

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

EDINALDO SERRA CARDOSO JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA CNC PARA A FABRICAÇÃO DE
ENCOSTOS ANATÔMICOS E PERSONALIZADOS EM BLOCOS DE ESPUMA**



Ilha Solteira - SP
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EDINALDO SERRA CARDOSO JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA CNC PARA A FABRICAÇÃO DE
ENCOSTOS ANATÔMICOS E PERSONALIZADOS EM BLOCOS DE ESPUMA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches
Orientador

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C268d Cardoso Júnior, Edinaldo Serra.
Desenvolvimento de máquina CNC para a fabricação de encostos anatômicos e personalizados em blocos de espuma / Edinaldo Serra Cardoso Júnior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
114 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2024

Orientador: Marcelo Augusto Assunção Sanches
Inclui bibliografia

1. Máquina Cnc. 2. Estabilização. 3. Adequação postural. 4. Tecnologia assistiva. 5. Paralisia cerebral.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Foi projetada e desenvolvida uma máquina de Controle Numérico Computadorizado (CNC) com o objetivo de fabricar encostos anatômicos e personalizados para pessoas com Paralisia Cerebral (PC), proporcionando-lhes estabilização, redução das dores, adequação postural e prevenção do surgimento de úlceras de pressão. A intenção é tornar essa tecnologia mais acessível às pessoas com PC, uma vez que a demanda por Tecnologia Assistiva desse tipo é significativa e poucos lugares, como a Rede de Reabilitação Lucy Montoro, a AACD e a Rede SARAHA, oferecem esse serviço, que além de ter um custo elevado na fabricação, esses lugares geram longas filas de espera.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

A CNC (Computer Numeric Control) machine was designed and developed to manufacture anatomical and customized backrests for individuals with Cerebral Palsy (CP), providing them with stabilization, pain reduction, postural adjustment, and prevention of pressure ulcers. The aim is to make this technology more accessible to people with CP, as the demand for such Assistive Technology is significant. Few places, such as the Lucy Montoro Rehabilitation Network, AACD, and the SARAHA Network, offer this service. Besides having a high manufacturing cost, these places generate long waiting queues for individuals with CP.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA CNC PARA A FABRICAÇÃO DE ENCOSTOS ANATÔMICOS E PERSONALIZADOS EM BLOCOS DE ESPUMA

AUTOR: EDINALDO SERRA CARDOSO JÚNIOR

ORIENTADOR: MARCELO AUGUSTO ASSUNÇÃO SANCHES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCELO AUGUSTO ASSUNÇÃO SANCHES (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ADALBERTO VIEIRA CORAZZA (Participação Virtual)
Faculdade de Medicina e Anatomia Humana / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Ilha Solteira, 06 de fevereiro de 2024

gov.br

Documento assinado digitalmente

ADALBERTO VIEIRA CORAZZA

Data: 06/02/2024 12:22:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista primeiramente a Deus por ter abençoado essa jornada. A minha esposa, Leticia Cardoso, por todo o apoio e incentivo, por sempre estar ao meu lado me fortalecendo e me ajudando nessa jornada. Aos meus pais Edinaldo Serra Cardoso e Raimunda Elita Ferreira da Silva por terem me apoiado desde o começo da minha busca por um futuro melhor e por terem me ensinado a lutar pelos meus sonhos. Aos meus familiares e amigos que sempre estiveram na torcida pelo meu sucesso.

Aos meus avós paternos Eneas Cardoso e Regina Serra.

Aos meus avós maternos Erderino Nunes da Silva (*In memoriam*) e Maria Ferreira da Silva.

Dedico também ao querido Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho, pela sabedoria compartilha, pelo apoio, incentivo e pela confiança depositada em minha pessoa. Ao meu querido Orientador Prof. Dr. Marcelo Augusto de Assunção Sanches, pela orientação, conselhos, companheirismo, pelo compartilhamento de conhecimento e por todo o apoio que tem me proporcionado nessa jornada.

Aos queridos amigos Prof. Dr. Fernando Yoiti Obana e Prof. Dr Max Robert Marinho pelos conselhos, pelo carinho e amizade que se estendeu desde a graduação.

Aos meus avós Silvio e Eunice de Souza que o matrimônio me concedeu.

A minha sogra Maria Cláudia Carvalho e meu sogro Luiz Carlos Barbosa.

Dedico também aos meus padrinhos e conselheiros Luciano Batista (*In memoriam*) e Ana Paulla Batista.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus por me conceder saúde e sabedoria para percorrer este caminho. A minha esposa Leticia de Souza Cardoso, que desde o namoro, me ajudou em todos os momentos, que sempre me incentivou e me inspirou a ser melhor, que sempre foi paciente comigo e me aconselhou nos momentos difíceis.

Aos meus pais que me ajudaram desde o início dessa jornada, sempre me incentivando e buscando me proporcionar o melhor para que eu alcançasse meus sonhos.

Aos meus queridos colegas e companheiros do LIEB (Laboratório de Instrumentação e Engenharia Biomédica) que ajudaram direta ou indiretamente nesta pesquisa.

Aos professores Dr. Aparecido Augusto de Carvalho, Dr. Marcelo Augusto de Assunção Sanches, Dr. Fernando Yoiti Obana, Dr. Max Robert Marinho, Dr. Adalberto Corazza, Dr. Elcio Alteris, por todo incentivo, conhecimento, auxílio e conselhos durante esta jornada e pela confiança depositada em minha pessoa e em meu trabalho.

Aos meus irmãos e irmãs por acreditarem em meu potencial e a todos os amigos e colegas que compartilharam desta jornada juntamente comigo e que ajudaram a tornar esse sonho em realidade.

Aos meus familiares e de minha esposa que sempre torceram pelo meu sucesso e sempre me deram total apoio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Em seu coração o homem planeja o seu caminho,
mas o Senhor determina os seus passos.”
(BÍBLIA, 2008)

RESUMO

Na presente pesquisa foi desenvolvida uma máquina de Controle Numérico Computadorizado (CNC), cuja função principal é a fabricação de encostos anatômicos e personalizados em blocos de espuma flexível através do processo de usinagem, visando atender, sobretudo, pessoas com Paralisia Cerebral (PC) que necessitam de estabilização e adequação postural. No âmbito do desenvolvimento de recursos de Tecnologia Assistiva, a demanda por adequação postural na posição sentada é significativa, especialmente para indivíduos com PC que dependem de cadeiras de rodas. A personalização é um fator crucial para essas tecnologias, mas o alto custo e a elevada procura resultam em grandes filas de espera e uma oferta limitada. Infelizmente, essa limitação impede que pessoas com PC desfrutem de melhorias funcionais, independência, qualidade de vida e inclusão social. Conscientes desses desafios, optou-se por utilizar a tecnologia CNC para desenvolver uma máquina que agilize o processo, reduza custos e mantenha a qualidade. Essa iniciativa visa proporcionar um suporte de vida eficiente, contribuindo para uma vida digna, maior independência e qualidade de vida para pessoas com deficiência (PcD). Desse modo, a máquina CNC desenvolvida incorpora software e hardware de código aberto, o que resulta em uma redução significativa nos custos de construção. A fase inicial envolveu a prototipagem da máquina por meio de um software CAD, permitindo uma análise detalhada dos custos e a flexibilidade para realizar ajustes necessários durante o desenvolvimento. A máquina CNC é altamente escalável e personalizável, possibilitando sua aplicação em diversos processos, como usinagem de diferentes materiais e outros procedimentos típicos de máquinas CNC. Realizou-se testes iniciais de desbaste em blocos de espuma flexível, utilizando um spindle a 12.000 RPM e uma fresa de topo reto para corte em materiais plásticos. A máquina CNC demonstrou acurácia no processo, conforme previsto no desenho 3D. Posteriormente, pretende-se executar o processo de fabricação de um encosto anatômico personalizado com base em um modelo real obtido por digitalização 3D. A expectativa é que esse avanço concreto resulte em melhorias significativas na qualidade de vida para indivíduos com Paralisia Cerebral.

Palavras-chave: máquina CNC; estabilização; adequação postural; tecnologia assistiva; paralisia cerebral.

ABSTRACT

In the present research, a Computer Numerical Control (CNC) machine was developed, whose primary function is to manufacture anatomical and customized backrests in flexible foam blocks through machining processes. The main aim is to cater, especially, to individuals with Cerebral Palsy (CP) who require stabilization and postural adjustment. In the field of Assistive Technology development, there is a significant demand for postural adjustment while seated, particularly for individuals with CP who rely on wheelchairs. Customization is a crucial factor for these technologies, but high costs and high demand result in long waiting queues and limited availability. Unfortunately, this limitation hinders individuals with CP from enjoying functional improvements, independence, quality of life, and social inclusion. Aware of these challenges, we chose to use CNC technology to develop a machine that streamlines the process, reduces costs, and maintains quality. This initiative aims to provide efficient life support, contributing to a dignified life, greater independence, and improved quality of life for people with disabilities (PwD). The developed CNC machine incorporates open-source software and hardware, resulting in a significant reduction in construction costs. The initial phase involved prototyping the machine using CAD software, allowing for a detailed cost analysis and flexibility to make necessary adjustments during development. The CNC machine is highly scalable and customizable, enabling its application in various processes such as machining different materials and other typical CNC machine procedures. Initial tests involved roughing cuts on flexible foam blocks using a 12,000 RPM spindle and a straight-end mill for cutting plastic materials. The CNC machine demonstrated accuracy in the process, as envisioned in the 3D design. Subsequently, the plan is to execute the manufacturing process of a customized anatomical backrest based on a real model obtained through 3D scanning. The expectation is that this concrete advancement will result in significant improvements in the quality of life for individuals with Cerebral Palsy.

Keywords: CNC machine; stabilization; postural adjustment; assistive technology cerebral palsy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Posicionamento correto da pelve na postura sentada.....	36
Figura 2	- Diagrama conceitual para distribuição da pressão de contato.....	40
Figura 3	- Distribuição de pressão para diferentes tipos de assento.....	42
Figura 4	- Funcionamento do encosto na postura sentada.....	44
Figura 5	- Tipos de Fresamento: (a) Fresa cilíndrica tangencial, (b) Fresa cilíndrico frontal e (c) Fresa de topo com haste cilíndrica.....	48
Figura 6	- Mapa de seleção de rotações e avanços para espumas de poliuretano.....	49
Figura 7	- Modelo 3D da Máquina <i>Router</i> CNC modelado no Inventor© 2023.....	54
Figura 8	- Perfis Estruturais de Alumínio V-Slot Preto – Canal 6.....	55
Figura 9	- Base Estrutural da Máquina Router CNC em Perfil Estrutural em Alumínio.....	56
Figura 10	- Modelo 3D das peças do eixo Y (Y2) divididas nas partes A, B e C.....	57
Figura 11	- Partes A, B e C do conjunto de movimentação do eixo Y (Y2) montadas.....	58
Figura 12	- Conjunto de movimentação direito do eixo Y (Y2).....	58
Figura 13	- Conjunto completo de Movimentação do eixo Y montado (Y1 e Y2).....	59
Figura 14	- Modelo 3D das peças do eixo Y (Y1) divididas em partes.....	59
Figura 15	- Modelo 3D das peças do eixo Y (Y1) modificadas.....	60
Figura 16	- Conjunto de movimentação esquerdo do eixo Y (Y1).....	60
Figura 17	- Modelo 3D da Estrutura do conjunto de movimentação do eixo X.....	61
Figura 18	- Conjunto de movimentação do eixo X montado.....	62
Figura 19	- Modelo 3D do Conjunto de Movimentação do eixo Z.....	62
Figura 20	- Conjunto de movimentação do eixo Z montado.....	63
Figura 21	- Microcontrolador ATmega328P.....	65
Figura 22	- CNC Shield V3.....	66
Figura 23	- Driver de Potência DRV8825.....	67

Figura 24	- Motor de Passo Nema 17.....	69
Figura 25	- Sensor <i>Endstops</i> – Chave Fim de Curso.....	70
Figura 26	- Posicionamento dos sensores <i>endstops</i> na máquina CNC.....	71
Figura 27	- Motor Spindle 500w Er11 CNC Router Fonte CA110/220V.....	72
Figura 28	- Spindle fixado ao eixo Z da Máquina CNC.....	72
Figura 29	- Diagrama de conexão dos componentes eletrônicos da Máquina CNC.....	73
Figura 30	- Montagem do gabinete do hardware de controle da máquina CNC.....	73
Figura 31	- Configurações dos parâmetros do Grbl para a Máquina CNC.....	75
Figura 32	- Ilustração da Tela de Interface do Universal Gcode Sender Platform.....	77
Figura 33	- Interface do software CAD Inventor® Professional durante o processo de modelagem da máquina CNC.....	80
Figura 34	- Interface do software CAD Aspire®.....	81
Figura 35	- Modelo 3D da peça que será usinada no bloco de espuma flexível.....	88
Figura 36	- Geração da área de trabalho do material no software Aspire®....	89
Figura 37	- Processo de importação de arquivo 3D para o software Aspire®.....	89
Figura 38	- Posicionamento da peça para importação no software Aspire®...	90
Figura 39	- Definições do Material no software Aspire®.....	91
Figura 40	- Seleção dos principais parâmetros do percurso de desbaste 3D.....	91
Figura 41	- Configuração da Ferramenta de Corte utilizada no processo de Usinagem.....	92
Figura 42	- Visualização da simulação do processo de usinagem do material.....	93
Figura 43	- Ilustração 3D gerada pelo Aspire® após a realização da simulação de percurso.....	93
Figura 44	- Fresa utilizada para realizar o ensaio de usinagem no bloco de espuma.....	94
Figura 45	- Processo de instalação da fresa no spindle.....	95

Figura 46	- Posicionamento do bloco de espuma flexível na base da máquina CNC.....	95
Figura 47	- Realização do processo de comunicação serial entre o software de controle e a máquina CNC.....	96
Figura 48	- Processo de comunicação do software de controle com a máquina CNC.....	97
Figura 49	- Realização do processo de seleção do ponto inicial da máquina CNC.....	97
Figura 50	- Posicionamento correto da fresa em relação ao bloco de espuma flexível.....	98
Figura 51	- Realização do processo de abertura do arquivo g-code.....	99
Figura 52	- Exibição do arquivo aberto na interface do software de controle...	99
Figura 53	- Inicialização do processo de usinagem no software de controle...	100
Figura 54	- Processo de usinagem por desbaste realizado na máquina CNC.....	100
Figura 55	- Bloco de espuma flexível após a realização do processo de usinagem com a máquina CNC.....	101
Figura 56	- Máquina LIEB Router CNC montada.....	102
Figura 57	- Medidas em perspectiva do modelo utilizado no desbaste 3D (mm).....	103
Figura 58	- Medidas do recorte do modelo utilizado no desbaste 3D (mm).....	103
Figura 59	- Medidas da peça após o processo de usinagem (mm).....	104
Figura 60	- Medidas referente a profundidade de cada degrau (mm).....	105
Figura 61	- Medidas da largura dos degraus (mm).....	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Estudos para avaliação da usinagem de espumas flexíveis.....	25
Quadro 2	- Categorias de Tecnologia Assistiva.....	33
Quadro 3	- Categorias de <i>Seating</i>	35
Quadro 4	- Componentes de uma Cadeira de Rodas segundo Marcon <i>et al.</i> , (2021).....	38
Quadro 5	- Características da cadeira de rodas segundo Teixeira <i>et al.</i> , (2002).....	38
Quadro 6	- Especificação de modelos de assentos para CR segundo Teixeira <i>et al.</i> , (2002)	39
Quadro 7	- Configuração da resolução de passo dos motores.....	67
Quadro 8	- Sensores e suas funcionalidades.....	70
Quadro 9	- Legendas da interface de controle do Universal Gcode Sender Platform.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Inclinação do encosto antes de 1972 segundo Harrison <i>et al.</i> , (1999).....	43
Tabela 2	- Especificações do INER para espumas flexíveis de PU.....	51
Tabela 3	- Tabela de Biótipo, Selo de Qualidade Pró-Espuma.....	51
Tabela 4	- Relação de custo das máquinas CNCs comerciais com a mesma área de trabalho ou aproximada a LIEB Router CNC descrita nesta pesquisa.....	87
Tabela 5	- Análise da acurácia da máquina CNC com base nas medidas obtidas	106

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AACD	Associação de Assistência à Criança Deficiente
ADA	<i>American with Disabilities Act</i>
A	Ampere
AC	<i>Alternating Current</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAA	Comunicação Aumentativa e Alternativa
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CG	Centro de Gravidade
CLP's	Controladores Lógicos Programáveis
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CR	Cadeira de Rodas
DC	<i>Direct Current</i>
DIY	<i>do it yourself</i>
GPLv3	<i>General Public License Version 3</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHC	Interface Homem Computador
INER	Instituto Nacional de Estudos do Repouso
LIEB	Laboratório de Instrumentação e Engenharia Biomédica
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MIPS	<i>Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NC	<i>Numeric Comands</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PC	Paralisia Cerebral
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PcD	Pessoa(s) com Deficiência
PU	Poliuretano
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>

RPM	Rotação Por Minuto
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
TA	Tecnologia Assistiva
ULA	Unidade Lógica e Aritmética
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V	Volt
3D	Tridimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVO.....	23
1.1.1	Objetivo Geral.....	23
1.1.2	Objetivos Específicos.....	23
1.2	JUSTIFICATIVA.....	23
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO.....	24
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	26
3.1	ORIGEM E EVOLUÇÃO DAS MÁQUINAS AUTOMATIZADAS.....	26
3.2	TIPOS DE MÁQUINAS CNC.....	27
3.2.1	Fresadora CNC.....	28
3.2.2	Laser CNC.....	29
3.2.3	Torno CNC.....	28
3.2.4	Router CNC.....	30
3.3	TECNOLOGIA ASSISTIVA (TA).....	31
3.3.1	Categorias de Tecnologia Assistiva.....	33
3.3.1.1	<i>Adequação postural.....</i>	<i>34</i>
3.3.2	Adequação da Postura Sentada: Seating.....	35
3.3.2.1	<i>Assentos.....</i>	<i>37</i>
3.3.2.2	<i>Encostos.....</i>	<i>42</i>
3.4	USO DE MÁQUINAS CNC NA TECNOLOGIA ASSISTIVA.....	46
3.4.1	Usinagem CNC.....	47
3.4.2	Usinagem em Blocos de Espuma Flexível.....	48
3.5	ESPUMAS POLIMÉRICAS FLEXÍVEIS.....	49
3.5.1	Principais Características e Propriedades das Espumas Flexíveis de Poliuretano.....	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1	PROTOTIPAGEM E CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA CNC.....	53

4.1.1	Modelagem 3D do Protótipo da Máquina CNC.....	53
4.1.2	Montagem Estrutural e Mecânica da Máquina CNC.....	54
4.1.2.1	<i>Montagem do eixo Y e base do eixo X.....</i>	56
4.1.2.2	<i>Montagem do eixo X e base do eixo Z.....</i>	61
4.1.2.3	<i>Montagem do eixo Z.....</i>	62
4.1.3	Montagem Eletrônica da Máquina CNC: Hardwares Utilizados.....	64
4.1.3.1	<i>Microcontrolador utilizado na máquina CNC.....</i>	65
4.1.3.2	<i>CNC Shield V3.....</i>	66
4.1.3.3	<i>Driver de potência DRV8825.....</i>	67
4.1.3.4	<i>Motor de passo Nema17.....</i>	68
4.1.3.5	<i>Sensor endstops.....</i>	69
4.1.3.6	<i>Spindle – máquina ferramenta de corte.....</i>	71
4.1.3.7	<i>Esquemático da montagem eletrônica da máquina CNC.....</i>	72
4.1.4	Softwares Utilizados na CNC.....	74
4.1.4.1	<i>Firmware Grbl.....</i>	74
4.1.4.2	<i>Arduino® IDE 2.....</i>	75
4.1.4.3	<i>Universal G-code Sender Platform – software de controle.....</i>	76
4.1.5	Softwares CAD e CAM.....	79
4.1.5.1	<i>Autodesk Inventor® Professional – software de modelagem e simulação 3D.....</i>	79
4.1.5.2	<i>Aspire® - software para criar e cortar peças em uma fresadora CNC....</i>	80
4.2	RESOLUÇÃO DOS EIXOS DA MÁQUINA CNC.....	81
4.2.1	Resolução de Movimentação dos Eixos.....	84
4.3	ANÁLISE E COMPARATIVO DE CUSTOS.....	86
4.4	ENSAIO DE USINAGEM EM BLOCO DE ESPUMA FLEXÍVEL DE POLIURETANO D33.....	87
4.4.1	Processo I: Desenho e Geração do G-code para Usinagem.....	88
4.4.2	Processo II: Preparação da Máquina CNC e do Material a ser Usinado.....	94
4.4.3	Processo III: Utilização do Software de Controle para Usinagem no Bloco de Espuma Flexível de Poliuretano D33.....	98
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	102

5.1	ANÁLISE DO BLOCO DE ESPUMA PÓS PROCESSO DE USINAGEM NA MÁQUINA CNC.....	103
6	CONCLUSÃO.....	107
6.1	IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS: PROPOSTA.....	108
	REFERÊNCIAS.....	109
	APÊNDICE A – Materiais utilizados na construção da máquina CNC e seus respectivos custos.....	114

1 INTRODUÇÃO

Fundamentalmente, a tecnologia está inserida intrinsecamente no cotidiano da sociedade. Não diferindo deste preâmbulo, pode-se dizer da mesma forma que a tecnologia está presente também nas indústrias em seus mais variados setores, fazendo com que empresas e seus colaboradores se adequem às tendências tecnológicas adquirindo novas máquinas e equipamentos, tal que traga consigo aprimoramento técnico (Guimarães, 2013).

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico tem crescido exponencialmente tendo como consequência a substituição de máquinas-ferramentas operadas manualmente por máquinas-ferramentas automatizadas, originando a tecnologia NC (*Numeric Comands*, ou Comandos Numéricos) por volta de 1949, que posteriormente evoluiu e se tornou CNC (*Computer Numerical Comands*, ou Comando Numérico Computadorizado) (Leite *et al.*, 2017).

Segundo Leite *et al.*, (2017), a primeira máquina CNC foi originalmente desenvolvida no Instituto de Tecnologia Massachusetts (MIT), e somente por volta de 1982, com a expansão da indústria, se tornou popular entre empresas de pequeno e médio porte pela introdução de computadores de baixo custo.

Após esse período, o acrônimo CNC passou a ser denominado de *Computer Numerical Control* ou Controle Numérico Computadorizado, onde tal tecnologia pode ser definida como sendo um método avançado de automação, que por meio de instruções, permite o controle da movimentação e operação de máquinas-ferramentas, tendo como principais vantagens a eficiência, flexibilidade, redução de custo e tempo, e precisão (Verma; Gianchandani; Saroha, 2018).

Segundo Guimarães (2013), a tecnologia evolui a todo instante, o que acarreta no lançamento contínuo de novos produtos e máquinas com tecnologias cada vez mais avançadas. Dessa forma, surgem novos critérios industriais, como o aumento da precisão e da qualidade, altas taxas de produção e redução de custos de produção, que são atendidos somente com a utilização da tecnologia CNC devido à inexistência de limitações humanas, além de ser capaz de fabricar produtos altamente precisos em escalas nanométricas de maneira ágil e eficiente (Jayachandriah *et al.*, 2014).

Atualmente essa tecnologia é amplamente difundida, principalmente nas indústrias, onde suas aplicações percorrem desde a aeronáutica (Silva, 2019) e o

automobilismo (Artacho, 2015), elevando a precisão e qualidade dos produtos e possibilitando a fabricação de peças extremamente complexas em curtos períodos de tempo, até a medicina (Kindlein Junior; Cândido; Berto, 2009), possibilitando desde a criação de próteses e órteses a peças anatômicas para adequação postural de PcD (Pessoas com Deficiência).

Nessa perspectiva, segundo Marcon *et al.*, (2021, p.55), na área de desenvolvimento de recursos de Tecnologia Assistiva que aborda as grandes demandas voltados para a adequação postural em cadeiras de rodas e a personalização destes, tendo como um dos principais fatores o baixo custo envolvido, sabe-se que no cenário atual a flexibilização de produtos personalizados, ainda pode ser restrita para grande parte da população brasileira, em função dos altos custos de produção.

Possuindo um custo muito elevado tornando-se inacessível a maioria das pessoas, essa tecnologia, por meio do advento da internet nas últimas décadas e a popularização da cultura *maker*, possibilitou a criação e disseminação de projetos baseados na tecnologia CNC utilizada por grandes indústrias, possibilitando o desenvolvimento de projetos em pequena, média e grande escala podendo ser desenvolvida por estudantes e pesquisadores dessa área tecnológica (Dantas; Junior, 2016).

Desse modo, a popularização da tecnologia CNC possibilitou com que surgissem novas aplicações (Silva; Kindlein Júnior, 2011), principalmente na área da Tecnologia Assistiva (TA), dispondo de processos automatizados, como a usinagem CNC, trazendo agilidade em sistemas produtivos personalizados uma vez que é possível programar diferentes produtos para serem manufaturados na mesma máquina, além do estabelecimento de parâmetros como velocidade de rotação e avanço (Beretta, 2011).

Com base nesses conceitos, este trabalho visa apresentar o processo de desenvolvimento (desde o projeto a montagem), de uma máquina *router* CNC que posteriormente, será utilizada para realizar a fabricação de encostos anatômicos e personalizados para indivíduos que possuam alguma deficiência ou não, por meio do processo de usinagem em blocos de espuma flexível, proporcionando ao indivíduo adequação postural e melhoria de qualidade de vida.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma máquina *router* CNC (*Computer Numeric Control*) com capacidade para realizar o processo de usinagem em blocos de espuma flexível possibilitando a fabricação de encostos anatômicos personalizados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar e construir uma máquina *router* CNC de baixo custo com capacidade de realizar usinagem por desbaste em blocos de espuma flexível;
- Confeccionar peças anatômicas e personalizadas para adequação postural de PcD a partir de blocos de espuma flexível por meio do processo de desbaste;
- Por meio da utilização da máquina CNC, reduzir o tempo de confecção de peças personalizadas e do custo de aquisição das mesmas, tornando esse tipo de tecnologia mais acessível às PcD, proporcionando-lhes melhorias na qualidade de vida.
- Utilizar Hardwares e Softwares *open-source*

1.2 JUSTIFICATIVA

Na perspectiva voltada para a Tecnologia Assistiva (TA), vemos que há grande carência de se ter assentos e encostos anatômicos e personalizados, pois trazem melhorias significativas de saúde, postural, conforto e qualidade de vida para PcD. Porém, atualmente o maior problema a ser ultrapassado é a grande demanda por este recurso causando aumento do tempo de espera por parte dos indivíduos devido os centros especializados, como a Rede de Reabilitação Lucy Montoro, a AACD e a Rede SARA, que oferecem esse serviço, demandarem de custos elevados na fabricação (muitas vezes terceirizando o serviço) e oferta limitada, fazendo com que haja um aumento nas filas de espera.

Desse modo, com o desenvolvimento de uma máquina CNC, pretende-se proporcionar redução de custo e tempo, no processo de fabricação de peças anatômicas e personalizadas em espumas flexíveis, para atender as necessidades de PcD que fazem uso de cadeiras especiais (cadeira de rodas ou comum), por meio da

utilização de máquinas CNCs de baixo custo. Com a redução de custo no processo de fabricação, espera-se que essa tecnologia venha tornar-se acessível aos PcD que não possuem condições financeiras de arcar com o custo atual desse tipo de processo, além de diminuir o tempo de espera nas filas.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

No capítulo 1 realiza-se uma breve abordagem sobre o tema proposto no trabalho, bem como uma síntese do problema que se espera resolver a partir desta pesquisa. No capítulo 2 demonstra-se a metodologia de pesquisa que foi utilizada neste trabalho para gerar todo o referencial bibliográfico necessário. No capítulo 3 são abordados os fundamentos teóricos da pesquisa, conceitos sobre tecnologia CNC e sua aplicação na TA, Tecnologia Assistiva e adequação postural sentada com encosto e assento. No capítulo 4 descreve-se o processo de desenvolvimento da máquina Router CNC, desde o projeto até a montagem estrutural, mecânica e eletrônica. No capítulo 5 são apresentados os resultados da pesquisa, testes realizados com a máquina Router CNC, discussões referentes ao que foi alcançado e análise dos resultados obtidos. No capítulo 6 expõe-se as conclusões do trabalho, tendo em vista os objetivos propostos no início do trabalho e as perspectivas futuras para esta pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Após ser determinado o tema do estudo e das palavras-chaves em português e inglês, a saber: máquinas CNC (*CNC machines*); tecnologia assistiva (*assistive technology*); adequação postural (*postural adequacy*); postura sentada (*sitting posture*); assento (*seating*); encosto (*backrest*); espumas poliméricas flexíveis (*flexible polymeric foams*) usinagem de polímeros (*polymer machining*); usinagem de assentos (*machining of seats*); usinagem de encostos (*machining of backrests*); determinou-se o período de pesquisa que envolveu os anos de 2010 a 2023, porém durante a busca surgiram trabalhos científicos relevantes no período anterior ao proposto que deram grande contribuição para esta pesquisa. Viabilizando o material referencial necessário (artigos em jornal, periódicos, revistas, livros, teses e dissertações), as bases de dados utilizadas na pesquisa foram: *IEEE Explorer, Academic Google, ResearchGate, Europe PMC, ScienceDirect, PubMed, Taylor & Francis Online e Web of Science*.

É importante frisar, com base na justificativa apresentada para este trabalho, que após o desenvolvimento da máquina *router* CNC, pretende-se fazer a utilização da mesma para realizar a fabricação de peças anatômicas personalizadas em blocos de espuma flexível. Desse modo, podem ser destacadas as pesquisas elencadas no Quadro 1, expondo alguns dos principais trabalhos que demonstram e avaliam parâmetros de suma importância no processo de usinagem de espumas flexíveis.

Quadro 1 – Estudos para avaliação da usinagem de espumas flexíveis

AUTOR	ANO	RESULTADO DO ESTUDO
Shih, Lewis e Strenkowski	2004	Foram avaliados diferentes tipos de ferramentas, velocidades de corte e avanço para a usinagem de elastômeros.
Batista, Silva e Kindlein Junior	2010	Foram realizados experimentos preliminares de usinagem de espumas.
Silva e Kindlein Júnior	2011	Foi avaliada qualitativamente a usinagem de espumas utilizando diferentes ferramentas, velocidades de corte e de avanço em espumas flexíveis de poliuretano de densidades variadas.
Rockenbach	2011	Foi realizado o estudo dos efeitos dos parâmetros de usinagem, velocidade de avanço (vf), profundidade de corte (ap) e penetração de trabalho (ae), no fresamento de topo de uma espuma flexível de poliuretano D50 e a utilização da digitalização tridimensional a laser.
Gaio	2019	Foi realizado o estudo de parâmetros ótimos para a realização de usinagem em espumas de poliuretano de densidades D33 e D45, como sendo as mais indicadas na fabricação de assentos adaptáveis às cadeiras de rodas comerciais.

Fonte: Elaborado pelo Próprio autor.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 ORIGEM E EVOLUÇÃO DAS MÁQUINAS AUTOMATIZADAS

Originalmente a primeira máquina programável foi criada em 1801 pelo francês Joseph Marie Jacquard, a invenção consistia em um tear mecânico que dispunha de uma leitora automática de cartões que utilizava o Comando Numérico, e funcionava com instruções em binário que eram controlados automaticamente. Com o passar do tempo, essas ferramentas foram transformando-se em instrumentos, com propósitos cada vez mais especializados, até se tornarem em máquinas. Desse modo, pode-se considerar que máquinas são instrumentos complexos advindos da sofisticação de ferramentas, que por sua vez estendem os sentidos humanos (Costa, 2008).

As primeiras máquinas automatizadas eram constituídas por sistemas de comando formados por circuitos com válvulas eletrônicas a vácuo e outros componentes, ligados por fios elétricos. A evolução da tecnologia de materiais e componentes eletrônicos agilizaram o avanço das máquinas automáticas de controle numérico. Esses componentes e válvulas foram substituídos por transistores e os fios, por placas de circuito integrados. Entretanto, a ligação do sistema de comando continuava sendo feita de forma rígida, por meio de fiação com a máquina (Rosário, 2009).

Atualmente, esse tipo de equipamento permite a usinagem de peças com um nível de complexidade e precisão superiores se comparados às máquinas rotativas comuns operadas manualmente, podendo ser capaz de gerar curvas mais suaves. Porém, mesmo apresentando essa característica desejável, as peças demandadas pela indústria sempre apresentam um grau de complexidade e capacidade produtiva crescentes que exigem agilidade e precisão que não podem ser atingidos sem automatização e o intermédio de computadores (Costa, 2017).

Com a substituição de máquinas-ferramentas operadas manualmente por máquinas-ferramentas automatizadas, esse processo promoveu o surgimento da tecnologia de Comandos Numéricos (NC, acrônimo de *Numeric Comands*) desenvolvida por John Parsons por volta de 1949, que a posteriori, progrediu para Comando Numérico Computadorizado (CNC, acrônimo de *Computer Numerical Comands*) após seu ingresso no Instituto de Tecnologia Massachusetts (MIT, acrônimo de *Massachusetts Institute of Technology*) onde foi desenvolvida a primeira

máquina CNC. Essa tecnologia se popularizou somente por volta de 1982, uma década após a expansão nos setores da indústria, onde foi amplamente difundida entre as empresas de médio porte devido à introdução de computadores de custo reduzido (Leite *et al.*, 2017).

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) pode ser definido como o uso do computador para comandar o caminho da ferramenta cortante de uma máquina operatriz, tendo como consequência alta precisão no produto final e alta repetitividade com um mesmo programa, podendo-se ainda associar o comando CNC diretamente com o Desenho Assistido por Computador (CAD, acrônimo de *Computer Aided Design*), possibilitando realizar o produto diretamente a partir do projeto (Rosário, 2009).

Evoluindo para Controle Numérico Computadorizado, a tecnologia CNC passa a ser definida como um método avançado de automação, que por meio de instruções, proporciona a operação e controle da movimentação de máquinas-ferramentas, possuindo como principais vantagens a redução de custo e tempo, eficiência, flexibilidade e precisão (Verma; Gianchandani; Saroha, 2018).

Assim como o nome da tecnologia sugere, o controle da máquina é dado por valores numéricos que representam os pontos desejados do atuador e também codificam informações simbólicas com funções secundárias. Estes valores são codificados em letras e números, ou seja, em códigos alfanuméricos (JUNIOR, 2013).

Embora essas máquinas possuam as mesmas finalidades das máquinas universais, os procedimentos de trabalho da CNC causam ganho de produtividade por meio da redução do tempo de trabalho e da melhoria da qualidade dos produtos, suprimindo ou reduzindo trabalhos desnecessários, como paradas intermediárias para medições ou comparações da peça, que seriam realizadas de forma manual (Rosário, 2009).

3.2 TIPOS DE MÁQUINAS CNC

Pode-se considerar uma máquina CNC qualquer equipamento eletrônico que orienta ferramentas ao longo de trilhos organizados em um plano de coordenadas cartesianas (Polastrini, 2016). Segundo Gobi (2019), a movimentação de tais máquinas se dá por meio do uso de informações geométricas inseridas em um sistema de coordenadas cartesianas, dessa forma a máquina percorre os eixos podendo ter

como referência as dimensões da peça, partindo do seu ponto inicial, ou a coordenada inicial de trabalho da máquina.

Para que esses movimentos sejam realizados, a máquina possui um interpretador que realiza a conversão de coordenadas e comandos (arquivo *G-code*) em movimentos que podem variar conforme a necessidade de uso ou aplicação da máquina, por exemplo, os comandos para o acionamento de um laser no processo de gravação superficial de um objeto, o controle da velocidade de rotação de um *spindle* durante um processo de usinagem de uma Placa de Circuito Impresso (PCB, acrônimo de *Printed Circuit Board*) ou o simples avanço da ferramenta para uma determinada posição no plano cartesiano, dentre outras inúmeras aplicações (Polastrini, 2016).

De acordo com Polastrini (2016, p.19) existem diferentes tipos de máquinas CNC que possuem diferentes tipos de aplicações conforme a necessidade, sendo elas a fresadora, *router*, torno, máquina de corte a *laser* e plasma, gravadora de circuitos eletrônicos, inseridora de componentes eletrônicos SMD (*Surface Mount Device*), dobradoras automáticas, dentre outras.

3.2.1 Fresadora CNC

Muito utilizada na criação de formas que não podem ser geradas pela simples ação do avanço da peça trabalhada na frente da fresa (processo manual), a fresadora CNC permite a usinagem de moldes (protótipos) e matrizes altamente precisos. Atualmente, processos que antes eram realizados em escribes são realizados em fresadoras CNC (Groover, 1997).

Segundo Polastrini (2016), a fresadora CNC é uma máquina desenvolvida para usinar variados tipos de materiais, desde alumínio, cobre, aço e até mesmo titânio. Desse modo, essa máquina prioriza a força de deslocamento da ferramenta pelo plano cartesiano e não a velocidade de deslocamento da ferramenta.

Nas fresadoras CNC, o caminho que a fresa percorre no plano cartesiano é controlado por dados numéricos em vez de modelos físicos. As fresadoras CNC são especialmente adaptadas para operações de fresamento de perfis, fresamento de cavidades, fresamento de contornos superficiais e entalhes, em que dois ou três eixos da mesa de trabalho devem ser controlados simultaneamente. No processo de controle manual da fresadora, o operador é normalmente obrigado a trocar os

cortadores e carregar e descarregar peças de trabalho, já na fresadora CNC, esses processos são realizados de forma automatizada (Groover, 1997).

A forma de trabalho desse tipo de máquina consiste na fixação do material em uma base que se desloca nos eixos X e Y do plano cartesiano, enquanto o motor que gira a ferramenta de corte se desloca ao longo do eixo Z. Comparada a uma router CNC, o custo de uma fresadora CNC de mesma área de trabalho é maior, isso se dá devido aos diferentes materiais e equipamentos utilizados nas mesmas (Polastrini, 2016).

3.2.2 Laser CNC

Amplamente utilizada pelas indústrias do couro, automotiva, naval, robótica e aeronáutica, onde são frequentemente usadas para a fabricação de produtos por meio do corte ou gravação superficial em materiais, conhecido como laser CNC para corte e gravação (Munadi *et al.*, 2018).

Um laser CNC possui o funcionamento igual ao de uma router CNC, sendo diferenciado apenas pela ausência do eixo de deslocamento Z, onde é apenas acoplado um raio laser com potência ajustável que incide sobre o material, desse modo, o ajuste da potência permite definir se o material será cortado ou terá apenas a sua superfície gravada pelo raio laser (Polastrini, 2016). Um laser é um dispositivo mecânico que emite radiação eletromagnética, geralmente na forma de luz, por meio de um processo de emissão estimulada. Existem quatro tipos de lasers comumente usados em máquinas CNC, o laser de CO₂, *laser* de fibra, *laser* Yag, entre outros diodos laser (Munadi *et al.*, 2018). Segundo Polastrini (2016), uma máquina Laser CNC prioriza a velocidade de deslocamento, já que a ferramenta não tem contato com o material usinado.

3.2.3 Torno CNC

Pode-se considerar o torno como uma das primeiras e mais importantes máquinas-ferramenta, uma vez que dele derivaram todas as máquinas operatrizes que existem na atualidade. As principais características dessa máquina mecânica são associadas a dois tipos de movimentação: o avanço da ferramenta e a rotação da peça. A mecânica da movimentação do torno mais primitivo era composta por dois

suportes de madeira, onde o torneiro apoiava a ferramenta em um suporte, enquanto seu ajudante realizava a movimentação da peça em sentido rotatório puxando uma corda enrolada no eixo em que a peça estava fixada (Oliveira, 2019).

Sendo semelhante ao torno mecânico, porém, com um grande diferencial que se destaca por meio de um conjunto de motores e controladoras que automatizam o processo de usinagem de peças de revolução ou cilíndricas, o torno CNC possui duas bases sobre as quais se deslocam o eixo X (onde seu deslocamento determina o diâmetro da peça) e outro o eixo Z (onde seu deslocamento determina o comprimento da peça), desse modo o material (normalmente um bloco circular) é acoplado em uma castanha, que por sua vez é fixada em uma placa que é acoplada ao eixo central da máquina (denominado de eixo árvore) (Oliveira, 2022).

Segundo Oliveira (2019), em um torno a movimentação ocorre em apenas 2 eixos, diferenciando-se de uma fresadora CNC ou centro de usinagem, por essas máquinas operarem com a utilização de mais eixos de movimentação em comparação ao torno CNC. Além disso, em outras máquinas CNC, onde a ferramenta possui um movimento rotacional para perfurar e desbastar o material, a ferramenta mantém posição estática em seu eixo, sendo necessária a realização do giro do material acoplado ao eixo árvore, bem como também, as ferramentas utilizadas para trabalhar a peça deslocam-se ao longo dos eixos X e Z trabalhando no material e dando a sua forma projetada no desenho CAD (Polastrini, 2016).

3.2.4 Router CNC

Segundo Santos e Gonçalves (2021), *router* é a nomenclatura atribuída a uma máquina ferramenta que processa matérias-primas como: madeiras, plásticos, borrachas, acrílicos e outros. Além disso, as *CNCs Routers* possuem estruturas mecânicas que realizam o movimento da ferramenta ao longo dos eixos e a mesa de trabalho fica em uma posição estática.

Esse tipo de máquina é muito utilizada pelas indústrias nos processos de produção de peças seriadas e também na produção de peças com grande complexidade, onde o processo manual se tornaria inviável se fosse produzido em uma fresadora comum (Barreto, 2018).

A palavra *router* é predominantemente utilizada no inglês, sendo denominada como um tipo de ferramenta que também pode ser conhecida pelas *Spindles* e Tupias.

Suas principais funções são de realizar o corte, desbaste, rebaixo e gravura, possibilitando esculpir objetos diversos (Pinaso, 2021).

Tendo em vista que a qualidade da fabricação de peças realizadas em máquinas convencionais dependia diretamente da destreza do operador, por meio da automação, a atuação do operador passou a restringir-se apenas à supervisão de uma ou várias máquinas durante o processo de produção sem que o mesmo interfira nesse processo (Barreto, 2018).

Segundo Pinaso (2021), a máquina *Router* CNC utiliza o mesmo conceito básico de qualquer outra máquina CNC, sendo controlada apenas por um software e um conjunto eletrônico que fazem com que os sistemas mecânicos, normalmente tridimensionais, da máquina se movimentem sem a necessidade da ação de um operador, possibilitando o alcance de maior precisão e qualidade.

De acordo com Barreto (2018), a movimentação dos eixos da *router* CNC, são realizadas por meio do controle de sistemas que realizam a interface entre o homem e a máquina, possibilitando que o operador da máquina visualize em tempo real a posição em que a máquina está, se o avanço da ferramenta e os parâmetros de fabricação estão conforme o projeto e caso ocorra alguma falha, o operador realiza a parada da máquina.

A forma de trabalho de uma *router* CNC consiste na fixação do material em uma mesa onde trilhos, em suas laterais, permitem a fixação e mobilidade do conjunto de deslocamento do eixo X. Perpendicular ao eixo X, existe outro segmento de trilhos possibilitando que haja o deslocamento do conjunto do eixo Y, onde são fixados trilhos verticais que garantem o deslocamento do conjunto de ferramentas que percorre o eixo Z (Polastrini, 2016).

3.3 TECNOLOGIA ASSISTIVA (TA)

A tecnologia é um fator comum que está presente em nosso cotidiano, fator este onde estão contidas diversas descobertas e inventos que resultaram do desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas que permitem a obtenção de maior disponibilidade de recursos, facilidade e conforto para a sociedade. Atrelado aos avanços tecnológicos, que permitiram a disseminação de conhecimento e acesso à informação, várias áreas usufruem das facilidades que a tecnologia dispõe, dentre

elas uma área conhecida como Tecnologia Assistiva (TA), que por meio dos avanços recentes nas áreas da Engenharia, Computação, Mecatrônica, Robótica, etc., permitem o desenvolvimento de equipamentos, serviços e sistemas, que promovem conforto, qualidade de vida e inserção de pessoas com deficiência (PcD) na sociedade (Gaio, 2019).

Segundo Bersch (2017), a TA é um termo ainda muito recente utilizado para distinguir todo o conjunto de serviços e recursos que contribuem para ampliar ou proporcionar habilidades funcionais de pessoas com deficiência, promovendo uma vida independente e a inclusão dessas pessoas.

A Tecnologia Assistiva (TA) foi concebida com o propósito de potencializar a autonomia das pessoas com deficiência, abrangendo uma vasta gama de recursos, serviços, estratégias e práticas, que são categorizados de acordo com os objetivos funcionais que visam atender (Beretta, 2011).

De forma mais ampla, pode-se dizer que a tecnologia sempre caminhou na direção de tornar a vida das pessoas cada vez mais fácil, uma vez que, se percebermos que o uso constante de ferramentas desenvolvidas especificamente para facilitar e simplificar as atividades cotidianas, desde as ferramentas mais simples como canetas ou talheres, às mais complexas como computadores, automóveis, telefones celulares, relógio, enfim, uma interminável lista de recursos, que já fazem parte da rotina do ser humano e que podem ser consideradas como instrumentos que facilitam o desempenho de funções pretendidas no cotidiano (Bersch, 2017).

Cook e Polgar (2007) definem a TA com base no conceito do *American with Disabilities Act* (ADA), que consiste em uma vasta cadeia de equipamentos, estratégias, serviços e práticas concebidas e aplicadas de forma que reduza os problemas funcionais encontrados por pessoas com deficiência.

Desse modo, pode-se entender que a TA consiste em um auxílio que propiciará a ampliação de uma habilidade funcional deficitária ou permitirá com que seja realizada a função desejada que se encontra debilitada, seja por deficiência ou envelhecimento, proporcionando à pessoa com deficiência maior independência, qualidade de vida e inclusão social, por meio da ampliação de sua mobilidade, comunicação, habilidades de seu aprendizado, controle de seu ambiente e trabalho (Bersch, 2017).

3.3.1 Categorias de Tecnologia Assistiva

Segundo Scatolim *et al.*, (2017) a Tecnologia Assistiva possui várias categorias e finalidades para variados tipos de deficiências, dentre elas a visual, física, motora, auditiva, múltipla e outras. Há vários produtos e serviços que proporcionam a melhoria do desempenho das habilidades funcionais, auxiliando o cotidiano e possibilitando uma vida mais independente. Tais categorias de Tecnologia Assistiva possuem vários exemplos, e podem ser elencados, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Categorias de Tecnologia Assistiva

CATEGORIA	EXEMPLOS
Auxílios para a vida diária e vida prática	Talheres adaptados, suportes para utensílios domésticos, roupas desenhadas para facilitar o vestir e despir, abotoadores, equipamentos que possibilitam tarefas diárias, etc.
CAA – Comunicação Aumentativa e Alternativa	Pranchas de comunicação impressa; vocalizadores de mensagens gravadas, etc.
Recursos de acessibilidade para computador	Teclados modificados, os teclados virtuais com mouses adaptados, software sintetizador de voz, órteses e ponteiras para digitação, softwares leitores de tela, entre outros.
Sistemas de controle de ambiente	Casas inteligentes com controle de ambientes, controle de ambiente a partir do controle remoto.
Projetos arquitetônicos para acessibilidade	Projetos adaptados em casas e/ou ambiente de trabalho Rampas, elevadores, adaptações em banheiros e mobiliário.
Órteses e próteses	Próteses de membros superiores e órtese de membro inferior, que permitem digitar, manter a postura correta, comer, ler, etc.
Adequação Postural	Sistemas especiais de assentos e encostos em cadeiras de rodas, estabilizadores ortostáticos, entre outros.
Auxílios de mobilidade	Bengalas, muletas, andadores, carrinhos, cadeiras de rodas manuais ou elétricas, scooters, etc.
Auxílios para qualificação da habilidade visual e recursos que ampliam a informação a pessoas com baixa visão ou cegas	Auxílios ópticos, lentes, lupas manuais e lupas eletrônicas; os softwares ampliadores de tela, lupa eletrônica, aplicativos com retorno de voz, etc.
Auxílios para pessoas com surdez ou com déficit auditivo	Equipamentos (infravermelho, FM), aparelhos para surdez, telefones com teclado-teletipo (TTY), sistemas com alerta tátil-visual, celular com mensagens escritas e chamadas por vibração, etc.
Mobilidade em veículos	Carros e elevadores adaptados, rampas, entre outros
Esporte e Lazer	Cadeira de rodas/basquete, bola sonora, auxílio para segurar cartas, etc.

Fonte: Scatolim *et al.* (2017).

Dentre as categorias de TA apresentadas no Quadro 2, será objeto de estudo deste trabalho a Adequação Postural, que consiste em tecnologias que auxiliem principalmente no controle postural, na prevenção e acomodação de deformidades, no controle e distribuição correta de pressão, no conforto e acomodação postural, uma

vez que, para que sejam alcançadas, são utilizados sistemas especiais de assentos e encostos, estabilizadores ortostáticos, entre outros tipos de soluções.

3.3.1.1 Adequação postural

Segundo Silva e Kindlein Júnior (2011), pode-se definir a postura como uma posição característica de sustentação do corpo no espaço, possuindo uma relação direta entre a linha do centro de gravidade e as partes corporais. Existem diferentes tipos de pessoas que apresentam suas próprias características relacionadas à sua postura, que dependerá da idade e de uma gama de fatores como, frouxidão ligamentar, obesidade, hábitos posturais inadequados, alterações nos sistemas respiratório, neuromuscular, ósseo, entre outros (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Continuamente, o corpo realiza a contração dos músculos para manter a postura, possibilitando a atividade ocupacional. Além disso, instintivamente um indivíduo modifica sua postura corporal automaticamente para aliviar a pressão, se estabilizar e reequilibrar, assumindo uma posição de maior conforto de forma que lhe proporcione melhoria funcional (Schell *et al.*, 2013).

Segundo Bersch (2017), para que sejam garantidas posturas estáveis, alinhadas, confortáveis e com boa distribuição do peso corporal, há uma seleção de recursos que fazem parte de um projeto de adequação postural que servirão para beneficiar indivíduos com capacidades físicas limitadas, por meio da prescrição de sistemas especiais de encostos e assentos que levem em consideração as medidas do indivíduo, o peso, a flexibilidade ou alterações musculoesqueléticas que possam existir.

Sabe-se que os recursos da TA estão classificados de acordo com os objetivos funcionais a que se destinam. Um destes recursos é a adequação postural, que consiste em trazer maior conforto, alívio de pressão, aumento da função básica humana e suporte corporal mediante adaptações para cadeira de rodas ou outro sistema de sentar visando o conforto e distribuição adequada da pressão na superfície da pele (almofadas especiais, assentos e encostos anatômicos), bem como posicionadores e contentores que propiciam maior estabilidade e postura adequada do corpo através do suporte e posicionamento de tronco/cabeça/membros (Beretta, 2011).

Há também recursos que estabilizam e auxiliam a postura deitada e de pé, onde estão inclusas as almofadas de leitos ou estabilizadores ortostáticos, dentre outros recursos que fazem parte deste grupo. Um ponto crucial na utilização precoce dos recursos de adequação postural é a prevenção e auxílio na melhoria de deformidades corporais (Bersch, 2017).

Segundo Cavalcanti e Galvão (2007), o objetivo da adequação postural é promover o alívio do desconforto e a maximização das funções do indivíduo, onde o usuário não obrigatoriamente é um indivíduo com sensibilidade alterada ou cadeirante. Desse modo, pode-se dizer que um bom desempenho funcional depende diretamente de uma postura estável e confortável. Sem isso, torna-se difícil a realização de quaisquer tarefas que ocasionalmente trazem insegurança ao indivíduo com relação a possíveis quedas ou desconfortos (Bersch, 2017).

3.3.2 Adequação da Postura Sentada: *Seating*

Dentro da Tecnologia Assistiva, a terminologia utilizada para indicar a intervenção de adequação postural por meio da utilização de um sistema de assento e encosto é denominada de *seating*, que pode ser aplicada em uma base móvel, como uma cadeira de rodas, ou estática como um sofá (Cavalcanti; Galvão, 2007). Segundo Cavalcanti e Galvão (2007), no *seating* há três categorias sugeridas que podem variar de acordo com a especificação do indivíduo, elencadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Categorias de *Seating*

CATEGORIAS	DESCRIÇÃO DO INDIVÍDUO
1. <i>Seating</i> para controle postural, prevenção e acomodação de deformidades.	Indivíduos com paralisia cerebral e outras doenças, como distrofia muscular, esclerose múltipla ou lesão encefálica adquirida, que, por apresentarem, frequentemente, alteração de tônus, déficit muscular, presença de reflexos primitivos ou incoordenação de movimentos, exigem intervenções para manter a postura adequada na cadeira e consequentemente, participação nas tarefas diárias.
2. <i>Seating</i> para controle da distribuição de pressão.	Indivíduos idosos que apresentam mobilidade limitada e dificuldade para realizar descarga de peso, indivíduos com lesão medular com perda total ou parcial da sensibilidade abaixo do nível da lesão, esclerose múltipla e distrofias musculares.
3. <i>Seating</i> para conforto e acomodação postural.	Indivíduos que, na postura sentada, apresentam dor e desconforto, idosos e os que relatam dores nas costas, decorrentes da manutenção da posição sentada no trabalho.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Cavalcanti e Galvão (2007).

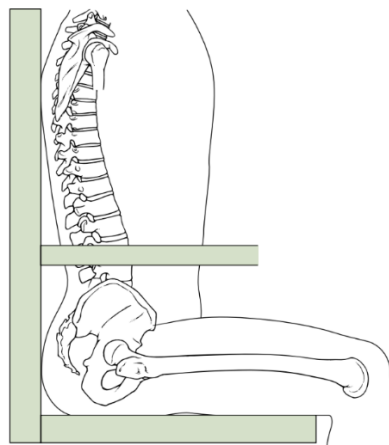
Pode-se observar que, em todas as categorias, os benefícios de uma boa postura sentada objetivam melhorar a mobilidade, as funções respiratórias, digestivas e circulares do indivíduo, além de possibilitar melhorias da integridade da pele, comunicação, autocuidado, autoestima e socialização (Cavalcanti; Galvão, 2007).

Condições como o alinhamento postural, conforto e estabilidade são itens estratégicos para a obtenção de uma postura sentada adequada, de forma que proporcione função ao usuário. A maior influência nessas condições se dá pelo posicionamento correto da pelve que, influencia diretamente nos demais segmentos corporais, como cabeça, tronco, membros superiores e inferiores (Cavalcanti; Galvão, 2007).

Segundo Cavalcanti e Galvão (2007), a recomendação do posicionamento da pelve na posição sentada deve ser neutra, ou seja, deve ser nivelada e mantida na linha média ou em discreta ântero versão, que, alinhada a posição de 90° de flexão do quadril, propicia na inibição do tônus extensor, diminuição da retroversão pélvica e mantém o indivíduo posicionado no assento com o peso sobre as tuberosidades isquiáticas.

Já segundo Dudgeon, Deitz e Dimpfel (2014), existem três posições da postura sentada mais comumente utilizadas. A primeira é uma posição sentada com o quadril, joelhos e tornozelos a 90°. A segunda é uma leve inclinação anterior (para a frente) da parte superior da pelve, possibilitando a distribuição do peso pelas nádegas e coxas, tornando possível a inibição de respostas reflexas anormais para alguns indivíduos (ilustrado na Figura 1). E a terceira é em um ângulo de encosto de 95° com um ângulo de reclinção de 3 a 5 graus no espaço.

Figura 1 – Posicionamento correto da pelve na postura sentada



Fonte: Dudgeon, Deitz e Dimpfel (2014).

Segundo Schell *et al.*, (2013) relatam em seus estudos, grande parte dos profissionais possuem a crença errônea de que uma boa postura se faz com o tronco na vertical e 90° de flexão nos quadris, joelhos e tornozelos. Porém, essa é uma postura que muitas pessoas não toleram, uma vez que o indivíduo deve permanecer continuamente sentado em uma só posição, causando desconforto e incapacitando-o de se reposicionar para a realização de tarefas.

O posicionamento correto da pelve ajuda na distribuição de pressão do tecido por toda a nádega e coxa, podendo ser realizado por meio de dispositivos de assento e encosto, que devem ser regulados em vários ângulos conforme a necessidade do indivíduo, podendo ou não possuir acessórios para o controle postural, como apoio de cabeça, suporte de tronco e apoios laterais, cinto ou faixa pélvica, abdutor, almofada lombar e mesa tipo bandeja (Cavalcanti; Galvão, 2007).

Para alguns indivíduos, a estabilização da pelve em alinhamento correto é essencial para que se tenha um bom desempenho funcional. A pelve na posição neutra gera suporte às curvaturas naturais da coluna vertebral e contribui para a função dos membros superiores. Há diversas formas de se obter um posicionamento neutro da pelve, como a utilização de cintos de posicionamento para o auxílio da manutenção da posição da pelve e inclinando o assento para trás, aumentando o controle pélvico e diminuindo o tônus extensor. Já para indivíduos com deformidades da pelve e da coluna vertebral, pode ser utilizado um sistema moldado personalizado que seja ajustado ao formato do tronco do indivíduo, possibilitando a distribuição de peso e a orientação ótima no espaço, reduzindo as pressões e pontos críticos (Schell *et al.*, 2013).

Desse modo, pode-se afirmar que em muitos casos, a utilização de um sistema especial de assento e encosto personalizado é necessário, para que seja proporcionado ao indivíduo uma adequação postural correta, tendo em vista que cada indivíduo possui características e especificidades diferentes, um assento ou encosto descrito como confortável por um indivíduo pode ser desconfortável para outro.

3.3.2.1 Assentos

Indivíduos que apresentam problemas posturais somados a outros problemas, como dificuldades de caminhar, necessitam de dispositivos que auxiliem na

manutenção postural e na locomoção. Assim, destaca-se o método de adequação postural por possuir objetivos fundamentais que visam a melhoria da independência e participação social do usuário, priorizando o conforto, alívio de pressão, aumento da função básica humana, suporte corporal, alterações e reajustes. Neste contexto, as cadeiras de rodas adaptadas podem potencializar as funções existentes, por meio de pontos de apoio e pontos de fixação, para melhor adequação postural na posição sentada (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Marcon *et al.*, (2021) apontam em sua pesquisa que existem basicamente dois componentes integrados em uma cadeira de rodas que podem ser analisados no Quadro 4.

Quadro 4 - Componentes de uma Cadeira de Rodas segundo Marcon *et al.*, (2021)

COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS
Veicular	É o responsável por algumas características técnicas como autonomia, estabilidade, manobrabilidade, amortecimento de vibrações, raio de giro e eficiência de propulsão.
Adequação Postural	Voltado para o conforto, facilidade de desenvolvimento das atividades motoras, estabilização da postura da cabeça, prevenção e correção de possíveis deformidades e facilidade de cuidados por terceiros.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Marcon *et al.*, (2021).

Já segundo Teixeira *et al.*, (2002), podem ser determinadas outras características importantes que a cadeira de rodas deve possuir, dispostas no Quadro 5.

Quadro 5 – Características da cadeira de rodas segundo Teixeira *et al.*, (2002)

CARACTERÍSTICA	DESCRIÇÃO
Ser confortável	A cadeira de rodas é a extensão de um corpo incapacitado, e a pessoa passará grande parte de seu tempo nesse equipamento, geralmente na mesma posição.
Aliviar a pressão	a distribuição do peso corporal tem de ser uniforme, favorecendo, assim, o alívio dos pontos de pressão. (...)
Incrementar a função	o sistema tem de possibilitar ao indivíduo a otimização e a maximização das funções motoras (...), fisiológicas (...), entre outras.
Proporcionar suporte corporal	o sistema deve oferecer suporte corporal adequado para a pessoa com deficiência de acordo com as suas necessidades, (...)
Permitir alterações e ajustes	o sistema deve ser planejado de forma que atenda às necessidades atuais (...), mas deve permitir modificações (...)

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Teixeira *et al.* (2002).

Com base nisso, pode-se dizer que a qualidade de vida dos sujeitos que utilizam a CR (Cadeira de Rodas), que em sua maioria passam a boa parte do dia sentado na mesma posição, é diretamente dependente do conforto que esta proporciona. Dessa forma, sentar-se ereto contribui diretamente para a distribuição do peso do usuário proporcionalmente na superfície do assento, auxiliando no seu alinhamento correto, porém, há uma grande variabilidade de parâmetros anatômicos que necessitam ser considerados para a confecção de assentos de CR (Marcon *et al.*, 2021).

Na pesquisa realizada por Teixeira *et al.*, (2002), realiza-se a diferenciação dos modelos de assentos para CR de acordo com a patologia do usuário, organizados no Quadro 6.

Quadro 6 – Especificação de modelos de assentos para CR segundo Teixeira *et al.*, (2002)

PATOLOGIA DO USUÁRIO	DESCRIÇÃO DO MODELO DO ASSENTO
Mielomeningocele (patologia que afeta a coluna vertebral podendo causar paralisia dos membros inferiores),	o assento deverá ser confeccionado em uma base rígida, plana com diferentes densidades, sendo que no terço distal das coxas apresente maior densidade e na região dos glúteos menor densidade.
Paralisia Cerebral (são indicados dois modelos)	assento anatômico com base rígida, confeccionado com compensado de madeira e forrado em espuma com formato anatômico, a parte anterior deve ser mais alta cerca de 50%
	assento digitalizado, confeccionado a partir da usinagem da espuma de acordo com a antropometria do usuário, mensurada a partir de simulador de almofadas que proporciona maior contato corporal.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Teixeira *et al.*, (2002).

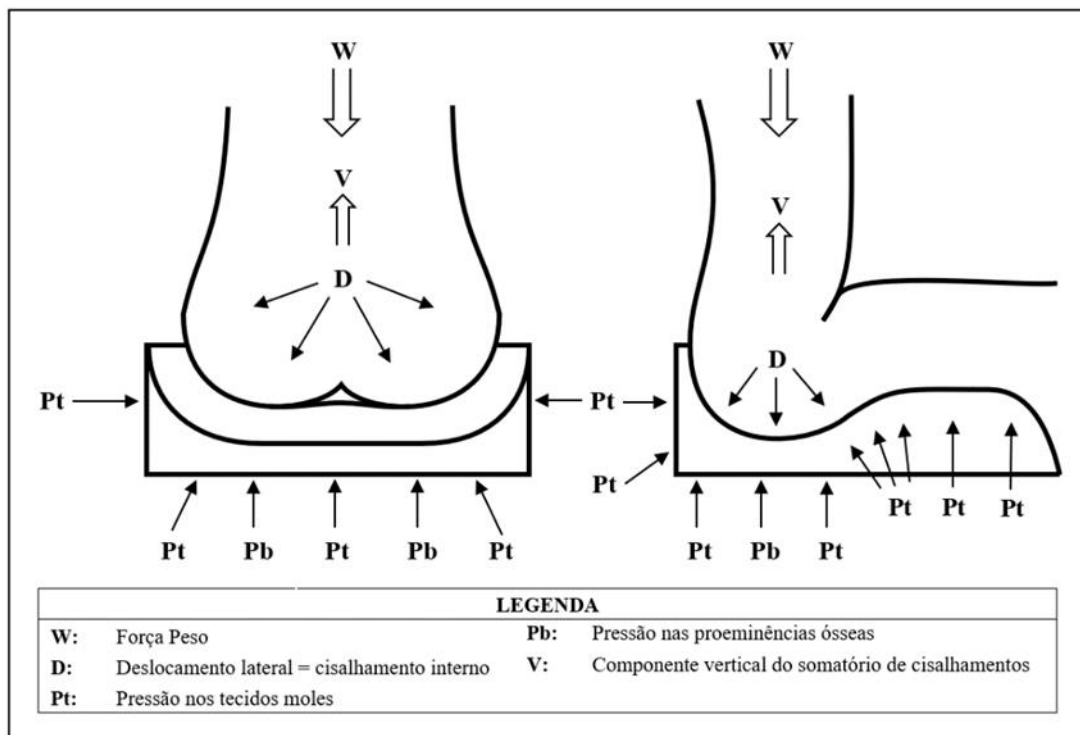
Segundo Silva e Kindlein Júnior (2011) concluem em sua pesquisa, dentre os usuários de CR, há um número elevado de pessoas que necessitam de assentos e/ou encostos personalizados, principalmente pessoas que possuem movimentos articulares limitados, deformidades ósseas, antropometria diferenciada e instabilidade articular.

Dessa forma, é de extrema importância que haja a confecção de assentos e encostos de espuma flexível anatômicos que possuam o formato exato do corpo do

paciente, pois apresentam muitas vantagens, tais como a transferência da pressão das zonas sensíveis para outras que possam suportá-la, a melhoria e estabilidade da postura sentada, obstar o atrito, a umidade e o acúmulo da temperatura, além de evitar úlceras de pressão por ser personalizado conforme as necessidades do indivíduo (Rockenbach, 2011).

Dadas essas características, pode-se observar que o posicionamento, a distribuição de pressão e a carga sobre o assento são os principais parâmetros que influenciam no conforto mecânico do usuário e pode ser definido como a parte do conforto total que depende da distribuição de pressão de contato sobre partes do corpo humano em contato com o assento ou a cama. Além disso, é importante que haja a transmissão da força peso de forma correta para o assento, de modo a distribuir a pressão corretamente em todas as áreas da superfície, conforme pode ser observado na Figura 2 (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Figura 2 - Diagrama conceitual para distribuição da pressão de contato



Fonte: Adaptado de Silva e Kindlein Júnior (2011).

Os pontos de pressão e a estabilidade são variáveis críticas nas cadeiras de rodas que influenciam a percepção de conforto entre os usuários. Como destacado, o conforto é identificado como uma dimensão ergonômica do produto. Entretanto, é

importante ressaltar que o conceito de conforto é subjetivo e está diretamente relacionado à experiência individual do indivíduo, não sendo possível encontrar uma definição universalmente aceita para o termo (Beretta, 2011).

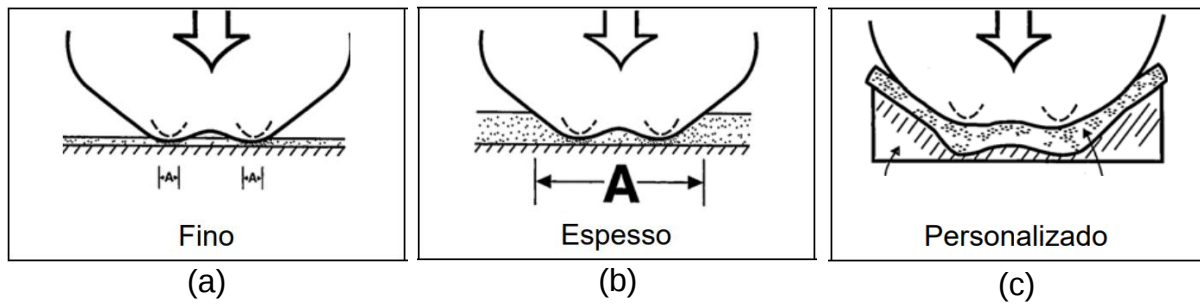
Considerando este cenário, há uma discussão sobre a importância relativa entre uma posição considerada saudável e uma posição considerada confortável pelo paciente (mesmo havendo prejuízo na simetria), não havendo concordância total entre os especialistas sobre qual é a posição mais desejável em termos de prescrição. Desse modo, a recomendação ortopédica de manter a postura ereta do tronco na posição sentada a fim de manter as curvas fisiológicas da coluna vertebral, conflita com o fato de outros estudos que afirmam que a posição sentada ligeiramente à frente ou reclinada, reduz os esforços musculares o que se torna mais confortável para o indivíduo (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Portanto, ao abordar a questão do conforto para os usuários de cadeiras de rodas, é relevante considerar que a avaliação do conforto deve levar em conta diversos fatores, incluindo o contexto de uso. Nesse contexto, aspectos como a duração do período em que a pessoa permanece sentada na superfície da cadeira e seu nível de mobilidade são de suma importância para uma avaliação abrangente do conforto percebido (Beretta, 2011).

Existem poucos trabalhos científicos que definam um modelo ou sistema de adequação postural sentada preferível para pessoas com deficiência. A recomendação ergonômica de manutenção de uma postura ideal se manifesta na maioria das prescrições de cadeiras de rodas, onde uma postura simétrica e bem definida é considerada um dos objetivos a ser alcançado com uso do sistema de assento personalizado (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Rockenbach (2011) em seu estudo, relata que o uso de uma espuma de assento mais espessa e sem contorno aumentou a área sobre a qual o peso do usuário é distribuído, mas manteve o pico de pressão no mesmo ponto, ilustrado na Figura 3(b), o que favoreceu o aparecimento de úlceras de pressão. No entanto, com um assento contornado pelo usuário, ilustrado na Figura 3(c), a pressão é desviada para pontos onde pode ser melhor suportada, como a parte de trás da coxa. A Figura 3 demonstra essas três situações de distribuição de pressão.

Figura 3 – Distribuição de pressão para diferentes tipos de assento



Fonte: Rockenbach (2011).

Conforme observado nas Figura 3, um assento com maior profundidade aumenta a área de aplicação da força, reduzindo assim o pico de pressão, porém o pico continua no mesmo local de risco. Consequentemente, o contorno adequado das superfícies de contato e/ou suporte fornece um meio mais eficiente de gerenciar (e distribuir) a pressão (Rockenbach, 2011).

Nesse sentido, e considerando que o ajuste entre a superfície de apoio e a anatomia do usuário é fundamental para se obter as condições de pressão desejadas da cadeira, concorda-se que, pelo menos em pacientes de alto risco, a estrutura da cadeira deve ser personalizada. Desse modo, um dos problemas a ser enfrentado no processo de desenvolvimento de assentos personalizados é a tendência ao maior custo, principalmente no que diz respeito aos recursos e às alternativas disponíveis, que são considerados caros e de difícil acesso para todos (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

3.3.2.2 Encostos

A principal funcionalidade do encosto de uma cadeira é amenizar as tensões exercidas na coluna vertebral, proporcionando o relaxamento da musculatura eretora da espinha, mantendo a lordose lombar e aumentando o conforto do indivíduo na posição sentada (Carcone; Keir, 2007). O encosto também fornece um apoio momentâneo, reduzindo ainda mais a necessidade de atividade muscular contínua para neutralizar o Centro de Gravidade (CG) (Corlett; Eklund, 1984).

De acordo com Harrison *et al.*, (1999), na posição sentada, o peso corporal é suportado por 8% da área do assento sob o ísquio, que carrega 64,8% do peso e os 35,2% restantes são suportados pela combinação de apoios de pés (18,4%), apoios de braços (12,4%) e encosto (4,4%) a 105°. Em sua pesquisa, Harrison *et al.*, (1999) aponta que a pequena quantidade de peso carregada pelo encosto indicava que a

estabilidade postural pode ser alcançada aqui, embora não haja necessariamente o relaxamento dos músculos.

Para uma postura estritamente ereta, um encosto que se estenda até a altura do ombro é provavelmente indesejável, pois inibiria a correção de desvios da posição ereta. No entanto, para um encosto inclinado para trás, o apoio acima do nível das vértebras lombares é necessário para permitir o relaxamento muscular (Corlett; Eklund, 1984).

Um parâmetro importante a que deve ser dada atenção, segundo Cooper (1998) afirma, é a altura do encosto, que deve ser suficientemente baixa para não pressionar as escápulas para frente e alta o suficiente para propiciar apoio adequado para a região lombar. No estudo realizado por Schell *et al.*, (2013), os encostos de assento variam quanto à altura, ao apoio lateral, à acomodação às curvas naturais da coluna vertebral e à orientação em relação ao assento.

Segundo Harrison *et al.*, (1999) demonstra em sua pesquisa, nos estudos realizados em relação ao design do encosto antes de 1972, deveriam ser adotadas as inclinações de recuo recomendadas de 90 a 125°, conforme elencadas na Tabela1.

Tabela 1 – Inclinação do encosto antes de 1972 segundo Harrison *et al.*, (1999)

Autor	Ano	Ângulo de encosto sugerido
Schulthess	1905	100° – 105°
Schede	1935	Mínimo individual*
Lay e Fisher	1940	111° – 117°
Morant	1947	110° para pilotos alertas, 110–125° para posição de descanso.
Kroemer	1971	Faixa de 90 a 120° no artigo de revisão
*Quando o indivíduo começou a descansar contra o encosto		

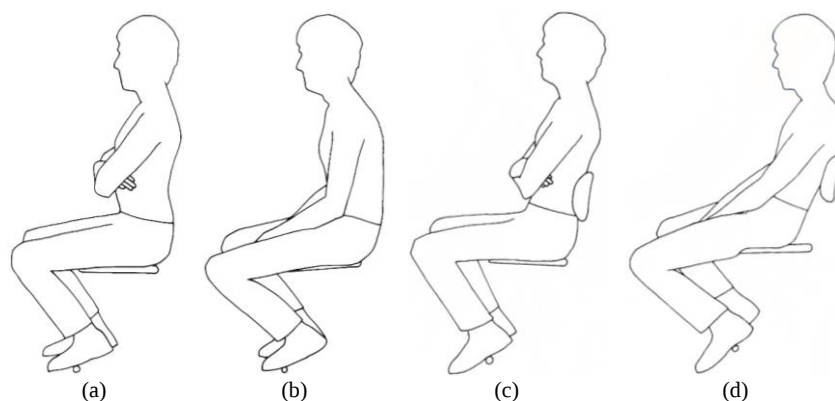
Fonte: (Harrison *et al.*, 1999).

No estudo realizado por Harrison *et al.*, (1999), a altura do encosto variou da parte inferior das escápulas até o topo dos ombros. Já Keegan (1962) apresentou um sistema de classificação para avaliar 36 assentos, variando de bancos de igreja a assentos de carros e caminhões. Nesse estudo, Keegan (1962) afirmou que os fabricantes estavam ignorando as pesquisas ergonômicas nos projetos de assentos,

e que a pesquisa de inclinação do encosto e a pesquisa de suporte lombar não estavam sendo aplicadas para o conforto do público.

De acordo com a pesquisa realizada por Corlett e Eklund (1984), foi investigado o funcionamento do encosto na posição sentada, identificando quatro casos distintos. No primeiro caso, ao adotar uma postura sentada com um banco e um ângulo de 90° entre o tronco e as coxas, ocorre uma redução da lordose lombar devido à rotação para trás da pelve, porém, há um aumento da tensão nos eretores da espinha e nas estruturas passivas, resultando em maior carga na coluna. No segundo caso, a exaustão muscular induz o indivíduo a inclinar-se para a frente, eliminando a lordose lombar, mas aumentando o ângulo do quadril devido à rotação anterior da pelve. No terceiro caso, uma postura sentada ereta em uma cadeira permite o relaxamento dos músculos posteriores da coluna lombar, com o centro de gravidade do tronco apoiado sobre as vértebras lombares, podendo ser suportado por ação muscular intermitente. Por fim, no quarto caso, ao sentar em uma cadeira com rotação para trás na pelve e deslocamento das nádegas para a frente, reduz-se a pressão no espaço abdominal e o torque exigido dos músculos das costas, pois o centro de gravidade está mais próximo da coluna.

Figura 4 – Funcionamento do encosto na postura sentada



Fonte: Elaborado a partir de Corlett e Eklund (1984).

Com base na análise realizada na pesquisa de Corlett e Eklund (1984), pode-se concluir que a redução no comprimento dos músculos na articulação do quadril com extensão da mesma, também reduz as forças longitudinais na coluna.

Todas essas mudanças reduzem a pressão nos discos e, à medida que o corpo desliza ainda mais na cadeira, fornece suporte na parte superior das costas e permite

maior extensão no quadril, fazendo com que a contribuição desses músculos para a pressão do disco tende a diminuir. No entanto, para uma postura muito caída, uma grande quantidade de cifose pode ocorrer na coluna lombar. Isso levará ao aumento da pressão sobre e dentro dos discos, tanto das forças decorrentes dos músculos e ligamentos esticados quanto do aumento da cunha nas bordas anteriores dos discos (Corlett; Eklund, 1984).

Bendix *et al.*, (1996) realizaram uma pesquisa, na qual foram analisados 12 indivíduos saudáveis, adotando posturas espontâneas, onde foram realizados testes por um método estatométrico durante períodos sentados de 2 horas em três tipos de cadeiras, em uma sequência estratificada, diferindo apenas quanto ao encosto: onde 'A' não tinha encosto; 'B' tinha encosto lombar vertical; e 'C' tinha um encosto curvado anteriormente. Em conclusão, os autores chegaram à concepção de que um encosto não facilita a lordose, mas sim proporciona ao usuário estabilização na coluna lombar, fornecendo suporte à região lombar, resultando em aumentos cifóticos relativos.

Segundo Schell *et al.* (2013), o encosto reclinado auxilia no alongamento dos flexores do quadril e possibilita o cuidado de cateteres e curativos. Desse modo, a inclinação mantém constante os ângulos do quadril e do joelho, ao mesmo tempo que inclina todo o corpo, possibilitando com que haja uma redução da gravidade, tornando mais fáceis os reposicionamentos.

Corlett e Eklund (1984) afirmam que a diminuição da carga na coluna lombar por meio do fornecimento de suporte lombar não é idêntica entre a postura sentada ereta e a postura sentada com encosto inclinado. Parte da carga na coluna em cada situação é causada pela tensão nos músculos das costas, podendo ser aliviada por uma almofada lombar. Na postura ereta, essa tensão surge na tentativa de compensar a rotação para trás da pelve, já na postura inclinada para trás, a tensão surge das forças da gravidade de uma região lombar sem suporte.

Desse modo, a utilização de um sistema de assento e encosto personalizados pode trazer grandes benefícios para o indivíduo, seja ele cadeirante ou não. Segundo Dahlin e Jones (2023), um encosto que suporta as curvas naturais da coluna vertebral é pensado para melhorar a postura, mobilidade funcional e conforto para indivíduos que utilizam cadeiras de rodas manuais. No entanto, há pouca pesquisa comparando a eficácia de um encosto de postura sólido com o encosto estofado padrão (Dahlin; Jones, 2023).

3.4 USO DE MÁQUINAS CNC NA TECNOLOGIA ASSISTIVA

Tecnologias que facilitam o design de produtos personalizados consistem em métodos computacionais e ferramentas auxiliadas por computadores, como por exemplo, as tecnologias CAD (*Computer-Aided Design*) e CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) que são amplamente utilizadas em vários estudos de produtos que necessitam ser totalmente personalizados, como calçados, joias, automóveis e implantes médicos (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Segundo Silva e Kindlein Júnior (2011), mesmo quando vários produtos podem ser categorizados como semelhantes, as diferenças naturais entre eles nas medidas antropométricas de cada pessoa podem levar as pesquisas a um alto grau de customização para garantir o melhor desempenho do produto. Nesse sentido, a usinagem CNC torna-se uma interessante alternativa flexível para aplicações onde o produto deve ser único. A área médica certamente representa um desses casos.

No que se refere aos assentos e encostos, há poucas alternativas de produção de peças únicas moldadas com o contorno do usuário, onde se tem a evolução dos assentos e a adaptação de dispositivos de adequação postural sentada, dentre as inúmeras inovações para cadeira de rodas (Watson; Woods, 2005). Sem uma tecnologia que permita a realização da personalização dos assentos e encostos, geralmente ocorrem adaptações que, na maioria, são artesanais, as quais muitas vezes não atendem às necessidades e exigências individuais.

De acordo com Silva e Kindlein Júnior (2011), o recurso mais utilizado por ortoprotesistas e terapeutas ocupacionais são as espumas alveolares de escavação, cujo o processo consiste basicamente em encostar o sujeito na espuma e um profissional vai escavando manualmente o bloco dessa estrutura até a acomodação do indivíduo dentro do dispositivo.

Porém, há situações em que seria mais vantajoso realizar a usinagem de blocos de espuma flexível para criar um formato desejado. Para isso, Olari e Allen (2006), patentearam um sistema que consiste no congelamento da espuma através da aspersão de gases a baixas temperaturas, endurecendo a espuma durante o processo de corte. Uma outra proposta de equipamento para a usinagem de espumas flexíveis foi realizada por Brienza *et al.* (1992), cujo processo consiste no uso de uma fresadora CNC especialmente projetada para este fim, onde se faz uso de uma ferramenta construída especificamente para esta função.

Embora essas soluções apresentadas sejam viáveis, tornam-se inacessíveis a grande parte da população por serem baseadas no uso de equipamentos especializados. Convenientemente, seria viável a utilização de máquinas e ferramentas já disponíveis no mercado, desde que os parâmetros de usinagem adequados para este material sejam conhecidos (Rockenbach, 2011).

Desse modo, Silva e Kindlein Júnior (2011) criaram um processo que utiliza a usinagem de bloco de espuma de poliuretano e digitalização tridimensional para a fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência, enquanto que Gaio (2019) realizou um estudo para a caracterização de parâmetros de usinagem CNC para peças de espumas de Poliuretano, possibilitando com que estudos posteriores fossem realizados com base nesses dados que foram coletados.

Desse modo, tais estudos apresentam parâmetros indispensáveis que serão de suma importância para que seja realizado o processo de usinagem de peças anatômicas personalizadas (assentos e encostos) por meio da utilização de máquinas CNC.

3.4.1 Usinagem CNC

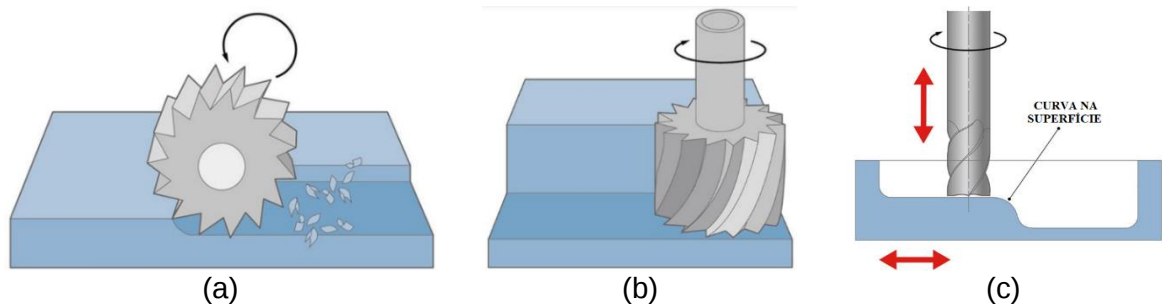
Caracterizada por ser um processo que possui um conjunto de operações cujo objetivo é gerar forma, dimensão ou acabamento por meio da remoção de material utilizando outro material com maior resistência e dureza, tendo como resultado a produção de cavaco, a usinagem, dentre uma infinidade de processos existentes, foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho com base no fresamento, que segundo Ferraresi (1970) é o processo mecânico que objetiva obter superfícies, por meio de ferramenta multicortante.

A usinagem abrange uma gama de processos de fabricação que quando automatizado, ou seja, controlado por um computador, denomina-se de usinagem CNC, no qual dentre os seus variados processos, o mais utilizado é o fresamento, que consiste em uma ferramenta cortante que faz um movimento de rotação e movimentos de translação sobre a peça (ou a mesa da fresadora translada) (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Gaio (2019) define o fresamento como um processo que utiliza uma ferramenta de arestas cortantes fixada a um eixo que se movimenta por coordenadas cartesianas, sendo definido em dois tipos básicos, o fresamento tangencial e o fresamento de topo

(ou fresamento frontal). A Figura 5 ilustra os dois tipos básicos de fresamento, onde na Figura 5(b) e Figura 5(c) a ferramenta é acoplada ao eixo Z da máquina (Gaio, 2019).

Figura 5 – Tipos de Fresamento: (a) Fresa cilíndrica tangencial, (b) Fresa cilíndrico frontal e (c) Fresa de topo com haste cilíndrica



Fonte: (INTECH VIETNAM MECHANICAL, 2022).

Portanto, pretende-se utilizar uma máquina *router* CNC para usinar diretamente nos blocos de espuma nas densidades desejadas, eliminando a necessidade de se fazer moldes. Para tal aplicação, torna-se necessário o estudo do processo de usinagem (fresamento) de materiais flexíveis.

3.4.2 Usinagem em blocos de espuma flexível

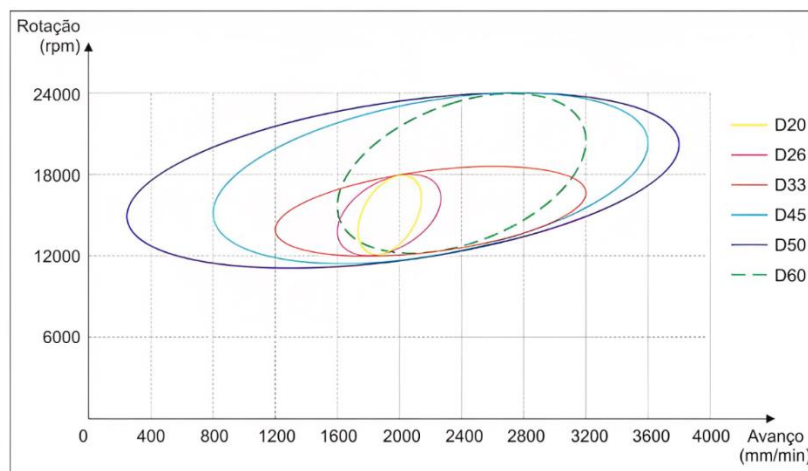
A utilização de máquinas CNC permite com que seja possível usinar materiais flexíveis, oferecendo vantagens para a produção de produtos personalizados, por exemplo, solas de sapatos ortopédicos, tendo como vantagem a utilização de estratégias de usinagem direta sem a dependência da tecnologia de molde que é de alto custo. A usinagem em máquina CNC tem sua relevância não só na produção de itens com geometria complexa, mas também na parte de produção de itens personalizados, tendo como principal vantagem um processo mais dinâmico e de menor custo, por não ter a necessidade do uso de moldes (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Segundo Gaio (2019), uma questão importante a ser discutida é a falta de estudos que corroborem com o conhecimento da usinagem de materiais poliméricos flexíveis, com base na diversidade do material, que pode ter diferentes composições e densidades.

Um trabalho importante a ser mencionado, que possui sua vertente voltada para a fabricação de assentos personalizados, foi desenvolvido por Brienza *et al.*, (1992), que conta com a utilização de ferramentas e dispositivos especializados para o corte da espuma, apresentando parâmetros, diretrizes e cuidados durante o processo de produção das peças, visto que a forma de fixação do bloco, a dureza do material e o cavaco gerado, devem ter um tratamento diferente do processo tradicional, além de discutir o desenvolvimento de um sistema específico para fabricação de assentos com contorno personalizado com a utilização de ferramentas e máquina especial para tal finalidade.

Gaio (2019) apresenta a possibilidade de usinagem de espumas de poliuretano e apresenta um mapa de seleção de rotações e avanços para uma pequena parcela de densidades de espumas flexíveis de poliuretano (Figura 6), utilizando fresas de metal duro de 6mm de diâmetro com duas arestas cortantes.

Figura 6 – Mapa de seleção de rotações e avanços para espumas de poliuretano



Fonte: (Gaio, 2019).

3.5 ESPUMAS POLIMÉRICAS FLEXÍVEIS

Pertencendo a uma das classes de materiais celulares de engenharia, as espumas são caracterizadas pela reunião de células com bordas ou faces sólidas aglomeradas de forma a preencher um espaço. Possuindo uma estrutura diferenciada com a presença de poros, esse material proporciona propriedades diferentes das dos demais materiais sólidos, de forma que as espumas geralmente possuem menor módulo elástico e resistência mecânica, mas também menor condutividade térmica, densidade e maior capacidade de deformação (Rockenbach, 2011).

Segundo Rockenbach (2011), as espumas podem ser classificadas pelo seu tipo de célula como: aberta (quando os poros do material estão ligados entre si) ou fechada (quando os poros do material estão isolados uns dos outros), rígidos ou flexíveis e também dependendo do tipo de material utilizado, que podem ser cerâmicos ou metálicos, embora os mais usuais são os polímeros.

Na utilização de polímeros, Callister e Rethwisch (2016), afirmam que tanto materiais termoplásticos como materiais termorrígidos podem ser produzidos em forma de espuma por meio da incorporação de um agente de insuflação em uma batelada de material. Alguns dos polímeros mais comumente utilizados para a produção de espumas são o poliuretano, a borracha, o poliestireno e o cloreto de polivinila (Rockenbach, 2011).

3.5.1 Principais Características e Propriedades das Espumas Flexíveis de Poliuretano

Também conhecidas como materiais celulares flexíveis, as Espumas Flexíveis são definidas pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como materiais contendo numerosas células, propositadamente introduzidas, interconectadas ou não, distribuídas ao longo de sua massa. Uma espuma de poliuretano pode ser genericamente estabelecida como um produto celular expandido, produzido pela interação entre compostos de hidrogênio reativos, água e isocianatos (American Society for Testing and Materials, 2008).

Segundo Rockenbach (2011) os poliuretanos são produzidos pela reação de poliadição de um *diisocianato* ou *polifuncional* com um *poliol* e outros reagentes. Este tipo de polímero distingue-se pela sua flexibilidade, podendo ser fabricado na forma de elastómeros, adesivos, mas também espumas rígidas, semirrígidas, semiflexíveis e flexíveis. O tipo de poliuretano (PU) mais utilizado é o flexível, pois somente o segmento de colchões e móveis consome cerca de 29% no âmbito mundial e 55% no mercado brasileiro.

As espumas de poliuretano flexível são de células abertas, herméticas, reversíveis à deformação e podem ter uma ampla gama de propriedades, incluindo maciez, firmeza e resiliência, proporcionando grande conforto aos indivíduos. Estas podem ser fabricadas tanto na forma de bloco, através de diferentes processos contínuos ou descontínuos, quanto moldadas, empregando-se moldes fechados. As

espumas flexíveis de poliuretano podem ser classificadas segundo a densidade nominal em kg/m³, sendo esta classificação utilizada pelo INER (Instituto Nacional de Estudos do Repouso), uma vez que a capacidade de carga destas espumas está geralmente ligada à sua densidade (Rockenbach, 2011).

A norma ASTM D3574-08 (American Society for Testing and Materials, 2008) expõe que espumas para assento com baixos fatores suporte comumente afundam, possuindo um desempenho inferior. No Brasil, as propriedades de espumas flexíveis para colchões, são especificadas pelo INER, conforme apresentado na Tabela 2 (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Tabela 2 – Especificações do INER para espumas flexíveis de PU

PROPRIEDADES	D18	D20	D23	D26	D28	D33	D40	D45
Densidade (kg/m ³), mín.	16,2	18,0	20,7	23,4	25,2	29,7	36,0	40,5
Resiliência (%)	35	40	40	40	40	40	45	45
Suporte de carga, 65% (N), mín.	140	160	180	220	240	270	330	340
Deform. Permanente 90% (%) máx.	12	10	8	8	7	7	6	6

Fonte: (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Visando proporcionar mais saúde e conforto às pessoas, o INER desenvolveu um estudo que estabelece um colchão adequado para cada biótipo, proporcionando aos fabricantes o Selo de Qualidade Pró-Espuma, conforme a Tabela 3 (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Tabela 3 – Tabela de Biótipo, Selo de Qualidade Pró-Espuma

PESO (kg)	ALTURA (m)					
	até 1,50	de 1,51 a 1,60	de 1,61 a 1,70	de 1,70 a 1,80	de 1,81 a 1,90	acima de 1,90
Até 50	D23	D23*/20	D23/20*	D20	-	-
51 - 60	D26	D26*/23	D26/23*	D23	-	-
61 - 70	D28	D26/28*	D26/28*	D26*/28	D26	-
71 - 80	-	D33	D28/33*	D28*/33	D28	-
81 - 91	-	-	D33	D33*/28	D33/28*	D28
91 - 100	-	-	D40	D40*/33	D33	D33
101 - 120	-	-	D45	D40	D40	D40/33*
121 - 150	-	-	-	D45	D45/40*	D40

*Preferencialmente.

**D18 indicado para recém-nascidos e crianças de até 3 anos.

Fonte: (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

Os dados apresentados na Tabela 3 servem de referência, uma vez que não existem tabelas semelhantes específicas para assentos. É importante observar o comportamento viscoelástico das espumas flexíveis que, ao deformarem-se, sofrem simultaneamente deformações viscoelásticas. Este fato deve ser levado em consideração na mecânica, pois a deformação total passa a ser dependente do tempo (Silva; Kindlein Júnior, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento de uma máquina CNC *Router* com custo reduzido que, por meio da usinagem no processo de fresagem, será utilizada para fabricar peças anatômicas e personalizadas a partir de blocos de espuma flexível. Todos os conhecimentos abordados nos capítulos anteriores serviram de embasamento teórico para a criação deste projeto.

4.1 PROTÓTIPO E CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA CNC

Com base nos conceitos abordados no Capítulo 2 deste trabalho, foi possível realizar o projeto e desenvolvimento de uma máquina CNC do tipo *router* com área de trabalho estimada de 600mm x 600mm (nos eixos X e Y) e com o avanço da ferramenta no eixo Z de 150mm, ou seja, espera-se que o volume total onde a máquina *Router* CNC opera seja de 540000mm³.

O diferencial deste projeto é o fato de a máquina ser desenvolvida desde a fase de prototipagem 3D (Desenho Técnico) até a montagem mecânica, eletrônica e comunicação entre hardware e software, com a proposta de redução de custo pelo uso de *hardware* e *software* livres, ao invés de ser utilizada uma solução comercial, que posteriormente acarretaria no aumento dos custos de fabricação de peças anatômicas personalizadas, como assentos e encostos.

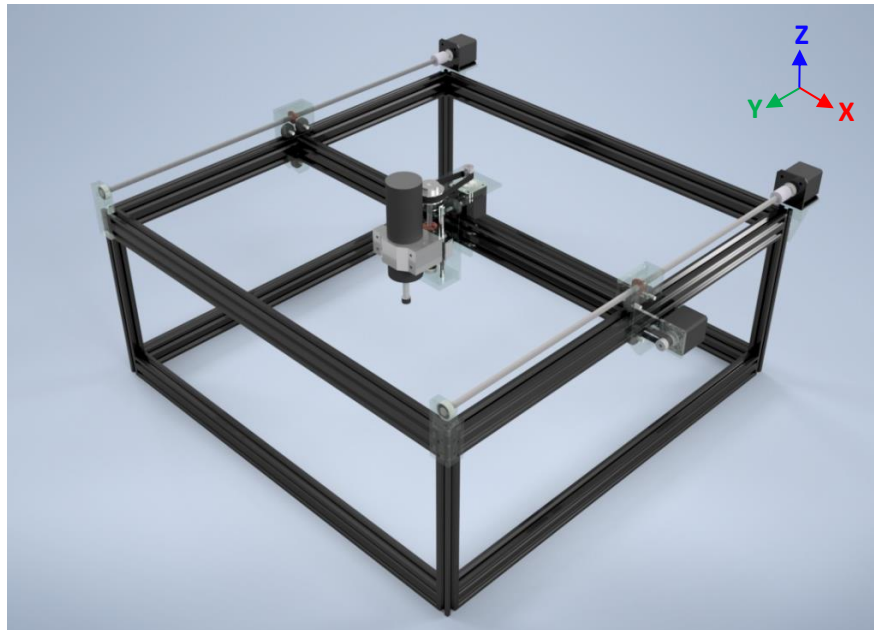
4.1.1 Modelagem 3D do Protótipo da Máquina CNC

Para se ter uma dimensão geral do projeto, de forma com que fossem contemplados os aspectos gerais da máquina *Router* CNC, como dimensão, tipo de movimentação cartesiana, formato das peças, acomodação dos componentes, comportamento mecânico, dentre outros, foi necessário criar inicialmente um modelo 3D do protótipo da máquina *Router* CNC, e para isso foi utilizado o software CAD da Autodesk®, o Inventor® 2023, por meio de licenças educacionais.

Para se chegar a um modelo que atenda às especificações e necessidades deste projeto, o embasamento teórico fornecido por essa pesquisa possibilitou a análise de diversos modelos atuais de máquinas CNCs com variados tipos de movimentação cartesiana. Desse modo, ao projetar a máquina *Router* CNC (Figura

7), foi escolhido o posicionamento cartesiano onde a movimentação do cabeçote da ferramenta ocorre ao longo dos eixos X e Z, ao mesmo tempo, em que os eixos X e Z se movimentam ao longo do eixo Y, possibilitando com que ocorra o processo de usinagem do material, obtendo o objeto desejado.

Figura 7 – Modelo 3D da Máquina *Router* CNC criado no Inventor© 2023



Fonte: Próprio autor.

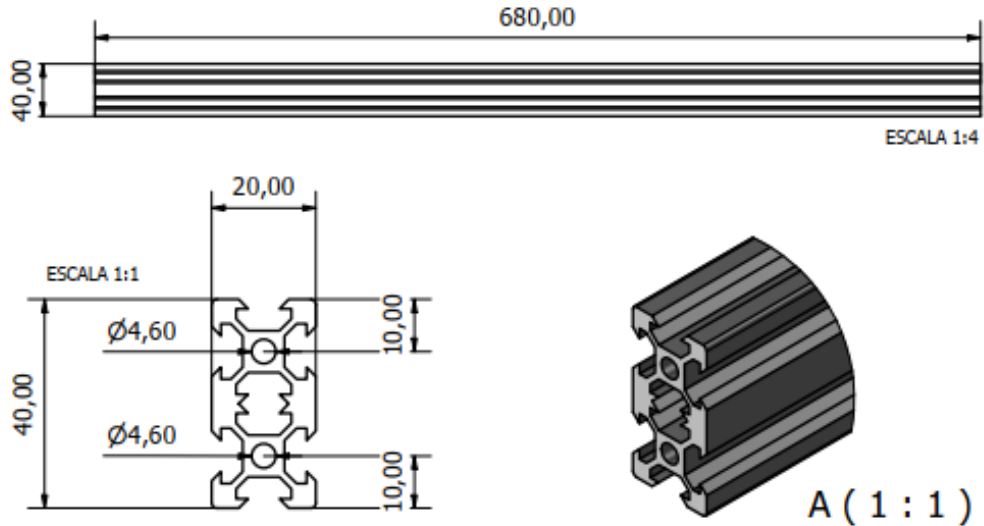
Toda a estrutura da máquina CNC foi projetada para ser fabricada em Perfis Estruturais de Alumínio V-Slot – Canal 6 de diferentes dimensões, mantendo o projeto com alta qualidade e durabilidade (por não ser acometido pela ferrugem) e com um peso que permita o fácil transporte e manuseio da máquina. Desse modo, todos os componentes e peças necessários para a construção da máquina *Router* CNC deverão ser obtidos por meio da compra de soluções comerciais, que estão discriminados no Apêndice A.

4.1.2 Montagem Estrutural e Mecânica da Máquina CNC

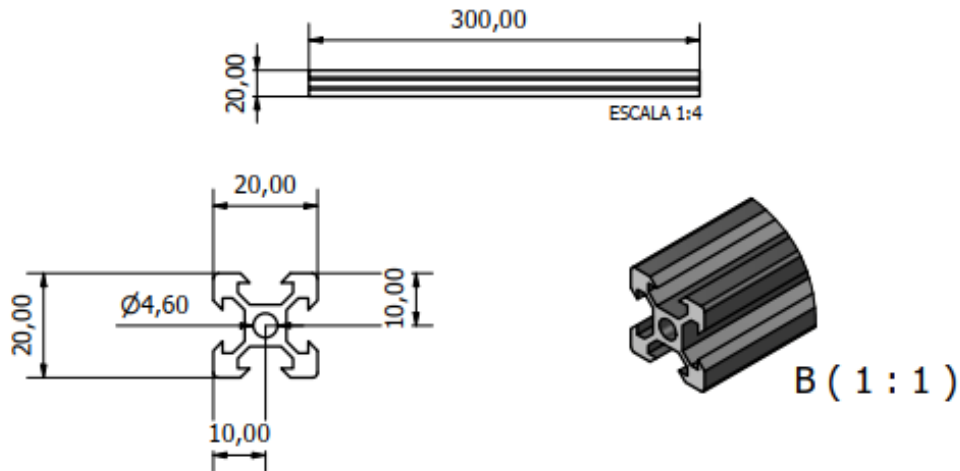
Para a montagem da base estrutural e mecânica da máquina *Router* CNC, da qual fazem parte os eixos de movimentação X, Y e Z, foram utilizados Perfis Estruturais em Alumínio V-Slot Preto – Canal 6 em duas dimensões diferentes, conforme ilustrado na Figura 8. A escolha desse material se deu pelo fato de ser leve, resistente à ferrugem e fácil de se trabalhar.

Figura 8 – Perfis Estruturais de Alumínio V-Slot Preto – Canal 6

PERFIL ESTRUTURAL EM ALUMÍNIO 20X40 MM V-SLOT PRETO - CANAL 6



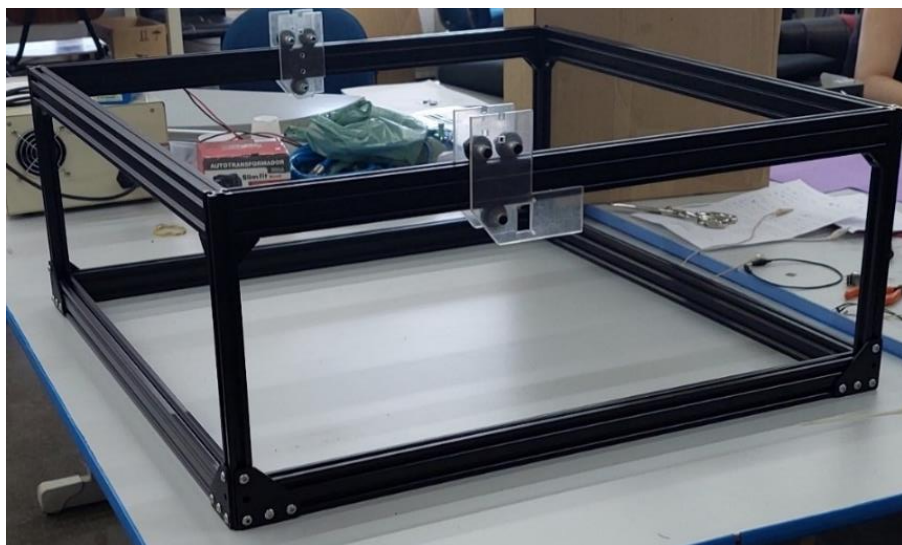
PERFIL ESTRUTURAL EM ALUMÍNIO 20X20 MM V-SLOT PRETO - CANAL 6



Fonte: Próprio autor.

No processo de montagem da base estrutural foram utilizados 4 Perfis Estruturais em Alumínio 20x20mm V-Slot Preto – Canal 6 (medindo 300 mm de comprimento), 8 Perfis Estruturais em Alumínio 20x40mm V-Slot Preto – Canal 6 (medindo 680 mm de comprimento), 8 Placas de Conexão 90° para Perfil Base 20, 30, 40, 45 e V-Slot, 8 Conectores tipo Cantoneira Preto Para Perfil T-Slot 6mm, e para a fixação, foram utilizadas Porcas T Reforçadas Canal 6 - Para V-Slot - M5 em conjunto com Parafusos Allen Cabeça Abaulada M5. Como resultado desse processo de montagem, foi obtida a base estrutural demonstrada na Figura 9.

Figura 9 – Base Estrutural da Máquina *Router* CNC em Perfil Estrutural em Alumínio



Fonte: Próprio autor.

Mesmo possuindo um custo maior em relação a outros tipos de materiais, como o MDF (*Medium Density Fiberboard*) por exemplo, a escolha do Perfil Estrutural em Alumínio como material para o desenvolvimento da máquina *Router* CNC levou em consideração a durabilidade e resistência do material, uma vez que se trata de uma liga metálica que não é acometida facilmente por ferrugem, o alumínio se torna uma escolha eficiente para este projeto.

4.1.2.1 Montagem do Eixo Y e base do eixo X

Para a montagem do eixo Y, foi utilizada a base estrutural mecânica como âncora para fixar as peças responsáveis pelo acoplamento do fuso trapezoidal TR8 nas extremidades do eixo. As peças utilizadas para fazer o acoplamento do fuso trapezoidal TR8 foram fabricadas por meio de corte a laser em placas de acrílico com diferentes espessuras, baseadas nos modelos obtidos na prototipagem 3D da máquina CNC. Pode-se dividir o eixo Y em três partes primordiais A, B e C:

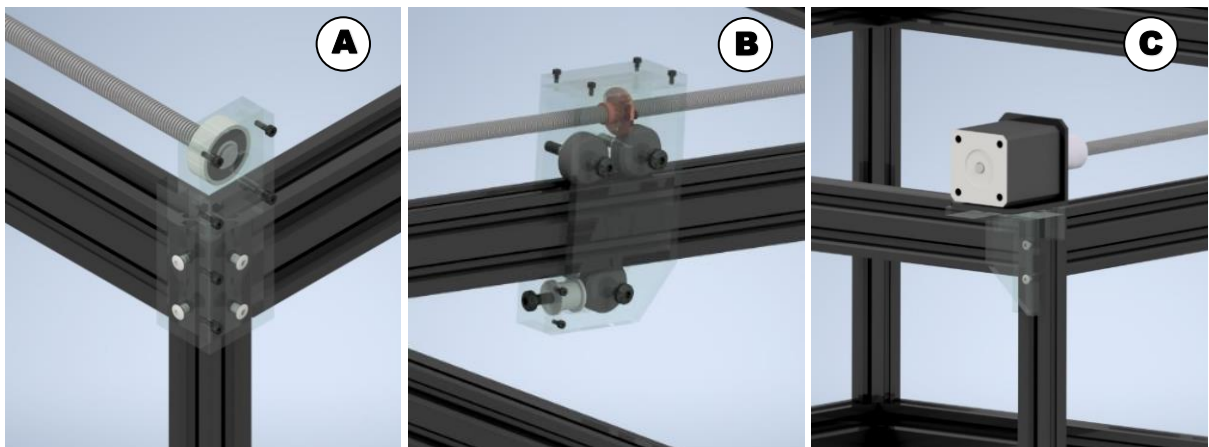
Parte A: onde é acoplada uma das extremidades do Fuso Trapezoidal TR8 em um rolamento 608zz - 8x22x7mm para que a movimentação do eixo mantenha suavidade e garanta a integridade das peças em acrílico, uma vez que o fuso não poderia ser fixado diretamente nas peças de acrílico devido à movimentação que, a

longo prazo poderia gerar calor por atrito e consequentemente ocasionaria a deformação do acrílico (ilustrado na Figura 10 - A).

Parte B: é a parte central do conjunto, onde foi utilizada uma castanha TR8 passo 2mm fixada ao conjunto central do eixo Y (Figura 10 - B), possibilitando sua movimentação ao longo do fuso. Essa parte também possui um conjunto de peças onde é fixado um Perfil Estrutural em Alumínio 20x40 V-Slot Preto - Canal 6 (medindo 670 mm de comprimento) que será a base do eixo X. Desse modo, possibilitando posteriormente que o conjunto do eixo Z se movimente pelo plano cartesiano XY.

Parte C: é a outra extremidade do eixo Y onde o fuso trapezoidal TR8 é conectado ao motor de passo por meio de um acoplamento flexível 5x8mm que suporta um torque de 10Kgf/cm (Figura 10 - C). Desse modo, quando o eixo do motor se movimentar irá consequentemente movimentar o fuso trapezoidal, fazendo com que o conjunto de peças onde está acoplada a castanha, se movimente pelo fuso.

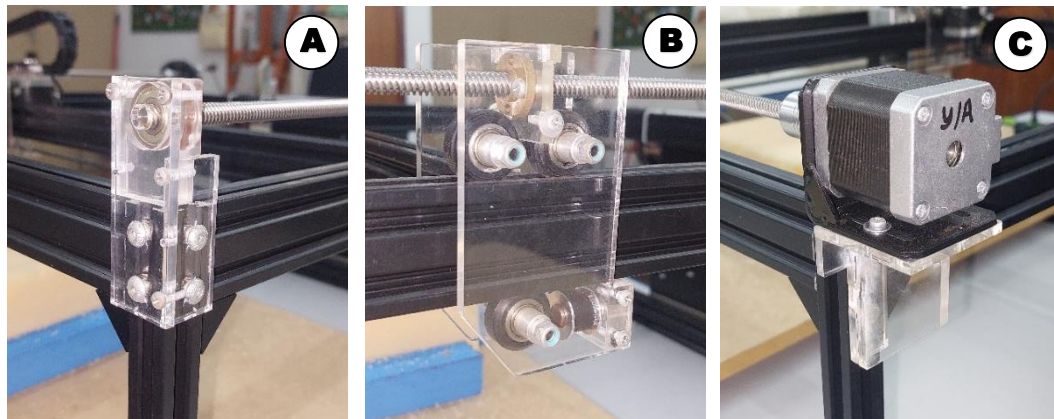
Figura 10 – Modelo 3D das peças do eixo Y (Y2) divididas nas partes A, B e C



Fonte: Próprio autor.

Com base nos modelos 3D obtidos na prototipação da máquina CNC via *software CAD* e a partir da obtenção das peças fabricadas a partir de chapas de acrílico, foi possível realizar a montagem das partes A, B e C do eixo Y de modo que, o processo de prototipagem mostrou total eficácia mediante os modelos apresentados na Figura 10, e ao compará-los com as partes A, B e C obtidas pela montagem das peças, demonstrando na Figura 11, percebe-se que há total correspondência entre o protótipo 3D modelado no *software CAD* e o resultado obtido com o processo de montagem das peças.

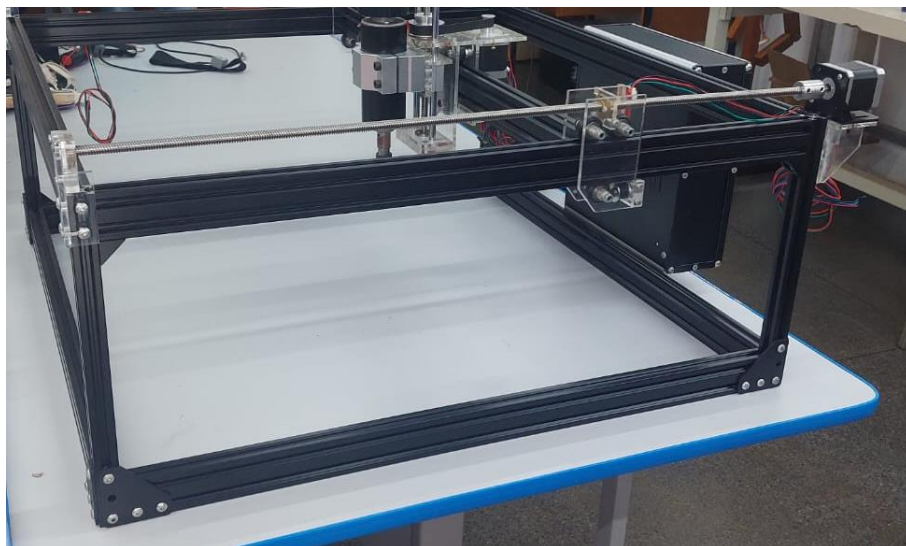
Figura 11 – Partes A, B e C do conjunto de movimentação do eixo Y (Y2) montadas



Fonte: Próprio autor.

A partir da montagem dessas três partes, obteve-se o lado direito do conjunto de movimentação do eixo Y (Y2), ilustrado na Figura 12, que posteriormente será utilizado para fixar perpendicularmente a base do eixo X, onde juntos formarão o plano cartesiano XY e serão os principais responsáveis por movimentar o conjunto do eixo Z (onde está posicionada a máquina-ferramenta) pelo plano cartesiano.

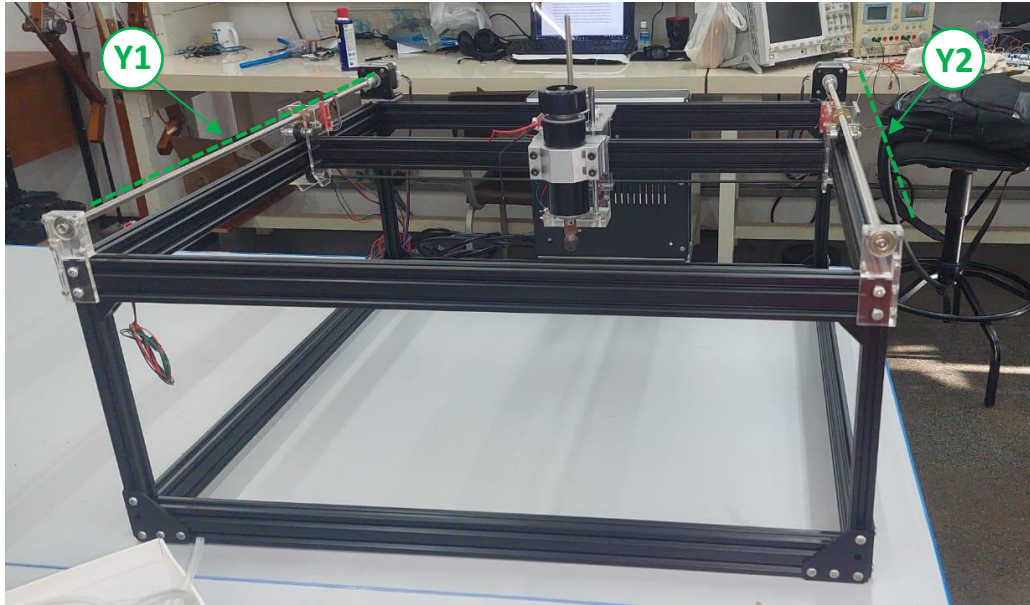
Figura 12 – Conjunto de movimentação direito do eixo Y (Y2)



Fonte: Próprio autor.

O eixo Y possui uma particularidade que o difere dos demais, o mesmo é dotado de um eixo secundário que funciona de forma espelhada, fazendo com que o eixo Y possa se mover com maior precisão, pois sem isto, o mesmo poderia acarretar erros durante a movimentação (ilustrado na Figura 13).

Figura 13 – Conjunto completo de Movimentação do eixo Y montado (Y1 e Y2)

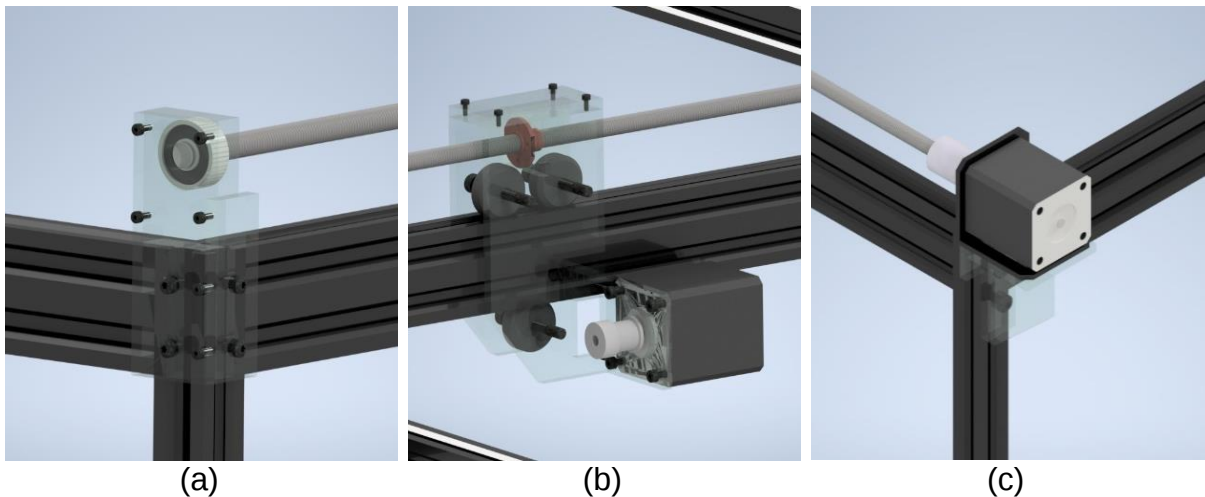


Fonte: Próprio autor.

Para a montagem das peças do lado esquerdo do eixo Y (Y1), foi necessário realizar algumas alterações no projeto, pois durante o processo de montagem foi notado que algumas partes sofreriam um torque de tração maior e consequentemente ocasionaria a quebra da peça.

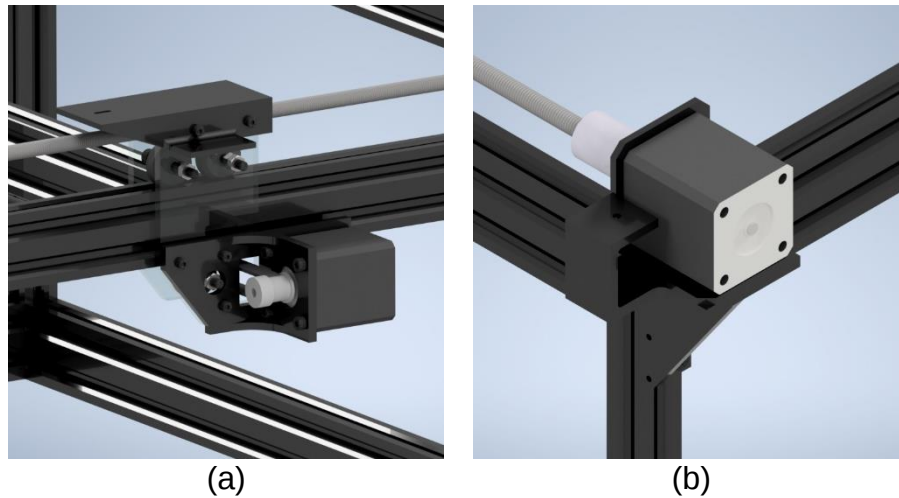
Originalmente, as peças foram projetadas conforme ilustrado na Figura 14, porém, para maior eficiência, algumas peças foram alteradas e outras receberam um complemento. Desse modo, obtiveram-se peças com maior resistência e com suporte para que fossem fixadas as guias porta cabos, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 14 – Modelo 3D das peças do eixo Y (Y1) divididas em partes



Fonte: Próprio autor.

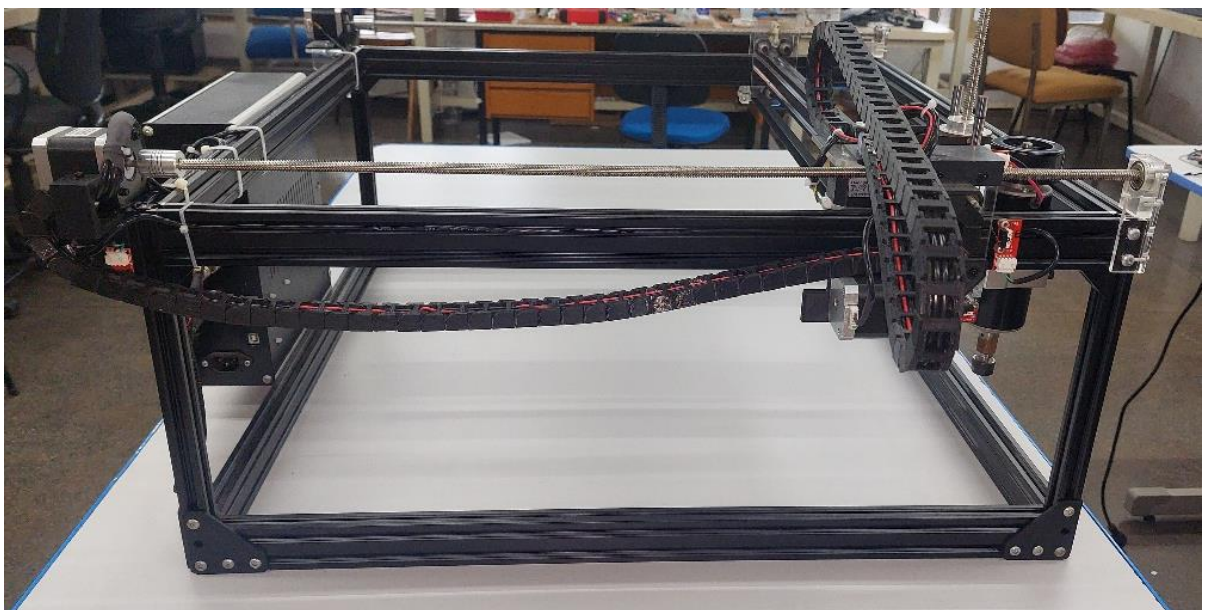
Figura 15 – Modelo 3D das peças do eixo Y (Y1) modificadas



Fonte: Próprio autor.

Ao analisar as Figuras 14 e 15, pode-se notar que apenas as peças B e C sofreram alterações. Tais modificações permitiram o aumento da resistência das peças, além de proporcionar suporte para a guia passa cabo, deixando o projeto esteticamente mais agradável. Após as alterações nos modelos 3D, foi utilizada uma impressora 3D para realizar a manufatura das novas peças, e após a montagem, obteve-se o eixo Y1 (Lado Esquerdo do eixo Y) demonstrado na Figura 16, finalizando a montagem estrutural e mecânica do eixo Y.

Figura 16 – Conjunto de movimentação esquerdo do eixo Y (Y1)

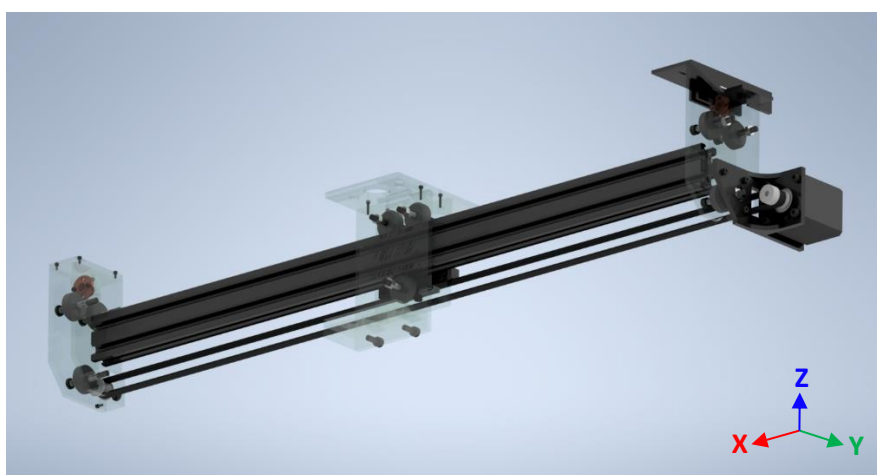


Fonte: Próprio autor.

4.1.2.2 Montagem do Eixo X e base do eixo Z

Realizada a montagem da base estrutural e mecânica do conjunto de movimentação do eixo Y, tornou-se possível realizar a montagem do conjunto de movimentação do eixo X, que fica posicionado perpendicular ao eixo Y. Como base para a montagem do eixo X, foi utilizado o modelo 3D da estrutura (Figura 17), respeitando as medidas fornecidas pelo *software CAD*.

Figura 17 – Modelo 3D da Estrutura do conjunto de movimentação do eixo X

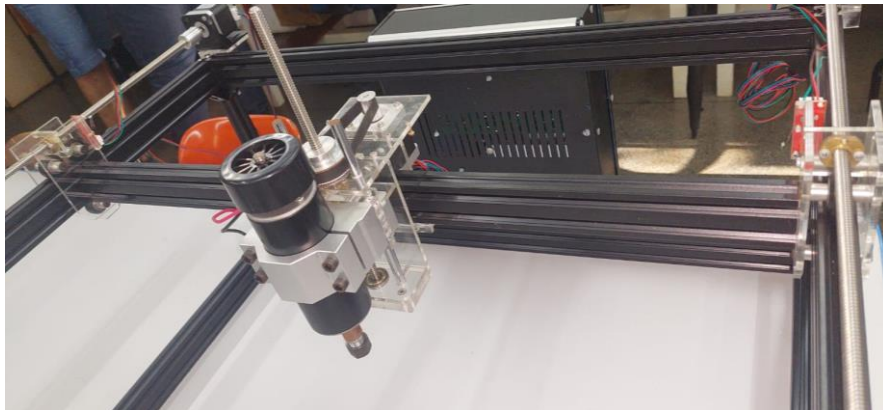


Fonte: Próprio autor.

Pode-se notar na Figura 17 um conjunto de peças no centro do eixo X que, além de servir de ponto de ancoragem para algumas peças do próprio eixo, também é a base do eixo Z onde serão posicionados os eixos retificados, fuso e todo o sistema de movimentação, possibilitando com que a máquina-ferramenta possa se mover ao longo do eixo Z da máquina CNC.

Para a montagem estrutural e mecânica do conjunto de movimentação do eixo X foram utilizados 1 Perfil Estrutural em Alumínio 20x40 - V-Slot Preto - Canal 6 (medindo 670 mm de comprimento) que servirá para unir ambos os lados do eixo Y; Peças em acrílico sob demanda, que fornecem suporte de fixação para outros componentes do eixo, possibilitando a fixação de um eixo ao outro; Porcas Auto Travantes Parlock - M5; Parafusos Allen de Perfil Baixo - M5 - 40 mm; Espaçadores em Alumínio Ø10 x Ø5mm; Polias V-slot Roldana para Impressora 3D e CNC Router laser - 10,2X24 e Parafusos Philips Cabeça Panela M3 - 10 mm. Utilizando tais materiais e seguindo a montagem conforme o modelo 3D do protótipo, obteve-se o conjunto de movimentação do eixo X ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Conjunto de movimentação do eixo X montado



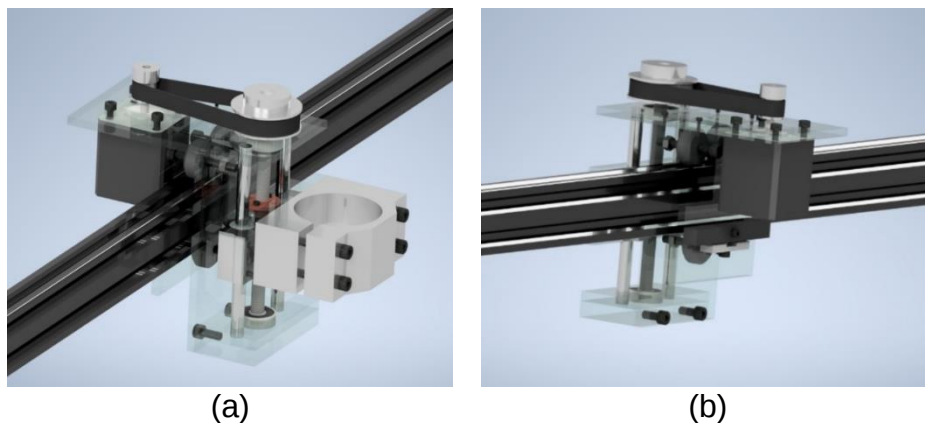
Fonte: Próprio autor.

No eixo X não houve mudanças a serem realizadas nas peças. Conforme projetado, as peças desempenharam seu papel sem serem acometidas por deformação ou quebra por força de torque exercida sobre o eixo de movimentação.

4.1.2.3 Montagem do Eixo Z

Pode-se observar na Figura 18, que há um conjunto de peças fixadas ao eixo X, do qual faz parte o conjunto de movimentação do eixo Z que é responsável pelo avanço da máquina-ferramenta no eixo Z do plano cartesiano. Após a montagem de todos os componentes do conjunto de movimentação do eixo X, foi utilizado o modelo 3D ilustrado na Figura 19 para iniciar a montagem do eixo Z respeitando todas as medidas disponibilizadas pelo *software CAD*.

Figura 19 – Modelo 3D do Conjunto de Movimentação do eixo Z



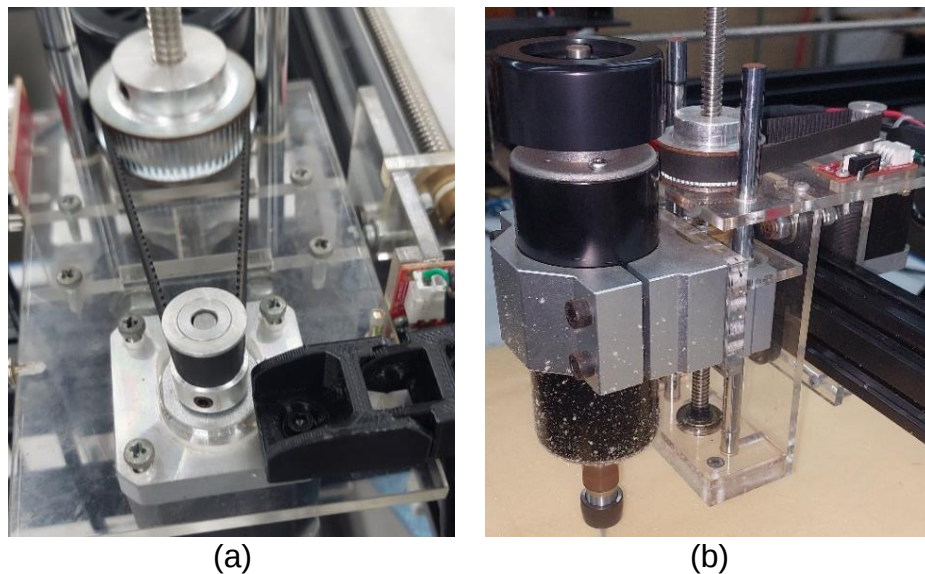
(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

Para a montagem estrutural e mecânica do eixo Z foram utilizadas Polias V-slot - Roldana para Impressora 3D/CNC Router e Laser - 10,2X24; Polias GT2 20 Dentes - Furo 5mm para Correia 10mm; Rolamentos 608zz - 8x22x7mm; Rolamentos Lineares SC8UU; Guias Lineares SAE1045 Ø8 x 200mm H7 Retificada; Motor de Passo Nema 17 5,2 kgf/cm; Fuso Trapezoidal TR8 250mm passo 2mm com castanha de Latão; Sistema de Redução 3:1 com Polias 20 e 60 Dentes e Correia 10mm GT2 240mm; Parafusos Allen de Perfil Baixo - M5 - 40 mm de comprimento; Parafusos Philips Cabeça Panela M3 - 10 mm de comprimento; Parafusos Allen Cabeça Cônica M4 - 12 mm de comprimento; Porcas Auto Travantes Parlock - M5 e Peças em Acrílico sob demanda. Seguindo os parâmetros e medidas obtidos através do *software CAD*, foi realizada a montagem do conjunto de movimentação do eixo Z (ilustrado na Figura 20).

Figura 20 – Conjunto de movimentação do eixo Z montado



Fonte: Próprio autor.

Para a movimentação do eixo Z optou-se pela utilização de um sistema de correia e polia associado ao fuso trapezoidal. De acordo com Santos e Gonçalves (2021), esse sistema costuma ser utilizado quando se requer um aumento do torque disponibilizado pelo motor. Utilizando a relação 3:1, há um aumento de eficiência de 95%. Como pode ser notado na Figura 20, a polia de 20 dentes está acoplada ao eixo do motor de passo enquanto que a polia de 60 dentes está acoplada ao fuso trapezoidal, desse modo é possível se obter um aumento de até 2,85 vezes no torque do motor de passo.

Com a utilização desse sistema, tem-se eficiência máxima de 50% (Santos; Gonçalves, 2021) enquanto que, se fosse utilizado o mesmo sistema, porém com o fuso de esferas, a eficiência chegaria até 90%, levando em consideração a mesma aplicação. Em relação ao custo, para este projeto, este sistema de redução 3:1 com fuso trapezoidal atinge todas as necessidades, uma vez que serão usinados blocos de espuma flexível. Se fosse adotada a utilização do mesmo sistema, porém com um fuso de esferas, o mesmo teria um custo 7 vezes maior do que o fuso trapezoidal. Desse modo, visando a redução de custo, esta solução comercial torna-se a mais viável para ser utilizada neste projeto.

4.1.3 Montagem Eletrônica da Máquina CNC: Hardwares Utilizados

Após a montagem da base estrutural e mecânica da máquina *Router* CNC com as estruturas dos conjuntos de movimentação dos eixos X, Y e Z finalizadas, deu-se início na montagem da parte eletrônica do projeto, da qual fazem parte diversos componentes de *hardware* como, placa microcontroladora compatível com Arduino® UNO, CNC *Shield*, *Driver* de Potência DRV8825, Motor de Passo NEMA 17, *Spindle*, e componentes de *software* como, *Firmware Grbl*, *IDE Arduino* e *Universal G-code Sender*.

O *hardware* é um dos principais elementos de um sistema de controle, neste caso, sendo responsável por realizar o controle do deslocamento dos eixos no plano cartesiano baseado em instruções recebidas de um *software*. Há uma grande diversidade de *hardwares* capazes de executar essas funções dependendo da necessidade da aplicação, como exemplo, podem ser citados os CLP's (Controladores Lógicos Programáveis) (Artacho, 2015) e os Microcontroladores (Gridling; Weiss, 2007).

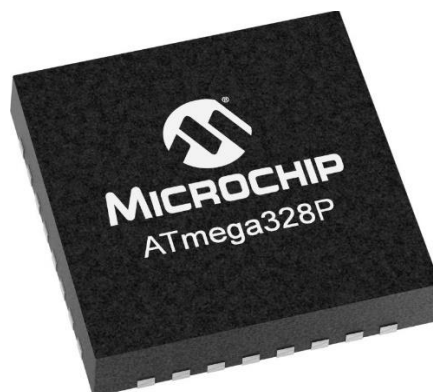
Pode-se afirmar que, dentro da comunidade *DIY* (*do it yourself*) e *Maker*, um dos microcontroladores mais utilizados é o AVR® da Atmel®, que faz parte da composição da placa de prototipagem eletrônica Arduino®, o que o torna a opção mais viável para ser utilizado na construção de Impressoras 3D e Máquinas CNC, por possuir um custo relativamente baixo, *hardware* e *software* livres, além de uma grande variedade de placas com modelos diferentes que podem ser utilizadas de acordo com a necessidade de cada projeto (Ismailov; Jo'rayev, 2022).

4.1.3.1 Microcontrolador utilizado na máquina CNC

Um microcontrolador é um dispositivo eletrônico de dimensões reduzidas, constituído por circuitos integrados, cuja funcionalidade é realizar operações específicas mediante uma lógica programável. Este circuito integrado engloba uma Unidade Lógica e Aritmética (ULA) para processamento, memória, interfaces de entrada e saída, temporizadores, módulos de comunicação serial, entre outros recursos periféricos (Maia Neto, 2019).

Para este projeto, foi utilizado o microcontrolador ATmega328P (Arrahman, 2022), cuja função é receber o G-code enviado pelo software, interpreta-lo e acionar os atuadores que comandam a movimentação da ferramenta nos eixos de movimentação (Polastrini, 2016).

Figura 21 – Microcontrolador ATmega328P



Fonte: (Atmel Corporation, 2015)

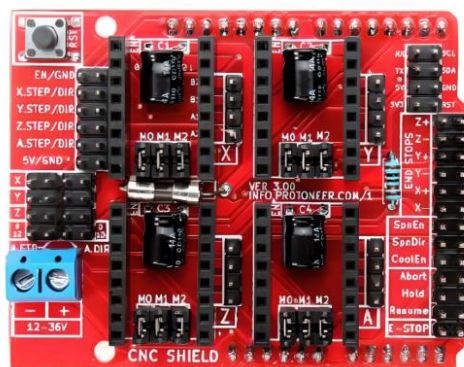
O microcontrolador ATmega328P possui arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) de 8 bits e alto desempenho, caracterizado pela sua configuração que integra recursos avançados e incorpora uma memória Flash ISP de 32 KB, que permite a leitura durante a gravação. Operando entre 1,8 e 5,5 volts, este dispositivo é capaz de executar instruções poderosas em um único ciclo de clock, alcançando taxas de transferência próximas a um MIPS (*Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages*) por MHz, garantindo um equilíbrio entre consumo de energia e velocidade de processamento (Atmel Corporation, 2015).

4.1.3.2 CNC Shield V3

O CNC Shield V3 (Figura 22) é um módulo compatível com o microcontrolador ATmega328P e possui conexões de entrada e saída para o controle de componentes como, Motor de passo, módulos *Endstops*, Spindle e outros. Amplamente utilizado para máquinas CNC e impressoras 3D, o CNC Shield é controlado por um firmware que fica armazenado na memória do microcontrolador que é responsável por converter o G-code na movimentação dos motores de passo conectados a ele (Anis; Santosa, 2018).

Segundo Polastrini (2016), os principais benefícios de se utilizar o CNC Shield V3, são a sua simplicidade de instalação eletrônica, a disposição de encaixes para a conexão direta de até quatro drivers de potência e uma entrada de alimentação independente para esses drivers, podendo variar entre 12V a 35V.

Figura 22 – CNC Shield V3



Fonte: (Polastrini, 2016).

Também conhecida como placa de expansão, este *shield* facilita a instalação eletrônica dos componentes, possuindo encaixes para o acoplamento direto de até quatro drivers de potência e com circuito de alimentação de energia tanto para o microcontrolador quanto para os drivers, se torna um dos itens mais utilizados no desenvolvimento de máquinas CNCs.

Os pinos M0, M1 e M2 situados abaixo de onde são encaixados os drivers X, Y, Z e A são responsáveis por controlar a resolução de passos dos motores, sendo que esses pinos possuem resistores *pull-down* internos, e caso sejam mantidos desconectados o driver irá operar em passo completo (*Full Step*) (Figini, 2017).

Conforme descrito no Quadro 7, podemos analisar a configuração da resolução de passos que pode ser utilizado nos motores.

Quadro 7 - Configuração da resolução de passo dos motores

MS0	MS1	MS2	RESOLUÇÃO
DOWN	DOWN	DOWN	Passo Completo
UP	DOWN	DOWN	1/2 passo
DOWN	UP	DOWN	1/4 passo
UP	UP	DOWN	1/8 passo
UP	UP	UP	1/16 passo

Fonte: (Figini, 2017).

Para este projeto, foi adotada a utilização de resolução de 1/4 de passo dos motores de todos os eixos, desse modo temos uma configuração intermediária em relação ao tipo de máquina CNC que se pretende obter.

4.1.3.3 *Driver de Potência DRV8825*

Os drivers de potência são utilizados para transformar sinais elétricos de baixa potência, recebidos em sua entrada, em pulsos elétricos de maior potência em sua saída. A sua utilização é necessária quando as especificações de alimentação (corrente e tensão) de um dispositivo não conseguem ser atendidas de forma correta e eficaz pelo sistema que o controla (Polastrini, 2016).

Segundo Meijer (2013), os drivers de motores de passo podem ser considerados e classificados de acordo com sua fonte de alimentação nominal e corrente de saída, podendo variar de 2A até 5A com tensão entre 20 e 50V.

Figura 23 – Driver de Potência DRV8825



Fonte: (Meijer, 2013).

O Driver DRV8825 (ilustrado na Figura 23) é uma placa que utiliza o controlador de motor de passo da *Texas Instruments* - DRV8825. Podendo atuar como interface entre o microcontrolador e motor de passo, o DRV8825 possui a capacidade de fornecer até 2,5A e pode ser controlado com uma interface simples de passo/direção (Meijer, 2013). Com resolução máxima de 1/32 passos e recursos de proteção para sobrecorrente, curto-circuito e sobre temperatura, além de possuir uma ótima relação custo/benefício, o driver de potência DRV8825 se torna um dos drivers mais utilizados para projetos como este.

Para que os drivers de potência realizem o controle dos motores de passo de forma eficiente, sem que os mesmos sofram perda de torque por falta de tensão, torna-se necessário calcular o VREF de cada driver para ajustar o nível de tensão que sairá para o motor, esse cálculo pode ser realizado por meio das equações 1 e 2.

Dessa forma, calcula-se:

$$VREF = IMAX * (4 * RD), \quad (1)$$

onde, VREF representa a tensão de referência; IMAX representa a corrente máxima do motor de passo e RD representa a resistência de detecção do driver (R1 e R2 do driver de potência).

$$VREF = 1,27 * (4 * 0,10) = 0,51 V. \quad (2)$$

Logo, a partir da resolução da equação 2, chega-se ao valor do VREF = 0,51 V que pode ser ajustado por meio do *trimpot* do driver de potência.

4.1.3.4 Motor de passo Nema17

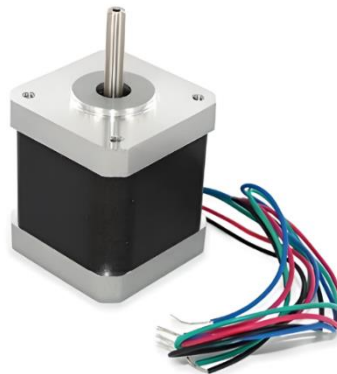
O motor de passo é um dispositivo atuador eletromecânico com capacidade de transformar cadeias de pulsos elétricos em energia mecânica, possibilitando o movimento rotacional discreto de um eixo, podendo ser em pequenos incrementos angulares, denominados de passo (Moreira, 2018).

No motor de passo, cada conjunto de bobinas é denominado de fase que, quando energizadas, provocam interações eletromagnéticas no interior do motor, fazendo com que o rotor gire. Para que o giro do rotor possa ser controlado, o motor

é alimentado com sequências de pulsos elétricos ordenados em cada uma de suas fases, gerando o movimento angular do rotor que é denominado de passo e determinando o sentido de giro do rotor (Polastrini, 2016).

Sendo amplamente utilizados atualmente como atuadores, principalmente na robótica (Anis; Santosa, 2018), os motores de passo (ilustrado na Figura 24) também possuem grande visibilidade na fabricação de máquinas como impressoras e scanners, principalmente por possuírem alto torque, sincronismo, ângulo de rotação e posicionamento preciso. Devido a essas características, também são amplamente utilizadas na construção de máquinas CNC e impressoras 3D (Moreira, 2018).

Figura 24 – Motor de Passo Nema 17



Fonte: Autor (2023).

Segundo Moreira (2018), é essencial que sejam utilizados motores de passo em projetos como este devido ao alto torque que possuem, sincronismo, ângulo de rotação e posicionamento preciso. Por esta razão, existem diversos projetos que utilizam motores de passo como atuadores em conjunto com driver de potência e controladores (Anis; Santosa, 2018).

Para este projeto foi utilizado o motor de passo NEMA 17 HS8401, com torque de 5,2kgf, operando com tensão de 4,8V e até 1,8A por fase. Amplamente utilizado em máquinas de pequeno porte, como impressoras 3D e *Router* CNC, o que facilitou na escolha do modelo conforme a necessidade do projeto.

4.1.3.5 Sensor Endstops

Segundo Thomazini e Albuquerque (2020), sensor é o termo designado para dispositivos sensíveis à alguma forma de energia do ambiente, podendo ser luminosa,

térmica ou cinética, e relacionando informações sobre uma determinada grandeza física que necessita ser mensurada (medida), como por exemplo, a temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, etc.

Segundo Thomazini e Albuquerque (2020), existe uma grande diversidade de sensores, citados do Quadro 8.

Quadro 8 – Sensores e suas funcionalidades

TIPO DE SENSOR	FUNCIONALIDADE
Fotoelétricos	Sensores que operam em função da luz;
Térmicos	Operam em função da variação da temperatura do meio em que se encontram;
Capacitivos	Operam gerando um campo eletrostático e detectam mudanças nesse campo;
Indutivos	Operam emitindo sinais que detectam elementos metálicos sem ter contato direto;
Ultrassônicos	Operam por meio de um oscilador que emite ondas ultrassônicas que são captadas por um sensor;
Mecânicos	Operam através de movimentos, posição ou presença utilizando recursos mecânicos;

Fonte: Elaborado pelo Próprio autor.

Sensores mecânicos, como os sensores de Chave Fim de Curso ou *Endstops* (Figura 25), são chaves comutadoras ou interruptores que operam sobre um circuito, desligando-o ou ligando-o quando uma ação mecânica acontece em seu elemento atuador (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

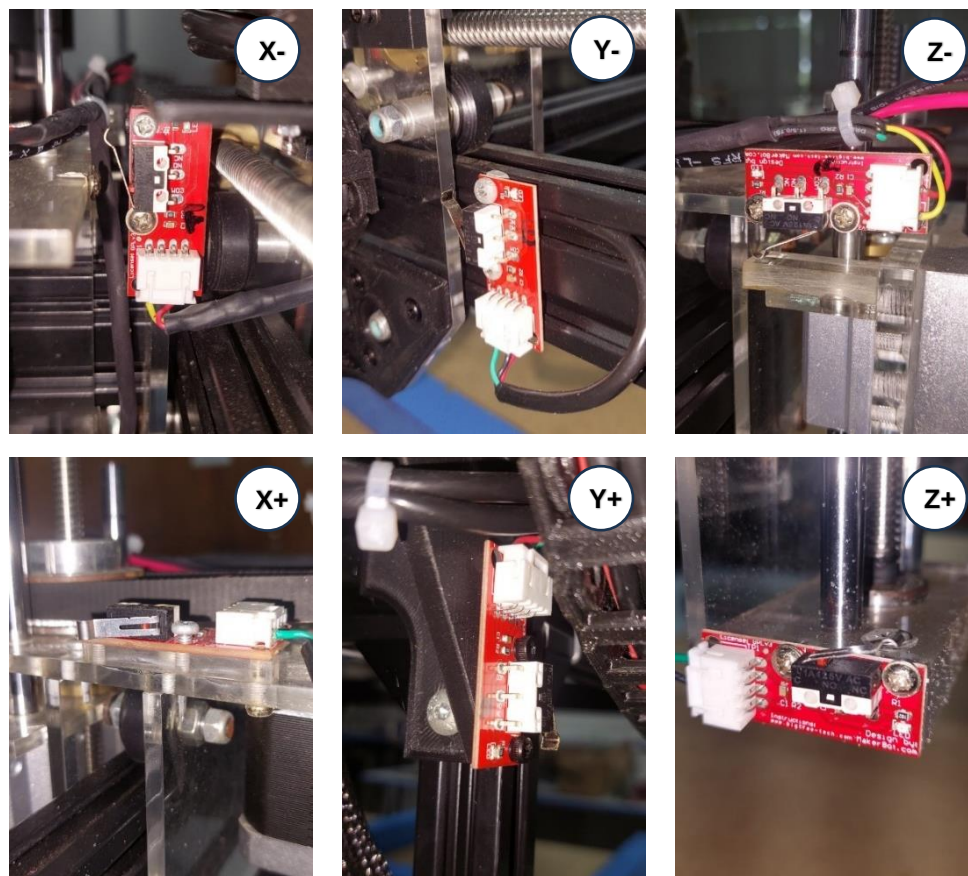
Figura 25 – Sensor *Endstops* – Chave Fim de Curso



Fonte: Próprio autor.

Para este projeto, foram utilizados 6 sensores *Endstops*, sendo um par para cada eixo (Figura 26). Os sensores de fim de curso servem para indicar um ponto de partida para a impressora ou o limite de sua área de trabalho, dessa forma, os eixos podem basear suas posições iniciais pela posição dos sensores. Os sensores foram posicionados no ponto inicial de cada eixo, dessa forma, temos que o ponto inicial de trabalho será sempre nas coordenadas X0, Y0 e Z0 podendo ser obtidas por meio do acionamento dos sensores, e no ponto final de cada eixo, ou seja, no limite máximo que a ferramenta deve percorrer pelo plano cartesiano.

Figura 26 – Posicionamento dos sensores *endstops* na máquina CNC



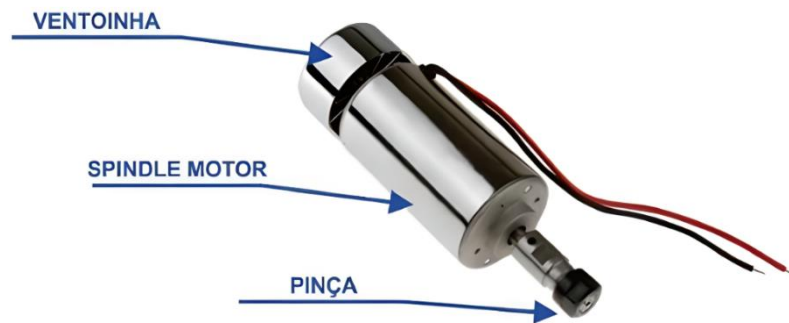
Fonte: Próprio autor.

4.1.3.6 *Spindle – máquina ferramenta de corte*

A máquina ferramenta é a parte da máquina CNC que realiza o corte da matéria-prima. Em uma CNC router, essa máquina ferramenta consiste basicamente um motor de alta rotação, também conhecido como *Spindle*, que possui em seu eixo

uma haste de fixação (pinça) da ferramenta cortante chamada de fresa, conforme ilustrada na Figura 27 (Polastrini, 2016).

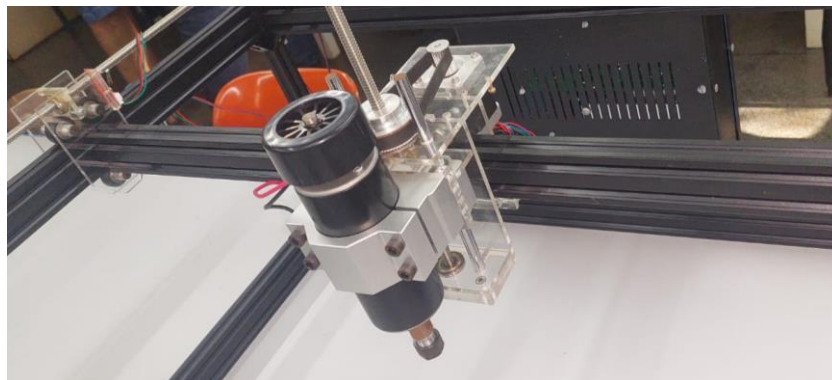
Figura 27 - Motor Spindle 500w Er11 CNC Router Fonte CA110/220V



Fonte: (Polastrini, 2016).

O Spindle utilizado neste projeto foi um Motor *Spindle* Er11 CNC Router com tensão de alimentação de 100VAC, controle de velocidade de 3000 a 12000 RPM (Rotação Por Minuto), 500W de potência e torque de 5500g/cm (Figura 28). Esta é uma opção de bom custo benefício e que traz resultados satisfatórios para trabalhos com madeiras leves, polímeros e até mesmo ligas leves de alumínio.

Figura 28. Spindle fixado ao eixo Z da Máquina CNC



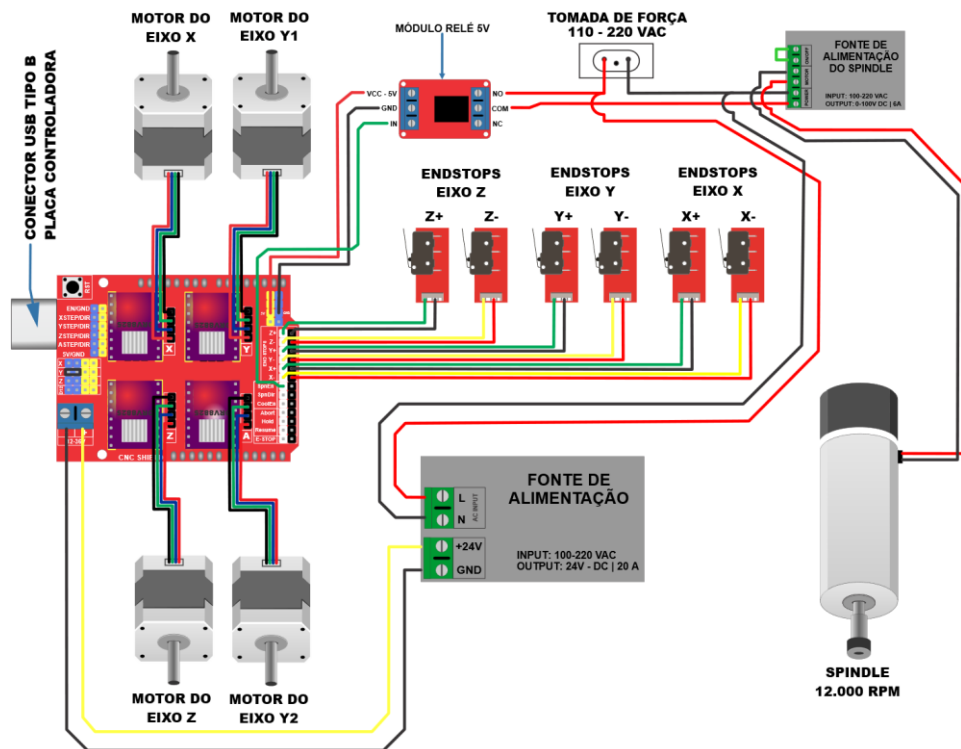
Fonte: Autor (2024)

4.1.3.7 Esquemático da montagem eletrônica da máquina CNC

Para realizar a montagem dos componentes eletrônicos da máquina CNC, foi utilizado como base o diagrama de conexão representado na Figura 29. Esse diagrama de conexão foi criado com base nos modelos de máquinas CNCs mais

populares da comunidade *maker*, desse modo, tal representação do diagrama contém todas as alterações feitas durante a execução do projeto.

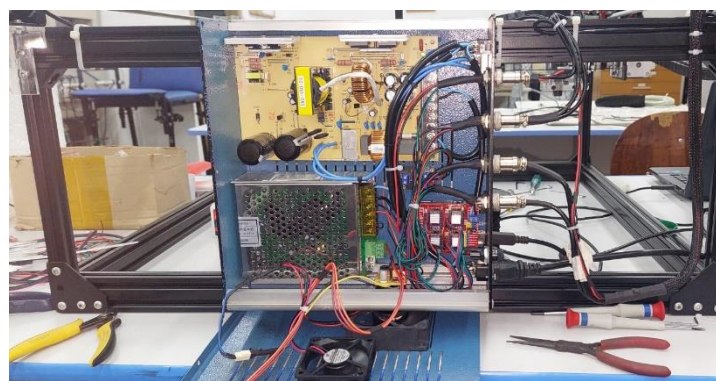
Figura 29. Diagrama de conexão dos componentes eletrônicos da Máquina CNC



Fonte: Próprio autor.

A montagem eletrônica foi realizada dentro de um gabinete, onde todos os componentes foram acomodados e interligados conforme o diagrama. Desse modo, obteve-se todo o sistema de hardware que será utilizado para realizar o controle da máquina CNC (Figura 30).

Figura 30 – Montagem do gabinete do hardware de controle da máquina CNC



Fonte: Autor(2024).

4.1.4 Softwares Utilizados na CNC

O software é responsável pela interface entre o usuário e a máquina, possibilitando o controle e manipulação das ações da mesma por meio de uma interface gráfica intuitiva e de fácil operação (Fachim, 2013). Denominados de CAM (*Computer-Aided Manufacturing*), esses softwares são amplamente utilizados pelas máquinas CNCs, fornecendo as instruções que deverão ser seguidas pela máquina para iniciar e concluir o processo de fabricação de um determinado produto. Existem variados tipos de softwares CAM open source que possuem compatibilidade com Grbl (interpretador de G-code), que podem ser utilizados para fazer o controle e configuração do G-code (Moreira, 2018).

4.1.4.1 *Firmware Grbl*

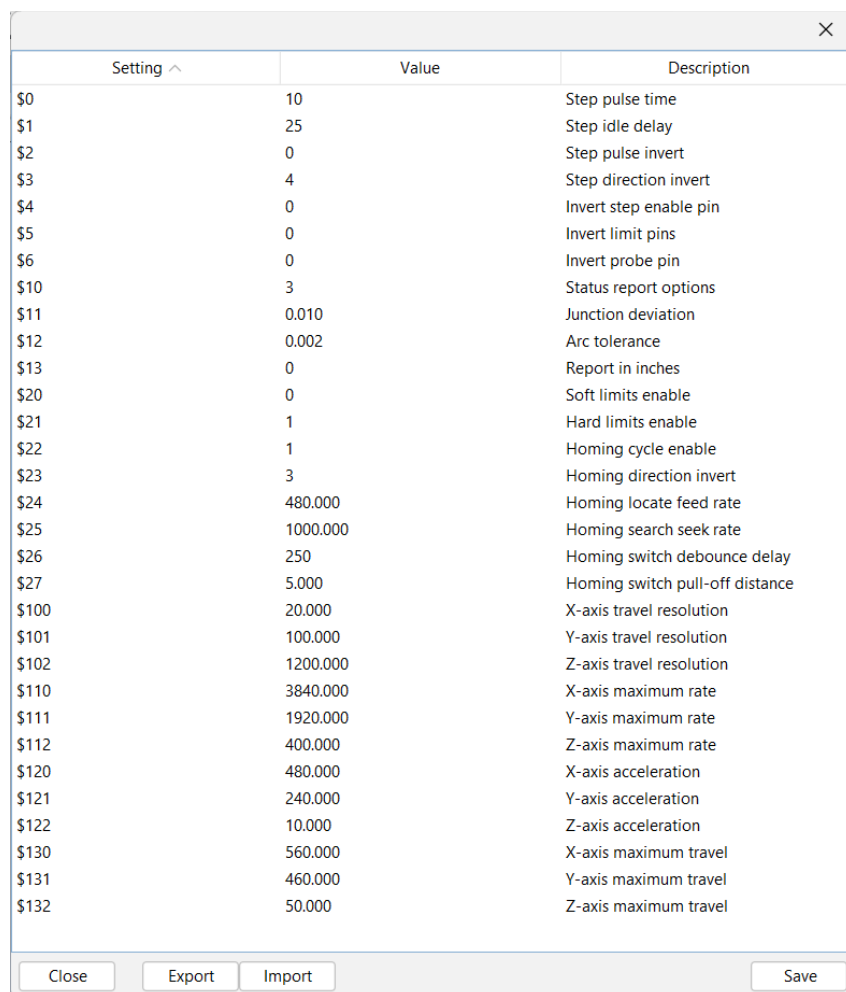
Gozzo (2017) descreve em sua pesquisa que independentemente da natureza, os “firmwares” (também conhecidos como softwares embarcados) são softwares embutidos em equipamentos que necessitam desempenhar algum “controle” sobre uma máquina. Também podem ser citados alguns exemplos de firmwares em equipamentos portáteis de medição, como os sistemas operacionais de celulares, os softwares de máquinas fotográficas digitais, máquinas de lavar, impressoras, ar condicionados, dentre outros. No âmbito eletrônico, são considerados sistemas embarcados os softwares desenvolvidos para executarem tarefas específicas em equipamentos específicos, diferentemente de equipamentos que possuem um propósito mais amplo como um computador pessoal.

Em um âmbito mais geral, o firmware é um *software* interpolado integrado a um dispositivo de hardware que permite a leitura e execução de um software, porém não permite a modificação. Em outras palavras, o firmware é um controlador de entrada e saída de baixo nível que gerencia dispositivos de hardware. Em um computador, o firmware permite a comunicação entre software e hardware. Os firmwares são primordialmente desenvolvidos em linguagem de máquina, como a Assembly, por exemplo, porém hoje alguns microcontroladores interpretam funções implementadas em linguagem C, possibilitando o surgimento de muitas variações oriundas de outras versões (Gozzo, 2017).

O firmware Grbl é um interpretador de G-code criado por *Simen Svale Skogsrud* em 2009, e por ser de código aberto é muito utilizado pela comunidade DIY (Fachim, 2013). É um software livre desenvolvido em linguagem C e otimizado para ser utilizado em conjunto com microcontroladores ATmega328p, sendo um dos responsáveis por controlar os movimentos da máquina, possui licença GPLv3, requer hardware simples e tem padrões industriais, tornando-se base para máquinas CNC, impressoras 3D e outras máquinas de três eixos (Polastrini, 2016).

Utilizando o *software* de controle *Universal Gcode Sender Platform* (descrito no tópico 4.1.4.3), foi realizada a configuração dos principais parâmetros responsáveis pela movimentação correta da máquina (Figura 31). Todos os valores adicionados na configuração foram previamente calculados de acordo com as especificações da máquina CNC.

Figura 31 - Configurações dos parâmetros do Grbl para a Máquina CNC



Setting ^	Value	Description
\$0	10	Step pulse time
\$1	25	Step idle delay
\$2	0	Step pulse invert
\$3	4	Step direction invert
\$4	0	Invert step enable pin
\$5	0	Invert limit pins
\$6	0	Invert probe pin
\$10	3	Status report options
\$11	0.010	Junction deviation
\$12	0.002	Arc tolerance
\$13	0	Report in inches
\$20	0	Soft limits enable
\$21	1	Hard limits enable
\$22	1	Homing cycle enable
\$23	3	Homing direction invert
\$24	480.000	Homing locate feed rate
\$25	1000.000	Homing search seek rate
\$26	250	Homing switch debounce delay
\$27	5.000	Homing switch pull-off distance
\$100	20.000	X-axis travel resolution
\$101	100.000	Y-axis travel resolution
\$102	1200.000	Z-axis travel resolution
\$110	3840.000	X-axis maximum rate
\$111	1920.000	Y-axis maximum rate
\$112	400.000	Z-axis maximum rate
\$120	480.000	X-axis acceleration
\$121	240.000	Y-axis acceleration
\$122	10.000	Z-axis acceleration
\$130	560.000	X-axis maximum travel
\$131	460.000	Y-axis maximum travel
\$132	50.000	Z-axis maximum travel

Fonte: Próprio autor.

4.1.4.2 *Arduino® IDE 2*

O Arduino® IDE 2 (*Integrated Development Environment* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) é uma melhoria do IDE clássico, com desempenho otimizado, interface de usuário aprimorada e muitos novos recursos, como depurador integrado, esboços de sincronização com o Arduino Cloud e preenchimento automático (ARDUINO, 2024).

A linguagem utilizada para programar nesse software é uma variação da linguagem C baseada em *Wiring* (FRIZZARIN, 2016). Além de possuir plataforma cruzada, o Arduino® IDE 2 é um editor versátil com muitos recursos. Possibilitando a instalação de bibliotecas diretamente na nova interface, além de sincronizar seus esboços com o *Arduino Cloud*, tornando a depuração muito mais rápida (ARDUINO, 2024).

4.1.4.3 *Universal G-code Sender Platform – software de controle*

Para que seja realizada a comunicação entre o computador e a máquina, é fundamental o uso de uma IHC (Interface Homem Computador) que permita o controle da máquina *Router CNC* em tempo real, realizando o envio do conjunto de instruções que o firmware irá ler e executar. Existem diversos softwares que podem ser utilizados para desempenhar esta função, dentre eles os mais utilizados são o *Easel*, *bCNC* e o *Universal G-code Sender* (Polastrini, 2016).

Segundo Polastrini (2016), esse software foi desenvolvido em Java sob a licença GPLv3, possuindo compatibilidade com vários sistemas operacionais como Windows®, Linux e Raspberry, sendo de fácil configuração e o mais utilizado na comunidade *Maker*.

O UGS é uma plataforma G-code gratuita e completa usada para interface com controladores CNC avançados como *GRBL*, *TinyG*, *g2core* e *Smoothieware* (Universal Gcode Sender, 2024).

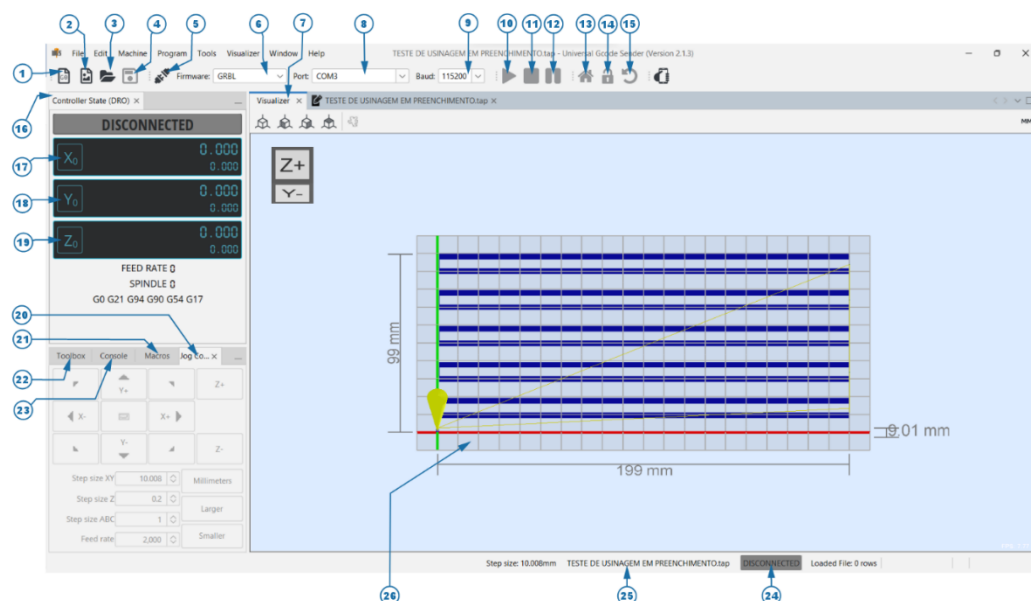
Segundo Universal Gcode Sender (2024), as principais características da plataforma são:

- a) Plataforma cruzada, pode ser executado em Windows®, MacOS®, Linux e Raspberry Pi;

- b) Visualizador 3D Gcode com segmentos de linha codificados por cores e feedback da posição da ferramenta em tempo real;
- c) Estimativas de duração;
- d) Suporte para *Gamepads* e *Joysticks*;
- e) Interface pendente da web;
- f) Possível conectar um *Gamepad*;
- g) Ferramenta para desenhar e gerar gcode;
- h) Mais de 3.000 linhas de código de teste de unidade e outras 1.000 linhas de comentários documentando os testes;
- i) Otimização de g-code configurável;
 - Remover comentários,
 - Truncar a precisão decimal para um valor configurável,
 - Converter arcos (G2/G3) em segmentos de linha,
 - Remover espaços em branco.

Possibilitando a operação da máquina CNC por meio de um computador, o Universal Gcode Sender Platform é de fácil utilização por possuir uma interface que permite a personalização do posicionamento de cada janela. Desse modo, cada usuário pode personalizar a interface de acordo com o uso, de forma a tornar o trabalho mais eficiente. A Figura 32 ilustra a interface de controle do Universal Gcode Sender Platform.

Figura 32. Ilustração da Tela de Interface do *Universal Gcode Sender Platform*



Fonte: Próprio autor.

As funções da interface do Universal Gcode Sender Platform servem para realizar o processo de controle da máquina CNC, como movimentação dos eixos, acionamento do *spindle* e outras funções que executam ações automáticas, como o botão “home” que movimenta os eixos até o ponto inicial X0, Y0 e Z0 da máquina. Como se pode notar na Figura 45, todas as funções da interface estão indicadas por números e estão descritas no Quadro 9.

Quadro 9 – Legendas da interface de controle do Universal Gcode Sender Platform

Nº	LEGENDA
1	Criar um Arquivo G-code
2	Criar um Desenho
3	Abrir Arquivo
4	Salvar
5	Conectar a Plataforma à máquina
6	Seleção do Firmware
7	Janela de Visualização do Modelo em Uso
8	Seleção da Porta de Comunicação Serial
9	Seleção da Velocidade da Comunicação Serial
10	Iniciar Processo
11	Parar Processo
12	Pausar Processo
13	Ir para o as Coordenadas iniciais da Máquina
14	Bloquear e Desbloquear Ações
15	Reiniciar Processo
16	Janela de Estado de Controle
17	Exibe a Coordenada Atual do eixo X
18	Exibe a Coordenada Atual do eixo Y
19	Exibe a Coordenada Atual do eixo Z
20	Janela de Controle Manual de Movimento
21	Janela Personalizada de Macros criada pelo usuário
22	Janela de Caixa de ferramentas de ações
23	Console em tempo real da máquina
24	Status de Conexão da Plataforma com a Máquina
25	Nome do Arquivo aberto
26	Ilustração 2D ou 3D do arquivo aberto

Fonte: Próprio autor.

4.1.5 Softwares CAD e CAM

Nos últimos anos, houve notáveis avanços no campo dos softwares CAD (Computer Aided Design) e CAM (Computer Aided Manufacturing), os quais emergiram na década de 70, causando um impacto significativamente positivo em diversas áreas, incluindo medicina, odontologia, arquitetura, engenharias, robótica e, sobretudo, nas indústrias (Silva *et al.*, 2020).

Os sistemas CAD consistem em aplicativos computacionais projetados para auxiliar na criação, modificação e análise de desenhos técnicos. Esses softwares oferecem uma ampla gama de recursos que possibilitam a definição de parâmetros e restrições geométricas, determinando assim a forma, dimensões e relações angulares das entidades modeladas. Consideradas ferramentas essenciais e amplamente adotadas em diversas áreas que demandam modelos e projetos 2D e 3D precisos e versáteis, suas principais aplicações incluem desenhos de engenharia, desenhos industriais e diversos tipos de projetos de construção (Chiozza, 2017).

Por outro lado, os softwares CAM representam processos subsequentes ao CAD, relacionados diretamente ao processo de produção. Esses procedimentos são executados por meio de um software que analisa o modelo 3D, gerando um código de programação conhecido como código G. Este código contém instruções para controlar os movimentos da máquina utilizada na fabricação da peça projetada (Carboni *et al.*, 2019).

4.1.5.1 Autodesk Inventor® Professional - software de modelagem e simulação 3D

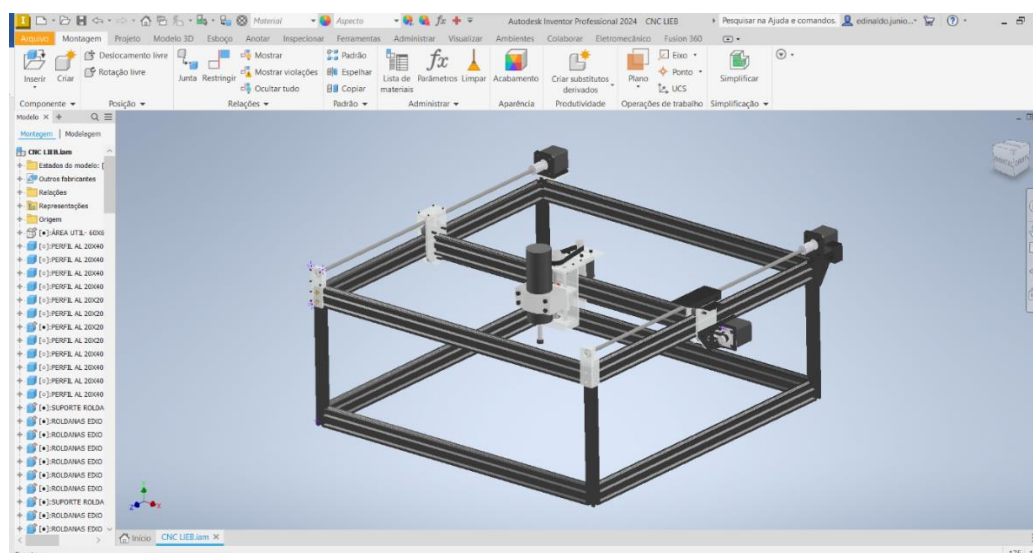
O Autodesk Inventor® Professional é um software CAD que disponibiliza ferramentas de natureza profissional destinadas à elaboração de projetos tridimensionais, especialmente voltados para aqueles que demandam movimentação mecânica, engenharia e desenvolvimento de produtos. Para além da abrangência de suas ferramentas, o referido software possibilita a criação de documentação e simulação de produtos, otimizando, assim, o processo de concepção por meio da integração de uma ampla gama de recursos de design paramétricos, diretos, de forma livre e baseados em regras (Autodesk, 2024).

O Inventor® Professional foi empregado na realização de prototipagem rápida deste projeto, notadamente devido à disponibilidade de uma licença educacional. Tal

licença viabilizou a geração de um protótipo tridimensional da máquina, que posteriormente serviu como base para a montagem do equipamento. Nesse contexto, tornou-se possível realizar uma análise preliminar de potenciais melhorias e implementações durante a modelagem da máquina CNC.

Este procedimento permitiu antecipar eventuais problemas de montagem durante o processo de construção, uma vez que, com o modelo 3D concluído, foi possível extrair medidas precisas de todas as peças da máquina. Na Figura 33 pode-se fazer uma breve análise na interface do software *Inventor® Professional* durante o processo de modelagem 3D da máquina CNC.

Figura 33 - Interface do software CAD *Inventor® Professional* durante o processo de modelagem da máquina CNC



Fonte: Próprio autor.

4.1.5.2 Aspire® - software para criar e cortar peças em uma fresadora CNC

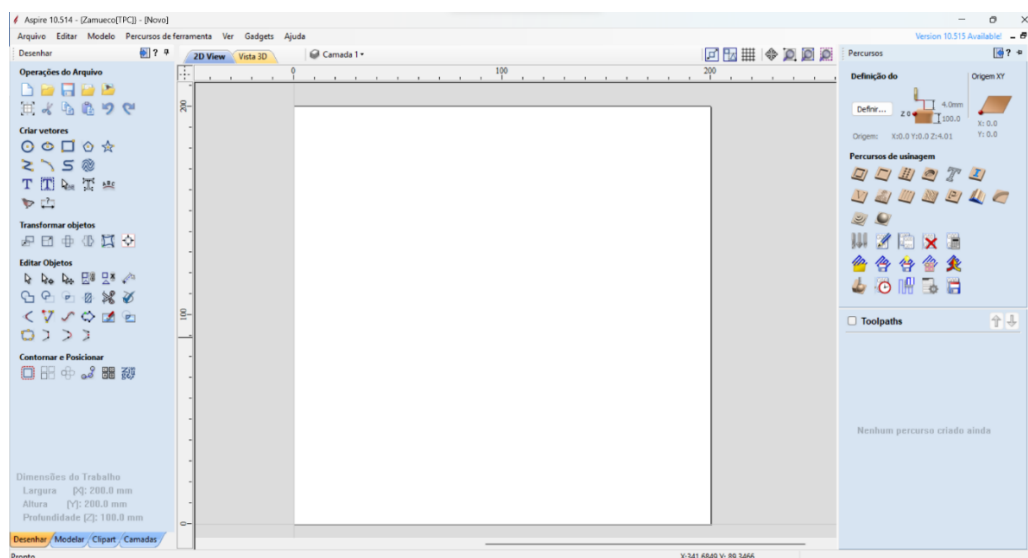
O software *Aspire®* constitui uma ferramenta CAD que apresenta uma solução robusta e altamente intuitiva, possibilitando a criação e o corte de peças em uma fresadora CNC. Suas principais funcionalidades compreendem processos de design 2D e cálculo de trajetórias de ferramenta 2D, tais como *Profiling*, *Pocketing* e *Drilling*, assim como trajetórias de ferramenta em um contexto 2.5D, englobando entalhe em V, entalhe em prisma, trajetórias de moldagem, canaletas, trajetórias de chanfro e até mesmo uma estratégia de texturização decorativa (VECTRIC, 2024).

A utilização do software *Aspire®* desempenhou um papel crucial no processo de usinagem dos blocos de espuma flexível. Isso se deve ao fato de que o software,

além de possibilitar a criação do objeto a ser usinado, permite a geração direta do arquivo g-code para máquinas CNC, eliminando a necessidade de empregar outros softwares intermediários. Esta ferramenta oferece a capacidade de ajustar todos os parâmetros da ferramenta a ser utilizada no processo de fresagem, incluindo espessura da fresa, altura de cada camada do ciclo de fresagem, velocidade do processo, ponto de início do processo, tipo do material a ser utilizado, espessura do material, entre outros.

Em virtude da eficiência nos processos de modelagem e usinagem nos blocos de espuma flexível, o software foi explorado por meio de uma versão de avaliação gratuita. Mesmo com as limitações inerentes a essa versão, dada sua natureza de avaliação, foi possível realizar a usinagem de todas as peças de maneira profissional e com elevada qualidade. A Figura 34 ilustra a interface do *software* Aspire®, onde são gerados os modelos por meio da utilização das ferramentas de desenho e modelagem 2D e 3D.

Figura 34 – Interface do software CAD Aspire®



Fonte: Próprio autor.

4.2 RESOLUÇÃO DOS EIXOS DA MÁQUINA CNC

A determinação da resolução máxima atingida pelos eixos requer a realização de cálculos matemáticos fundamentados nos parâmetros dos dispositivos responsáveis pelo movimento dos referidos eixos. De acordo com Gozzo (2017), a

avaliação da resolução em sistemas orientados por correias e barras roscadas é conduzida mediante a aplicação das equações 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, respectivamente.

Dessa forma, calcula-se:

$$E1 = \frac{PC * NDP}{PRM * MD}, \quad (3)$$

Onde, E1 representa a equação para resolução de sistemas guiados por correias e polias (mm); PC representa o passo da correia (mm); NDP representa o número de dentes da polia; PRM representa o número de passos por revolução do motor de passo; e MD representa a configuração de *microstepping* realizada no driver de potência.

Com base nos componentes utilizados para a movimentação do eixo X, com sistemas guiados por correias e polias, temos as correias GT2 que possuem passo de 2mm e polias do modelo GT2 fabricadas em alumínio com 20 dentes. Quanto ao PRM, é calculado em relação aos parâmetros do motor de passo utilizado, dessa forma temos o motor de passo NEMA17 que possui o ângulo de passo de 1,8 graus e o número de passos por revolução (360°) igual a 200. Já a configuração de micro passos utilizada no driver de modelo DRV8825 foi de ¼ de micro passos, tendo como base os dados representados na Quadro 8 da seção 4.1.3.3. Com esses valores aplicados na equação 3, chegamos ao valor:

$$E1 = \frac{2 * 20}{200 * 4} = 0.05 \text{ mm} \quad (4)$$

Logo, a resolução alcançada no eixo X com base nos valores apresentados para o cálculo da equação 4 é de 0.05 mm.

Para se calcular o valor da equação 5, alguns parâmetros são alterados em relação a equação 3, dessa forma temos:

$$E2 = \frac{PFT}{PRM * MD}, \quad (5)$$

onde, E2 representa a equação para resolução de sistemas guiados por barras roscadas (mm); PFT representa o passo do fuso trapezoidal (mm); PRM representa o

número de passos por revolução do motor de passo; e MD representa a configuração setada no *microstepping* do driver de potência.

A barra roscada utilizada no eixo Y foi um Fuso Trapezoidal TR8 com passo de 8 mm, logo o PFT = 8 mm. Já o PRM e o MD são conhecidos por meio da realização do cálculo da equação 4, assim tem-se:

$$E2 = \frac{8}{200 * 4} = 0.0100 \text{ mm.} \quad (6)$$

Logo, a resolução alcançada no eixo Y com base nos valores apresentados para o cálculo da equação 6 é de 0.0100 mm.

Por fim, para calcular a equação 7 e encontrar a resolução do eixo Z temos:

$$E3 = \frac{DR}{PRM * MD}, \quad (7)$$

onde, E3 representa a equação para resolução de sistemas guiados por relação entre sistema de redução de polias 3:1 e barras roscadas (mm); DR representa a distância por revolução do sistema de redução de polias; PRM representa o número de passos por revolução do motor de passo; e MD representa a configuração setada no *microstepping* do driver de potência.

Para realizar o cálculo da equação 7, primeiramente torna-se necessário encontrar o valor de DR que é dado pela equação 8:

$$DR = PFT * \frac{\text{Número de Dentes da Polia Maior}}{\text{Número de Dentes da Polia Menor}}, \quad (8)$$

onde, PFT representa o passo do fuso trapezoidal e o número de dentes das polias maior e menor são 60 e 20 respectivamente (conforme as informações do fabricante). Desse modo, temos que:

$$DR = 2 * \frac{60}{20} = 6 \text{ mm.} \quad (9)$$

Definido o valor de DR, pode-se realizar o cálculo da equação para resolução de sistemas guiados por relação entre sistema de redução de polias 3:1 e barras roscada, assim tem-se:

$$E3 = \frac{6}{200 * 4} = 0.0075 \text{ mm.} \quad (10)$$

Logo, a resolução alcançada no eixo Z com base nos valores apresentados para o cálculo da equação 10 é de 0.0075 mm.

4.2.1 Resolução de Movimentação dos Eixos

Além da realização dos cálculos relativos às resoluções máximas atingidas pelos motores de passo com base na disposição dos componentes de hardware envolvidos, é imperativo determinar os parâmetros críticos a serem incorporados na configuração do firmware grbl. Esses parâmetros estão relacionados com o número de passos requeridos por unidade de distância (passos/mm) correspondentes aos eixos X, Y e Z. Em essência, são empregadas as equações 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 para calcular as resoluções de movimentação.

Para realizar o cálculo da equação 11, tem-se:

$$R1 = \frac{MD * PRM}{PC * NDP}, \quad (11)$$

onde R1 representa a resolução de movimentação de sistemas movidos por correia (passos/mm); PC representa o passo da correia (mm); NDP representa o número de dentes da polia; PRM representa o número de passos por revolução do motor de passo; e MD representa a configuração de microstepping do driver de potência.

Os valores utilizados para calcular a equação podem ser obtidos da equação 4, sendo eles MD = 4, PRM = 200, PC = 2, NDP = 20, dessa forma podemos calcular a equação 12 e obter a resolução de movimentação do eixo X.

$$R1 = \frac{4 * 200}{2 * 20} = 20.00 \text{ passos/mm.} \quad (12)$$

Logo, a resolução de movimentação do eixo X com base nos valores apresentados para o cálculo da equação 12 é de 20.00 passos/mm.

Para o cálculo da equação 13, referente a resolução de movimentação do eixo Y, que possui o sistema de movimentação baseado em fuso trapezoidal, tem-se:

$$R2 = \frac{PRM * MD}{PFT}, \quad (13)$$

onde R2 representa a resolução de movimentação de sistemas movidos por fusos trapezoidais (passos/mm); PFT representa o passo do fuso trapezoidal (mm); PRM representa o número de passos por revolução do motor de passo; e MD representa a configuração de *microstepping* do driver de potência.

Dessa forma, pode-se calcular o valor da equação 13 com base nos parâmetros de movimentação do eixo Y obtidos por meio da configuração do hardware, com isso tem-se a equação 14:

$$R2 = \frac{200 * 4}{8} = 100.00 \text{ passos/mm}. \quad (14)$$

Logo, a resolução de movimentação do eixo Y com base nos valores apresentados para o cálculo da equação 14 é de 100.00 passos/mm.

Por fim, para calcular a resolução de movimentação do eixo Z, que possui um sistema guiado por relação entre sistema de redução de coreia dentada e polias com razão de redução de 3:1 e fuso trapezoidal, deve-se utilizar a equação 15:

$$R3 = \frac{PRM * MD}{PFT} * RR, \quad (15)$$

onde R3 representa a resolução de movimentação de sistemas guiados por relação entre sistema de redução de polias 3:1 e fuso trapezoidal (passos/mm); PFT representa o passo do fuso trapezoidal; PRM representa o número de passos por revolução do motor de passo; MD representa a configuração de *microstepping* do driver de potência; e RR representa a razão de redução do sistema de correia dentada e polia.

Para realizar o cálculo da equação 15, deve-se obter o valor de RR por meio da utilização da equação 16 dada por:

$$RR = \frac{NDPG}{NDPP}, \quad (16)$$

onde RR representa a razão de redução do sistema de correia dentada e polia (mm); NDPG representa o número de dentes da polia maior (60 dentes) e NDPP representa o número de dentes da polia menor (20 dentes).

Aplicando esses valores a equação 16 tem-se:

$$RR = \frac{60}{20} = 3. \quad (17)$$

Obtidos os valores de RR, MD e PRM e aplicando-os na equação 15 tem-se:

$$R3 = \frac{200 * 4}{2} * 3 = 1200.00 \text{ passos/mm}. \quad (18)$$

Logo, a resolução de movimentação do eixo Z com base nos valores apresentados para o cálculo da equação 18 é de 1200.00 passos/mm.

Após o término dos cálculos das equações 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18, os valores de R1, R2 e R3 devem ser adicionados respectivamente aos parâmetros *X-axis travel resolution (\$100)*, *Y-axis travel resolution (\$101)* e *Z-axis travel resolution (\$102)*, na configuração do firmware grbl por meio do software *Universal Gcode Sender Platform* ou diretamente no arquivo “*config.h*” dentro do diretório de configuração do *firmware grbl*.

Com esses parâmetros calculados e configurados, a máquina CNC passa a ter precisão e resolução na usinagem de objetos 2D e 3D, uma vez que esses parâmetros servem de base para que a mesma possa movimentar a máquina ferramenta corretamente pelo plano cartesiano.

4.3 ANÁLISE E COMPARATIVO DE CUSTOS

Após a finalização do processo de montagem da máquina *Router* CNC, foi executado o processo de levantamento do custo total utilizado na construção da máquina. Foram levados em consideração todos os materiais utilizados no desenvolvimento, incluindo modificações realizadas durante o processo de montagem, onde se pode analisar os custos no Apêndice A.

Visando melhorar a comparação de custo entre a máquina CNC desenvolvida neste trabalho e os modelos comerciais, a máquina desenvolvida nessa pesquisa será nomeada de *LIEB Router* CNC, e a pesquisa por máquinas CNCs comerciais se limitará apenas a máquinas com área útil de no mínimo 400*400*50 mm e no máximo 800*800*150 mm.

Para a validação da relação de custo benefício da *LIEB Router* CNC em relação às demais máquinas CNCs do mercado, foi elaborada a Tabela 4, levando em consideração a área de trabalho da máquina e o custo. É importante reforçar que os custos de todas as máquinas CNCs demonstradas na Tabela 4 podem variar conforme o mercado, pois alguns componentes sofrem constante alteração de valor por conta dos materiais com os quais são fabricados além de algumas máquinas CNCs, por serem vendidas no exterior, possuem ainda custo de importação.

Tabela 4. Relação de custo das máquinas CNCs comerciais com área de trabalho aproximada a *LIEB Router* CNC descrita nesta pesquisa

MODELO DA CNC	ÁREA ÚTIL DA MÁQUINA	VALOR
LIEB <i>Router</i> CNC	550*460*45 milímetros	R\$ 3.072,65
AccTeck – AK6060	600*600*150 milímetros	R\$ 5.555,70
Yofuly - CNC4540	430*390*90 milímetros	R\$ 5.019,19
DistritecCNC – RC0807	800*700*60 milímetros	R\$ 13.990,00
Atividade Maker – Revolution 2	500*330*80 milímetros	R\$ 4.690,00
Atividade Maker – Revolution 2 – Grande	500*630*80 milímetros	R\$ 5.290,00

Fonte: Próprio autor.

4.4 ENSAIO DE USINAGEM EM BLOCO DE ESPUMA FLEXÍVEL DE POLIURETANO D33

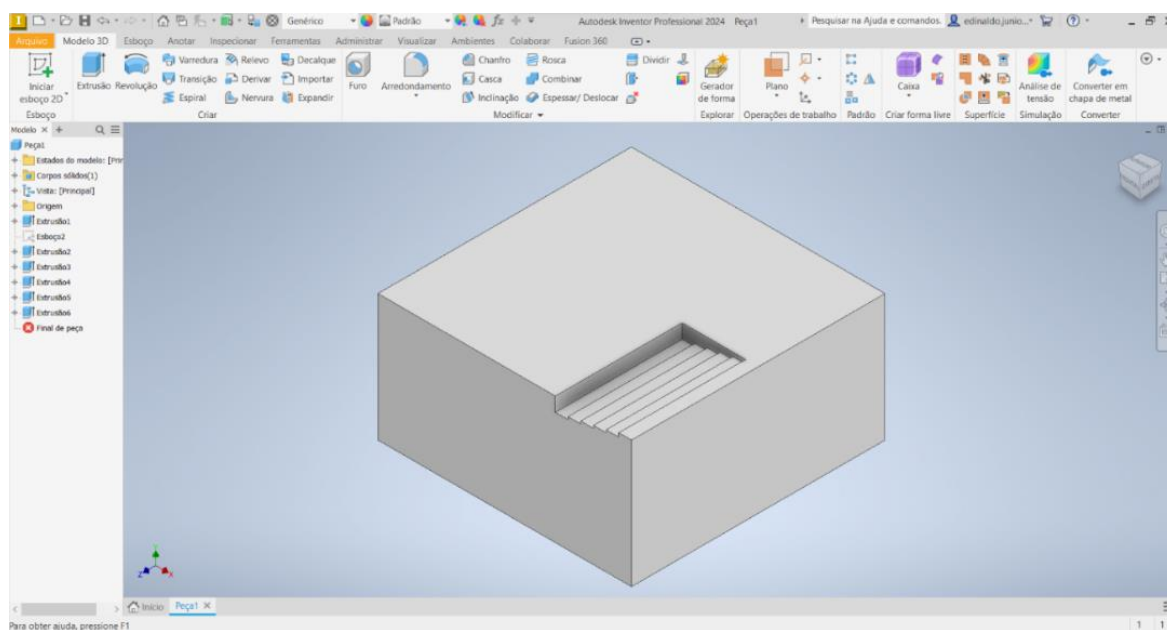
4.4.1 Processo I: Desenho e Geração do G-code para Usinagem

Primeira Etapa: Criação do modelo 3D no *Software Inventor® Professional*.

Para esta etapa, utiliza-se o software CAD *Inventor® Professional* para realizar a modelagem 3D do arquivo que posteriormente será importado para o *software Aspire®*, possibilitando a realização do processo de geração do g-code.

Após a realização da modelagem, obtém-se a peça ilustrada na Figura 35. Para ser importada para o *Aspire®*, o modelo 3D obtido nesta etapa deve ser salva no formato de arquivo STL (*Standard Triangle Language*).

Figura 35 - Modelo 3D da peça que será usinada no bloco de espuma flexível



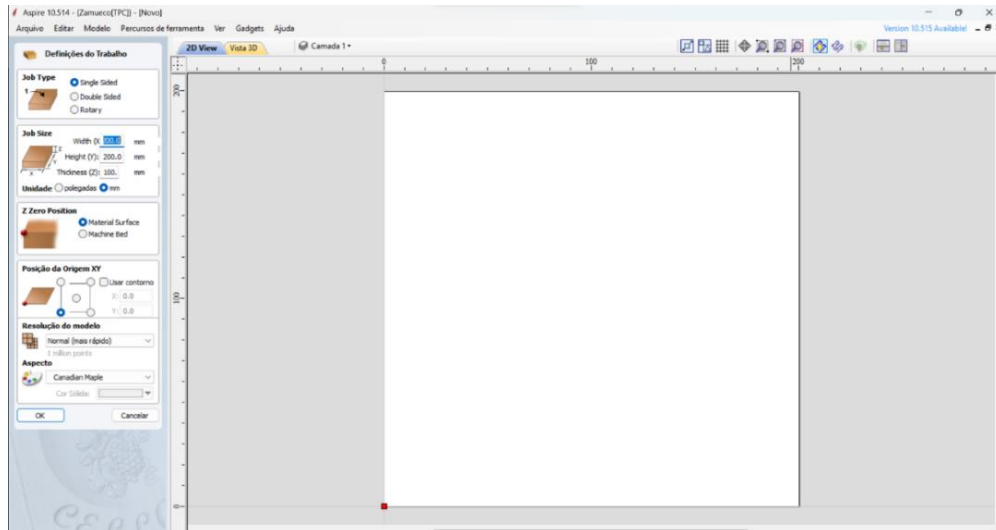
Fonte: Próprio autor.

Segunda Etapa: Criação do Arquivo no *software Aspire®* com a área desejada para usinagem.

Essa etapa consiste inicialmente na criação do arquivo de trabalho que será utilizado para fazer o desenho dos vetores que serão utilizados nas futuras etapas. Para tal, torna-se necessário introduzir algumas informações no *software Aspire®* inerentes ao material que será utilizado no processo de usinagem, como as

dimensões do material, a unidade de medida utilizada pela máquina e a posição inicial dos eixos em relação ao material (Figura 36).

Figura 36 - Geração da área de trabalho do material no software Aspire®

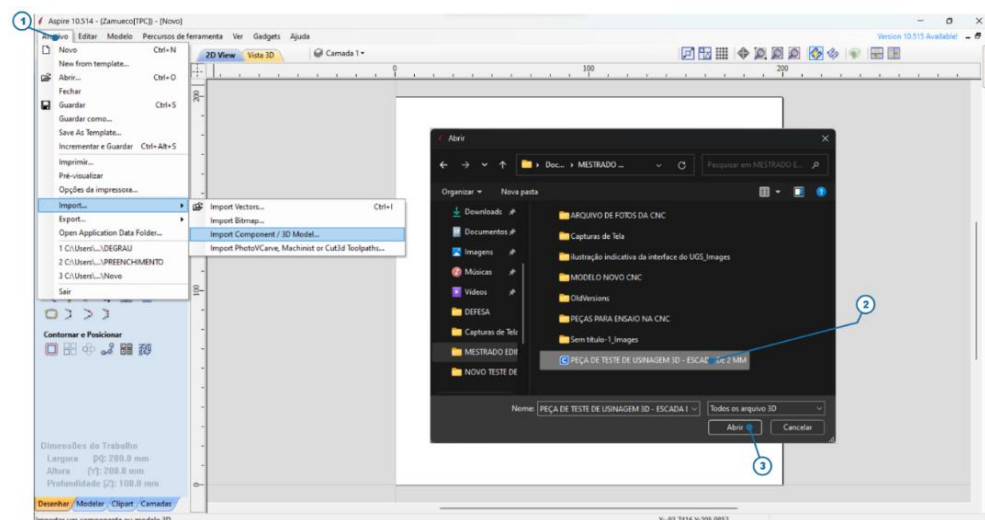


Fonte: Próprio autor.

Terceira Etapa: Importação do modelo 3D para o software Aspire®.

Após a realização da Segunda Etapa realiza-se a importação do modelo 3D em formato STL para o software Aspire® conforme o processo ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Processo de importação de arquivo 3D para o software Aspire®



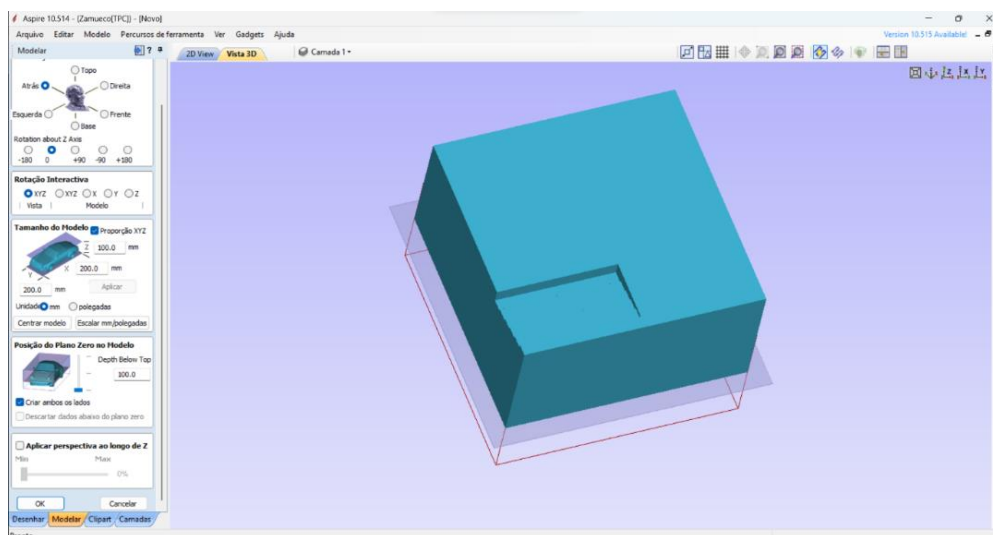
LEGENDA:

- 1 – Seleção da opção “Arquivo”, em seguida a opção “Import” e por último a opção “Import Component / 3D Model”.
- 2 – Seleção do arquivo 3D que será utilizado no processo.
- 3 – Inserindo o arquivo 3D do modelo na área de trabalho criada na Segunda Etapa.

Fonte: Próprio autor.

Realizada a importação do arquivo 3D, deve-se realizar o ajuste da peça de acordo com a área criada no *software Aspire®* (Figura 38), possibilitando que seja feito o posicionamento correto do modelo 3D na área útil disponível criada na Segunda Etapa deste processo.

Figura 38 - Posicionamento da peça para importação no *software Aspire®*



Fonte: Próprio autor.

Para realizar o posicionamento da peça na área do *software Aspire®*, utilizam-se as ferramentas de orientação do modelo 3D, como a Rotação Interativa, Tamanho do Modelo, Centrar modelo, Posição do Plano Zero no Modelo, que estão fixadas no lado esquerdo da Figura 38. Feito este processo, o modelo importado está pronto para ser utilizado nos processos do *Aspire®*.

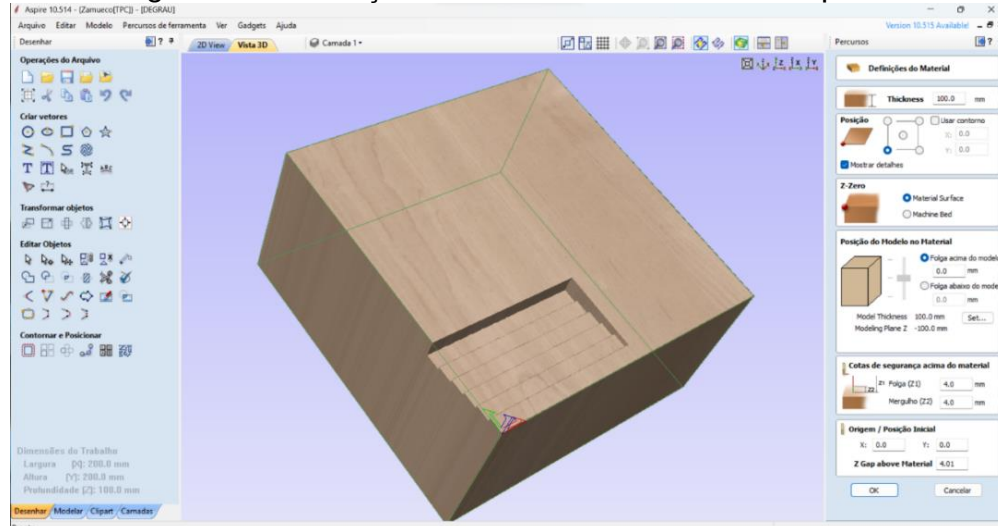
Quarta Etapa: Definições do Material a ser usinado e Seleção do Tipo de Percurso Desejado.

Nessa etapa, realiza-se a seleção do tipo de percurso que será utilizado no processo de usinagem. Entretanto, antes da realização da escolha do percurso de usinagem, deve-se realizar a configuração dos parâmetros do material que será utilizado.

Para configurar as definições do material que será utilizado, deve-se selecionar a opção “Definir” para que os parâmetros possam ser acessados, dentre os quais estão inclusos à altura do material, a posição inicial da máquina em relação ao material, a face do material que será utilizada e a cota de segurança do eixo Z que

deve ser configurada com uma distância mínima de 3 a 5 mm para a folga do material e o mergulho da ferramenta (Figura 39).

Figura 39 - Definições do Material no software Aspire®



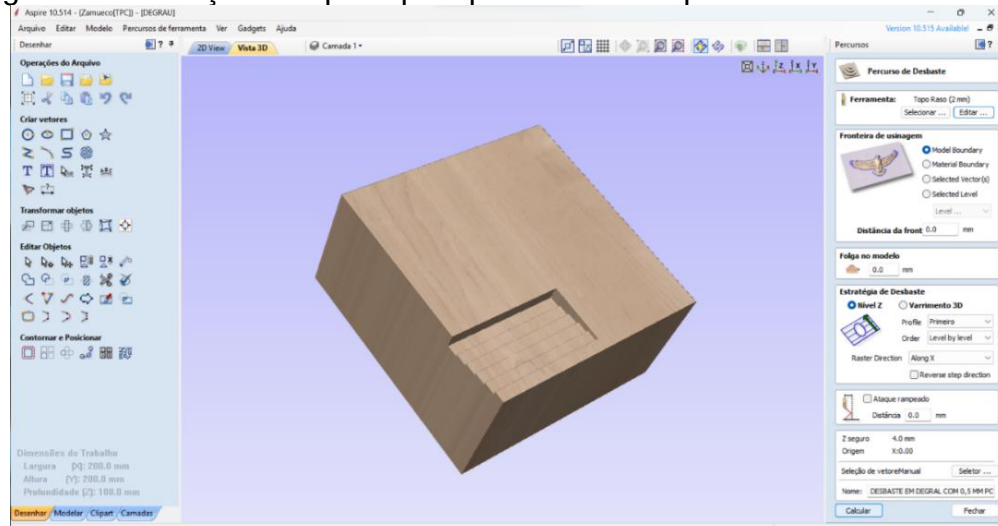
Fonte: Próprio autor.

Realizada a definição dos parâmetros do material, pode-se realizar a seleção do percurso desejado, no caso deste ensaio, selecionou-se o “Percurso de Desbaste 3D”, dando acesso às configurações referente a este processo.

Quinta Etapa: Configuração dos parâmetros de usinagem do percurso de desbaste 3D e ferramentas utilizadas.

Para esta etapa, deve-se selecionar alguns dos parâmetros mais importantes do processo de desbaste 3D, como a fronteira de usinagem e a ferramenta de corte a ser utilizada, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40 - Seleção dos principais parâmetros do percurso de desbaste 3D



Fonte: Próprio autor.

Além dos parâmetros do percurso de desbaste 3D, deve-se também configurar os parâmetros da ferramenta que será utilizada no processo de usinagem na máquina CNC (tipo de ferramenta de corte, características e as especificações de profundidade e quantidade de passagens da ferramenta no percurso para que atinja a profundidade de corte desejada). Para realizar a configuração desses parâmetros, seleciona-se a opção “*Selecionar*” em “*Ferramenta*” na barra do “*Percurso de Desbaste*” para ter acesso ao painel de seleção dos parâmetros da ferramenta ilustrados na Figura 41.

Figura 41 - Configuração da Ferramenta de Corte utilizada no processo de Usinagem

Fonte: Próprio autor.

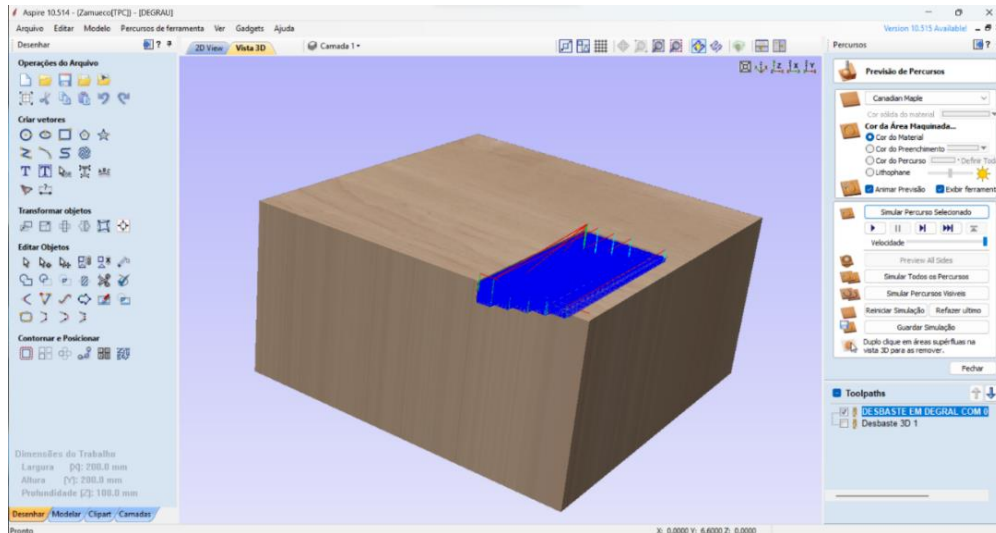
As configurações da ferramenta de corte devem ser baseadas nos parâmetros da máquina CNC e da ferramenta de corte que será utilizada para o desbaste 3D. Após configurar os parâmetros da ferramenta de corte que será utilizada na máquina CNC, como o tipo de fresa, geometria, parâmetros de corte e parâmetros do *spindle*, nomeia-se o modelo e seleciona-se a opção “*Calcular*”.

Sexta Etapa: Geração do g-code e Simulação 3D do processo de Usinagem

Após a configuração de todos os parâmetros da Quinta Etapa e selecionada a opção “*Calcular*” ilustrada no canto inferior direito da Figura 40, o *software* irá gerar o

percurso em desbaste 3D do modelo adicionado e configurado nas Etapas anteriores (Figura 42).

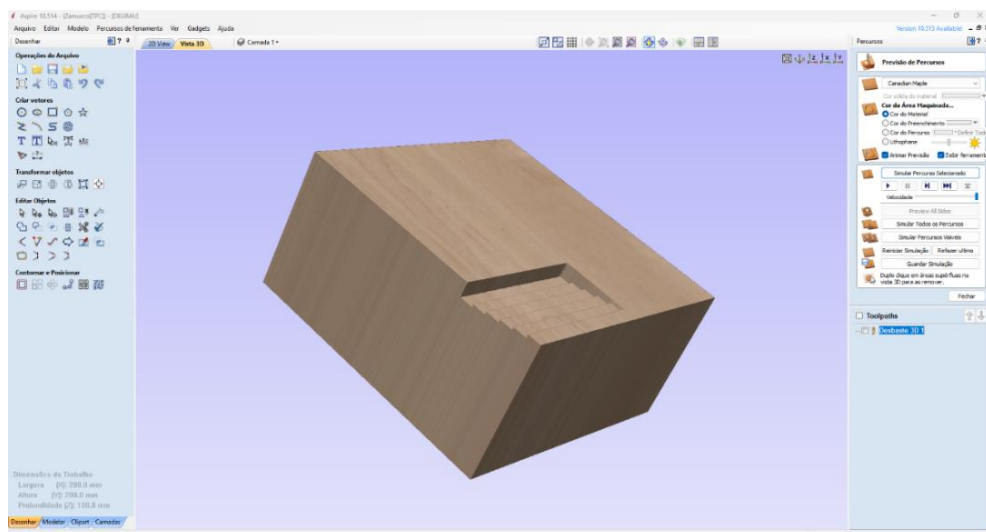
Figura 42 - Visualização da simulação do processo de usinagem do material



Fonte: Próprio autor.

Nota-se que no lado direito do painel são exibidas as configurações de simulação da usinagem do modelo projetado, tal ferramenta permite uma pré-visualização 3D do processo de usinagem que será realizado. Selecionando a opção “*Simular Percursos Selecionados*” o software Aspire® executa a simulação do percurso da fresa, realizando o processo de usinagem do modelo que foi gerado (Figura 43).

Figura 43 - Ilustração 3D gerada pelo Aspire® após a realização da simulação de percurso.



Fonte: Próprio autor.

Após o término dessas etapas, o painel de simulação 3D pode ser fechado e o arquivo g-code do modelo pode ser salvo. Desse modo, o processo de desenho e geração do g-code para usinagem é findado, podendo dar-se início ao segundo processo.

4.4.2 Processo II: Preparação da Máquina CNC e do Material a ser Usinado

Primeira Etapa: Instalação da ferramenta de corte na máquina CNC conforme a configuração realizada no *Aspire®*.

Realizado o processo de preparação do arquivo g-code que contém as instruções de usinagem do modelo gerado no Processo I, torna-se necessário o preparo da máquina CNC para realizar o processo de usinagem do bloco de espuma. Para isso, inicialmente realiza-se a instalação da fresa que fora definida no software *Aspire®* (conforme indicado na Figura 39) para que a máquina CNC possa realizar o processo de forma correta.

A fresa escolhida para realizar o processo de usinagem em blocos de espuma flexível foi uma Fresa topo reto *Down Cut* 1 corte de 2.0mm x 12mm em Metal Duro com corte invertido (Figura 44).

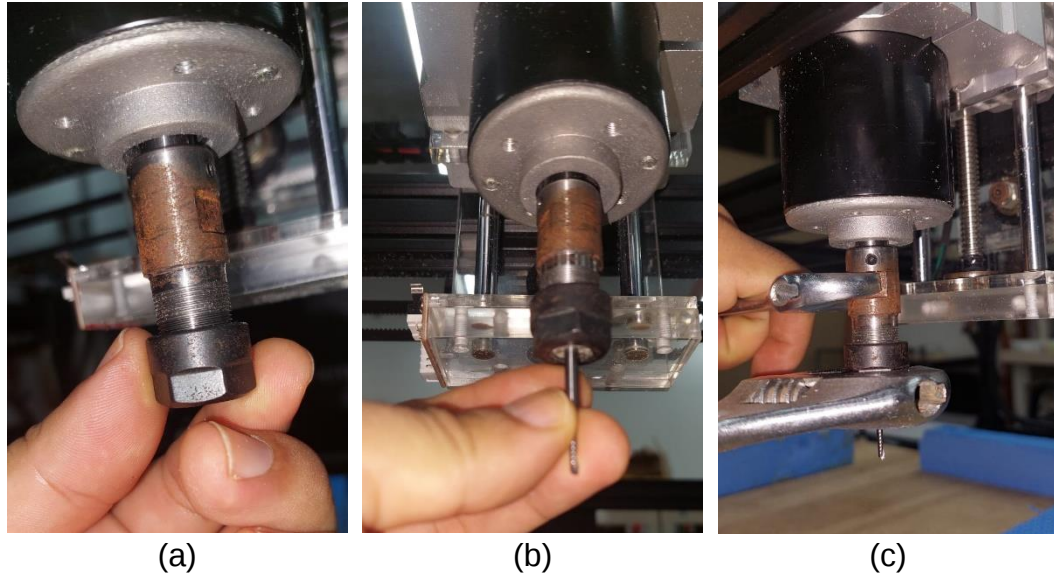
Figura 44 - Fresa utilizada para realizar o ensaio de usinagem no bloco de espuma



Fonte: Próprio autor.

Para a instalação da fresa é afrouxa-se a pinça do spindle (Figura 45(a)), posteriormente insere-se a fresa (Figura 45(b)) e realiza-se o aperto da pinça utilizando duas chaves de boca, conforme ilustrado na Figura 45(c).

Figura 45 - Processo de instalação da fresa no spindle

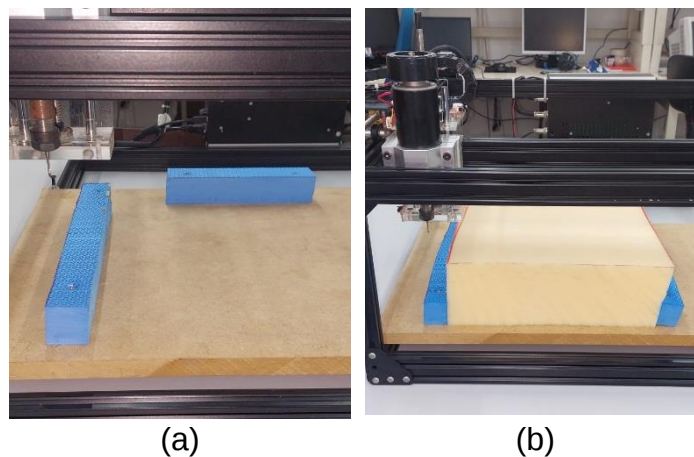


Fonte: Próprio autor.

Segunda Etapa: Posicionamento e fixação do bloco de espuma flexível na máquina CNC.

Após a fixação da fresa no spindle, pode-se verificar a distância entre a fresa e a base da máquina CNC, podendo ser realizado o dimensionamento do bloco de espuma a ser utilizado, posicionando-o no suporte criado para que não haja movimentação do mesmo durante o processo de usinagem (Figura 46).

Figura 46 - Posicionamento do bloco de espuma flexível na base da máquina CNC



Fonte: Próprio autor.

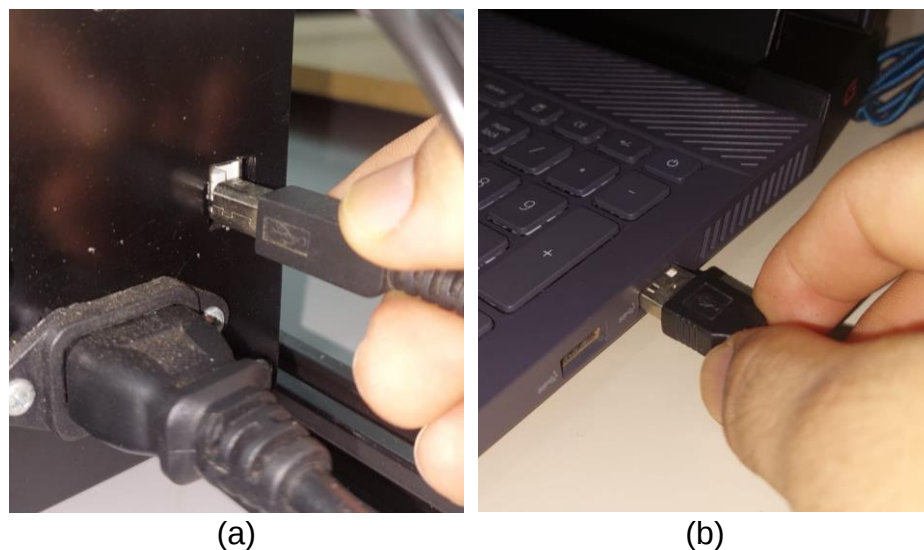
Após o posicionamento do bloco de espuma na base da máquina CNC, torna-se necessário utilizar o software de controle para que seja possível ajustar a fresa no ponto inicial configurado durante o Processo I.

Terceira Etapa: Posicionamento da fresa no ponto inicial de trabalho no bloco de espuma flexível.

Nessa etapa, utiliza-se o *software* de controle da máquina CNC para que sejam configurados os pontos iniciais da máquina em relação ao bloco de espuma flexível.

Para que seja possível a realização deste ajuste, primeiramente deve-se realizar a comunicação entre o *Universal Gcode Sender* (*software* de controle instalado no computador) com a máquina CNC via cabo USB tipo B (compatível com Arduino® UNO) conforme ilustrado na Figura 47.

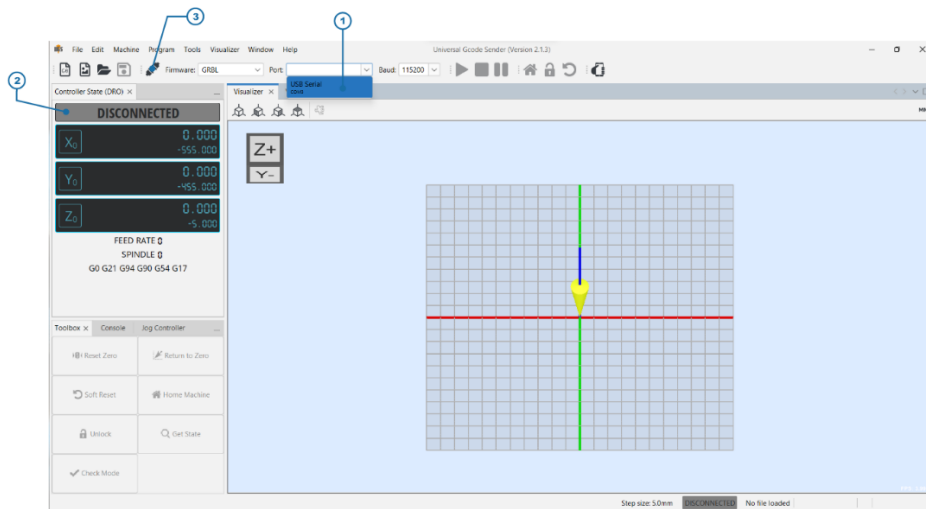
Figura 47 - Realização do processo de comunicação serial entre o software de controle e a máquina CNC



Fonte: Próprio autor.

Realizada a conexão física entre o computador e a máquina CNC, utilizando o software de controle, realizam-se os passos demonstrados na Figura 48 para que seja feita a comunicação serial com a máquina, possibilitando que o usuário possa realizar o controle da máquina de forma manual e enviar instruções e comandos para a máquina CNC.

Figura 48 - Processo de comunicação do software de controle com a máquina CNC



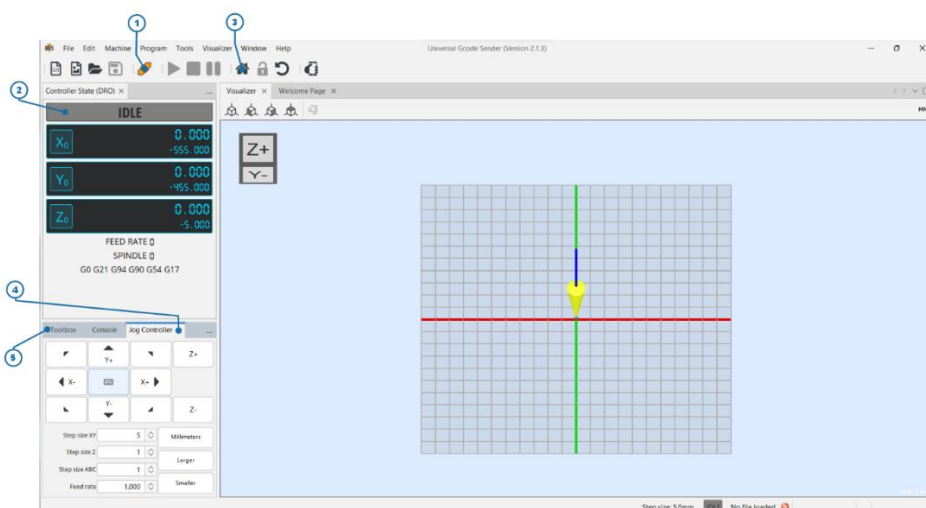
LEGENDA:

- 1 - Seleção da porta de comunicação serial que a máquina CNC está conectada;
- 2 - Status da comunicação da Máquina;
- 3 - Iniciar comunicação serial com a máquina CNC.

Fonte: Próprio autor.

Realizada a conexão da máquina CNC ao *software* de controle, pode-se ajustar o ponto inicial de cada eixo por meio do *joystick* de controle manual. Para realizar a configuração do ponto inicial da máquina CNC, deve-se realizar os passos demonstrados na Figura 49.

Figura 49 - Realização do processo de seleção do ponto inicial da máquina CNC



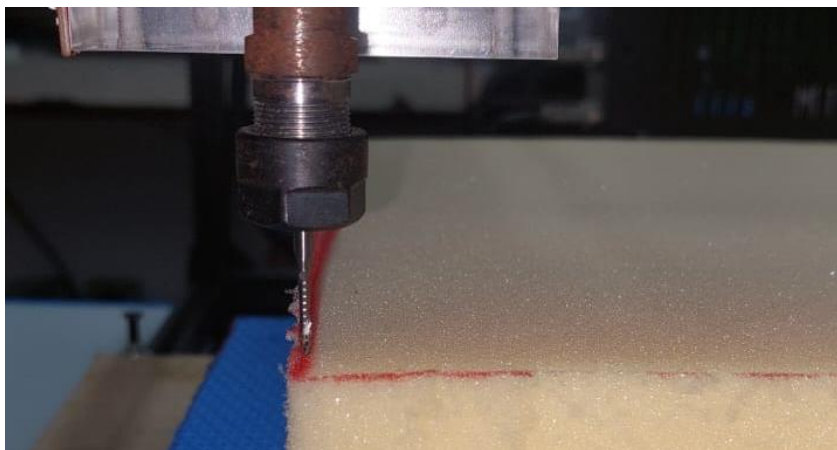
LEGENDA:

- 1 - Ícone de conexão está na cor laranja, indicando conexão com a máquina CNC;
- 2 - Status de coordenadas dos eixos zeradas;
- 3 - Botão de Auto Home – Acionando-o, a máquina CNC realiza a movimentação dos eixos para a posição X0, Y0 e Z0, com base nos sensores endstops;
- 4 - Janela de controle de movimentação manual da máquina CNC;
- 5 - Janela de ferramentas do software de controle.

Fonte: Próprio autor.

É importante frisar que o ponto inicial da máquina CNC deve estar ajustado de forma correta, conforme as configurações de usinagem definidas no Aspire®. Desse modo, para posicionar a ferramenta de corte da máquina CNC, realiza-se a movimentação dos eixos até que a fresa esteja posicionada a aproximadamente 1 mm da face do bloco de espuma flexível, conforme ilustrado na Figura 50. Após realizado este processo, seleciona-se a aba “Toolbox” e clica-se no botão “Reset Zero” para realizar o reset do ponto inicial da máquina CNC. Desse modo, o ponto atual onde foi posicionada a fresa torna-se o ponto inicial de trabalho da máquina.

Figura 50 – Posicionamento correto da fresa em relação ao bloco de espuma flexível



Fonte: Próprio autor.

Após a realização desta etapa, a máquina CNC está pronta para a realização do processo de usinagem do material posicionado na sua base. Antes de iniciar a execução do processo, é importante verificar se todos os parâmetros estão ajustados de forma correta, se a fresa da máquina CNC está de fato posicionada no ponto inicial desejado e se as configurações do ponto inicial estão em X0, Y0 e Z0.

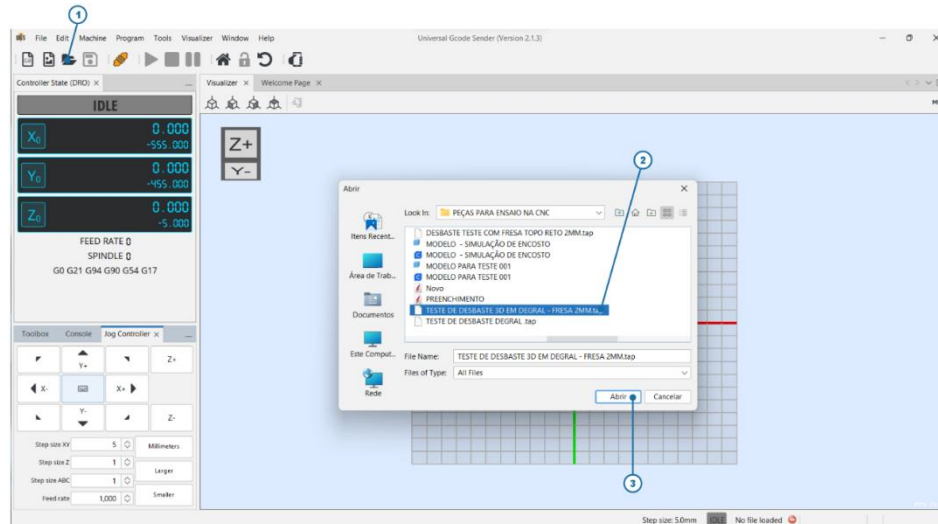
4.4.3 Processo III: Utilização do software de controle para usinagem no Bloco de espuma flexível de Poliuretano D33.

Primeira Etapa: Abertura do arquivo g-code (gerado pelo Processo I) no software de controle da máquina CNC.

Após a realização correta do Processo II, a máquina CNC está pronta para ser utilizada. Desse modo, realiza-se a abertura do arquivo g-code na interface do software de controle (Figura 51) para que seja possível a realização do processo de

usinagem do modelo gerado no Processo I no bloco de espuma flexível fixado a base da máquina CNC.

Figura 51 - Realização do processo de abertura do arquivo g-code



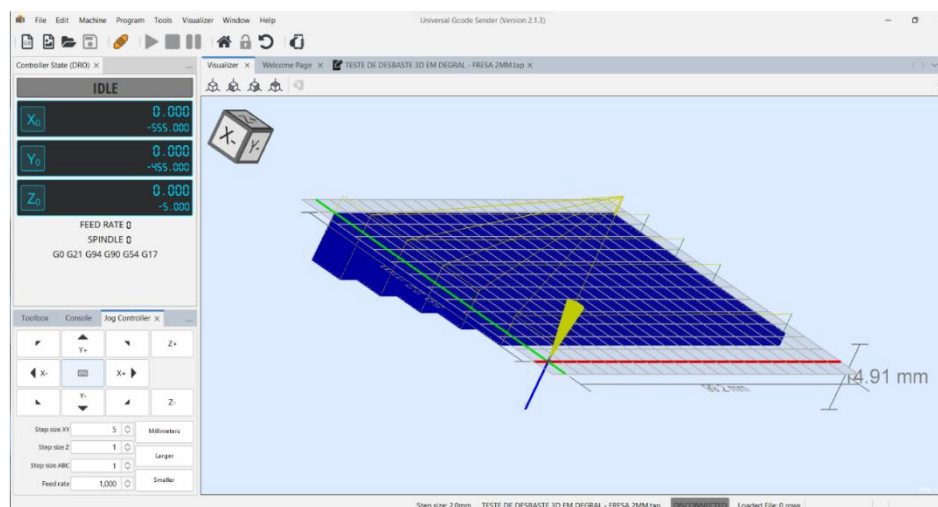
LEGENDA:

- 1 – Botão “Abrir Arquivo” do software de controle;
- 2 – Seleção do arquivo no diretório em que o mesmo foi salvo após a realização do Processo I;
- 3 – Botão “Abrir” para que o arquivo selecionado seja aberto no software de controle.

Fonte: Próprio autor.

Com a abertura do arquivo g-code, pode-se observar na aba “Visualizer” na interface do *software* de controle, o percurso das passagens da fresa no bloco (Figura 52), conforme as configurações realizadas no software *Aspire®* no Processo I.

Figura 52 – Exibição do arquivo aberto na interface do software de controle

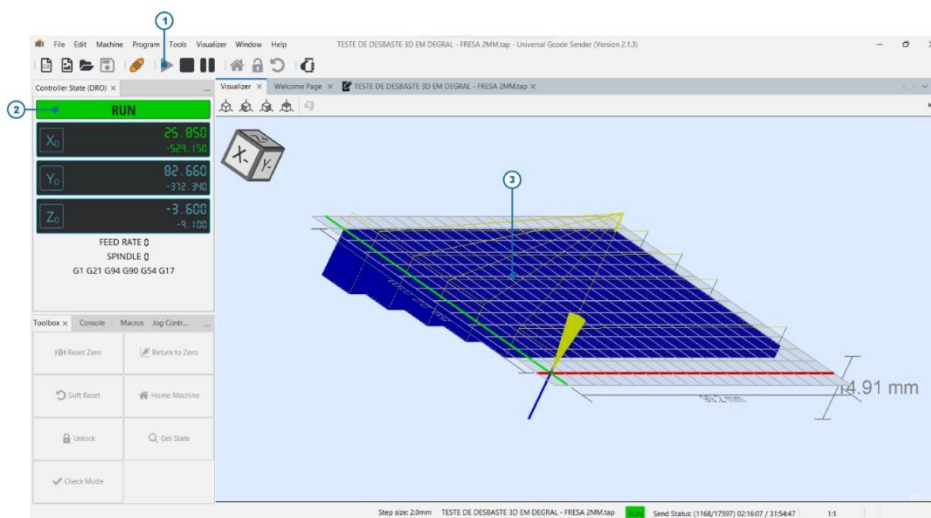


Fonte: Próprio autor.

Segunda Etapa: Início do processo de usinagem do bloco de espuma flexível D33.

Com o arquivo g-code aberto no *software* de controle e todos os demais parâmetros ajustados, pode-se iniciar o processo de usinagem conforme os passos ilustrados na Figura 53.

Figura 53 – Inicialização do processo de usinagem no software de controle



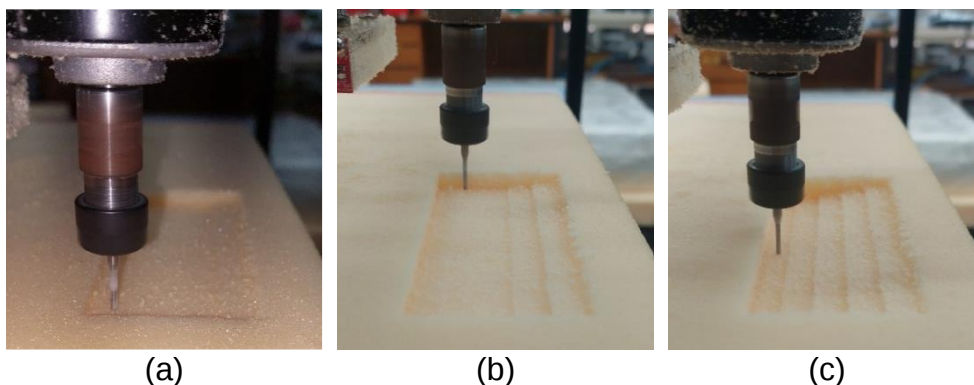
LEGENDA:

- 1 – Botão “Iniciar” (inicia o processo de usinagem na máquina CNC);
- 2 – Botão na aba de Status indicando que o processo de trabalho foi iniciado (alteração para a cor verde);
- 3 – Visualização em tempo real, indicando a ferramenta movendo-se pelo plano cartesiano da máquina CNC.

Fonte: Próprio autor.

Dado início ao processo de usinagem, pode-se acompanhar o progresso da execução em tempo real pela aba “*Visualizer*” no software de controle. O processo de usinagem por desbaste 3D é realizado camada por camada, como pode ser observado na Figura 54.

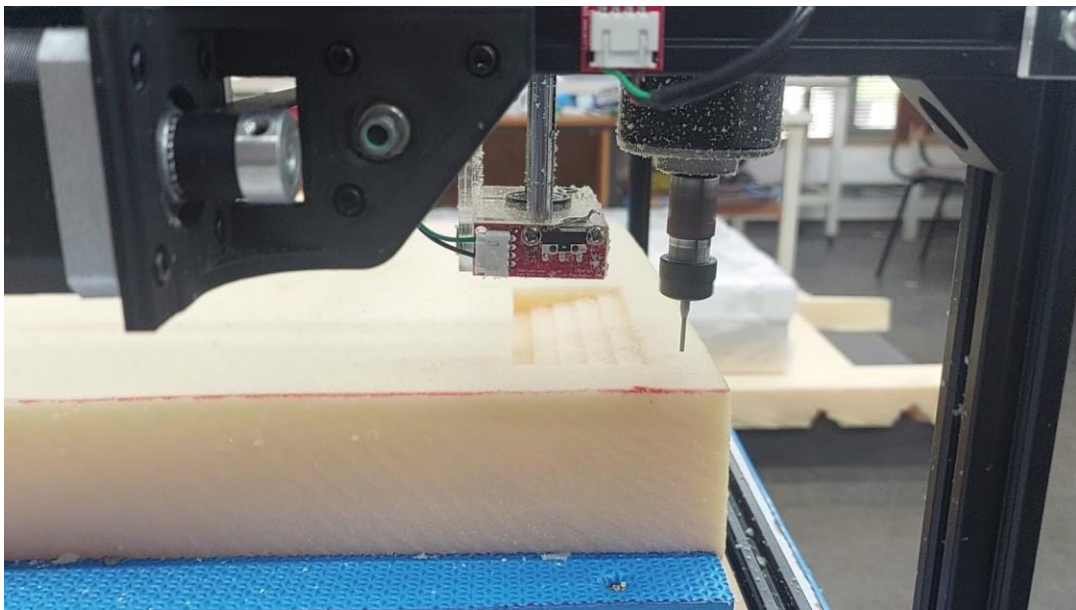
Figura 54 – Processo de usinagem por desbaste realizado na máquina CNC



Fonte: Próprio autor.

No término do processo de usinagem, a máquina retornará ao ponto inicial configurado, porém, com um deslocamento no eixo Z possibilitando que o bloco de espuma possa ser retirado da base da máquina CNC. Finalizado o do processo de usinagem no bloco de espuma flexível, pode-se notar que a máquina executou todo o processo de forma correta, gerando exatamente o que foi projetado no modelo 3D para este ensaio (Figura 55).

Figura 55 - Bloco de espuma flexível após a realização do processo de usinagem com a máquina CNC

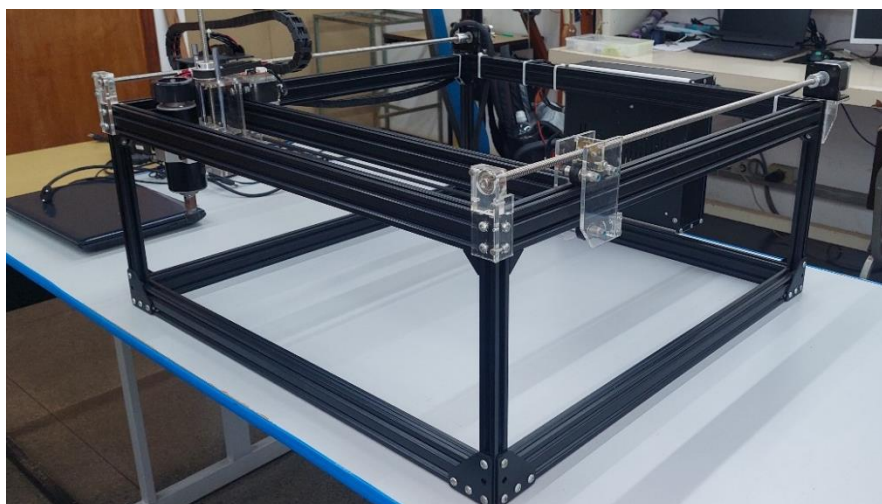


Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como principal resultado deste trabalho, foi desenvolvida uma máquina *Router* CNC (Figura 56) com capacidade técnica para usinar materiais como espumas flexíveis e outros materiais, uma vez que as máquinas *router* CNC priorizam tanto o torque quanto a velocidade, pode-se presumir que a máquina LIEB *Router* CNC terá capacidade de usinar materiais como madeiras de baixa densidade, polímeros e até mesmo ligas leves de alumínio.

Figura 56 – Máquina LIEB *Router* CNC montada



Fonte: Próprio autor.

Quanto ao custo, no Apêndice A deste trabalho, é demonstrado que o custo efetivo utilizado para o desenvolvimento da máquina LIEB *Router* CNC foi de R\$ 3.072,65. Para validar a relação custo-benefício, podem ser analisados os dados da Tabela 4, onde se pode notar que a máquina CNC de menor custo e com área útil aproximada de cerca de 550*460*45mm é a LIEB *Router* CNC, sendo uma das máquinas com melhor custo e área útil de trabalho.

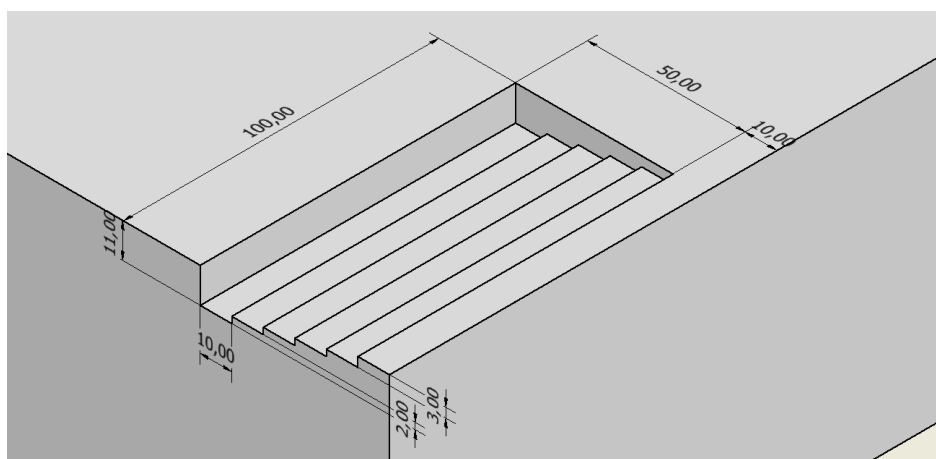
Portanto, pode-se afirmar que a LIEB *Router* CNC possui uma excelente relação custo benefício em comparação com as demais máquinas, tornando possível a redução de custo no processo de fabricação de encostos anatômicos e personalizados, além de tornar esse processo mais rápido para indivíduos que possuem tal necessidade.

5.1 ANÁLISE DO BLOCO DE ESPUMA PÓS PROCESSO DE USINAGEM NA MÁQUINA CNC

Após a realização do processo de usinagem por desbaste 3D na máquina CNC, torna-se necessário a realização da comparação das medidas do modelo 3D com as medidas da peça usinada no bloco de espuma, para a obtenção da acurácia da máquina CNC ao usinar materiais flexíveis.

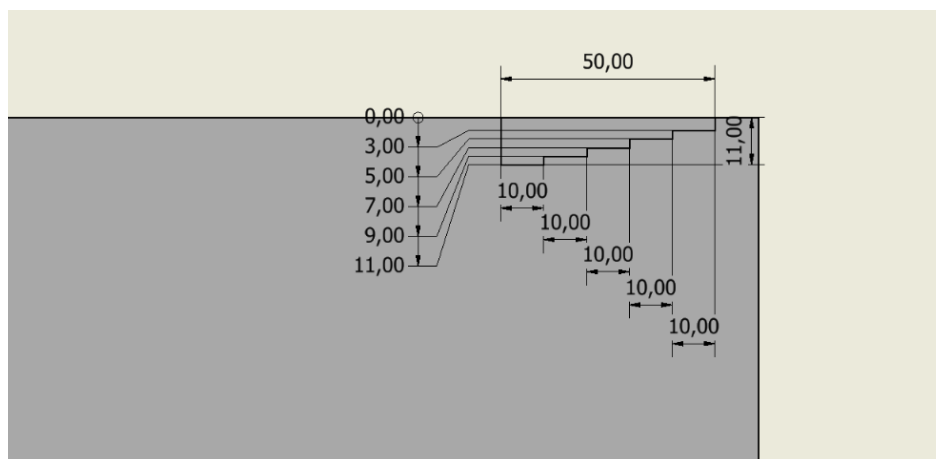
A acurácia de uma máquina CNC refere-se à capacidade da máquina em produzir peças ou produtos de acordo com as dimensões especificadas no software CAD. Para calcular a acurácia, deve-se primeiramente obter as medidas do modelo 3D gerado por meio do software CAD, ilustrado na Figura 57 e 58.

Figura 57 – Medidas em perspectiva do modelo utilizado no desbaste 3D (mm)



Fonte: Próprio autor.

Figura 58 – Medidas do recorte do modelo utilizado no desbaste 3D (mm)



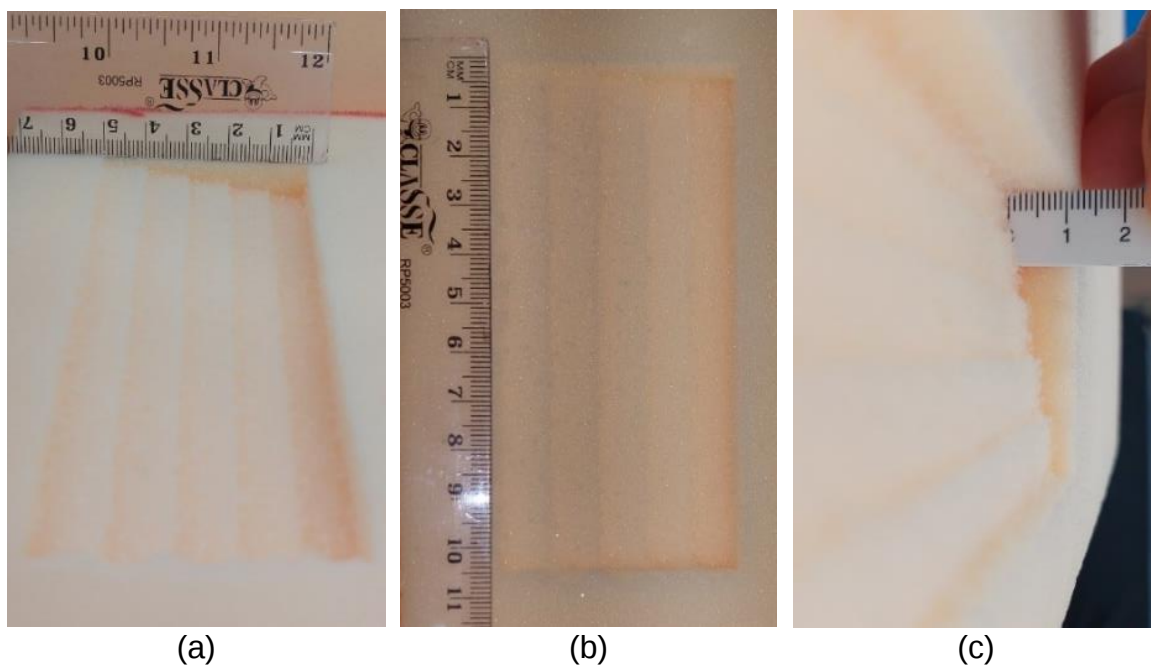
Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar na Figura 57 que a parte que será usinada possui as medidas principais iguais a 100 mm de comprimento (correspondente ao eixo X), 50 mm de largura (correspondente ao eixo Y) e 11 mm de profundidade total (correspondente ao eixo Z). Além dessas medidas, o modelo possui uma geometria mais complexa, em forma de degraus. Analisando a Figura 58, podem ser observadas as devidas medidas de cada degrau.

Obtidas as medidas do modelo 3D, foram retiradas as medidas do bloco usinado por meio da utilização de uma régua e de um paquímetro digital.

Para se obter a acurácia da máquina CNC ao usinar materiais flexíveis, inicialmente foi utilizada uma régua para medir a peça usinada, obtendo os valores ilustrados na Figura 59. Devido o material ser flexível, as medidas foram retiradas de forma aproximada, resultando nos valores de ≈ 50 mm (Figura 59(a)), ≈ 105 mm (Figura 59(b)) e ≈ 12 mm (Figura 59(c)).

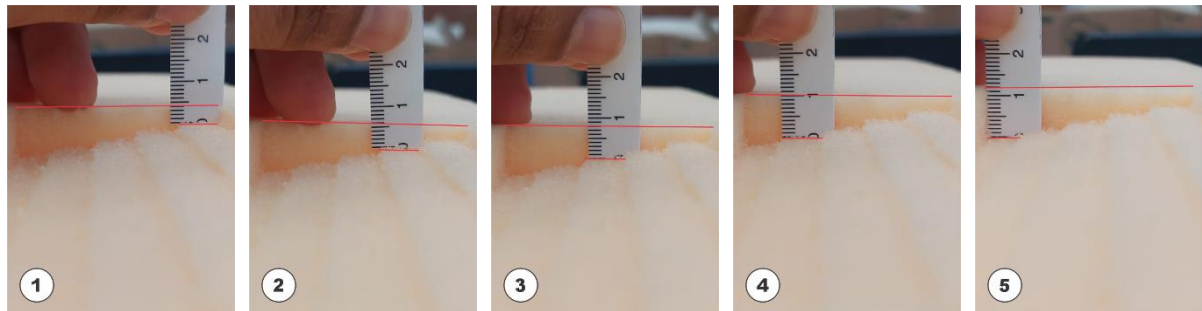
Figura 59 – Medidas da peça após o processo de usinagem (mm)



Fonte: Próprio autor.

Para realizar a medida referente à profundidade de cada degrau, foi necessário utilizar apenas uma pequena faixa de régua medindo 5 cm de comprimento e aproximadamente 13 mm de largura. Desse modo, foi possível coletar as medidas referentes à profundidade de cada degrau, ilustradas na Figura 60.

Figura 60 – Medidas referente a profundidade de cada degrau (mm)



LEGENDA

1 – Medida do primeiro degrau ≈ 4 mm
2 – Medida do segundo degrau ≈ 6 mm

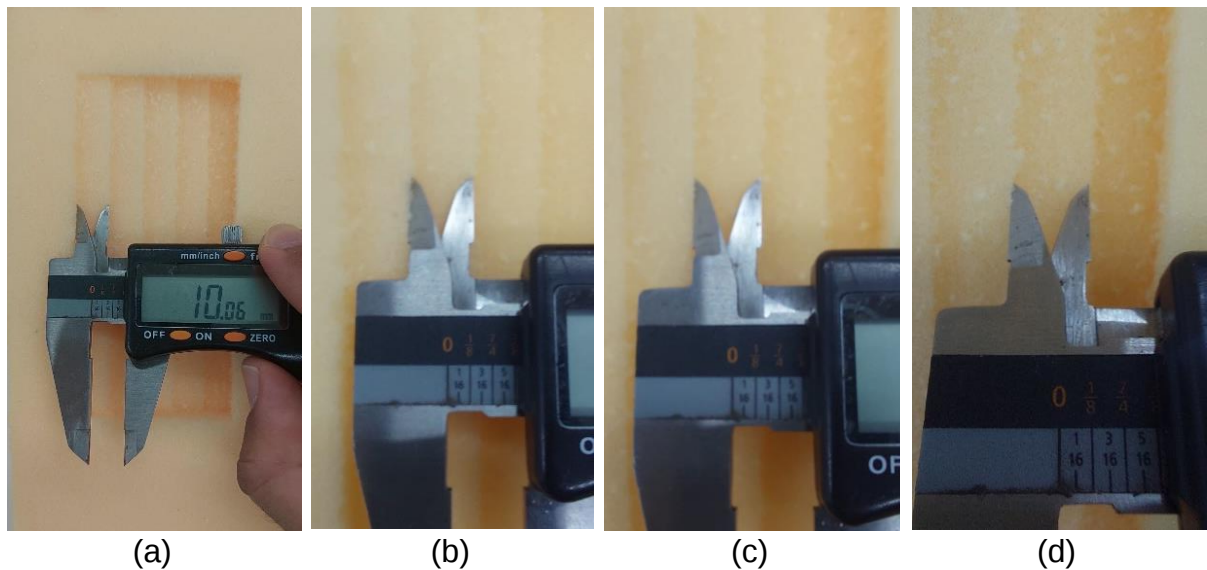
3 – Medida do terceiro degrau ≈ 8 mm
4 – Medida do quarto degrau ≈ 10 mm

5 – Medida do quinto degrau ≈ 12 mm

Fonte: Próprio autor.

Para retirar a medida referente à largura de cada degrau, foi utilizado o paquímetro, onde o valor coletado foi de $\approx 10,06$ mm em cada degrau. Analogamente, pode-se observar na Figura 59(a) que as medidas são aproximadas aos valores exibidos na Figura 61 para todos os degraus.

Figura 61 – Medidas da largura dos degraus (mm)



Fonte: Próprio autor.

Para facilitar a visualização dos dados coletados a partir das medidas da peça usinada no bloco de espuma flexível e do modelo 3D, os dados foram organizados na Tabela 5. É importante frisar novamente que os valores obtidos para esta análise são aproximados, uma vez que o material utilizado para este teste é flexível.

Tabela 5 – Análise da acurácia da máquina CNC com base nas medidas obtidas

DEGRAU	MEDIDAS DO MODELO 3D			MEDIDAS DA PEÇA USINADA			ACURÁCIA		
	EIXO Z	EIXO X	EIXO Y	EIXO Z	EIXO X	EIXO Y	EIXO Z	EIXO X	EIXO Y
D1	3 mm	100 mm	10 mm	≈ 4 mm	≈ 105 mm	≈ 10,06 mm	≈ 1 mm	≈ 5 mm	≈ 0,06 mm
D2	5 mm	100 mm	10 mm	≈ 6 mm	≈ 105 mm	≈ 10,06 mm	≈ 1 mm	≈ 5 mm	≈ 0,06 mm
D3	7 mm	100 mm	10 mm	≈ 8 mm	≈ 105 mm	≈ 10,06 mm	≈ 1 mm	≈ 5 mm	≈ 0,06 mm
D4	9 mm	100 mm	10 mm	≈ 10 mm	≈ 105 mm	≈ 10,06 mm	≈ 1 mm	≈ 5 mm	≈ 0,06 mm
D5	11 mm	100 mm	10 mm	≈ 12 mm	≈ 105 mm	≈ 10,06 mm	≈ 1 mm	≈ 5 mm	≈ 0,06 mm

Fonte: Autor(2024).

Com base na Tabela 5, pode-se notar que a acurácia alcançada pela máquina CNC ao usinar blocos de espuma flexível é de ≈ 1 mm no eixo Z, ≈ 5 mm no eixo X e ≈ 0,06 mm no eixo Y, desse modo, nota-se que os eixos X e Z possuem uma acurácia muito baixa se comparada com máquinas comerciais. Entretanto, essa acurácia pode ser melhorada ajustando os parâmetros da máquina CNC, como a resolução de movimentação, velocidade de movimentação da máquina e ajustes mecânicos.

Por se tratar de um material flexível, há certa dificuldade de realizar a mensuração da acurácia da máquina, uma vez que o material possui um comportamento elástico que pode acarretar em medidas inexatas. Posteriormente, pretende-se realizar outros testes de usinagens em outros materiais com densidade mais alta, possibilitando que seja realizado o processo de mensuração da acurácia de forma mais precisa.

6 CONCLUSÃO

A utilização de máquinas CNCs no processo de usinagem de blocos de espuma flexível para a fabricação de assentos e encostos anatômicos e personalizado ainda é uma área de pesquisa que não possui muitos dados de estudo, uma vez que as espumas possuem menor dureza se comparada aos materiais que são comumente utilizados para o processo de usinagem em máquinas CNCs. Porém, este trabalho permitiu que fosse realizado um estudo completo quanto aos tipos de espumas que são propícias para o processo de fresagem, bem como parâmetros ideais para que seja alcançada excelente qualidade durante o processo de fabricação de assentos e encostos.

A partir da realização do ensaio de usinagem, pode ser comprovado que a máquina *LIEB Router CNC* possui total capacidade para realizar o processo de desbaste em blocos de espuma flexível. Porém, a acurácia desejada para a máquina CNC não foi alcançada devido a alguns fatores, como a configuração de resolução de movimentação da máquina - que deve ser alterada tanto em hardware quanto em software – lubrificação dos eixos de movimentação, configuração de velocidade máxima de arranque, entre outros fatores que podem ocasionar a redução da acurácia da máquina.

Elencados tais problemas, pretende-se realizar novamente todo o processo de configuração da máquina *LIEB Router CNC*, alterando as configurações de *hardware* e *software* necessários para que seja atingida uma acurácia aceitável. Também serão realizadas melhorias em algumas peças mecânicas da máquina para melhoria da movimentação da máquina e aumento do eixo Z.

Desse modo, a partir da máquina *LIEB Router CNC*, espera-se que possam ser produzidos encostos anatômicos e personalizados com capacidade de garantir ajuste adequado na estrutura anatômica do indivíduo, possibilitando que haja o alívio de pressão para pessoas com deficiência física e possibilite o tratamento de alto nível para pessoas de renda mais baixa, tornando essa tecnologia acessível.

Por fim, espera-se que os encostos personalizados obtidos oportunizem a adequação postural e aumentem o conforto e a qualidade de vida do usuário, além de reduzir o tempo de espera desses indivíduos no processo de confecção de tais peças.

6.1 IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS: PROPOSTA

Como continuidade deste projeto, espera-se que sejam realizados os seguintes passos para que sejam alcançados resultados mais significativos:

- Realizar testes de usinagens em materiais com densidade maior que permitam maior confiabilidade na definição da acurácia da máquina.
- Realizar alterações e melhorias na máquina levando em consideração os resultados obtidos por meio do ensaio realizado.
- Com a máquina LIEB Router CNC funcional e calibrada de forma correta, pretende-se realizar mais testes em blocos de espumas flexíveis, variando as densidades da espuma.
- Utilizando um Scanner 3D, pretende-se realizar a aquisição de um molde de encosto de um indivíduo para que seja realizado o processo de desbaste na máquina CNC.
- Direcionar a pesquisa a alguma patologia que possua a necessidade de utilização de encosto e assento anatômico personalizado para que sejam feitos os testes de confecção de tais peças para atender indivíduos com tal patologia.
- Melhorar a eficiência da máquina CNC de forma a tornar o processo de fabricação de encostos mais eficaz.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3574 08 Standard Test Methods For Flexible Cellular Materials - Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams**. [S. l.]: ASTM International, 2008. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/235666267/ASTM-D-3574-08-Standard-Test-Methods-for-Flexible-Cellular-Materials>. Acesso em: 31 dez. 2022.

ANIS, A.; SANTOSA, I. Instrumen Kendali Mesin CNC Portable Berbasis Microcontroller Arduino dan Modul CNC Shield. *In: 1ST METIC - MECHANICAL ENGINEERING CONFERENCE*, 2018, Indonésia. **Proceedings** [...] Indonésia: [s. n.], 2018. p. 10.

ARDUINO. **Arduino IDE 2 | Arduino Documentation**. [S. l.], 2024. Fabricante. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ARRAHMAN, R. Automatic Gate Based on Arduino Microcontroller Uno R3. **Journal Robotik**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 61–66, 2022.

ARTACHO, B. M. **Automação em raspadora de pneus utilizando controle numérico computadorizado com controlador lógico programável integrado**. 2015. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/139103>. Acesso em: 20 jan. 2024.

ATMEL CORPORATION. **8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash**. [S. l.]: Atmel Corporation, 2015. Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p#document-table>. Acesso em: 26 fev. 2024.

AUTODESK. **Software Autodesk Inventor | Conheça os preços e compre o Inventor 2024 oficial**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>. Acesso em: 21 jan. 2024.

BARRETO, R. A. A. **Projeto detalhado de uma máquina CNC Router**. 2018. 76 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Mossoró, 2018.

BENDIX, T. *et al.* What does a backrest actually do to the lumbar spine?. **Ergonomics**, Abingdon, v. 39, n. 4, p. 533–542, 1996.

BERETTA, E. M. **Tecnologia assistiva: personalização em massa através do design e fabricação de assentos customizados para cadeiras de rodas**. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2011.

BERSCH, R. INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA ASSISTIVA. **Porto Alegre: CEDI**, [s. l.], v. 21, p. 20, 2017.

BÍBLIA, A. T. Provérbios 16:9. *In: BIBLIA sagrada*. 2. ed. rev. atual. Barueri: [s. n.], 2008. p. 1664.

BRIENZA, D. M. *et al.* A manufacturing system for contoured foam cushions. **Journal of Rehabilitation Research and Development**, Baltimore, v. 29, n. 4, p. 32–40, 1992.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARBONI, M. H. D. S. *et al.* Lamp–laboratório de modelagem e prototipagem. *In*: EDUCAÇÃO no século XXI: artes & design. Belo Horizonte: Poisson, 2019. v. 12, p. 220. Disponível em: http://www.poisson.com.br/livros/educacao/volume12/Educacao_no_seculoXXI_vol12.pdf. Acesso em: 21 jan. 2024.

CARCONE, S. M.; KEIR, P. J. Effects of backrest design on biomechanics and comfort during seated work. **Applied Ergonomics**, Oxford, v. 38, n. 6, p. 755–764, 2007.

CAVALCANTI, A.; GALVÃO, C. **Terapia ocupacional**: fundamentação & prática. Rio de Janeiro - RJ: GEN - Guanabara Koogan, 2007.

CHIOZZA, S. G. Computer aided geological design: AutoCAD® applications in structural geology. **Terrae Didactica**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 113–122, 2017.

COOK, A. M.; POLGAR, J. M. **Cook and Hussey's Assistive Technologies: Principles and Practice**. 3rd ed. St. Louis, Mo: Mosby, 2007.

COOPER, R. A. **Wheelchair selection and configuration**. New York: Demos Medical, 1998.

CORLETT, E. N.; EKLUND, J. A. E. How does a backrest work?. **Applied Ergonomics**, Oxford, v. 15, n. 2, p. 111–114, 1984.

COSTA, R. C. **Desenvolvimento de protótipo de máquina-ferramenta acionada por comando numérico computadorizado para fins didáticos**. [S. l.: s. n.], 2017.

COSTA, E. B. L. da. **O invento de Jacquard e os computadores: alguns aspectos das origens da programação no século XIX**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo - PUC, São Paulo - SP, 2008.

DAHLIN, M.; JONES, J. Wheelchair Backs that Support the Spinal Curves: Assessing Backrest Type and Placement with Postural and Functional Outcomes. **Assistive Technology**, New York, v. 35, n. sup1, p. S30, 2023.

DANTAS, M. P. S.; JUNIOR, O. V. D. S. Fresadora CNC de baixo custo-SUSY. *In*: MOSTRA NACIONAL DE ROBÓTICA (MNR), 2016, [s. l.]. **Resumos [...]** [S. l.: s. n.], 2016.

DUDGEON, B. J.; DEITZ, J. C.; DIMPFE, M. Wheelchair Selection. *In*: OCCUPATIONAL THERAPY FOR PHYSICAL DYSFUNCTION. 7th. ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2014. p. 495–579. Disponível em: Acesso em: 20 maio 2023.

FACHIM, A. **Projeto de fresadora cnc com plataforma livre arduino**. 2013. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2013.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1970.

FIGINI, E. R. **Automatização do processo de delaminação eletroquímica de grafeno crescido por deposição química a partir da fase vapor**. [S. l.], 2017.

GAIO, L. **Caracterização de parâmetros de usinagem CNC para peças de espumas de poliuretano**. 2019. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

GOBI, N. **Desenvolvimento de protótipo de máquina CNC de baixo custo para processos de corte e gravação em micro e pequenas empresas**. 2019. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2019.

GOZZO, L. F. **Projeto e construção de uma impressora 3d baseada na tecnologia da modelagem por fusão e deposição**. 2017. 67 f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

GRIDLING, G.; WEISS, B. **Introduction to microcontrollers**. Vienna: Vienna University of Technology Institute of Computer Engineering Embedded Computing Systems Group, 2007.

GROOVER, M. P. **Fundamentos de manufatura moderna: materiales, procesos y sistemas**. Colômbia: Pearson Educación, 1997.

GUIMARÃES, H. A. S. **Evolução do processo de usinagem convencional para CNC (controle numérico computadorizado)**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS, Varginha, 2013. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/959>. Acesso em:

HARRISON, D. D. *et al.* Sitting biomechanics Part I: Review of the Literature. **Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics**, Philadelphia, v. 22, n. 9, p. 594–609, 1999.

INTECH VIETNAM MECHANICAL CO., LTD. フライス加工. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://cokhiintech.com/milling/>. Acesso em: 30 dez. 2022.

ISMAILOV, A. S.; JO'RAYEV, Z. B. Study of arduino microcontroller board. **Science and Education**, Kokand, v. 3, n. 3, p. 172–179, 2022.

JAYACHANDRAIAH, B. *et al.* Fabrication of low cost 3-Axis CNC router. **International Journal of Engineering Science Invention**, [S. l.], v. 3, n. 6, p. 1–10, 2014.

JUNIOR, P. A. S. D. R. **Máquina de controle numérico computadorizado**. 2013. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, 2013.

KEEGAN, J. J. Evaluation and improvement of seats. **Industrial Medicine & Surgery**, [s. l.], v. 31, p. 137–148, 1962.

KINDLEIN JUNIOR, W.; CÂNDIDO, L. H. A.; BERTO, L. S. **Processo de produção de implantes craniofaciais via digitalização tridimensional a laser e usinagem CNC, e implantes produzidos pelo presente processo**. [S. l.], 2009.

LEITE, Josicleudo R. *et al.* Desenvolvimento de um CNC de pequeno porte. *In*: REUNIÃO REGIONAL DA SBPC NO CARIRI - URCA, 2017, Cariri. [S. l.], 2017.

MAIA NETO, P. O. **Projeto e fabricação de uma máquina CNC Router para prototipagem de circuitos impressos**. 2019. 55 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Caraúbas, 2019.

MARCON, C. T. *et al.* Uso de parametrização digital no desenvolvimento de assentos personalizados para cadeiras de rodas. **Human Factors in Design**, [s. l.], v. 10, n. 19, p. 52–69, 2021.

MEIJER, B. Stepstick DRV8825 v1. 0 Datasheet. **Circuit de contrôle de moteur pas-à-pas**, [s. l.], v. 21, 2013.

MOREIRA, D. L. B. **Construção de uma fresa de controle numérico computadorizado para placas de circuito impresso**. 2018. 72 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/23640>. Acesso em: 30 jul. 2023.

MUNADI, M. *et al.* Rancang-bangun prototipe mesin CNC laser engraving dua sumbu menggunakan diode laser. **Jurnal Teknik Mesin**, Surabaya, v. 13, n. 1, p. 32–37, 2018.

OLARI, J. R.; ALLEN, D. L. **Process for machining a flexible foam**. Depositante: United States. US7073244B2. Depósito: 20 set. 2002. Concessão: 11 jul. 2006. Inventors: _:n363

OLIVEIRA, J. S. D. **Implementação de processo para fabricação de peças aplicado à indústria de papel e celulose**. 2022. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (GRaduação) - Universidade Federal do Pará - UFPA, Tucuruí, 2022.

OLIVEIRA, H. C. de. **Retrofit de um Torno CNC do Tipo Bancada**. 2019. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

PINASO, G. R. **Projeto e desenvolvimento de máquina CNC do tipo Router para trabalhos em madeira**. 2021. 121 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2021.

POLASTRINI, F. H. **Desenvolvimento de uma máquina CNC de baixo custo com software e hardware abertos**. 2016. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG, Formiga, 2016.

ROCKENBACH, M. **Estudo e aperfeiçoamento da usinagem em espumas poliméricas flexíveis**. 2011. 26 f. Trabalho de Conclusão de Curso (GRaduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2011.

ROSÁRIO, J. M. **Automação industrial**. São Paulo: Baraúna, 2009.

SANTOS, L. R. R. dos; GONÇALVES, J. F. de S. **CNC router de baixo custo associado com confiabilidade e precisão**. 2021. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021.

SCATOLIM, R. L. *et al.* Legislação e tecnologias assistivas: aspectos que asseguram a acessibilidade das pessoas com deficiências. **InFor**, Philadelphia, v. 2, n. 1, p. 227–248, 2017.

SHELL, B. A. *et al.* **Willard and Spackman's Occupational Therapy**. 12th. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2013.

SILVA, B. G. C. da. **Estudo de materiais compósitos híbridos na indústria aeronáutica e aeroespacial e avaliação de argila organofílica e resina epóxi para aplicação em usinagem no torno CNC**. [S. l.: s. n.], 2019.

SILVA, H. M. C. da *et al.* Sistemas CAD/CAM: Revisão sistemática. **SEMPESq-Semana de Pesquisa da Unit-Alagoas**, [s. l.], n. 8, 2020. Disponível em: https://eventos.set.edu.br/al_sempesq/article/view/13913. Acesso em: 21 jan. 2024.

SILVA, F. da; KINDLEIN JÚNIOR, W. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. 2011. 192 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2011.

TEIXEIRA, E. *et al.* **Terapia ocupacional na reabilitação física**. São Paulo: Roca, 2002.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. D. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. Bela Vista: Saraiva, 2020.

UNIVERSAL GCODE SENDER. **UGS**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://winder.github.io/ugs_website/. Acesso em: 21 jan. 2024.

VECTRIC. **Página do produto Aspire | Vetric**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.vetric.com/products/aspire>. Acesso em: 21 jan. 2024.

VERMA, K.; GIANCHANDANI, I.; SAROHA, S. Efficient Use of Electronic Waste for CNC Machine. **International Journal of Computer Applications**, New York, v. 975, p. 8887, 2018.

WATSON, N.; WOODS, B. The origins and early developments of special/adaptive wheelchair seating. **Social History of Medicine**, Oxford, v. 18, n. 3, p. 459–474, 2005.

APÊNDICE A - Materiais utilizados na construção da máquina CNC e seus respectivos custos

ITEM	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	VALOR UND	SUBTOTAL
Polia V-slot Roldana P/ Impressora 3d CNC Router laser - 10,2X24	UND	9	R\$ 9,09	R\$ 81,81
Driver DRV8825 para Motor de Passo Nema de até 2.5A	UND	2	R\$ 20,89	R\$ 41,78
Kit CNC Shield V3 + 4 Driver Drv8825	KIT	1	R\$ 104,82	R\$ 104,82
Polia GT2 20 Dentes, Furo 5mm, P/ Correia 10mm	UND	1	R\$ 9,61	R\$ 9,61
Rolamento 608zz - 8x22x7mm	UND	4	R\$ 2,65	R\$ 10,60
Polia Tensora GT2 20 Dentes, Furo 5mm, P/ Correia 10mm	UND	1	R\$ 11,77	R\$ 11,77
Fixador Emenda em Alumínio 9x40, p/ Correia GT2	UND	1	R\$ 8,10	R\$ 8,10
Rolamento Linear SC8UU	UND	2	R\$ 18,25	R\$ 36,50
Guia Linear SAE1045 Ø8 x 400mm H7 Retificada	UND	1	R\$ 12,31	R\$ 12,31
Suporte Motor de Passo Nema 17 - 90°	UND	2	R\$ 15,01	R\$ 30,02
Motor de Passo Nema 17 5,2 kgf.cm 17hs8401 - 1,8A	UND	4	R\$ 77,65	R\$ 310,60
Fuso Trapezoidal TR8 250mm passo 2 roscas 1 entrada com castanha de metal	KIT	1	R\$ 44,52	R\$ 44,52
3 Metros de Correia GT2 largura 10mm passo 2mm alma fibra de vidro	METRO	1	R\$ 58,52	R\$ 58,52
Acoplamento flexível furos 5x8mm torque 10Kgf.cm externo 19/25mm	UND	2	R\$ 14,52	R\$ 29,04
Kit Polia Correia 10mm Gt2 240mm 20 60 Dentes Redução 3:1 F60-8 (8MM-5MM)	KIT	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Motor Spindle 500w Er11 CNC Router Fonte CA110/220v	UND	1	R\$ 629,00	R\$ 629,00
Fuso Trapezoidal De Avanço Tr8 8 X 700mm Com Castanha	KIT	2	R\$ 79,90	R\$ 159,80
Conector Cantoneira Preto Para Perfil T-Slot 6mm	Pacote com 4 UND	2	R\$ 65,72	R\$ 131,44
Espaçador em Alumínio Ø10 x Ø5mm	Pacote com 10 UND	2	R\$ 20,75	R\$ 41,50
Kit Broca Macho M3, M4, M5, M6, M8 e M10	KIT	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
Parafuso Allen Cabeça Abaulada M5	Pacote com 50 UND	2	R\$ 21,57	R\$ 43,14
Parafuso Allen Cabeça Cônica M4 - 12 mm	Pacote com 10 UND	1	R\$ 9,59	R\$ 9,59
Parafuso Allen de Perfil Baixo - M5 - 40 mm	Pacote com 10 UND	1	R\$ 14,38	R\$ 14,38
Parafuso Philips Cabeça Panela M3 - 10 mm	Pacote com 50 UND	1	R\$ 11,98	R\$ 11,98
Perfil Estrutural em Alumínio 20x20 V-Slot Preto - Canal 6	300 mm	4	R\$ 49,00 / m	R\$ 58,80
Perfil Estrutural em Alumínio 20x40 V-Slot Preto - Canal 6	680 mm	8	R\$ 75,00 / m	R\$ 458,25
	670 mm	1		
Placa de Conexão 90° p/ Perfil Base 20, 30, 40, 45 e V-Slot	20x20 Canal 8 e V-Slot	8	R\$ 3,94	R\$ 31,52
Porca Auto Travante Parlock - M5	Pacote com 50 UND	1	R\$ 11,98	R\$ 11,98
Porca T Reforçada Canal 6 - Para V-Slot - M5	Pacote com 50 UND	2	R\$ 71,89	R\$ 143,78
Peças em Acrílico sob demanda	30 Peças sob demanda	1	R\$ 800,00	R\$ 800,00
Endstop Final De Curso	UND	6	R\$ 7,10	R\$ 42,60
Fonte Chaveada Metal 100-240vac 480w 24vdc 21A	UND	1	R\$ 259,90	R\$ 259,90
Placa Uno Rev3 R3 Atmega328 SMD + Cabo Usb + Pinos	UND	1	R\$ 44,99	R\$ 44,99
TOTAL				R\$ 3.072,65

Fonte: Próprio autor.