



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO E APLICAÇÃO DE SISTEMAS INTEGRADOS CAD/CAM/CNC

Por

Mizael dos Santos Falheiro

Maio de 2019
João Pessoa Paraíba

MIZAEEL DOS SANTOS FALHEIRO

ESTUDO E APLICAÇÃO DE SISTEMAS INTEGRADOS CAD/CAM/CNC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do título de Graduado em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Carlos de Lima Júnior

Maio de 2019
João Pessoa-Paraíba

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F188e Falheiro, Mizael Dos Santos.
ESTUDO E APLICAÇÃO DE SISTEMAS INTEGRADOS CAD/CAM/CNC /
Mizael Dos Santos Falheiro. - João Pessoa, 2019.
74 f.

Orientação: José Carlos de Lima Júnior Lima.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Sistemas CAD, Sistemas CAM, Engenharia Reversa. I.
Lima, José Carlos de Lima Júnior. II. Título.

UFPB/BC

ESTUDO E APLICAÇÃO DE SISTEMAS INTEGRADOS CAD/CAM/CNC

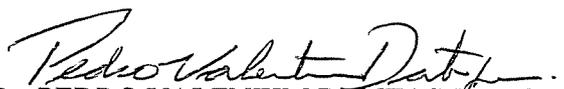
Por

Mizael dos Santos Falheiro

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em 14 de Maio de 2019


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR
Orientador – UFPB


Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Examinador – UFPB


Dr. PEDRO VALENTIM DANTAS JÚNIOR
Examinador Externo

Maio de 2019
João Pessoa-Paraíba

RESUMO

Nos dias de hoje, a tecnologia CAD/CAM vem influenciando progressivamente na competição industrial, proporcionando um aumento da qualidade dos produtos, elevando a produtividade e diminuindo consideravelmente os tempos de projeto e fabricação. A utilização de sistemas CAM/CNC possibilitou a melhora significativa de geometrias já usinadas e viabilizou a fabricação de peças com geometrias complexas, além de permitir o desenvolvimento de novas tecnologias, como a Engenharia Reversa. No entanto, devem ser estabelecidos métodos rápidos e práticos durante a cadeia produtiva, na qual todo o aparato tecnológico deve ser utilizado da melhor forma possível, com a intenção de proporcionar fluxos de informação e de material adequados. Assim sendo, o propósito deste trabalho foi avaliar o uso do sistema CAD/CAM/CNC para estabelecer um roteiro simples e eficiente para a usinagem de peças com o auxílio de um software CAD/CAM. É apresentado também um estudo de caso de Engenharia Reversa na reconstrução de um modelo físico com o auxílio de um software CAD/CAM.

Palavras-Chave: Sistemas CAD, Sistemas CAM, Engenharia Reversa, Usinagem.

ABSTRACT

Nowadays the CAD / CAM technology has been progressively influencing industrial competition, providing an increase in product quality, increasing productivity and considerably shortening design and manufacturing times. The use of CAM / CNC systems allowed the significant improvement of already machined geometries and enabled the manufacture of parts with complex geometries. However, the methods must be rapid and practical during productive production in which the all technologies must be used in the best possible way with the intention of providing appropriate flows of information and material. Therefore, the main goal of this work was to evaluate the use of the CAD / CAM / CNC system to establish a simple and efficient guide for machining parts with CAD / CAM software. This work also presents an Engineering Reverse case in which a physical model was built using CAD/CAM software.

Keywords: CAD Systems, CAM Systems, Reverse Engineering, Machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desenhos 2D utilizados em cortes de chapas-Libellula.CUT (O autor).....	17
Figura 2.2 - NX 11 (Siemens, 2017)	17
Figura 2.3 - Modelamento de um Sólido (O autor).....	19
Figura 2.4 - Modelamento de Superfície (O autor).....	19
Figura 2.5 - Realidade Aumentada (Fernandes, 2008).....	22
Figura 2.6 - Realidade Virtual (Proconcept, 2018).....	22
Figura 2.7: Fusion 360 Autodesk (O autor).....	23
Figura 2.8: Design Generativo (Autodesk, 2016)	24
Figura 2.9: Sistema CAD/CAM/CNC.....	25
Figura 2.10:Trajetórias da ferramenta(Silva, 2006).....	25
Figura 2.11: Pós-Processamento.....	26
Figura 2.12: Fresamento (Santos, 2017).....	29
Figura 2.13: Fresas (Souza, 2013).....	29
Figura 2.14: Centro de Usinagem (Silva, 2006).....	31
Figura 2.15 Usinagem em três eixos coordenados (Autodesk 2014).....	31
Figura 2.16: Digitalização de um Veículo (Genhini, 2013).....	32
Figura 2.17: Nuvem de Pontos (Genhini, 2013)	33
Figura 2.18 Malha Triangular (Genhini, 2013).....	33
Figura 2.19: Partes principais de uma máquina e medição por coordenadas (Oliveira, 2003).....	34
Figura 3.1: Bloco usinado - Blank (O autor).....	36
Figura 3.2: Centro de Usinagem 3 Eixos ROMI D 600 (O autor).....	37
Figura 3.3: Máquina por Medição de Coordenadas Crysta-Apex S 7106 CNC.....	38
Figura 3.4: Suporte.....	38
Figura 3.5: Modelamento (O autor).....	38
Figura 3.6: Metodologia de Trabalho	39

Figura 3.7: Seleção do <i>Template</i> do Setup (O autor).....	42
Figura 3.8: Modelo 3D na área de trabalho do CAM: Setup (O autor).....	43
Figura 3.9: Especificação dos dados da Ferramenta.....	43
Figura 3.10: Fluxograma criação de uma Operação.....	44
Figura 3.11 Estratégia de desbaste (O autor).....	45
Figura 3.12: Especificação das áreas de corte	46
Figura 3.13: Configuração dos Movimentos Passivos (sem corte) (O autor).....	47
Figura 3.14: Caminho de ferramenta gerado (O autor).....	48
Figura 3.15: Simulação NX CAM (O autor).....	48
Figura 3.16: Sequência de Operações.....	49
Figura 3.17: Trajetórias Redesbaste (O autor).....	50
Figura 3.18: Trajetórias acabamento das paredes.....	50
Figura 3.19: Trajetórias acabamento dos furos	50
Figura 3.20: Trajetórias acabamento da rampa	51
Figura 3.21: Trajetórias acabamento das calotas.....	51
Figura 3.22: Simulação de Máquina NX CAM (O autor).....	51
Figura 3.23: Janela de Pós-Processamento (O autor).....	52
Figura 3.24: Porta-ferramentas.....	52
Figura 3.25: Material Bruto para Usinagem (<i>Blank</i>).....	53
Figura 3.26: Software Comunicar (O autor).....	54
Figura 3.27: Transferência do código.....	54
Figura 3.28: Painel da máquina com as primeiras linhas do código (O autor).....	54
Figura 3.29: Peça sendo usinada (O autor).....	55
Figura 3.30: Peça na MMC (O autor)	56
Figura 3.31: Sensor apalpador SP25M.....	56
Figura 3.32: Hélice de um ventilador utilizada como objeto de estudo (O autor).....	57
Figura 3.33: Nuvem de pontos (O autor)	58

Figura 3.34: Modelo de malha triangular - STL (O autor)	58
Figura 3.35: Preenchimento de furos e vazios (O autor).....	59
Figura 3.36: Suavização de superfícies (O autor).....	59
Figura 3.37: Face da hélice (O autor).....	60
Figura 3.38: Transformação de uma superfície em um sólido (O autor).....	60
Figura 3.39: Curvas do corte (O autor)	61
Figura 3.40: Criação de um sólido através de uma curva geratriz (O autor).....	61
Figura 3.41: Hélice reconstruída (O autor)	62
Figura 4.1: Código CNC - Primeiras linhas (O autor)	63
Figura 4.2: Suporte Usinado.....	63
Figura 4.3: Tempos Usinagem do Suporte (O autor)	64
Figura 4.4: Tempos Modificados (O autor)	64
Figura 4.5: Localização dos furos (O autor)	65
Figura 4.6: Modelo sólido e STL (O autor)	66
Figura 4.7: Reconstrução da hélice (O autor)	66
Figura 4.8: Análise de curvatura (O autor)	67
Figura 4.9: Descontinuidade de curvatura (O autor).....	67
Figura 4.10: Parte Central da hélice (O autor).....	68
Figura 4.11: Análise da curvatura (O autor).....	68
Figura 4.12: Modelo STL da hélice reconstruída.....	68
Figura 4.13: Desbaste (O autor)	69
Figura 4.14: Antes do acabamento (O autor)	69
Figura 4.15: Acabamento em cinco eixos - NX (O autor).....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Diâmetros das Ferramentas.....	36
Tabela 3.2: Operações, parâmetros e ferramentas.....	41
Tabela 3.3: Parâmetros Recomendados (Autodesk, 2014)	46
Tabela 3.4: Parâmetros de Corte: Velocidade e Avanço (Autodesk, 2014).....	47
Tabela 4.1: Medidas dos furos.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
CAI	Computer Aided Inspection
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FEA	Finite Element Method
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
MCS	Machine Coordinates Systems
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	Stereolithography
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Importância dos Sistemas computacionais de apoio às etapas de engenharia (CAx) para as Organizações	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Principal	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Estrutura do Trabalho	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Sistemas CAD (Computer Aided Design)	16
2.1.1 Sistemas CAD 2D	16
2.1.2 Sistemas CAD 3D	17
2.1.3 Transferência de dados entre Sistemas CAD	19
2.1.4 A Tecnologia CAD no Cenário Atual	20
2.1.5 A Tecnologia CAD do Futuro	21
2.1.5.1 CAD integrado com Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV).....	21
2.1.5.2 O CAD baseado em Nuvem (Cloud).....	23
2.1.5.3 O CAD e o Design Generativo Baseado em Nuvem.....	23
2.2 Sistemas CAM (Computer-Aided Manufacturing).....	24
2.3 CNC (Comando Numérico Computarizado)	27
2.4 Processo de Usinagem	28
2.4.1 Fresamento	28
2.4.1.1 Principais Operações de fresamento.....	29
2.4.1.2 Parâmetros de Usinagem	30
2.4.2 Centros de Usinagem	30
2.5 Engenharia Reversa	31
2.5.2 Máquinas de Medição Por Coordenada	33
3 METODOLOGIA APLICADA	35
3.1 - Recursos utilizados	36
3.1.1- Software CAD/CAM	36
3.1.2 - Materiais e Ferramentas	36

3.1.3 Máquina Ferramenta	37
3.1.4 - Máquina de Medição por Coordenadas	37
3.2 - Modelamento CAD e Programação CAM da Peça	38
3.2.1- Modelamento 3D	38
3.2.2 Programação CAM.....	39
3.2.2.3 Plano de Usinagem: definir das estratégias e parâmetros de usinagem. .	40
3.2.2.1 Criação do Setup CAM	42
3.2.2.2 Criar Ferramentas	43
3.2.2.4 Criar Operações	44
3.2.2.4.1 Operação de Desbaste	45
3.2.2.4.2 Verificar Caminhos de Ferramenta.....	48
3.2.2.4.3 Redesbaste, Operações de Furação, Acabamento.....	49
3.2.2.5 Pós-processador - Gerar Código CNC (código da máquina)	51
3.3 Usinagem	52
3.3.1 Separação das ferramentas utilizadas no processo.....	52
3.3.2 <i>Setup</i> do centro de usinagem.....	53
3.3.3 Transferir o código para a máquina.....	53
3.3.4 Usinagem da Peça	55
3.4 Medições dos furos da peça usinada.....	55
3.4 Estudo de Caso Engenharia Reversa: obtenção do modelo CAD a partir do modelo físico.....	57
3.4.1 Digitalização.....	57
3.4.3 Obtenção do modelo 3D sólido a partir de um arquivo STL	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Programação CAM e Usinagem	63
4.2. Medição dos furos.....	65
4.3 Estudo de Caso Engenharia Reversa	66
4.3.1 Programação CAM do modelo reconstruído.....	69
5 CONCLUSÕES	70
7.1 As principais conclusões deste trabalho estão apresentadas a seguir:	70
7.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	71
6 REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A	74

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância dos Sistemas computacionais de apoio às etapas de engenharia (CAx) para as Organizações

A progressiva procura pela competitividade das empresas em busca de consolidação no mercado resulta no fornecimento de produtos com custos menores, prazos reduzidos e melhor qualidade. O uso de novas tecnologias associado à implementação de novas ferramentas e métodos é de fundamental importância para as organizações que almejam ser competitivas e sobreviver no mercado.

Diante disto, surgiu a necessidade de criar equipamentos e softwares suprir tal demanda. Os computadores que auxiliam os projetos e a fabricação passaram a ser disponibilizados em linguagem simples, amigável e de custo reduzido, acessíveis às empresas de todos os portes.

Juntamente com o desenvolvimento de hardwares, vários tipos de softwares que auxiliam a engenharia surgiram ao longo dos anos. Estes são conhecidas como sistemas CAx, onde CA representa “auxiliado por computador” (Computer Aided) e o “x” representa a aplicação específica. Entre os sistemas mais conhecidos estão o CAD (*Computer Aided Desing*), CAM (*Computer Aided Manufacturing*), CAE (*Computer Aided Engineering*), CAI (*Computer Aided Inspection*), etc. E como parte da integração desses sistemas, é primordial a presença de equipamentos e máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), fundamentais para a indústria moderna (SOUZA, 2013).

A integração racional desses sistemas automatizou as células de produção flexíveis e avançados sistemas de gerenciamento de material e produto, compondo um ambiente CIM (*Computer Integrated Manufacture*) sofisticado.

As tecnologias CAD/CAM/CNC permitiram a evolução na fabricação de peças com superfícies complexas, fazendo do modelamento 3D um fator diferencial de grande importância entre as empresas concorrentes. A tecnologia CNC associada aos modelos digitais disponíveis nos sistemas CAD e CAM proporciona a transferência do modelo (2D/3D) de um produto para uma máquina com pouca intervenção humana, substituindo o meio de transmissão convencional (papel e verbal) pelo eletrônico (FIGUEIRA, 2002).

A alta velocidade de atualização tecnológica dos setores fabris aumenta a necessidade por profissionais capacitados.

Os profissionais recém-formados encontram dificuldades para suprir determinadas exigências. Isso se deve em maior parte por causa das dificuldades que as instituições de ensino têm para acompanhar as novas tendências e inovações no ramo industrial.

Diante o que foi supracitado, esse trabalho oferece uma abordagem sobre os sistemas integrados CAD/CAM/CNC/CAI, fornecendo uma visão ampla sobre o tema e mencionando a interação entre as etapas de fabricação de peças complexas e também uma metodologia prática de Engenharia Reversa envolvendo a programação de superfícies complexas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para a fabricação e inspeção de uma peça metálica utilizando um sistema integrado CAD/CAM/CNC e com o auxílio de uma máquina de medição por coordenadas, discutindo as etapas necessárias para o design, programação e usinagem da peça. É ainda apresentada uma metodologia para a fabricação de uma peça com geometria complexa aplicando os conceitos de Engenharia Reversa com o auxílio do sistema CAD seguintes etapas: digitalização 3D, tratamento do objeto digitalizado, correções e reconstrução utilizando um software CAD.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Realizar um estudo acerca dos sistemas integrados CAD/CAM/CNC e das abordagens que vêm sendo utilizadas por outros autores;
- Compreender os conceitos de sistemas integrados CAD/CAM/CNC e seus benefícios para a produção industrial;
- Destacar sobre os softwares CAD/CAM utilizados para a modelagem de uma peça;
- Abordar sobre a importância e o potencial dos softwares CAM para a fabricação de peças das mais variadas geometrias;

- Desenhar e elaborar a programação de uma peça. Depois realizar a usinagem da mesma
- Apresentar um conhecimento breve sobre usinagem, como conceitos, processos, tipos, ferramentas e a transmissão dos códigos CNC para a máquina;
- Compreender o que se entende por digitalização, abordando alguns métodos e ferramentas fundamentais para a digitalização 3D;
- Realizar a programação de uma peça com geometria complexa aplicando os conceitos de engenharia reversa com o auxílio do sistema integrado CAI/CAD/CAM.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, no qual o **primeiro** é de caráter introdutório.

O **segundo capítulo** com o título de *Revisão Bibliográfica* apresenta conceitos e aplicações dos sistemas CAD/CAM/CNC/CAI bem como informações históricas. O capítulo aborda também ferramentas e métodos em alguns modernos processos no tocante à sistemas de auxílio à engenharia (CAx).

No **terceiro capítulo** são explanados os métodos, equipamentos e materiais utilizados no trabalho. Intitulada de *Metodologia*, esta parte do trabalho foca nas metodologias utilizadas no processo de usinagem utilizando o sistema integrado CAD/CAM/CNC e na programação de uma peça complexa através da Engenharia reversa.

O **quarto capítulo** tem como o título *Resultados e Discussões* e apresenta as soluções e resultados de acordo com o que foi proposto no trabalho. Foram feitas análises dos modelos digitais gerados nos sistemas CAD/CAM e das metodologias aplicadas

O **quinto capítulo** apresenta comentários adicionais e considerações finais sobre o estudo realizado, assim como sugestões para trabalhos futuros. E finalizando tem-se as referência bibliográficas utilizadas neste trabalho de conclusão de curso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas CAD (Computer Aided Design)

O CAD (*Computer Aided Design*) é um software para auxílio ao projeto, desenho, modelamento e design industrial de produtos e tem por objetivo auxiliar no desenho e modelamento de peças pela integração com o computador, onde são definidas todas as informações geométricas necessárias para manufatura. Estas informações que tornam essa etapa crucial para a cadeia produtiva. (SOUZA, 2013)

Há décadas o desenho técnico surgiu como parte integrante da indústria, desde ao desenvolvimento e concepção do produto até as fases de produção, uma vez que representava o elo entre o desenvolvimento do produto e a produção.

O desenho elaborado com padrões especificados permite que a informação seja rapidamente comunicada para o resto da planta industrial, promovendo a confecção do produto com maior rapidez. Por esse motivo e aliado à redução do preço dos computadores e facilidade de aquisição de softwares, o número de profissionais e empresas que passaram a utilizar o CAD como ferramenta de trabalho aumentou consideravelmente nos últimos anos. No entanto, verifica-se boa parte das aplicações do CAD está apenas relacionado à elaboração de desenhos, sendo que o potencial dos sistemas CAD além da criação de desenhos 2D/3D permite a integração de informações, apresentação de projetos em três dimensões, simulações dinâmicas e renderização, possibilitando diferentes formas de visão e concepção de projetos e, principalmente, diminuindo a possibilidades de erros (FIGUEIRA, 2002).

2.1.1 Sistemas CAD 2D

Para algumas aplicações a representação em 2D é suficiente, nas quais não há necessidade de visualização e interpretação em 3 dimensões. No projeto mecânico a utilização da representação em duas dimensões é utilizada em montagens de componentes, cotas para fabricação, leitura rápida de um projeto, e etc. Usa-se sistemas 2D também na integração com outros sistemas, como o CAM (Computer Aided Manufacturing). Neste caso, desenhos eletrônicos 2D podem ser utilizado para fabricação em apenas dois eixos, como no corte a plasma por exemplo (Figura 2.1).

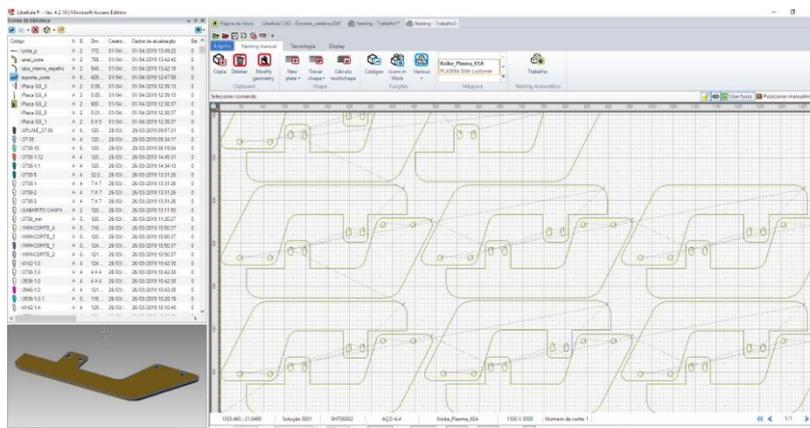


Figura 2.1: Desenhos 2D utilizados em cortes de chapas - Libellula.CUT (O autor)

Embora seja a tecnologia precursora, o CAD 2D sempre terá seu espaço de trabalho. Atualmente, mesmo com o modelamento tridimensional a disposição e todos os seus recursos, como simulações, montagens e renderização, em muitas aplicações o uso de um CAD 3D não é justificado. Saber identificar estas aplicações é de fundamental importância, já que pode significar uma importante otimização de tempo e custo de trabalho. (SOUZA, 2013)

2.1.2 Sistemas CAD 3D

O uso de sistemas de modelamento 3D é recomendado para aplicações nas quais a representação em três dimensões é fundamental, como a figura 2.2. Por exemplo, na elaboração de montagens e simulações de componentes mecânicos, fabricação de moldes ou na elaboração de um protótipo por impressão 3D.

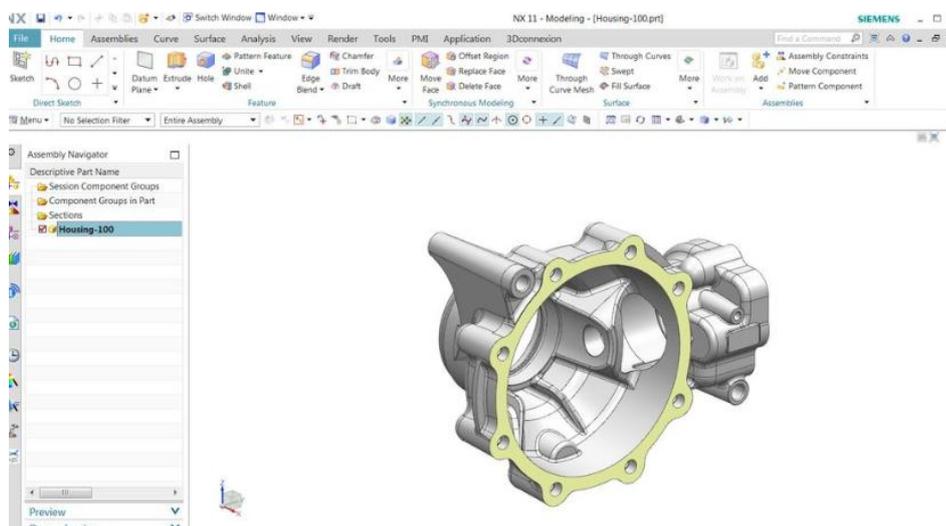


Figura 2.2: NX 11 (Siemens, 2017)

Dentre os sistemas CAD 3D, existe uma grande diversidade de software atualmente. Nem todos os sistemas 3D devem ser considerados concorrentes entre si, já que cada software pode ser indicado para trabalhos distintos. Assim sendo, é fundamental compreender esta diversidade de softwares CAD no momento de analisar um investimento nesta tecnologia. (SOUZA, 2013).

Um sistema CAD tridimensional pode auxiliar diferentes etapas de projeto. Dentre as principais funções de um CAD 3D, se destacam: a) modelamento de produtos tridimensionais; b) análise das formas geométricas para manufatura. c) análises de interferências em peças e montagens; d) definição de volume e centro de massa do produto; d) geração de desenhos em suas dimensões com cotas e dimensionamentos; e) análises de suavidade e continuidade entre superfícies, e; f) gerenciamento de projeto. Mais importante que estas finalidades, é o fato que esses softwares representam a base e a ligação entre todos os outros sistemas computacionais de auxílio às etapas produtivas. Geralmente os sistemas CAD de médio porte não são integrados diretamente com outros sistemas computacionais e são conhecidos como *stand-alone*, com apenas um módulo de trabalho. Sistemas CAD de grande porte possuem ligação direta com outros sistemas, como CAM, CAE, etc. (SOUZA, 2013)

O Modelamento 3D é uma ferramenta importante para um projeto excelente, especialmente quando combinado com simulação e análise. Tudo o que é necessário para fabricar um item - do material ao ajuste e à tolerância - é eficientemente comunicado nos desenhos e modelos para uso interno e para colaboração com parceiros na cadeia de suprimentos. Executar o projeto requer comunicar mais do que a aparência e a confiança de ter passado por uma análise de elementos finitos.

O software CAD 3D pode ser um modelador sólido, um modelador de superfície ou os dois (híbrido). Os softwares CAD modeladores de sólidos, como apresentado na figura 2.3, permitem a criação de objetos tridimensionais de forma rápida e simples. No entanto, a matemática empregada nestes tipos de modeladores não permite recursos avançados para modelamento de formas geométricas complexas. Já os sistemas CAD modeladores de superfícies permitem a criação mais apurada de formas complexas, com recursos interativos para a formação da geometria desejada, mantendo continuidade de curvatura da geometria, como a figura 2.3. Por sua vez, a manipulação de geometria 3D para realizar o modelamento de produtos em um sistemas CAD modelador de superfícies é mais difícil e requer mais habilidade do usuário. (SOUZA, 2013)

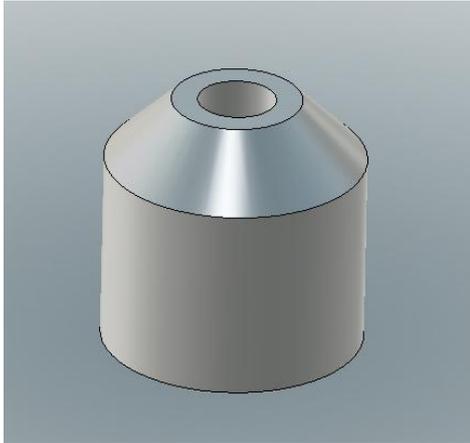


Figura 2.3: Modelamento de um Sólido (O autor)

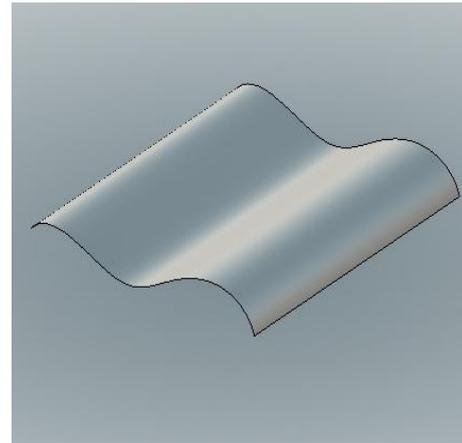


Figura 2.4: Modelamento de um Sólido (O autor)

Com a utilização da modelagem 3D no desenvolvimento de produtos através de softwares específicos para a projeção virtual de peças, é viável transformar suas ideias em protótipos digitais. Assim, será possível reduzir gastos e acelerar o lançamento de produtos no mercado. As informações de montagens e de peças individuais ficam armazenadas no arquivo CAD, permitindo que qualquer alteração realizada futuramente seja atualizada em todo o sistema. No mais, a criação de protótipos virtuais permite visualizar e testar projetos em condições reais, tudo sendo realizado em um único modelo 3D inteligente e atualizável, possibilitando a especificação de materiais, realizar simulações e analisar a viabilidade de produção do produto desejado (NEWTON, 2017).

2.1.3 Transferência de dados entre Sistemas CAD

O surgimento de vários tipos de sistemas CAD diferentes, somado à existência de inúmeros fabricantes de softwares fez com que surgisse a necessidade de padronizar a transferência de informações gráfica entre esses sistemas, e assim, criar um formato de arquivo capaz de ser lido por qualquer CAD.

Os primeiros padrões para a troca de dados de destaque criados foram o IGES (“Initial Graphics Exchange Specification” - EUA), SET (“Standard d’Exchange et de Transfert” - França) e VDA-FS (Alemanha). Esses padrões apresentavam algumas deficiências, entre elas podem-se se destacar:

- Ambiguidade de suas definições;
- Restrições no que se refere ao escopo de dados de produtos representado;
- Inflexibilidade no que concerne à forma de implementação;
- Falta de procedimento para a verificação de conformidade;

- Ineficiência e impressão das implementações.

Entre as décadas de 80 e 90 o IGES foi adotado pelos Estados Unidos e por outras corporações mundiais de grande porte.

Até o início dos anos 2000 esses padrões eram ainda muito utilizados na indústria. No entanto, devido à deficiência desses padrões e da impossibilidade de integrar módulos de softwares era muito trabalhoso trabalhar com sistemas CAD/CAM/CNC na concepção e fabricação de uma peça. Os sistemas eram incompatíveis, tornando necessária a recriação do modelo geométrico em cada estágio do sistema. A troca de dados incompleta transforma-se dessa forma em lentidão e diminuição da eficiência (FERNEGAS, 1999).

Na maior parte dos casos, quando um objeto sólido é exportado pelo padrão IGES, esta nova geometria é convertida em superfícies. Nesta transferência de dados, a ocorrência de perda de informações geométricas é comum, gerando perda de tempo com retrabalho de modelamento.

Para minimizar os problemas de transferência de dados com os padrões existentes, a *International Organization for Standardization (ISO)* desenvolveu uma linguagem universal de transferência de dados, nomeada STEP (*standard for the exchange of product model data*) com o objeto de suprir as deficiências dos padrões anteriores. A principal vantagem das normas STEP é que estas preveem todo o ciclo de vida, desde a concepção até a reciclagem, abrangendo todas as etapas do processo de produção e (ULBRICH, 2013).

2.1.4 A Tecnologia CAD no Cenário Atual

Estima-se que metade do faturamento mundial de sistemas CAD refere-se à indústria metal mecânica, o que demonstra a importância da pesquisa neste setor. A utilização de novas tecnologias, novos modos de organização econômica e as novas práticas de produção podem definitivamente criar condições para que se alterem outros aspectos da vida cotidiana. O desenvolvimento e barateamento das máquinas CAD/CAM e a difusão da internet enquanto espaço de troca em rede promove a criação de novas oportunidades para a produção, acesso e distribuição de produtos e serviços para um conjunto da população (CACCERE, 2016).

Os sistemas CAD vêm sendo uma importante ferramenta industrial, amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo indústria automotiva, de construção naval e aeroespacial, na arquitetura, projetos de próteses, entre outras. É a principal tecnologia para um processo integrado de desenvolvimento de produto em uma manufatura integrada por

computador (CIM) e pode ser utilizada em projeto e análise de produto, avaliação de produtos, desenvolvimento da documentação, etc.

As vantagens da adoção de sistemas CAD na área de projeto da empresa são muito expressivas: ganho de tempo (redução do tempo necessário para modelamento); qualidade (ao integrar as várias fases do projeto, ao reduzir o trabalho de desenho, ao avaliar desenho alternativos, melhora-se a qualidade do projeto e, conseqüentemente, a qualidade do produto); redução de custo ; flexibilidade (busca de alternativas para o projeto, revisões e alteração); comunicação e integração (ao integrar várias fases do projeto, estabelece-se novas formas de comunicação que buscam ser mais eficazes e ágeis na área de projeto): e inovação (aumentando o tempo empenhado na busca por soluções alternativas, estabelecendo novas formas de comunicação por meio do sistema CAD e aumentando a qualidade no projeto (FIGUEIREDO, 2010).

2.1.5 A Tecnologia CAD do Futuro

O projeto auxiliado por computador (CAD) é uma tecnologia presente na indústria há anos, ajudando na criação de produtos com melhor qualidade e custo reduzido. Todavia, novas tecnologias e processos envolvendo sistemas CAD estão desempenhando cada vez mais papéis importantes no desenvolvimento de produtos bem como vindo a influenciar nas formas de projeto e fabricação. Algumas destas novas tecnologias são apresentadas a seguir.

2.1.5.1 CAD integrado com Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV)

A Realidade Aumentada (RA) é uma tecnologia que possibilita a visualização em tempo real de modelos CAD em um ambiente físico do mundo real. O software específico para essa aplicação captura o ambiente com uma câmera e colocar um efeito digital para possibilitar a visualização do modelo. Diferentemente da Realidade Virtual (RV), a RA faz a combinação dos mundos real e digital (PROCONCEPT, 2018). A RA Tem muitas aplicações para o CAD, como permitir que os projetistas visualizem seus modelos CAD de diferentes posições e ângulos antes de serem fabricados como demonstrado na figura 2.5 (FERNANDES, 2008).



Figura 2.5: Realidade Aumentada (Fernandes, 2008)

A Realidade Virtual (RV) é uma simulação totalmente digital de um produto ou ambiente (na RA o produto é projetado em um fundo real) e permite que os projetistas interajam diretamente com o modelo 3D. Futuramente, os projetos poderão enviar aos clientes produtos que podem ser visualizados em formato real usando RA, antes que o produto seja fabricado. A figura 2.6 mostra, como exemplo, profissionais e clientes têm a oportunidade de ter experiência com o produto antes da fabricação deste. RV e RA proporcionam a otimização de projetos no estado inicial bem como uma revisão rápida e realista do produto criado. Os modelos criados podem ser virtualmente testados, analisados e acionados com ferramentas de FEA e CFD.



Figura 2.6: Realidade Virtual (PROCONCEPT, 2018)

2.1.5.2 O CAD baseado em Nuvem (Cloud)

O CAD baseado em nuvem já está sendo utilizado por algumas empresas CAD e com previsão de implementação em outras. Com esse sistema, o software estará disponível na rede sem a necessidade de atualizações e downloads. Com o CAD baseado em nuvem a colaboração de um projeto será mais dinâmica, onde os usuários terão capacidade de trabalhar simultaneamente em um único modelo. O advento do software de design em nuvem reduzirá o tempo e custos para fazer atualizações em um modelo, permitindo um volume considerado de colaboração (PROCONCEPT, 2018). A figura 2.7 mostra o Fusion 360 da Autodesk, um software que armazena e processa arquivos na nuvem.

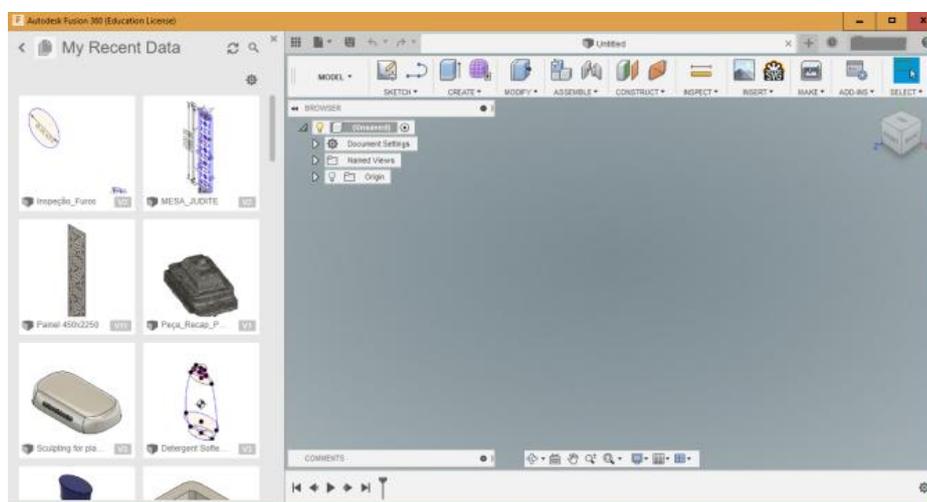


Figura 2.7: Fusion 360 Autodesk (O autor)

2.1.5.3 O CAD e o Design Generativo Baseado em Nuvem

No futuro, os softwares não vão simplesmente documentar projetos criados por humanos, mas também criar por conta própria. Esse conceito que representam a nova era do CAD é chamado de Design Generativo (Generative Design). Esta tecnologia baseada em nuvem pode fornecer opções de design quase ilimitadas bem como estimular a inovação, melhorar a capacidade de fabricar e melhorar a qualidade.

Com o Design Generativo (Figura 2.8), designer e engenheiros inserem metas de projeto e parâmetros no software, como material, métodos de fabricação, peso e restrições de custo, e em seguida, usando computação em nuvem e Inteligência Artificial, o software gerar várias possibilidades possíveis de uma solução, criando rapidamente inúmeras alternativas de projetos (PROCONCEPT, 2018).

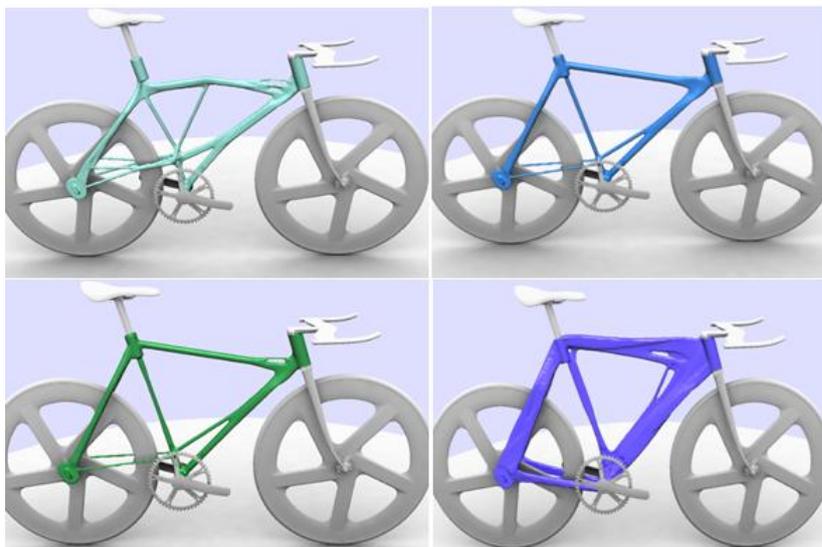


Figura 2.8: Design Generativo (Autodesk, 2016)

O Design Generativo consiste basicamente na geração de uma ou mais soluções a partir de um conjunto de parâmetros e restrições estabelecidos de acordo com o projeto (distribuição de tensão e esforços, redução de massa, fator de segurança, etc). A partir de então, o engenheiro tem três abordagens principais a fazer: otimização de topologia, otimização de treliça e superfície, e síntese de formulário. Impulsionar a inovação, reduzir as barreiras entre o projeto e a fabricação e aumentar a qualidade dos produtos são alguns dos principais propósitos desta tecnologia (PROCONCEPT, 2018).

2.2 Sistemas CAM (Computer-Aided Manufacturing)

No ano de 1952 foi conectado um computador rudimentar a uma fresadora manual, criando a primeira ferramenta computadorizada controlada numericamente (GERSHENFELD, 2005).

No começo, estas máquinas eram programadas através de perfuração manual de cartões de papel, sendo interpretável diretamente por aparelhos de controle eletrodomésticos das máquinas CN (Comando Numérico), que consistia principalmente de coordenadas binárias e uns poucos comandos (por exemplo, as velocidades do eixo e avanço).

No início dos anos 70 surgiram os primeiros sistemas específicos para CAD/CAM, oferecendo facilidades de programação para manipulação de dados, comunicação homem-máquina e inter-relação entre programas;

De acordo com SACCHI (2000) apud ULBRICH (2003), os sistemas CAD/CAM têm se tornado uma importante ferramenta no desenvolvimento de produtos. Em um ambiente moderno de manufatura, a sequência de operações inicia-se com o modelo criado em um

sistema CAD e termina de instruções de usinagem que convertem um material bruto em um modelo geométrico idêntico ao projetado.

Um sistema CAM pode ser empregado na geração de programas CNC para usinagem por fresamento, torneamento, furação, eletroerosão, retificação e demais equipamentos. Contudo, é na usinagem por fresamento, que esse sistema tem se destacado, pois, neste processo, os movimentos das ferramentas de corte são, muitas vezes, complexos, exigindo recursos computacionais para calculá-los.

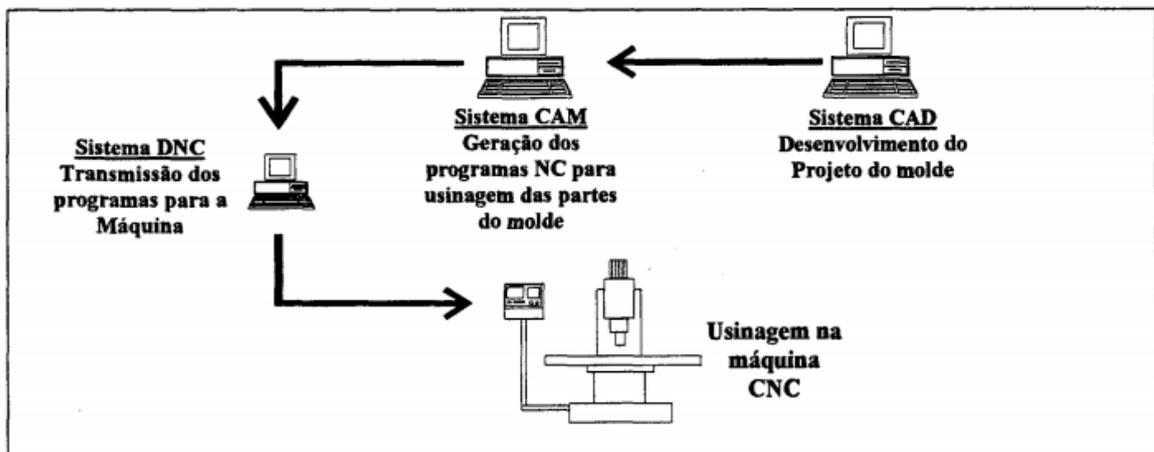


Figura 2.9: Sistema CAD/CAM/CNC

Segundo KOCHAN (1986) apud FERNEDA (1999), o sistema CAM consiste de um processador e pós-processador os quais dão ao computador de uma forma geral, o “cérebro” que ele precisa para entender e executar as instruções. O software (processador) recebe as instruções da peça e calcula o caminho de corte (Figura 2.10). Também aceita instruções de controle de avanço, rotação da máquina, fluido refrigerante, etc, e passa estes parâmetros no pós-processador, para a saída.

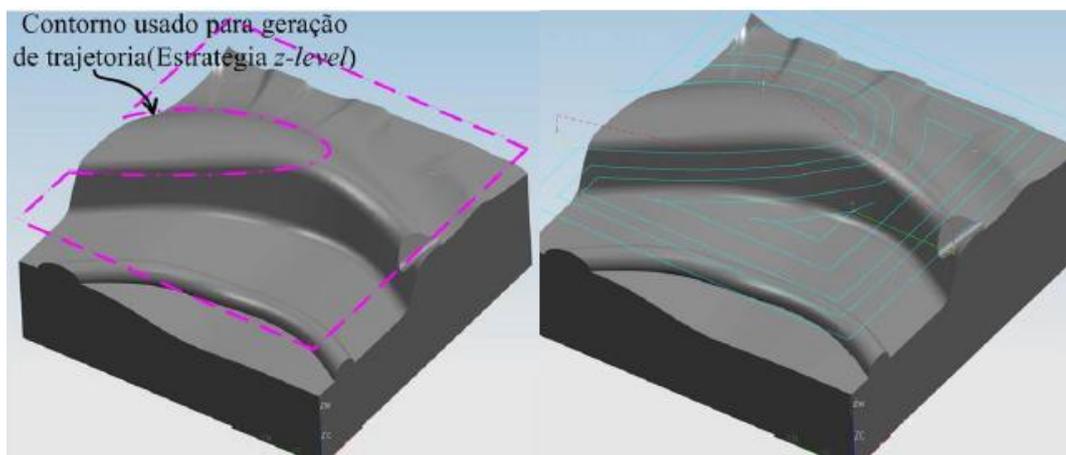


Figura 2.10: Trajetórias da ferramenta (SILVA, 2006)

Como cada máquina-ferramenta tem linguagem e programação diferentes, é necessário um meio para fazer a comunicação entre esses tipos diferentes de configuração e o computador. Esse papel é executado por um programa de computador suplementar chamado de pós-processador. Estas instruções são processadas pelo computador após o cálculo dos caminhos de corte realizados pelo processador, daí surge o nome pós-processador. É nessa etapa que toda a informação processado no software CAM, como caminhos da ferramenta, avanço, rotação e outros comando auxiliares são convertidos em linguagem CN de acordo com a máquina para a qual os dados serão exportados e interpretados. A saída final do computador contém os comando necessários para produzir a peça (FERNEDA, 1999).

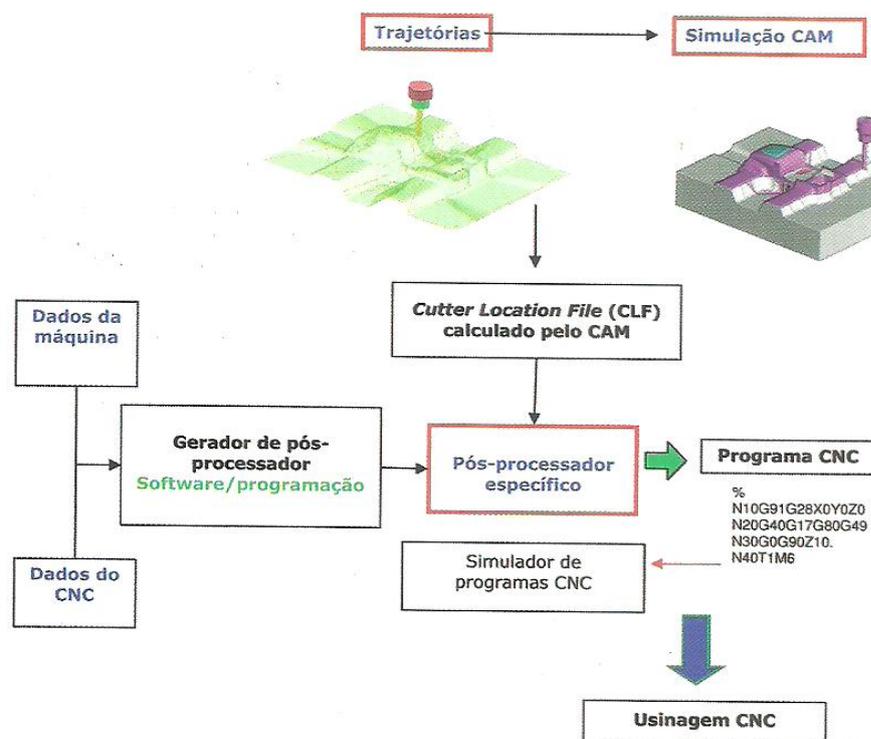


Figura 2.11: Pós-Processamento

Pode-se encontrar uma extensa gama de softwares CAM, sendo a maioria dirigida aos processos de usinagem. Alguns são modulares, possibilitando aos usuários módulos de acordo com os processos de seu interesse, por exemplo, torneamento ou fresamento. Outros são mais abrangentes e contemplam mais de um processo. Em alguns casos, pode-se adquirir uma plataforma CAD/CAM completa. Esta última evita alguns aborrecimentos durante a transferência de dados entre sistemas de fabricantes diferentes. Salvo algumas limitações,

uma vez modelado o produto, pode-se escolher o processo de fabricação, entre aqueles disponibilizados pelo CAM, selecionar a máquina, informar a sequência de fabricação, escolher as ferramentas e condições de corte. A partir disso, o sistema calcula automaticamente a trajetória da ferramenta, transferindo a forma de um programa CN, para a máquina-ferramenta determinada a priori (COSTA, 2006).

Antes do surgimento da tecnologia CAD/CAM, quando era necessário fabricar um produto com formas geométricas complexas, uma das alternativas era criar artesanalmente um modelo em resina, similar à forma da peça a ser usinada. Depois, com o uso de uma fresadora, era realizada a usinagem do modelo. Este processo consumia muito tempo de fabricação, além da baixa precisão dimensional e acabamento superficial pobre.

2.3 CNC (Comando Numérico Computarizado)

A geração de dados para a usinagem automática de uma peça é chamada de programa CN (Controle Numérico). Esses programas possuem instruções geométricas e tecnológicas para a usinagem de uma peça e são codificadas em termos de números incluídas em uma base de dados (local de armazenamento). Essas instruções (geométricas e tecnológicas) possuem dados dimensionais para a geração da peça (G,X,Y,Z) e informações de acionamentos para a operação da máquina ferramenta(avanço, rotação, troca de ferramentas, etc) (GENEROSO, 2011).

A sequência de passos que executam uma tarefa é especificada em arquivos, cuja estrutura corresponde obedecem as normas ISO 6983 e DIN 66025. A Norma ISO 6983 descreve o formato das instruções do programa para Máquinas de Controle Numérico. Trata-se de um formato geral de programação e não um formato para um tipo de máquina específica. A flexibilidade desta norma não garante intercambiabilidade de programas entre máquinas. Os objetivos desta norma são:

- Unificar os formatos-padrão anteriores numa Norma Internacional para sistemas de controle de posicionamento, movimento linear e circular;
- Introduzir um formato-padrão para novas funções, não descritas nas normas anteriores;
- Reduzir a diferença de programação entre diferentes máquinas ou unidades de controle, uniformizando técnicas de programação;
- Desenvolver uma linha de ação que facilite a intercambiabilidade de programas entre máquinas de controle numérico de mesma classificação, por tipo, processo, função, tamanho e precisão;

- Incluir os códigos das funções preparatórias e miscelâneas.

A trajetória da ferramenta é o principal conteúdo de um programa CNC. No entanto, comandos de preparação, acionamento secundário (como ligar o fluido de corte) dentre outros, são necessários.

Um programa CNC é formado por comandos de acionamento e preparação empregando uma linguagem em sintaxe padrão ASCII. É formado por várias linhas (blocos) contendo as informações. Embora as máquinas-ferramenta para usinagem sejam as mais conhecidas na aplicação CNC, outros equipamentos também podem ser controlados por um CNC, como as máquinas de medir por coordenadas, máquinas de montagem, máquinas de corte a laser ou plasma, para soldagem, etc. (SOUZA, 2013).

2.4 Processo de Usinagem

A usinagem consiste basicamente na fabricação de um produto pela remoção de material excedente de um corpo primitivo. Esse processo é classificado em: a) convencional, e; b) não convencional. Na usinagem não convencional o material é removido através de processos relativamente novos, como o corte a plasma, a laser e a eletroerosão. Na usinagem convencional é utilizada uma ferramenta de corte para realizar a remoção de material, como o torneamento, furação, fresamento, etc (SOUZA, 2013).

2.4.1 Fresamento

Dos processos de usinagem não convencional, o fresamento é o mais complexo, principalmente por causa das suas características de movimentação. Na fabricação de peças com geometria complexa ou no mínimo uma superfície suave (orgânica), a ferramenta se movimenta no espaço, utilizando simultaneamente os três eixos (Figura 2.12). Logo, a maioria das aplicações envolvendo uma fresadora envolve a utilização de sistemas CAM para a programação da usinagem (SOUZA, 2013). Na maioria dos casos, o fresamento emprega uma ferramenta de corte denominada fresa e possui haste cilíndrica e arestas de corte. As fresas podem ser inteiriças, na qual as regiões da ferramenta que realizam o corte e a haste de fixação da ferramenta representam um único corpo, ou podem ser com insertos intercambiáveis, em que a ferramenta é composta por pastilhas que representam a região do corte. As pastilhas são fixadas em uma haste (porta-ferramentas) fabricada de aço rápido.

(SOUZA, 2013). A figura 2013 mostra os tipos de fresas e possibilidades de geometria a serem usinadas.



Figura 2.12: Fresamento (SANTOS, 2017)

Entre os critérios para seleção da ferramenta se destacam o material a ser usinado, a qualidade superficial desejada, a quantidade da peça e a potência da máquina.

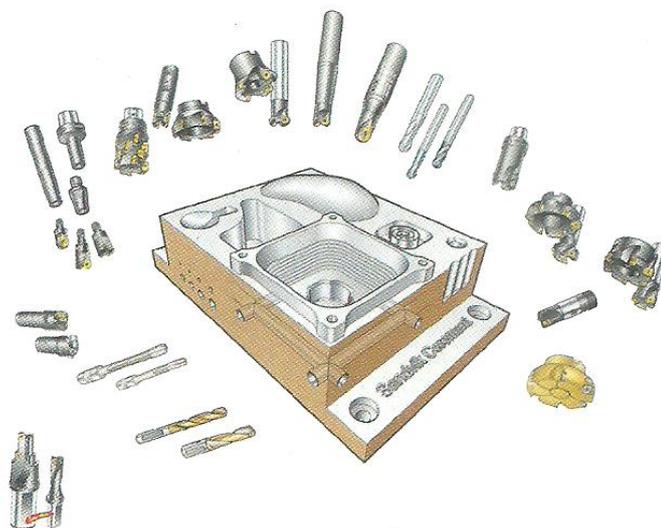


Figura 2.13: Fresas (SOUZA, 2013)

2.4.1.1 Principais Operações de fresamento

Geralmente o processo de fresamento envolve as seguintes etapas: a) desbaste e b) acabamento. A operação de desbaste é executada em 2 ½ eixos, pois a ferramenta se posiciona em uma determinada profundidade em Z e depois realiza movimentos em dois eixos

para remoção de material no nível. Quando a remoção de material em um nível termina, a ferramenta desce para o próximo plano e repete esse procedimento até a conclusão do desbaste. No desbaste deixa-se um sobremetal para ser removido na operação final de acabamento. As operações de acabamento tem a finalidade de remover todo o material remanescente das operações anteriores e garantir uma qualidade superficial satisfatória. Frequentemente, devido às geometrias da peça e da ferramenta, após a operação de desbaste, a quantidade de sobremetal é maior do que o determinado para o acabamento. Isso ocorre quando a ferramenta não consegue penetrar em alguma ou por causa dos parâmetros utilizados. Fazer um acabamento nessas condições pode prejudicar a qualidade superficial da peça. Assim, é necessário realizar uma outra operação para remover o excedente de material. Esse novo procedimento é nomeado de redesbaste ou pré-acabamento. Alguns software possuem estratégias específicas para essa situação (SOUZA, 2013).

2.4.1.2 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem são divididos em parâmetros geométricos e parâmetros tecnológicos. Os parâmetros geométricos são: a) profundidade de corte no sentido axial da ferramenta; b) profundidade de corte no sentido radial da ferramenta (a_e); c) e o avanço por aresta de corte. Esses Parâmetros influenciam na espessura do cavaco. Os parâmetros de velocidade são representados pela velocidade de corte (V_c) e a velocidade de avanço. A velocidade de corte é a velocidade periférica da aresta de corte e depende do diâmetro da ferramenta e da rotação do eixo da máquina. A velocidade de avanço é a velocidade de deslocamento da ferramenta em relação à peça e está relacionada (SOUZA, 2013).

2.4.2 Centros de Usinagem

Centros de usinagem são máquinas operatrizes, controladas numericamente, capazes de realizar várias operações de usinagem e realizar trocas de ferramentas automáticas a partir de uma magazine, ou outro aparelho de armazenagem de ferramentas, de acordo com a ordem de execução do programa de usinagem (FERNEDA, 1999).

O centro de usinagem, representado pela figura 2.14, permite maior precisão e exatidão na movimentação e posicionamento por causa da atuação dos transdutores de posicionamento (angular e linear), que fazem parte de uma malha fechada de controle. Esta é a principal característica que diferencia um Centro de Usinagem de uma Fresadora CNC. Os centros de usinagem possuem um dispositivo chamado de magazine, onde ficam armazenadas

as ferramentas. Esse aparato permite a troca automática da ferramenta durante o processo (SOUZA, 2013).



Figura 2.14: Centro de Usinagem (SILVA, 2006)

A aplicação mais comum de centro de usinagem envolve a utilização de três eixos coordenados (X, Y, Z) para movimentação linear da máquina (Figura 2.15). Contudo, centros de usinagem contendo quatro ou cinco eixos de movimentação vêm sendo utilizado com mais frequência.

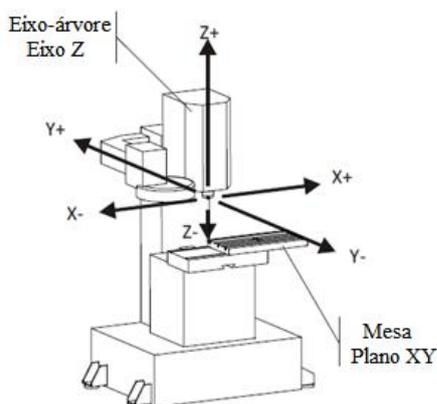


Figura 2.15 Usinagem em três eixos coordenados (Autodesk 2014)

2.5 Engenharia Reversa

Engenharia Reversa (ER) consiste no processo de reconstrução de um objeto que parte do modelo físico para chegar ao virtual (SOUZA, 2013). No processo convencional de engenharia, cria-se primeiramente o modelo virtual e em seguida são fabricados os produtos

de acordo como CAD. Na Engenharia Reversa, como o nome próprio diz, o processo ocorre de trás para frente, ou seja, o modelo físico já existe e há a necessidade de obter o modelo digital bidimensional ou tridimensional para aplicações nas etapas de engenharia e fabricação. A ER pode ser dividida em duas etapas: digitalização do modelo físico e criação do modelo CAD a partir dos dados digitalizados (SOUZA, 2013).

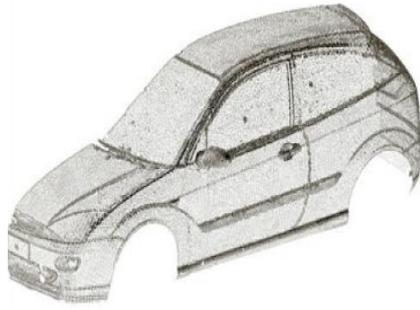
A digitalização consiste no processo de obtenção de dados que representam as informações das coordenadas geométricas do produto (Figura 2.16). Os dados são capturados por um sistema de equipamentos e software gerando uma nuvem de pontos e/ou uma malha triangular. O espaço 3D onde o modelo físico encontra-se é referenciado a um sistema de coordenadas cartesianas.

Na indústria automotiva os sistemas de digitalização a *laser* são utilizados principalmente para controle de qualidade e para ER (GENGHINI, 2013).



Figura 2.16: Digitalização de um Veículo GENGHINI (2013)

Após a coleta de dados o software agrupa os dados (pontos), gerando um conjunto de pontos medidos, a nuvens de pontos (Figura 2.17), e após alguns ajustes, esta será transformada em um modelo matemático tridimensional, geralmente o STL, como na figura 2.18. O formato STL é um padrão de linguagem que representam um modelo tridimensional através de uma malha triangular.



2.17: Nuvem de Pontos GENGHINI (2013)

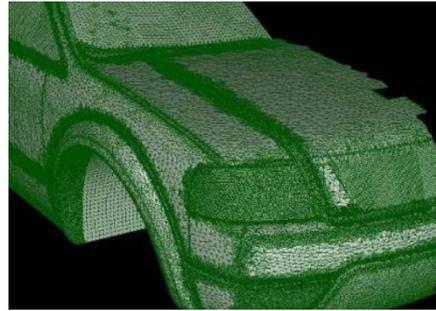


Figura 2.18 Malha Triangular GENGHINI (2013)

Muitos autores não acreditam que o sistema seja capaz de fazer todo o processo automaticamente sem nenhuma intervenção manual para objetos de complexidade razoável. Logo, depois da geração do modelo tridimensional formado pela malha triangular, é necessário editar o modelo obtido para melhorar a qualidade da malha. As ações tomadas podem ser: redução ou aumento do número de triângulos, fechamento de furos ou imperfeições, suavização da malha, etc. Em seguida um modelo CAD pode ser gerado em um software que possibilite a modelagem sólida ou de superfície a partir de um STL. Este modelo poderá ser utilizado em análises de engenharia e como base para a fabricação, em um sistema CAM por exemplo (ULBRICH, 2003).

2.5.2 Máquinas de Medição Por Coordenada

Conhecidas como CMM (do inglês *Coordinate Measuring Machine*), tais equipamentos surgiram no início dos anos 80, com o primeiro equipamento industrial da marca FERRANTI. As CMM's passaram por diversos avanços ao longo dos últimos anos com relação à exatidão e velocidade de medição. Quando comparados com técnicas de inspeção manuais, os benefícios pela aplicação dessa tecnologia são muito significativos. Em relação ao tempo de inspeção, por exemplo, normalmente é obtida uma economia de tempo de 90% comparada ao método de inspeção tradicional (FERNEDA, 1999).

A capacidade de medição de uma CMM é muito ampla. Pode-se medir as dimensões de qualquer peça ou componente mecânico de maneira rápida e precisa. Segundo BOTTURA & FUOCO (1922) apud FERNEDA (1999), os benefícios trazidos pela CMM's isoladamente já são compensadores, e quando estão integradas a sistemas CAD/CAM, aplicações importantes podem ser alcançadas, como por exemplo, o controle de inspeção e identificação de peças de maneira automática e a possibilidade de realização de Engenharia Reversa.

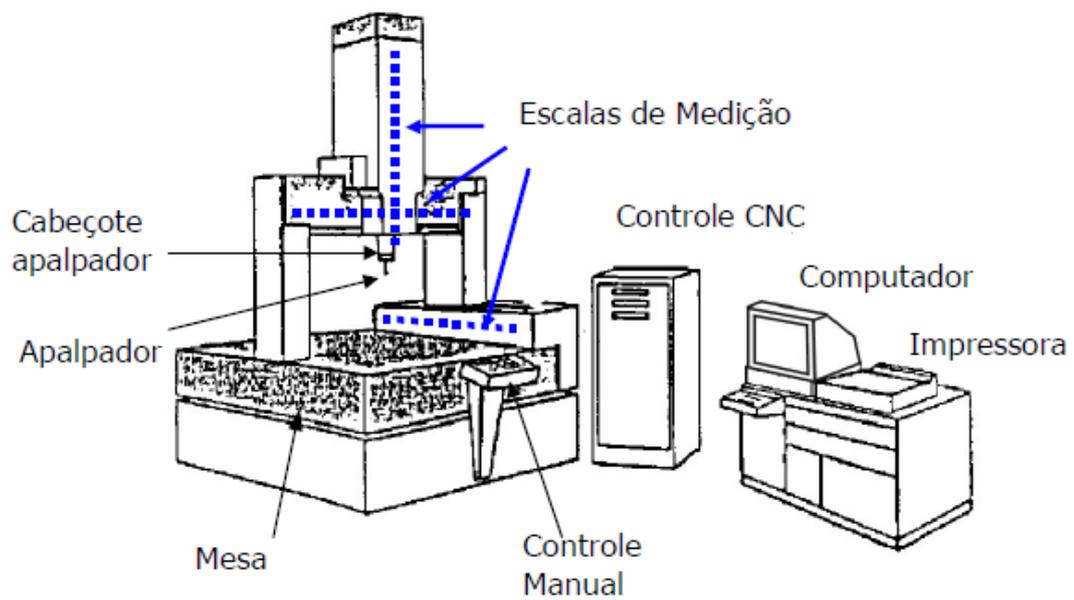


Figura 2.19: Partes principais de uma máquina e medição por coordenadas (Oliveira, 2003)

No presente capítulo foram apresentados e revisados os tópicos mais relevantes que este trabalho aborda. Foi visto a importância dos sistemas CAD para a indústria atual e algumas tendências dessa tecnologia para o futuro. Também foram mostrados os papéis fundamentais dos sistemas CAD/CAM na fabricação de peças em centros de usinagem e no auxílio ao processo de Engenharia Reversa, da aquisição de dados à fabricação do produto final.

Capítulo 3

3 METODOLOGIA APLICADA

O método proposto neste trabalho objetiva a fabricação de uma peça metálica a partir de um modelo 3D com o auxílio de um sistema CAD/CAM/CNC. Foi feito também um estudo de caso baseado nas práticas de Engenharia Reversa com o auxílio de um sistema CAD/CAM e o uso de uma máquina de medição por coordenadas. O foco geral do presente capítulo é determinar procedimentos bem definidos para facilitar as análises e reprodutibilidade dos métodos aplicados.

Resumidamente, este trabalho apresenta um método para programar e usinar uma peça a partir de um modelo 3D utilizando um software CAM. A manufatura com o auxílio de um sistema integrado engloba CAD/CAM/CNC as seguintes etapas:

- Criar o modelo 3D da peça;
- Criar a programação CAM da peça modelada, definindo estratégias e parâmetros de usinagem para obtenção dos caminhos de ferramenta;
- Realizar pós-processamento do programa CAM e gerar o código CNC;
- Realizar o pré-set (setup) do centro de usinagem;
- Transferir o código para a máquina;
- Usinar a peça.

Paralelamente, como mencionado, foi estabelecido um roteiro para a obtenção de uma peça a partir da digitalização do modelo físico real, empregando princípios da Engenharia Reversa. Basicamente, este método propicia a realização da programação CAM de uma peça com geometria complexa com base em um modelo físico existente. Esse procedimento contém os seguintes passos:

- Obtenção do modelo digital da peça através da digitalização da mesma;
- Tratamento do modelo obtido, com o intuito de aproximar ao máximo do modelo físico;
- Obtenção do modelo CAD 3D
- Realização a programação CAM.

A ordem do trabalho será desenvolver a programação da peça a partir de um sistema CAD/CAM/CNC para posterior usinagem, e em seguida será mencionado todo processo de programação CAM fundamentado na Engenharia Reversa.

3.1 - Recursos utilizados

3.1.1- Software CAD/CAM

Para a modelamento 3D e programação CAM foi utilizado o software Siemens *NX*. Esse software possui vários módulos de sistemas CAx e representa uma solução avançada para o desenvolvimento de produtos e manufatura, permitindo otimização dos tempos de projeto e operação bem como da qualidade dos serviços.

3.1.2 - Materiais e Ferramentas

O bloco de alumínio utilizado na usinagem da peça possui seção retangular quadrada de 2 (duas) polegadas (50,8 mm).



Figura 3.1: Bloco usinado - *Blank* (O autor)

As ferramenta utilizadas no processo de usinagem foram escolhidas de acordo com as operações e a disponibilidade no estoque. A Tabela 3.1 lista as ferramentas e os diâmetros das mesmas.

Ferramenta (Tipo)	Diâmetro (mm)
Fresa de Topo Reto	16.0
Fresa de Topo Reto	8.0
Broca de Centro	11.2
Broca	6.0
Broca	11.0
Fresa Ponta Esférica	4.0

Tabela 3.1: Diâmetros das Ferramentas

3.1.3 Máquina Ferramenta

O centro de usinagem utilizado neste trabalho para a manufatura da peça foi um modelo ROMI D 600 (Figura 3.2) O modelo possui comando CNC Fanuc Oi-MD e rotação máxima de 8000 rpm. A máquina pertence ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do estado da Paraíba (IFPB). Todo o processo de usinagem foi auxiliado pelo professor Dr. Laurivan Diniz, integrante do corpo docente do IFPB e responsável pelo centro de usinagem.



Figura 3.2: Centro de Usinagem 3 Eixos ROMI D 600 (O autor)

3.1.4 - Máquina de Medição por Coordenadas

Para as etapas de digitalização e medição foi utilizada uma Máquina de Medição de Coordenadas *Crysta-Apex S 7106* CNC equipada com o sensor apalpador e o sensor de digitalização a *laser* (Figura 3.3)



Figura 3.3: Máquina por Medição de Coordenadas *Crysta-Apex S 7106* CNC

3.2 - Modelamento CAD e Programação CAM da Peça

3.2.1- Modelamento 3D

A peça usinada foi modelada a partir de um exemplo de suporte de um componente aeronáutico (Figuras 3.4 e 3.5).

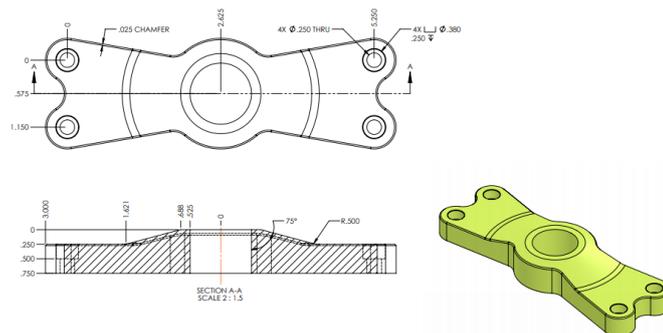


Figura 3.4: Suporte

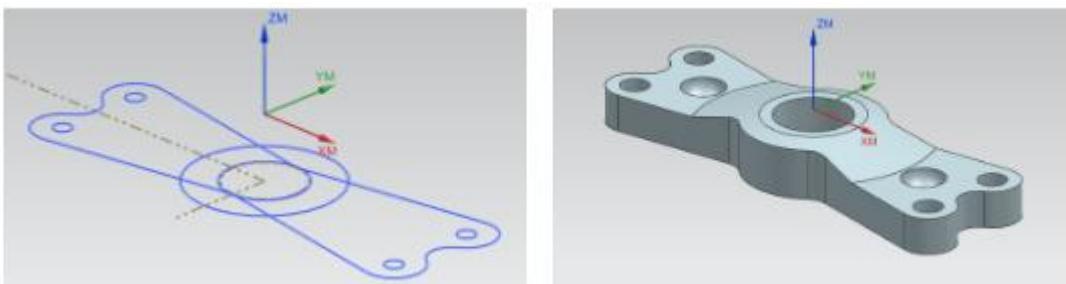


Figura 3.5: Modelamento 3D

3.2.2 Programação CAM

Um sistema CAM tem por função desenvolver três atividades principais: a) calcular a trajetória para a movimentação de forma que a máquina possa realizar a usinagem; b) realizar a simulação da usinagem calculada; c) gerar programas CNC para máquinas CNC específicas. Todas essas etapas resumem-se na obtenção do código G (código CNC) para a realização da usinagem da peça.

A metodologia de trabalho utilizada em sistemas integrados CAD/CAM/CNC é representada pelo esquema da Figura 3.6. O fluxograma mostra as etapas realizadas para elaboração da programação CAM neste trabalho. Essa sequência é uma metodologia simples e prática para obter o código CNC de uma peça a ser fabricada.

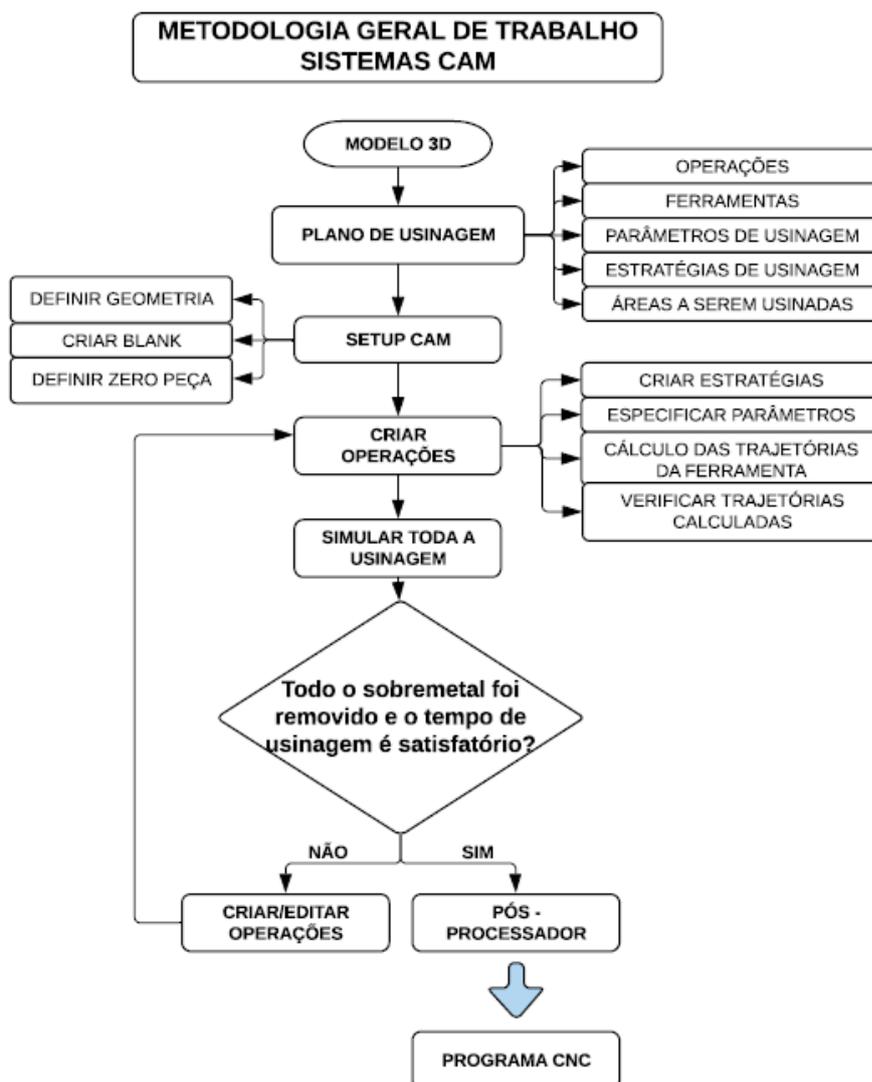


Figura 3.6: Metodologia de Trabalho

3.2.2.3 Plano de Usinagem: definir das estratégias e parâmetros de usinagem.

Na programação CAM, as estratégias de usinagem representam o modo como o software irá calcular as trajetórias da ponta da ferramenta durante a operação. As estratégias caracterizam os caminhos de ferramentas gerados pelo software de acordo com as opções, parâmetros e demais dados atribuídos pelo usuário.

Antes de realizar a programação de uma peça, o profissional deve determinar todas as operações necessárias para a realização da usinagem, bem como os dados das ferramentas, além dos parâmetros geométricos (profundidade de corte e passo) e tecnológicos (velocidades/rotação e avanço). Em seguida, inicia-se o uso do software, com a especificação do modelo e a realização do set-up.

A Tabela 3.2 apresenta a sequência de operações utilizada bem como as ferramentas e os parâmetros de corte de cada processo.

Os parâmetros de corte foram definidos com base em um guia oferecido por um fabricante de software CAM e, principalmente, na experiência prática do professor Laurivan Diniz, responsável pelo centro de usinagem.

Quando se trata da usinagem de uma peça a partir de um material bruto como um bloco ou tarugo, a primeira operação a ser definida é o desbaste, que tem como objetivo remover a quantidade máxima de material em relação sobremetal especificado para as operações de acabamento. O redesbaste vem logo em seguida e tem a função de remover material nas regiões onde não foi possível realizar na operação anterior, seja por causa do diâmetro da ferramenta ou por causa dos parâmetros utilizados no desbaste. Sendo assim, na usinagem do suporte, a sequência determinada para as primeiras operações foi desbaste, desbaste e realização dos furos rebaixados e central. Por último veio a sequência de acabamento: paredes e regiões planas, furos, rampa, e as calotas esféricas. O acabamento dessas superfícies deve ser feito em operações diferentes, já que para cada situação serão especificados parâmetros e/ou ferramentas diferentes distintos.

Com todas as referências e informações em mãos, é o momento de definir quais estratégias criar para cada operação.

Finalidade	Ferramenta	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (% diâmetro)	Profundidade de Usinagem (mm)	Avanço por dente (mm/dente)	Rotação (rpm)
Remover o máximo de material	Fresa de Topo 16 mm	120	446	70	3	0,093	2380
Fazer o furo de centro antes da furação	Broca de Centro	90	130	N/D	N/D	N/D	2550
Furação dos Furos de 6 mm	Broca 6 mm	90	240	N/D	N/D	N/D	4775
Pré-Furação do Furo Central	Broca 6 mm	90	244	N/D	N/D	N/D	4775
Furação do Furo Central	Broca 11 mm	90	102	N/D	N/D	0,0196	2600
Remover o excesso de material não usinado no desbaste	Fresa de Topo 8 mm	140	400	70	2	0,0182	5570
Usinar os furos com rebaixo, deixando apenas o sobremetal para acabamento	Fresa de Topo 8 mm	90	400	10	N/D	0,028	3580
Usinar os furos centrais, deixando apenas o sobremetal para acabamento	Fresa de Topo 8 mm	90	400	10	N/D	0,028	3580
Acabamento das paredes e partes planas	Fresa de Topo 8 mm	130	300	N/D	3	0,0144	5173
Acabamento de todos os furos	Fresa de Topo 8 mm	130	300	N/D	3	0,0144	5173
Acabamento da rampa	Fresa de Topo ponta esférica 4 mm	80	400	10	N/D	0,025	6300
Acabamento da calota esférica	Fresa de Topo 8 mm	80	400	5	N/D	0,025	6300

Tabela 3.2: Operações, parâmetros e ferramentas.

3.2.2.1 Criação do Setup CAM

O set-up é a primeira etapa realizada no ambiente CAM. Essa etapa consiste em especificar para o software um conjunto de informações essenciais para a realização do cálculo da trajetória da ferramenta. A quantidade de dados necessária para realização do set-up pode variar de um software para o outro, mas no geral essas informações consistem em: a) seleção do modelo 3D; b) criação/especificação da matéria-prima (*blank*); c) especificar a posição dos fixadores quando o uso destes é necessário para prender a peça; d) determinação do zero peça (origem da coordenada de trabalho de máquina).

A referência das movimentações da ferramenta deve partir de uma origem. Assim como no modelamento CAD, na programação CAM as posições coordenadas devem se basear em um sistema de referência conhecido. Logo, foi definido um sistema de coordenadas posicionado em uma região conveniente em relação ao trabalho específico. Este sistema de coordenadas é denominado MCS (Sistema de Coordenadas de Máquina) - também conhecido como “zero-peça”.

No módulo *Manufacture* do NX, o software solicita ao usuário a seleção de *templates* de set-ups de acordo com o tipo de usinagem a ser realizada (Figura 3.7). A criação do set-up consistiu-se nos seguintes passos: o modelo 3D foi vinculado à geometria da programação; o blank foi criado e a origem da MSC foi modificada.

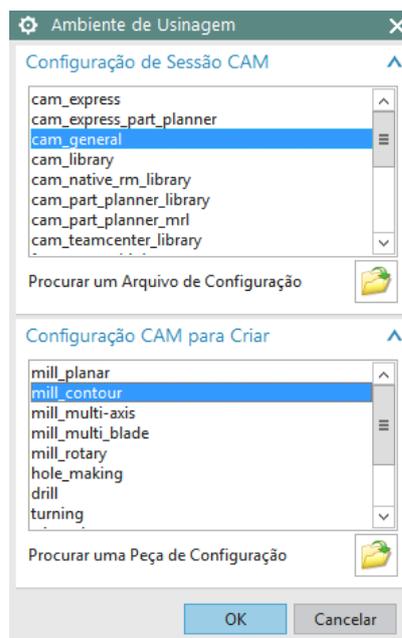


Figura 3.7: Seleção do *Template* do Setup (O autor)

Na usinagem do suporte, a origem do MCS foi definida na parte central do bloco, como apresentado na figura 3.8.

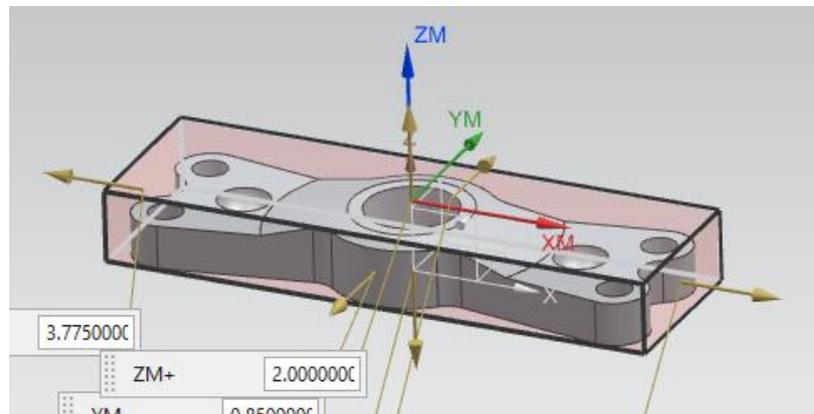


Figura 3.8: Modelo 3D na área de trabalho do CAM: Setup (O autor)

3.2.2.2 Criar Ferramentas

Os dados geométricos da ferramenta são indispensáveis para o software realizar qualquer cálculo de trajetória (Figura 3.9) Caso o programador queira criar uma estratégia rápida para análise, a ferramenta deve ser criada ou selecionada, caso já esteja presente no programa. Além da ferramenta, outros dados são necessários para a realização de qualquer trajetória: a geometria a ser usinada e a área de corte.

As ferramentas utilizadas neste trabalho estão listadas na Tabela 3.1.

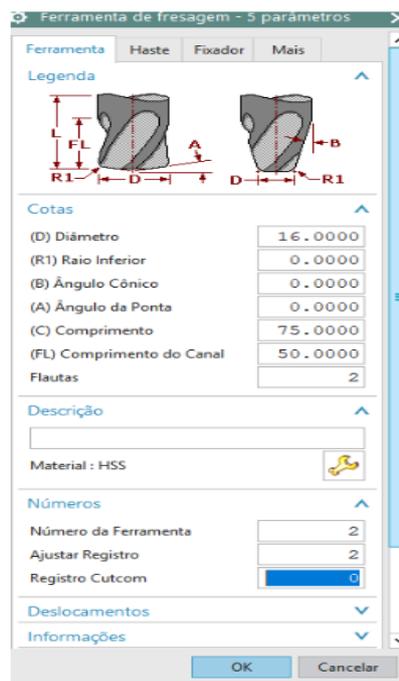


Figura 3.9: Especificação dos dados da Ferramenta

3.2.2.4 Criar Operações

A estratégia é um dos itens configurados na hora de criar uma operação em um software CAM. A operação representa um conjunto de ‘saídas’ da programação e é dependente das várias ‘entradas’ (dados, parâmetros, etc) diferentes. Além da estratégia, o software irá solicitar ao usuário a seleção de opções e especificação de parâmetros para configurar a operação a ser criada: selecionar/criar ferramenta, configurações da estratégia, velocidades e avanços, parâmetros de corte, movimentos passivos (não corte), etc. Para o modelo deste trabalho, as operações foram criadas conforme o esquema da Figura 3.10 e os parâmetros utilizados em cada operação constam na Tabela 3.2.

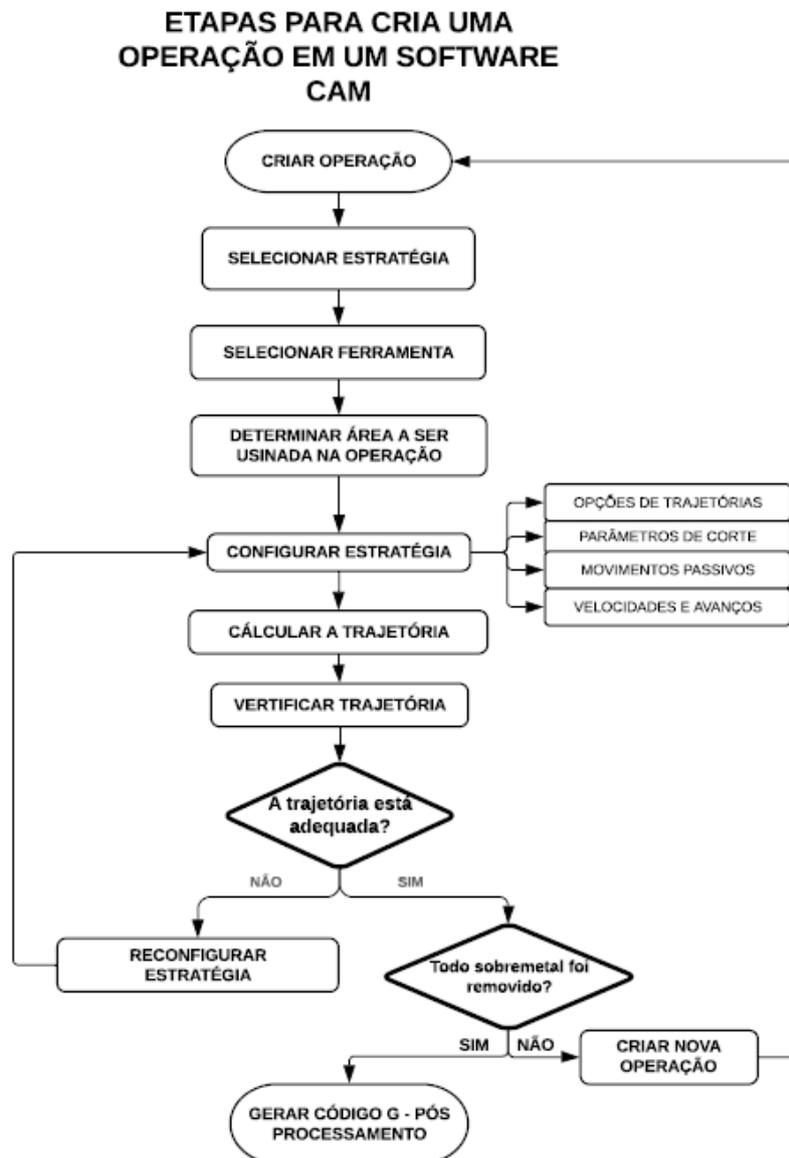


Figura 3.10: Fluxograma criação de uma Operação

Neste trabalho foi detalhada apenas a operação de **desbaste** e o uso de sua respectiva estratégia. Para as outras operações ou estratégias, pontos relevantes serão citados sucintamente de acordo com a ordem da programação.

3.2.2.4.1 Operação de Desbaste

A operação de desbaste no NX CAM foi programada a partir de uma estratégia que remove material em níveis de recorte planares (2 ½ eixos), específica para este tipo de operação (Figura 3.11). Os dados geométricos da ferramenta bem como o modelo 3D e a especificação das regiões a serem usinadas são as informações essenciais requeridas por qualquer software CAM para realizar o cálculo de uma trajetória. Isso não significa que apenas com essas informações podemos gerar um código para usinar uma peça. Mas, a partir delas, os *softwares* já calculam os caminhos das ferramentas e realizam a simulação da trajetória. Assim, para o programador já ter um feedback da estratégia, não precisa especificar todos os dados logo no início, e sim apenas as três entradas essenciais, conhecidas também como informações iniciais. As ferramentas utilizadas nesta e nas operações posteriores estão listadas na seção 3.2.2.2.

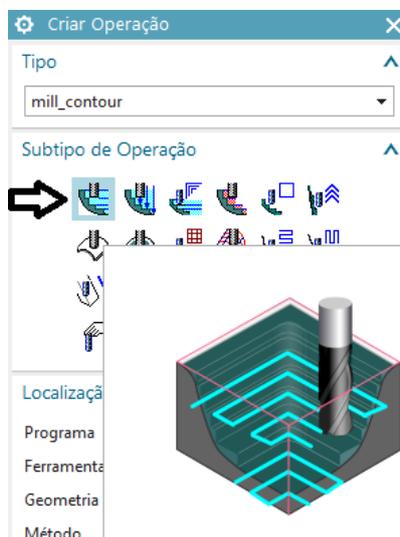


Figura 3.11: Estratégia de desbaste (O autor)

Quando a usinagem é realizada a partir de um material bruto, não é necessário especificar as áreas de corte, pois o software entende que a função desta operação é retirar o máximo de material. Assim, o CAM usa todo o modelo 3D como referência. Porém, em

algumas aplicações, pode ser necessário selecionar as regiões de corte ou limites de corte (Figura 3.12)

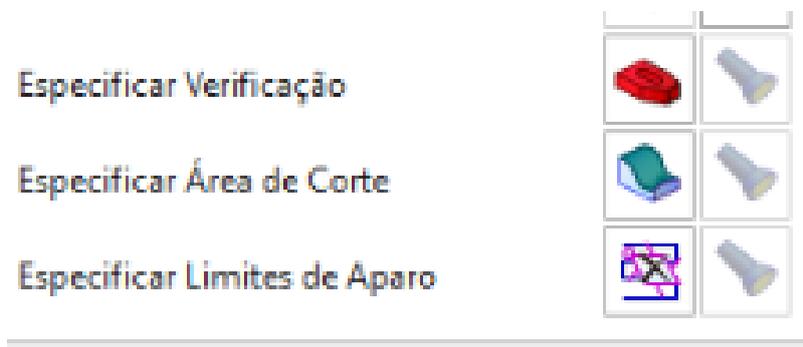


Figura 3.12: Especificação das áreas de corte

Outra etapa importante na criação de uma operação é a configuração da estratégia. Deve-se especificar o padrão no qual a ferramenta irá se deslocar sobre o modelo e determinar os passos radial (profundidade de corte) e axial (profundidade de usinagem) da ferramenta. Quanto menores os passes axial e radial, melhor a qualidade da superfície após a usinagem. Quanto maiores os passes axial e radial menor é o tempo da operação. Deste modo, cabe ao programador avaliar a situação de acordo com as condições do processo. No presente trabalho, esses dados foram obtidos de uma tabela sugerida por um fabricante de software (Tabela 3.3)

Recommended Machining Parameters		
Operation	Parameter	Value
All	Clearance Height	1.0 inches
All	Feed Height	.1 inches
All	Rapid Height	As needed to clear clamps and fixtures
Mill (Roughing)	Stepover (XY)	50-80% of tool dia.
Mill (Roughing)	Stepdown (Z)	25-50% of tool dia.
Drill	Peck Increment	.05 inches
Spot Drill	Dwell	.5 seconds

Tabela 3.3: Parâmetros Recomendados (Autodesk, 2014)

O próximo passo desta etapa foi configurar os parâmetros de corte. Para a operação de desbaste foram configurados os seguintes dados: sentido de rotação do eixo, determinar o estoque (sobremetal para o acabamento). O último item a ser configurado na etapa de configuração da estratégia foi a opção de movimentos passivos (Figura 3.13), que representam os movimentos da ferramenta quando esta não está realizando corte. Configurar

de forma adequada a forma como a ferramenta se aproxima e se afasta do corte e como ela se desloca em movimentos rápidos exige muito cuidado, pois esses tipos de movimento podem influenciar na qualidade da peça, no desgaste da ferramenta e principalmente na possibilidade de colisões. Por último, foram especificados o avanço e velocidade de corte. Esses parâmetros foram especificados de acordo com a Tabela 3.4 e com a experiência do programador.

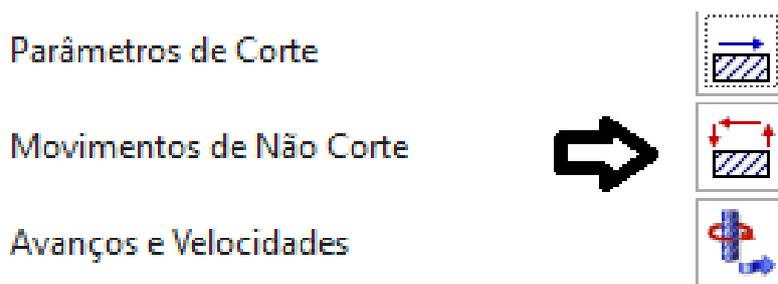


Figura 3.13: Configuração dos Movimentos Passivos (sem corte) (O autor)

Mill Cutting Speeds (SFM) <i>surface ft/min</i>		
Material	HSS	Carbide
Aluminum	600	800
Brass	175	175
Delrin	400	800
Polycarbonate	300	500
Stainless Steel (303)	80	300
Steel (4140)	70	350

Cutting Feeds (IPR) <i>in/rev</i>					
Operation	Tool Diameter Range (<i>in</i>)				
	<.125	.125-.25	.25-.5	.5-1.	>1.
Milling					
Aluminum	.002	.002	.005	.006	.007
Brass	.001	.002	.002	.004	.005
Delrin	.002	.002	.005	.006	.007
Polycarbonate	.001	.003	.006	.008	.009
Stainless Steel (303)	.0005	.001	.002	.003	.004
Steel (4140)	.0005	.0005	.001	.002	.003
Drilling					
	.002	.004	.005	.010	.015
Reaming					
	.005	.007	.009	.012	.015

Tabela 3.4: Parâmetros de Corte: Velocidade e Avanço

Após o calcular a trajetória, o software exibe na área de trabalho os caminhos de ferramenta sobre o modelo 3D, como apresentado na figura 3.14.

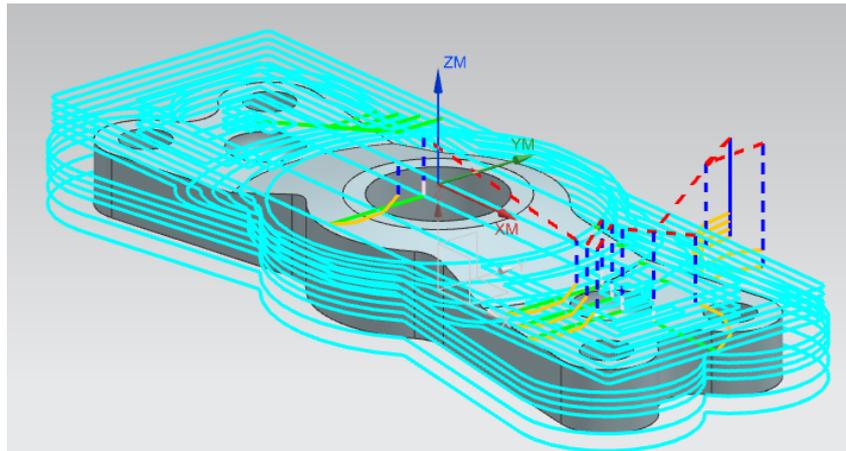


Figura 3.14: Caminho de ferramenta gerado (O autor)

3.2.2.4.2 Verificar Caminhos de Ferramenta

Embora as etapas da programação CAM serem sequenciais e bem definidas, a geração de um caminho de ferramenta (tool patch) adequado é um processo iterativo, no qual as etapas se cruzam com o intuito de obter um código otimizado, levando em conta principalmente o tempo de usinagem e acabamento superficial. Um software CAM permite a verificação dos caminhos gerados através de uma simulação realizada no próprio ambiente do software. O software simula as trajetórias das ferramentas e a remoção do material do *blank*.

A etapa de verificação possui as seguintes finalidades:

- Verificar a ocorrência de invasões indesejáveis na geometria;
- Verificar a adequação das trajetórias calculadas;
- Verificar a colisão do porta-ferramentas com a peça;
- Verificar colisões com a fixação da peça na mesa da máquina;
- Simulação de usinagem com 5 eixos

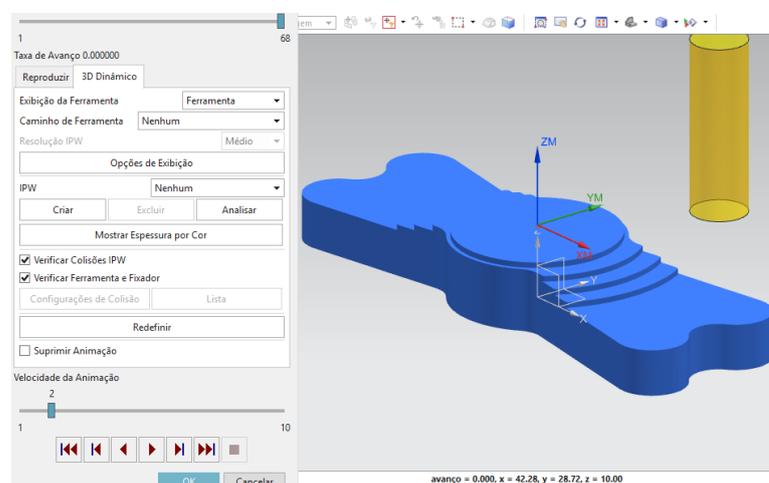


Figura 3.15: Simulação NX CAM (O autor)

No presente trabalho não houve problema quanto a colisões ou invasões da ferramenta. No entanto, na criação de todas as operações foram necessários ajustes na estratégia de usinagem com o objetivo de reduzir o tempo da operação e melhorar o acabamento superficial.

As outras operações foram criadas com a mesma metodologia desenvolvida na criação do desbaste (Figura 3.16).

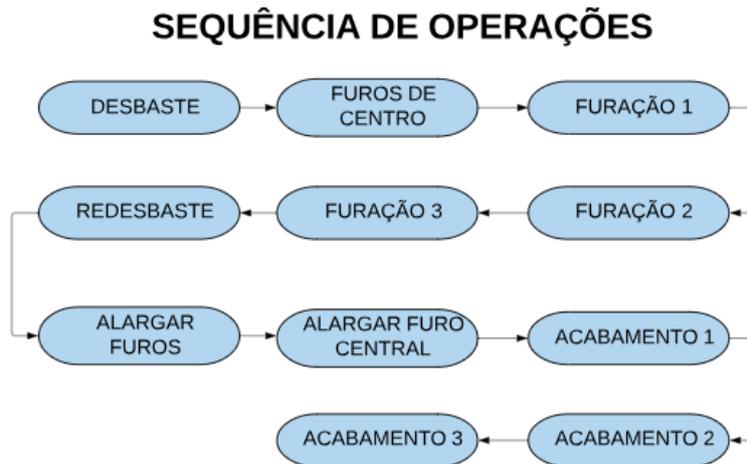


Figura 3.16: Sequência de Operações

Os pontos relevantes da criação de cada operação posterior são apresentados no item seguinte.

3.2.2.4.3 Redesbaste, Operações de Furação, Acabamento.

Como estabelecido no plano de usinagem, o redesbaste é a segunda etapa para a remoção de material da peça. Muitos softwares têm uma estratégia definida para o redesbaste. No entanto, como os parâmetros e configurações são semelhantes à operação de desbaste, é comum o programador que usa o NX copiar a operação anterior (duplicar) e alterar apenas a ferramenta e alguns parâmetros. Na usinagem do suporte foi alterada apenas a ferramenta. Depois de realizada a alteração, o caminho de ferramenta foi gerado (Figura 3.17).

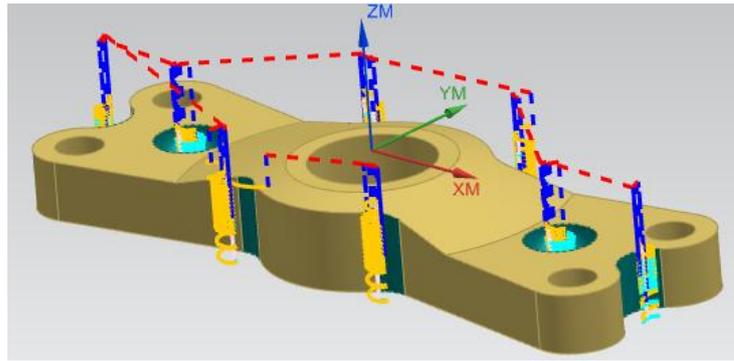


Figura 3.17: Trajetórias Redesbaste (O autor)

As furações foram realizadas a partir de uma pré-furação com uma broca de centro. Essa etapa é importante para evitar furos excêntricos. Após as furações foram executadas os alargamentos dos furos. A maioria dos softwares CAM já tem uma estratégia definida para esse tipo de operação. Esta estratégia foi aplicada nos furos com rebaixo e no furo central.

Como mencionado na Figura 3.16, a primeira operação de acabamento realizada foi a usinagem das paredes e partes planas do modelo Figura 3.18. Essa operação foi criada a partir de uma estratégia do software para criar trajetórias em paredes e que também realiza, com a permissão do usuário, usinagem de regiões planas. Utilizando essa mesma estratégia, foi programado o acabamento dos furos (Figura 3.19).

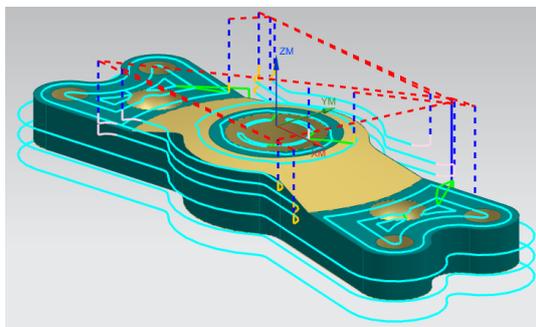


Figura 3.18: Trajetórias acabamento das paredes

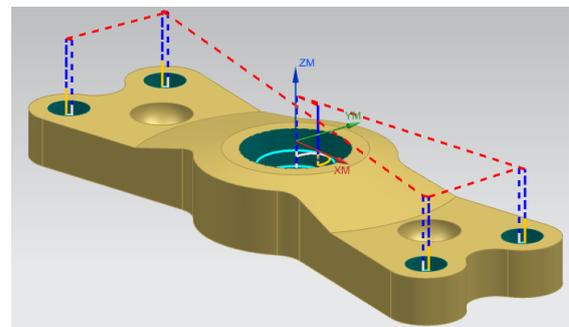


Figura 3.19: Trajetórias acabamento dos furos

Por fim, foram programados os acabamentos da rampa e da calota. Para essas duas operações foram utilizadas a mesma estratégia e a mesma ferramenta. No entanto, viu-se a necessidade de reduzir o passe radial (profundidade de corte) na remoção de material da calota com o objetivo de manter um acabamento adequado. A estratégia utilizada nesse tipo de acabamento é conhecida como *raster* e consiste na criação de trajetórias paralelas em um plano horizontal superior à geometria usinada (Figura 3.20 e 3.21). Quando projetadas na geometria, essas trajetórias podem sofrer alteração nos espaçamentos (passo radial) e quanto

mais inclinada a superfície, maiores são esses espaçamentos. Por isso optou-se por diminuir o passe radial no acabamento da calota esférica.

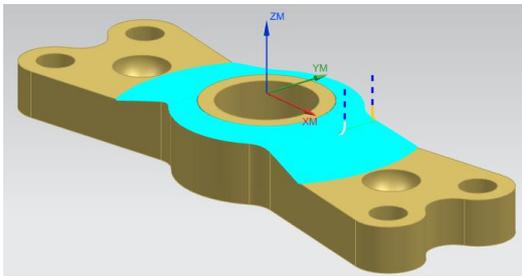


Figura 3.20: Trajetórias acabamento da rampa

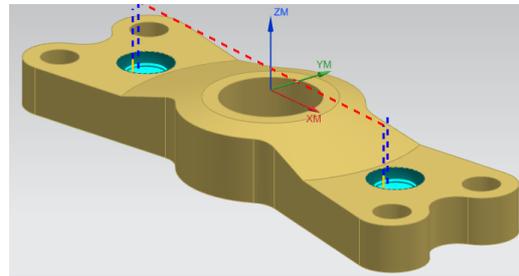


Figura 3.21: Trajetórias acabamento das calotas

Após a criação de todas as operações deve-se simular todo o processo, a fim de apurar a existência de inconvenientes, como colisões, entrada e saídas impróprias das ferramentas, etc. O NX CAM disponibiliza simulações de usinagem com movimentos de modelos de máquinas-ferramenta. A Figura 3.22 mostra o suporte sobre equipamento genérico três eixo e a simulação das operações.

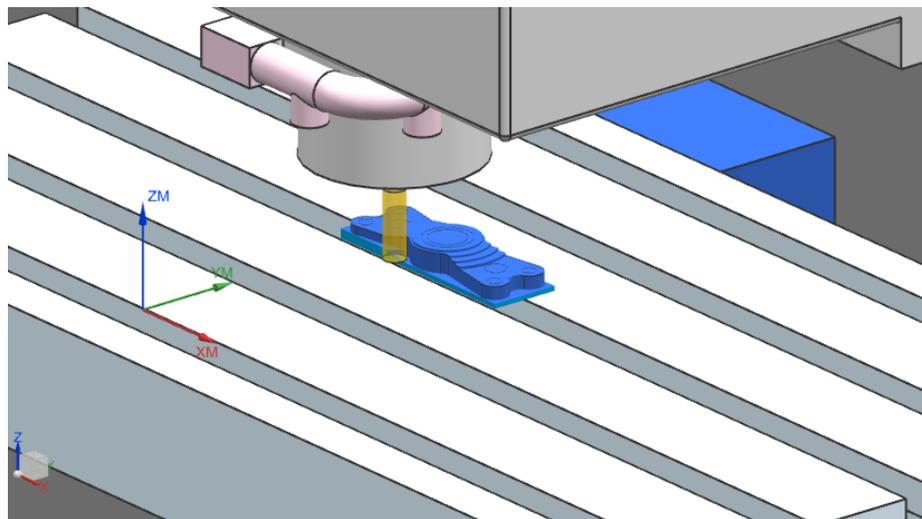


Figura 3.22: Simulação de Máquina NX CAM (O autor)

3.2.2.5 Pós-processador - Gerar Código CNC (código da máquina)

Com todas as operações programadas, é o momento de gerar o código CNC. O pós-processador utilizado foi um padrão para três eixos disponível no software NX CAM (Figura 3.23). O software irá criar um arquivo de texto com o código e o mesmo pode ser editado pelo usuário caso necessário. O código gerado na programação deste trabalho precisou de edição, já que o pós-processador não era específico da máquina-ferramenta utilizada. Finalmente, o programa está pronto para ser transferido para a máquina ferramenta.

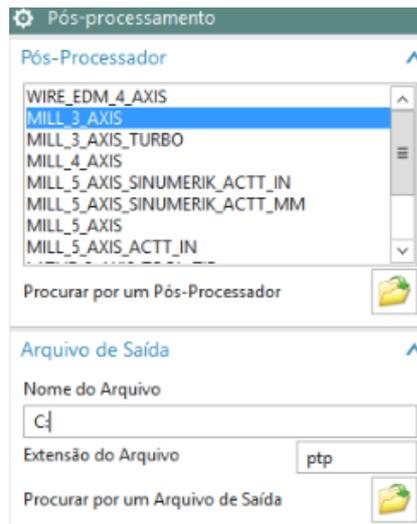


Figura 3.23: Janela de Pós-Processamento (O autor)

3.3 Usinagem

Depois que o código CNC da peça foi gerado, o mesmo foi transferido para um computador que auxilia o processo de transferência de dados para o centro de usinagem.

3.3.1 Separação das ferramentas utilizadas no processo

A seleção das ferramentas foi feita de acordo com as operações realizadas, material e disponibilidade. Depois de selecionadas, todas as ferramentas foram fixadas no porta-ferramentas e adicionadas ao magazine da máquina. O porta-ferramentas representa a interface entre a ferramenta de corte e o eixo-árvore da máquina (Figura 3.24).

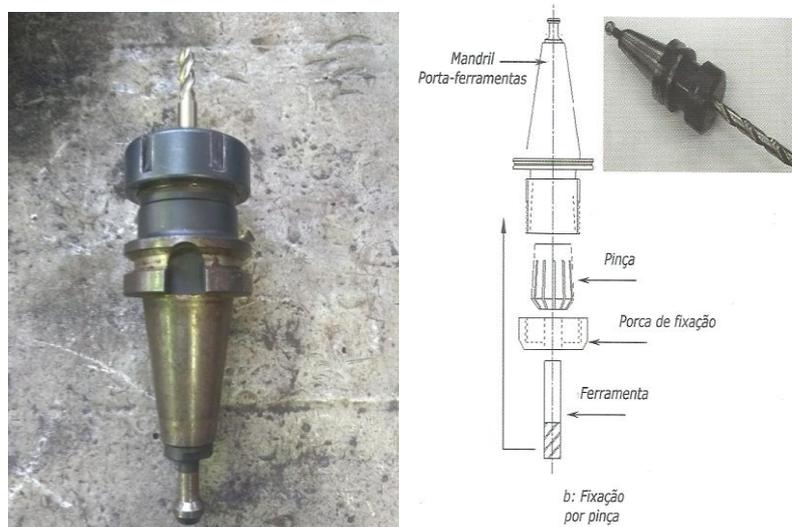


Figura 3.24: Porta-ferramentas

3.3.2 Setup do centro de usinagem

A preparação do centro de usinagem consiste nas seguintes etapas: colocar as ferramentas no magazine de acordo com a ordem estabelecida na programação CAM; fixação do bloco a ser usinado; configurar a origem da coordenada de trabalho de acordo com a origem na programação; informar à máquina a altura das ferramentas. O bloco usinado neste trabalho foi fixado na mesa por meio de uma morsa (Figura 3.25).



Figura 3.25: Material Bruto para Usinagem (*Blank*)

3.3.3 Transferir o código para a máquina

A memória do centro de usinagem utilizado neste trabalho não comporta um arquivo de um código G com dezenas de milhares de linhas de código. Logo, foi necessário o uso de software de comunicação serial WinDNC para transmitir os dados do código para o CNC da máquina (Figura 3.26). Para cada linha de código executada pela máquina ferramenta, o software de comunicação apaga essa linha, evitando o uso de espaço da memória (Figura 3.27 e 3.28).

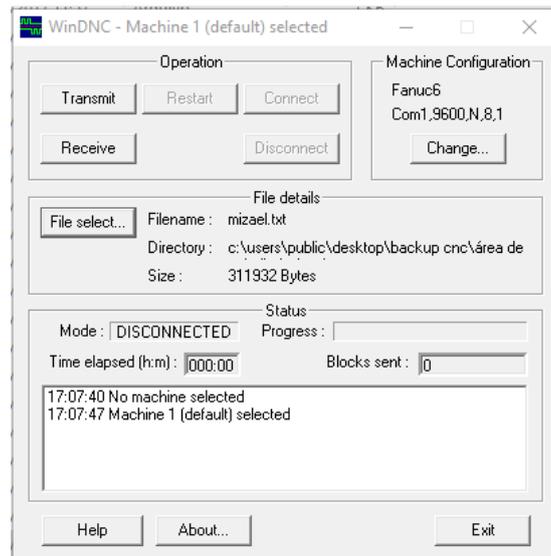


Figura 3.26: Software Comunicar (O autor)

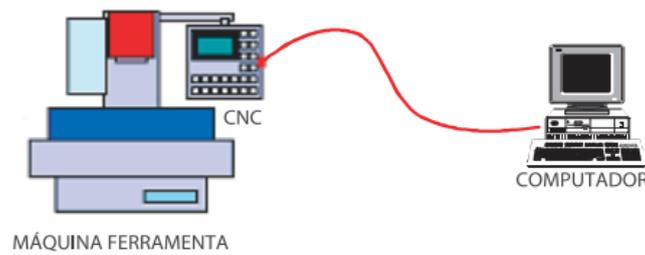


Figura 3.27: Transferência do código

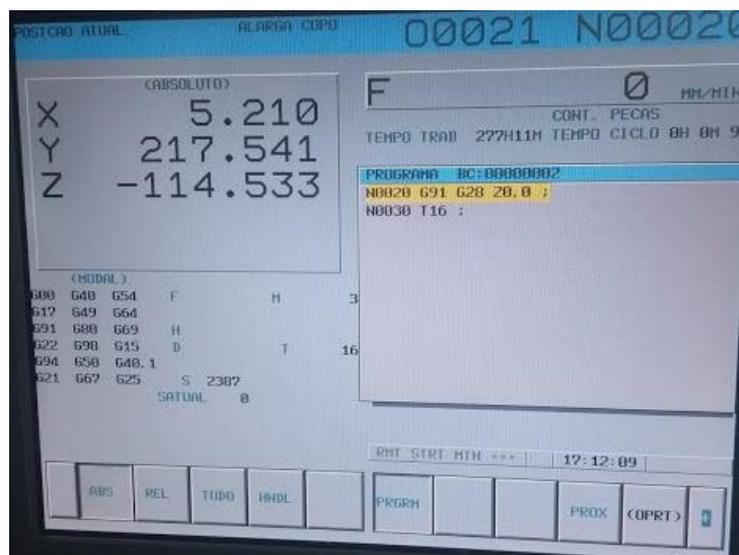


Figura 3.28: Painel da máquina com as primeiras linhas do código (O autor)

3.3.4 Usinagem da Peça

Por último, foi realizada a usinagem da peça no centro de usinagem (Figura 3.29). Foi observado que os tempos das operações foram muito próximos do tempos estimados no software CAM.



Figura 3.29: Peça sendo usinada (O autor)

3.4 Medições dos furos da peça usinada

Os furos do suporte usinado no procedimento supracitado foram medidos na máquina de medição por coordenadas para a obtenção informações do modelo físico para comparar o com modelo 3D criado no CAD. As medidas foram realizadas com o auxílio do sensor apalpador SP25M (Figura 3.30 e 3.31) para mensurar precisamente as dimensões dos furos e comparar estas com o modelo CAD.

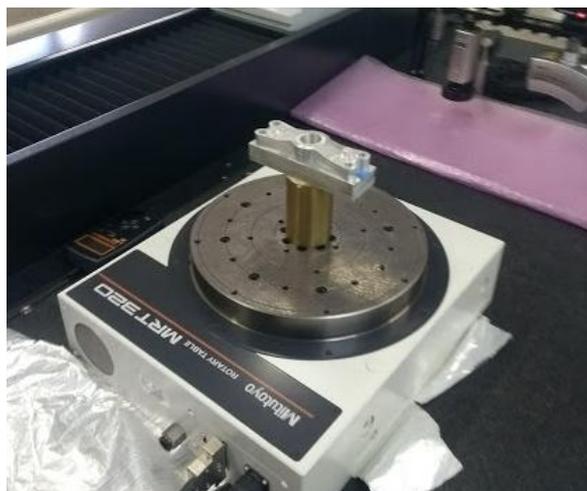


Figura 3.30: Peça na MMC (O autor)



Figura 3.31: Sensor apalpador SP25M (*probe*)

3.4 Estudo de Caso Engenharia Reversa: obtenção do modelo CAD a partir do modelo físico

Neste tópico serão descritas sucintamente as etapas para obtenção do modelo virtual utilizando práticas de Engenharia Reversa. O método proposto neste estudo tem o objetivo de reconstruir modelos físicos a partir de digitalizações. Como visto no capítulo anterior, esse processo pode ser resumido em duas etapas principais: digitalização e obtenção do modelo CAD 3D.

O modelo físico estudado foi uma hélice de ventilador danificada (Figura 3.32). Como finalidade prática, o modelo CAD foi construído a partir da malha triangular obtida na digitalização e, em seguida, foi realizada programação da usinagem do modelo em um fresamento de cinco eixos.

3.4.1 Digitalização

A digitalização corresponde ao processo de aquisição de dados das coordenadas geométricas de um modelo físico. Os pontos obtidos originam uma nuvem de pontos ou uma malha triangular a partir dos dados capturados no processo. O formato padrão de arquivo da malha triangular gerada é o STL (Stereolithography).

Um digitalizador a laser tridimensional foi utilizado para a obtenção dos dados geométricos da hélice. Este componente é integrado à máquina de medição por coordenadas, conferindo apreciável precisão à captura de dados.



Figura 3.32: Hélice de um ventilador utilizada como objeto de estudo (O autor)

Resumidamente, o processo de digitalização com auxílio de uma máquina de medição de coordenadas pode ser dividido nas seguintes etapas: definição da origem do sistemas de coordenadas; captura de pontos; geração da nuvens de pontos e/ou geração do modelo 3D em arquivo STL (Figuras 3.33 e 3.34).

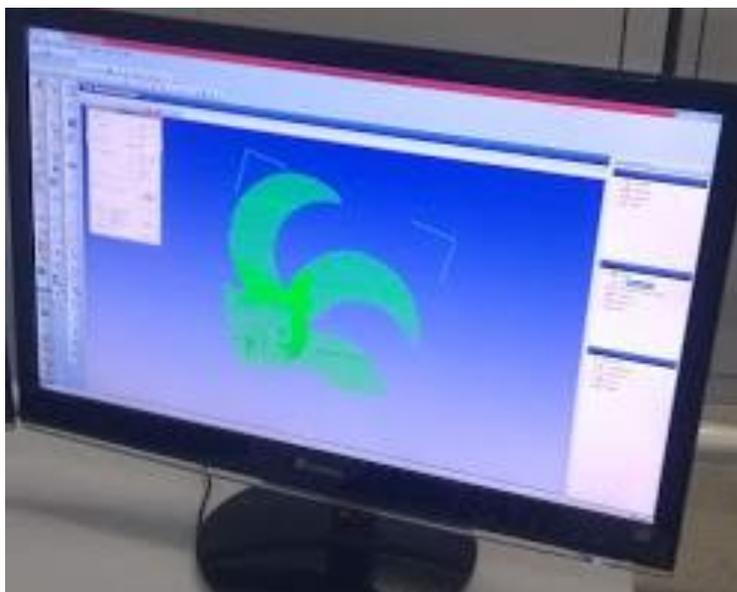


Figura 3.33: Nuvem de pontos (O autor)

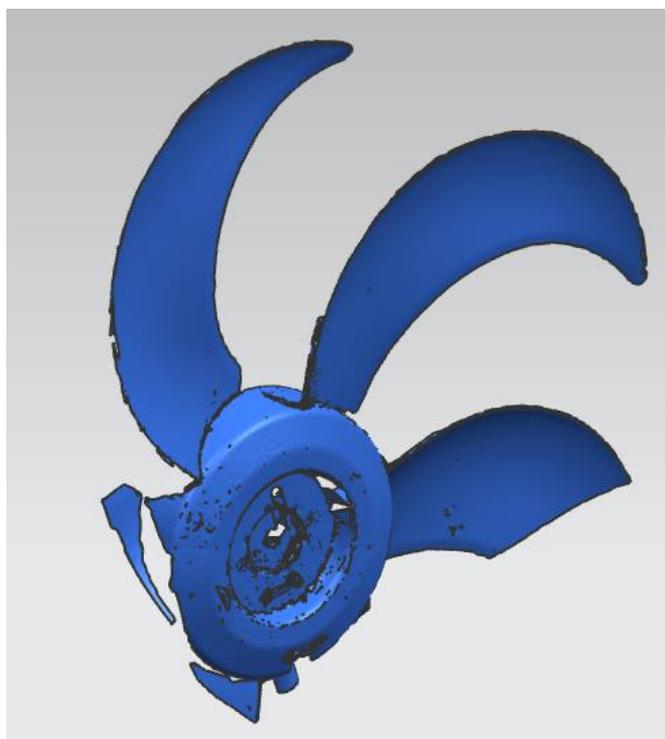


Figura 3.34: Modelo de malha triangular - STL (O autor)

3.4.3 Obtenção do modelo 3D sólido a partir de um arquivo STL

Após a digitalização, o modelo STL foi importado no *software* NX. Com a estrutura 3D sólida definida, pode-se recorrer à utilização de softwares CAM para a definição dos processos de usinagem e a criação do código CNC para a fabricação do modelo físico.

As práticas de modelagem usadas para obter um modelo sólido a partir de um arquivo STL consistem na criação de superfícies usando as faces do modelo como referência e na obtenção de curvas a partir da projeção ou corte de seções do modelo digitalizado.

A primeira etapa após a digitalização consiste no tratamento do modelo STL importado. Foram feitos ajustes e edições no modelo STL para proporcionar a obtenção de superfícies mais suaves e com dimensões próximas do modelo físico. As principais edições envolvem preenchimento de furos (Figura 3.35), reconstituição de áreas com ruídos e suavização de faces (Figura 3.36).

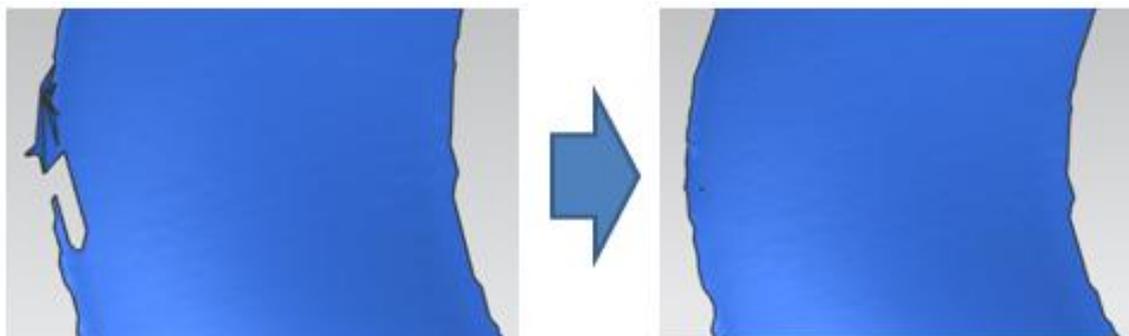


Figura 3.35: Preenchimento de furos e vazios (O autor)

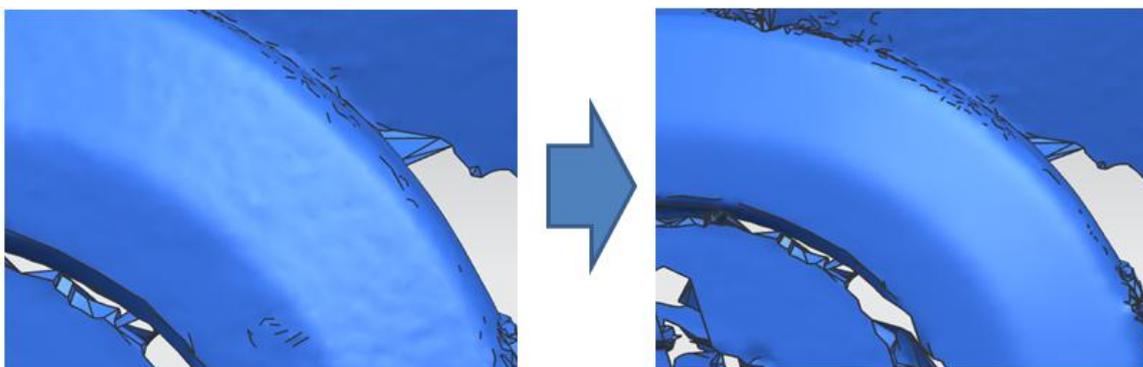


Figura 3.36: Suavização de superfícies (O autor)

Alguns modeladores de superfícies possibilitam a criação de superfícies usando como guia uma face de um modelo STL. O usuário deve especificar os limites nos quais a superfície deve ser formada (Figura 3.37). A criação desse tipo de superfície consiste na criação de quatro curvas que se fecham formando uma malha (superfície de malha ou rede). Esse é o principal tipo de superfície mais utilizada na Engenharia Reversa.

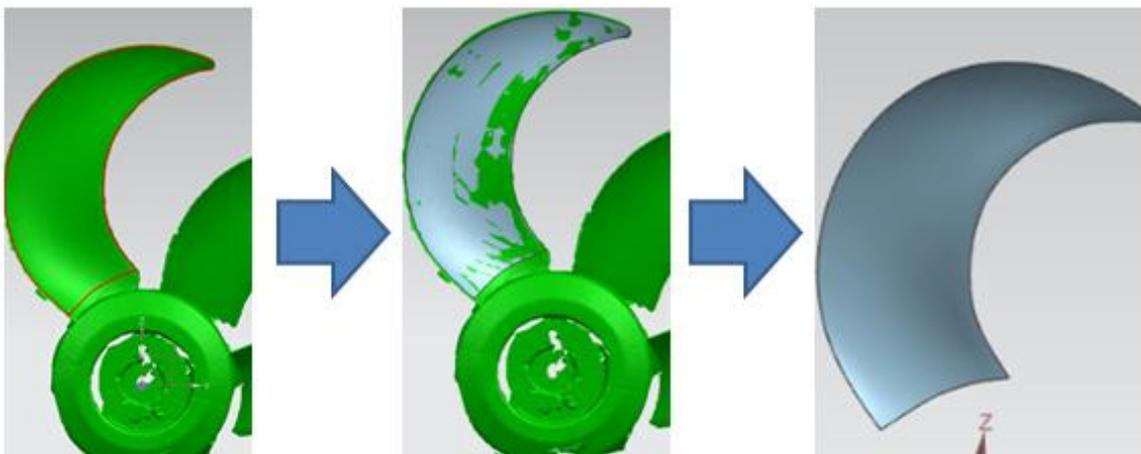


Figura 3.37: Face da hélice (O autor)

Através de comandos simples no NX CAD a superfície gerada foi transformada em um sólido (Figura 3.38).

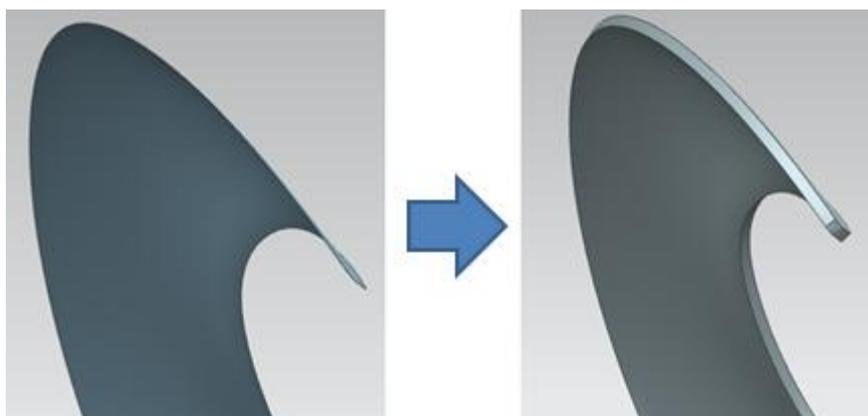


Figura 3.38: Transformação de uma superfície em um sólido (O autor)

Outro recurso para gerar um corpo sólido com base em um STL utilizado neste trabalho consistiu na obtenção de curvas a partir de cortes da seção no modelo digitalizado. Informações como curvas bases, alturas e ângulos, podem ser extraídas do modelo digitalizado através de cortes. As curvas dos cortes podem ser utilizadas diretamente ou servir

apenas como referência para construção de uma nova curva com menos imperfeições (Figura 3.39).

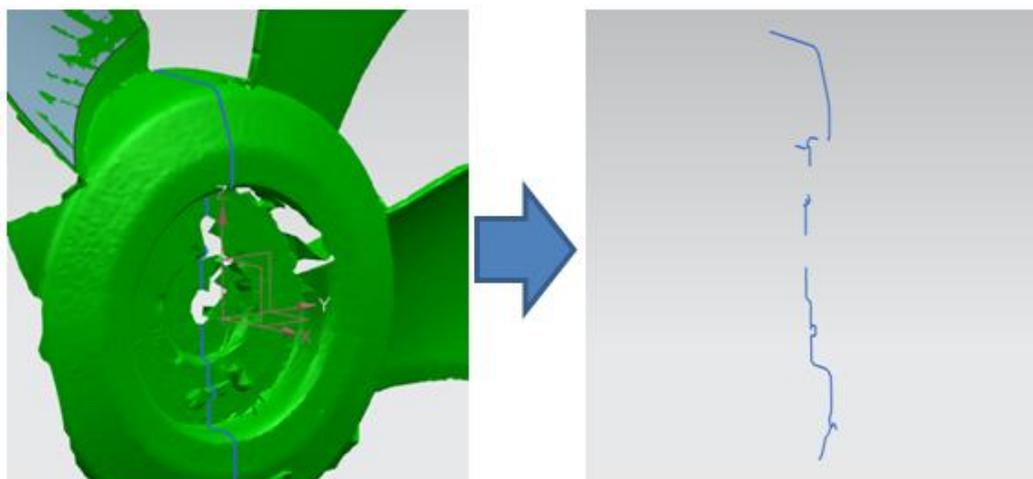


Figura 3.39: Curvas do corte (O autor)

Ajustes nas curvas foram realizados, pois as curvas obtidas através desse método apresentam grande número de segmentos e muita irregularidade. Por meio de um comando de ajuste de curvas, o NX cria uma nova curva usando como referência os pontos da curva anterior, mas com número reduzido de segmentos e tolerável continuidade de curvatura. Posteriormente foi criado o sólido 3D que representam a parte central da hélice (Figura 3.40).

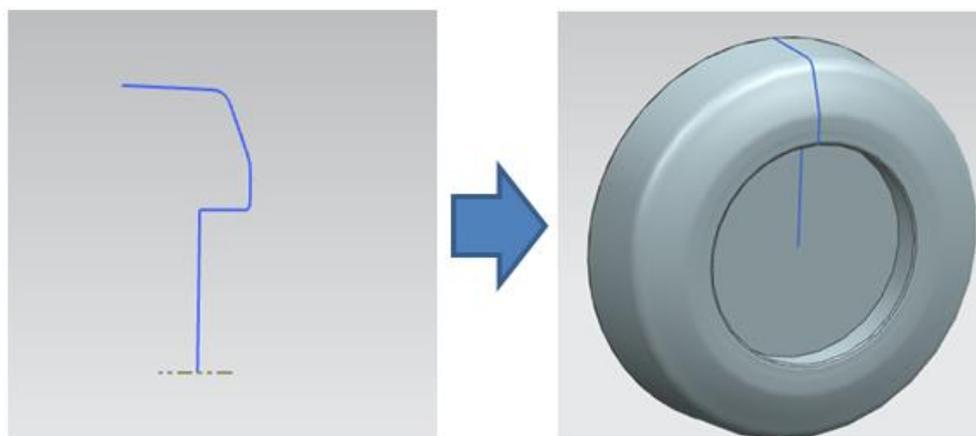


Figura 3.40: Criação de um sólido através de uma curva geratriz (O autor)

Por fim, as partes foram unidas dando origem ao modelo CAD 3D idêntico ao modelo físico da hélice (Figura 3.41).



Figura 3.41: Hélice reconstruída (O autor)

No presente capítulo foram apresentados e revisados os tópicos mais relevantes que este trabalho aborda. Foi visto a importância dos sistemas CAD para a indústria atual e algumas tendências dessa tecnologia para o futuro. Também foram mostrados os papéis fundamentais dos sistemas CAD/CAM na fabricação de peças em centros de usinagem e no auxílio ao processo de Engenharia Reversa, da aquisição de dados à fabricação do produto final.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta todos os resultados obtidos na fabricação do suporte com o auxílio de um sistema integrado CAD/CAM/CNC e no estudo de caso de reconstrução da hélice apresentado na seção 3.4 do capítulo anterior.

4.1 Programação CAM e Usinagem

Através do pós-processamento na etapa de programação CAM foi obtido o código G (código CNC) em formato de texto (.txt). Esse código contém as instruções em linguagem de máquina (CNC) para a usinagem do suporte (Apêndice A).

```
%
N0010 G40 G17 G90 G21 G94 (N0010 G40 G17 G90 G71)
N0020 G53 G00 Z0 H0 (N0020 G91 G28 Z0.0)
N0030 T20 (M06) (DESBASTE)
N0035 M06
N0040 G54 S1432 M03 T11
N0050 G00 G90 X-8.6106 Y14.7771 S1432 M03
N0060 G43 D20 Z10. H20
N0070 Z3.
N0080 G01 X-8.9951 Y16.603 Z2.5 F217.7 M08
N0090 X-8.9657 Y18.4717 Z2.
N0100 X-8.5521 Y20.2943 Z1.5
N0110 X-7.7723 Y21.9927 Z1.
N0120 X-6.5505 Y23.4010 Z1.5
```

Figura 4.1: Cabeçalho do código CNC - Primeiras linhas (O autor)

A Figura 4.2 apresentada a peça usinada. O tempo de usinagem estimado pelo software foi de aproximadamente uma hora. Os tempos das operações foram monitorados e a soma destes ficou em torno também de uma hora, confirmando a estimativa do software. Os tempos de troca de ferramenta são irrelevantes em comparação ao tempo total de usinagem graças ao sistema de troca rápida de ferramentas.



Figura 4.2: Suporte Usinado

A qualidade superficial da peça foi satisfatória, principalmente na região da calota esférica, onde foi reduzido o passe radial, resultando em um melhor acabamento em relação à rampa.

O aumento do avanço nas operações de desbaste e redesbaste é uma alternativa para reduzir o tempo de usinagem. Nas operações de acabamento esse aumento pode ser feito, mas como muita cautela, já que em operações de acabamento o avanço deve ser rigorosamente controlado para manter uma qualidade superficial aceitável.

Como comparação, foi criada uma nova programação sem a usinagem. Foram feitas alterações nos parâmetros de algumas operações. Esses parâmetros foram obtidos por um processo de *benchmarking*¹ através de dados obtidos de materiais e profissionais ligados à indústria. O principal parâmetro alterado foi o avanço. O tempo de usinagem caiu drasticamente, pois os novos parâmetros são próximos aos utilizados na indústria e são adequados para reduzir o tempo de usinagem e concomitantemente manter a qualidade superficial. No entanto, deve-se tomar cuidado com os parâmetros fornecidos pelos fabricantes das ferramentas, já que parâmetros fora da faixa na qual a ferramenta deve operar podem acentuar o desgaste da mesma. As figuras 4.3 e 4.4 mostram os tempos das operações estimados pelo software. Com a atualização dos parâmetros o tempo total de fabricação da peça reduziu para quatro vezes do tempo da peça usinada, que foi de aproximadamente 60 minutos.

Vale destacar que a escolha dos novos parâmetros levou apenas como critérios a rotação limite do eixo da máquina e os dados obtidos por *benchmarking*. Em uma situação real deve-se analisar as faixas de parâmetros das ferramentas especificados pelos fabricantes.

PEÇA_TCC				01:00:13
✓	DESBASTE	FTD16	16	00:18:32
✓	ZLEVEL_PRO...	FTD8	8	00:09:58
!	FUROS_DE_C...	BRO...	11	00:00:35
✓	FURAÇÃO_D6	BRO...	6	00:00:21
✓	FURAÇÃO_D...	BRO...	6	00:00:06
✓	FURAÇÃO_D11	BRO...	12	00:00:13
!	REDESBASTE	FTD8	8	00:00:58
!	ALARGAR_F...	FTD8	8	00:00:40
✓	ALARGAR_F...	FTD8	8	00:05:15
✓	ACABAMEN...	FTD8	8	00:01:55
!	ACABAMEN...	FRES...	4	00:17:45
!	ACABAMEN...	FRES...	4	00:02:31

Figura 4.3: Tempos Usinagem do Suporte (O autor)

PEÇA_TCC				00:15:22
!	DESBASTE	FTD16	16	00:02:48
!	FUROS_DE...	BRO...	11	00:00:35
✓	FURAÇÃO...	BRO...	6	00:00:21
✓	FURAÇÃO...	BRO...	6	00:00:06
✓	FURAÇÃO...	BRO...	12	00:00:13
!	REDESBASTE	FTD8	8	00:01:07
!	ALARGAR...	FTD8	8	00:00:12
!	ALARGAR...	FTD8	8	00:01:46
!	ZLEVEL_PR...	FTD8	8	00:02:04
!	ACABAME...	FTD8	8	00:00:27
!	ACABAME...	FRES...	4	00:03:50
!	ACABAME...	FRES...	4	00:00:41

Figura 4.4: Tempos Modificados (O autor)

¹ *Benchmarking* pode ser entendido como um processo de investigação relativo ao desempenho de processos e produtos, usando como referência aqueles identificados como melhores práticas (COSTA, 2011).

4.2. Medição dos furos

Medições dos diâmetros do furo com rebaixo (furos 1 e 2) do furo central (furo 3) do suporte usinado foram feitas na máquina de medição por coordenadas (Figura 4.1). A tabela 4.1 contém os valores nominais e os valores reais obtidos na medição.

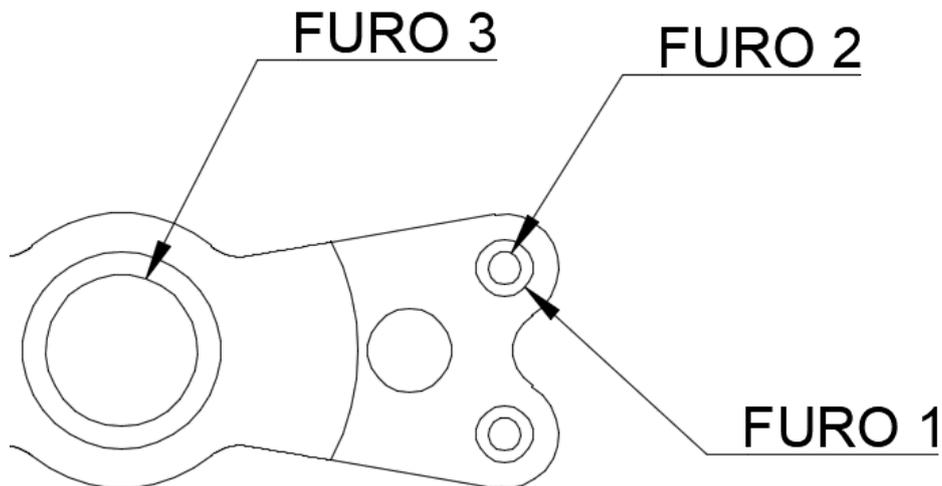


Figura 4.5: Localização dos furos

Medidas Diâmetros (mm)			
MEDIDAS	Nominal	Real	Erro
Furo 1 - diâmetro maior	10,000	9,978	0,022
Furo 2 - diâmetro menor	6,000	6,022	0,022
Furo 3- central	26,670	26,673	0,003

Tabela 4.1: Medidas dos furos

De acordo com a tabela, a maior diferença entre os valores reais e o de projeto ocorreu no diâmetro maior do furo com rebaixo (22 μm). A outra medida apresentara diferença desprezível em relação à dimensões nominais, demonstrando a eficácia dos processos mencionados no capítulo anterior na usinagem de furos e rebaixos.

Vale lembrar que os processos de medição por coordenadas, como todos os processos de mensuração, possuem incertezas que geram imprecisão nos resultados de medições. É de grande importância que os profissionais envolvidos no processo conheçam as diferentes fontes de erros da máquina e suas limitações para que possam ser estabelecidas estratégias de medição consistente e que venham a minimizar as influências nos resultados das aferições (OLIVEIRA, 2003).

4.3 Estudo de Caso Engenharia Reversa

Como abordado no capítulo anterior, para prosseguir com o processo de engenharia reversa após a digitalização, fez-se necessário o tratamento do modelo para ajustes na malha triangular digitalizada antes do modelamento do sólido 3D. Essa etapa foi realizada no próprio software NX CAD, uma vez que o mesmo dispõe de ferramentas para processamento e edição de STL. Como visto, foram aplicadas técnicas de modelagem de sólido e superfície para criar o modelo CAD a partir da malha de triângulos (Figuras 4.5 e 4.6).



Figura 4.5: Modelo sólido e STL (O autor)

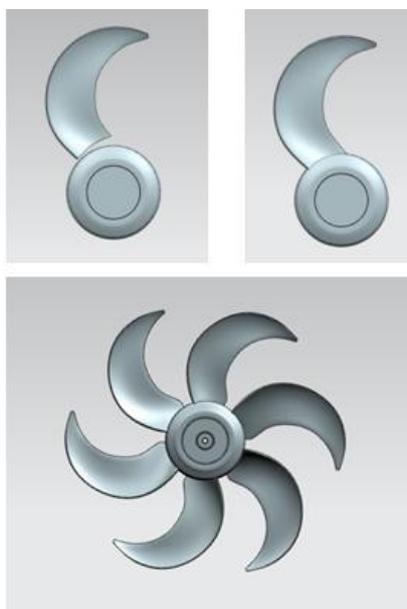


Figura 4.6: Reconstrução da hélice (O autor)

Através da análise de curvatura da superfície, pode-se verificar a suavidade adequada na maior parte da superfície da hélice e uma descontinuidade em uma região no centro da face (de transição de curvatura perto das superfícies). Esta mesma característica é notada no modelo físico (Figura 4.7).

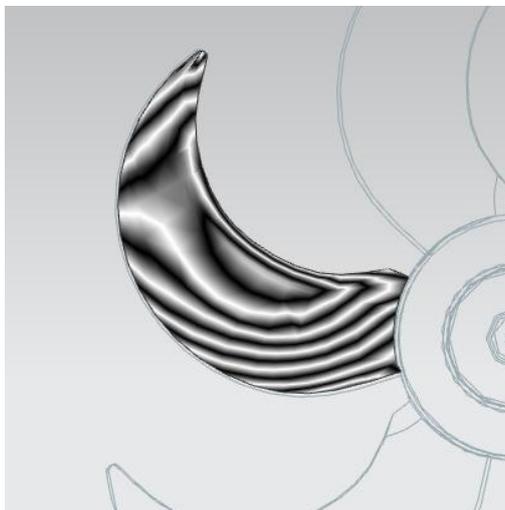


Figura 4.7: Análise de curvatura (O autor)

Na ponta da hélice (Figura 4.8) foi verificada uma descontinuidade que, provavelmente, pode ser atribuída à qualidade das curvas utilizadas na geração da superfície ou pelo número de segmentos de superfícies determinado automaticamente pelo software no uso do comando.



Figura 4.8: Descontinuidade de curvatura (O autor)

Na Figura 4.9 também pôde ser verificado uma descontinuidade da superfície da parte central da hélice. Esta superfície foi gerada através da curva após esta ser extraída o STL. Um reajuste na curva geratriz da superfície pode amenizar este defeito.



Figura 4.9: Parte Central da hélice (O autor)

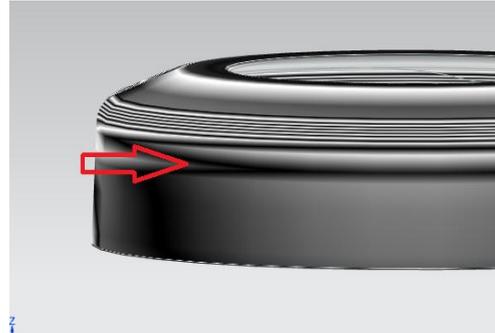
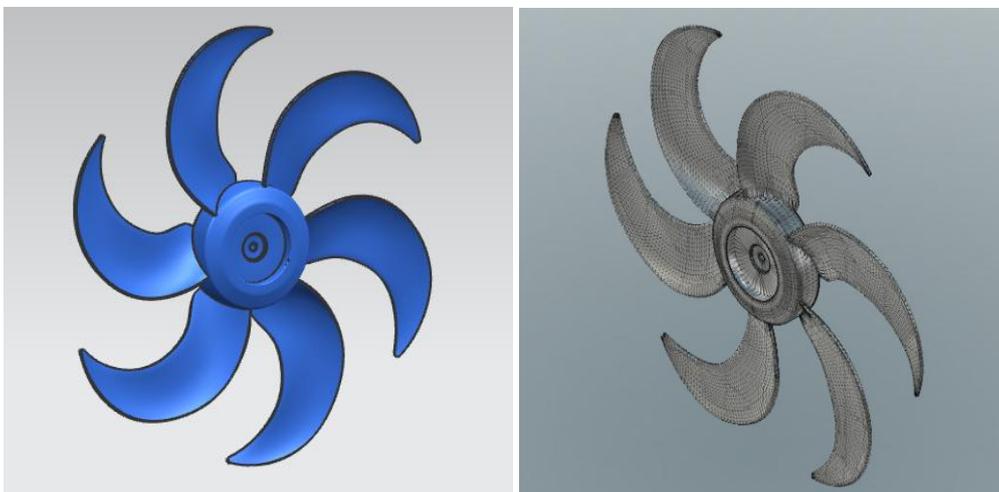


Figura 4.10: Análise da curvatura (O autor)

Dependendo da finalidade do modelo, os inconvenientes citados podem ou não ser ignorados. Para a programação CAM, por exemplo, descontinuidades de superfícies e curvas dificultam os cálculos de trajetórias pelo software resultando em um acabamento superficial de baixa qualidade.

Caso o arquivo CAD seja reconstruído para prototipagem rápida, descontinuidades de menor intensidade não causarão problemas, visto que modelos de malha triangular são utilizados para esse tipo de processo com ampla tolerância. Técnicas para edição e melhoramento de superfícies consistem na edição das curvas geratrizes, das curvas que compõem o arranjo de superfícies formadas por rede e edição da superfície propriamente dita. A edição de uma superfície pode ser feita através da alteração do número de longitudinais e laterais (curvas que formam uma malha para gerar uma superfície), ajuste da superfície de acordo com uma superfície existente, etc,

Após a finalização do modelo CAD sólido, o mesmo pode ser convertido de volta para STL para fins de prototipagem rápida ou para a comparação com um modelo físico digitalizado (Figuras 4.12 e 4.13).

Figura 4.12: Modelo STL da hélice reconstruída: *NX* (a esquerda) e *Fusion 360* (a direita)

4.3.1 Programação CAM do modelo reconstruído

Finalizando o processo de engenharia reversa com o auxílio de um sistema CAD/CAM, foi realizada a programação CAM do modelo reconstruído. Como a hélice possui superfícies com alto grau de suavidade e continuidade de curvatura, a usinagem em cinco eixos é recomendada na fabricação de peças com essas características. O software dispõe de um *template* de usinagem em cinco eixos (*multi-axis*). Dependendo da geometria da peça, o desbaste, redesbaste e/ou acabamento inicial podem ser realizados usando estratégias em três eixos (Figuras 4.13 e 4.14) e o acabamento final das superfícies mais complexas é realizado empregando estratégias em *multi-axis* (Figura 4.15).

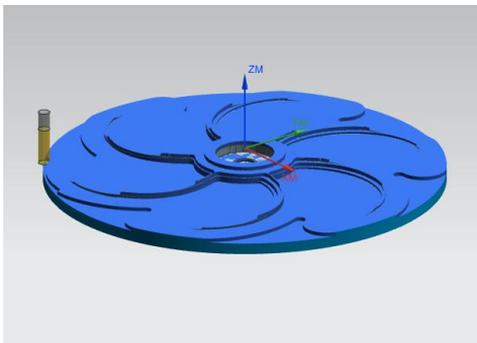


Figura 4.13: Desbaste (O autor)

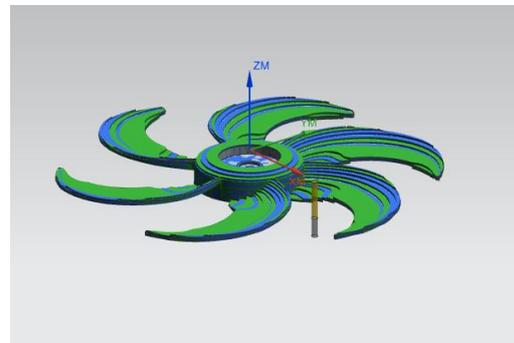


Figura 4.14: Redesbaste (O autor)

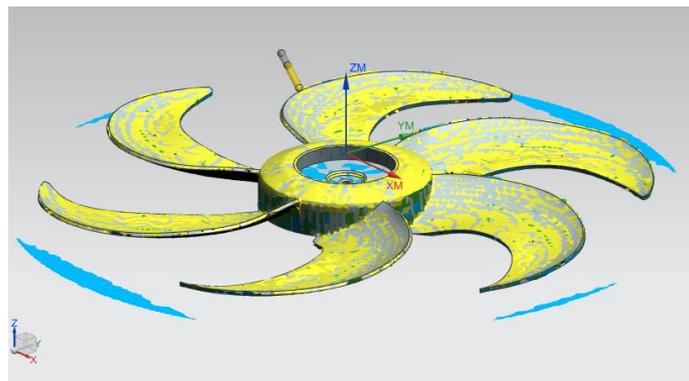


Figura 4.15: Acabamento em cinco eixos - NX (O autor)

5 CONCLUSÕES

Os sistemas integrados CAD/CAM/CNC possuem ferramentas imprescindíveis para suprir todo o processo de manufatura de uma peça, da concepção e idealização do produto ao processo de fabricação, permitindo a produção de peças com geometria complexas, otimização de tempo e custo, e aumento da competitividade das corporações.

A Engenharia Reversa (ER) é uma tecnologia que permite criar modelos virtuais a partir de peças reais. Portanto, é possível produzir novas peças, produtos e montagens baseados em modelos físicos existentes. Além disso, a ER permite correção e melhoria de modelos, inspeção de produtos, além de poder gerar documentação.

A captura dos pontos das superfícies de uma peça, na qual estes pontos são referenciados em um sistema de coordenadas, é realizada através do processo de digitalização. Com a nuvem de pontos é possível gerar um sólido ou superfície de malha triangular e a partir disto gerar um modelo CAD. A metodologia e ferramentas de Engenharia Reversa proposta neste trabalho permitiram a reconstrução do modelo físico em um ambiente CAD. O modelo obtido pode ser usado como documentação, ser convertido em STL para prototipagem rápida ou usado em um ambiente CAM para geração do código CNC, como foi exemplificado neste trabalho.

7.1 As principais conclusões deste trabalho estão apresentadas a seguir:

- A tecnologia CAD surgiu para proporcionar a criação de produtos com melhor qualidade, otimização de tempo e redução de custo. Esse sistema ajudou e continuará ajudando na melhoria de processos e inovação devido ao seu tamanho potencial;
- A metodologia aplicada neste trabalho para a usinagem de uma peça empregando um sistema integrado CAD/CAM/CNC permitiu uma visão sistemática de todo o processo;
- A metodologia proposta neste trabalho atendeu satisfatoriamente as expectativas no que diz respeito ao uso eficaz de sistemas CAx no apoio ao projeto e à fabricação de peças e componentes. O conjunto de etapas propostas permite o controle de todo o processo, podendo o usuário revisar e editar os estágios de acordo com o que é requisitado no projeto.
- Sistemas CAD/CAM são capazes de programar para a usinagem peças com geometrias complexas que antes eram obtidas por meio de outros processos de fabricação;

- Através da digitalização pode-se obter dados geométricos de uma peça para auxiliar nos processos de inspeção, melhorias, documentação e, principalmente, reprodução de modelos físicos;
- Os métodos e ferramentas de modelamento CAD com base em um STL apresentados neste trabalho auxiliam na reprodução de uma gama de modelos físicos de geometrias variadas;

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, a complementação do tema pode se estender através da sugestão dos seguintes assuntos;

- Aplicar a metodologia aplicada neste trabalho em outro software CAD/CAM e fazer uma comparação com o este trabalho para aperfeiçoar a proposta de uma metodologia genérica;
- Uso do sistema integrado CAD/CAE/CAM/CNC para fabricar uma peça que irá sofrer carregamentos mecânicos;
- Comparação entre as ferramentas de modelagens voltadas para a reconstrução de um modelo digitalizado disponíveis em diversos sistemas CAD;
- Criação de moldes de injeção a partir de modelos CAD reconstruídos com as técnicas e conceitos de Engenharia Reversa apresentados neste trabalho;

6 REFERÊNCIAS

- CACCERE, J. SANTOS, A. “Sustentabilidade no Projeto e Manufatura de Produto Através da Fabricação Digital”. 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Vol. 9, 2016.
- CAI, Y. NEE, A. LOH, H. Geometric feature detection for Reverse Engineering using range imaging. *Journal of visual communication and image representation*. Vol. 7, n3. September, 1996.
- COSTA D. PEREIRA, A. Desenvolvimento e avaliação de uma tecnologia de baixo custo para programação CNC em pequenas empresas. *Produção*, v. 16, n.1, p. 048-063, Jan./Abr. 2006;
- COSTA, D. FORMOSO, T. Fatores chaves de sucesso para sistemas de indicadores de desempenho para benchmarking colaborativo em empresas construtoras. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 3, p. 143-159, jul./set. 2011. Porto Alegre-RS
- FERNANDES, B. SÁNCHEZ, J. Realidade Aumentada Aplicada ao Design. *Holos*, Ano 24, Vol. 1. 2008;
- FERNEDA, A. Integração Metrologia, CAD e CAM: uma Contribuição ao Estudo de Engenharia Reversa. Dissertação (Mestrado). São Carlos. Universidade de São Paulo, 1999;
- FIGUEIRA, R. CAD/CAM/CNC/CIM. Projeto em Licenciatura em Computadores e Sistemas. Instituto Politécnico do Porto. 2002;
- FIGUEIREDO, A. FILHO, E. As Práticas de Sistemas CAD e sua Contribuição: Survey na Indústria Metal-Mecânica Mineira. *Produção*, Dez. 2010;
- GENEROSO, D. Usinagem Avançada (Torneamento). Apostila Curso Técnico em Eletromecânica. Instituto Federal de Santa Catarina, 2011. Araranguá-SC;
- GENGHINI, P. O Processo de Engenharia Reversa, com a utilização de sistemas de digitalização óptica sem contato de superfície e sua aplicabilidade na indústria automotiva. Monografia apresentada ao programa de pós-graduação e Engenharia Automotiva de Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2013. São Caetano do Sul-SP;
- GERSHENFELD, N. FAB: The Coming Revolution on Your Desktop - from Personal Computers to Personal Fabrication. Nova Iorque: Basic Books, 2005;

- LEÃO, L. CAD, CAE e CAM. Blog de Engenharia Elétrica Moderna. Disponível em <<https://www.e3seriescenter.com/blog-engenharia-eletrica-moderna/cad-cae-e-cam-qual-a-diferenca>>. Acesso em 6 de Fevereiro de 2019;
- NEWTON, R. Porquê o CAD 2D ainda é importante. Publicado em Consilia Vektor. Disponível em: <<https://www.metaconsultoria.com/modelagem-2d-e-3d-e-sua-importancia-para-o-desenvolvimento-de-produtos>>. Acesso em 25 de Fevereiro de 2019;
- OLIVEIRA, A. Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle de qualidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Florianópolis-SC;
- PROCONCEPT. O CAD do Futuro. Disponível em: <<http://www.proconcept.com.br/blog/o-cad-do-futuro/>>. Acesso em: 25 de Fevereiro de 2019;
- SACCHI, R.; POLIAKOFF J. F.; HÄFELE K.-H. Improved Extraction of Planar Segments for Scanned Surfaces. IEEE. Department of Computing The Nottingham Trent University. Burton Street, Nottingham. England. 2000;
- SANTOS, E. CAD/CAM/USINAGEM Integrado à Engenharia Reversa. Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira – SP. UNESP, 2017;
- SILVA, A. Desenvolvimento Integrado CAD/CAM de Componentes para Turbina a Gás. Tese de Doutorado. São José dos Campos-SP. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2006;
- SOUZA, A. ULBRICH, C. Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC. 2ª Edição, Editora Artliber, São Paulo, 2013;
- ULBRICH, C. Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida: Estudo de Casos. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2003. Campinas-SP.

APÊNDICE A**PRIMEIRA PÁGINA DO CÓDIGO**

%
N0010 G40 G17 G90 G21 G94 (N0010 G40 G17 G90 G71)
N0020 G53 G00 Z0 H0 (N0020 G91 G28 Z0.0)
N0030 T20 (M06) (DESBASTE)
N0035 M06
N0040 G54 S1432 M03 T11
N0050 G00 G90 X-8.6106 Y14.7771 S1432 M03
N0060 G43 D20 Z10. H20
N0070 Z3.
N0080 G01 X-8.9951 Y16.603 Z2.5 F217.7 M08
N0090 X-8.9657 Y18.4717 Z2.
N0100 X-8.5521 Y20.2943 Z1.5
N0110 X-7.7723 Y21.9927 Z1.
N0120 X-6.6595 Y23.4942 Z.5
N0130 X-5.2615 Y24.7345 Z0.0
N0140 X-3.6381 Y25.6604 Z-.5
N0150 X-1.8589 Y26.2323 Z-1.
N0160 X0.0 Y26.3957 Z-1.5
N0170 X80.3317
N0180 X81.3908 Y26.378
N0190 G02 X82.0749 Y25.9226 I-.2188 J-1.0703
N0200 X82.2011 Y25.5936 I-.939 J-.5487
N0210 G01 X82.2215 Y24.5508
N0220 Y-24.5501
N0230 X82.2013 Y-25.5711
N0240 G02 X81.7435 Y-26.2521 I-1.0818 J.2328
N0250 X81.4067 Y-26.3779 I-.5503 J.9596
N0260 G01 X80.3324 Y-26.3957
N0270 X-80.3324
N0280 X-81.4067 Y-26.3779
N0290 G02 X-81.7435 Y-26.2521 I.2136 J1.0854
N0300 X-82.2013 Y-25.5711 I.624 J.9139
N0310 G01 X-82.2215 Y-24.5501
N0320 Y24.5508
N0330 X-82.2015 Y25.5711
N0340 G02 X-81.7439 Y26.2518 I1.0824 J-.2335
N0350 X-81.4063 Y26.3778 I.5513 J-.9627
N0360 G01 X-80.3317 Y26.3957
N0370 X0.0
N0380 Y12.3957
N0390 X68.2215
N0400 Y-12.3957
N0410 X-68.2215
N0420 Y12.3957
N0430 X0.0
N0440 Y3.3957
N0450 X59.2215
N0460 Y-3.3957
N0470 X-59.2215
N0480 Y3.3957