



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DAVI DA FROTA LEITE LIMA

**IMPLEMENTAÇÃO DE COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO EM UMA
MESA DE COORDENADAS**

**FORTALEZA
2018**

DAVI DA FROTA LEITE LIMA

IMPLEMENTAÇÃO DE COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO EM UMA
MESA DE COORDENADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D11i da Frota Leite Lima, Davi.
Implementação de Comando Numérico Computadorizado em uma Mesa de Coordenadas / Davi da Frota Leite Lima. – 2018.
57 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Francisco Elicivaldo Lima.

1. Usinagem. 2. Comando Numérico Computadorizado. 3. Motor de passo. 4. Mach 3. 5. Fusion 360. I. Título.

CDD 620.1

DAVI DA FROTA LEITE LIMA

IMPLEMENTAÇÃO DE COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO EM UMA
MESA DE COORDENADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pierre Maurice Christophe Lamary
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Soares Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Primeiramente a Jesus Misericordioso, à Nossa Senhora, a São José e ao meu Anjo da Guarda.

Aos meus pais, José Mauricio Junior e Rebecca Lima, aos meus irmãos, José Mauricio Neto e Maria Lima, e à Eliane Vilarinho.

Ao Padre Edilson e a toda a minha família espiritual dos Servos da Divina Misericórdia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, à Nossa Senhora, a São José e ao meu Anjo da Guarda por tudo que tem sido providenciado na minha vida pessoal, espiritual e acadêmica.

Agradeço aos meus pais e irmãos por todos esses anos de amor e convívio que foram fundamentais na minha formação como pessoa.

Agradeço aos meus avós paternos, José Maurício e Maria de Lourdes, aos meus avós maternos, José Osvaldo e Cláudia Maria, aos meus padrinhos de batismo, Odacir Barreto e Dulce Maria, à Maria Marques e à toda a minha família de sangue e espiritual por todo o carinho e apoio recebido.

Agradeço ao meu padrinho de crisma, Padre Edilson, por toda a sua intercessão e orientação espiritual sem a qual não teria sido possível crescer no conhecimento humano e de Deus.

Agradeço a todos os meus amigos que conheci antes e durante o tempo de faculdade por todos os momentos de alegre convívio.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima pela sua dedicação em orientar e instruir durante todo o período destinado à realização desse trabalho.

Agradeço aos meus companheiros de equipe Ásafe Teixeira, James Alves, Thiago Camelo e Thiago Casimiro, pela ajuda recebida no projeto e procedimentos realizados.

Agradeço ao técnico Sr. Bonfim do Núcleo de Manufatura Qualidade e Sustentabilidade que, por sua disponibilidade e boa vontade, foi crucial na parte de projeto e fabricação de alguns componentes desse trabalho.

Agradeço, finalmente, A Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Engenharia Mecânica e a todos os meus professores por terem me concedido os meios para estudar e obter conhecimento, os quais foram necessários para produzir esse trabalho.

“Pois o que é loucura de Deus é mais sábio do que os homens, e o que é fraqueza de Deus é mais forte do que os homens”

1Cor 1,25

RESUMO

A automatização por Comando Numérico Computadorizado de componentes mecânicos de máquinas-ferramentas é de interesse recorrente no mercado de usinagem de peças. Porém, por mais que se tenha uma noção geral do que seja necessário para esse intento, não se encontra com tanta clareza um projeto mostrando na prática o passo a passo das operações básicas para isso. O trabalho em questão teve o intuito de descrever, ao leitor interessado no assunto, o necessário para a transformação de uma mesa de coordenadas controlada por manivelas em uma mesa de coordenadas com controle CNC usando como interface o software comercial Mach3, expondo todo o planejamento e execução do que está sendo proposto desde a fase de projeto até a fase de configuração eletrônica dos motores de passo, além de explicitar todos os componentes mecânicos e eletrônicos fundamentais para o trabalho. Assim se dividiu a seção que fala sobre os materiais e procedimentos realizados em cinco partes para melhor entendimento do leitor, na qual a primeira fala sobre o acoplamento dos eixos rotores do motor de passo aos fusos da mesa de coordenadas, na segunda é explicado o planejamento e fabricação dos suportes que fixam os motores de passo a mesa, na terceira parte foi exposto os componentes eletrônicos utilizados, na penúltima parte é tratado sobre a configuração do Mach 3 e finalmente, na quinta e última parte, são mostrados todos os componentes mecatrônicos utilizados no trabalho. O resultado obtido foi uma mesa de coordenadas com os seus dois eixos automatizados com motores de passo, sendo agora completamente controlada por CNC.

Palavras-chave: Usinagem. Comando Numérico Computadorizado. Motor de passo. Mach 3. Fusion 360.

ABSTRACT

The automation of machine tool mechanical components using Computer Numerical Control is an often subject in the machining business. However, even if one have a general notion of the necessary for this attempt, it is not easy to find a project showing clearly the practical step-by-step of the basic operations for doing so. This work has the intent to present, to the interested reader in the theme, what is need to turn a machine tool worktable with hand crank control into a machine tool worktable controlled by CNC, employing as interface the commercial software Mach3, reporting the whole planning and execution of what is propose since the phase of project until the phase of stepping motor's electronic configuration, in addition to make explicit all the bare mechanical and electronic components to this work. Therefor the section that explains the materials and performed proceedings was splitted in five parts for better knowledge of the reader. In the first one is proposed the linkage of the stepping motors rotor to the worktable axis, in the second part is explained the planning and fabrication of the metallic supports that fix the stepping motors to the worktable, in the third one is exposed the electronic components required, in the penultimate part is described the Mach3 configuration and finally, in the fifth and last part, are shown the mechatronic components utilized for this specific case. The result achieved was a machine tool worktable with both axis automatized by stepping motors, been now completely commanded by CNC.

Keywords: Machining. Computer Numerical Control. Stepping motor. Mach 3. Fusion 360.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mesa de coordenadas MR-25	25
Figura 2 – Especificações da mesa de coordenadas MR-25	25
Figura 3 – Mecanismo de translação dos eixos da mesa de coordenadas	26
Figura 4 – Especificações gerais do motor de passo NEMA 23	27
Figura 5 – Tabela de seleção do motor de passo NEMA 23	28
Figura 6 – Informações técnicas do motor de passo NEMA 23 (escala em mm)	28
Figura 7 – Imagem do acoplamento flexível	29
Figura 8 – Vistas em perspectiva do modelo em três dimensões do projeto inicial do suporte metálico	31
Figura 9 – Dimensões do projeto inicial do suporte metálico (escala em mm)	31
Figura 10 – Faces de fixação do suporte à mesa de coordenadas	32
Figura 11 – Face de fixação do suporte ao motor de passo	32
Figura 12 – Regiões com possível grande concentração de tensão	33
Figura 13 – Propriedades do modelo do suporte metálico feito de Alumínio 1100-H14	34
Figura 14 – Representação das forças aplicadas no modelo do projeto inicial do suporte metálico	34
Figura 15 – Esquemática em cores das tensões de Von Mises no suporte feito de alumínio 1100-H14	35
Figura 16 – Esquemática em cores do coeficiente de segurança do limite de escoamento (cima) e do limite de resistência à tração (baixo) no suporte feito de alumínio 1100-H14	36
Figura 17 – Vistas em perspectiva do modelo em três dimensões do projeto modificado do suporte metálico	37
Figura 18 – Dimensões do projeto modificado do suporte metálico (escala em mm)	38

Figura 19 – Novas faces de fixação do suporte à mesa de coordenadas	38
Figura 20 – Nova face de fixação do suporte ao motor de passo	38
Figura 21 – Propriedades do modelo modificado do suporte feito de Alumínio 1100-H14	39
Figura 22 – Propriedades do modelo modificado do suporte metálico feito de aço AISI 1015	39
Figura 23 – Representação das forças aplicadas no modelo modificado do projeto do suporte metálico	40
Figura 24 – Esquemática em cores das tensões de Von Mises no suporte modificado feito de alumínio 1100-H14	40
Figura 25 – Esquemática em cores do coeficiente de segurança do limite de escoamento (cima) e do limite de resistência à tração (baixo) no suporte modificado feito de alumínio 1100-H14	41
Figura 26 – Esquemática em cores das tensões de Von Mises no suporte modificado feito de aço AISI 1015	42
Figura 27 – Esquemática em cores do coeficiente de segurança do limite de escoamento (cima) e do limite de resistência à tração (baixo) no suporte modificado feito de aço AISI 1015	42
Figura 28 – Vistas do modelo do suporte metálico 2	43
Figura 29 – Imagem da placa controladora STB4100	46
Figura 30 – Imagem do driver TB6600	47
Figura 31 – Micro passos do motor de passo controlado pelo driver	47
Figura 32 – Esquema eletrônico do circuito de comando dos motores de passo	48
Figura 33 – Fluxograma para configurar unidade padrão	49
Figura 34 – Configuração da unidade padrão	49
Figura 35 – Fluxograma para configurar os sinais de saída da placa controladora	49
Figura 36 – Configuração dos sinais de saída da placa controladora para o motor	50

Figura 37 – Configuração dos limites de trabalho da mesa de coordenadas	50
Figura 38 – Fluxograma para configurar a quantidade passos por milímetro	51
Figura 39 – Calibração dos eixos	51
Figura 40 – Configuração dos parâmetros dos motores de passo	52
Figura 41 – Mesa de coordenada automatizada com os motores de passo	52
Figura 42 – Vista superior da mesa de coordenada automatizada com os motores de passo	53
Figura 43 – Mesa de coordenada (esquerda) e sistema eletrônico utilizado (direita)	53
Figura 44 – Sistema integrado da mesa de coordenadas controlada por CNC	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NC	Numerical Control
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DAC	Desenho Assistido por Computador
CAD	Computer Aided Design
NMQS	Núcleo de Manufatura Qualidade e Sustentabilidade
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

°	Grau
∅	Diâmetro
”	polegada
in	polegada
mm	milímetro
cm	centímetro
m	metro
g	grama
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
N	newton
s	segundo
min	minuto
MPa	Megapascal
kHz	Quilo-hertz
V	volt
A	ampere

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Processos de fabricação por usinagem	18
2.1.1	<i>Torneamento</i>	19
2.1.2	<i>Furação</i>	20
2.1.3	<i>Fresamento</i>	20
2.2	Tecnologia CNC	21
2.3	Código G (G-Code)	22
2.4	Motores de passo	23
2.5	Software Mach	24
3	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	25
3.1	Definição do acoplamento do eixo da mesa de coordenadas com o eixo rotor do motor de passo	25
3.2	Projeto, fabricação e fixação do suporte metálico à mesa de coordenadas e ao motor de passo	29
3.2.1	<i>Projeto dos suportes metálicos com a ajuda do software Fusion 360</i>	29
3.2.1.1	<i>Projeto para o suporte 1</i>	30
3.2.1.2	<i>Projeto para o suporte 2 e escolha do material de fabricação dos mesmos</i>	43
3.2.2	<i>Fabricação e fixação do suporte metálico na mesa de coordenadas</i>	44
3.3	Definição da parte eletrônica	45
3.4	Configuração do software Mach3 para a mesa de coordenadas MR-25	48
3.5	Componentes mecatrônicos e de fixação utilizados e seus respectivos custos	54
4	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Manufatura é uma palavra que vem da união de duas palavras do latim, *manu* que significa mão e *factus* que significa fazer, ou seja, semanticamente quer dizer fazer à mão (DOYLE *et al.*, 1978; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009), porém com o passar do tempo e com o desenvolver dos processos industriais, passou-se a usar ferramentas sempre mais sofisticadas para a fabricação de artigos e mercadorias, assim como afirma Doyle *et al.* (1978, p. 11), “A fabricação foi sempre, e é atualmente, uma arte sempre em crescimento e em constante modificação. Pode-se esperar que processos do presente mudarão nos anos futuros.”. Hoje manufatura é entendida, segundo Machado *et al.* (2011, p. 16), “[...] como o processo de transformação de matérias-primas em produtos acabados [...]”. Temos que entender que os produtos acabados que o autor citado fala podem ser bens de consumo, que serão comercializados no setor terciário da economia (produtos discretos), ou também materiais semimanufaturados que servirão de matéria-prima para a fabricação de outros produtos (produtos contínuos). Além do fato da manufatura produzir produtos que produzirão outros produtos, como por exemplo, a fabricação de máquinas-ferramentas que produzirão peças diversas, como nos indica Kalpakjian e Schmid (2009).

A Manufatura possui diversos processos de fabricação, os quais podem ser divididos em dois grandes grupos. No primeiro estão os processos em que há remoção de cavaco, como os processos de usinagem em geral, e no segundo estão os que não há remoção de cavado, como a fundição, soldagem, conformação mecânica, dentre outros (MACHADO *et al.*, 2011).

Como já relatado, os processos de fabricação que existem atualmente passaram por uma série de progressos tecnológicos. Se formos fazer um histórico sobre como a manufatura de utensílios em geral eram feitos no decorrer da história poderíamos começar desde os anos anteriores à Cristo onde já se produziam utensílios e peças metálicas que envolviam em sua maioria forja por martelamento e fundição, por serem trabalhos mais simples de serem realizados manualmente. Com o passar dos séculos os processos de fabricação foram se desenvolvendo gradativamente até o século XVIII que foi quando se iniciou a Primeira Revolução Industrial (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Até este período, o material das peças usinadas na engenharia era em sua maioria a madeira. Já no final do século XVIII somou-se ao fato do surgimento de ligas de aço mais resistentes para as ferramentas de corte, a utilização da água e do vapor como fonte de energia o que alavancou a indústria metálico-mecânica. A partir deste período foi quando começou a

serem inventadas e aprimoradas as máquinas-ferramentas (MACHADO *et al.*, 2011). Segundo McGeough (1988 *apud* MACHADO *et al.*, 2011) a primeira grande inovação nessa área se deu em 1774 com a mandrilhadora desenvolvida por John Wilkinson para usinar cilindros de máquinas à vapor, sendo agora possível usinar pré-furos de cilindros para a fabricação de peças que com grau de tolerância melhor que existia na época, visto que antes não havia mandrilhadora para esse fim específico.

A confecção de peças metálicas adquiriu um novo espectro na indústria e no mercado econômico depois que o inventor Eli Whitney iniciou o conceito de peças intercambiáveis, por volta do ano 1800, o que fazia com que os elementos de uma máquina fossem fabricados com padrões estipulados, fazendo que a sua montagem pudesse ser feita sem muitos ajustes manuais (DOYLE *et al.*, 1978; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Isso sem dúvida contribui com o progresso industrial manufatureira, visto que o desenvolvimento continuou como nos mostra Machado *et al.* (2011, p. 15):

Em 1797, Henry Maudslay desenvolveu o primeiro torno com avanço automático, permitindo a produção de roscas com passo definido. Após a mandrilhadora e o torno surgiu a plainadora e, em 1860, a retificadora. A primeira fresadora universal, desenvolvida por J. R. Brown, surgiu 1862 e foi utilizada inicialmente para a produção de canais em brocas helicoidais. Outro desenvolvimento importante ocorreu em 1896, quando F. W. Fellows desenvolveu uma máquina capaz de produzir praticamente qualquer tipo de engrenagem.

No início do século XX começou a ser utilizado ferramentas feitas de aço rápido, que são aços de alta liga e baixo carbono. Em 1930 passou a ser também utilizadas ferramentas de carbonetos duros, como o carboneto de tungstênio, até se chegar a usar ferramentas cerâmicas o que possibilitou cortar metais mais resistentes e duráveis, com maiores velocidades de corte e melhores precisões nas dimensões dos produtos fabricados (DOYLE *et al.*, 1978; MACHADO *et al.*, 2011).

Pelo ano de 1940 houve avanços, mas agora na área da automatização das máquinas, quando se começou a utilizar nos Estados Unidos e Europa as máquinas automáticas por fita, também conhecida por máquinas controladas por Comando Numérico ou Numerical Control (NC) em inglês. Mais o verdadeiro avanço se deu depois da década de 60 quando houve um salto na tecnologia da informática com o desenvolvimento e a popularização do uso de softwares, os quais permitiram que as máquinas-ferramentas fossem controladas por programas de computadores, sendo agora Controladas por Comandos Numéricos Computadorizados (CNC), conforme Fitzpatrick (2013). É interessante ressaltar que o Comando Numérico Computadorizado veio tornar totalmente obsoleto a tecnologia das

máquinas controladas por fita, porém as máquinas-ferramentas por controle mecânico, ou seja, controladas manualmente, ainda são utilizadas em algumas situações.

Entende-se, então, que a manufatura é um setor muito amplo no mercado econômico. Os métodos de fabricação por usinagem, por sua vez, possuem um espaço importante na indústria onde é necessário produzir peças com perfis mais complexos, com uma alta tolerância dimensional e um bom acabamento.

Observando a importância crucial do controle de máquinas por meio da tecnologia CNC, foi proposto para este trabalho, estudar e expor esmiuçadamente ao leitor as etapas e os meios de transformar uma mesa de coordenadas com controle manual de uma máquina-ferramenta comum em uma mesa de coordenadas controlado pelo CNC usando o software comercial Mach 3, que por seu fácil manuseio e compatibilidade com vários sistemas operacionais o torna uma ótima interface para controle de motores de passo, tornando-o mais acessível para uma maior número de pessoas e para eventuais estudos universitários.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Processos de fabricação por usinagem

Dentre os processos de fabricação existentes para a manufatura de peças metálicas existem os processos por usinagem que segundo Trent (1985 *apud* MACHADO *et al.*, 2011) são os processos de fabricação mais populares do mundo.

Neles se utilizam uma matriz de metal em que, com uma ferramenta de corte, será retirado material dessa matriz até que ele fique com o formato e as dimensões desejadas, sendo o material em excesso que sai no processo chamado de cavaco (DOYLE *et al.*, 1978). Os processos de usinagem em si podem ser utilizados para a fabricação de peças, porém são comumente utilizados como meios de dar dimensões mais próximas das desejadas às peças fabricadas por outros processos de fabricação, como fundição ou forjamento. Por isso são muito utilizados em processos secundários e de acabamento, podendo dar aos produtos pequenos limites de tolerância dimensional, os quais não poderiam ser obtidos de outra forma (DOYLE *et al.*, 1978; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009). Visto que a ferramenta de corte precisa penetrar o material para retirar o cavaco faz-se necessário que esta possua uma dureza maior que a do material, além de possuir também certo grau de tenacidade para resistir aos choques (DOYLE *et al.*, 1978).

Por haver diversas variáveis presentes no processo de usinagem, como a avanço, velocidade e profundidade de corte, o material e a geometria da peça usinada e da ferramenta de corte, fluidos refrigerantes utilizados, dentre outros, Machado *et al.* (2011) diz que a usinagem é um processos complexo e simples ao mesmo tempo. Complexo no que diz respeito à dificuldade em descobrir as condições ideais do processo, e simples quando já descoberto condições favoráveis para o corte podendo-se usinar o material sem grandes problemas. Shaw (1984 *apud* MACHADO *et al.*, 2011) chega a afirmar que não se tem como prever o desempenho no corte dos metais, porém isso não é motivo para que se estude e entenda o processo da maneira mais perto do real possível, existindo até, como escreve Kalpakjian e Schmid (2009), estudos feitos por simulações computacionais para se entender melhor essa complexa interação de diferentes variáveis.

Em muitos processos de usinagem existe o movimento de rotação há altas velocidades de corte seja da peça, como no caso do torneamento, ou da ferramenta de corte, como no fresamento. No caso do processo de brochamento não há rotação, porém o que

sempre existe nos processos de usinagem é um movimento relativo entre a peça e a aresta cortante da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2011).

Dos processos de usinagem existentes pode-se dizer que três se destacam no mercado da manufatura de peças metálicas e eles são o torneamento, a furação e o fresamento.

2.1.1 Torneamento

O processo de torneamento é utilizado para se fabricar peças com perfis radiais ao seu eixo, pois nesse processo será fixado o material a ser usinado impedindo os movimentos de translação, de maneira que se permita apenas que seja rodado em torno do eixo, enquanto se avança a ferramenta a uma determinada profundidade de corte que causará a retirada do cavaco do material. Assim, como se pode inferir, todo o movimento de avanço e transladação será feito pela ferramenta de corte (VIANNA, 2002).

O material, que possui normalmente um formato cilíndrico, pode ser preso na placa do torno por meio de castanhas ou preso entre centros. Quando o material é preso entre centros não se pode realizar a operação de faceamento, que se faz movendo-se a ferramenta perpendicularmente ao eixo na extremidade do material, causando a diminuição no seu comprimento, contudo, as deformações causadas na peça tendem a serem menores se comparadas quando preso na placa do torno (DOYLE *et al.*, 1978).

Para cada tipo de perfil que se deseja fazer no material usa-se uma operação diferente. Pois se o que se deseja é diminuir o raio da peça deve-se fazer um torneamento externo com movimento de avanço paralelo ao eixo, se é necessário fabricar um produto com perfil cônico faz um torneamento externo com movimento de avanço oblíquo ao eixo, se o objetivo é fazer um canal com certa profundidade no material então deve se realizar a operação de sangramento que possui o seu movimento perpendicular ao eixo, se é preciso fazer uma rosca na superfície do material, então se usará uma ferramenta de corte para rosqueamento com o avanço de acordo com o passo da rosca, dentre outras operações. É necessário ressaltar que cada uma dessas operações que são feitas externamente podem ser realizadas também internamente, contanto que o material tenha um pré-furo. Para cada operação se terá uma ferramenta diferente para esse fim específico (DOYLE *et al.*, 1978; VIANNA, 2002; MACHADO *et al.*, 2011).

Esse processo é usado na fabricação de diferentes produtos como eixos, peças roscadas, pinos, polias, etc.

2.1.2 Furação

A furação é dos processos mais importantes da usinagem, visto uma boa parte dos materiais possuem algum tipo de furo, seja para se reduzir peso de um material, abri-lo um canal de ventilação ou por motivos de fixação de peças, já que se precisa de furos para se fixar parafusos, rebites, etc (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Broca é o nome dado a ferramenta de corte da furação. Esta possui múltiplas arestas de corte e gira a altas velocidades de rotação, diferentemente da ferramenta do torneamento que somente possui uma aresta de corte e não possui movimento de rotação. Durante o processo o material a ser usinado fica preso a uma mesa de coordenadas que possui movimento de translação nos três eixos, mas somente para ajuste da posição do material em relação à broca, visto que o movimento de avanço é dado pela própria ferramenta de corte (DOYLE *et al.*, 1978).

Para o mesmo autor, Doyle *et al.* (1978), existem diferentes operações de furação. A furação propriamente dita é para ele abrir um furo num material sólido, porém quando se utiliza uma broca com mais de um diâmetro pode-se chamar a operação de furação escalonada. Se for necessário aumentar um pré-furo denomina-se o processo como alargamento. Porém se a broca furar com uma profundidade pequena diz-se que se fez um alargamento de topo, e quando nesse caso se fizer uma angulação no começo do furo chama-se esse processo de escariação. Já a mandrilagem é a operação que irá ajustar um furo já existente, aumentando o seu diâmetro, e dando-o um melhor acabamento.

2.1.3 Fresamento

O processo de fabricação chamado de fresamento produzirá peças que não necessariamente possuem um perfil radial e não necessitam que o material usinado seja cilíndrico, podendo produzir peças com perfis variados. De maneira equivalente a furação, ele é caracterizado pela rotação da ferramenta de corte e o material matriz a ser usinado estará preso a uma mesa de coordenadas, existindo um movimento relativo entre a mesa e a ferramenta de corte (MACHADO *et al.*, 2011; VIANNA, 2002).

As ferramentas de corte do processo são chamadas de fresas e, como as brocas, possuem múltiplas arestas de corte. Elas podem possuir o seu eixo de rotação paralelo ao plano a ser usinado, sendo chamadas de fresas periféricas, porém existem também as

chamadas fresas de topo que possuem o seu eixo de rotação perpendicular ao plano usinado, aos quais possibilitam a usinagem de formas arredondadas (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Nas fresadoras mecânicas de coluna a ferramenta de corte normalmente estará fixa, enquanto a própria mesa de coordenadas se movimentará nos três eixos de transladação. Caso o eixo árvore for horizontal, ou seja, se a fresa for periférica, então o avanço deverá ser longitudinal (DOYLE *et al.*, 1978).

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009) as máquinas fresadoras estão sendo cada vez mais substituídas pelas máquinas-ferramentas controladas por CNC, em que nas quais é possível fazer diversos processos de usinagem em uma só máquina, como fresamento, furação, mandrilhamento e rosqueamento, além de possuírem ferramentas de corte que se movimentam em mais de um grau de liberdade, possibilitando assim criar perfis mais complexos se comparada as fresadoras mecânicas.

2.2 Tecnologia CNC

Existe uma grande diferença na operação de máquinas-ferramenta mecânicas e as que são controladas pela tecnologia de Comando Numérico Computadorizado. Aquelas são operadas manualmente por meio de alavancas e manivelas, tendo uma necessidade maior de um operador técnico a assistir a máquina, mesmo que o procedimento de desbaste possa ter passos automáticos, pois quando se trata de finalizar a peça é necessário que a operação seja manual para uma maior precisão. As que são controladas por CNC por sua vez, não precisão de um técnico durante a operação de usinagem da máquina, já que todo o seu processo será automatizado, a necessidade para esses tipos de máquinas-ferramentas é a de um técnico que saiba manter a máquina em um bom funcionamento, fazendo as manutenções preventivas e corretivas necessárias e fiscalizando alguma anormalidade que possa ocorrer durante o processo (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Mas o procedimento de usinagem em si para máquinas que funcionam com a tecnologia de CNC é o fase final de todo o processo. A etapa inicial é a geração do código que controla todos os comandos realizados pela máquina-ferramenta. O código que é usado de um modo geral nas indústrias é o chamado G-code ou, em português, o código G. Será falado mais sobre a sua linguagem à frente. Esse código pode ser escrito manualmente, mas normalmente ele é gerado por um software de desenho assistido por computador (DAC) ou computer aided design (CAD), em inglês, onde um modelo da peça que se deseja fabricar será

desenhado, em seguida o próprio software irá gerar o código G com o passo a passo dos comandos que a máquina realizará (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Depois disso o código deve ser aberto pelo software de usinagem pelo qual se poderão configurar os sinais de entradas e saídas da placa controladora. Deste modo o software traduz o código em pulsos, ou sinais, eletrônicos os quais irá repassá-los para a placa controladora que, como diz o seu nome, tem a função de controlar os sinais recebidos e repassá-los para cada um dos componentes motores da máquina, como a bomba de fluido refrigerante ou os motores de passo, etc. A placa controladora não receberá somente os sinais vindos do software de usinagem, mas também receberá os sinais vindos dos dispositivos secundários acoplados como o botão de parada de emergência ou os sensores de limite de curso, dentre outros, que também interferiram no processo de usinagem (ARTSOFT EUA, 2008).

Os pulsos que são transmitidos aos motores de passo passam antes pelos drivers que serão responsáveis por receber os sinais eletrônicos de um dos eixos. Assim cada driver somente receberá o sinal referente ao eixo o qual controla. O driver possui algumas portas de entrada eletrônicas, onde duas delas são responsáveis pela direção com o nome de DIR ou CW, e a que é responsável por controlar os pulsos que serão transmitidos para as bobinas dos motores de passo, com o nome de PUL ou CLK. Os drivers permitem o controle da quantidade de pulsos que o motor de passo receberá por revolução, que modo que o motor de passo possa dar uma revolução por pulso ou vir a dar uma revolução a cada 16 pulsos, dependendo da regulagem do passo no driver. Quanto maior a quantidade de pulsos por revolução maior será a precisão do motor de passo, porém maior será a quantidade de energia necessária para a realização do processo, assim se deve ajustar o pulso, ou passo, do motor de passo de acordo com a sua aplicação específica.

2.3 Código G (G-code)

O código G é a linguagem universal para o controle dos comandos de máquinas-ferramenta atualmente, o qual é padronizado pela norma internacional ISO 6983 que tem o intuito de diminuir o as diferenças entre os códigos de diferentes máquinas (INTERNATIONAL STANDARD, 2009). Ele possui uma linguagem simples em que cada comando é executado por uma função que é representada por uma letra seguida de um número. Essas funções podem ser divididas em três campos.

O primeiro campo são as funções preparatórias que são as responsáveis por preparar a máquina para fazer ou receber os comandos necessários, como definir o sistema de coordenadas, restabelecer o zero da máquina, limitar a rotação máxima do eixo-árvore, mas possui também a função de fazer a movimentação da ferramenta de corte ou da mesa de coordenadas seja com uma interpolação linear ou com uma interpolação circular. Elas são caracterizadas pela própria letra ‘G’ (CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO, 2006).

O segundo campo de funções, indicadas pela letra ‘M’ são as chamadas de miscelâneas que executam os comandos relativos ao funcionamento da máquina-ferramenta durante o processo de usinagem, como por exemplo, início e fim de programa, direção da rotação do eixo, começo e final do uso de fluido refrigerante, dentre várias outras funções (SENAI, [entre 2002 e 2018]).

O terceiro e último campo são as funções auxiliares, dentre elas existem a função ‘S’ que define a velocidade de corte ou a rotação de usinagem, a função ‘T’ que escolhe a ferramenta de corte a ser utilizada, a função ‘P’ que põe em execução um subprograma, e existem ainda aquelas funções que são utilizadas logo em seguida de uma função preparatória para que seja definido algum parâmetro desta, como as funções ‘X’, ‘Y’ e ‘Z’ que definem as coordenadas da ferramenta de corte e as funções ‘I’, ‘K’, ‘U’, ‘W’ e ‘F’ que determinam outros parâmetros da função preparatória em questão (PEREIRA; SCHNEIDER, 2002).

2.4 Motores de passo

Conforme Kenjo (1986), motores de passo são motores elétricos que transformam um pulso de entrada digital em movimento mecânico. No seu interior existem um núcleo estático chamado de estator e um núcleo que roda, com o nome de rotor. Tanto o estator como o rotor possuem dentes, porém os dentes do estator são energizados com uma corrente elétrica que passa por solenoides, criando um campo magnético que atrai os dentes do rotor, fazendo com que este se movimente em um pequeno ângulo chamado de passo. As bobinas do motor possuem dois solenoides por fase, que podem estar em série ou paralelo.

Uma das vantagens na utilização de motores de passo é o fato de serem compatíveis com equipamentos modernos com controle digital, mas nem sempre foi assim, pois os motores de passo já existiam antes mesmo das máquinas com comando numérico existirem. Na década de 20 McClelland (1927 *apud* KENJO, 1986) descreve no artigo “The Application of Electricity in Warships” o funcionamento do motor de passo de três fases que

seria usado para o direcionamento de canos de torpedos e artilharia, com um acionamento mecânico à manivela, em que a volta completa nessa manivela ocasionava o movimento de seis passos do motor, girando no total 90°. Somente por volta de 1960 que se começou a utilizar motores de passo eletro-hidráulicos em máquinas controlados por comando numérico, os quais possuíam um mecanismo hidráulico que permite utilizar torques maiores, visto que essas máquinas sofrem maiores tensões (THOMAS; FLEISCHAUER, 1957 *apud* KENJO, 1986). Mas somente no começo da década de 1970 com o desenvolvimento de microprocessadores foi que se começou a serem produzidos comercialmente motores de passo com ótimas performances e com comando digital.

As precauções que se deve ter com os motores de passo é a necessidade de haver torque suficiente para fazer com que as partes móveis saiam da inércia e a razão da indutância do circuito pela resistência deve ser pequena, para que assim seja possível obterem-se altas velocidades de operação (KENJO, 1986).

2.5 Software Mach

O software utilizado que servirá de interface para o controle dos motores de passo será o pacote de programas Mach da empresa ArtSoft EUA, que usando como linguagem o Código G pode-se controlar tornos, fresadoras, cortadores por plasma, routers, além de ser possível de se adaptarem a furadeiras automáticas e outras máquinas. A versão utilizada foi a Mach3 Mill para controle de fresadoras.

O Mach3 Mill possui diversas funções que permitem ao operador trabalhar de diversas maneiras na máquina, seja para opera um código que usará determinada peça, seja para calibrar a máquina ou movimentar os seus carros móveis a determinadas distâncias para o acoplamento inicial do material que irá ser usinado, além de ser possível fazer toda a configuração de sinais eletrônicos provenientes da placa controladora.

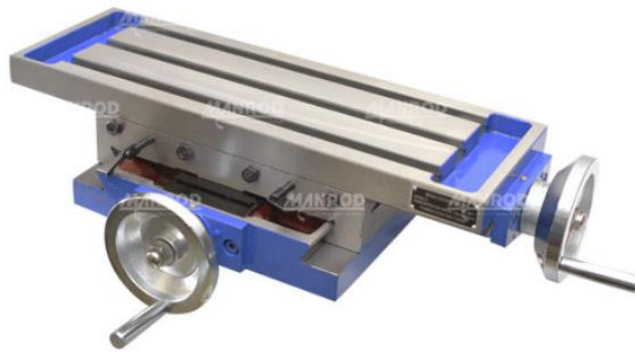
O programa foi escolhido por seu fácil manuseio e aprendizagem, porém não se pode com isso achar que sem um estudo e treinamento anterior é possível utilizá-lo, pois como irá se trabalhar com rotores de motores de passo girando à altas rotações, operando em máquinas ferramentas com ferramentas de corte com grandes tensões atuantes, os danos na máquina e no próprio operador podem ser catastróficos. A experiência e a cautela do operador na operação de maquinas-ferramentas por Comando Numérico Computadorizado são indispensáveis.

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

3.1 Definição do acoplamento do eixo da mesa de coordenadas com o eixo rotor do motor de passo

Para o trabalho em questão foi utilizado uma mesa de coordenadas MR-25 da empresa Manrod fabricada com ferro fundido, sendo comumente utilizada em furadeiras de bancada ou de coluna, e fresadoras de topo, com as especificações do fabricante de acordo com a Figura 2.

Figura 1 – Mesa de coordenadas MR-25



Fonte: Manrod (2018).

Figura 2 – Especificações da mesa de coordenadas MR-25

Ref. #:	MR-22	MR-25	MR-28
Dimensões da mesa de trabalho	495 x 165 mm	555 x 195 mm	640 x 205 mm
Curso longitudinal "X"	210 mm	240 mm	370 mm
Curso transversal "Y"	100 mm	140 mm	150 mm
Largura do canal tipo "T"	14 mm	14 mm	14 mm
Quantidade de canais tipo "T"	3	3	3
Quantidade de manivelas	1 frontal + 1 direita	1 frontal + 1 direita	1 esquerda + 1 frontal + 1 esquerda
Altura da mesa	115 mm	120 mm	155 mm
Resolução do nônio	0,04 mm	0,04 mm	0,04 mm
Dimensões da base de apoio	260 x 280 mm	335 x 315 mm	238 x 320 mm
Dimensões da Embalagem	650x425x210 mm	710x490x220 mm	880x485x275 mm
Peso [Kg]	40	50	65

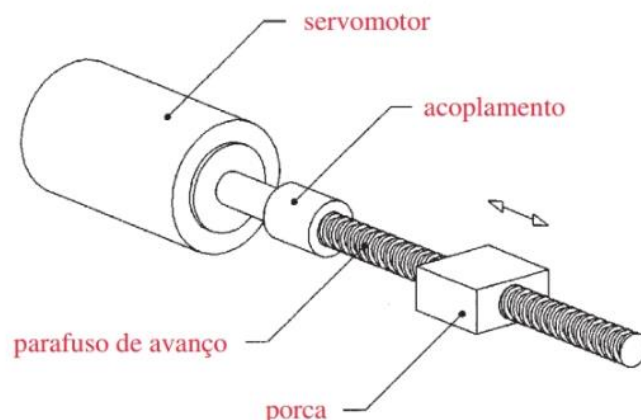
Fonte: Manrod (2018).

A mesa possui dois eixos paralelos que a fazem se movimentar em um 'plano XY' paralelo ao chão. Ela não possui, dessa maneira, o 'Eixo Z', que seria o eixo que se move

paralelo ao plano do chão, ficando este a cargo da máquina-ferramenta em que aquela será acoplada. Para o deslocamento do curso transversal (Eixo X) e do curso longitudinal (Eixo Y) a mesa possui dois “carros móveis” que ficam empilhados um sobre o outro e estes sobre a mesa de consolo, que permanecendo imóvel servirá para o encaixe na máquina-ferramenta. O carro móvel que fica logo acima da mesa de consolo, que por convenção será chamada de carro móvel 1, movimenta o curso transversal, e o que fica acima deste desloca a mesa no curso longitudinal, carro móvel 2. O acionamento de cada um dos eixos é manual e se faz por meio de manivelas, uma para cada eixo, ficando a manivela do eixo transversal, manivela 1, na frente da mesa de consolo, que ao ser acionada causa a revolução de um fuso que se encontra ligado a mesma. O fuso passa por uma peça rosqueada presa ao carro móvel 1 fazendo com que a peça se mova ao girá-lo. Por um método semelhante, na parte superior direita do carro móvel 1 se encontra a segunda manivela, manivela 2, que ao ser manualmente girada, roda também outro fuso que está acoplado nele, e faz o carro móvel 2 se deslocar devido a outra peça rosqueada que está presente na sua parte inferior. Na Figura 3 podemos ver uma esquematização do funcionamento desse mecanismo de transladação dos eixos, contudo vemos nela que o seu controle se dá por motores de passo em vez de manivela, o qual é o desejado para o trabalho em questão.

Percebe-se que os dois eixos se mobilizam independentemente, o que indica que a mesa de coordenadas possui dois graus de liberdade.

Figura 3 – Mecanismo de translação dos eixos da mesa de coordenadas



Fonte: Norton (2013).

Para que a mesa de coordenadas pudesse ser controlada pelo software Mach 3, foi necessário pensar em alguma maneira de o fuso ser controlado por motores de passo, substituindo dessa maneira o acionamento manual por manivelas.

O primeiro passo foi retirar os elementos de fixação que prendiam as manivelas aos eixos onde se encontravam os fusos, que eram uma porca sextavada tipo calota M12 que se encontrava na parte da frente da manivela que a impedia de movimentar-se longitudinalmente em relação ao eixo do fuso, e uma chaveta paralela, com as dimensões de 4 mm de largura, 4 mm de altura e 14 mm de comprimento, que estava no rasgo de chaveta e fazia a conexão do eixo com a manivela. No total, duas porcas sextavadas tipo calota e duas chavetas paralelas, uma de cada por manivela. Ficou exposta, desta maneira, apenas a ponta dos eixos, os quais serão acoplados aos motores de passo.

Os motores de passo escolhidos foram dois NEMA 23, uma para cada eixo, que são controlados por CNC, com as suas especificações de acordo com a Figura 4. Esses motores são produzidos pela empresa fabricante de motores de passo Neo Motion, que faz parte do grupo empresarial Neoyama que manufatura produtos eletrônicos em geral.

Figura 4 – Especificações gerais do motor de passo NEMA 23

Especificação	Valor
Ângulo do passo	1,8°
Número de passos	200
Enrolamento	Bifilar
Temperatura de operação máx.	80°C
Temperatura ambiente	-10°C ~ 50°C
Resistência de isolamento	100VAC / 500VDC
Rigidez dielétrica	500VAC / 1min
Classe de isolamento	B
Esforço radial máximo	0,03mm - 500g de carga
Esforço axial máximo	0,03mm - 700g de carga
Detent torque	400gf.cm
Inércia rotórica	370g.cmr ²
Quantidade de fios	6
Peso	0,98kg

Fonte: Neo Motion (2018).

Figura 5 – Tabela de seleção do motor de passo NEMA 23

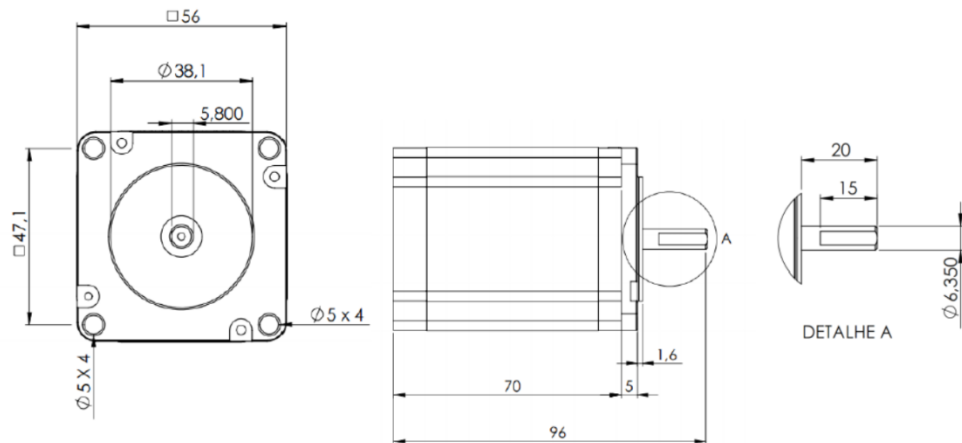
NEMA	MODELO	CONEXÃO		HOLDING TORQUE (kgf.cm)	CORRENTE (A/fase)	TENSÃO (V/fase)	RESISTÊNCIA (Ω /fase)	INDUTÂNCIA (mH/fase)	PESO (kg)
23	AK23/15F6FN1.8	Bipolar	Série	15	2,1	4,2	2	8	0,98
		Unipolar		10,5	3	3	1	2	

Fonte: Neo Motion (2018).

Estes foram selecionados devido a sua compatibilidade com o programa Mach 3 e também por causa de possuir um torque suficientemente grande para suportar não somente o peso dos carros móveis, mas também os esforços que surgiriam durante um possível processo de usinagem, pois tais motores com torque de 15 kgf.cm são comumente utilizados em fresadoras de bancada.

O eixo rotor do motor de passo, segundo as especificações do fabricante, Figura 6, possui um diâmetro de 6,35 mm e o eixo da mesa possui 12 mm, medida essa que foi medida por um paquímetro analógico, contudo, é necessário haver alguma ligação entre os dois para que sejam coaxiais e tenham a mesma velocidade angular de rotação.

Figura 6 – Informações técnicas do motor de passo NEMA 23 (escala em mm)



Fonte: Neo Motion (2018).

Para essa conexão foi escolhido para cada eixo, com os seus respectivos motores de passo, um acoplamento flexível com as dimensões específicas dos diâmetros dos eixos dos motores de passo e dos eixos da mesa. Pode-se dizer que esse acoplamento é um cilindro de alumínio, sendo o seu corpo central uma espécie de mola, tornando-o mais flexível às tensões de flexão que eventualmente possam surgir durante a rotação do eixo, diminuindo os esforços que seriam aplicados neste. Em uma face ele possui um furo não passante com o mesmo diâmetro do eixo da mesa e igualmente na sua face paralela há um furo não passante com o

mesmo diâmetro do eixo rotor do motor de passo, ambos sendo coaxiais. Logo, quando o eixo do motor de passo for acoplado com o eixo da mesa eles serão coaxiais, como se pode ver na Figura 7.

Figura 7 – Imagem do acoplamento flexível



Fonte: Mercado livre (2018).

Embora já exista uma ligação entre o eixo do motor de passo e o fuso da mesa de coordenadas, acarretando que ambos sejam coaxiais e tenham uma mesma velocidade angular de rotação, foi percebida a necessidade de haver algum suporte para o motor de passo devido ao fato de seu peso, de aproximadamente 1 quilo, causar uma tensão de flexão superior ao limite de escoamento do acoplamento flexível. Então foi necessário realizar o projeto e a fabricação de suportes metálicos que suportassem as tensões causadas pelo peso dos motores de passos.

3.2 Projeto, fabricação e fixação do suporte metálico à mesa de coordenadas e ao motor de passo

3.2.1 Projeto dos suportes metálicos com a ajuda do software Fusion 360

Os suportes metálicos por conveniência deveriam ser projetados de maneira que ficassem presos à mesa de coordenadas, para que ao serem fixados os motores de passo aos seus respectivos suportes aqueles ficassem assim presos à mesa. Foi necessário então analisar

como seria possível prender os suportes a esta, tentando evitar-se ao máximo fazer alterações permanentes nela.

A primeira observação foi que perto dos eixos das manivelas 1 e 2 existiam alguns parafusos que ao serem retirados poderiam ser utilizados seus respectivos furos rosqueados para ajudar na fixação do suporte. Depois se percebeu que as distâncias entre centros dos furos para o eixo eram diferente para o eixo da manivela 1 e para o da manivela 2, logo foi definido que o projeto de cada um dos dois suportes se daria de maneira individual, sendo o suporte que se encontra no eixo da manivela 1 denominado de suporte 1, e o outro que se encontra no eixo da manivela 2 chamado de suporte 2.

3.2.1.1 Projeto para o suporte 1

Percebeu-se ao examinar a mesa que ela possui um parafuso com uma distância entre centros de 50 mm a esquerda do eixo da manivela 1 e simetricamente outro parafuso com uma igual distância entre centros a sua direita, dimensões estas que foram medidas com um paquímetro analógico. Tanto os parafusos como o centro do eixo da manivela 1 se encontram a um mesmo desnível em relação ao chão.

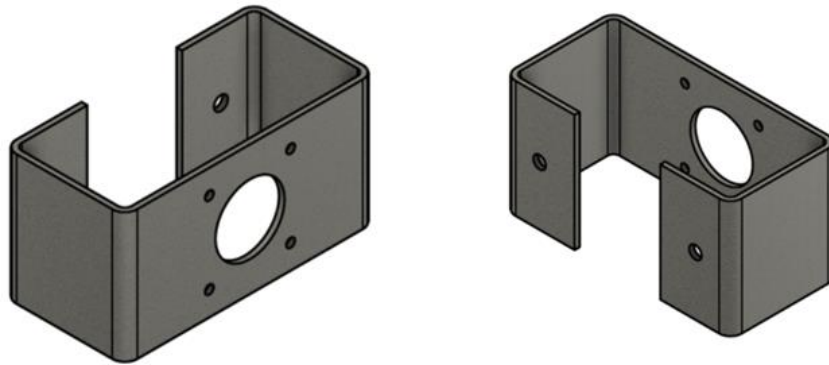
Assim, foi definido que esse suporte poderia ser ligado à mesa de coordenadas por meio dos furos rosqueados que se encontravam nela, com arruelas e parafusos compatíveis com as suas dimensões. A fixação do motor de passo ao suporte se daria por meio de quatro pequenos parafusos e arruelas que passariam pelos furos que se encontravam no próprio motor de passo, com as distâncias entre os seus centros dadas pelo fornecedor, como indicado na Figura 6. Então, bastaria furar o suporte metálico de acordo com as distâncias e os diâmetros dos furos rosqueados já existentes na mesa de coordenadas e de acordo também com os furos que já estavam nos motores de passo, e fazer ainda uma furação central que serviria para passar o eixo rotor deste e o da mesa de coordenadas.

Visto que o motor de passo não estaria ligado diretamente à mesa devido ao comprimento dos eixos, essa ligação deveria ser feita então pelo suporte metálico. Para que não houvesse material em excesso, por causa de uma espessura muito grande do suporte, foi pensado em usar uma chapa fina com dobras para suprir essa necessidade da distância entre o motor de passo e a mesa de coordenadas.

Inicialmente o suporte foi projetado como mostra a Figura 8 e 9. Esse modelo em três dimensões foi feito no software de desenho Fusion 360, sendo as faces que se encontram

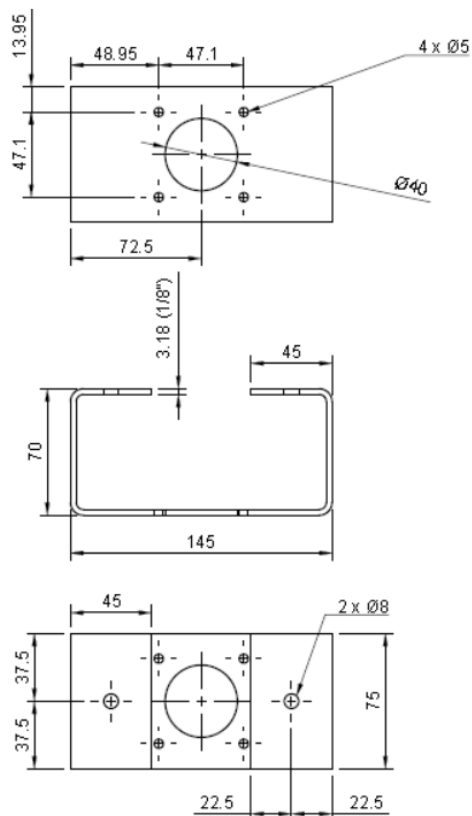
fixadas à mesa de coordenadas chamadas de face 1a e 1b, Figura 10, e a que está ligada ao motor de passo denominada face 2, Figura 11.

Figura 8 – Vistas em perspectiva do modelo em três dimensões do projeto inicial do suporte metálico



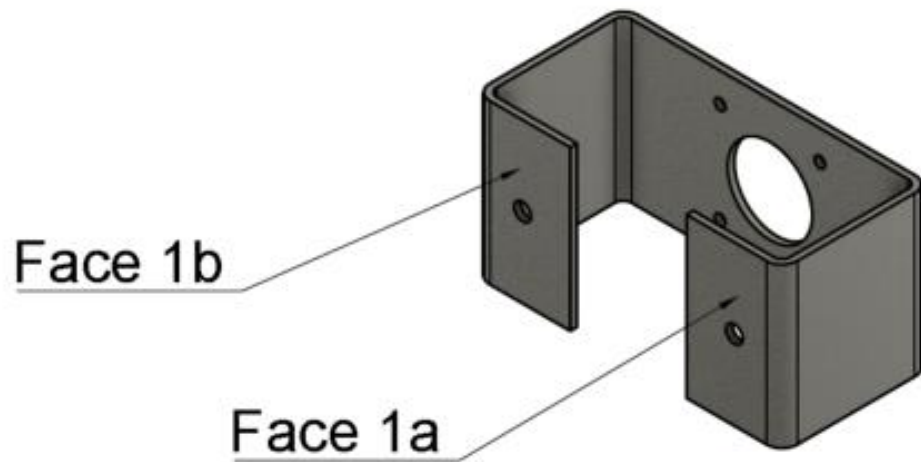
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 9 – Dimensões do projeto inicial do suporte metálico (escala em mm)



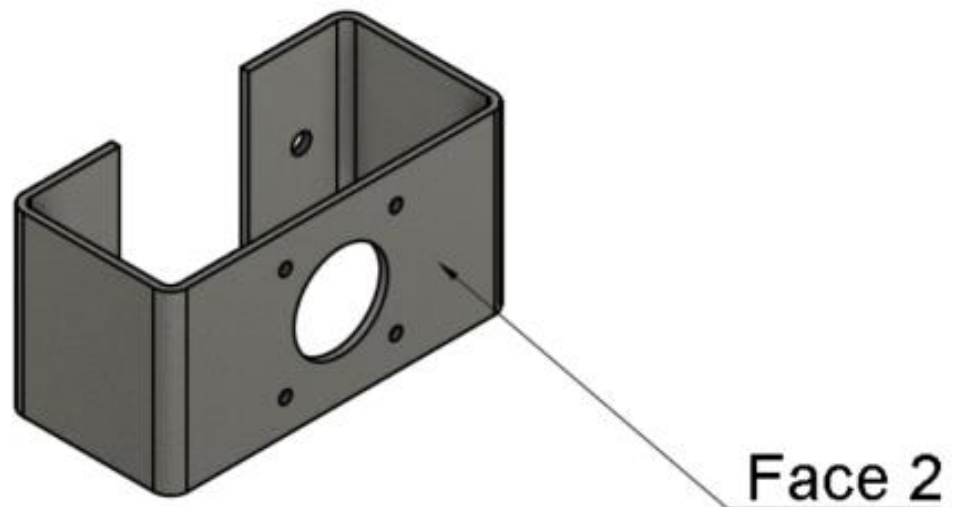
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 10 – Faces de fixação do suporte à mesa de coordenadas



Fonte: elaborado pelo autor.

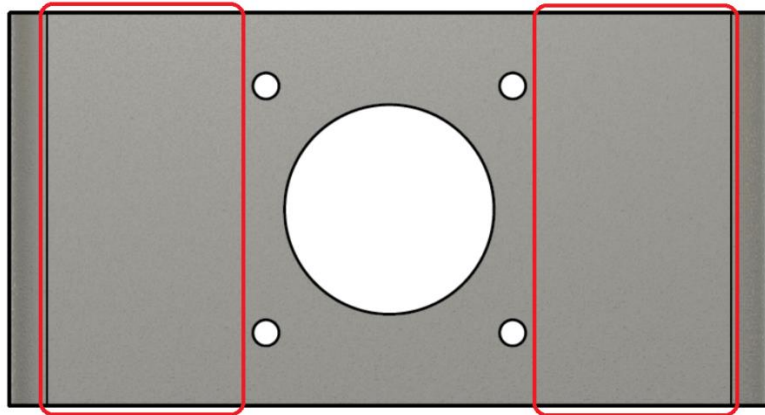
Figura 11 – Face de fixação do suporte ao motor de passo



Fonte: elaborado pelo autor.

Foi pensado em fazer a face 2 com o seu comprimento maior que a distância dos furos nas faces 1a e 1b, para que as suas dobras ficassem distantes dos furos onde se fixaria o motor de passo, para se evitar tensões muito elevadas nas regiões indicadas na Figura 12, pois por suposição foi considerado que essas regiões teriam baixo coeficiente de segurança, e portanto, com grande tensões de Von Mises, visto que as dobras e os furos dos parafusos provocam uma grande concentração de tensão.

Figura 12 – Regiões com possível grande concentração de tensão



Fonte: elaborado pelo autor.

Era necessário agora definir o material dos suportes metálico. Dentre os materiais cogitados os mais viáveis, por sua disponibilidade no mercado, foram o alumínio 1100-H14 e o aço AISI 1015. A espessura de 1/8 in (3,175 mm) da chapa foi escolhida de acordo com as espessuras de chapa de aço e alumínio que se encontram no mercado, optando-se por escolher uma que fosse fina o bastante para evitar uso de excesso de material, mas que ainda assim suportasse com facilidade o peso do motor de passo.

Para saber se esses materiais suportariam a carga que o peso do motor de passo causaria foi feito um modelo em três dimensões do suporte no software Fusion 360, como já citado anteriormente, o qual permite, dentre outras funções, fazer simulações de testes dos modelos submetidos à cargas estáticas para uma variedade de materiais, obtendo-se os coeficientes de segurança para o limite de escoamento e para o limite de resistência à tração e as tensões de Von Mises. Possibilitando também verificar se a suposição inicial, de que poderia haver grande concentração de tensão nas regiões mostradas na Figura 12, estava correta.

A simulação consiste em fixar a região dos furos das faces 1a e 1b, enquanto se aplica uma carga perpendicular ao plano do chão de 10 N na face 2, a qual representa a força que o peso do motor de passo aplica ao suporte, pois foi arredondado para 1 quilograma a massa daquele e 10 m/s² a aceleração gravitacional, levando também em consideração a massa do próprio suporte. Pelas informações que obtemos do software, Figura 13, vemos que a massa do modelo quando feito de alumínio 1100-H14 é 214,461 g, ou seja, para uma aceleração gravitacional de 10 m/s², causará uma força de 2,144 N no modelo feito de

alumínio 1100-H14 e 6,251 N, lembrando que essa força-peso é aplicada no centro de massa do material. Como se pode observar na Figura 14, a força que representa o peso do motor de passo está simbolizada por uma seta azul e a força-peso do suporte está indicada por uma seta amarela, e isso se repete para todas as outras simulações.

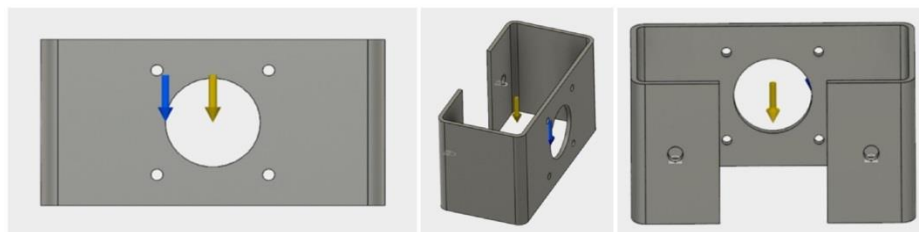
O valor da massa do motor de passo, que segundo as especificações do fornecedor é 0,98 g, e o módulo da aceleração gravitacional, que no default do software estava com 9,807 m/s², foram arredondados para o maior número inteiro mais próximo propositalmente, pois fazendo isso teremos uma maior margem de confiança para saber se o caso real falhará ou não, já que fazendo assim teremos maiores tensões aplicados do modelo virtual do suporte do que no próprio suporte metálico.

Figura 13 – Propriedades do modelo do suporte metálico feito de Alumínio 1100-H14

PROPERTIES	
Area	5.351E+04 mm ²
Density	0.003 g / mm ³
Mass	214.461 g
Volume	7.943E+04 mm ³
Physical Material	Aluminum 1100-H14
Appearance	Aluminum - Cast

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 – Representação das forças aplicadas no modelo do projeto inicial do suporte metálico

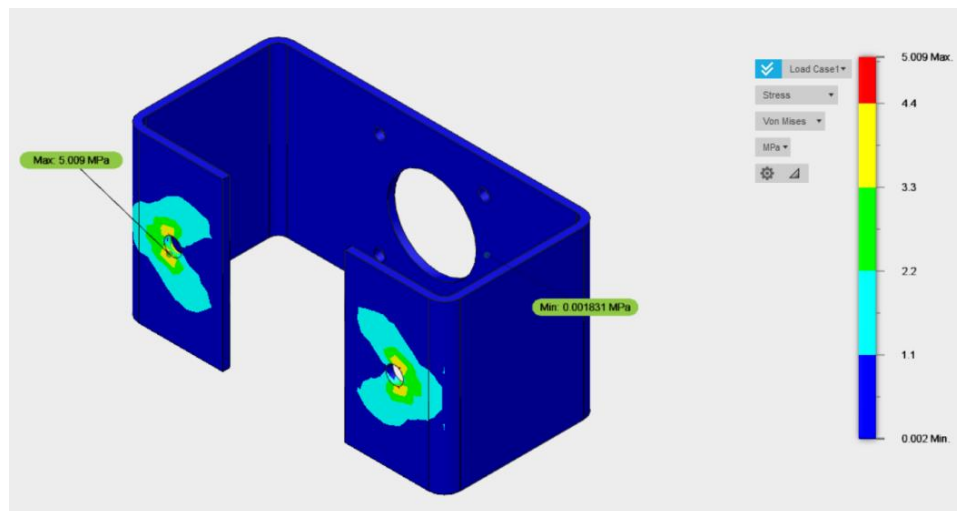


Fonte: elaborado pelo autor.

Primeiro foi feita a simulação do teste do modelo do suporte metálico submetido à carga estática para o alumínio 1100-H14 como material, que teoricamente é menos resistente à falha que o aço. Os resultados, conforme as Figuras 15 e 16, mostraram que a região com as maiores tensões foi a região próxima aos furos das faces 1a e 1b com a tensão máxima de 5,009 MPa, ficando até aproximadamente 1,1 MPa quando se afasta um pouco destes. Na face 2 encontramos a tensão mínima com valor de 0,001831 MPa. Referindo-se ao coeficiente de segurança do limite de escoamento vemos que ele é 15 para todo o suporte, porém em se tratando do coeficiente de segurança para o limite de resistência à tração vemos que o menor coeficiente de segurança se encontra nos furos da face 1a e 1b e possui o valor de 11,28, enquanto para o resto do suporte esse mesmo coeficiente é 15.

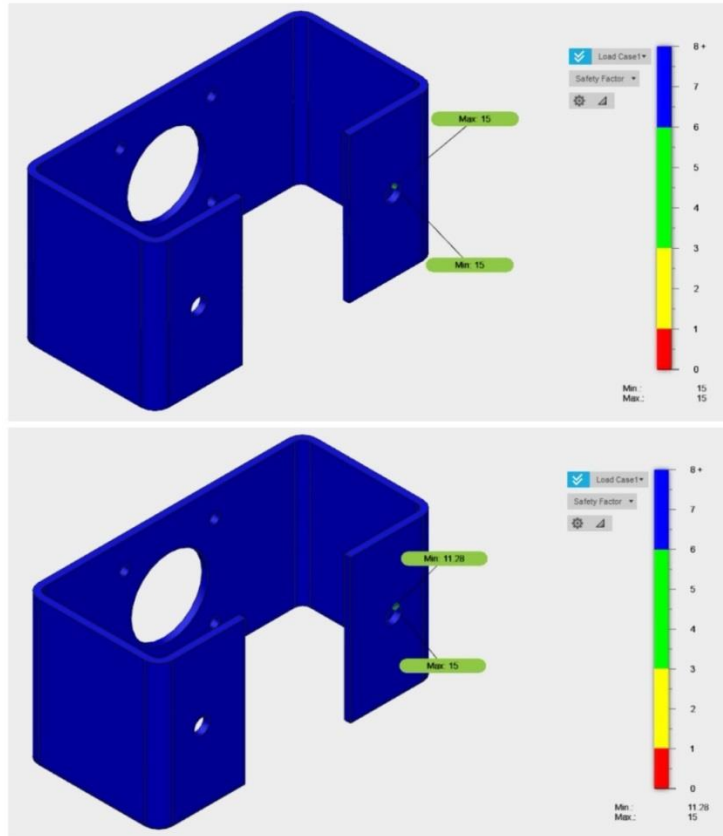
É importante ressaltar que o software Fusion 360 não calcula coeficientes de segurança com valores maiores do que 15, com isso ele está querendo dizer que o coeficiente a partir desse valor está em um grau de confiabilidade mais do que aceitável, tendo um valor muito maior do que o necessário para não falhar.

Figura 15 – Esquemática em cores das tensões de Von Mises no suporte feito de alumínio 1100-H14



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16 – Esquemática em cores do coeficiente de segurança do limite de escoamento (cima) e do limite de resistência à tração (baixo) no suporte feito de alumínio 1100-H14



Fonte: elaborado pelo autor.

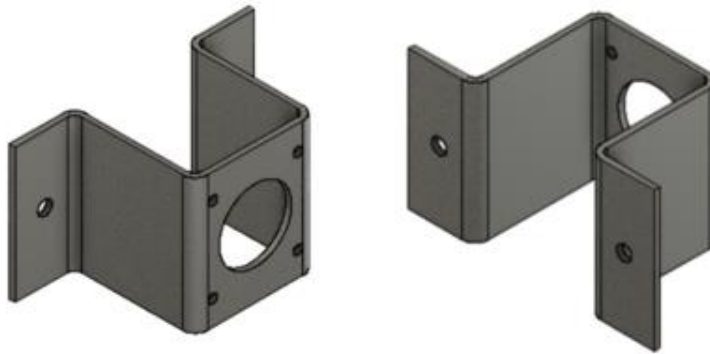
Nota-se que a suposição inicial de que poderia haver grande concentração de tensões nas regiões indicadas na Figura 12 estava incorreta, então se o material suporta as tensões com facilidade sendo de alumínio, também o suportará sendo de aço. Não haveria então necessidade de fazer com que a face 2 tivesse o comprimento maior que a distância dos furos das faces 1a e 1b, para que as dobras e os furos da face 2 ficassem distantes. Somado a isso, logo se percebeu que a fixação dos parafusos nas faces 1a e 1b seriam impraticáveis, pois como os parafusos teriam suas cabeças voltadas para a parte de dentro do suporte, as chaves para a sua fixação não poderiam ser encaixadas e giradas com facilidade, encontrando vários esbarros. Inverter a posição das cabeças dos parafusos também era inviável por causa do pouco espaço na mesa de coordenadas.

A solução para o problema do pouco espaço para a chave de fixação do parafuso poderia ser resolvido se o perfil do suporte metálico fosse mudado, de maneira que as cabeças dos parafusos não ficassem para dentro do suporte, o que seria possível se o comprimento da

face 2 fosse diminuída para um comprimento menor que a distância dos furos das faces 1a e 1b, porém maior que a distância de 47,1 mm que é a distância entre centros dos furos onde seriam fixados os motores de passo, Figura 6.

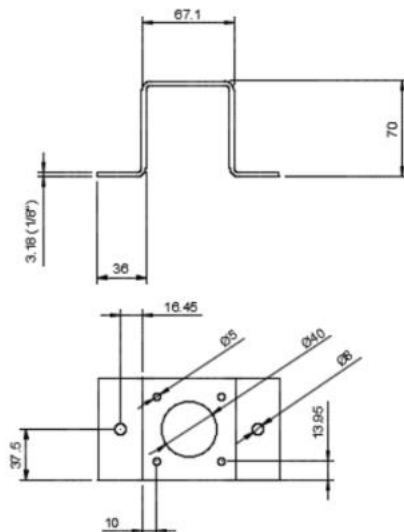
O modelo do suporte metálico foi então redesenhado, ficando como nas Figuras 17 e 18. Assim as novas faces 1a e 1b e a nova face 2 ficaram de acordo com as Figuras 19 e 20 respectivamente. Logo as simulações dos testes do modelo do suporte submetidos à carga estática foram repetidas tanto para o alumínio 1100-H14 como para o aço AISI 1015 para ver se esses materiais suportariam as tensões e não falhariam por escoamento ou por ruptura.

Figura 17 – Vistas em perspectiva do modelo em três dimensões do projeto modificado do suporte metálico



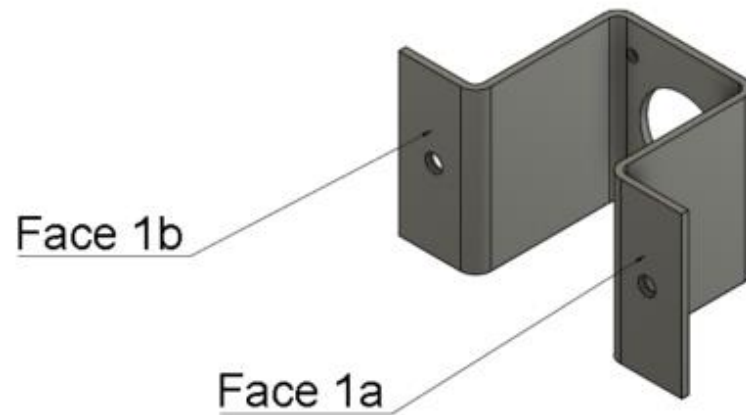
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18 – Dimensões do projeto modificado do suporte metálico (escala em mm)



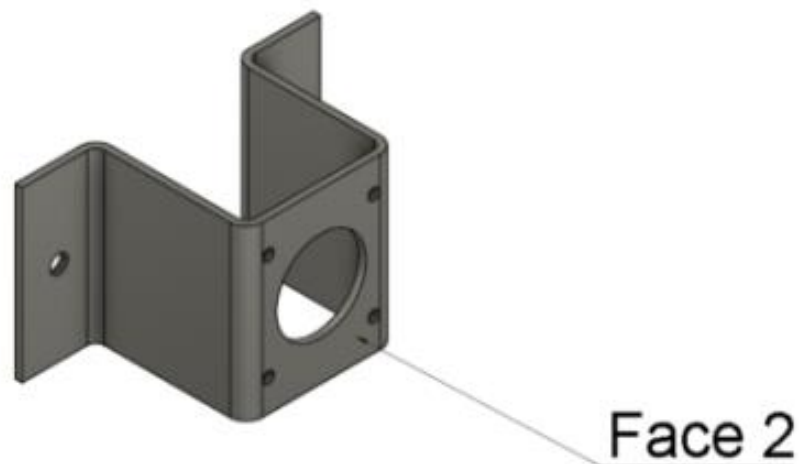
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 – Novas faces de fixação do suporte à mesa de coordenadas



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 20 – Nova face de fixação do suporte ao motor de passo



Fonte: elaborado pelo autor.

As simulações dos testes foram refeitas com os mesmos procedimentos das simulações anteriores, porém, como o volume do suporte foi ligeiramente mudado a massa do mesmo também foi alterada, o que ocasionou em uma diferente força aplicada pelo peso do suporte, além do fato de que mudando o seu perfil, mudar-se-á também a localização do seu centro de massa, gerando assim diferentes tensões de Von Mises aplicadas nele. A nova massa do suporte feito de alumínio 1100-H14 de acordo com o software é 152,803 g, como pode se

ver na Figura 21, enquanto a sua nova massa quando feito de aço AISI 1015 é 445,394 g, Figura 22, o que faz com que a força-peso seja 1,528 N e 4,454 N para o alumínio 1100-H14 e o aço AISI 1015 respectivamente. Como se vê a massa e a força-peso do suporte diminuiu em relação ao projeto anterior para os seus respectivos materiais. Na Figura 23 pode-se ver a representação das forças aplicadas no modelo modificado do suporte metálico.

Figura 21 – Propriedades do modelo modificado do suporte feito de Alumínio 1100-H14

- PROPERTIES	
Area	3.851E+04 mm ²
Density	0.003 g / mm ³
Mass	152.803 g
Volume	5.659E+04 mm ³
Physical Material	Aluminum 1100-H14
Appearance	Aluminum - Cast

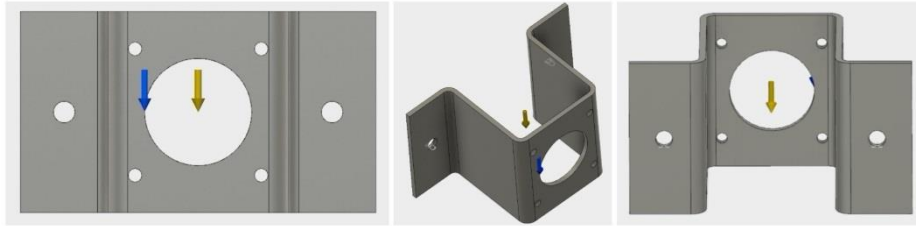
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 22 – Propriedades do modelo modificado do suporte metálico feito de aço AISI 1015

- PROPERTIES	
Area	3.851E+04 mm ²
Density	0.008 g / mm ³
Mass	445.394 g
Volume	5.659E+04 mm ³
Physical Material	Steel AISI 1015
Appearance	Steel - Cast

Fonte: elaborado pelo autor.

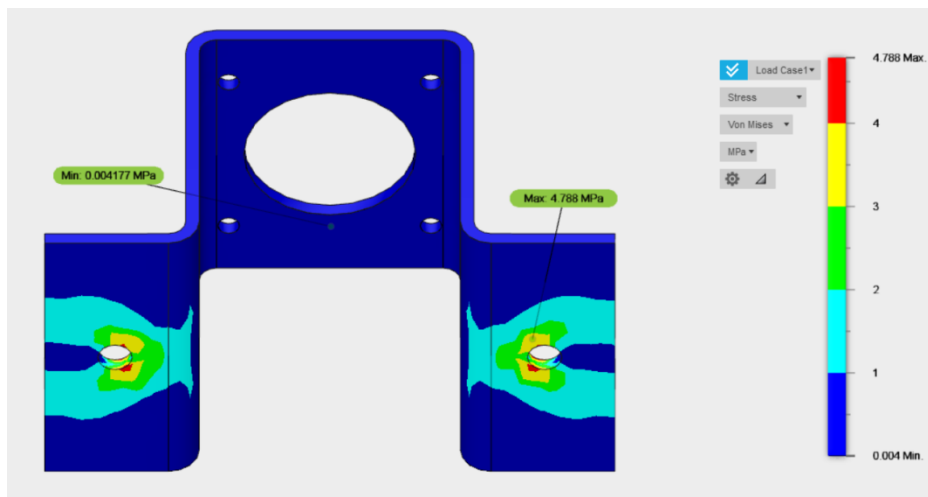
Figura 23 – Representação das forças aplicadas no modelo modificado do projeto do suporte metálico



Fonte: elaborado pelo autor.

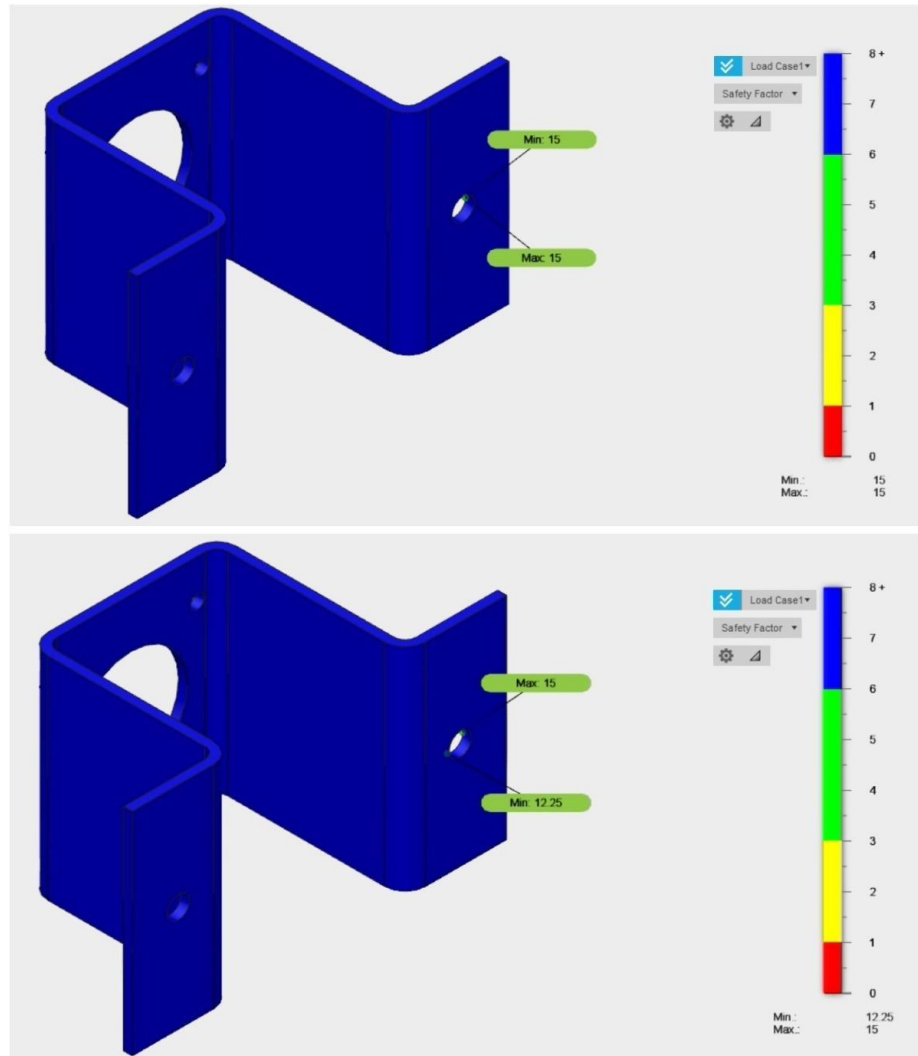
Os resultados da simulação para o alumínio 1100-H14, Figuras 24 e 25, mostraram que a área de menores tensões é a que se encontra perto do furo de 40 mm na face 2 com uma tensão mínima de 0,004177 MPa, enquanto a área com as maiores tensões de Von Mises é aquela que se encontra perto dos furos das faces 1a e 1b com tensões que vão de aproximadamente 1 MPa até a tensão máxima de 4,788 MPa. Em relação ao coeficiente de segurança do limite de escoamento vemos que ele é 15 em todo o suporte, entretanto para coeficiente do limite de resistência à tração podemos constatar que ele será mínimo no furo com o valor de 12,25 e valor de 15 para o resto do suporte.

Figura 24 – Esquemática em cores das tensões de Von Mises no suporte modificado feito de alumínio 1100-H14



Fonte: elaborado pelo autor.

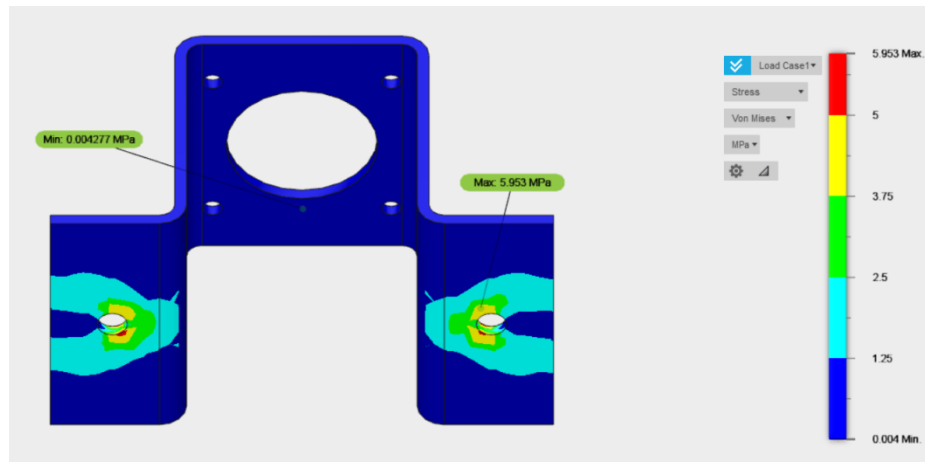
Figura 25 – Esquematização em cores do coeficiente de segurança do limite de escoamento (cima) e do limite de resistência à tração (baixo) no suporte modificado feito de alumínio 1100-H14



Fonte: elaborado pelo autor.

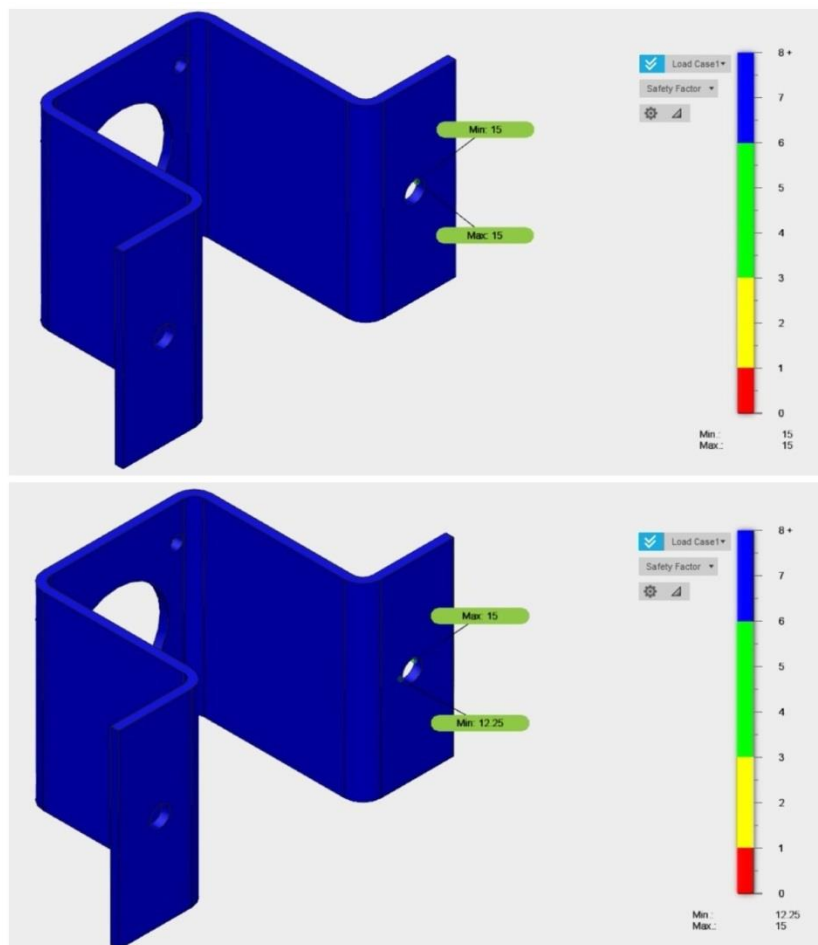
Na simulação do teste à carga estática no projeto modificado do suporte metálico feito de aço AISI 1015 vemos que a tensão máxima de 5,953 MPa se encontra na região próxima a dos furos das faces 1a e 1b, com tensões menores de até 1,25 MPa na medida em que se afasta deles. A sua tensão mínima se encontra no mesmo local das simulações anteriores, ou seja, perto do furo de 40 mm na face 2 com o valor de 0,004277 MPa. Tratando-se do coeficiente de segurança de limite de escoamento vemos que ele é 15 em todo o modelo, enquanto o coeficiente de limite de resistência à tração é mínimo com um valor de 12,25 nos furos das faces 1a e 1b e 15 no seu restante.

Figura 26 – Esquematização em cores das tensões de Von Mises no suporte modificado feito de aço AISI 1015



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 27 – Esquematização em cores do coeficiente de segurança do limite de escoamento (cima) e do limite de resistência à tração (baixo) no suporte modificado feito de aço AISI 1015



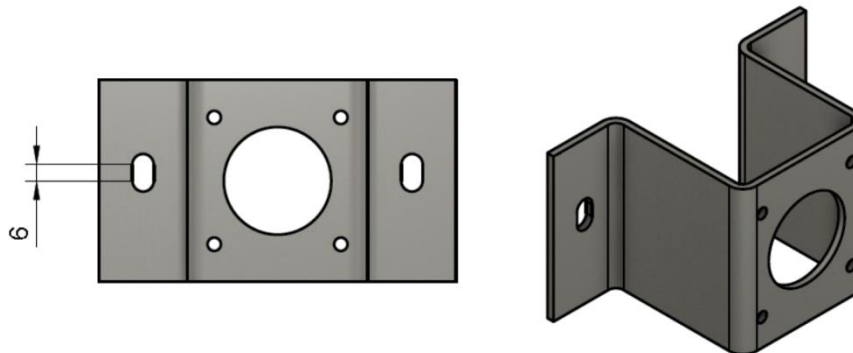
Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1.2 Projeto para o suporte 2 e escolha do material de fabricação dos mesmos

O segundo suporte por sua vez possuía uma particularidade em relação ao outro, e ela provinha do fato do centro do eixo da mesa de coordenadas não estar nivelado com centros dos furos rosqueados dos parafusos que já existiam na mesa. Isso acarretou um problema, visto que fazer uma medição mais precisa para medir esse desnível era inviável por falta de materiais de medição disponíveis, embora fosse crucial obter uma medida precisa para se poder fazer o furo no local correto, e assim deixar coaxiais o eixo da mesa de coordenadas e o eixo rotor do motor de passo. Por outro lado, as distâncias entre centros do eixo para os furos, tanto a esquerda com a direita, permaneciam as mesmas, logo a única diferença do segundo suporte para o primeiro seria apenas esse pequeno desnível.

A solução para o problema foi resolvida não fazendo apenas os furos nas faces 1a e 1b do suporte 2, mas sim um rasgo de 6 mm na direção vertical o qual permitiria ajustar o suporte nessa direção, sendo a medida do comprimento do rasgo um pouco maior que a medida do próprio desnível, dessa maneira foi possível centralizar o eixo da mesa de coordenadas com o eixo rotor do motor de passo.

Figura 28 – Vistas do modelo do suporte metálico 2



Fonte: elaborado pelo autor.

Resolvido o problema, não se achou necessário fazer simulações próprias para o suporte 2, com a sua particularidade do rasgo, pois mesmo sabendo que iria haver diferenças nas tensões aplicados ao longo do suporte, elas ainda não seriam suficiente para fazer com que este falhasse, pois como se pôde ver nas simulações anteriores, o suporte aguentaria com muita folga o peso do motor de passo independente do material com que fosse fabricado.

Tanto o aço como o alumínio se mostraram bons materiais para a fabricação dos suportes, com grandes coeficientes de segurança em seus pontos mais solicitados, com o alumínio possuindo coeficientes de segurança menores, mais ainda assim suficientes para não falhar. Mesmo assim, depois de feita uma pesquisa em algumas metalúrgicas, foi constatada que por mais que o preço do aço seja maior que o do alumínio ele continua sendo baixo. Por fim o material escolhido para a fabricação do suporte foi o aço, que possui um preço maior do que do alumínio, porém continuando barato, além de já possuir um coeficiente de segurança maior em relação ao alumínio.

Feito o projeto dos dois suportes o próximo passo seria a sua fabricação.

3.2.2 Fabricação e fixação do suporte metálico na mesa de coordenadas

Para a realização do corte e da dobra da chapa foi necessário fazê-los em uma metalúrgica (Estrutural Comércio e Serviços LTDA.). A realização dos furos na peça, por sua vez, foi feita na Oficina do Núcleo de Manufatura Qualidade e Sustentabilidade (NMQS), localizada no Centro de Tecnologia nos campi do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC).

No suporte 1 o processo de usinagem utilizado para a realização dos furos de 8 mm nas faces 1a e 1b foi por furação com uma broca de igual diâmetro, assim como também foi o processo realizado na face 2 para se fazer os quatro furos de 5 mm com uma broca de igual diâmetro. Já para o furo de 40 mm foi feito inicialmente um furo passante no local indicado com uma broca de 8 mm, depois usando uma peça de usinagem chamada de bailarina foi-se aumentando em pequenos passos o diâmetro do furo, até finalmente chegar a 40 mm.

No suporte 2 o procedimento utilizado para realizar os rasgos nas faces 1a e 1b foi a furação da peça com uma broca de 8 mm de diâmetro, e enquanto a broca ainda estava atuando a peça foi levemente movida para a realização do rasgo de 6 mm de comprimento. Todos os outros procedimentos foram feitos iguais aos do suporte 1.

Para prender o acoplamento flexível no eixo da mesa de coordenadas é necessário apertar no próprio acoplamento um parafuso Allen sem cabeça M4 com 8 mm de comprimento no rasgo de chaveta da mesa, pois assim quando o eixo rotor do motor de passo girar e causar a rotação do acoplamento flexível o parafuso no rasgo da chaveta transferirá a rotação do acoplamento para o eixo da mesa, fazendo o fuso rodar. Outro parafuso Allen M3

com 14 mm de comprimento também deve ser apertado para a uma maior aderência na conexão.

O próximo passo é fixar o suporte metálico na mesa de coordenadas. Primeiramente retirar os parafusos Allen M8 já existentes nesta, depois se posiciona o suporte no seu lugar correspondente para que possam ser colocadas as arruelas e os parafusos Allen M8 de 40 mm de comprimento. Depois de posto os parafusos, colocar na sua outra extremidade uma porca para cada parafuso.

Depois prender também o acoplamento ao eixo rotor do motor de passo, apertando naquele um parafuso M4 Allen de 8 mm de comprimento exatamente no rebaixo que se encontra no eixo do motor de passo, pois se o parafuso fosse fixado na própria circunferência do eixo rotor ele iria deslizar e não transferiria sua rotação ao acoplamento flexível, coisa que não acontece quando aquele é fixado no rebaixo, pois este serve para evitar o deslizamento na hora da rotação. Assim como para o eixo da mesa, é necessário apertar outro parafuso M3 de 14 mm de comprimento para maior adesão.

Finalmente irão ser fixados os quatros parafusos Allen M5 de 16 mm de comprimento. Em cada parafuso deve-se por uma arruela na extremidade de sua cabeça antes de passá-lo pelo furo e, depois de passado o parafuso pelo furo, colocar na outra extremidade uma porca.

Este procedimento é igual para os dois suportes de aço, com exceção de que quando for fixar o suporte 2 na mesa de coordenadas deve-se ajustá-lo para que fique coaxial o eixo rotor do motor de passo ao eixo da mesa de coordenadas, ajuste esse que se torna possível devido ao rasgo realizado na sua fabricação.

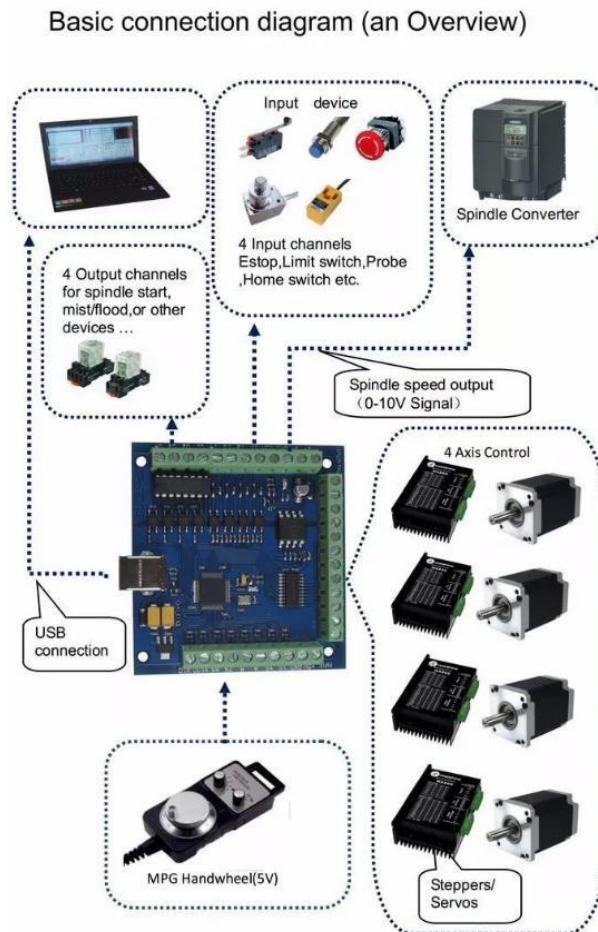
3.3 Definição da parte eletrônica

O objetivo inicial do trabalho era implementar o Comando Numérico Computadorizado (CNC) na mesa de coordenadas usando o software comercial Mach 3, a partir daí foi procurado uma placa controladora que pudesse fazer uma interface compatível do software com os motores de passo NEMA 23. Depois de feita uma pesquisa no mercado e em outros projetos já existentes de uma máquina-ferramenta controlada por CNC foi então escolhida a placa STB4100 e os drivers TB6600 que controlam por meio de pulsos elétricos os motores de passo, sendo essa a interface do CNC.

Tratando-se da placa controladora STB4100 temos que ela oferece uma frequência máxima de pulso-passo de 100 kHz. Possui 4 saídas para 4 eixos independentes,

possibilitando adaptá-la a qualquer máquina-ferramenta que possua até 4 graus de liberdade, sendo geralmente 2 movimentos de translação (Eixo X e Eixo Y) para a mesa de coordenadas, 1 movimento de translação (Eixo Z) e 1 de rotação (Eixo A) para o suporte onde fica a ferramenta, visto que talvez seja necessário que a ferramenta usine a peça com uma certa inclinação. Têm ainda 4 saídas para controle de dispositivos em geral como os de acionamento do spindle ou do fluido refrigerante. Possui também 4 entradas para acessórios diversos para máquinas-ferramentas como por exemplo botão de parada de emergência, sensor para limite dos eixos, etc. Além de possuir uma conexão para manivela eletrônica (MPG) e uma saída DAC 0-10V PWM para regular a velocidade do spindle.

Figura 29 – Imagem da placa controladora STB4100

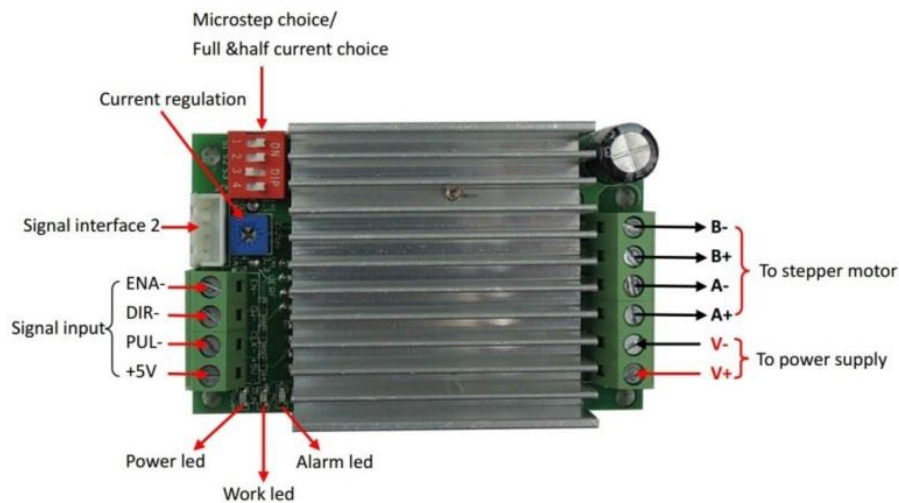


Fonte: MACH3 [201-?].

Os drivers vão receber os sinais eletrônicos dos pulsos (CLK-) dos motores de passo e a direção de rotação (CW-) do seu eixo rotor vindos da placa controladora. Esse sinal recebido será repassado para as saídas conectadas aos motores de passo por meio de correntes

elétricas que energizam as bobina A (A+ e A-) e a bobina B (B+ e B-). No próprio driver pode-se controlar a quantidade de micro-passos por revolução do eixo rotor por meio de interruptores (S1, S2 e S3), que ao serem ligados ou desligados em determinada combinação mudam o passo como se pode ver na Figura 31. O interruptor S4 para controlar se se passará corrente completa (desligado) ou meia corrente (ligado).

Figura 30 – Imagem do driver TB6600



Fonte: Marlin P. Jones & Assoc. Inc. [201-?].

Figura 31 – Micro passos do motor de passo controlado pelo driver

Microstep	S1	S2	S3
1	OFF	OFF	ON
2	OFF	ON	OFF
4	ON	OFF	OFF
8	ON	OFF	ON
16	ON	ON	OFF

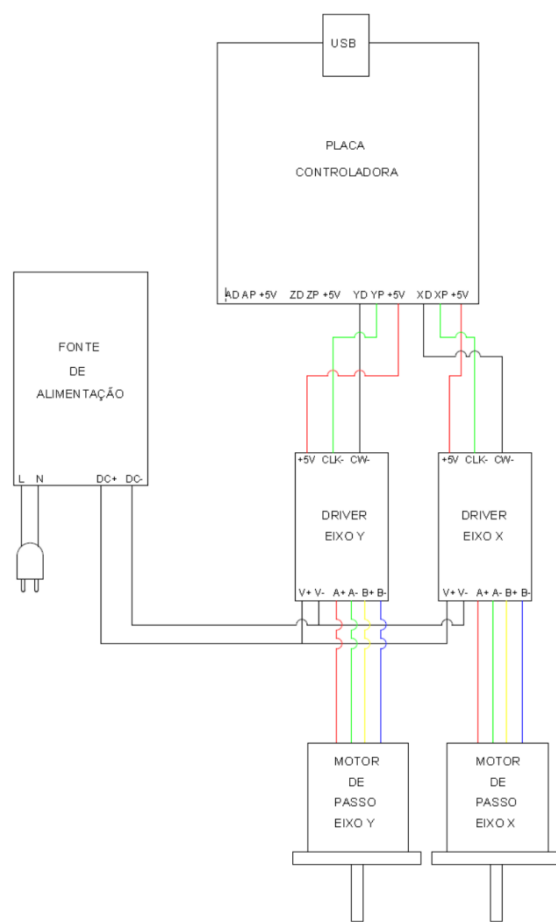
Fonte: Marlin P. Jones & Assoc. Inc. [201-?].

É importante ressaltar que esses pulsos são transmitidos separadamente para cada driver, de modo que cada um deles irão receber sinais eletrônicos diferentes. Portanto quando se especifica as coordenadas no software pelo comando G00 ou G01 elas serão traduzidas em sinais eletrônicos que serão transmitidos a placa controladora, a qual repassará o sinal

específico da coordenada X para o driver que controla o eixo X e assim por diante. De modo que um motor de passo funciona independente dos outros.

Foi ainda necessário conectar uma fonte de alimentação de 12 V e 20 A aos drivers para a alimentação destes, ficando o circuito de comando dos motores de passo igual como está na Figura 32. Foi utilizada uma fonte com potência muito maior do que o necessário para o caso em questão, já se pensando em trabalhos futuros em que poderão ser utilizados quatro drivers.

Figura 32 – Esquema eletrônico do circuito de comando dos motores de passo



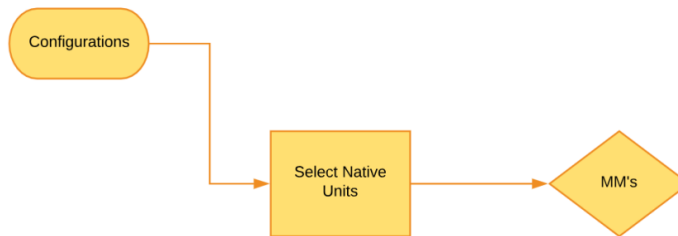
Fonte: elaborado pelo autor.

3.4 Configuração do software Mach3 para a mesa de coordenadas MR-25

Quando se conectou todo o sistema eletrônico aos motores de passo, e estes à mesa de coordenadas, foi necessário configurar o software Mach3 segundo as suas especificações.

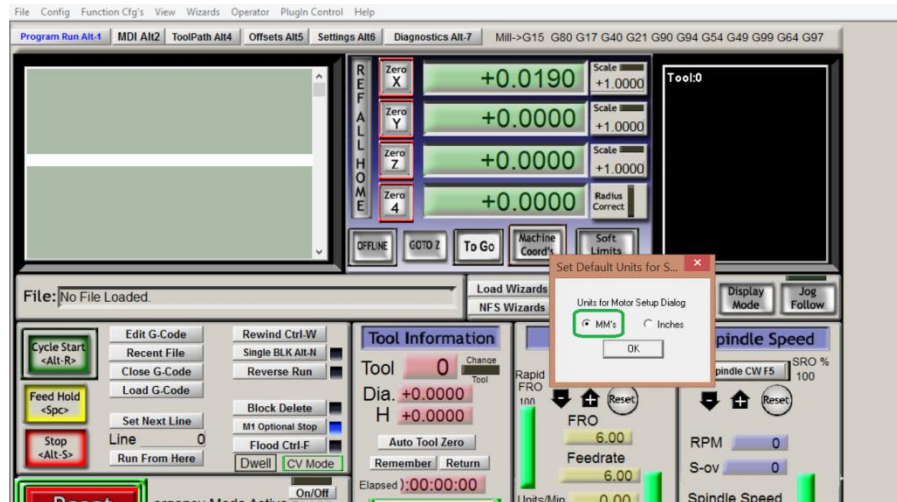
O primeiro passo foi colocar a unidade métrica como padrão, para isso em Configurations foi acessado a opção Select Native Units e foi escolhido a unidade milímetros.

Figura 33 – Fluxograma para configurar unidade padrão



Fonte: elaborado pelo autor.

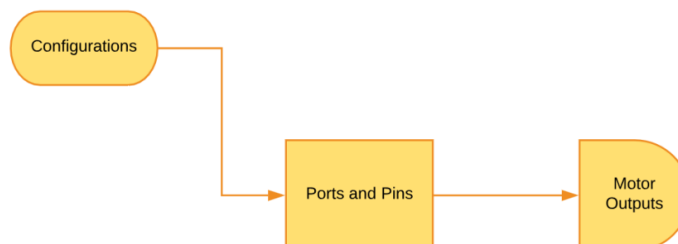
Figura 34 – Configuração da unidade padrão



Fonte: elaborado pelo autor.

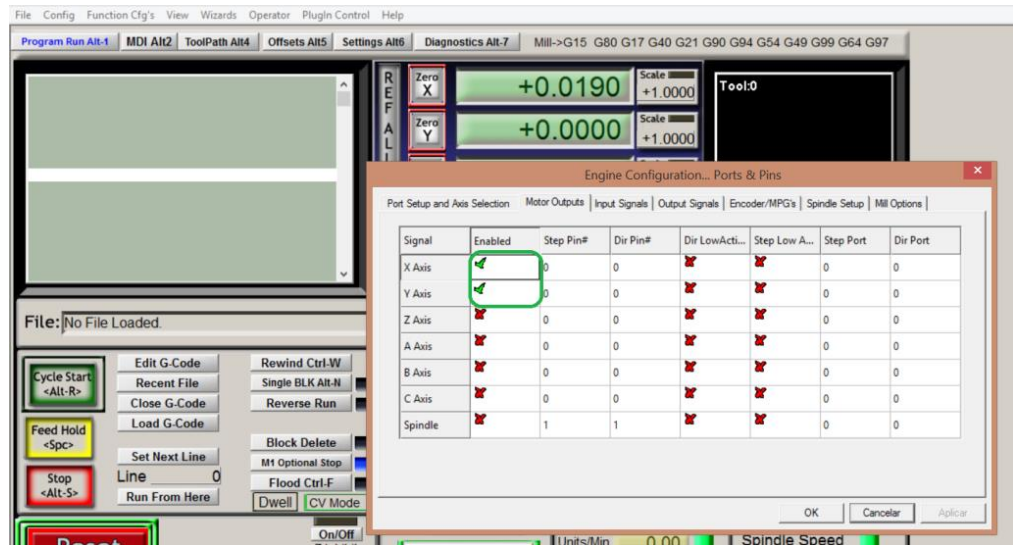
O próximo passo foi configurar os sinais de saída da placa controladora para o motor, para isso abriu-se a janela Ports and Pins em Configurations para ativar os eixos X e Y clicando em Enable na opção Motor Outputs como indicada na Figura 36.

Figura 35 – Fluxograma para configurar os sinais de saída da placa controladora



Fonte: elaborado pelo autor.

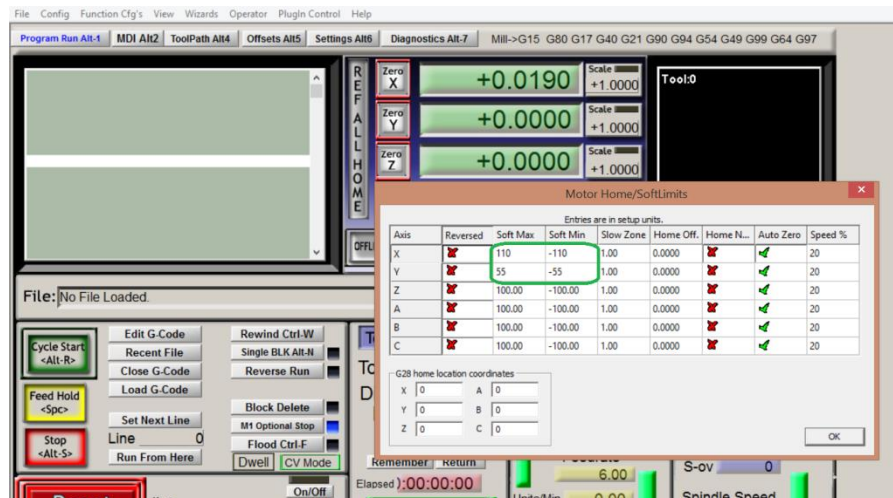
Figura 36 – Configuração dos sinais de saída da placa controladora para o motor



Fonte: elaborado pelo autor.

Depois abriu-se a janela Homing/Limits em Configurations para definir os limites da mesa de coordenadas. Foi definido para o eixo X que a mesa se movimentaria 110 mm para a direita e a mesma distância para a esquerda, totalizando 220 mm. Para o eixo Y foi definido que a mesa poderia se movimentar 55 mm para frente e o mesmo para trás, totalizando 110 mm. Por motivos de segurança na operação da mesa foram escolhidas distâncias de trabalho menores que as indicadas pelo fabricante, Figura 2. A mesa de coordenadas terá como ponto de coordenadas (0,0) quando estiver centralizada.

Figura 37 – Configuração dos limites de trabalho da mesa de coordenadas

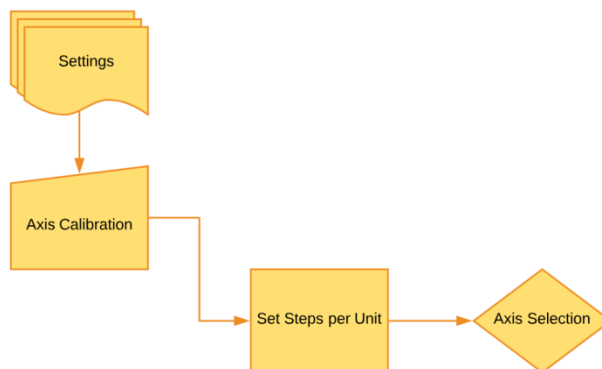


Fonte: elaborado pelo autor.

Depois foram configurados os interruptores dos próprios drivers para que os motores de passo deem 1 micropasso por revolução, de acordo com a Figura 31.

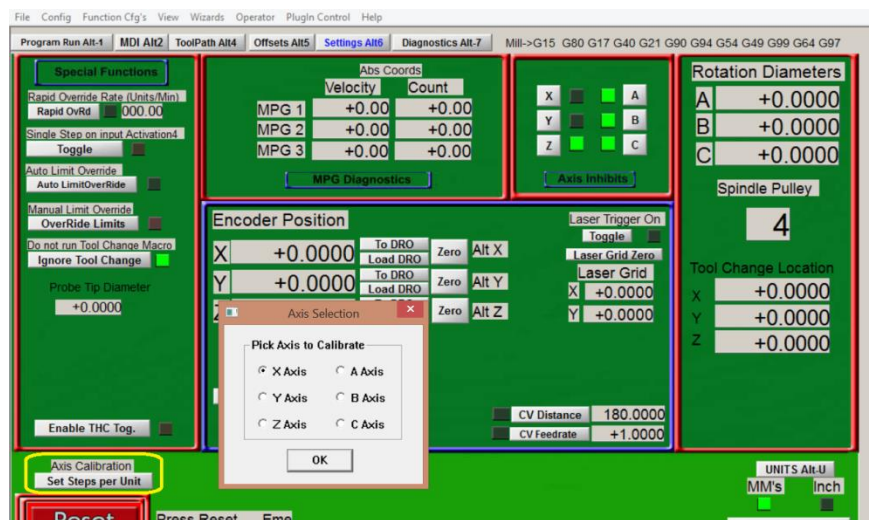
Voltando para o software, na janela Settings foi escolhido a opção Set Steps per Unit em Axis Calibration para calibrar os eixos da mesa de coordenadas, definindo a quantidade de passos que o motor de passo dará por unidade de milímetros. Seguindo os passos que o software pede, foi calibrado separadamente o eixo X e o eixo Y. Depois de calibrado os eixos, foi encontrado um valor aproximado de 52 passos por milímetros.

Figura 38 – Fluxograma para configurar a quantidade passos por milímetro



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 39 – Calibração dos eixos

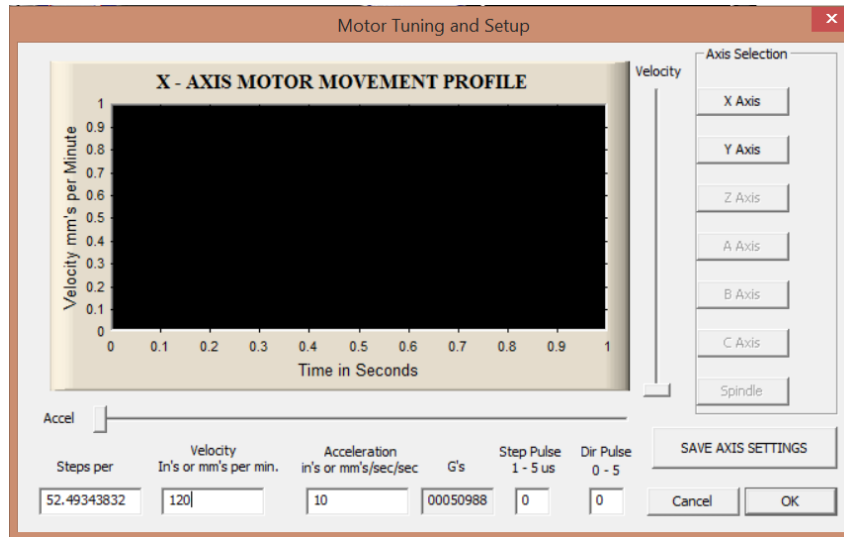


Fonte: elaborado pelo autor.

Depois foi aberta a janela Motor Tuning na opção Configurations para configurar os parâmetros dos motores de passo. Onde se encontra Steps per deve se encontrar o valor encontrado na calibração da mesa de coordenadas. Para a caixa Velocity (Velocidade) foi

colocado 120 mm/min e na caixa de Acceleration (Aceleração) foi colocado o valor de 10 mm/s², isso tanto para o eixo X como para o eixo Y.

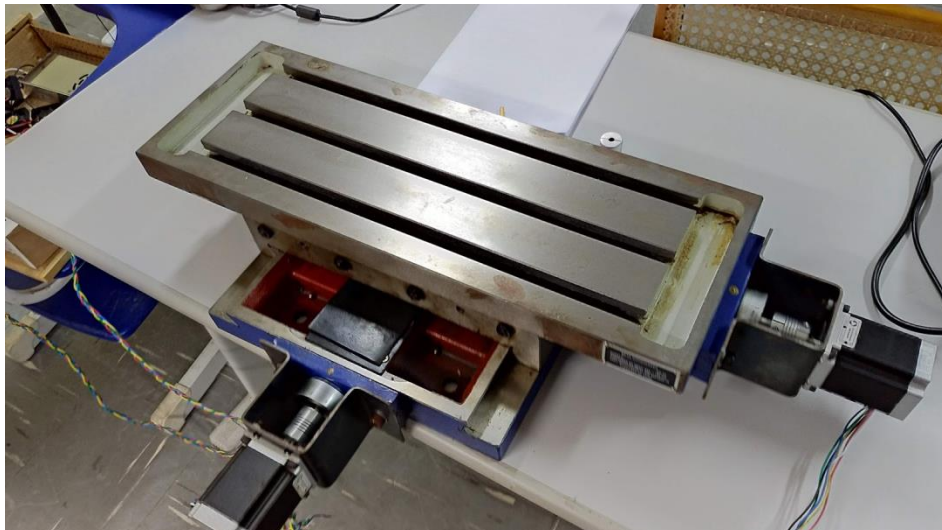
Figura 40 – Configuração dos parâmetros dos motores de passo



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim se conclui a configuração da mesa de coordenadas MR-25 usando o software Mach 3 como interface para o seu controle.

Figura 41 – Mesa de coordenada automatizada com os motores de passo



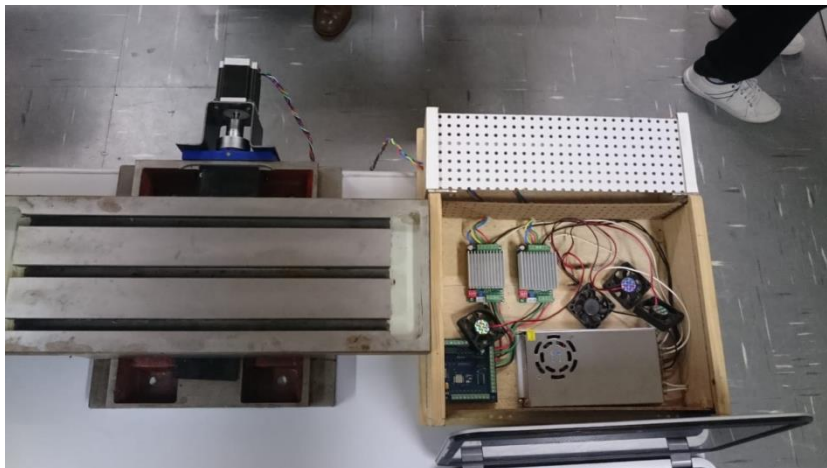
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 42 – Vista superior da mesa de coordenada automatizada com os motores de passo



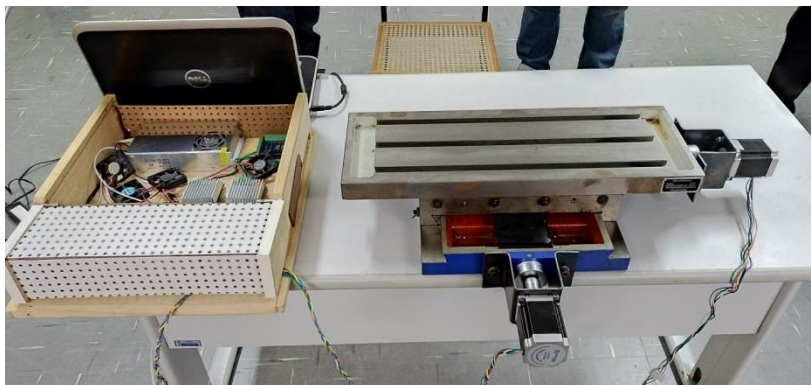
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 43 – Mesa de coordenada (esquerda) e sistema eletrônico utilizado (direita)



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 44 – Sistema integrado da mesa de coordenadas controlada por CNC



Fonte: elaborado pelo autor.

3.5 Componentes mecatrônicos e de fixação utilizados e seus respectivos custos

Depois de feito um apanhado de todos os componentes mecânicos, eletrônicos e de fixação empregados para a automatização da mesa de coordenadas, foi elaborada uma tabela com os custos necessários para a realização do trabalho.

Tabela 1 – Componentes utilizados com os seus respectivos custos

Componente	Quantidade	Valor unitário	Custo
Motor de passo	2	R\$ 150,00	R\$ 300,00
Acoplamento flexível	2	R\$ 30,00	R\$ 60,00
Suporte metálico	2	R\$ 6,00	R\$ 12,00
Placa controladora	1	R\$ 310,00	R\$ 310,00
Driver	2	R\$ 60,00	R\$ 120,00
Fonte de alimentação	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Parafuso M8	4	R\$ 0,90	R\$ 3,60
Parafuso M5	8	R\$ 0,35	R\$ 2,80
Porca M8	4	R\$ 0,15	R\$ 0,60
Porca M5	8	R\$ 0,05	R\$ 0,40
Arruela M8	4	R\$ 0,10	R\$ 0,40
Arruela M5	8	R\$ 0,05	R\$ 0,40
Outros	-	-	R\$ 10,50
		TOTAL	R\$ 870,70

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim se observa que com menos de novecentos reais é possível implementar o controle CNC em uma mesa de coordenadas, e assim aumentar consideravelmente a rapidez e a precisão de um processo de usinagem.

4 CONCLUSÃO

Como resultado final a mesa de coordenadas foi completamente automatizada, sendo agora operada por Comando Numérico Computadorizado tendo como interface para o controle o software comercial Mach 3.

A mesa que antes funcionava manualmente por meio de manivelas terá a partir de então todo o seu controle dado pelo computador com o software Mach 3 instalado. Para movimentar os eixos X e Y deve-se agora gerar um código usando a linguagem G-code, já abordada anteriormente, que terá no seu texto o passo a passo do movimento de translação de cada eixo, ou seja, uma vez que é configurado os passos por unidade de milímetros, se descreverá no corpo do código G as distâncias que se quer movimentar os eixos, caso a configuração não for devidamente realizada o código lido pela máquina fará a mesa se movimentar em distâncias diferentes daquela desejada. Pode ser necessário movimentar os eixos da mesa quando o código não está sendo lido, para isso usam-se as setas do teclado do computador.

A finalidade do trabalho que era realizar na prática a automatização de uma mesa de coordenadas para servir de modelo para trabalhos futuros na mesma área foi cumprida, mostrando o funcionamento da mesa de coordenadas e todo o processo do projeto desde o seu início referente ao design e fabricação dos suportes dos motores de passo, os elementos de fixação e acoplamento, os componentes elétricos e a parte necessária de configuração do Mach 3.

O trabalho realizado pode ainda ser utilizado para realização de projetos subsequentes, como o acoplamento da mesa de coordenadas em uma máquina-ferramenta com comando manual, seja ela uma furadeira ou uma fresadora, que poderá agora ter os seus dois eixos X e Y operados pelo Mach 3, de maneira que se reduza consideravelmente o tempo de operação da máquina e aumente a sua precisão.

REFERÊNCIAS

- ARTSOFT EUA. **Mach3 controle de CNC**: a instalação do software e configuração. Tradução de Maurício Dias. Versão 3. 2008.
- CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO. Departamento Acadêmico de Mecânica e Materiais. **Apostila de programação CNC 2D torno much 9**. São Luis, 2006. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/47512589/apostila-CNC-2D-MACH-9>>. Acesso em: 23 mar. 2018.
- DOYLE, L. E. *et al.* **Processos de fabricação e materiais para engenheiros**. Tradução de Roberto Vieira *et al.* São Paulo: Blucher, 1978. p. 11-15; 334-406; 441-458; 475-493.
- FITZPATRICK, Michael. **Introdução à manufatura**. Tradução de Sergio Almeida *et al.* Porto Alegre: AMGH, 2013. p. xiii.
- INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 6983-1**: automation systems and integration – numerical control of machines – program format and definitions of address words. 2th ed. 2009.
- KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, S. R. **Manufacturing engeneering and technology**. 6th ed. New Jersey: Pearson, 2009. p. 1-6; 553-674; 1049-1092.
- KENJO, Takashi. **Stepping motors and their microprocessor controls**. New York: Oxford University Press, 1986. p. 1-64; 221-239.
- MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. p. 15-37.
- MACH3 usb motion card (STB4100): instalation manual. Version 2.1. [201-?]. il. color.
- MANROD. manrod.com.br. **Manrod quality machines**. 2018. Disponível em: <<http://manrod.com.br/produto/mesas-coordenadas-mr-22>>. Acesso em: 10 jan. 2018. il. color.
- MARLIN P. JONES & ASSOC. INC. **Datasheet stepmotor driver**. Lake Park, [201-?]. il. color.
- MERCADO LIVRE. mercadolivres.com.br. **Acoplamento flexível 6x8 mm Alumínio Kit 4 peças**. 2018. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1032600392-acoplamento-flexivel-6x8-mm-6x8mm-aluminio-kit-4-pecas-_JM>. Acesso em: 17 jan. 2018. il. color.
- NEO MOTION. **Datasheet de produto**: motores de passo. 2018. Disponível em: <<https://neomotion.com.br/motor-de-passo/>>. Acesso em: 13 jan. 2018. il. color.
- NORTON, Robert. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Tradução de Konstantinos Stavropoulos *et al.* 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 867, il. color.

PEREIRA, Giancarlo Medeiros; SCHNEIDER, Felipe Carlos. **Disciplina de comando numérico computadorizado (CNC)**. São Leopoldo, 2002. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/mendes007/78662181-cnc>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

SENAI. **Comando numérico computadorizado**. Campinas, [entre 2002 e 2018]. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/renanribeiro/apostila-torno-cnc-fanuc-21i>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

VIANNA, Filipi Damasceno. **Prática de oficina: processos de fabricação**. Porto Alegre: [s. n.], 2002.