eletrônico.** Disponível em www.cobrasman.com.br. Acesso em 08 dez 2006.

DELFT, S. **Prototyping in practice.** Utrecht: Delft Spline Systems. Disponível em www.deskproto.com, p.3, 1998.

D.E.N., Departamento de Engenharia naval e Oceânica: **Laboratório de Engenharia Naval.** Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2001.

DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES, Francisco C.; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

DREMEL COMPANY. **Catálogo eletrônico**. Disponível em www.dremel.com. Acesso em 08 dez 2006.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Vol. 1. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1977.

FREIRE, J. M. **Introdução às Máquinas Ferramentas**. Vol. 2. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1989.

EXPOENTE, **Trabalho dos Alunos**. Disponível em www.expoente.com.br/trabalunos/hppessoa/aerodi/tunel. Acesso em 2002.

FILHO, J. N. Belo Horizonte: **Laboratório de Hidráulica** – CPH, UFMG, 2002.

FOX, R. W. e Mc Donald, A. T. **Introdução a Mecânica dos Flúidos**. Ed. Guanabara Koogan, 1992.

GOM, Internatioanl AG. **The Mobile Optical 3D-Digitizer**. Disponível em www.gom.com. Acesso em 2002.

HELISYS, Inc. **Laminated Object Manufacturing System**. Torrance, 1998.

INDUFRESA COMERCIAL LTDA. **Catálogo eletrônico**. Disponível em www.indufresa.com.br. Acesso em 08 dez 2006.

LENNINGS, L. **Selecting either layered lanufacturing or CNC machining to build your prototype**. Delft Spline Systems. Disponível em www.spline.nl. Aceso em 10 jul. 2006.

LIN ENGINEERING INC. **Catálogo eletrônico**. Disponível em www.linengineering.com. Acesso em 08 dez 2006.

MACHADO, Aryoldo. **Comando Numérico Aplicado as Máquinas Ferramentas**. 4. Ed. São Paulo: Ícone Editora, 1990.

MAESA, **Usina Hidrelétrica de Machadinho**: Modelo Hidráulico Reduzido. Disponível em www.machadinho.com.br. Acesso em 2002.

MAXNC INC. **Catálogo eletrônico**. Disponível em www.maxnc.com. Acesso em 16 jan 2007.

MCP, Hek GMBH. **MCP Metal Part Casting**. Disponível em www.mcp-group.de. Acesso em 2002.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de Máquinas**. Ed. revisada, ampliada e atualizada. São Paulo: Ed. Érica, 2000.

PROVENZA, F. **Projetista de Máquinas**. 71. ed. São Paulo: Ed. F. Provenza, 1996.

ROLANDDG, **3D Studio max® & LightWave®**. Disponível em www.rolanddg.com. Acesso em 2002.

ROMA, J. **Equipamentos para o Ensino e Investigação**. Lisboa. Disponível em www.jroma.pt. Acesso em 2002.

ROSSI, Mario. **Máquinas Operatrizes Modernas**. Tradução da Sétima Edição Espanhola. Rio de Janeiro: Ed. Livro Ibero-Americano, 1970.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo técnico**. p.A228-A231. 2002.

SANTOS, Daniel Martins Costa. **Desenvolvimento de um programa computacional para a prototipagem rápida por retirada de material**. 2002. 164f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.

STRATASYS. **Rapid Prototyping with Superior Material Performance**. Disponível em www.stratasys.com. Acesso em 2002.

SENAI – ES. **Noções básicas sobre elementos de máquinas – mecânica**. Apostila do curso programa de certificação de pessoal de manutenção. Espírito Santo, 1996. 118p.

VANTICO. **Modelagem e Ferramentaria**. Disponível em www.vantico.com. Acesso em 2002.

WALTERS, W.A. **Rapid prototyping using FDM: a fast, precise, safe technology**. Austin: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, TX, p.301–308, 1992.

Z CORPORATION, **3D Printers**. Burlington (UK). Disponível em www.zcorp.com. Acesso em 2002.

BIBLIOGRAFIA

CHANG, C. C.; LEE, M. Y.; WANG, S. H. **Digital denture manufacturing-An integrated technologies of abrasive computer tomography, CNC machining and rapid prototyping.** Disponível em www.springerlink.com. Acesso em 20 ago. 2006.

GORDON, Seamus; HILLERY, Michael T. **Development of a high-speed CNC cutting machine using linear motors.** Disponível em www.elsevier.com. Acesso em 20 ago. 2006.

KWONA, Yongjin et al. **Characterization of closed-loop measurement accuracy in precision CNC milling.** Disponível em www.elsevier.com. Acesso em 20 ago. 2006.

WANG, S. H. et al. **A new high-efficiency error compensation system for CNC multi-axis machine tools.** Disponível em www.springerlink.com. Acesso em 20 ago. 2006.

XU, X. W.; NEWMAN, S. T. **Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent: a review of the technologies.** Disponível em www.elsevier.com. Acesso em 20 ago. 2006.

YANG, Xujing; CHEN, Zezhong C. **A practicable approach to G1 biarc approximations for making accurate, smooth and non-gouged profile features in CNC contouring.** Disponível em www.elsevier.com. Acesso em 20 ago. 2006