

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MATEUS BAYS

**REPROJETO E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS ESTRUTURAIS DE
NANOSSATÉLITES EM FRESADORA ROUTER CNC**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MATEUS BAYS

**REPROJETO E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS ESTRUTURAIS DE
NANOSSATÉLITES EM FRESADORA ROUTER CNC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador:
Prof. Raimundo Ricardo Matos da Cunha,
Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Bays, Mateus

REPROJETO E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS ESTRUTURAIS DE
NANOSSATÉLITES EM FRESADORA ROUTER CNC / Mateus Bays; orientação
de Raimundo Ricardo Matos da Cunha. - Florianópolis,
SC, 2023.

56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Usinagem CNC. 2. Fresamento. 3. Sistemas CAD/CAM.
4. Cubesat. I. Matos da Cunha, Raimundo Ricardo. II.
Instituto Federal de Santa Catarina. III. REPROJETO
E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS ESTRUTURAIS DE NANOSSATÉLITES
EM FRESADORA ROUTER CNC .

REPROJETO E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS ESTRUTURAIS DE NANOSSATÉLITES EM FRESADORA ROUTER CNC

MATEUS BAYS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de dezembro, 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Orientador: Raimundo Ricardo Matos Da Cunha, Dr. Eng.

Prof. Avaliador 1: Eduardo Antônio Linck, Me.

Prof. Avaliador 2: Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o estudante **MATEUS BAYS**, matrícula nº 201910005193, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **REPROJETO E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS ESTRUTURAIS DE NANOSSATÉLITES EM FRESADORA ROUTER CNC** o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 01 de Fevereiro de 2023.



Documento assinado digitalmente

RAIMUNDO RICARDO MATOS DA CUNHA

Data: 01/02/2023 12:59:46-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

RAIMUNDO RICARDO MATOS DA CUNHA
Prof. Orientador do TCC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Roberto José Bays e Nely Lucia Bays, por todo amor, incentivo e suporte na minha jornada acadêmica.

Aos professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, principalmente ao Dr. Raimundo Ricardo Matos da Cunha, pela paciência, dedicação e disposição nos momentos necessários.

Em geral, a todos os envolvidos que de alguma forma me apoiaram ou dedicaram esforços para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Os CubeSats são nanossatélites com estruturas mecânicas padronizadas. A redução nos custos de produção e lançamento, viabilizaram projetos aeroespaciais em ambientes acadêmicos. E também atraíram a atenção de empresas e órgãos governamentais. Considerando que a prototipagem de estruturas mecânicas para CubeSats devem respeitar requisitos de projeto, tais como, tolerâncias dimensionais e baixa rugosidade, a maneira pela qual são fabricadas é muito importante. Este trabalho busca reprojetar e fabricar estruturas mecânicas para nanossatélites a partir da utilização de uma fresadora Router CNC. Na fabricação dos protótipos foram realizadas pesquisas quanto aos parâmetros dos processos de usinagem e especificações das estruturas de CubeSats. Com o auxílio de sistemas CAD/CAM foram desenvolvidos os processos de fresamento para a fabricação das peças, e quando necessário, o reprojetado das estruturas.

Palavras-chave: Usinagem CNC. Fresamento. Sistemas CAD/CAM. Cubesat.

ABSTRACT

CubeSats are nanosatellites with standardized mechanical structures. The reduction in production and launch costs has made aerospace projects feasible in academic environments. In addition, they also attracted attention of companies and government agencies. Considering that the prototyping of mechanical structures for CubeSats must respect design requirements, such as, such as dimensional tolerances and low roughness, the way they are manufactured is very important. This work seeks to redesign and manufacture mechanical structures for nanosatellites using a CNC Router milling machine. In the manufacturing of prototypes, research was carried out regarding the machining parameters and the specifications of the CubeSat structures. With the aid of CAD/CAM systems, milling process were developed for the fabrication of the parts, and when necessary, the redesign of structures.

Keywords: CNC Machining. Milling. CAD/CAM systems. Cubesat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação unitária do <i>CubeSat</i>	15
Figura 2 - FloripaSat-1	16
Figura 3 - Operação de fresamento	17
Figura 4 - Sentidos de corte	18
Figura 5 - Parâmetros de fresamento.....	20
Figura 6 - Fresa de topo inteiriça.....	21
Figura 7 - Fresa frontal.....	21
Figura 8 – Fluxograma do processo de fabricação das estruturas.....	25
Figura 9 - Router CNC Compact Pro.....	26
Figura 10 - Suporte do tipo pinça padrão ER20	27
Figura 11 - Bloco usinável de resina de poliuretano (Cibatool)	29
Figura 12 - Resultado do processo de faceamento.....	30
Figura 13 - Peça IFSC de baixo relevo	31
Figura 14 - Peça IF de alto relevo	31
Figura 15 - Resultado da usinagem das peças modeladas.....	32
Figura 16 - Vista explodida da estrutura adaptada.....	32
Figura 17 - Simulação da usinagem da barra de ligação com as ferramentas do laboratório	33
Figura 18 - Simulação da usinagem da amarração lateral com as ferramentas do laboratório	34
Figura 19 - Modificações realizadas na barra de ligação	35
Figura 20 - Modificações realizadas na amarração lateral	35
Figura 21 - Etapas de configuração no sistema CAM	36
Figura 22 - Posicionamento da barra de ligação	37
Figura 23 - Posicionamento da amarração lateral.....	37
Figura 24 - Sobrematerial adicionado na barra de ligação.....	38
Figura 25 - Sobrematerial adicionado na amarração lateral.....	38
Figura 26 - Trajetória de usinagem da Barra de Ligação	41
Figura 27 - Resultado da usinagem da Barra de Ligação	41
Figura 28 - Trajetória de usinagem da Amarração Lateral	42
Figura 29 - Resultado da Usinagem da Amarração Lateral	42
Figura 30 - Resultado do fresamento em MDF	44
Figura 31 - Resultado do fresamento utilizando cibatool em vista frontal	45

Figura 32 - Resultado do fresamento utilizando cibatool em vista posterior	45
Figura 33 - Incremento das espessuras da barra de ligação	46
Figura 34 - Incremento de espessuras da amarração lateral	46
Figura 35 - Problemas na usinagem da Amarração Lateral	47
Figura 36 – Formato da trinca	47
Figura 37 - Amarração Lateral após todas modificações	48
Figura 38 - Montagem da estrutura fabricada	49
Figura 39 - Montagem da estrutura fabricada vista superior	49
Figura 40 - Montagem da estrutura usinada em nylon	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Suportes ER20 disponíveis	27
Tabela 2 - Fresas disponíveis no laboratório GDMAES	28
Tabela 3 - Parâmetros de usinagem definidos para o MDF	39
Tabela 4 - Operações definidas para a fabricação da peça Barra de Ligação	39
Tabela 5 - Operações definidas para a fabricação da peça Amarração Lateral.....	40
Tabela 6 - Parâmetros de usinagem para resinas.....	45
Tabela 7 - Parâmetros referência para usinagem de <i>Nylon</i>	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
Cal Poly	<i>California Polytechnic State University, San Luis Obispo</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FIESC	Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo principal	14
2.2	Objetivos específicos	14
2.3	Justificativa e relevância	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1	Nanossatélite <i>Cubesat</i>.....	15
3.2	Fresamento.....	17
3.2.1	Parâmetros de fresamento	18
3.2.2	Ferramentas de corte	21
3.3	Comando Numérico Computadorizado.....	21
3.4	Sistemas CAM	22
4	METODOLOGIA	24
4.1	Equipamentos e materiais utilizados	25
4.1.1	O sistema CAM	25
4.1.2	A máquina	26
4.1.3	O ferramental de corte	27
4.1.4	Materiais usináveis.....	28
5	DESENVOLVIMENTO	31
5.1	Ensaios de usinagem para capacitação e operação da Router CNC ..	31
5.2	Fabricação da estrutura do CubeSat.....	32
5.2.1	Configuração do fresamento da estrutura no <i>SprutCAM</i>	35
5.2.2	Resultado da usinagem das estruturas	43
5.3	Usinagem da estrutura utilizando <i>Nylon</i>.....	50
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS	53
	APENDICÊ A – Parâmetros de usinagem	56

1 INTRODUÇÃO

O espaço contém informações importantes, e até ainda desconhecidas, para o desenvolvimento e a manutenção da vida na Terra. Entretanto o difícil acesso e o alto custo que é preciso desembolsar para chegar ao espaço, trouxeram uma problemática a comunidade científica universitária que buscava estudar e conhecer esse ambiente. Para solucionar o problema, Jordi Puig-Suari, da California Polytechnic State University, e Bob Twiggs, da Stanford University, propuseram no ano de 1999, um modelo simples e padronizado de nanossatélite que se tornou conhecido como *CubeSat* (CGEE, 2018, apud TWIGGS, 2008). A ideia da invenção dos nanossatélites, inicialmente veio do interesse em proporcionar aos estudantes da época a experiência de participar de um projeto aeroespacial, que iria desde a construção até o lançamento ao espaço, todavia por ser uma solução prática e acessível o uso dos nanossatélites foi adotado também por empresas privadas e órgãos governamentais (CGEE, 2018).

Atualmente existem nanossatélites em órbita que possuem aplicações importantes, exemplos disso são, nanossatélites para observação e mapeamento da Terra, responsáveis por estudos e monitoramento de processos dinâmicos e nanossatélites para comunicação de dados via *IoT*. Embora ainda não seja uma tecnologia disseminada, a busca pela fabricação e lançamento de novos nanossatélites pode ser percebida aqui mesmo no estado de Santa Catarina. Com a criação do programa Constelação Catarina o governo vem incentivando o desenvolvimento dessas tecnologias para estudar e prevenir catástrofes meteorológicas e contribuir com informações para o agronegócio (FIESC, 2022).

Em consequência, este trabalho busca verificar a possibilidade de utilização de uma fresadora *Router* CNC na fabricação de *CubeSats*, tendo em vista que este tipo de máquina pode apresentar acabamentos satisfatórios, considerando um adequado planejamento das operações e uma especificação correta dos parâmetros de usinagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

- Reprojetar e prototipar estruturas leves para nanossatélites utilizando o processo de usinagem por fresamento em uma fresadora *Router* CNC.

2.2 Objetivos específicos

- Conhecer os requisitos de projeto de estrutura de nanossatélites do tipo *CubeSat*.
- Planejar as operações de usinagem por fresamento utilizando sistema CAM.
- Calcular e definir os parâmetros de usinagem no sistema CAM.
- Realizar as operações de usinagem por fresamento utilizando uma *Router* CNC.
- Analisar os resultados das operações de usinagem por fresamento.

2.3 Justificativa e relevância

Levando em consideração que a prototipagem da estrutura de um *CubeSat* deve respeitar alguns requisitos de projeto, tais como, tolerâncias dimensionais e baixa rugosidade, a maneira pela qual é fabricada é muito importante. Portanto, além de proporcionar a aplicação dos conhecimentos desenvolvidos durante o curso, esse projeto busca verificar a possibilidade de utilização de uma fresadora *Router* CNC na fabricação de estruturas leves para nanossatélites com o auxílio de um sistema CAM.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

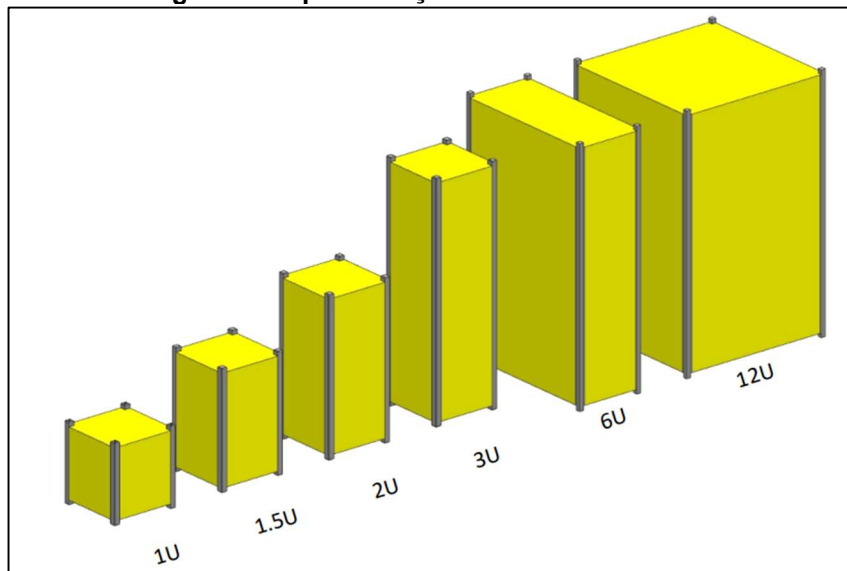
Neste tópico serão abordados os temas pesquisados para a fundamentação teórica desse trabalho.

3.1 Nanossatélite *Cubesat*

Segundo a *Cal Poly* (2022), os *CubeSats* são uma classe de satélites construídos por unidades que possuem formato de cubo e dimensão padronizada. Diferente de outros pequenos satélites, o *CubeSat* é um satélite que possui critérios padronizados, como massa, forma e tamanho. Esses critérios ajudam a reduzir o custo de produção e o custo de lançamento (NASA, 2017).

Os *CubeSats* são classificados em 1U, 2U, 3U, 6U e 12U, onde os números equivalem a quantidade de módulos unitários que o satélite possui. Um *CubeSat* do tipo 1U, representa um cubo de dimensões 10x10x10 cm e massa de até 2 quilogramas (CAL POLY SLO, 2022). A Figura 1 apresenta os módulos unitários 1U, 2U, 3U, 6U e 12U.

Figura 1- Representação unitária do *CubeSat*



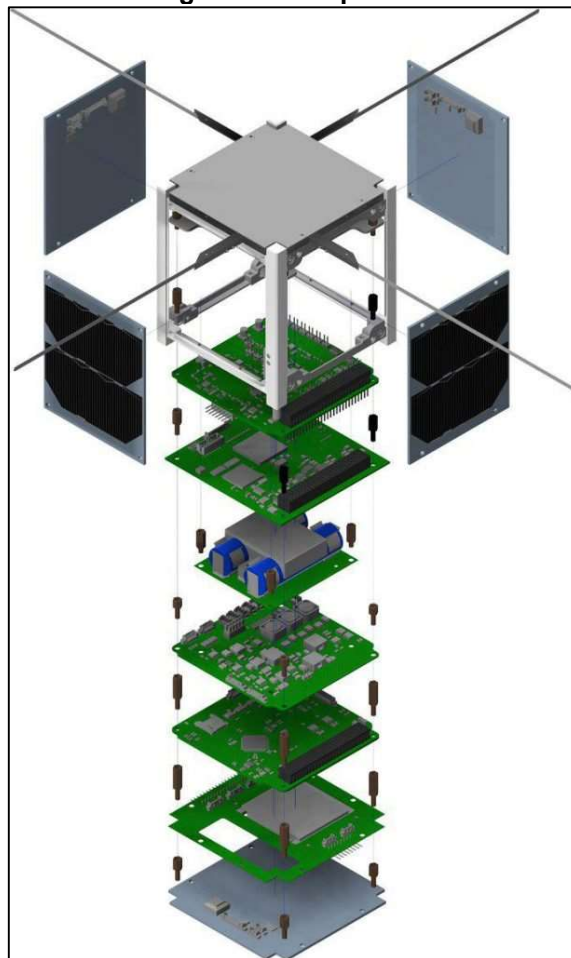
Fonte: Cal Poly SLO (2022).

As estruturas dos *CubeSats* devem respeitar tolerâncias dimensionais e de rugosidade, o que torna a produção manual complicada, portanto, o uso de máquinas

CNC se torna ideal para a fabricação, pois além de suprir os critérios de projeto também diminuem o tempo de produção. Na fabricação das estruturas desse trabalho foram utilizados materiais de prototipagem, como por exemplo, o MDF, a resina e o *nylon*. Esses materiais não são recomendados pela documentação original (CAL POLY SLO, 2022), portanto se o objetivo fosse lançar essas estruturas seria necessário verificar a possibilidade com o provedor de lançamento ou com o fabricante do dispensador.

Atualmente existem diversos *CubeSats* em órbita e todos eles possuem finalidades específicas. Por exemplo, na Universidade Federal de Santa Catarina, foi desenvolvido o FloripaSat-1, *CubeSat* do tipo 1U, com a finalidade de repetir sinal de rádio amador, que pode ser utilizado em todo o mundo em situações de emergência e resgate (SpaceLab, 2022). A Figura 2 apresenta a estrutura completa do FloripaSat-1, que também representa a forma final de um *CubeSat*.

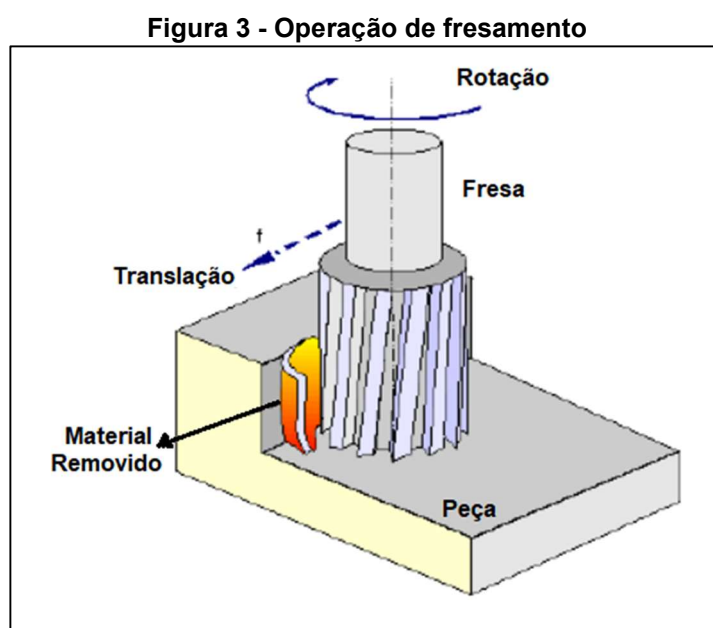
Figura 2 - FloripaSat-1



Fonte: SpaceLab (2022).

3.2 Fresamento

Segundo Diniz et al. (2009), o fresamento é uma das possíveis operações de usinagem existentes e é caracterizado pela remoção de material a partir do emprego da ferramenta de corte denominada fresa, que é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo. A operação de fresamento pode ser vista na Figura 3, que mostra a remoção de material a partir da combinação do movimento de translação e rotação de uma fresa de topo.



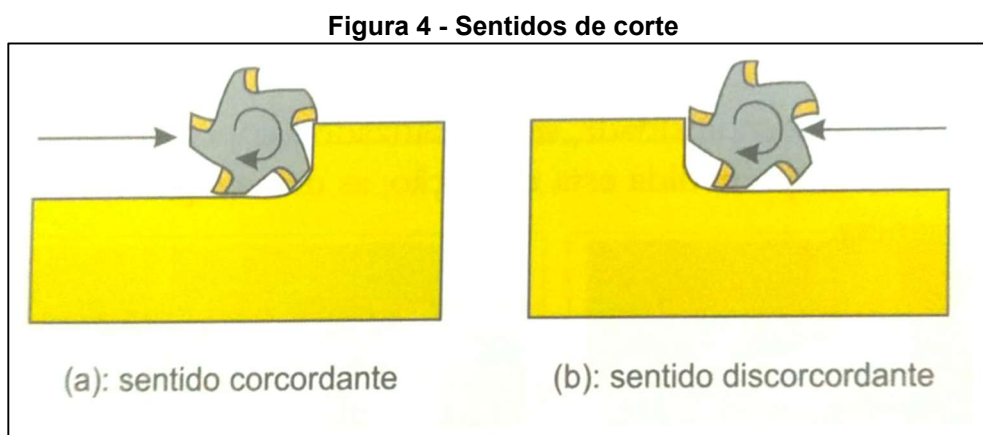
Fonte: Adaptado de Renato Goulart Jasinevicius (2022).

O fresamento é considerada a operação mais complexa de usinagem, em razão das suas características de corte intermitente e da sua movimentação (SOUZA; ULBRICH, 2009).

De acordo com Souza e Ulbrich (2009), “o fresamento pode ser classificado segundo o sentido de remoção de material, conforme o sentido de movimentação entre a ferramenta e a peça”. Essa classificação determina se o sentido de corte é concordante ou discordante. No sentido concordante, a maior espessura do cavaco se encontra no início do corte e no sentido discordante a maior espessura do cavaco se encontra no final do corte (SOUZA; ULBRICH, 2009). Apesar dessa

classificação, o sentido de corte não foi definido na fabricação das estruturas, dessa forma o sistema CAM ficou responsável pela escolha entre quando utilizar um e outro.

A Figura 4 ilustra os sentidos de corte, concordante quando o avanço é no sentido de rotação da fresa (a) e discordante quando o avanço é oposto ao sentido de rotação da fresa (b).



Fonte: Souza e Ulbrich (2009).

As principais operações utilizadas na fabricação das estruturas, foram as operações de desbaste e acabamento. O desbaste é realizado com a finalidade de garantir elevada taxa de remoção de material, sendo limitado pela potência da máquina-ferramenta, diferente disso o acabamento é responsável pela remoção do sobrematerial restante após processo de desbaste, priorizando as dimensões finais e a qualidade da peça (Machado et al., 2009).

3.2.1 Parâmetros de fresamento

Os parâmetros são essenciais para um ótimo fresamento, pois além de serem responsáveis pela qualidade da superfície usinada são também responsáveis pela eficiência do processo e pela vida útil das ferramentas de corte (SOUZA; ULBRICH, 2009).

Segundo Machado et al. (2009, p. 13), para se obter o resultado do processo de usinagem é necessário providenciar um movimento relativo adequado entre a peça e a ferramenta. De acordo com Diniz et al. (1999, p. 17), o movimento entre a peça e a ferramenta é responsável pelas grandezas físicas do processo de

usinagem e podem ser classificados como ativos ou passivos. Os movimentos ativos realizam a remoção de cavaco, diferente dos passivos, que apesar de fundamentais não removem material.

Para o estudo realizado nesse trabalho, foram definidos somente os parâmetros provenientes dos movimentos ativos, pois os demais parâmetros ficaram em responsabilidade do *software* CAM. Os parâmetros relacionados com os movimentos ativos necessários para a fabricação das estruturas são: velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade no sentido axial da ferramenta, profundidade no sentido radial da ferramenta e avanço por aresta (SOUZA; ULBRICH, 2009).

Conforme Machado et al. (2009, p. 17), “a velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte”. Para processos com movimentos de rotação da ferramenta como o de fresamento, a velocidade de corte é calculada pela Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte (m/min)

D = diâmetro da peça ou da ferramenta (mm)

n = número de rotações por minuto (rpm)

Ainda conforme Machado et al. (2009, p. 17), “a velocidade de avanço (v) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço”. A velocidade de avanço é calculada pela Equação 2.

$$V_f = n \times f_z \times Z \quad (2)$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

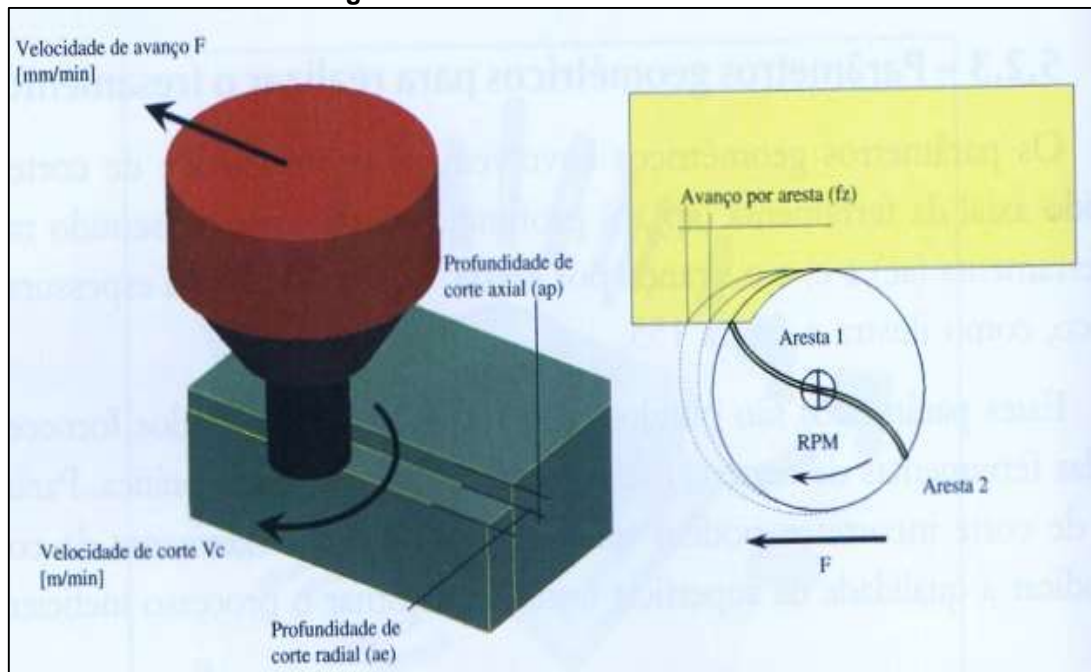
n = número de rotações por minuto (rpm)

f_z = avanço por aresta (mm)

Z = número de arestas da ferramenta

De acordo com Souza e Ulbrich (2009), diferente das velocidades que devem ser calculadas, os parâmetros geométricos: profundidade axial (ap), radial (ae) e avanço por aresta (fz), são normalmente obtidos com auxílio dos manuais disponíveis pelos fornecedores das ferramentas e muitas vezes pela própria experiência prática. Na Figura 5, estão ilustrados os parâmetros de corte (V_f , V_c , ae , ap e fz) de acordo com o posicionamento e a movimentação da fresa em relação a peça.

Figura 5 - Parâmetros de fresamento



Fonte: Souza e Ulbrich (2009).

3.2.2 Ferramentas de corte

O processo de fresamento desse trabalho é do tipo fresamento frontal, pois de acordo com Diniz et al. (1999, p. 197), no fresamento frontal são utilizados os dentes ativos que estão na superfície frontal da fresa e o eixo da fresa está perpendicular a superfície usinada. Sendo assim, as fresas do fresamento frontal são denominadas fresas de topo ou frontais. Para a fabricação das estruturas, foram utilizadas as fresas de topo de característica inteiriça, onde sua haste e sua região de corte apresentam um único corpo.

As Figuras 6 e 7 ilustram as fresas de topo ou frontais, em ambas figuras as ferramentas estão perpendiculares às superfícies usinadas.

Figura 6 - Fresa de topo inteiriça



Fonte: ISCAR Milling (2022).

Figura 7 - Fresa frontal



Fonte: ISCAR Milling (2022).

3.3 Comando Numérico Computadorizado

O comando numérico computadorizado é uma tecnologia para o controle das máquinas a partir de códigos, sem a necessidade de intervenção manual. De acordo com Rebeyka (2018), “o comando numérico é um equipamento eletrônico capaz de receber informações por meio de entrada própria, compilar estas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina, de modo que esta, sem a intervenção do operador, realize as operações na sequência programada”.

Em vista disso, as operações das máquinas começaram a ser realizadas a partir do uso de uma linguagem de programação, conhecida como *G-Code* (código G). Em uma programação realizada em código G estão presentes todas as

informações necessárias para o *software* de controle realizar o comando da máquina. Nas máquinas atuais, o *hardware* de controle é integrado aos computadores e através de um *software*, os códigos são interpretados e transformados em sinais de comando que são enviados para os atuadores da máquina.

Com a evolução da tecnologia CNC surgiram novos métodos de fabricação, sendo um deles, o sistema CAM. O sistema CAM, é um *software* responsável pela geração de programas de comando numérico para a fabricação de peças a partir de operações de eletroerosão, torneamento, fresamento e retificação, dentre outras, sendo a operação de fresamento a principal aplicação (SOUZA, COELHO, 2003). Os sistemas CAM serão discutidos com maior profundidade no tópico 3.4.

3.4 Sistemas CAM

De acordo com a Siemens (2022), a manufatura auxiliada por computador (CAM) normalmente está relacionada ao uso de *softwares* para a criação de instruções detalhadas de orientação para ferramentas de máquinas voltadas para a manufatura de peças. Isso significa, que os sistemas CAM são ferramentas de auxílio na criação de projetos de manufatura, o que torna o processo mais simples comparado à programação manual. Em resumo, a utilização do sistema CAM reduz a necessidade do operador no processo de manufatura, pois permite a realização de programas com mais rapidez, segurança, com poucos erros de programação e com tempo de preparação das máquinas menor (CORRÊA, 1995).

Entretanto, para um bom funcionamento do sistema CAM, é necessário um modelo CAD com as informações completas das peças, para a geração das trajetórias das ferramentas sem a necessidade de intervenção manual (SCHUT, 1993). Dessa forma, o processo para a manufatura utilizando sistema CAD/CAM/CNC é dada de acordo com as seguintes etapas (SOUZA, COELHO, 2003):

- Modelagem de peça – CAD;
- Importação da peça no sistema CAM, transferência dos dados geométricos – CAM;
- Estratégia e cálculo da trajetória – CAM;
- Pós-processamento do programa – CAM;

- Aplicação no controlador CNC;

Segundo Azevedo (2017), os sistemas CAM geram arquivos em linguagem genérica contendo as instruções para uma máquina CNC. Entretanto, essa linguagem genérica não é interpretada pelos controladores CNC das máquinas, sendo necessário a conversão para a linguagem da máquina (código G). Para solucionar esse problema, existem os pós-processadores, que traduzem a linguagem genérica para a linguagem da máquina. Neste trabalho, foi utilizado o pós-processador para o *Mach3Mill*, que é o *software* responsável pelo controle numérico computadorizado da *Router CNC Compact Pro*.

Entre as principais funções de um sistema CAM, se destacam a capacidade de estimativa dos tempos de produção, o levantamento dos custos, o planejamento da sequência de operações, a seleção do maquinário necessário para a fabricação e a adequação dos parâmetros de fresamento, através das simulações do processo (GRAEF, 2019).

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho é baseada em uma pesquisa qualitativa de natureza aplicada, com o objetivo de explorar a utilização de máquinas do tipo *Router* CNC para a fabricação de protótipos de estruturas para nanossatélites. Além disso, este trabalho é fundamentado a partir de procedimentos de ação, pois além do levantamento bibliográfico foram de fato fabricadas e reprojetadas as estruturas propostas.

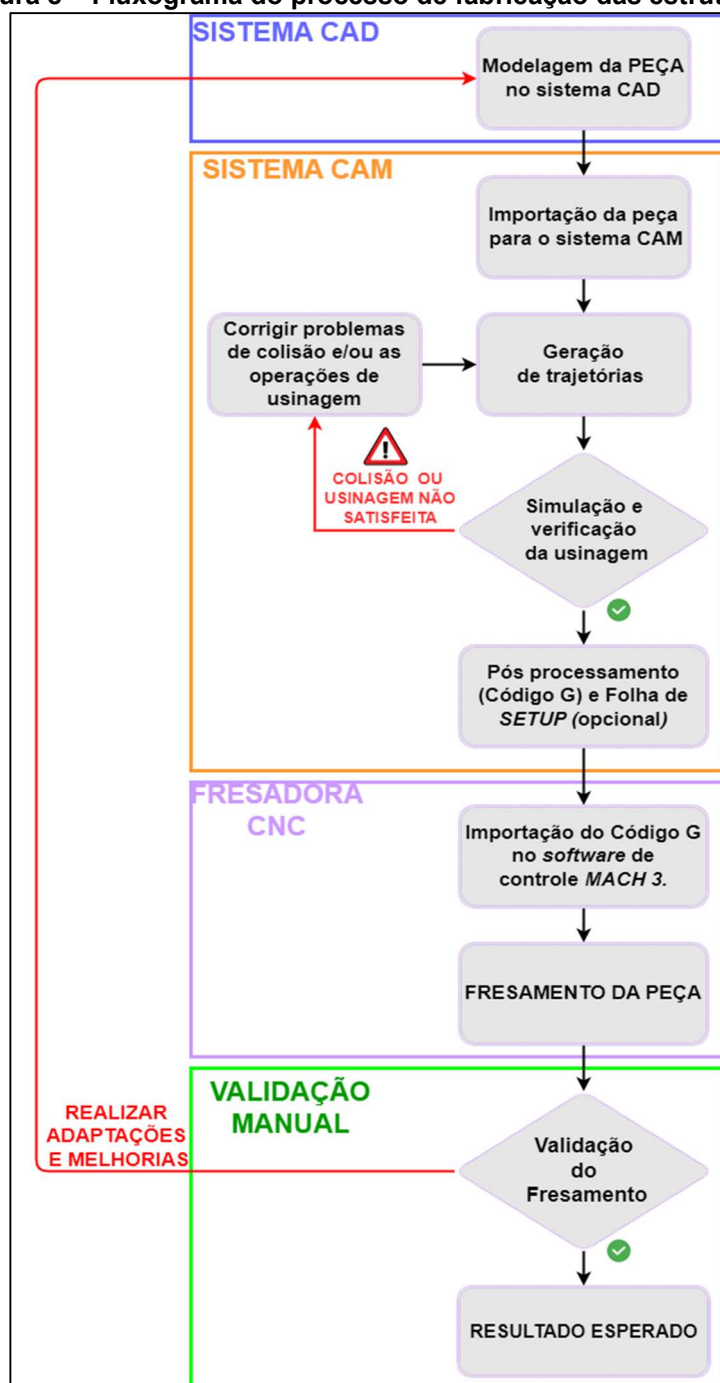
Para a elaboração desse trabalho três etapas foram necessárias, sendo elas: a pesquisa bibliográfica para o levantamento de informações, a capacitação técnica para utilização da *Router* CNC e por último a fabricação dos protótipos.

Na etapa de pesquisa, foi realizado um estudo bibliográfico, utilizando de materiais disponíveis em meio físico e digital, sendo eles livros, trabalhos para conclusão de curso, artigos e documentos técnicos.

Na etapa de capacitação prática para utilização da *Router* CNC, foram vistos treinamentos fornecidos pela empresa fabricante da máquina e também verificada a integração entre os *softwares* de CAM e o *software* de controle numérico *Mach3Mill*. Além disso, foram realizados os primeiros ensaios de fresamento.

E por fim, para a fabricação dos protótipos, foi seguido o fluxograma apresentado na Figura 8, que ilustra as etapas que precisam ser cumpridas para a fabricação das estruturas. Essas etapas, representam as operações necessárias em cada momento do processo, descrevendo cada operação realizada, no sistema CAD, no sistema CAM, na fresadora CNC e a validação manual.

Figura 8 – Fluxograma do processo de fabricação das estruturas



Fonte: Elaboração própria (2022).

4.1 Equipamentos e materiais utilizados

4.1.1 O sistema CAM

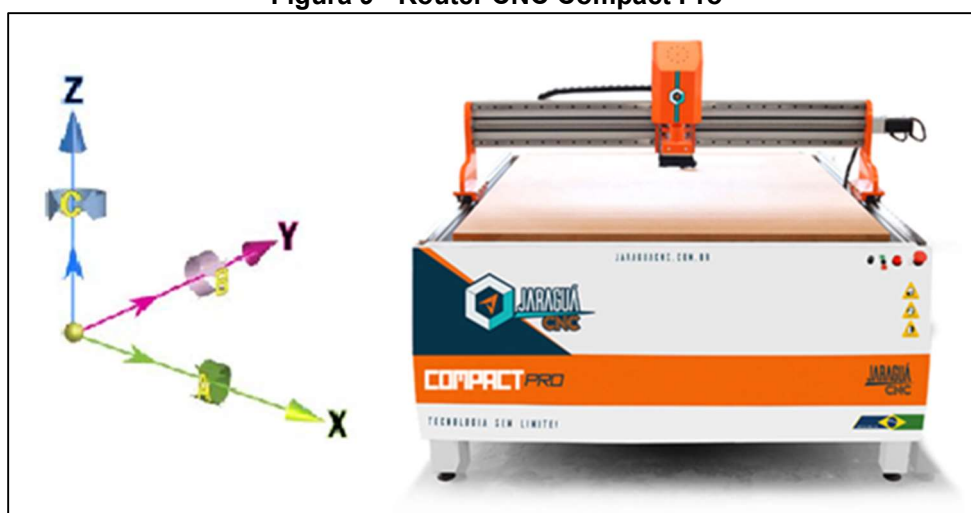
Para o desenvolvimento dos projetos de manufatura das estruturas, foi utilizado o *software SprutCAM XV*, que é desenvolvido pela *SprutCAM Tech Ltd*. O

SprutCAM é um *software* CAM com fluxo de trabalho simplificado e muito seguro, que possui diversos aspectos importantes no processo de manufatura de peças, como por exemplo, gerenciamento de material remanescente, simulação completa da máquina, além do suporte a diversas marcas de controladores CNC (SPRUTCAM TECH LDT., 2022).

4.1.2 A máquina

Para a fabricação dos protótipos foi utilizada a máquina *Router* CNC *Compact Pro*, ilustrada na Figura 9. A máquina possui três eixos de movimentação: 800 mm no eixo X, 1200 mm no eixo Y e 120 mm no eixo Z. A velocidade máxima de avanço é de 7000 mm/min e a velocidade máxima de rotação do eixo árvore é de 24000 rpm, podendo comportar ferramentas de 1 até 10 mm de diâmetro utilizando o suporte de ferramentas do tipo pinça de padrão ER20 (JARAGUA CNC, 2018). O Controle Numérico Computadorizado da *Router* é realizado a partir do *software* *Mach3Mill*, que transforma computadores em controladores completos para máquinas (MACH SUPORTE, 2022).

Figura 9 - Router CNC Compact Pro



Fonte: Adaptado de Jaraguá CNC.

A Figura 10 apresenta o modelo de suporte ER20, utilizado para a fixação das ferramentas de corte no eixo árvore.

Figura 10 - Suporte do tipo pinça padrão ER20

Fonte: CNC Fresas.

Na Tabela 1, estão discriminados os suportes ER20 disponíveis no laboratório, vale ressaltar que com esses 4 suportes é possível fixar todas as ferramentas disponíveis.

Tabela 1 - Suportes ER20 disponíveis

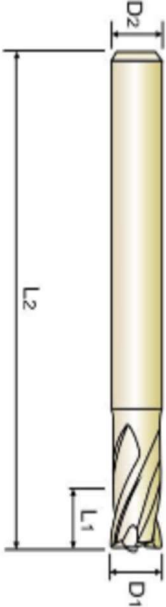
Suportes de Ferramenta
Pinça ER20 com furo de 1/8 (3.175mm)
Pinça ER20 com furo de 4.0 mm
Pinça ER20 com furo de 1/4 (6.35mm)
Pinça ER20 com furo de 8.0 mm

Fonte: Elaboração própria (2022).

4.1.3 O ferramental de corte

As ferramentas de corte disponíveis para a fabricação no laboratório GDMAES são fresas de topo reto e esférica. A Tabela 2, apresenta as especificações técnicas das ferramentas.

Tabela 2 - Fresas disponíveis no laboratório GDMAES

Legenda	Descrição	D1	D2	L1	L2	Material	Sentido do Corte	Materiais Usináveis
	Fresa de topo reto, 2 cortes invertido	8mm	8mm	35mm	75mm	Metal Duro K58	Para Baixo	Madeira, MDF, MDP, ACM, PVC, acrílico
	Fresa de topo reto, 2 cortes invertido	6mm	6mm	25mm	49mm	Metal Duro K58	Para Baixo	Madeira, MDF, MDP, ACM, PVC, acrílico
	Fresa de topo reto, 2 cortes invertido	4mm	4mm	22mm	46mm	Metal Duro K58	Para Baixo	Madeira, MDF, MDP, ACM, PVC, acrílico
	Fresa esférica 2 cortes	4mm	4mm	22mm	46mm	Metal Duro/ Tin		MDF, MDP e Madeira (baixa/média) densidade
	Fresa de topo reto, 1 corte invertido	4mm	4mm	22mm	46mm	Metal Duro	Para Baixo	Todos citados anteriormente e polímeros
	Fresa de topo, 2 cortes retos paralelos	4mm	4mm	30mm	55mm	Metal Duro HRC50		MDF, MDP e Madeira (baixa/média) densidade
	Fresa de topo, 2 cortes retos paralelos	8mm	8mm	30mm	60mm			
	Fresa de topo reto, 1 corte invertido	6mm	6mm	25mm	50mm	Metal Duro	Para Baixo	Todos citados anteriormente e polímeros
	Fresa de topo reto, 2 cortes invertido	2.5mm	6mm			Metal Duro	Para Baixo	MDF, MDP e Madeira (baixa/média) densidade

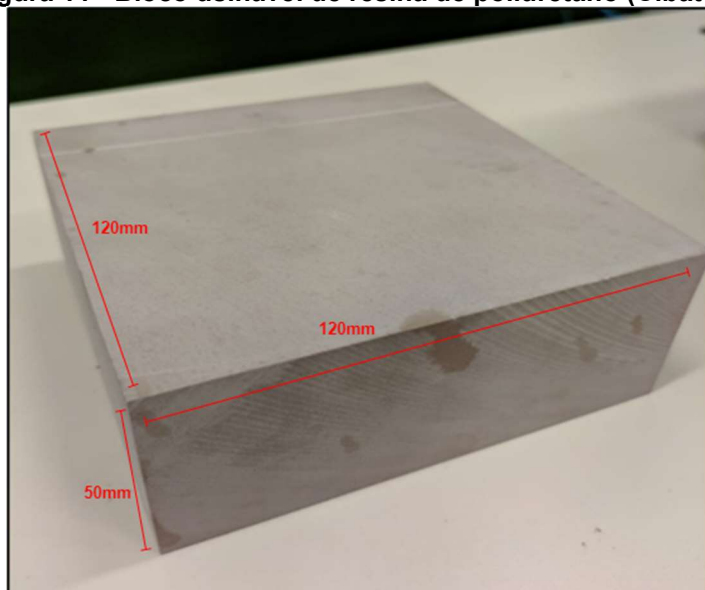
Fonte: Elaboração própria (2022).

4.1.4 Materiais usináveis

Os materiais utilizados na fabricação dos protótipos estruturais dos nanossatélites foram escolhidos a partir da disponibilidade da instituição e de acordo com a possibilidade de usinagem a partir das ferramentas disponíveis.

Inicialmente foi planejado fabricar as estruturas utilizando MDF para posteriormente utilizar *Nylon*. Porém, ao decorrer da fabricação das estruturas notou-se que o MDF apresentou baixa resistência mecânica para as dimensões usinadas. Sendo assim, para substituir o MDF foram utilizados blocos usináveis de resina de poliuretano, comercialmente conhecidos como *Cibatool*, esses blocos estão ilustrados na Figura 11.

Figura 11 - Bloco usinável de resina de poliuretano (Cibatool)



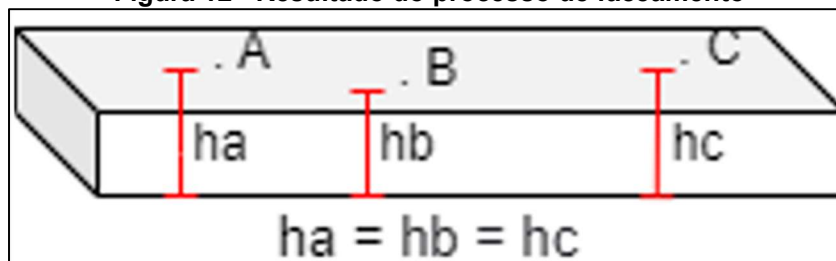
Fonte: Elaboração própria (2022).

Os blocos de resina de poliuretano foram utilizados, pois além de serem um material disponível na instituição, apresentaram boa resistência mecânica após a usinagem. Os blocos tinham as dimensões de 120(L) x 120(A) x 50(P) mm e antes de serem usinados eram submetidos a duas operações, sendo elas, corte utilizando serra circular e faceamento a partir da operação manual da fresadora *Router* CNC.

A operação de corte na serra foi realizada para dividir os blocos de acordo com a espessura de sobrematerial definida nos parâmetros do *software SprutCAM*. Essa operação proporciona economia de material e diminuição no tempo de fresamento, não sendo preciso remover material além do necessário nas operações.

Já o processo de faceamento foi realizado para obter uma superfície plana e paralela à mesa da fresadora, dessa forma quando fosse necessário fazer o zeramento do eixo z, que é realizado sempre que ocorre uma troca de ferramenta, qualquer ponto da superfície do material apresentaria altura igual em relação a superfície da fresadora. O resultado do processo de faceamento pode ser visto na Figura 12, que mostra que todos os pontos, independentemente da localização, possuem a mesma altura.

Figura 12 - Resultado do processo de faceamento



Fonte: Elaboração própria (2022).

Após as fabricações utilizando resina de poliuretano, foram realizadas fabricações utilizando chapas de *nylon*. As chapas de *nylon* são padronizadas e não precisam ser preparadas e estavam disponíveis em espessuras de 13 mm e 17 mm.

5 DESENVOLVIMENTO

Neste tópico é apresentado o desenvolvimento do trabalho, descrevendo desde a capacitação para operação da máquina até a fabricação das estruturas.

5.1 Ensaios de usinagem para capacitação e operação da Router CNC

Para atingir os objetivos desse trabalho foram necessárias usinagens iniciais, as quais serviram de capacitação para a realização das operações na fresadora e da utilização do *software Mach3Mill*.

Esses ensaios foram feitos a partir de simples usinagens realizadas em peças modeladas e possibilitaram verificar a integração entre o pós-processador *Mach3Mill* do sistema CAM e o controlador *Mach3Mill* da fresadora, validando se as trajetórias geradas no *software* estavam de acordo na máquina, além do funcionamento e operação da fresadora.

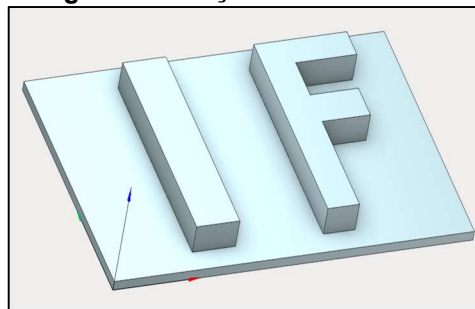
As peças inicialmente usinadas foram modeladas utilizando o *software Tinkercad* disponível de forma online para navegadores de internet e também utilizando o sistema CAD existente no *software SprutCAM*. As peças estão representadas nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Peça IFSC de baixo relevo



Fonte: Elaboração própria (2022).

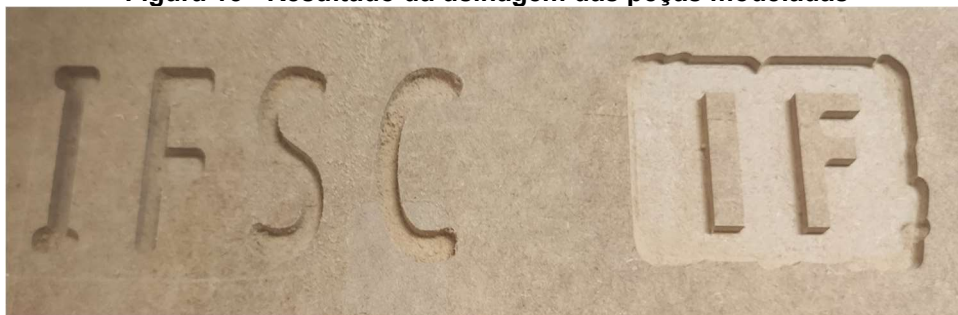
Figura 14 - Peça IF de alto relevo



Fonte: Elaboração própria (2022).

Após a modelagem das peças, foram gerados os códigos G necessários para realizar as operações de desbaste de ambas as peças. Com a execução desses códigos no *software* controlador *Mach3Mill* da fresadora foram obtidos os resultados apresentados na Figura 15, onde é possível visualizar uma usinagem com bom acabamento, sem a presença de lascamentos.

Figura 15 - Resultado da usinagem das peças modeladas



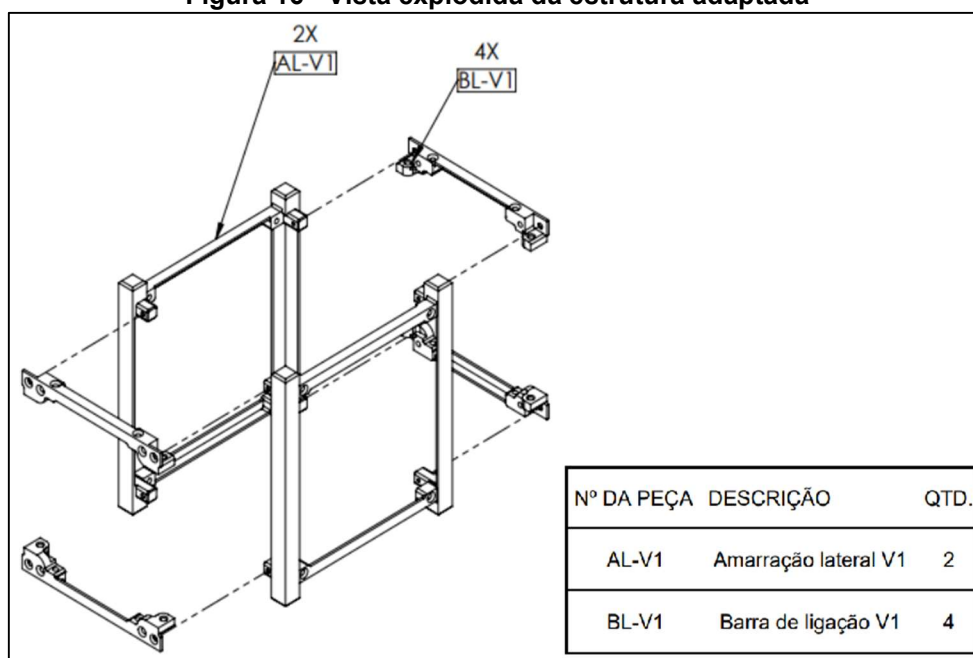
Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir dessas usinagens, foi possível verificar que o controlador da máquina suportou o código gerado pelo pós-processador do *sistema* CAM.

5.2 Fabricação da estrutura do CubeSat

O protótipo fabricado é a adaptação de uma estrutura comercializada pela empresa *Innovative Solutions in Space* – ISIS. Essa adaptação foi modelada em um trabalho anterior de conclusão de curso (TEIXEIRA, 2021). A adaptação pode ser visualizada em vista explodida na Figura 16, que apresenta as duas peças que compõe a estrutura.

Figura 16 - Vista explodida da estrutura adaptada

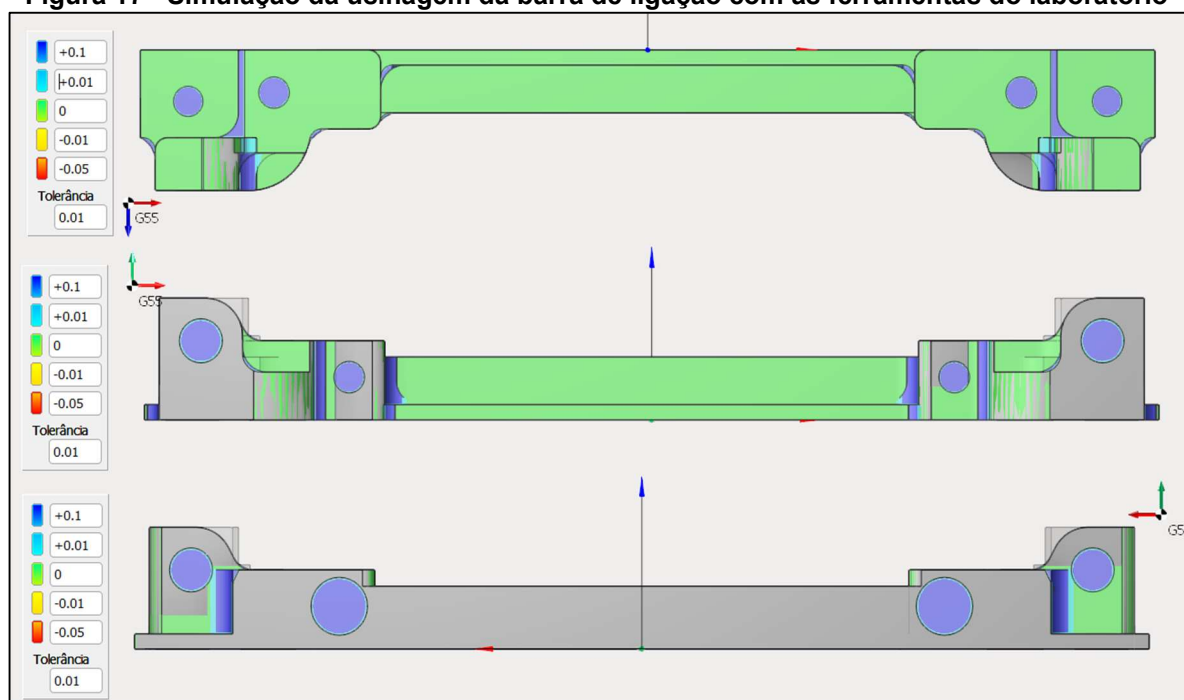


Fonte: Adaptado de Teixeira (2021).

Para a usinagem dessa estrutura, foi utilizado um sistema CAM, sendo necessário o desenvolvimento de um projeto de manufatura. A primeira etapa para o desenvolvimento de um projeto de manufatura é a modelagem CAD da peça que será usinada.

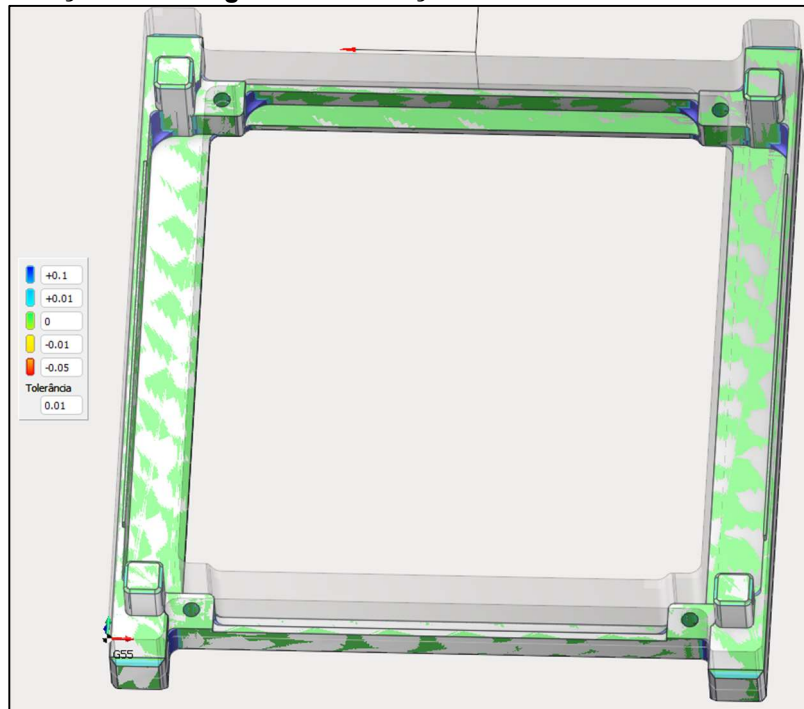
O modelo CAD utilizado, foi o reprojeto da estrutura apresentada anteriormente. A realização do reprojeto se fez necessária, dado que a usinagem da estrutura apresentada anteriormente a partir das ferramentas disponíveis no laboratório, resultaria em dimensões diferentes da peça modelada. Para ilustrar esse problema, foi realizada uma simulação de usinagem. Essa simulação pode ser visualizada na Figura 17 e na Figura 18, que representam as regiões usinadas a partir das ferramentas disponíveis no laboratório. Nessas figuras, as áreas em azul, mostram regiões onde não foi possível atingir as tolerâncias de usinagem, ou seja, sobra de material. Isso se deve pelo fato do diâmetro das fresas disponíveis serem maiores do que as dimensões que precisam ser usinadas e em outros casos pela falta de ferramentas especiais de corte, como por exemplo o escareador, utilizado para escarear os furos.

Figura 17 - Simulação da usinagem da barra de ligação com as ferramentas do laboratório



Fonte: Elaboração própria (2022).

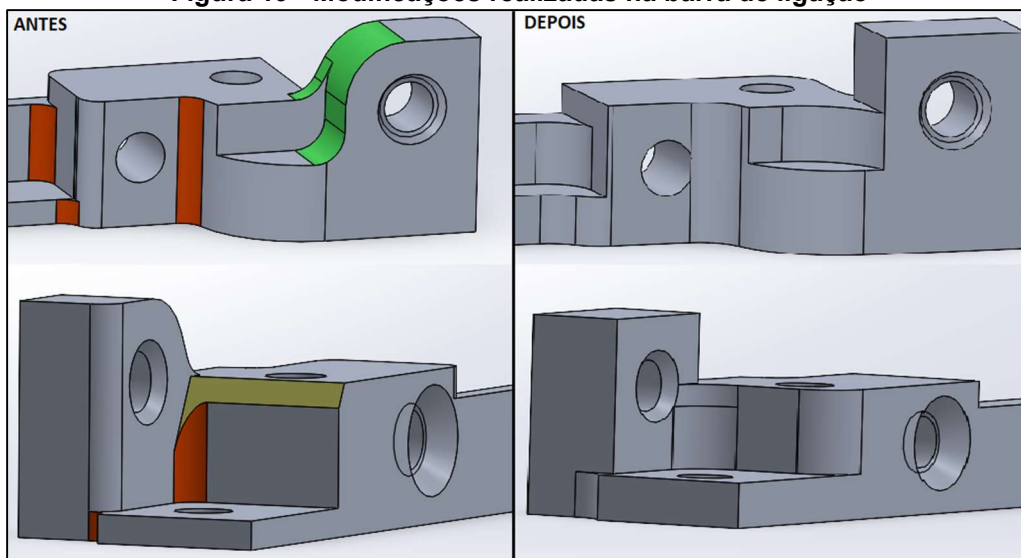
Figura 18 - Simulação da usinagem da amarração lateral com as ferramentas do laboratório



Fonte: Elaboração própria (2022).

Sendo assim, as adaptações basearam-se em incremento, ou remoção, quando necessário, dos raios menores que 2 mm e também na remoção dos chanfros existentes na estrutura. A Figura 19 mostra as modificações realizadas na barra de ligação. Os raios incrementados estão destacados em vermelho, o filete de raio removido está destacado em verde e o chanfro removido está destacado em amarelo.

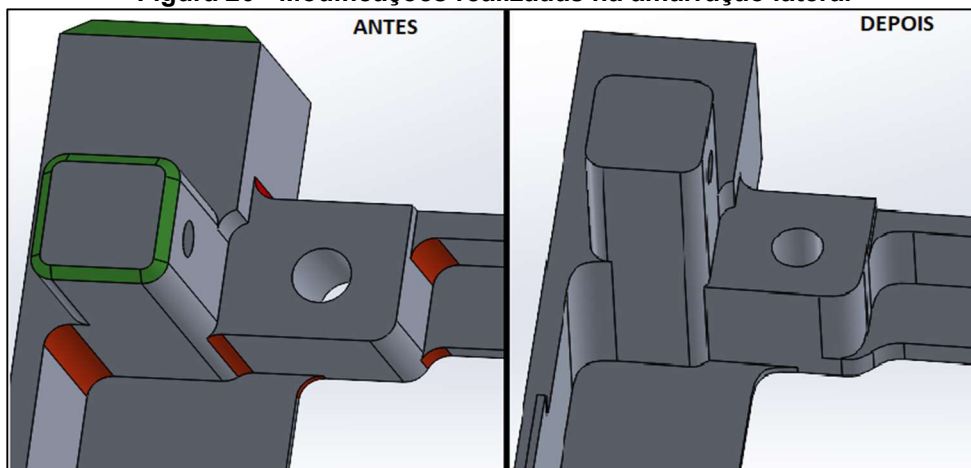
Figura 19 - Modificações realizadas na barra de ligação



Fonte: Elaboração própria (2022).

A Figura 20 é o resultado das modificações realizadas na amarração lateral, em vermelho estão os raios que foram incrementados e em verde os chanfros que foram removidos.

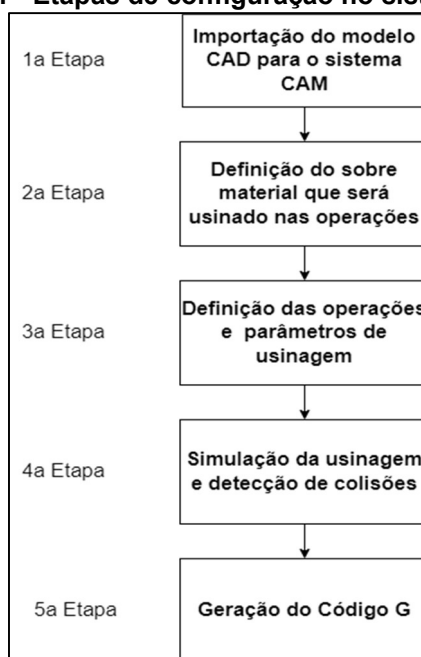
Figura 20 - Modificações realizadas na amarração lateral



Fonte: Elaboração própria (2022).

5.2.1 Configuração do fresamento da estrutura no *SprutCAM*

A configuração de um processo de fresamento utilizando sistema CAM passa por diferentes etapas. A Figura 21, apresenta as etapas de configuração necessárias a serem realizadas no sistema CAM.

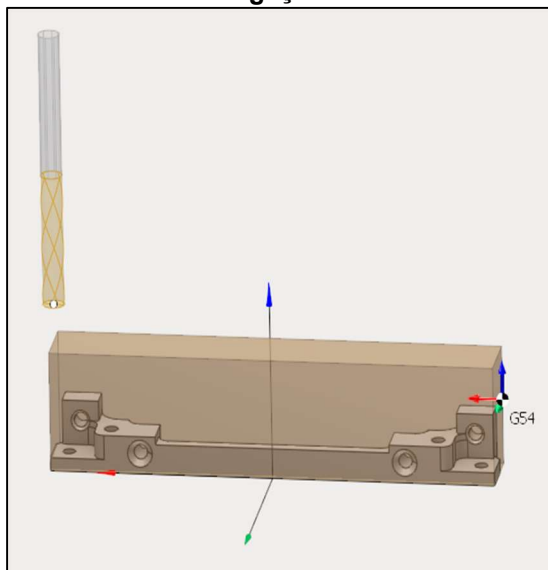
Figura 21 - Etapas de configuração no sistema CAM

Fonte: Elaboração própria (2022).

Na 1ª etapa é realizada a importação do modelo CAD para o sistema CAM e definido o posicionamento da peça em relação a mesa da fresadora. Para realizar a importação do modelo CAD para o sistema CAM, foi necessário converter os arquivos gerados pelo *software* CAD para a extensão *parasolid*. Isso aconteceu, pois o sistema CAM não suportava os arquivos CAD da versão do *software* utilizado.

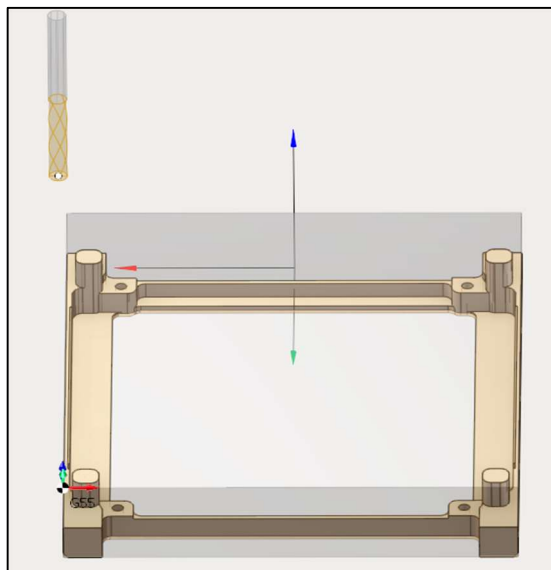
Os posicionamentos definidos para as operações de desbaste e acabamento da barra de ligação e da amarração lateral podem ser vistos respectivamente nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 - Posicionamento da barra de ligação



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 23 - Posicionamento da amarração lateral



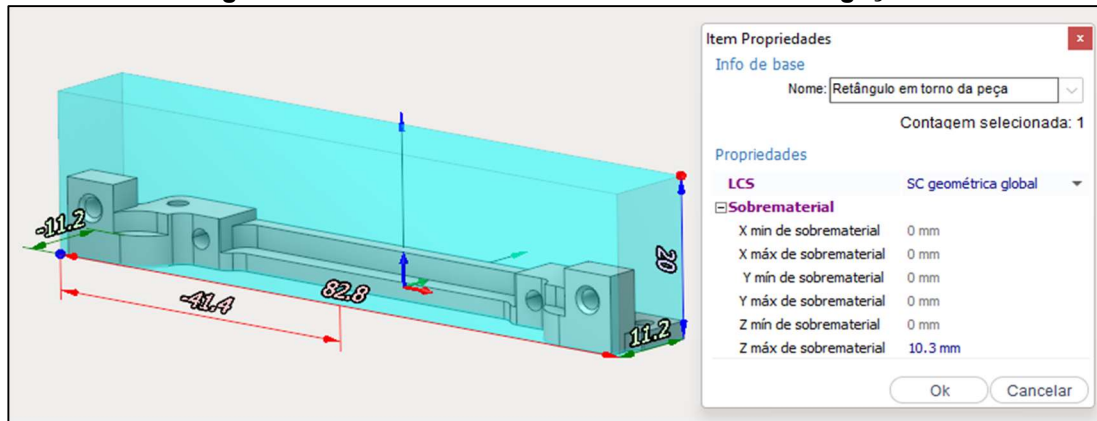
Fonte: Elaboração própria (2022).

O posicionamento deve levar em consideração alguns aspectos como, a fixação da peça, os cursos da máquina e a geometria da ferramenta. Por exemplo, é possível usar uma geometria usando certa ferramenta em um determinado posicionamento e em outro não.

Na 2ª etapa foi realizada a definição de sobrematerial das peças. A definição de sobrematerial da peça foi estabelecida a partir das dimensões do material que seria usinado. Como os materiais usinados eram blocos com superfícies planas e de bom acabamento, essas superfícies foram aproveitadas na peça, sendo assim o sobrematerial foi definido em somente um lado.

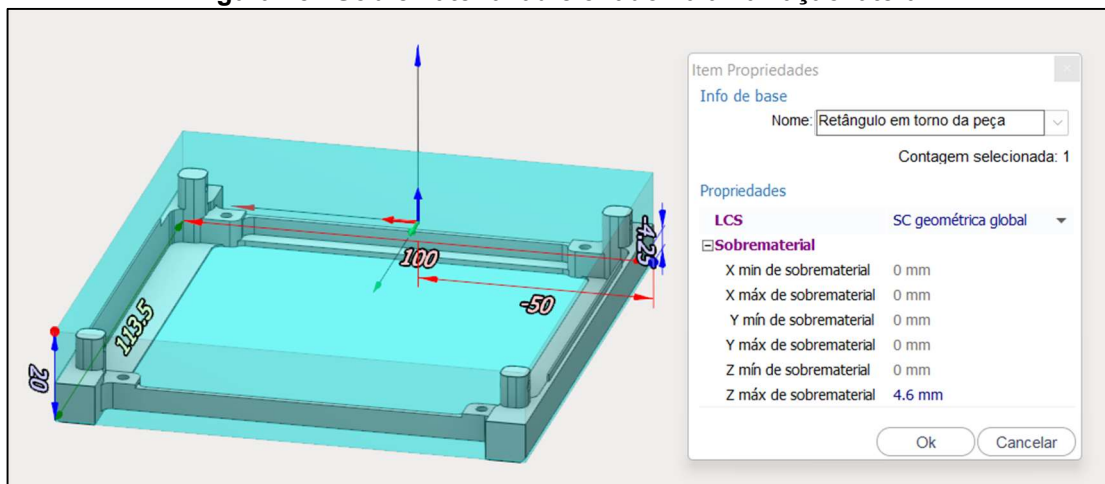
Como a usinagem seria realizada em chapas de MDF de 20mm, o sobrematerial foi definido a partir desse valor. Sendo assim, na Figura 24, é possível verificar os 10.3 mm de sobrematerial adicionados na barra de ligação e na Figura 25, os 4.6 mm de sobrematerial adicionados na amarração lateral, totalizando em ambas as peças os 20mm da espessura da chapa de MDF.

Figura 24 - Sobrematerial adicionado na barra de ligação



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 25 - Sobrematerial adicionado na amarração lateral



Fonte: Elaboração própria (2022).

Na 3ª etapa do processo, foram criadas as operações de fresamento e definido os parâmetros. As operações necessárias para o fresamento das peças foram as operações de desbaste e acabamento. Como ambas as peças são fabricadas a partir do mesmo material, os parâmetros de fresamento são os mesmos. Os valores calculados para a velocidade de corte, a velocidade de avanço da mesa e os demais parâmetros utilizados ficaram de acordo com o apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de usinagem definidos para o MDF

Diâmetro da Fresa	Rotação (RPM)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por dente/gume (mm)		Velocidade de avanço da mesa (mm/min)		Profundidade Axial (ap) (mm)	Profundidade Radial (ae) (mm)
			DESBASTE	ACABAMENTO	DESBASTE	ACABAMENTO		
8mm	12000	302	0,125	0,05	3000	1200	50 - 60 % do diâmetro da Fresa	60 - 80 % do diâmetro da Fresa
4mm		151						

Fonte: Elaboração própria (2022).

Dos parâmetros necessários para a usinagem, a rotação da ferramenta de corte foi obtida nas especificações do fornecedor da fresa (CÓDIGO G, 2022) e o avanço por dente foi baseado em valores aproximados de fresas de metal duro (ORION FERRAMENTAS, 2022). Com a definição desses valores é possível calcular a velocidade de corte e a velocidade de avanço da mesa a partir da Equação 1 e 2 do tópico 3.2.1. Todos os parâmetros e equações utilizados na usinagem das estruturas estão presentes no Apêndice A, podendo ser consultados em futuras reproduções e pesquisas.

As operações de desbaste foram configuradas com uma sobra radial de material de 0.2 mm, sendo retirado na operação de acabamento. O sentido de corte utilizado foi tanto o concordante e o discordante, ficando a critério do sistema CAM escolher quando usar cada um. A estratégia de usinagem definida era a que apresentasse o menor tempo de usinagem ao calcular a operação. Após todas as definições realizadas as operações para fabricação da barra de ligação ficaram de acordo com o apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Operações definidas para a fabricação da peça Barra de Ligação

Operações	Ferramenta	V_c (m/min)	V_f (mm/min)
Desbaste em linha d'água	Fresa de topo reto de 2 cortes invertidos com 4mm de diâmetro	151	3000
Acabamento em linha d'água	Fresa de topo reto de 2 cortes invertidos com 4mm de diâmetro	151	1200

Fonte: Elaboração própria (2022).

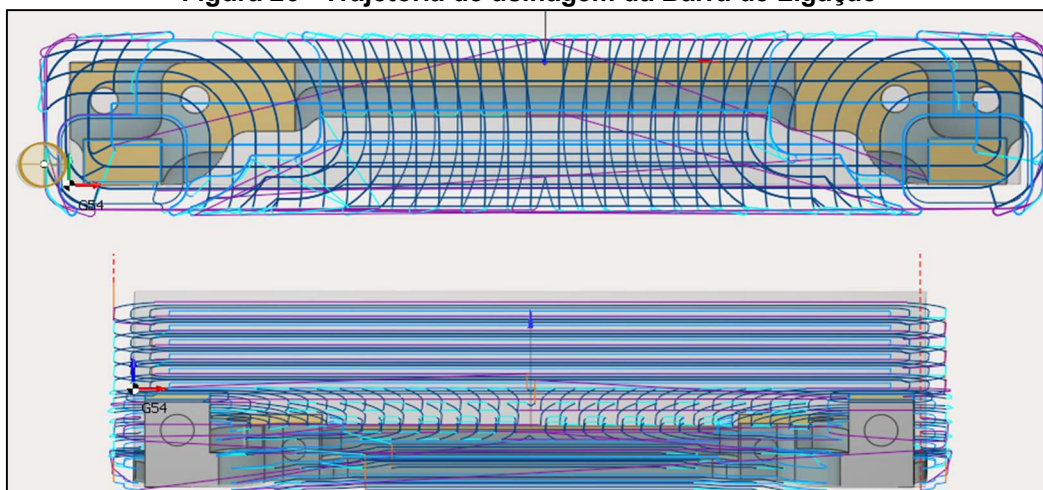
As operações para fabricação da amarração lateral ficaram de acordo com o apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Operações definidas para a fabricação da peça Amarração Lateral

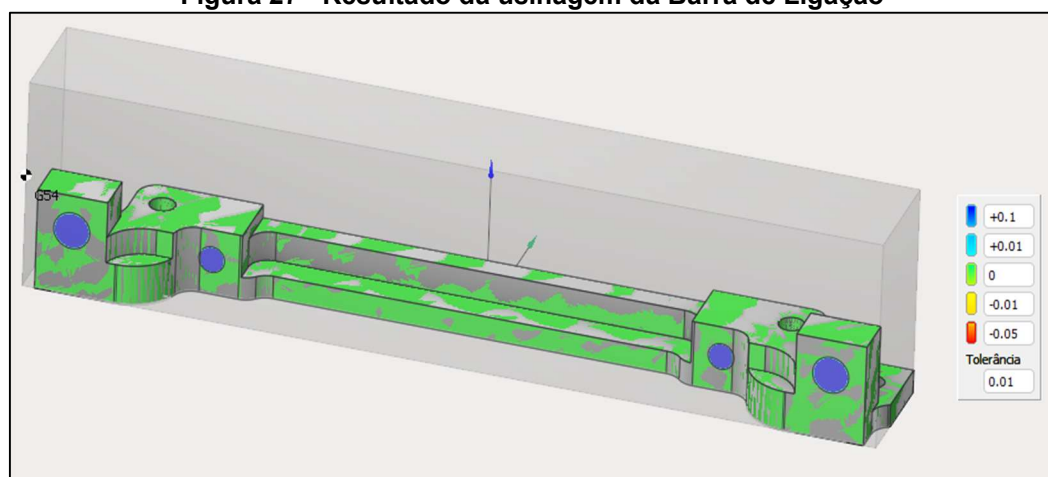
Operações	Ferramenta	V_c (m/min)	V_f (mm/min)
Desbaste em linha d'água	Fresa de topo reto de 2 cortes invertidos com 4mm de diâmetro	151	3000
Acabamento em linha d'água	Fresa de topo reto de 2 cortes invertidos com 4mm de diâmetro	151	1200
Usinagem de furos	Fresa de topo reto de 2 cortes invertidos com 2.5mm de diâmetro	151	1200

Fonte: Elaboração própria (2022).

Com a configuração dos parâmetros de usinagem e todas as operações definidas, a 4ª etapa é da simulação da usinagem, aonde são detectadas colisões e verificados os resultados da usinagem virtual. Na simulação é indicado o tempo de usinagem calculado pelo *software*, se há presença de colisão ou invasões na peça, a trajetória de usinagem e o resultado da simulação. A Figura 26 mostra a trajetória de usinagem que a fresa realiza para fabricar a barra de ligação e a Figura 27 o resultado da usinagem virtual da barra de ligação, onde é possível ver que todas as regiões atingiram as dimensões definidas no modelo CAD, com exceção dos furos, em azul, que não foram realizados.

Figura 26 - Trajetória de usinagem da Barra de Ligação

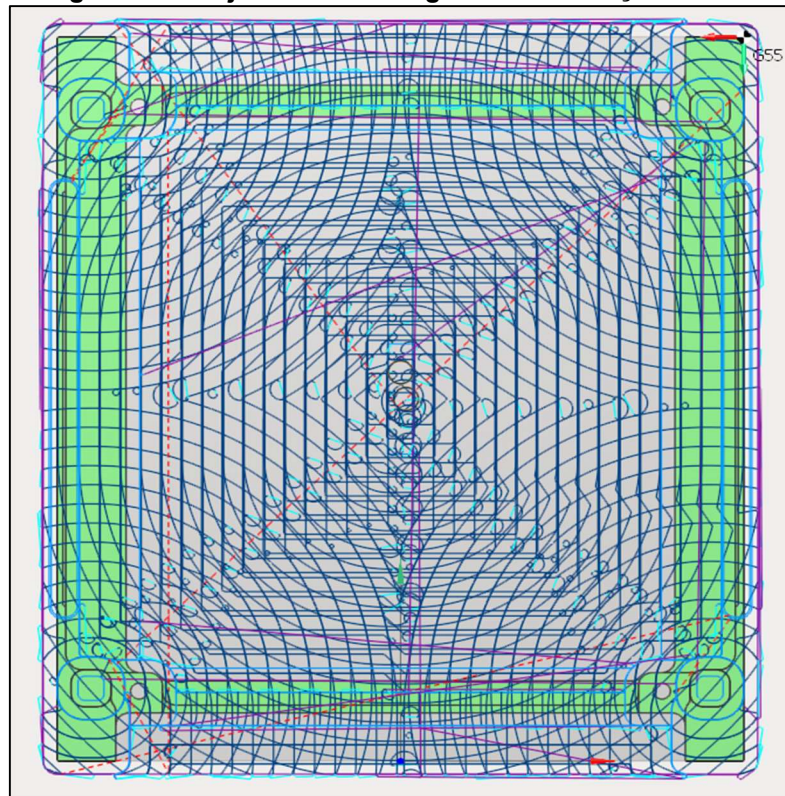
Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 27 - Resultado da usinagem da Barra de Ligação

Fonte: Elaboração própria (2022).

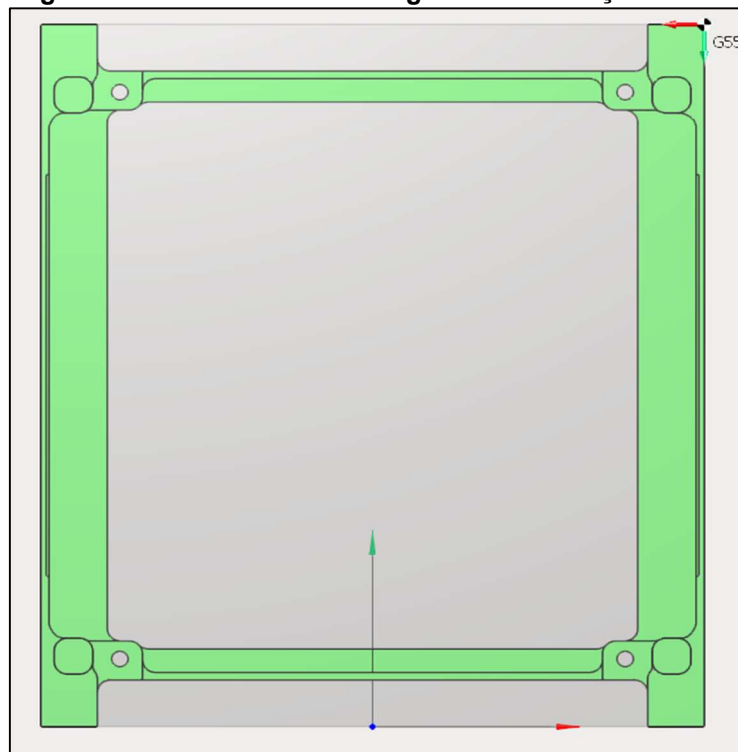
A Figura 28 mostra a trajetória de usinagem para a fabricação da amarração lateral e a Figura 29 o resultado da usinagem virtual da peça.

Figura 28 - Trajetória de usinagem da Amarração Lateral



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 29 - Resultado da Usinagem da Amarração Lateral



Fonte: Elaboração própria (2022).

As regiões em verde, indicam os locais em que a usinagem retirou todo o material necessário. Na usinagem da estrutura não ocorreu nenhum tipo de colisão e invasão na peça. O tempo de usinagem para as peças foi de 17 minutos e 26 segundos para a amarração lateral e de 3 minutos e 38 segundos para a barra de ligação. As furações destacadas nas regiões em azul não foram feitas utilizando a fresadora *Router* CNC, foram realizadas a partir de operações manuais em furadeiras de bancada.

A partir da validação da simulação, é dado o início a 5ª etapa, que é a geração do código de controle numérico (código G). Nessa etapa é efetuado o pós-processamento das operações, para isso é necessário somente escolher o pós-processador do controlador *Mach3Mill* e aguardar o *software* gerar o código G. Após a geração do código, é necessário criar arquivos de texto, pois são esses arquivos que serão inseridos no controlador da fresadora. Como as operações são realizadas com ferramentas diferentes, também é necessário separar o código em arquivos diferentes. Isso acontece pelo fato de a máquina não possuir um trocador automático de ferramentas, portanto esse processo precisa ser realizado manualmente.

A partir da conclusão de todas as etapas, o projeto de manufatura está concluído e já é possível realizar a usinagem na fresadora.

Dessa forma, se faz necessária a preparação da fresadora *Router* CNC para realizar o processo de fresamento. As etapas de preparação, consistem em: inserção manual da ferramenta de acordo com a operação, fixação do material a ser usinado, configuração da origem de trabalho de acordo com o definido na programação, configuração da altura da ferramenta e transferência do código g para o controlador via *pen drive*.

5.2.2 Resultado da usinagem das estruturas

Como o tempo de simulação foi menor para a barra de ligação, os primeiros fresamentos realizados foram dessa peça. O resultado da usinagem da barra de ligação atingiu a forma esperada, porém a estrutura não apresentou boa resistência, podendo ser facilmente danificada no manuseio. Além disso, o próprio processo de fresamento acabou danificando a peça, gerando uma ruptura na região superior

esquerda que pode ser vista na Figura 30, na qual é mostrada cada extremidade simétrica da peça, com a geometria perfeita e outra danificada.

Figura 30 - Resultado do fresamento em MDF



Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir dos resultados obtidos, foi decidido por não realizar a usinagem da amarração lateral com o MDF, pois como visto nas imagens o material se mostrou ineficiente para usinagens com pequenas dimensões, como as estruturas.

Para solucionar este problema, foi necessário utilizar outro material para a fabricação do nanossatélite, este material é conhecido como *cibatool* que é um tipo de resina feita a partir do polímero poliuretano.

Para poder realizar o fresamento com esse material, foi necessário ajustar somente o sobrematerial no projeto de manufatura, adequando-o com a espessura dos blocos de resina. Os parâmetros de fresamento não foram modificados, pois ao realizar uma pesquisa buscando os parâmetros de usinagem para resinas em geral, foram encontrados valores próximos aos do MDF, que podem ser visualizados na Tabela 6.

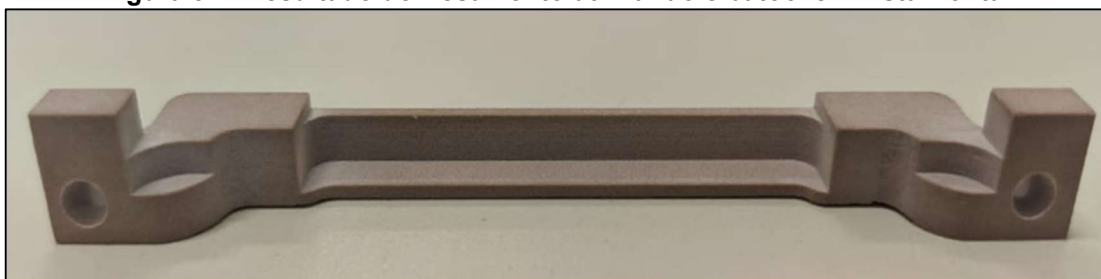
Tabela 6 - Parâmetros de usinagem para resinas

	RPM	Velocidade de avanço da mesa (mm/min)		Velocidade de corte (m/min)	Avanço por aresta/gume (mm)	
		DESBASTE	ACABAMENTO		DESBASTE	ACABAMENTO
Parâmetros MDF	12000	3000	1200	151	0,125	0,05
Parâmetros para Resina (Derenievicki Filho, Volpato, 2005)	5000	Entre 1000-4000		157	Entre 0,05-0,2	

Fonte: Derenievicki Filho, Volpato (2005).

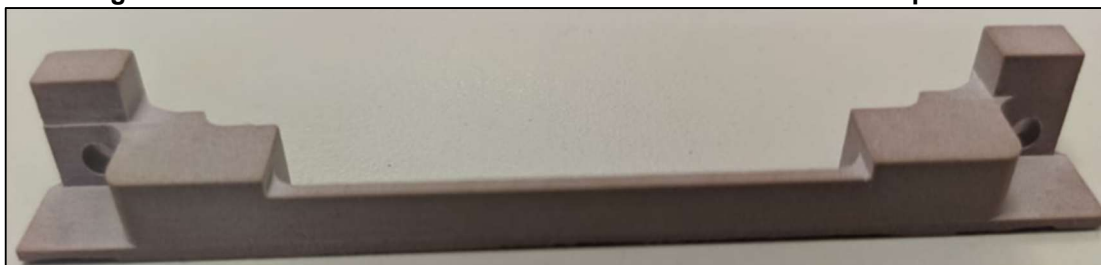
Após as modificações necessárias no projeto de manufatura, novamente foram realizadas usinagens, que podem ser visualizadas na Figura 31 e na Figura 32. Essas usinagens apresentaram ótimo acabamento e uma melhora na resistência da peça, mas não se mostraram suficientes para um manuseio sem o risco de danificar o protótipo.

Figura 31 - Resultado do fresamento utilizando cibatool em vista frontal



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 32 - Resultado do fresamento utilizando cibatool em vista posterior

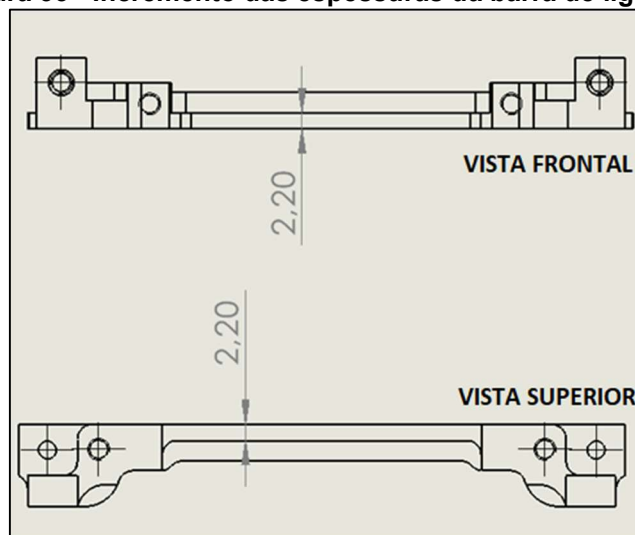


Fonte: Elaboração própria (2022).

Dessa forma, para aumentar ainda mais a resistência da barra de ligação, foram realizadas modificações no modelo CAD, aumentando duas espessuras que

tinham 1.20 mm e que agora passam a ter 2.20 mm. Essas modificações podem ser visualizadas na Figura 33, que apresenta as dimensões alteradas na barra de ligação.

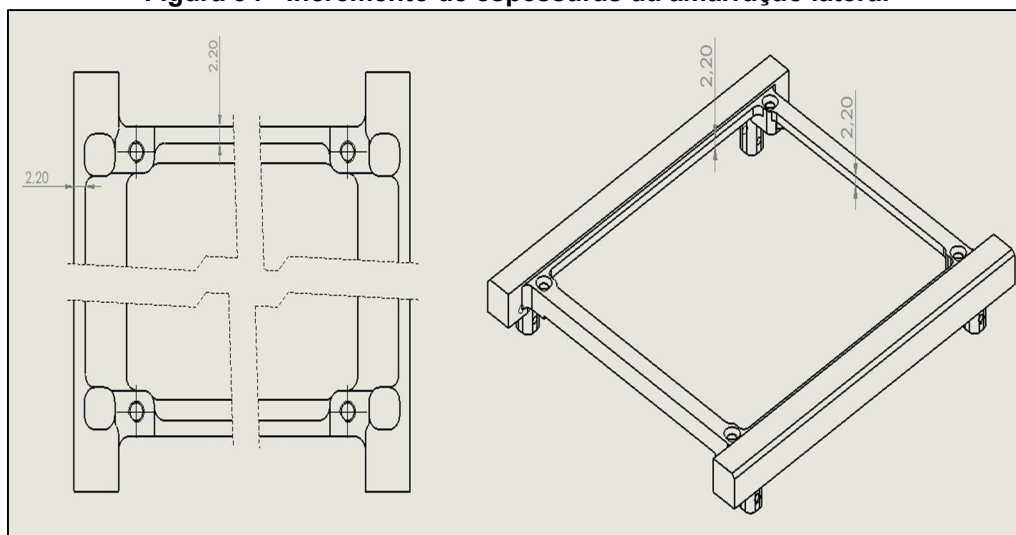
Figura 33 - Incremento das espessuras da barra de ligação



Fonte: Elaboração própria (2022).

Ao mesmo tempo em que as modificações eram realizadas para a barra de ligação, uma vez validadas, eram também utilizadas na amarração lateral. Portanto, da mesma forma que foi realizado na barra de ligação, as espessuras foram incrementadas na amarração lateral. Essas alterações podem ser visualizadas na Figura 34, que representam os locais de incremento das espessuras na amarração lateral.

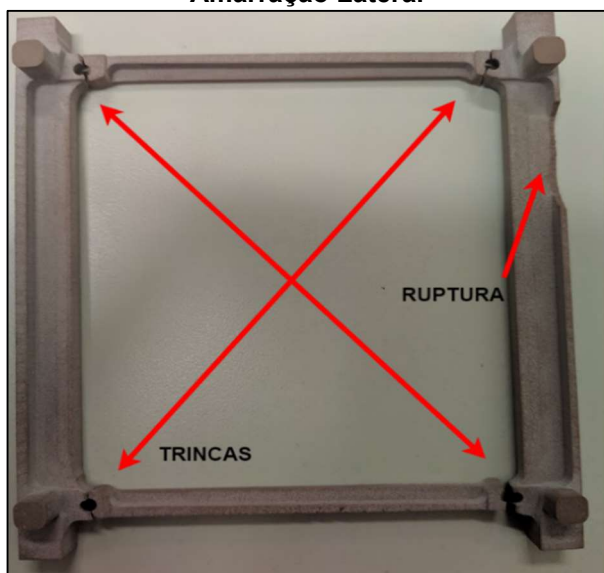
Figura 34 - Incremento de espessuras da amarração lateral



Fonte: Elaboração própria (2022).

Após as alterações na amarração lateral, foram realizadas novamente as usinagens. A usinagem da amarração lateral apresentou boa resistência de manuseio, entretanto dois problemas aconteceram. Durante o processo de usinagem, a peça descolou da mesa, resultando na ruptura da parede externa e ao realizar as furações aconteceu o trincamento das paredes. Na Figura 35 é possível verificar os quatro locais que resultaram em trincas após o processo de furação e na Figura 36 é possível verificar o formato da trinca.

Figura 35 - Problemas na usinagem da Amarração Lateral



Fonte: Elaboração própria (2022).

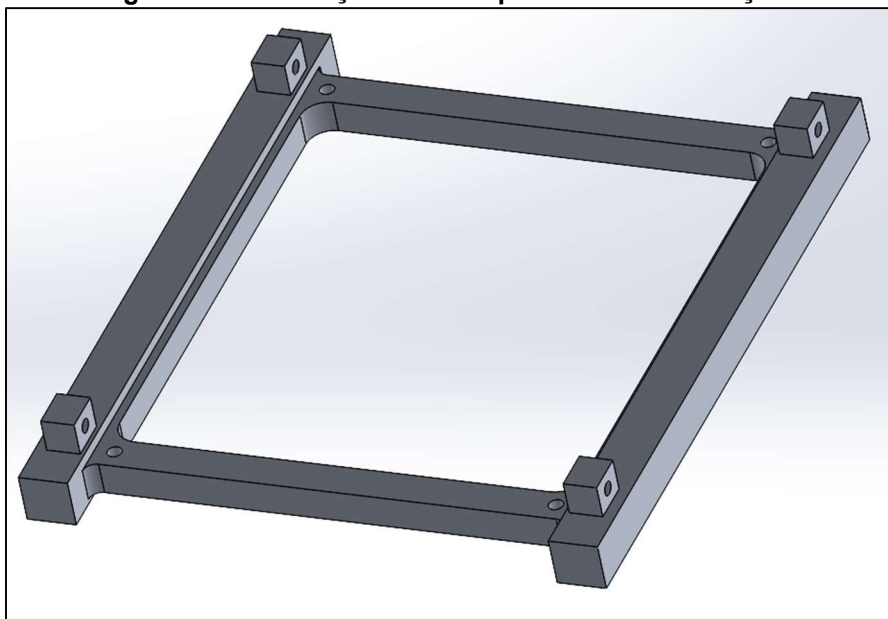
Figura 36 – Formato da trinca



Fonte: Elaboração própria (2022).

Portanto, para solucionar os problemas apresentados, novamente foram realizadas modificações na estrutura. Vale ressaltar, que ao realizar alterações no modelo CAD, as operações no sistema CAM precisam ser novamente calculadas. Após as últimas alterações na amarração lateral, chegamos na peça apresentada na Figura 37, onde é possível ver uma estrutura com paredes mais robustas, visando a segurança de manuseio e a eliminação de possíveis trincas após as furações.

Figura 37 - Amarração Lateral após todas modificações

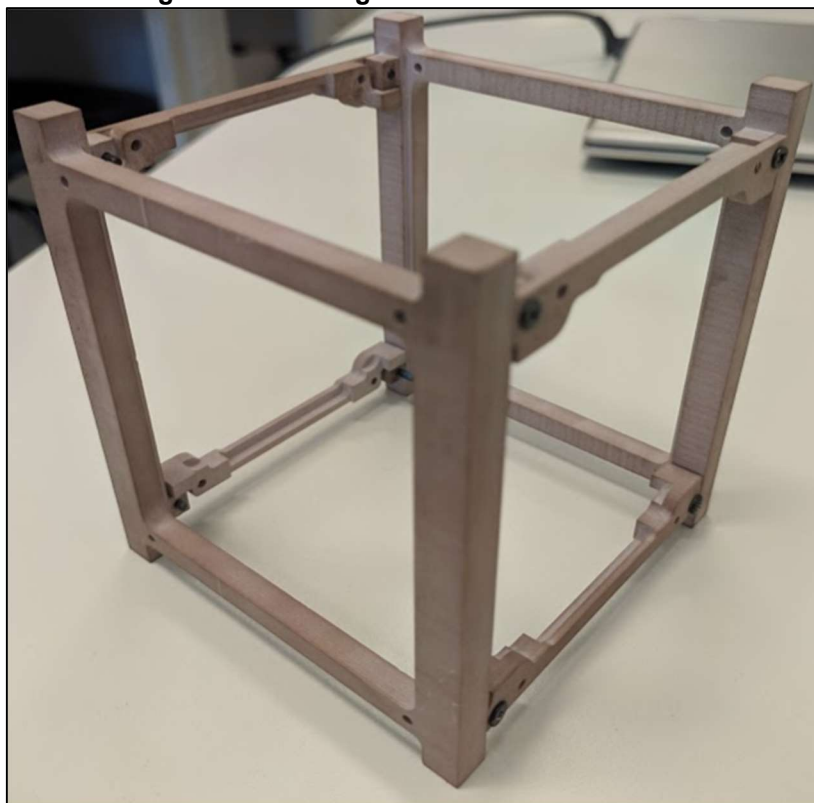


Fonte: Elaboração própria (2022).

Apesar das modificações alterarem a aparência da estrutura, não afetaram nas dimensões finais do nanossatélite, não impactando na montagem da estrutura. Desta maneira, escolheu-se por manter a fabricação do protótipo com as modificações realizadas, pois além de proporcionar o manuseio seguro do protótipo em razão do aumento da resistência mecânica, foram alteradas somente características de design da estrutura. Todas as modificações realizadas, foram necessárias para a fabricação do protótipo utilizando o *cibatool*, que não é o material indicado para a fabricação dessas estruturas. Portanto, caso as estruturas fossem fabricadas com a finalidade de um futuro lançamento, o ideal seria fabricar a partir dos materiais indicados pela especificação originalmente recomendada (CAL POLY SLO, 2022).

Com todas as modificações realizadas e a partir da usinagem de todas as peças necessárias para a montagem do *CubeSat*, atingiu-se o resultado apresentado na Figura 38 e na Figura 39, que mostram a montagem da estrutura do *CubeSat*.

Figura 38 - Montagem da estrutura fabricada



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 39 - Montagem da estrutura fabricada vista superior



Fonte: Elaboração própria (2022).

5.3 Usinagem da estrutura utilizando *Nylon*

Com a finalidade de verificar a usinabilidade e a prototipação em outros materiais foi realizada a usinagem de um protótipo dessa estrutura utilizando *nylon*. Para a fabricação desse protótipo, foram necessárias algumas alterações no projeto de manufatura, sendo elas, o ajuste de sobrematerial, que precisava ser adequado a espessura das chapas de *nylon*, a mudança dos parâmetros de usinagem e as ferramentas de corte.

Na usinagem da primeira peça utilizando o *nylon*, ocorreu o derretimento do material que resultou na quebra da fresa. Nessa usinagem, tanto a ferramenta de corte utilizada e os parâmetros estavam inadequados para o material. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa de topo reto de 2 cortes invertidos, que não é indicada para usinagem de *nylon* e a velocidade de avanço da mesa estava muito alta, pois tinha sido calculada com um avanço por dente de 0,5 mm, que estava indicado em *datasheet* e não permitiu a usinagem a partir da rotação definida e da ferramenta utilizada (Poly Brasil, 2018).

Dessa maneira, foi necessário encontrar a ferramenta correta e os parâmetros de referência para a usinagem do *nylon*. A ferramenta de corte disponível e adequada para essa usinagem, foi a fresa de topo reto com 1 corte invertido (CÓDIGO G, 2022). Os parâmetros de referência para essa ferramenta na usinagem de *nylon*, são os apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros referência para usinagem de *Nylon*

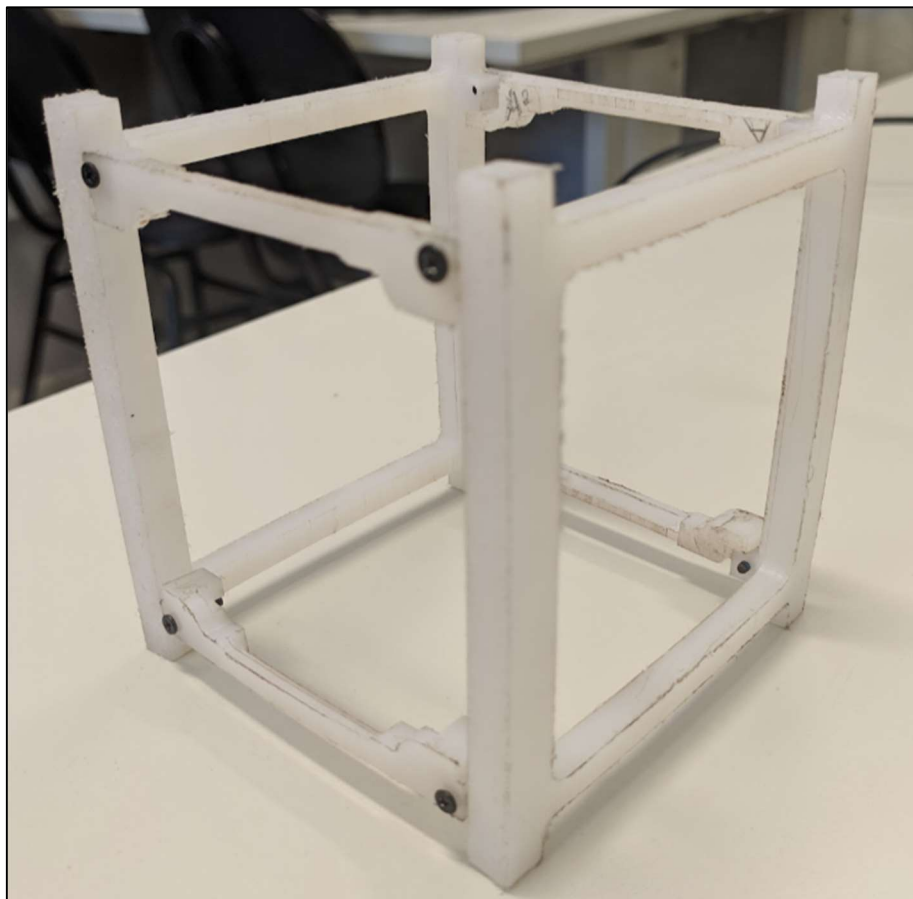
Parâmetros referência para usinagem de <i>Nylon</i>	Rotação (rpm)	Avanço por Dente (mm)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Profundidade axial (mm)	Velocidade de Mergulho (mm/min)
FRESA DE TOPO RETO de 4mm com 1 corte invertido	12000	0,025	600	2	240

Fonte: CÓDIGO G (2022).

Com a adequação do projeto de manufatura, foi realizada a usinagem das peças utilizando o *nylon*. O resultado das usinagens utilizando *nylon*, é apresentado na Figura 40, que mostra a montagem da estrutura. As peças apresentaram boa resistência, entretanto, o acabamento das usinagens em *nylon* foram piores do que

as usinagens realizadas com a resina, pois as superfícies ficaram com muitas rebarbas e marcas da ferramenta de corte.

Figura 40 - Montagem da estrutura usinada em nylon



Fonte: Elaboração própria (2022).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o objetivo de reprojeter e prototipar estruturas leves para nanossatélites, esse trabalho mostrou a viabilidade de fabricação dessas estruturas a partir da utilização de fresadora *Router* CNC.

Visto que a fabricação utilizando materiais para prototipagem apresentaram bons resultados, se realizada a adequação dos parâmetros e das operações de usinagens, é possível fabricar as estruturas utilizando os materiais indicados nas especificações (CAL POLY SLO, 2022).

Em função dos parâmetros utilizados e das estratégias adotadas, as usinagens no material *cibatoool* apresentaram melhor acabamento, entretanto, se utilizados parâmetros ideais, melhores resultados poderiam ter sido obtidos nas usinagens utilizando *nylon*.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

De acordo com os resultados das usinagens em *nylon*, onde as superfícies apresentaram rebarbas e marcas da ferramenta de corte, fica como sugestão para trabalhos futuros, a busca por parâmetros ótimos para o fresamento de *nylon* e a experimentação para verificar e qualificar as diferenças entre os sentidos de corte concordante e discordante, visto que este trabalho não se aprofundou no estudo desse parâmetro.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Américo Luiz de. **Fundamentos do CNC para Usinagem** / Américo Luiz de Azevedo (autor/ Ilustrador) – São José dos Campos/ SP, JAC Gráfica e Editora, 2017.

CAL POLY SLO. **CubeSat Design Specification – CDS, Rev. 14.1. California Polytechnic State University.** Fev-2022. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf. Acesso em: 02 de dezembro de 2022.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **CubeSats**. Brasília, DF: 2018. 46 p.

CÓDIGO G. **Fresas para Acrílico e outros Plásticos**. 2022. Disponível em: https://www.codigog.com.br/item-Fresa_Down_Cut_1_corte_4.0mm_x_22mm_Metal_Duro__topo_reto__corte_invertido-342.htm. Acesso em: 03 dez. 2022.

CORRÊA, W. S.; **Análise da viabilidade do emprego de sistemas CAD/CAM na fabricação de cavidades para moldes de injeção em plataformas PC com estudo de casos**. 1995. 134 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

DINIZ, A. E. et al. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, Editora Artliber, 3ª. Edição, São Paulo, 2001.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA (Florianópolis). **Satélites catarinenses começam a ser desenvolvidos nos próximos meses**. 2022. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/satelites-catarinenses-comecam-ser-desenvolvidos-nos-proximos-meses>. Acesso em: 18 jul. 2022.

GAIO, Lucas. **CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM CNC PARA PEÇAS DE ESPUMAS DE POLIURETANO**. 2019. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

GRAEFF, P. I.; **Análise da viabilidade do emprego de sistemas CAD/CAM na fabricação de cavidades para moldes de injeção**. 2019, 65 f. TCC (Graduação) – Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2019.

ISCAR MILLING. **FRESAS INTEIRIÇAS DE METAL DURO**. Disponível em: https://www.iscardobrasil.com.br/MediaR/Images/Products_2019_CHATTERFREE-ECK-H7.jpg. Acesso em: 15 nov. 2022.

JARAGUÁ CNC LTDA (Santa Catarina). **Especificação Técnica Router-CNC-COMPACT-PRO-12081**. Guaramirim: Jaraguá CNC, 2018. 1 p.

JASINEVICIUS, Renato Goulart. **SEM 343 – Processos de Usinagem**. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2036771/mod_resource/content/2/Aula%20Fresamento.pdf. Acesso em: 15 nov. 2022.

MACHADO, A. R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. 2a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MACH SUPORTE. **MACH 3 SOFTWARE DE CONTROLE CNC**. Disponível em: <https://www.machsuporte.com.br/download-mach3.php>. Acesso em: 13 fev. 2023.

ORION FERRAMENTAS. **FRESA TOPO METAL DURO**. 2022. Disponível em: <https://www.orionferramentas.com/fresa-topo-metal-duro-2-cortes-04-mmx16x075xh4-tisin>. Acesso em: 01 fev. 2023.

POLY BRASIL. **NYLON 6.0: DATASHEET**. 2018. Disponível em: <https://www.polybrasil.com.br/wp-content/uploads/2018/08/datasheet-nylon60-roc.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2022.

SCHUT, J. H., Blow Molds Grow in Sophistication, Plastic Technology, USA, p. 48-53, Maio, 1993.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/ CNC – Princípios e aplicações**. Artliber Editora, 336 p., São Paulo - SP, 2009.

SPACELAB. **FloripaSat-1**: uma missão CubeSat brasileira, desenvolvida por estudantes universitários. Universidade Federal de Santa Catarina - 2020. Disponível em: <https://floripasat.ufsc.br/pt/home-br/>. Acesso em: 23 nov. 2022.

SPRUTCAM TECH LDT. **Simplifique seu fluxo de trabalho de programação CNC com a curva de aprendizado curto ainda mais poderosa Software CAD/CAM – SprutCAM X**. Disponível em: <https://sprutcam.com/pt-br/>. Acesso em: 17 nov. 2022.

TEIXEIRA, Gabriel da Silva. **PROJETO E PROTOTIPAGEM DE ESTRUTURAS MECÂNICAS LEVES PARA MINISSATÉLITES**. 2021. 90 f. TCC (Graduação) - Curso

de Curso Superior de Engenharia Mecatrônica, Metal-Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

VOLPATO, Neri; DERENIEVICKI FILHO, Otávio. **UMA ANÁLISE DA USINAGEM DE RESINAS PARA FERRAMENTAL RÁPIDO**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF), 3., 2005, Joinville. **Anais [...]**. Curitiba: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 2005. p. 1-10. Disponível em: https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2005/COF_011115577.pdf. Acesso em: 04 out. 2022.

