



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ CARLOS ALBUQUERQUE DA SILVA

**PROJETO MECÂNICO, FABRICAÇÃO, MONTAGEM E ENSAIOS
GEOMÉTRICOS EM UMA *ROUTER* CNC COM QUATRO EIXOS**

Recife

2018

JOSÉ CARLOS ALBUQUERQUE DA SILVA

**PROJETO MECÂNICO, FABRICAÇÃO, MONTAGEM E ENSAIOS
GEOMÉTRICOS EM UMA *ROUTER* CNC COM QUATRO EIXOS**

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de
Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586p Silva, José Carlos Albuquerque da.
Projeto mecânico, fabricação, montagem e ensaios geométricos em uma *router* CNC com quatro eixos / José Carlos Albuquerque da Silva - 2018.
98 folhas, il., tabs., abr. e símb.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. *Router* CNC. 3. Projeto. 4. Fabricação. 5. Testes geométricos. 6. Máquina ferramenta. I. Rolim, Tiago Leite (Orientador).
II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-458

JOSÉ CARLOS ALBUQUERQUE DA SILVA

**PROJETO MECÂNICO, FABRICAÇÃO, MONTAGEM E TESTES GEOMÉTRICOS
EM UMA *ROUTER* CNC COM QUATRO EIXOS**

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 05 / 09 / 2018.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Tiago Leite Rolim (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. José Maria Andrade Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. José Eduardo Ferreira de Oliveira (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A realização desse trabalho tornou-se possível devido à colaboração pronta e generosa de muitas pessoas:

Sou grato primeiramente a Deus e em seguida a minha família pelo apoio durante todos esses anos de percurso.

À Engenheira Civil Camilla Lais Lima dos Santos, pela compreensão, apoio e palavras de incentivo quando eu mais precisava.

Ao Prof. Dr Tiago Leite Rolim, por todos os anos de orientação e ensino dedicados em passar seus conhecimentos a diante.

Ao Prof. Me. Rogério Pontes de Araújo, pela orientação, ajuda na fabricação das peças, e amizade.

Ao Prof. Me. Alex Elton Moura, pelas longas conversas sobre o tema, pois estas me abriam a mente para novas possibilidades.

“Se o engenheiro não sabe modelar o problema sem ter computador, ele não deve fazê-lo tendo o computador” (ALVES FILHO, 2013, p. 7).

RESUMO

O projeto e os testes geométricos de muitas *routers* CNC, produzidas atualmente, não atendem as normas vigentes em termos de tolerâncias dimensionais do equipamento. O que se tem é um mercado de projeto informal onde muitos fazem suas próprias máquinas (com custos até mais baixos), porém nada se sabe sobre os detalhes construtivos e os procedimentos tomados na montagem, perdendo-se com isso a garantia da qualidade das peças fabricadas. Os pequenos e médios empresários da área de fabricação de peças artesanais, esculturas em madeira, polímeros e metais não ferrosos, precisam ter em mãos um equipamento capaz de suprir suas necessidades. Por outro lado, as universidades e escolas técnicas devem passar os conhecimentos sobre as possibilidades de uso desse tipo de equipamento aos seus alunos. Nesse contexto, esse trabalho dedica-se ao projeto, a fabricação, a montagem e aos testes geométricos de um protótipo de *router* CNC com uma sistemática de projeto que auxilie na garantia da qualidade das peças por ela fabricadas, atendendo assim, uma demanda do mercado atual de forma competitiva.

Palavras-chave: *Router* CNC. Projeto. Fabricação. Testes geométricos. Máquina ferramenta.

ABSTRACT

The design and geometric tests of currently commercialized CNC Routers is not considered standard in terms of dimensional tolerances. What exist is an informal design market that many do their own machines (with even lower costs), but nothing is known about the constructive details and the assembly care, losing with this the quality guarantee of the pieces manufactured. The small and medium indicators of the area of placement of handmade pieces, sculptures in wood, polymers and non-ferrous metals, need to have a product capable of meeting their needs. On the other hand, universities and technical schools must pass the knowledge on the possibilities of using this type of equipment to their students. In this context, this work dedicated to the design, fabrication, assembly and geometric testing of a CNC router with a design systematics that help of the guarantees the quality of parts manufactured by it. Thus meeting the demand of the current market in a competitive way.

Keywords: CNC router. Design. Manufacturing. Testing. Machine tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Da máquina ferramenta 1.0 à máquina ferramenta 4.0	20
Figura 2 –	Classificação dos processos de fabricação	26
Figura 3 –	Forças na usinagem	28
Figura 4 –	Modelo de ciclo de vida de produtos	36
Figura 5 –	Variáveis de um projeto	37
Figura 6 –	Fases do ciclo de vida do produto	37
Figura 7 –	Fluxograma de projeto de máquina CNC	43
Figura 8 –	Formas construtivas de máquinas CNC	44
Figura 9 –	Análise de tensões com o método dos elementos finitos	45
Figura 10 –	Representação dos elementos	46
Figura 11 –	Etapas da análise	47
Figura 12 –	Variáveis que influenciam as características da máquina	48
Figura 13 –	Componentes de erro do eixo X	49
Figura 14 –	Arranjos de centros de usinagem com eixo vertical	50
Figura 15 –	Principais componentes da <i>router</i>	51
Figura 16 –	Eixos de movimento da <i>router</i>	52
Figura 17 –	Etapas da metodologia de projeto utilizada no trabalho	53
Figura 18 –	Fluxograma para elaboração da lista de requisitos	54
Figura 19 –	Fluxograma para elaboração do projeto conceitual	56
Figura 20 –	Fluxograma para elaboração do projeto preliminar	57
Figura 21 –	Fluxograma para elaboração do projeto detalhado	58
Figura 22 –	Perfil 45 mm x 45 mm	61
Figura 23 –	Perfil 45 mm x 90 mm	62
Figura 24 –	Perfil 30 mm x 30 mm	62
Figura 25 –	Perfil 30 mm x 150 mm	63
Figura 26 –	Chapa de Alumínio 5052-F	64
Figura 27 –	<i>Spindle</i> utilizado	65

Figura 28 –	Motor de passo NEMA 34	66
Figura 29 –	Guia linear	67
Figura 30 –	Fuso de esferas recirculantes com castanha dupla	68
Figura 31 –	Chapa do pórtico	70
Figura 32 –	Componentes da montagem da mesa	72
Figura 33 –	Acessórios da mesa	73
Figura 34 –	Montagem dos eixos lineares	73
Figura 35 –	Montagem do 4º eixo	74
Figura 36 –	Esquadro cilíndrico	75
Figura 37 –	Barra padrão	76
Figura 38 –	Verificação da retitude do movimento do eixo X: a) no plano vertical ZX e b) no plano horizontal XY.....	77
Figura 39 –	Medição na barra padrão dos pontos no movimento do eixo X posição b	77
Figura 40 –	Verificação da retitude do movimento do eixo Y: a) no plano vertical YZ e b) no plano horizontal XY.....	78
Figura 41 –	Medição na barra padrão dos pontos no movimento do eixo Y posição b	78
Figura 42 –	Verificação da Retitude do movimento do eixo Z: a) no plano vertical YZ paralelo ao eixo Y e b) no plano vertical ZX paralelo ao eixo X	79
Figura 43 –	Medição no esquadro dos pontos no movimento do eixo Z posição a	79
Figura 44 –	Verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos Z e X	80
Figura 45 –	Medição dos pontos no plano ZX para cálculo da perpendicularidade	81
Figura 46 –	Verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos Z e Y	81
Figura 47 –	Medição dos pontos no plano ZY para cálculo da perpendicularidade	82
Figura 48 –	Verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos X e Y	82
Figura 49 –	Medição dos pontos no plano XY para cálculo da perpendicularidade	83
Figura 50 –	Router	84
Figura 51 –	Dimensões da máquina em milímetros	85
Figura 52 –	Volume de trabalho	85
Figura 53 –	Tensões causadas pela aplicação da carga	87

Figura 54 –	Deslocamentos causados pela aplicação da carga	87
Figura 55 –	Deformações causadas pela aplicação da carga	88
Figura 56 –	Tensões causadas pela aplicação da carga na base do eixo X no eixo X	89
Figura 57 –	Deslocamentos causados pela aplicação da carga na base do eixo X no eixo X	89
Figura 58 –	Deformações causadas pela aplicação da carga na base do eixo X no eixo X	90
Figura 59 –	Gráfico de dispersão de Y na posição a	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Fases da metodologia de projeto segundo Asimow	38
Quadro 2 –	Fases da metodologia de projeto segundo Roth	40
Quadro 3 –	Fases da metodologia de projeto segundo a norma VDI 2221	40
Quadro 4 –	Fases da metodologia de projeto segundo Pahl e Beitz	41
Quadro 5 –	Parâmetros de corte	59
Quadro 6 –	Especificações técnicas da liga 6063-T5	60
Quadro 7 –	Especificações técnicas do perfil 45 mm x 45 mm	61
Quadro 8 –	Especificações técnicas do perfil 45 mm x 90 mm	62
Quadro 9 –	Especificações técnicas do perfil 30 mm x 30 mm	63
Quadro 10 –	Especificações técnicas do perfil 30 mm x 150 mm	63
Quadro 11 –	Especificações técnicas do alumínio das chapas	64
Quadro 12 –	Especificações técnicas do <i>Spindle</i>	65
Quadro 13 –	Especificações técnicas do motor de passo	66
Quadro 14 –	Especificações técnicas da guia linear	67
Quadro 15 –	Especificações técnicas do fuso de esferas recirculantes	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Coeficiente de força específica de corte	34
Tabela 2 –	Médias dos pontos medidos nos eixos X e Y	91
Tabela 3 –	Médias dos pontos medidos no eixo Z	91
Tabela 4 –	Valores de Retitude dos eixos nas posições a e b em milímetros	93
Tabela 5 –	Perpendicularidade entre os eixos	94

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	<i>Alternative Current</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
ESSS	<i>Engineering Simulation and Scientific Software</i>
ETEPAM	Escola Técnica Professor Agamenon Magalhães
IFPE	Instituto federal de Pernambuco
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas
NC	<i>Numerical Control</i>
PPGEM.	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RPM	Rotações Por Minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas Maiúscula

D	Diâmetro da fresa	[mm]
K _c	Coeficiente de força específica de corte	[Mpa]
N _a	Potência de avanço	[cv]
N _c	Potência de corte	[cv]
N _e	Potência efetiva de corte	[cv]
OXYZ	Sistema de coordenadas de referência	
O ₁ X ₁ Y ₁ Z ₁	Sistema de coordenadas móvel	
X	direção de movimento escolhido	
P _a	Força de avanço	[N]
P _{ap}	Força de apoio	[N]
P _c	Força de corte	[N]
P _e	Força efetiva de corte	[N]
P _u	Força de usinagem	[N]
PL1	Plano 1	
PL2	Plano 2	
PL3	Plano 3	
PL4	Plano 4	
Z _c	Número de dentes em contato com a peça	
Z	Número de dentes da fresa	

Letras Latinas Minúsculas

1-mc	Coeficiente de Kienzle	
a _e	Largura de corte	[mm]
a _p	Profundidade de corte	[mm]
b	Largura de cavaco	[mm]
f	Avanço	[mm]
f _z	Avanço por dente	[mm/dente]

h	Espessura do cavaco	[mm]
h_m	Espessura média do cavaco	[mm]
k_s	Pressão específica de corte	[MPa]
$k_{c1.1}$	Pressão específica de corte para cavaco de seção 1x1 mm	[MPa]
$k_{c1.1}$	Constante específica do metal	[MPa]
n	Rotação	[rpm]
s	Área da seção de corte	[mm ²]
v	Velocidade de corte	[m/min]
v_a	Velocidade de avanço	[mm/min]
v_e	Velocidade efetiva de corte	[m/min]

Letras Gregas

α	Ângulo entre os movimentos dos eixos	
$\delta_x (x)$	Erro de translação (posicionamento) ao longo do eixo X	
$\delta_y (x)$	Erro de translação (retitude horizontal) ao longo do eixo Y	
$\delta_z (x)$	Erro de translação (retitude vertical) ao longo do eixo Z	
$\varepsilon_x (x)$	Erro rotacional do eixo X (rolamento)	
$\varepsilon_y (x)$	Erro rotacional do eixo Y (tombamento)	
$\varepsilon_z (x)$	Erro rotacional do eixo Z (guinamento)	
κ_r	Ângulo de direção do gume principal	[graus]
ϕ_s	Ângulo de contato ferramenta peça	[graus]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO	22
1.1.1	Objetivos geral	22
1.1.2	Objetivos específicos	22
2	REVISÃO DE LITERATURA	23
3	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	25
3.1	PROCESSOS DE USINAGEM	26
3.2	FORÇAS E POTÊNCIA DE USINAGEM NO FRESAMENTO	27
3.2.1	Forças durante a usinagem	27
3.2.1.1	Componentes da força de usinagem	27
3.2.1.2	Força principal de corte	29
3.2.2	Potência de Corte	30
3.2.2.1	Potência de corte calculada por outras expressões	33
3.3	METODOLOGIA DE PROJETO	35
3.3.1	Ciclo de vida de um produto	35
3.3.2	Metodologia de projeto atuais	38
3.4	PROJETO DE MÁQUINA CNC	42
3.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	45
3.5.1	Uso do método	46
3.6	ANÁLISE METROLÓGICA E TESTES DE PERFORMANCE	48
3.6.1	Comportamento geométrico e cinemático de máquinas ferramentas	48
3.6.1.1	Desvios geométricos	49
3.6.2	Normas ISO para controle geométrico de máquinas ferramentas	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	PLANEJAMENTO	51
4.2	PROJETO MECÂNICO E SELEÇÃO DE COMPONENTES	53
4.2.1	Metodologia utilizada no projeto	53
4.2.1.1	Definição da tarefa	53
4.2.1.2	Projeto conceitual	55
4.2.1.3	Projeto preliminar	57
4.2.1.4	Projeto detalhado	58
4.2.2	Cálculo da força e potência de corte	58

4.2.3	Plataforma CAE e simulações	60
4.2.4	Estrutura da máquina	60
4.2.4.1	Perfis extrudados	60
4.2.4.2	Chapas	64
4.2.5	Acionamento	65
4.2.5.1	Spindle	65
4.2.5.2	Motor de passo	66
4.2.6	Transmissão de movimento	67
4.2.6.1	Guias lineares	67
4.2.6.2	Fuso de esferas recirculante	68
4.3	FABRICAÇÃO	69
4.3.1	Máquinas ferramentas utilizadas	69
4.3.1.1	Fresadora	69
4.3.1.2	Torno mecânico	69
4.3.1.3	Serra de fita	69
4.3.1.4	Centro de usinagem	70
4.3.2	Preparação dos perfis	70
4.3.3	Preparação das chapas	70
4.3.3.1	Chapas do pórtico	70
4.3.4	Preparação dos fusos	71
4.3.5	Fabricação do dispositivo para o quarto eixo	71
4.4	MONTAGEM	72
4.4.1	Montagem da mesa	72
4.4.2	Montagem dos eixos X, Y e Z	73
4.4.3	Montagem do 4º eixo	74
4.5	ENSAIOS GEOMÉTRICOS	75
4.5.1	Instrumentação utilizada	75
4.5.2	Método de verificação	76
4.5.2.1	Retitude dos movimentos lineares	77
4.5.2.2	Perpendicularidade entre movimentos lineares	80
5	RESULTADOS E ANÁLISES	84
5.1	PROJETO MECÂNICO	84
5.1.1	Dimensões da <i>router</i>	85

5.1.2	Dimensionamento dos acionamentos	86
5.1.3	Análise estrutural	86
5.1.3.1	Simulação do pórtico	86
5.1.3.2	Simulação da base do eixo X	88
5.2	PROCESSAMENTO DAS MEDIÇÕES	91
5.2.1	Retitude dos movimentos lineares	93
5.2.2	Perpendicularidade entre os movimentos lineares	93
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo que o homem utiliza ferramentas na produção de bens para melhorar o seu dia a dia e a qualidade de vida. A história das máquinas é a história da paciente, persistente e genial rebeldia, contra as dificuldades e os limites para fazer deste planeta uma casa habitável. História na qual o ser humano não poupou imaginação e audácia na descoberta de melhores maneiras de abrir caminhos, plantar, colher, morar, vestir-se e locomover-se. Foi assim, de invenção em invenção, que o homem terminou criando formas de energia e tecnologia que lhe vieram substituir os braços e mesmo a memória e o pensamento, como no caso da informática (ABIMAQ, 2006). Nesse contexto as máquinas ferramentas desempenham um papel muito importante.

A indústria de máquinas ferramentas, assim como todo o setor produtor de bens de capital, representa pouco em termos de participação na produção industrial total (cerca de 1%), mas é de extrema importância, pois transfere tecnologia incorporada em suas máquinas para outras indústrias, gerando ganhos de produtividade (GOMES; AYRES; SILVA FILHO, 1996).

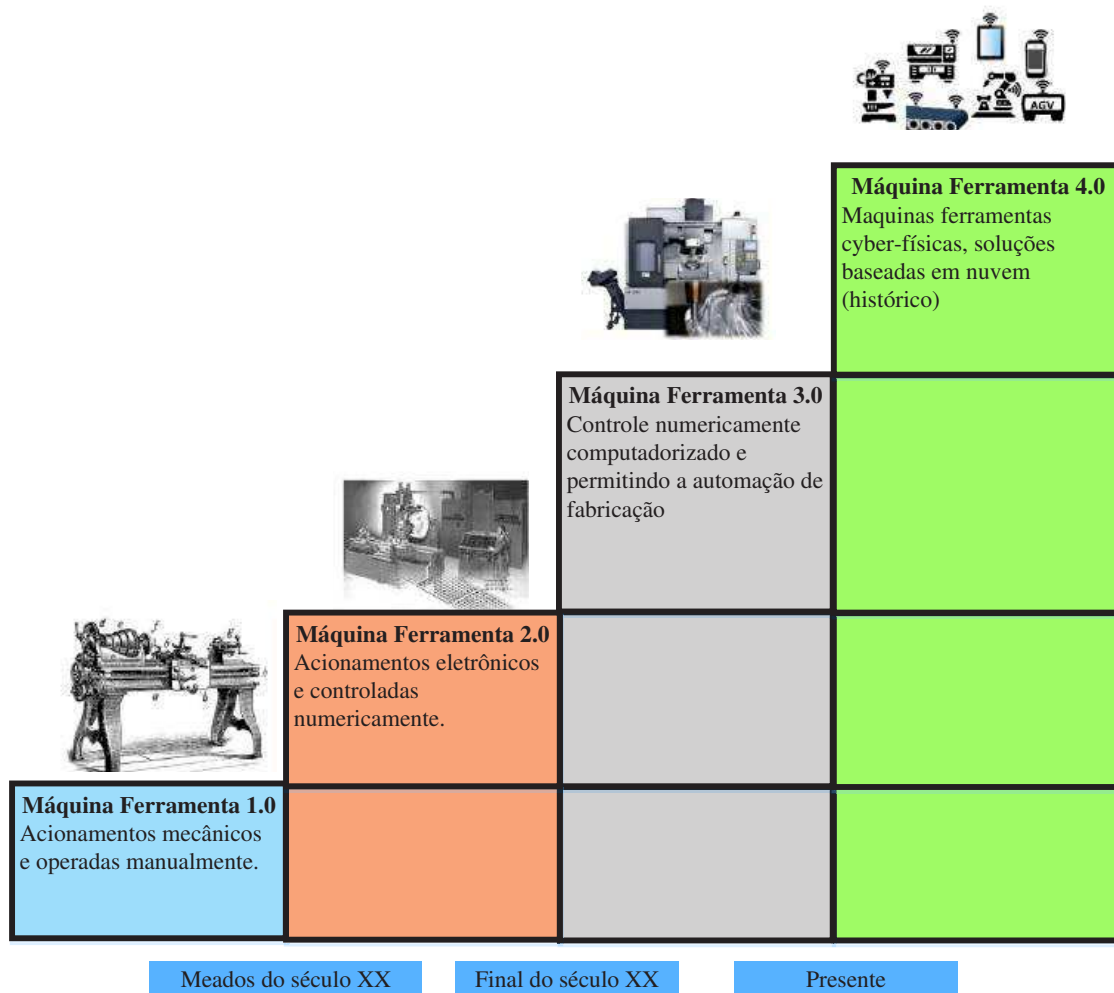
O setor de máquinas ferramentas brasileiro surgiu em um contexto de baixa competitividade internacional e a transição para um regime competitivo, nos anos 1990, foi realizada de forma pouco atenta (BERTASSO, 2012). O setor brasileiro é bastante tradicional, teve seu início nos anos 1930 e ganhou grande impulso com a implantação da indústria automobilística no país, que, em um ambiente de proteção, atraiu empresas de capital estrangeiro para produzir máquinas ferramentas localmente (VERMULM, 2003).

Desde o início da revolução industrial quando surgiram as primeiras máquinas ferramentas, desenvolvidas segundo princípios modernos, até meados dos anos 70 do século XX, as máquinas ferramentas sempre evoluíram com base em soluções puramente mecânicas (no máximo eletromecânicas). Contudo nas últimas décadas, os avanços tecnológicos, na eletrônica e computação, permitiram uma verdadeira revolução no projeto de máquinas ferramentas (STOETERAU, 2004).

Segundo Liu e Xu (2017), as máquinas ferramentas passaram por três revoluções (por eles chamadas de máquinas ferramentas 1.0, máquinas ferramentas 2.0 e máquinas ferramentas 3.0) e atualmente está na quarta revolução na base da tecnologia desta máquina (máquinas ferramentas 4.0), onde a robótica e a cibernética dominam o controle desse tipo de equipamento. No alvorecer da nova era da industrialização, a necessidade de avançar as máquinas ferramentas para um novo nível que esta de acordo com o conceito de indústria 4.0

tem de ser reconhecido (XU, 2017). A figura 1 a seguir, mostra essa perspectiva de desenvolvimento ao longo do tempo.

Figura 1 – Da máquina ferramenta 1.0 à máquina ferramenta 4.0



Fonte: Adaptado de Xu, 2017.

Um modelo de máquina ferramenta que tem se destacado no setor industrial de fabricação de peças em madeiras, polímeros, borrachas, metais não ferrosos, entre outros tantos materiais maleáveis é a *router* CNC. Esse equipamento é semelhante a um centro de usinagem em termos de processo de fabricação, porém, com relação ao projeto, têm algumas diferenças, a principal são seus pórticos móveis (“Router CNC”, 2018). A primeira máquina *router* NC do mundo foi criada pelo Isao Shoda e apresentada na feira internacional de Osaka (Japão) em 1968. O modelo apresentado foi o NC111A, e iniciou o uso das máquinas ferramentas controladas na confecção de peças em madeira (ALBERT, 2010). Este avanço específico

permitiu uma revolução nas indústrias de produção de móveis e instrumentos musicas (“Shoda Company”, 2018).

A exatidão da forma e dimensões dos componentes usinados é uma das considerações mais críticas para qualquer fabricante de máquinas ferramentas (RAMESH; MANNAN; POO, 2000). É raro encontrar um fabricante que especifica a capacidade de sua máquina produzir tolerâncias estreitas e, além disso, não levam em consideração as normas para ensaios geométricos em máquinas CNC (FACHIM, 2013; PAREDES, 2013; PETKO et al., 2015). Por isso, não se sabe as tolerâncias geométricas dos equipamentos projetados. Para uma primeira análise geométrica de uma máquina ferramenta recomenda-se a realização de ensaios geométricos sem carga ou em condições de acabamento baseado na normas ISO 230-1, ISO 10791-1 e ISO 10791-2.

Nesse contexto, esse trabalho dedica-se ao projeto, fabricação, montagem e construção de um protótipo de *router* CNC com uma sistemática de projeto que garanta a qualidade das peças por ela fabricadas. Atendendo assim, a uma demanda do mercado atual de forma competitiva.

1.1 OBJETIVO

Conhecer o equipamento desde o projeto até a utilização é um privilégio de poucos engenheiros, visto que, o mercado quer profissionais cada vez mais especializados em temas específicos. Será apresentado nas seções seguintes o objetivo geral e específico deste trabalho que permeiam por esse assunto.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma *router* para uso com comando numérico computadorizado e quatro eixos de movimento, passando pelas fases de projeto, fabricação, montagem e ensaios geométricos.

1.1.2 Objetivos específicos

Para desenvolver o objetivo geral que foi proposto no tópico anterior, foram apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar uma metodologia de projeto para idealizar uma *router*;
- Projetar e/ou selecionar todos os componentes da *router*;
- Fabricar a maioria dos componentes do equipamento como descrito no projeto;
- Montar os componentes estruturais e de acionamentos;
- Verificar problemas relacionados a erros dimensionais e geométricos com influência na movimentação dos eixos da *router*;
- Documentar todas as etapas construtivas para aulas de projeto, fabricação e medição do curso de engenharia mecânica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma discussão sobre o estado da arte que envolve os temas principais desta dissertação: projeto, fabricação, montagem e ensaios geométricos de uma *router* com quatro eixos. É comum nos trabalhos envolvendo esses assuntos encontrar-se uma junção de vários desses temas. A pesquisa dos trabalhos apresentados a seguir foram feitas nas mais variadas bases de conhecimento (livros, periódicos, catálogos, banco de dados das universidades, entre outras tantas), citando aqui como a mais utilizada a base de periódicos do portal CAPES.

Um contexto histórico geral das máquinas é encontrado no livro da ABIMAQ (2006). É mostrado onde, como e quando surgiram algumas máquinas que mudaram o modo de viver da humanidade e, além disso, é feito um paralelo muito importante com as máquinas ferramentas.

Uma referência de grande importância deste trabalho, e de qualquer outro que trate sobre as máquinas ferramentas, é a coleção de livros de Manfred Weck (1984) que apesar de ser antiga do ponto de vista de edição (a primeira lançada em 1934), é bastante atual em muitos aspectos.

No primeiro livro da coleção são mostrados os tipos de máquinas, materiais utilizados em sua construção, tipos de operações, princípios de funcionamento, suas formas contrutivas e algumas aplicações, além de mostrar algumas máquinas com propósitos especiais e os equipamentos auxiliares. Para quem deseja projetar uma máquina ferramenta não sabe por onde iniciar, essa é uma referência importante.

O segundo volume trata sobre o projeto estrutural do equipamento. O livro discute temas como tipos de componentes, materiais, carregamentos, instalação e fundação (base), guias e rolamentos e, por fim, uma descrição sobre os acionamentos principais.

O terceiro volume faz uma descrição detalhada sobre a automação do equipamento e seus controles, passando por assuntos bastante tradicionais, como o controle manual, até início do controle CNC.

No seu quarto volume Weck (1984) aborda os conceitos da análise dimensional das máquinas ferramentas, iniciando-o definindo quais as principais variáveis que influenciam as distorções das peças fabricadas. Definindo como variáveis influenciadoras o comportamento geométrico e cinemático das máquinas e os efeitos térmicos. Além de indicar essas fontes de erros é mostrado como corrigi-los ou minimizá-los com uma grande riqueza de detalhes.

Um panorama dos avanços no campo da manufatura com ênfase na atual revolução é mostrada por Liu e Xu (2017) em seu trabalho intitulado *Cyber-Physical Machine Tool – the era of machine tool 4.0*. São apresentados os avanços tecnológicos das máquinas ferramentas em quatro fases: máquinas ferramenta 1.0, máquinas ferramenta 2.0, máquinas ferramenta 3.0 e máquinas ferramenta 4.0. A primeira fase é dita como a que iniciou o desenvolvimento e uso das máquinas ferramentas, tendo grande contribuição de Maudslay e Whitworth no aumento da exatidão desses equipamentos e com a indústria automobilística dominando o desenvolvimento de novas máquinas, no início do século 20. A segunda fase surge com a implementação do controle numérico nas máquinas ferramentas pelo Massachusetts Institute of Technology na década de 40, o que trouxe um avanço gigantesco na área de fabricação, mas ainda possuía algumas limitações como, por exemplo, a capacidade de memória muito limitada. O avanço dos computadores nos anos 70 foi a oportunidade perfeita para a terceira fase, onde a introdução das máquinas CNCs mudaram radicalmente as plantas de manufatura e adicionaram uma maior complexidade às peças fabricadas. Por fim, o desenvolvimento atual da manufatura, e da indústria como um todo, está na quarta fase, onde as máquinas passam a ter um nível de controle mais independente com dados baseados em históricos introduzidos inicialmente.

Se não houver uma movimentação nas pesquisas e formação de profissionais, a implantação da indústria 4.0 no Brasil passará por um processo muito semelhante ao da introdução das máquinas ferramentas com controle numérico computadorizado nas décadas de 80 e 90 descrito por Machline, Rattner e Udry (2001). Nesse artigo é mostrado que o acesso da automação era difícil e oneroso para os países recém industrializados, pois não tinham acesso à mão de obra qualificada, existia uma escassez de capital, pobreza de demanda e, se não bastasse isso tudo, os entraves e equívocos governamentais emperravam a eficiência produtiva.

Uma abordagem de projeto industrial para máquinas ferramentas CNC e suas perspectivas de implementação é feita por Yang e Cheng (2017). No trabalho buscou-se uma investigação centrada no design industrial ideais para máquinas ferramentas CNC, através de conceitos avançados de design, ergonomia e interações homem-máquina. O artigo é concluído com uma discussão mais aprofundada sobre o potencial e a aplicação da abordagem de projeto industrial para máquinas CNCs em geral.

No artigo de Petko et al. (2015) é implementado o controle de uma fresadora de cinco eixos com estrutura híbrida. Além disso, é feita uma comparação com as fresadoras convencionais, mostrando assim, que a fresadora híbrida possuía algumas características

interessantes, como: maior rigidez (devido sua estrutura fechada), maior precisão e velocidades mais altas. Apresentando com isso, a eficácia de se projetar máquinas para aplicações mais específicas ao invés de universalizar os equipamentos.

O desenvolvimento de equipamentos para adição ou adequação de novas tecnologias na parte de programação e comando de máquinas ferramentas é mostrado na dissertação de mestrado de Paredes (2013), onde é desenvolvida e validada uma arquitetura de um controlador numérico computadorizado (CNC) aderente à norma STEP-NC por meio de um adaptador STEP-NC a código G. Para validação da arquitetura proposta, o autor desenvolve uma máquina ferramenta do tipo *router* com três graus de liberdade.

A versatilidade de projetos independentes de máquinas CNCs é mostrada de forma bem simples no trabalho de conclusão de curso de Fachim (2013) onde o autor projeta e fabrica um protótipo de fresadora CNC para uso em uma plataforma livre (Arduino) visando um projeto de baixo custo e, ainda assim, buscando a minimização dos erros provenientes do projeto e da fabricação da máquina.

No trabalho desenvolvido por Shneor (2018) é mostrado o conceito de uma máquina configurável e como esse tipo de equipamento aumenta a versatilidade de produção das máquinas ferramentas. Os equipamentos, por ele descritos, apresentam alguns módulos de fabricação que podem ser montados à estrutura das máquinas para uma rápida adaptação no processo de usinagem e, devido a isso, com apenas uma única máquina ferramenta, pode-se reduzir o consumo de energia no processo de fabricação, a necessidade de espaço no ambiente fabril e o custo por peça.

No artigo de Ramesh, Mannan e Poo (2000) é feito um levantamento teórico sobre a compensação de erros em máquinas ferramentas, onde são analisados os erros devido a influência da geometria, da força de corte e das fixações. Nessa mesma linha de pensamento, porém em condições quase estáticas e com cargas reduzidas, Szipka, Laspas e Archenti (2018) medem e analisam erros de máquinas ferramentas através de métodos analíticos e com posterior validação experimental (usinando uma peça e medindo os erros).

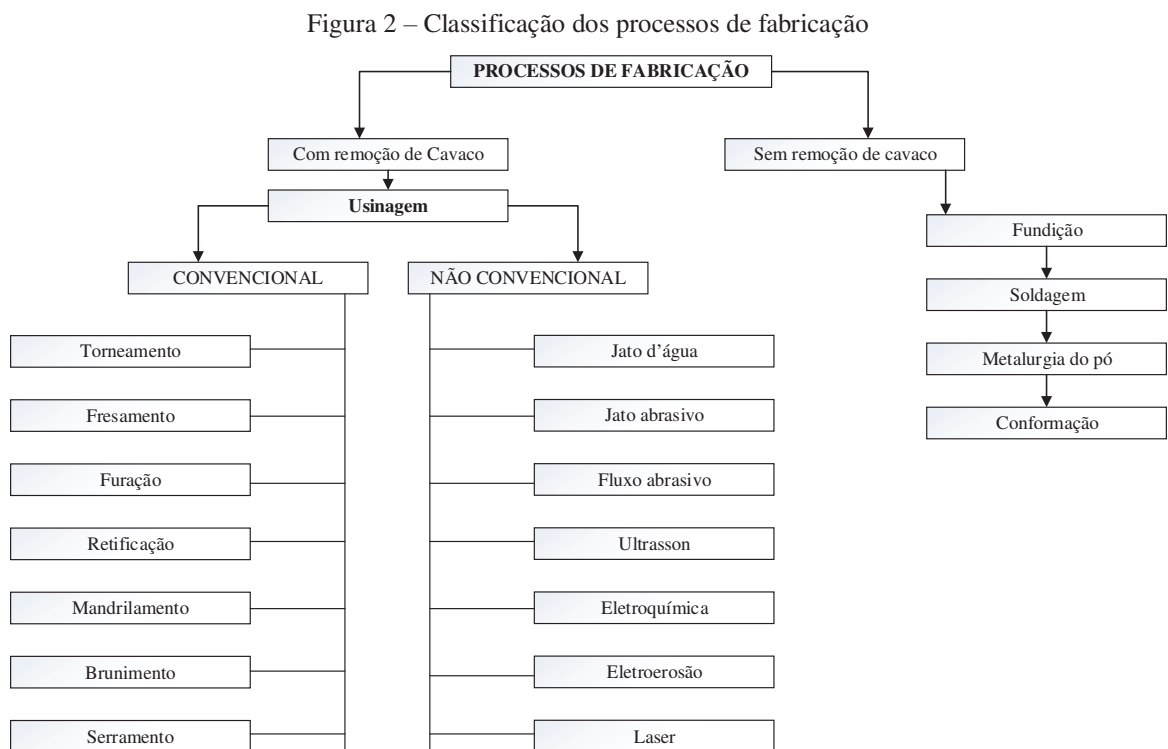
3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nesta seção serão apresentados os conceitos fundamentais que permeiam a teoria ligada ao tema do trabalho. Ajudando, assim, os leitores no entendimento dos assuntos discutidos.

3.1 PROCESSOS DE USINAGEM

Segundo a norma DIN 8580 (2003), usinagem compreende os processos de fabricação que conferem à peça forma, dimensões e acabamento, ou ainda uma combinação de qualquer desses três processos, através da remoção de material sob a forma de cavaco, sendo esse a porção de material da peça retirada pela ferramenta de corte, caracterizando-se por apresentar forma irregular. Além desta característica, estão envolvidos nos mecanismos de formação de cavaco alguns fenômenos particulares, tais como o recalque, a aresta postiça de corte, a craterização na superfície de saída da ferramenta e a formação periódica do cavaco (FERRARESI, 1977).

Dentre as formas de se produzir uma peça existem os processos sem remoção de material e com remoção de material. A figura 2 mostra essa classificação.



Fonte: O autor, 2018.

3.2 FORÇAS E POTÊNCIAS DE USINAGEM NO FRESAMENTO

Ter o conhecimento da ordem de grandeza dos esforços em um processo de usinagem é de fundamental importância, pois esses afetarão diretamente a potência de corte, que está diretamente ligada ao dimensionamento do motor da máquina ferramenta, a capacidade de obtenção de tolerâncias estreitas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

3.2.1 Forças durante a usinagem

A força de usinagem é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem que surge como reação do contato do material da peça com a ferramenta.

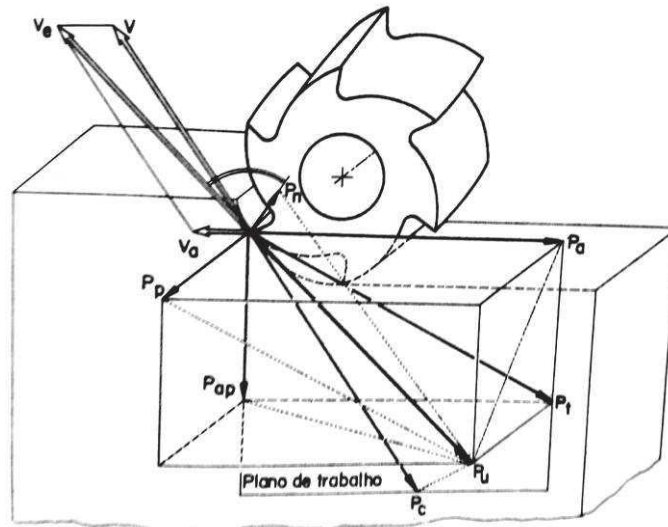
Existem, basicamente, três métodos para o estudo da força de corte: o método teórico analítico, o método numérico e o método empírico. A primeira abordagem, teórica, parte da fenomenologia de formação do cavaco e, através de algumas simplificações, registra os diversos esforços que ocorrem em torno do plano de cisalhamento do cavaco e da superfície de saída da ferramenta. Na segunda abordagem, numérica, são realizadas simulações computacionais do processo. Na terceira abordagem, empírica, os esforços de corte são equacionados utilizando-se coeficientes retirados de procedimentos experimentais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Nesse trabalho será mostrado apenas o método empírico.

3.2.1.1 Componentes da força de usinagem (P_u)

A força de usinagem é considerada agindo em direção e sentido sobre a ferramenta e suas componentes são determinadas mediante projeção ortogonal num plano ou numa direção qualquer. Assumem importância especial aqueles componentes que estão contidas no plano de trabalho e no plano efetivo de referência (FERRARESI, 1977).

No plano de trabalho as componentes são: força ativa (P_t), força de corte (P_c), força de avanço (P_a), força de apoio (P_{ap}) e força efetiva de corte (P_e). No plano efetivo de referência tem-se: a força passiva (P_p) e a força de compressão (P_n) que não contribuem para na potência de usinagem. Todas as forças descritas estão representadas na figura 3 e definidas logo em seguida.

Figura 3 – Forças na usinagem



Fonte: Baseado na DIN6584, 1982.

Força ativa (P_t): é a projeção da força de usinagem (P_u) sobre o plano de trabalho.

Força de corte (P_c): também conhecida por força principal de corte, é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte (dada pela velocidade de corte).

Força de avanço (P_a): é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço.

Força de apoio (P_{ap}): é a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

Entre a força ativa, a força de apoio e a força de avanço vale a seguinte relação:

$$P_t = \sqrt{P_{ap}^2 + P_a^2} \quad (1)$$

Logo,

$$P_{ap} = \sqrt{P_t^2 - P_a^2} \quad (2)$$

Força efetiva de corte (P_e): é a projeção da força de usinagem sobre a direção efetiva de corte.

Força passiva (P_p): é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho.

Força compressão (P_n): é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte.

3.2.1.2 Força principal de corte

A força de corte pode ser expressa pela equação 3 mostrada a seguir.

$$P_c = k_s \cdot s \quad (3)$$

Onde

S: área da seção de corte [m²]

k_s: pressão específica de corte [MPa]

A expressão para o cálculo da área da seção de corte é dada pela seguinte equação:

$$s = a_p \cdot a_c = h \cdot b \quad (4)$$

Onde

a_p: profundidade de corte [mm]

f: avanço [mm]

h: espessura do cavaco [mm]

b: comprimento do cavaco [mm]

A pressão específica de corte depende de diversos fatores, alguns deles são: material da peça, geometria da ferramenta, afiação da ferramenta, velocidade de corte, fluido de corte, rigidez da ferramenta, entre tantos outros. Existem várias propostas para o cálculo da pressão específica de corte, relacionando-a com essas diversas grandezas que a influencia. Porém, a de Kienzle é uma forma bastante simples e suficientemente precisa para os cálculos práticos da força de corte, pois em seu modelo matemático a pressão específica de corte é função da espessura de corte (h) e não do avanço (f) (FERRARESI, 1977). A expressão de Kienzle para força de corte é:

$$P_c = k_{c1.1} \cdot h^{1-mz} \cdot b \quad (5)$$

Onde

k_{c1.1}: pressão específica de corte para uma seção de corte de 1mm de espessura por 1 mm de largura [MPa]

1-mz: coeficiente de Kienzle

Esses fatores são obtidos experimentalmente e fortemente dependente do par ferramenta-peça.

No fresamento surgirão quatro fatores complicantes, devido as características particulares do processo, são eles: espessura do cavaco variável, diferença entre o fresamento frontal e periférico, ferramenta multicortante e variedade de geometrias de ferramenta e do gume (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; FERRARESI, 1977).

A equação geral para o cálculo da força de corte no fresamento é determinada pela equação 11 a seguir.

$$P_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot Z_c \cdot h_m^{1-mz} \quad (6)$$

Onde

$k_{c1.1}$: constante específica do metal para uma seção de corte de 1mm de espessura por 1 mm de largura [MPa]

b : comprimento do cavaco

Z_c : número de dentes em contato com a peça

h_m : espessura média do cavaco

$1-mz$ coeficiente de Kienzle

3.2.2 Potências de corte

Segundo Ferraresi (1977) as potências necessárias para usinagem resultam como produtos das componentes da força de usinagem pelas respectivas componentes da velocidade de corte. Sendo assim, temos, ainda segundo Ferraresi (1977) as seguintes expressões para as potências de algumas das componentes da força de corte:

Potência de corte: é o produto da força de corte (P_c) pela velocidade de corte (v). Para P_c em Newton e v em m/min tem-se a potência de corte (N_c) em Watt dado pela equação 7 a seguir.

$$N_c = \frac{P_c \cdot v}{60} \quad (7)$$

Potência de avanço: é o produto da força de avanço (P_a) pela velocidade de avanço (v_a). Para P_a em Newton e v_a em m/min tem-se a potência de avanço (N_a) em Watt dado pela equação 8 a seguir.

$$N_a = \frac{P_a \cdot v_a}{60} \quad (8)$$

Potência efetiva de corte: é o produto da força efetiva de corte (P_e) pela velocidade efetiva de corte (v_e). É portanto a igual a soma das potências de corte e avanço, como mostra a equação 9.

$$N_e = N_c + N_a \quad (9)$$

Para P_e em Newton e v_e em m/min tem-se a potência efetiva de corte (N_e) em Watt dado pela equação 10 a seguir.

$$N_e = \frac{P_e \cdot v_e}{60} \quad (10)$$

Através das equações 7 e 8 tem se uma razão de importante interesse no estudo dos projetos de máquina ferramenta, que é a razão entre a potência de corte e a potência de avanço (equação 11).

$$\frac{N_c}{N_a} = 1000 \frac{P_c \cdot v}{P_a \cdot v_a} \quad (11)$$

Para o fresamento com fresas cilíndricas tangenciais o que se tem são as aproximações mostradas nas equações 12 e 13 (FERRAREZI, 1977).

$$P_a \approx 1,2 P_c \quad (12)$$

$$v_a \approx 5v \quad (13)$$

Para v em metros por minuto e v_a em milímetros por minuto.

Substituindo-se na equação 11 resulta na equação 14.

$$\frac{N_c}{N_a} \approx 170 \quad (14)$$

Através da equação 14 vê-se que a maior parcela da potência efetiva de corte (N_e) é fornecida pela potência de corte (N_c). Logo, no cálculo da potência efetiva de corte pode-se admitir a aproximação mostrada na equação 15 a seguir.

$$N_e \approx N_c \quad (15)$$

Para o cálculo da potência do motor nas máquinas operatrizes que apresentam um único motor para o movimento de corte e avanço, despreza-se N_a e faz-se:

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (16)$$

Onde

η : é rendimento da máquina operatriz

Esse rendimento varia de 60 a 80% em máquinas convencionais, que possuem caixa de engrenagens para transmissão do movimento, e maior que 90% em máquinas CNC, onde o motor tem variação contínua de rotação e a transmissão de movimentos do motor é realizada com poucos (ou nenhum) elementos de transmissão. Nesse último caso, deve-se considerar, porém, que a maioria das máquinas CNC tem motor principal que de corrente alternada com variação contínua da rotação decorrente da variação da frequência do sinal de entrada, por isso, estes motores tem baixo rendimento em baixas rotações. Em geral, em rotações menores que 1000 rpm este rendimento é menor que 90% (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

3.2.2.1 Potência de corte calculada por outras expressões

Alguns fabricantes de ferramentas também tem suas formas de calcular a potência de corte, fortemente baseadas no que foi descrito anteriormente, sendo assim, será mostrado a expressão para potência de corte de um processo de fresamento fornecida pela empresa Mitsubishi Materials do Brasil LTDA (equação 17), potência dada em kW.

$$N_c = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_a \cdot K_c}{60 \times 10^6 \times \eta} \quad (17)$$

Onde

K_c : é o coeficiente de força específica de corte em Mpa

a_p : é a profundidade de corte em mm

a_e : é a Largura de corte em mm

v_a : é a velocidade de avanço mm/min

η : é rendimento da máquina ferramenta

O coeficiente de força específica de corte pode ser encontrado para diversos materiais na tabela 3.1 a seguir (MITSUBISHI, 2018).

Tabela 1 – Coeficiente de força específica de corte

Material	Resistência a tração e dureza (MPa)	Coeficiente de força específica Kc (MPa)				
		0,1 (mm/dente)	0,2 (mm/dente)	0,3 (mm/dente)	0,4 (mm/dente)	0,6 (mm/dente)
Aço com baixo Carbono (Com ligas especiais)	520	2200	1950	1820	1700	1580
Aço baixo Carbono	620	1980	1800	1730	1600	1570
Aço Duro	720	2520	2200	2040	1850	1740
Aço Ferramenta	670	1980	1800	1730	1700	1600
Aço Ferramenta	770	2030	1800	1750	1700	1580
Aço-Cromo-Manganês	770	2300	2000	1880	1750	1660
Aço-Cromo-Manganês	630	2750	2300	2060	1800	1780
Aço-Cromo-Molibdênio	730	2540	2250	2140	2000	1800
Aço-Cromo-Molibdênio	600	2180	2000	1860	1800	1670
Aço Níquel Cromo-Molibdênio	940	2000	1800	1680	1600	1500
Aço Níquel Cromo-Molibdênio	352HB	2100	1900	1760	1700	1530
Aço Inoxidável Austenítico	155HB	2030	1970	1900	1770	1710
Ferro Fundido	520	2800	2500	2320	2200	2040
Ferro Fundido Meehanite	46HB	3000	2700	2500	2400	2200
Ferro Fundido Duro	360	2180	2000	1750	1600	1470
Ferro Fundido Cinzento	200HB	1750	1400	1240	1050	970
Latão	500	1150	950	800	700	630
Ligas Leves (Al-Mg)	160	580	480	400	350	320
Ligas Leves (Al-Si)	200	700	600	490	450	390
Ligas Leves (Al-Zn-Mg-Cu)	570	880	840	840	810	720

Fonte: Mitsubishi, 2018.

Nas colunas para localização do coeficiente de força específica surge um termo com unidade em milímetros por dente, esse termo é o avanço por dente mostrado na equação 18 abaixo (MITSUBISHI, 2018).

$$f_z = \frac{v_a}{Z \times n} \quad (18)$$

3.3 METODOLOGIA DE PROJETO

Desenvolver um produto é algo mais complexo do que se imagina. É fácil olhar para um equipamento fabricado e imaginar como foi simples a solução de determinado problema construtivo. Porém, deve-se entender que isso quase sempre é um equívoco. Segundo Carpes (2014), o desenvolvimento de produto, de qualquer tipo, é uma tarefa que exige muito mais do que a simples execução de uma ideia. Isso porque, cada solução é específica para cada problema e isso reflete na produção e comercialização do objeto funcional em questão.

Nesse contexto, a missão do engenheiro é encontrar soluções para esses problemas técnicos. Para tanto, ele se baseia em conhecimentos das ciências naturais, da engenharia e leva em conta os condicionantes materiais, tecnológicas e econômicas, bem como restrições legais, ambientais e aquelas impostas pelo ser humano (PAHL et al., 2005).

Devido a grande importância da atividade projetual, torna-se necessário que haja a utilização de procedimentos sistemáticos, para que o método utilizado seja de fácil planejamento, flexível, otimizável e verificável. Porém, a utilização de métodos sistemáticos se justifica na medida em que a explicitação do processo contribua para que se criem soluções levando em conta a experiência de um maior número de pessoas, inclusive pessoas não pertencentes à equipe de projeto; para que se possa produzir uma maior qualidade, e não só quantidade de soluções; e para que se possa acelerar o tempo gasto no processo de criar e avaliar soluções (ANDRADE, 2008).

Esse capítulo descreverá algumas metodologias sistemáticas de projeto utilizadas na concepção de produtos.

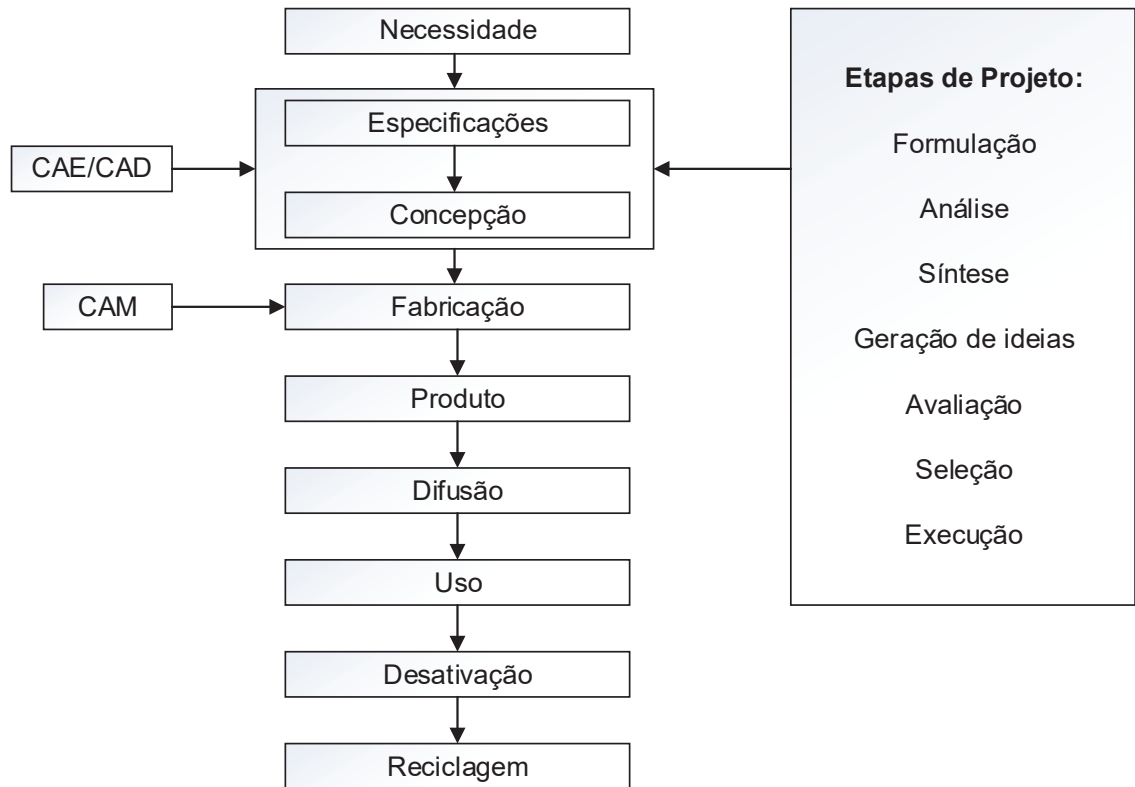
3.3.1 Ciclo de vida de um produto

Cada produto está sujeito a um ciclo de vida, independente de sua aplicabilidade. Porém, essa duração varia muito em função do tipo de fabrico e da especialidade. Nos últimos anos observou-se uma constante redução desse tempo. Isso tem consequências importantes no trabalho nos departamentos de desenvolvimento e projeto, uma vez que os tempos de execução alocados para tarefas iguais ou semelhantes também se reduzem (PAHL et al., 2005).

O ciclo de vida de um produto, em geral, inicia-se com uma necessidade, ou de certa forma com alguma qualidade para algo necessário que não é atendida pelos produtos no mercado. Às vezes, isso leva a um processo criativo e em outros casos leva a um processo

adaptativo, mas ambos os caminhos levarão à criação de um produto. A seguir, na figura 4, encontra-se um esquema detalhando todas as etapas da vida útil de um novo equipamento.

Figura 4 – Modelo de ciclo de vida de produtos



Fonte: Adaptado de Romeiro Filho, 2006.

Definindo bem qual problema resolver, passa-se para a segunda fase, a etapa de concepção e especificações. Nessa parte, o projeto será a principal variável de estudo. Nela, devem estar contidas, como mostrado na figura 5, a formulação dos possíveis problemas, análise das possibilidades de solução, síntese dessas análises, geração de ideias, avaliação da viabilidade, seleção e, por fim, execução do projeto. A imagem a seguir, apresentada na figura 5, mostra alguns fatores que influenciam a fase de projeto.

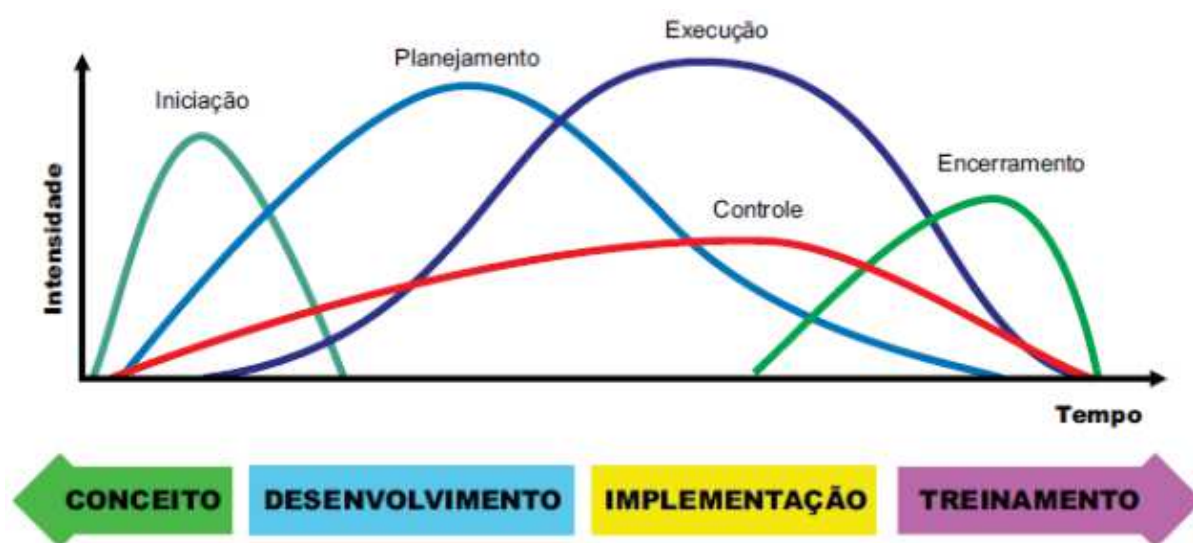
Figura 5 – Variáveis de um projeto



Fonte: O autor, 2018.

A figura 6 mostra como se deve usar o tempo no decorrer do projeto e o momento de início e término de acordo com a etapa a ser seguida (iniciação, planejamento, execução controle e encerramento). Observa-se ainda que algumas dessas etapas coexistem nas fases do projeto (conceito, desenvolvimento, implementação e treinamento), o que é natural, visto que, o andamento do projeto depende de vários fatores que precisam estar sempre sendo planejados, executados e controlados.

Figura 6 – Fases do ciclo de vida do projeto



Fonte: Adaptado de Pahl et al, 2005.

3.3.2 Metodologias de projetos atuais

Há vários registros históricos da tentativa de implementação de uma metodologia para elaboração de um projeto, porém o artista e inventor renascentista italiano Leonarod Da Vinci (1452-1519), foi um dos primeiros que utilizou conhecimentos de mecânica, hidráulica e geometria para desenvolver produtos capazes de desempenhar determinadas tarefas (CARPES JR, 2014). Obviamente, esses métodos passaram por uma grande evolução e no início da década de 1960, o Professor de engenharia de sistemas, Asimow (1968) desenvolveu uma metodologia de projeto em sete fases distintas que contenham não somente a geração do produto, mas quase todo o ciclo de vida do produto. O quadro 1, a seguir, mostra as fases da metodologia de Asimow.

Quadro 1 – Fases da metodologia de projeto segundo Asimow

Fases da metodologia de projeto segundo Asimow	
Estudo da Viabilidade	Dar início ao projeto e estabelecem suas principais diretrizes. Nesta fase, certifica-se que uma dada necessidade possui uma existência forte e latente. A partir desse ponto, os problemas gerados pelas necessidades são explorados, identificando parâmetros, limitações e critérios. As metas de estudos de viabilidade consistem em avaliar a necessidade de um novo produto, produzir um conjunto de possíveis soluções com base na realização física, econômica e financeira.
Projeto Preliminar	Consiste na análise do grupo de soluções viáveis desenvolvidas no estudo de viabilidade. A meta do projeto preliminar é estabelecer critérios de seleção visando encontrar a melhor solução. Assim, a magnitude, o desenvolvimento e o custo do projeto são estimados. Além disso, é estimado o comportamento da solução com o tempo e os parâmetros a serem controlados.
Projeto Detalhado	A esta fase compete desenvolver uma descrição completa do projeto de um produto testável e produzível. Um projeto detalhado inclui desenhos para manufatura com todas as partes e componentes dimensionados, especificados e com tolerâncias. De modo mais detalhado, esta fase é composta por: preparação para o projeto, projeto geral de subsistemas e componentes, projeto detalhado das partes, preparação dos desenhos para montagem, construção experimental, programas de testes, análises técnicas, previsões de custos e reprojeto.

Planejamento para Manufatura	Além do detalhamento do projeto realizado na etapa anterior, são especificadas as formas e as dimensões do material, ferramenta e equipamentos de manufatura que serão utilizados. Isso inclui: planejamento detalhado dos processos de fabricação; projetos de ferramentas e gabaritos; planejamento, especificação e projeto da nova produção e instalação da fábrica; planejamento do sistema de controle de qualidade; planejamento do pessoal para a produção; planejamento do sistema de fluxo de informações e planejamento financeiro.
Planejamento para Distribuição	Fase na qual os esforços de propaganda são direcionados para um determinado tipo de consumidor, para o qual o produto foi concebido. Planeja-se a embalagem, o sistema de armazenamento, as atividades de <i>marketing</i> , o transporte, entre outros.
Planejamento para Uso	Envolve a manutenção, confiabilidade, segurança, a conveniência do uso, a estética e a economia de operação. Essas questões não estão restritas a esta fase. As considerações de segurança, manutenção e confiabilidade, por exemplo, estão presentes na maioria das fases dessa metodologia.
Planejamento do Descarte	É a fase final no processo de projeto, onde acontece o planejamento do que será feito com o produto após o término da sua vida útil. Algumas diretrizes são utilizáveis nesta fase, como: projetar para redução da obsolescência (considerando efeitos dos desenvolvimentos técnicos), projetar para uma vida física mais longa que a vida útil, projetar para vários níveis de utilização (de modo que ao fim da vida útil o produto possa ser utilizado de forma menos exigente), projetar para reutilização de materiais e componentes e, finalmente, testar e examinar em laboratório os produtos inutilizados e seus subprodutos a fim de obter informações úteis para esse planejamento.

Fonte: CARPES JR, 2014.

Em 1965, Karlheinz Roth, citado por Carpes Jr. (2014), publicou uma metodologia de projeto conhecida por projeto com o auxílio de catálogos. As fases de seu método estão descritas no quadro 2, a seguir.

Quadro 2 – Fases da metodologia de projeto segundo Roth

Fases da metodologia de projeto segundo Roth	
Formulação do Problema	Envolve a definição do problema e suas características principais, como as necessidades do consumidor em relação ao produto, o conhecimento do mercado e a tecnologia envolvida. O resultado desta fase é uma lista de requisitos que identifica a maioria das necessidades e tarefas. Uma vez obtida a lista de requisitos, a metodologia proposta por Roth adquire características particulares até chegar a obtenção de princípios de solução para tarefas principais, quando torna a assemelhar-se com as demais metodologias de projeto.
Funcional	Etapa na qual as sentenças genéricas são formuladas, partindo da lista de requisitos. A partir dessas sentenças, utiliza-se o método da estruturação de funções genéricas. Nessa fase, são utilizados os catálogos de projeto para auxiliar as transformações das funções genéricas em princípios de solução, montadas genericamente e catalogadas anteriormente, é um dos projetos mais importantes da metodologia. A fase funcional determina que os princípios de solução satisfaçam a estrutura geral de funções.
Detalhamento	Resulta em estruturas geométricas, estruturas modulares baseadas em módulos pré-projetados e elementos funcionais, além de originar um corpo físico aos princípios de solução e de conceber o projeto completo com todos os detalhes necessários para documentação final do produto.

Fonte: CARPES JR, 2014.

A recomendação de projeto VDI 2221 (1993), apresenta uma metodologia sistemática de procedimentos para execução de projetos de produtos industriais. Suas principais fases são descritas no quadro 3.

Quadro 3 – Fases da metodologia de projeto segundo a norma VDI 2221

Fases da metodologia de projeto segundo a norma VDI 2221	
Fase I	Estuda-se o problema a ser solucionado. Nesta fase, busca-se definir e esclarecer o problema. As informações sobre o mercado consumidor, leis de proteção ambiental, patentes, produtos similares, entre outros, são coletadas. Como resultado, elabora-se a lista de requisitos do projeto.
Fase II	Pesquisa-se concepções ou soluções que atendam às exigências do problema em estudo. Partindo da lista de requisitos e da definição do problema, a função global do produto é definida. Essa função global é dividida em funções menores, ou subfunções, de complexidade inferior. Uma vez obtidas as subfunções do produto, procura-se por princípios de solução que satisfaçam as subfunções. Então, unem-se os princípios de solução de forma a atender a função global do produto.

Fase III	Elabora-se o projeto preliminar, buscando dar forma e dimensão a cada módulo, selecionando materiais e processos de fabricação, definindo as medidas básicas do produto e testando a compatibilidade entre as partes. A VDI 2221 enfatiza a divisão do produto em módulos funcionais, além de avaliar técnica e economicamente as soluções. Essa fase resulta em representações formais para todo o produto, com listas de componentes e recomendações genéricas de fabricação e montagem.
Fase IV	Detalha-se o projeto, fornecendo especificações definitivas sobre os componentes quanto a formas, medidas, acabamentos superficiais, especificações de materiais, custos estimados de fabricação e etc.

Fonte: CARPES JR, 2014.

A metodologia de Pahl et al. (2005), conhecida mundialmente como metodologia de Pahl e Beitz, estabelece um processo de projeto em quatro etapas principais: definição da tarefa, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Essas fases são descritas no quadro 4.

Quadro 4 – Fases da metodologia de projeto segundo Pahl e Beitz

Fases da metodologia de projeto segundo Pahl e Beitz	
Definição da tarefa	Inicia-se a definição de um produto considerando a situação do mercado consumidor e as necessidades da empresa, assim como sua situação financeira, muitas ideias poderão surgir nessa etapa, e haverá necessidade de selecionar as que forem utilizáveis. O resultado dessa seleção é uma proposta de produto mais viável e com mais detalhes, sendo necessário especificar as necessidades em relação ao produto antes de iniciar seu desenvolvimento. Essa fase conduz para uma lista de requisitos, obtida a partir das informações coletadas, que deve estar de acordo com os interesses do processo de projeto e com suas fases subsequentes.
Projeto conceitual	Consiste em vários passos, que não devem ser ignorados devido à possibilidade de problemas nas fases posteriores. O projeto conceitual é realizado após a fase de definição da tarefa e resulta em princípios de solução ou concepções que serão utilizadas para iniciar a fase posterior. Esses princípios de solução são obtidos por meio da abstração de problemas essenciais, do estabelecimento de uma estrutura de funções, da busca por princípios de soluções utilizáveis e das combinações desses princípios em uma estrutura aplicável, para então resultarem em uma especificação de um princípio de solução utilizável.
Projeto preliminar	Inicia com uma concepção avaliada técnica e economicamente. O objetivo básico é satisfazer uma determinada função com componentes, configurações físicas e materiais apropriados, considerando os critérios de segurança ergonomia, produção, montagem, operação e custos.

Projeto detalhado	São estabelecidas descrições definitivas para disposição de elementos, formas, dimensões, acabamentos superficiais, materiais e custos de fabricação. É nessa fase que a configuração física, as formas, as dimensões e as propriedades de todas as partes individuais são finalmente determinadas. Além disso, os materiais são especificados, as possibilidades de produção avaliadas, os custos são estimados e todos os desenhos e documentos para produção são produzidos.
-------------------	---

Fonte: Criado pelo autor, baseado em CARPES JR, 2014.

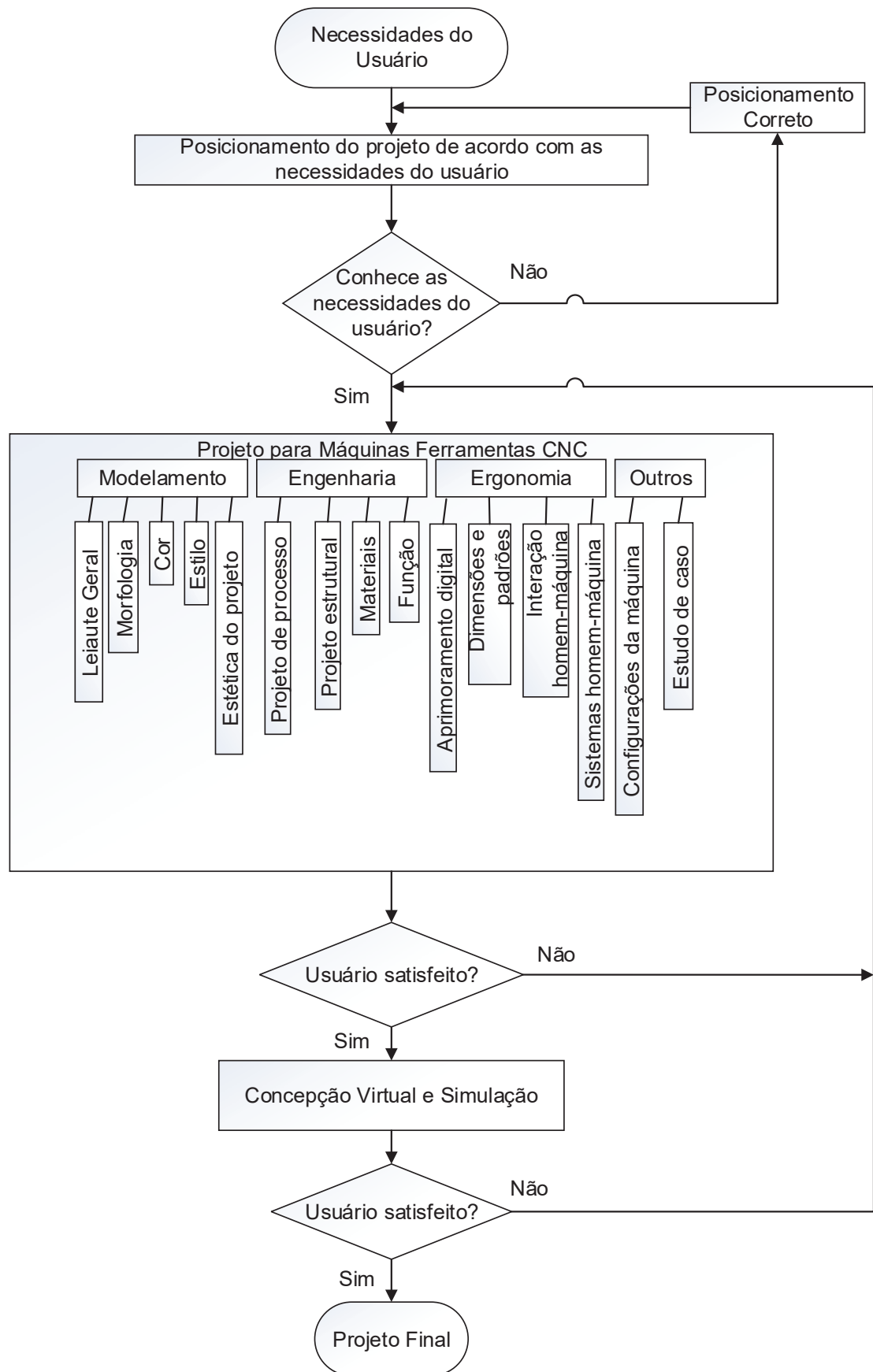
Para qualquer uma das metodologias descritas, sua aplicação somente é importante quando são necessárias e úteis para o desenvolvimento do objetivo parcial ou geral. O usuário não deve realizar nenhum trabalho por conta da sistemática ou pelo prazer da perfeição e que não esteja numa razoável proporção com o sucesso (PAHL et al., 2005).

3.4 PROJETO DE MÁQUINAS CNC

A introdução das máquinas CNCs mudou radicalmente o cenário da manufatura. Curvas se tornaram muito fáceis de serem usinadas, estruturas 3-D complexas passaram a ser relativamente simples de se produzir e o número de passos que necessitam da ação humana foram drasticamente reduzidos (LIU; XU, 2017). Tendo essa grande importância na área da manufatura e fabricação, deve-se conhecer os princípios de projeto para as máquinas CNCs modernas, apoiado em análises de design, caracterização de processos de projeto e exemplos de projetos de engenharia (YANG; CHENG, 2017).

Ainda segundo Yang e Chang (2017), o design industrial de máquinas abrange fatores humanos, estéticos, ergonômicos, sociológicos, de engenharia, de fabricação e de marketing, etc., que podem ser considerados como ferramentas de entrada para auxiliar as especificações das necessidades do mercado. A figura 7 mostra um fluxograma das etapas do processo de projeto desse tipo de equipamento.

Figura 7 – Fluxograma de projeto de máquina CNC



Fonte: Adaptado de Yang e Cheng, 2017.

Passando por essas etapas e tomadas as decisões, chega-se à concepção do equipamento que apesar de ter a mesma função primária pode variar bastante em sua forma construtiva, como mostra a figura 8, onde em *a* é apresentada uma máquina CNC com cinco eixos onde os movimentos da ferramenta são transferidos através de pistões pneumáticos, *b* é uma *router* (tipo portal) que tem como característica os pórticos móveis e pouco curso no eixo Z (vertical), *c* é um centro de usinagem tradicional e *d* tem-se o uso de um braço robótico para usinagem.

Figura 8 – Formas construtivas de máquinas CNC



a



b



c



d

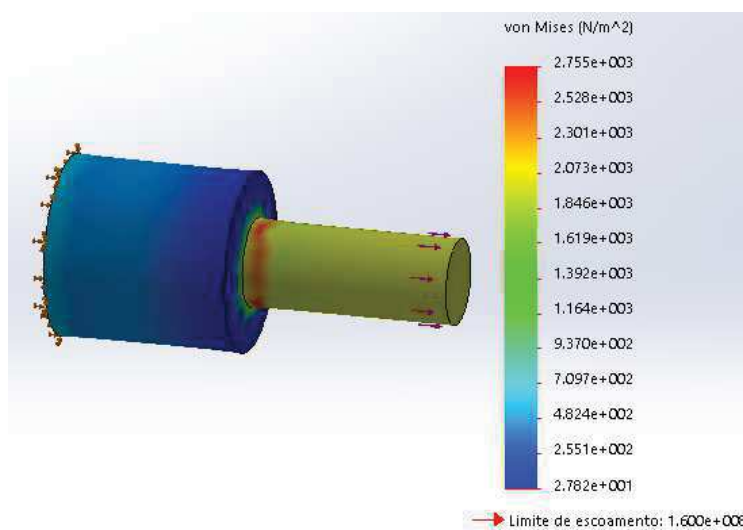
Fonte: O autor, 2018.

3.5 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

No início das produções em massa, a utilização de desenhos como forma de representação de projetos levou a uma grande facilidade na definição das características finais do produto, como na especificação das dimensões e aspectos formais antes mesmo de sua primeira versão concluída (ROMEIRO FILHO, 2006). O MEF fez algo muito parecido no campo de projeto de engenharia, pois muitas concepções podem ser testadas antes mesmo de um protótipo ser fabricado.

Muitos fenômenos em engenharia e ciências podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais. Em geral, solucionar essas equações por meios de métodos analíticos clássicos para geometrias arbitrárias é quase impossível. O método de elementos finitos é uma aproximação numérica com a qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado (FISH; BELYTSCHKO, 2009). Do ponto de vista da engenharia é um método para resolver problemas de engenharia, tais como análise de tensões, transferência de calor, escoamento de fluidos e eletromagnetismo, por simulações de computador. A figura 9, abaixo, mostra um exemplo de análise de tensões em um eixo escalonado.

Figura 9 – Análise de tensões com o método dos elementos finitos



Fonte: O autor, 2018.

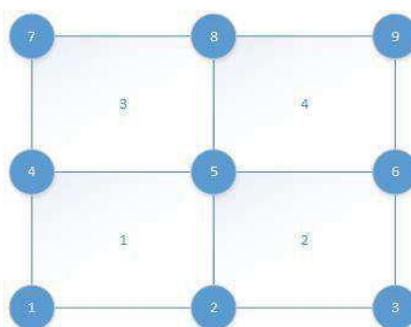
Para análise de estruturas, o MEF ganhou projeção internacional a partir de meados dos anos cinquenta do século XX com os trabalhos independentes e quase simultâneos do professor John Argyris, que trabalhava no Imperial College em Londres, e de um grupo de

engenheiros da *Boeing* liderados pelo professor Ray W. Clough (VAZ, 2011). Já no Brasil segundo Vaz (2011), a primeira tese sobre o assunto foi defendida na Coppe-UFRJ, em 1970.

3.5.1 Uso do método

Na utilização do método, a estrutura, o componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos), conectados entre si pelos pontos discretos, que são chamados de nós (figura 10). A montagem de elementos, que constitui o modelo matemático, tem seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros. Para os problemas de análise estrutural, em particular, os parâmetros são os deslocamentos nodais, que são as incógnitas do problema (ALVES FILHO, 2013).

Figura 10 – Representação dos elementos



Fonte: O autor, 2018.

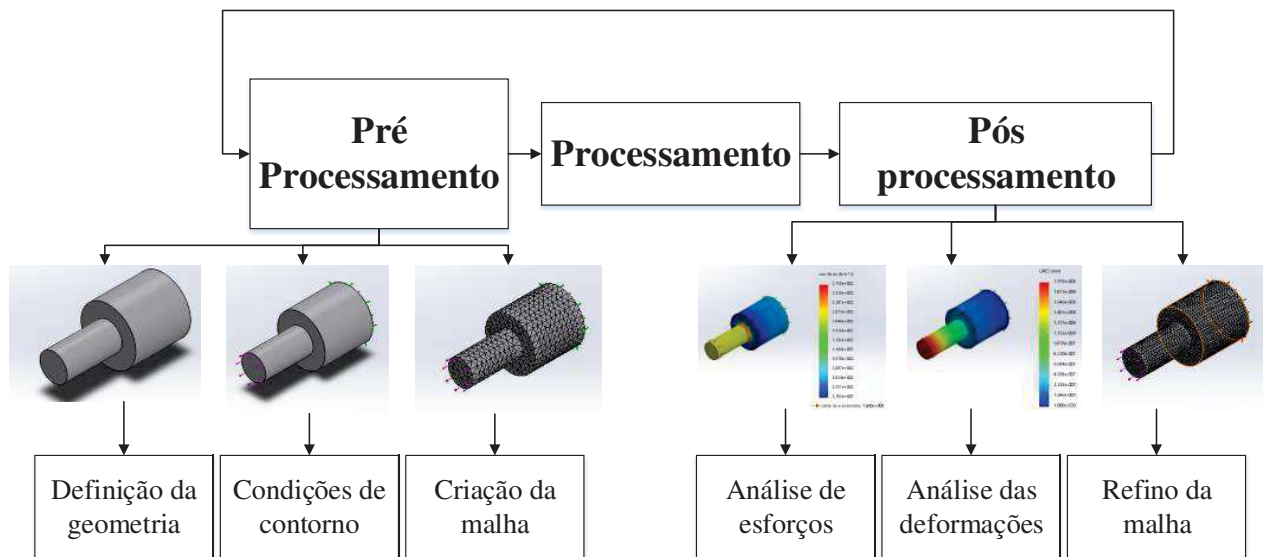
A análise em software de elementos finitos passam, basicamente por três fases: pré processamento, processo e pós processamento, cada qual com sua devida importância (ALVES FILHO, 2013; FISH; BELYTSCHKO, 2009; VAZ, 2011).

Pré processamento: esta fase é a que exige maior esforço do analista (70% do tempo de análise), pois é nela que a geometria deve ser especificada, as especificações das propriedades do material são definidas, a geração da malha de nós é criada (discretização) e as restrições e cargas são impostas (condições de contorno).

Processamento: uma vez que defini-se todas as características de análise (pré processamento), passa-se para a etapa de processamento, o que pode levar desde minutos até várias horas. É nela que o *software* monta as matrizes dos elementos, monta a matriz do sistema global, reduz a matriz global com ajuda das condições de contorno e resolve o sistema.

Pós processamento: após o problema ser resolvido com base nas condições de contorno e propriedades adicionadas nas etapas anteriores, são apresentados os resultados ao analista. É importante que esses resultados sejam os mais claros possíveis, para não induzirem o usuário a erros. Após a análise é verificado se há a necessidade de alguma mudança nos parâmetros de entrada ou um refino na malha e o processo é refeito até atingir resultados mais próximos da realidade. A figura 11 a seguir ilustra as três etapas do uso do MEF.

Figura 11 – Etapas da análise

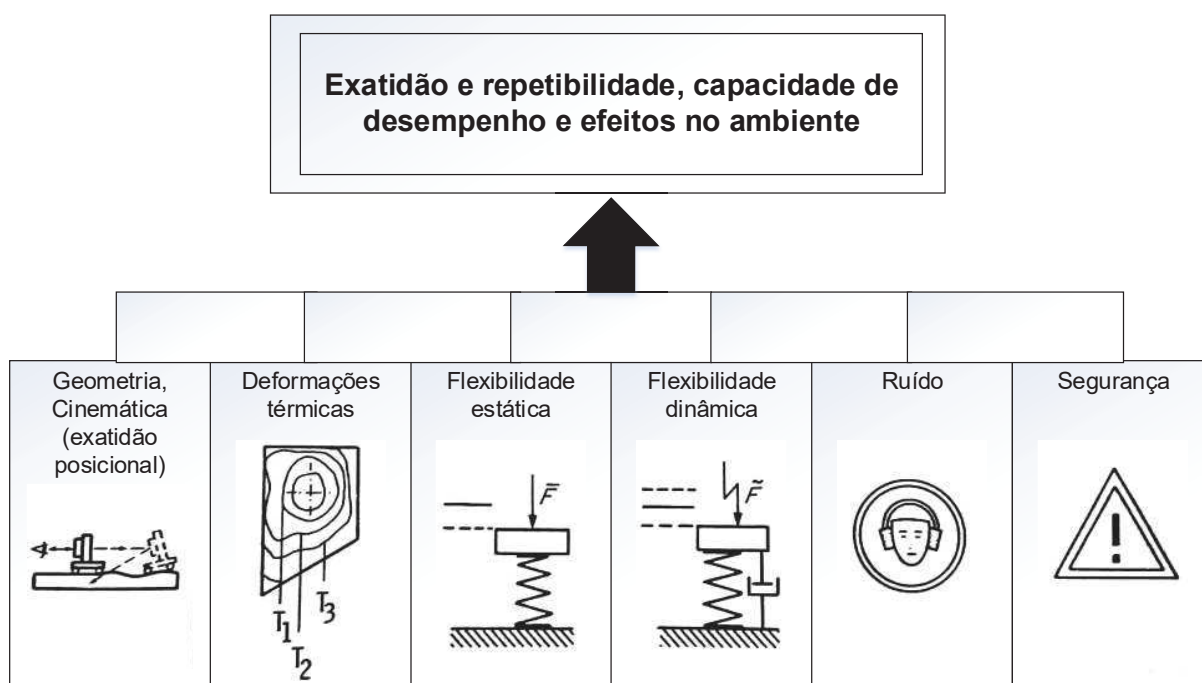


Fonte: O autor, 2018.

3.6 ANÁLISE METROLÓGICA E TESTES DE PERFORMANCE

Para uma maior aceitação das máquinas ferramentas pelos usuários, exige-se do controle de qualidade que todas as propriedades importantes do equipamento sejam definidas e avaliadas. O problema é que praticamente todas as características da máquina são influenciadas por um grande número de variáveis aleatórias ou sistemáticas (figura 3.11). Por isso, é importante, para um julgamento científico do equipamento, que se identifique as variantes individuais e as mantenham dentro de certos limites baseados em comparações com outras máquinas ferramentas (WECK, 1984).

Figura 12 – Variáveis que influenciam as características da máquina



Fonte: Adaptado de Weck, 1984.

3.6.1 Comportamento geométrico e cinemático de máquinas ferramentas

A exatidão e a repetibilidade do trabalho produzido no processo de usinagem nas máquinas são bastante influenciadas pelos seguintes fatores: desvios entre o movimento do carro porta ferramenta e a mesa de trabalho, condições da máquina (desgaste, temperatura, entre outras), deformações elásticas da ferramenta e deformações elásticas da mesa e dos elementos de fixação (WECK, 1984). Destas fontes de erros, a primeira é atribuída ao projeto e montagem da máquina e por isso será descrita com mais detalhes nesse texto.

3.6.1.1 Desvios geométricos

Ao descrever os desvios esperados dentro de todo o volume de trabalho de uma máquina, devem ser consideradas as contribuições individuais de cada eixo (WECK, 1984). Para o caso de três eixos de movimento são esperados vinte e uma fontes dos erros geométricos, são elas: três erros de posicionamento linear, seis erros de retitude, nove erros angulares e três erros de perpendicularidade entre os eixos (OKAFOR; ERTEKIN, 2000).

Um esquema das seis componentes de erro do eixo X de centros de usinagem é mostrado na figura 13. Um sumário dos símbolos usados é mostrado a seguir:

OXYZ Sistema de coordenadas de referência

$O_1X_1Y_1Z_1$ Sistema de coordenadas móvel

X direção de movimento escolhido

$\epsilon_x(x)$ Erro rotacional do eixo X (rolamento)

$\epsilon_y(x)$ Erro rotacional do eixo Y (tombamento)

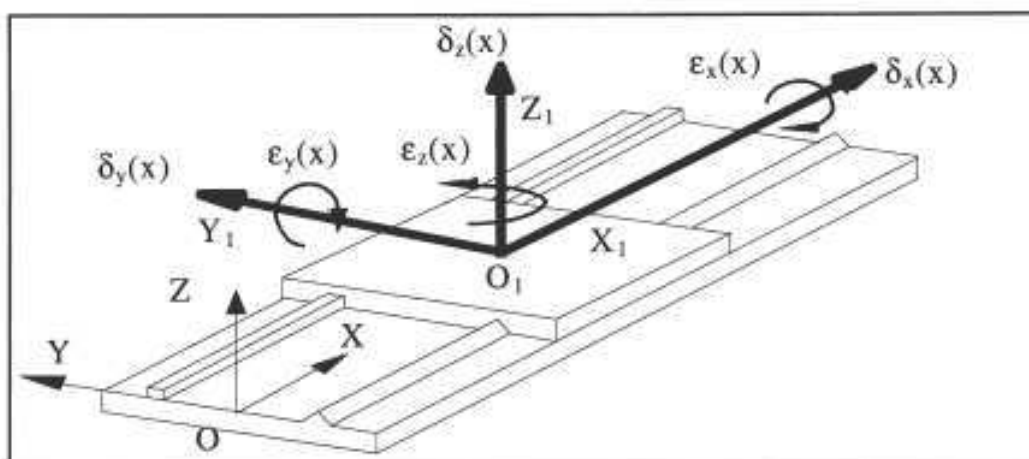
$\epsilon_z(x)$ Erro rotacional do eixo Z (guinamento)

$\delta_x(x)$ Erro de translação (posicionamento) ao longo do eixo X

$\delta_y(x)$ Erro de translação (retitude horizontal) ao longo do eixo Y

$\delta_z(x)$ Erro de translação (retitude vertical) ao longo do eixo Z

Figura 13 – Componentes de erro do eixo X



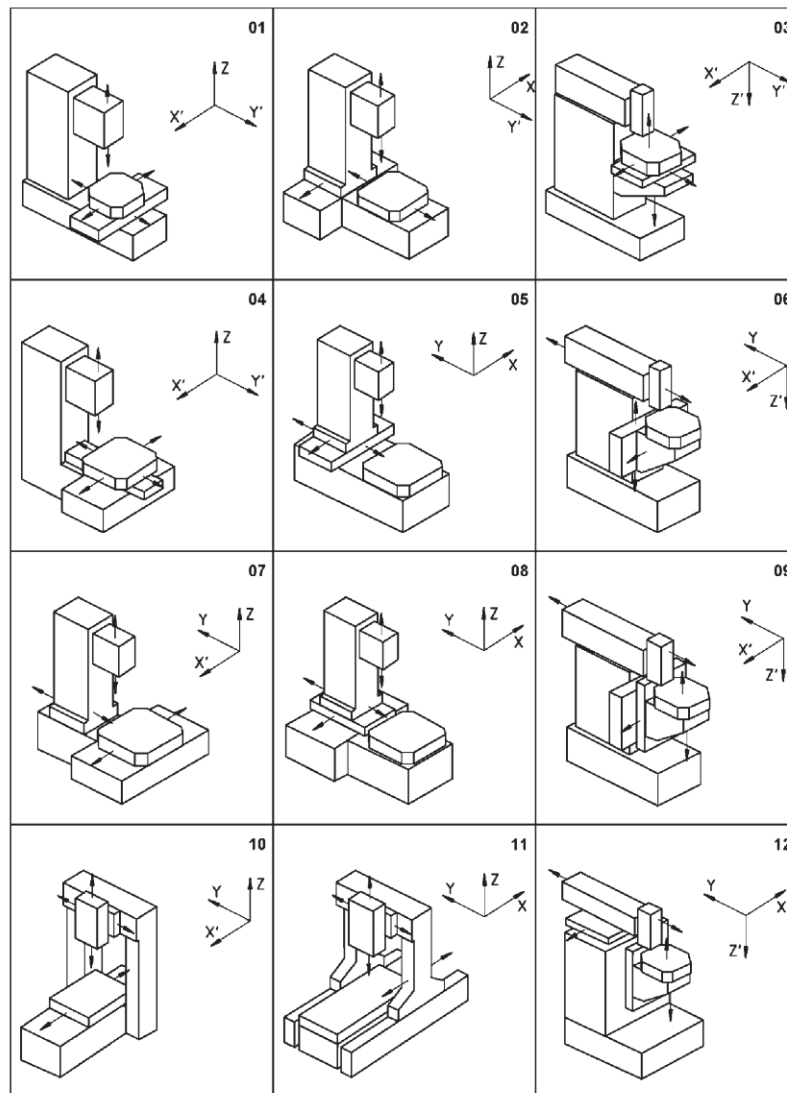
Fonte: Okafor e Ertekin, 2000.

3.6.2 Normas ISO para controle geométrico de máquinas ferramentas

As principais normas que tratam do assunto discutido nessa seção são: a ISO 10791-2 (2003) e a ISO 230-1 (1999). Ambas estabelecem métodos para verificação da exatidão geométrica, a primeira em centros de usinagem e a última em máquinas ferramentas.

A norma 10791-2 (2003) deve ser aplicada a centros de usinagem (ou similares) com sistema de controle de acordo com o programa, três eixos lineares (X, Y, Z) com movimentos até 2000 mm, eixo de rotação B e eixos de rotação com cabeçotes de fuso adicionais (A e C). A figura 14 a seguir, mostra os tipos dos equipamentos abrangidos pela norma e os sentidos de movimentos de cada eixo. São apresentados apenas três eixos, mas podem existir mais.

Figura 14 – Arranjos de centro de usinagem com eixo vertical



Fonte: ISO 10791-2, 2003.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

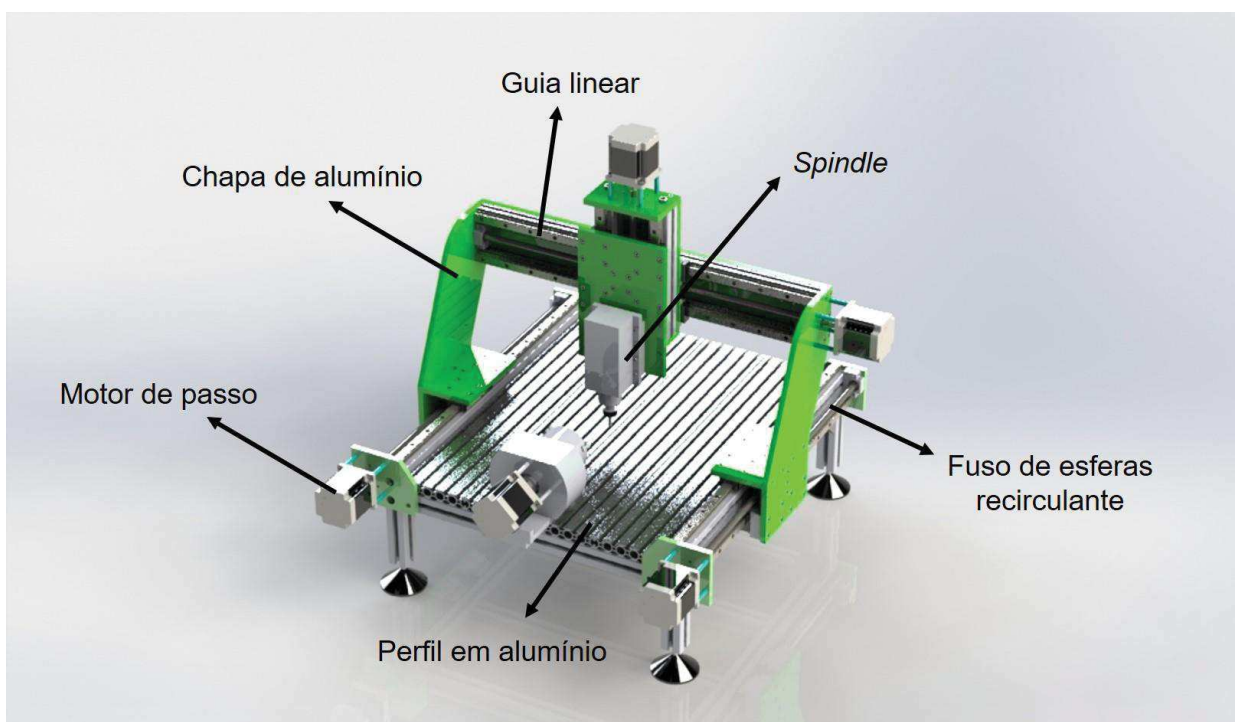
Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos geral e específicos deste trabalho.

4.1 PLANEJAMENTO

Deve-se levar em consideração alguns parâmetros para limitar o desenvolvimento desse produto, dois desses limitantes serão a verificação das tolerâncias geométricas dos movimentos dos eixos e o custo do equipamento, ambos mutuamente relacionados. Apesar disso, buscou-se, dentro dessas limitações, um equipamento que possa ser adquirido pelos interessados com custos competitivos.

A *router* tratada neste texto está representada na figura 15, onde podem ser identificados os seguintes componentes: estrutura metálica de alumínio com perfis e chapas, mecanismos de transmissão de movimentos (lineares e de rotação), motores de passo e *spindle*. Todos estes elementos foram dimensionados e/ou selecionados para atender aos requisitos do projeto com base numa metodologia específica que será descrita na seção 4.2.

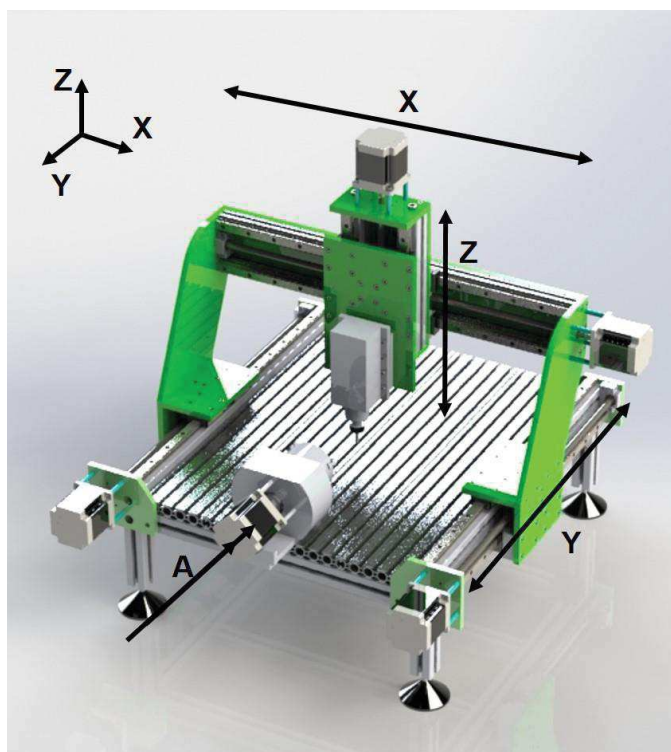
Figura 15 – Principais componentes da *router*



Fonte: O autor, 2018.

A máquina foi projetada para ter quatro graus de liberdade, sendo três movimentos lineares (X, Y, e Z) e um movimento de rotação (eixo A) como pode ser visto na figura 16.

Figura 16 – Eixos de movimento da *router*



Fonte: O autor, 2018.

As etapas deste trabalho foram divididas e executadas em quatro grandes grupos distintos, porém interligados. São eles: projeto mecânico e seleção de componentes, fabricação de peças, montagem do conjunto e testes do equipamento. Cada etapa será descrita nos tópicos seguintes desta metodologia.

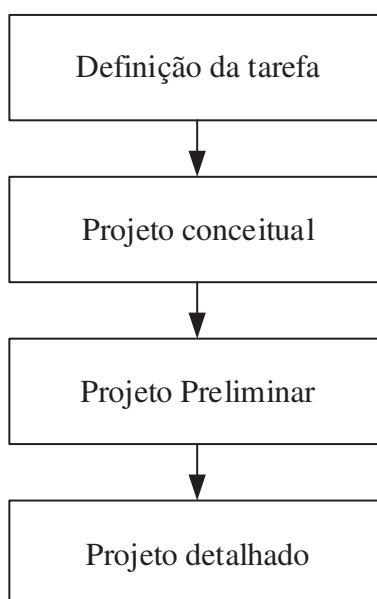
4.2 PROJETO MECÂNICO E SELEÇÃO DOS COMPONENTES

Nas seções a seguir serão descritos todos os passos e ferramentas utilizados para o dimensionamento mecânico e seleção dos componentes que compõem a *router*, objeto de estudo desta dissertação.

4.2.1 Metodologia utilizada no projeto

O projeto da *router* foi realizado tomando como guia a metodologia de Pahl et al (2005), seção 3.6.2. As etapas desta metodologia de projeto (figura 17) estão implícitas na metodologia do trabalho, porém será feito um resumo do que foi realizado em cada etapa nas seções seguintes.

Figura 17 – Etapas da metodologia de projeto utilizada no trabalho



Fonte: O autor, 2018.

4.2.1.1 Definição da tarefa

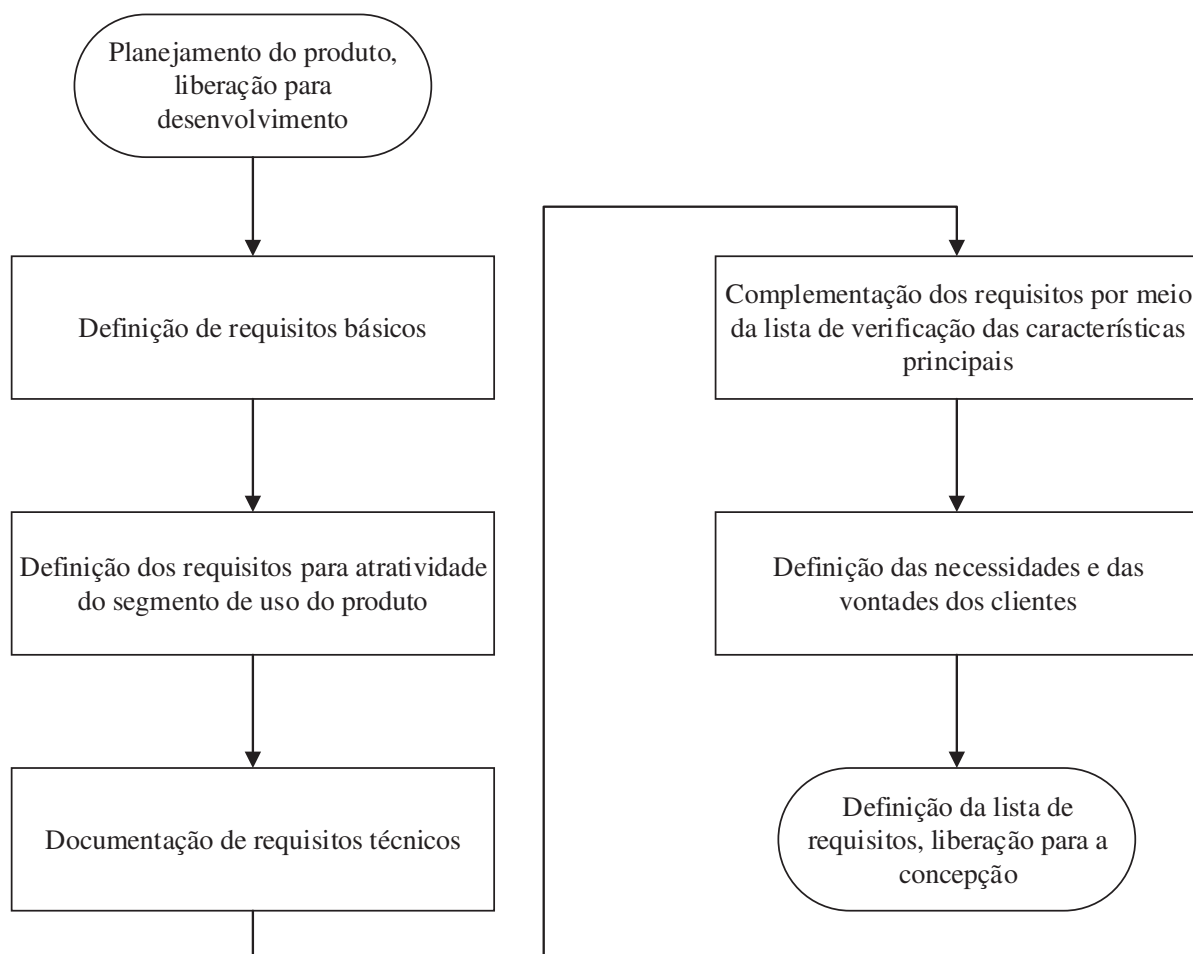
A tarefa deste trabalho foi concedida da necessidade do desenvolvimento de uma máquina ferramenta versátil que atingisse os objetivos dos interessados com respeito a funcionalidade, performance, prazos e custos. Para isso, a percepção das vontades dos “clientes” (orientador e aluno de doutorado que dará continuidade ao trabalho) foram transformadas em requisitos do

produto a ser desenvolvido, através de *brainstorms*. Nestes encontros, para debate dos requisitos do projeto, foram discutidos assuntos como: o volume de trabalho, quais materiais seriam usinados, quantidade de eixos da máquina, entre outros. A metodologia era lançar um tema para discussão e propor soluções, sem se preocupar se a solução era viável ou não, a partir das opções, escolhia-se a mais aplicavelmente possível como um ponto de partida.

No *brainstorm* inicial para coleta de informações sobre o produto, que foi projetado, fabricado, montado e ensaiado geometricamente, decidiu-se que a tarefa principal é produzir um equipamento para usinagem de peças dos mais variados formatos e materiais, com as retitudes e perpendicularidades dos eixos de movimento próximas as das especificações da norma ISO 10791-2/2003.

O fluxograma das etapas para elaboração da lista de requisitos é mostrado na figura 18 e a lista de parâmetros adotados, no projeto desta dissertação, encontra-se logo a seguir.

Figura 18 – Fluxograma para elaboração da lista de requisitos



Fonte: Adaptado de Pahl et al, 2005.

Lista de parâmetros adotados

- Volume de trabalho de 550 mm x 550 mm x 100 mm (X, Y e Z);
- Três deslocamentos lineares (X, Y e Z);
- Um deslocamento angular na peça (quarto eixo);
- Rigidez estrutural suficiente para usinagem de uma grande variedade de materiais;
- Leveza para um fácil transporte;
- Atendimento às tolerâncias das normas pertinentes;
- Custo competitivo.

A adição desses requisitos no projeto deve ser o guia para o projetista e isso, naturalmente, dará início à próxima etapa da metodologia (o projeto conceitual).

4.2.1.2 Projeto conceitual

Essa etapa se inicia com a definição da lista de requisitos e resulta em princípios de solução ou concepções que serão utilizadas para iniciar a fase posterior. Neste momento, por exemplo, foi tomada a decisão de fazer a transmissão (direta ou indireta) do motor ao eixo correspondente e que tipos de componentes utilizar em função das listas de requisitos apresentadas anteriormente.

Em um primeiro momento, é feita uma abstração dos problemas essenciais da máquina, nessa fase prende-se do individual e busca-se conhecer o geral e o principal do equipamento em mente. Essa generalização permite localizar o ponto central do problema. Se este tiver sido formulado de forma precisa, então a função global e as condicionantes principais, caracterizadoras da problemática, são identificáveis, sem no entanto fixar uma solução particular. Assim, chegou-se aos seguintes tópicos à abstrair: como converter o movimento rotacional do motor (seja ele qual for) em movimento linear dos eixos, como transmitir potência, quais formatos construtivos e quais materiais utilizar na estrutura. Feitas essas abstrações, passa-se a fase de avaliação das combinações apropriadas baseadas em critérios técnicos e econômicos. A seguir, na figura 19, é apresentado o fluxograma para esta etapa do processo de criação do produto.

Figura 19 – Fluxograma para elaboração do projeto conceitual



Fonte: Adaptado de Pahl et al, 2005.

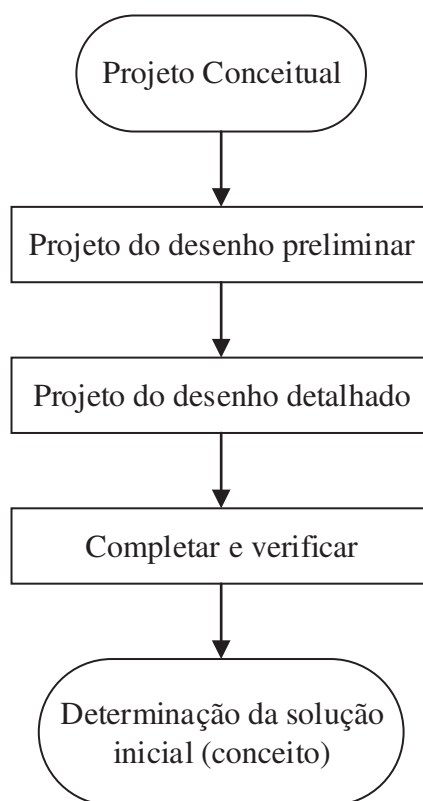
Para o acionamento da máquina, e do avanço, foram escolhidos respectivamente *spindle* e motores de passo. Para o *spindle* não havia muitas opções competitivas em termos de soluções, o que o fez, sem muita dificuldade, a escolha. Já para o motor de passo, existem também os servomotores DC e AC que são opções a se pensar em um projeto desse tipo, porém o custo foi o principal fator de escolha, e nesse critério, o motor de passo tem grande vantagem. Já para a transmissão dos movimentos, foi escolhida a combinação da utilização de fusos de esferas recirculantes com guias lineares para a transmissão de movimento dos motores de passo até a ferramenta. Isso devido, basicamente, a eficiência na transmissão com baixas folgas mecânicas que esse prudo propicia. Alta rigidez estrutural e baixa massa eram um dos requisitos e para atender esses critérios foi escolhido ligas de alumínio para o material da estrutura.

4.2.1.3 Projeto preliminar

Uma vez que na etapa de concepção a solução básica foi essencialmente elaborada a partir de informações sobre a estrutura de funcionamento, a configuração concreta dessa ideia básica figura agora em primeiro plano. Esta etapa exige a escolha dos materiais e dos processos de manufaturas, a definição das dimensões principais, o exame da compatibilidade espacial e ainda a complementação das soluções da fase anterior.

O objetivo básico dessa etapa foi satisfazer uma determinada função, a partir de pré projetos, com componentes, configurações físicas e materiais apropriados, considerando os critérios de segurança, ergonomia, produção, montagem, operação e custos. A figura 20, a seguir, mostra o fluxograma seguido nessa etapa.

Figura 20 – Fluxograma para elaboração do projeto preliminar

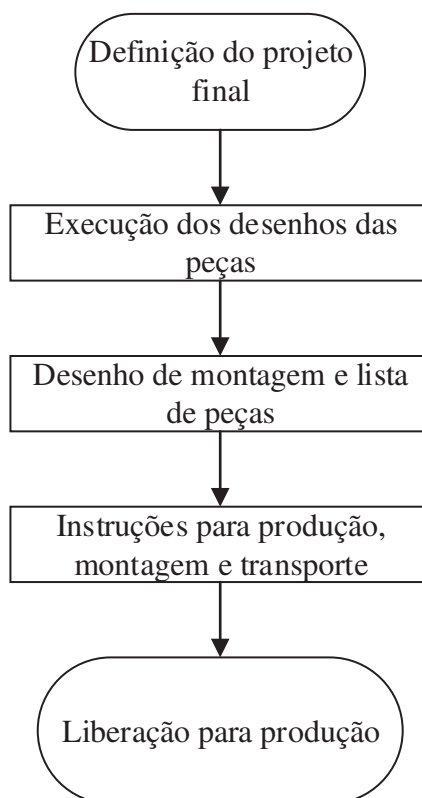


Fonte: Adaptado de Pahl et al, 2005.

4.2.1.4 Projeto detalhado

São estabelecidas descrições definitivas para disposição de elementos, formas, dimensões, acabamentos superficiais e materiais. Para facilitar este trabalho, utilizou-se uma plataforma CAD. Nesta metodologia e nos resultados deste trabalho encontram-se essas informações. A figura 21, a seguir, mostra o fluxograma seguido nessa etapa.

Figura 21 – Fluxograma para elaboração do projeto detalhado



Fonte: Adaptado de Pahl et al, 2005.

4.2.2 Cálculo da força e potência de corte

Foi determinada uma situação crítica para o equipamento em função dos parâmetros de corte além dos desejáveis ao equipamento. Nessa situação foi considerado o fresamento frontal, utilizando uma fresa de topo em aço rápido com quatro cortes e o material da peça sendo de aço de baixo carbono (tabela 1). Os parâmetros de entrada são apresentados no quadro 5, a seguir.

Quadro 5 – Parâmetros de corte

Parâmetros de corte crítico estabelecidos	
Profundidade de corte (a_p)	3 mm
Largura de corte (a_e)	12 mm
Velocidade de avanço (v_a)	1000 mm/min
Rotação (n)	2000 rpm
Avanço por dente (f_z)	0,125 mm/dente
Velocidade de corte (V_c)	75,4 m/min
Rendimento do motor (η)	80%
Coeficiente de força específica de corte (K_c)	2000 MPa

Fonte: O autor, 2018.

A determinação da potência de corte foi realizada a partir da equação 17, retirada do catálogo da Mitsubishi Materials do Brasil LTDA, descrita no tópico 3.4.1.2 deste trabalho e repetida abaixo.

$$N_c = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_a \cdot K_c}{60 \times 10^6 \times \eta}$$

Cálculo semelhante foi realizado utilizando a equação de Kienzle (equação 5), porém a equação acima se mostrou mais conservadora.

Já a potência de avanço, foi determinada a partir de uma modificação da expressão da equação 14, de forma a deixar o projeto mais conservador. A expressão modificada é mostrada abaixo.

$$\frac{N_c}{N_a} \simeq 100$$

Chegando-se ao valor da potência de corte, foi utilizado a equação 7 descrita no tópico 3.4.1.1, e repetida abaixo, para o cálculo da força de corte.

$$N_c = \frac{P_c \cdot v}{60 \cdot 75}$$

4.2.3 Plataforma CAE e Simulações

O software de elementos finitos utilizado para análise estrutural do equipamento projetado foi o da marca *Engineering Simulation and Scientific Software* (ESSS): ANSYS® 18.2 licença estudantil com todas as funções do programa completo, porém com limitação na geração da malha de 32 mil nós.

4.2.4 Estrutura da máquina

Dos possíveis materiais para a estrutura de uma máquina ferramenta optou-se pelo uso de perfis extrudados e chapas em liga de alumínio devido à boa trabalhabilidade desse material e a razão massa-resistência elevada (o que deixa a máquina leve). Foram utilizados quatro tipos de perfis extrudados.

4.2.4.1 Perfis extrudados

O tipo de liga de alumínio dos perfis é o 6063-T5 e suas características técnicas estão descritas no quadro 6 a seguir.

Quadro 6 – Especificações técnicas da liga

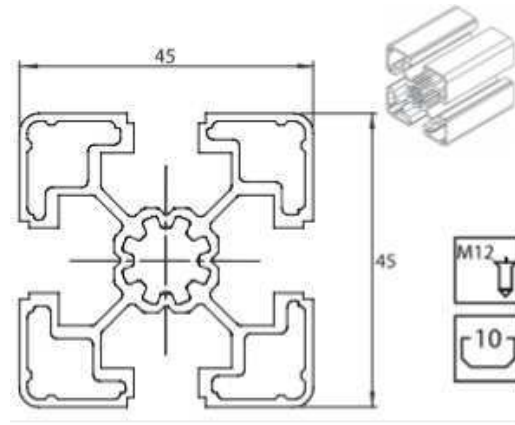
Especificações técnicas	
Composição do material	AlMgSiO.5F25
Material normalizado	Al6063-T5
Resistência mínima à tração	250 MPa
Limite de escoamento	160 Mpa
Módulo de elasticidade	70 GPa
Dureza Brinell	75 HB
Coeficiente de expansão térmica	$(-50...+20^{\circ}\text{C}) = 21,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $(+20...+100^{\circ}\text{C}) = 23,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Espessura de anodização	10 μm
Tolerância de paralelismo	+/- 0.1mm

Fonte: OBR, 2018.

A seção transversal dos perfis utilizados e suas propriedades serão descritas a seguir.

Perfil 45mmx45mm: esse perfil foi utilizado em duas situações distintas, como viga transversal da mesa (amarração da estrutura) e como viga e apoio da guia linear do eixo Z. A figura 22, a seguir, mostra a seção transversal desse elemento (dimensões em milímetros).

Figura 22 – Perfil 45 mm x 45 mm



Fonte: OBR, 2018.

Seus dados técnicos encontram-se no quadro 7 a seguir.

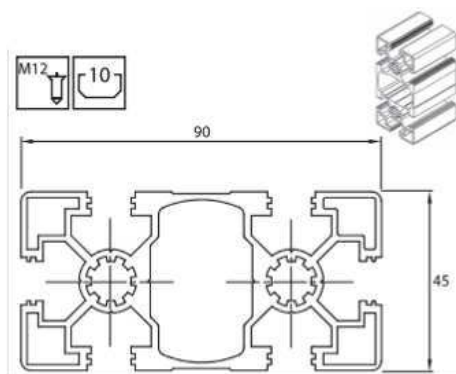
Quadro 7 – Especificações técnicas do perfil 45mmx45mm

Perfil 45mmx45mm	
Massa	1,2 kg/m
Momento de inércia	$I_{XX} = 8,46 \text{ cm}^4$
	$I_{YY} = 8,46 \text{ cm}^4$
Módulo de Resistência	$W_{XX} = 4,14 \text{ cm}^3$
	$W_{YY} = 4,14 \text{ cm}^3$

Fonte: OBR, 2018.

Perfil 45mmx90mm: esse perfil foi utilizado como uma viga longitudinal na montagem da mesa e como apoio dos dois trilhos do eixo Y da máquina. A figura 423, a seguir, mostra a seção transversal desse elemento (dimensões em milímetros).

Figura 23 – Perfil 45 mm x 90 mm



Fonte: OBR, 2018.

Seus dados técnicos encontram-se no quadro 8 a seguir.

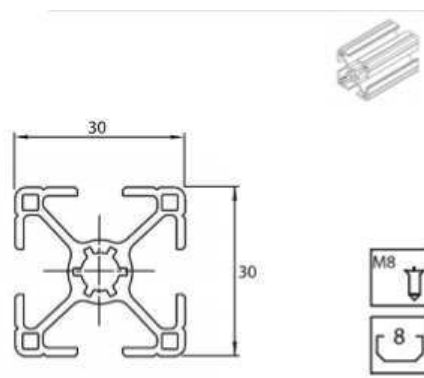
Quadro 8 – Especificações técnicas do perfil 45mmx90mm

Perfil 45mmx90mm	
Massa	3,2 kg/m
Momento de inércia	$I_{XX} = 97,52 \text{ cm}^4$
	$I_{YY} = 24,85 \text{ cm}^4$
Módulo de Resistência	$W_{XX} = 20,96 \text{ cm}^3$
	$W_{YY} = 10,35 \text{ cm}^3$

Fonte: OBR, 2018.

Perfil 30mmx30mm: esse perfil foi utilizado com dupla função: viga no eixo X e apoio dos trilhos. A figura 24, a seguir, mostra a seção transversal desse elemento (dimensões em milímetros).

Figura 24 – Perfil 30 mm x 30 mm



Fonte: OBR, 2018.

Seus dados técnicos encontram-se no quadro 9 a seguir.

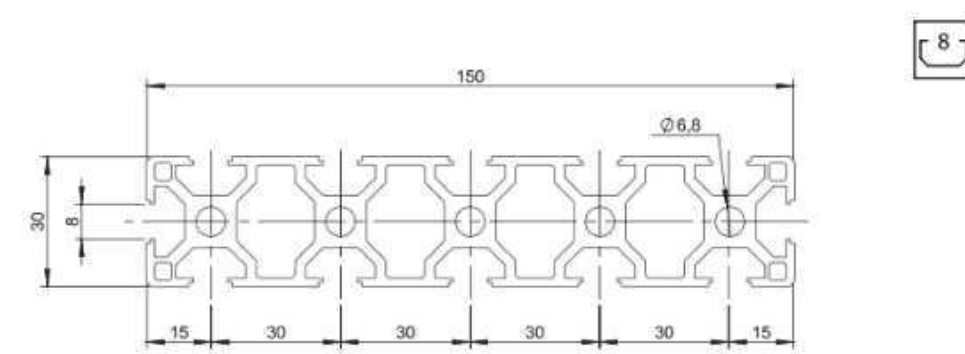
Quadro 9 – Especificações técnicas do perfil 30 mm x 30 mm

Perfil 30mmx30mm	
Massa	0,67 kg/m
Momento de inércia	$I_{XX} = 2,24 \text{ cm}^4$
	$I_{YY} = 2,24 \text{ cm}^4$
Módulo de Resistência	$W_{XX} = 1,47 \text{ cm}^3$
	$W_{YY} = 1,47 \text{ cm}^3$

Fonte: OBR, 2018.

Perfil 30mmx150mm: foram utilizados 4 peças com essa seção transversal e comprimento de 800 mm. A função desempenhada por este perfil foi compor a base da mesa. A figura 25, a seguir, mostra a seção transversal desse elemento (dimensões em milímetros).

Figura 25 – Perfil 30 mm x 150 mm



Fonte: OBR, 2018.

Seus dados técnicos encontram-se no quadro 10 a seguir.

Quadro 10 – Especificações técnicas do perfil 30 mm x 150 mm

Perfil 30mmx150mm	
Massa	4,05 kg/m
Momento de inércia	$I_{XX} = 12,92 \text{ cm}^4$
	$I_{YY} = 265,83 \text{ cm}^4$
Módulo de Resistência	$W_{XX} = 8,61 \text{ cm}^3$
	$W_{YY} = 35,44 \text{ cm}^3$

Fonte: OBR, 2018.

4.2.4.2 Chapas

O tipo de liga de alumínio utilizado nas chapas foi o Al5052-F e suas características técnicas estão descritas no quadro 11 a seguir.

Quadro 11 – Especificações técnicas do alumínio das chapas

Especificações técnicas	
Material normalizado	Al5052-F
Resistência mínima à tração	220 MPa
Limite de escoamento	90 Mpa
Módulo de elasticidade	70 GPa
Dureza Brinell	50 HB
Coefficiente de expansão térmica	$23,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Espessura de anodização	10 μm

Fonte: MetalTron, 2018.

Essas chapas foram utilizadas no pórtico, na base do eixo X e na base do eixo Z, todas com espessura de 12,7 milímetros, como a mostrada na figura 26 a seguir.

Figura 26 – Chapa de alumínio 5052-F



Fonte: O autor, 2018.

4.2.5 Acionamento

Foram escolhidos para o acionamento dos eixos e para o acionamento da ferramenta um motor de passo e um *spindle*, respectivamente. Ambos descritos nas seções a seguir.

4.2.5.1 Spindle

Em função da potência de corte dimensionada no tópico 4.2.2, foi escolhido o *spindle* da marca TECNR, modelo GDZ80*73-2.2 mostrado na figura 27.

Figura 27 – *Spindle* utilizado



Fonte: O autor, 2018.

O quadro 12, a seguir, mostra os detalhes técnicos do *spindle* escolhido.

Quadro 12 – Especificações técnicas do *Spindle*

Especificações Técnicas	
Potência	2,2 kW
Corrente	6 A
Frequência padrão	400 Hz
Rotação máxima	24000 rpm
Tensão	220/380 V
Pinças	ER20
Rolamentos	Rolamentos de cerâmica

Fonte: TECNR.

4.2.5.2 Motor de passo

Em função da força de avanço dimensionada no tópico 4.2.2, para o acionamento de todos os eixos (X, Y, Z e A) foi escolhido o motor de passo NEMA 34, a figura 28 mostra o motor escolhido.

Figura 28 – Motor de passo NEMA 34



Fonte: O autor, 2018.

O quadro 13, a seguir, mostra os detalhes técnicos do motor de passo escolhido.

Quadro 13 – Especificações técnicas do motor de passo

Especificações Técnicas	
NEMA	34
Flange	86,0 mm
Passo em ângulo	1,8°
Torque estático Bipolar	9,0 N.m
Quantidade de fios	8
Ligações possíveis	Unipolar, Bipolar série e paralelo
Corrente unipolar	4,0 A/fase
Inércia	4000 g.cm ²
Temperatura de operação	-20 a +50 °C
Classe de isolamento	Classe B (130 °C)
Diâmetro do eixo	12,7 mm
Massa	3,90 kg

Fonte: KALATEC, 2018.

4.2.6 Transmissão do movimento

Foram escolhidas, para a conversão do movimento de rotação em translação, guias lineares e fuso de esferas recirculantes. Ambas descritas nas seções a seguir.

4.2.6.1 Guias Lineares

Para guiar os eixos X, Y e Z da máquina foram escolhidos as guias lineares da marca KALATEC, série THR com quatro fileiras de esferas e com a mesma capacidade de carga nas quatro direções. O modelo escolhido foi o TRH20FL com abas, a figura 29 a seguir mostra o modelo utilizado.

Figura 29 – Guia linear



Fonte: Kalatec, 2018.

O quadro 14, a seguir, mostra os detalhes técnicos do modelo de guia escolhido.

Quadro 14 – Especificações técnicas da guia linear

Especificações Técnicas	
Capacidade de carga dinâmica	2125 kg
Capacidade de carga estática	3891 kg
Momento M_x	39,6 kgf.mm
Momento M_y	36,9 kgf.mm
Momento M_z	36,9 kgf.mm
Tolerância classe N	Paralelismo 35 μ m/4000 mm

Fonte: Kalatec, 2018.

4.2.6.2 Fuso de esferas recirculantes

Para conversão do movimento circular do motor em movimento linear, foram escolhidos os fusos de esferas recirculantes com castanha dupla, comercializado pela KALATEC. O modelo escolhido foi o DFUR-1605, a figura 30 a seguir mostra o modelo utilizado.

Figura 30 – Fuso de esferas recirculantes com castanha dupla



Fonte: Kalatec, 2018.

O quadro 15, a seguir, mostra os detalhes técnicos do modelo de fuso de esferas escolhido.

Quadro 15 – Especificações técnicas do fuso de esferas recirculantes

Especificações Técnicas	
Erro máximo	0,05 mm/315 mm
Diâmetro do fuso	16 mm
Passo	5,0 mm
Capacidade de carga dinâmica	973 kgf
Capacidade de carga estática	2406 kgf
Rosca	Direita

Fonte: Kalatec, 2018.

4.3 FABRICAÇÃO

A fabricação da *router* foi realizada, em sua maior parte, nos laboratórios de usinagem do DEMEC. Apenas duas chapas, que serão descritas nos procedimentos foram fabricadas no centro de usinagem da ETEPAM. Nas seções seguintes serão mostrados os equipamentos e procedimentos realizados na fabricação, bem como algumas modificações no projeto original devido ao melhor aproveitamento das utilidades das máquinas ferramentas.

4.3.1 Máquinas ferramentas utilizadas

Nas seções a seguir serão apresentadas as máquinas ferramentas utilizadas na fabricação da *router*.

4.3.1.1 Fresadora

Todas as operações de faceamento, esquadreamento, rebaixo e furação, necessárias para fabricação das peças retangulares e algumas circulares, foram realizadas em uma fresadora vertical da marca *Diplomat*, modelo FVF 2500. Esta máquina dispõe de escalas digitais nos eixos lineares na resolução de 5 μm .

4.3.1.2 Torno mecânico

Para usinagem em peças com superfícies de revolução foi utilizado o torno mecânico da marca *Nardini*, modelo Mascote MS205. Foram utilizados, neste equipamento, dois tipos de placa para prender as peças em função do procedimento a ser executado: uma placa universal de três castanhas e uma placa com quatro castanhas independentes.

4.3.1.3 Serra de fita

Para o corte dos tarugos e das chapas, para posterior preparação, foi utilizada uma serra de fita da marca *Franho*, modelo FM400.

4.3.1.4 Centro de usinagem

A preparação das chapas do pórtico foram realizadas, devido a sua geometria diferenciada, em um centro de usinagem da marca ROMI, Modelo *Discovery 4022* com três eixos de movimento.

4.3.2 Preparação dos perfis

Os perfis utilizados são vendidos com o comprimento ligeiramente maior que o especificado e, além disso, passam por um processo de serramento. Por isso, todos os perfis utilizados passaram pelo processo de faceamento na fresadora, descrita no tópico 4.3.1.1, para adequação com as dimensões nominais do projeto. Após este procedimento, foram criadas roscas nos furos centrais destes, manualmente.

4.3.3 Preparação das chapas

As chapas que fazem parte da estrutura da máquina foram usinadas na fresadora descrita no tópico 4.3.1.1 e os processos realizados foram: faceamento, furação e rebaixo. Além destes, foram realizadas roscas manuais onde descrito no projeto.

4.3.3.1 Chapas do pórtico

As chapas do pórtico (figura 31) por apresentarem uma geometria mais complexa, optou-se por usiná-las no centro de usinagem descrito no tópico 4.3.1.4.

Figura 31 – Chapa do pórtico



Fonte: O autor, 2018.

4.3.4 Preparação dos fusos

Os fusos foram usinados em suas extremidades para adequação das medidas dos mancais. O procedimento foi realizado no torno mecânico descrito anteriormente no tópico 4.3.1.2.

4.3.5 Fabricação do dispositivo para o quarto eixo

A fabricação do dispositivo para o quarto eixo foi realizada em duas etapas: a primeira etapa foi a preparação do mancal, onde houveram as operações de faceamento; diminuição do diâmetro; furos e roscas para fixação do motor de passo e os rebaixas para alojamento dos rolamentos cônicos. A segunda etapa foi a preparação do eixo com o flange para fixação da placa universal de três castanhas.

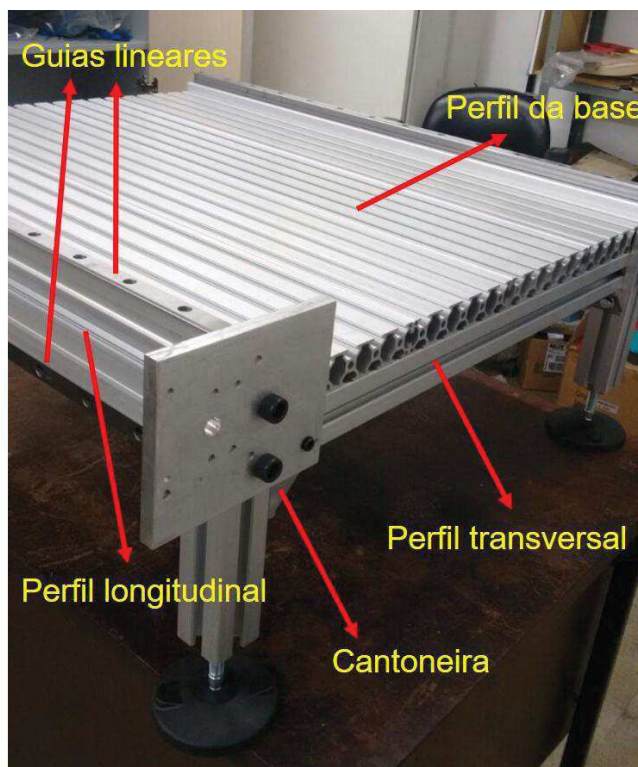
4.4 MONTAGEM

A montagem da *router* foi dividida em duas partes: montagem da mesa e montagem dos eixos. A seguir, cada etapa é descrita com detalhes.

4.4.1 Montagem da mesa

A mesa iniciou-se com a preparação dos trilhos para montagem nos dois perfis longitudinais de 45mmx90mmx800mm. Nessa parte, os parafusos e as porcas “T” são montadas neles. Em seguida, colocou-se a montagem anterior no perfil descrito do lado direito e esquerdo da mesa, sendo esta a primeira pré-montagem. Prendeu-se, em uma segunda pré-montagem, os perfis transversais com dimensões de 45mmx45mmx600mm aos perfis da base da mesa (quatro unidades igualmente espaçadas), tudo de acordo com as dimensões do projeto e com o auxílio de esquadro para garantia das perpendicularidades existentes. Em seguida, fez-se a junção das duas pré-montagens descritas com as cantoneiras, a figura 32 a seguir mostra todos os componentes citados montados.

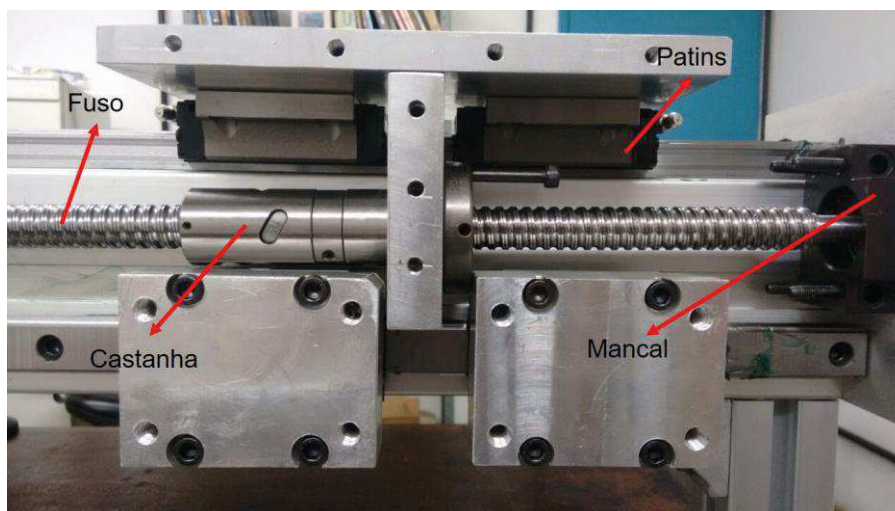
Figura 32 – Componentes da montagem da mesa



Fonte: O autor, 2018.

Monta-se, por fim, os acessórios da mesa: o fuso (eixo Y), castanha dos fusos, os patins nos trilhos e os mancais às chapas, todos mostrados na figura 33.

Figura 33 – Acessórios da mesa

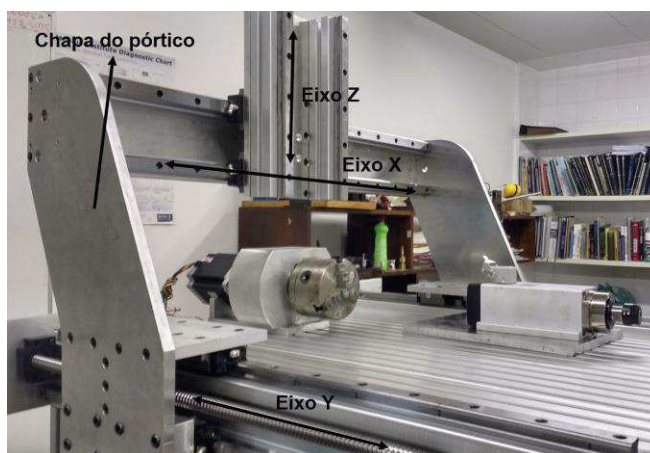


Fonte: O autor, 2018.

4.4.2 Montagem dos eixos X, Y e Z

O eixos de movimentos lineares são montados à estrutura da seguinte forma: o eixo Y, como foi mostrado na seção anterior, é diretamente montado à mesa (figura 4.19). O eixo X é montado nas chapas do pórtico e por fim, o eixo Z é montado nos patins do eixo Y. como mostra a figura 34.

Figura 34 – Montagem dos eixos lineares

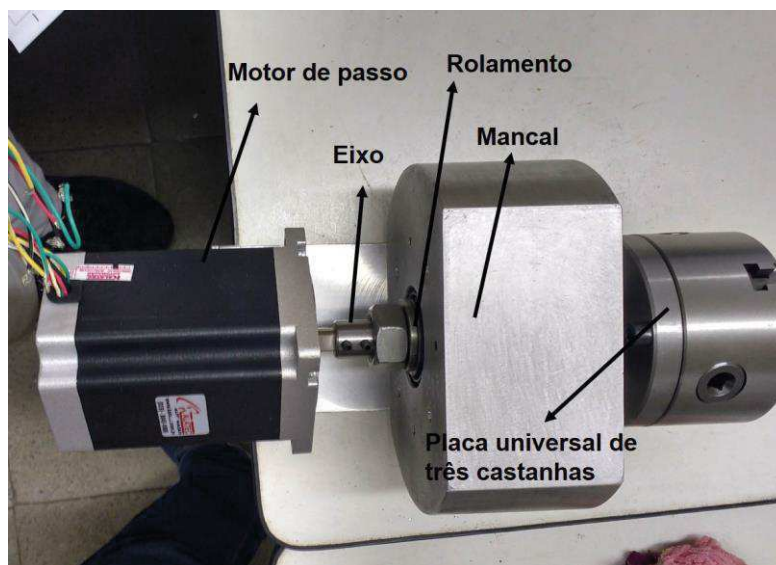


Fonte: O autor, 2018.

4.4.3 Montagem do 4º eixo

A montagem do eixo de rotação é realizada unindo-se os seguintes elementos: placa universal de três castanhas, eixo, rolamentos (um de cada lado do mancal), mancal, eixo e motor de passo. A figura 35 a seguir mostra o conjunto montado.

Figura 35 – Montagem do 4º eixo



Fonte: O autor, 2018.

Após a montagem, foi realizada uma verificação da excentricidade do eixo utilizando um relógio comparador.

4.5 ENSAIOS GEOMÉTRICOS

Nessa seção serão descritos os métodos aplicados nos ensaios geométricos e quais foram a instrumentação utilizada.

4.5.1 Instrumentação utilizada

Foi utilizado, nas verificações de retitude e perpendicularidade, um relógio comparador da marca Mitutoyo modelo 2046F certificado de calibração 9667/2018 com 1 μm de resolução e 1 mm de curso.

Com a intenção de verificar a perpendicularidade entre os eixos, utilizou-se um esquadro cilíndrico (figura 36). O mesmo pertence ao laboratório de metrologia dimensional do departamento de engenharia mecânica do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), campus Recife.

Figura 36 – Esquadro cilíndrico

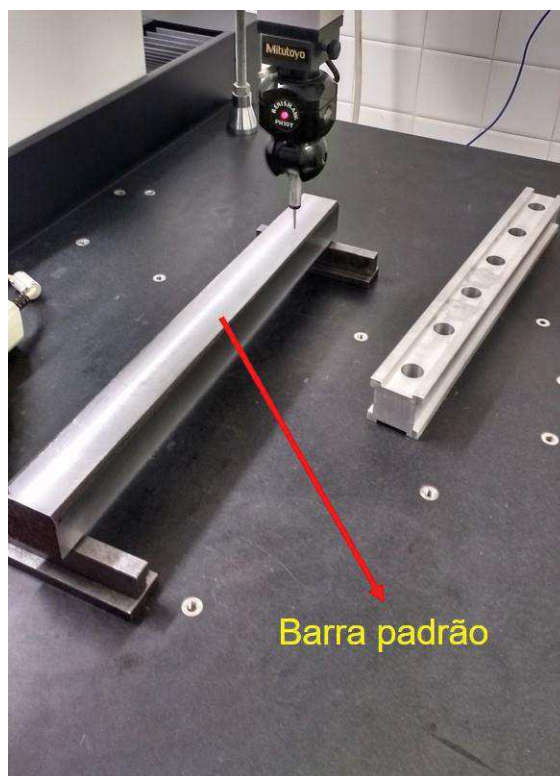


Fonte: O autor, 2018.

Atendendo à exigência da norma ISO 10791-2, a qual indica uma régua com planeza conhecida para avaliação dos parâmetros geométricos em centros de usinagem, foi utilizada uma barra padrão com seção retangular nas dimensões nominais de: 50 mm x 50mm x 500mm, em Aço ABNT 1045. Para fins de conhecimento da planeza e retitude desta barra padrão, as quatro faces da mesma foram usinadas na fresadora citada no item 4.3.1.1. A determinação destas grandezas em cada uma das faces da barra padrão (figura 37), foi realizada usando-se uma máquina de medir por coordenadas (MMC), marca Mitutoyo, modelo Beyond – Crysta C 574, certificado de calibração RBC 03206/2013. A face utilizada

para avaliação da *router* foi aquela que apresentou uma planeza média de 0,0054 mm e com incerteza expandida com grau de confiança de 95,45% igual a 0,0016 mm.

Figura 37 – Barra padrão



Fonte: O autor, 2018.

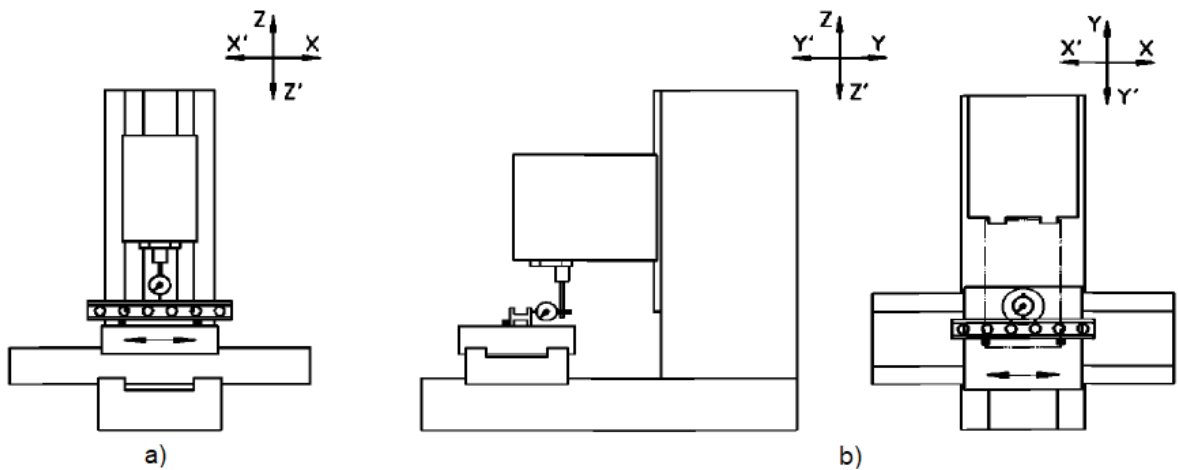
4.5.2 Método de verificação

A metodologia, aplicada aos ensaios, foi a descrita pela norma ISO 10791-2 (2003). Foram verificadas as retitudes dos movimentos de cada eixo (X, Y e Z) e as perpendicularidades entre os eixos (XY, XZ e YZ). As medições dos eixos X e Y foram tomadas em um comprimento de 200 mm com intervalos de 10 mm para cada medição, o eixo Z por ser menor serão tomadas as medições em um comprimento de 100 mm com intervalos de 5 mm para cada medição. Os pontos medidos serão plotados e ajustados por uma reta que a partir de sua equação serão calculadas as retitudes e perpendicularidades. As seções a seguir mostram os procedimentos experimentais utilizados para medição da retitude e da perpendicularidade.

4.5.2.1 Retitude dos movimentos lineares

A verificação da retitude do movimento do eixo X é realizada como mostra a figura 38. Utiliza-se como instrumentação para esse experimento a barra padrão (posicionada sobre a mesa) e o relógio comparador (montado no eixo árvore). Como recomendação, a norma pede que a linha de medição passe o mais próximo possível do centro da mesa. Na figura 39 é mostrado como foram medidos os pontos no eixo X na posição *b*.

Figura 38 – Verificação da retitude do movimento do eixo X: a) no plano vertical ZX e b) no plano horizontal XY



Fonte: ISO 10791-2, 2003.

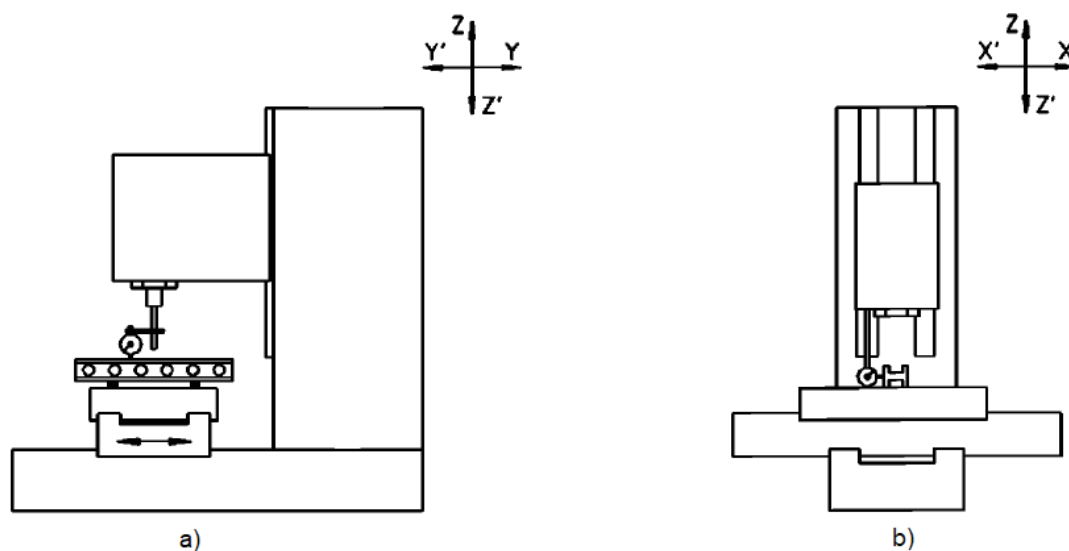
Figura 39 – Medição na barra padrão dos pontos no movimento do eixo X posição b



Fonte: O autor, 2018.

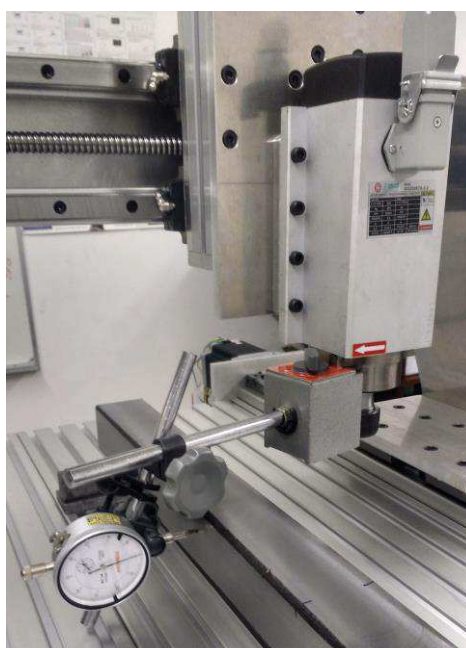
A verificação da retitude do movimento do eixo Y é realizada como mostra a figura 40. Este procedimento experimental é semelhante ao descrito para o eixo X. Na figura 41 é mostrado como foi medido os pontos no eixo Y na posição *b*.

Figura 40 – Verificação da retitude do movimento do eixo Y: a) no plano vertical YZ e b) no plano horizontal XY.



Fonte: ISO 10791-2, 2003.

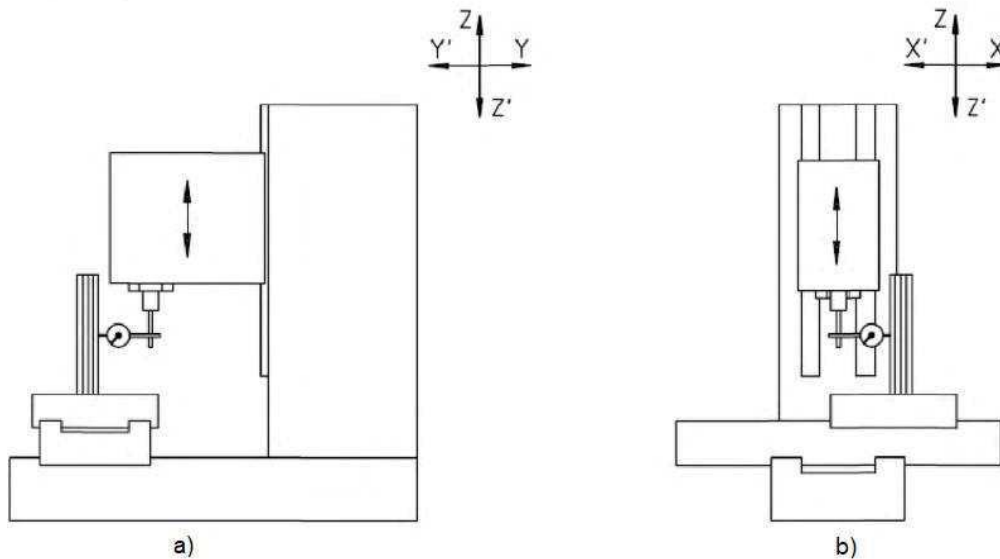
Figura 41 – Medição na barra padrão dos pontos no movimento do eixo Y posição b



Fonte: O autor, 2018.

A verificação da retitude do movimento do eixo Z é realizada como mostra a figura 42. Utiliza-se como instrumentação nesse experimento o esquadro (posicionado o mais próximo possível do centro da mesa) e o relógio comparador (montado no eixo árvore). Na figura 43 mostra-se como foi medido

Figura 42 – Verificação da retitude do movimento do eixo Z: a) no plano vertical YZ paralelo ao eixo Y e b) no plano vertical ZX paralelo ao eixo X.



Fonte: ISO 10791-2, 2003.

Figura 43 – Medição no esquadro dos pontos no movimento do eixo Z posição *a*



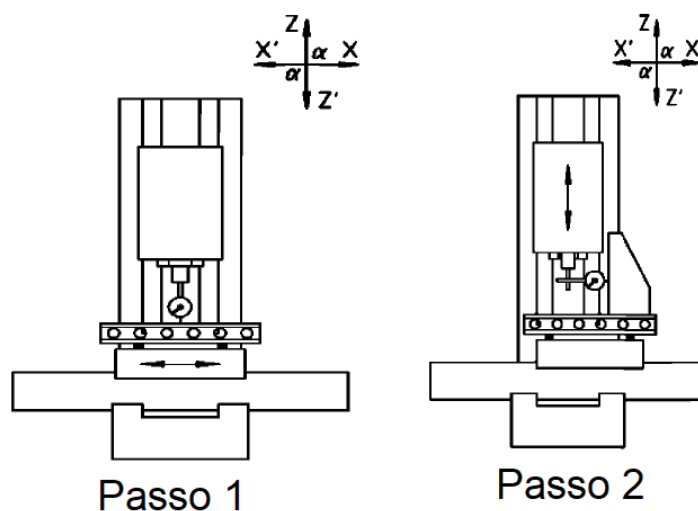
Fonte: O autor, 2018.

Os dados medidos no experimento de retitude são: vinte pontos para cada eixo X, Y e Z com 10 mm de espaçamento para X e Y e 5 mm de espaçamento para o eixo Z. Com os pontos medidos, é feita a aproximação desse por uma reta utilizando o método dos mínimos quadrados. Posteriormente, são medidas as distâncias de cada ponto a reta. A soma das distâncias perpendiculares à reta do maior ponto acima com a do maior ponto baixo da reta é a retitude procurada.

4.5.2.2 Perpendicularidade entre movimentos lineares

A verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos Z e X é realizada conforme esquema mostrado na figura 44. Utiliza-se, como instrumentação, nesse experimento a barra padrão, o esquadro e o relógio comparador. O ensaio é realizado em dois passos: no primeiro passo, a barra padrão deve ser posicionada paralela ao eixo X e realizada a verificação nessa direção. No segundo passo, o eixo Z deve então ser verificado por meio de um esquadro posicionado sobre a barra padrão.

Figura 44 – Verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos Z e X



Fonte: ISO 10791-2, 2003.

O valor do ângulo α , sendo menor, igual ou maior que 90° , deve ser anotado para informação e possíveis correções. O processo de medição dos pontos para cálculo da perpendicularidade ZX é mostrado na figura 45, a seguir.

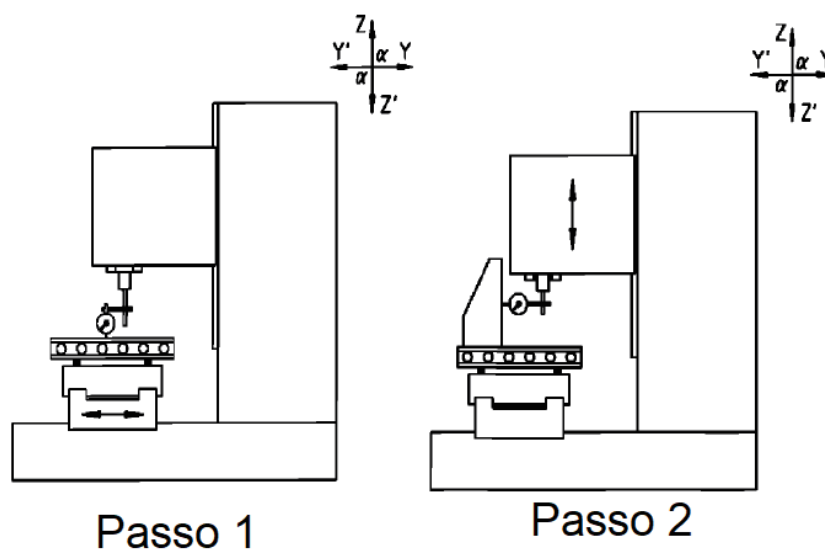
Figura 45 – Medição dos pontos no plano ZX para cálculo da perpendicularidade



Fonte: O autor, 2018.

A verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos Z e Y é realizada como mostra a figura 46, e o procedimento experimental é semelhante ao descrito para a medição de perpendicularidade entre os eixos Z e X descrito anteriormente.

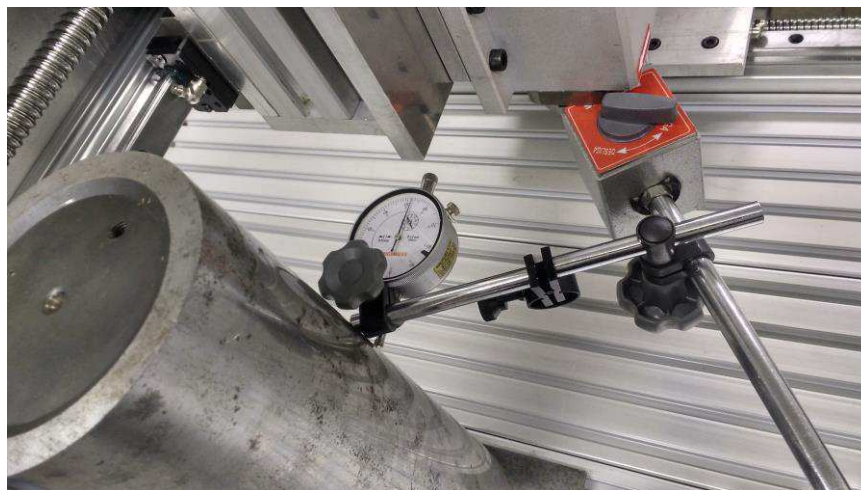
Figura 46 – Verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos Z e Y



Fonte: ISO 10791-2, 2003.

O processo de medição dos pontos para cálculo da perpendicularidade ZY é mostrado na figura 47, a seguir.

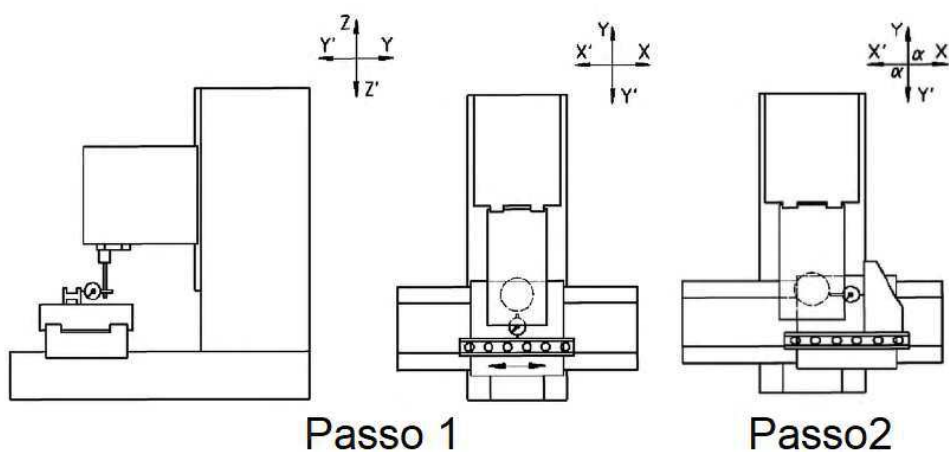
Figura 47 – Medição dos pontos no plano ZY para cálculo da perpendicularidade



Fonte: O autor, 2018.

A verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos X e Y é realizada como mostra a figura 48. Utiliza-se, como instrumentação, nesse experimento a barra padrão, o esquadro e o relógio comparador. O ensaio é realizado em dois passos: no primeiro passo a barra padrão deve ser posicionada paralela ao eixo X (ou Y) e realizada a verificação nessa direção. No segundo passo, o eixo Y (ou X) deve então ser verificado com o esquadro posicionado sobre a mesa com um lado contra a barra padrão, ao longo de um eixo por meio de um esquadro posicionado sobre a barra padrão.

Figura 48 – Verificação da perpendicularidade entre os movimentos dos eixos X e Y



Fonte: ISO 10791-2, 2003.

O processo de medição dos pontos para cálculo da perpendicularidade XY é mostrado na figura 49, a seguir.

Figura 49 – Medição dos pontos no plano ZY para cálculo da perpendicularidade



Fonte: O autor, 2018.

Os dados medidos no experimento de perpendicularidade são: vinte pontos espaçados de 10 mm cada para o eixo X e Y e 20 pontos espaçados de 5 mm cada para o eixo Z. Em seguida, é feita a aproximação dos pontos de cada eixo por uma reta utilizando o método dos mínimos quadrados e medido os ângulos entre os eixos de interesse (dois a dois). Cria-se então uma reta com essa angulação em um sistema cartesiano e utilizando o teorema de Pitágoras encontra-se qual distância entre dois planos paralelos para que a reta criada, com uma altura de 500mm, partindo de um plano toque o plano seguinte. Essa distância é a perpendicularidade entre os eixos.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Serão discutidos os resultados obtidos no projeto mecânico e nos ensaios geométricos realizados.

5.1 PROJETO MECÂNICO

A *router* foi projetada, fabricada, montada e ensaiada geometricamente e se encontra com os movimentos dos eixos em perfeito funcionamento aguardando apenas a automação e instrumentação da máquina que serão realizadas por um aluno em doutoramento do programa de pós-graduação em engenharia mecânica (PPGEM) da UFPE. A figura 50 abaixo mostra a máquina pronta como foi proposto para esse trabalho.

Figura 50 – Router

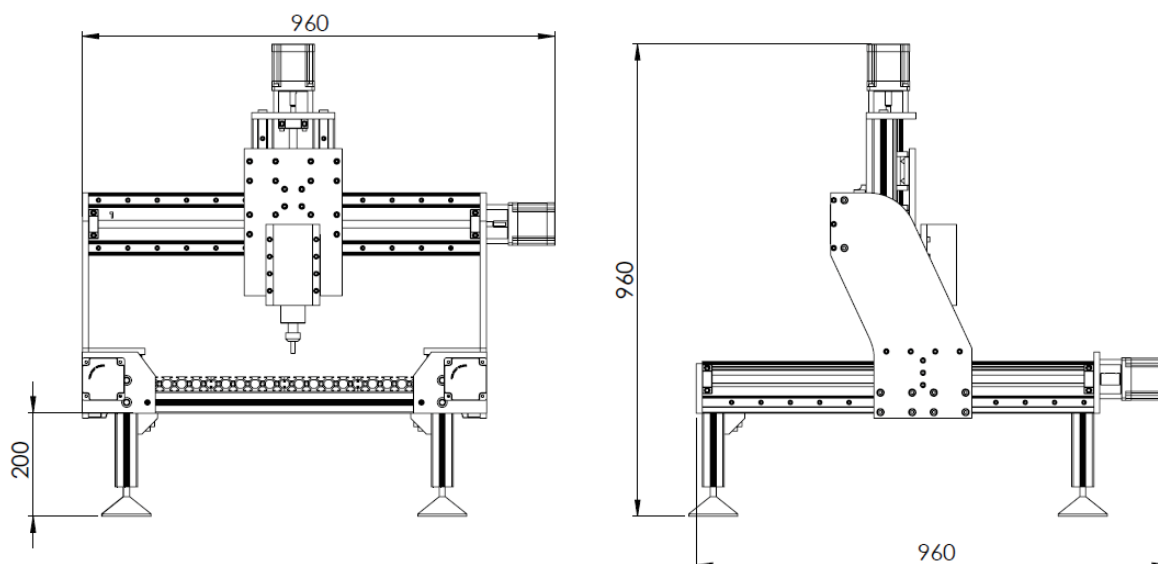


Fonte: O autor, 2018.

5.1.1 Dimensões da *router*

A máquina ficou compacta, como pode ser visto na figura 51 onde são mostrados as distâncias limites do comprimento, da largura e da altura.

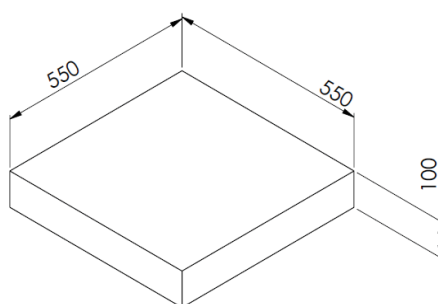
Figura 51 – Dimensões da máquina em milímetros



Fonte: O autor, 2018.

Além de compacta, a *router* ficou leve, com aproximadamente 70 kg, conforme planejado na fase de projeto. Seu volume de trabalho é 550 mm x 550 mm x 100 mm (X x Y x Z) e está representado esquematicamente na figura 52 (dimensões em milímetros). Para usinagem com o quarto eixo, pode-se utilizar peças de até 80 mm de diâmetros e de até 400 mm de comprimento.

Figura 52 – Volume de trabalho



Fonte: O autor, 2018.

5.1.2 Dimensionamento dos acionamentos

Com o cálculos das forças e potências de corte descritos na metodologia foram dimensionados os motores. O *spindle* foi selecionado com 2,2 kW de potência nominal dando-se uma certa folga com relação ao ponto crítico calculado (potência de corte de 1,5 kW) para que, com isso, o sistema trabalhe um pouco abaixo do seu limite, garantindo um maior tempo de vida para o equipamento. Já o motor de passo é dimensionado pelo seu torque, por isso usou-se a expressão de potência para se chegar ao torque necessário para o avanço dos eixos. O motor de passo escolhido possui 9 N.m de torque estático e torque dinâmico decrescendo com o aumento da rotação. Porém, seu mínimo ocorre em 4 N.m. Sendo assim, não se terá problemas na transmissão do movimento de avanço durante a usinagem, visto que o torque máximo calculado foi 2 N.m.

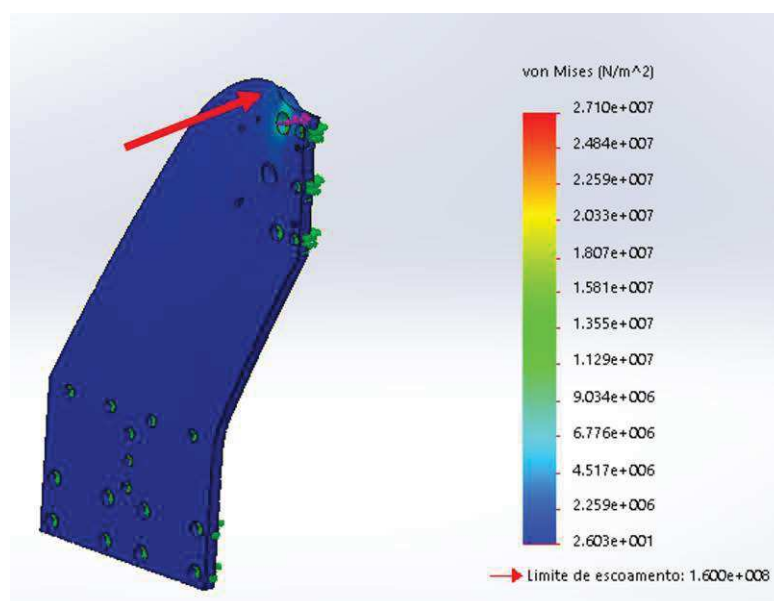
5.1.3 Análise estrutural

A análise de resistência dos componentes da máquina foi realizada tendo como ponto de partida o valor de força de corte determinada (1,2 kN). As simulações realizadas são apresentadas a seguir com suas devidas discussões. Para essas análises utilizou-se apenas as partes mais críticas, em termos estruturais, do equipamento: pórtico e base eixo X.

5.1.3.1 Simulação do Pórtico

As análises das tensões levam às informações que constam na figura 53 a seguir (valores em N/m^2). Utilizou-se metade da força de corte (seta vermelha) nesta análise, visto que existe simetria entre os pórticos. Os pontos de fixação para simulação da estrutura foram os furos de fixação da chapa.

Figura 53 – Tensões causadas pela aplicação da carga

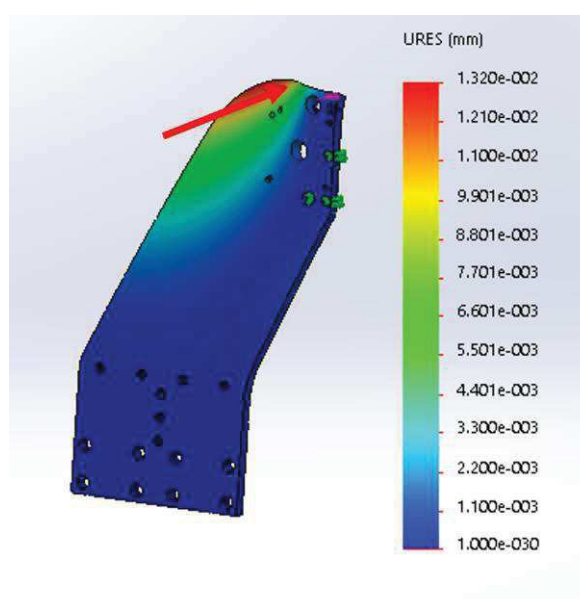


Fonte: O autor, 2018.

Observa-se que o nível de tensão máxima alcançado pela chapa não ultrapassou o limite de escoamento do alumínio utilizado (160 MPa) chegando a apenas 27 MPa na condição proposta. Com esse resultado, conclui-se que não haverá deformação plástica na estrutura do pórtico.

Em termos de deslocamentos chegou-se aos resultados mostrados na figura 54 (valores em mm).

Figura 54 – Deslocamentos causados pela aplicação da carga

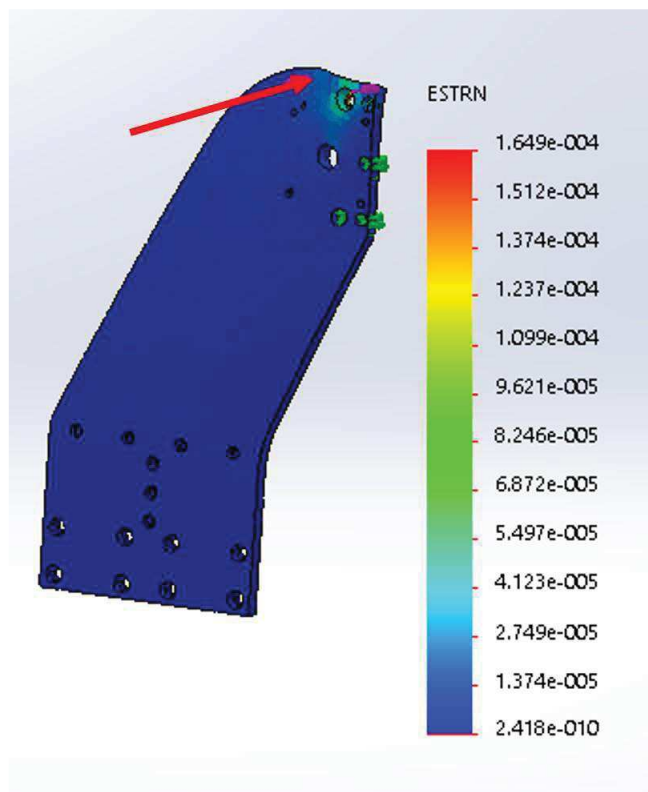


Fonte: O autor, 2018.

Pode ser constatado que o deslocamento máximo na condição mais crítica do projeto, bem acima da condição normal, ficou em um nível baixo, apenas 0,013 mm.

As deformações são apresentadas na figura 55 a seguir (valores adimensionais).

Figura 55 – Deformações causadas pela aplicação da carga



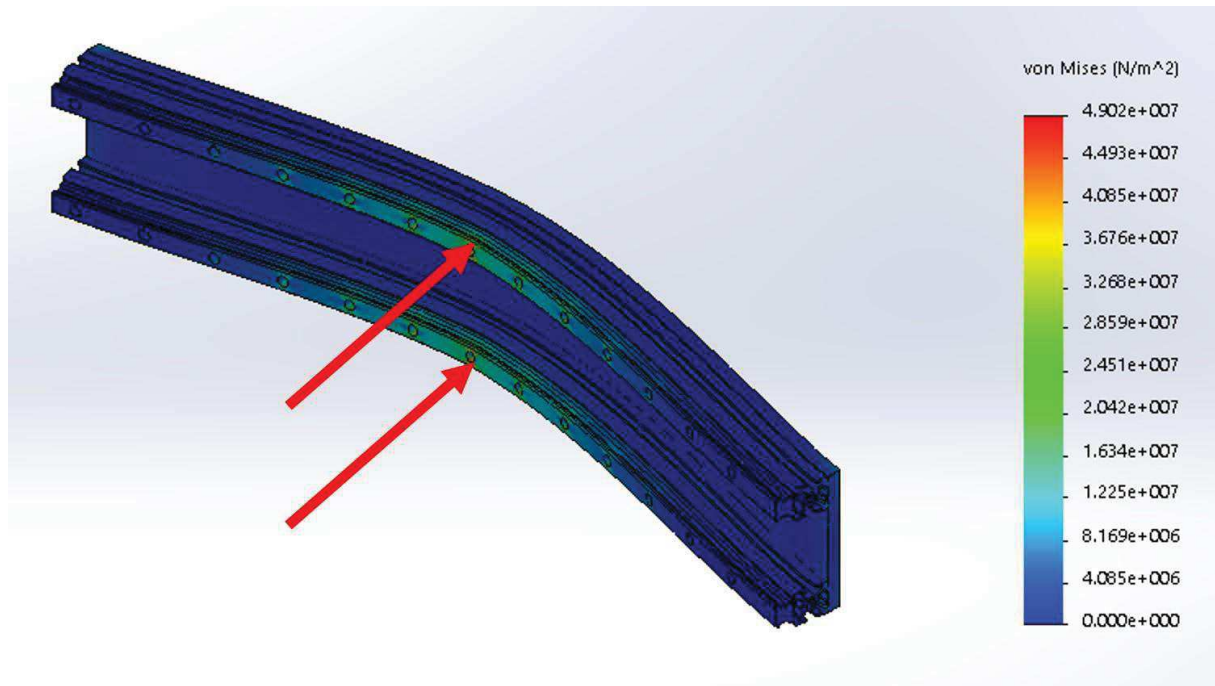
Fonte: O autor, 2018.

Como já era esperado, as deformações também ficaram em níveis aceitáveis.

5.1.3.2 Simulação da base do eixo X

Outra parte estrutural de grande importância no projeto do equipamento é o perfil utilizado como a base do eixo X. As análises das tensões resultou na figura 56 a seguir. Utilizou-se uma carga, de valor igual a força de corte, centrada no conjunto agindo sobre os trilhos simetricamente.

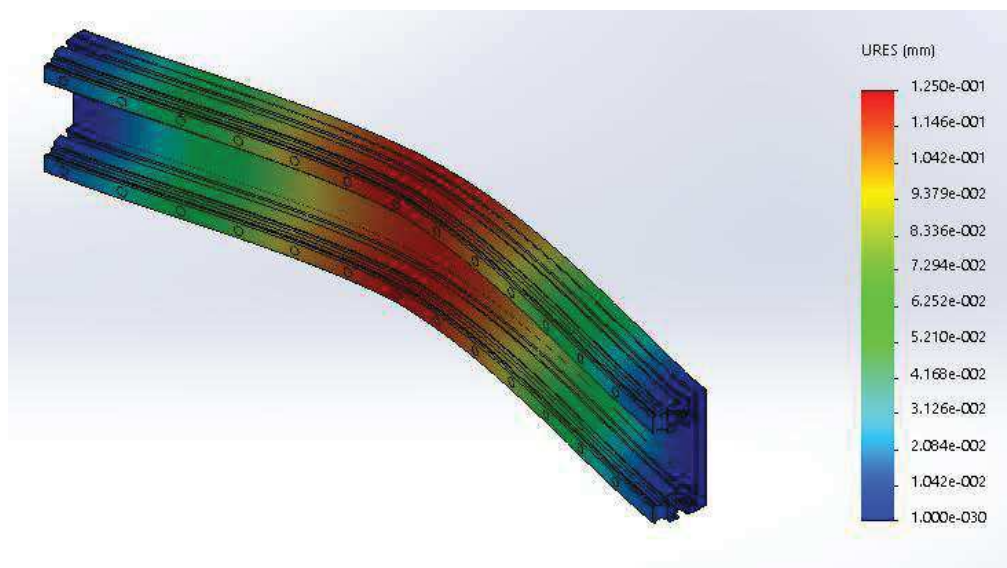
Figura 56– Tensões causadas pela aplicação da carga na base do eixo X



Fonte: O autor, 2018.

A tensão máxima nessa estrutura foi de 49 MPa, valor este que está bem abaixo dos limites de escoamento do alumínio (perfil e chapa) e do aço (trilho). Os deslocamentos estão apresentados na figura 57 a seguir (valores em mm).

Figura 57 – Deslocamentos causados pela aplicação da carga na base do eixo X

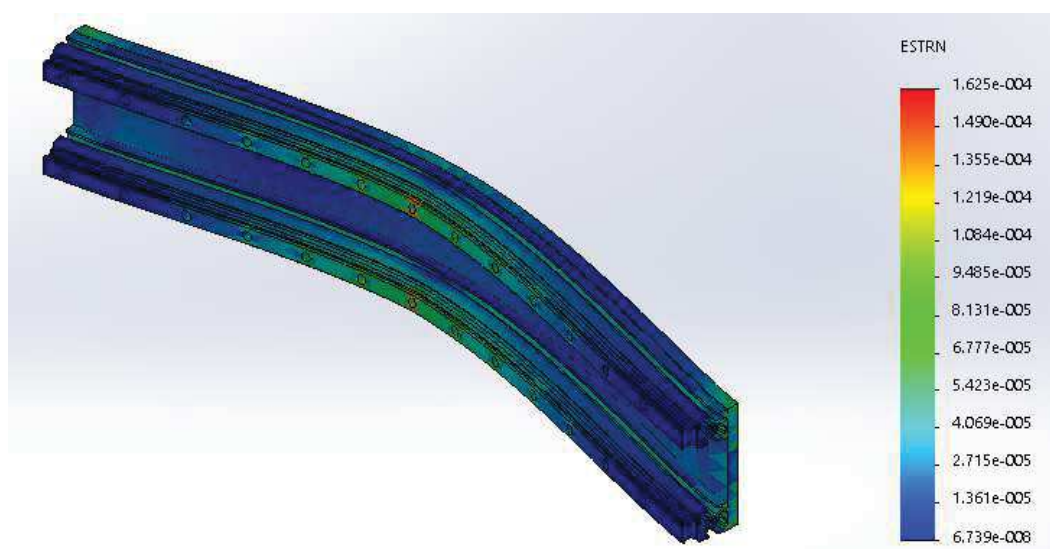


Fonte: O autor, 2018.

Nesse caso, os deslocamentos já apresentaram um valor razoável, mas ainda é baixo, visto que a situação analisada é para um processo crítico (longe do real). Vale lembrar que essas deformações adicionarão erros geométricos nas peças fabricadas pela máquina e por isso deve-se dimensionar o sistema para que as deformações sejam as mínimas (o caso em questão).

As deformações são apresentadas na figura 58 a seguir (valores adimensionais).

Figura 58 – Deformações causadas pela aplicação da carga na base do eixo X



Fonte: O autor, 2018.

Como esperado, visto as duas análises anteriores, as deformações são mínimas no conjunto testado chegando ao valor máximo de $1,625 \times 10^{-4}$.

5.2 PROCESSAMENTO DAS MEDIÇÕES

Os pontos medidos no movimento linear dos eixos X, Y e Z nas posições *a* e *b* de acordo com a norma 10791-2 (2003) estão apresentados nas tabelas 2 e 3 a seguir (valores em milímetros).

Tabela 2 – Médias dos pontos medidos nos eixos X e Y

Ponto de medição	X – a	X – b	Y – a	Y – b
0	0,003	-0,001	0,003	-0,008
10	0,014	0,001	0,008	-0,002
20	0,023	0,003	0,019	0,010
30	0,030	0,003	0,022	0,030
40	0,037	0,001	0,025	0,042
50	0,045	0,006	0,028	0,055
60	0,046	0,006	0,033	0,068
70	0,046	0,006	0,038	0,078
80	0,045	0,007	0,039	0,100
90	0,046	0,015	0,042	0,113
100	0,048	0,017	0,050	0,126
110	0,049	0,018	0,054	0,143
120	0,052	0,017	0,055	0,165
130	0,054	0,016	0,057	0,175
140	0,056	0,016	0,058	0,190
150	0,055	0,016	0,060	0,210
160	0,060	0,014	0,067	0,225
170	0,054	0,009	0,070	0,240
180	0,048	0,007	0,071	0,260
190	0,049	0,005	0,071	0,290
200	0,047	0,005	0,073	0,310

Fonte: O autor, 2018.

Tabela 3 – Pontos medidos no eixo Z

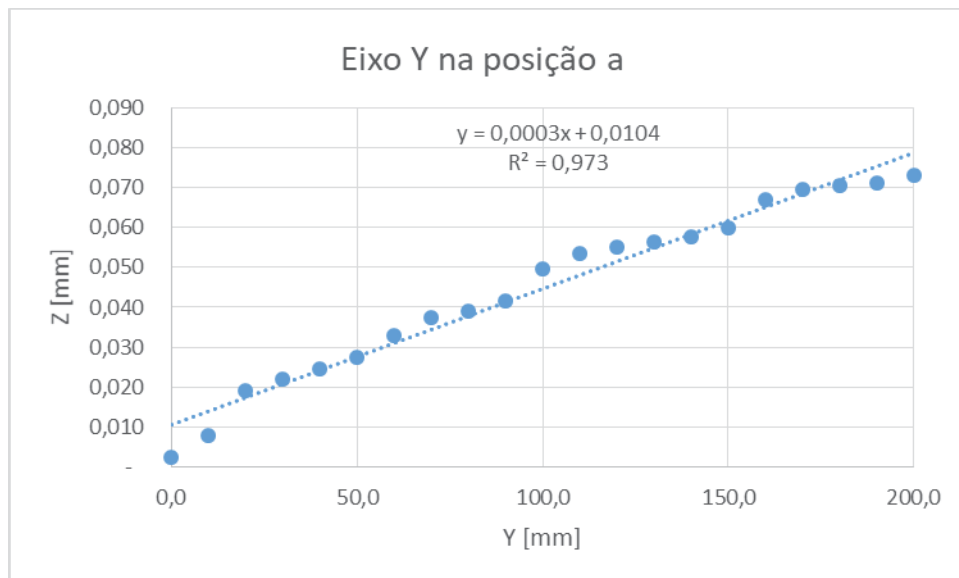
Ponto de medição	Z – a	Z – b
0	0,000	0,000
5	0,000	0,002
10	0,002	0,002
15	0,002	0,010
20	0,003	0,005
25	0,005	0,005

30	0,005	0,000
35	0,006	0,010
40	0,006	0,005
45	0,008	0,005
50	0,010	0,010
55	0,012	0,005
60	0,013	0,005
65	0,015	0,010
70	0,017	0,005
75	0,020	0,000
80	0,023	0,000
85	0,023	0,005
90	0,025	0,000
95	0,028	0,010
100	0,030	0,015

Fonte: O autor, 2018.

Observa-se nas tabelas que, nos casos onde houveram aumento significativo dos valores medidos, esse aumento tem uma tendência linear, como pode ser visto na figura 59 a seguir que usa o eixo Y na posição *a* como exemplo. Esse efeito não influencia nas medições de retitude, porém influenciará bastante os resultados de perpendicularidade.

Figura 59 – Variação da coordenada Z ao longo do eixo Y



Fonte: O autor, 2018.

5.2.1 Retitude dos movimentos lineares

Os valores das retitudes calculados e suas respectivas incertezas são apresentados na tabela 4 abaixo.

Tabela 4 – Valores de retitude dos eixos nas posições *a* e *b* em milímetros

Eixo	Retitude (mm)	
	a	b
X	$0,027 \pm 0,007$	$0,031 \pm 0,009$
Y	$0,021 \pm 0,004$	$0,029 \pm 0,005$
Z	$0,015 \pm 0,003$	$0,019 \pm 0,003$

Fonte: O autor, 2018.

A norma indica que para o comprimento medido, o valor da tolerância para retitude seja de 0,01mm, ficando os valores da tabela fora do descrito. Como citado na metodologia, a norma adotada é utilizada apenas como guia dos procedimentos, até por que ela é proposta para outra classe de máquinas (centros de usinagem) com processo de fabricação com capacidades maiores que os utilizados nesse trabalho, porém serve como referência de valores a se atingir. Os processos de fabricação, montagem e ensaios geométricos da *router* possuem limitações técnicas das máquinas e das instrumentações utilizadas. Sendo assim, os resultados apresentados estão de acordo com o esperado para o equipamento e atenderá bem a demanda dos tipos de peças que serão fabricadas do ponto de vista da retitude dos movimentos dos eixos X, Y e Z.

5.2.2 Perpendicularidade entre os movimentos lineares

Os valores das perpendicularidades calculadas para um comprimento de 500 mm, como é sugerido pela norma, e suas respectivas incertezas são apresentados na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Perpendicularidade entre os eixos

Eixos	Perpendicularidade (mm)
XY	$0,180 \pm 0,062$
XZ	$0,270 \pm 0,076$
YZ	$0,260 \pm 0,084$

Fonte: O autor, 2018.

O valores de perpendicularidades apresentados para os eixos XY, XZ e YZ estão de acordo com os interesses propostos para o equipamento (mas ainda fora do especificado pela norma que é 0,020 mm). Foi feita uma análise das possíveis fontes de erros que resultaram esses valores e se sabia que existiam algumas limitações, a citar aqui: processos de fabricação dos compoentes de forma manuais, as máquinas ferramentas utilizadas que não garantem tolerâncias na ordem de grandeza do especificado pela norma e da habilidade do operador em fabricar e montar os componentes. Mesmo com esses resultados, não há com o que se preocupar no tocante à funcionalidade do equipamento, pois com os valores de perpendicularidades mencionados, a *router*, ainda pode ser utilizado para produção de peças em vários processos, como por exemplo, no meio artesanal, onde as tolerâncias dimensionais são menos estreitas. Além disso, para uma análise metrológica da máquina mais aprofundada é necessário que ela esteja em operação para se avaliar em uma MMC as peças fabricadas, o que certamente será realizado em trabalhos futuros.

5.3 ANÁLISE DOS CUSTOS DO EQUIPAMENTO

O custo para fabricação da *router*, como descrito neste trabalho, mais os custos das peças de automação e do sistema elétrico da máquina somam R\$ 21.500,00. Esse valor pode ser considerado baixo em comparação com valores comerciais para a aquisição de um equipamento com as mesmas características. Vale ressaltar ainda, que esse valor pode ser reduzido em uma segunda máquina, devido ao fato desse equipamento ser um protótipo.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A *router* foi projetada, fabricada, montada e verificada geometricamente como proposto nos objetivos do trabalho e está pronta para adição do controle CNC.

As simulações estruturais do pórtico e da base para o eixo X mostraram que a *router* não sofrerá deformações excessivas em condições operacionais. Nos outros eixos não foram feitas análises estruturais, visto que o pórtico e a base do eixo X eram considerados os pontos críticos do ponto de vista de carregamento.

Nos ensaios geométricos, as retitudes dos movimentos dos eixos X, Y e Z apresentaram bons resultados e muito próximos ao descrito pela norma utilizada. Já as perpendicularidades entre os movimentos dos eixos estão fora do padrão de acordo com a norma. Porém, não impossibilita a utilização do equipamento em vários setores de produção de peças.

A máquina está pronta para atender a alguns setores da indústria e aos meios artesanal e educacional, as tolerâncias das peças usinadas não são tão estreitas como na mecânica em geral.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir encontra-se uma lista de possíveis trabalhos a serem desenvolvidos utilizando como partida ou ferramenta de análise a máquina produzida nesse trabalho. Algumas dessas sugestões já são objetivos de um trabalho de doutorado em desenvolvimento por um aluno do PPGEM da UFPE. Sugestões para trabalhos futuros:

- Automação da *router* com quatro eixos em plataformas abertas, fechadas ou própria;
- Implementação de uma sistemática para monitoramento dos parâmetros que afetam a usinagem (força de corte, vibração, temperatura e etc);
- Análise dos erros geométricos das peças fabricadas pelo equipamento;
- Estudo do impacto, na produção, da implementação desse equipamento no campo do produtor artesanal.

REFERÊNCIAS

- ABIMAQ. **A história das Máquinas: ABIMAQ 70 anos.** São Paulo: Magma, 2006.
- ALBERT, A. **Understandig CNC Router.** FPinnovation, 2010.
- ANDRADE, L. F. S. DE. **Uma Proposta de Metodologia de Projeto de Interfaces na Fase de Projeto Conceitual.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- ASIMOW, M. **Introdução ao Projeto de Engenharia.** São Paulo: Mestre Jou, 1968.
- BERTASSO, B. F. **Relatório de Acompanhamento Setorial: Máquinas Ferramentas.** Brasília: ABDi, 2012.
- CARPES JR., W. P. **Introdução ao Projeto de Produtos.** Porto Alegre: Bookman, 2014.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN. **DIN 8580: Manufacturing Process - Terms and Definitions.** Germany, 2003.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 9ª ed. São Paulo: Artliber, 2014.
- FACHIM, A. **Projeto de Fresadora CNC com Plataforma Livre Arduino.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Blucher, 1977.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE.** 6ª ed. São Paulo: Érica, 2013. f
- ROMEIRO FILHO, E. **Projeto de Produto.** 8ª ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- GOMES, M. THOMAZ DE O.; AYRES, M. L. A.; SILVA FILHO, G. A. F. **A Indústria de Máquinas Ferramenta.** 1996. Disponível em https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3341/1/BS%2002%20A%20Ind%C3%BAria%20de%20M%C3%A1quinas-Ferramenta_P.pdf. Acesso em: 16 mai. 2018.
- ISO. **ISO10791-2: Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis),** 2003.
- KALATEC. **Kalatec Automação.** Disponível em: <http://www.kalatec.com.br/>. Acesso em: 15 jun. 2018.
- LIU, C.; XU, X. Cyber-physical Machine Tool - The Era of Machine Tool 4.0. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 70–75, 2017.

MACHLINE, Claude; RATTNER, Henrique; UDRY, Olivier. **Máquinas-ferramenta de controle numérico**: efeitos administrativos de sua introdução na indústria nacional. Rev. adm. empres., São Paulo, v. 22, n. 2, p. 05-21, Junho 1982. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75901982000200001&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 14 Jul. 2018.

METALTRON. Chapas de alumínio. Disponível em: <http://www.metaltrom.com.br/>. Acessado em 03 mar. 2018.

MITSUBISHI. **Força de Corte**. Disponível em: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/formula4.html. Acesso em: 10 abr. 2018.

OBR. **Perfis de alumínio**. Disponível em <http://www.obr.com.br/perfis.html>. Acessado em 20 jan. 2018

OKAFOR, A. C.; ERTEKIN, Y. M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 8, p. 1199–1213, 2000.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos, Métodos e Aplicações**. 6ª ed. São Paulo: Blucher, 2005.

PAREDES, M. E. G. **Desenvolvimento de uma Fresadora CNC Aderente à Norma STEP-NC Baseado no Controlador de Máquina Avançado**. Distrito Federal: Universidade de Brasília, 2013.

PETKO, M. et al. CNC system of the 5-axis hybrid robot for milling. **Mechatronics**, v. 37, p. 89–99, 2015.

RAMESH, R.; MANNAN, M. A.; POO, A. N. Error Compensation in Machine Tools - a review Part I: Geometric, Cutting Force induced and fixture depend errors. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, p. 1235–1256, 2000.

SHNEOR, Y. Reconfigurable machine tool: CNC machine for milling, grinding and polishing. **Procedia Manufacturing**, v. 21, n. 2017, p. 221–227, 2018. **Shoda Company**. Disponível em: <http://www.shoda.com/en/company/president/>. Acesso em: 28 fev. 2018.

STOETERAU, R. L. **Introdução ao Projeto de Máquinas Ferramentas Modernas**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SZIPKA, K.; LASPAS, T.; ARCHENTI, A. Measurement and analysis of machine tool errors under quasi-static and loaded conditions. **Precision Engineering**, v. 51, p. 59–67, 2018. VAZ, L. E. **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VDI. **VDI - 2221**: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.

VERMULM, R. **Estratégias empresariais nos anos 80: o setor de máquinas ferramenta.** Disponível em http://www.fundacaoofia.com.br/pgtusp/publicacoes/arquivos_cyted/Cad30.PDF. Acessado em 12 fev. 2018

WECK, M. **Handbook of Machine Tools: Metrological Analysis and Performance Tests.** Germany: Wiley Heyden, 1984.

XU, X. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 5–8, p. 1893–1900, 2017.

YANG, X.; CHENG, K. Investigation on the Industrial Design Approach for CNC Machine Tools and Its Implementation and Application Perspectives. **Procedia Manufacturing**, v. 11, n. June, p. 1454–1462, 2017.