

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

BRUNA KAROLINA SCHNEIDER

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES CAM

FLORIANÓPOLIS, 2021

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

BRUNA KAROLINA SCHNEIDER

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOTWARES CAM

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

Professor Orientador: Diovani
Castoldi Lencina, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Schneider, Bruna Karolina

Análise Comparativa entre Softwares CAM / Bruna Karolina Schneider ; orientação de Diovani Castoldi Lencina. - Florianópolis, SC, 2021.

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

Inclui Referências.

1. CAM. 2. Usinagem por fresamento. 3. Análise comparativa. I. Castoldi Lencina, Diovani. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.
III. Título.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES CAM

BRUNA KAROLINA SCHNEIDER

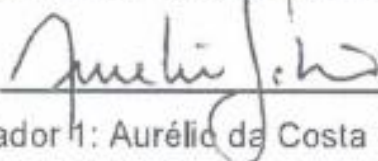
Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de abril de 2021

Banca Examinadora:



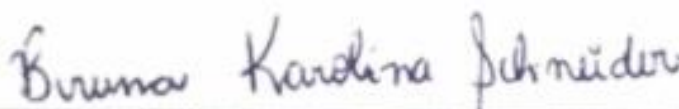
Prof. Orientador / Presidente: Giovanni Castoldi Lencina



Prof. Avaliador 1: Aurélio da Costa Sabino Netto



Prof. Avaliador 3: Eduardo Antonio Linck



Acadêmico: BRUNA KAROLINA SCHNEIDER



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

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

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o estudante **BRUNA KAROLINA SCHNEIDER**, matrícula nº 161006844-0, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho *ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES CAM*, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 20 de Maio de 2021.

Prof. Orientador do TCC: Diovani Castoldi Lencina



Documento assinado digitalmente
Diovani Castoldi Lencina
Data: 20/05/2021 16:45:23-0300
CPF: 582.332.020-53

Dedico este trabalho aos meus familiares, em especial meus pais, que sempre me incentivaram, aos meus amigos e ao meu orientador por todo ensinamento e Suporte nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por ter me dado coragem, esperança e tantas boas oportunidades, para que o objetivo de ser Engenheira Mecatrônica fosse alcançado.

Agradeço aos meus pais Ernani Flávio Schneider e Rubia Cinara Franco da Rosa por todo o cuidado, amor e suporte que me deram durante todos esses anos, eles são a razão de tudo o que eu sou, como pessoa e profissional.

Agradeço aos meus irmãos Gustavo Henrique Schneider e Laura Isadora Schneider, por estarem sempre ao meu lado, principalmente nos momentos difíceis me acolhendo e incentivando.

Agradeço a minha avó Maria Ruth Franco da Rosa por ter me recebido em sua casa, me proporcionando um lar e a melhor condição possível para que eu pudesse me dedicar aos estudos, na ausência dos meus pais. Agradeço também a toda minha família que não mediu esforços para me ajudar durante toda a graduação e torce pelo meu sucesso.

Agradeço ao meu namorado Jadson Demétrio Vidal, por ter acreditado na minha capacidade em todos os momentos em que eu descreditei de mim mesma, por ter me incentivado e dado todo o apoio necessário para que eu elaborasse esse trabalho.

Agradeço ao professor Diovani Castoldi Lencina pela disposição em me ajudar em um projeto como esse, por toda atenção e paciência dedicadas durante o desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Mecatrônica por todo o conhecimento e experiências compartilhadas comigo, me sinto honrada em ter sido moldada por eles.

Agradeço aos meus “fiéis escudeiros” de graduação Ellen Amorim de Carvalho, Marcus Vinicius da Silva e Rainara Bueno Aldebrand, por toda a amizade e companheirismo durante a graduação.

Por fim, agradeço aos professores orientadores da monitoria acadêmica, pela confiança em mim e no meu trabalho e também agradeço a Equipe Zênite Solar, por todo o aprendizado e vitórias.

“O homem não teria alcançado o possível se repetidas
vezes não tivesse tentado o impossível.”
(Max Weber)

RESUMO

A usinagem é um processo de fabricação amplamente utilizado nas indústrias do mundo, a maior parte dos produtos industrializados passa pela operação de usinagem em alguma etapa de produção. Segundo a norma DIN 8580 de 2003, usinagem é todo o processo de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco, ou seja, consiste na retirada de material do bloco de matéria prima bruta ou pré-fabricada, com uma ferramenta cortante, conferindo à peça forma, dimensões e acabamento, ou ainda a combinação dos três. Visando melhorar os tempos de usinagem, a qualidade superficial e dimensional, e preocupando-se com questões ambientais, são investidos recursos na compra de máquinas e *softwares* de programação mais eficientes e mais modernos. As empresas desenvolvedoras dos *softwares* de programação CNC aprimoram suas plataformas constantemente, a partir de informações coletadas entre os usuários, formando um banco de dados que auxilia a entender e melhorar o processo de fabricação. Comercialmente existem diversos *softwares* CAM, entretanto é importante conhecer as características e áreas de aplicação dos mesmos, visto que nem todas as indústrias possuem as mesmas necessidades. Mediante isso, este trabalho consiste em uma análise comparativa entre três *softwares* comerciais de programação CNC para usinagem por fresamento. Os *softwares* comparados são: o PowerMILL, SprutCAM e SolidWorks CAM. Para a avaliação foram feitas simulações de usinagem por fresamento de uma peça padrão, com operações de desbaste, alívio de cantos e acabamento. A análise comparativa abrange o tempo de usinagem, código CNC, e o comprimento do percurso da ferramenta.

Palavras-chave: CAM. Usinagem por fresamento. Análise comparativa.

ABSTRACT

Machining is a manufacturing process widely used in industries all over the world, most of all industrialized products go through the machining operation in some of their production stages. According to DIN 8580 of 2003, machining is the entire manufacturing process where material is removed in the form of chips, that is, it consists of removing material from the raw or prefabricated raw material block, with a cutting tool, giving the part shape, dimensions and finish, or even a combination of the three. In order to improve machining times, surface and dimensional quality, and being concerned with environmental issues, resources are invested in the purchase of more efficient and more modern machines and programming software. The companies that develop CNC programming software constantly improve their platforms, based on information collected among users, forming a database that helps to understand and improve the manufacturing process. Commercially there are several CAM software, however it is important to know their characteristics and application areas, since not all industries have the same needs. Therefore, this work consists of a comparative analysis between three commercial CNC programming software for machining. The software that will be compared are PowerMILL, SprutCAM and SolidWorks CAM. For the evaluation were performed simulations of milling machining a standard part, with roughing operations, corner relief and finishing. The comparative analysis covered machining time, CNC code, and the length of the tool path.

Keywords: CAM. Milling machining. Comparative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da malha de triângulos.....	29
Figura 2 – Etapas de manufatura utilizando CAD/CAM/CNC.....	30
Figura 3 – Metodologia geral de trabalho empregando sistemas CAM.....	34
Figura 4 – Operação de desbaste.....	35
Figura 5 – Operação de alívio de cantos.....	36
Figura 6 – Operação de pré-acabamento.....	36
Figura 7 – Tolerância da trajetória para usinagem.....	37
Figura 8 – Exemplos de estratégias de trajetórias de usinagem, em (a) Estratégia de <i>offset</i> , em (b) estratégia de passes paralelos.....	38
Figura 9 – Segmentos de retas gerados pelo comando G01 e tolerância definida pelo usuário.....	39
Figura 10 – Interpolação linear e circular.....	39
Figura 11 – Pontos CL e CC.....	40
Figura 12 – Malha de triângulos.....	41
Figura 13 – Método paramétrico.....	41
Figura 14 – Método <i>drive surface</i>	42
Figura 15 – Método plano auxiliar.....	42
Figura 16 – Métodos de obtenção dos pontos CC, em (a) Método Casteljau, em (b) Metodologia <i>offset</i> inverso da ferramenta.....	43
Figura 17 – Cálculo do ponto CL.....	44
Figura 18 – Exemplo de código CNC.....	48
Figura 19 – Fluxo de geração do código CNC através do pós-processador.....	49
Figura 20 – Integração dos sistemas CIM.....	50
Figura 21 – Exemplo da associação dos sistemas CIM no processo de manufatura.....	51
Figura 22 – Interface do SprutCAM.....	52
Figura 23 – Tela inicial do pós-processador do SprutCAM.....	53
Figura 24 – Interface do PowerMILL.....	54
Figura 25 – Tela inicial do pós-processador do PowerMILL.....	54
Figura 26 – Interface do SolidWorks CAM.....	55
Figura 27 – Tela inicial do pós-processador do SolidWorks CAM.....	56
Figura 28 – Organograma da metodologia.....	57

Figura 29 – Modelo 1.....	58
Figura 30 – Vistas do Modelo 1.....	59
Figura 31 – Modelo 2.....	60
Figura 32 – Organograma dos passos da programação no PowerMILL.....	63
Figura 33 – Modelo 1 importado no PowerMILL.....	63
Figura 34 – Modelo 2 importado no PowerMILL.....	64
Figura 35 – Blocos de matéria-prima, em (a) Bloco de matéria-prima do Modelo 1, em (b) Bloco de matéria-prima do Modelo 2.....	65
Figura 36 – Planos de trabalho, em (a) Plano de trabalho do Modelo 1, em (b) Plano de trabalho do Modelo 2.....	65
Figura 37 – Criação e configuração das ferramentas na janela gráfica do Explorer, em (a) Dados geométricos, em (b) Parâmetros de corte.....	66
Figura 38 – Ligação rasante entre movimentos.....	67
Figura 39 – Estratégia de entrada nas peças.....	67
Figura 40 – Estratégia de saída nas peças.....	68
Figura 41 – Configuração dos pontos inicial e final das trajetórias.....	68
Figura 42 – Parâmetros de corte do faceamento no PowerMILL.....	69
Figura 43 – Faceamento no PowerMILL.....	70
Figura 44 – Parâmetros de corte do acabamento do faceamento no PowerMILL.....	70
Figura 45 – Acabamento do faceamento no PowerMILL.....	71
Figura 46 – Parâmetros de corte do desbaste do rasgo no PowerMILL.....	71
Figura 47 – Desbaste do rasgo no PowerMILL.....	72
Figura 48 – Parâmetros de corte do desbaste da cavidade no PowerMILL.....	72
Figura 49 – Fronteira de usinagem da cavidade.....	73
Figura 50 – Desbaste da cavidade no PowerMILL.....	73
Figura 51 – Parâmetro de corte a_p do acabamento do rasgo do Modelo 1 no PowerMILL.....	74
Figura 52 – Parâmetro de corte a_e do acabamento do rasgo do Modelo 1 no PowerMILL.....	74
Figura 53 – Acabamento do rasgo no PowerMILL.....	75
Figura 54 – Parâmetro de corte do acabamento da cavidade no PowerMILL.....	75

Figura 55 – Distribuição dos pontos do acabamento da cavidade no PowerMILL....	76
Figura 56 – Acabamento da cavidade no PowerMILL.....	76
Figura 57 – Parâmetros de corte para a furação no PowerMILL.....	77
Figura 58 – Furação no PowerMILL.....	78
Figura 59 – Fronteira de fresamento dos rebaixos.....	78
Figura 60 – Parâmetros de corte do desbaste do rebaixo no PowerMILL.....	79
Figura 61 – Fresamento dos rebaixos no PowerMILL.....	79
Figura 62 – Simulação do faceamento do Modelo 1 no PowerMILL.....	80
Figura 63 – Simulação do desbaste do rasgo do Modelo 1 no PowerMILL.....	80
Figura 64 – Simulação do desbaste da cavidade do Modelo 1 no PowerMILL.....	81
Figura 65 – Simulação da furação do Modelo 1 no PowerMILL.....	81
Figura 66 – Simulação do desbaste do rebaixo Modelo 1 no PowerMILL.....	81
Figura 67 – Parâmetros de corte do desbaste do Modelo 2 no PowerMILL.....	83
Figura 68 – Desbaste do Modelo 2 no PowerMILL.....	83
Figura 69 – Resíduo de desbaste no PowerMILL.....	84
Figura 70 – Parâmetros de corte do desbaste do resíduo do Modelo 2 no PowerMILL.....	84
Figura 71 – Desbaste do resíduo do Modelo 2 no PowerMILL.....	85
Figura 72 – Parâmetros de corte do acabamento do Modelo 2 no PowerMILL.....	86
Figura 73 – Acabamento do Modelo 2 no PowerMILL.....	86
Figura 74 – Simulação do desbaste do Modelo 2 no PowerMILL.....	87
Figura 75 – Simulação do redesbaste do Modelo 2 no PowerMILL.....	87
Figura 76 – Simulação do acabamento do Modelo 2 no PowerMILL.....	88
Figura 77 – Organograma dos passos de programação no SprutCAM.....	89
Figura 78 – Importação do Modelo 1 no SprutCAM.....	90
Figura 79 – Importação do Modelo 2 no SprutCAM.....	90
Figura 80 – Conjunto máquina-ferramenta, morsa e peça para o Modelo 1 (a) Conjunto completo (b) Conjunto morsa-peça.....	91
Figura 81 – Conjunto máquina-ferramenta, morsa e peça para o Modelo 2 (a) Conjunto completo (b) Conjunto morsa-peça.....	91
Figura 82 – Zero peça, em (a) Modelo 1, em (b) Modelo 2.....	92
Figura 83 – Bloco de matéria-prima, em (a) Matéria-prima do Modelo 1 (b) Matéria- prima do Modelo 2.....	92

Figura 84 – Estratégia de corte do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	93
Figura 85 – Parâmetros de corte do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	94
Figura 86 – Faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	94
Figura 87 – Parâmetros de corte do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	95
Figura 88 – Estratégia de corte do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	95
Figura 89 – Acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	96
Figura 90 – Parâmetros de corte do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.....	96
Figura 91 – Estratégia de corte do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM...	97
Figura 92 – Desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.....	97
Figura 93 – Parâmetros de corte do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	98
Figura 94 – Estratégia de corte do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	98
Figura 95 – Desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	99
Figura 96 – Parâmetros de corte do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.....	99
Figura 97 – Estratégia de corte do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.....	100
Figura 98 – Acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.....	100
Figura 99 – Parâmetros de corte do acabamento da lateral da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	101
Figura 100 – Acabamento das laterais da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	101
Figura 101 – Estratégia de corte do acabamento do fundo da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	102
Figura 102 – Acabamento do fundo da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	102
Figura 103 – Parâmetros de furação do Modelo 1 no SprutCAM.....	103
Figura 104 – Estratégia de furação do Modelo 1 no SprutCAM.....	103
Figura 105 – Furação do Modelo 1 no SprutCAM.....	104
Figura 106 – Parâmetros de corte do rebaixo do Modelo 1 no SprutCAM.....	104
Figura 107 – Desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SprutCAM.....	105

Figura 108 – Simulação do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	105
Figura 109 – Simulação do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	106
Figura 110 – Simulação do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.....	106
Figura 111 – Simulação do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	106
Figura 112 – Simulação do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.....	107
Figura 113 – Simulação do acabamento das laterais da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	107
Figura 114 – Simulação do acabamento do fundo da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.....	107
Figura 115 – Simulação da furação do Modelo 1 no SprutCAM.....	108
Figura 116 – Simulação do desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SprutCAM.....	108
Figura 117 – Parâmetros de corte para o desbaste do Modelo 2 no SprutCAM.....	110
Figura 118 – Estratégia de corte do Modelo 2 no SprutCAM.....	110
Figura 119 – Desbaste do Modelo 2 no SprutCAM.....	111
Figura 120 – Parâmetros de corte do redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM.....	112
Figura 121 – Estratégia de corte do redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM.....	112
Figura 122 – Redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM.....	113
Figura 123 – Parâmetros de corte do acabamento do Modelo 2 no SprutCAM.....	113
Figura 124 – Acabamento do Modelo 2 no SprutCAM.....	114
Figura 125 – Simulação do desbaste do Modelo 2 no SprutCAM.....	114
Figura 126 – Simulação do redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM.....	115
Figura 127 – Simulação do acabamento do Modelo 2 no SprutCAM.....	115
Figura 128 – Organograma dos passos de programação no SolidWorks CAM.....	116
Figura 129 – Importação do Modelo 1 para o SolidWorks CAM.....	117
Figura 130 – Importação do Modelo 2 para o SolidWorks CAM.....	117
Figura 131 – Bloco de matéria-prima, direção dos eixos e zero peça, em (a) Modelo 1, em (b) Modelo 2.....	118
Figura 132 – Recursos usináveis do Modelo 1.....	119
Figura 133 – Parâmetros de corte do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	120
Figura 134 – Faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	120

Figura 135 – Parâmetros de corte do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	121
Figura 136 – Acabamento do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	121
Figura 137 – Parâmetros de corte do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	122
Figura 138 – Desbaste do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	122
Figura 139 – Parâmetros de corte do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	123
Figura 140 – Desbaste da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	123
Figura 141 – Parâmetros de corte do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	124
Figura 142 – Acabamento do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	124
Figura 143 – Parâmetros de corte do acabamento da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	125
Figura 144 – Acabamento da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	125
Figura 145 – Parâmetros de corte para a furação do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	126
Figura 146 – Furação do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	126
Figura 147 – Parâmetros de corte do rebaixo do Modelo 1 no SolidWorks CAM....	127
Figura 148 – Opções de recursos para o desbaste do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	127
Figura 149 – Desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	128
Figura 150 – Simulação do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	128
Figura 151 – Simulação do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	129
Figura 152 – Simulação do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	129
Figura 153 – Simulação do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks.....	129
Figura 154 – Simulação do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	130
Figura 155 – Simulação do acabamento da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	130
Figura 156 – Simulação da furação do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	130

Figura 157 – Simulação do desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	131
Figura 158 – Parâmetros de corte a_p para o desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	133
Figura 159 – Parâmetros de corte a_e para o desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	133
Figura 160 – Desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	134
Figura 161 – Parâmetros de corte para o redesbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	135
Figura 162 – Redesbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	135
Figura 163 – Parâmetros de corte do acabamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	136
Figura 164 – Acabamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	137
Figura 165 – Simulação do desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	137
Figura 166 – Simulação do Redesbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	138
Figura 167 – Simulação do acabamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	138
Figura 168 – Análise do número de linhas geradas para o Modelo 1.....	140
Figura 169 – Análise do número total de linhas geradas para o Modelo 1.....	141
Figura 170 – Análise do número de linhas geradas para o Modelo 2.....	142
Figura 171 – Análise do número total de linhas geradas para o Modelo 2.....	142
Figura 172 – Análise do tempo de fresamento para o Modelo 1.....	143
Figura 173 – Análise do tempo total de fresamento para o Modelo 1.....	144
Figura 174 – Análise do tempo de fresamento para o Modelo 2.....	145
Figura 175 – Análise do tempo total de fresamento para o Modelo 2.....	145
Figura 176 – Análise do comprimento do percurso da ferramenta para o Modelo 1.....	147
Figura 177 – Análise do comprimento total do percurso da ferramenta para o Modelo 1.....	147
Figura 178 – Análise do comprimento do percurso da ferramenta para o Modelo 2.....	148
Figura 179 – Análise do comprimento total do percurso da ferramenta para o Modelo 2.....	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos sistemas CAM pelo número de eixos.....	32
Quadro 2 – Classificação dos sistemas CAM pelo tipo de geometria do modelo.....	32
Quadro 3 – Classificação dos sistemas CAM pela integração com o recurso de modelamento.....	45
Quadro 4 – Funções do tipo palavras.....	45
Quadro 5 – Funções G, comandos preparatórios.....	46
Quadro 6 – Funções M, comandos miscelâneos.....	47
Quadro 7 – Ferramentas utilizadas.....	61
Quadro 8 – Estratégias de fresamento do Modelo 1.....	140
Quadro 9 – Estratégias de fresamento do Modelo 2.....	141
Quadro 10 – Comparativo final entre os <i>softwares</i>	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem para as ferramentas.....	62
Tabela 2 – Características dos códigos CNC do Modelo 1 no PowerMILL.....	82
Tabela 3 – Características dos códigos CNC do Modelo 2 no PowerMILL.....	88
Tabela 4 – Características dos códigos CNC do Modelo 1 no SprutCAM.....	109
Tabela 5 – Características dos códigos CNC do Modelo 2 no SprutCAM.....	115
Tabela 6 – Características dos códigos CNC do Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	132
Tabela 7 – Características dos códigos CNC do Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAM – Computer Aided Manufacturing
CNC – Comando Numérico Computadorizado
DIN – Deutsches Institut für Normung
HSC – High Speed Cutting
CAD – Computer Aided Design
NC – Numerical control
CIM – Computer Integrated Manufacturing
ISO – International Organization for Standardization
CC – Cutter contact
CL – Cutter location
2D – 2 dimensões
3D – 3 dimensões
 V_c – Velocidade de corte
F – Avanço
S – Velocidade de rotação
 f_z – Avanço por aresta
 a_e – Profundidade de corte radial
 a_p – Profundidade de corte axial
T – Torre da ferramenta
CLF – Cutter location file
CAPP – Computer Aided Process Planning
CAI – Computer Aided Inspection
CAE – Computer Aided Engineering
STL – Standard Triangle Language
STEP – Standard for the Exchange of Product Data
VRML – Virtual Reality Modeling Language
IGES – Initial Graphics Exchange Specification
DFX – Design for Excellence
3DM – 3 Dimensional Modeling
LAM I – Laboratório da Automação da Manufatura I
LU – Comprimento útil

LF – Comprimento total

APMX – Profundidade máxima de corte

DC – Diâmetro de corte

RE – Raio de corte

ZAFP – Número de arestas cortantes

F_n – Avanço por rotação

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	24
1.1.	Definição do Problema	25
1.2.	Objetivos	26
1.2.1.	Objetivo Principal	26
1.2.2.	Objetivos Específicos	26
1.3.	Justificativa	27
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1.	Sistemas CAM	29
2.2.	Aplicações dos Sistemas CAM	30
2.3.	Classificação dos sistemas CAM	31
2.3.1.	Classificação quanto ao número de eixos	31
2.3.2.	Classificação quanto ao tipo de representação geométrica dos modelos	32
2.3.3.	Classificação quanto à integração com recursos de modelamento	33
2.4.	Metodologia de utilização de um sistema CAM	33
2.5.	Operações básicas de um sistema CAM	34
2.5.1.	Desbaste	35
2.5.2.	Pré-acabamento	35
2.5.3.	Acabamento	36
2.6.	Cálculo de trajetórias de um sistema CAM	37
2.7.	Código NC	44
2.8.	Pós-processador	48
2.9.	Associação com outros sistemas	49
2.10.	SprutCAM	51
2.11.	PowerMILL	53
2.12.	SolidWorks CAM	55
3.	METODOLOGIA	57
3.1.	Definição dos modelos	58
3.1.1.	Desenho do Modelo 1 no CAD	58
3.1.2.	Seleção do Modelo 2	60
3.2.	Definição das ferramentas	60
3.3.	Movimentação e posicionamento da ferramenta	61
3.4.	Definição dos parâmetros de usinagem	62
3.5.	Programação utilizando o PowerMILL	63
3.5.1.	Importação dos modelos no PowerMILL	63
3.5.2.	Definições iniciais no PowerMILL	64
3.5.3.	Criação das ferramentas	66
3.5.4.	Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 1 no PowerMILL	69
3.5.5.	Simulação de fresamento do Modelo 1 no PowerMILL	80
3.5.6.	Geração do código CNC para o Modelo 1 no PowerMILL	82
3.5.7.	Criação das trajetória de fresamento para o Modelo 2 no PowerMILL	82

3.5.8.	Simulação de fresamento para o Modelo 2 no PowerMILL.....	87
3.5.9.	Geração do código CNC para o Modelo 2 no PowerMILL.....	88
3.6.	Programação utilizando o SprutCAM.....	89
3.6.1.	Importação dos modelos no SprutCAM.....	89
3.6.2.	Importação do centro de usinagem e dos acessórios de fixação da peça.....	90
3.6.3.	Definições iniciais no SprutCAM.....	92
3.6.4.	Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 1 no SprutCAM.....	93
3.6.5.	Simulação de fresamento do Modelo 1 no SprutCAM.....	105
3.6.6.	Geração dos códigos CNC para o Modelo 1 no SprutCAM.....	108
3.6.7.	Criação para as trajetórias fresamento para o Modelo 2 no SprutCAM.....	109
3.6.8.	Simulação de fresamento para o Modelo 2 no SprutCAM.....	114
3.6.9.	Geração do código CNC para o Modelo 2 no SprutCAM.....	115
3.7.	Programação utilizando o Solidworks CAM.....	116
3.7.1.	Importação dos Modelos no SolidWorks CAM.....	116
3.7.2.	Definições iniciais no SolidWorks CAM.....	117
3.7.3.	Reconhecimento automático dos recursos usináveis.....	118
3.7.4.	Criação das estratégias de fresamento para o Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	119
3.7.5.	Simulação de fresamento para o Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	128
3.7.6.	Geração dos códigos CNC para o Modelo 1 no SolidWorks CAM.....	131
3.7.7.	Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	132
3.7.8.	Simulação de fresamento para o Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	137
3.7.9.	Geração dos códigos CNC para o Modelo 2 no SolidWorks CAM.....	138
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	139
4.1.	Análise do número de linhas geradas no código CNC.....	139
4.1.1.	Número de linhas geradas para o Modelo 1.....	140
4.1.2.	Número de linhas geradas para o Modelo 2.....	141
4.2.	Análise do tempo estimado de usinagem de fresamento.....	143
4.2.1.	Tempo de fresamento para o Modelo 1.....	143
4.2.2.	Tempo de fresamento para o Modelo 2.....	144
4.3.	Análise do comprimento da trajetória da ferramenta.....	146
4.3.1.	Comprimento da trajetória da ferramenta para o Modelo 1.....	146
4.3.2.	Comprimento da trajetória da ferramenta para o Modelo 2.....	148
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	149
6.	REFERÊNCIAS.....	151
7.	ANEXOS.....	155

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da civilização a fabricação é utilizada para se produzir artigos de madeira, pedra, cerâmica, barro e metal. Com o passar dos anos, houve um grande desenvolvimento neste setor o que possibilitou a fabricação de objetos em uma vasta quantidade de materiais e processos (MACHADO, SILVA, 2004).

Dentre os diversos processos de fabricação destaca-se o de usinagem, devido ao volume de objetos que produz e sua aplicação em diversos segmentos. Segundo Walter (2000 apud Amorim, 2002, p.1), é difícil citar algum produto que não requeira de maneira direta ou indireta a operação de usinagem em algum momento de sua manufatura.

Este processo historicamente recebe grandes investimentos nas fábricas dada a complexidade de suas peças e o alto tempo de produção quando o processo não é feito de maneira automatizada. Para melhorar esses tempos investe-se recursos na compra de máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) e ferramentas mais eficientes. Atrelado a isso, a aplicação de ferramentas de simulação com softwares CAM (*Computer Aided Manufacturing* - Manufatura Assistida por Computador) auxiliam de maneira significativa a redução dos tempos de fabricação e aumentam a qualidade dos itens usinados, impactando diretamente no preço final do produto (DOBLER, 2014).

A questão principal em um processo de usinagem atualmente são as máquinas de comando numérico computacional, que são a parte final de um sistema CAM. “O emprego dessas máquinas revolucionou o processo produtivo, tendo impactos nos materiais de ferramentas, projetos de máquinas, mão de obra, qualidade do produto final e custos de fabricação” (MACHADO, SILVA, 2004, P.7).

Em paralelo à utilização de máquinas CNC, estão os *softwares* de programação, que são os responsáveis por gerar estratégias de usinagem mais eficientes e produzir simulações das operações, garantindo confiabilidade e rapidez à fabricação. Álvares (2005), afirma que depois de mais de três décadas da utilização da tecnologia CAD (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador) e CAM, ambas têm tido grande sucesso em aplicações industriais resultando em um significativo aumento na produtividade e competitividade.

Como resultado do amplo uso dessas ferramentas no meio industrial, existem diversas plataformas comerciais, que atendem de diferentes maneiras as necessidades da indústria.

Conforme Schaffer e Espinoza, 2004, mencionam, o sistema CAM não trabalha completamente automatizado e suficiente. Sempre é necessários técnicos especializados e altamente treinados. Além disso, quando as indústrias fazem a aquisição do sistema, é necessário a ciência de qual principal requisito de produção que o *software* deve atender.

Mediante o exposto, este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo fazer uma análise comparativa, na usinagem por fresamento, de três *softwares* comerciais de programação CNC, sendo eles: PowerMILL, SprutCAM e SolidWorks CAM.

São exploradas as características comuns e específicas de cada um dos *softwares* e realizadas simulações para uma análise quantitativa dos resultados, apresentando como resultado dados que servirão como base na tomada de decisão quanto ao *software* mais adequado para implantação em diferentes áreas da indústria, respeitando suas necessidades, capacidades e priorizando sua necessidade produtiva.

1.1. Definição do Problema

Segundo Machado et. al. (2015, P. 18) apesar da popularidade a usinagem é um processo bastante imprevisível, ou seja: é um processo complexo e simples ao mesmo tempo.

“É um processo complexo em razão das dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. E simples porque, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. As condições ideais de corte são aquelas capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível”.

Diante da complexidade do processo os sistemas CAM facilitam o processo de fabricação através da usinagem, entretanto dado a variedade de *softwares* disponíveis é necessário se avaliar qual plataforma se adequa melhor às necessidades de cada empresa. Essa avaliação deve ser pauta em análises estatísticas relativas à comparação entre os *softwares* disponíveis.

1.2. Objetivos

Diante do descrito na subseção anterior, determinar as variáveis do processo de usinagem, visando o melhor custo-benefício entre recursos de máquina, *software*, mão de obra, qualidade e tempo de operação é o grande desafio da indústria. Assim, o presente trabalho de conclusão de curso teve os objetivos descritos na próxima subseção.

1.2.1. Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho foi a análise comparativa, na usinagem por fresamento, entre três *softwares* comerciais CAM, sendo eles: PowerMILL, SprutCAM e SolidWorks CAM.

Para isso, foram criadas nos *softwares* as trajetórias de usinagem e simulações de blocos de alumínio, bem como foram gerados os respectivos programas CNC pós-processados para o centro de usinagem ROMI D600, máquina que é disponibilizada no Laboratório da Automação da Manufatura I (LAM I). Foram analisados os códigos CNC, tempos de usinagem, e trajetórias da ferramenta.

1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho têm-se:

- Avaliar os tempos de fresamento simulados para cada um dos *softwares*, quando aplicados em peças com mesma geometria e dimensões;
- Analisar o tamanho do código CNC gerado;
- Analisar o comprimento das trajetórias geradas para cada operação de fresamento;

1.3. Justificativa

“A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de

metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo o mundo” (MACHADO, SILVA, 2004, P.3).

Dados como estes nos remetem a necessidade de estudos e desenvolvimento tecnológico que aprimorem e aumentem a eficiência das operações de usinagem, para que se alcance condições satisfatórias de operação, que reduzirão o tempo de fabricação, o desgaste da ferramenta e o uso de fluídos de corte, acarretando um melhor acabamento das peças, maior precisão e produtividade, além de diminuir o impacto ambiental.

Buscando a melhoria contínua dos *softwares* CAM, as principais desenvolvedoras desses sistemas procuram constantemente se atualizar e aprofundar seu conhecimento sobre a usinagem HSC (*High Speed Cutting* - Alta velocidade de Corte), utilizando informações disponibilizadas por seus clientes. (DOBLER, 2014). Essas entre outras informações são condensadas em um banco de dados (*Knowledge Based System*), trabalhos como este também ajudam a formar o banco de informações utilizadas para o aprimoramento constante dos *softwares* CAM.

Em paralelo à evolução dos *softwares* CAM, é válida a análise comparativa entre as diferentes plataformas comercializadas, visando destacar e quantificar os pontos fortes e melhores setores de aplicação dos mesmos, visto que nem todas as indústrias possuem as mesmas necessidades em sua planta produtiva.

Para indústrias que fabricam moldes para injeção de materiais poliméricos, as peças possuem alta complexidade geométrica, e uma das prioridades do processo é o acabamento superficial das peças usinadas, exigindo *softwares* com maiores recursos.

Para a indústria moveleira o tempo das operações e a precisão dimensional tem grande importância no processo produtivo. Constantemente esse setor se moderniza e insere os sistemas CAD / CAM nas suas plantas. Segundo Pereira (2009), a fabricação de uma cadeira pelo sistema convencional de fabricação leva 2 horas, já com a fabricação através de centros de usinagem faz-se duas cadeiras simultâneas em 2 minutos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Groover (2011), manufatura assistida por computador (CAM) envolve o uso de tecnologias computacionais no planejamento e controle da manufatura. É um processo fortemente ligado à programação via comando numérico (NC), e suas aplicações dividem-se em duas categorias: planejamento de manufatura e controle de manufatura.

O objetivo dos projetistas de máquinas CNC desde a introdução das mesmas no setor industrial, é desenvolver um processo de manufatura rápido, eficiente e integrado (ROSSO JR., NEWMAN, 2003).

As máquinas com comando numérico têm suas informações de entrada representadas de forma alfanumérica através de um programa que pode ser criado manualmente ou através dos *softwares* CAM.

Para a programação manual é necessário que o operador/programador possua conhecimento avançado sobre máquinas-ferramenta, processos de fabricação e tenha habilidade de calcular as trajetórias da ferramenta (MENGES, MOHREN, 1992, apud CORRÊA, 1995, p.29).

Quando a programação é assistida por um software CAM o programador utiliza recursos de um CAD para descrever a geometria das peças, tornando o processo mais simples quando comparado com a programação manual, em resumo deixa-se de depender da capacidade do operador e faz-se programas com mais rapidez, segurança, com poucos erros de programação e com tempo de preparação das máquinas menor (CORRÊA, 1995).

A norma corrente (ISO 6893) para programas NC, utiliza os mesmos padrões de programação que eram utilizados nas primeiras máquinas CNC, esses códigos são conhecidos como G/M e se baseiam na descrição dos movimentos da ferramenta. Apesar dos códigos de programação se basearem nos mesmos padrões, a tecnologia CAD/CAM está exercendo uma influência cada vez mais decisiva na competição industrial (SOUZA, 2004).

De forma geral nesta sessão serão apresentados conceitos fundamentais sobre sistemas CAM, critérios para classificação dos sistemas, metodologia de utilização, operações básicas de um sistema CAM, cálculos de trajetórias de ferramentas, o código CNC, pós-processador, uma descrição dos *softwares* em estudo nesse trabalho, a associação com outros *softwares* e as áreas de aplicação do CAM.

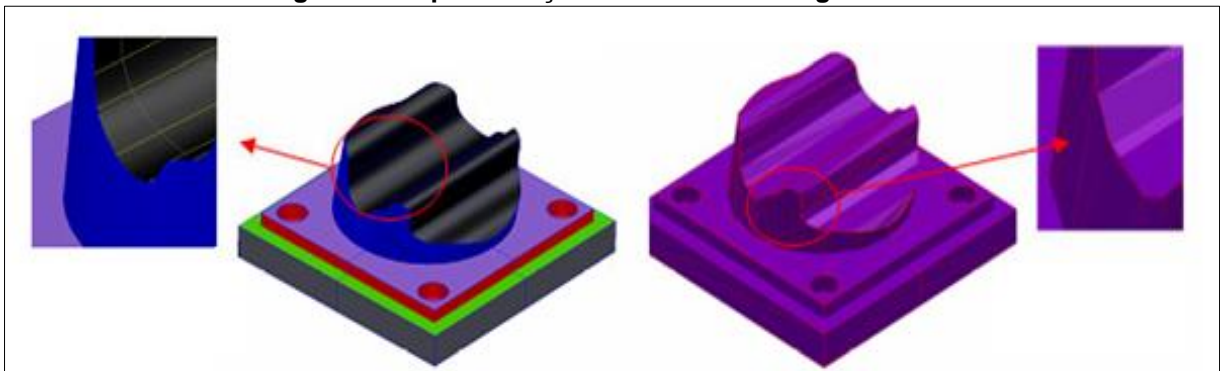
2.1. Sistemas CAM

Os sistemas CAM foram introduzidos no mercado no início da década de 1970, junto com a tecnologia CAD. A utilização desses sistemas possibilitou a fabricação de peças complexas, como por exemplo matrizes e moldes, e alavancou o desenvolvimento de outros setores da indústria (ROSSO JR., NEWMAN, 2003).

Para o cálculo dos programas NC (instruções para as máquinas CNC) é necessário um modelo CAD que fornece dados geométricos para o *software* CAM através de diferentes métodos, como por exemplo, por malhas de triângulos (SCHÜTZER, SOUZA, 1999).

A malha se aproxima da representação geométrica do modelo CAD através de um valor de tolerância estabelecido pelo usuário como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Representação da malha de triângulos



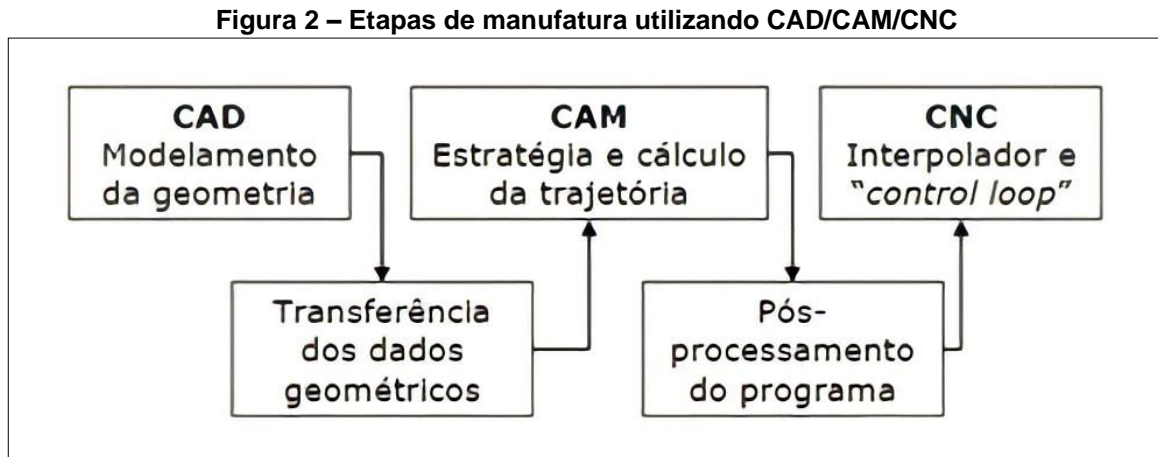
Fonte: Adaptado de (SOUZA,2004)

Esta metodologia facilita a transferência de dados entre os sistemas CAD e CAM, entretanto a conversão da malha de triângulos em segmentos de retas quando trabalhamos com geometrias que possuem modelo matemático complexo pode ser um problema, pois quanto menor a tolerância, mais próximo do modelo real se chega, mas em contrapartida o tamanho dos arquivos de transferência aumenta proporcionalmente, dificultando as etapas de geração dos programas NC (SOUZA, COELHO, 2003).

Os sistemas CAM permitem a geração de programas NC aplicados em operações de eletroerosão, torneamento, fresamento e retificação, dentre outras, sendo a operação de fresamento a principal aplicação (SOUZA, COELHO, 2003).

O CAM atua em paralelo ao sistema CAD e a uma máquina-ferramenta CNC, que fornecem o modelo geométrico base para a geração do programa NC e executa

as trajetórias programadas no CAM, respectivamente. Um esquema representando na Figura 2 sintetiza as etapas do processo de manufatura utilizando as tecnologias CAD/CAM/CNC.



Fonte: Adaptado de (SOUZA, COELHO, 2003)

Segundo Graeff (2019), entre as principais funções dos sistemas CAM pode-se citar a estimativa dos tempos de produção, levantamento de custos, planejamento da sequência de operação, seleção das máquinas necessárias para a fabricação e os parâmetros mais adequados para o fresamento, através das simulações do processo.

2.2. Aplicações dos sistemas CAM

A utilização dos sistemas CAD/CAM foi limitada por anos a aplicação em grandes empresas como aeroespacial e automobilística, devido direta e indiretamente aos custos envolvidos para a aquisição dos *softwares/hardwares*, mão de obra qualificada e maquinário (SOUZA, COELHO, 2007).

Atualmente, a aplicação dos sistemas CAM abrange quase todas as áreas de manufatura. No segmento de produtos poliméricos injetados, por exemplo, a aplicação dos *softwares* CAM ajuda a diminuir as incertezas do processo e podem ser inseridos já nas fases iniciais do projeto.

Segundo Arias (2009), a indústria de produtos plásticos é responsável por 35% do consumo de polímeros produzidos no país, o que acarreta em um consumo

substancial de moldes, que precisam das tecnologias CAM incorporadas à sua fabricação, dada a complexidade geométrica das peças usinadas por fresamento.

A indústria automobilística, seguida das indústrias eletrônica e de eletrodomésticos, é uma das principais clientes das indústrias de moldes para produtos poliméricos injetados, utilizando indiretamente e diretamente a tecnologia dos sistemas CAM (CORREA,1995).

Os *softwares* CAM são aplicados também a manufatura de produtos relacionados a medicina e odontologia, com a fabricação de próteses e restaurações fixas (CRUZ, 2018).

Além das áreas citadas, a tecnologia CAM é amplamente aplicada em indústrias do setor metal mecânico que produzem peças usinadas ou peças fundidas que posteriormente passarão por processos de acabamento através de usinagem.

2.3. Classificação dos sistemas CAM

Os sistemas CAM podem ser classificados pelo número de eixos no processo, tipos de representação geométrica dos modelos, integração com recursos de modelamento ou tipo de *hardware* e sistema operacional (LENCINA, 2020).

2.3.1. Classificação quanto ao número de eixos

Uma classificação para os sistemas CAM toma como referência os números de eixos em que a ferramenta se movimenta. O Quadro 1 apresenta a classificação dos sistemas CAM dado o seu número de eixos.

Quadro 1 – Classificação dos sistemas CAM pelo número de eixos

Número de eixos	Direção de movimento	Característica
2 ½	X e Y (linear)	Programas NC a partir de geometrias bidimensionais. Aplicado a usinagens simples.
3	X, Y e Z (linear)	Programas NC a partir de geometrias tridimensionais. Aplicado a usinagens complexas.
4	X, Y, Z (linear) e 1 eixo rotativo	Programas NC a partir de geometrias tridimensionais. Aplicado a usinagens complexas. A mesa da máquina pode rotacionar em torno de um eixo perpendicular a ela.
5	X, Y, Z (linear) e 2 eixos rotativos	Programas NC a partir de geometrias tridimensionais. Aplicado a usinagens complexas. Rotação simultânea em dois eixos da máquina.
6	X, Y, Z (linear) e 3 eixos rotativos	Programas NC a partir de geometrias tridimensionais. Aplicado a usinagens complexas. Rotação simultânea em três eixos da máquina.

Fonte: Adaptado de (LENCINA, 2020)

2.3.2. Classificação quanto ao tipo de representação geométrica dos modelos

Segundo Dias (2015), a classificação baseada no tipo de representação geométrica dos modelos divide-se em 4 categorias: *Wireframe* (estrutura de arame), superfícies, sólidos e malha de triângulos.

O modelo geométrico é a uma forma de organização dos dados e forma de visualização de objetos. O Quadro 2 apresenta a classificação dos sistemas CAM considerando o tipo de modelo.

Quadro 2 – Classificação dos sistemas CAM pelo tipo de geometria do modelo

Modelo	Característica
<i>Wireframe</i>	Representação mais simples, é uma malha de arames que através de pontos, linhas, arcos, círculos e curvas foram um objeto. Esses modelos são ambíguos e dependem da interpretação humana.
Superfícies	Representação por particionamento espacial, geralmente formada por cubos ou tetraedros.
Sólidos	Representação por fronteiras: 3D. É um conjunto de superfícies.
Malha de triângulos	Cada face tem 3 vértices, cada vértice compartilha um número arbitrário de faces. O maior problema está na simplificação das malhas.

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, MINIGHIM, 2018)

2.3.3. Classificação quanto à integração com recursos de modelamento

A classificação baseada na integração dos sistemas CAM com os recursos de modelamento CAD divide-se nas categorias apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação dos sistemas CAM pela integração com o recurso de modelamento

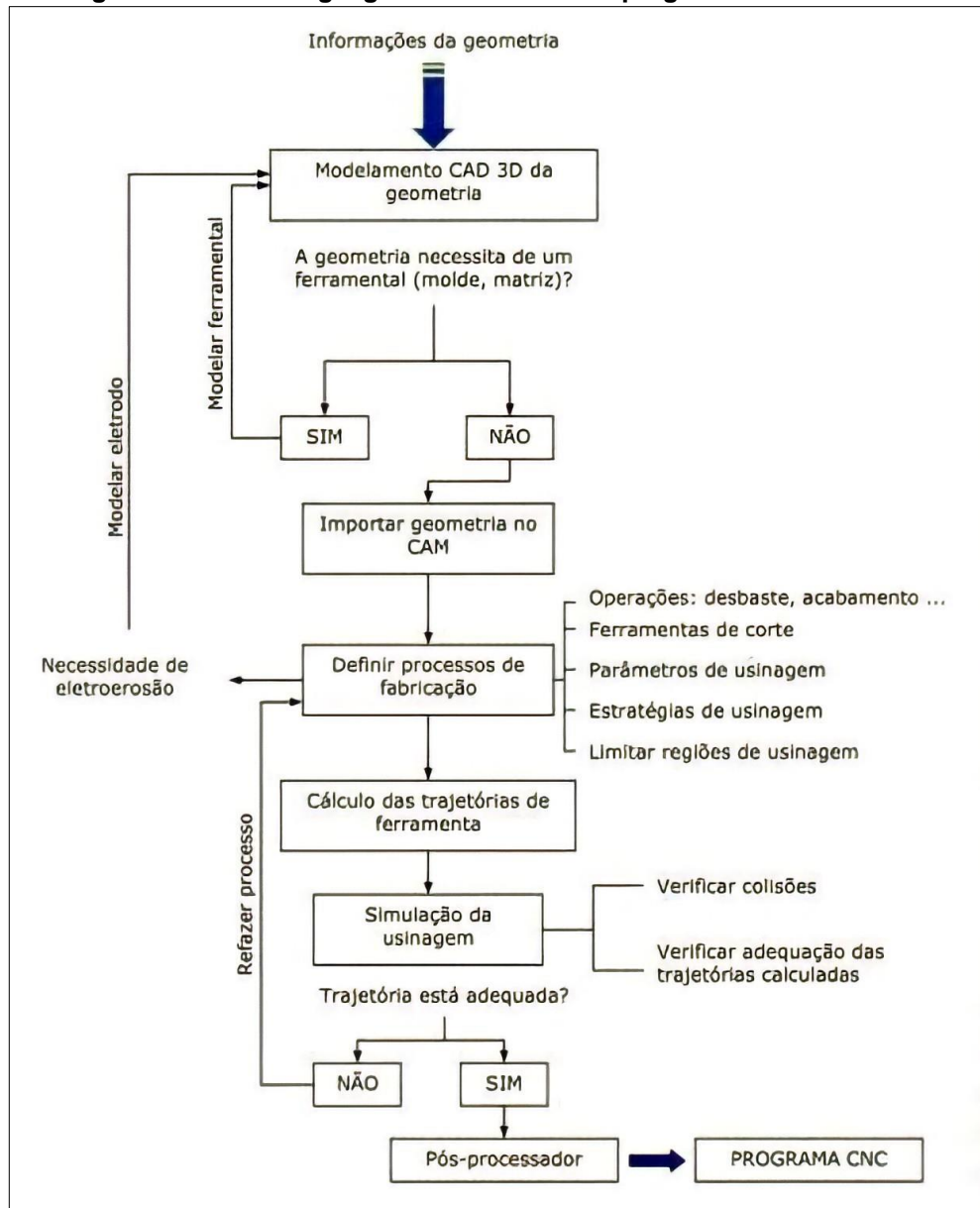
Tipo de integração	Software
Total	Unigraphics NX, CATIA, CimatronE, SolidWorks CAM
Integrado ao CAD independente	SolidCAM, InventorCAM, MasterCAM for SolidWorks
Dedicado	EdgeCAM, GibbsCAM, MasterCAM, PowerMILL, SprutCAM

Fonte: Adaptado de (LENCINA, 2020)

2.4. Metodologia de utilização de um sistema CAM

O processo de manufatura inicia através da representação do modelo através de um sistema CAD. A partir desse ponto as informações são transferidas para um sistema CAM, que como o próprio nome indica, auxilia a manufatura gerando o cálculo de trajetórias da máquina-ferramenta, através de um código NC. O *software* CAM possibilita também a simulação e controle dos movimentos das máquinas CNC (GRAEFF, 2019). A Figura 3 mostra um fluxograma da sequência de trabalho com a integração dos sistemas CAD, CAM e CNC.

Figura 3 – Metodologia geral de trabalho empregando sistemas CAM



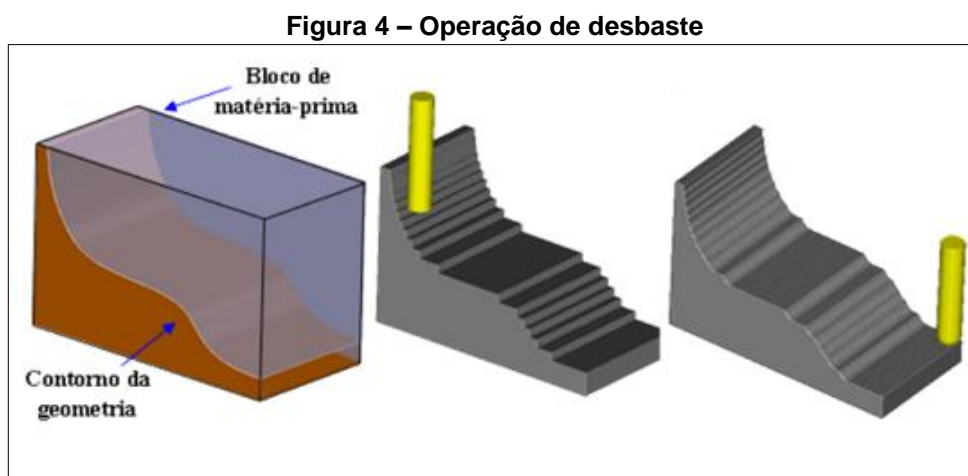
Fonte: Adaptado de (SOUZA, ULBRICH, 2013)

2.5. Operações básicas de um sistema CAM

Os sistemas CAM geram códigos NC que descrevem a trajetória que a ferramenta deve realizar durante o processo de usinagem. Conforme Arias (2009), o processo de fabricação através da usinagem é bastante complexo e possui algumas operações básicas sendo elas: desbaste, pré-acabamento e acabamento.

2.5.1. Desbaste

Para Lee (1999), existem dois tipos de processos de desbaste, o primeiro a partir de um bloco bruto, onde camadas com espessura específicas são retiradas deixando-se um sobremetal definido pelo usuário para o acabamento, e o segundo é quando o material bruto apresenta geometria próxima da geometria final, assim o desbaste é calculado realizando um *offset* da geometria final. A Figura 4 exemplifica a operação de desbaste de maneira genérica.



Fonte: (SOUZA, 2004)

Na operação de desbaste, a ferramenta trabalha em dois eixos e meio, sendo um incremento no eixo Z (normalmente) e a realização da trajetória nos eixos X e Y (ARIAS, 2019).

O desbaste é a primeira operação do processo de usinagem e objetiva remover de maneira eficiente a maior quantidade de material antes de atingir a forma geométrica final (SOUZA et al., 2008).

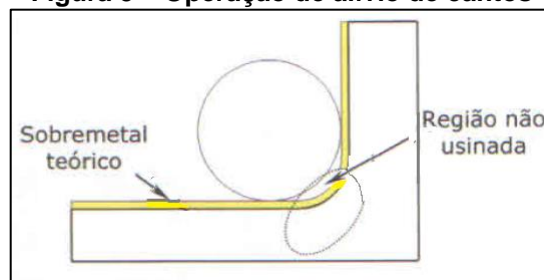
2.5.2. Pré-acabamento

As operações de pré-acabamento dividem-se em dois grupos: alívio de cantos e remoção de degraus. De acordo com Souza (2004), essas operações têm como

finalidade remover grandes volumes de material deixados pela operação de desbaste e uniformizar a espessura do sobremetal, aumentando a qualidade superficial do acabamento.

Sua necessidade surge em decorrência da ineficiência do processo de desbaste ou para remover o material em áreas que a ferramenta não conseguiu alcançar devido as suas limitações geométricas.

Figura 5 – Operação de alívio de cantos

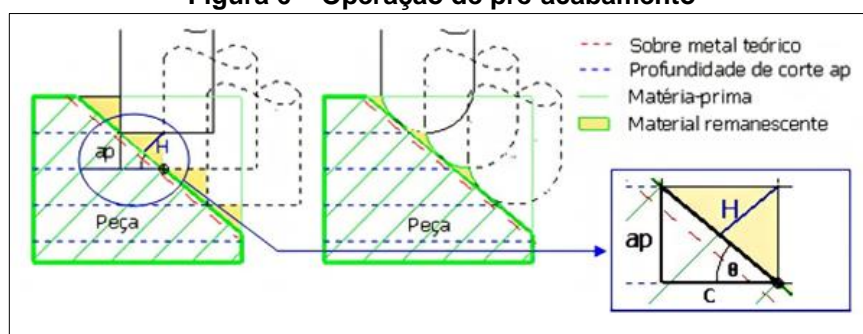


Fonte: Adaptado de (CAVICHIOILLI)

Conforme é possível observar na Figura 5 a operação de desbaste deixou sobras de material no canto, não respeitando a camada de sobremetal definida pelo usuário. Esse material excedente prejudica a operação de acabamento e deve ser retirado com uma ferramenta de diâmetro menor, para que o sobremetal fique uniforme para a operação de acabamento.

Na Figura 6, observa-se degraus que devem ser removidos antes da operação de acabamento pela operação pré-acabamento.

Figura 6 – Operação de pré-acabamento



Fonte: Adaptado de (SOUZA, P. 71, 2004)

2.5.3. Acabamento

Segundo ARIAS (2009), a operação de acabamento visa remover o sobremetal proveniente da operação de desbaste e pré-acabamento. Essa operação é normalmente a última operação aplicada no processo de usinagem.

O acabamento pode ser manual (não utiliza fresamento CNC), ou por fresamento tridimensional, e pode utilizar 3, 4 ou 5 eixos de liberdade. Nesta operação o material excedente das operações anteriores é removido, deixando a peça nas tolerâncias definidas no projeto e garantindo a qualidade superficial (SOUZA, 2004).

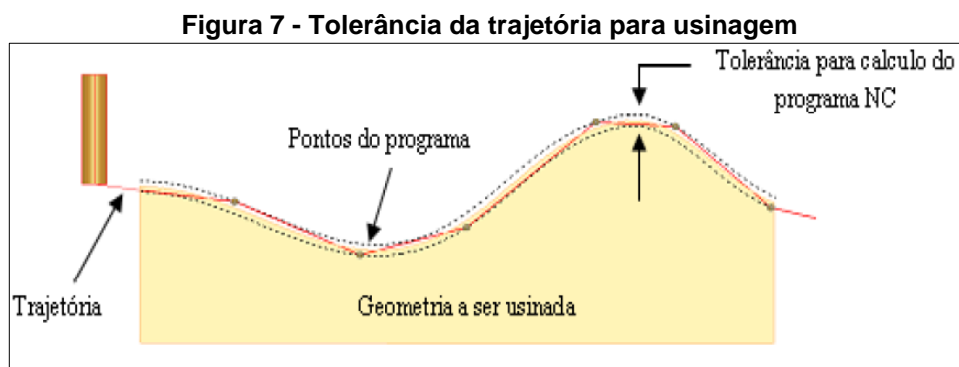
2.6. Cálculo de trajetórias de um sistema CAM

Graeff (2009), afirma que as principais funções dos *softwares* CAM são calcular as trajetórias da ferramenta de usinagem e simular a movimentação da máquina para validação dos programas NC.

Os *softwares* CAM podem gerar programas NC através de diferentes trajetórias da ferramenta, essa característica assim como a interface para a operação tem se tornado o diferencial na competição entre os fornecedores (SOUZA, 2003).

A estratégia de usinagem deve ser escolhida com cautela, pois pode representar grande influência sobre o tempo necessário para a usinagem, desgaste da ferramenta de corte e qualidade superficial, e isso se agrava ainda mais para a usinagem de superfícies complexas (WEINERT e GUNTERMANN, 2000).

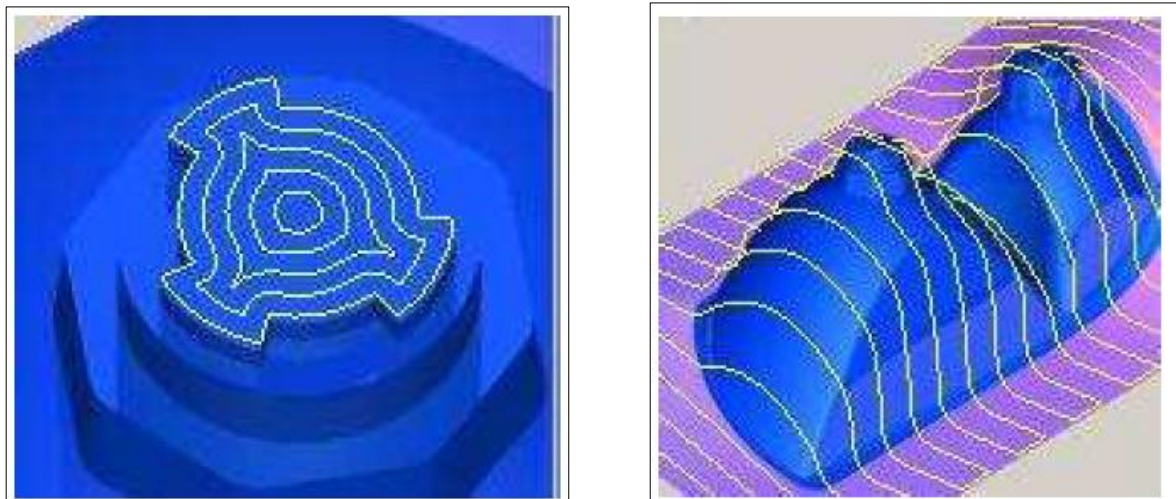
Conforme Souza (2001), os sistemas CAM geram seus programas NC através de segmentos de retas. O comprimento desses segmentos de retas está relacionado com a tolerância utilizada no CAM, associado com o grau de curvatura da superfície. A Figura 7 apresenta as tolerâncias da trajetória para usinagem.



Fonte: (SOUZA, COELHO, 2003)

As principais estratégias de trajetórias para usinagem segundo Souza (2004) são: trajetórias em passes verticais paralelos, passes horizontais paralelos e em *offset*. A Figura 8 apresenta exemplos de trajetórias de usinagem em *offset* e passes paralelos.

Figura 8 – Exemplos de estratégias de trajetórias de usinagem



(a) Estratégia de *offset*

(b) Estratégia de passes paralelos

Fonte: Adaptado (a) e (b) PowerMILL

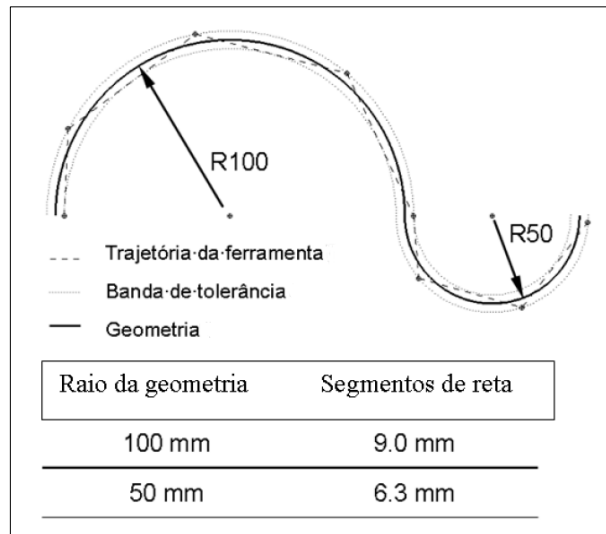
Para a estratégia de passes paralelos, existem algumas variações. Segundo Arias (2009) é possível definir uma estratégia em uma única direção ou definir a usinagem em dois sentidos de movimento. Ainda segundo o mesmo autor a estratégia de *offset* permite iniciar a usinagem do centro para a extremidade do contorno a ser usinado, ou da extremidade do contorno para o centro.

O cálculo das trajetórias é feito dentro de uma banda de tolerância definida pelo usuário, essa tolerância se traduz para o *software* como segmentos de retas, que quanto menores, representam mais fielmente a geometria do modelo, entretanto o programa NC será maior e a velocidade de avanço será menor (LENCINA, 2020).

Os segmentos de retas são representados pelo comando G01 da linguagem de programação ISO 6983, este comando permite que a interpolação linear tenha uma representação matemática simples em relação aos demais métodos.

A Figura 9 apresenta a geração de segmentos de retas ao longo de uma geometria, respeitando a banda de tolerância que foi definida pelo usuário. A geometria da peça também influencia diretamente no tamanho dos segmentos de retas gerados (ARIAS, 2009).

Figura 9 - Segmentos de retas gerados pelo comando G01 e tolerância definida pelo usuário



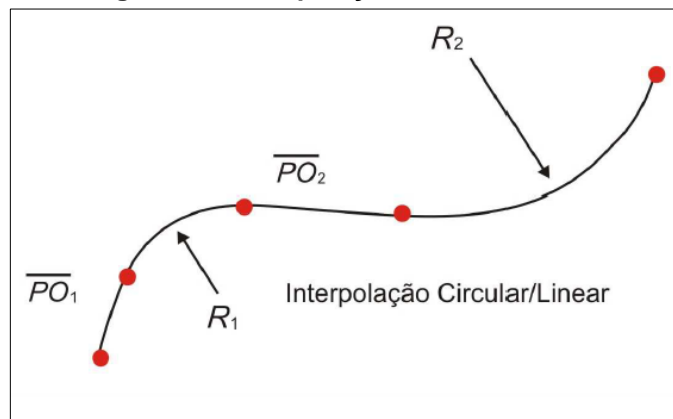
Fonte: (SOUZA, COELHO, 2007)

Para a representação de superfícies complexas a interpolação linear resulta em significativos problemas de desempenho dinâmico, dado o tempo de processamento do código CNC e as características de aceleração da máquina-ferramenta. Quando o tempo de processamento do bloco for maior que o tempo de usinagem do percurso do segmento, a máquina atingirá o ponto de destino e a informação para o próximo movimento ainda não estará disponível (ARIAS, 2009, P.36).

Dado a limitação das trajetórias geradas pelo comando G01, tem-se outra opção para a geração das trajetórias, utilizando-se as interpolações lineares e circulares através dos comandos G01, G02 e G03 (SOUZA, 2001).

A Figura 10 representa a trajetória da ferramenta utilizando os comandos de interpolação linear e circular.

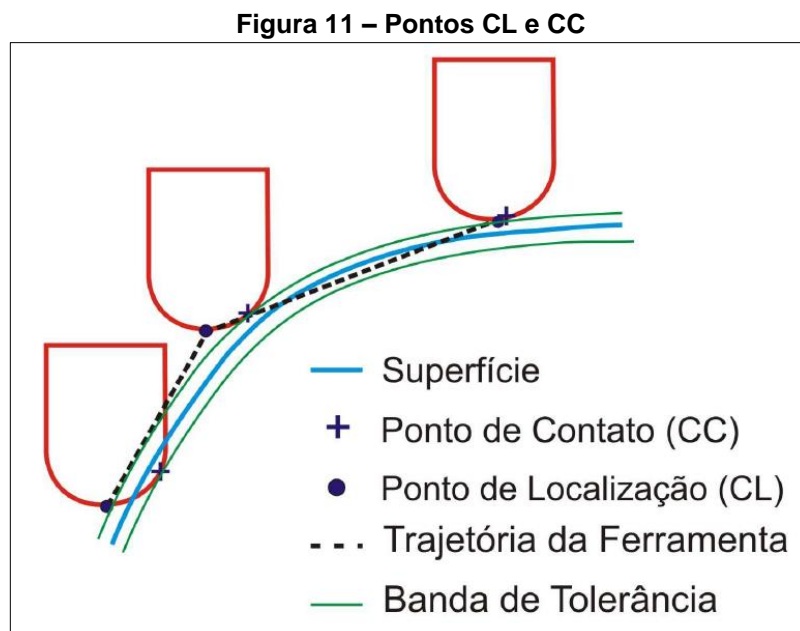
Figura 10 – Interpolação linear e circular



Fonte: (SOUZA, 2000)

O cálculo das trajetórias pode ser feito a partir de uma abordagem adicional através do uso de *spline*. Com o uso desse recurso a trajetória é calculada por segmentos de curvas o que torna a usinagem mais suave (SCHUTZER, HELLENO, 2007).

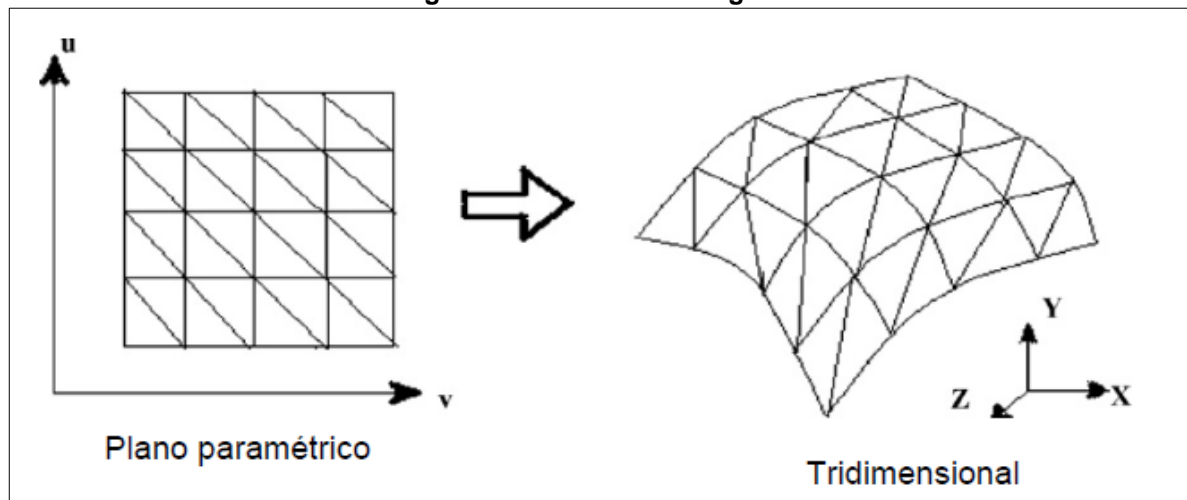
Para calcular efetivamente os pontos da trajetória o sistema CAM calcula o ponto de contato com a ferramenta – *Cutter Contact* (CC) - sobre o modelo CAD 3D, e também a localização da ponta central da ferramenta – *Cutter Location* (CL) – através de um método de compensação. Os pontos CL são os pontos contidos no programa NC (ARIAS, 2009). A Figura 11 representa os pontos CL e CC utilizados pelo *software* CAM para o cálculo das trajetórias.



Fonte: (ARIAS, SOUZA, 2008)

Para a obtenção do ponto de contato através de triangulação da superfície do modelo, é utilizado um método apresentado por Chen e Shi (2008) que consiste na divisão da geometria no plano paramétrico em retângulos, que posteriormente são divididos em outros dois triângulos. A malha criada pelo plano paramétrico é rebatida na superfície que deve ser usinada. A Figura 12 ilustra o método proposto por Chen e Shi.

Figura 12 – Malha de triângulos

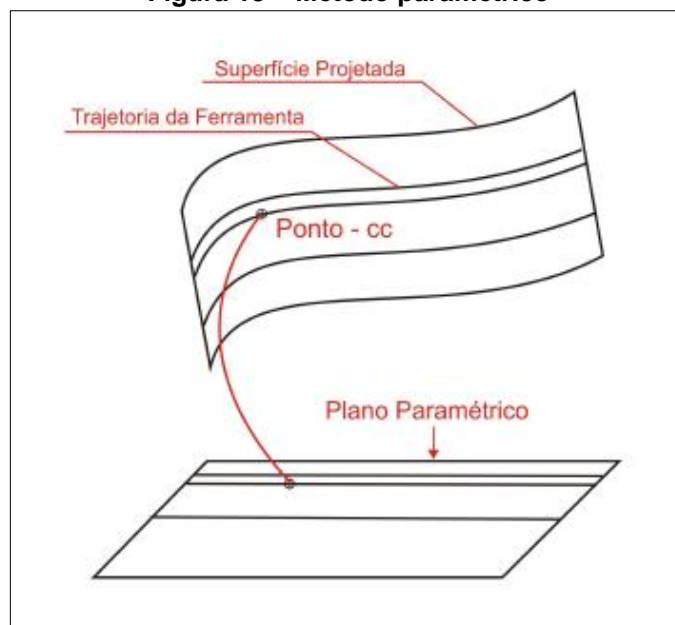


Fonte: (CHEN, SHI 2008)

A trajetória da ferramenta é obtida por uma sequência de pontos CC. Esses pontos são determinados a partir de três métodos: método paramétrico, *drive surface* e plano auxiliar.

- a) Método paramétrico: as linhas da trajetória da ferramenta são calculadas em um plano e rebatidas sobre a superfície a ser usinada, elas têm espaçamentos iguais no plano, já as linhas de usinagem têm espaçamentos irregulares quando rebatidas sobre a superfície que deve ser usinada (Figura 13) (ARIAS, 2009, P.43).

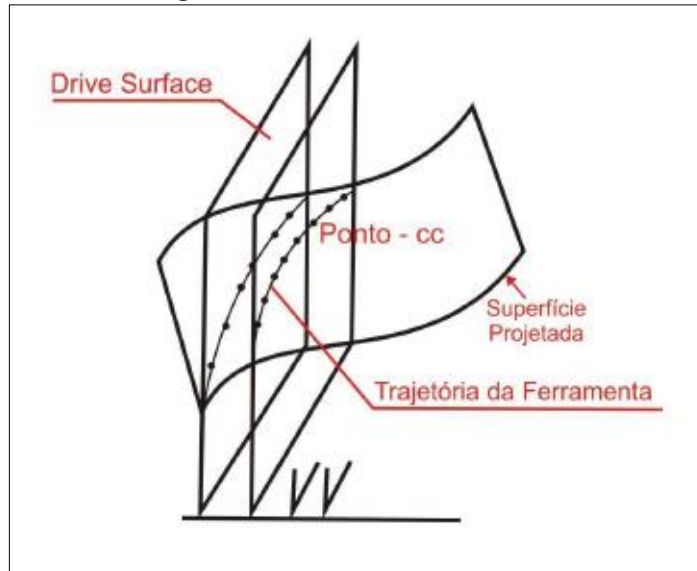
Figura 13 – Método paramétrico



Fonte: (MISRA et al 2008)

- b) Método *Drive Surface*: as trajetórias são calculadas pela intersecção da superfície gerada com vários planos (Figura 14).

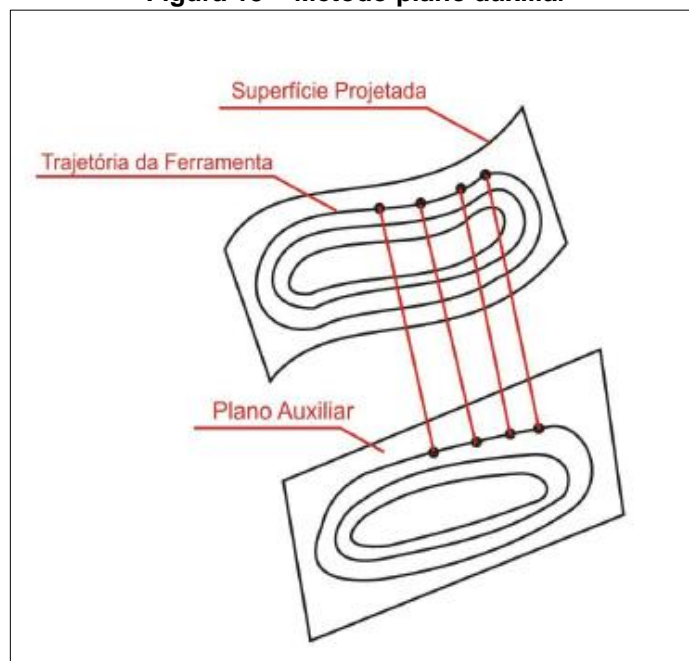
Figura 14 – Método *drive surface*



Fonte: (MISRA et al 2008)

- c) Método plano auxiliar: gera-se um plano 2D auxiliar, onde as linhas são o contorno da usinagem e são rebatidas (Figura 15).

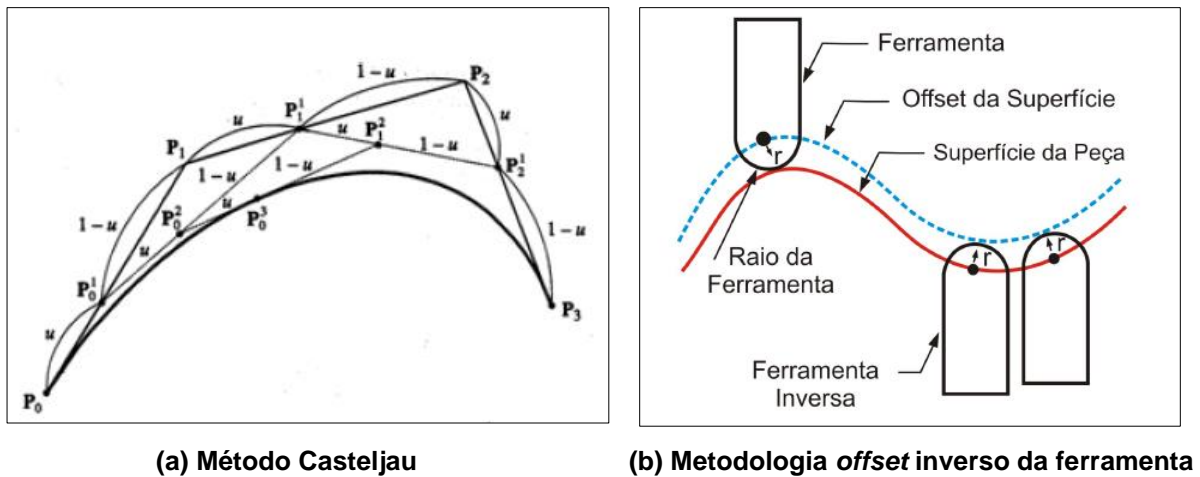
Figura 15 – Método plano auxiliar



Fonte: (MISRA et al 2008)

Existem outras formas de obtenção dos pontos CC como por exemplo o algoritmo de Casteljau (Figura 16 (a)) apresentado por Lee (1999) e uma metodologia que utiliza um *offset* da superfície, invertendo a ferramenta no eixo Z (Figura 16 (b)) (ARIAS, 2009).

Figura 16 – Métodos de obtenção dos pontos CC



(a) Método Casteljau

(b) Metodologia *offset* inverso da ferramenta

Fonte: ((a) LEE, 1999, (b) MISRA et al, 2008)

Após os pontos CC serem determinados, os pontos CL correspondentes são calculados para que seja feito o programa NC de usinagem. Lee, (1999) apresenta uma formulação matemática para os pontos CL utilizando uma ferramenta esférica (Figura 17). Segundo Arias (2009) esse método é utilizado por outros autores.

Equação 1 – Cálculo dos pontos CL

$$r_{cl} = r_{cc} + R[n(u, v) - a]$$

Onde:

r_{cl} = vetor de posição

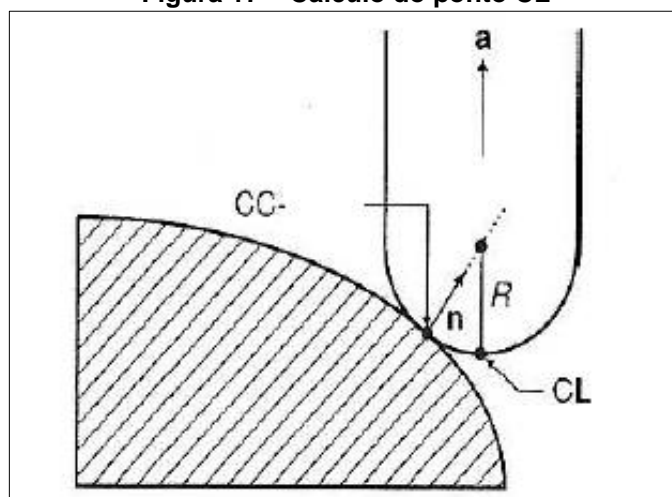
r_{cc} = vetor de contato

R = raio da curvatura

$n(u, v)$ = vetor unitário da superfície

a = vetor unitário da ferramenta

Figura 17 – Cálculo do ponto CL



Fonte: (LEE, 1999)

2.7. Código CNC

Os meios mais modernos e eficientes para a geração dos códigos CNC atualmente são os *softwares* CAD/CAM. A criação desse tipo de linguagem iniciou por volta de 1808, na forma apenas de código NC (comando numérico), quando Joseph Jacquard utilizou cartões perfurados para indicar comandos que deveriam ser realizados por equipamentos têxtis (GRAEFF, 2019).

Segundo Graeff (2019), as limitações do código NC alavancaram o desenvolvimento da tecnologia CNC, o que facilitou o processo de usinagem pois inseriu o computador no processo que antes era manual.

Em síntese, o comando numérico (CN ou NC, de *numerical control*) representa o acionamento de equipamentos por coordenadas numéricas. O CNC (comando numérico computadorizado) representa o mesmo acionamento, porém controlado por computador. Neste caso, o computador pode interagir e controlar a máquina, e as alterações do programa podem ser facilmente realizadas. (SOUZA E ULBRICH, 2013, P. 220, apud GRAEFF, 2019, P 24).

O código CNC, possui funções de comando que se dividem em: Palavras, G e M (LEE,1999). Estas funções estão resumidas nos Quadros 4, 5 e 6.

Quadro 4 – Funções do tipo palavras

Código	Função	Explicação
N	Número da sequência	Identifica cada bloco ou linha do programa e permite que os comandos sejam localizados de forma rápida. É sequencial.
X, Y, Z, A e B	Posição e orientação	Indicam a posição e orientação dos eixos para sistemas com até 5 eixos.
F	Taxa de avanço	Especifica a taxa de avanço de corte, é determinado em mm/min (milímetros por minuto).
S	Velocidade de rotação da ferramenta	Especifica a velocidade do <i>spindle</i> , é determinado em rpm (rotações por minuto).
T	Seleção de ferramenta	Indica qual a posição de ferramenta que deve ser usada em uma determinada operação.

Fonte: Adaptado de (Lee,1999)

Quadro 5 – Funções G, comandos preparatórios

Código	Função	Explicação
G00	Posicionamento rápido	Posicionamento automático da máquina-ferramenta
G01	Interpolação linear	Modo de controle de contorno onde as dimensões incrementais são normais, ou seja, a resolução de entrada é especificada.
G02 e G03	Interpolação circular	Interpolações no sentido horário e anti-horário.
G04	Tempo de permanência (<i>Dwell</i>)	Tempo de “atraso” programado, aonde não há movimentação da máquina-ferramenta.
G05	Espera	Determina a parada de movimentação da máquina-ferramenta até ser encerrado por um operador ou ação de intertravamento.
G06	Interpolação parabólica	Modo de controle de contorno produzido através de segmentos de parábolas.
G08	Aceleração	Taxa de aceleração dos eixos, normalmente é exponencial.
G09	Desaceleração	Taxa de desaceleração dos eixos, normalmente é exponencial, é determinada por um percentual fixo.
G10	Entrada de dados	Permite a entrada de dados.
G11	Cancelamento de entrada de dados	Operação inversa a G10.
G13, G14, G15, G16	Seleção de eixos	Usada para controle direto dos eixos e pode ativar e desativar o sistema de coordenadas polares.
G17	Seleção de plano de trabalho	Plano de trabalho XY.
G18	Seleção de plano de trabalho	Plano de trabalho ZX.
G19	Seleção de plano de trabalho	Plano de trabalho YZ.
G20	Entrada de unidades	Dados em polegadas.
G21	Entrada de unidades	Dados em milímetros.
G28	<i>Machine Home</i>	Retorna o eixo programado para o ponto de referência.
G30	Interpolação circular (LD)	Interpolação circular para longas distâncias.
G31	Interpolação circular (SD)	Interpolação circular para pequenas distâncias.
G33	Rosqueamento com avanço constante	Ciclos de rosqueamento, não está disponível para todas as máquinas-ferramentas.
G34	Rosqueamento com aumento constante	Semelhante ao G33, mas com aumento constante do avanço.

G35	Rosqueamento com redução constante	Semelhante ao G33, mas com redução constante do avanço.
G40	Cancela a compensação do raio da ferramenta	Comando que finaliza a compensação do raio da ferramenta.
G41	Compensa o raio da ferramenta	Ativa a compensação do raio da ferramenta pela esquerda do perfil.
G42	Compensa o raio da ferramenta	Ativa a compensação do raio da ferramenta pela direita do perfil.
G43	Compensa o comprimento da ferramenta	Ativa a compensação do comprimento da ferramenta na direção positiva.
G44	Compensa o comprimento da ferramenta	Ativa a compensação do comprimento da ferramenta na direção negativa.
G49	Cancela a compensação do comprimento da ferramenta	Comando que finaliza a compensação do comprimento da ferramenta.
G50.1	Cancela imagem de espelho	Comando que finaliza a imagem de espelho.
G51.1	Ativa a imagem de espelho	Comando que ativa a imagem de espelho.
G52	Sistema de coordenadas local	Faz a mudança de ponto zero.
G53	Sistema de coordenadas da máquina	Ativa o sistema de coordenadas da máquina.
G54, G55, G56, G57, G58, G59	Sistemas de coordenadas de trabalho	Seleciona as coordenadas de trabalho entre a 1ª e a 7ª opção.
G60	Comando reservado	Comando reservado para posição.
G65	Chamada de macro	Ativa funções macros.
G66	Chamada de macro modal	Ativa funções macros modais.
G67	Cancela G66	Cancela chamada de macro modal.
G68	Rotação de sistemas de coordenadas	Rotaciona o sistema de coordenadas.
G69	Cancela G68	Cancela a rotação de coordenadas.
G73	Ciclo de furação	Ciclo de furação com quebra de cavaco.
G74	Ciclo de rosqueamento	Ciclo de rosqueamento com macho, rosca esquerda.
G76	Ciclo de mandrilamento	Ciclo de mandrilamento fino com retorno deslocado do centro.
G80	Cancela ciclos fixos	Cancela ciclos do G73 ao G76.
G81	Ciclo de furação	Ciclo de furação contínua.
G82	Ciclo de furação	Ciclo de furação contínua com tempo de permanência.
G83	Ciclo de furação	Ciclo de furação com descarga de cavaco.
G84	Ciclo de rosqueamento	Ciclo de rosqueamento com macho, rosca direita.
G85	Ciclo de mandrilamento	Ciclo de mandrilamento com retração em avanço programado.
G86	Ciclo de mandrilamento	Ciclo de mandrilamento com retração em avanço rápido.
G87	Ciclo de mandrilamento	Ciclo de mandrilamento para rebaixo interno.
G88	Ciclo de mandrilamento	Ciclo de mandrilamento para retorno manual.

G89	Ciclo de mandrilamento	Ciclo de mandrilamento com Dwell e retração em avanço programado.
G90	Sistema de coordenadas	Sistema de coordenadas absolutas.
G91	Sistema de coordenadas	Sistema de coordenadas incremental.
G92	Origem	Estabelece nova origem.
G94	Unidade do avanço	Avanço em mm/in por minuto.
G95	Unidade do avanço	Avanço em mm/in por rpm.
G98	Retorno de posicionamento	Retorno ao posicionamento inicial durante ciclos fixos.
G99	Retorno de plano	Retorno ao "plano R" durante ciclos fixos.

Fonte: Adaptado de (LEE, 1999 e ROMI)

Quadro 6 – Funções M, comandos miscelâneos

Código	Função	Explicação
M00	Para o programa	Desliga o <i>spindle</i> , a refrigeração e a alimentação depois da compilação dos comandos do bloco. É necessário destravar a parada de emergência para continuar o programa.
M01	Parada planejada	Similar a M00, mas acontece quando o operador puxa o botão de emergência.
M02	Fim do programa	Indica o fim do programa.
M03	Inicia a rotação do <i>spindle</i>	Inicia a rotação do <i>spindle</i> no sentido horário.
M04	Inicia a rotação do <i>spindle</i>	Inicia a rotação do <i>spindle</i> no sentido anti-horário.
M05	Para o <i>spindle</i>	Desliga a rotação do <i>spindle</i> e a refrigeração.
M06	Mudança de ferramenta	Executa a mudança de ferramenta, não inclui a seleção da ferramenta.
M07	Ativa o sistema de refrigeração	Ativa o sistema de refrigeração secundário.
M08	Ativa o sistema de refrigeração	Ativa o sistema de refrigeração secundário.
M09	Desliga o sistema de refrigeração	Desativa os sistemas de refrigeração ligados.
M10	Grampos	Fixa automaticamente as corredeiras da máquina, peça de trabalho, fixação, fuso, etc.
M11	Cancela M10	Cancela as configurações de fixação.
M13, M14	Spindle e refrigeração	Combina os comandos de ativação do <i>spindle</i> (horário e anti-horário) e refrigeração no mesmo comando.
M15, M16	Movimentação	Movimentação no sentido positivo e negativo.
M19	Para a orientação do <i>spindle</i>	Desliga o <i>spindle</i> em uma angulação pré-determinada.
M30	Fim do programa	Similar ao comando M02, mas volta o programa para o início.
M31	Desvio de bloqueio	Evita temporariamente o bloqueio normal.
M32-M35	Velocidade de corte constante	Mantém uma velocidade de corte constante ajustando a velocidade de rotação da peça inversamente proporcional à distância da ferramenta ao centro de rotação. Normalmente usada com giro.
M40-M45	Mudanças de marcha	Não precisa ser utilizada.

Fonte: Adaptado de (LEE, 1999)

Na sequência apresenta-se um exemplo de um programa CNC de fresamento, tirado do Manual de Programação e operação da Linha ROMI D, comando CNC FANUC Oi -MC (Figura 18).

Figura 18 – Exemplo de código CNC

```
O1000 (COMP. RAIOS ESQ.)  
N10 G17 G21 G90 G94  
N20 G53 G00 Z0 G49  
N30 T2 (FRESA DE TOPO D20)  
N40 M6  
N50 G54 S2500 M3  
N60 G00 X-70 Y-20  
N70 G43 H2 D2 Z5  
N80 G01 Z-10 F750  
N90 G41 X-50 Y0  
N100 Y40  
N110 X-11.36 Y84.8  
N120 G02 X11.36 R15  
N130 G01 X50 Y40  
N140 Y0 R5  
N150 X20  
N160 G03 X-20 R20  
N170 G01 X-45  
N180 G02 X-50 Y5 R5  
N190 G40 G01 X-70 Y-20  
N200 G53 G00 Z0 G49  
N210 M30
```

Fonte: Adaptado de (ROMI)

2.8. Pós-processador

Conforme Graeff (2019), um pós-processador CNC é um *software* que converte as trajetórias das ferramentas que foram criadas em um sistema CAM em programas NC, esses programas podem ser lidos pelo controlador de uma máquina para deslocar a ferramenta de corte e executar a usinagem de maneira segura.

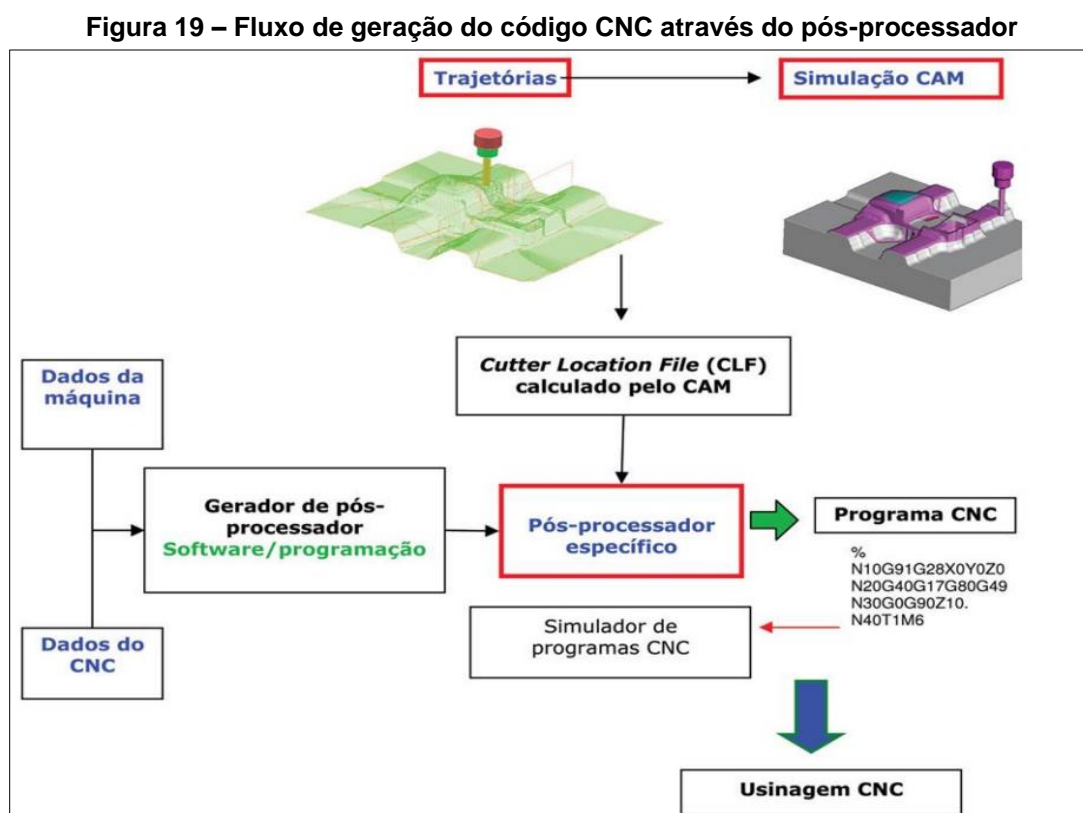
Além das informações referentes à trajetória da ferramenta, o pós-processador utiliza os parâmetros de velocidades de corte (V_c) e avanço (F), rotação da ferramenta (S), avanço por aresta (f_z), profundidades de corte radial (a_e) e axial (a_p), e posição da ferramenta no magazine (T) para cada operação de usinagem (CAMARGO, 2017).

O cálculo da trajetória gera um arquivo genérico, sem especificações que contém todos os pontos da trajetória, esse arquivo é denominado *Cutter Location File* (CLF). Esse arquivo é transformado pelo pós-processador em um programa

CNC no formato específico para ser interpretado pelo conjunto máquina-CNC (GRAEFF, 2019).

Cada pós-processador é exclusivo para realizar o pós-processamento de um determinado sistema CAM e a geração de um pós-processador envolve informações da máquina e do comando CNC. As informações relativas à sintaxe dos comandos são padronizadas pela ISO 66025 (CAMARGO, 2017, P.28).

A Figura 19 apresenta a fluxo de geração de um programa CNC, abrangendo a entrada dos parâmetros de usinagem, geração da trajetória da ferramenta e conversão do CLF em programa CNC.



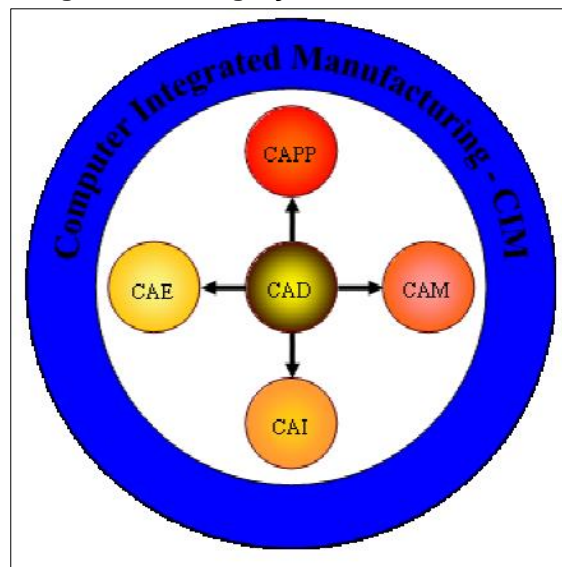
Fonte: Adaptado de (CAMARGO, 2017)

2.9. Associação com outros sistemas

Segundo Souza e Coelho (2003), atualmente com o decorrido desenvolvimento de *softwares* e *hardwares* a integração dos sistemas que auxiliam na cadeia produtiva é mais efetiva, embora ainda não tenha atingido o ciclo total de produção.

Os sistemas CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) atuam nas etapas de planejamento (CAPP- Planejamento de Processos Assistido por Computador), projeto (CAD), manufatura (CAM), inspeção (CAI – Inspeção Assistida por com Computador) e análise (CAE – Análise de Engenharia assistida por Computador). O centro da cadeia de integração são os *softwares* CAD, a Figura 20 ilustra a integração entre os *softwares* mencionados.

Figura 20 – Integração dos sistemas CIM

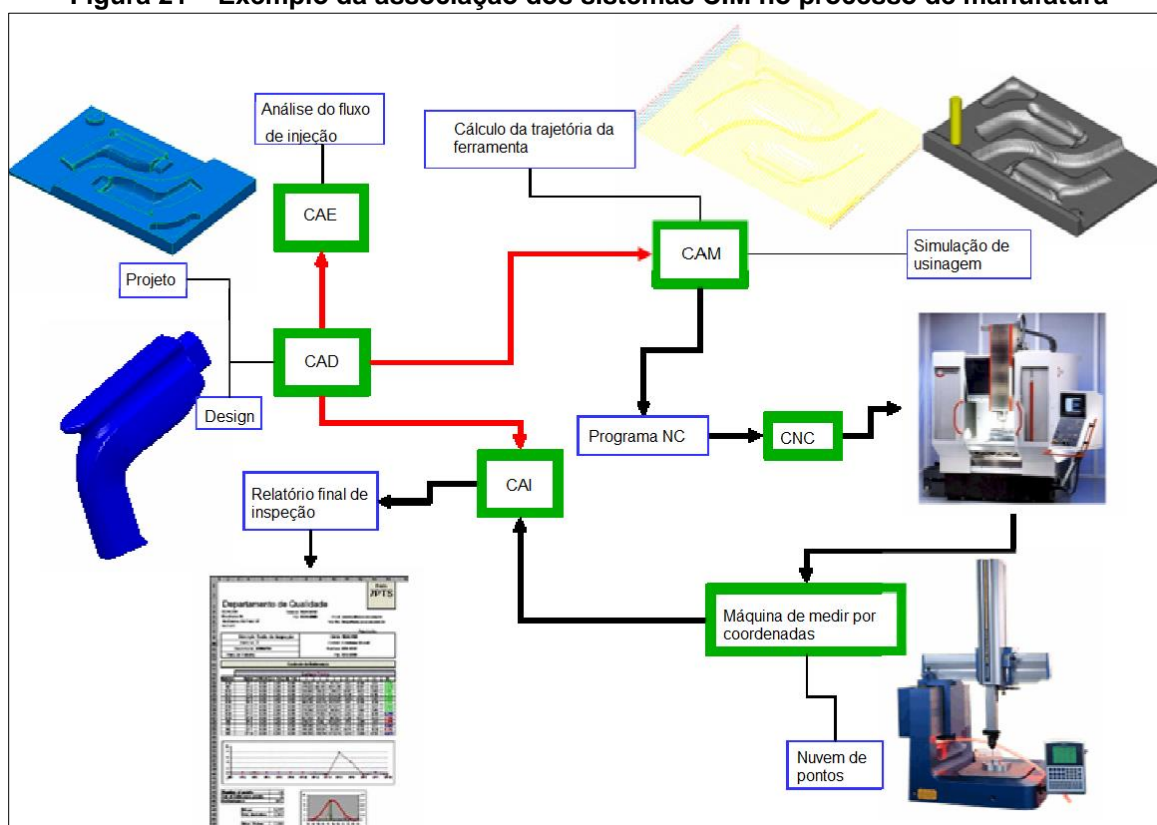


Fonte: Adaptado de (SOUZA, COELHO, 2003)

Como exemplo prático Souza e Coelho (2003), apresentam o exemplo da fabricação de um molde para injeção de termoplásticos. Para o *design* do produto utilizou-se um *software* CAD, após a etapa de projeto aplicou-se um *software* CAE para verificação do projeto.

Na etapa seguinte um *software* CAM gerou o programa NC para um centro de usinagem. Para verificação do processo de usinagem gerou-se uma nuvem de pontos cartesianos no espaço a partir de uma máquina de medição por coordenadas. Com os dados obtidos nesse processo foi feita uma comparação com o modelo através do *software* CAI que gera um relatório quantificando as variáveis do processo. A Figura 21 ilustra o processo descrito.

Figura 21 – Exemplo da associação dos sistemas CIM no processo de manufatura



Fonte: Adaptado de (SOUZA, COELHO, 2003)

2.10. SprutCAM

O SprutCAM é um *software* CAM utilizado para virtualização, programação e simulação de diferentes tipos de máquinas CNC, como por exemplo fresadoras, tornos, centros de usinagem, robôs, eletroerosão a fio e máquinas especiais. A partir da máquina real o *software* possibilita a construção e configuração de máquinas virtuais, além de permitir a criação de códigos NC (SBARDELOTO, 2017).

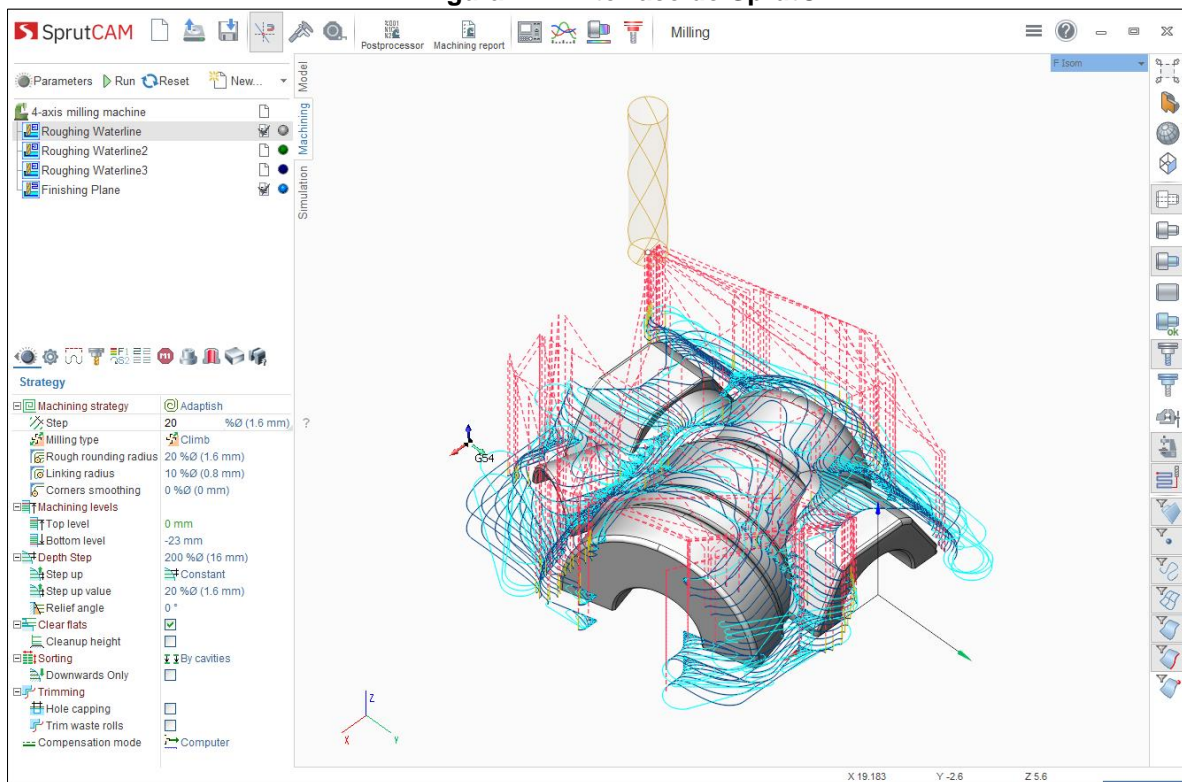
O *software* importa geometrias do tipo IGES, DXF, 3DM, PostScript, Parasolid (texto e binário), STL, STP, VRML, e outros arquivos. Ele permite integração com a maioria dos CADs disponíveis no mercado como por exemplo AutoCAD, Catia, Inventor, Solid Edge e SolidWorks (DERECICHEI, CODRUTA, CHEREGI, 2018)

Segundo Sbardeloto (2017, P.24), é possível realizar a simulação do processo de usinagem que leva em consideração os parâmetros da máquina virtual como, por exemplo, limite de curso e velocidade dos eixos. O *software* ainda permite adicionar na simulação outros eixos e equipamentos, como contraponto, luneta, morsas e eixos externos.

A facilidade na programação e simulação permite que o usuário faça a programação rapidamente de suas peças visualizando o processo de remoção e/ou adição de material em cada operação e calculando a trajetória da ferramenta com base na cinemática da máquina levando em consideração as propriedades de cada eixo. O SprutCAM proporciona uma simulação segura e eficaz, disponibilizando ao usuário a verificar colisões, excesso material e invasão na peça, fim curso dos eixos (COMAC, 2017).

Para definir uma nova máquina no SprutCAM deve-se seguir as etapas segundo Breaz (2015): dividir os componentes de cada eixo da máquina em arquivos de geometria 3D, abrir cada componente no SprutCAM, salvá-los no formato .OSD, e criar ou modificar o modelo pré-definido de um arquivo .XML. A Figura 22 ilustra uma peça aonde as trajetórias de fresamento estão sendo geradas

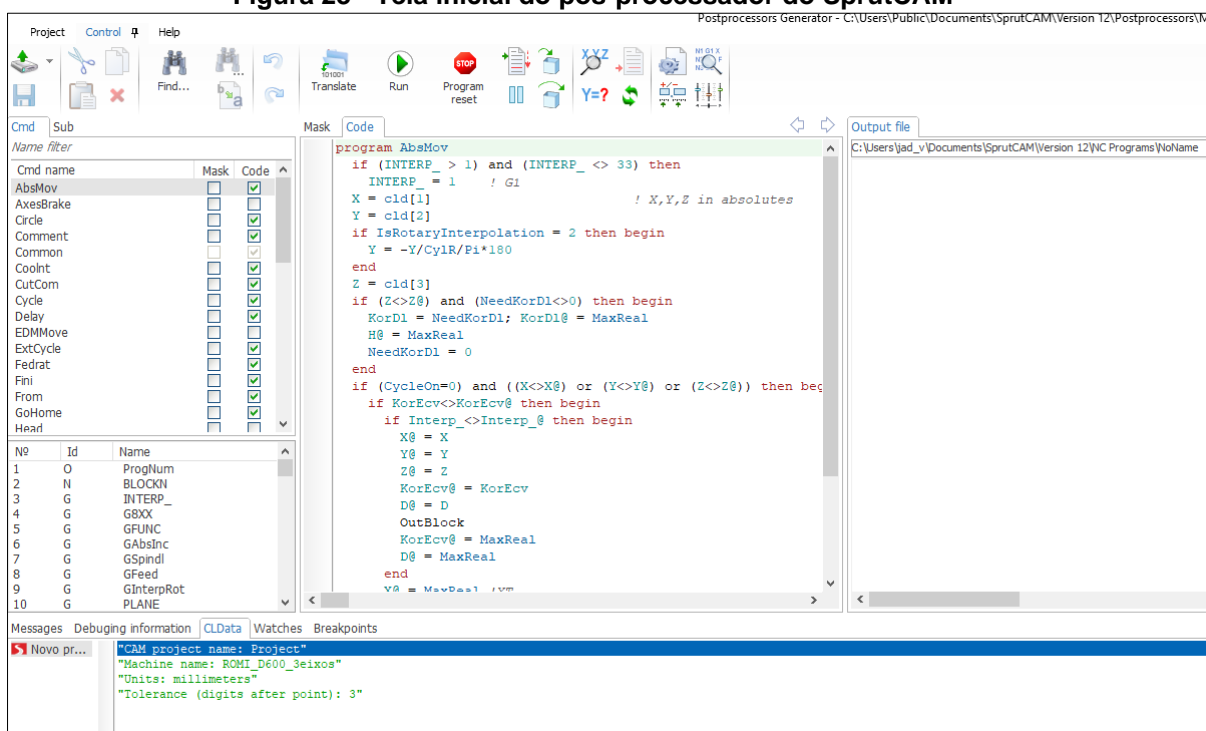
Figura 22 – Interface do SprutCAM



Fonte: SprutCAM

A Figura 23 apresenta a tela inicial do pós-processador do SprutCAM, o *software* possui diversas opções para os controladores mais utilizados no mercado (SBARDELOTO, 2017, P.25).

Figura 23 - Tela inicial do pós-processador do SprutCAM



Fonte: SprutCAM

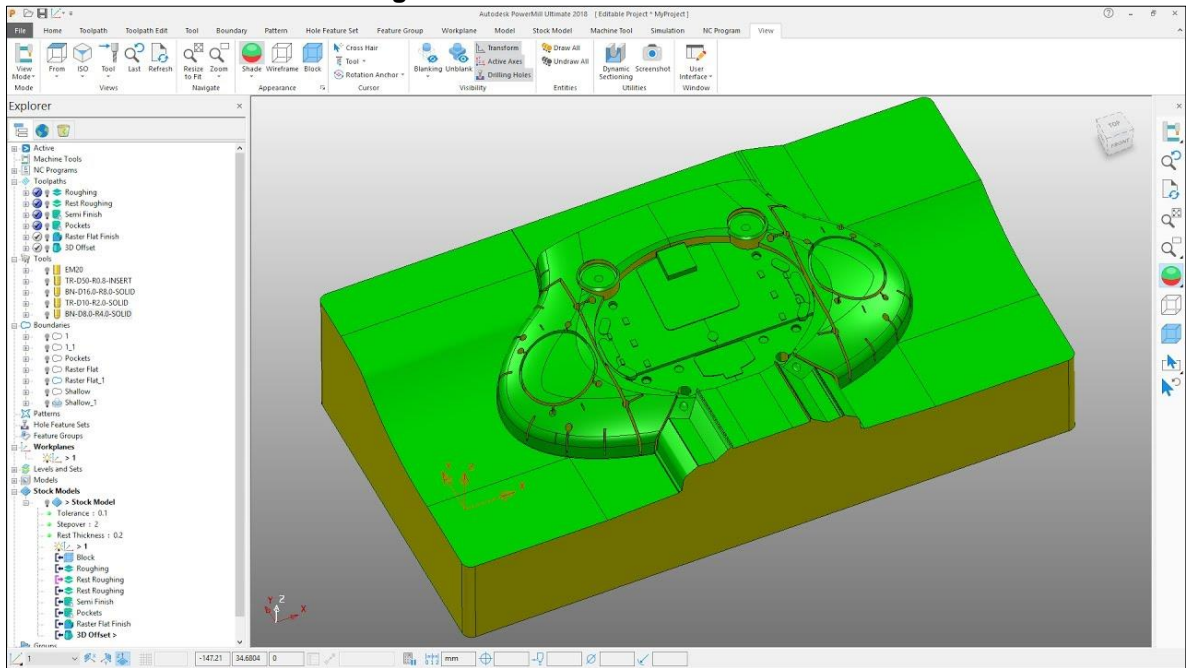
2.11. PowerMILL

O PowerMILL é um sistema independente para modelagem de formas 2D e 3D e permite que sejam importadas para o ambiente de projeto de usinagem as geometrias geradas em sistemas CAD (POWERMILL, 2013). É uma ferramenta de amplo uso na manufatura sendo de execução rápida e flexível utilizado por cerca de 30 % das ferramentarias nacionais (SILVA FILHO, 2000).

Segundo Holzmann (2014), o *software* proporciona várias alternativas para execução de trabalhos, tanto na seleção quanto edição de percursos de usinagem, objetivando reduzir o tempo gasto com a programação dos códigos CNC, uma vez que converte diretamente as formas geométricas em linguagem de máquina.

Com um ambiente simples e interface *Windows*, o *software* está disponível em português, podendo ser operado facilmente. O PowerMILL pode trabalhar com dados de baixa qualidade, admitindo “*gaps*” entre as superfícies originais, sem prejudicar drasticamente a trajetória calculada para a usinagem (POWERMILL,2013). A Figura 24 apresenta um modelo onde as trajetórias estão sendo programadas no *software*.

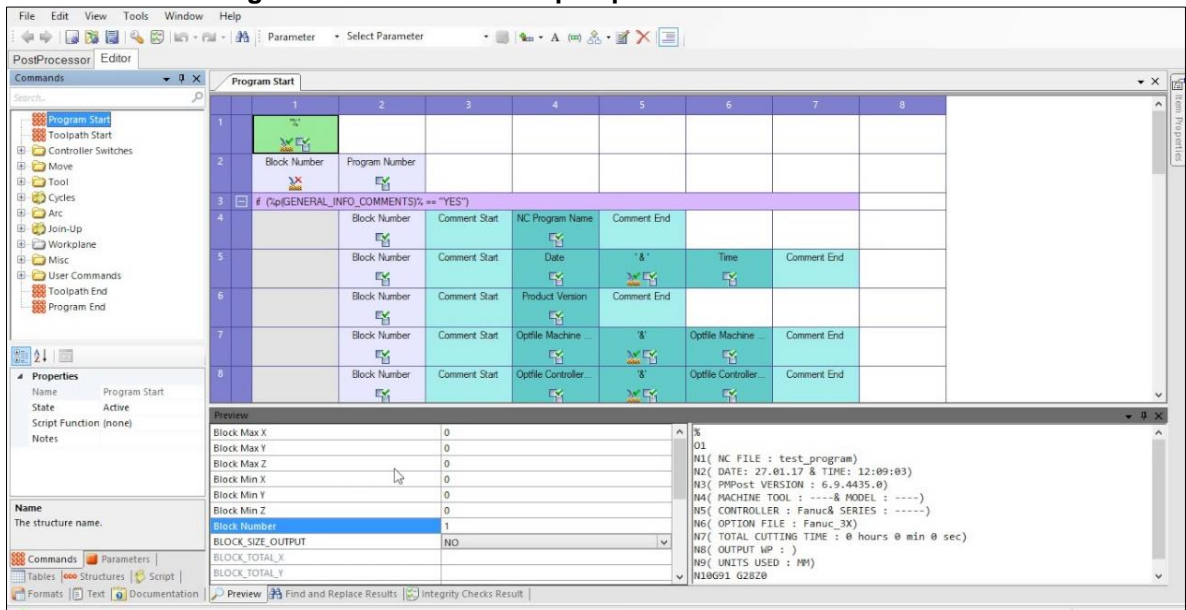
Figura 24 – Interface do PowerMILL



Fonte: POWERMILL (2018)

Assim como o SprutCAM o PowerMILL possui um módulo integrado de pós-processamento, a Figura 25 apresenta a tela inicial do pós-processador que o *software* oferece.

Figura 25 – Tela inicial do pós-processador do PowerMILL



Fonte: POWERMILL (2018)

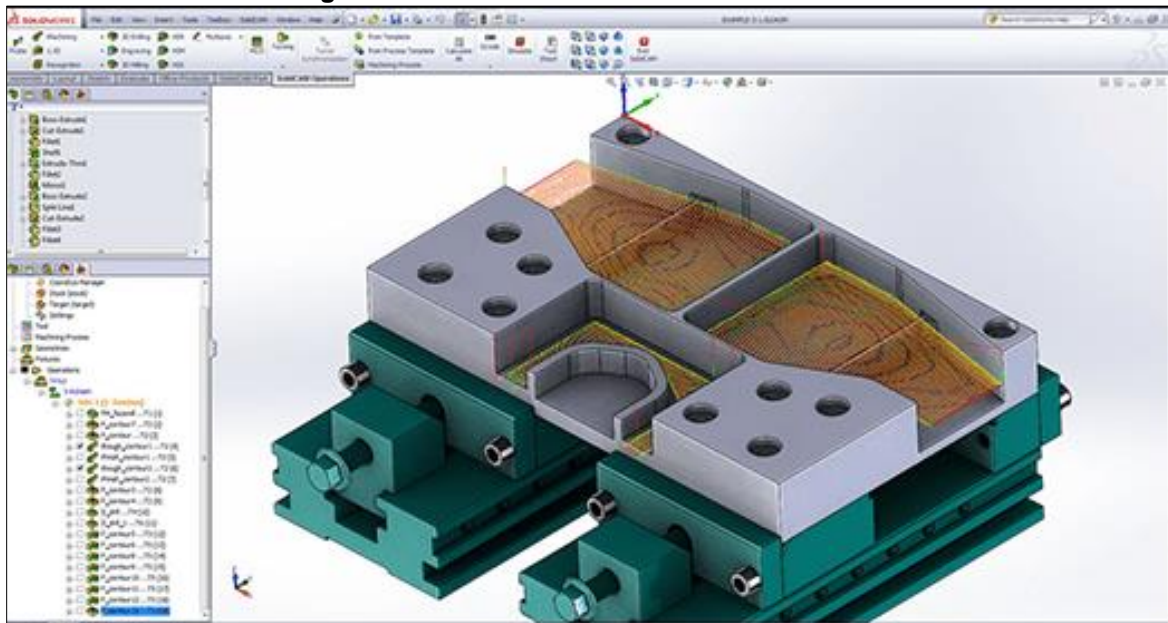
2.12. SolidWorks CAM

Segundo Holzman (2014), o SolidWorks CAM é amplamente difundido, e apresenta muitas soluções para os processos CAM na área de mecânica. O *software* apresenta interface de conversão de superfícies geométricas em 2D e 3D, código G de alta qualidade, preservando as geometrias do modelo CAD devido a interface de leitura do desenho ser feita através de *wireframe*, que forma malhas regionais nos sólidos. Outra característica do SolidWorks CAM é a rápida transmissão de dados.

Esse *software* possibilita a variação da trajetória de usinagem, a formulação de banco de dados tanto para ferramentas, quanto para peças, exibe relatórios de rendimento de usinagem e ainda relata pontos críticos de usinagem (SOLIDCAM, 2013, apud HOLZMAN, 2014, P.49).

O SolidWorks CAM foi implementado na versão 2018 do SolidWorks com duas versões, um *standard* com fresamento de 2 ½, e a versão profissional para fresamento 4 e 5 eixo e torneamento. A Figura 26 ilustra a interface do *software*.

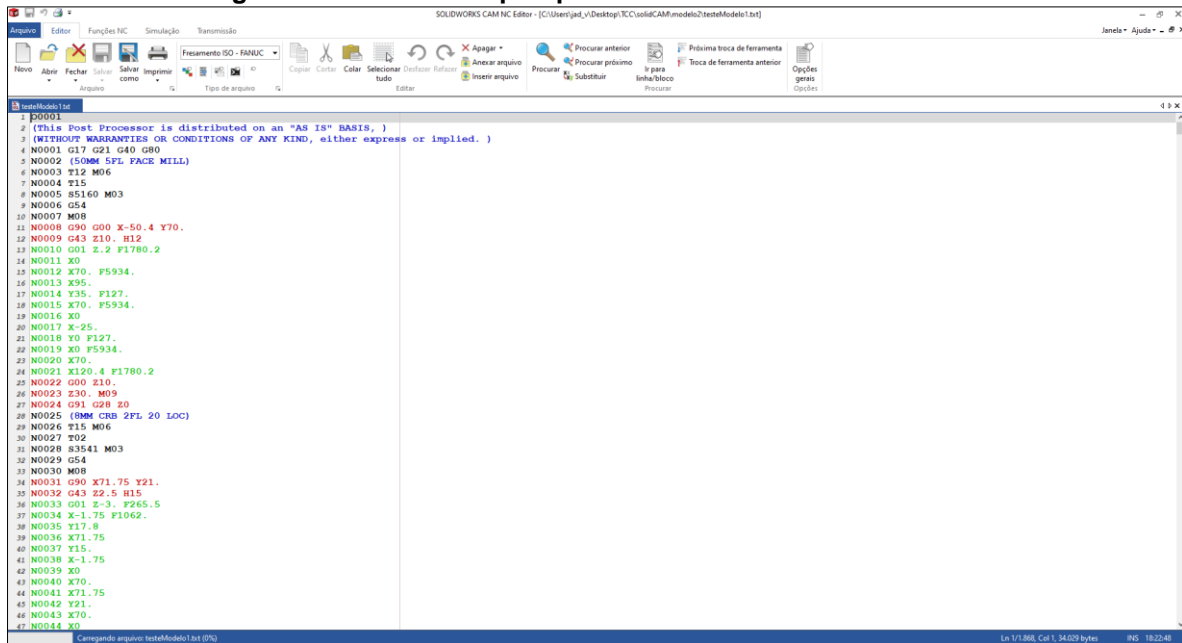
Figura 26 – Interface do SolidWorks CAM



Fonte: SOLIDWORKS CAM

A Figura 27 apresenta a tela inicial do pós-processador editável do SolidWorks CAM, aonde as trajetórias lineares, angulares e funções preparatórias aparecem em cores diferentes.

Figura 27 – Tela inicial pós-processador do SolidWorks CAM



Fonte: SOLIDWORKS CAM

O SolidWorks CAM reconhece as geometrias usináveis de maneira automática através de elementos pré-definidos que utilizam informações das operações utilizadas na etapa de desenho 2D e 3D da peça. As principais geometrias usináveis disponíveis no ambiente de projeto são:

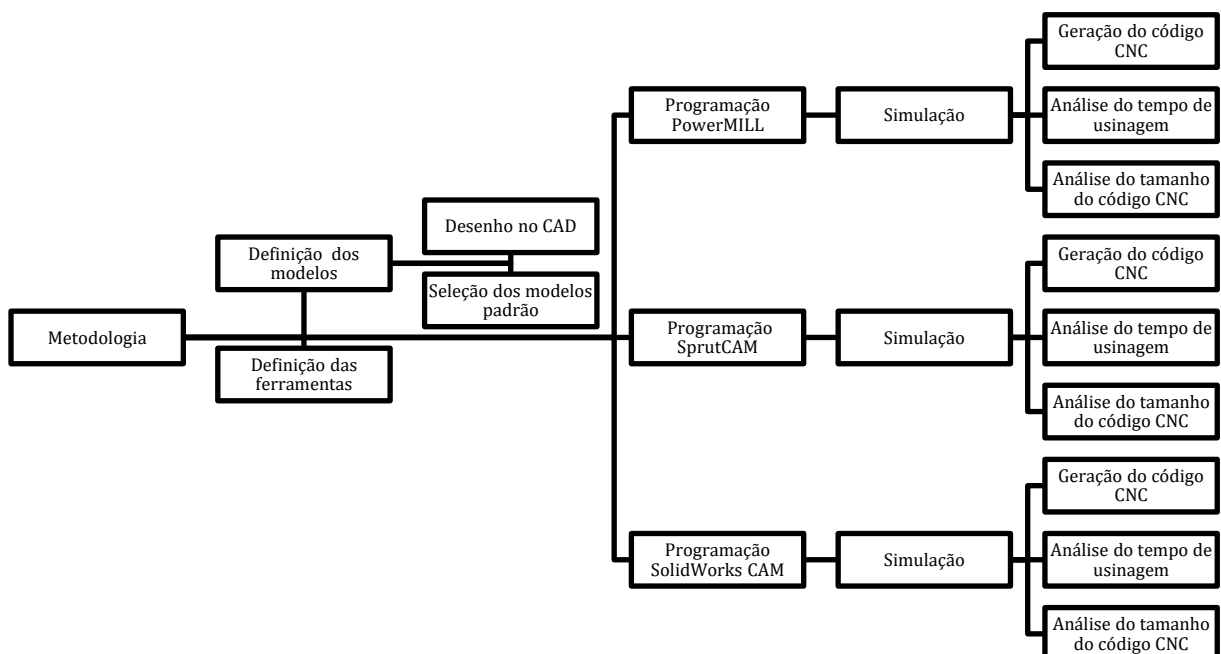
- a) Alojamentos: retangular, circular, oblongo e irregular;
- b) Ressaltos: retangular, circular, oblongo e irregular;
- c) Furos: cego, roscado, passante, cabeça cilíndrica, cabeça cônica e composto;
- d) Acabamentos: chanfro, face inclinada, canto regular, rasgo retangular e canto irregular;

3. METODOLOGIA

Nesta seção são descritos os recursos e procedimentos empregados para o que os objetivos propostos para o experimento fossem alcançados. O *software* empregado para o projeto do Modelo 1 foi o SolidWorks, os *softwares* utilizados para as atividades CAM foram: PowerMILL, SprutCAM e SolidWorks CAM.

Para a realização dos experimentos foram executados procedimentos que garantem a geração de padrões de usinagem iguais para que seja realizada uma análise sistemática dos *softwares* CAM em estudo. Os mesmos parâmetros de usinagem serão utilizados para as ferramentas aplicadas em cada modelo. A Figura 28 apresenta as etapas da metodologia, e os desdobramentos para análise e resultados.

Figura 28 – Organograma da metodologia



3.1. Definição dos modelos

Este trabalho objetiva analisar e comparar três *softwares* comerciais CAM, a partir de operações de fresamento conforme citado anteriormente. Para que as análises sejam feitas, é necessário definir modelos geométricos desenhados em CAD, que serão importados para o CAM e servirão de base para a geração das trajetórias da ferramenta, simulações das operações, análises dos tempos de fresamento, entre outros pontos apresentados na subseção de objetivos específicos.

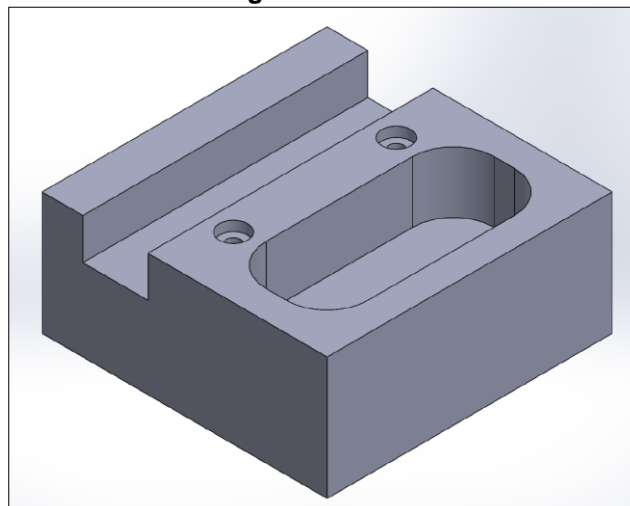
Os modelos que serão utilizados como base, têm duas vertentes. O primeiro foi desenhado no *software* SolidWorks, plataforma disponibilizada pelo Instituto Federal de Educação de Santa Catarina, e o segundo é um modelo retirado da base de exemplos do *software* PowerMILL.

Deste ponto em diante a peça de autoria própria será chamada de Modelo 1 e a peça selecionada a partir da base de dados do PowerMILL será chamada de Modelo 2.

3.1.1. Desenho do Modelo 1 no CAD

O Modelo 1, ilustrado na Figura 29, foi desenvolvido visando a fabricação a partir de um bloco de matéria-prima bruta de alumínio, nas dimensões 70 mm x 70 mm x 30 mm (Comprimento, largura e altura).

Figura 29 – Modelo 1

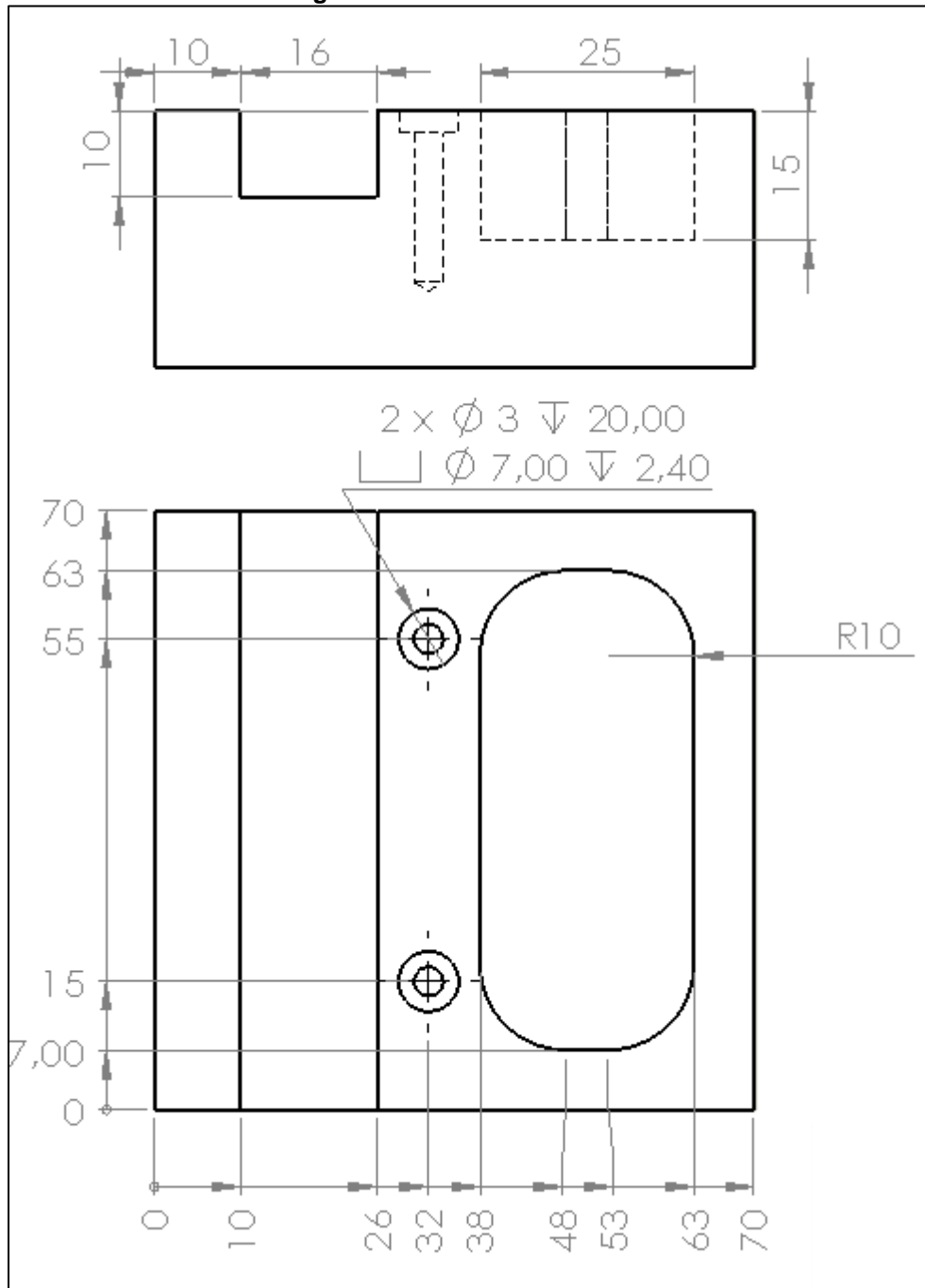


Fonte: Autora (2021)

Esta peça contempla elementos geométricos comuns em peça usinadas nas indústrias metal mecânicas. Os elementos geométricos propostos são: furos com rebaixos, cavidades, perfis, rasgos, faces planas e perpendiculares.

As vistas do Modelo 1 são ilustradas na Figura 30, e o desenho técnico completo se encontra no Anexo 1.

Figura 30 – Vistas do Modelo 1

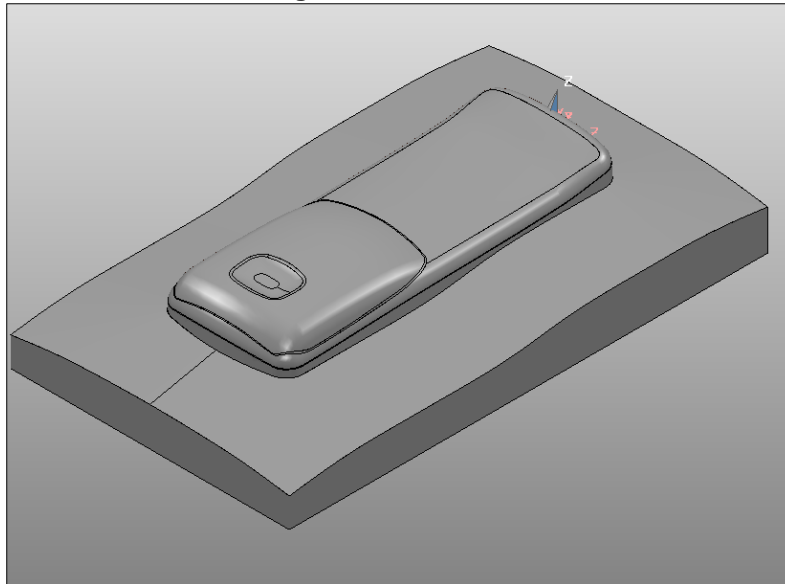


Fonte: Autora

3.1.2. Seleção do Modelo 2

O Modelo 2 , ilustrado na Figura 31, foi selecionado a partir dos modelos usados como exemplos no *software* PowerMILL. O modelo possui uma superfície com geometria complexa e será utilizado para a análise do comportamento dos *softwares* CAM quando aplicados a esses tipos de de geometrias. As dimensões do Modelo 2 são 227,5 mm de comprimento, 132,5 mm de largura e 44,0 mm de altura.

Figura 31 – Modelo 2



Fonte: PowerMILL 2020

3.2. Definição das ferramentas

Este trabalho foi desenvolvido prevendo a usinagem e simulação de fresamento para um centro de usinagem ROMI Linha D600 com comando FANUC 0i – MC. Este centro de usinagem é disponibilizado pelo IFSC Florianópolis no laboratório LAM I.

As ferramentas utilizadas no processo de fresamento são fresas ou brocas, elas são ferramentas rotativas com múltiplas arestas de corte e são divididas em dois grupos, inteiriças (apenas um corpo) e com insertos intercambiáveis.

As ferramentas de corte devem possuir dureza superior a do material que deve ser usinado, possibilitando a retirada do material com mínimo de esforço

possível. O Quadro 7 apresenta a lista de ferramentas selecionadas para o experimento.

Quadro 7 – Ferramentas utilizadas

Ferramenta	Aplicação	Característica	Material da Ferramenta
Fresa toroidal Ø 50 mm R0,15 Ø 40 mm R0,15	Desbaste em geral e acabamento de superfícies planas horizontais	Grande taxa de remoção de material. Possui insertos intercambiáveis que aumentam a durabilidade da ferramenta e possibilitam maiores velocidades. Geralmente são aplicadas para operações de faceamento.	Aço
Fresa de topo reto Ø 10 mm	Desbaste em geral e acabamento de superfícies planas horizontais e verticais	Média taxa de remoção de material, normalmente é interiça.	Metal duro
Fresa de topo reto Ø 4 mm	Desbaste em geral e acabamento de superfícies planas horizontais e verticais	Baixa taxa de remoção de material, normalmente é interiça.	Metal duro
Fresa toroidal Ø 8 mm R0,5	Desbaste em geral e acabamento de superfícies planas horizontais e verticais	Aplicada em fresamentos multieixo, usinagem em superfícies e acabamento.	Metal duro
Fresa de topo esférico Ø 4 mm	Desbaste de superfícies complexas	Utilizadas em processo de fresamento de peças mais complexas como moldes e modelos de processos mais avançados de fabricação.	Metal duro
Broca Ø 3,3 mm	Furação	Podem ter corte a direita ou a esquerda, e são utilizadas para fazer furações, dependendo da dureza do material em que estão sendo aplicadas podem ter coberturas que proporcionam maior resistência. São aplicadas também em furos que posteriormente receberão operações de rosqueamento.	Metal duro

Fonte : Autora (2021)

3.3. Movimentação e posicionamento da ferramenta

Para todos os programas gerados foi mantida a mesma movimentação da ferramenta de usinagem, que iniciava no ponto X_0 , Y_0 e Z_0 . As usinagens foram realizadas com somente um *setup*, e a partir do ponto zero a ferramenta realizou a usinagem com avanço programado de acordo com as características de cada ferramenta, mantendo os mesmos parâmetros para todos os *softwares*.

Todos os parâmetros de corte serão apresentados no decorrer das próximas sessões. O número de passes utilizados foi o mesmo para todos os sistemas e a ferramenta foi configurada para retornar para o ponto X_0 e Z_0 com avanço máximo ao final de cada passe.

3.4. Definição dos parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem foram definidos a partir de dados do manual técnico da Sandvik 2020. Os modelos das ferramentas foram escolhidos levando em conta o material que será usinado, diâmetros requeridos e a profundidade de corte máxima.

Após a seleção das ferramentas foram definidos os parâmetros de corte utilizando informações técnicas de cada ferramenta. Para a determinação da velocidade de rotação do eixo árvore foi utilizada a Equação 2.

Equação 2:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot DC}$$

Onde:

n = Velocidade de rotação do eixo árvore [min^{-1}]

V_c = Velocidade de corte [m/min]

π = 3,14

DC = Diâmetro da ferramenta [mm]

A Tabela 1 apresenta as ferramentas selecionadas e os parâmetros de corte aplicados para o fresamento do Modelo 1 e Modelo 2.

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem das ferramentas

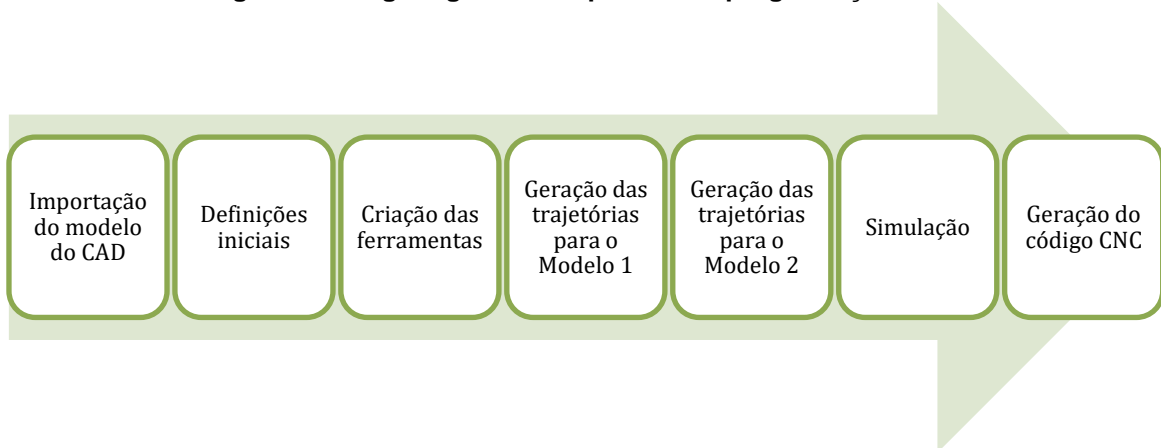
Ferramenta	Descrição	V_c (m/min)	F_z (mm/min)	a_p (mm)	a_e (mm)	n (min^{-1})	F_n (mm/rotação)
R590-050C5-11M	Fresa de topo toroidal 50,0 mm	810	0,23	5,0	35,0	5160	-
R590-040C3-11M	Fresa de topo toroidal 40,0 mm	1010	0,211	5,0	13,64	7500	-
2P121-1000-NC	Fresa de topo reto 10,0 mm	355	0,132	15,0	7,0	7500	-
2P121-0800-NC	Fresa de topo 8,0 mm	368	0,28	5,0	7,14	7500	-
2P232-0400-NA	Fresa de topo reto 4,0 mm	334	0,0506	1,2	3,5	7500	-
R216.42-04030-AK08A	Fresa de ponta esférica 4,0 mm	510	0,146	0,283	0,185	4300	-
860.1-0330-027A1-GM	Broca 3,30 mm	206	-	26,0	-	7500	0,14

Fonte: Autora (2021)

3.5. Programação utilizando o PowerMILL

A programação dos Modelos 1 e 2 foi realizada primeiramente no *software* PowerMILL 2020. Para a geração dos códigos CNC foram seguidos os passos apresentados na Figura 32:

Figura 32 - Organograma dos passos da programação no PowerMILL

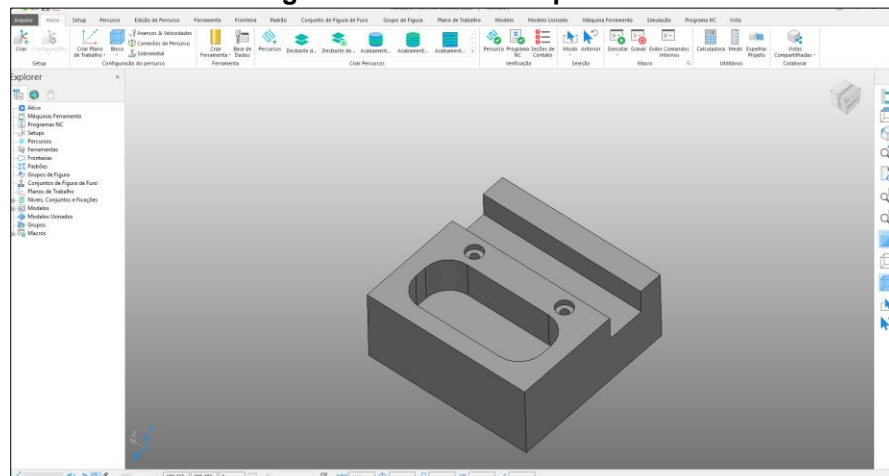


Fonte: Autora (2021)

3.5.1. Importação dos modelos no PowerMILL

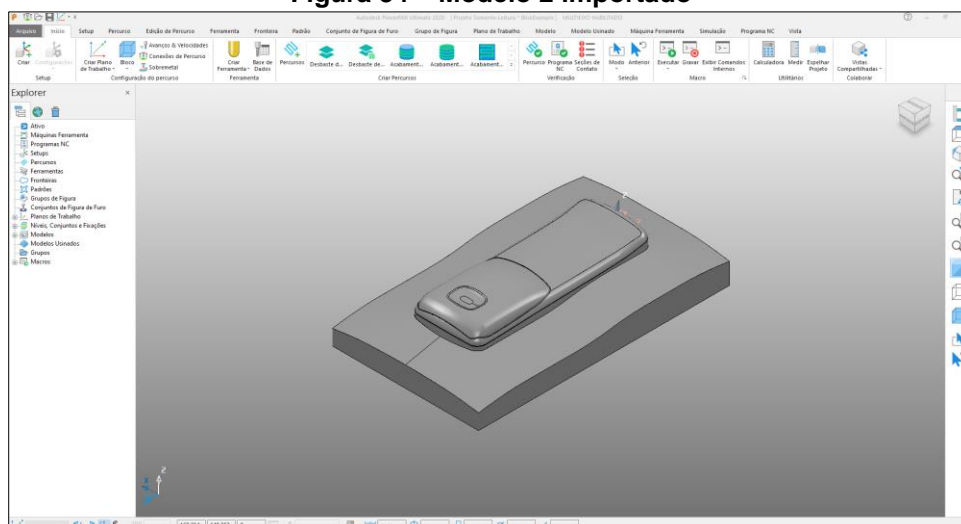
O Modelo 1 foi importado do SolidWorks, o arquivo possui extensão .SLDPRT e o Modelo 2 foi importado da biblioteca de exemplos do PowerMILL e possui extensão .dkg. As Figuras 33 e 34 ilustram os modelos importados para o PowerMILL, respectivamente.

Figura 33– Modelo 1 importado



Fonte: Autora (2021)

Figura 34 – Modelo 2 importado



Fonte: Autora (2021)

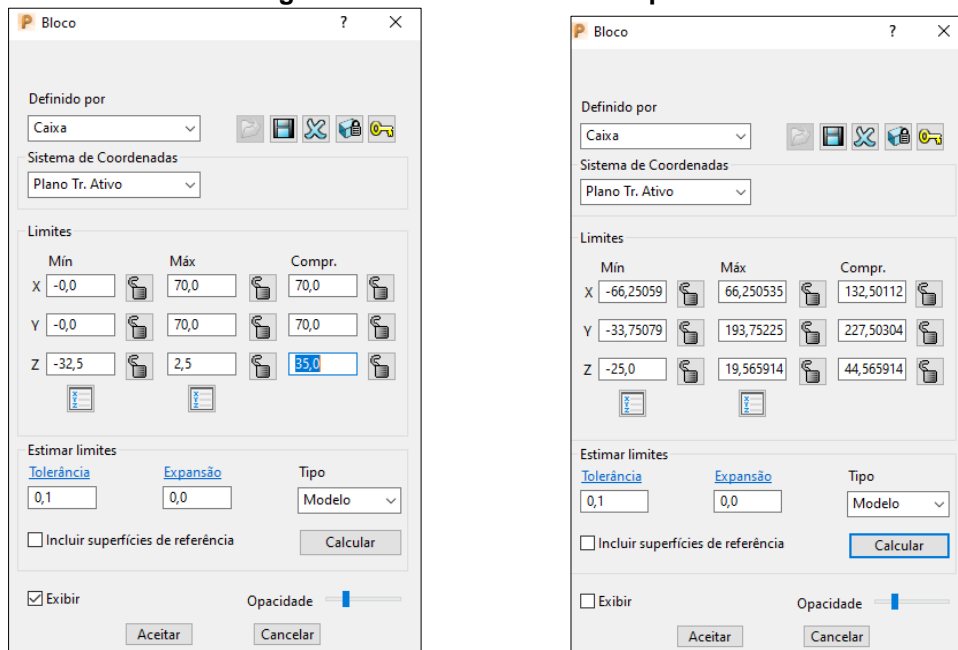
3.5.2. Definições iniciais no PowerMILL

As informações iniciais sobre o bloco de matéria-prima, zero peça, e direção dos eixos, compoem o plano de trabalho aonde a usinagem será feita. Para a usinagem dos Modelo 1 e 2 foi definido apenas um plano de trabalho, apesar de ser possível adicionar múltiplos planos de trabalho para uma mesma peça.

O bloco bruto de material foi definido a partir de uma caixa com as dimensões próximas as dos modelos e sistema de coordenadas considerando o plano de trabalho ativo.

Para o Modelo1 foi adicionado 5,0 mm na direção +Z para que uma operação de faceamento fosse adicionada ao processo. Para o Modelo 2 o bloco de matéria-prima utilizado foi o sugerido automaticamente pelo PowerMILL. A Figura 35 apresenta as informações referentes aos blocos de matéria-prima utilizados.

Figura 35 – Blocos de matéria-prima

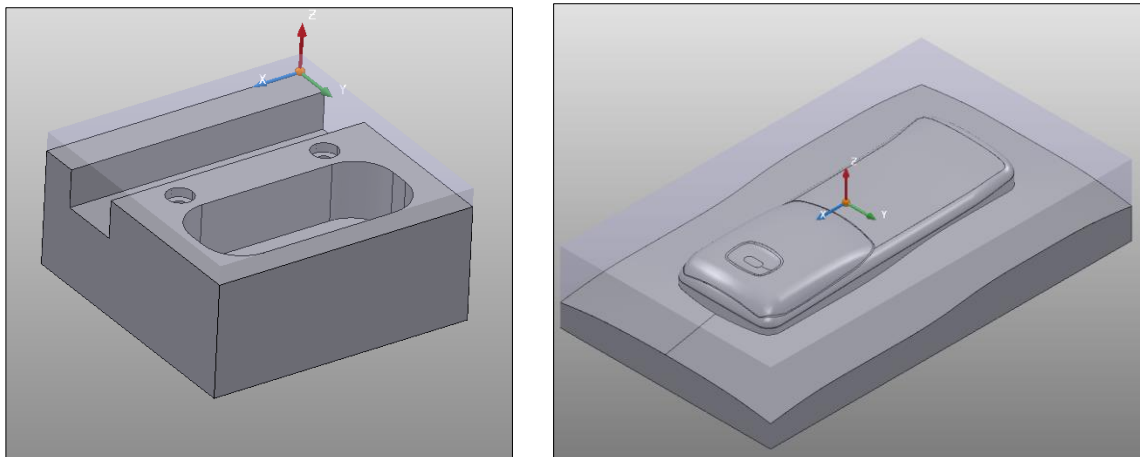


(a) Bloco de matéria-prima do Modelo 1 (b) Bloco de matéria-prima Modelo 2

Fonte: Autora (2021)

Após a definição dos blocos brutos foram criados os pontos de zero peça (ponto X_0 , Y_0 e Z_0) e definidas as direções dos eixos X, Y e Z, dando origem aos planos de trabalho. O *software* possibilita que o plano de trabalho seja criado a partir de várias estratégias, a opção utilizada foi a criação a partir de três elementos, sendo eles um ponto de origem, um plano e a direção do eixo X. A Figura 36 ilustra os planos de trabalhos dos Modelos 1 e 2.

Figura 36 – Planos de trabalho



a) Plano de trabalho do Modelo 1

b) Plano de trabalho do Modelo 2

Fonte: Autora (2021)

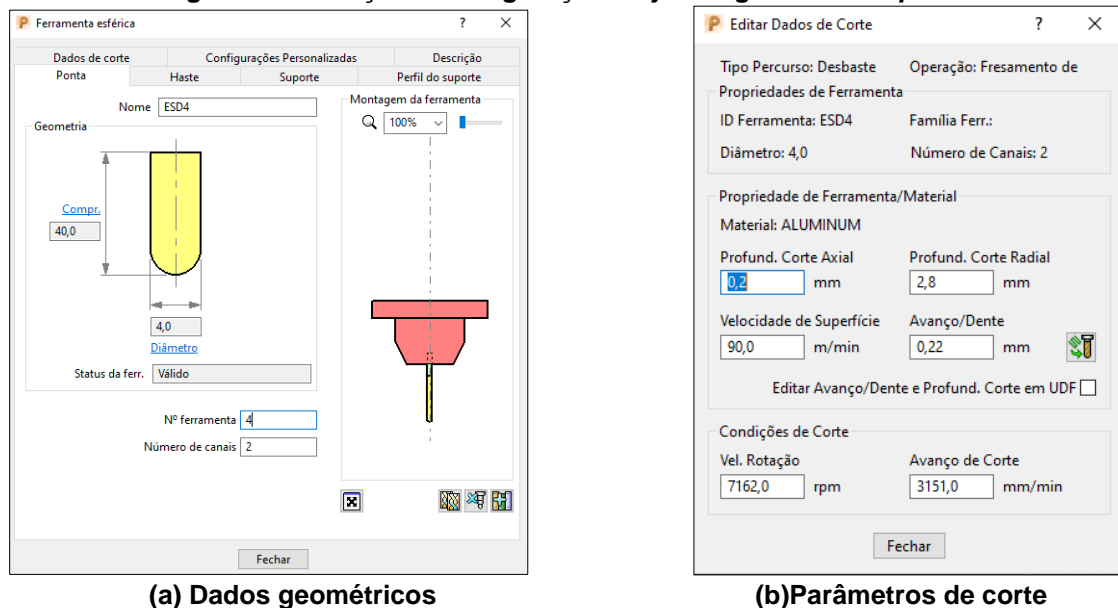
3.5.3. Criação das ferramentas

A criação das ferramentas foi feita a partir da importação de uma base de dados do *software* que foi editada para que as ferramentas obtivessem as informações dimensionais reais das ferramentas selecionadas na sessão 3.4.

As características dimensionais configuradas foram diâmetro de corte (DC), comprimento total (LF), profundidade máxima de corte (APMX), comprimento útil (LU), número de arestas cortantes (ZEFP) e raio de canto (RE). Esses dados foram retirados do catálogo técnico Sandvik 2020.

As informações relativas aos parâmetros de corte, foram inseridas manualmente de acordo com os dados da Tabela 1. A Figura 37 ilustra a criação e configuração das ferramentas na janela gráfica do *explorer*.

Figura 37 – Criação e configuração na janela gráfica do *explorer*



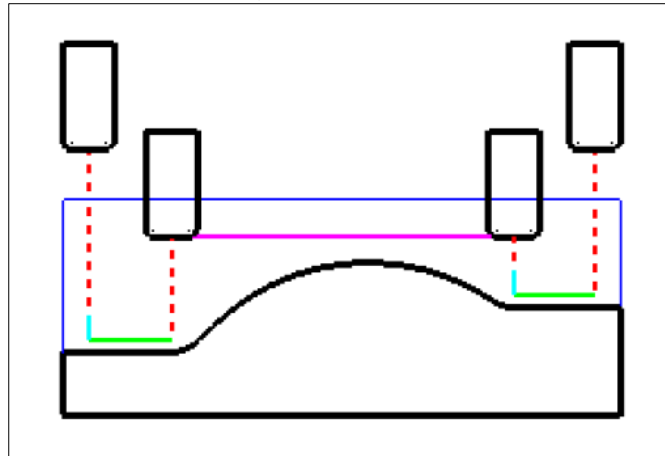
Fonte: Autora (2021)

Em paralelo à criação das ferramentas foram definidos os parâmetros de alturas seguras de movimento das ferramentas. Para a altura de movimentação rápida (Z seguro) foi definido 15,0 mm e a altura de mergulho foi definido 10,0 mm (Z inicial), esses valores foram calculados pelo próprio *software*.

Para as ligações de percursos foi selecionada a estratégia de movimentação rasante, que permite que o avanço rápido vertical continue para um Z inicial incremental, especificado acima da profundidade total de mergulho antes que o

avanço de mergulho mais lento ocorra. A Figura 38 ilustra a estratégia de ligação de movimentos. A linha roxa sólida representa o avanço rasante a linha vermelha tracejada representa o avanço rápido G0.

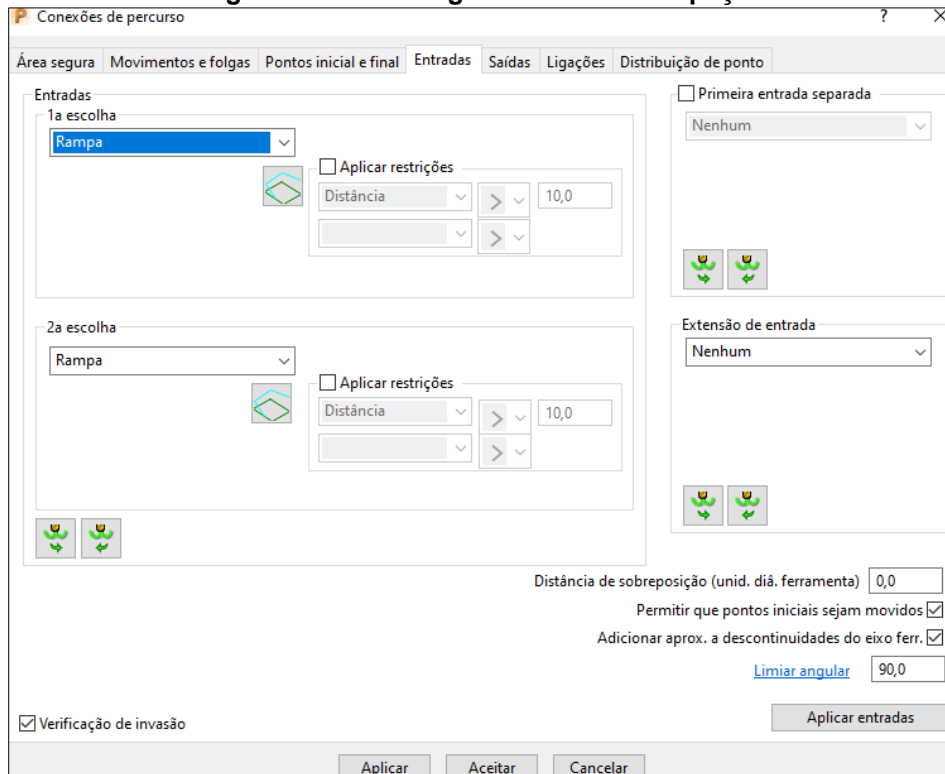
Figura 38 – Ligação rasante entre movimentos



Fonte: PowerMILL (2013)

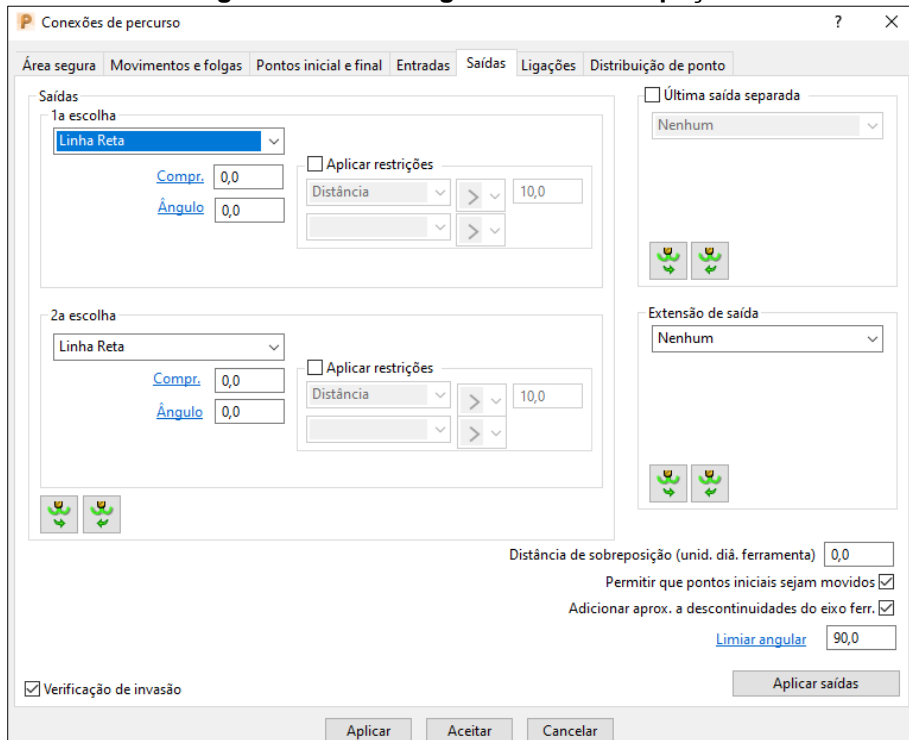
Como estratégia de entrada e saída das ferramentas na peça foi definida a estratégia de rampa e linha reta respectivamente (Figura 39 e 40).

Figura 39 – Estratégia de entrada nas peças



Fonte: Autora (2021)

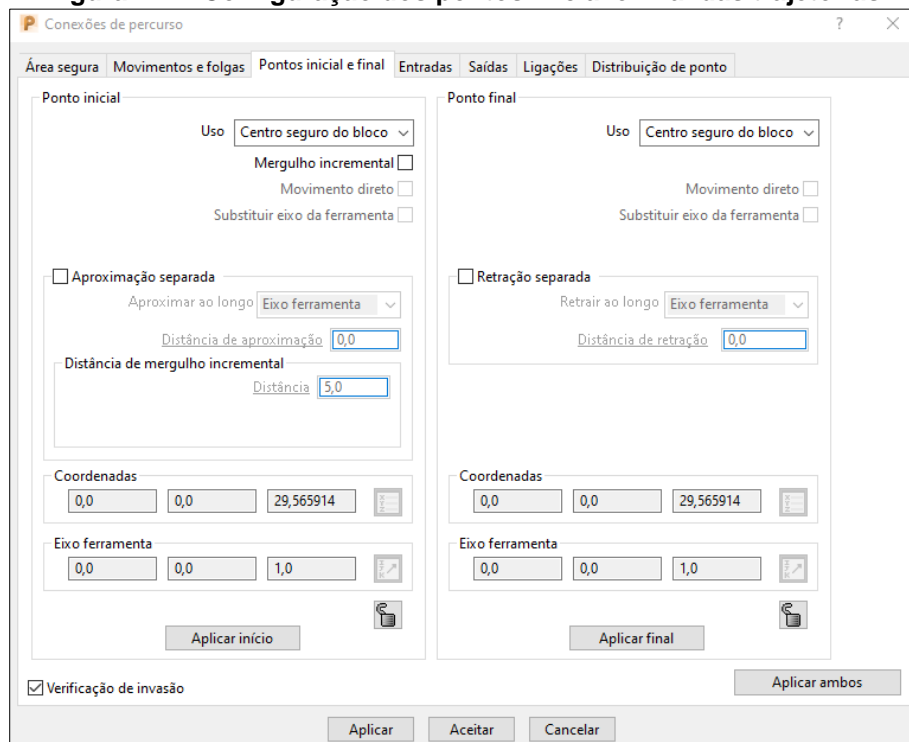
Figura 40 – Estratégia de saída nas peças



Fonte: Autora (2021)

Para os pontos inicial e final das trajetórias da ferramenta foi de finido o uso do centro seguro do bloco (Figura 41).

Figura 41 – Configuração dos pontos inicial e final das trajetórias

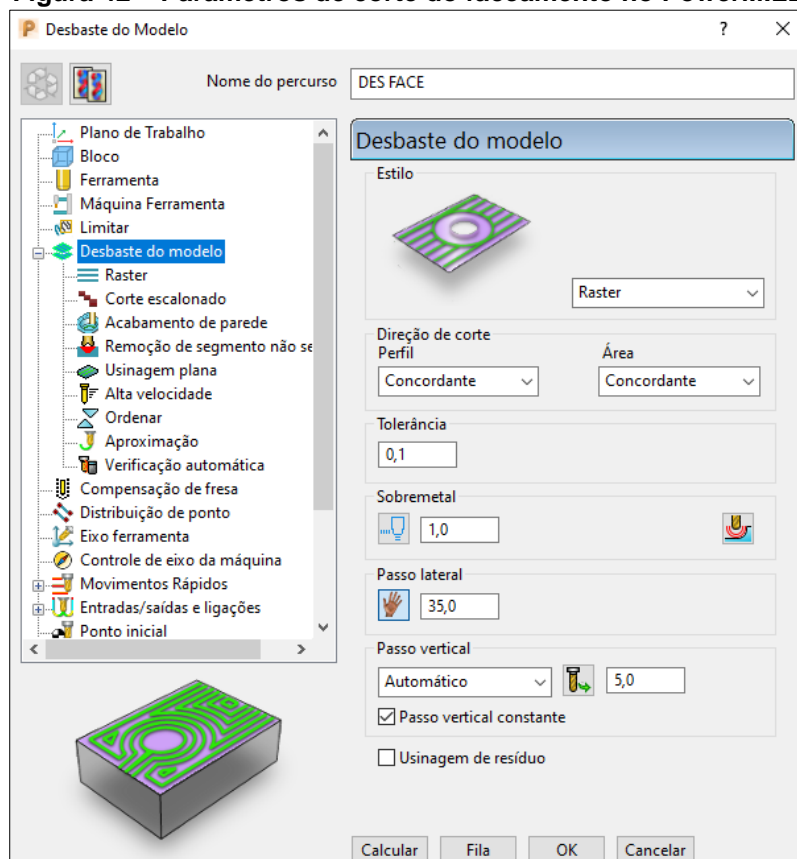


Fonte: Autora (2021)

3.5.4. Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 1

Para o Modelo 1 foram geradas trajetórias de desbaste, furação e acabamento. A primeira operação feita no Modelo 1 foi o faceamento na parte superior do bloco, que posteriormente receberá as outras operações. A estratégia para essa trajetória foi o desbaste com usinagem plana de nível e estilo *raster*, com corte concordante, utilizando a fresa toroidal de $\varnothing 50$ mm. Os passes lateral e axial utilizados foram de 35,0 mm e 5,0 mm, com sobremetal axial de 1,0 mm (Figura 42).

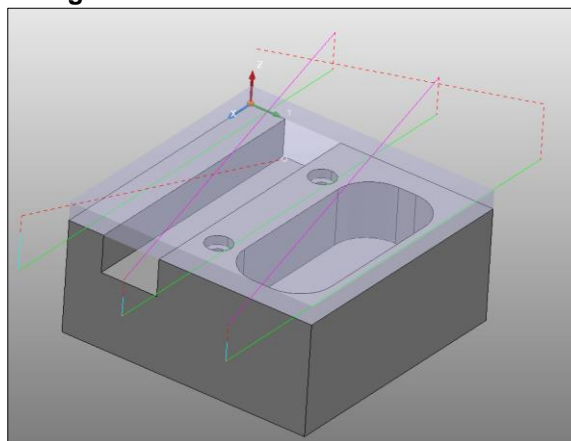
Figura 42 – Parâmetros de corte do faceamento no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A Figura 43 apresenta o resultado das trajetórias geradas para o faceamento do Modelo 1 após a aplicação dos parâmetros de corte descritos anteriormente.

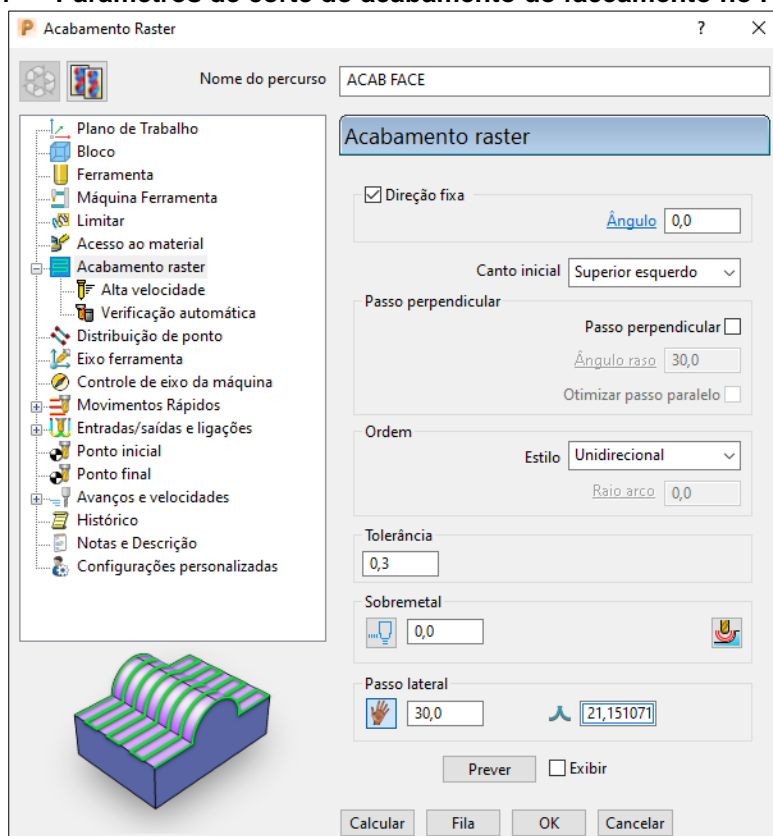
Figura 43 – Faceamento no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

Para a face superior, foi utilizada a estratégia de acabamento raster com direção fixa, passo lateral de 30,0 mm e limite de usinagem de fronteira do bloco. A ferramenta selecionada para a operação foi a mesma utilizada no desbaste. A Figura 44 ilustra os parâmetros de fresamento do acabamento do faceamento do Modelo 1 na tela do *explorer*.

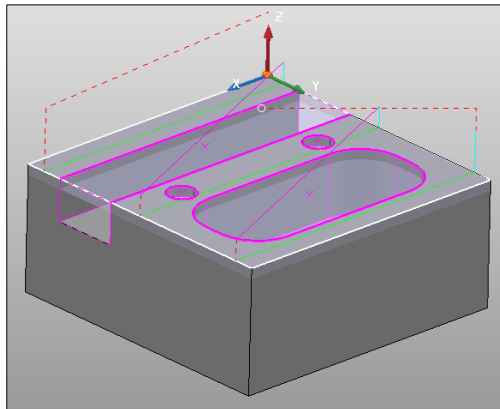
Figura 44 – Parâmetros de corte do acabamento do faceamento no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A Figura 45 ilustra as trajetórias criadas para o acabamento do faceamento do Modelo 1, após serem aplicados os parâmetros de corte citados.

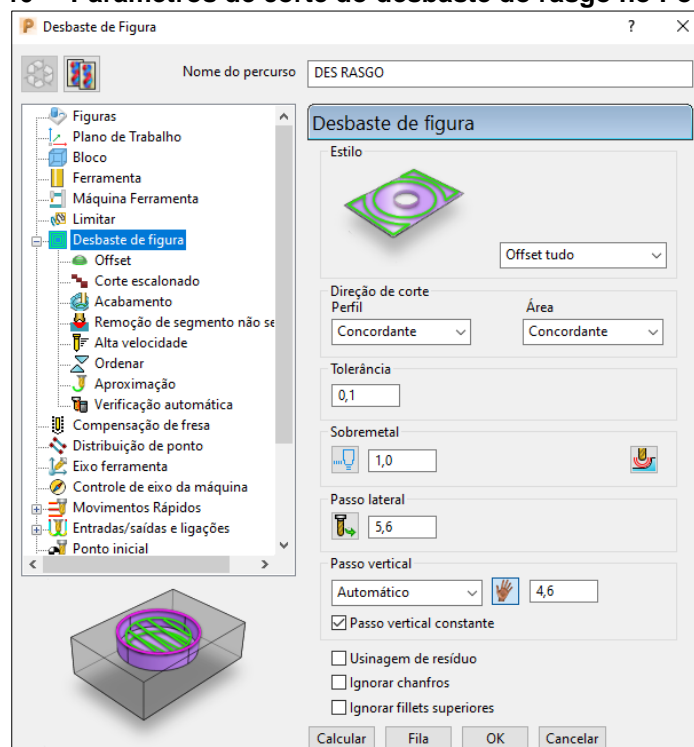
Figura 45 – Acabamento do faceamento no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A segunda operação foi a usinagem do rasgo da peça, para essa operação foram criados elementos chamados figuras da peça. Utilizando a fresa de topo de $\varnothing 10,0$ mm a estratégia escolhida foi o desbaste de figura com estilo *offset total*, o tipo de corte definido foi concordante com passo lateral de 5,6 mm, passo vertical de 4,6 mm e 1,0 mm de sobremetal (Figuras 46).

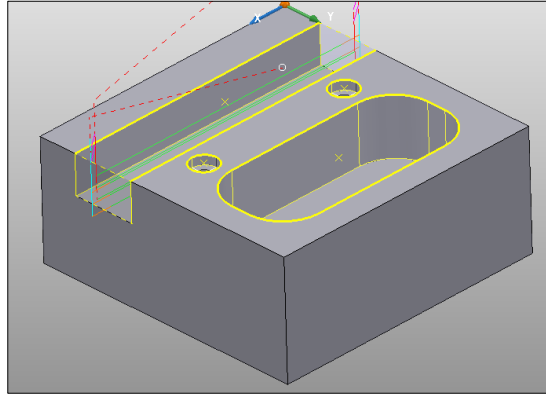
Figura 46 – Parâmetros de corte do desbaste do rasgo no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

Para que a somente o rasgo fosse usinado na operação, foi editado o percurso gerado e apagadas as trajetórias indesejadas, a Figura 47 ilustra as trajetórias geradas para o desbaste do rasgo.

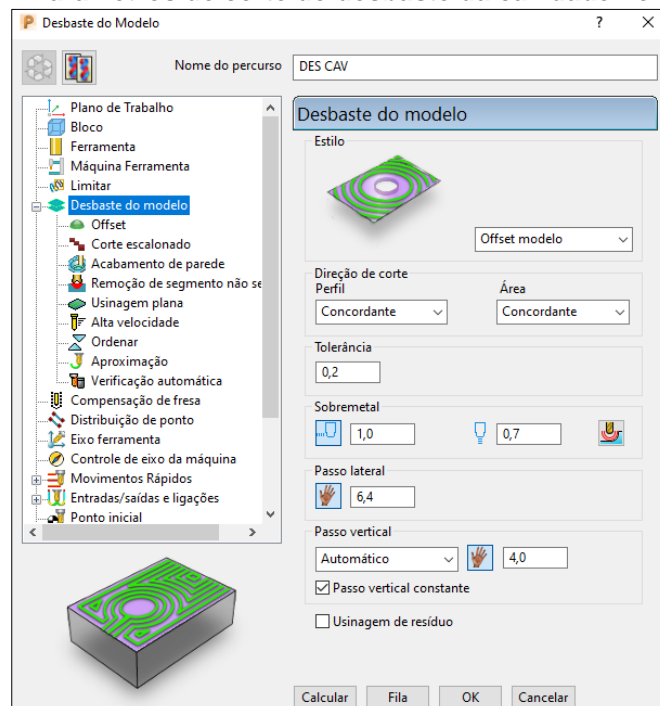
Figura 47– Desbaste rasgo no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A próxima operação realizada foi o desbaste da cavidade, com a mesma ferramenta da operação anterior. Para esse desbaste foi aplicada a estratégia de desbaste do modelo com estilo *offset* do modelo, com corte concordante, passo lateral de 6,4 mm, passo vertical de 4,0 mm e sobremetal radial (parede) de 1,0 mm e axial (fundo) 0,7 mm, com tolerância de 0,2 mm (Figura 48).

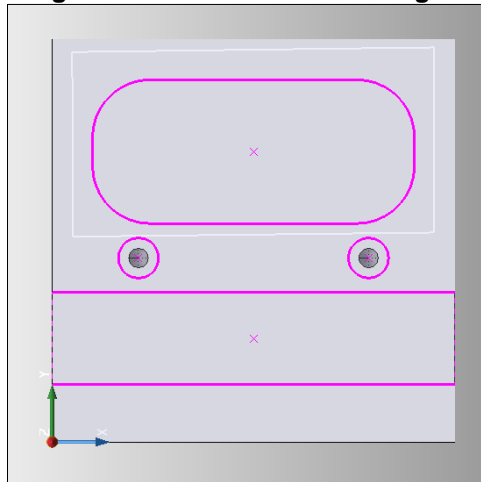
Figura 48 – Parâmetros de corte do desbaste da cavidade no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A usinagem foi limitada por uma fronteira desenhada sob o bloco e ilustrada pela Figura 49 (linha branca). Para que a usinagem fosse feita somente na cavidade poderia ter sido editado o percurso gerado e apagado as trajetórias em áreas indesejadas.

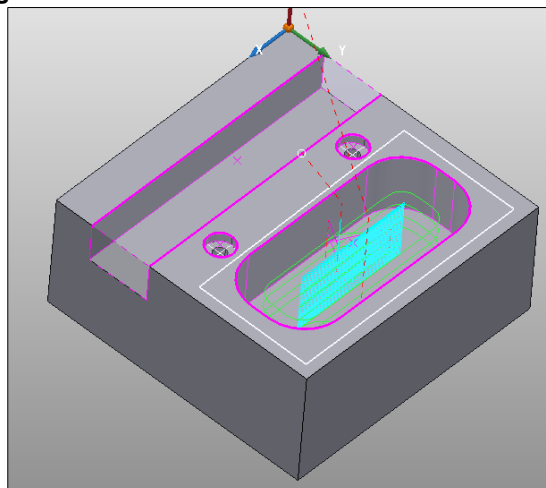
Figura 49 – Fronteira de usinagem



Fonte: Autora (2021)

A Figura 50 apresenta as trajetórias geradas para o fresamento da cavidade com os parâmetros de corte definidos. Devido a delimitação da área, não foram criadas trajetórias fora da cavidade.

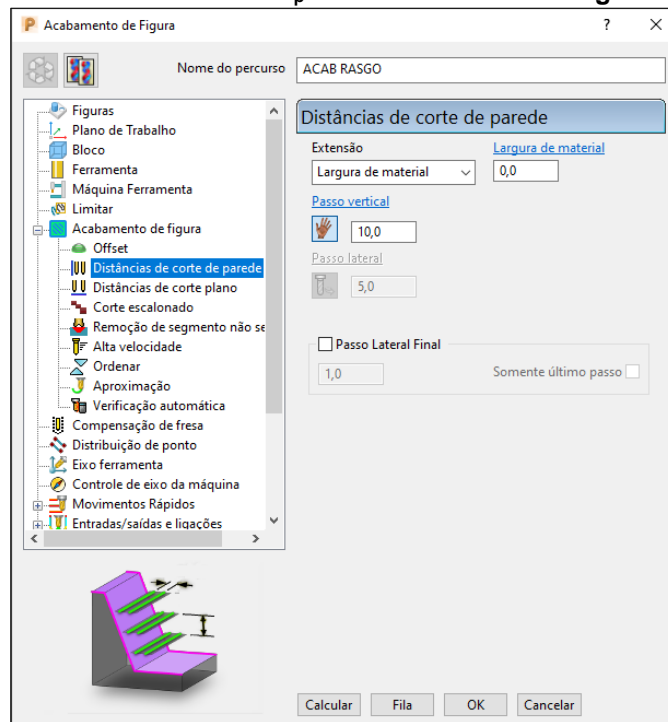
Figura 50 – Desbaste da cavidade no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

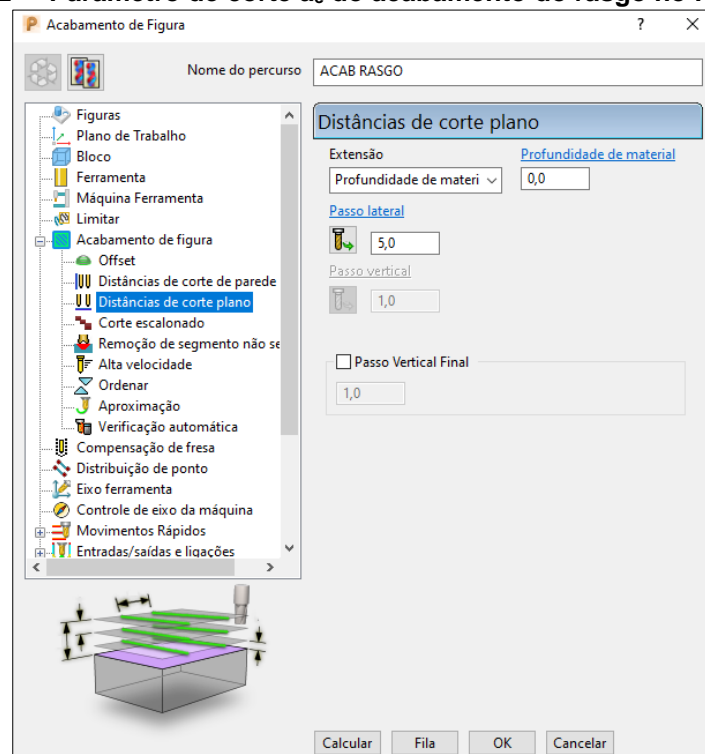
O acabamento do rasgo foi feito a partir da estratégia de acabamento de figura. A direção do corte aplicada foi concordante com passo vertical de 10,0 mm (Figura 51) e passo lateral de 5,0 mm (Figura 52).

Figura 51 – Parâmetro de corte a_p do acabamento do rasgo no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

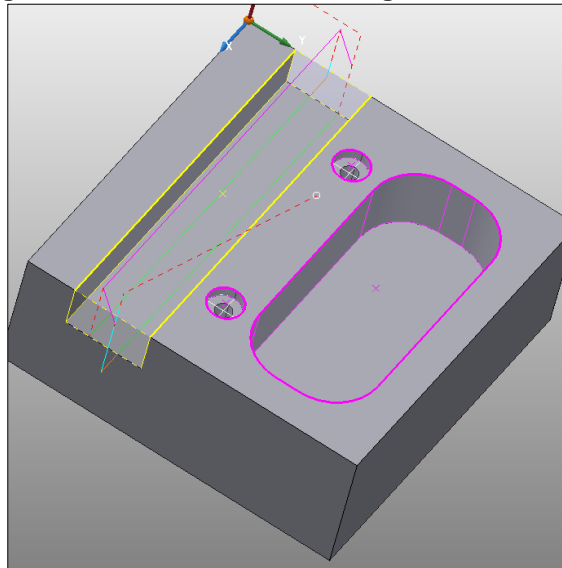
Figura 52 – Parâmetro de corte a_e do acabamento do rasgo no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A Figura 53 ilustra o resultado do processo de acabamento do rasgo do Modelo 1 com os parâmetros definidos para o fresamento nas paredes e no fundo.

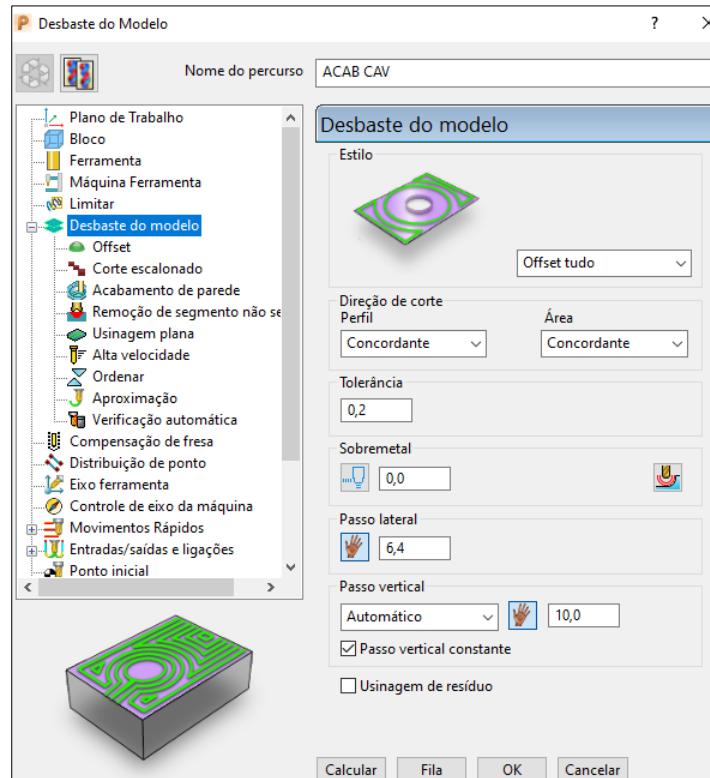
Figura 53 – Acabamento do rasgo no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A última operação de acabamento realizada no Modelo 1 foi o acabamento na cavidade, ainda com a fresa de topo de $\varnothing 10,0$ mm. Para esta operação foi selecionada a estratégia de desbaste de modelo sem sobremetal, estilo *offset* total, com corte concordante, a_e de 6,4 mm, a_p de 10,0 mm (Figura 54).

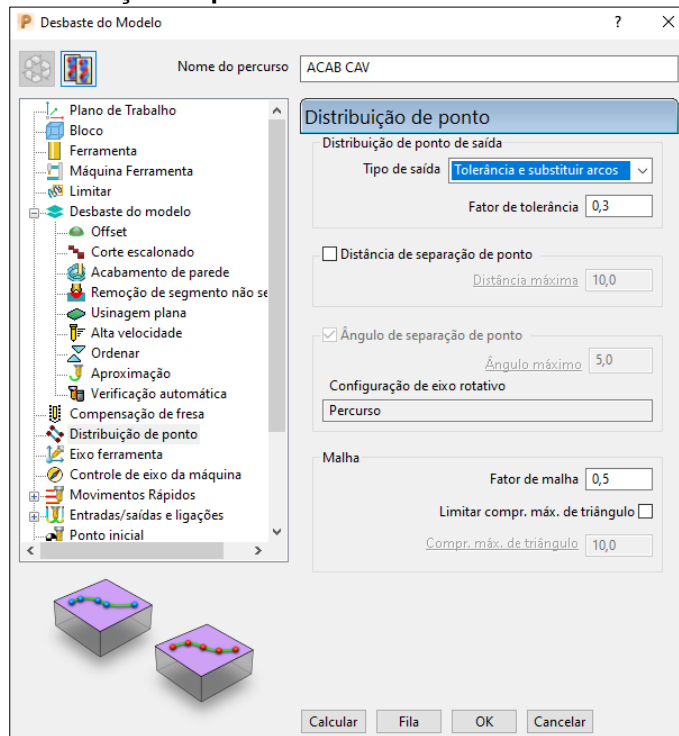
Figura 54 – Parâmetros de corte do cabamento da cavidade no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

Para um melhor acabamento a distribuição de pontos de saída foi alterada para a opção de tolerância e substituição e ângulos com fator de tolerância de 0,3 mm (Figura 55).

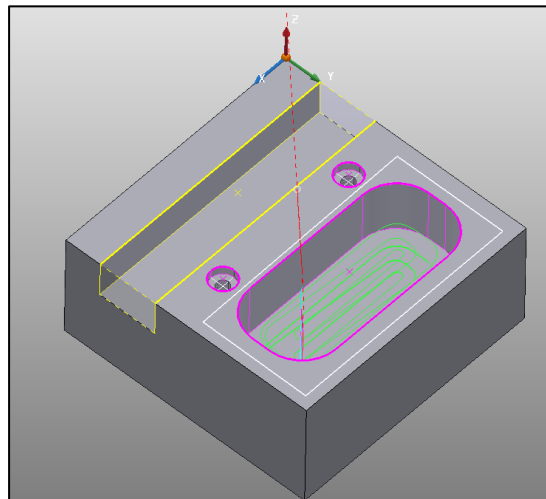
Figura 55 – Distribuição de pontos do acabamento da cavidade no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A Figura 56 ilustra as trajetórias geradas para a operação de acabamento da cavidade do Modelo 1.

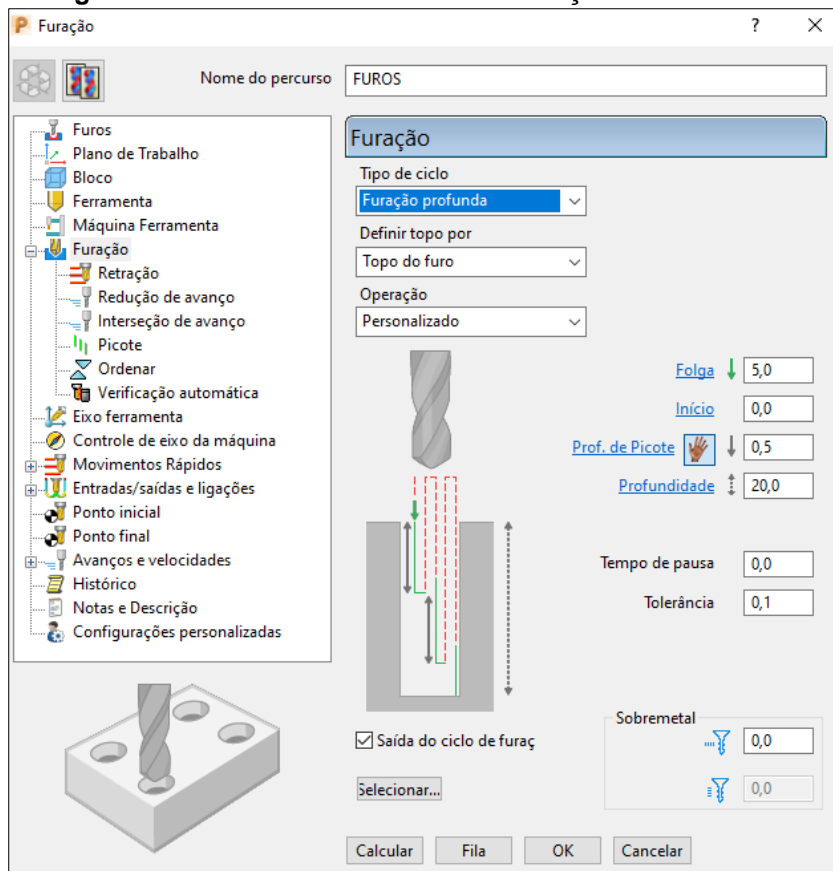
Figura 56 – Acabamento da cavidade no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

Finalizados os desbastes e acabamentos, foi executada a furação da peça. Para que o *software* reconhecesse quais elementos eram furos foi utilizada a ferramenta de criação de furos. Após o reconhecimento, os furos foram selecionados e criados a partir da estratégia de percurso de furação com a broca de Ø 3,3 mm. A configuração aplicada para a furação foi o ciclo com furação profunda, com folga de 5,0 mm, profundidade de 20,0 mm (Figura 57).

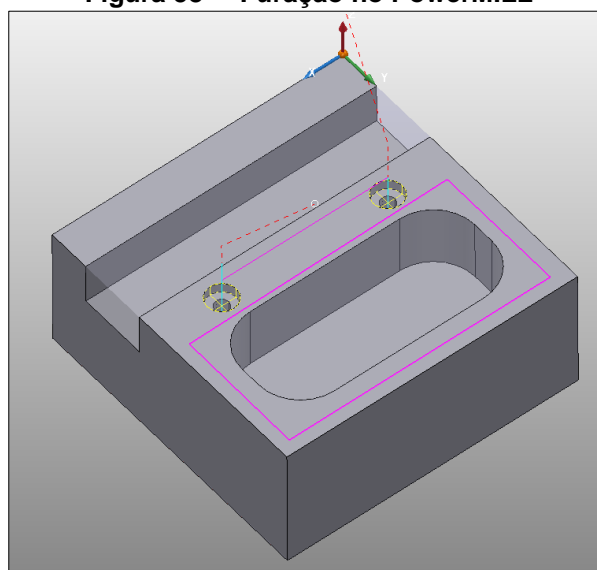
Figura 57 – Parâmetros de corte da Furação no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A Figura 58 ilustra a furação do Modelo 1 segundo os parâmetros de corte aplicados.

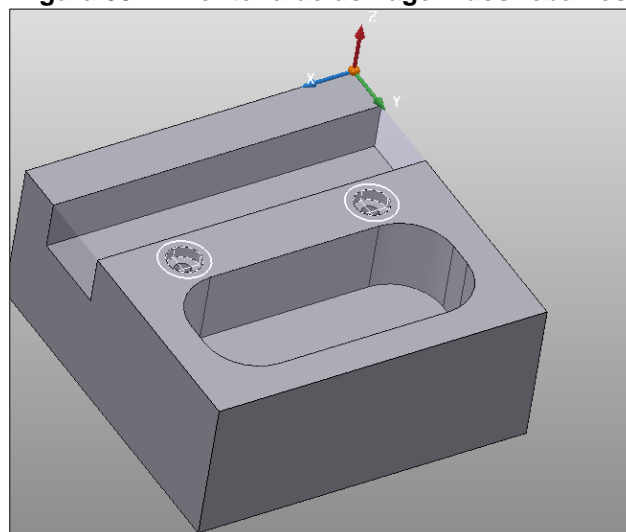
Figura 58 – Furação no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A última operação realizada no Modelo 1 foi a usinagem dos rebaxos, onde foi criada uma nova fronteira a partir do esboço de um círculo ilustrado pela Figura 59 (círculos brancos). O bloco de matéria-prima foi redefinido para -2,4 mm (profundidade do rebaxo) para que o fresamento não fosse aplicado além do especificado.

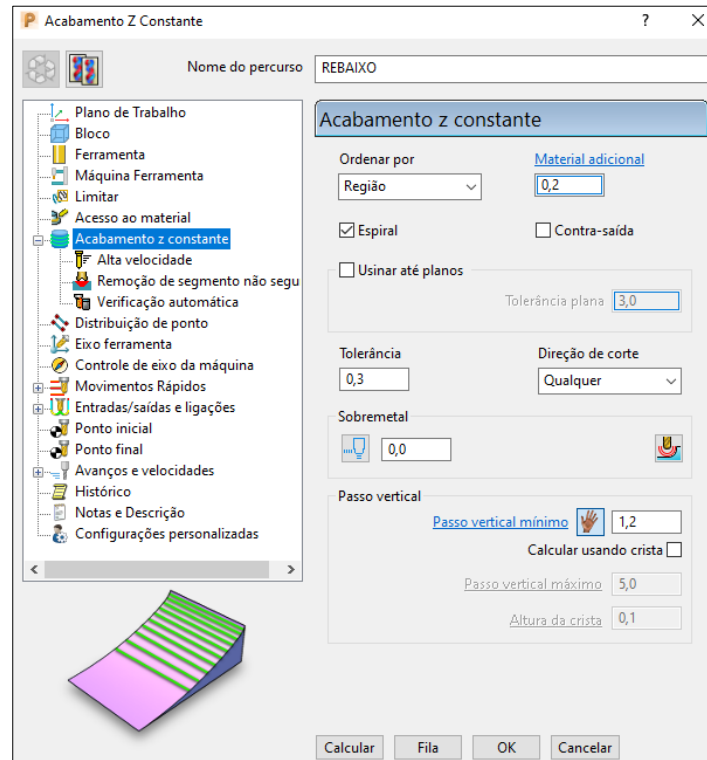
Figura 59 – Fronteira de usinagem dos rebaxos



Fonte: Autora (2021)

A ferramenta utilizada foi a fresa se topo de $\varnothing 4,0$ mm, e a estratégia de usinagem selecionada foi o acabamento Z constante em espiral, passo vertical de 1,2 mm (Figura 60).

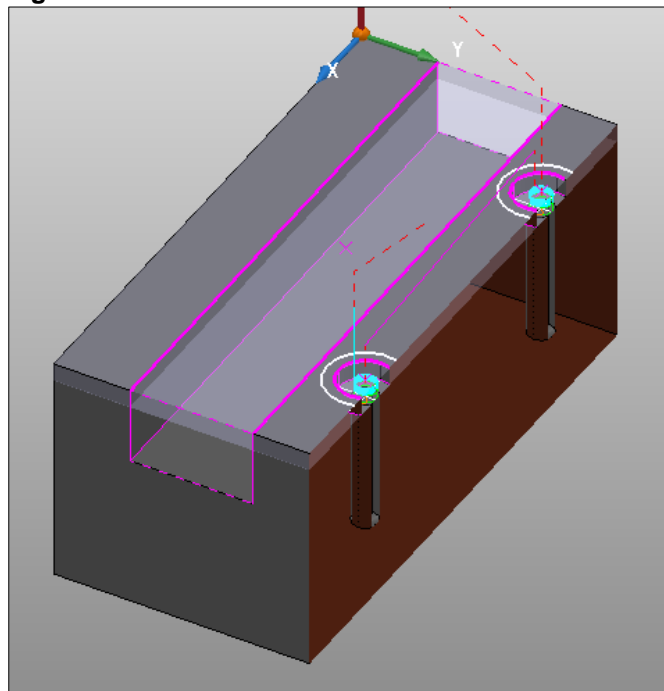
Figura 60 – Parâmetros de corte do desbaste do rebaixo no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A Figura 61 ilustra o resultado das trajetórias geradas para o desbaste dos rebaiços, a partir de uma vista de seção do Modelo 1.

Figura 61 – Fresamento dos rebaiços no PowerMILL



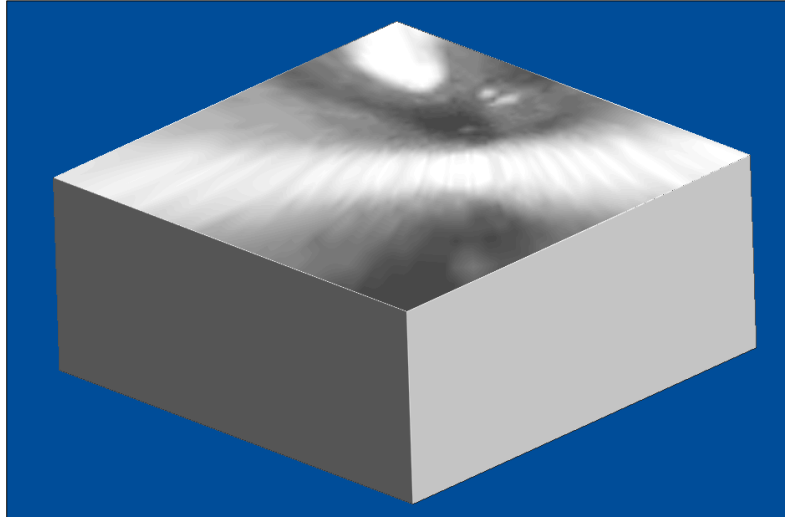
Fonte: Autora (2021)

3.5.5. Simulação de fresamento do Modelo 1

Todos os processos de fresamento de desbaste e acabamento realizados no Modelos 1 foram simulados para conferência das trajetórias e para garantir que o resultado do processo está de acordo com o projeto.

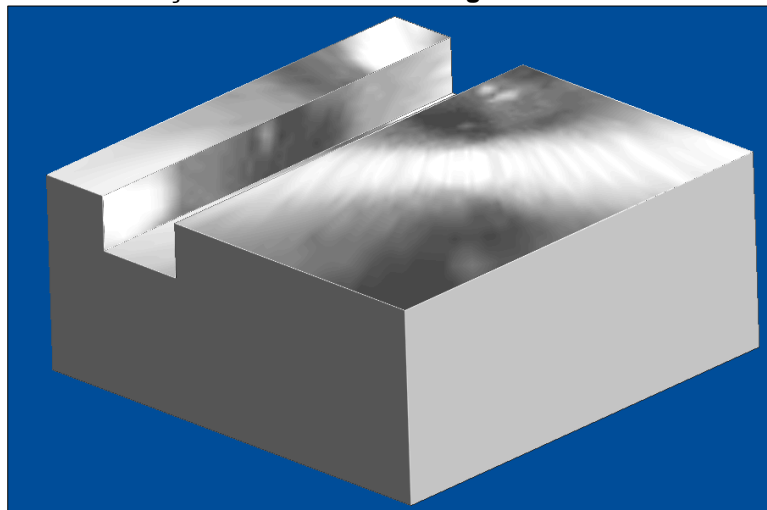
O PowerMILL possibilita a simulação e animação dos processos através de diversas maneiras. A configuração utilizada foi o modo de sombreamento polido do modelo em uma direção fixa. As Figuras 62 até 66 ilustram a simulação da usinagem de fresamento na ordem que elas ocorreram. A área usinada é identificada através da característica de polimento que aparece na superfície do modelo.

Figura 62 – Simulação do faceamento do Modelo 1 no PowerMILL



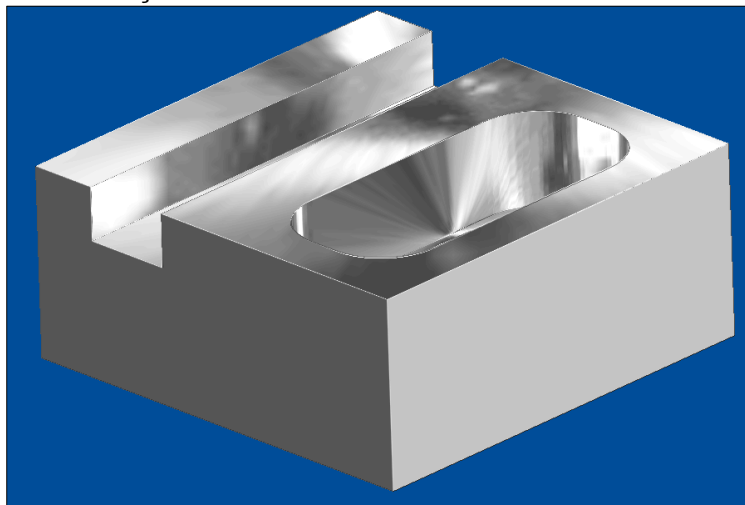
Fonte: Autora (2021)

Figura 63 – Simulação do desbaste do rasgo do Modelo 1 no PowerMILL



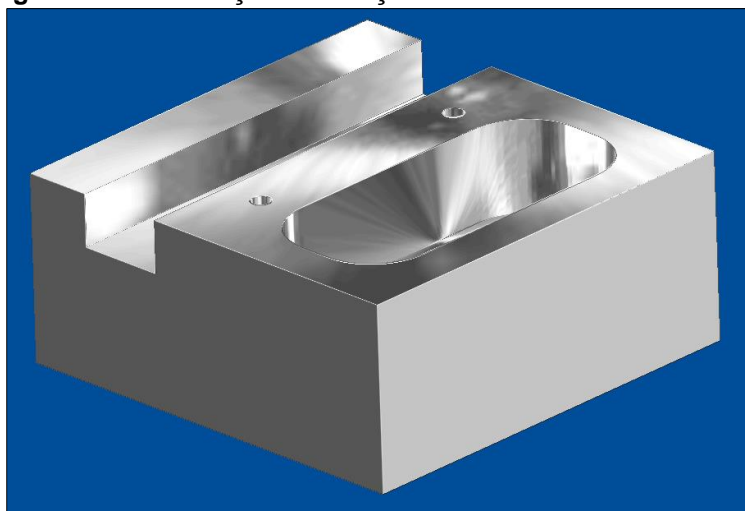
Fonte: Autora (2021)

Figura 64 – Simulação do desbaste da cavidade do Modelo 1 no PowerMILL



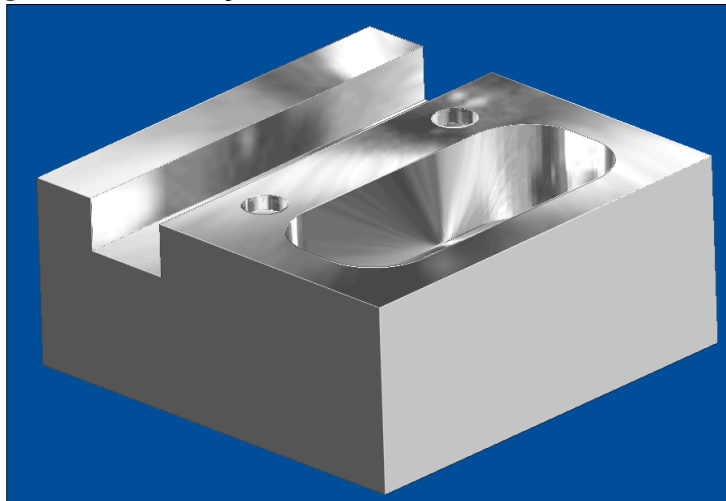
Fonte: Autora (2021)

Figura 65 – Simulação da furação do Modelo 1 no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

Figura 66 – Simulação do rebaixo do Modelo 1 no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

3.5.6. Geração do código CNC para o Modelo 1 no PowerMILL

Para a geração dos códigos CNC para os Modelo 1 foi utilizado o pós-processador FANUC, comando que o centro de usinagem CNC ROMI D600 disponibilizado pelo IFSC interpreta e executa.

Para o Modelo 1 foram geradas 1512 linhas de código, para 8 operações que incluíram, desbaste, furação e acabamento. O tempo estimado de usinagem foi de 4 minutos e 54 segundos, com percurso de 9541,53 mm.

Quando os códigos são gerados de maneira independente o número de linhas aumenta, visto que são escritas funções preparatórias para cada uma das operações. A Tabela 2 resume as informações referentes aos tempos de cada processo de fresamento, número de linhas de código, e comprimento do percurso para o Modelo 1.

Tabela 1 – Características dos códigos CNC do Modelo 1 no PowerMILL

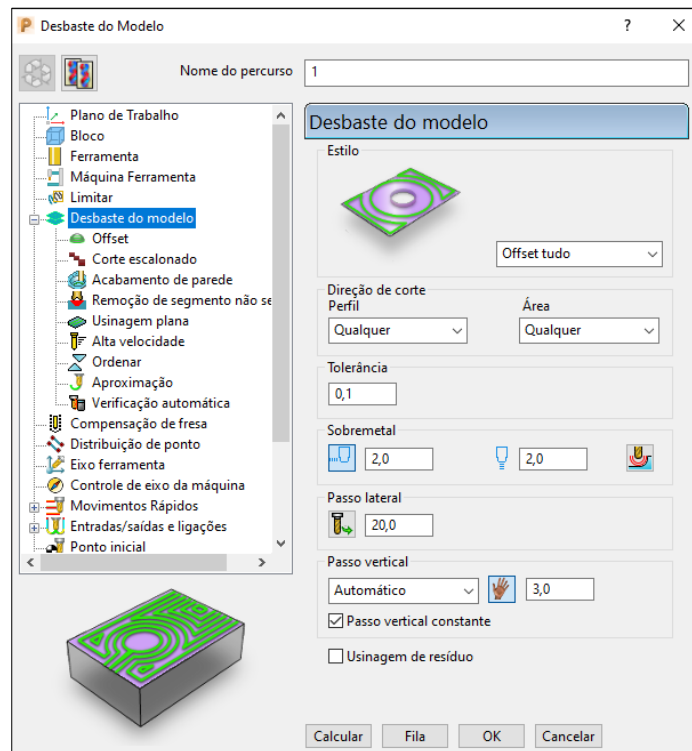
Operação	Número de linhas	Tempo estimado de usinagem	Comprimento do percurso (mm)
Desbaste da face superior	63	9 s	819,3
Desbaste do rasgo	69	28 s	546,7
Desbase da cavidade	693	2 min	3021,6
Furos	288	22 s	2555,6
Rebaixo	162	32 s	427,23
Acabamento da face superior	58	6 s	528,6
Acabamento do rasgo	69	28 s	597,2
Acabamento da cavidade	320	49 s	1045,3
Total	1722	4 min 54 s	9541,53

Fonte: Autora (2021)

3.5.7. Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 2

A primeira operação aplicada ao Modelo 2, foi um desbaste de modelo de usinagem plana, estilo *offset* de modelo com tolerância de 0,1 mm, sobremetal radial e axial de 2,0 mm, passo horizontal de 20,0 mm e passo vertical de 3,0 mm, sem direção de corte definida. A ferramenta utilizada foi a fresa toroidal de Ø 40,0 mm. A Figura 67 apresenta os parâmetros de corte descritos.

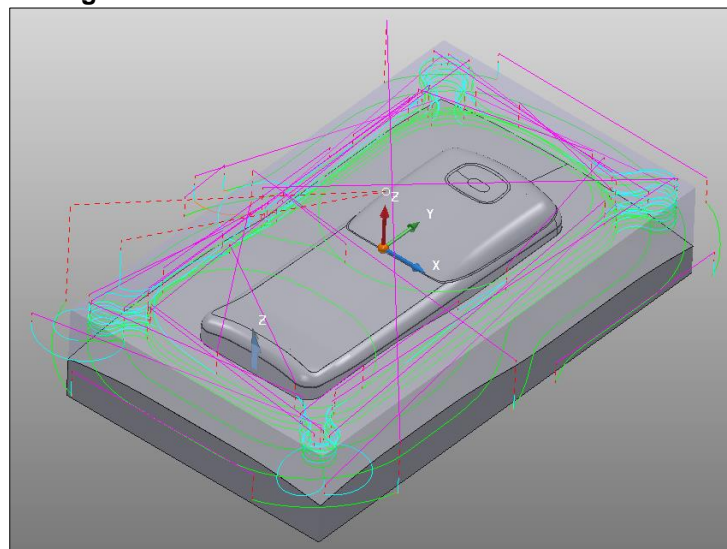
Figura 67 – Parâmetros de corte do desbaste do Modelo 2 no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A operação de desbaste teve o parâmetro de usinagem plana configurado para a opção de nível. A Figura 68 apresenta as trajetórias criadas.

Figura 68 – Desbaste do Modelo 2 no PowerMILL

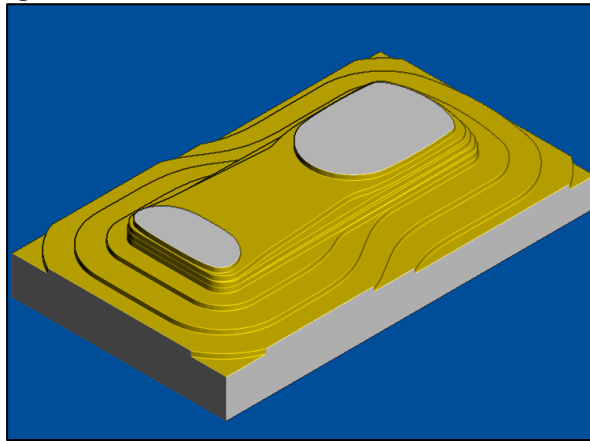


Fonte: Autora (2021)

Devido ao diâmetro da fresa utilizada no primeiro desbaste ser grande, sobram resíduos de material que devem ser usinados em uma segunda operação

(Figura 69). O redesbaste também facilita o processo de acabamento, minimizando a quantidade de material que deve ser retirada.

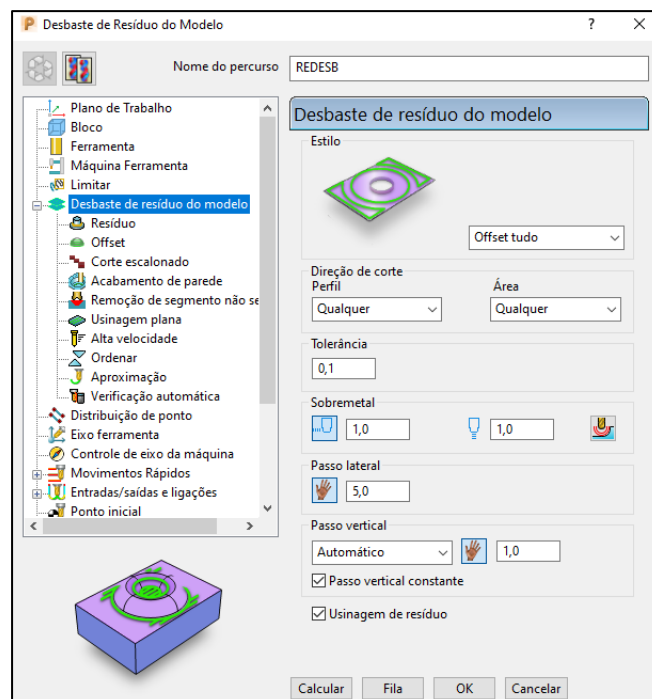
Figura 69 – Resíduo do desbaste no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

Para o redesbaste foi utilizada a estratégia de desbaste de resíduo do modelo com estilo *offset* do modelo. Essa operação de fresamento foi realizada com a fresa de topo de $\varnothing 8,0$ mm e foi uma cópia do desbaste anterior com alteração de alguns parâmetros. O sobremetal foi definido como 1,0 mm nas direções axial e radial, o passo lateral de 5,0 mm e o passo vertical de 1,0 mm (Figura 70).

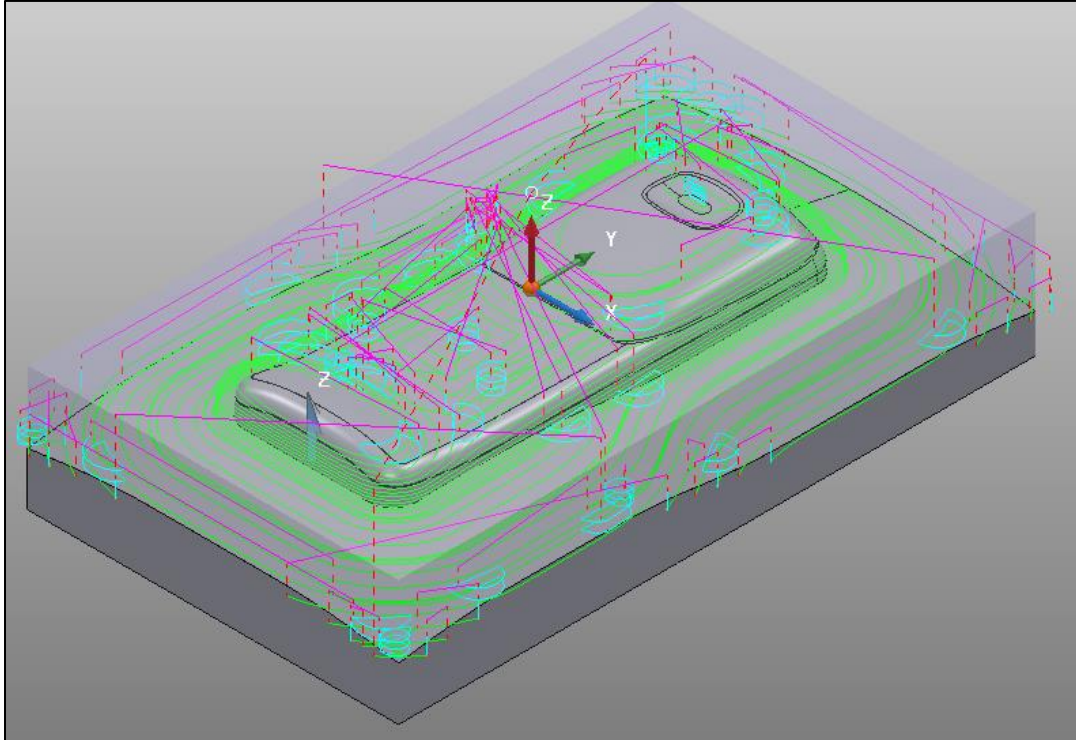
Figura 70 – Parâmetros de corte do desbaste do resíduo do Modelo 2 no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

As trajetórias geradas para o fresamento do desbaste do resíduo do Modelo 2 são ilustradas na Figura 71.

Figura 71 – Desbaste de resíduo do Modelo 2 no PowerMILL

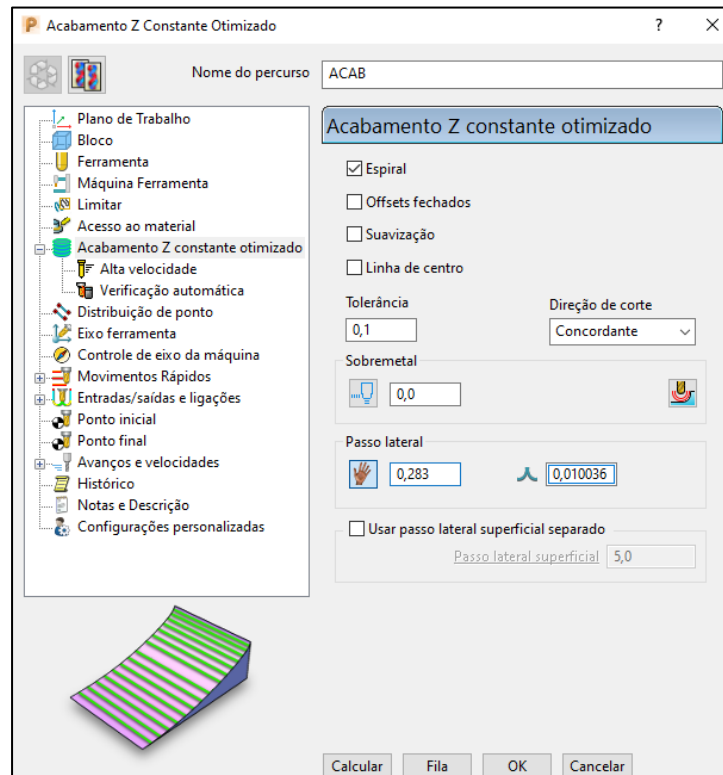


Fonte: Autora (2021)

No Modelo 2 foi realizada apenas uma operação de fresamento no processo de acabamento, com a fresa de ponta esférica de $\varnothing 4,0$ mm. A seleção dessa ferramenta com diâmetro pequeno foi devido ao raio mínimo exigido para que todos os pontos fossem atingidos.

Para um bom acabamento superficial na peça foi selecionada a estratégia de acabamento com Z constante otimizado, ordenado por nível, com direção de corte concordante, passo lateral de 0,283 mm (a_e máximo). A Figura 72 apresenta a janela de configurações dos parâmetros de fresamento.

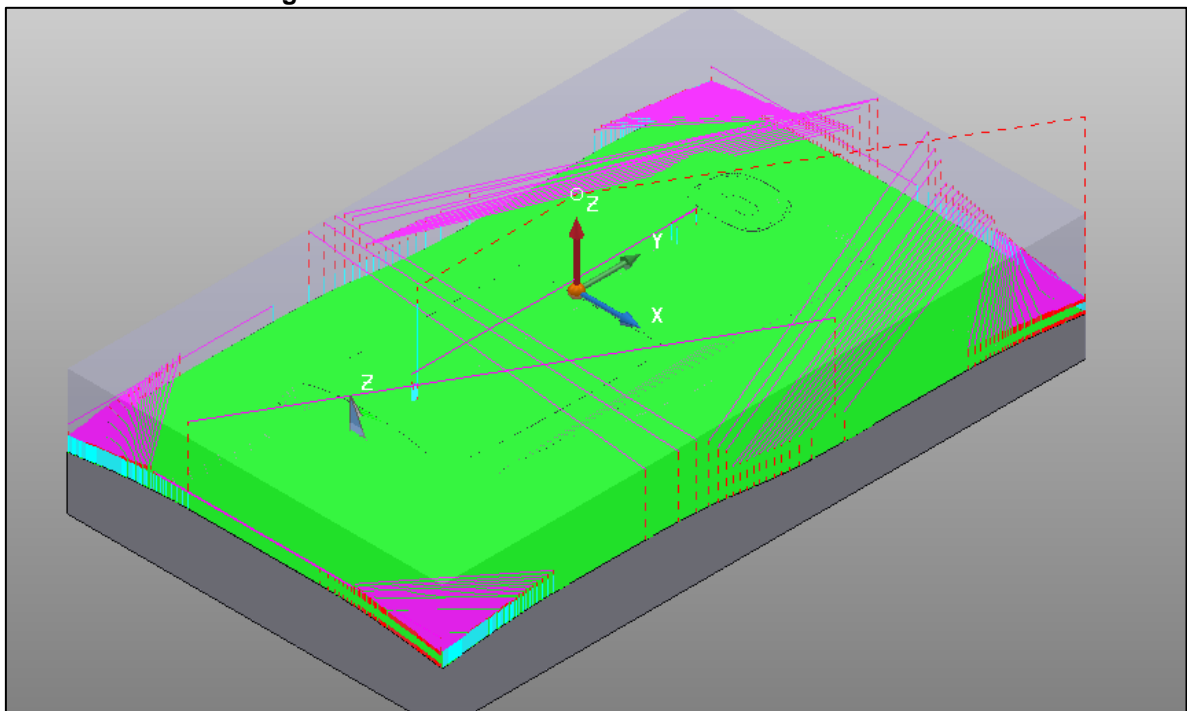
Figura 72 – Parâmetros de corte do acabamento do Modelo 2 no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

A Figura 73 ilustra as trajetórias geradas a partir dos dados configurados para o fresamento do acabamento do Modelo 2.

Figura 73 – Acabamento do Modelo 2 no PowerMILL



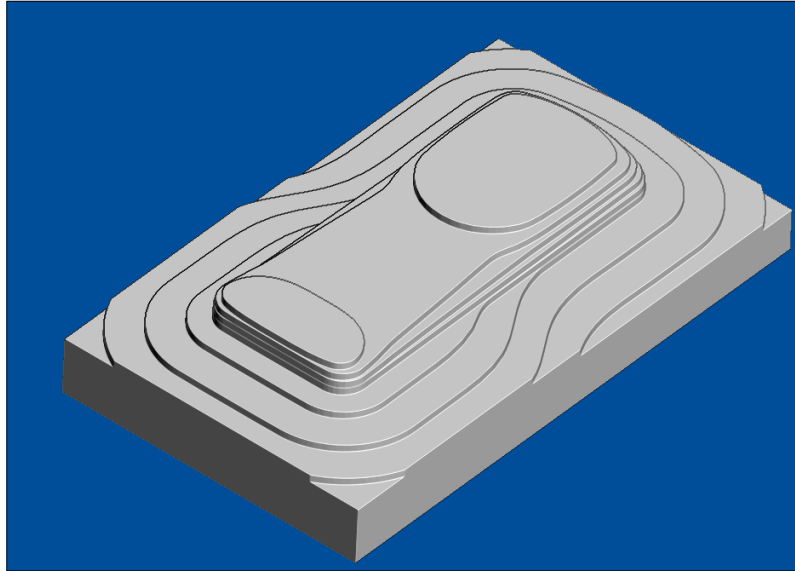
Fonte: Autora (2021)

3.5.8. Simulação do fresamento do Modelo 2 no PowerMILL

Assim como feito no Modelo 1, todos os processos de fresamento de desbaste e acabamento realizados no Modelo 2 foram simulados para conferência das trajetórias e para garantir que o resultado do processo está de acordo com o projeto.

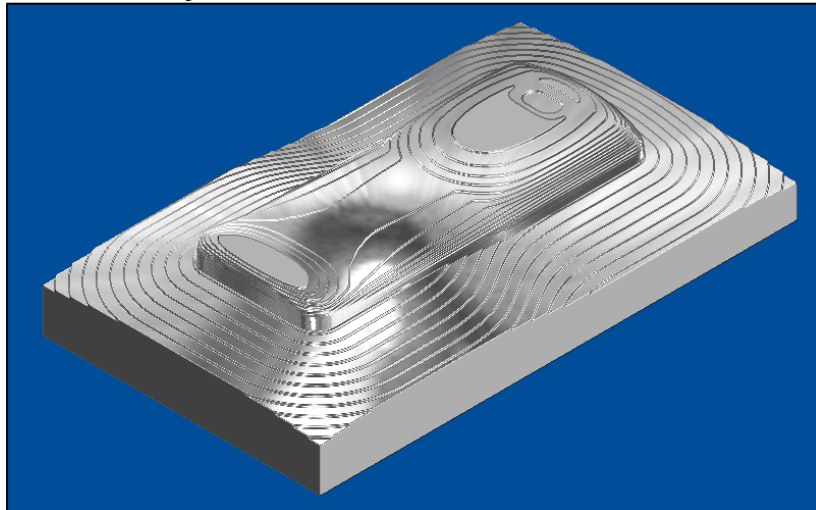
As Figuras 74 até 76 ilustram a simulação da usinagem de fresamento na ordem que elas ocorreram. A área usinada é identificada através da característica de polimento que aparece na superfície do modelo.

Figura 74 – Simulação do desbaste do Modelo 2 no PowerMILL



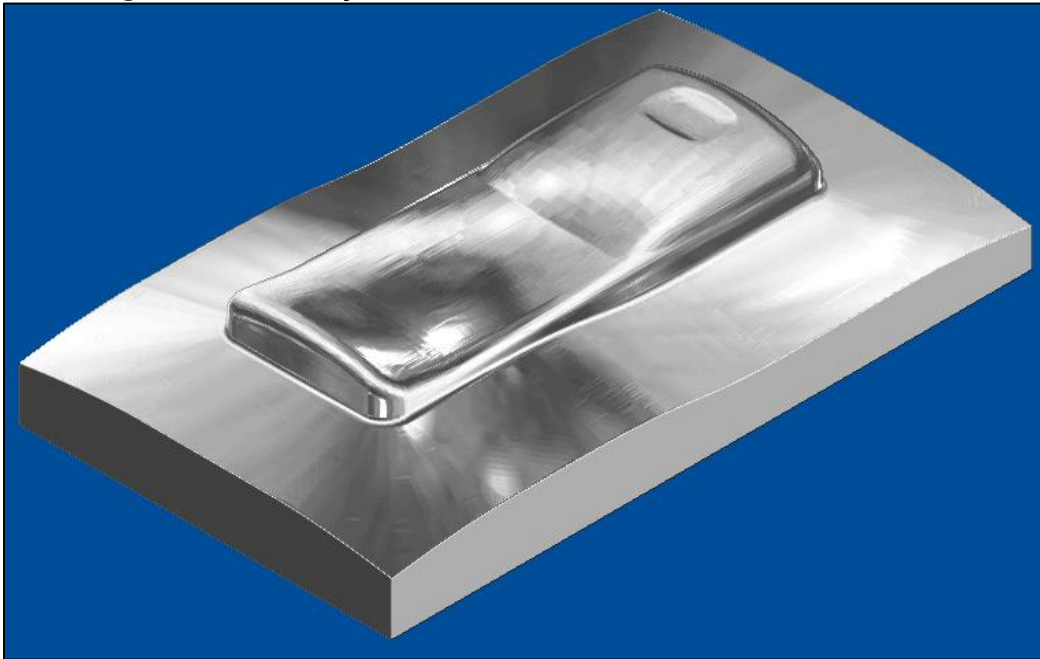
Fonte: Autora (2021)

Figura 75 – Simulação do desbaste de resíduo do Modelo 2 no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

Figura 76 – Simulação do acabamento do Modelo 2 no PowerMILL



Fonte: Autora (2021)

3.5.9. Geração do código CNC para o Modelo 2 no PowerMILL

Para a geração dos códigos CNC para o Modelo 2 foi utilizado o mesmo pós-do Modelo 1. Para o Modelo 2 foram geradas 31230 linhas de código, para 3 operações, que incluem desbaste e acabamento com tempo estimado de usinagem de 54 minutos e 41 segundos, com percurso de 173069,3 mm. A Tabela 3 resume as informações referentes aos processo de fresamento para o Modelo 2.

Tabela 3 – Características dos códigos CNC do Modelo 2 no PowerMILL

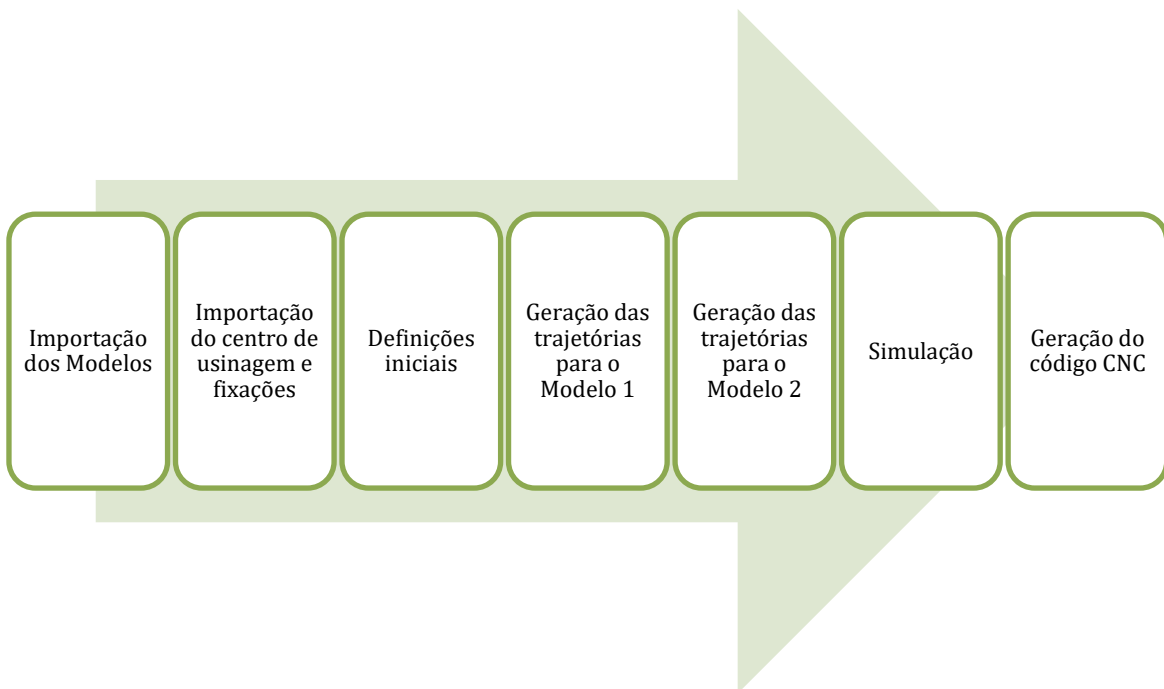
Operação	Número de linhas	Tempo estimado de usinagem	Comprimento do percurso (mm)
Desbaste	3817	7 min 24 s	14257,3
Desbaste de resíduo	7624	17min 17 s	23462,7
Acabamento	19789	29 min 58 s	135349,3
Total	31230	54 min 41 s	173069,3

Fonte: Autora (2021)

3.6. Programação utilizando o SprutCAM

O segundo *software* utilizado para a geração do código CNC para os Modelos 1 e 2 foi o SprutCAM. A programação de usinagem de fresamento seguiu os passos no apresentados na Figura 77.

Figura 77 – Organograma dos passos da programação no SprutCAM

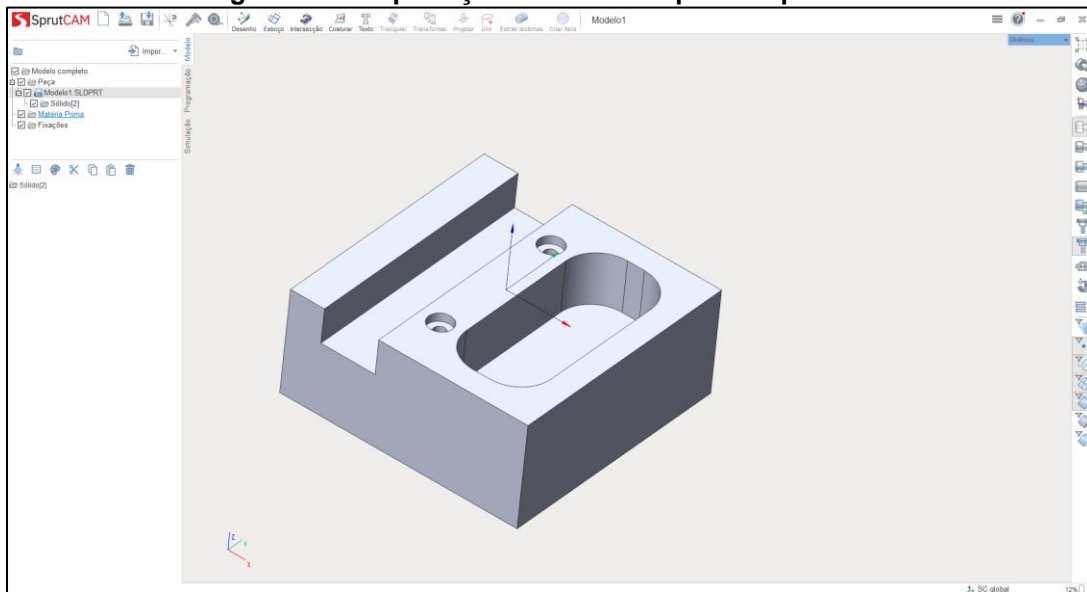


Fonte: Autora (2021)

3.6.1. Importação dos Modelos no SprutCAM

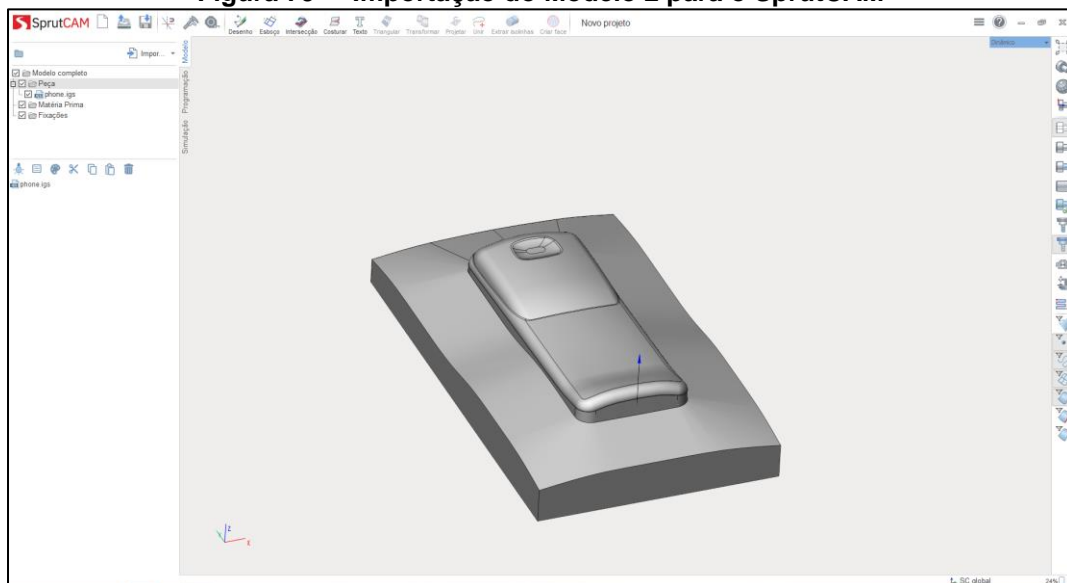
Assim como na geração dos códigos CNC no PowerMILL o Modelo 1 foi importado do SolidWorks, com extensão .SLDPRT e o Modelo 2 foi importado da biblioteca de exemplos do PowerMILL na extensão .IGES, pois o modelo .dkg não é suportado por esse *software*. As Figuras 78 e 79 ilustram os modelos importados para o SprutCAM, respectivamente.

Figura 78 – Importação do Modelo 1 para o SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

Figura 79 – Importação do Modelo 2 para o SprutCAM



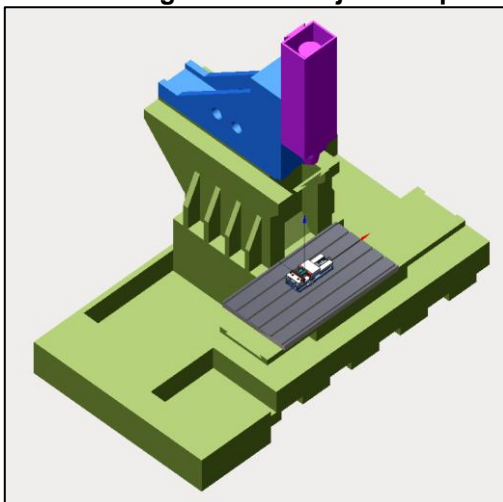
Fonte: Autora (2021)

3.6.2. Importação do centro de usinagem e dos acessórios de fixação da peça

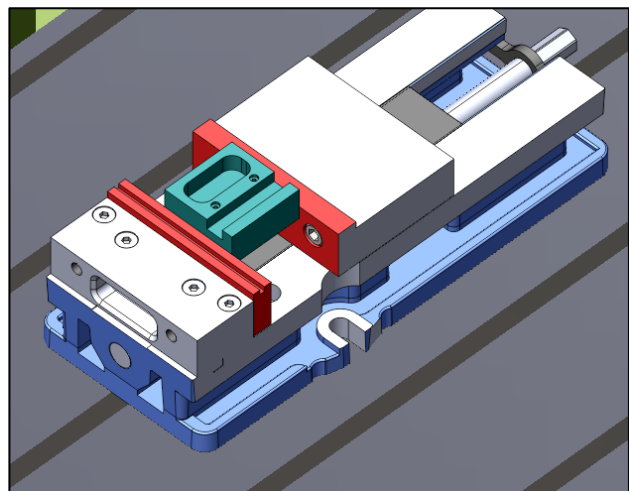
O SprutCAM permite a criação de máquinas virtuais que simulam a usinagem levando em conta parâmetros dimensionais e cinemáticos do centro de usinagem real. Para este experimento foram importados dois arquivos, um com extensão .xml e outro com extensão . SLDWPRT com as configuração do centro de usinagem ROMI D600 e da morsa Kurt – DX6 respectivamente.

A Figura 80 ilustra o conjunto completo do Modelo 1, com o centro de usinagem, a morsa e a peça, todos posicionados corretamente através de transformações espaciais de movimentação nos três eixos, rotação em torno de Z e ajuste da localização do zero peça.

Figura 80 – Conjunto máquina-ferramenta, morsa e peça para o Modelo 1



(a) Conjunto completo

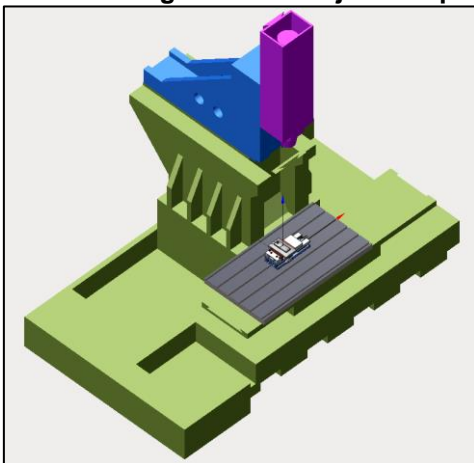


(b) Conjunto Morsa – peça

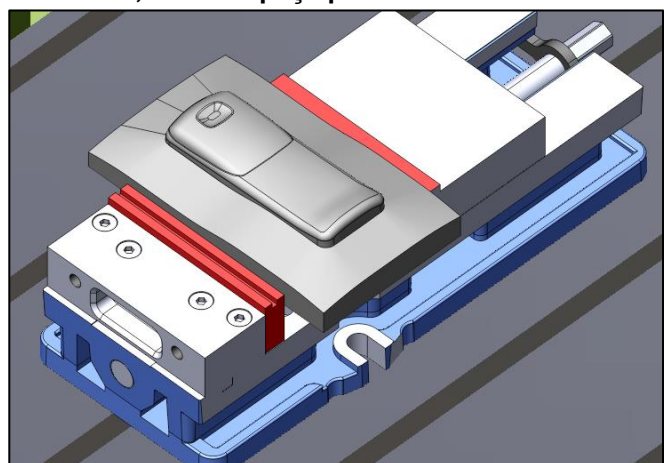
Fonte: Autora (2021)

Para o Modelo 2 foram importados os mesmos arquivos para o centro de usinagem e acessório de fixação da peça utilizadas no Modelo 1. O posicionamento do conjunto foi feito através de transformações espaciais de movimentação da peça nos três eixos e dos mordentes da morsa em um eixo. A Figura 81 ilustra o conjunto completo do Modelo 2.

Figura 81 – Conjunto máquina-ferramenta, morsa e peça para o Modelo 2



(a) Conjunto completo



(b) Conjunto Morsa – peça

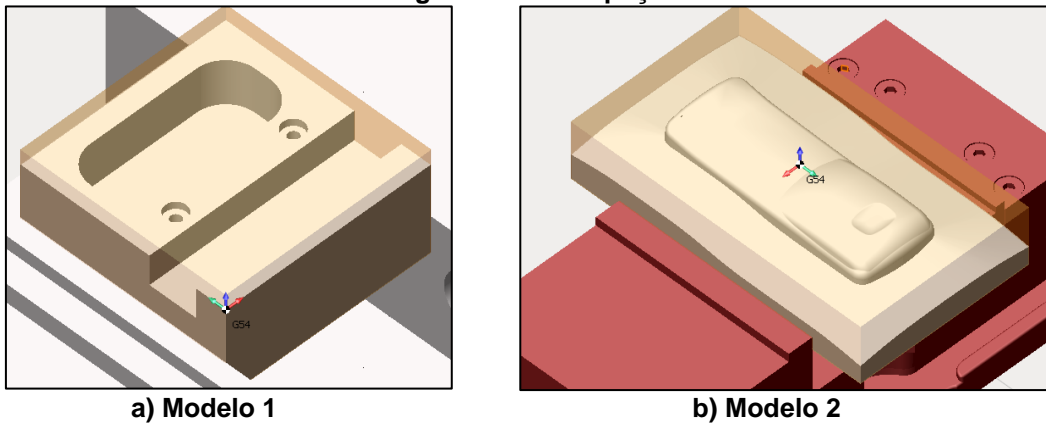
Fonte: Autora (2021)

3.6.3. Definições iniciais no SprutCAM

As informações iniciais definidas no SprutCAM foram as dimensões e formato dos blocos de matéria-prima, o ponto zero peça (pontos de coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0) e a direção dos eixos que compoem o plano de trabalho aonde a usinagem será feita.

Os Modelo 1 e 2 possuem apenas um plano de trabalho, e a configuração para a matéria-prima são blocos prismáticos retangulares com as dimensões máximas dos modelos em todas as direções. O ponto zero peça foi definido conforme a Figuras 82 ilustra.

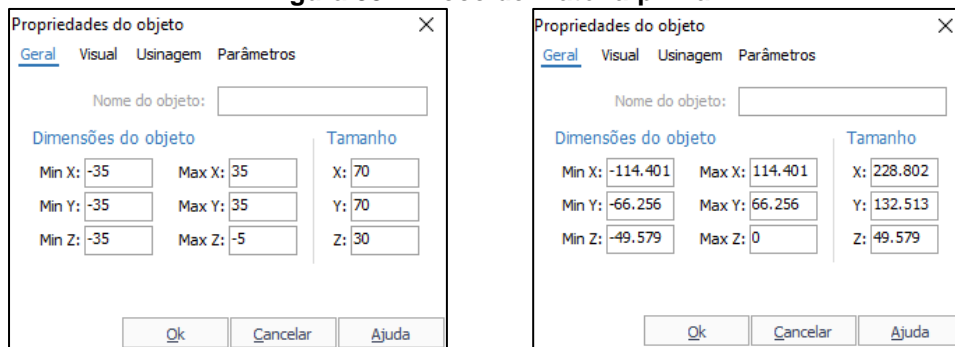
Figura 82 – Zero peça



Fonte: Autora (2021)

Para o Modelo1 foi adicionado 5,0 mm na direção +Z, para que uma operação de faceamento fosse adicionada ao processo. Para o Modelo 2 o bloco de matéria-prima utilizado foi a sugestão automática do SprutCAM. A Figura 83 apresenta as informações referente aos blocos de matéria-prima utilizados.

Figura 83 – Bloco de matéria-prima



a) Matéria-prima do Modelo 1

b) Matéria-prima do Modelo 2

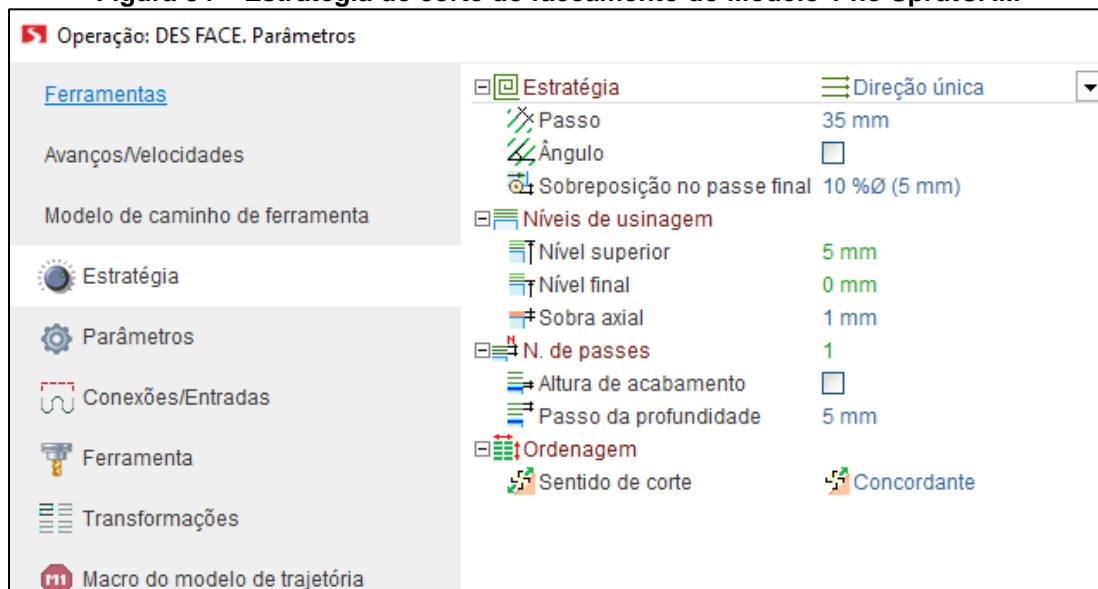
Fonte: Autora (2021)

3.6.4. Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 1

A primeira operação de usinagem aplicada foi o faceamento da superfície superior da peça com a fresa toroidal de Ø 50,0 mm, os parâmetros de corte estão disponíveis na Tabela 8. Diferentemente do PowerMILL no SprutCAM a criação/seleção das ferramentas foi feita em paralelo com a criação das operações.

A estratégia selecionada para o desbaste foi o faceamento com direção única, com os mesmos parâmetros utilizados no faceamento realizado no PowerMILL. A Figura 84 ilustra a janela de configurações de estratégia do SprutCAM.

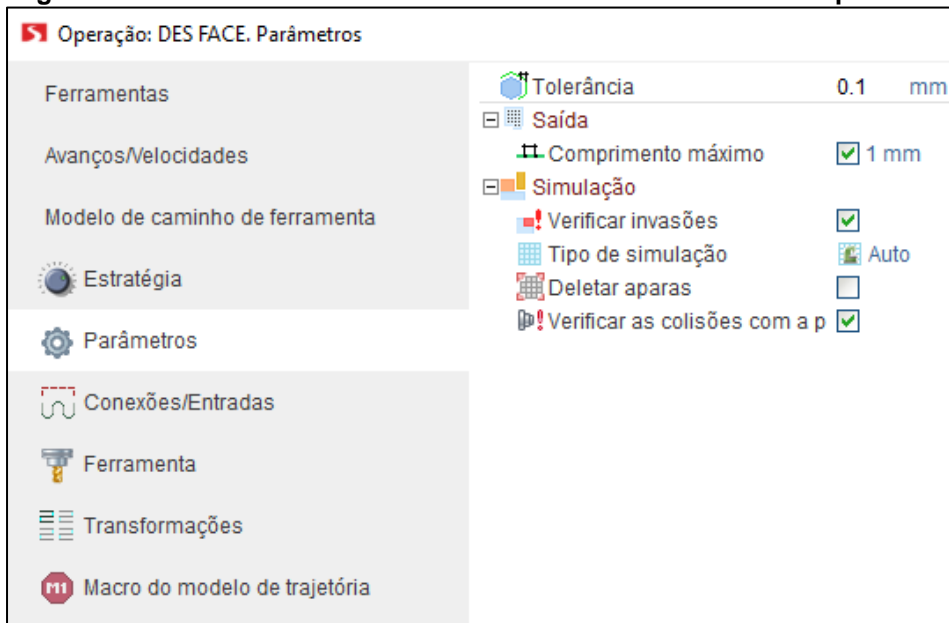
Figura 84 – Estratégia de corte do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 85 apresenta a configuração dos parâmetros de corte aplicados no faceamento do Modelo 1.

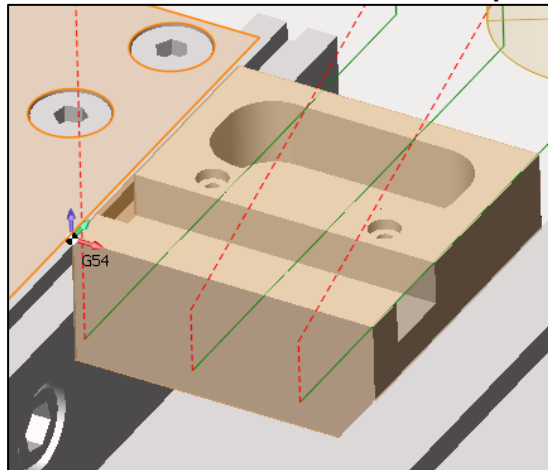
Figura 85– Parâmetros de corte do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 86 ilustra o resultado das trajetórias geradas para a operação de faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.

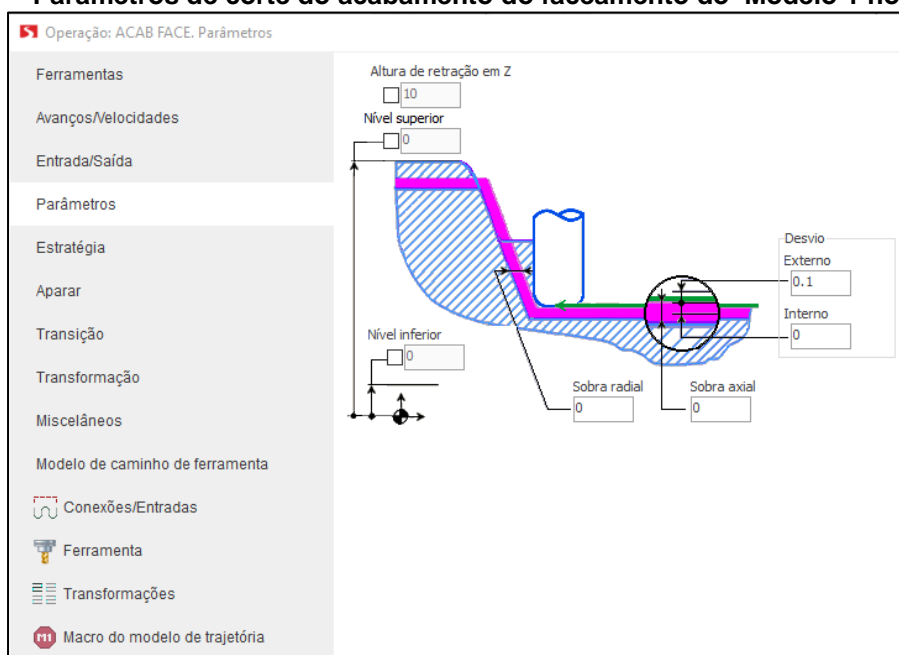
Figura 86 – Faceamento do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

Para o acabamento da face superior, foi utilizada a estratégia de acabamento de faces planas com passes paralelos, com a mesma ferramenta da operação anterior. O passo lateral foi 25,0 mm com corte concordante. A Figura 87 apresenta a tela de configuração de parâmetros da operação.

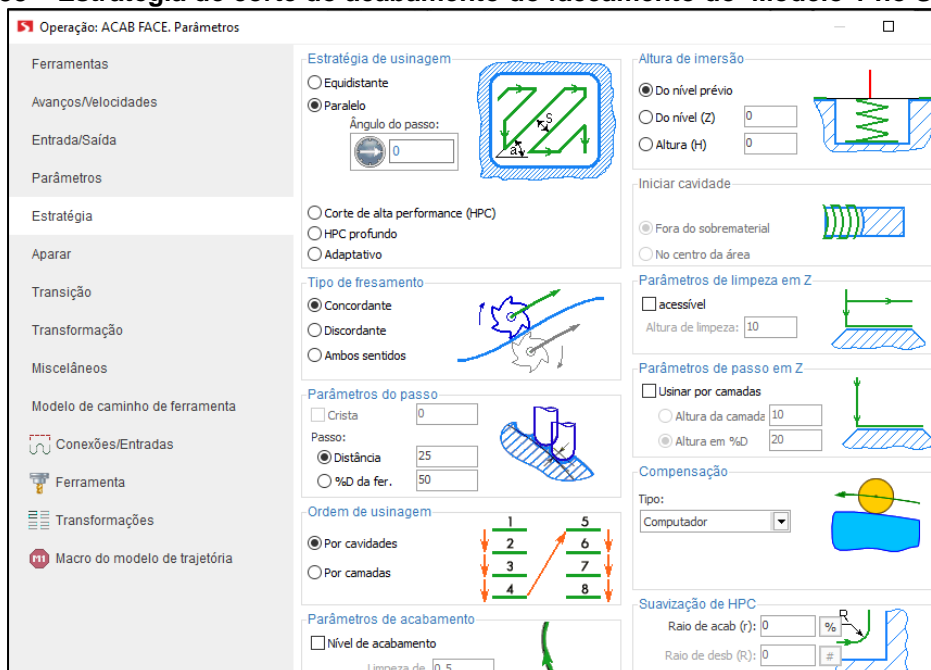
Figura 87 – Parâmetros de corte do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 88 apresenta a tela de configuração da estratégia de acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM.

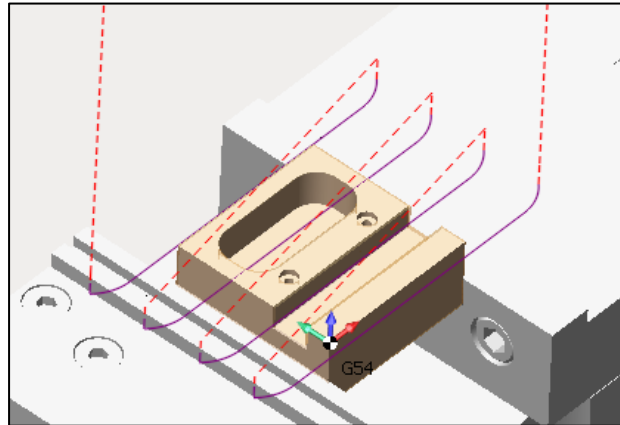
Figura 88 – Estratégia de corte do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 89 apresenta as trajetórias criadas para a operação de acabamento do Modelo 1 no SprutCAM.

Figura 89 – Acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM

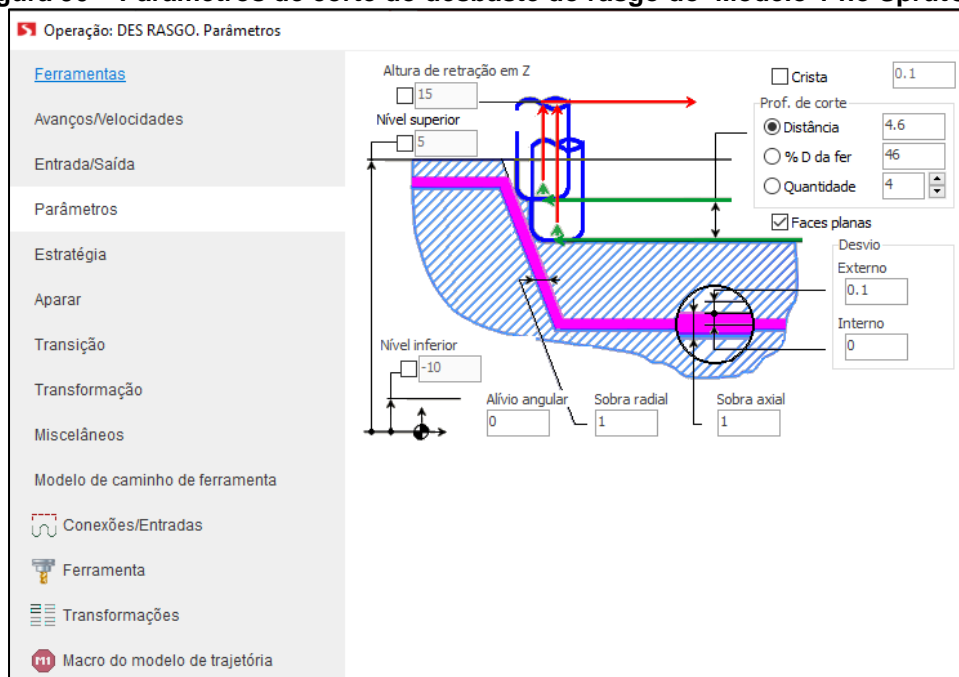


Fonte: Autora (2021)

A operação seguinte foi o fresamento do desbaste do rasgo com a fresa de topo de $\varnothing 10,0$ mm. A estratégia utilizada foi o desbaste de linha d'água com passes paralelos. A usinagem foi limitada ao rasgo através da seleção das faces que fazem parte desse elemento geométrico.

Os parâmetros utilizados foram a_p de 4,6 mm. O sobremetal definido foi de 1,0 mm nas direções radial e axial com corte concordante. As configurações dos dados de corte são apresentadas na Figura 90.

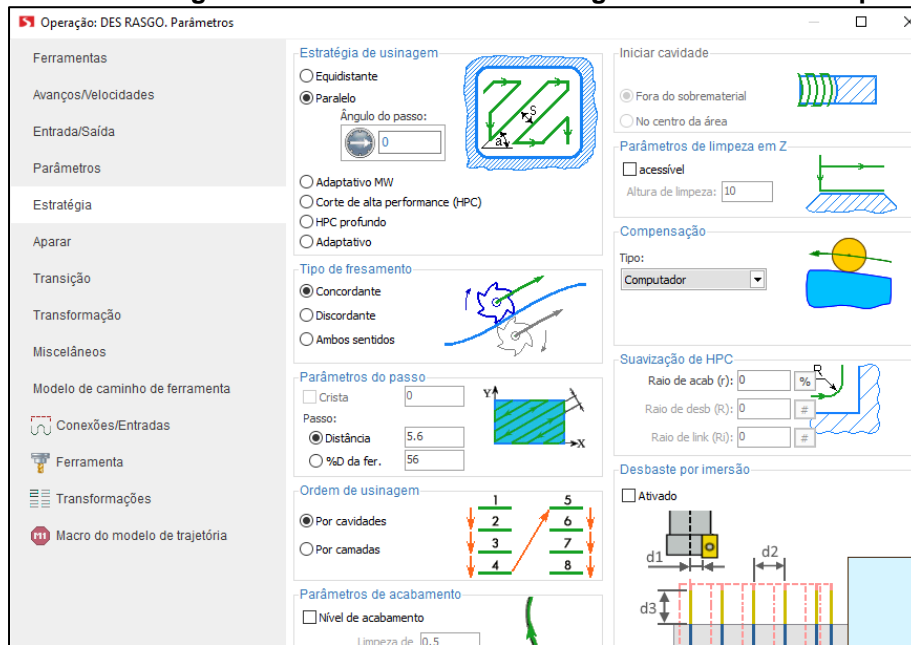
Figura 90 – Parâmetros de corte do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 91 apresenta a tela de configuração de estratégias para o Modelo 1 no SprutCAM, o valor de passo lateral utilizado foi de 5,6 mm.

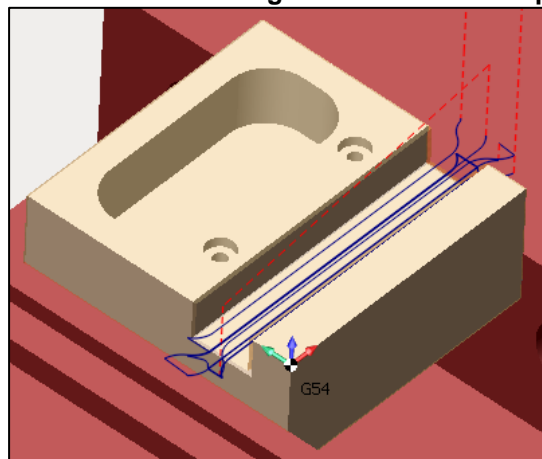
Figura 91 – Estratégia de corte do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 92 apresenta o resultado das trajetórias criadas para o desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.

Figura 92 – Desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM

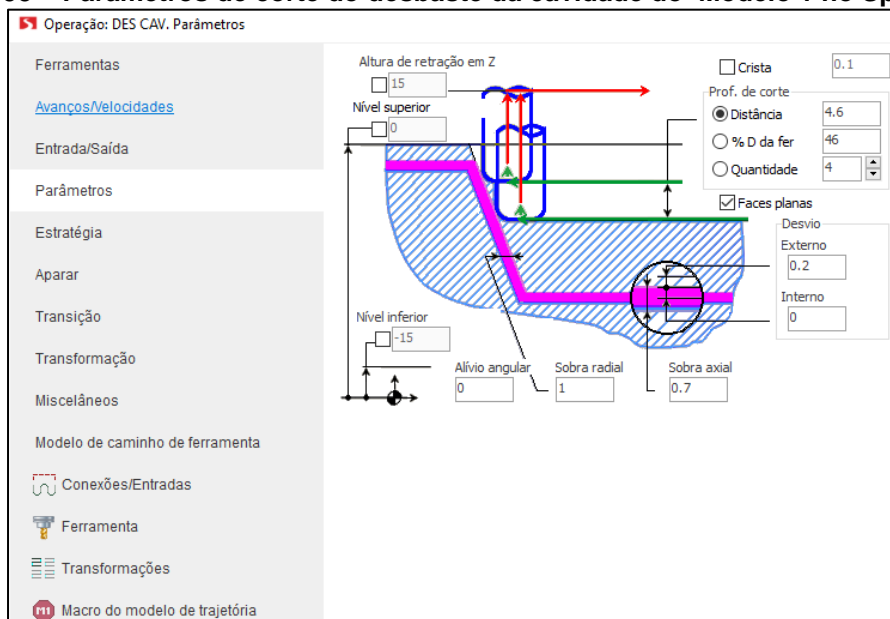


Fonte: Autora (2021)

A operação seguinte foi o desbaste da cavidade a partir da mesma ferramenta e estratégia de fresamento utilizada no desbaste do rasgo, a área usinada foi limitada através da seleção da cavidade.

Os parâmetros utilizados foram a_p de 4,0 mm, a_e de 6,4mm, com corte concordante. Na direção radial o sobremetal definido foi de 1,0 mm e na direção axial foi de 0,7 mm, a tolerância foi de 0,2 mm. A Figura 93 ilustra a configuração dos parâmetros da operação.

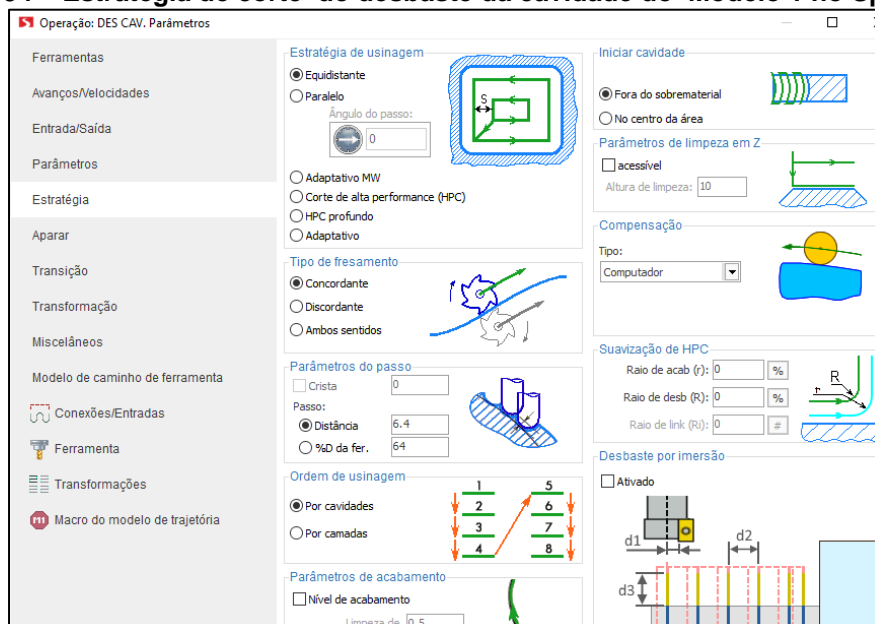
Figura 93 – Parâmetros de corte do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 94 apresenta a tela de configuração dos dados da estratégia de corte do fresamento da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.

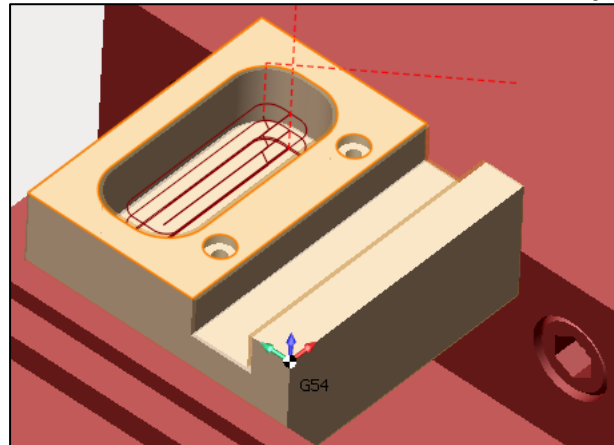
Figura 94 – Estratégia de corte do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 95 ilustra as trajetórias geradas para o fresamento da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.

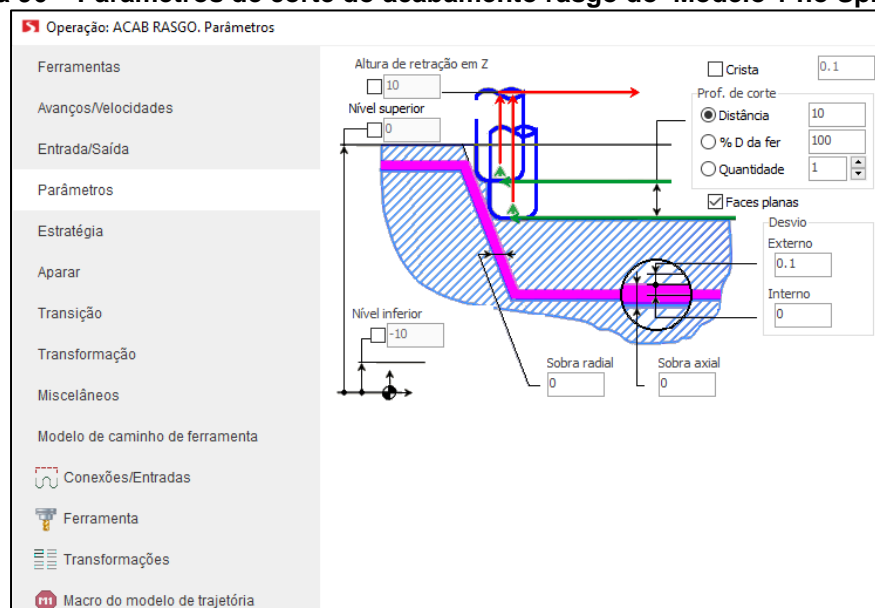
Figura 95 – Desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

Na sequência, para o acabamento do rasgo foi selecionada a estratégia de acabamento de desbaste de linha d'água, ainda com a fresa de $\varnothing 10,0$ mm. A direção de corte aplicada foi concordante com passo vertical de 10,0 mm e passo lateral de 5,0 mm. A Figura 96 apresenta os parâmetros de corte da operação.

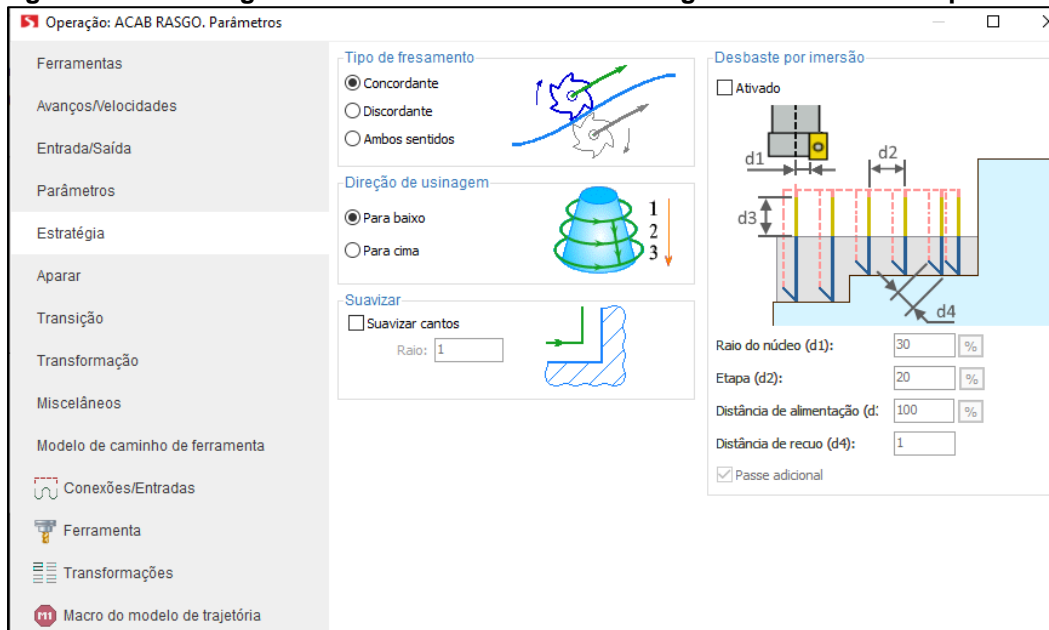
Figura 96 – Parâmetros de corte do acabamento rasgo do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 97 apresenta a janela de configuração da estratégia de corte para o acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.

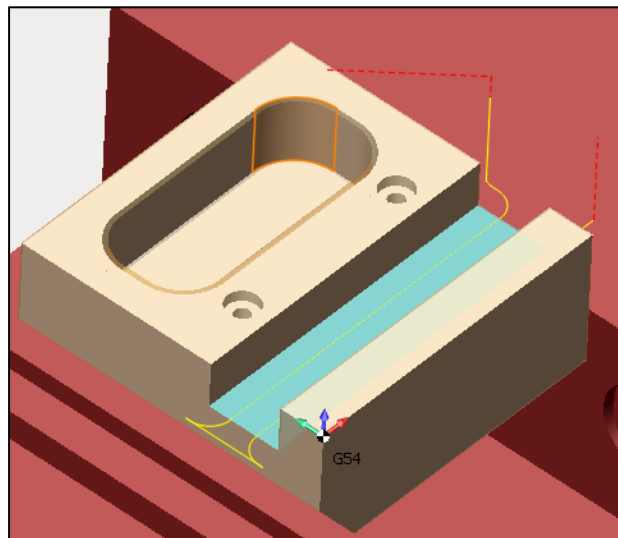
Figura 97 – Estratégia de corte do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 98 ilustra o resultado das trajetórias geradas para o acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM.

Figura 98 – Acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM

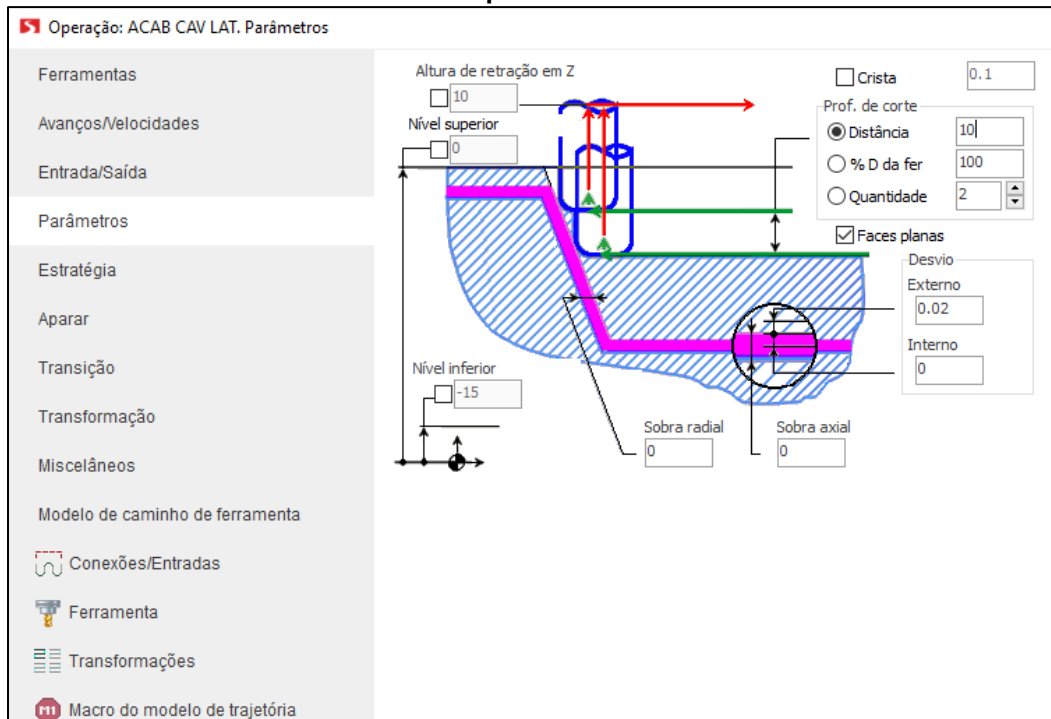


Fonte: Autora (2021)

A última operação de acabamento realizada no Modelo 1 foi o acabamento na cavidade, para esta operação foram combinadas 2 estratégias, a primeira para o acabamento das laterais, e a segunda para o acabamento do fundo.

O acabamento das laterais foi realizado a partir da estratégia de acabamento de linha d'água, com corte concordante, a_p de 10,0 mm, direção para baixo. A Figura 99 apresenta a janela de configurações para a operação.

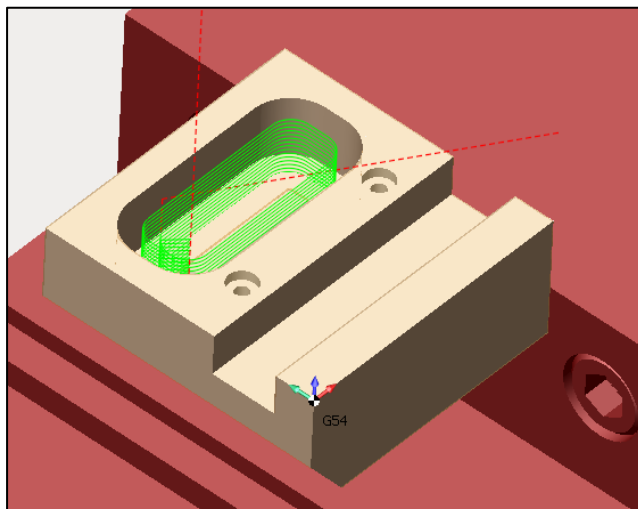
Figura 99 – Parâmetros de corte do acabamento da lateral da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 100 ilustra as trajetórias criadas para a operação de acabamento das laterais da cavidade do Modelo 1.

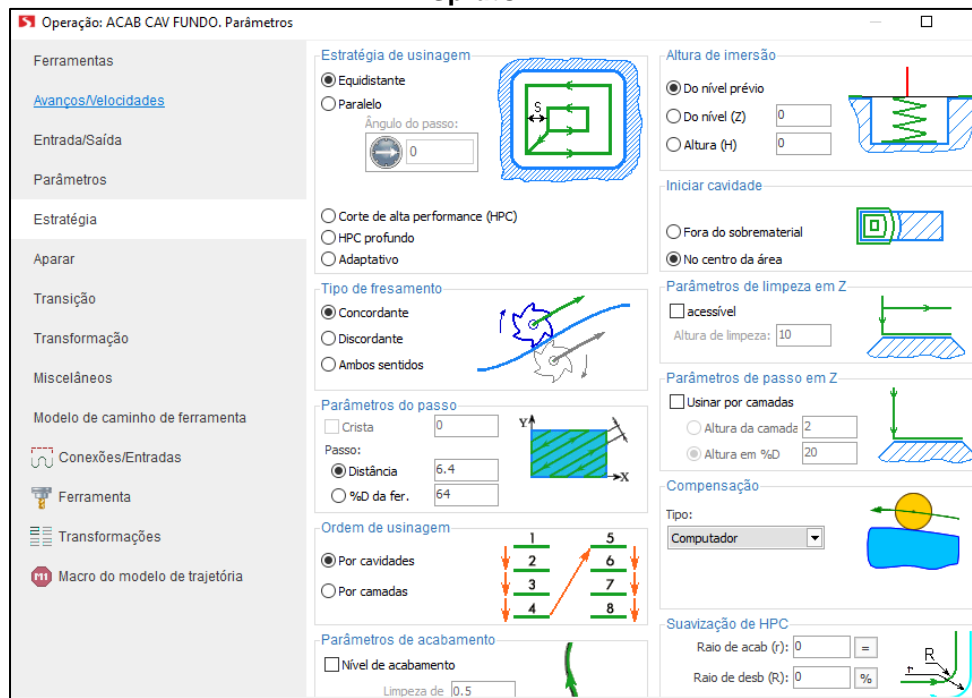
Figura 100 – Acabamento das laterais da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

Para o acabamento do fundo da cavidade foi utilizada a estratégia de acabamento de faces planas com passos equidistantes de 6,4 mm. A Figura 101 apresenta a janela de configurações para a operação de acabamento do fundo da cavidade.

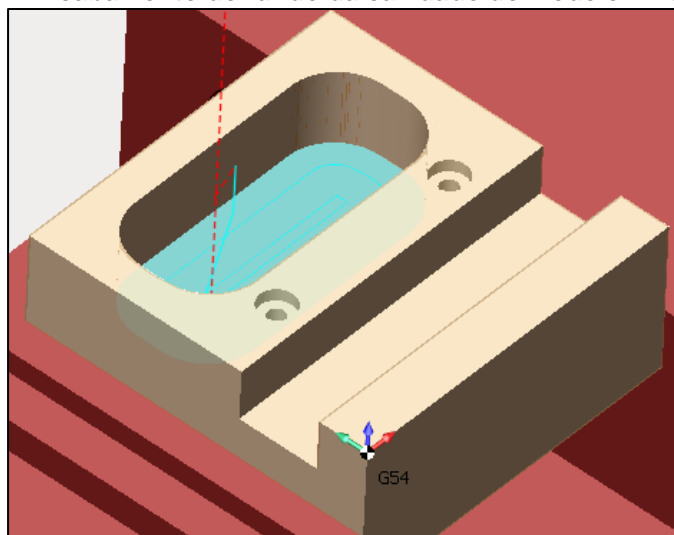
Figura 101 – Estratégia de corte do acabamento do fundo da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 102 ilustra as trajetórias criadas para o acabamento do fundo da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM.

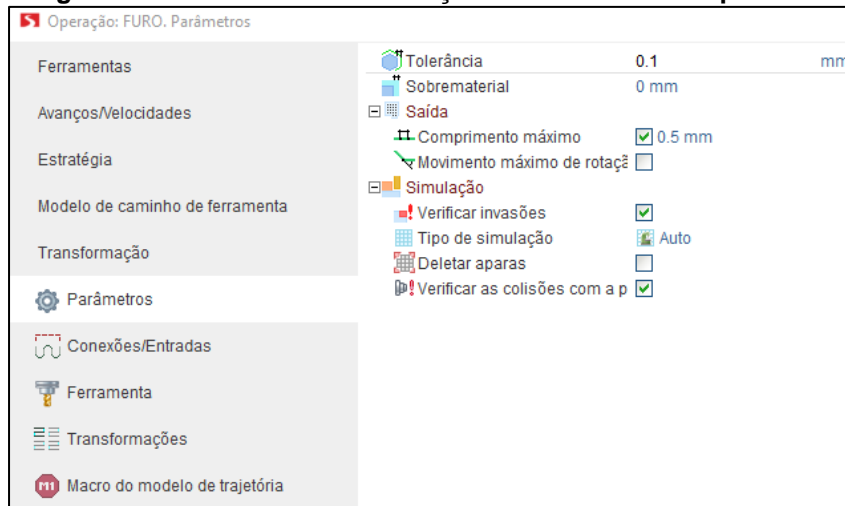
Figura 102 – Acabamento do fundo da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

Após o desbaste da cavidade, foi feita a operação de furação com a broca de \varnothing 3,3 mm. Os parâmetros de corte utilizados estão descritos na Tabela 8. O SprutCAM reconhece de maneira automática os furos, sendo necessário somente a seleção de quais furos deseja-se realizar a furação. A Figura 103 apresenta a janela de configurações para a furação.

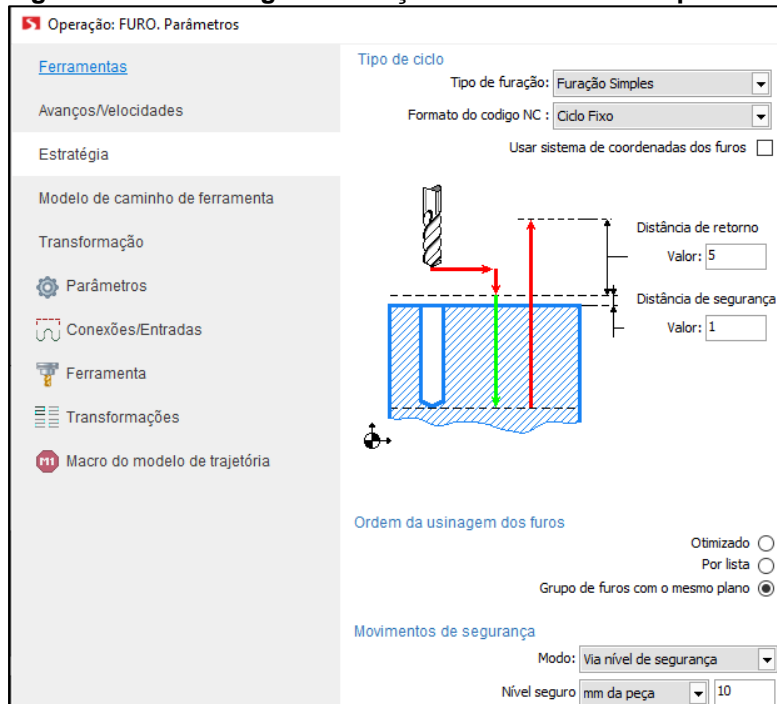
Figura 103 – Parâmetros de furação do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 104 apresenta a janela de configuração da estratégia de furação do Modelo 1 no SprutCAM.

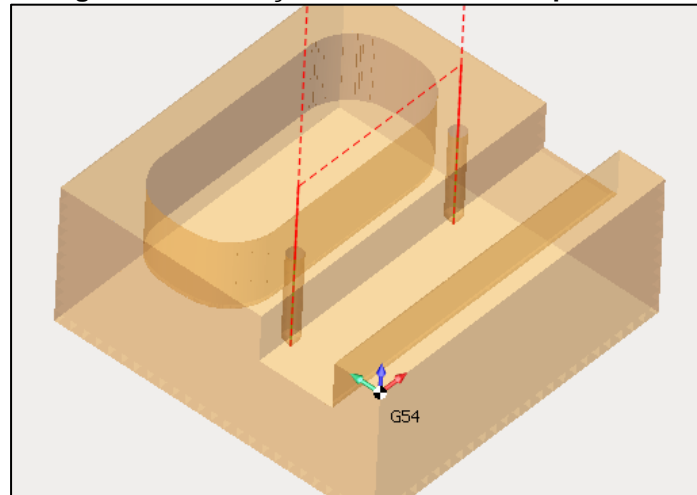
Figura 104 – Estratégia de furação do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 105 ilustra o resultado das trajetórias geradas para a operação de furação do Modelo 1 no SprutCAM.

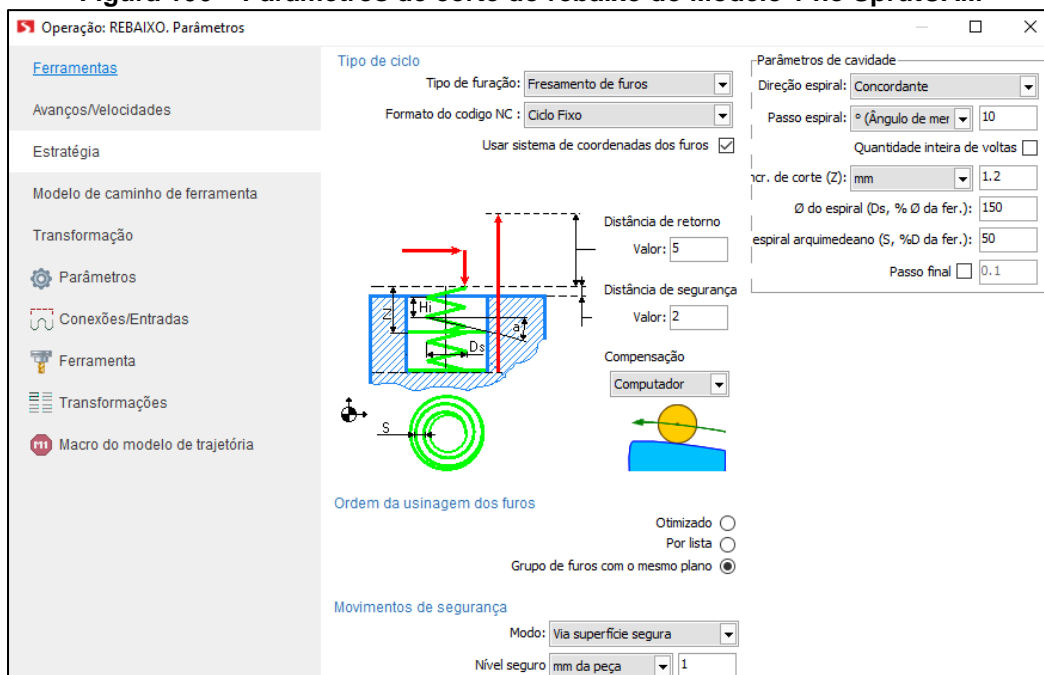
Figura 105 – Furação do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A última operação de desbaste realizada no Modelo 1 foi o rebaixo dos furos com a fresa de topo de $\varnothing 4,0$ mm. A estratégia utilizada foi o fresamento de furos com ciclo fixo, com incremento de corte de 1,2 mm, tolerância de 0,3 mm, sem sobremetal. A Figura 106 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de fresamento do rebaixo.

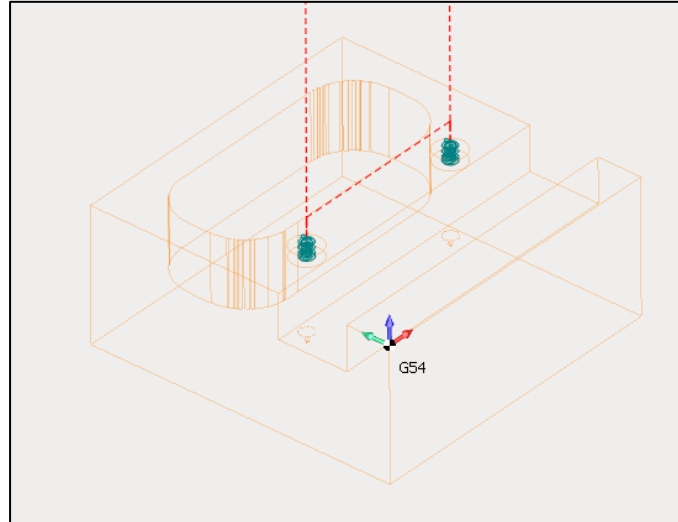
Figura 106 – Parâmetros de corte do rebaixo do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 107 ilustra o resultado das trajetórias geradas para a operação de desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SprutCAM.

Figura 107 – Desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SprutCAM

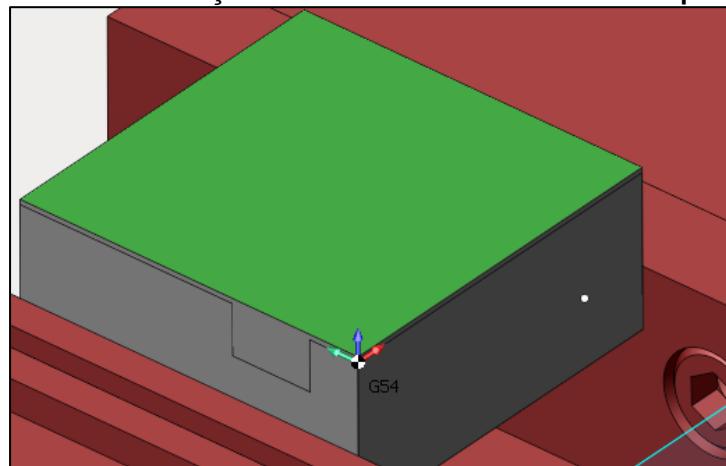


Fonte: Autora (2021)

3.6.5. Simulação do fresamento do Modelo 1 no SprutCAM

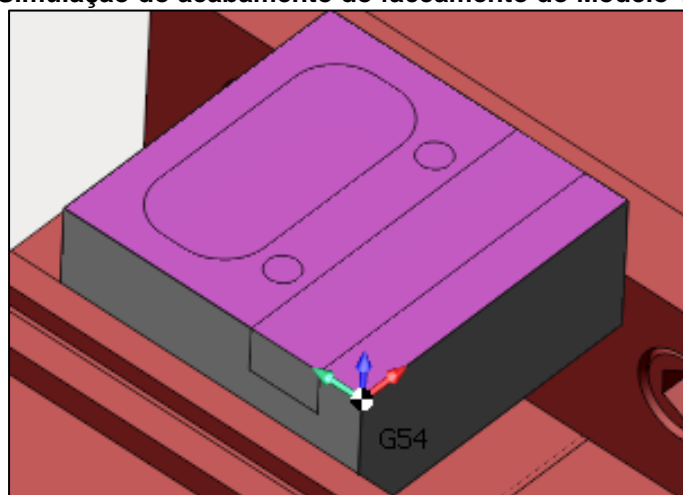
Os processos de fresamento de desbaste e acabamento realizados no Modelo 1 foram simulados para a conferência das trajetórias e para garantir que o resultado do processo está de acordo com o projeto. As Figuras 108 até 116 ilustram a simulação da usinagem, em ordem cronológica e cada área usinada é identificada por uma cor específica que pode ser alterada ou utilizada no modo padrão escolhido pelo *software*.

Figura 108 – Simulação do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM



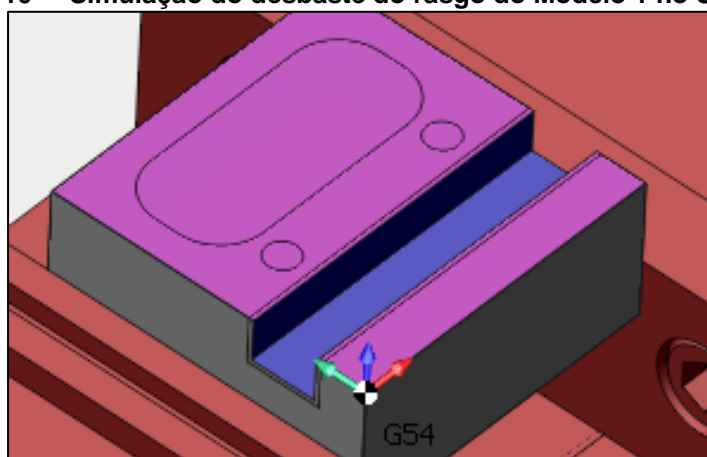
Fonte: Autora (2021)

Figura 109 – Simulação do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SprutCAM



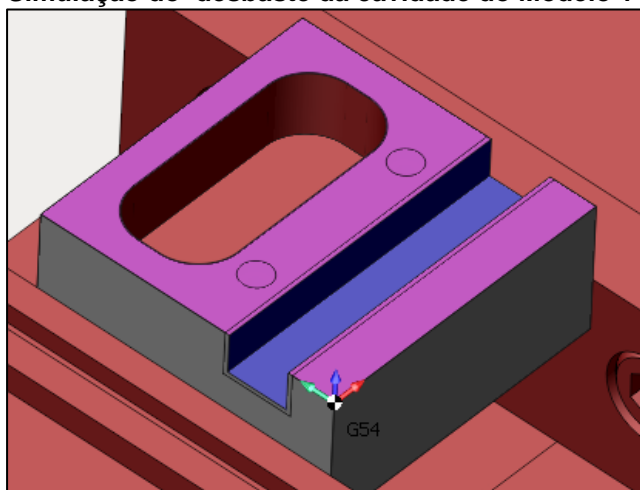
Fonte: Autora (2021)

Figura 110 – Simulação do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM



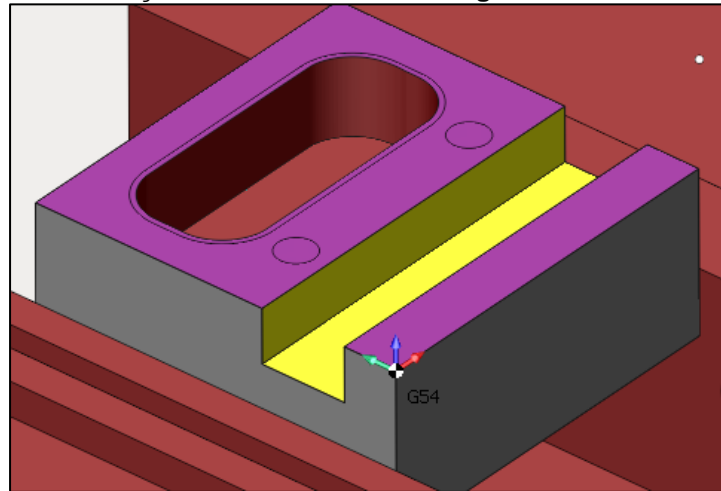
Fonte: Autora (2021)

Figura 111 – Simulação do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



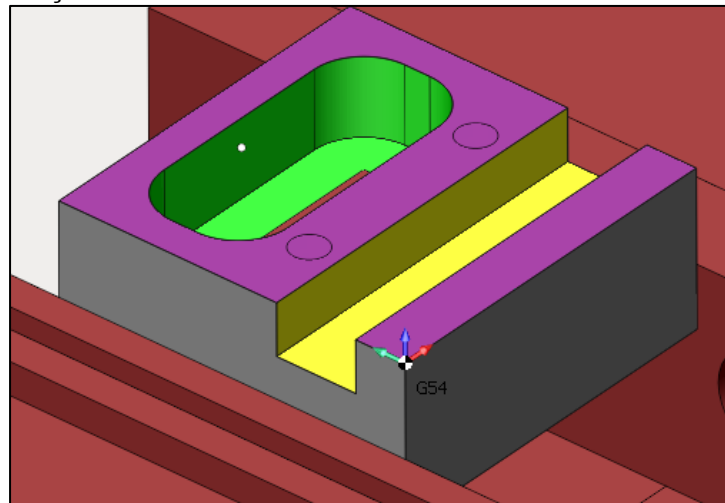
Fonte: Autora (2021)

Figura 112 – Simulação do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SprutCAM



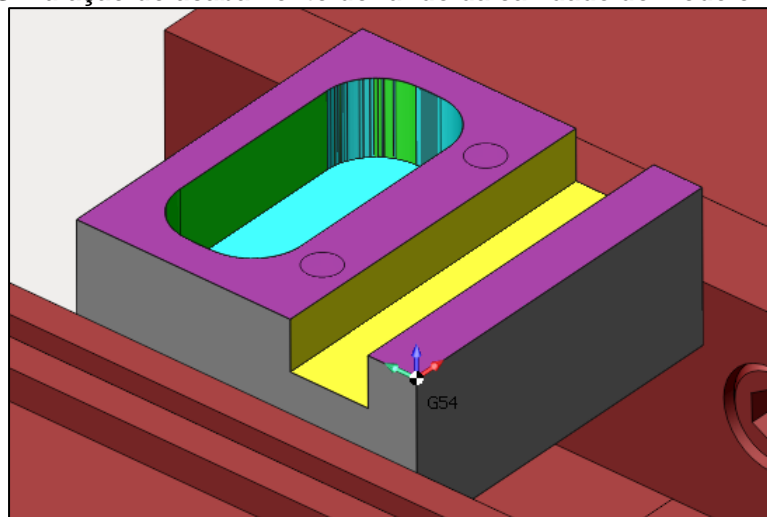
Fonte: Autora (2021)

Figura 113 – Simulação do acabamento das laterais da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



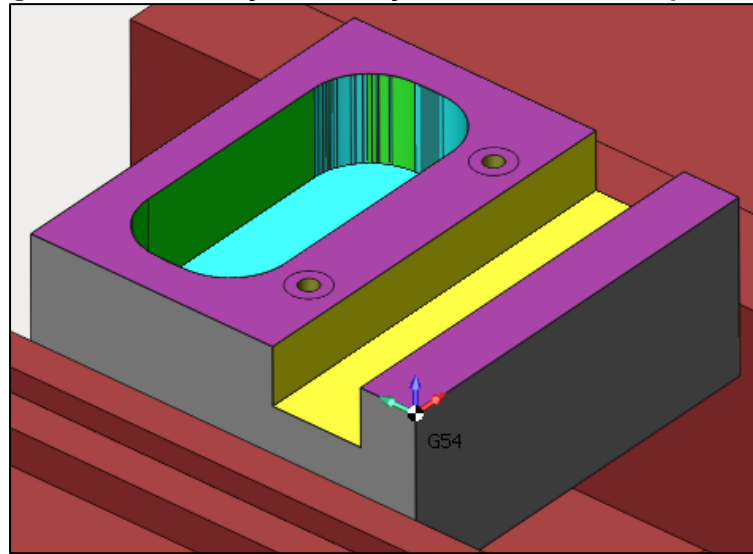
Fonte: Autora (2021)

Figura 114 – Simulação do acabamento do fundo da cavidade do Modelo 1 no SprutCAM



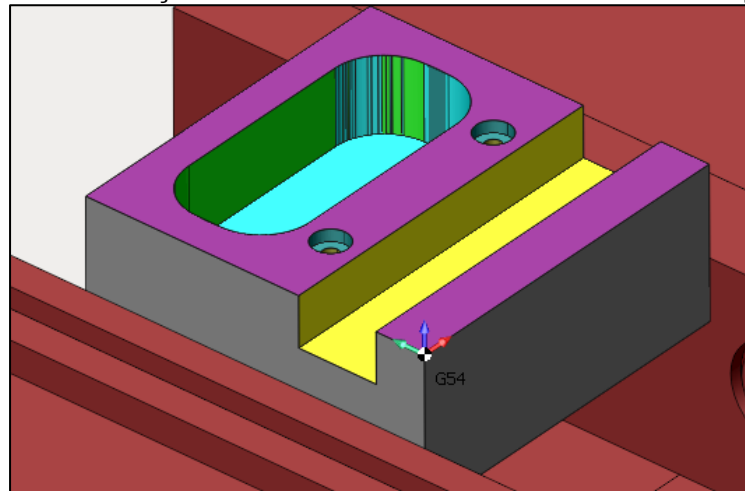
Fonte: Autora (2021)

Figura 115 – Simulação da furação do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

Figura 116 – Simulação do desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

3.6.6. Geração do código CNC para o Modelo 1 no SprutCAM

Para a geração dos códigos CNC para o Modelo 1 foi utilizado o pós-processador FANUC. Para o Modelo 1 foram geradas 1449 linhas de código, para 9 operações que incluíram, desbaste, furação e acabamento. O tempo estimado de fresamento foi de 5 minutos e 10 segundos com percurso total de 10775,0 mm. A Tabela 4 resume as informações referentes aos tempos de cada processo de

fresamento, número de linhas de código e comprimento de percurso para o Modelo 1.

Tabela 4 – Características dos códigos CNC do Modelo 1 no SprutCAM

Operação	Número de linhas	Tempo estimado de usinagem	Comprimento do percurso (mm)
Desbaste da face superior	482	26 s	1952,0
Desbaste do rasgo	111	52 s	1810,0
Desbase da cavidade	123	54 s	1228,0
Furos	76	40 s	1100,0
Rebaixo	530	30 s	1761,0
Acabamento da face superior	75	15 s	1714,0
Acabamento do rasgo	53	32 s	671,0
Acabamento da lateral da cavidade	287	43 S	2471,0
Acabamento do fundo da cavidade	59	30 s	654,0
Total	1796	5 min 10 s	13361,0

Fonte: Autora (2021)

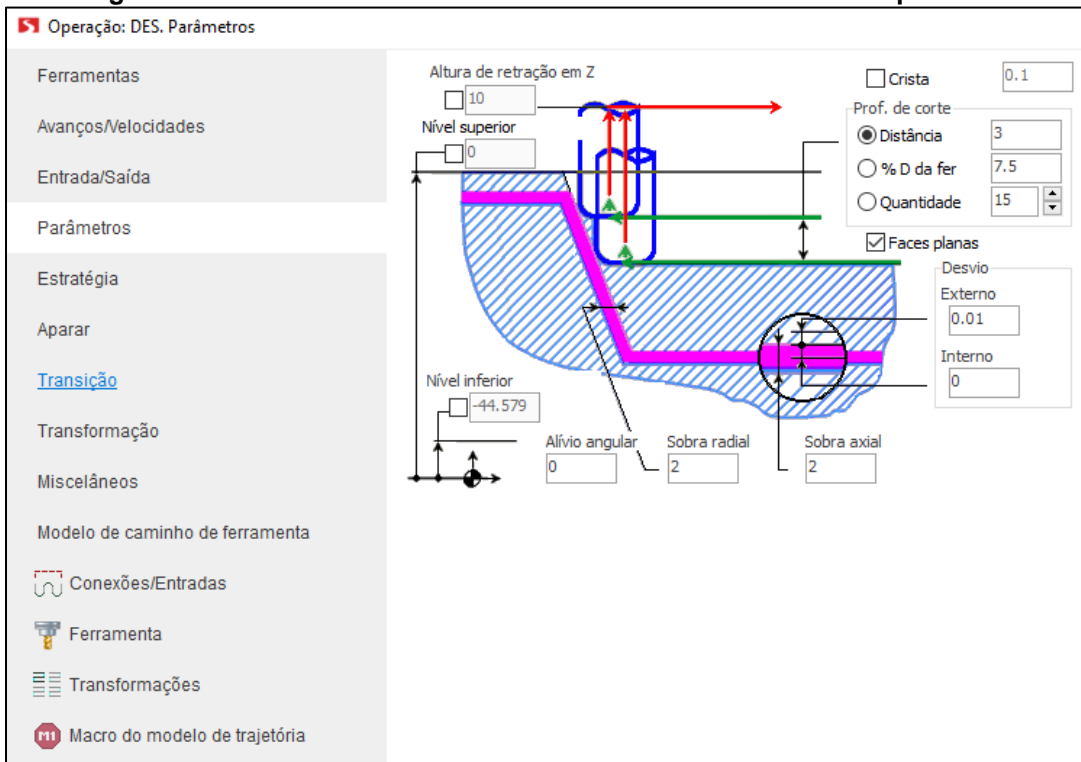
Quando os códigos são gerados de maneira independente o número de linhas aumenta e o comprimento das trajetórias aumentam. Isso acontece porque são escritas funções preparatórias para cada uma das operações e os deslocamentos do ponto inicial e final das ferramentas mudam, uma vez que para operações realizadas sequencialmente com a mesma ferramenta, ela não vai para o ponto zero peça para iniciar a próxima operação, ela continua a trajetória de maneira otimizada a partir do ponto em que finalizou a operação anterior.

3.6.7. Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 2

A primeira operação aplicada ao Modelo 2, foi um desbaste de linha d'água com estratégia adaptativa, visando retirar a maior quantidade possível de material com uma fresa robusta de diâmetro $\varnothing 40,0$ mm.

Os parâmetro definidos têm os mesmo valores utilizados no processo realizado no PowerMILL, com sobremetal radial e axial de 2,0 mm, a_e de 20,0 mm e a_p de 3,0 mm, com corte adaptativo. A Figura 117 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de corte para o desbaste do Modelo 2.

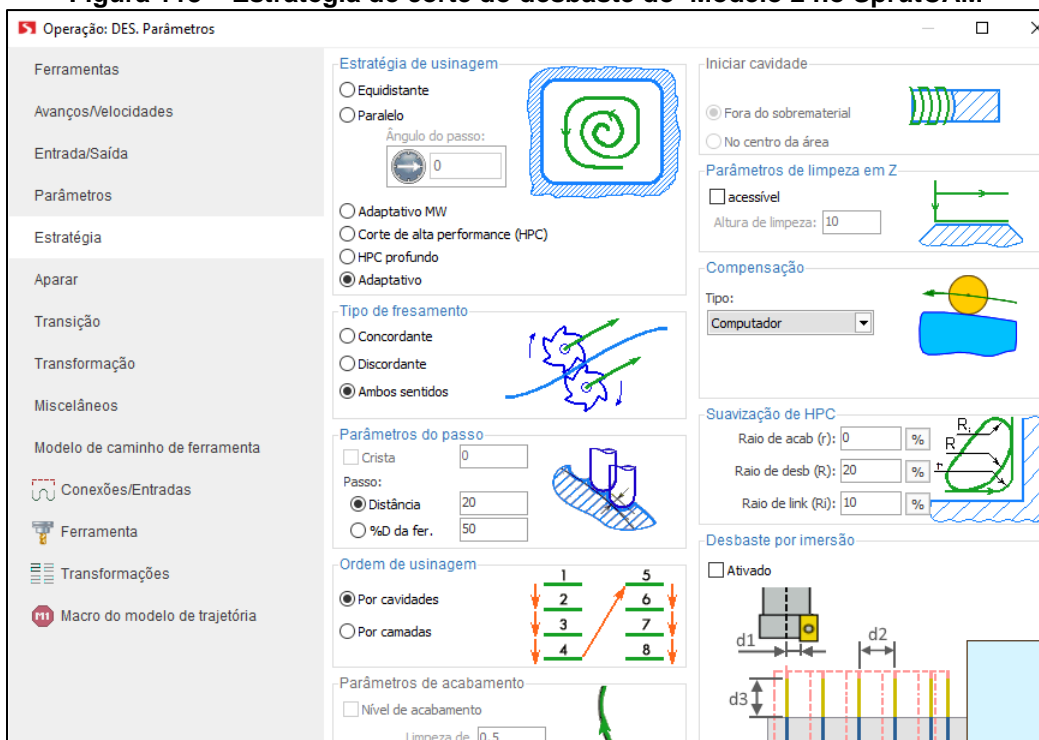
Figura 117– Parâmetros de corte do desbaste do Modelo 2 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 118 apresenta a janela de configuração da estratégia de corte para o fresamento do desbaste do Modelo 2.

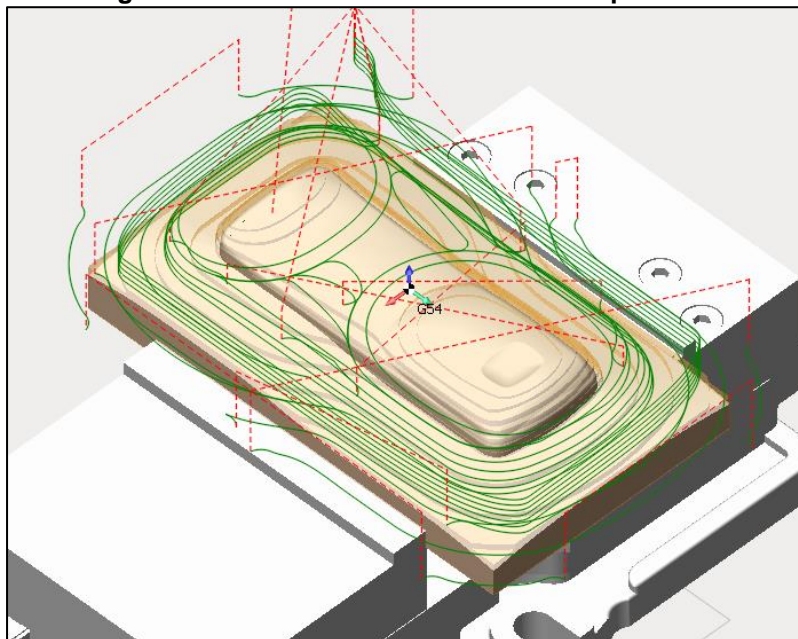
Figura 118 – Estratégia de corte do desbaste do Modelo 2 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 119 ilustra as trajetórias geradas para o desbaste do Modelo 2 no SprutCAM.

Figura 119 – Desbaste do Modelo 2 no SprutCAM

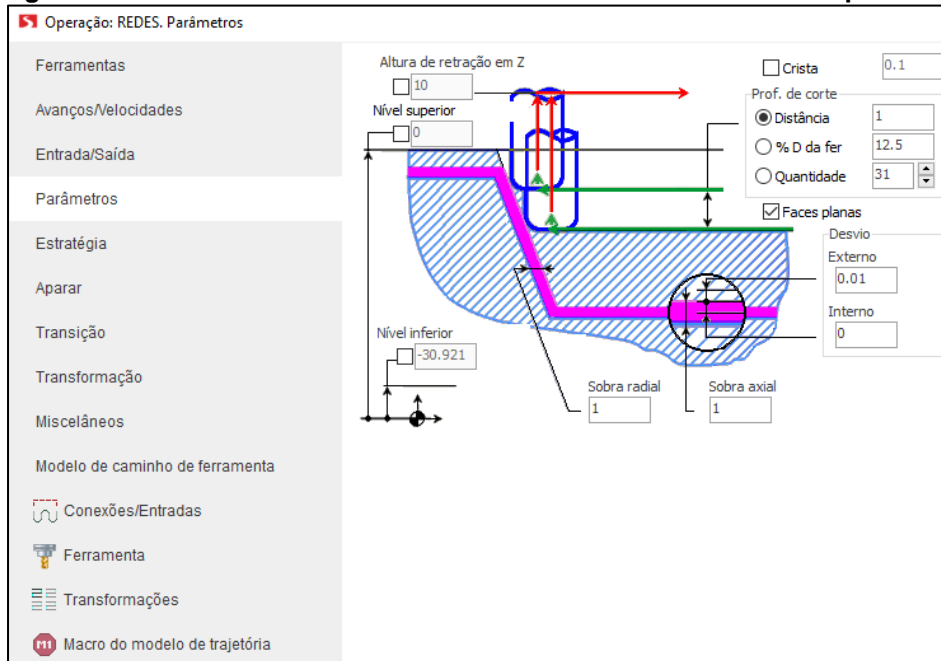


Fonte: Autora (2021)

A utilização de uma ferramenta com diâmetro grande com os parâmetros de corte definidos na operação anterior, implica em degraus na peça, que precisam ser romovidos. O SprutCAM não oferece uma operação de redesbaste aplicada na superfície inteira da peça, por esse motivo a operação de redesbaste será feita com uma estratégia de acabamento.

Para o redesbaste foi utilizada a estratégia de acabamento de linha d'agua com corte em ambos os sentidos, e a fresa de $\varnothing 8,0$ mm. A direção de usinagem foi definida como para baixo, passo vertical de 1,0 mm, passo lateral de 5,0 mm e sobremetal nas direções radial e axial de 1,0 mm, com tolerância de 0,1 mm. A Figura 120 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de fresamento.

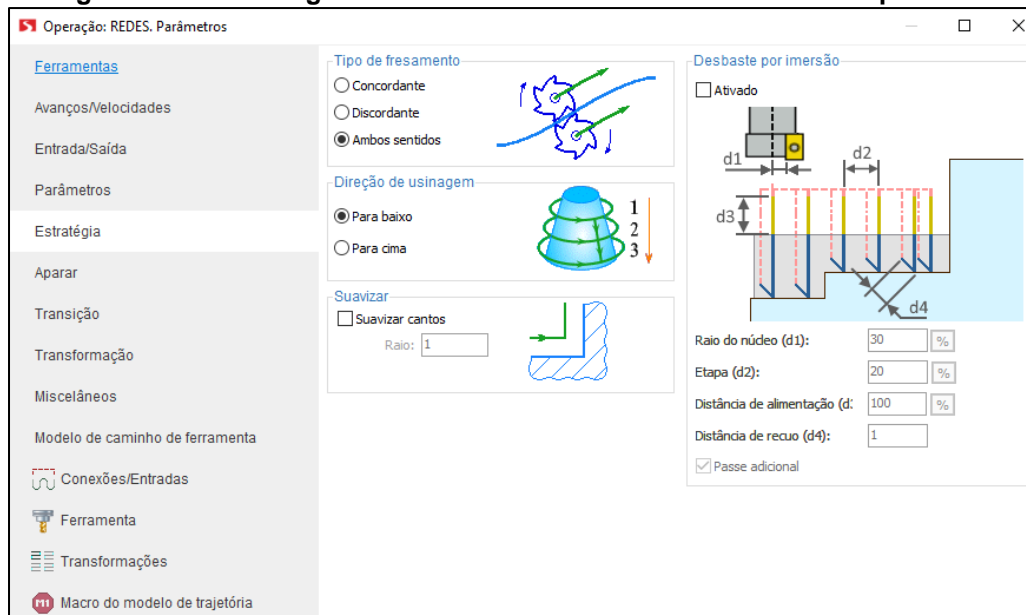
Figura 120 – Parâmetros de corte do redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 121 apresenta a janela de configuração da estratégia de corte para o fresamento do redesbaste do Modelo 2.

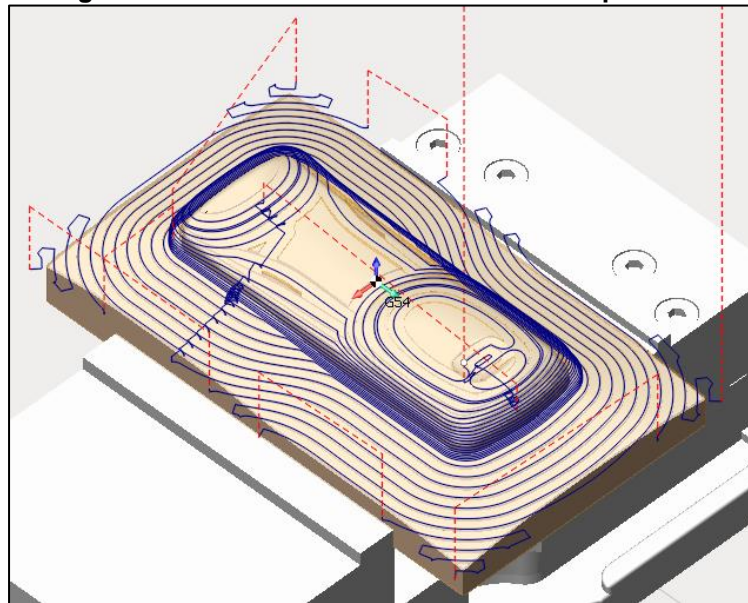
Figura 121 – Estratégia de corte do redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 122 ilustra as trajetórias geradas para o redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM.

Figura 122 – Redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM

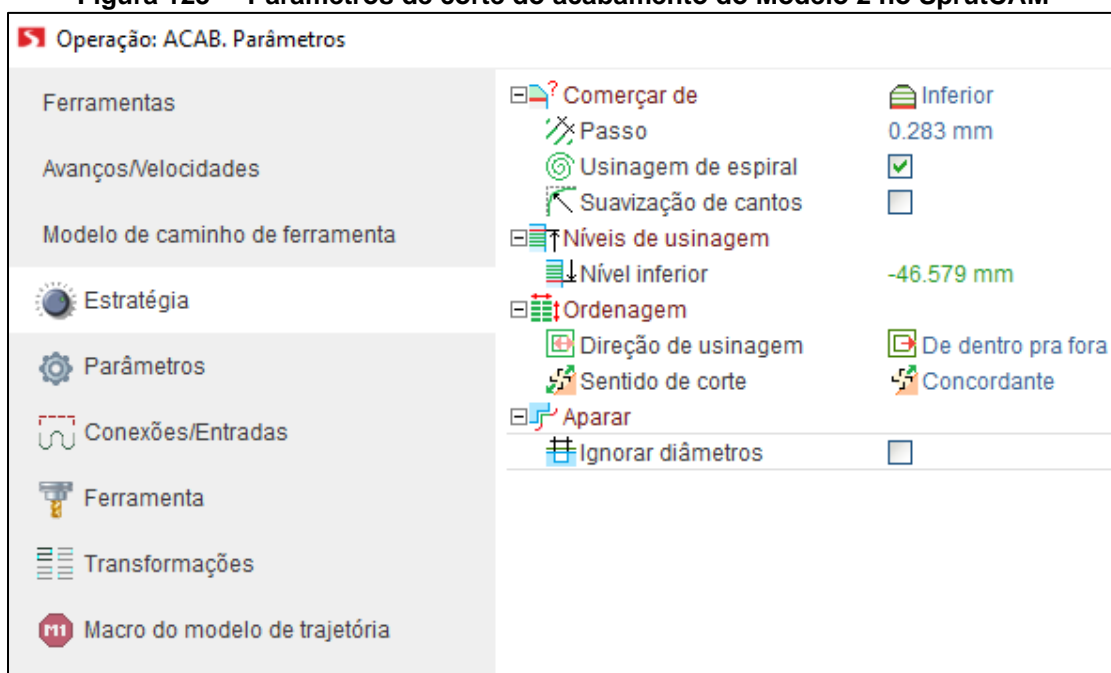


Fonte: Autora (2021)

Para o Modelo 2 foi realizada somente uma operação de acabamento, com a fresa de ponta esférica de $\varnothing 4,0$ mm, sendo possível fresar todas as faces.

A estratégia selecionada foi o acabamento em crista, com usinagem em espiral, direção de corte concordante, avanço de trabalho inteligente, passo lateral de 0,283 mm (a_e máximo), tolerância de 0,1 mm. A Figura 123 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de fresamento.

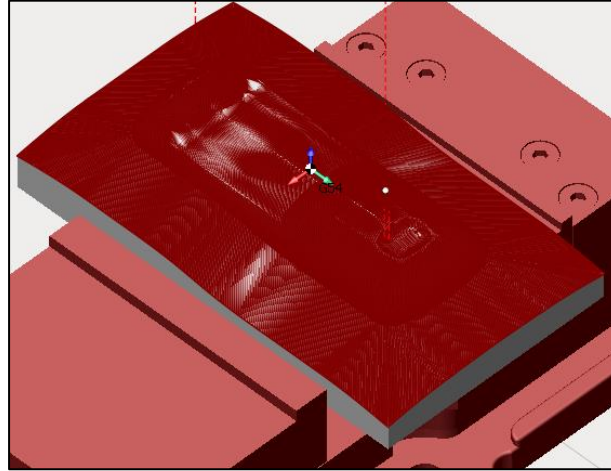
Figura 123 – Parâmetros de corte do acabamento do Modelo 2 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 124 ilustra as trajetórias geradas para o acabamento do Modelo 2 no SprutCAM.

Figura 124 – Acabamento do Modelo 2 no SprutCAM



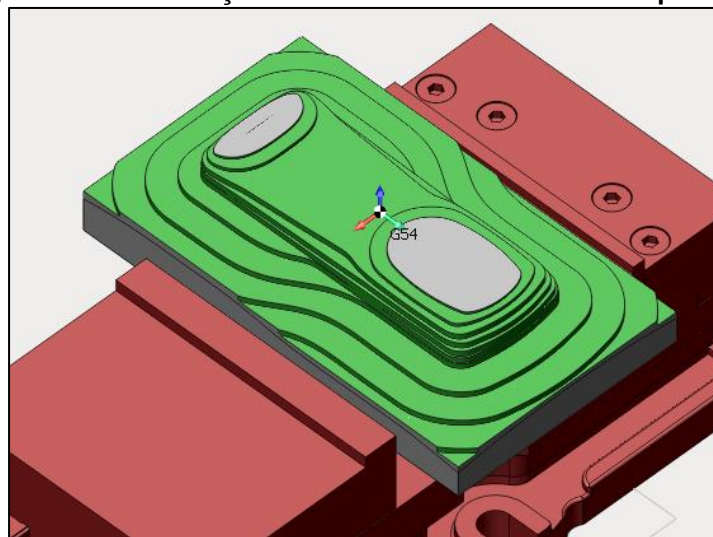
Fonte: Autora (2021)

3.6.8. Simulação do fresamento do Modelo 2 no SprutCAM

Todos os processos de fresamento de desbaste e acabamento realizados no Modelos 2 foram simulados para conferência das trajetórias e para garantir que o resultado do processo está de acordo com o projeto.

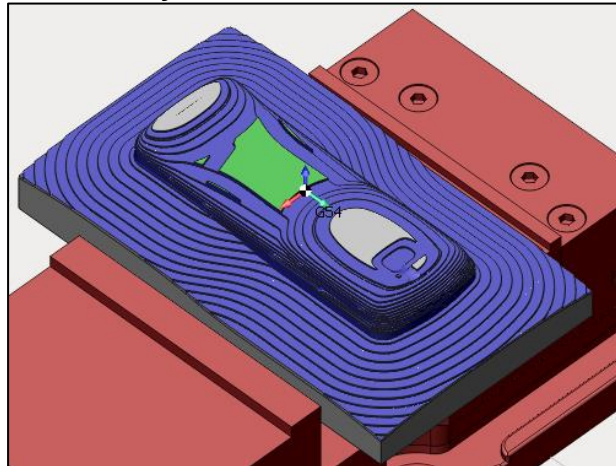
As Figuras 125 até 127 ilustram a simulação da usinagem de fresamento na ordem que elas ocorreram. A área usinada é identificada por uma cor específica que pode ser alterada ou utilizada no modo padrão escolhido pelo *software*.

Figura 125 – Simulação do desbaste do Modelo 2 no SprutCAM



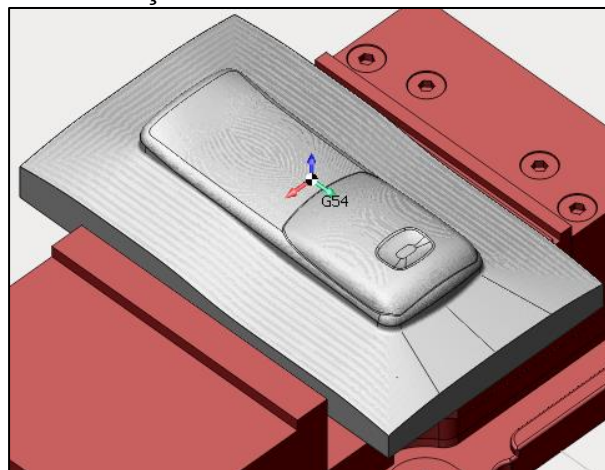
Fonte: Autora (2021)

Figura 126 – Simulação do redesbaste do Modelo 2 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

Figura 127 – Simulação do acabamento do Modelo 2 no SprutCAM



Fonte: Autora (2021)

3.6.9. Geração dos códigos CNC para o Modelo 2 no SprutCAM

Para o Modelo 2 foram geradas 158223 linhas de código, para 3 operações. O tempo estimado do processo é de 53 minutos e 01 segundo, com comprimento de percurso de 204266,0 mm. A Tabela 5 resume as informações referentes aos processo de fresamento para o Modelo 2.

Tabela 5 – Características dos códigos CNC do Modelo 2 no SprutCAM

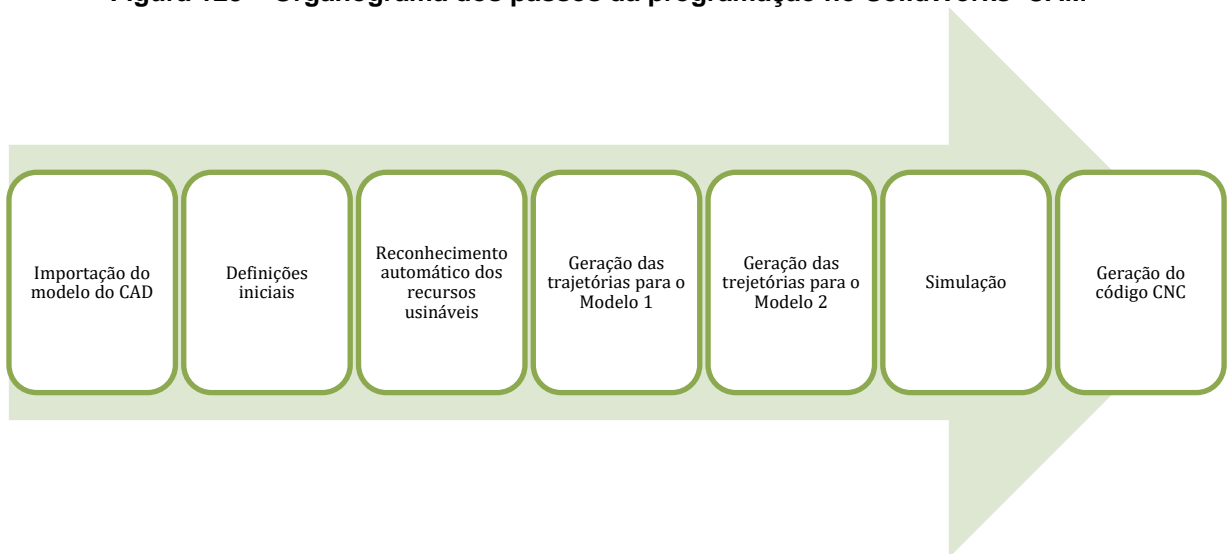
Operação	Número de linhas	Tempo estimado de usinagem	Comprimento do percurso (mm)
Desbaste	1817	2 min 47 s	14430,0
Desbaste de resíduo	2073	13 min 56 s	14208,0
Acabamento	154333	36 min 39 s	175629,0
Total	158223	53 min 01 s	204266,0

Fonte: Autora (2021)

3.7. Programação utilizando o SolidWorks CAM

O último *software* utilizado nesse experimento para a programação dos Modelos 1 e 2 foi o SolidWorks CAM. Para a geração dos códigos CNC foram seguidos os passos apresentados na Figura 128.

Figura 128 – Organograma dos passos da programação no SolidWorks CAM

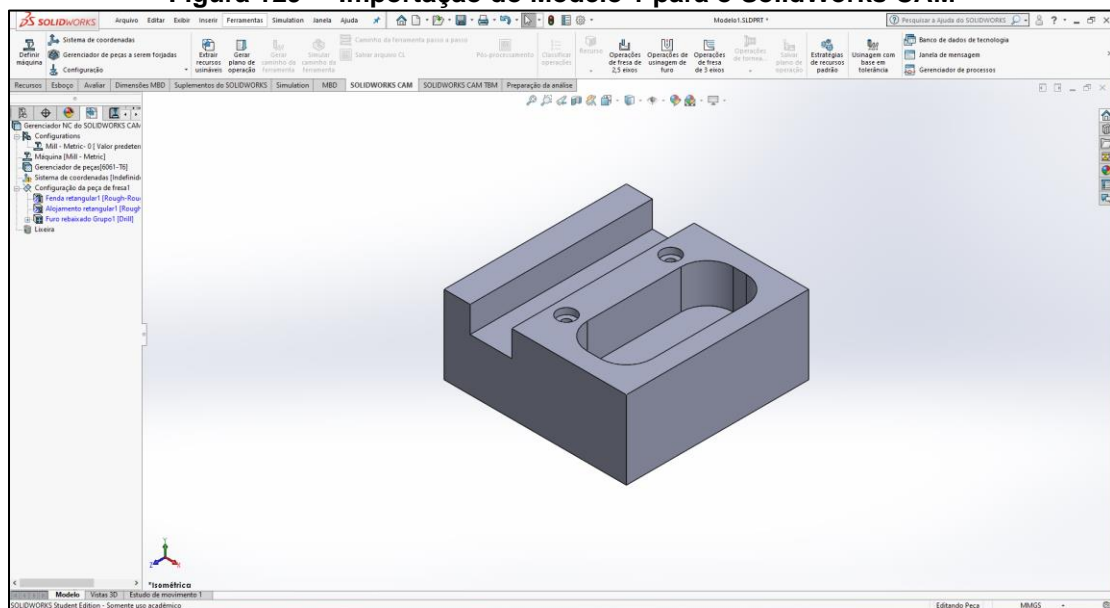


Fonte: Autora (2021)

3.7.1. Importação dos Modelos para o SolidWorks CAM

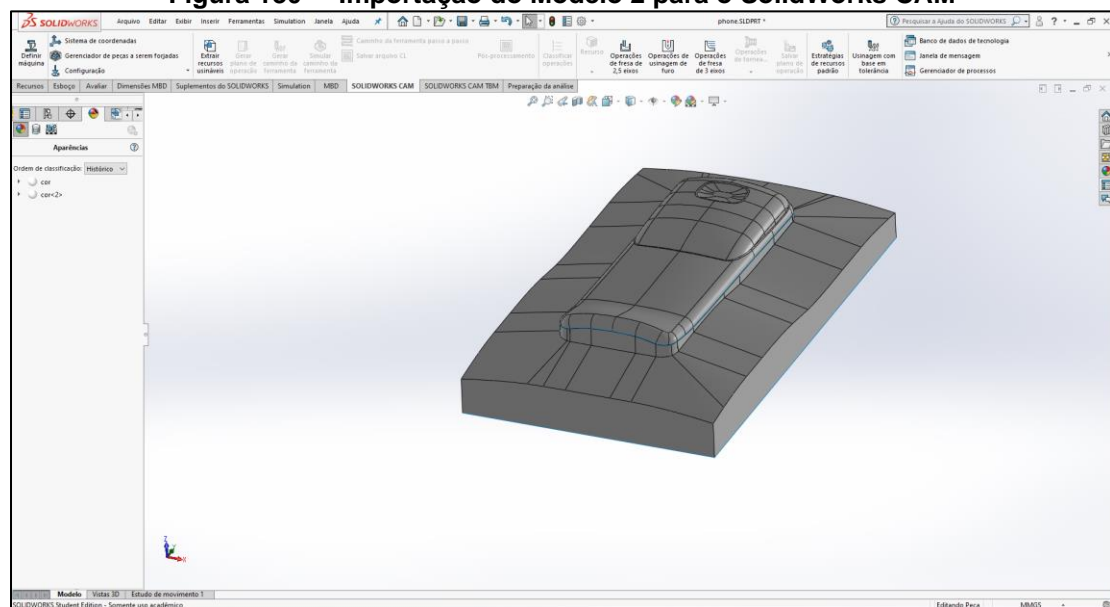
O Modelo 1 foi importado do SolidWorks, com extensão .SLDPRT e o Modelo 2 foi importado da biblioteca de exemplos do PowerMILL na extensão .IGS, pois o modelo .dkg não é suportado por esse *software*. As Figuras 129 e 130 ilustram os modelos importados para o SolidWorks CAM, respectivamente.

Figura 129 – Importação do Modelo 1 para o SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Figura 130 – Importação do Modelo 2 para o SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

3.7.2. Definições iniciais no SolidWorks CAM

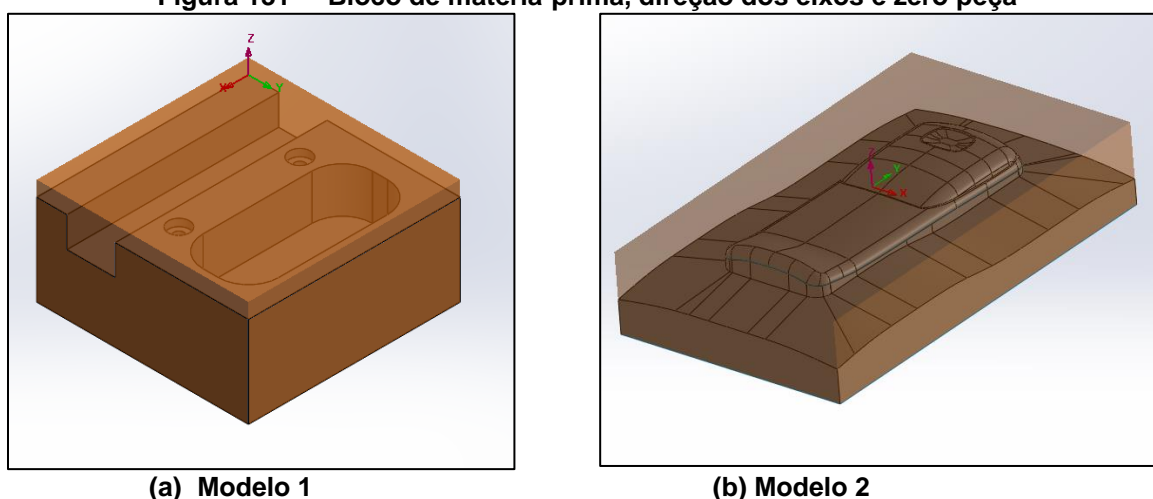
Para a programação o SolidWorks CAM foi selecionado o centro de usinagem a partir das máquinas padrão oferecidas pelo *software*. O centro de usinagem selecionado foi uma fresadora de três eixos com sistema métrico.

O *software* disponibiliza uma biblioteca padrão de ferramentas que são selecionadas de maneira automática conforme o centro de usinagem escolhido e os recursos usináveis reconhecidos na importação dos modelos. Essas ferramentas podem ser substituídas por ferramentas criadas pelo usuário e adicionadas a uma nova biblioteca chamada de cesto.

O sistema de coordenadas foi modificado nos Modelos 1 e 2 pra que o eixo +Z fosse perpendicular à face superior. No Modelo 1 foi definido um bloco de matéria-prima retangular do tipo envolvente com sobremetal de 5,0 mm na direção +Z para uma operação de facimento.

No Modelo 2 foi utilizado a matéria-prima de retângulo envolvente sugerida pelo *software*. A Figura 131 apresenta os blocos de matéria-prima, direção dos eixos e zero peça para os dois modelos utilizados nesse experimento.

Figura 131 – Bloco de matéria-prima, direção dos eixos e zero peça



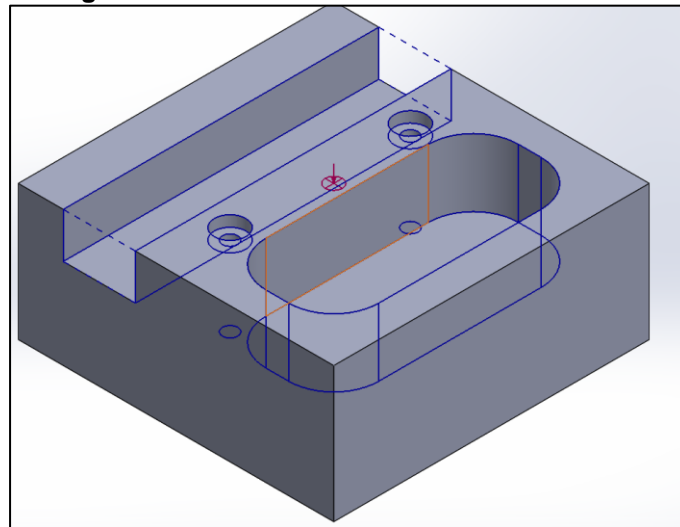
Fonte: Autora (2021)

3.7.3. Reconhecimento automático dos recursos usináveis

O Soliworks CAM tem um facilitador no processo de identificação dos elementos que devem ser usinados. Através do reconhecimento automático dos recursos são criadas as operações que devem ser realizadas, sendo necessário somente a configuração dessas operações, ou adição de algum processo extra que o usuário não julque satisfatório.

Para o Modelo 1 o *software* reconheceu três elementos, uma fenda retangular (rasgo), um alojamento retangular (cavidade) e um padrão de furos com rebaixo (Figura 132). Para o Modelo 2 o *software* não reconheceu nenhum recurso usinável.

Figura 132 – Recursos usináveis do Modelo 1



Fonte: Autora (2021)

3.7.4. Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 1 no SolidWorks CAM

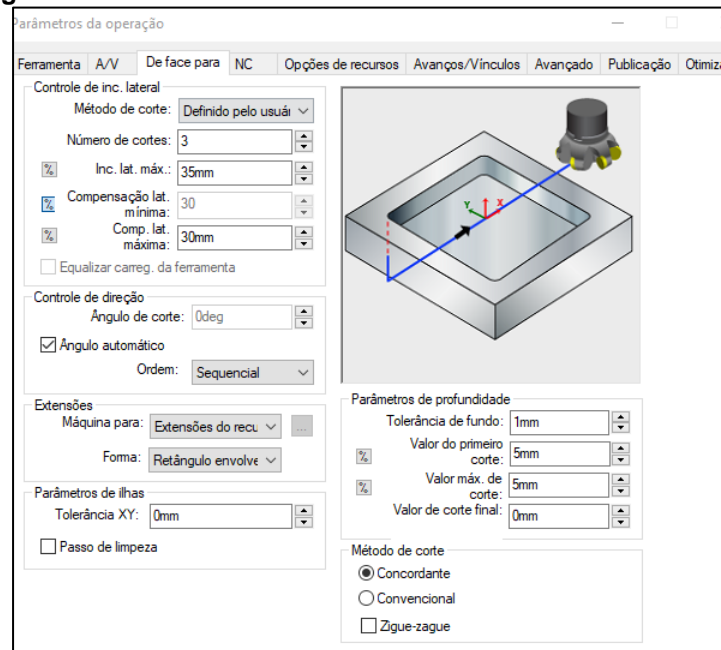
A criação das trajetórias pode ser feita de maneira automática a partir do reconhecimento automático dos elementos usináveis, e criação automática das trajetórias ou pode ser feita manualmente caso a geração automática não seja satisfatória.

Para o Modelo 1 a geração automática das trajetórias não foi satisfatória, uma vez que foram geradas operações diferente do padrão utilizado nos outros *softwares*. Sendo assim, as operações de usinagem de fresamento foram criadas manualmente.

A primeira operação realizada foi a fresa de face para recursos de 2 ½ eixos com tipo de alojamento e cadeia aberta, a estratégia de utilizada foi *rough-finish* com condição final cega da espessura do sobremetal.

Essa operação foi feita com a fresa toroidal de Ø 50,0 mm, com corte concordante, a_e de 35,0 mm, a_p de 5,0 mm e sobremetal de 1,0 mm. A Figura 133, ilustra a configuração dos parâmetros de corte.

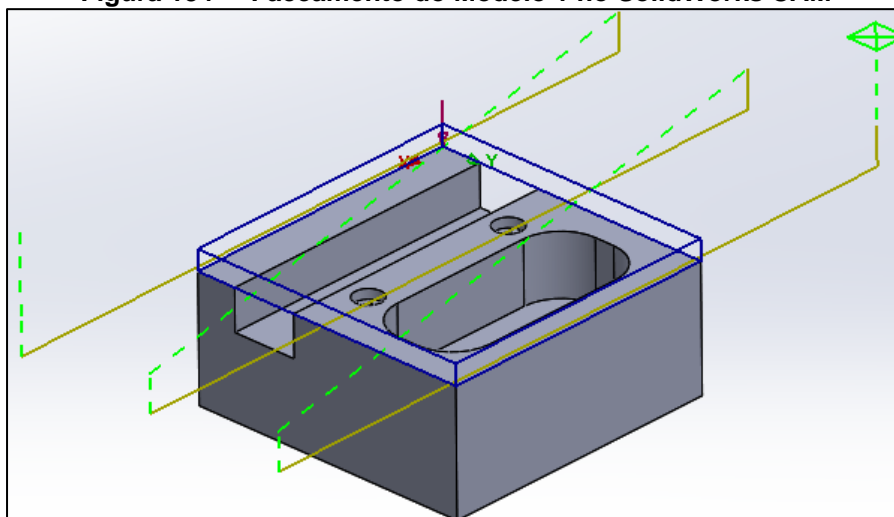
Figura 133 – Parâmetros de corte do Faceamento do Modelo 1



Fonte: Autora (2021)

A Figura 134 ilustra as trajetórias criadas para o faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.

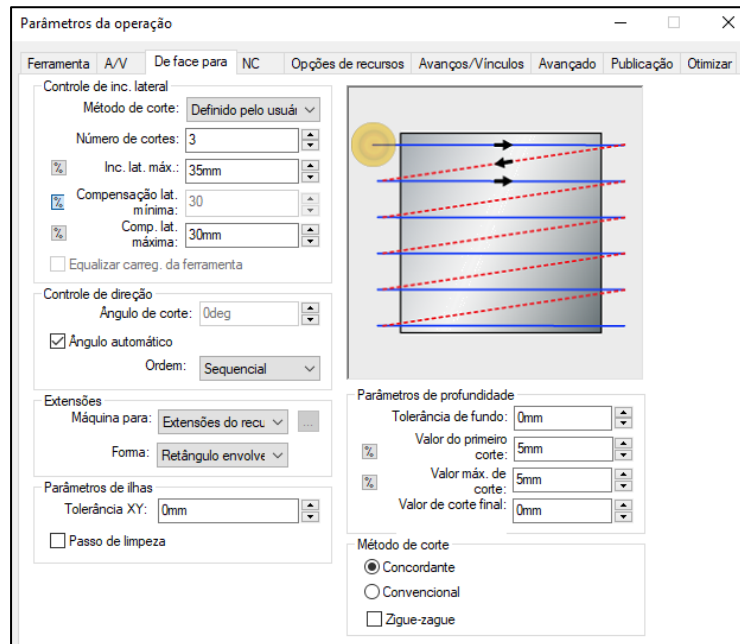
Figura 134 – Faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Para a face superior a operação de acabamento foi criada a partir de uma cópia da operação de faceamento. O valor de sobremetal foi alterado para zero, a_e para 25,0 mm, e a estratégia de corte foi definida como acabamento, os outros parâmetros não foram alterados (Figura 135).

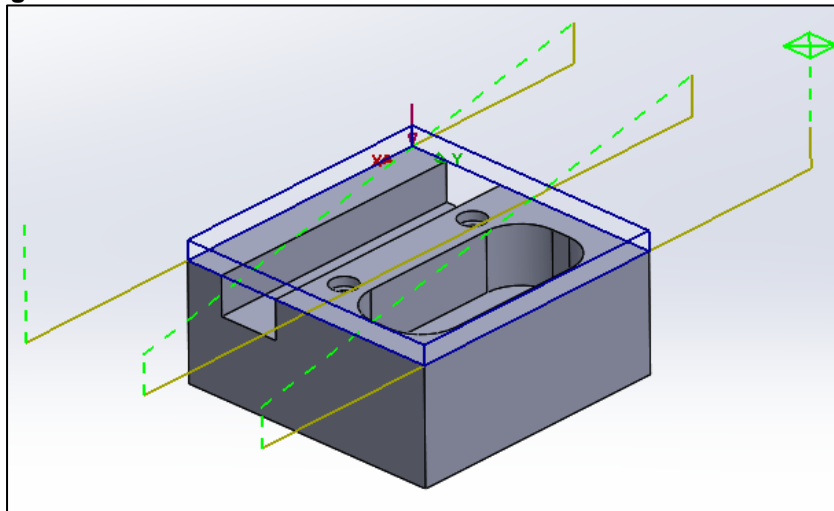
Figura 135 – Parâmetros de corte do acabamento do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 136 ilustra as trajetórias geradas para o acabamento do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM.

Figura 136 – Acabamento do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM

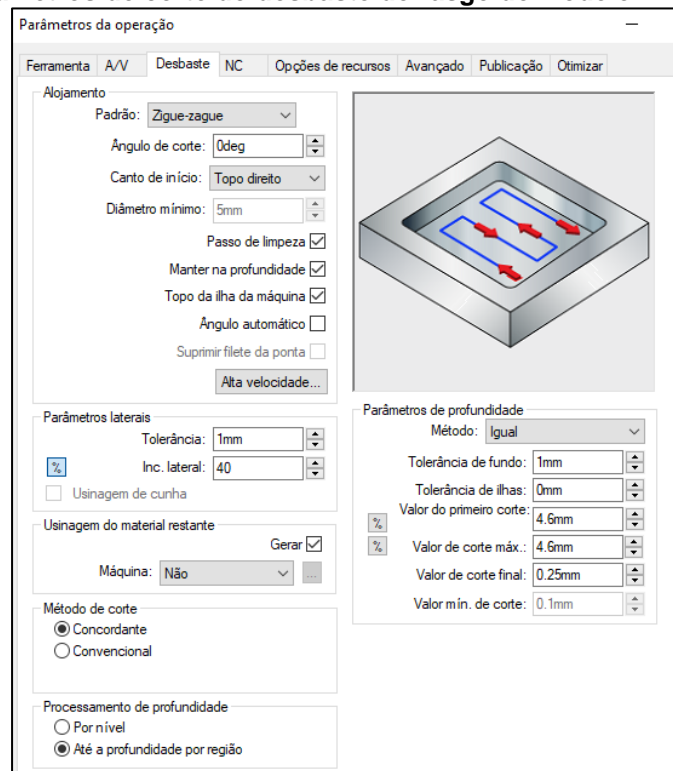


Fonte: Autora (2021)

A segunda operação foi a usinagem do rasgo da peça a partir da estratégia de fresa de desbaste no recurso usinável fenda retangular. O fresamento foi realizado com a fresa de topo de $\varnothing 8,0$ mm.

O tipo de corte utilizado foi concordante, com passo lateral de 5,6 mm, passo vertical de 4,6 mm e sobremetal radial e axial de 1,0 mm. A Figura 137 ilustra as configurações dos parâmetros de corte.

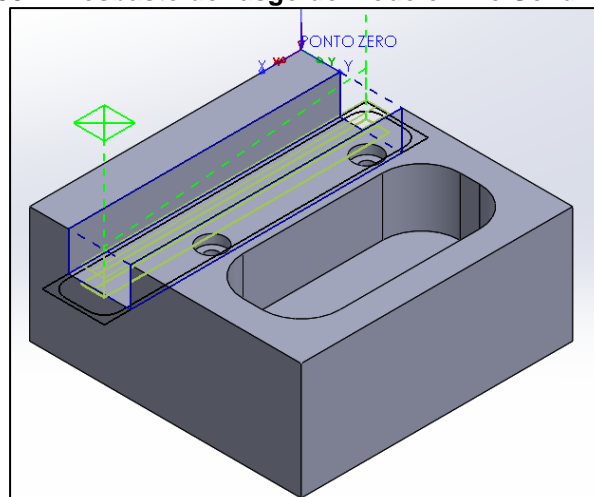
Figura 137 – Parâmetros de corte do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 138 ilustra as trajetórias de fresamento geradas para o desbaste do rasgo com os parâmetros de corte definidos.

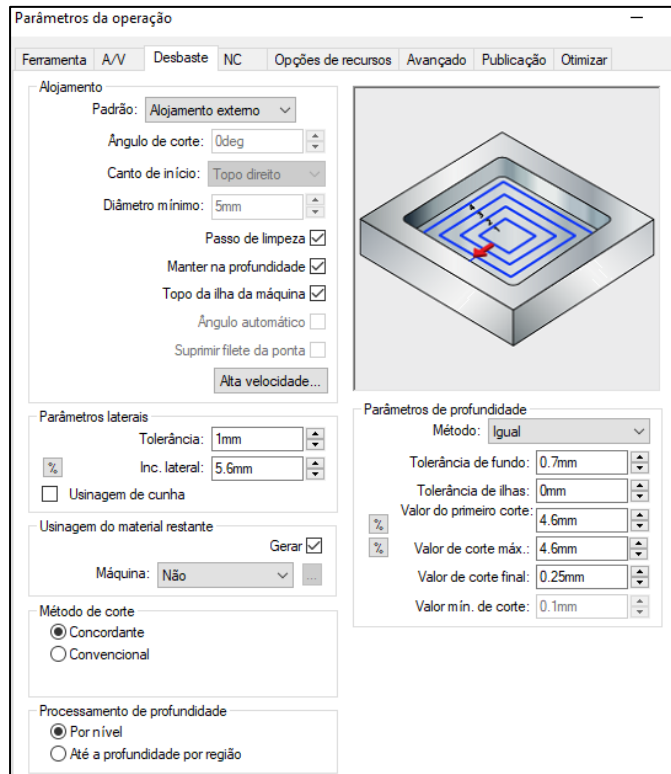
Figura 138 – Desbaste do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A terceira operação aplicada ao desbaste da cavidade, através da mesma estratégia utilizada na operação anterior. O recurso usinável atribuído foi um alojamento retangular, com a_e de 6,4 mm e a_p de 4,0 mm, na direção radial o sobremetal definido foi de 1,0 mm e na direção axial 0,7 mm. A Figura 139 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de corte.

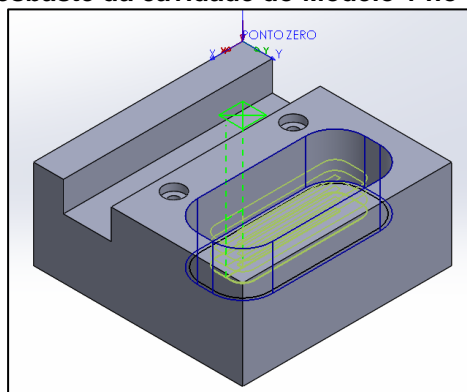
Figura 139 – Parâmetros de corte da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 140 ilustra as trajetórias geradas para o desbaste da cavidade do Modelo 1.

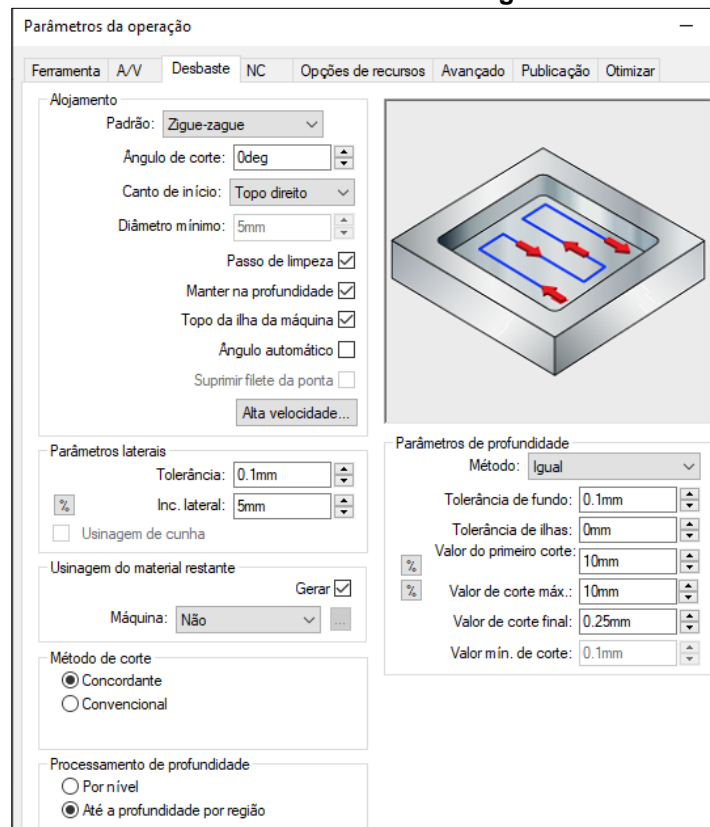
Figura 140 – Desbaste da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Para o acabamento do rasgo foi copiada a operação de desbaste do rasgo. Os parâmetros de sobremetal axial e radial foram definidos como zero, o passo lateral foi de 5,0 mm e o passo vertical de 10,0 mm (Figura 141). A estratégia de corte foi modificada para acabamento, com direção de corte concordante.

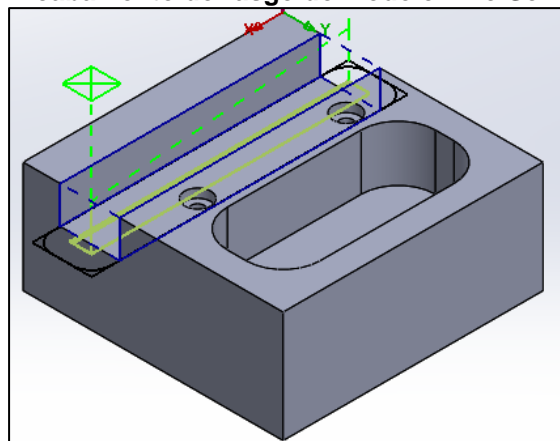
Figura 141 – Parâmetros de corte do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 142 ilustra as trajetórias geradas para o acabamento do rasgo do Modelo 1.

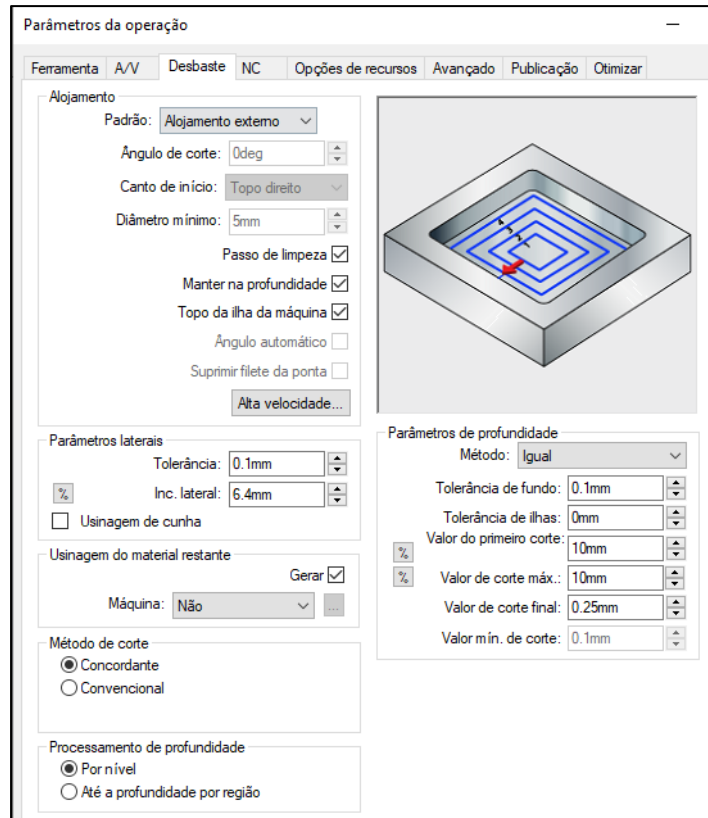
Figura 142 - Acabamento do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Para o acabamento da cavidade foi copiada a operação de desbaste da cavidade. O passo lateral foi de 6,4 mm e o passo vertical de 10,0 mm (Figura 143). A estratégia de corte foi modificada para acabamento, com direção de corte concordante.

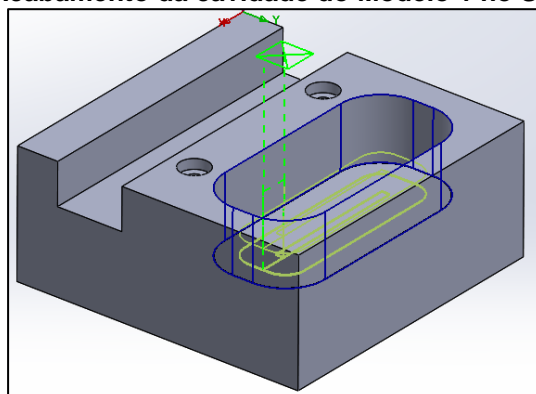
Figura 143 – Parâmetros de corte do acabamento da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 144 ilustra as trajetórias geradas para o acabamento da cavidade do Modelo 1.

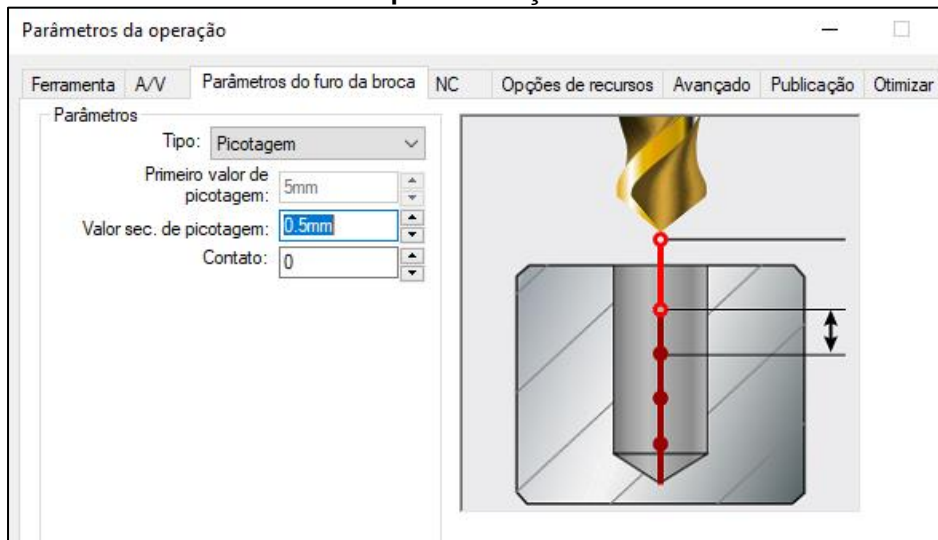
Figura 144 – Acabamento da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Na sequência foi realizado o processo de furação com a broca de \varnothing 3,3 mm a partir da estratégia de usinagem de furos com broca. O valor de picote utilizado foi de 0,5 mm (mesmo valor utilizado anteriormente). A Figura 145 ilustra a janela de configuração do processo de furação.

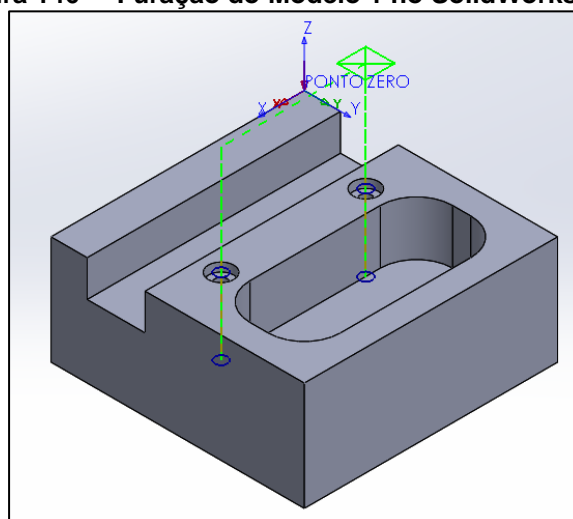
Figura 145 – Parâmetros de corte para a furação do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 146 ilustra as trajetórias geradas para a furação do Modelo 1 no SolidWorks CAM.

Figura 146 – Furação do Modelo 1 no SolidWorks CAM

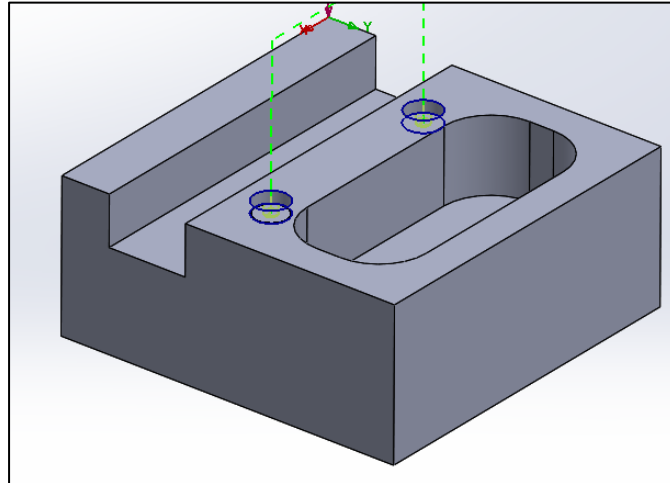


Fonte: Autora (2021)

A última operação realizada foi o desbaste dos rebaxos. A estratégia utilizada foi a de fresa de desbaste com recurso usinável de conjunto de alojamento

circular. A profundidade de corte a_p foi de 1,2 mm, sem direção de corte definida. A Figura 147 ilustra a configuração dos dados de corte para o desbaste do rebaixo.

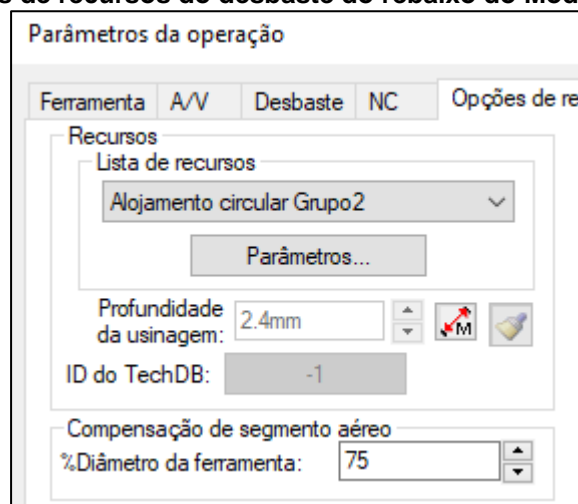
Figura 147 – Parâmetros de corte do desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SolidWoks CAM



Fonte: Autora (2021)

Para o desbaste do rebaixo dos furos foi selecionado recurso de alojamento circular (Figura 148).

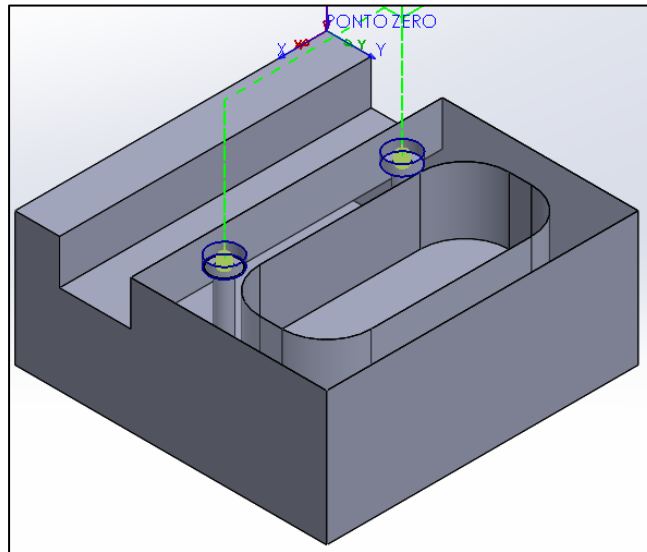
Figura 148 – Opções de recursos do desbaste do rebaixo do Modelo 1 SolidWoks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 149 ilustra as trajetórias geradas para o desbaste do rebaixo do Modelo 1 no SolidWorks CAM.

Figura 149 – Desbaste do rebaixo do Modelo 1 SolidWoks CAM



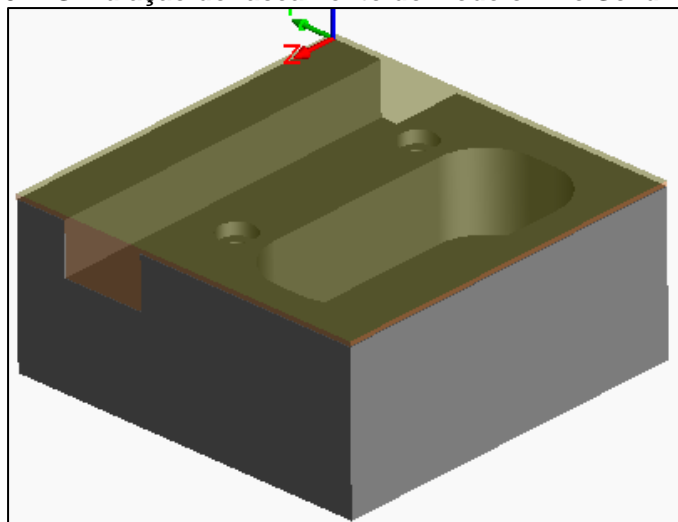
Fonte: Autora (2021)

3.7.5. Simulação das trajetórias de fresamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM

O último processo de simulação aplicado no Modelo 1, foi gerado visando detectar falhas nas trajetórias geradas, como percursos errados e colisões, para isso o modo de deteção para qualquer tipo de colisão foi ativado.

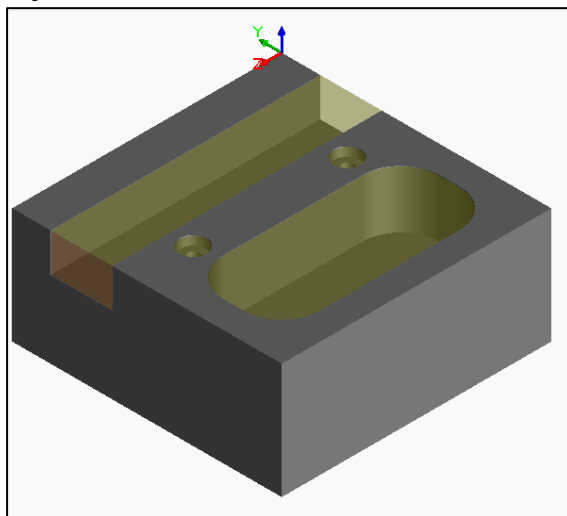
As Figuras 150 até 173 ilustram a simulação do fresamento, e cada área usinada é identificada por uma cor específica que pode ser alterada ou utilizada no modo padrão. Quando determinada região tem o processo de usinagem finalizado ela aparece representada na cor definida para o modelo.

Figura 150 – Simulação do faceamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM



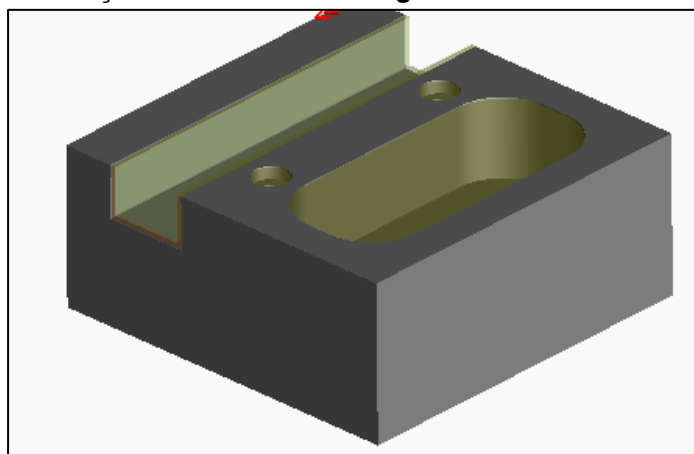
Fonte: Autora (2021)

Figura 151– Simulação do acabamento da face do Modelo 1 no SolidWorks CAM



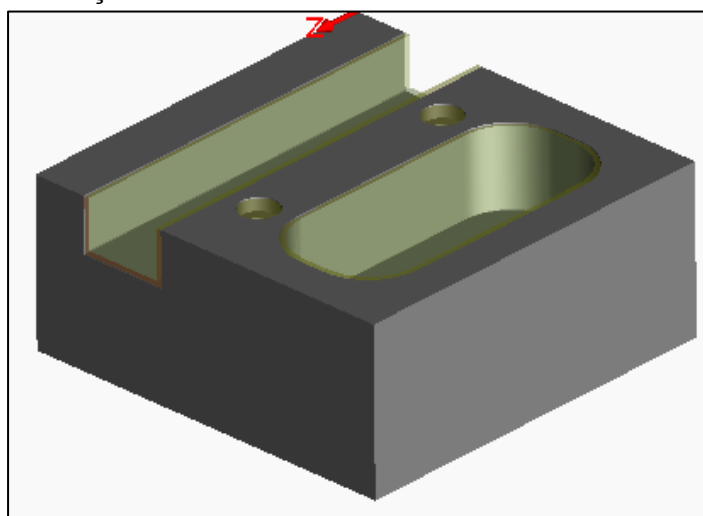
Fonte: Autora (2021)

Figura 152 – Simulação do desbaste do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM



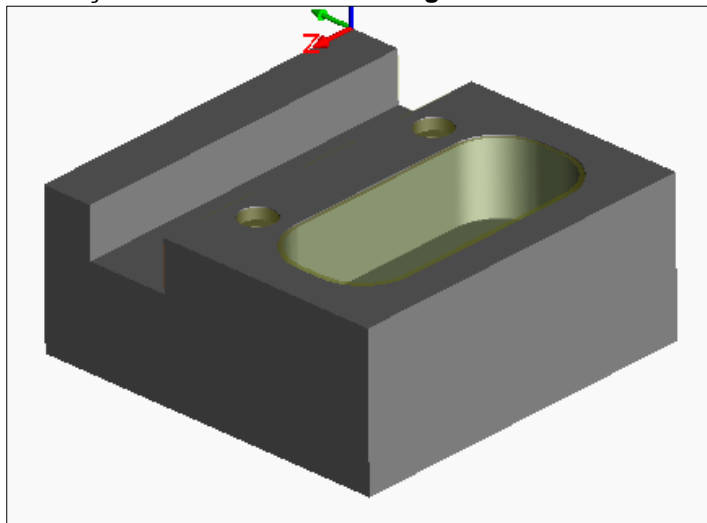
Fonte: Autora (2021)

Figura 153 – Simulação do desbaste da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM



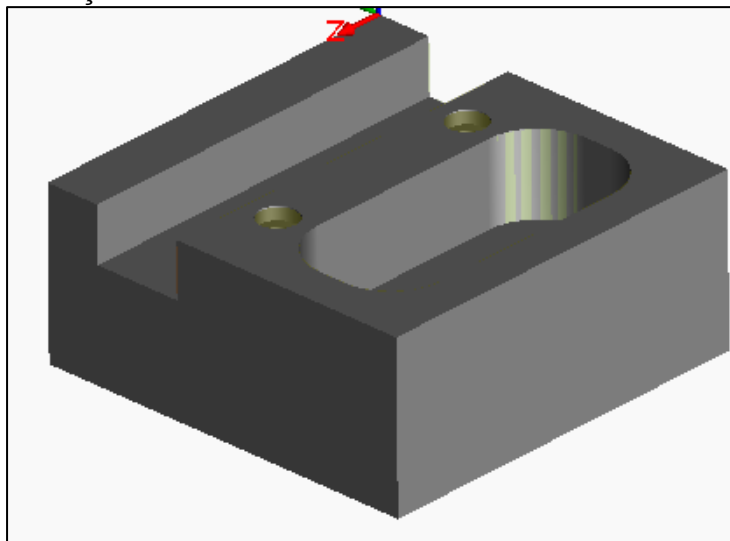
Fonte: Autora (2021)

Figura 154 – Simulação do acabamento do rasgo do Modelo 1 no SolidWorks CAM



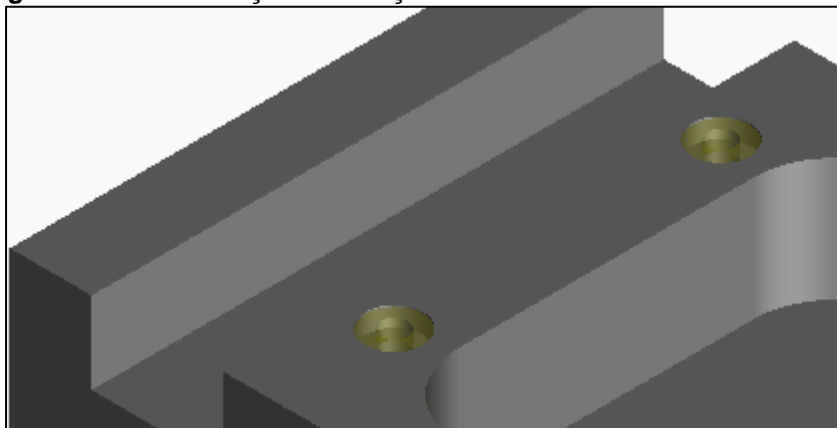
Fonte: Autora (2021)

Figura 155 – Simulação do acabamento da cavidade do Modelo 1 no SolidWorks CAM



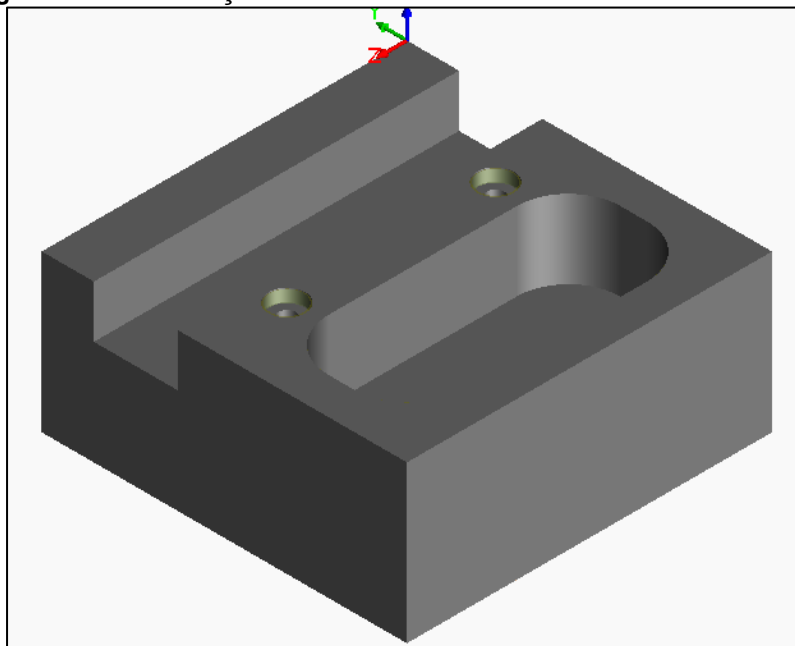
Fonte: Autora (2021)

Figura 156 – Simulação da furação do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Figura 157– Simulação do rebaixo do Modelo 1 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

3.7.6. Geração dos códigos CNC para o Modelo 1 no SolidWorks CAM

Para a geração dos códigos CNC para o Modelo 1 foi utilizado o pós-processador FANUC disponível na biblioteca de pós-processadores do SolidWorks CAM. O código pós-processado pode ser aberto em uma janela de edição do próprio *software*, as linhas aparecem em cores diferentes dependendo do tipo de movimento.

Para o Modelo 1 foram geradas 426 linhas de código, para 8 operações que incluíram, desbaste, furação e acabamento. O tempo estimado de usinagem foi de 5 minutos e 3 segundos, com percurso de 6722,4 mm. A Tabela 6 resume as informações referentes aos tempos de cada processo de fresamento, número de linhas de código e o comprimento do percurso para o Modelo 1.

A diferença no número de linhas geradas para o programa completo e para os programas individuais é devido a trajetórias de movimentação e posicionamento repetidas quando os programas são gerados individualmente.

Tabela 6 – Características dos códigos CNC do Modelo 1 no SolidWorks CAM

Operação	Número de linhas	Tempo estimado de usinagem	Comprimento do percurso (mm)
Desbaste da face superior	25	44 s	538,8
Desbaste do rasgo	61	54 s	1418,6
Desbase da cavidade	145	1 min 07 s	1650,9
Furos	14	7 s	225,3
Rebaixo	55	14 s	316,6
Acabamento da face superior	25	41 s	540,8
Acabamento do rasgo	44	35 s	963,6
Acabamento da cavidade	91	41 s	1067,8
Total	460	5 min 03 s	6722,4

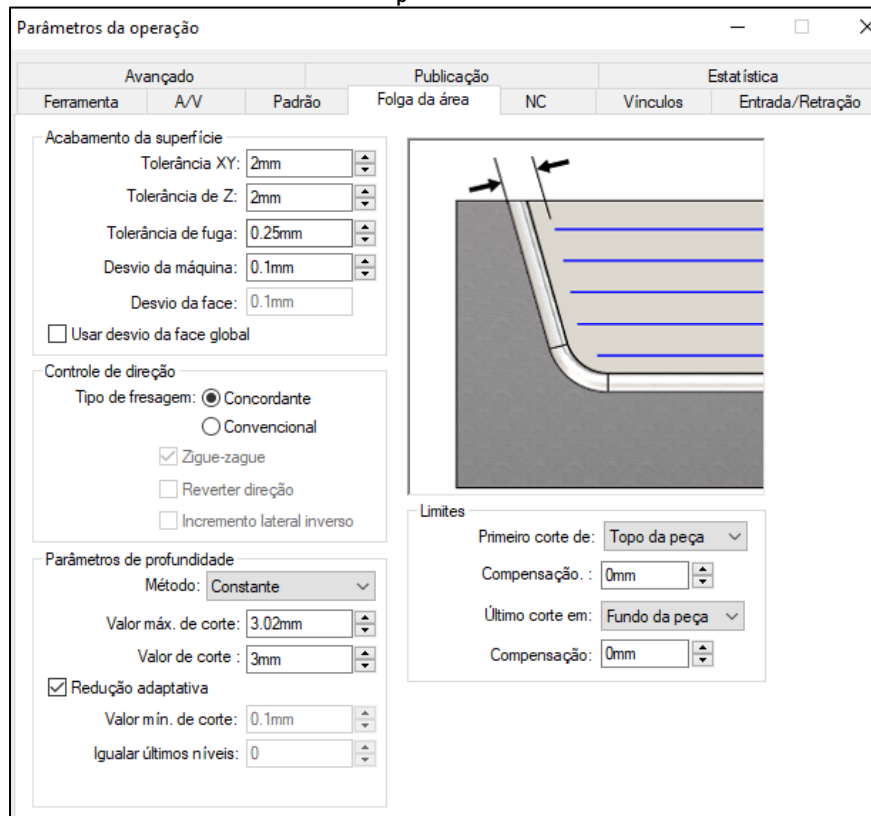
Fonte: Autora (2021)

3.7.7. Criação das trajetórias de fresamento para o Modelo 2 no SolidWorks CAM

Para gerar trajetórias de desbaste no Modelo 2, foi necessário converter a peça em um recurso multissuperfícies, selecionando todas as faces aonde o fresamento deveria ser realizado.

Após a conversão do modelo foi selecionada a operação de recursos multissuperfícies com estratégia *area clearance*, com tolerância de 0,1 mm, sobremetal radial e axial de 2,0 mm, passo radial de 20,0 mm e passo vertical de 3,0 mm, sem direção de corte definida. Para esta operação foi utilizada a fresa toridal de Ø 40,0 mm. A Figura 158 apresenta a tela de configuração dos parâmetros de corte.

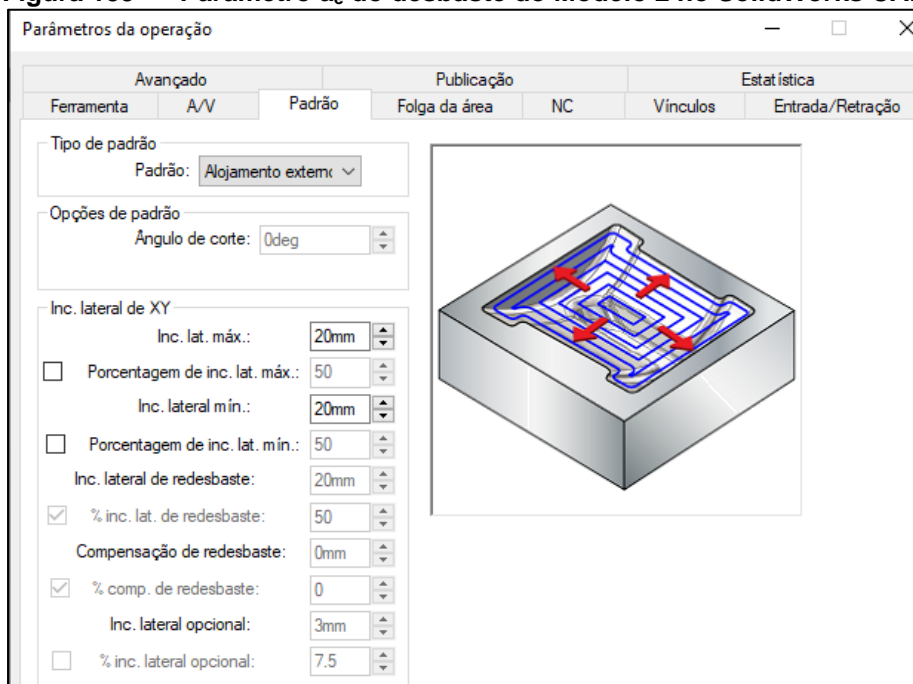
Figura 158 – Parâmetros de corte a_p desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 159 apresenta a tela de configuração do parâmetro de incremento lateral (a_e) para o fresamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM.

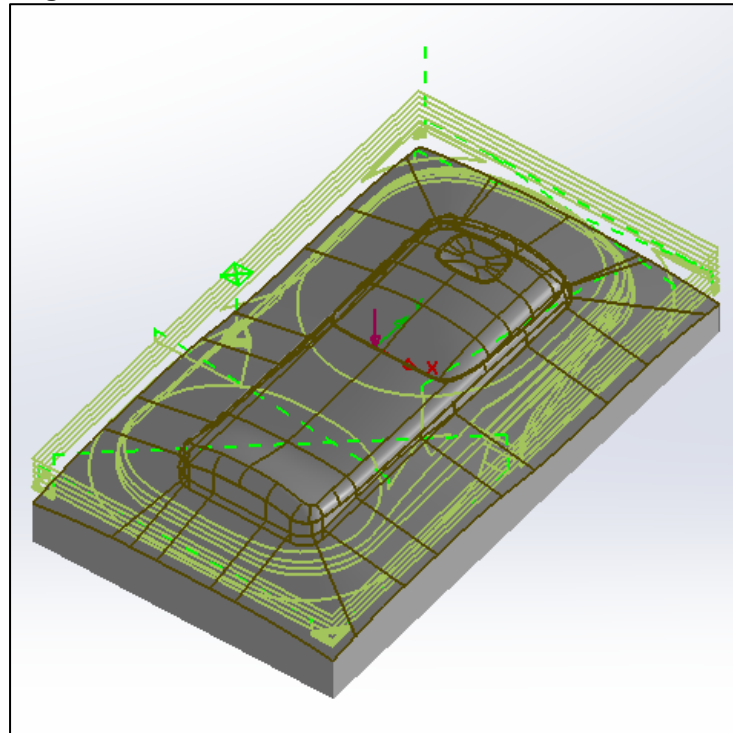
Figura 159 – Parâmetro a_e do desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 160 ilustra as trajetórias geradas para o desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM, com os parâmetros de corte definidos.

Figura 160 – Desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM

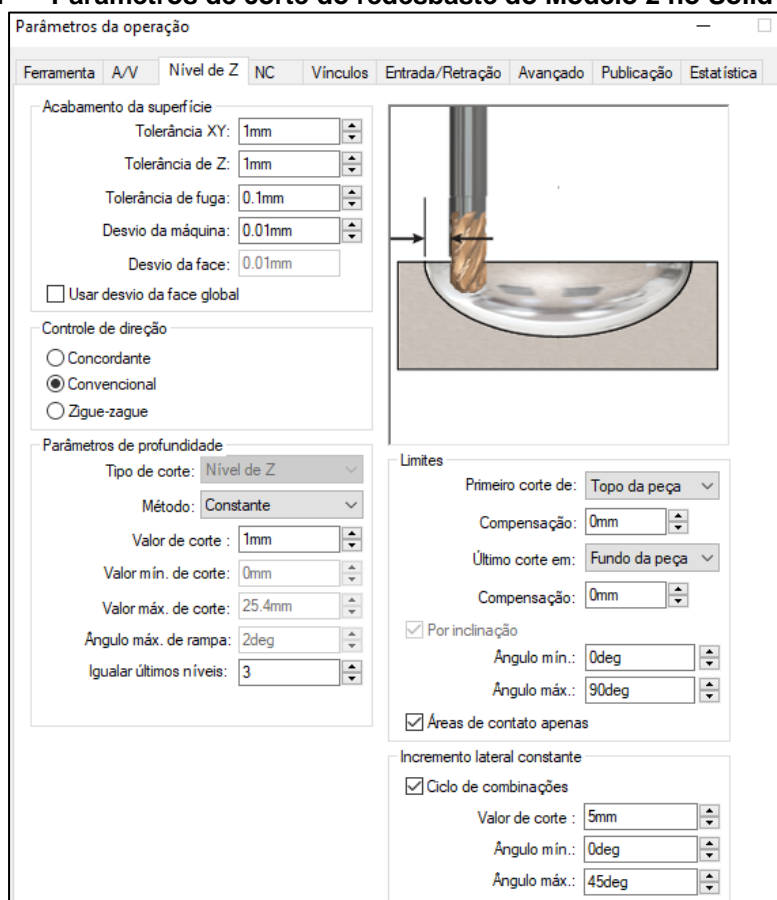


Fonte: Autora (2021)

Durante o processo de desbaste sobraram resíduos de material que foram usinados em uma segunda operação. Para o redesbaste foi utilizado o recurso multissuperfícies com estratégia nível Z, modificando o tipo de padrão para redesbaste.

Essa operação foi realizada com a ferramenta toroidal de \varnothing 8,0 mm, sobremetal de 1,0 mm nas direções axial e radial, passo lateral de 5,0 mm e o passo vertical de 1,0 mm. A Figura 161 apresenta a configuração dos parâmetros de corte.

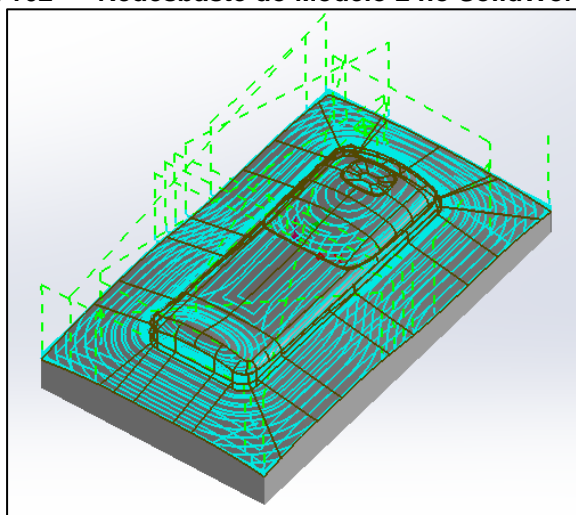
Figura 161 – Parâmetros de corte do redesbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 162 ilustra as trajetórias geradas para o redesbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM.

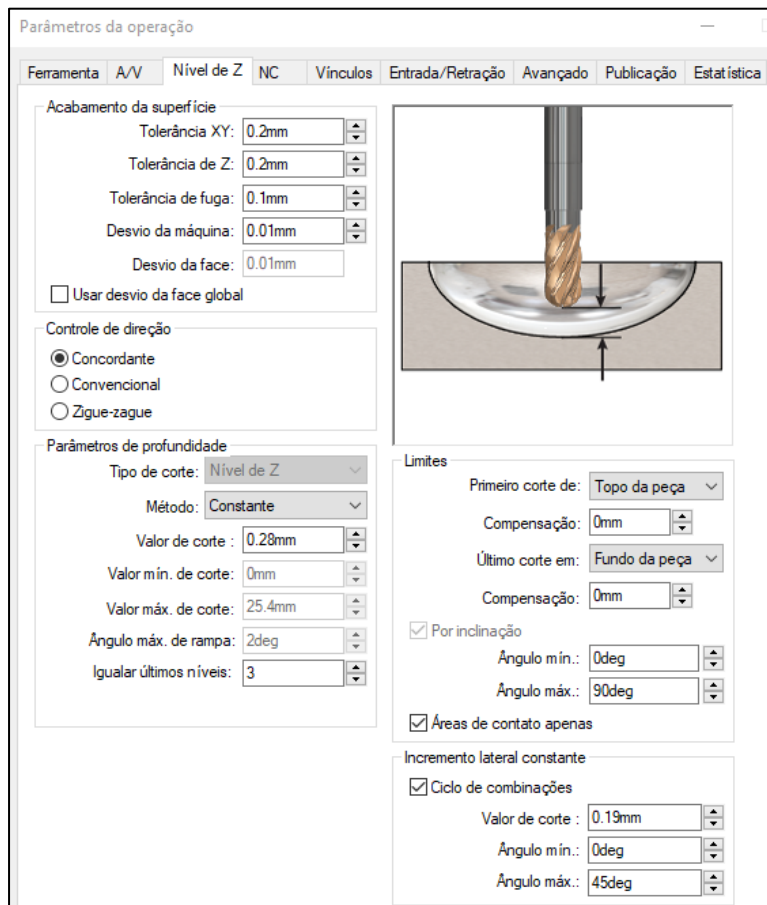
Figura 162 – Redesbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Para o Modelo 2 foi realizada apenas uma operação de fresamento para o acabamento, com a fresa de ponta esférica de \varnothing 4,0 mm, sendo possível fresar todas as faces da peça. A estratégia selecionada é uma cópia da operação de desbaste de recurso multissuperfície com estratégia de nível de Z, com corte concordante para acabamento, passo lateral de 0,283 mm, tolerância de 0,2 mm. A Figura 163 ilustra a janela de configuração dos parâmetros de corte.

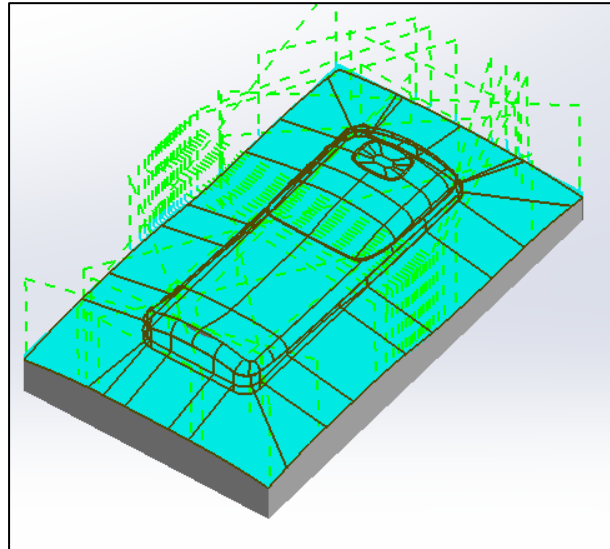
Figura 163 – Parâmetros de corte do acabamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

A Figura 164 ilustra as trajetórias geradas para o acabamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM.

Figura 164 – Acabamento do Modelo 1 no SolidWorks CAM



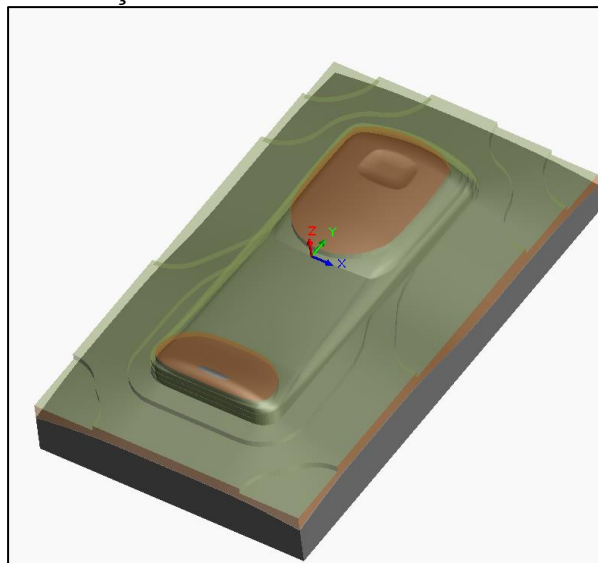
Fonte: Autora (2021)

3.7.8. Simulação das trajetórias de fresamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM

O processo de simulação aplicado no Modelo 2, foi realizado para detectar falhas nas trajetórias geradas, como por exemplo, percursos errados e colisões, para isso o modo de detecção para qualquer tipo de colisão foi ativado.

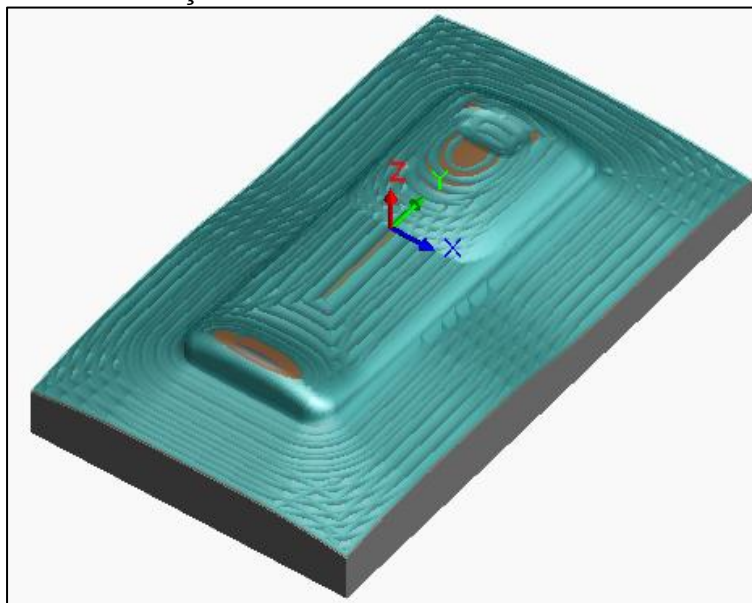
As Figuras 165 até 167 ilustram a simulação do fresamento, e cada área usinada é identificada por uma cor específica. Quando determinada região tem o processo de fresamento finalizado ela é representada por uma cor diferente.

Figura 165 – Simulação do desbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM



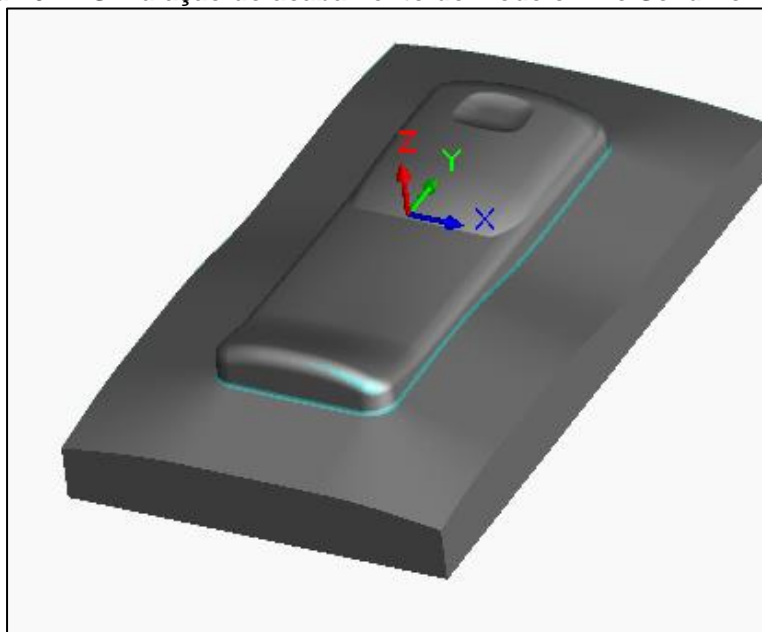
Fonte: Autora (2021)

Figura 166 – Simulação do redesbaste do Modelo 2 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

Figura 167– Simulação do acabamento do Modelo 2 no SolidWorks CAM



Fonte: Autora (2021)

3.7.9. Geração dos códigos CNC no SolidWorks CAM

Para a geração dos códigos CNC do Modelo 2 foi utilizado o pós-processador FANUC disponível na biblioteca de pós-processadores do SolidWorks CAM. Foram geradas 108146 linhas de código, para 3 operações. O tempo estimado do processo é de 52 minutos e 15 segundos, com comprimento de percurso percorrido pela

ferramenta de 244935,25 mm. A Tabela 7 resume as informações referentes aos processo de usinagem para o Modelo 2.

Tabela 7 – Características dos códigos CNC do Modelo 2 no SolidWorks CAM

Operação	Número de linhas	Tempo estimado de usinagem	Comprimento do percurso (mm)
Desbaste	911	2 min 8 s	10115,6
Desbaste de resíduo	9167	7 min 16 s	22197,2
Acabamento	98068	42 min 51 s	212622,45
Total	108146	52 min 15 s	244935,25

Fonte: Autora (2021)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões foram divididos em três sub sessões, que abrangeram os objetivos elencados na sessão introdutória deste trabalho. Foram analisados de maneira comparativa quantitativa os tempos de usinagem de fresamento para os processos aplicados aos Modelos 1 e 2, a quantidade de números de linhas geradas para cada operação e o comprimento do percurso gerado pela movimentação da ferramenta.

4.1. Análise do número de linhas geradas no código CNC

As estratégias de usinagem de fresamento escolhidas juntamente com os parâmetros de corte definidos para cada ferramenta e para o processo de usinagem, determinam as funções G que serão atribuídas ao programa CNC e o número de passes que serão gerados pelo pós-processador para que seja conferida à peça as dimensões especificadas no projeto 3D.

Cada *software* estudado nesse trabalho possui um conjunto de estratégias distintas em relação à quantidade de parâmetros editáveis, mas que possibilitam o mesmo resultado do fresamento.

4.1.1. Número de linhas geradas para o Modelo 1

O Quadro 8 resume as estratégias utilizadas no Modelo 1 em cada operação aplicada nos três *softwares* utilizados.

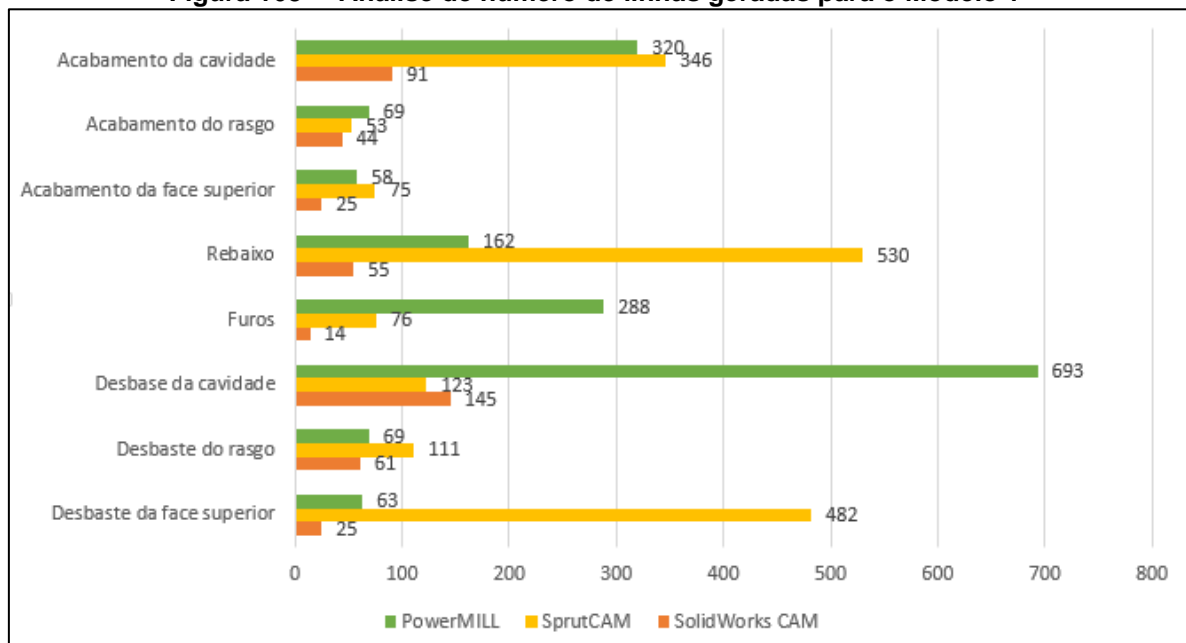
Quadro 8 – Estratégias de fresamento para o Modelo 1

Operação	PowerMILL	SprutCAM	SolidWorks CAM
Desbaste da face superior	Desbaste com usinagem plana <i>raster</i>	Faceamento com direção única	Fresa de face
Desbaste do rasgo	Desbaste de figura <i>offset total</i>	Desbaste de linha d'agua	Fresa de desbaste
Desbase da cavidade	Desbaste com <i>offset</i> do modelo	Desbaste de linha d'agua	Fresa de desbaste
Furos	Furação profunda	Furação	Furação com broca
Rebaixo	Acabamento Z constante em espiral	Fresamento de furos com ciclo fixo	Fresa de desbaste
Acabamento da face superior	Acabamento raster	Acabamento de faces planas	Fresa de face com corte de acabamento
Acabamento do rasgo	Acabamento de figura	Acabamento de linha d'agua	Fresa de desbaste com corte de acabamento
Acabamento da cavidade	Desbaste do modelo <i>offset total</i>	Acabamento de linha d'agua e de faces planas	Fresa de desbaste com corte de acabamento

Fonte: Autora (2021)

A Figura 168 apresenta graficamente a análise comparativa em relação número de linhas geradas para os códigos CNC para o Modelo 1.

Figura 168 – Análise de número de linhas geradas para o Modelo 1

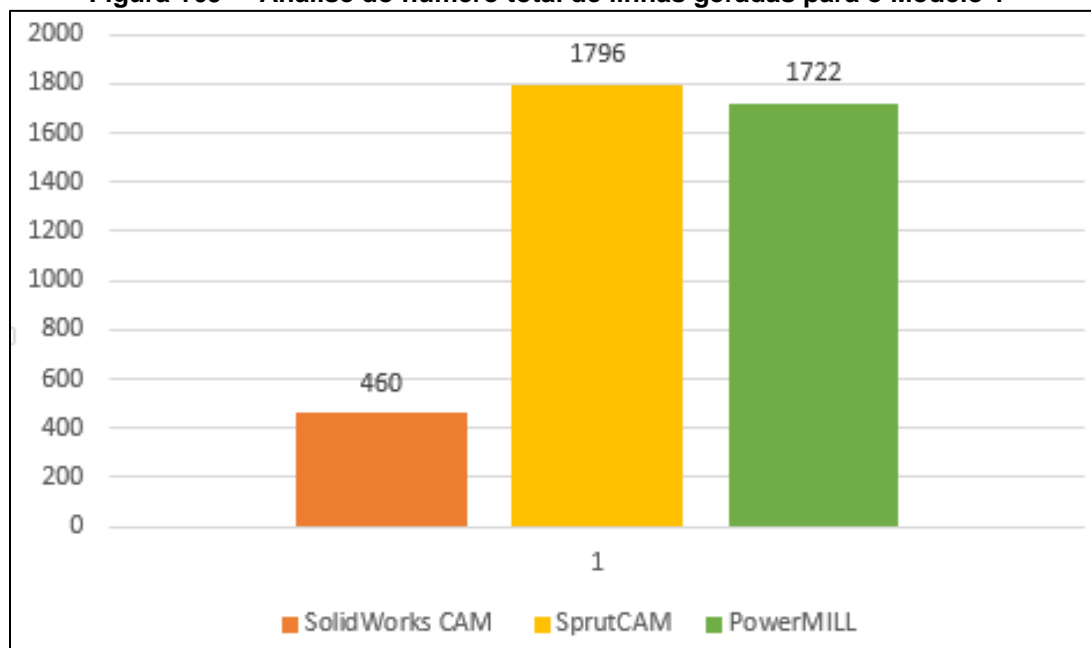


Fonte: Autora (2021)

Em relação ao número de linhas geradas para o Modelo 1 observou-se que o SolidWorks CAM gera apenas 25 % do total de linhas que os outros dois *softwares* geram, para reproduzir as mesmas operações de fresamento.

A Figura 169 apresenta graficamente a análise comparativa em relação número total de linhas geradas para os códigos CNC para o Modelo 1.

Figura 169 – Análise do número total de linhas geradas para o Modelo 1



Fonte: Autora (2021)

4.1.2. Número de linhas geradas para o Modelo 2

O Quadro 9 resume as estratégias utilizadas no Modelo 2 em cada operação aplicada nos três *softwares* utilizados.

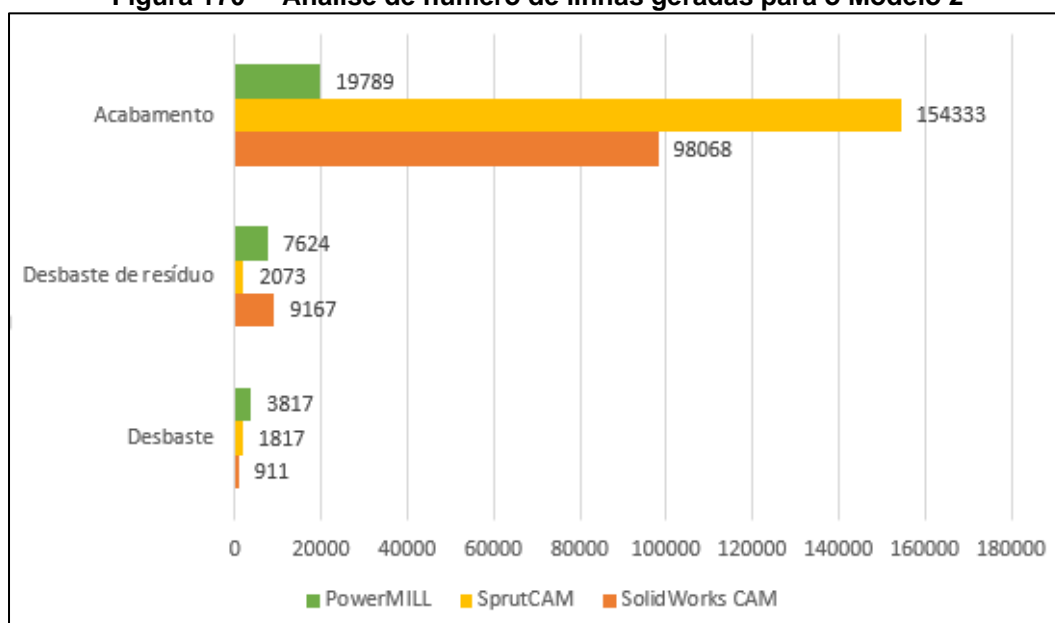
Quadro 9 – Estratégias de fresamento para o Modelo 1

Operação	PowerMILL	SprutCAM	SolidWorks CAM
Desbaste	Desbaste com usinagem plana <i>offset</i> do modelo	Desbaste de linha d'agua	<i>Area clearance</i>
Desbaste de resíduo	Desbaste com usinagem plana <i>offset</i> do modelo (resíduo)	Acabamento de linha d'agua	<i>Z level</i>
Acabamento	Acabamento Z constante otimizado	Acabamento em crista	<i>Z level</i>

Fonte: Autora (2021)

A Figura 170 apresenta graficamente a análise comparativa em relação número de linhas geradas para os códigos CNC para o Modelo 2.

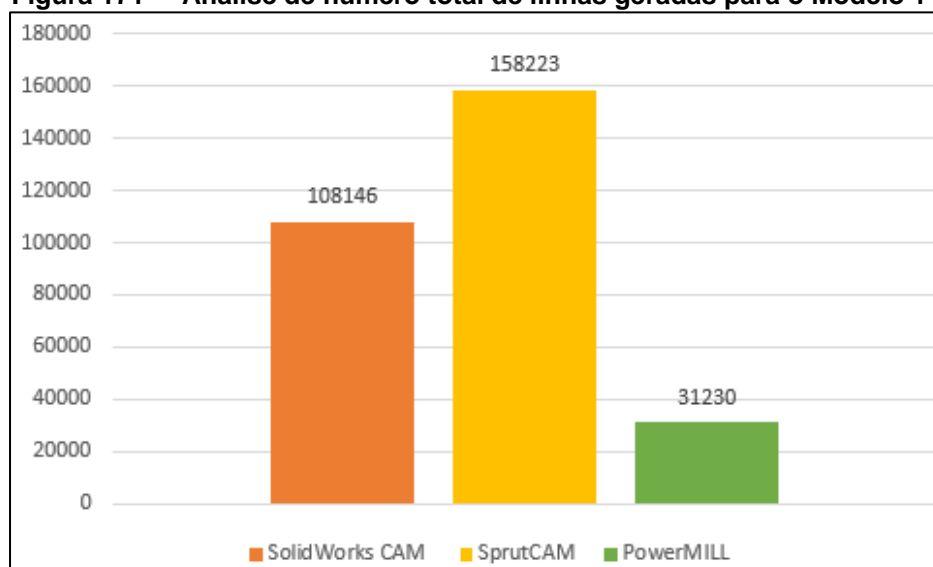
Figura 170 – Análise de número de linhas geradas para o Modelo 2



Fonte: Autora (2021)

A operação de acabamento nos três *softwares* é a operação que gera maior número de linhas. O código gerado pelo SprutCAM é 37 % maior em relação ao código gerado pelo PowerMILL e 88 % maior que o código gerado no SolidWorks CAM (Figura 171).

Figura 171 – Análise de número total de linhas geradas para o Modelo 1



Fonte: Autora (2021)

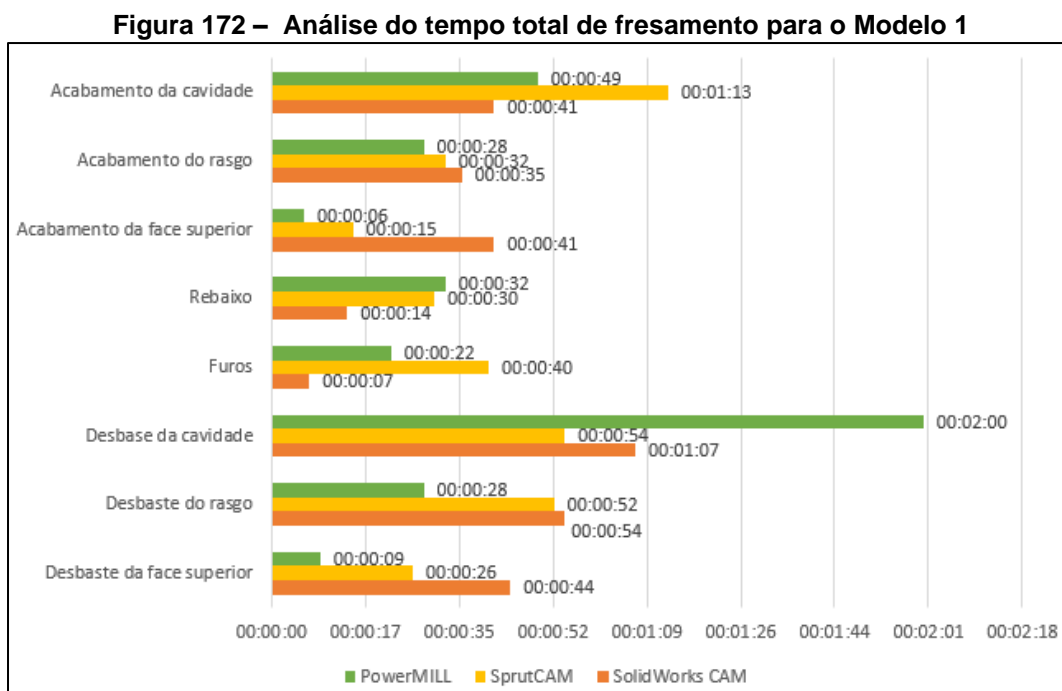
4.2. Análise do tempo de usinagem de fresamento

Assim como o número de linhas geradas no código CNC, o tempo de usinagem depende dos parâmetros de corte da ferramenta, da estratégia selecionada e dos parâmetros como passo lateral e axial, tolerâncias, tipos de corte e parâmetros de movimentação da ferramenta (rápido, mergulho, trabalho e retração por exemplo).

Os parâmetros definidos para cada operação, as ferramentas utilizadas e o número de operações foram programados nos três *softwares* igualmente, segundo os dados descritos na sessão 3.

4.2.1. Tempo de fresamento para o Modelo 1

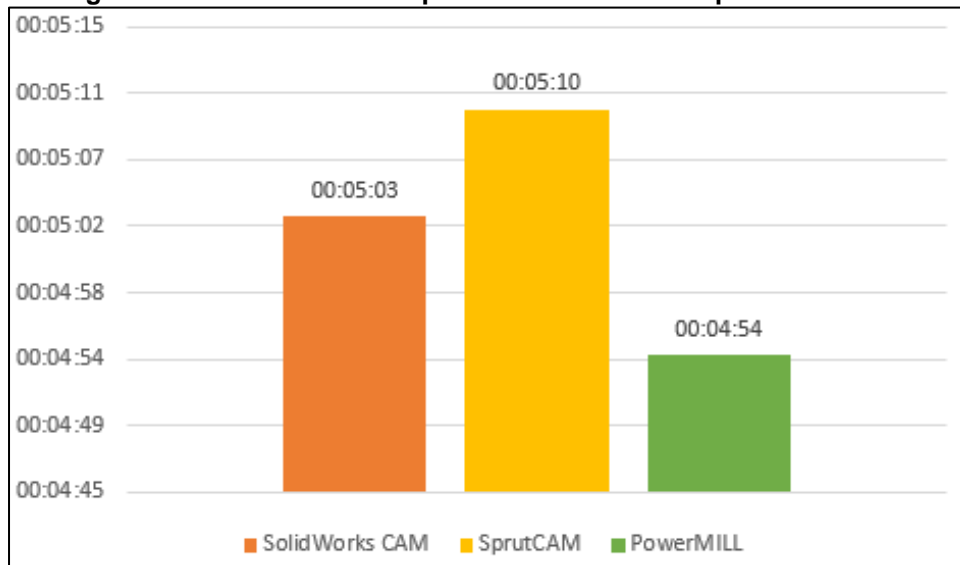
A Figura 172 apresenta a análise quantitativa dos tempos de cada processo para o Modelo 1.



Fonte: Autora (2021)

Os tempos de fresamento do Modelo 1 foram semelhantes nos três *softwares*. O SprutCAM apresentou tempo 6 % superior em relação aos outros dois *softwares* (Figura 173).

Figura 173 – Análise do tempo total de fresamento para o Modelo 1



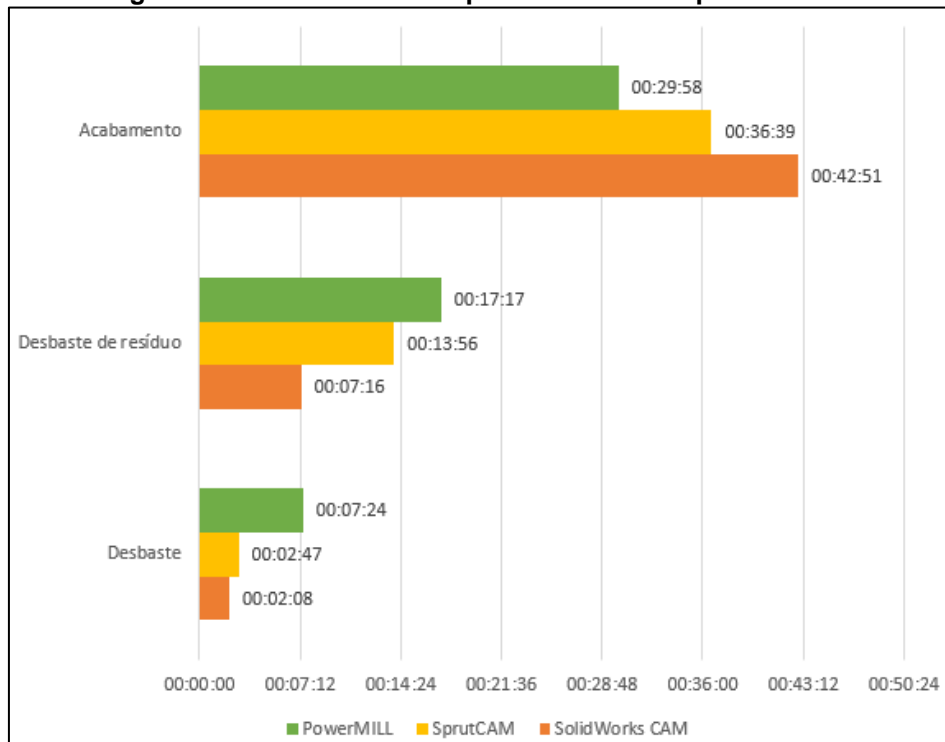
Fonte: Autora (2021)

Para o Modelo 1 todos os *softwares* apresentaram tempos parecidos de trabalho, a definição de parâmetros para geometrias mais simples (sem superfícies angulares), contribui para um baixo tempo de processo nesses *softwares*, devido a movimentações mais objetivas.

4.2.2. Tempo de fresamento para o Modelo 2

Os processos de acabamento representaram a maior parte do tempo de fresamento em todos os *softwares*. A Figura 174 apresenta a análise quantitativa dos tempos de cada processo para o Modelo 2.

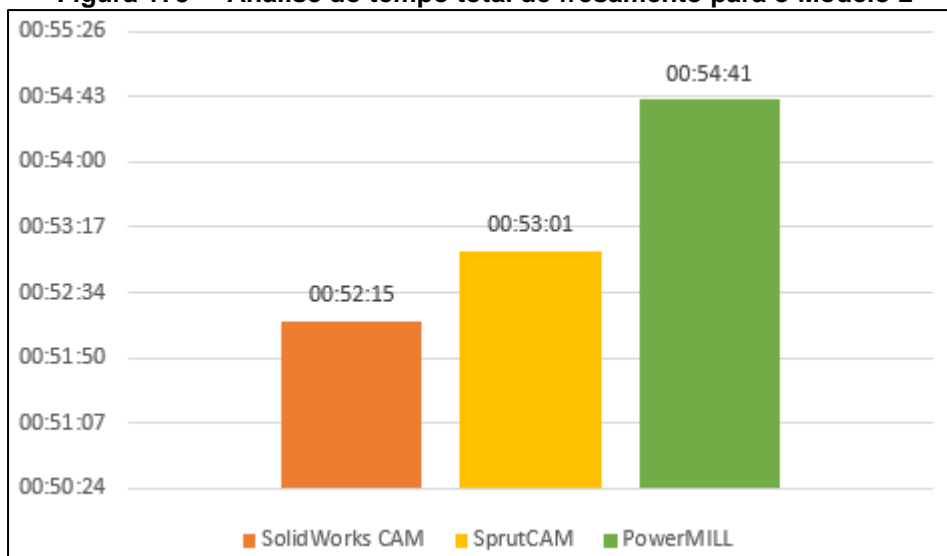
Figura 174 – Análise do tempo de fresamento para o Modelo



Fonte: Autora (2021)

A Figura 175 apresenta a comparação entre o tempo total de fresamento para cada *software*. A diferença de tempo de fresamento entre os três *softwares* foi menor que 3 minutos.

Figura 175 – Análise do tempo total de fresamento para o Modelo 2



Fonte: Autora (2021)

4.3. Análise do comprimento da trajetória da ferramenta

Os *softwares* de programação CNC possuem a funcionalidade de medir o comprimento da trajetória gerada pela ferramenta. Alguns sistemas fornecem informações sobre comprimento do percurso linear, angular, de movimento rápido e de trabalho efetivo.

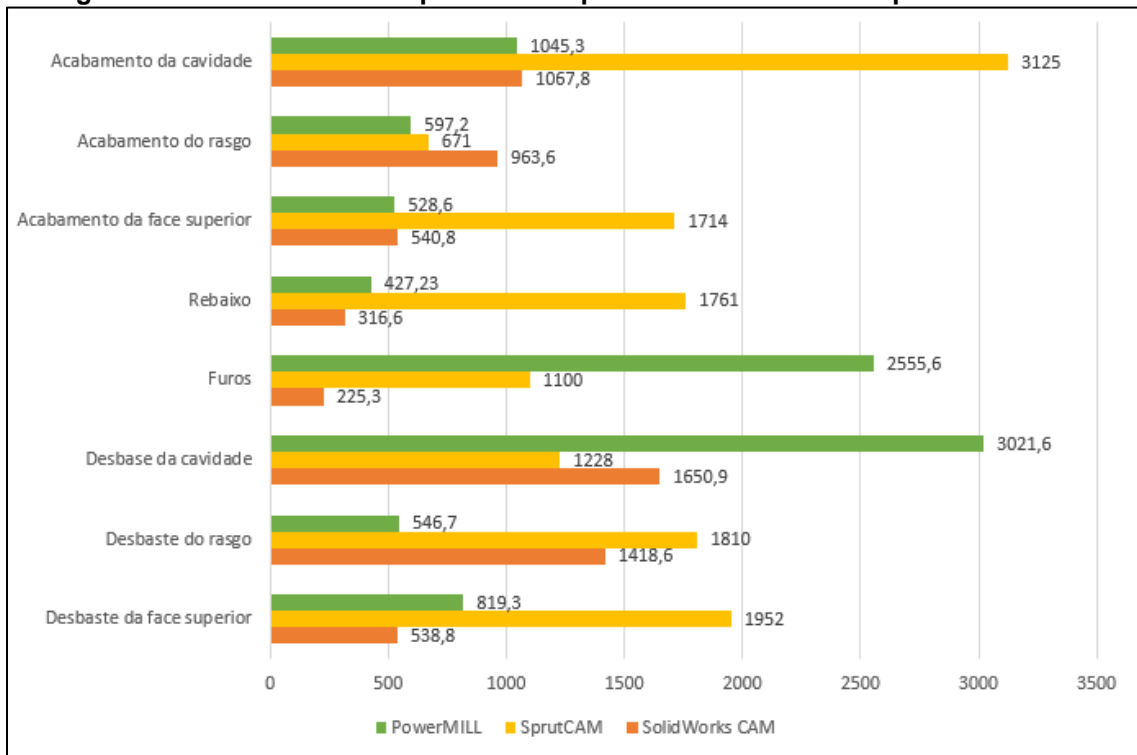
A maneira que esses dados são fornecidos varia, o PowerMILL possui uma janela de dados estatísticos do processo para cada operação definida. Essa janela não fica aparente, deve ser acessada toda a vez que se deseja ter informações do processo. No SprutCAM esses dados aparecem em uma tela de mensagens quando o *mouse* passa por uma operação da árvore de projetos. No SolidWorks CAM esses dados são fixados no ambiente de projeto, e são exibidos conforme a operação que está selecionada.

Para todos os *softwares* os dados são atualizados assim que uma nova trajetória é criada. Além de informações sobre o comprimento do percurso, são disponibilizadas informações sobre o tempo de processo, número de linhas de código, velocidades entre outros dados.

4.3.1. Comprimento da trajetória da ferramenta do Modelo 1

Para o Modelo 1 as operações de acabamento e desbaste da cavidade geraram os maiores percursos, não impactando de maneira significativa o tempo de usinagem. A Figura 176 apresenta a análise quantitativa dos comprimentos de cada processo para o Modelo 1.

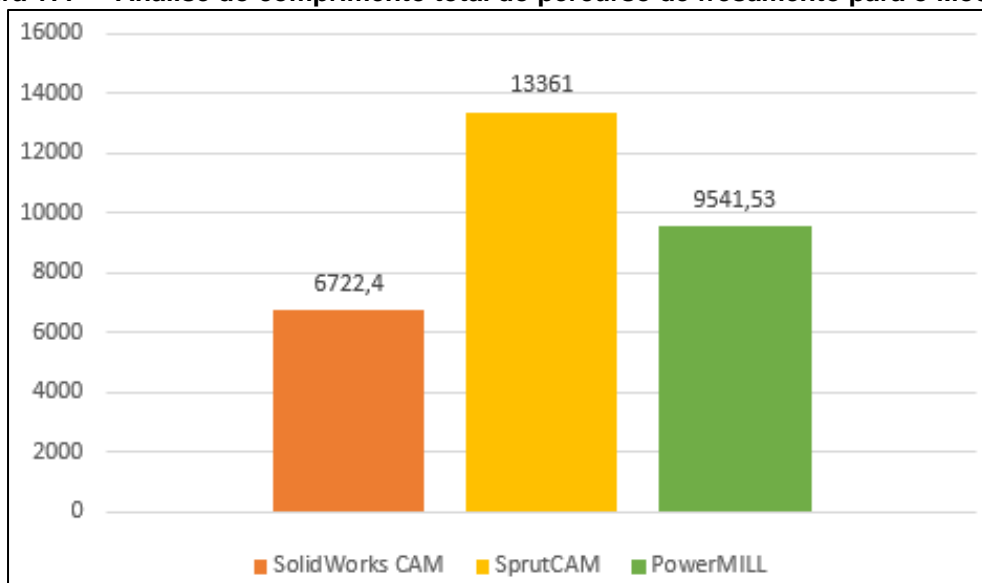
Figura 176 – Análise do comprimento do percurso de fresamento para o Modelo 1



Fonte: Autora (2021)

Para a maioria das operações do Modelo 1 o SolidWorks CAM gerou percursos curtos, visto que o módulo *standard* utilizado nesse experimento limita as configurações de estratégias de corte e movimentação (Figura 177).

Figura 177 – Análise do comprimento total do percurso de fresamento para o Modelo 1

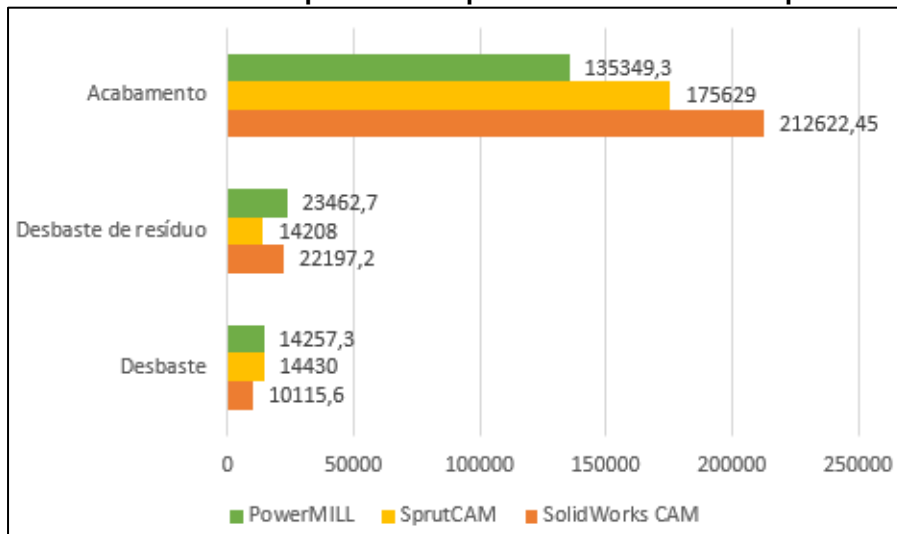


Fonte: Autora (2021)

4.3.2. Comprimento da trajetória da ferramenta do Modelo 2

O padrão de comprimento gerado para o Modelo 2 foi diferente em relação ao Modelo 1. Quando observamos os dados do SolidWorks CAM (Figura 178), apenas para o acabamento o comprimento da trajetória foi maior, devido ao *software* não disponibilizar uma estratégia de acabamento de superfície eficiente.

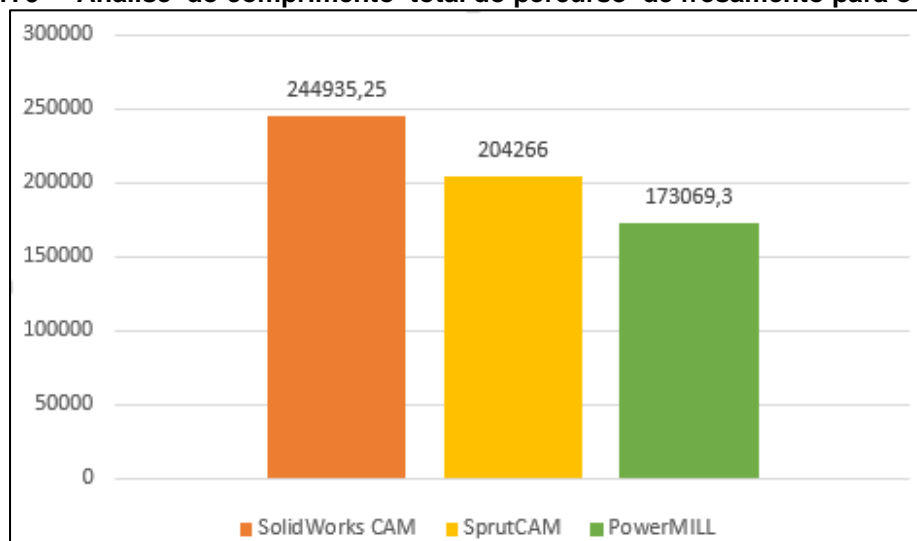
Figura 178 – Análise do comprimento do percurso de fresamento para o Modelo 2



Fonte: Autora (2021)

Para o Modelo 2 a operação de acabamento em superfícies, por ser mais complexa impactou o comprimento do percurso de fresamento da peça, principalmente para o SolidWorks CAM (Figura 179).

Figura 179 – Análise do comprimento total do percurso de fresamento para o Modelo 2



Fonte: Autora (2021)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da criação dos programas para os experimentos, foi possível aprofundar o conhecimento sobre operações de usinagem de fresamento, tipos de estratégias disponíveis e funcionamento dos sistemas CAM.

Com o objetivo de comparar quantitativamente o desempenho dos sistemas de CNC foram utilizadas duas peças com geometrias bem distintas, mas fabricadas a partir do mesmo material. Cada peça foi simulada mantendo-se as mesmas ferramentas, parâmetros de corte, operações de fresamento, máquina-ferramenta e pós-processador.

Observando os dados obtidos pode-se afirmar que para a programação de peças mais simples o SolidWorks CAM *standard* apresenta bom desempenho, pois a integração CAD/CAM é mais rápida, facilitando a programação através do uso de reconhecimentos automáticos de padrões geométricos e geração automática de operações e percursos. Além disso, para o SolidWorks CAM obteve-se percursos curtos, com tempo de usinagem satisfatório.

Para peças com geometrias complexas, com elementos de superfícies, o SolidWorks CAM não apresentou bons resultados para a versão *standard* do sistema, pois não foi possível ter um bom controle das trajetórias da ferramenta gerando resíduo de material na peça.

Em relação ao SprutCAM pode-se afirmar que apesar do comprimento de percurso ser maior em relação aos outros *softwares*, isso não se reflete no tamanho do código gerado nem no tempo de usinagem. O *software* possui interface simples, mas com diversas opções de controles de parâmetros, sendo uma boa opção para segmentos que necessitam de processos rápidos de usinagem por fresamento, mas não abrem mão da qualidade do processo.

Analisando os dados obtidos em relação do PowerMILL, pode-se afirmar que é um sistema robusto de programação e simulação para operações de fresamento. O sistema permite controle de diversas variáveis do processo, com diferentes estratégias que suprem as necessidades de qualidade superficial e dimensional das peças. Com um controle maior do processo e maior número de parâmetros de entrada para esse experimento o *software* gerou mais trajetórias o que implicou em mais tempo de usinagem.

Apesar do tempo de fresamento ter sido maior para esse sistema no Modelo 2, indústrias que têm como prioridade a qualidade do processo de fresamento devem apostar no PowerMILL.

O número de linhas difere entre os *softwares* visto que cada um usa uma função diferente para realizar a operação. Mesmo que o resultado que elas geram seja o mesmo, ou minimamente diferente, as funções matemáticas que cada *software* usa varia, afetando diretamente o número de linhas de código.

Em relação as trajetórias geradas, apesar dos parâmetros de corte usados serem iguais para todos *softwares*, elas não possuem o mesmo comprimento. Essa diferença é devido aos métodos do cálculo das trajetórias usados. Cada *software* aplica um tipo de método para calcular seus pontos CC e CL que são as informações utilizadas para a geração das trajetórias da ferramenta.

O Quadro 10 apresenta em comparativo final entre os três *softwares*, considerando os dois modelos utilizados nesse trabalho. As notas aplicadas baseiam-se nos resultados obtidos no processo experimental e na minha experiência como usuária e variam de 1 estrela (avaliação muito negativa) até 5 estrelas (avaliação muito positiva).

Quadro 10 – Comparativo final entre os softwares

Software	Número de linhas de código CNC	Comprimento das trajetórias	Tempo de fresamento	Facilidade de uso	Interface gráfica	Opções de configuração
PowerMILL	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★	★★★	★★★★★
SprutCAM	★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
SolidWorks CAM	★★★	★★★	★★★★★	★★★	★★★	★★★

Fonte: Autora (2021)

Os objetivos pospostos para esse trabalho foram cumpridos, e abriram espaço para novos estudos, mais direcionados, com possibilidade de experimentação prática, e análise da peça em laboratório. Em um primeiro momento, esse era o escopo principal desse trabalho, mas devido as restrições impostas pela pandemia, essas atividades que demandavam trabalho presencial no IFSC não puderam ser executadas.

Como sugestão para próximos trabalhos devem ser feitas simulações variando as estratégias de operações que cada sistema oferece, para a identificação das melhores estratégias para cada tipo de geometria, requisito de projeto e fabricação. Outra sugestão é a realização prática do experimento, possibilitando a análise real

dos códigos gerados e a análise de parâmetros dimensionais e superficiais dos modelos fresados.

6. REFERÊNCIAS

- ALVARES, A. J.; **Uma metodologia para integração CAD/CAPP/CAM voltada para manufatura remota de peças rotacionais baseada na internet**. 2005. 329 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- AMORIM, H. J.; **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- ARIAS, M. L.; **Análise do comportamento de diferentes sistemas CAM na usinagem de superfícies complexas utilizando altas velocidades**. 2009. 100f f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Sociedade Educacional de Santa Catarina Instituto Tupy, Joinville, 2009.
- ARIAS, M.L.; SOUZA, A. F.; **Descrição matemática das funções *Spline***. Máquinas e Metais. v 507, p 290-311, 2008.
- BREAZ, R. et al. ***Using serial industrial robots in CNC milling processes***, 2015. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/291336878_Using_Serial_Industrial_Robots_in_CNC_Milling_Procesess> Acesso em: 14 mar. 2021.
- CAMARGO, L. G.; **Desenvolvimento de um modelo cinemático dos centros de usinagem CNC para revisão do tempo de fresamento de formas complexas com interpolação linear**. 2017. 103 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- CAVICHIOILLI, F.; **Acabamento dos raios de canto sem vibração**. Mundo da Usinagem. Disponível em: < <https://omundodausinagem.com.br/o-desafio-da-usinagem-de-cantos/> >. Acessado em: 03 de março de 2021.
- COMAC. **Conheça mais sobre o SprutCAM**, 2017. Disponível em:
<<http://comacbr.com/sprutcam/>> Acesso em: 20 março 2021.
- CORRÊA, W. S.; **Análise da viabilidade do emprego de sistemas CAD/CAM na fabricação de cavidades para moldes de injeção em plataformas PC com estudo de casos**. 1995. 134 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- CRUZ, E. M.; **Sistemas CAD/CAM na odontologia**. 2018. 47 f. TCC (Graduação) – Curso de Odontologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- DIAS, A.; **Representação Matemática de Curvas**. 2015. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015

DERECICHEI, L., CODRUTA, L., CHEREGI, G.; **Issues related to the use of SprutCAM in wood processing**. Annals of the University of Oradea, Fascicle: Environmental Protection. Vol. XXXI, 2018. Oradea, Romania.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V.. **DIN 8560: Manufacturing Process – Terms and Definitions**. Germany, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V.. **DIN 66025: Numerical control of machines, format; general requirements**. Germany, 2005.

DOBLER, J. K.; **Estudo comparativo de estratégias de usinagem na fabricação de um molde de alumínio**. 2014. 73 f. TCC (Graduação), Universidade Regional do Nordeste do Rio Grande do Sul, 2014.

FILHO, M. S. S.; **Fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes de injeção através de sistema CAD/CAM**. 2000. 133f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

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

GROOVER, M. P.; **Automação Industrial e sistemas de manufatura**. 2011. 3 ed. São Paulo, SP. Pearson Prentice Hall, 2011.

HOLZMANN, H. A.; **Uso do software CAM em auxílio a estimativa de custos de fabricação na fase inicial do desenvolvimento de produtos poliméricos injetados**. 2014. 143 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

ISO 6983/1; **International Organization for Standardization -Numerical control of machines Program format and definition of address words** – Part 1: First edition, 15/09/1982.

LEE, K.; **Principle of CAD/CAM/CAE systems**.1999. Addison Wesley Longman.ISBN 0-201-38036-6.

LENCIA, D. C.; **Manufatura Assistida por Computador**. 2020. DAMM- Instituto Federal de Educação de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

MACHADO, A. R. SILVA, M. B.; **Usinagem dos metais**. 2004. 262 f. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 8ª versão, 2004.

MACHADO, A. R. et al.; **Teoria da usinagem dos materiais**. 2015. p. 18. 3 ed. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo.

MISRA, B.; SUNDARARAJAN, V.; WRIGHT, P. K.; **Zig-zag tool path generation for sculptured surface finishing**. 2008. Department of Mechanical Engineering. University of California Berkeley, 2008.

OLIVEIRA, M. C. F; MINGHIM, R.; **Representação de objetos tridimensionais**. 2018.

PEREIRA, T. C. P.; **Indústria moveleira no Brasil e os fatores determinantes das exportações**. 2009. 104 f. TCC (Graduação) – Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

POWERMILL; **Treinamento Básico 2013**. 2013. DELCAM PLC.

ROMI; **Manual de Programação e Operação Linha ROMI D – CNC FANUC 0i M**. Santa Barbara d'Oeste, 2017.

ROSSO JR, R. S. U.; NEWMAN, S. T.; **Estrutura de Dados para Sistemas CAD/CAM aderente à STEP**. 2003. In: Proceedings of VI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica – Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

SANDIVIK; **Ferramentas Rotativas**. 2020.

SBARDELOTO, V. G.; **Projeto, fabricação e integração de eixo rotativo em fresadora CNC controlada pelo LINUXCNC**. 2017. 79 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecatrônica, Instituto Federal de Educação de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

SCHAFFER, L. ESPINOZA, M.; **Uso do CAD/CAE/CAM na produção de matrizes para os processos novos de conformação mecânica**. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG Vol. 7, N.º 14, 84-91 (2004) Universidad Nacional Mayor de San Marcos ISSN: 1561-0888 (impresso) / 1628-8097 (eletrônico)

SCHÜTZER, K, HELLENO, A. L.; **Influência da Interpolação Spline Sobre a velocidade de avanço da manufatura de superfícies complexas**. In: Congresso Brasileiro de Fabricação, 2007.

SCHÜTZER, K.; SOUZA, A.F.; **Introdução do Processo HSC na Indústria Brasileira**. 1999. 105 f. Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Barbara d'Oeste, 1999.

SOUZA, A. F.; **Padrões Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geométrica em Centros de Usinagem**. 2000. 210 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SOUZA, A. F.; **Análise de interpolação de trajetórias de ferramentas na usinagem HSC (High Speed Cutting) em superfícies complexas**. 2001. 105 f. Dissertação (Pós-

graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2001.

SOUZA, A. F.; **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**. 2004. 189 f. Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SOUZA, A. F.; COELHO, R. T.; **Tecnologia CAD/CAM – Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril**. 2013. In: XXIII Encontro Nac. De Eng. De Produção. Ouro Preto, Brasil.

SOUZA, A. F.; COELHO, R. T.; ***Spline Polynomial to Describe a Free Form Tool Path for High Speed Milling***. 2007. 19th International Congress of Mechanical Engineering Brasília.

SOUZA, A. F.; SCHUTZER, K.; ***Interpolating Free Form Tool path for High Speed Cutting Technology***. 2001. In: 7th International Scientific Conference on Production Engineering-CIM 2001. Zagreb, Croatia.

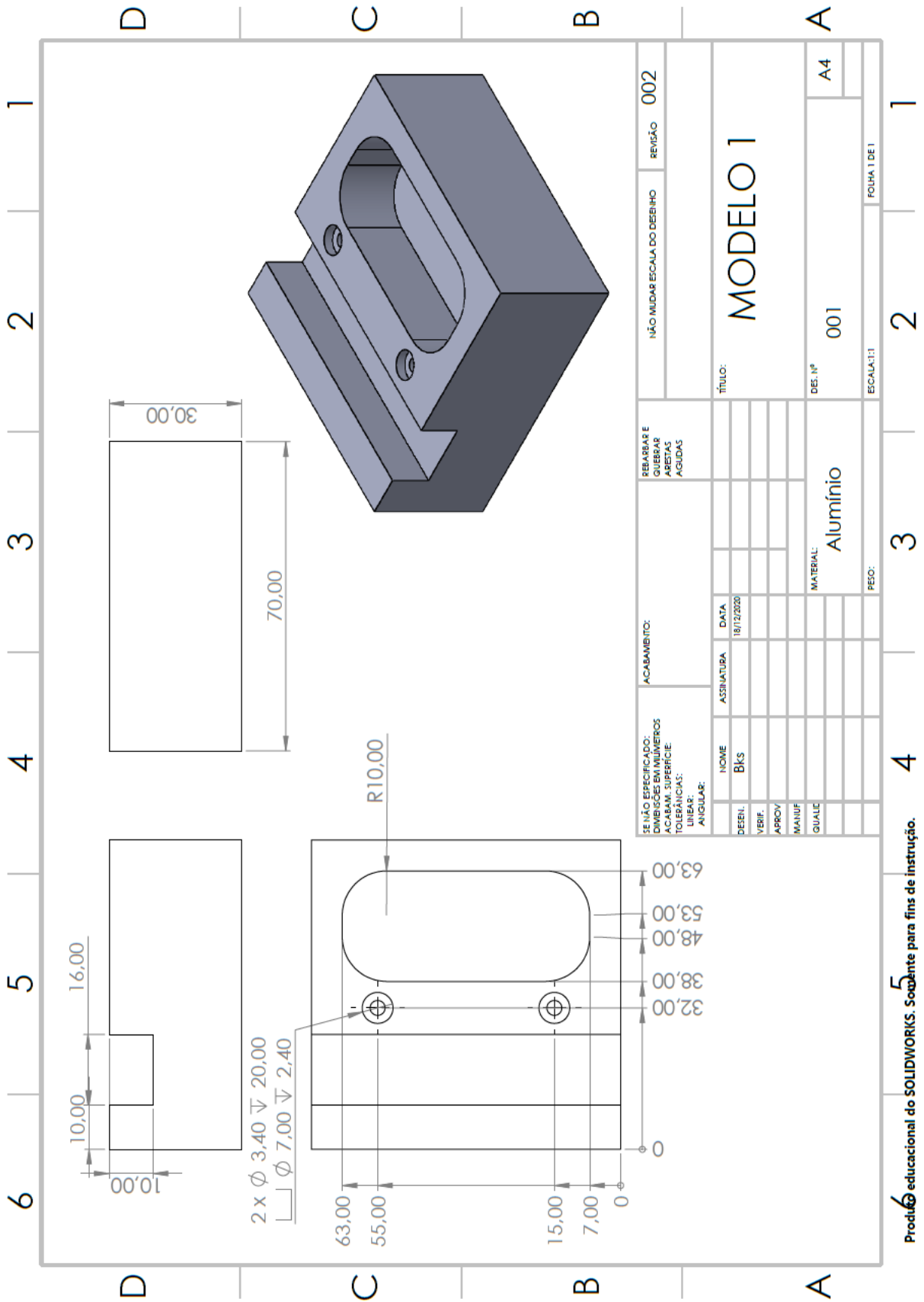
SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L.; **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC**. 2013. 2 ed São Paulo: Artliber, 2013.

SOUZA, A. F.; et al.; **Efeitos da Variação de Tamanho Excessivo devido ao uso de 2 eixos 1/2 em Operações de Acabamento**. 2008. Instituto Superior Politécnico José Antonio Encheverría. Cuba, 2008.

TAO C.; ZHILIANG S.; **A tool path generation strategy for three axis ball-end milling of free-form surfaces**. 2008. Journal of materials processing technology.

WEINERT, K.; GUNTERMANN, G.; **Usinagem de superfícies complexas**. 2000. 18-27 f. Máquinas e Metais, São Paulo, v.36, n.415, p.18-27.

7. ANEXO I – DESENHO TÉCNICO DO MODELO 1.



REBARBAR E QUEBRAR ARISTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	002
ACABAMENTO:		TÍTULO:		MODELO 1	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIVISÕES EM MILÍMETROS		DESENH.		DESENH. N.º	
ACABAM. SUPERFÍCIE:		VERIF.		001	
TOLERÂNCIAS: LINEAR:		APROV.		MATERIAL: Alumínio	
ANGULAR:		MANUF.		ESCALA: 1:1	
NOME: BKS		DATA: 18/12/2020		FOLHA 1 DE 1	
ASSINATURA:		MATERIAL: Alumínio		ESCALA: 1:1	
FEZO:		MATERIAL: Alumínio		ESCALA: 1:1	

Produto educacional do SOLIDWORKS. Disponível para fins de instrução.