



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

WELLYSON CARLOS PONTES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE ENGENHARIA REVERSA E OBTENÇÃO DO
MOLDE EM UMA PEÇA DE GEOMETRIA COMPLEXA**

**JOÃO PESSOA
2019**

WELLYSON CARLOS PONTES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE ENGENHARIA REVERSA E OBTENÇÃO DO
MOLDE EM UMA PEÇA DE GEOMETRIA COMPLEXA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal da Paraíba, como requerido para a
obtenção do diploma de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador. Prof. Dr. José Carlos de Lima
Júnior

**JOÃO PESSOA - PB
2019**

S586a Silva, Wellyson Carlos Pontes da.

APLICAÇÃO DE ENGENHARIA REVERSA E OBTENÇÃO DO MOLDE EM
UMA PEÇA DE GEOMETRIA COMPLEXA / Wellyson Carlos Pontes
da Silva. - João Pessoa, 2019.
76 f. : il.

Orientação: José Júnior.

TCC (Especialização) - UFPB/Tecnologia (CT).

1. Engenharia Reversa. I. Júnior, José. II. Título.

UFPB/BC

WELLYSON CARLOS PONTES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE ENGENHARIA REVERSA E OBTENÇÃO DO
MOLDE EM UMA PEÇA DE GEOMETRIA COMPLEXA**

Trabalho de conclusão de curso – TCC, apresentado pelo graduando WELLYSON CARLOS PONTES DA SILVA, do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, tendo obtido o conceito _____, conforme a apreciação da banca examinadora.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR
ORIENTADOR

Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA

Dr. PEDRO VALENTIM DANTAS JÚNIOR

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Wiliken Carlos e Arlete Pontes, minha irmã Amanda e minha namorada Adriana, por acreditarem e investirem em mim; ao professor José Carlos pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida, família e amigos;

Aos meu pais, Wiliken Carlos e Arlete Pontes, por fazerem o possível e impossível para que eu pudesse chegar onde cheguei;

A minha namorada, Adriana Fernandes, pelo amor, apoio, encorajamento e compreensão;

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior, pela supervisão, inspiração, conselhos e ideias, cujos quais tornaram possível a conclusão deste trabalho;

Ao Prof. Dr. João Bosco, pelo assessoramento e disponibilização do Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP).

Ao Dr. Pedro Valentim pela honra cedida em fazer parte da banca avaliadora do presente trabalho;

Ao técnico Manuel Fidelis pela ajuda, atenção, dedicação e acompanhamento das atividades realizadas ao longo do trabalho;

A empresa Guaraves Guarabira Aves Ltda, por ceder a peça em estudo;

Aos meus colegas de trabalho, Alexsander Medeiros, Antônio Vieira, Iuri Dantas e Marcos Antônio, por confiarem e acreditarem em meu trabalho;

A Wellington Pereira dos Anjos, pelos ensinamentos de usinagem que tornaram possível a realização do trabalho;

Aos meus grandes amigos Yago Ferreira e Taivson Liberato, companheiros de curso que levarei para toda a vida;

Finalmente, aos demais que, de maneira direta ou indireta, fizeram parte da minha formação academia, deste sonho.

Agradeço.

RESUMO

O presente trabalho aborda a aplicação e resultados da engenharia reversa na replicação de uma peça, com auxílio de uma Máquina de Medição por Coordenadas para escaneamento do modelo estudo, juntamente com uma plataforma integrada CAx para realização de modelagem e análises CAE e CAM. Tendo como objetivo principal a aplicação da engenharia reversa na manufatura de uma peça de geometria complexa, analisando a influência dos parâmetros de fabricação. Inicialmente a peça, que foi gentilmente cedida pela Guaraves, foi escaneada com uma Máquina de Medição por Coordenadas, gerando um arquivo com extensão STL, que em seguida foi tratado e modelado para obtenção da geometria 3D, em seguida iniciou-se um aprofundamento na aplicação de sistemas integrados CAD/CAE/CAM/CNC com o objetivo da realização da engenharia reversa, em todas suas etapas, em uma única plataforma. Conclui-se que as ferramentas CAx são de extrema importante para a competitividade das empresas, oferecendo recursos para otimização do processo produtivo, onde se consegue uma maior qualidade com um menor custo, utilizando ainda a engenharia reversa para prototipagem rápida, otimizando o tempo e novamente o custo envolvido no projeto.

Palavras-chaves: Engenharia reversa; Sistemas integrados CAx; Manufatura

ABSTRACT

The present work addresses the application and results of reverse engineering in the replication of a part, with the aid of a coordinate measuring machine for scanning the study model, together with an integrated CAx platform for CAE and CAM modeling and analysis. Having as main objective the application of reverse engineering in the manufacture of a piece of complex geometry, analyzing the influence of the manufacturing parameters. Initially the piece, which was kindly provided by Guaraves, was scanned with a coordinate measuring machine, thus generating the STL, which was then treated and modeled to obtain the 3d geometry, then a deepening in the application of systems began. CAD / CAE / CAM / CNC with the goal of reverse engineering, in all its stages, in a single platform. It can be concluded that CAx tools are extremely important for companies' competitiveness, offering resources to optimize the production process, where higher quality is achieved at a lower cost, using reverse engineering for rapid prototyping, optimizing time and again. the cost involved in the project.

Keywords: Reverse engineering; CAx integrated systems; Manufacturing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Navio quinquerre (Wikipédia)	18
Figura 2- Imagem geradas por pontos subsequentes (Will Barcellos)	19
Figura 3- Nuvem de pontos de um mouse em formato de carro (autor)	20
Figura 4 – Procedimento de análise de engenharia reversa (Raja e Fernandes, 2008).....	21
Figura 5 - Máquina de Medição por Coordenadas (Catálogo da empresa Hexagon Manufacturing Intelligence)	22
Figura 6- Malha formada por elementos triangulares e nós (4i engenharia).....	24
Figura 7- Resultados de análises CAE (FORCE engenharia)	24
Figura 8- Exemplo de um molde (FARHAN, 2019)	26
Figura 9- Colher evisceradora (autor)	30
Figura 10- Máquina de medição por coordenadas utilizada no estudo (JUNIOR, 2017)	31
Figura 11 - Magazine ACR3, equipado com sensores do tipo visão e a laser (JUNIOR, 2017)	31
Figura 12- Definição do plano.....	32
Figura 13- Definição do centro de coordenadas do sistema.....	32
Figura 14 – Imagem gerada pelo software da máquina de medição por coordenadas	33
Figura 15 – STL da peça.....	33
Figura 16- Colher de baixo.....	34
Figura 17- Colher de cima	34
Figura 18- Corpo de baixo.....	35
Figura 19- Corpo de cima.....	35
Figura 20- Base.....	35
Figura 21 – Suavização das superfícies da colher de baixo	36
Figura 22- Definição de superfícies via cor.....	36
Figura 23 – Legendas de atributos das cores das superfícies	37
Figura 24 – Superfície automática da colher de baixo	38
Figura 25 – Edição da superfície automática da colher de baixo	38
Figura 26 – Superfícies editadas das colheres de cima e baixo, respectivamente.....	39
Figura 27- Extrude da superfície de baixo na direção negativa de y.....	39
Figura 28 – Extrude da superfície de cima na direção positiva de x	39
Figura 29 – Extrude de curva guia em ambas as direções em z	40

Figura 30 – Intersecção e espalhamento dos extrudes gerados	40
Figura 31 – Curva guia do corpo de cima	41
Figura 32 – Corpo gerado.....	41
Figura 33 – Base gerada	41
Figura 34 – Análise CAE do escoamento do fluido na peça montada	42
Figura 35 - Tempo de escoamento do metal fundido INOX 316 no molde	43
Figura 36 - Moldabilidade do molde	44
Figura 37 - Possíveis pontos com bolhas de ar.....	44
Figura 38 – Análise das condições de moldabilidade.....	45
Figura 39 – Análise das condições de moldabilidade.....	46
Figura 40 – Cubo primário para geração do molde	47
Figura 41 – Definição de Cavity e Core da base	47
Figura 42 - Definição de Cavity e Core do corpo.....	48
Figura 43 - Definição de Cavity e Core da colher	48
Figura 44 – Molde da base	48
Figura 45 – Molde do corpo	49
Figura 46 – Molde da colher	49
Figura 47 – Desgastes na ferramenta ao usinar Inox 316 (Sandvik Coromant)	50
Figura 48 – Molde superior da base	51
Figura 49 – Blank com 5mm de sobremetal em cada lado do molde e zero máquina definido	52
Figura 50 – Parâmetros no software para desbaste.....	53
Figura 51 – Tempo do CAM do molde da parte de baixo da base	54
Figura 52 – Movimento da ferramenta no CAM do molde da parte de baixo da base.....	54
Figura 53 - Tempo do CAM do molde superior da base	56
Figura 54 - Movimento da ferramenta no CAM do molde superior da base.....	56
Figura 55- Acabamento do molde superior da base	57
Figura 56 – Molde inferior da base	58
Figura 57 - Blank com 5mm de sobremetal em cada lado do molde	58
Figura 58 - Tempo do CAM do molde inferior da base	59
Figura 59 - Movimento da ferramenta no CAM do molde inferior da base.....	59
Figura 60 – Acabamento do molde superior da base.....	60
Figura 61 - Peça após moldagem.....	60
Figura 62 – Tempos de furação da base moldada em INOX 316.....	61

Figura 63 – Caminho da ferramenta na furação da base em INOX 316	61
Figura 64 - Tempos de usinagem da base em INOX 316.....	62
Figura 65 - Caminho da ferramenta na base em INOX 316.....	63
Figura 66 – Base finalizada	63
Figura 67 – Molde do corpo	64
Figura 68 – Tempo de usinagem do molde do corpo	65
Figura 69 – Caminhos da ferramenta na usinagem do molde do corpo	65
Figura 70 – Acabamento superficial do molde do corpo (mm).....	66
Figura 71 – Tempos de usinagem da peça em INOX 316.....	67
Figura 72 – Caminhos da ferramenta na usinagem em INOX 316	67
Figura 73 – Acabamento superficial da peça finalizada.....	67
Figura 74 – Tempos de usinagem do molde superior da colher.....	68
Figura 75 – Caminhos da ferramenta no molde superior da colher.....	69
Figura 76 – Acabamento superficial do molde da colher.....	69
Figura 77 – Tempos de usinagem do molde inferior da colher.....	70
Figura 78 – Caminhos da ferramenta no molde inferior da colher.....	71
Figura 79 – Acabamento superficial do molde inferior da colher.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na usinagem da peça.....	51
Tabela 2 – Parâmetros de usinagem automáticos para o CAM do molde da parte de baixo da base	53
Tabela 3 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde superior da base	55
Tabela 4 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde inferior da base	57
Tabela 5 - Parâmetros de usinagens regulados para a furação da base em INOX 316	61
Tabela 6 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM da base em INOX 316	62
Tabela 7 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde do corpo.....	64
Tabela 8 - Parâmetros de usinagens para o CAM do corpo em INOX 316	66
Tabela 9 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde superior da colher	68
Tabela 10 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde inferior da colher	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Desing
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Comando Numérico Computadorizado
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
STL	Stereolithography
ISO	International Organization for Standardization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 ENGENHARIA REVERSA APLICADA EM SISTEMAS CAD/CAE/CAM	15
1.2 MOTIVAÇÃO	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 ENGENHARIA REVERSA	18
2.1.1 ORIGENS DA ENGENHARIA REVERSA	18
2.1.2 ETAPAS	19
2.1.3 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (MMC)	21
2.2 INTRODUÇÃO A ELEMENTOS FINITOS E ANÁLISE CAE	23
2.3 PROJETO DE MOLDES EM UM SOFTWARE	25
2.5 PROGRAMAÇÃO CAM/CNC	27
3 METODOLOGIA	29
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	29
3.1.1 PEÇA ESTUDADA	29
3.1.2 MMC UTILIZADA	30
3.1.3 SOFTWARE INTEGRADO	31
3.2 DIGITALIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO	32
3.3 TRATAMENTO DO MODELO STL NO SOFTWARE CAD/CAE/CAM	34
3.4 TÉCNICAS DE MODELAGEM PARA ENGENHARIA REVERSA	36
3.5 ANÁLISE CAE DO MODELO CAD OBTIDO	41
3.5.1 PRÉ-PROCESSAMENTO	42
3.5.2 PROCESSAMENTO	42
3.5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	43
3.6 PROJETO DE MOLDE A PARTIR DO MODELO CAD	45
3.7 PROGRAMAÇÃO CAM DO MOLDE E CAD	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 BASE	51

4.2 CORPO.....	63
4.3 COLHER	68
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
5.1 PRINCIPAIS DIFICULDADES	72
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
6 REFERÊNCIA.....	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENGENHARIA REVERSA APLICADA EM SISTEMAS CAD/CAE/CAM

Com a globalização e a indústria 4.0, aumenta a competitividade das empresas por seu lugar no mercado, como resultado tem-se produtos com menores custos, prazos e com uma maior qualidade, diante disto a engenharia reversa vem sendo empregada para suprir tais demandas.

A engenharia reversa consiste na obtenção de um produto ou objeto a partir de um já existente, seja pelo fato de descobrir o funcionamento a partir da análise de sua estrutura e montagem como até mesmo a obtenção da tecnologia de construção, acelerando o processo de fabricação do objeto em estudo.

Segundo Ponticelli e Aurélio (2010), “A Engenharia Reversa é um processo de duplicação de uma peça, de maneira que se possa copiá-la, tanto funcional quanto dimensionalmente, através de medição e avaliação da superfície da peça, com suporte dos dados técnicos da mesma”.

Raja e Fernandes (2008) mencionam a importância da engenharia reversa na redução dos custos e tempo no projeto de um novo objeto: “No intenso mercado global competitivo, os fabricantes estão constantemente buscando novas formas de encurtar os prazos de entrega para comercializar um novo produto”.

“O menor investimento financeiro e prazos reduzidos de desenvolvimento já são por si só importantes, mas o fato de lançar um produto novo baseado em algo que já obteve o reconhecimento do mercado é, talvez, o maior dos atrativos, principalmente pela redução dos riscos do investimento feito” (NOGUEIRA et al.2006).

A implementação de sistemas computacionais assistidos é de fundamental importância para a boa execução da engenharia reversa, diante disto empresas que desenvolvem sistemas computacionais passaram a disponibilizar seus produtos de maneiras mais acessíveis, com linguagem mais simples, layout amigável e um menor custo de aquisição, o que facilitou a difusão da engenharia reversa em pequenas e médias empresas

Neste trabalho serão apresentados vantagens, conceito e aplicação da engenharia reversa com auxílio de sistemas computacionais assistidos e integrados, os chamados CAx, fazendo um comparativo com a manufatura de construção convencional da peça estudada

1.2 MOTIVAÇÃO

Com o avanço dos hardwares e softwares, a aplicação da engenharia reversa fica cada dia mais acessível, contudo, as instituições de ensino têm dificuldade de acompanhar o surgimento e crescimento de tecnologias, deixando o aluno com um déficit em determinados setores, diante disto surge a necessidade de um estudo detalhado de novas tecnologias.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Realizar engenharia reversa numa colher evisceradora cedida pelo grupo Guaraves, com auxílio de Máquina de Medição por Coordenadas, discutindo-se as etapas de modelagem, usinagem e obtenção do molde para injeção, como também fazer um comparativo de qual o melhor método para obtenção da peça estudada.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obter o modelamento 3D da colher evisceradora a partir de um modelo STL gerado por uma Máquina de Medição por Coordenadas;
- Utilizar engenharia reversa para reconstruir a peça;
- Realizar estudo CAE;
- Fazer o molde para injeção da peça;
- Fazer CAM da peça.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos, sendo o primeiro uma visão geral de todo o trabalho realizado.

O segundo capítulo, com título de Revisão Bibliográfica, tem o intuito de apresentar conceitos pertinentes na engenharia reversa, sua história e aplicações, junto com uma introdução aos sistemas CAD/CAE/CAM/CNC.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados nos experimentos, e em todo o presente estudo, tal capítulo denominado de Metodologia tem a premissa de mostrar ao leitor a metodologia aplicada para a reconstrução da peça em estudo, indo desde levantamentos materiais, até mesmo a informações técnicas de uso dos materiais e metodologia da engenharia reversa.

No quarto capítulo, com título de Resultados e Discussões, é apresentado os resultados obtidos com a aplicação da metodologia do terceiro capítulo, analisando e discutindo os resultados.

Em seguida o quinto capítulo apresentado como Conclusão, apresentando comentários e considerações finais acerca do estudo realizado, como sugestões para outras formas de replicar a peça dependendo da finalidade.

Por fim temos as Referências bibliográficas, onde são apresentados os trabalhos, livros, artigos e sites, utilizados para o desenvolvimento do presente estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENGENHARIA REVERSA

2.1.1 ORIGENS DA ENGENHARIA REVERSA

O termo “engenharia reversa” tem origem em análise de hardware para obtenção de vantagem comercial ou militar, o objetivo era deduzir as decisões do design de produtos finais com poucas informações, muitas vezes sequer tinha alguma informação, contudo existem relatos históricos de engenharia reversa entre 264-241 A.C, durante a primeira guerra punica onde a marinha romana, após conquistar navios de Cartago, equipou sua tropa com navios semelhantes aos capturados, com fabricação de 200 quinqueremes (embarcação de guerra) em apenas 60 dias, a Figura (1) mostra um exemplo de navio quinquereme.

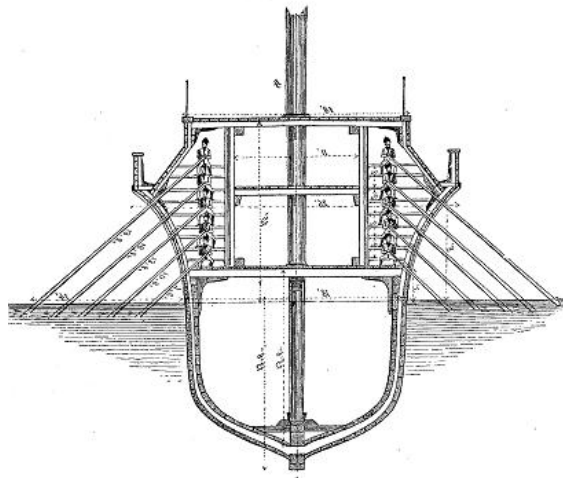


Figura 1- Navio quinquereme (Wikipédia)

Atualmente o processo de engenharia reversa é amplamente empregado em diversos setores, como exemplo os estúdios de design industrial, onde primeiro trabalham em um meio físico como argila ou espuma antes de criar um modelo CAD de uma peça, sendo assim engenharia reversa, outra aplicação notável é na medicina, próteses são fabricadas via engenharia reversa, com o escaneamento de parte do membro amputado, com o intuito de obter uma prótese confortável e ergonômica.

Segundo Hoschek e Dankwort (1996), “Engenharia reversa em sua definição completa refere-se ao processo de criação de um protótipo completamente projetado, um clone em forma e função, a partir de uma parte física.”

2.1.2 ETAPAS

A engenharia reversa por ser dividida em duas etapas: digitalização do modelo físico e criação do modelo CAD a partir dos dados digitalizados (SOUZA, 2013), de acordo com Falheiro (2019) “A digitalização consiste no processo de obtenção de dados que representam as informações das coordenadas geométricas do produto”.

Após a digitalização dos pontos, o software agrupa os dados obtidos pela varredura, gerando um conjunto de pontos, a chamada “nuvens de pontos”, pode-se fazer analogia com a técnica de pintura pontilhismo, onde uma imagem é gerada a partir de pontos subsequentes, as Figuras (2) e (3) ilustram a técnica de pontilhismo e uma nuvem de pontos, respectivamente.



Figura 2- Imagem geradas por pontos subsequentes (Will Barcellos)

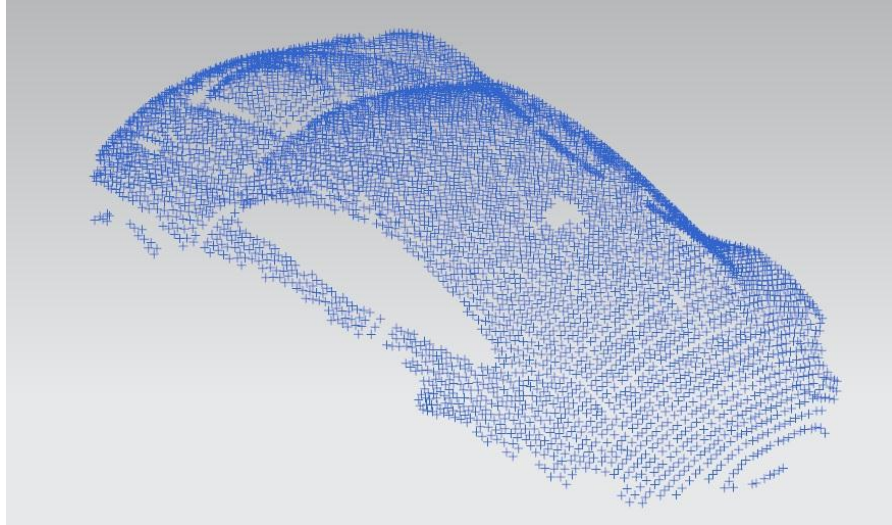


Figura 3- Nuvem de pontos de um mouse em formato de carro (autor)

Após alguns ajustes os dados serão transformados em um modelo matemático tridimensional, na maioria das vezes em STL cuja representação dar-se por um modelo de malhar triangular.

De acordo com Raja e Fernandes (2008), “Na fase de pontos, os dados da digitalização são registrados, preparados e otimizados para a construção de modelos de polígonos em 3D”, a Figura (4) apresenta um fluxograma proposto por Raja e Fernandes descrevendo o procedimento para Engenharia reversa (ER).

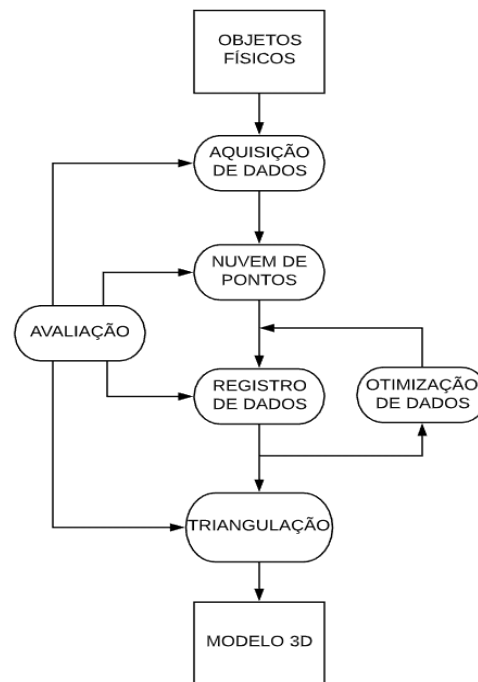


Figura 4 – Procedimento de análise de engenharia reversa (Raja e Fernandes, 2008)

Apesar dos avanços, há uma limitação na transformação automática do STL para o modelo 3D, com isso, é necessário a intervenção manual para objetos com certa complexidade. Visto isso, em seguida a criação do STL, deve-se editar nosso arquivo com a finalidade de melhorar a malha, facilitando e por vezes viabilizando o modelamento, dentre tais mudanças pode-se citar fechamento de furos, criação de “pontes”, suavização da malha, aumentar ou reduzir número de triângulos da malha.

Em seguida, com a malha tratada, é possível, gerar a superfície do objeto em questão, editando-a caso necessário, gerando um corpo formado apenas por superfícies, apesar de poder ser utilizado para programação CAM, o arquivo não tem informações sobre centro de massa, momento de inércia, o que inviabiliza sua utilização em análises CAE, caso necessário tais análises, utilizar ferramentas do software para obtenção de sólidos a partir de superfícies, agregando informações suficiente para a utilização das análises.

2.1.3 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (MMC)

Segundo Martin (2010), “A base para a medição por coordenadas é o sistema cartesiano, utilizando a representação de cada ponto num sistema ortogonal de coordenadas

(x, y, z). A partir desta informação de posição, registrada diretamente do componente, é possível avaliar as características dimensionais do projeto”.

Com uma MMC determina-se as coordenadas de certos pontos sobre as peças em estudo, onde tais pontos ao serem processados, com ajuda de um software, resultam nos parâmetros geométricos das peças em questão.

A primeira MMC surgiu na década de 50, cujo funcionamento se dava por operações manuais e as coordenadas eram registradas na máquina, com uma resolução de 0,012mm e uma incerteza declarada de 0,025mm (ORREGO, et al., 2000).

Com a evolução da MMC, as máquinas passaram a incorporar controladores CNC (comando numérico computadorizado), possibilitando leituras mais rápidas e uma menor incerteza, o que tem contribuído para melhorar a qualidade dos produtos produzidos, e aprimorando a engenharia reversa, cuja o pontapé inicial se dá pela obtenção de pontos com uma MMC. A Figura (5) mostra um exemplo de Máquina de Medição por Coordenadas.



Figura 5 - Máquina de Medição por Coordenadas (Catálogo da empresa Hexagon Manufacturing Intelligence)

Atualmente as MMC existentes possuem arquiteturas e configurações bem variadas, dependendo da aplicação desejada, dentre as escolhas do mercado tem-se como destaque a estrutura (guias e mancais), escalas, sistemas de apalpação, controlador e software de

medição, e no que confere a erros dos sistemas, estas originam-se da estrutura e do sistema de apalpação.

2.2 INTRODUÇÃO A ELEMENTOS FINITOS E ANÁLISE CAE

O estudo de muitos fenômenos que acontecem na engenharia e afins usam domínios que são geometricamente complicados e difíceis de desenhar, as chamadas geometrias complexas, onde tais geometrias dificultam a resolução analítica do problema em questão, tendo assim que optar por uma solução numérica.

O método de diferenças finitas resolve tais problemas com um sistema de equações diferenciais parciais elípticas, contudo, tal tarefa não é algo fácil, com cálculos difíceis e longos, com isso, surge o método dos elementos finitos.

De acordo com Kim e Sankar (2011), “O método de elementos finitos (MEF) é um método numérico usado para resolver equações diferenciais que caracterizam muitos problemas de engenharia” ainda de acordo com Kim e Sankar (2011), “A análise de elementos finitos envolve dividir a estrutura em um conjunto de elementos contíguos. Esse processo é chamado de discretização. Cada elemento tem um formato simples como um alinha, um triângulo ou retângulo, e está conectado a outros elementos compartilhando ‘nós’. As incógnitas para cada elemento são os deslocamentos dos nós. Elas são chamadas de grau de liberdade”, ao dividir a geometria em pequenos elementos, pode-se resolver problemas complexos subdividindo-o em problemas mais simples, o que possibilita o computador resolver com eficiências problemas como carregamentos, cargas axiais e restrições a peça estudada.

O método transforma um número infinito de variáveis desconhecidas em um número finito de elementos de comportamento bem definido, cada elemento com sua forma, tais como, triangular, quadrilateral, hexagonal entre outras, onde cada elementos é ligado no elemento subsequente por pontos denominados de pontos nodais, ou simplesmente nós. O conjunto desses itens, elementos e nós, é chamado de malha, a Figura (6) mostra uma malha, detalhando os nós e elementos.

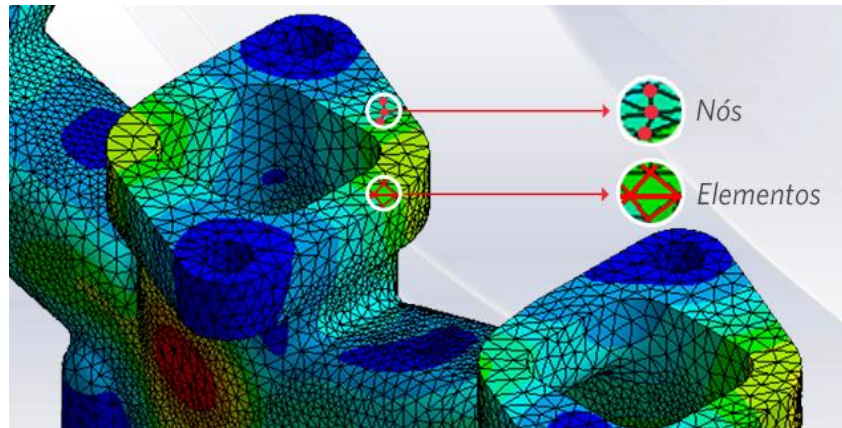


Figura 6- Malha formada por elementos triangulares e nós (4i engenharia)

Os softwares de CAE vêm evoluído e buscando aprimorar as análises abordadas pelo método de elementos finitos, além de deixar um ambiente mais agradável, buscam aprimorar a geração da malha de elementos, suas técnicas de modelagem e os critérios para aceitação, erros e a apresentação dos resultados obtidos.

Uma análise de elementos finitos dar-se em três fases listadas a seguir:

- Pré-processamento: Inicia-se com a definição do modelo geométrico e das entradas de dados para a execução da análise, as chamadas condições iniciais e condições de contorno;
- Processamento: Feito em uma estação de trabalho via software;
- Pós-processamento: Análise dos resultados obtidos, geralmente em forma de gráficos e animações, um exemplo de pós-processamento (resultados) é mostrado na Figura (7).

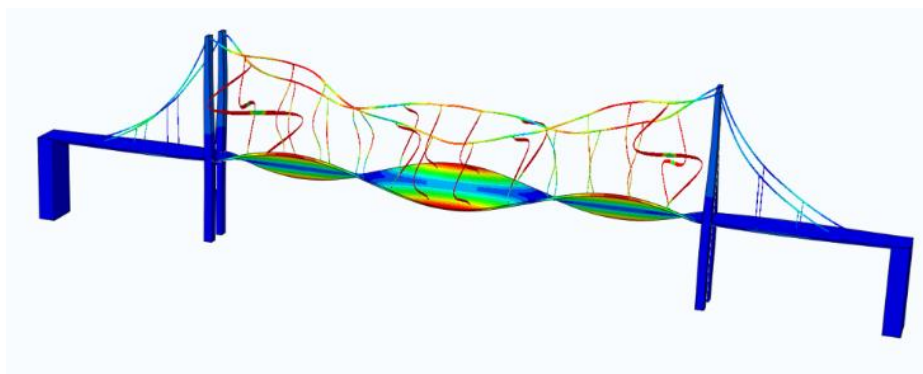


Figura 7- Resultados de análises CAE (FORCE engenharia)

Vantagens da análise CAE:

- Tempo e custo reduzidos na realização de um projeto.
- Alterações podem ser feitas rapidamente.
- Pode corrigir e testar o projeto, sem a necessidade de construção de um protótipo, o que agregaria tempo e dinheiro.
- Aumento significativo na eficiência do objeto projetado.
- Realização de cálculos complexos e detecção de erros na fase de engenharia.
- Aumento de competitividade.
- Simular fabricação do produto.

2.3 PROJETO DE MOLDES EM UM SOFTWARE

De acordo com Kazmer (2007), “A moldagem por injeção é um processo fantástico, capaz de tornar economicamente viável peças complexas com tolerâncias extremamente apertadas. Antes de qualquer peça poder ser moldada, um molde de injeção adequado deve ser projetado, fabricado e comissionado. O molde de injeção é em si um sistema complexo composto de múltiplos componentes que estão sujeitos a muitos ciclos de temperaturas e tensões”.

Injeção é o processo metal-mecânico onde o metal é fundido e, sobre pressão, forçado a entrar nas cavidades de uma peça denominada matriz, preenchendo-a e formando a peça desejada. Ao adentrar na matriz, o metal fundido “expulsa” o ar por canais pré-determinados, preenchendo por total a matriz, por fim recebe uma força de compactação com o intuito de reduzir as microporosidades decorrentes da solidificação (SENAI/SP, 2009).

O molde para injeção é, sem dúvida, uma das partes mais caras no desenvolvimento do projeto, com isso a utilização de moldes só é viável, economicamente, em produção de larga escala onde existe uma alta repetição de fabricação de uma mesma peça, deve-se atentar ao fato de que a peça deve ser retirada da matriz, isso é feito com a abertura do molde, logo, peças reproduzidas com moldes não podem ter ângulos negativos, o que impossibilitaria a retirada da peça moldada de sua matriz.

Ainda como diz o SENAI/SP (2009), “o molde é construído de aços especiais ou não, dependendo da aplicação, e possui as seguinte partes: cavidade, bucha de injeção, anel de centragem, extratores, placa porta extrator, placa porta cavidade, olhal, molas, etc, podendo ter ou não sistema de refrigeração em suas cavidades, e machos para gerar um espaço vazio dentro da matriz”. A Figura (8) apresenta um exemplo de molde.

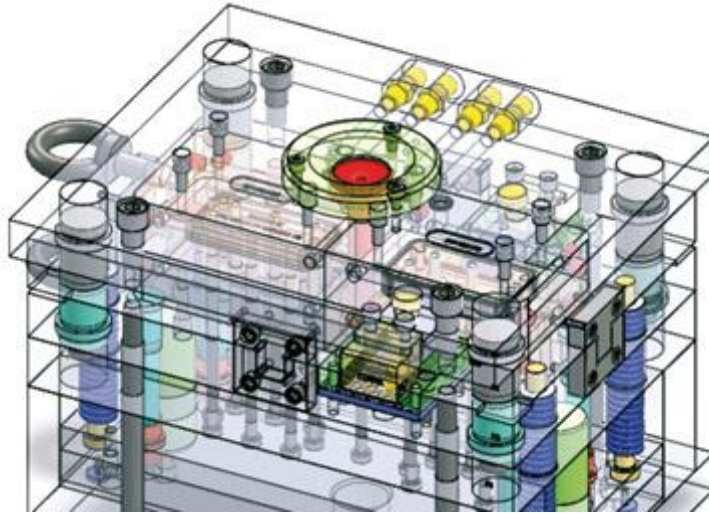


Figura 8- Exemplo de um molde (FARHAN, 2019)

A utilização de moldes, como todo processo de fabricação, tem suas vantagens e desvantagens, listadas a seguir.

Vantagens:

- Reprodução de peças com altas taxas de produtividade;
- Produção de peças de grandes volumes;
- Custo de mão-de-obra relativamente baixo;
- Peças requerem pouco ou nenhum acabamento;
- Peças podem ser moldadas com insertos metálicos.

Desvantagens:

- Moldes possuem preços elevados em comparação com outros processos de fabricação;

- Devido a difusão térmica, o material resfriado sofre contração, resultando em um produto menor que o vazio na matriz, fato esse que deve ser levado em conta ao fazer o projeto do molde.
- A contração devido ao resfriamento é volumétrica, ou seja, é preciso aplicar um coeficiente de compensação para cada dimensão do produto dada em porcentagem (FARHAN, 2016).

2.5 PROGRAMAÇÃO CAM/CNC

CNC (controle numérico computadorizado) é uma tecnologia de fabricação como fresamento, torneamento e furação, e são utilizadas para transformar um projeto CAD em uma peça usinada.

Os modelos e desenhos criados pelo designer tem que passar por outros processos para chegar ao produto acabado, sendo o CAM (computer aided manufacture) a técnica mais amplamente utilizada onde se gera códigos para uma máquina CNC (LEU et al.2016).

De acordo com Generoso (2011) “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.)”.

Apesar de que o objetivo principal do programa CNC seja a posição da ferramenta de corte, objetivos secundários podem ser necessários como ligar fluido de corte e entre outros, e suas sequências obedecem as normas ISO 6883 e DIN 66025, onde a ISO 6983 é um formato geral de programação que formula as instruções do programa para o CNC, Falheiros (2019), lista os objetivos dessa norma, que são mostrado a seguir:

- 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.

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

3 METODOLOGIA

O método empregado neste trabalho tem como objetivo recriar uma peça com auxílio de um sistema integrado CAD/CAE/CAM, o foco desde capítulo é apresentar como se deu o trabalho de engenharia reversa e realizar um estudo sobre possíveis técnicas de fabricação da peça estudada.

De maneira resumida, neste trabalho será empregado um roteiro proposto por Falheiros (2019), cujas etapas são listadas a seguir:

- 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;
- Criar a programação CAM da peça modelada, definindo estratégias e parâmetros de usinagem para obtenção dos caminhos de ferramenta;

Paralelamente, como mencionado anteriormente, será feito o estudo de fabricação com outras técnicas, analisando produtividade e gastos, fundamentando assim a engenharia reversa.

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1.1 PEÇA ESTUDADA

A peça em estudo, apresentada na Figura (9), é uma colher evisceradora cedida pela empresa Guaraves Guarabira Aves Ltda, esta é uma peça utilizada na máquina evisceradora, utilizada para retirar, em grande escala, as vísceras do frango nas indústrias de avicultura.



Figura 9- Colher evisceradora (autor)

3.1.2 MMC UTILIZADA

Para o escaneamento da peça foi utilizada uma máquina de medição de coordenadas Crysta-Apex S 7106 CNC, Localizados no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus I, cujo coordenador é o Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva. Os componentes da máquina utilizada foram listados por JUNIOR (2017) e são apresentados a seguir:

- Cabeçote PH10MQ – Renishaw;
- Magazine ACR3 – Renishaw;
- Sensor apalpador SP25M – Renishaw com esferas de rubi de $\phi = 2$ e 3mm;
- Sensor do tio de máquina QVP modelo IDR – 70/19W – JA – Mitutoyo.
- Sensor a laser – LINE LASER PROBE (Surface Measure 606) – Mitutoyo;
- Mesa rotativa MRT 320 – Mitutoyo;
- Joystick – Mitutoyo;
- Mesa metrológica – Mitutoyo.

As Figuras (10) e (11) apresentam a Máquina de Medição por Coordenadas utilizada no presente estudo, e alguns de seus sensores, respectivamente.



Figura 10- Máquina de medição por coordenadas utilizada no estudo (JUNIOR, 2017)

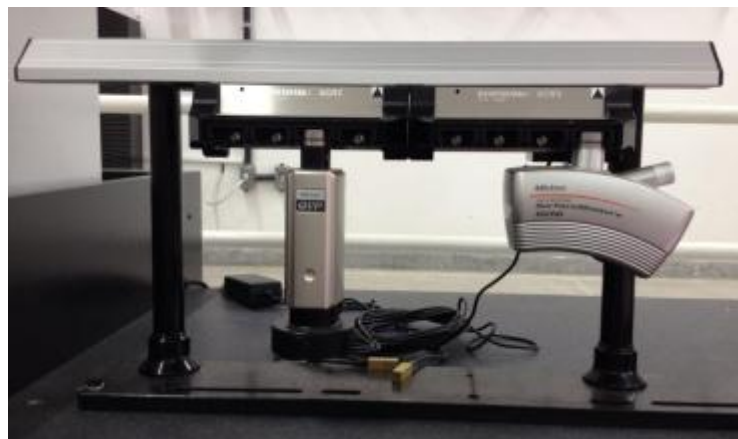


Figura 11 - Magazine ACR3, equipado com sensores do tipo visão e a laser (JUNIOR, 2017)

3.1.3 SOFTWARE INTEGRADO

Para o tratamento da malha STL, modelamento 3D do CAD, análise CAE, desenvolvimento de molde e programação CAM, foi utilizado o software Siemens NX, que possui vários módulos integrados, o que além da praticidade, gera um menor erro, otimização dos tempos de projeto e total compatibilidade entre os ambientes CAx.

3.2 DIGITALIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO

De posse da peça iniciou-se a engenharia reversa com a digitalização do modelo físico com uma Máquina de Medição por Coordenadas, o primeiro passo foi definir o plano onde ficaria a origem do sistema, o plano é gerado pegando 4 pontos sobre a peça com o auxílio do sensor apalpador, como mostrado na Figura (12).

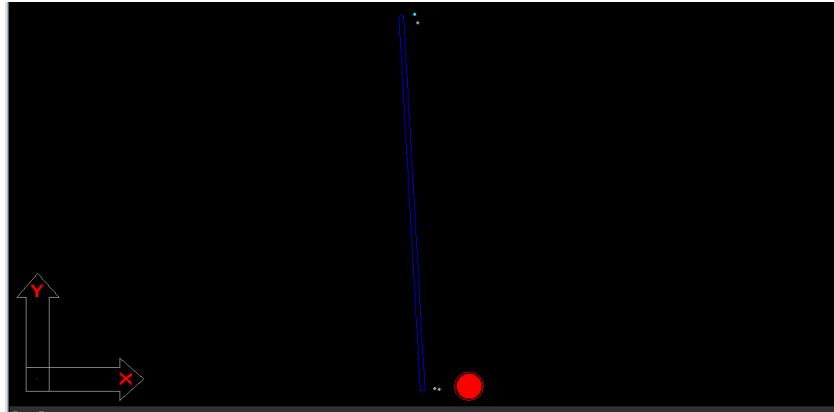


Figura 12- Definição do plano

Em seguida deve-se determinar a origem, nesta peça a origem foi colocada no centro de um círculo, logo, deve-se definir o círculo, essa etapa também foi realizada com o sensor apalpador, pegando 4 pontos na parede do círculo, a Figura (13) mostra o círculo e o centro determinado.

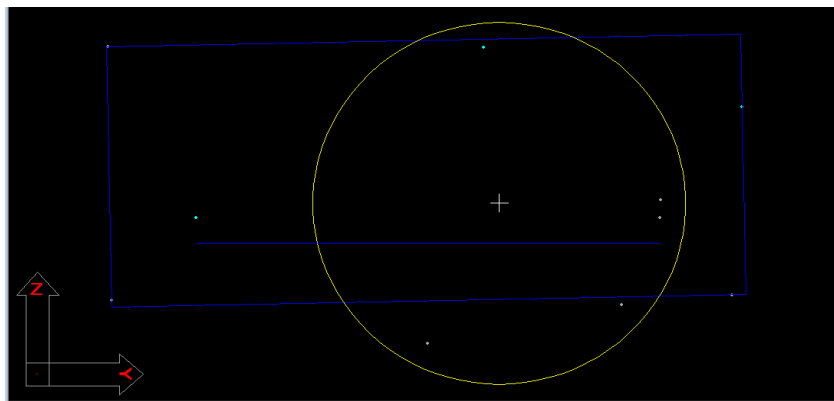


Figura 13- Definição do centro de coordenadas do sistema

Com a origem definida, dar-se início da varredura da peça, esta etapa foi realizada com o sensor de digitalização a laser, para a realização desta etapa deve-se informar ao software qual o material da peça, neste trabalho informamos ser feita de alumínio.

Devido à complexidade da peça a varredura foi com vários passos, em angulações e posições diferentes, contudo ficando ainda com espaços vazios (sem pontos), fato este observado na Figura (14).

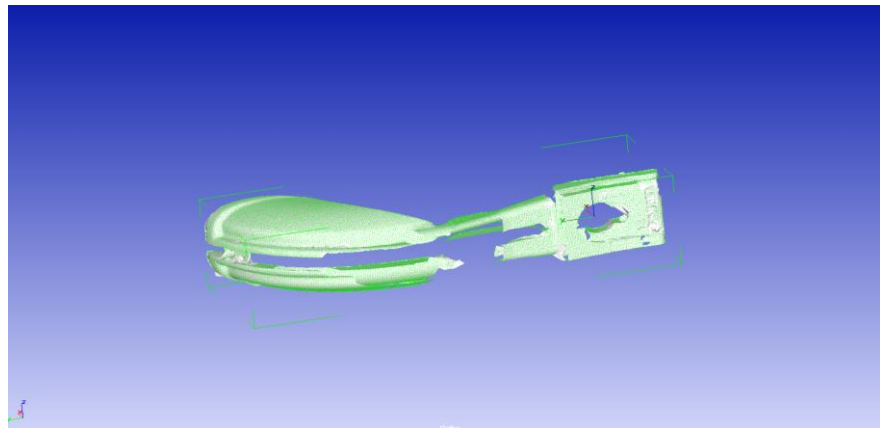


Figura 14 – Imagem gerada pelo software da máquina de medição por coordenadas

Por fim gerado a malha triangular STL que foi importada em outro software e mostrada na Figura (15).

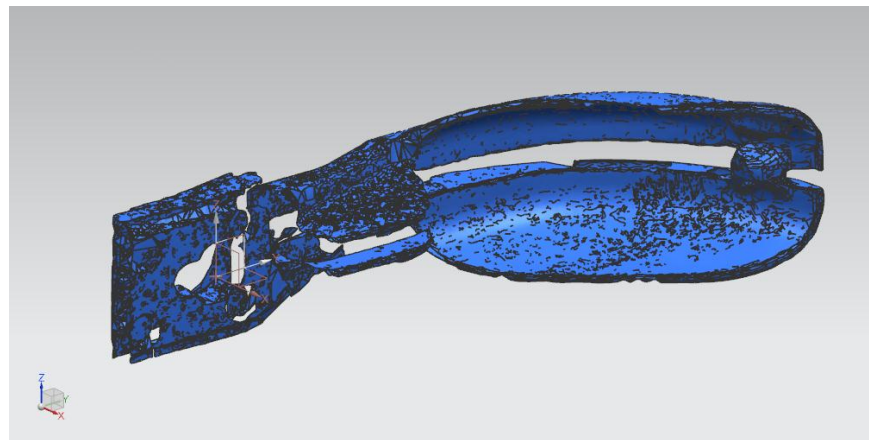


Figura 15 – STL da peça

3.3 TRATAMENTO DO MODELO STL NO SOFTWARE CAD/CAE/CAM

O próximo passo é a modelagem do sólido, feito a partir de superfícies criadas nas faces do modelo de referência, contudo, pode-se ver facilmente a complexidade da peça aliada a “falhas” da varredura (espaços sem malha e locais com muito ruído), impossibilitando o prosseguimento da engenharia reversa sem antes um tratamento na malha.

O primeiro passo no tratamento foi analisar a malha, sendo visto ser uma peça espelhada, o que possibilitou fracionar a peça em 5 partes: Colher de baixo, colher de cima, corpo de baixo, corpo de cima e base, como podem ser vistas nas Figuras (16) a (20), respectivamente.

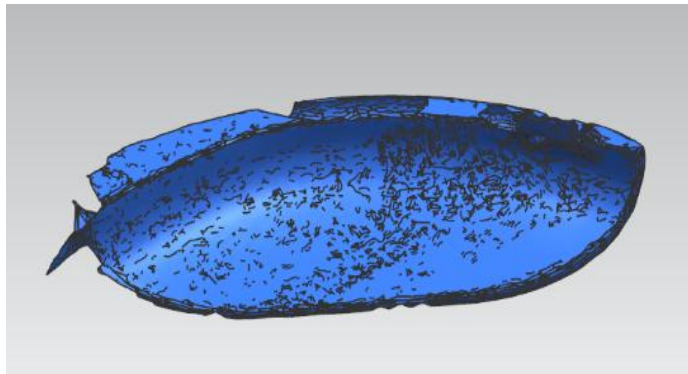


Figura 16- Colher de baixo

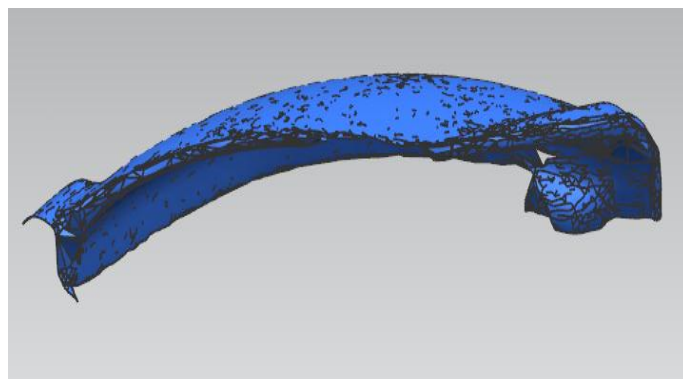


Figura 17- Colher de cima

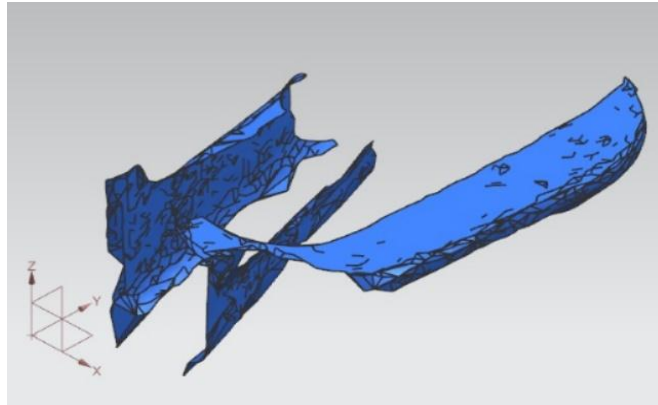


Figura 18- Corpo de baixo

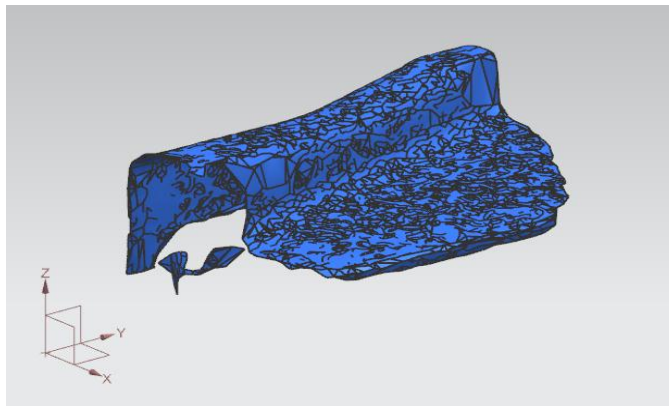


Figura 19- Corpo de cima

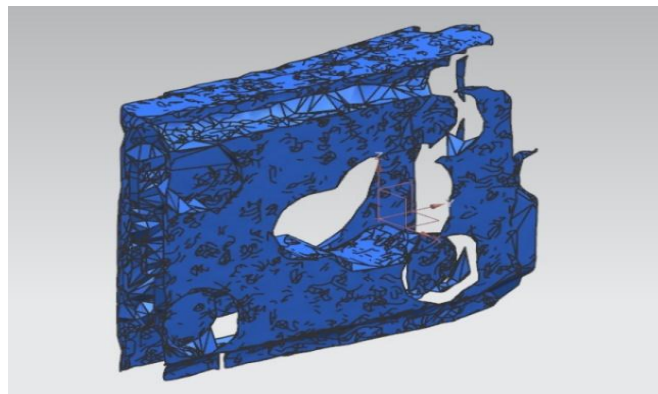


Figura 20- Base

Iniciando pela colher de baixo, pois devido a inclinação no momento da varredura, foi a parte que beneficiou-se com mais superfícies do interior da colher, sendo a parte de cima aquela com maiores espaços vazios na parte interior, com isso, foi suavizado a face da parte

em estudo, com o intuito de diminuir os ruídos, ficando uma malha mais uniforme e melhor de trabalhar, como mostra a Figura (21).

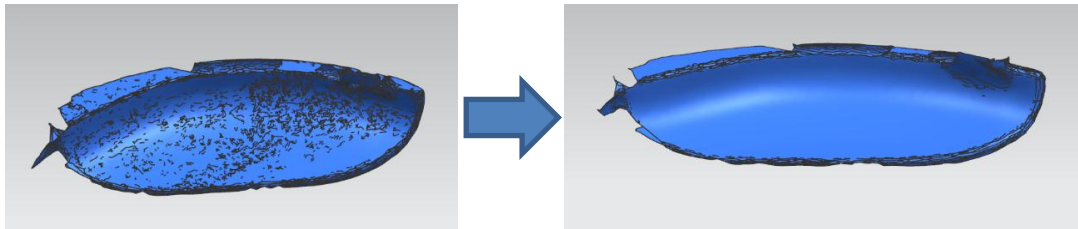


Figura 21 – Suavização das superfícies da colher de baixo

3.4 TÉCNICAS DE MODELAGEM PARA ENGENHARIA REVERSA

Alguns modeladores geram a superfície de maneira automática, necessitando de tratamento para adequação ao modelo, outros trazem a possibilidade de criar uma curva usando como guia a face do modelo estudado, contudo, necessita-se especificar os limites da superfície com a criação de 4 curvas, apesar do segundo método ser o mais utilizado na engenharia reversa, algumas peças, devido sua complexidade, tem que ser dividida em várias subpartes, com o intuito de criar secções correspondentes ao modelo estudado e uni-las ao final.

A peça aqui estudada, devido sua forma complexa, tem uma melhor adequação a malha automática, necessitando posteriormente ao tratamento adequado, inicialmente foi utilizado a função *Detect Primitives* que apresenta, em cores, geometrias primitivas na superfície estudada. Caso uma geometria venha com espaços vazios ou ruídos, pode-se utilizar a ferramenta de pincel para pintar com a cor desejada nos limites especificados, o resultado é mostrado na Figura (22).

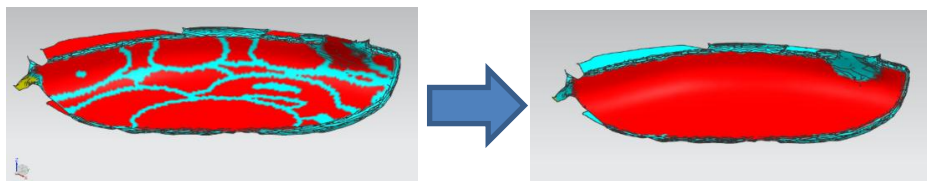


Figura 22- Definição de superfícies via cor

A Figura (23) apresenta a função utilizada, com a lista de especificações de cada cor, onde vermelho, verde, azul, amarelo e ciano, representam, respectivamente, plano, esfera, cilindro, cone e outros, pode-se ver que na parte em estudo, devido ao alto grau de sensibilidade utilizado, foi obtido uma grande área representada como plano, com poucas bordas representadas como outros, e com ajuda da função pincel, foi uniformizado, pintando toda a parte interior, deixando o ciano como os limites.

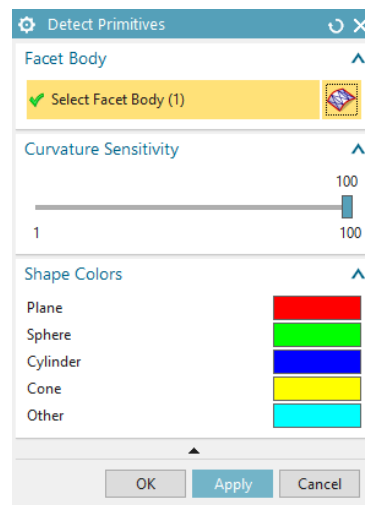


Figura 23 – Legendas de atributos das cores das superfícies

Com as cores pintadas nos limites especificados (vermelho no interior e ciano nos limites), pode-se utilizar a função para criar a superfície de maneira automática seguindo uma cor especificada (neste caso a cor vermelha), podendo modificar os graus de liberdade, onde aumentando cria-se uma superfície com um erro menor em relação a face especificada, contudo mais pesada, necessitando de um processamento mais demorado, em contra-partida podemos ter uma malha mais leve, com processamento rápido, contudo, com um erro alto, a escolha vai depender principalmente da finalidade do produto, caso seja algo cujo desvio seja um fator impactante no projeto, deve-se optar com uma superfície com maior grau de liberdade, logo mais pesada, caso o projeto aceite um certo grau de desvio, pode-se optar com uma superfície mais leve, o que ajudará na otimização do tempo de projeto total.

Como o intuito do presente estudo é a reprodução assistida de um objeto via engenharia reversa, analisando a função da peça em estudo, concluiu-se aceitável um pequeno erro relativo, nada que prejudique ou modifique sua geometria, utilização e complexidade,

com isso a colher foi feita com todos os graus em 4 de acordo com a Figura (24), ficando com erro máximo de aproximadamente 2,19 mm e com erro médio de 0,32 mm (cade destacar que o erro máximo pode ser ajustado manualmente, ou ainda ser retirado durante o ajuste mencionando anteriormente).

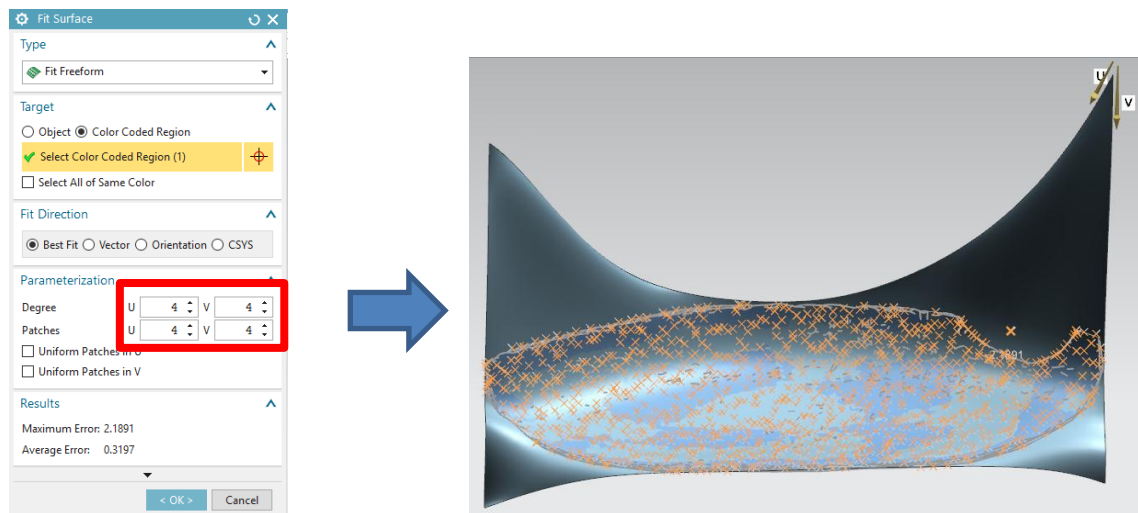


Figura 24 – Superfície automática da colher de baixo

Tendo a superfície ajustada ao modelo STL, é necessário aparar as arestas para ter uma superfície com mesmo formato e dimensões do modelo em questão, tal operação foi feita com o auxílio de curvas feitas em planos paralelos ao modelo, com o intuito de cortar e modelar a superfície, a Figura (25) apresenta o resultado obtido.

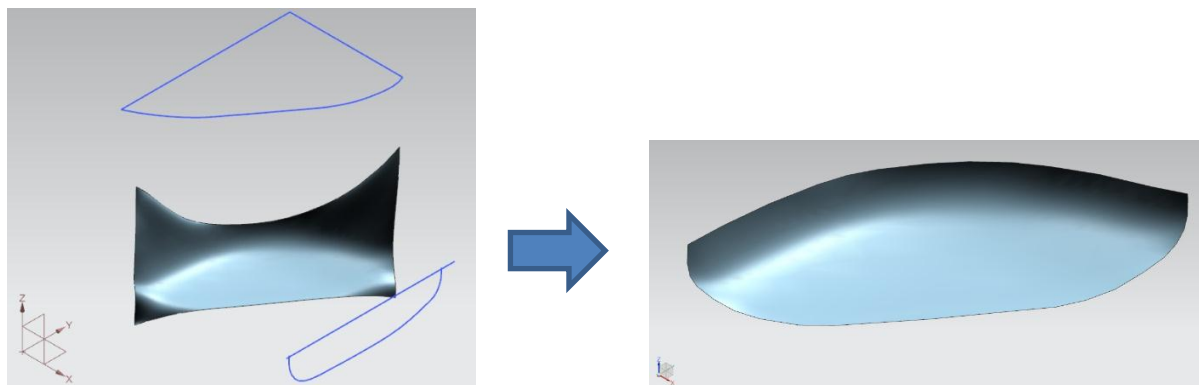


Figura 25 – Edição da superfície automática da colher de baixo

O mesmo procedimento foi realizado para a parte de cima da colher, chegando ao resultado mostrado na Figura (26).

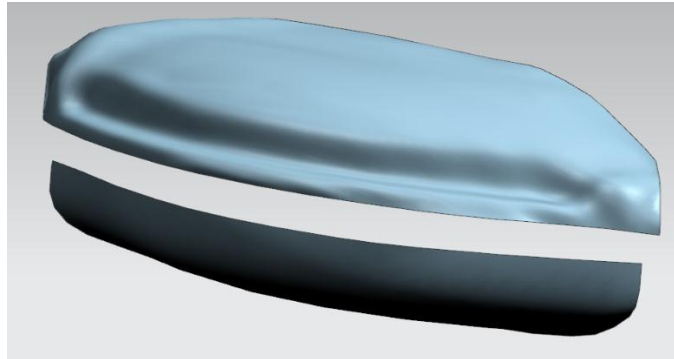


Figura 26 – Superfícies editadas das colheres de cima e baixo, respectivamente

Desta forma, foi criado as partes interior de baixo e exterior de cima, realizando um espelhamento obtem-se as superfícies interior e superior de cima (ou baixo), faltando apenas transformar em sólido, o que é feito com extrusões nos eixos X, Y e em uma curva no plano Z, mostrados nas Figuras (27), (28) e (29), respectivamente.



Figura 27- Extrude da superfície de baixo na direção negativa de y

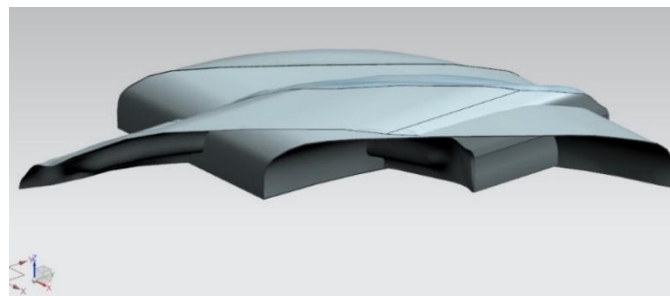


Figura 28 – Extrude da superfície de cima na direção positiva de x

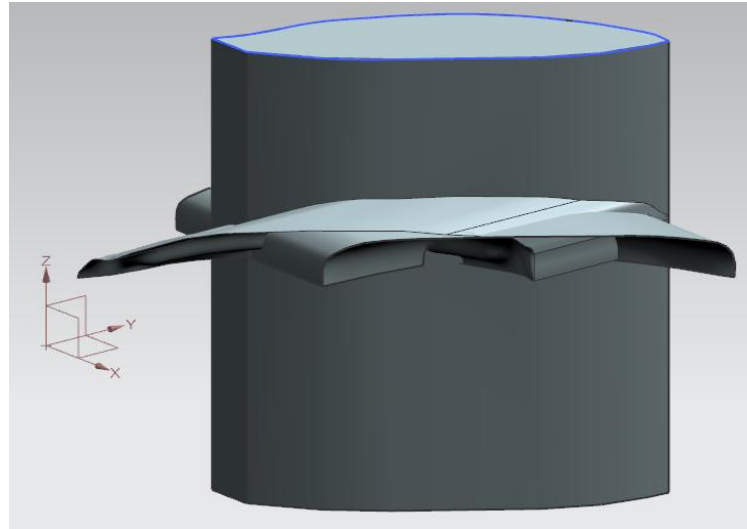


Figura 29 – Extrude de curva guia em ambas as direções em z

Apesar da aparência, a colher está quase finalizada, faltando apenas selecionar a interseção entre os 3 sólidos criados, com um simples comando a colher está finalizada, bastando apenas espelhar o resultado, a Figura (30) mostra o resultado do espelhamento.

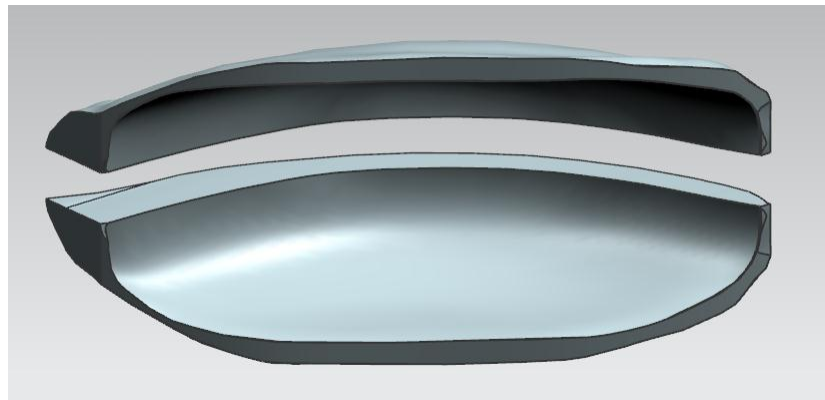


Figura 30 – Intersecção e espalhamento dos extrudes gerados

O corpo é mais simples, foi criado um plano paralelo a extremidade da peça e aplicado o comando que gera uma curva entre a interseção do modelo STL e o plano gerado, tal curva serviu como base, faltando apenas o guia, onde o mesmo foi feito levando em consideração o modelo STL, por fim, tendo a base e o guia, foi aplicado o comando de varredura, tais etapas são mostradas nas Figuras (31) e (32).

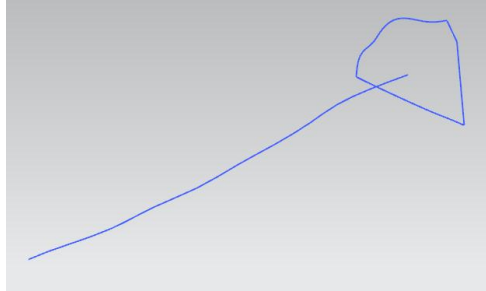


Figura 31 – Curva guia do corpo de cima

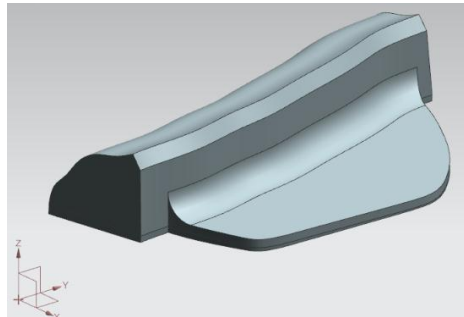


Figura 32 – Corpo gerado

Por fim foi criado a base, com o mesmo princípio com o qual a Figura (32) foi feito, com criação de plano para gerar a base, e desenvolvimento de uma curva guia, chegando a Figura (33).

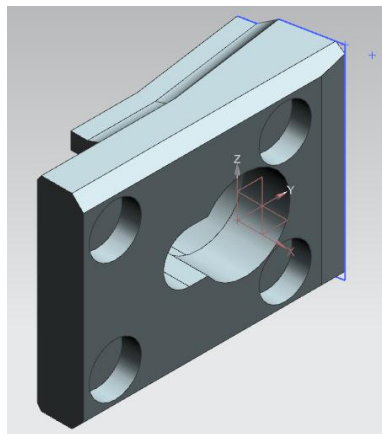


Figura 33 – Base gerada

3.5 ANÁLISE CAE DO MODELO CAD OBTIDO

Apesar do método CAE ser a análise por elementos finitos, existem outros métodos como *computation fluid dynamics* (CFD) que se trata da análise térmica e dinâmica do fluxo de fluidos, podendo analisar distribuição de temperaturas, escoamentos de fluidos, tendo os resultados mostrados em forma de gráficos e animações

A análise CAE realizada no modelo estudado refere-se ao escoamento do fluido no molde, com o intuito de obter informações assistidas como **locais com bolhas de ar, tempo para preenchimento, temperatura durante o processo** entre outras coisas.

Para a realização do estudo com análise CFD é necessárias três etapas, e são elas: Pré-processamento, processamento e análise de resultados.

3.5.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

O pré-processamento são as informações de entrada para a realização da análise, no modelo em estudo o pré-processamento é a definição do corpo (modelo 3D), malha, material utilizado no escoamento e definição de canal de entrada do fluido, como inicialmente o objeto não possui esse canal, é feito uma cavidade e informada ao software que será usada como canal para inserção do fluido, como observado na Figura (33).

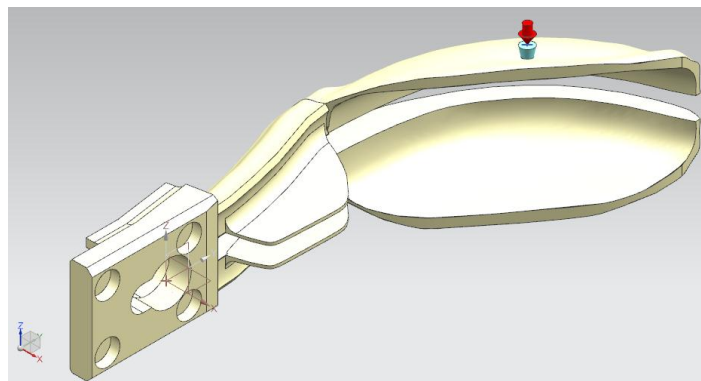


Figura 34 – Análise CAE do escoamento do fluido na peça montada

3.5.2 PROCESSAMENTO

O processamento se trata do software resolvendo, para cada nó da malha, suas equações, com as informações cedidas no pré-processamento, é uma etapa demorada, podendo chegar a horas ou dias, e que necessita de um hardware potente, apesar de ser um

sistema integrado, o que facilita e agiliza o processamento, esta etapa ainda é o gargalo em grande parte das análises CFD's executadas.

3.5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Ao final do processamento tem-se em mãos os resultados em forma de gráficos e animações, devendo ser analisados, levando sempre em consideração o que foi ajustado no pré-processamento, como exemplo vemos a Figura (35) onde é mostrado o tempo necessário para o preenchimento do molde, totalizando aproximadamente 2,38 segundos. Em seguida a Figura (36) onde é verificado a moldabilidade do molde, e como pode ser observado é de boa qualidade. Por fim, a Figura (37) mostra os possíveis pontos de bolhas.

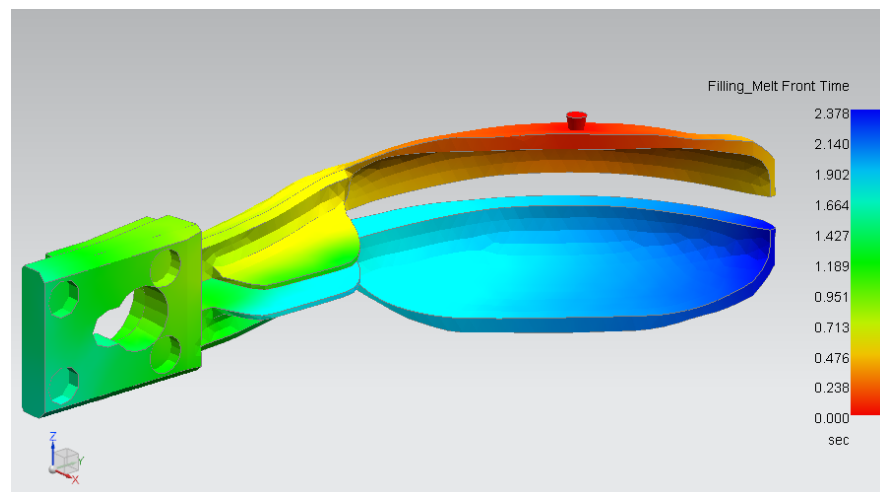


Figura 35 - Tempo de escoamento do metal fundido INOX 316 no molde

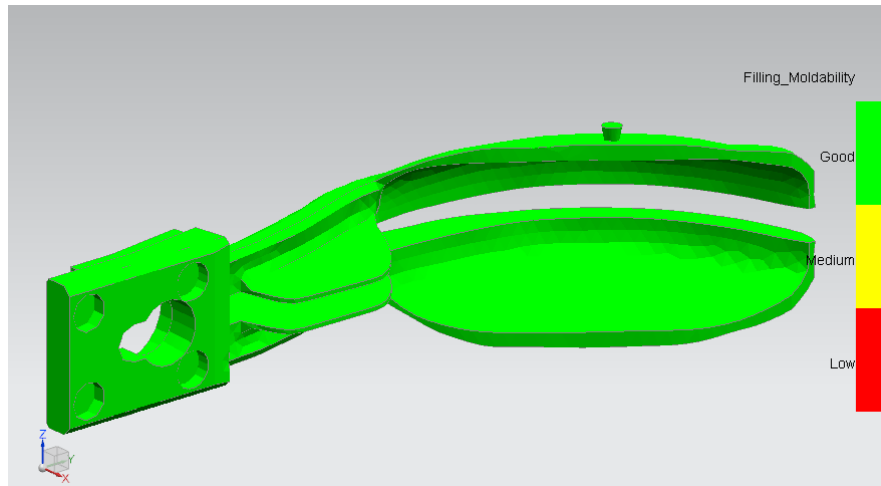


Figura 36 - Moldabilidade do molde

Este indicador mostra se uma geometria é capaz de ser moldada, em nossa geometria a moldabilidade teve um resultado “BOM”.

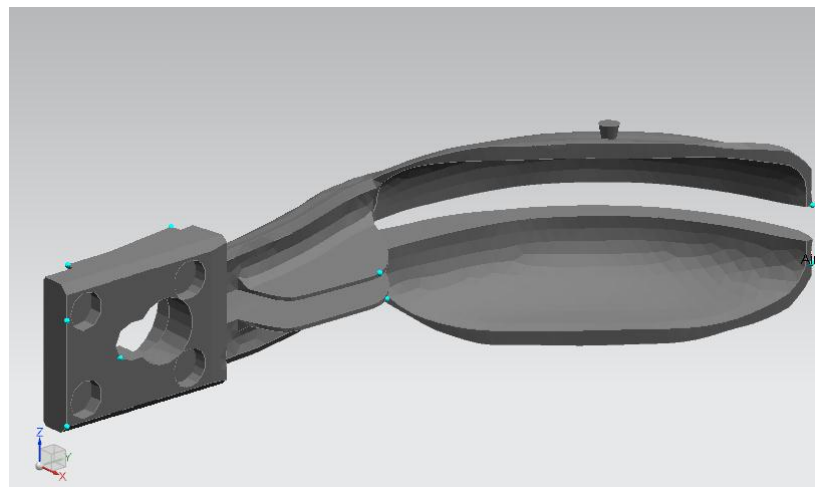


Figura 37 - Possíveis pontos com bolhas de ar

Este indicador mostra possíveis pontos com bolhas de ar, é possível ver alguns possíveis pontos, tal fato é devido a geometria complexa da peça, o que dificulta a saída de ar do molde, nesses casos deve-se tomar cuidado, e editar a geometria com o intuito de minimizar as bolhas de ar, o que causa falhas na superfície da peça, ou até mesmo ruptura, em alguns casos deixando indisponível a moldagem, neste caso específico, vemos que temos pequenas bolhas, e todas elas na superfície da peça, o que pode ser retirado via usinagem.

Cale ressaltar que a partir deste ponto as peças vão ser analisadas individualmente, devido sua geometria complexa, o que além das bolhas, traz consigo problemas na retirada da peça moldada, com o intuito de evitar tal problema, será feito moldes individuais, sendo as peças moldada e unidas, posteriormente, via solda.

3.6 PROJETO DE MOLDE A PARTIR DO MODELO CAD

Tendo em mãos bons resultados no CFD, o que viabiliza o prosseguimento de um molde para obtenção da peça em estudo, contudo, como dito anteriormente, a construção do molde é uma das partes mais cara do projeto, sendo economicamente viável apenas para produção em larga escala, trabalhos específicos agregariam alto valor de construção, o que inviabilizaria o projeto.

Alguns softwares tem a opção de criação de molde a partir do CAD 3D, necessitando apenas de algumas entradas de dados, inicialmente, mesmo com a análise CAE/CFD realizada, necessita-se uma análise mais detalhada sobre a geometria, bordas e faces do objeto, a colher evisceradora passou, mas com algumas informações mostradas nas Figuras (38) e (39).

Status	<i>Passed with Information</i>
Object Set Result Message	<i>Found 25 undercut faces</i>
Parent Profile	<i>Mold Part Quality</i>
Part	<i>colher 10_06.prt</i>

▼ *More Detail...*

- **Objects in the set:**
 - Face:R-440150-60 [63442] on layer 1*
 - Face:R-439892-60 [63493] on layer 1*
 - Face:R-440290-60 [63426] on layer 1*
 - Face:R-440286-60 [63446] on layer 1*
 - Face:R-251105-60 [63407] on layer 1*
 - Face:R-240546-60 [63400] on layer 1*
 - Face:R-251106-60 [63408] on layer 1*
 - Face:R-251137-60 [63411] on layer 1*
 - Face:R-440147-63 [63461] on layer 1*
 - Face:R-440288-60 [63415] on layer 1*
 - Face:R-443813-60 [63437] on layer 1*
 - Face:R-240547-60 [63401] on layer 1*
 - Face:R-437540-63 [63490] on layer 1*
 - Face:R-437633-60 [63484] on layer 1*
 - Face:R-439897-60 [63444] on layer 1*
 - Face:R-240635-60 [63405] on layer 1*
 - Face:R-233062-60 [63395] on layer 1*
 - Face:R-437547-60 [63480] on layer 1*
 - Face:R-223288-60 [63473] on layer 1*
 - Face:R-257496-60 [63412] on layer 1*
 - Face:R-440291-63 [63427] on layer 1*
 - Face:R-437546-60 [63516] on layer 1*
 - Face:R-443816-60 [63413] on layer 1*
 - Face:R-251104-60 [63406] on layer 1*
 - Face:R-443541-60 [63431] on layer 1*
- **Test was run at:** 17:54 07/06/2019

Figura 38 – Análise das condições de moldabilidade

Check-Mate Test: [Draft Angle](#)

Test Status	Passed with Information
Test Result Message	Found 3 faces angle in (0 ~ 3), 3 faces angle in (-3 ~ 0) and 34 vertical faces
Parent Profile	Mold Part Quality
Part	colher 10_06.prt
Number of logged object sets	3

▼ More Detail...

- Test was run at: 17:54 07/06/2019
- Test was run by: Welhysom
- Part Version: 66

Figura 39 – Análise das condições de moldabilidade

Logo após a validação, enfim pode-se começar a realizar o projeto do molde, o que é feito seguindo as seguintes etapas:

1. Escolha do material para o molde: que neste caso é o VC 131;
2. Definir centro do molde;
3. Criação de cubo primário;
4. Definição dos negativos da parte de cima e baixo do molde, chamados pelo software de *cavity* e *core*, respectivamente;
5. Criar curvas guias na intersecção do *cavity* e *core*;
6. Criar plano com auxílio das curvas guias, tais planos devem necessariamente ultrapassar os limites do cubo primário;
7. Utilizar o comando de criação de molde.

A Figura (40) apresenta o cubo primário para a criação do molde da base.

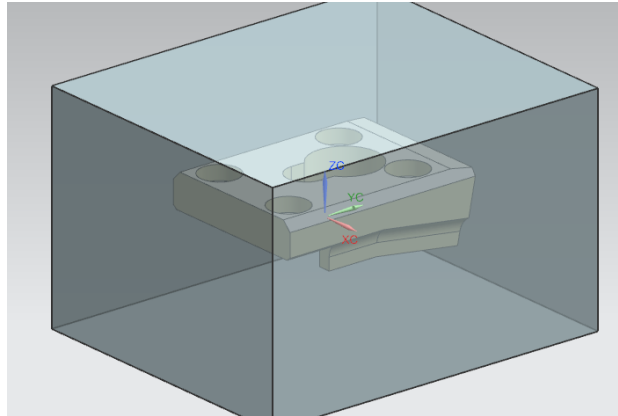


Figura 40 – Cubo primário para geração do molde

Logo após a criação do cubo primário é necessário definir quais superfícies serão da parte de cima do molde e qual da parte de baixo, essa etapa é crucial para a criação do molde, caso a peça tenha furos passantes ou vazios, é aconselhável fechar o furo ou vazio, e fazê-lo posteriormente via usinagem, as Figuras (41), (42) e (43) mostram as escolhas feitas para a peça em questão sendo as superfícies em azul e laranja os negativos da parte de cima e de baixo do molde, ou de acordo com a nomenclatura do software, *Cavity* e *Core*, respectivamente.

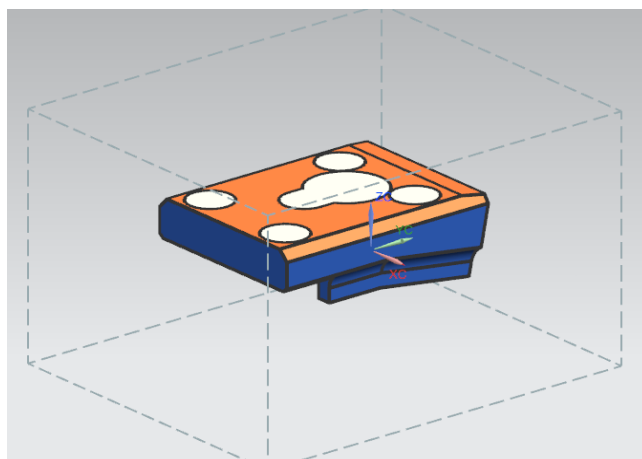


Figura 41 – Definição de Cavity e Core da base

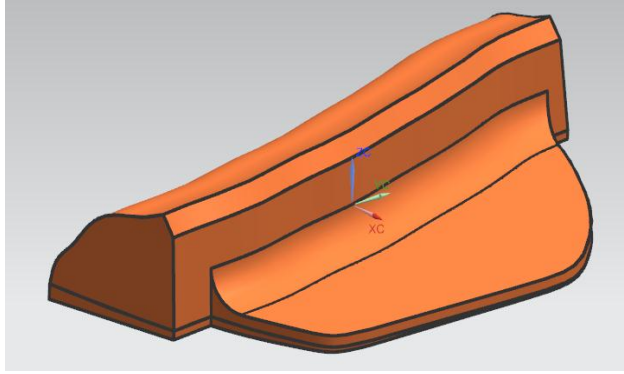


Figura 42 - Definição de Cavity e Core do corpo

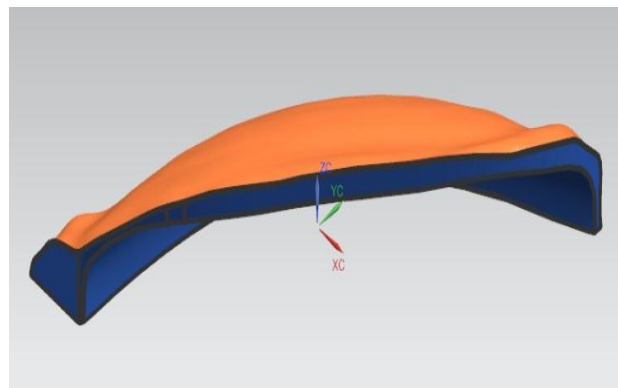


Figura 43 - Definição de Cavity e Core da colher

Definido os negativos de cima e baixo, a próxima etapa foi criar superfícies saindo do cubo primário com o intuito de criar um corte, ficando apenas o molde, as Figuras (44), (45) e (46) mostram os moldes da base, corpo e colher, respectivamente.

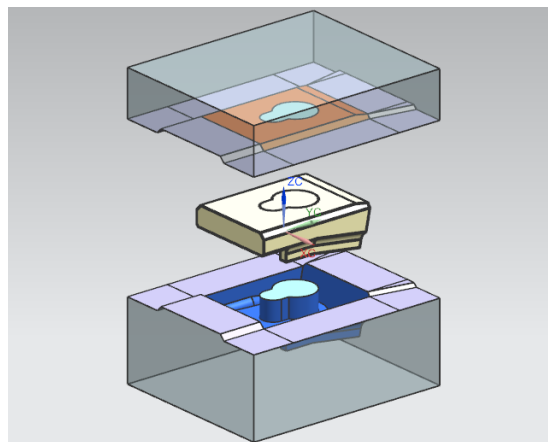


Figura 44 – Molde da base

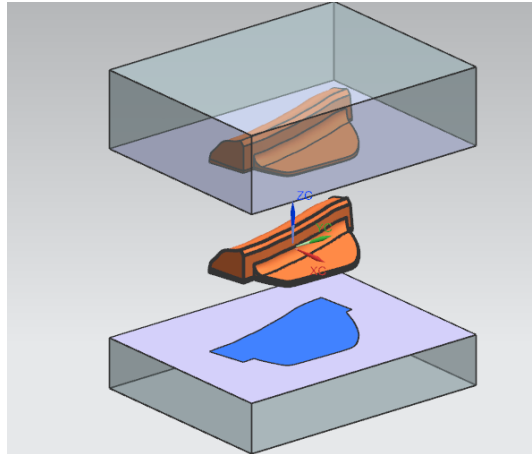


Figura 45 – Molde do corpo

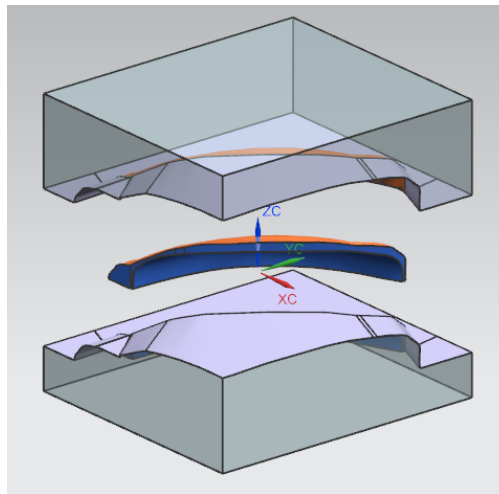


Figura 46 – Molde da colher

3.7 PROGRAMAÇÃO CAM DO MOLDE E CAD

As partes da peça em estudo serão obtidas por molde, contudo, no desenvolvimento do molde deve-se levar em consideração sua usinagem, neste capítulo será discutido sobre a usinagem do molde para a criação da peça, como também a usinagem em algumas partes da peça logo após a desmoldagem.

Utilizando a plataforma CAM do software integrado, inicialmente deve-se entrar com os dados do pré-processamento, onde é necessário dizer ao software a peça em questão, a zero máquina, o blank (tarugo), sobremetal utilizado e o metal a ser usinado. A partir deste ponto tem-se CAM feito para o molde, cujo material é o VC 131 temperado, existe ainda CAM para acabamento da peça moldada, cujo material é o Inox 316 austenítico, de acordo com a

empresa Sandvik Coromant, vale atentar-se as particularidades da usinagem de um aço inoxidável austenítico, onde durante o fresamento os principais critérios de desgaste são trincas térmicas na ferramenta, lascamento das arestas e ainda formação de arestas postiças de corte, o que prejudica o acabamento superficial. A Figura (47) apresenta os principais desgastes do Inox 316.



Figura 47 – Desgastes na ferramenta ao usinar Inox 316 (Sandvik Coromant)

Para evitar tais problemas, na usinagem da peça serão utilizadas altas velocidades de corte para o desbaste, com o intuito de evitar arestas postiças de corte, usinando sem fluido de corte, para minimizar problemas com trincas térmicas no desbaste, podendo ser usado fluido no acabamento, onde o calor gerado na zona de corte é menor devido menor profundidade de corte, vale ainda citar que um pequeno avanço durante a operação de acabamento pode ocasionar um maior desgaste da ferramenta, com isso utilizaremos, no acabamento, valores relativamente altos de avanço, sem prejudicar a qualidade superficial da peça, a Tabela (1) mostra foi proposta pela Sandvik Coromant e será adotada como referência para realização das etapas de desbaste e acabamento no presente trabalho.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na usinagem da peça

	Velocidade de corte	Refrigeração	avanço
Desbaste	150 - 250 m/min	Não	Alto
Acabamento		Caso necessario	Relativamente alto

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em todos os CAM's realizados a partir deste ponto tem-se um blank de seção transversal retangular, com sobremetal de 5 mm e zero máquina posicionado em um vértice da peça a ser usinada.

4.1 BASE

A Figura (48) mostra o molde superior da base, o qual será obtido via usinagem, a Figura (49) mostra a posição do zero máquina e o blank utilizado.

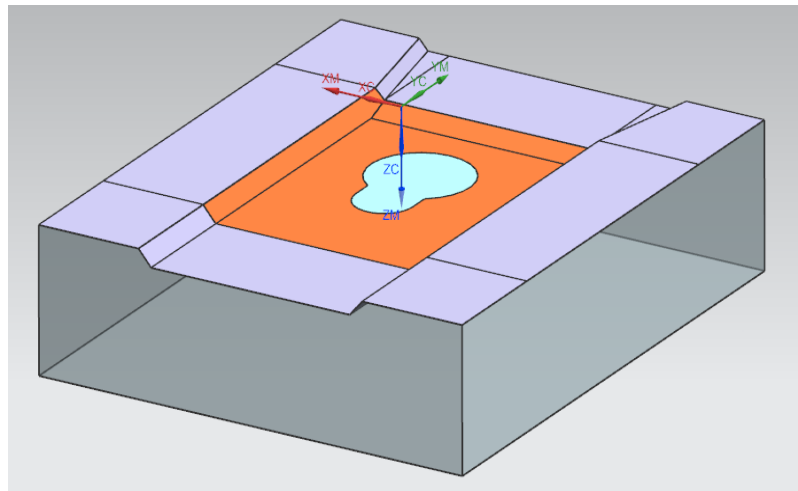


Figura 48 – Molde superior da base

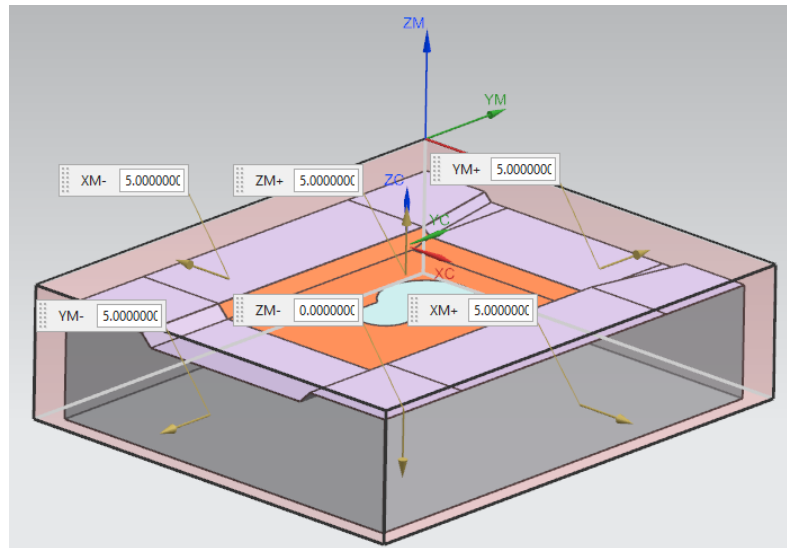


Figura 49 – Blank com 5mm de sobremetal em cada lado do molde e zero máquina definido

Logo após essa etapa, foram definidos os procedimentos de usinagem a serem adotados, tendo sempre como referência uma máquina CNC 3 eixos, foi utilizado a seguinte sequência:

1. Desbaste: Retirar a maior quantidade de material possível, deixando sobremetal para futuras etapas;
2. Redesbaste: Um novo desbaste, contudo, com uma ferramenta de menor diâmetro, com o intuito de melhores parâmetros para etapas subsequentes;
3. Pré-acabamento: Caracterizado por ter um menor avanço e profundidade de corte que as etapas anteriores, é a última etapa antes do acabamento final;
4. Acabamento: Altas velocidade de corte, baixos avanços e profundidade de corte, com a intenção de ter uma peça bem acabada e dentro dos limites especificados.

Definido as etapas a serem seguidas, pode-se começar a alimentar o CAM com informações sobre procedimentos de usinagem, a Figura (50) mostra a operação a ser realizada, que inicialmente é o desbaste, sendo feito com 2,5 eixos (2 eixos e meio), onde a ferramenta situa-se em um plano, assumindo uma configuração de 2 eixos e usinando as superfícies existente no plano, ao término da usinagem no plano atual move-se para um plano subsequente, repetindo o processo. Dependendo do tipo de operação, o usuário do sistema computacional faz a escolha adequada.

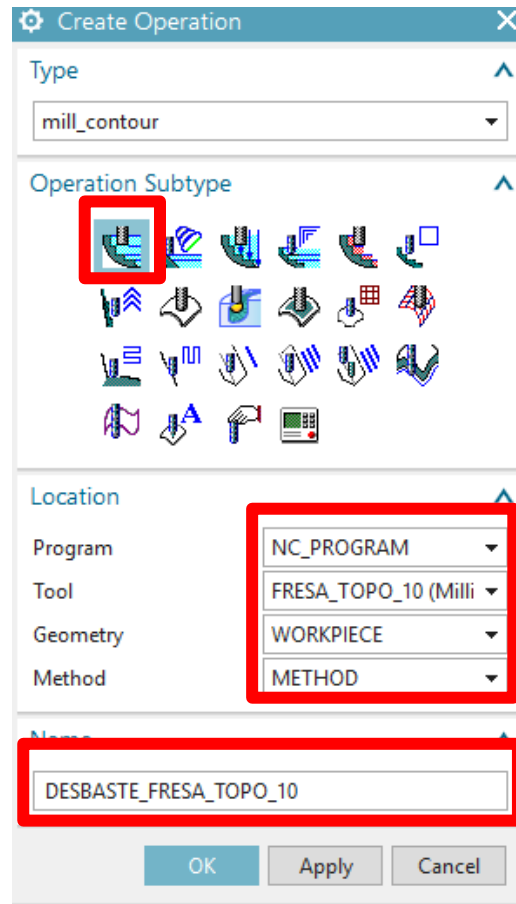


Figura 50 – Parâmetros no software para desbaste

Neste ponto escolhe-se a superfície a ser usinada, e parâmetros de corte como avanço de ferramenta, AP, sobremetal, velocidade de corte, entre outros, inicialmente fizemos a programação com os valores pré-determinado pelo software, com o intuito de comparar os resultados obtidos de maneira automática, com os obtidos de acordo com o estabelecido anteriormente, a Tabela (2) apresenta os valores adotados para os parâmetros da usinagem.

Tabela 2 – Parâmetros de usinagem automáticos para o CAM do molde da parte de baixo da base

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (Ap)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	10	250	3	25	500
Pré-acabamento	4	250	1	25	500
Acabamento	4	250	1	25	500

Na Figura (51) é possível ver todas as operações que devem ser realizadas para obter a usinagem do molde superior da base, contendo também o tempo de cada etapa realizada, como também o tempo total de usinagem da peça. Já na Figura (52) são apresentados os caminhos que a ferramenta vai percorrer durante a usinagem, é importante tal visualização pois permite ao usuário ver se a ferramenta irá trabalhar em “vazio” ou não, ou até mesmo colidir com a peça.

Operation Navigator - Program Order

Name	Toolchange	Path	Tool	Tool Number	Time
NC_PROGRAM					06:17:52
Unused Items					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESABASTE_FRESA_TOPO...		✓	FRESA_TOPO_10	1	00:55:21
PRE_ACABAMENTO_FRE...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:04:13
PRE_ACABAMENTO_02_F...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:01:16
ACABAMENTO_FRESA_T...		✓	FRESA_TOPO_04	2	01:17:08
ACABAMENTO_02_FRES...		✓	FRESA_TOPO_04	2	01:24:01
ACABAMENTO_03_FRES...		✓	FRESA_TOPO_04	2	02:35:30

Figura 51 – Tempo do CAM do molde da parte de baixo da base

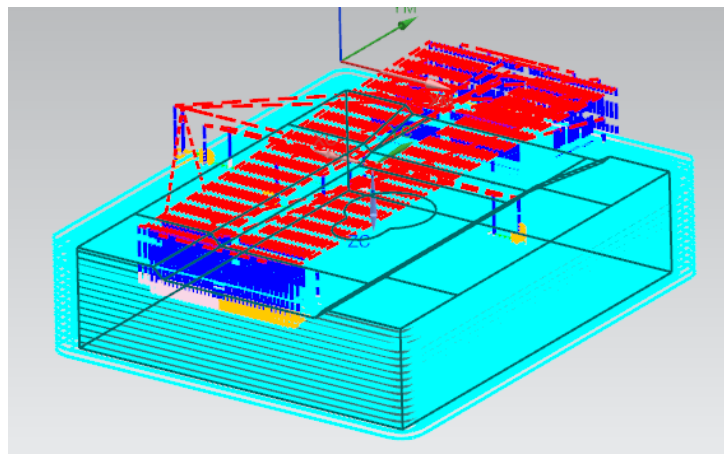


Figura 52 – Movimento da ferramenta no CAM do molde da parte de baixo da base

As linhas laranjas correspondem ao movimento de entrada da ferramenta na peça, linhas azul-claros referem-se ao movimento da ferramenta onde existe a retirada de material, as linhas azul-escuros mostram os movimentos sem retirada de material, existe ainda as linhas vermelhas, que relatam movimentos rápidos no plano de segurança.

Pode-se observar a grande quantidade de linhas, que correspondem a movimentos da ferramenta, principalmente o número elevado de linhas vermelhas e azuis escuras, que são

movimentos onde não tem retirada de material, tais movimentos são os grandes responsáveis pelo tempo usinagem elevado, principalmente nas etapas de acabamento, mostrado na Figura (52).

Com o intuito de otimização do tempo usinagem, aumentou-se o avanço de corte, inclusive nas etapas de pré-acabamento e acabamento, sendo reduzido a profundidade de corte na etapa de acabamento, com o intuito de amenizar os esforços gerados com o aumento do avanço, também foi aumentado a velocidade de corte e a rotação do eixo, os valores utilizados estão exibidos na Tabela (3).

Tabela 3 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde superior da base

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (Ap)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	10	446	3	120	2350
Pré_acabamento	4	300	1	130	5173
Acabamento	4	300	0.5	130	5173

As figuras (53) e (54) mostram os resultados obtidos com a otimização, onde foi reduzido o número de movimentos no plano de segurança, cuja função é ser o plano onde a ferramenta pode ter a segurança de movimentos rápidos sem colisões com a peça, geralmente tal plano é situado a uma distância, livre e pré-estabelecida, da peça. Um menor número de linhas no plano de segurança, significa um menor tempo de “não corte”, otimizando o processo de usinagem.

Operation Navigator - Program Order □

Name	To...	Path	Tool	Too...	Time
NC_PROGRAM					00:25:14
Unused Items					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESBASTE_FRESA_...		✓	FRESA_TOPO_10	1	00:12:52
PRE_ACABAMENT...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:02:46
PRE_ACABAMENT...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:00:21
ACABAMENTO_FR...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:03:25
ACABAMENTO_02_...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:00:33
ACABAMENTO_03_...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:04:53

Figura 53 - Tempo do CAM do molde superior da base

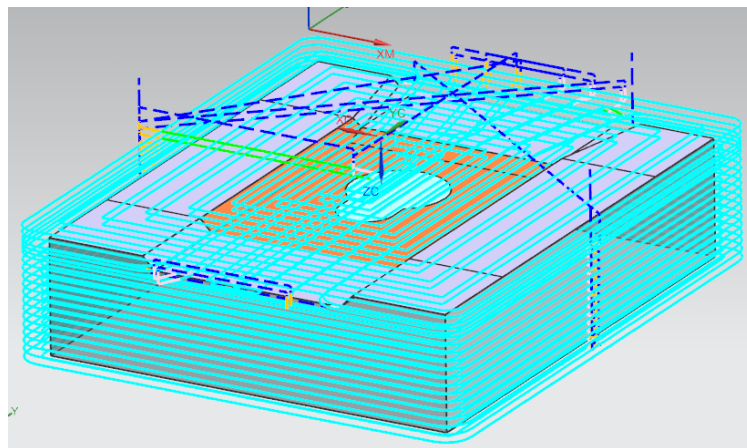


Figura 54 - Movimento da ferramenta no CAM do molde superior da base

Um detalhe importante é o acabamento superficial da peça usinada, cujo valor foi de 0,1875 mm como mostra a Figura (55).

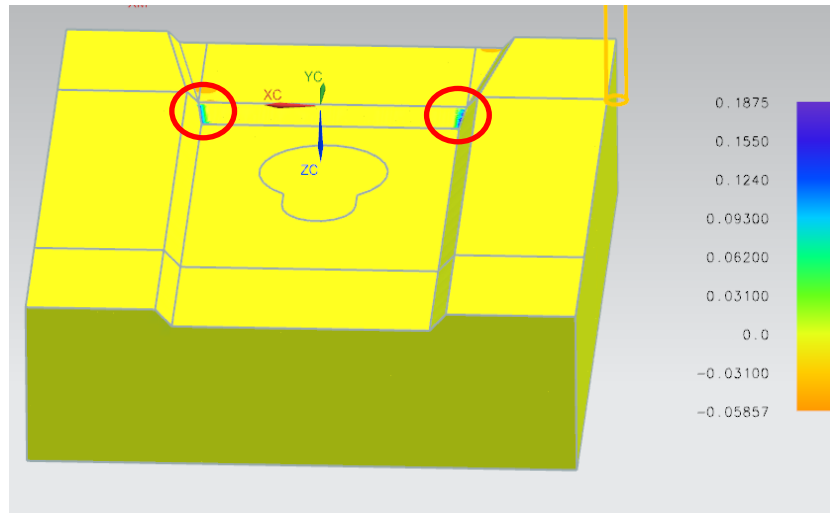


Figura 55- Acabamento do molde superior da base

É possível observar uma pequena “falha” em um canto vivo, contudo, o valor máximo do erro está abaixo de 0,2 mm, um erro insignificante de acordo com a aplicação da peça estudada.

O mesmo procedimento foi realizado para a usinagem da parte inferior do molde da peça (Base da colher) e os parâmetros utilizados estão mostrados na Tabela (4), já levando em consideração a otimização do CAM. As Figuras (56) a (59) mostram respectivamente, o molde desejado, o blank utilizado, os tempo de usinagem e os caminhos realizados pela ferramenta de corte.

Tabela 4 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde inferior da base

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (Ap)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	20	446	3	120	2350
Redesbaste	10	400	2	140	5570
Acabamento	6 e 4	300	0.5	130	5173

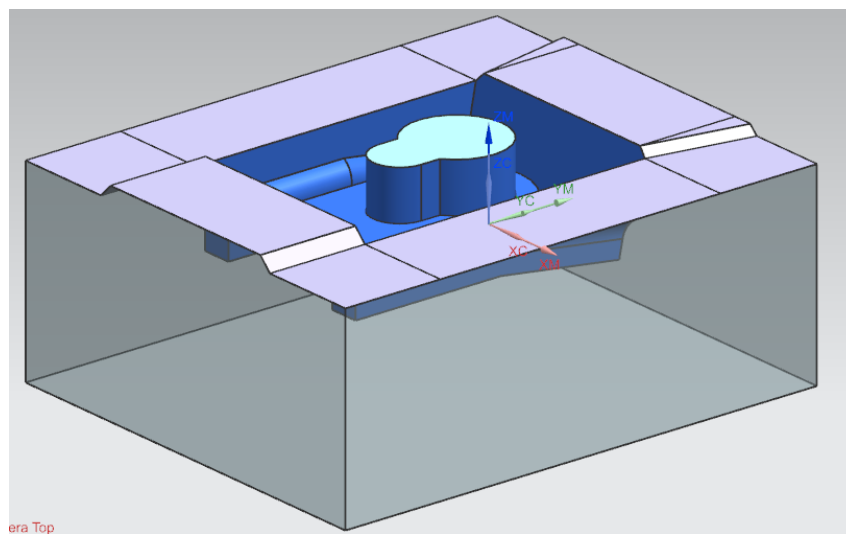


Figura 56 – Molde inferior da base

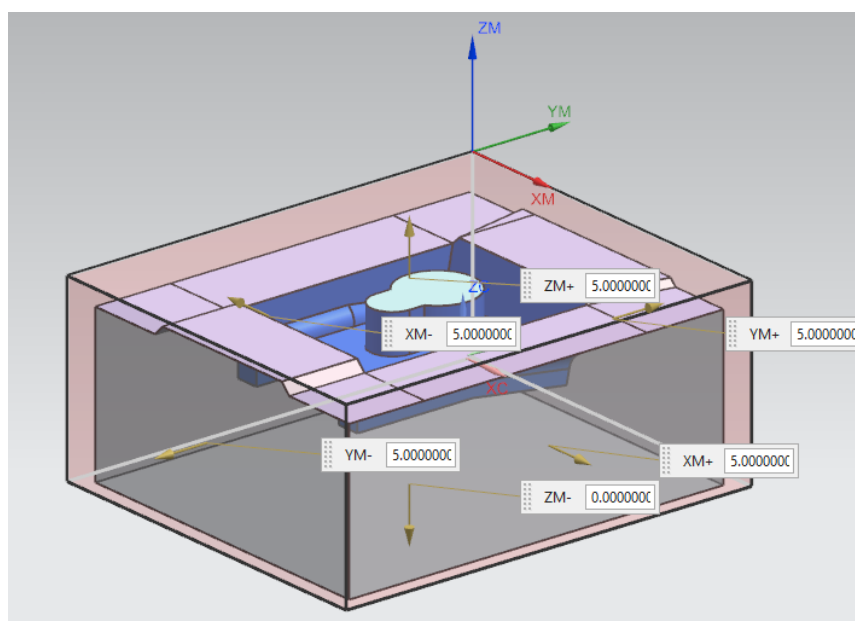


Figura 57 - Blank com 5mm de sobremetal em cada lado do molde

Operation Navigator - Program Order □

Name	To...	Path	Tool	Too...	Time
NC_PROGRAM					00:35:10
Unused Items					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESABASTE_FRESA_...		✓	FRESA_TOPO_20	1	00:03:04
ACABAMENTO_FR...		✓	FRESA_TOPO_20	1	00:06:59
REDESABASTE_FRES...		✓	FRESA_TOPO_10	2	00:01:55
REDESABASTE_FRES...		✓	FRESA_TOPO_10	2	00:01:35
REDESABASTE_FRES...		✓	FRESA_TOPO_06	3	00:03:00
ACABAMENTO_02...		✓	FRESA_TOPO_06	3	00:04:09
ACABAMENTO_03...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:00:49
ACABAMENTO_04...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:04:08
ACABAMENTO_05...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:02:11
ACABAMENTO_06...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:03:58
ACABAMENTO_07...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:01:11
ACABAMENTO_08...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:01:24

Figura 58 - Tempo do CAM do molde inferior da base

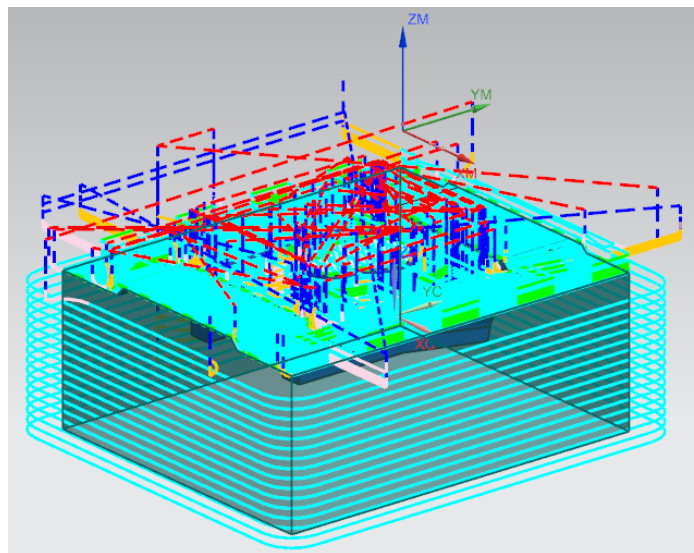


Figura 59 - Movimento da ferramenta no CAM do molde inferior da base

Pode-se notar na Figura (59) o elevado número de linhas vermelhas, isso é devido a quantidade elevada de acabamentos e trocas de ferramentas, o que acarreta em um tempo elevado sem cortar o material, contudo, como mostra a Figura (58), o tempo total é de pouco mais de 35 minutos, abaixo do tempo de construção da parte de cima do molde, mesmo tendo mais detalhes e maior troca de ferramentas, o motivo é que neste o desbaste foi menor, em comparação com o desbaste do anterior, como no desbaste a penetração é alta, a velocidade de corte tem que ser baixa para evitar elevadas temperaturas, o que traz desgaste a ferramenta.

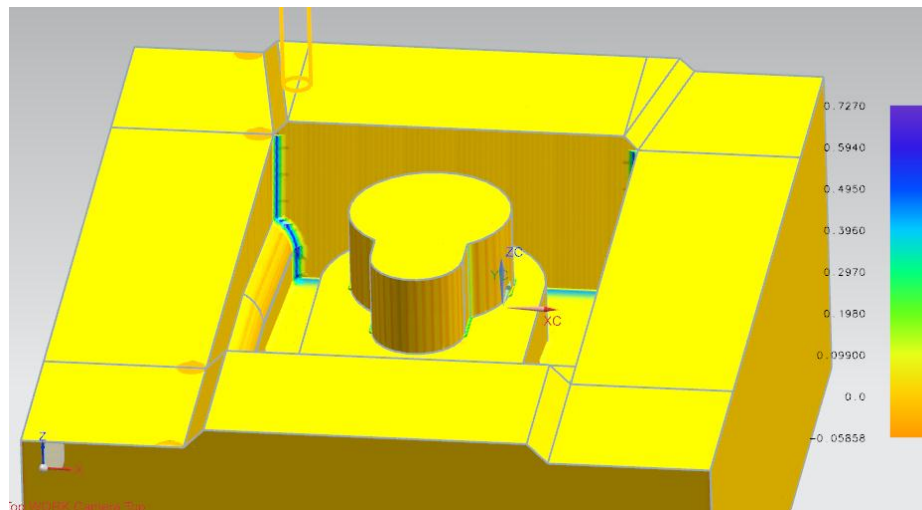


Figura 60 – Acabamento do molde superior da base

Na Figura (60) percebe-se um erro nos cantos vivos, contudo, tal erro é menor que 1 mm, o que não acarreta problemas a peça, devido não atrapalhar sua funcionalidade, mas, caso seja necessário, o erro pode ser retirado da peça moldada via usinagem, levando em consideração que tal feito, inicialmente, vai retirar material onde antes deveria ter, para suprir esse problema aconselha-se aumentar o vazio no molde o que será compensado na usinagem futura, para exemplificar, foi feito um aumento de 5 mm na dimensão a ser usinada posteriormente, o resultado da moldagem utilizando as peças das Figuras (60) e (55) é mostrado na Figura (61).

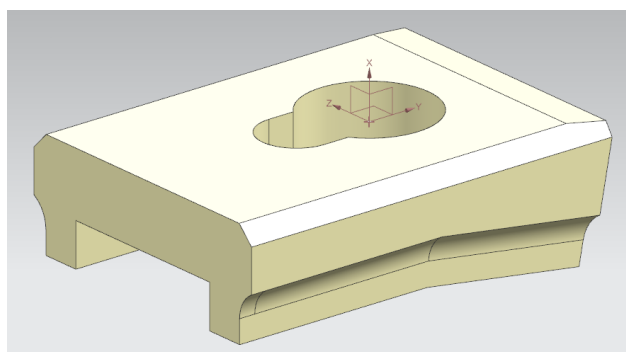


Figura 61 - Peça após moldagem

Como foi retirado os machos da parte de cima do molde, então a peça moldada não tem as cavidades do projeto inicial, o que deverá ser feito via furação, com acabamento em

fresa de topo, vale lembrar ainda que foi adicionado 5 mm na extremidade, com intuito de exemplificar o procedimento necessário para retirar o erro residual dos cantos vivos da peça em questão. A Tabela (5) mostra os parâmetros utilizados, já levando em consideração a otimização do CAM, a Figura (62) mostra as etapas de usinagem com seus respectivos tempos, por fim, na Figura (63) tem-se os caminhos da ferramenta para a realização dos furos.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagens regulados para a furação da base em INOX 316

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (Ap)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Furo 1	4	130	-	90	4775
Furo 2	10	130	-	90	4775
Acabamento	6	300	1mm	0 mm	5173

Operation Navigator - Program Order						
Name	To...	Path	Tool	Too...	Time	
NC_PROGRAM					00:02:24	
Unused Items					00:00:00	
PROGRAM					00:00:00	
FURO_BROCA_04	✓	✓	BROCA_04	1	00:00:09	
FURO_BROCA_10	✓	✓	BROCA_10	2	00:00:09	
ACABAMENTO_FR...	✓	✓	FRESA_TOPO_06	3	00:01:31	

Figura 62 – Tempos de furação da base moldada em INOX 316

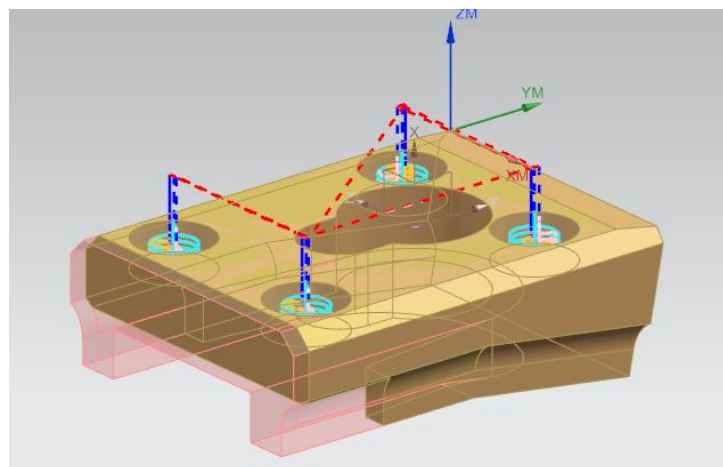


Figura 63 – Caminho da ferramenta na furação da base em INOX 316

Ao termino de tal etapa tem-se os furos feitos, o que já estaria de bom tamanho para o prosseguimento do trabalho, contudo, como dito anteriormente, como exemplificação, foi feito um acréscimo de 5 mm em algumas faces, com o intuito de retirar o erro gerado na usinagem do molde, a usinagem remanescente será realizada com base nos parâmetros, já otimizados, mostrados na Tabela (6). As Figuras (64) a (66) mostras, respectivamente, as etapas utilizadas e com seus respectivos tempos, os caminhos realizados pela ferramenta de corte para execução da usinagem e por fim o acabamento da peça Base.

Tabela 6 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM da base em INOX 316

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (mm)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	20	446	3	150	2380
Acabamento	4	300	0.5	150	5173

Operation Navigator - Program Order

Name	To...	Path	Tool	Too...	Time
NC_PROGRAM					00:05:26
Unused Items					00:00:00
PROGRAM_2					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESBASTE_FRESA...		✓	FRESA_TOPO_20	4	00:00:44
ACABAMENTO_FR...		✓	FRESA_TOPO_04	5	00:01:19
ACABAMENTO		✓	FRESA_TOPO_04	5	00:02:59

Figura 64 - Tempos de usinagem da base em INOX 316

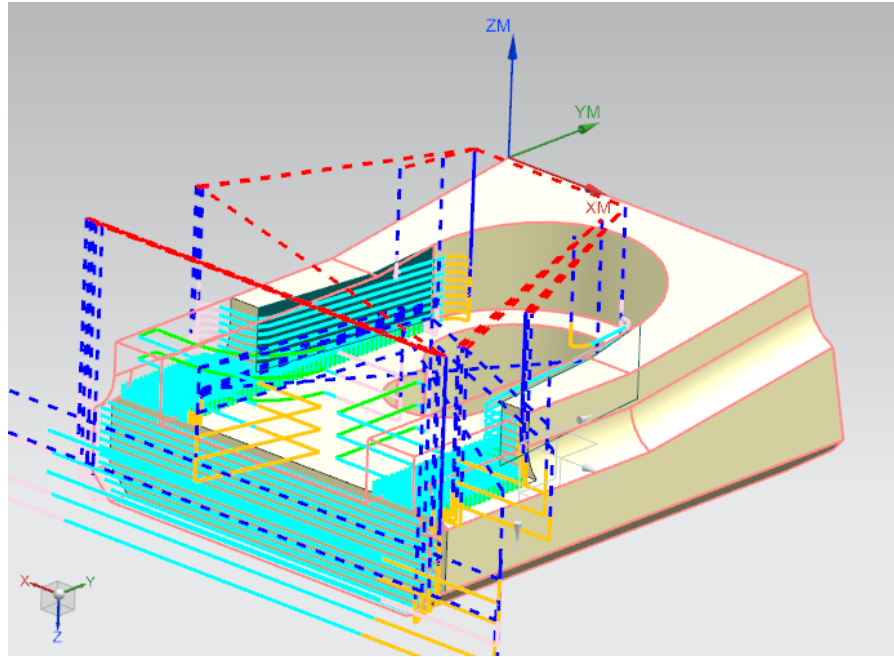


Figura 65 - Caminho da ferramenta na base em INOX 316

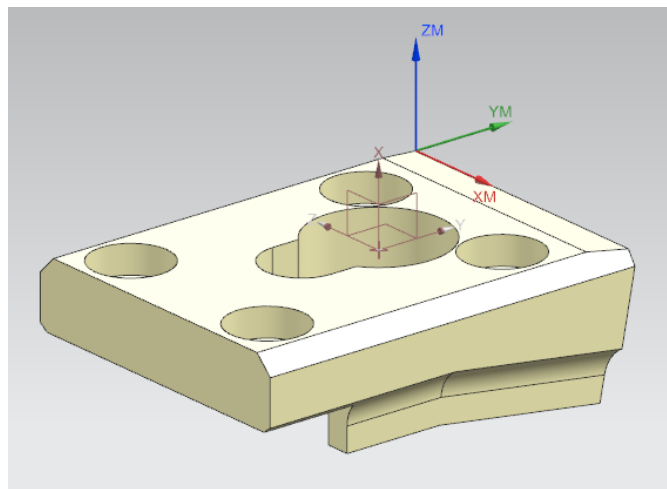


Figura 66 – Base finalizada

4.2 CORPO

Repetindo o processo para a peça corpo, onde devido sua formatação, apenas a parte de cima do molde será usinada, pois a parte de baixo foi projetada para ser plano, podendo ser feito um CAM com intuito apenas de manter uma qualidade superficial dentro de limites pré-estabelecidos (o que não é o caso). A Figura (67) apresenta o molde desejado.

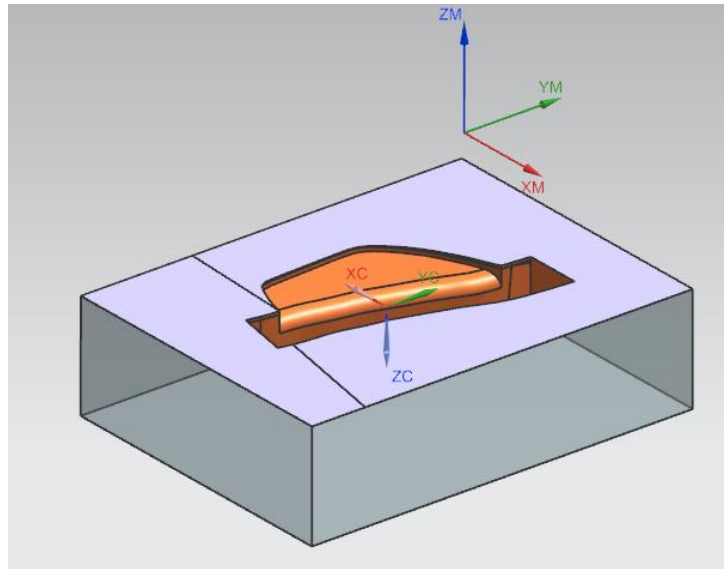


Figura 67 – Molde do corpo

É importante salientar aqui que da mesma maneira que da peça anterior, esta tem cantos vivos em seu interior, contudo, devido sua aplicação, espera-se que tal erro seja desprezível, no entanto, novamente foi adicionado material para ser retirado em uma usinagem futura, assumindo assim um erro bem menor quanto ao gerado apenas pela moldagem da peça. A Tabela (7) apresenta os parâmetros de corte otimizados, as Figuras (68), (69) e (70) mostram, respectivamente, os tempos de usinagem de cada etapa, os caminhos percorridos pela ferramenta de corte e por fim o acabamento superficial do molde do corpo

Tabela 7 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde do corpo

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (A_p)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	20	446	3	120	2350
Redesbaste	6	400	2	140	5570
Acabamento	4 e 10	300	0.5	130	5173

Operation Navigator - Program Order □

Name	To...	Path	Tool	Too...	Time
NC_PROGRAM					00:37:37
Unused Items					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESABASTE_FRESA_...		✓	FRESA_TOPO_20	1	00:10:27
REDESABASTE_FRES...		✓	FRESA_TOPO_06	3	00:00:18
REDESABASTE_02_FR...		✓	FRESA_TOPO_06	3	00:02:52
ACABAMENTO_03_...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:09:18
ACABAMENTO_04_...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:01:29
ACABAMENTO_05_...		✓	FRESA_TOPO_10	2	00:03:36
ACABAMENTO_06_...		✓	FRESA_TOPO_10	2	00:08:49

Figura 68 – Tempo de usinagem do molde do corpo

Com um tempo total de pouco mais de uma hora, é o molde mais rápido a ser fabricado, tanto pelo fato que apenas um lado do molde será usinado, tanto pelo fato que mesmo aquele que é usinado tem um tempo relativamente baixo de produção, quando comparado as demais até aqui apresentados.

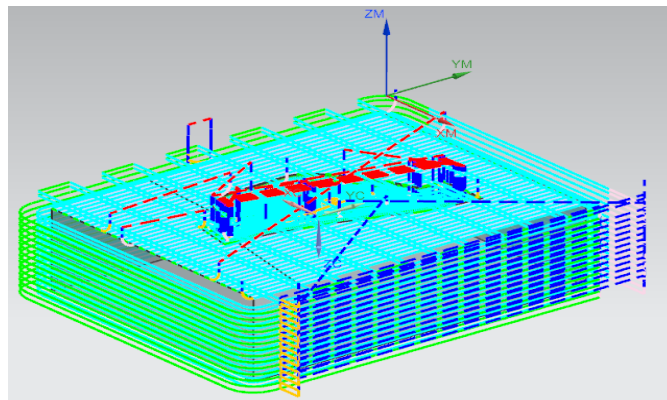


Figura 69 – Caminhos da ferramenta na usinagem do molde do corpo

Apesar de muitas linhas vermelhas, em maior parte nas atividades de acabamento, o tempo ficou baixo, muito disto devido aos poucos desbastes, e muitos acabamentos, onde a velocidade de corte é maior.

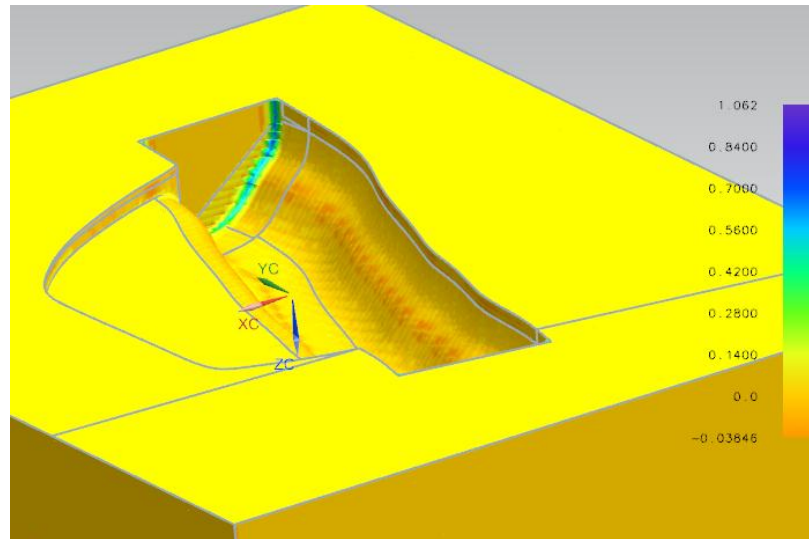


Figura 70 – Acabamento superficial do molde do corpo (mm)

É possível ver aqui o erro previamente mencionado, um etapa de CAM será realizada com o intuito de retirar as imperfeições, lembrando novamente que esta etapa será feita, contudo, a imperfeição, ou erro, não interferiria na utilização da peça montada, tendo em vista o erro ser pequeno, apenas 1 mm (um milímetro), e que situa-se justamente nos locais onde haverá uma união por solda, logo, material será depositado para que haja a união, fortalecendo ainda mais a ideia de que mesmo com o erro, a peça já está condizente com sua finalidade, suprimindo-a de todas as formas possíveis. A Tabela (8) apresenta os parâmetros de corte, já otimizados, sendo mostrado nas Figuras (71), (72) e (73), o tempo de usinagem de cada etapa, o caminho traçado pela ferramenta de corte e o acabamento superficial da peça, respectivamente.

Tabela 8 - Parâmetros de usinagens para o CAM do corpo em INOX 316

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (Ap)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	10	446	3	150	2350
Pré-acabamento	6	300	1	150	5173
Acabamento	4	300	0.5	150	5173

Operation Navigator - Program Order □

Name	To...	Path	Tool	Too...	Time
NC_PROGRAM					00:03:56
Unused Items					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESABASTE_FRESA_...		✓	FRESA_TOPO_10	1	00:00:27
PRE_ACABAMENT...		✓	FRESA_TOPO_06	3	00:01:14
ACABAMENTO_FR...		✓	FRESA_TOPO_04	2	00:01:39

Figura 71 – Tempos de usinagem da peça em INOX 316

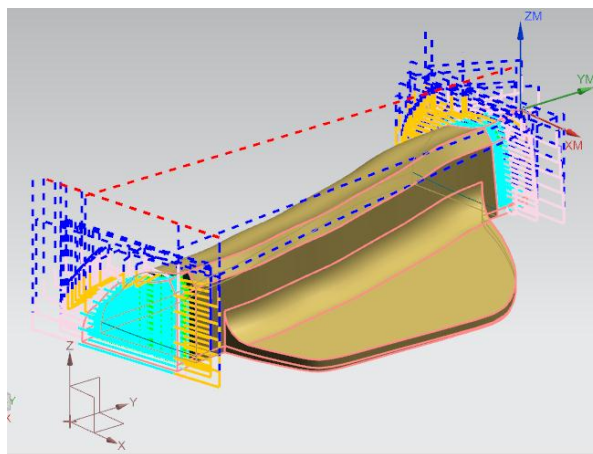


Figura 72 – Caminhos da ferramenta na usinagem em INOX 316

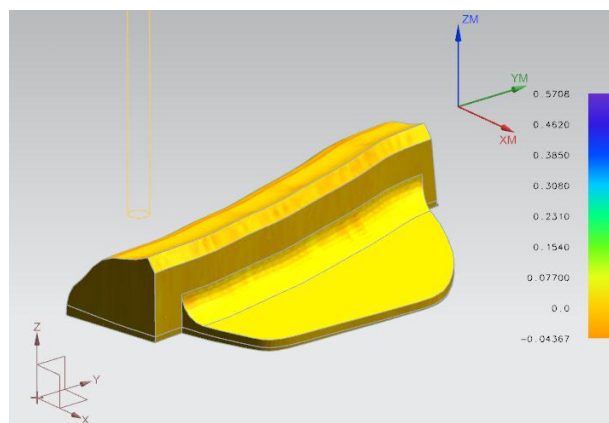


Figura 73 – Acabamento superficial da peça finalizada

Desta maneira a peça encontra-se com o menor erro possível, mas, na fabricação deve-se levar em conta se esta etapa é ou não válida, tendo em vista o custo gerado pela usinagem posterior ao molde, levando em consideração que a peça apresenta perfeitas condições de uso

antes mesmo da usinagem, por mais que seja uma rápida usinagem, não seria viável sua utilização com o intuito de um melhor acabamento nesta peça, contudo, esta afirmação é válida para esta peça, haverá outras, em outros estudos de engenharia reversa, onde o acabamento superficial seja fator crítico para a continuidade do projeto, valendo, neste caso, os esforços com usinagem posteriores a moldagem.

4.3 COLHER

De maneira análoga, foi feito a última parte da nossa peça, denominado de colher, onde foi usinado tanto a parte de cima quanto a parte de baixo. A Tabela (9) apresenta os parâmetros de corte, otimizados, utilizados no CAM. Já as Figuras (74), (75) e (76) mostram os tempos de usinagem, caminhos percorridos pela ferramenta e acabamento superficial do molde, respectivamente.

Tabela 9 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde superior da colher

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (Ap)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	20	446	3	120	2350
Redesbaste	10	400	2	140	5570
Acabamento	4 e 6	300	0.5	130	5173

Operation Navigator - Program Order □

Name	To...	Path	Tool	Too...	Time
NC_PROGRAM					00:47:36
Unused Items					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESABASTE_FRESA...		✓	FRESA_TOPO_20	1	00:11:17
REDESABASTE_FRES...		✓	FRESA_TOPO_10	2	00:03:49
ACABAMENTO_01_...		✓	FRESA_TOPO_10	2	00:08:45
ACABAMENTO_02_...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:13:33
ACABAMENTO_03_...		✓	FRESA_TOPO_04	4	00:06:26
ACABAMENTO_04_...		✓	FRESA_TOPO_06	3	00:02:57

Figura 74 – Tempos de usinagem do molde superior da colher

Com um tempo total de pouco menos de 50 minutos, está é, até o momento, o molde com fabricação mais lenta, pode-se ver na figura a seguir que existe poucas linhas vermelhas, com isso, o elevado tempo é devido a complexidade da superfície do molde, onde as etapas de acabamento tendem a ter um tempo mais elevado, quando comparadas as peças anteriores, com geometrias mais simples.

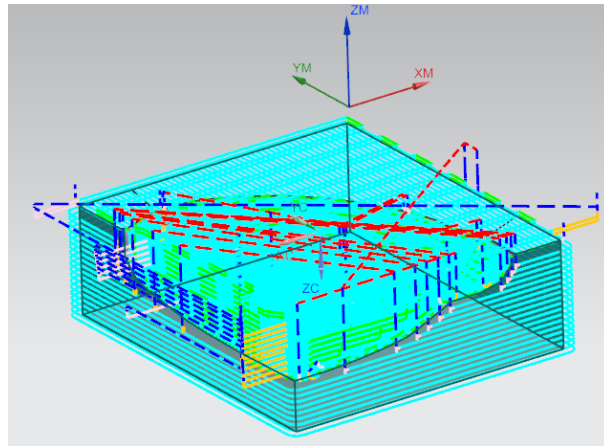


Figura 75 – Caminhos da ferramenta no molde superior da colher

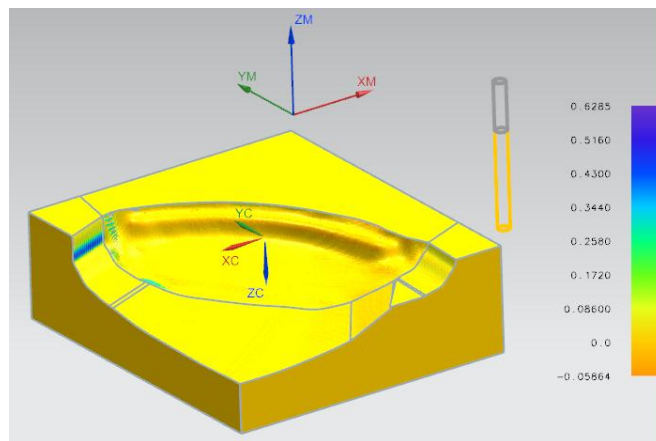


Figura 76 – Acabamento superficial do molde da colher

Percebe-se aqui um erro pouco acima de 0,6 mm, este é devido uma angulação negativa no ponto em questão, onde uma usinagem em 3 eixos não consegue retirar material, contudo, levando em consideração a utilização da peça, o erro encontra-se relativamente pequeno, onde a peça pode executar, sem nenhum problema, o serviço para o qual ela foi projetada.

A parte de baixo seguiu a mesma linha da parte de cima, com superfícies complexas, o que levou a um tempo elevado, a Tabela (10) mostra os parâmetros de corte otimizados, sendo mostrado nas Figuras (77), (78) e (79) os tempos de usinagem de cada etapa, os caminhos da ferramenta durante o processo de usinagem e o acabamento superficial do molde.

Tabela 10 - Parâmetros de usinagens regulados para o CAM do molde inferior da colher

	Diâmetro da ferramenta (mm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte (Ap)	Velocidade de corte (m/min)	Rotação do eixo (rpm)
Desbaste	20	446	3	120	2350
Redesbaste	6 e 10	400	2	140	5570
Acabamento	4, 6 e 10	300	0.5	130	5173

Operation Navigator - Program Order □

Name	To...	Path	Tool	Too...	Time
NC_PROGRAM					00:49:48
Unused Items					00:00:00
PROGRAM					00:00:00
DESBASTE_FRESA_...		✓	FRESA_TOPO_20	4	00:13:34
REDESBASTE_FRES...		✓	FRESA_TOPO_10	1	00:01:43
REDESBASTE_FRES...		✓	FRESA_TOPO_06	2	00:01:22
REDESBASTE_02_FR...		✓	FRESA_TOPO_06	2	00:01:28
ACABAMENTO_FR...		✓	FRESA_TOPO_04	3	00:06:39
ACABAMENTO_02_...		✓	FRESA_TOPO_04	3	00:01:53
ACABAMENTO_03_...		✓	FRESA_TOPO_06	2	00:08:56
ACABAMENTO_04_...		✓	FRESA_TOPO_10	1	00:10:06
ACABAMENTO_05_...		✓	FRESA_TOPO_10	1	00:02:56

Figura 77 – Tempos de usinagem do molde inferior da colher

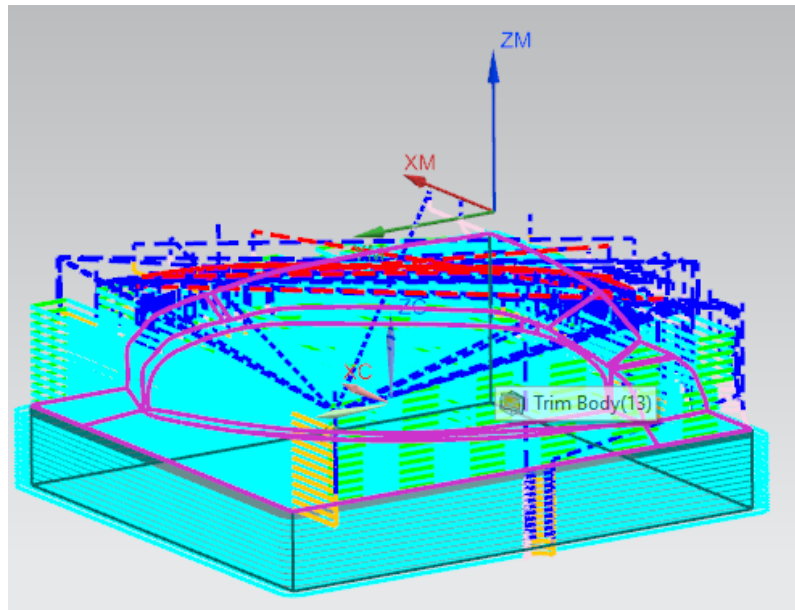


Figura 78 – Caminhos da ferramenta no molde inferior da colher

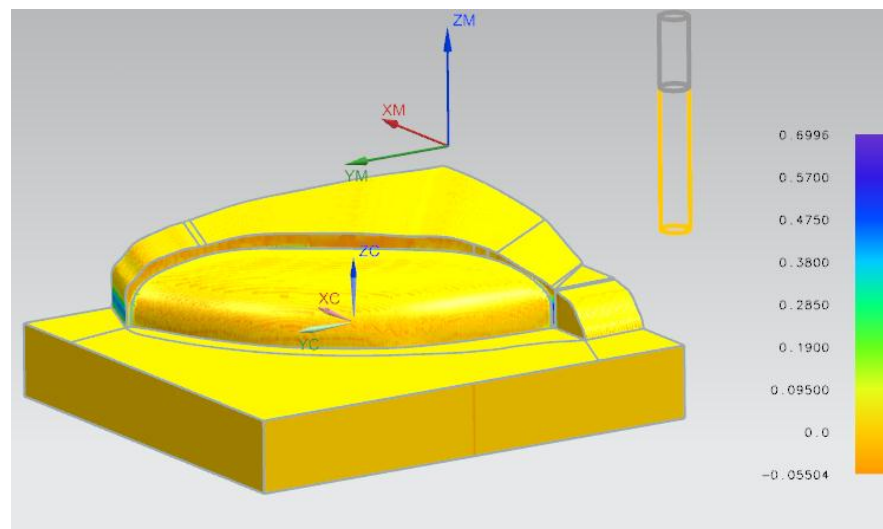


Figura 79 – Acabamento superficial do molde inferior da colher

Novamente temos um erro acima de 0,5 mm, mas com uma aplicação simples, onde o erro não atrapalha a execução da tarefa da peça.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas integrados CAx apresentam poderosas ferramentas para aplicação da engenharia reversa, suprimindo por completo todo o processo de manufatura, desde a idealização, até ao comando numérico para a realização, o que permite além de fabricar uma peça, reinventá-la, analisando, redesenhando, otimizando o produto, com esforços, tempos e custos reduzidos, otimizando por completo o processo produtivo, aumentando assim a competitividade.

A metodologia utilizada neste trabalho tornou possível não somente a reconstrução de uma peça de geometria complexa, mas também sua edição e análise, onde caso seja necessário, pode-se utilizar o arquivo virtual com a finalidade de otimização da peça, buscando, por exemplo, um material que atenda suas exigências sem comprometer sua estrutura, ou até mesmo uma redução do material utilizado, sem afetar, obviamente, a utilização da peça, podendo até mesmo ser feito prototipagem da peça, importando como arquivo STL.

Entre tantas informações armazenadas em um único trabalho, pode-se destacar:

- A evolução da tecnologia CAx na manufatura industrial, criando produtos com maior qualidade e um menor custo, ajudando a melhoria continua do processo e produto em estudo;
- A metodologia aplicada, principalmente a utilizada na programação CAM, permitindo uma visão sistêmica do processo para obtenção da peça, onde as etapas utilizadas permitem o controle do processo;
- Usinagem de geometria complexa utilizando um maquinário 3 eixos utilizando um sistema integrado CAD/CAM;
- Compreensão do sistema de moldes, materiais utilizados e métodos de fabricação de moldes;
- Visão sistêmica dos processos de usinagem, de seus parâmetros, limitações e aplicações.

5.1 PRINCIPAIS DIFICULDADES

Durante a execução da engenharia reversa foi notado diversas dificuldades em sua realização, entre tantas dificuldades pode-se citar:

- Falta de conhecimento prévio sobre as ferramentas de engenharia reversa disponíveis no software utilizado;
- Equipamentos utilizados, necessitando de computadores arrojados, com placa de vídeo e boas memórias RAM's, devido a necessidade de processamento requerido pelo software, principalmente nas etapas de CAE;
- Falta de conhecimento prévio sobre as ferramentas de criação de moldes disponíveis no software utilizado;
- Otimização do CAM automático;
- Definição de material para o molde;

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados obtidos no presente estudo, trabalhos futuros podem ser efetuados através da sugestão dos seguintes temas:

- Aplicar a metodologia da engenharia reversa aplicada neste trabalho em uma outra peça, comparando os resultados e aperfeiçoando, em busca de uma metodologia genérica;
- Replicar a peça por processo de manufatura aditiva;
- Análise de manufatura para a obtenção da peça estudada, sendo analisado as vantagens de obter-se a peça por molde, por usinagem, por soldagem de partes isoladas, fazendo sempre uma ligação com a quantidade de fabricação especificada para cada método;
- Análise CAE de esforços exigidos pela peça, com intuito de melhorar o projeto inicial, seja pela mudança de material ou modificação na geometria da peça, sem afetar sua função;
- Criação de um molde único para a peça estudada, com o intuito de obter a peça com apenas um molde, agilizando o processo de fabricação.

6 REFERÊNCIAS

- **Como realizar o fresamento em diferentes materiais**, 2019. Disponível em <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>> Acesso em; 03 de ago. 2019, 15:21:00
- COSTA, Carlos A.; LUCIANO, Marcos Alexandre. **Tendências e desafios para sistemas computacionais de apoio a projetos de moldes de injeção**. Plástico Sul, Julho 2002, pp. 40-45.
- Diniz, A.E. et al. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Art Liber, 2000.
- **Elementos Finitos – Módulo 1: Análise Linear**, 2019. Disponível em: <https://www.forcecursos.com.br/curso/10/elementos_finitos_modulo_1_analise_linear> Acesso em; 25 de ago. 2019, 17:42:00.
- **Engenharia reversa**, 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Engenharia_reversa&oldid=55498055>. Acesso em: 15 jun. 2019, 13:36:00.
- FALHEIROS, Mizael. **Estudo e aplicação de sistemas integrados CAD/CAM/CNC**. Trabalho de Conclusão de Curso –Universidade Federal da Paraíba, Departamento de engenharia mecânica, João Pessoa, 2019.
- FARHA N, ALEXANDRE. **Transformação – moldes de injeção para termoplásticos**, 2016. Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/transformacao-moldes-de-injecao-para-termoplasticos/>> Acesso em; 23 de jun. 2019, 17:38:30.
- GENEROSO, D. **Usinagem Avançada (torneamento)**. Apostila curso técnico em Eletromecânica. Instituto Federal de Santa Catarina, 2011. Araranguá- SC;
- **Global S**, 2019. Disponível em: <<https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/global-s>> Acesso em; 25 de ago. 2019, 17:42:00.
- GRANJA, Domingos. **Materiais para moldes. Manual do projetista para moldes de injeção de plástico**. Volume 4. Marina Grande. CENTIMFE, 2003, ISBN 972.98872-1-7.

- HOSCHEK, J.; DANKWORT, W. **Reverse Engineering**. 1. ed. Einheitsaufnahme. Teubner Stuttgart, 1996.
- JÚNIOR, Pedro Valentim Dantas. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise da incerteza de uma máquina de medição por coordenadas com sensor a laser**. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2017.
- KAZMER, David O. **Injection mold desing Engineering**. 1. Ed. Cincinnati, Hanser Gardner Publications, 2007.
- KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani. **Introdução à análise em elementos finitos**. Rio de Janeiro, LTC, 2011.
- LEU, MING C.; et al. **NX 10 for engineering design**. Departamento f mechanical and aerospace engineering, Missouri university of Science & technology, 2016.
- MARTIN, Victor Barbosa. **Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear**. Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Rio de Janeiro, 2010.
- **Método dos elementos finitos**, 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9todo_dos_elementos_finitos&oldid=54089717> Acesso em; 22 de jun. 2019, 05:27:00.
- ORREGO, Roxana M. Martinez. **Fontes de erros em metrologia a três coordenadas: considerações gerais**. Revista de ciência de Tecnologia, v.8, 2000.
- PONTICELLI, Claudiomar; AURÉLIO, Cássio. **O avanço do desenvolvimento de produtos através da engenharia reversa**. Revista UNIFEBE, Brusque, v.1, 2010.
- RAJA, V.; Fernandes, K. J. **Reverse engineering: an industrial perspective**, 1º ed., Springer Science & Business Media, London, 2008.
- SENAI/SP. **Injeção de plásticos e metais**. São Paulo, 2009.
- **SOLIDWORKS Simulation é um software de Análise de Elementos Finitos (FEA)?**, 2019. Disponível em: <<https://www.4ieng.com.br/single-post/SOLIDWORKS-Simulation-e-um-software-de-Analise-de-Elementos-Finitos-FEA>> Acesso em; 25 de ago. 2019, 17:30:00.

- SOUZA, A. ULBRICH, C. **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC**. 2ª Edição, Editora Art liber, São Paulo, 2013.