UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMATIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO VIA CAM DO FRESAMENTO DE CAVIDADES DE MOLDES PARA PEÇAS INJETADAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDREI ZWETSCH CAVALHEIRO

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1998.

SISTEMATIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO VIA CAM DO FRESAMENTO DE CAVIDADES DE MOLDES PARA PEÇAS INJETADAS

ANDREI ZWETSCH CAVALHEIRO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.
ORIENTADOR

Prof. Júlio César Passos, Dr.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Áureo Campos Ferreira, Ph.D.
PRESIDENTE

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Prof. Walter Lindolfo Weigaertner, Dr.-Ing.

Aos meu pais, Odilon e Elaine

Ao meu irmão, Julian (Alemão)

À minha namorada, Lenise.

AGRADECIMENTOS

Ao Caíco, pela compreensão, atenção, orientação e amizade.

A Aurélio "Lelo", Mariano, Angelo, Rodrigo "Netscape" e Alexandre pela indispensável ajuda no desenvolvimento e elaboração deste trabalho, assim como aos demais colegas que passaram pelo CIMJECT durante o período em que realizei meu mestrado, Braida "Tubarão", Marcelo "Malone", Marlus "Dr. Jorge, Marlus Sem Alça, Igor", Akira "Pocahontas", Lafratta "Lafruta", Ricardo "Tetê", Ricardo "Formigão", Vinícius, Gustavo "Muzzy", Alecsey "Véio", Andrey "Novo", Felipe "Padrão", Rodolfo Paes, Rodolfo Vidotto, Luiz Fernando "Zé", Augusto "Xuxu", Cristóvão "Cristo" (e seu fiel escudeiro Tarquinio), George "Jó", Daniel e Clênio, pelo espírito de grupo, descontração, amizade e por terem tornado nosso ambiente de trabalho o melhor pelo qual já passei.

Ao pessoal da Multibrás e do CMPJ, especialmente a Alexandre, Henriette, Christiano, Luciana, Richard, Danielly, Bernardo, Mário "Catatau", Pedro, Arnaldo, Gebran "Gebra, Siri" e Ricardo, Andersson "Barra Velha", Naas e Gilberto pelo aprendizado, colaboração com meu trabalho e receptividade.

Ao "Jeff", pelas valiosas discussões técnicas e etílicas.

Ao professor Rolando Vallejos, da Universidade de Caxias do Sul.

Aos professores Wagner, Assis, Bork e Adair, diretores e coordenadores da ETFPEL / UNED Sapucaia do Sul, pelo incentivo ao meu trabalho.

A todos os colegas da UNED, especialmente a, João Antônio, Genísia e Gladimir da UNED, por terem "quebrado um baita galho" sempre que precisei cumprir minhas tarefas em Florianópolis.

A Diovani "Lagarto", Jony "Tigrão", Peixoto e Albert "Batata", por terem me agüentado como companheiro de apartamento.

Ao Ilhéu, Cantuária, e El Cabrón, lugares que muitas vezes proporcionaram a recuperação das energias e apoio moral para o trabalho.

A todos os meus amigos, colegas e parentes, pelo apoio dado em todos os momentos

E, especialmente, à cidade de Florianópolis, por realmente ser a "Ilha da Magia".

ÍNDICE ANALÍTICO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS xii
LISTA DE QUADROS xiv
SIMBOLOGIA xvi
RESUMO xviii
ABSTRACT xix
1 INTRODUÇÃO **1**
1.1 ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 1
1.2 DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO 5
1.3 OBJETIVOS 6
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 7
2 SISTEMAS CAM COMERCIAIS PARA FRESAMENTO EM 2½ E 3 EIXOS **9**
2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS *SOFTWARES* DE CAM 9
2.1.1 Quanto ao número de eixos no fresamento 9
2.1.2 Quanto aos tipos de representação geométrica dos modelos 10
2.1.3 Quanto à integração com os recursos de modelamento 11
2.1.4 Quanto à plataforma 14
2.2 SISTEMAS CAM SELECIONADOS PARA ESTUDO DETALHADO DE PARÂMETROS E ESTRATÉGIAS 15
3 CONSIDERAÇÕES SOBRE PROGRAMAÇÃO DO FRESAMENTO DE MOLDES VIA CAM **17**
3.1 DEFINIÇÃO E PREPARAÇÃO DO PROCESSO 19
3.2 PREPARAÇÃO DA GEOMETRIA PARA A PROGRAMAÇÃO DO FRESAMENTO 21
3.3 GERAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS 23
3.3.1 Criação do bloco 23
3.3.2 Considerações sobre a seleção de ferramentas 24
3.3.3 Indicação da ferramenta a ser utilizada pela operação 25
3.3.4 Especificação dos parâmetros de corte para a ferramenta selecionada 28
3.3.5 Determinação dos movimentos globais da ferramenta – seleção da estratégia 29
3.3.6 Seleção da área a ser usinada 30
3.3.7 Parâmetros relativos ao posicionamento e aos movimentos locais da ferramenta 34
3.4 VERIFICAÇÃO 43
3.5 CORREÇÕES E MODIFICAÇÕES – EDIÇÃO POSTERIOR 46

3.6 ETAPAS FINAIS 47
4 ESTRATÉGIAS PARA FRESAMENTO EM 2½ E 3 EIXOS 51
4.1 MÉTODOS E ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS 51
4.1.1 Pontos gerados pelo CAM 51
4.1.2 Tipos de interpolação 52
4.1.3 Algoritmos para geração de trajetórias em 2½ eixos para modelos 2½D 54
4.1.4 Algoritmos para geração de trajetórias em 2½ eixos para modelos 3D . 55
4.1.5 Algoritmos para geração de trajetórias em 3 eixos para modelos 3D 56
4.1.6 Problemas e defeitos na geração de trajetórias 61
4.1.7 Estratégias para fresamento de geometrias 2D e 2½D 64
4.1.8 Estratégias para fresamento de geometrias 3D 65
5 ORIENTAÇÕES E PROCEDIMENTOS PARA O PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO VIA CAM DO FRESAMENTO 3D DE MOLDES 78
5.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES 78
5.1.1 Considerações quanto a termos empregados no capítulo 82
5.1.2 Interpretação dos quadros sistematizadores 84
5.2 ORIENTAÇÃO PASSO A PASSO PARA O PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DO DESBASTE 86
5.2.1 Planejamento das operações 86
5.2.2 Escolha da ferramenta 88
5.2.3 Delimitação da área da usinagem 91
5.2.4 Definição do sobrematerial 93
5.2.5 Especificação da tolerância 93
5.2.6 Seleção da estratégia - movimentos globais 94
5.2.7 Definição da altura dos patamares de corte 97
5.2.8 Escolha do ponto inicial 100
5.2.9 Especificação dos planos de segurança e início 100
5.2.10 Definição do incremento lateral 101
5.2.11 Escolha da orientação da varredura 102
5.2.12 Utilização de passes adicionais em estratégias de varredura 103
5.2.13 Definição dos movimentos de conexão entre passadas 103
5.2.14 Seleção do tipo de entrada da ferramenta no bloco 104
5.2.15 Habilitação da opção "usinagem por região" 106
5.3 ORIENTAÇÃO PASSO A PASSO PARA O PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DO ACABAMENTO 107
5.3.1 Definição dos critérios de programação – proporção tecnologia/tempo 107
5.3.2 Planejamento das operações e seleção de estratégias 108
5.3.3 Delimitação das áreas a usinar 116

5.3.4 Escolha da ferramenta 117
5.3.5 Definição do intervalo entre passadas 119
5.3.6 Especificação da tolerância de usinagem 121
5.3.7 Definição dos movimentos de conexão entre passadas 122
5.3.8 Determinação dos movimentos de entrada e saída 122
5.3.9 Especificação do ponto inicial e dos planos de segurança e saída 123
5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE PROGRAMAÇÃO DO PRÉ-ACABAMENTO 123
5.5 SEQÜÊNCIA DE PROCEDIMENTOS PARA A PROGRAMAÇÃO VIA CAM 125
6 DESCRIÇÃO DE UM ESTUDO PRÁTICO DE PROGRAMAÇÃO 129
6.1 ESPECIFICAÇÃO DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO 129
6.2 SISTEMA CAM UTILIZADO 130
6.3 PREPARAÇÃO DO ESTUDO 131
6.3.1 Procedimentos 131
6.3.2 Restrições simuladas 131
6.3.3 Determinação do zero-peça 132
6.3.4 Interpretação dos quadros sistematizadores 132
6.4 DESENVOLVIMENTO PASSO A PASSO DA PROGRAMAÇÃO 133
6.4.1 Esboço da seqüência de operações 133
6.4.2 Planejamento da programação do desbaste 134
6.4.3 Execução do programa de desbaste 146
6.4.4 Verificação e correção do programa de desbaste 146
6.4.5 Resumo dos parâmetros do programa final de desbaste 149
6.4.6 Planejamento da programação do acabamento 150
6.4.7 Planejamento da programação do pré-acabamento 159
6.4.8 Execução dos programas de pré-acabamento 162
6.4.9 Verificação e correção dos programas de pré-acabamento 163
6.4.10 Execução dos programas de acabamento 164
6.4.11 Verificação e correção dos programas de acabamento 165
6.4.12 Avaliação dos resultados do programa final de desbaste 167
6.4.13 Avaliação dos resultados dos programas finais de pré-acabamento 169
6.4.14 Avaliação dos resultados dos programas finais de acabamento 171
6.4.15 Avaliação geral da programação 174
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 175
7.1 COMENTÁRIOS ADICIONAIS 175
7.2 CONCLUSÕES 176
7.3 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS 180
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 182
ANEXO 194

LISTA DE FIGURAS

1 Perfil de fresas com haste cilíndrica 24

2 Menus para seleção de ferramentas 26

3 Corte de uma cavidade com ilha, após o desbaste 27

4 Trajetórias geradas por diferentes estratégias 30

5 Seqüência de menus para a seleção da estratégia 31

6 Contornos delimitadores da área de usinagem (1) 32

7 Contornos delimitadores da área de usinagem (2) 33

8 Contornos delimitadores da área de usinagem (3) 33

9 Construção de geometrias de apoio 33

10 Contornos delimitadores da área de usinagem (4) 34

11 Planos de segurança e início 35

12 Cristas ou *scallops* formados por passadas paralelas de fresas esféricas 36

13 Direção e sentido das trajetórias 37

14 Usinagem "*up only*" 38

15 Ângulo de usinagem 38

16 Sentido de corte (1) 39

17 Sentido de corte (2) 40

18 Entrada da ferramenta em rampa 41

19 Movimentos de entrada e saída 41

20 Tipos mais freqüentes de movimentos de conexão entre passadas 42

21 Tolerância de usinagem. 43

22 Simuladores de usinagem. 45

23 Verificador de colisões 46

24 Sessões de trabalho 48

25 Ficha de programação 50

26 Pontos de referência na ferramenta de corte para as coordenadas CL 52

27 Pontos CC e CL 52

28 Geração de trajetórias em 2½ eixos a partir de diagramas de *Voronoi* 54

29 Geração de trajetórias de desbaste em Z constante 55

30 Trajetórias de desbaste de bolsões em Z constante 55

31 Métodos tradicionais de geração de trajetórias em 3 eixos 58

32 Curvas de preenchimento espacial 61

33 Trajetória com interferência 61

34 Tipos de interferência de trajetórias na superfície do modelo 62

35 Falhas na geração de *offsets* da superfície do modelo 62

36 Opções de varredura em 2 ½ eixos em zig-zag de geometrias 3D 66

37 Varredura espiral em 2 ½ eixos de geometrias 3D 67

38 Perfilamento em 2½ eixos 67

39 Estratégia de usinagem por planos paralelos 68

40 Estratégia de projeção radial 69

41 Opções de usinagem radial (1) 69

42 Opções de usinagem radial (2) 69

43 Estratégia de projeção helicoidal 69

44 Estratégia de projeção de contornos ou *offset* de contornos (1) 70

45 Estratégia de projeção de contornos ou *offset* de contornos (2) 70

46 Perfilamento em 3 eixos 71

47 Varredura em 3 eixos por patamar 71

48 Usinagem de cantos 72

49 Gravação ou *engraving* 73

50 Estratégias isoparamétricas 74

51 Usinagem de superfícies regradas (1) 75

52 Usinagem de superfícies regradas (2) 75

53 Estratégia de reusinagem 76

54 Quadro sistematizador exemplo 85

55 Altura da ferramenta de corte 91

56 Falha na varredura 94

57 Material no miolo de uma fresa toroidal de insertos após penetração axial 104

58 Usinagem por região 107

59 Usinagem de rampa com fresa subindo inclinada 111

60 Usinagem de calotas com estratégia de perfilamento em 2½ eixos 112

61 Usinagem de calotas com estratégia de patamares em hélice 113

62 Usinagem de calotas com estratégia de planos paralelos 113

63 Usinagem de calotas com estratégia de usinagem radial 113

64 Usinagem de discos 113

65 Trajetórias isoparamétricas redundantes 115

66 Trajetórias em planos paralelos 115

67 Trajetórias de projeção isoparamétrica 115

68 Direção das trajetórias (1) 115

69 Direção das trajetórias (2) 115

70 Gradiente de velocidade de corte entre a lateral e o centro do topo de uma fresa 118

71 Seqüência de programação 127

72 Programação propriamente dita 128

73 Peça selecionada para o exemplo de aplicação 130

74 Molde para a *Carcaça* 130

75 Modelo da placa-macho no CAM 132

76 Patamares de corte selecionados para o desbaste 143

77 *Carcaça*: movimentos de entrada/saída/conexão do programa PAR 159

78 *Carcaça*: trajetórias de pré-acabamento das paredes e curvaturas 164

79 *Carcaça*: trajetórias de pré-acabamento dos planos horizontais 164

80 *Carcaça*: trajetórias de acabamento do programa FEC 166

81 *Carcaça*: trajetórias de acabamento do programa PLA 166

82 *Carcaça*: trajetórias de acabamento do programa PAR 167

83 *Carcaça*: trajetórias de acabamento do programa CAN 167

84 *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do desbaste 169

85 *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do pré-acabamento das paredes e das curvaturas das protusões 170

86 *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do pré-acabamento dos planos horizontais das protusões 171

87 *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do acabamento da superfície de fechamento 172

88 *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do acabamento das superfícies com inclinação zero 173

89 *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do acabamento das superfícies com inclinação 173

90 *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do acabamento dos cantos vivos 174

91 Ressalto na superfície de fechamento do molde 194

92 Eletrodo tipo palheta 195

LISTA DE TABELAS

1 Sistemas CAD/CAM integrados..... 13

2 Sistemas CAM dedicados..... 13

3 Módulos de CAM para integração com sistemas CAD independentes..... 14

4 Características operacionais dos sistemas CAM analisados..... 16

5 Recursos de programação dos sistemas CAM analisados..... 16

6 Elementos do molde e seus processos de fabricação..... 20

7 Vantagens e desvantagens dos métodos tradicionais de geração de trajetórias..... 58

8 Classificação dos tipos de estratégias para fresamento 3D..... 77

9 Seqüência de passos no planejamento das operações de desbaste. 80

10 Seqüência de passos no planejamento das operações de acabamento. 81

11 Seqüência de programação em três *softwares* de CAM..... 81

12 Sobrematerial em operações de desbaste. 93

13 Espessura máxima de aço P20 removível para fresas de diâmetro entre 4 e 18 mm. 93

14 Altura máxima de crista para operações de acabamento. 120

15 *Carcaça*: parâmetros relativos à ferramenta de desbaste. 138

16 *Carcaça*: parâmetros relativos ao bloco programado para o desbaste..... 138

17 *Carcaça*: sobrematerial e tolerância para desbaste e pré-acabamento..... 139

18 *Carcaça*: patamares de corte para o desbaste. 142

19 *Carcaça*: coordenadas do bloco de material bruto e planos de posicionamento. 143

20 *Carcaça*: parâmetros e opções do programa inicial de desbaste. 146

21 *Carcaça*: resolução dos problemas encontrados no programa de desbaste..... 148

22 *Carcaça*: parâmetros e opções do programa corrigido de desbaste..... 149

23 *Carcaça:* estratégias selecionadas para os programas de acabamento..... 152

24 *Carcaça*: ferramentas e dados de corte selecionados para os programas de acabamento. 154

25 *Carcaça*: incrementos laterais para as trajetórias de acabamento. 157

26 *Carcaça*: movimentos de entrada e saída para os programas de acabamento.... 158

27 *Carcaça*: estratégias e sobrematerial selecionado para os programas de pré-acabamento. 160

28 *Carcaça*: dados geométricos e de corte para as ferramentas de pré-acabamento. 161

29 *Carcaça*: intervalo entre passadas para as trajetórias de pré-acabamento..... 162

30 *Carcaça*: parâmetros e opções dos programas de pré-acabamento..... 163

31 *Carcaça*: parâmetros e opções dos programas de acabamento..... 165

32 *Carcaça*: resultados do programa de desbaste. 168

33 *Carcaça:* resultados dos programas de pré-acabamento. 170

34 *Carcaça*: resultados dos programas de acabamento... 172

LISTA DE QUADROS

1 Sistematização da decisão quanto à uniformização do sobrematerial 87

2 Sistematização da decisão quanto ao uso de pré-acabamento..... 87

3 Sistematização da decisão quanto ao número de programas de desbaste..... 88

4 Sistematização da decisão quanto ao tipo de ponta da ferramenta de desbaste..... 89

5 Sistematização da seleção da estratégia de desbaste..... 96

6 Sistematização da decisão quanto à constância do intervalo entre patamares de corte..... 98

7 Sistematização da decisão quanto ao valor do intervalo entre os patamares de corte..... 100

8 Sistematização da decisão quanto ao valor do incremento lateral..... 102

9 Sistematização da decisão quanto ao movimento de entrada da ferramenta..... 106

10 Sistematização da decisão quanto ao tipo de ponta da ferramenta de acabamento..... 118

11 Emprego do quadro sistematizador 1 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"..... 134

12 Emprego do quadro sistematizador 2 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"..... 135

13 Emprego do quadro sistematizador 3 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"..... 136

14 Emprego do quadro sistematizador 4 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"..... 137

15 Emprego do quadro sistematizador 5 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"..... 140

16 Emprego do quadro sistematizador 6 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça" 142

17 Emprego do quadro sistematizador 7 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça" 142

18 Emprego do quadro sistematizador 8 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça" 144

19 Emprego do quadro sistematizador 9 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça" 145

20 Emprego do quadro sistematizador 10 no planejamento do programa de acabamento da superfície de fechamento 155

21 Emprego do quadro sistematizador 10 no planejamento do programa de acabamento dos planos horizontais 156

22 Emprego do quadro sistematizador 10 no planejamento do programa de acabamento das paredes e curvaturas 156

SIMBOLOGIA

a_e	Penetração lateral
a_p	Penetração passiva
APT	Automatic Programming Tool
B-rep	Boudary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPP	Computer Aided Process Planning
CC	Cutter Contact
CL	Cutter Location
CLDATA	Cutter Location Data
CNC	Computer Numerical Control
CSG	Constructive Solid Geometry
DNC	Direct Numerical Control
EDM	Eletrical Discharge Machining
f_z	Avanço por gume
H_l	Altura livre de uma fresa
ISO	International Standards Organization
LAN	Local Area Network
l_s	Comprimento da haste de uma fresa
MDI	Manual Data Input
n	Rotação
NC	Numerical Control

NURBS Non-Uniform Rational B-Splines

PC Personal Computer

STL Stereolitography

$\mathbf{v_c}$ Velocidade de corte

$\mathbf{v_f}$ Velocidade de avanço

RESUMO

Este trabalho trata da problemática envolvida na seleção de estratégias e parâmetros para a programação NC via CAM do fresamento em 2½ e 3 eixos de moldes de injeção para peças plásticas. Para tanto, é apresentada uma descrição detalhada da seqüência de operações e tarefas envolvidas na programação, bem como os principais algoritmos e características das estratégias de usinagem mais freqüentemente encontradas nos sistemas CAM atualmente disponíveis no mercado.

O objetivo global do trabalho consiste em apresentar um conjunto de orientações e recomendações para facilitar e agilizar o planejamento e o desenvolvimento da programação NC, elaborado a partir de um levantamento de informações colhidas em literatura especializada e junto ao setor de moldes, mediante o desenvolvimento de trabalhos práticos em chão-de-fábrica. Adicionalmente, foi realizado um exemplo prático de aplicação, visando demonstrar a operacionalidade das orientações propostas, bem como facilitar a compreensão das etapas da programação do fresamento NC via CAM.

ABSTRACT

This work deals with the issues involved in the selection of machining cycles and parameters for two-and-a-half and three-axis numerically controlled milling of injection molds. Therefore, a detailed description of the operational sequence and programming tasks is presented, as well as attributes and peculiarities of the most frequently found machining cycles in currently available commecial CAM systems.

The general purpose of this work consists of presenting a set of procedures and recommendations in order to render the planning and development of NC programming easier and more agile. This set is based upon a survey conducted in technical literature and also information collected from moldmakers through shop-floor jobs. In addition, a case study has been carried out to demonstrate the applicability of the proposed procedures and to facilitate the understanding of the computer assisted NC milling programming steps.

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

No que tange à área de manufatura de moldes, sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*) é aquele que engloba o conjunto de programas voltados a apoiar as atividades de processistas e programadores de máquinas de comando numérico, na fase de fabricação do molde, principalmente através da especificação de planos de processo, simulação das trajetórias das ferramentas de corte e geração de programas NC para operações de usinagem, nos processos de fresamento, torneamento, furação e eletroerosão [1].

Em se tratando especificamente das ferramentarias nacionais, pressionadas pela dura concorrência dos moldes importados, principalmente de Portugal, Itália e Tigres Asiáticos, cada vez mais esta ferramenta computacional tem sido apontada como a solução para reduzir custos, melhorar a qualidade dos produtos e tornar a produção de moldes mais eficiente e rápida [1, 2, 3, 4, 5]. No entanto, uma vez instalada, nem sempre esta ferramenta consegue satisfazer as expectativas anteriormente geradas por parte da empresa [4].

Mesmo com um *software* apropriadamente selecionado, a geração de programas NC, especificamente para o caso de fresamento de cavidades de moldes de injeção[1], pode se tornar muito lenta se o programador do CAM não tiver um amplo conhecimento de tecnologia de usinagem, máquinas-ferramenta CNC, ferramentas de corte, materiais para moldes e sobre o próprio CAM. Ou seja, deve dominar o processo e o *software* que o assiste, para que possa ter o máximo de êxito na utilização deste tipo de ferramenta [4].

---

[1] Considera-se como "cavidade" o espaço vazio dentro do molde fechado, ou seja, as paredes das placas do molde que entram em contato com o produto, moldando-o.

Em linhas gerais, um programa NC para o fresamento de cavidades deve garantir, a perfeita **reprodução da geometria** do modelo, isto é, garantir que a ferramenta não interfira na superfície, que todo o sobrematerial seja removido e que o acabamento superficial resulte conforme requerido. Além disso, deve assegurar a **integridade da ferramenta** de corte, bem como sua apropriada vida, em um **tempo de usinagem** compatível com a disponibilidade da máquina-ferramenta a ser utilizada e com os prazos de entrega estabelecidos (em outras palavras, quanto menor o tempo de usinagem, melhor).

Para isto, seja qual for o sistema CAM empregado, em uma sessão de trabalho o programador tem, basicamente, três preocupações, considerando-se já escolhidas as regiões ou elementos do molde que devem ser usinadas:

1) Quantas, quais tipos e qual a seqüência das **operações** que devem ser programadas ?

2) Como selecionar a **ferramenta** e os parâmetros de corte para cada operação ?

3) Dentre as várias opções disponíveis no *software*, como escolher a **estratégia** de usinagem mais apropriada para cada operação ?

A **seqüência, os tipos e o número de operações** podem fugir do convencional "um desbaste mais um acabamento", dependendo da geometria da peça, das ferramentas disponíveis, das características da máquina-ferramenta e dos requisitos de acabamento superficial. Além disso, durante a sessão de trabalho é comum o programador optar por alterar, inserir ou eliminar uma ou outra operação ou, até mesmo, ter de recomeçar o trabalho do zero, em vista de restrições tecnológicas e dificuldades gerais não antevistas durante a preparação do processo.

A **geometria das ferramentas** de corte a serem utilizadas nos programas de fresamento também depende das geometrias da cavidade e dos recursos disponíveis de maquinário e ferramental, e sua apropriada seleção exerce fundamental influência para o sucesso do trabalho do programador. Contudo, as opções quanto ao tipo de ferramenta para o fresamento de cavidades de moldes de injeção não são muito amplas, muitas vezes por limitação dos próprios sistemas CAM, o que, de certa forma, facilita o trabalho do programador quanto a esta preocupação. A especificação dos **parâmetros de corte** depende da máquina-ferramenta, das condições de fixação da ferramenta, e, fundamentalmente, dos materiais da peça a ser usinada e da ferramenta de corte a ser empregada. Embora de fundamental importância para o sucesso da programação, os dados de corte usualmente

empregados podem ser obtidos de tabelas e catálogos de fabricantes, livros, publicações técnicas ou de ensaios conduzidos pela própria empresa usuária do CAM.

Por sua vez, a **seleção das estratégias de usinagem** (ou ciclos de usinagem), ou seja, a determinação da forma e da orientação dos **movimentos globais da ferramenta de corte**, (trajetórias de usinagem ou *tool paths*) mais apropriados para cada região/geometria da cavidade, é a principal preocupação do programador. Juntamente com a escolha da ferramenta, a seleção apropriada da estratégia e dos demais parâmetros de usinagem é o que proporciona a correta movimentação da ferramenta de corte e por conseqüência a reprodutibilidade da geometria da peça projetada, respeitando os requisitos de integridade da ferramenta, acabamento superficial e tempo de usinagem.

Assim, a partir das diversas opções de estratégias oferecidas pelo *software* disponíveis, cabe ao programador selecionar a mais apropriada, mas, ao contrário do que o termo "geração automática de trajetórias de usinagem" possa transparecer, esta tarefa não se limita a simples apertos de teclas, cliques e preenchimentos de campos. Para exemplificar a complexidade da programação no CAM, é possível relacionar, entre outras, diversas situações e fatores causadores de dúvidas e dificuldades durante a programação:

- dois ou mais tipos de **estratégias** que produzem, para uma determinada combinação geometria do modelo-ferramenta, semelhante remoção de material, pelo menos segundo a imagem de um simulador gráfico;
- deficiências do *software* ou falta de domínio do programador sobre o mesmo, dificultando a delimitação da(s) região(ões) do modelo que devem ser usinadas por uma **estratégia** já escolhida;
- **trajetórias** geradas que cobrem toda a área selecionada, que produziriam, porém, forças de corte muito elevadas, exigiriam excesso de potência da máquina, causariam desgaste muito rápido ou quebra da ferramenta ou produziriam um tipo inadequado de remoção de material resultando em acabamento indesejado;
- avaliação sobre até que ponto um tempo de usinagem menor é melhor do que uma usinagem mais técnica, que minimize o desgaste da ferramenta e produza melhor acabamento superficial;

- problemas de *software* e *hardware* como erros no cálculo das **trajetórias**, baixa performance de processamento, falta de memória, "*bugs* de sistema", entre outros, obrigando a busca de alternativas à estratégia que se considerava a mais adequada;
- geração de **trajetórias** pouco otimizadas, com excesso de usinagem em vazio (movimentos em avanço de corte sem remoção de material) e trajetórias truncadas, com grande número de retrações da ferramenta (aumento dos tempos secundários);
- inexistência de ferramentas adequadas para uma determinada **estratégia** ou falta de uma **estratégia** apropriada para uma situação específica, obrigando o uso de artifícios de programação;
- verificação visual dos resultados, detecção de interferências e movimentos inadequados da ferramenta em **trajetórias** de posicionamento;
- necessidade de edição manual posterior de defeitos e anomalias localizadas nas **trajetórias** geradas;
- resultados inesperados na aplicação de uma **estratégia**, sem identificação do motivo, conduzindo ao uso de outra estratégia, modificação de parâmetros ou nova seleção de ferramenta pelo método da "tentativa e erro";

Mesmo que um programador seja experiente e habilidoso o suficiente para evitar parte dos problemas listados acima e resolver outra parte, conseguindo gerar rapidamente um programa "sem erros", é possível que este programa possa ser melhorado. Isto se deve ao fato de ainda se encontrar programadores com vários anos de trabalho em CAM que geram programas, os quais com pouco de trabalho adicional, poderiam diminuir o desgaste de ferramentas, melhor distribuir o sobrematerial para acabamento e reduzir os tempos secundários gastos em trocas de ferramenta, retrações, movimentos no plano de segurança, etc.[2] Isto pode acontecer, por exemplo, a programadores "viciados" ou "acomodados", acostumados a programar sempre de uma maneira que produz resultados aceitáveis, em termos de acabamento e tempo de manufatura, mas não otimizados. Além disso, programadores deste tipo ignoram ou não tem acesso, por vezes, ao desenvolvimento tecnológico de ferramentas, máquinas e algoritmos de geração de trajetórias.

---

[2] Esta afirmação se baseia na observação de programas gerados em várias ferramentarias visitadas durante o trabalho.

Embora não haja referências na bibliografia disponível, nota-se que as ferramentarias brasileiras possuem dois tipos de programadores de CAM. Ex-operadores de máquinas-ferramenta, normalmente formados "pela prática", ou por cursos técnicos, ainda são, na maioria das vezes, profissionais que encontram alguma dificuldade inicial na operação de recursos computacionais. Mesmo depois de acostumados com o *hardware* e com o *software*, procedem por vezes de forma mecânica, sem o total conhecimento das causas e conseqüências das ações, levando a erros ou à "não-otimização" do processo. Faltam-lhes noções básicas da arquitetura dos *softwares*, das representações geométricas, dos métodos para cálculo das trajetórias de corte e da integração destes elementos. O outro tipo de programador é o técnico de nível médio ou o engenheiro, geralmente recém saído do ambiente acadêmico, que, geralmente, possui pouca (ou nenhuma) experiência em tecnologia e prática de usinagem, fabricação de moldes, ferramentas, materiais, etc. Apesar deste profissional geralmente possuir maior facilidade de absorção de conhecimentos sobre o *software* e uma base mais sólida de conhecimentos técnicos/teóricos relativos à área, ele costuma demorar a utilizar os recursos do CAM com a eficiência necessária, passando por um tempo de aprendizado durante o qual produz menos do que poderia.

Portanto, na medida em que **no Brasil é um crescente mercado da indústria do plástico** e, por conseqüência, da fabricação de moldes via CAM, e que o país vem se tornando centro das atenções de fornecedores de *softwares* do mundo todo, pois ainda temos um **mercado de CAD/CAM praticamente inexplorado** [10], as ferramentarias nacionais não podem mais se dar ao luxo de esperar por tanto tempo a qualificação pessoal dos seus programadores. Sendo assim, o campo relativo a pesquisas que auxiliem a melhor compreensão do uso de sistemas CAM para a área de moldes ainda deve ser amplamente enfocado.

1.2 DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO

O nível tecnológico médio das máquinas-ferramenta das ferramentarias nacionais está ainda bem aquém do nível dos países que detém as maiores fatias do mercado internacional de moldes. Enquanto o "primeiro mundo dos moldes" já utiliza máquinas com **4, 5 ou mais eixos de movimento simultâneo**, com a capacidade de atingir as velocidades de avanço e de rotação requeridas pelo moderno conceito de **usinagem de alta velocidade** e com controles numéricos

altamente sofisticados, a maioria das ferramentarias nacionais ainda confia a fabricação de seus moldes aos métodos convencionais, quase que artesanais. Mesmo as empresas que operam máquinas CNC e sistemas CAx, raramente possuem máquinas cujas velocidades de avanço excedem os valores tradicionais e com configuração que permita usinagem com mais de 3 eixos de movimentação. Ao contrário das máquinas, os *softwares* que vêm sendo adquiridos pelas principais ferramentarias brasileiras são geralmente os mesmos que auxiliam a fabricação dos moldes estrangeiros. Porém, as instruções de programação para usinagem em alta velocidade e para 5 eixos de movimentação não podem ser aproveitadas, pois as máquinas CNC no chão-de-fábrica não têm estas capacidades. Além disso, por enquanto a usinagem em 5 eixos é mais comum para peças da indústria aeronáutica e aeroespacial do que para a automobilística e a de utensílios domésticos e eletroeletrônicos [11], os grandes filões das ferramentarias nacionais.

Embora estas novas tecnologias possam ser implantadas na indústria nacional de moldes, este trabalho não pretende estudá-las a fundo. Contudo, as informações aqui contidas oferecem uma indispensável base de conhecimentos sobre o estado atual do fresamento de moldes via CAM no Brasil para os necessários futuros trabalhos relativos a técnicas como fresamento em 5 eixos e a usinagem de alta velocidade. Desta forma, restringe-se o enfoque desta dissertação às estratégias para fresamento em 2½ e 3 eixos.

1.3 OBJETIVOS

Tendo em vista o exposto, este trabalho tem como **objetivo global**, estabelecer e apresentar de forma organizada um conjunto de **procedimentos e recomendações para servir de orientação ao processo de planejamento, seleção de estratégias e determinação de parâmetros de usinagem**, na elaboração de programas NC via CAM para o fresamento em 2½ e 3 eixos de moldes de injeção. Adicionalmente, o trabalho tem como objetivos específicos:

1) Realizar um levantamento e uma revisão bibliográfica sobre sistemas CAM comerciais para fresamento em 2½ e 3 eixos, visando apresentar uma descrição dos tipos, características e recursos, principalmente em relação aos mais utilizados no Brasil e voltados à área de moldes para peças plásticas.

2) Estudar o processo de elaboração de programas NC para o fresamento de moldes via CAM, visando apresentar uma descrição da seqüência de programação e das estratégias de usinagem empregadas para o fresamento em 2½ e 3 eixos, bem como dos seus algoritmos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para que os objetivos do trabalho fossem atingidos, organizou-se o desenvolvimento e a apresentação do trabalho em seis capítulos e um anexo, além desta introdução. Cada uma destas seções tem aqui seus conteúdos brevemente descritos:

Capítulo 2 - Sistemas CAM comerciais para fresamento em 2½ e 3 eixos. Neste capítulo são apresentadas classificações dos sistemas CAM para fresamento de moldes quanto a diversas características operacionais e relacionados os principais sistemas CAM do gênero, com maior ênfase a oito, os quais foram analisados em maior detalhe, em vista da elaboração dos demais capítulos do trabalho;

Capítulo 3 - Seqüência de programação do fresamento de moldes via CAM. As informações contidas neste capítulo apresentam o modo de trabalho dos *softwares* de CAM, apresentando a seqüência de passos que o programador deve cumprir para gerar programas NC, independentemente do sistema CAM empregado, e relacionando os principais parâmetros de programação dos movimentos globais e locais da ferramenta de usinagem;

Capítulo 4 - Estratégias para fresamento em 2½ e 3 eixos. Este capítulo descreve as estratégias de usinagem mais usuais que os *softwares* de CAM para fresamento em 2½ e 3 eixos oferecem aos seus usuários. Embora o presente trabalho se preocupe fundamentalmente com a aplicação das trajetórias, é importante que o programador tenha noções de como o *software* as gera internamente, ganhando mais um subsídio para uma rápida e acertada escolha de uma estratégia.

Capítulo 5 - Orientações e procedimentos para o planejamento da programação via CAM do fresamento 3D de moldes. Baseado no conhecimento adquirido em visitas e estágios realizados em ferramentarias nacionais, na prática da programação em vários sistemas CAM e em artigos publicados, este capítulo contém a principal contribuição do autor a este tra-

balho. São propostas orientações para os passos da programação de operações de desbaste e acabamento, incluindo soluções para algumas situações freqüentemente encontradas na usinagem de moldes e a apresentação de quadros orientativos que sistematizam tomadas de decisão durante os principais passos da programação.

Capítulo 6 - Descrição de um estudo prático de programação. Este capítulo demonstra a aplicação das orientações e recomendações propostas no capítulo 5 através da descrição, passo a passo, das etapas que envolveram a elaboração de programas NC para o fresamento, em um sistema CAM, da placa-macho de um molde para injeção de peças de plástico.

Capítulo 7 - Conclusões e considerações finais. Finalmente, mas não menos importante, discutem-se os resultados gerais do trabalho e apresentam-se sugestões para novas pesquisas e trabalhos na área do fresamento assistido por computador para fabricação de moldes de injeção para peças plásticas.

Anexo - Recomendações e considerações gerais quanto à programação do fresamento de elementos do molde e eletrodos. As orientações propostas no capítulo 5 tratam, de modo generalizado, o fresamento de geometrias de moldes de injeção, podendo ser utilizadas também para o fresamento de eletrodos, canais de injeção e superfícies de fechamento, bem como outros tipos de moldes, matrizes e produtos metálicos. Porém, como as geometrias destes elementos são menos genéricas que as formas das cavidades, este anexo propõe procedimentos, orientações e parâmetros específicos para sua fabricação via CAM.

2. SISTEMAS CAM COMERCIAIS PARA FRESAMENTO EM 2½ E 3 EIXOS

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS *SOFTWARES* DE CAM

Os sistemas CAM comerciais atualmente disponíveis no mercado podem ser classificados quanto a algumas características operacionais:

- número de eixos no fresamento;
- tipos de representação geométrica dos modelos;
- integração com os recursos de modelamento, ou seja, a forma como o CAM manuseia o modelo geométrico da peça a usinar;
- plataforma, ou seja, tipo de *hardware* e sistema operacional necessários.

2.1.1 QUANTO AO NÚMERO DE EIXOS NO FRESAMENTO

O número de eixos no fresamento se refere ao número de graus de liberdade de uma máquina NC em posicionar ferramentas de corte [11]:

- **2 eixos**: ferramentas se movimentam apenas nas direções X e Y;
- **2 ½ eixos**: adiciona usinagem no eixo Z, o qual pode ser posicionado mas não pode ser usado para movimentos simultâneos com os eixos X e Y;
- **3 eixos**: movimenta os eixos X, Y e Z simultaneamente durante a usinagem;
- **4 eixos**: permite posicionamento da ferramenta através da rotação da mesa da máquina, em torno de um eixo perpendicular à mesma.
- **4 eixos simultâneos**: como descrito acima, mas com o quarto utilizado também para movimentos de corte, simultaneamente aos outros 3.

- **5 eixos**: permite a movimentação básica em torno dos três eixos mais dois eixos de movimento simultâneo, paralelos ou em torno de X, Y ou Z.

No entanto, os *softwares* de CAM costumam ser classificados em 2 ½ ou 3 eixos, não quanto aos movimentos da ferramenta, mas quanto à geometria que serve de base ao CAM, causando um pouco de confusão [12]. *Ahrens* [5, 13], seguindo esta linha, classificou CAM quanto ao número de eixos da seguinte forma:

- **CAM 2½D**: geração de programas NC em máquinas-ferramenta de 3 eixos, a partir de geometrias em 2D;
- **CAM 3D**: geração de programas NC em máquinas-ferramenta de 3 eixos, a partir de geometrias em 3D;

Assim, fica esclarecido que quando catálogos de produtos definem módulos de CAM como "2 ½ eixos", se quer dizer que eles apresentam estratégias de usinagem aplicadas a modelos em duas dimensões, com movimentos de ferramenta em 2 ½ eixos. Da mesma forma, a usinagem em módulos de CAM para "3 eixos", conforme catálogos e manuais de *softwares*, se refere a estratégias para modelos geométricos em três dimensões, podendo ter movimentos de ferramenta em 2½ ou 3 eixos.

2.1.2 QUANTO AOS TIPOS DE REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DOS MODELOS

Os *softwares* pesquisados trabalham com um ou mais destes quatro tipos de representação:

- ***Wireframe.*** Vários *softwares* para a área de moldes possibilitam geração de trajetórias simples em 2 ½ eixos a partir destes modelos em 2D ou 2½D [6, 11], que são utilizados para o modelamento de componentes prismáticos de moldes ou geometrias não complexas de cavidades e eletrodos, tão somente com linhas, arcos e curvas livres.
- **Superfícies.** Outra técnica de modelamento consiste em unir as arestas de um modelo em *wireframe* com "cascas", ditas **superfícies**, conferindo ao objeto um "aspecto sólido" quando visualizado em *shade*. A maioria dos moldes para injeção de peças de plástico possuem formas complexas, que requerem modelamento através de **superfícies de forma livre** (*freeform surfaces*), também chamadas de **superfícies esculpidas** ou esculturais (*sculptured surfaces*) [1, 2, 3, 5, 6,11]. Estas superfícies são formadas por curvas livres

irregulares, como **polinômios bi-cúbicos** (*splines*), que seguem diferentes formulações matemáticas (*Coons*, *Bézier*, NURBS [3, 5, 11, 15, 16, 17]), conforme cada fornecedor de CAD/CAM arquiteta seu *software*.

- **Sólidos.** Atual tendência no mercado de CAD e CAD/CAM [3, 15, 18, 19, 20], os modelos sólidos são mais simples de construir e modificar, definem a geometria de uma peça sem a ambigüidade característica do modelo de superfícies e podem conter mais do que simplesmente informações geométricas [19, 20, 21]. Contudo, a maioria dos sistemas CAM para a área de moldes converte o modelo sólido para superfícies, antes de iniciar a geração das trajetórias, devido a ainda pouca eficiência de seus algoritmos para a usinagem de geometrias sólidas complexas. Várias técnicas de modelamento podem ser utilizadas, como ***Octree***, Geometria Sólida Construtiva (***CSG***), e representação de contornos (***B-rep*** e ***sweep representation***), cada uma com suas vantagens e desvantagens amplamente descritas em [3, 5, 22, 23, 24].
- **Malha de triângulos.** O formato **STL,** que usa modelos inteiramente definidos por faces triangularizadas, representando toda a geometria do modelo como uma só entidade, é um método semelhante ao sólido, porém, menos complexo [25]. Apesar de ter sido criada em 1988 para o processo de prototipagem rápida, esta forma de representação livra os processos de tradução (importação/exportação) de dados e de geração de trajetórias de erros freqüentes em outros tipos de modelo [25]. Alguns sistemas CAM, como o *PowerMILL*, estão adotando esta forma de representar seu modelos, que embora dificulte a manipulação e edição da geometria (pois trabalham exclusivamente com esta representação) e exija mais espaço para armazenamento do arquivo, simplifica a geração de trajetórias e reduz seu tempo de cálculo [25, 26].

2.1.3 QUANTO À INTEGRAÇÃO COM OS RECURSOS DE MODELAMENTO

Existem três tipos de *softwares* de CAM quanto aos recursos de modelamento:

- **Totalmente integrados.** São os chamados sistemas CAD/CAM, *softwares* modulares que integram dentro de um mesmo ambiente vários "sub-*softwares*" com funções diferentes, como modelamento, projeto, simulação, engenharia reversa e a própria geração de pro-

gramas NC [27, 10, 28]. As maiores vantagens deste tipo de sistema são a eliminação dos notórios problemas da transferência de arquivos (importação e exportação) entre o CAD e o CAM, a facilidade de alterar e manipular as geometrias a serem usinadas e a possibilidade de gerar curvas, planos e superfícies de apoio à usinagem. Contudo, normalmente o custo de aquisição deste tipo de sistema é alto, assim como o custo das configurações de *hardware* mais poderosas que são exigidas [10].

- **CAM integrado a um sistema CAD independente.** É o caso de *softwares* de CAM produzidos especificamente para atuarem como um módulo de um sistema CAD de outro fornecedor, normalmente um CAD já consagrado no mercado, como *AutoCAD*. O CAM é acessado no ambiente do CAD por um ícone ou um menu, como se fosse apenas mais uma de suas funções [27, 29]. De uma maneira geral, têm menos recursos do que os grandes sistemas CAD/CAM, mas podem se constituir numa alternativa interessante e barata para quem já possui um CAD e necessita de um CAM para usinagens pouco complexas. Além disso, tem a vantagem da não-importação de arquivos do CAD.
- **CAM dedicado ou "*stand alone*".** Caracterizam-se por trabalharem "fora" do CAD. São programas independentes, adquiridos separadamente e que se comunicam com sistemas CAD através da importação e exportação de arquivos via interfaces neutras ou diretas. Alguns apresentam recursos básicos de modelamento, para geração de entidades de apoio à geração de trajetórias NC ou para construção das próprias geometrias a usinar [1, 2, 5, 6, 7, 12, 30, 31].

As tabelas 1, 2 e 3 relacionam os *softwares* de CAM para fresamento 2½ e 3 eixos atualmente disponíveis no mercado, dividido-os quanto à integração com o modelamento. Alguns *softwares*, como o *Euclid-IS* e o *Duct*, não são mais fornecidos ou não dispõem mais de módulos de CAM nas versões atuais, mas foram incluídos por ainda estarem sendo utilizados em várias ferramentarias [14]. Os sistemas mais conhecidos e utilizados no Brasil, no que diz respeito à fabricação assistida de moldes, são destacados em vermelho.

SISTEMAS CAD/CAM INTEGRADOS			
software	*origem*	*software*	*origem*
ANVIL-5000	EUA	**I-DEAS**	EUA
CADDS-5	EUA	**MASTERCAM**	EUA
CADRA	EUA	**MicroCADAM**	EUA
Caeds	EUA	**MOZAIC**	Alemanha
CAELUM	Japão	**Para-Max**	Reino Unido
Camand-Camax	EUA	**Prelude**	França
Professional CADAM	França	**Pro/Engineer**	EUA
CATIA	EUA/França	**SIPSURF**	Holanda
Cimatron	Israel	**STRIM 100**	França
DUCT 5 / Duct Machinist	Reino Unido	**Swiss Precision/Engineer**	Suíça
Euclid Quantum	França	**Tebis**	Alemanha
Euclid-IS	França	**UNIGRAPHICS**	EUA
Euklid	Suíça	**Varimetrix**	EUA
GMS	EUA	**Virtual Gibbs**	EUA
I/EMS	EUA	**VisiCAM**	Itália
ICEM	EUA	**XCAD/XCAM**	EUA

Tabela 1 – Sistemas CAD/CAM integrados: em vermelho, os sistemas mais conhecidos no Brasil

SISTEMAS CAM DEDICADOS			
software	*origem*	*software*	*origem*
AlphaCAM	Reino Unido	**GeoPath**	EUA
ArtCAM	Reino Unido	**Goelan**	França
CamModul	Suécia	**HI-MILL**	Itália
CAMWrite	Reino Unido	**Mr. Machinist**	EUA
CAPSMill	Índia	**PEPS**	Reino Unido
CIMPLEX	EUA	**PowerMILL**	Reino Unido
NC Code Creator	Irlanda	**ShopCAM**	EUA
DLog	Alemanha	**SmartCAM**	EUA
EdgeCAM	Reino Unido	**SURFCAM**	EUA
ESPRIT	EUA	**Synergy**	EUA
EZFeatureMill	EUA	**TechnoCAM**	Romênia
FastNurbs	EUA	**TekSoft**	EUA
FlexCAM	EUA	**WorkNC**	França

Tabela 2 – Sistemas CAM dedicados: em vermelho, os sistemas mais conhecidos no Brasil

MÓDULOS DE CAM PARA SISTEMAS CAD INDEPENDENTES					
software	*origem*	*CAD*	*software*	*origem*	*CAD*
ACU-CARV	EUA	AutoCAD	**HyperMILL**	Alemanha	CATIA, Mechanical Desktop, Solid Designer
Auto-Code Mechanical	EUA	AutoCAD	**MASTERCAM**	EUA	SolidWorks
AutoPRO	EUA	AutoCAD	**NC Auto-Code**	EUA	AutoCAD
Camstation	Brasil	Microstation	**NC Polaris**	EUA	AutoCAD
FastNurbs[1]	EUA	Cadkey	**NC Works**	EUA	AutoCAD
Camand	EUA	IDEAS	**SURFCAM**[1]	EUA	SolidWorks
CAMWorks (TekSoft)	EUA	SolidWorks			

Tabela 3 – Módulos de CAM para integração com sistemas CAD independentes: em vermelho, os *softwares* mais conhecidos no Brasil

2.1.4 QUANTO À PLATAFORMA

Quanto ao tipo de *hardware* requerido, os *softwares* pesquisados se dividem desta forma:

- **Estações de trabalho, as ditas *workstations*.** Quanto mais poderosos os recursos de sistemas CAM, exigindo alta performance matemática e gráfica, mais é indicado este tipo de *hardware* [21, 27, 32]. Por isso, os chamados "grandes" sistemas CAD/CAM, como o Pro/Engineer, Euclid-IS, I/EMS, CATIA e Duct, eram tradicionalmente desenvolvidos exclusivamente para emprego em estações de trabalho [8];
- **Microcomputadores pessoais, PC`s.** Até pouco tempo ainda estava solidificada, entre especialistas e usuários de CAD/CAM, a opinião de que apenas *softwares* simples e de recursos limitados poderiam rodar em PC`s, cabendo às "poderosas" *workstation* os trabalhos mais pesados [3, 5, 6, 10, 33, 34]. Porém, o desenvolvimento do *hardware* dos PC`s, especialmente quanto a velocidade de processamento, vem sendo muito rápido nos últimos anos. Com o poderio comparável a algumas *workstations*, mas a custos bem mais baixos (menores do que os próprios PC`s de gerações anteriores), os PC`s se tornaram a opção natural para pequenas e médias ferramentarias [10, 28, 32];
- **Tanto estações quanto PC`s.** É a tendência dos sistemas CAM e CAD/CAM de alto nível, como *Duct/PowerMILL* e *Euclid Quantum*, que já oferecem versões para PC. Porém,

[1] São os mesmos da tabela 2, porém, podem ser utilizados como *softwares* dedicados ou integrados a um CAD.

para operações pesadas, que solicitam altíssimas velocidades de cálculo e de processamento gráfico, as *workstations* ainda são a única opção satisfatória [10].

Os *softwares* relacionados, quando instalados em estações de trabalho, podem rodar em:

- **UNIX.** Linguagem dos mais populares sistemas operacionais para estações de trabalho *Sun, Silicon Graphics* e *HP*, que atualmente dominam o mercado de estações [19, 28];
- **VMS.** Já foi um sistema operacional difundido, porém seu uso está caindo vertiginosamente [32];
- **Windows NT.** Em termos de CAD/CAM o *Windows NT* se aproxima ao *UNIX* em performance e barateia o *hardware*, levando os principais fabricantes de estações a lançar versões para este tipo de sistema dos seus *softwares* para UNIX [21, 28].

Por sua vez, os *softwares* instalados em PC's podem rodar em:

- **DOS.** Sistema no qual as primeiras gerações de CAD/CAM se baseavam. Vem sendo rapidamente ultrapassado pelo *Windows.*
- **Windows.** Desenvolvedores de CAM rapidamente reconheceram que características e funções do *Windows* são capazes de potencializar seus *softwares*, principalmente em termos de instalação, visualização gráfica, operação e interface com usuário, edição e integração de dados ou imagens com editores gráficos e de texto [27, 23]. Os novos sistemas de *32-bits, Windows 95* e *Windows NT*, permitem aproveitar melhor o potencial de processamento dos PC's, tornando a máquina mais veloz e estável, embora exijam mais memória e velocidade de processamento matemático e gráfico [27, 32, 21];

2.2 SISTEMAS CAM SELECIONADOS PARA ESTUDO DETALHADO DE PARÂMETROS E ESTRATÉGIAS

Devido à impossibilidade de se pesquisar a fundo todos os sistemas CAM encontrados no mercado, oito foram mais intensamente analisados, visando a obtenção das informações sobre a seqüência de programação, parâmetros de usinagem e estratégias, apresentadas nos capítulos 3 e 4: *Alphacam, Camand, Camstation, Cimatron, Hypermill, Powermill, Pro/Mfg e Teksoft.*

Dentro de um grupo de sistemas que poderiam ser analisados, devido a disponibilidade de contato com os mesmos, estes oito foram selecionados por representarem uma amostragem capaz de conter as diferentes características que atendem ao diversificado grau de complexidade dos moldes de injeção, uma vez que pertencem a categorias diferentes dentro de cada classificação apresentada anteriormente, como se vê pelas tabelas 4 e 5. Da mesma forma, as estratégias oferecidas pelos *softwares* deste grupo representam uma amostragem das estratégias oferecidas pelo atual mercado de CAM para fresamento de moldes em 2½ e 3 eixos, excluindo apenas estratégias para aplicações específicas, ou porventura, tipos que sejam encontrados em apenas um sistema.

	representações geométricas	*tipo de sistema*	*recursos de modelamento*	*plataformas*
Alphacam	wireframe superfícies	CAM dedicado	construção de linhas, curvas, superfícies não-complexas	PC Windows
Camand	wireframe superfícies sólidos	sistema CAD/CAM integrado ou módulo CAM integrado ao CAD	construção de linhas, curvas, superfícies complexas e sólidos	estação/PC Unix/Windows
Camstation	wireframe superfícies	módulo CAM integrado ao CAD	recursos do CAD ao qual está integrado	PC DOS/Windows
Cimatron	wireframe superfícies sólidos	sistema CAD/CAM integrado	construção de linhas, curvas, superfícies complexas e sólidos	estação/PC Unix/Windows
Hypermill	wireframe superfícies sólidos	módulo de CAM integrado a um CAD	dependem do CAD ao qual está integrado	estação/PC Unix/Windows
Powermill	STL	CAM dedicado	nenhum	estação/PC Unix/Windows
Pro/Engineer	wireframe superfícies sólidos	sistema CAD/CAM integrado	construção de linhas, curvas, superfícies complexas e sólidos	estação Unix
Teksoft	wireframe superfícies	sistema CAD/CAM integrado	construção de linhas, curvas, superfícies complexas	PC Windows

Tabela 4 – Características operacionais dos sistemas CAM analisados

	usinagem de modelos 2D e 2½D	*emprego na usinagem de superfícies complexas*	*fresamento em 5 eixos*	*simulador gráfico com imagens em "shade"*	*outros módulos de usinagem*
Alphacam	sim	não	sim	integrado	torneamento / EDM fio
Camand	sim	sim	sim	integrado	torneamento / EDM fio
Camstation	sim	não	não	não possui	nenhum
Cimatron	sim	sim	sim	integrado	EDM fio
Hypermill	sim	sim	não	incorpora o simulador dedicado N-See	nenhum
Powermill	não	sim	não	integrado	nenhum
Pro/Engineer	sim	sim	sim	integrado	torneamento / EDM fio
Teksoft	sim	não	sim	integrado	torneamento / EDM fio

Tabela 5 – Recursos de programação dos sistemas CAM analisados

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE PROGRAMAÇÃO DO FRESAMENTO DE MOLDES VIA CAM

Volpato [1] relacionou os seguintes passos gerais da fabricação de moldes assistida por computador, dispondo-os em uma seqüência lógica de trabalho, também referida por *Christman* [11]:

a) Definição e preparação do processo de usinagem;

b) Preparação da geometria para o CAM;

c) Seleção de estratégias de usinagem;

d) Escolha de parâmetros utilizados no cálculo da trajetória da ferramenta;

e) Verificação e simulação gráfica das trajetórias da ferramenta;

f) Pós-processamento para obtenção do programa NC;

g) Comunicação com a máquina CNC.

Inicialmente, o programador do CAM deve obter um **modelo geométrico**, o qual define tamanho, forma e topologia do(s) elemento(s) a ser(em) usinado(s). A construção deste modelo pode se dar no próprio CAM, ou em um sistema CAD independente, dependendo do tipo de integração entre CAD e CAM e da rotina de trabalho de cada ferramentaria. Modelos geométricos podem ser representados por várias formas (ver item 2.1.2), em função da capacidade de cada modelador e da necessidade do usuário. Os tipos de representação e técnica de modelamento adotados influenciam a eficiência da sua transmissão do CAD para o CAM, nas possibilidades de manipulação da geometria, na maneira de se definir o processo e no tempo e confiabilidade do cálculo das trajetórias pelo algoritmo do *software* [11]. Para informações mais detalhadas sobre a construção de modelos geométricos e suas representações, podem ser consultadas as referências [3, 13, 20, 22, 25, 24, 35].

Com o modelo nas mãos, deve-se planejar o processo, ou seja, elaborar uma lista de operações, definindo quais partes serão fresadas, torneadas ou eletroerodidas e como proceder para che-

gar à superfície da peça a partir de um bloco bruto de material. Porém, para que se possa iniciar a geração das trajetórias, muitas vezes o modelo geométrico deve sofrer uma série de alterações, o que, por sua vez, está atrelado à maneira como o processo é planejado. Portanto, em muitos casos, a *definição do processo de usinagem* e a *preparação da geometria para o CAM* são passos interdependentes, ou até mesmo simultâneos.

Com o processo planejado e após uma análise visual do modelo já preparado na tela do CAM, o programador planeja uma primeira seqüência de **estratégias de usinagem**. Parâmetros para geometria de ferramentas, material bruto, movimentos específicos da ferramenta, planos de segurança, dados de corte, etc. são especificados. Baseado em toda esta coleção de dados o programa calcula as trajetórias, consumindo um certo tempo para processamento, para então apresentar na tela as trajetórias sobre o modelo.

O programador analisa estes resultados, podendo ser auxiliado por simuladores de usinagem, programas que mostram o material bruto sendo removido pela ferramenta através de uma imagem tridimensional colorida. Se a avaliação dos resultados for insatisfatória, selecionam-se outras estratégias, ferramentas e parâmetros e repete-se o roteiro. Caso contrário, se o programador considerar que a peça será usinada de forma satisfatória quanto à qualidade superficial exigida, ao tempo de usinagem na máquina e ao desgaste da ferramenta, o programa estará pronto para ser pós-processado[2]. Finalmente, o programa é enviado para o controlador da máquina, seja por um disquete, seja por um cabo que conecta o *hardware* que roda o CAM com a máquina ou por um sistema intermediário de distribuição de programas de controle numérico, o DNC (*Distributed Numerical Control*).

A seleção das estratégias de usinagem e dos de programação, etapas c) e d) relacionadas por *Volpato*, constituem a etapa de **geração das trajetórias**. Sendo esta o enfoque principal deste trabalho, será detalhada neste e nos próximos capítulos. Contudo, tendo em vista a visualização global da programação do fresamento de moldes via CAM, se fazem necessários comentários gerais para todas as demais etapas, em maior ou menor grau de profundidade. Desta forma, as etapas a) e b) serão apenas brevemente comentadas, pois destas depende o início da *programação propriamente dita*. Os passos f) e g), respectivamente, *pós-processamento* e *comunicação com a máquina*, ao lado

[2] O pós-processamento transforma os códigos gerados pelo CAM para o formato específico aceito pelo controlador da máquina CNC. Maiores detalhes são fornecidos pelo item 3.6.

de outras tarefas que finalizam a operação de um sistema CAM para fresamento de moldes, são comentadas brevemente. Maiores comentários serão dispensados à etapa e), que diz respeito à *verificação* dos programas gerados. Isto se justifica em vista da freqüente necessidade de se efetuar correções nas trajetórias geradas, o que, embora não salientado por *Volpato* [1], também se constitui uma importante etapa do fresamento de moldes via CAM.

3.1 DEFINIÇÃO E PREPARAÇÃO DO PROCESSO

Conforme mostra a tabela 6, muitas são as partes e componentes de um molde de injeção e vários processos são utilizados para sua fabricação. Algumas partes de um molde são constituídas por elementos que podem ser comprados diretamente de fornecedores de **componentes padronizados**, enquanto outras, como **canais de resfriamento,** embora possam ser obtidos pelas rotinas de furação dos *softwares* de CAM (principalmente no caso de placas com muitos furos do mesmo diâmetro) são confeccionados com operações de usinagem convencionais [36, 37]. **Superfícies de fechamento**, da mesma forma, podem ser fresadas convencionalmente ou por programas NC [14, 38]. Dependendo da forma e da dimensão, da disponibilidade de ferramentas e máquinas e de características do molde, os **canais de injeção** podem ser executados por **remoção por faísca elétrica** (*Eletrical Discharge Machining* ou EDM, ou ainda conhecida informalmente como eletroerosão), usinados em fresadoras convencionais ou fresados por programas NC, neste caso com a programação diretamente na máquina (***Manual Data Input***, ou MDI) ou via CAM [14, 38]. A cavidade que molda o produto pode ser confeccionada por vários processos, como por exemplo, fundição em areia, cunhagem e deposição eletrolítica, além do fresamento por cópia ou torneamento (para moldes redondos) [3, 24]. Porém, quando a geometria requerida é complexa (crescente exigência do mercado do plástico), técnicas mais modernas são necessárias, como a remoção por faísca elétrica, a remoção eletroquímica e o **fresamento em máquinas CNC com programação realizada em sistemas CAM** [1, 2, 3, 6].

Embora existam alguns *softwares* de CAM, ditos *knowledge-based systems* ou **sistemas baseados em conhecimento** e *softwares* de CAPP (*computer-aided process planning*), cuja função é auxiliar e automatizar tarefas do planejamento do processo, estes sistemas[3] ainda não atingiram um grau tecnológico suficiente para o amplo emprego na área de moldes de injeção, devido à comple-

[3] Para maiores detalhes ver referências 11, 94, 95, 96, 97 e 98.

xidade geométrica da maioria dos produtos plásticos, adequando-se, geralmente, para componentes e peças prismáticas [40].

elemento a ser fabricado	processos utilizados
placas base ou de fixação	componente normalizado / usinagem convencional[4]
placa porta-extratores	componente normalizado / usinagem convencional
placa extratora	componente normalizado / usinagem convencional
extratores	componente normalizado / usinagem convencional
buchas-guia	componente normalizado / usinagem convencional
pinos guia	componente normalizado / usinagem convencional
bucha de injeção	componente normalizado / usinagem convencional
blocos espaçadores	componente normalizado / usinagem convencional
anel de centragem	componente normalizado / usinagem convencional
canais de resfriamento	furação convencional / CNC via MDI
canais de injeção	furação convencional / CNC via MDI ou via CAM / EDM
placas porta-cavidades	componente normalizado / usinagem convencional
fechamento	usinagem convencional / CNC via MDI ou via CAM
insertos com as cavidades	usinagem convencional / CNC via MDI ou via CAM / EDM
eletrodos	usinagem convencional / CNC via MDI ou via CAM

Tabela 6- Elementos do molde e seus processos de fabricação

Desta forma, para definir como será fabricada cada parte do molde, bem como planejar outros passos de sua manufatura (retificação, tratamento térmico, polimento, ajustagem, etc.), ordenar e distribuir os postos de trabalho para execução destes serviços, geralmente as ferramentarias empregam técnicos em análise de processo (processistas). Muitas vezes o processista e o programador de CAM são a mesma pessoa, mas em outros casos, em consenso com o processista, o próprio programador altera detalhes do processo. A principal preocupação do processista diz respeito aos componentes não diretamente relacionados com a moldagem, fabricados sem auxílio do CAM, cabendo ao programador do CAM definir a usinagem das cavidades dos moldes por ele indicados. É o programador quem estabelece a divisão das várias partes da cavidade do molde e como cada uma será usinada, dentro da capacidade da máquina definida pelo processista e da disponibilidade de ferramentas.

Freqüentemente os moldes possuem regiões com geometrias impossíveis de serem usinadas com ferramentas normais, como as fresas de topo reto e esféricas [3, 14, 38]. Um dos exemplos mais típicos são cantos vivos. Também são comuns pequenos detalhes estreitos e profundos, que só

[4] Considerando como usinagem convencional os processos de fresamento e torneamento manuais e por cópia.

poderiam ser usinados por fresas de pequeno diâmetro e grande altura, portanto frágeis e muito suscetíveis à vibrações, inviabilizando o fresamento. Geometrias deste tipo devem ser erodidas, e o programador é responsável tanto por determinar quais áreas da peça são melhor executadas por eletrodos ao invés de fresas, quanto por providenciar a fabricação dos eletrodos necessários. Da mesma forma que a separação de superfícies para as duas metades do molde, a partir do modelo da peça, o programador seleciona as entidades geométricas que formam o detalhe a ser erodido, para com estas criar outras entidades para completar a forma do eletrodo [14, 38]. Os eletrodos, caso necessário, são usinados via CAM, em programas separados.

Outras situações com as quais o programador freqüentemente se depara são a usinagem de moldes muito grandes, cujo comprimento ou largura é maior que o curso dos eixos da mesa da máquina-ferramenta ou moldes que precisem de operações em dois ou mais lados [14]. Nestes casos o programador divide a geometria do molde em tantas partes quanto forem necessárias e gera seqüências de programas independentes, sendo que o operador da máquina se encarrega de reposicionar e referenciar novamente a peça na mesa da máquina entre cada programação. Outro caso comum é a máquina-ferramenta não suportar um número excessivo de linhas de programa e não se dispor de um sistema eficiente para distribuição dos programas. O programador também deve dividir a geometria do molde em várias partes, cuidando para que a ferramenta não penetre em áreas externas à parte sendo programada, mas que pertencem à geometria de uma região contígua, previamente ou ainda não programada[5].

3.2 PREPARAÇÃO DA GEOMETRIA PARA A PROGRAMAÇÃO DO FRESAMENTO

Os passos a serem seguidos nesta etapa dependem muito de como o *software* de CAM trata a obtenção da geometria do modelo. De um modo geral, seja o modelamento um recurso integrado em um sistema CAD/CAM ou não, o programador deparar-se-á com a representação de uma peça na tela. Esta peça[6] pode ser o produto moldado, uma placa-macho ou fêmea do molde ou apenas

[5] Nota-se que estas tarefas dizem respeito à preparação da geometria para a geração das trajetórias, embora estejam incluídas no item sobre planejamento do processo, mostrando o quanto os dois passos estão relacionados.

[6] Quando isolado, o substantivo "peça" será empregado, daqui para frente, para denominar o modelo que está sendo manuseado pelo usuário do CAM, podendo ser o produto (peça de plástico), o molde, um componente do molde, uma parte de um componente ou uma região de um produto, molde ou componente.

um de seus componentes, o que varia de empresa para empresa, conforme seu roteiro de trabalho padrão e os recursos de CAD e CAM disponíveis.

Em alguns casos, o projeto do molde é executado em 2D, e o programador recebe um desenho em papel (geralmente uma cópia heliográfica) em mãos e um modelo magnético do produto [14]. Nesta situação o programador separa as superfícies de modo a construir um modelo para cada metade do molde e gera a superfície de fechamento. Geralmente isto é feito copiando as superfícies desejadas e mantendo-as em *layers* diferentes para cada parte do molde. Um ou mais *layers* podem ser selecionados, para a visualização apenas das partes que serão usinadas. Para isto o CAM deve ter recursos mínimos de modelamento que permitam tais tarefas. Em *softwares* que não foram desenvolvidos para manusear entidades geométricas deste nível, pode-se usinar o macho a partir do produto, desde que seja determinado um sobrematerial negativo para considerar sua espessura, e utilizar um comando que habilita a geração de trajetórias para a fêmea, invertendo o lado da superfície do modelo que deve estar em contato com a ferramenta [42]. Muitas vezes o modelo do produto ainda não sofreu a expansão necessária para compensar a contração do plástico. Quando projeto e programação usam sistemas diferentes, o modelo importado pelo CAM pode sofrer algumas anomalias causadas pelo mau interfaceamento, implicando a reconstrução de algumas superfícies [13, 38]. Se o CAM não tiver recursos de modelamento suficientes para remediar estes problemas, trabalho adicional será gerado para levar o modelo para um CAD, consertar a geometria e novamente transmiti-lo ao CAM.

As modernas ferramentarias, porém, preferem projetar seus moldes tridimensionalmente, normalmente em sistemas CAD ou CAD/CAM com modelamento paramétrico e/ou variacional [14]. A grande vantagem deste procedimento, do ponto de vista exclusivo do CAM, é que o modelo repassado ao programador representa o molde, evitando tanto a fastidiosa e demorada operação da separação de superfícies para obtenção das duas metades do molde, quanto a construção do fechamento, a expansão do modelo e outros inconvenientes relacionados à geração da usinagem a partir do modelo do produto. Com isto, o programador pode se concentrar somente na definição de detalhes do processo e na geração das trajetórias. Os problemas de importação, porém, podem continuar acontecendo se a interface utilizada não funcionar corretamente.

3.3 GERAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS

Esta etapa do trabalho no CAM obedece uma série de aberturas de menus, preenchimento de campos, seleções de geometrias via teclado e *mouse*, observações das imagens da tela, etc.. Embora seqüência de tarefas, os parâmetros, o modo como se informa os dados ao sistema e a rotina de tarefas executada para ativar estas informações sejam peculiares de cada sistema CAM, alguns passos são fundamentais para que as trajetórias possam ser geradas de acordo com os movimentos de ferramenta desejados pelo programador. Esta seção do trabalho apresenta tanto estas informações básicas como alguns outros parâmetros freqüentemente oferecidos.

3.3.1 CRIAÇÃO DO BLOCO

A peça é usinada a partir de um material bruto fixado à mesa da máquina-ferramenta, cuja forma é pré-definida pelo processista. Geralmente, um dos quatro tipos de bloco abaixo são utilizados [14, 38]:

- **bloco hexaédrico**: cortado na área de preparação de material da ferramentaria e esquadrejado em uma fresadora convencional para deixá-lo nas dimensões especificadas pelo programador ou processista;
- **bloco pré-usinado**: também passa por uma fresadora convencional para tomar uma forma que diminua o tempo de desbaste na máquina CNC;
- **montagem de blocos**: vários blocos hexaédricos são soldados ou parafusados em uma base, solução para moldes muito grandes e irregulares, como, por exemplo, para termoformagem dos painéis das portas de refrigeradores domésticos;
- **peça fundida**: o bloco tem uma geometria próxima da peça a ser usinada, para diminuir o tempo de usinagem e o desperdício de material, geralmente para peças grandes.

Na programação no CAM, um bloco (*block, workpiece, stock*) deve ser criado para operações de desbaste e, dependendo do *software*, também para acabamento, informando ao algoritmo onde ele deve gerar as trajetórias da ferramenta. O bloco criado no CAM não tem necessariamente as mesmas dimensões do bloco de material real, pois este deve ter uma dimensão suficiente para a colocação dos dispositivos de fixação, o que geralmente não é considerado durante a programação [38, 41, 42, 53, 55]. Além disso, usinagens de regiões específicas do modelo são programadas utili-

zando blocos (no *software*) específicos, de forma a limitar a geração das trajetórias sobre o modelo ao gosto do usuário.

O programador tem várias alternativas para criação do bloco, sempre dependendo dos recursos que o *software* dispõe. **Blocos hexaédricos** geralmente são criados automaticamente[7] a partir de linhas que passam pelos pontos máximos e mínimos da geometria da peça, que podem sofrer um *offset* para considerar sobrematerais positivos ou negativos. Quando o bloco de usinagem for **pré-usinado, fundido** ou for uma **montagem**, alguns *softwares* permitem seu modelamento a parte (ou a importação de um modelo da geometria deste bloco) [41, 42, 52, 54].

3.3.2 INDICAÇÃO DA FERRAMENTA A SER UTILIZADA PELA OPERAÇÃO

As ferramentas para fresamento empregadas no setor de moldes, geralmente, se resumem à **fresas de topo com haste cilíndrica**. Tradicionalmente este tipo de ferramenta apresenta três configurações para o seu topo, podendo ser reto, semiesférico com raio de arredondamento dos cantos, a chamada ponta toroidal (figura 1). Outra ferramenta que encontra algumas aplicações no setor é a **fresa de topo com haste cônica**, com as mesmas variações dos tipos de ponta das fresas de haste cilíndrica. Menos utilizadas, fresas com raios côncavos e outros ferramentas de forma, dificilmente são utilizadas por programas para geometrias tridimensionais, restando como um bom artifício para usinagem em 2 ½ eixos de algumas regiões de modelos em 2 e 2 ½ D. Resumindo, as três ferramentas básicas para fresamento de moldes, tanto inteiriças como com insertos, são as fresas:

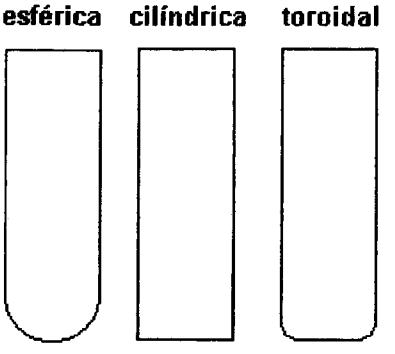


Figura 1 – Perfil de fresas com haste cilíndrica

- de topo reto, plano ou de ponta cilíndrica, mais utilizadas para desbaste, comumente chamadas de fresas **cilíndricas** ou simplesmente de fresas de **topo** (***end mills***);
- com topo semiesférico ou de ponta esférica, mais empregada para operações de acabamento de superfícies esculpidas, denominadas pela maioria dos artigos técnicos como fresas de **bola** e conhecida em chão-de-fábrica como fresas **esféricas** (***ball mills***);

[7] Fica claro que o termo "automático", muito utilizado neste trabalho, implica sempre em acionar um comando.

- de topo reto com raio de arredondamento, muito usada para qualquer operação, freqüentemente chamadas de fresas **toroidais** ou ainda "tóricas" ou "toricais" (***bull mills*** ou ***tip radiused mills***).

Nos *softwares* de CAM, os parâmetros relativos à geometria das ferramentas podem estar dentro dos menus de estratégias ou em menus próprios. Dois parâmetros são sempre pedidos pelo *software*, o **diâmetro** da ferramenta e o **raio de arredondamento** da quina, que se for zero define uma fresa de topo, se for igual à metade do diâmetro define um fresa de bola e nos demais casos define um ferramenta toroidal ou uma fresa com insertos intercambiáveis retangulares com pequenos arredondamentos da quina (geralmente entre 0,2 e 1,2 mm). Para outros tipos de ferramenta, como fresas cônicas, mais dados são necessários. Alguns *softwares*, inclusive, já apresentam as alternativas de tipo de ferramenta, limitando os campos a serem preenchidos no menu, conforme o tipo selecionado [41, 42]. Outras informações geométricas que podem ser requeridas são a **altura livre**, ou seja, a altura em que o diâmetro de corte não é alterado, a **altura do gume**, o **ângulo de inclinação da haste** (haste cônica) e os **diâmetros e alturas do suporte** da ferramenta. A figura 2 mostra menus de sistemas CAM para seleção de ferramentas.

3.3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DE FERRAMENTAS

As **fresas cilíndricas** (de ponta cilíndrica) foram durante muito tempo consideradas as ideais para desbaste de grandes volumes, devido à maior taxa de remoção de material em cada passada [43, 44, 45, 46]. Além disso, o corte é sempre lateral, mantendo constante o valor da velocidade de corte, ao contrário das fresas esféricas cuja velocidade de corte diminui gradativamente da periferia para o centro, onde a velocidade é zero. Outro motivo era que os insertos intercambiáveis, que aumentam a durabilidade da ferramenta e possibilitam maiores velocidades de corte, eram disponíveis somente para fresas cilíndricas [47]. Ultimamente, porém, com o desenvolvimento de insertos também para **fresas toroidais** [48], este tipo de ferramenta se tornou muito eficiente para o desbaste, principalmente em cavidades com geometria com pouca inclinação e curvaturas acentuadas (figura 3), uma vez que reduz o excesso de material em forma de degrau deixado pela fresa cilíndrica [49]. Além disso, ferramentas com insertos intercambiáveis redondos são muito robustas, es-

táveis, vibram menos e suportam melhor as difíceis condições de trabalho pelo acúmulo de cavaco entre cada dente da fresa, principalmente em cavidades profundas e o gradiente de velocidade no gume é menor do que nas fresas esféricas [48, 49]. Mesmo fresas inteiriças com geometria toroidal, para desbaste de cavidades menores, vêm sendo cada vez mais empregadas [14, 38]. Desta forma, as fresas cilíndricas são geralmente aplicadas em situações em que não se dispõe de fresas toroidais com o diâmetro ou altura requeridos, ou quando a geometria do modelo favorece sua aplicação, como em cavidades com paredes quase verticais [49] ou quando é mais vantajoso um maior incremento lateral para um mesmo diâmetro. Fresas toroidais também são utilizadas para operações de acabamento, pois reúnem vantagens de fresas cilíndricas e esféricas [49].

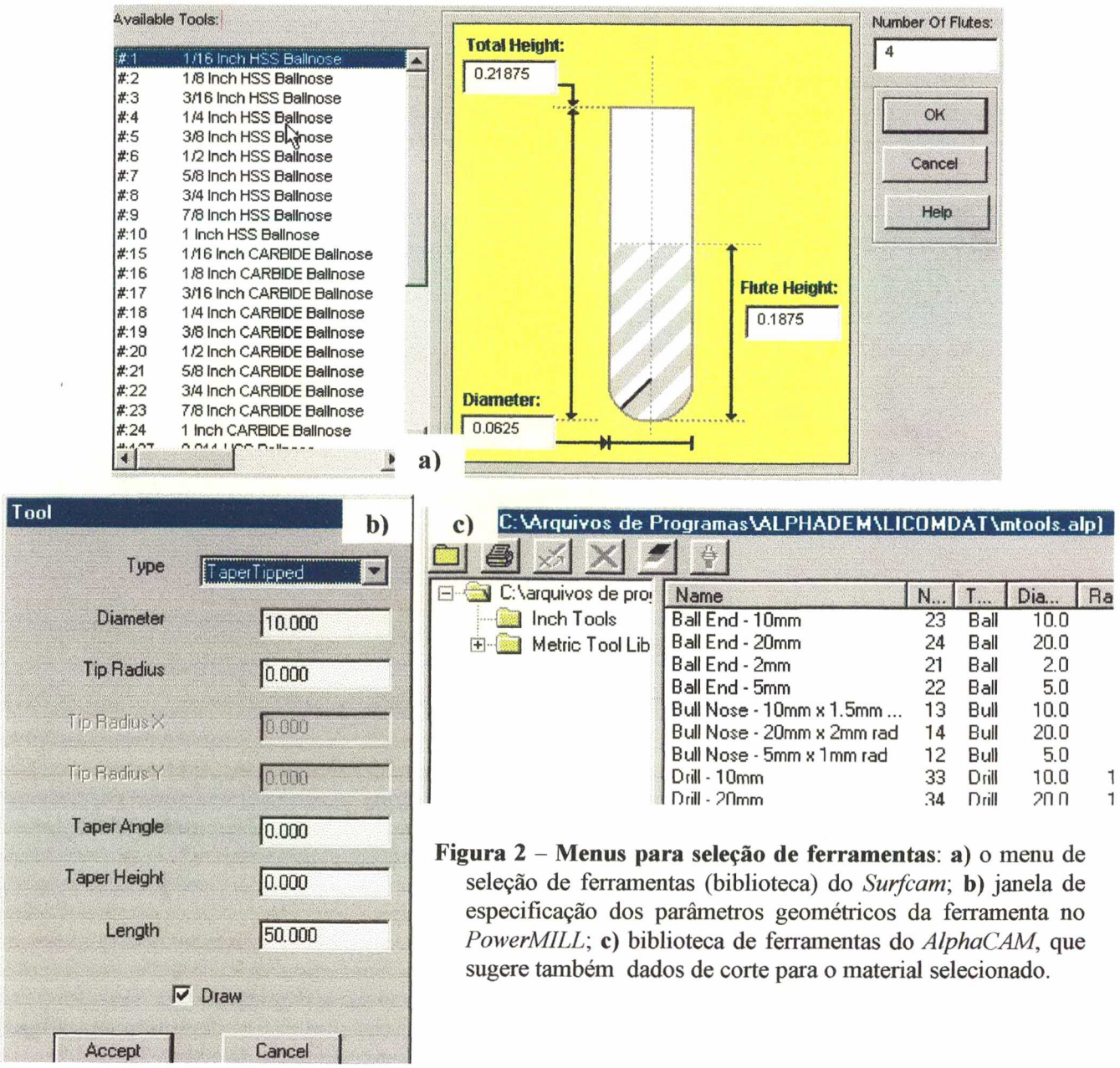
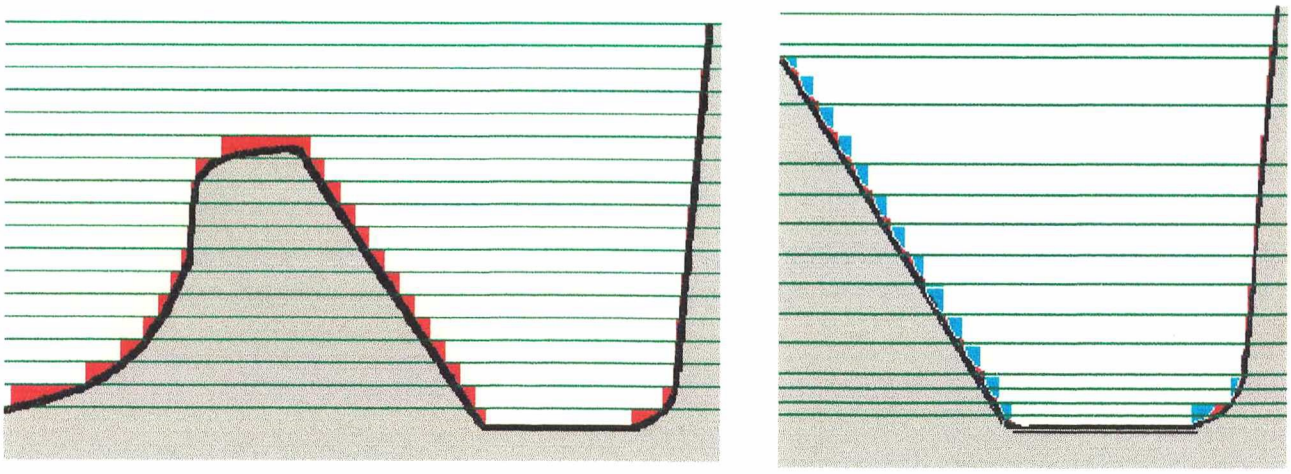


Figura 2 – Menus para seleção de ferramentas: **a)** o menu de seleção de ferramentas (biblioteca) do *Surfcam*; **b)** janela de especificação dos parâmetros geométricos da ferramenta no *PowerMILL*; **c)** biblioteca de ferramentas do *AlphaCAM*, que sugere também dados de corte para o material selecionado.

As **fresas esféricas** são as mais populares para operações de acabamento em geral, principalmente em geometrias de forma complexa, com grandes e constantes variações nos graus de curvatura e inclinação, como nas superfícies de forma livre [14, 38, 43, 45, 50,]. Quanto ao desbaste, devido à pequena taxa de remoção de material em comparação com as anteriores, costumam ser utilizadas somente em cavidades pequenas cuja geometria apresente muitas curvaturas [51], embora o surgimento de insertos intercambiáveis para estas ferramentas possibilite o uso de maiores velocidades de avanço, compensando o menor incremento lateral necessário.

Quanto às suas **dimensões**, em termos gerais, a ferramenta deve ter o maior diâmetro capaz de atingir todas as regiões do modelo [14, 38, 44]. Porém, quando a peça possui regiões estreitas (em relação à sua área total) ou cantos internos com pequenos raios de arredondamento, a usinagem exigiria uma ferramenta muito pequena, e se tornaria improdutiva em termos de tempo. Nestes casos, são utilizadas operações em separado para tais regiões, remoção do material destas áreas por eletroerosão e programas de pré-acabamento ou acabamento fino dos cantos [14].



a) b)

Figura 3 – **Corte de uma cavidade com ilha, após o desbaste:** em preto, o sobrematerial especificado; em vermelho, o material adicional deixado pela fresa; em verde, os planos de corte; **a)** material deixado por uma fresa cilíndrica; **b)** redução da quantidade de sobrematerial graças ao emprego de uma fresa toroidal (do mesmo diâmetro); o azul representa a quantidade de material deixado pela fresa cilíndrica que é removido por uma fresa toroidal do mesmo diâmetro

3.3.4 ESPECIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA A FERRAMENTA SELECIONADA

Ainda no menu de ferramentas, ou em um menu próprio devem ser informados ao *software* os parâmetros de corte para a ferramenta selecionada:

- **avanço for gume (por faca, por corte, por dente), f_z.** É o percurso de avanço por dente, medido no plano de trabalho, conseqüentemente a distância entre duas superfícies de corte sucessivas, medida na direção do avanço da ferramenta [52]. Dado em **mm/gume**.
- **velocidade de corte, v_c.** É a velocidade instantânea do movimento principal de um determinado ponto do gume [52], ou seja, a velocidade na qual o material do bloco é removido. Depende fundamentalmente do material do bloco e do material da ferramenta. Dada em **m/min**.
- **velocidade de avanço, v_f.** Velocidade relativa entre o eixo da ferramenta e a peça usinada durante o corte [52]. O movimento pode ser feito pela mesa ou pelo cabeçote da máquina, dependendo de sua configuração. Dada em **mm/min**.
- **rotação, n.** Rotação da ferramenta presa no fuso da máquina. Dada em **rpm**.
- **velocidade de avanço rápido.** Velocidade relativa entre o eixo da ferramenta e a peça usinada, para posicionamentos rápidos. Cada máquina possui uma velocidade máxima para cada eixo, que geralmente é a usada para o avanço rápido, ainda que alguns *softwares* de CAM permitam a programação de velocidades inferiores. Também dada em **mm/min**.

Boa parte dos *softwares* permitem que diferentes avanços possam ser programados diferenciadamente para diversas situações que a ferramenta possa encontrar. Por exemplo, quando a ferramenta corta com todo o diâmetro ou quando entra no material com seu topo (neste caso específico o avanço geralmente varia entre 20 e 30% do avanço de corte normal [14, 38, 44]), o avanço deve ser mais baixo, para não comprometer a integridade da ferramenta nem o acabamento da peça.

As informações que são incluídas no programa CNC são a rotação **n** e o avanço v_f (tanto para avanço de corte quanto para avanço rápido). Entretanto, como parte dos programadores prefere programar a usinagem em termos do avanço por dente f_z e da velocidade de corte v_c, alguns *softwares* também mostram campos de preenchimento para estes dados, bem como para o número

de dentes **z**. O avanço por dente se relaciona com a velocidade de avanço pela equação 1 e a velocidade de corte com avanço e rotação pela equação 2.

$$v_c = \frac{\pi.D.1000}{n} \quad (1) \qquad v_f = fz.z.n \quad (2)$$

Embora não existam em todos os sistemas CAM, **bibliotecas de ferramenta** [53, 54, 55] são um excelente recurso para a programação do fresamento de moldes, pois armazenam informações geométricas de cada ferramenta disponível (ver figura 2). Alguns *softwares* ainda incorporam uma **biblioteca de materiais** que, quando empregada em conjunto com a biblioteca de ferramentas, automaticamente atualiza os dados de corte para a ferramenta selecionada, cabendo ao programador confirmá-los ou alterá-los.

3.3.5 DETERMINAÇÃO DOS MOVIMENTOS GLOBAIS DA FERRAMENTA – SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA

Escolher a "estratégia" significa determinar a forma e a orientação dos movimentos da ferramenta sobre a peça durante a usinagem. As estratégias de desbaste são consideravelmente diferentes para desbaste e acabamento. Para o acabamento as possibilidades e diferenças de forma são muito maiores, justamente para que seja possível usinar de maneira apropriada as diversas geometrias, normalmente complexas, dos moldes para plástico. Já a grande maioria das estratégias desenvolvidas para o desbaste (tanto para modelos 2D e 2½D quanto 3D) movimentam a ferramenta em 2 ½ eixos sobre planos horizontais cuja altura Z é determinada pelo programador. As estratégias de acabamento para usinagem 2 ½D são, normalmente, muito semelhantes às de desbaste, variando apenas alguns parâmetros como o sobrematerial, que para o acabamento deve ser zero. No capítulo 4 são apresentados os vários tipos de estratégias oferecidos pelos sistemas CAM, mas a figura 4 antecipa a forma das trajetórias geradas por algumas das mais empregadas estratégias para acabamento 3D.

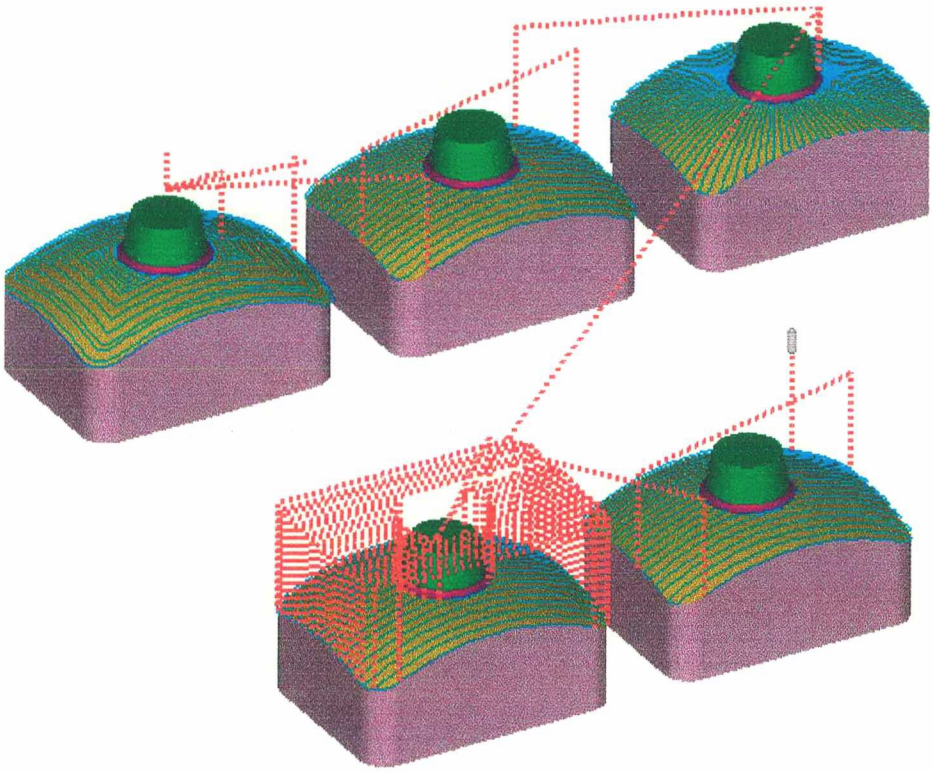


Figura 4 – Trajetórias (azul) **geradas por diferentes estratégias:** em vermelho os movimentos de posicionamento em avanço rápido

Para que o programador escolha os movimentos da ferramenta, os *softwares* de CAM geralmente apresentam um primeiro menu com as alternativas de processo. Com o processo escolhido, abre-se um outro menu mostrando os tipos de estratégias que podem ser utilizadas para tal processo. Selecionada a estratégia, mais um menu surge na tela, pedindo informações mais detalhadas sobre forma, direção, sentido da usinagem, requisitos tecnológicos e de processo, tolerâncias e região da peça a ser usinada (figura 5). Os principais parâmetros deste gênero são discutidos nos próximos ítens. Com a entrada de todos os parâmetros e informações necessárias para a estratégia selecionada, o programa processa as informações e seu algoritmo calcula as trajetórias.

3.3.6 SELEÇÃO DA ÁREA A SER USINADA

Na programação do fresamento de cavidades, pode-se usinar todo o modelo com um único programa ou selecionar estratégias diferentes para cada região, caso a aplicação de uma única estratégia não seja suficiente para usinar todas as geometrias de acordo com o necessário. Para operações de **desbaste**, normalmente a criação do bloco é suficiente para limitar a área de aplicação das trajetórias geradas [42, 53], mas em alguns *softwares* existe a flexibilidade da seleção individual ou conjunta das superfícies a usinar, mesmo dentro de um volume (bloco) ou um contorno [41, 55,

56]. O programador indica as superfícies a usinar selecionando-as diretamente na tela, ou por listas (pilha, menu) de superfícies, de acordo com o *software* utilizado.

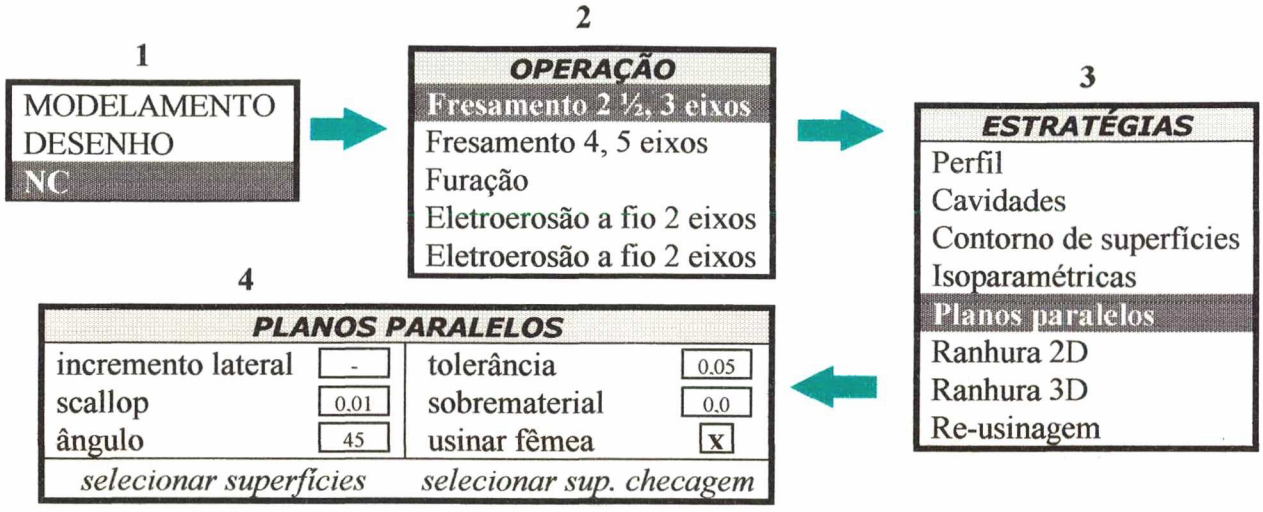


Figura 5 – Seqüência de menus para a seleção da estratégia e seus parâmetros: Em um hipotético sistema integrado CAD/CAM, um primeiro menu permite o acesso às funções de CAM, entre as quais a seleção do tipo de operação de usinagem (menu 2). Um terceiro menu habilita a escolha de um dos tipos de estratégia oferecidos para a operação escolhida. Para cada estratégia, um menu próprio permite a seleção de diversos parâmetros de programação, como mostra o menu 4

Para o **acabamento**, o procedimento de **seleção de superfícies** é o mesmo, porém, ao contrário do desbaste, é muito comum selecionar apenas uma superfície ou um pequeno grupo de superfícies para um programa e, dependendo do *software* e da estratégia, sem a necessidade de criação de um bloco [41, 42, 53, 55, 56]. Além da seleção de superfícies a usinar, a maioria dos *softwares* disponibiliza várias maneiras de selecionar a área que deve ser acabada. Algumas estratégias costumam exigir o modelamento de uma curva ou seqüência de curvas, formando um contorno que, projetado sobre as superfícies selecionadas no modelo, indica ao algoritmo onde gerar as trajetórias para o acabamento [53, 55, 56]. Outras estratégias requerem um contorno aberto, um contorno fechado (figura 6) ou dois contornos abertos (figura 7 e 8) [55]. Em alguns casos, também superfícies devem ser modeladas, não exatamente por exigência do algoritmo de usinagem, mas para viabilizar melhores soluções para uma determinada usinagem. Uma operação muito comum é estender superfícies ou criar entidades para fechar regiões abertas para evitar que o algoritmo gere trajetórias para o interior destas áreas (figura 9) [13]. Na maioria dos *softwares*, sempre que se exigir curvas ou superfícies de apoio, o programador as deve modelar antes de acionar o menu de estratégias, pois

estes menus contém "submenus" que orientam a escolha das superfícies de usinagem (*part surfaces*) e das curvas e contornos de apoio [42, 53, 55]. Além disso, estes menus podem pedir ao programador que indique **superfícies de verificação** (*check surfaces*), ou seja, superfícies que não devem ser usinadas pela estratégia escolhida, mas que de alguma forma estão dentro ou próximas às áreas selecionadas [53, 55]. Este procedimento garante que tais superfícies não sofram interferências nem colisões com a ferramenta. Alguns *softwares*, porém, requerem primeiramente a seleção da superfície desejada, para então possibilitar a ativação das funções do menu da estratégia ou do menu seleção de estratégias.

Conforme já referido, *softwares* de CAM que usam representação tipo STL para os seus modelos não são compostos por várias superfícies e sim por uma única entidade representando todo o modelo. Ao contrário de exemplos anteriores, este tipo de CAM não exige a execução de muitas tarefas antes da escolha da estratégia, mas apresenta certos recursos de seleção já dentro do menu da estratégia escolhida [42]. Um destes recursos é a determinação de um **ângulo de inclinação** máximo da geometria, para que sejam usinadas apenas as partes do modelo cuja inclinação esteja abaixo deste valor (figura 10). Outro é o **posicionamento de entidades** (pontos, linhas ou planos) a partir das quais ou para as quais as trajetórias são projetadas sobre a superfície.

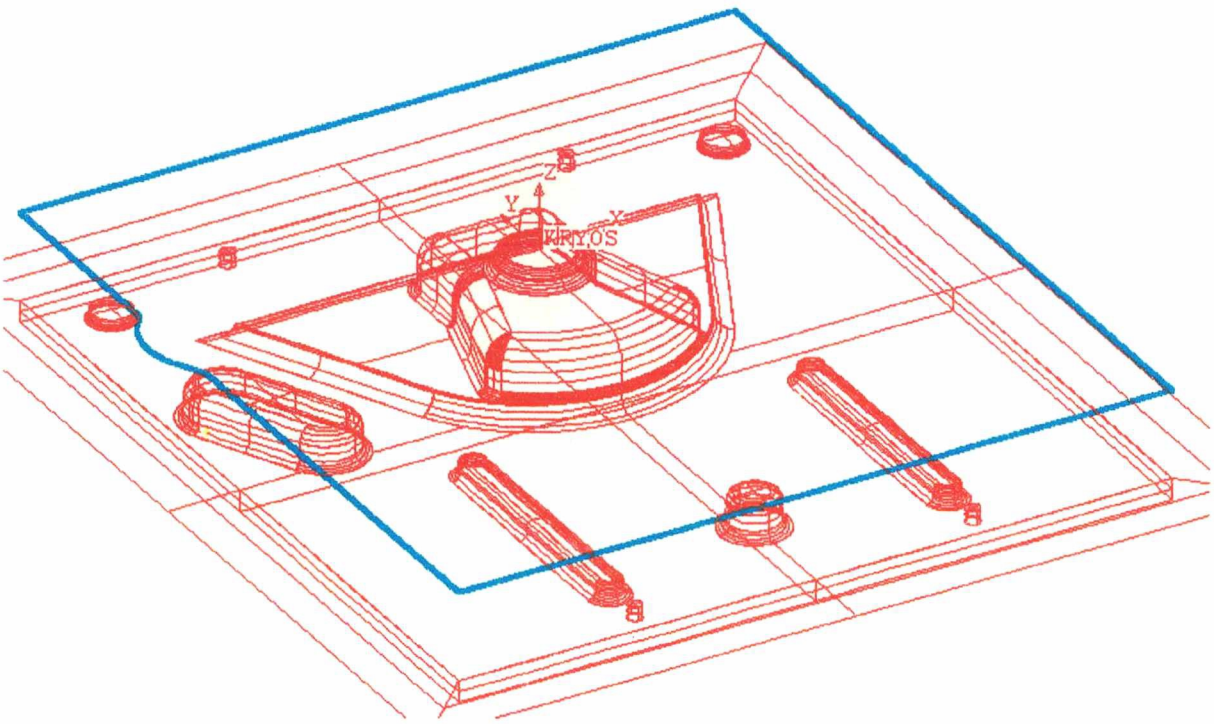


Figura 6 – Contornos delimitadores da área de usinagem (1): as entidades de apoio modeladas em azul formam um contorno fechado que limita a usinagem apenas às superfícies em vermelho que situam-se dentro da sua projeção

0.292.080-4
Biblioteca Universitária
UFSC

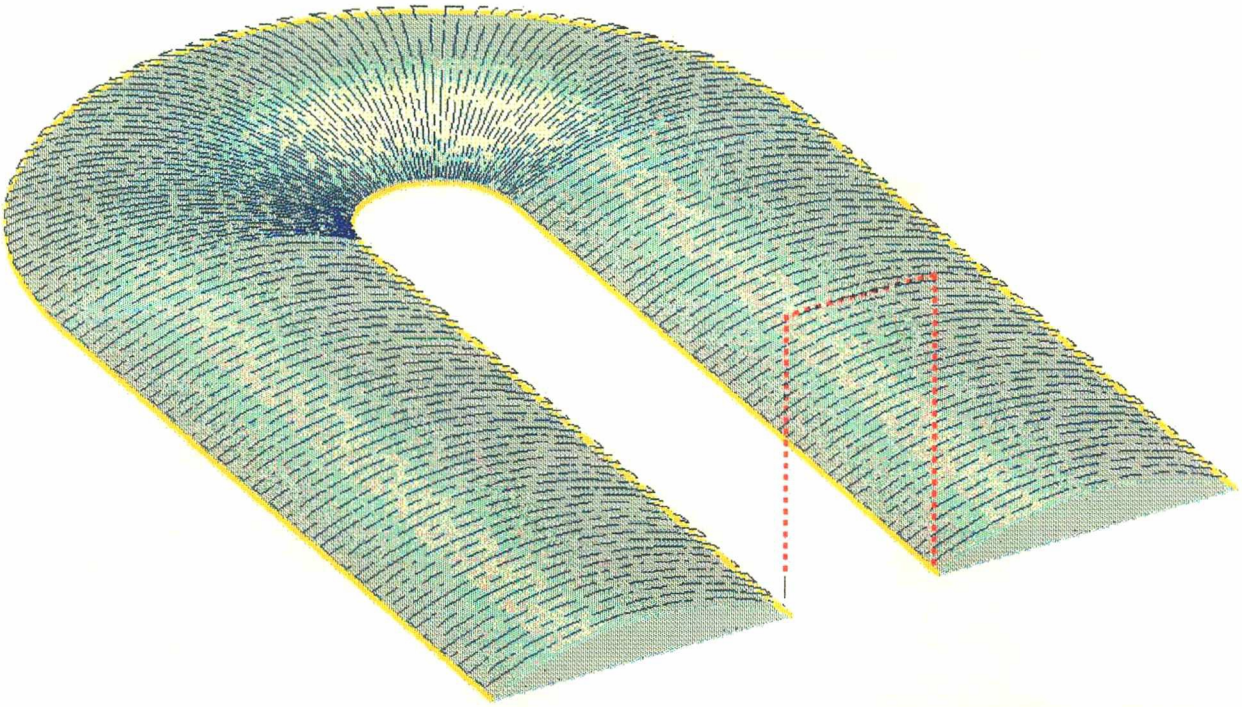


Figura 7 – Contornos delimitadores da área de usinagem (2): os dois contornos amarelos, extraídos dos limites da superfície, pelo programador no CAM, delimitam a área de aplicação das trajetórias (azul, para o corte e vermelho, para os movimentos em avanço rápido)

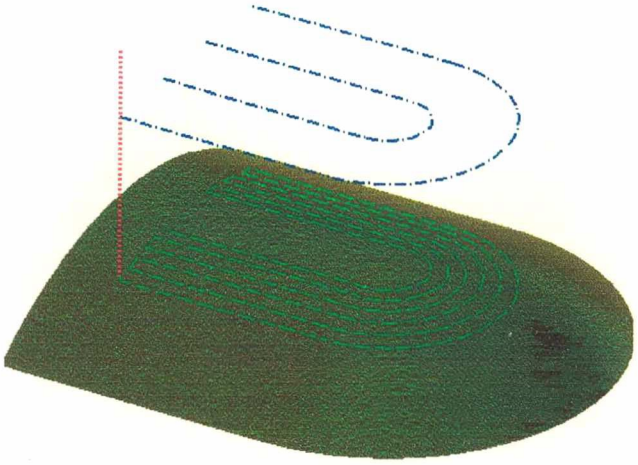


Figura 8 – Contornos delimitadores da área de usinagem (3): os dois contornos (azul) modelados pelo programador no CAM limitam a geração das trajetórias (verde) à região contida entre suas projeções na superfície selecionada do modelo (em vermelho o movimento em avanço rápido)

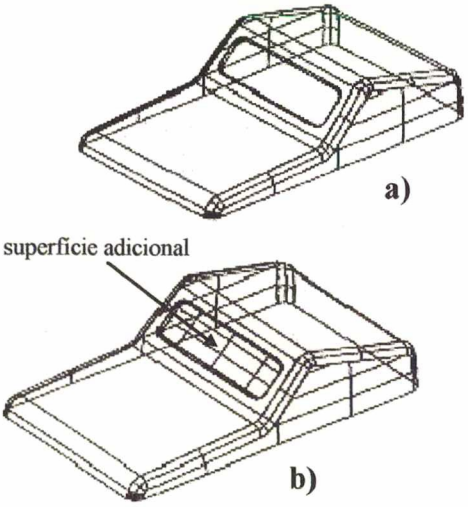


Figura 9 – Construção de geometrias de apoio: a) modelo do produto moldado; **b)** modelo do molde; a ferramenta não pode penetrar a região aberta no produto, mas fechada no molde

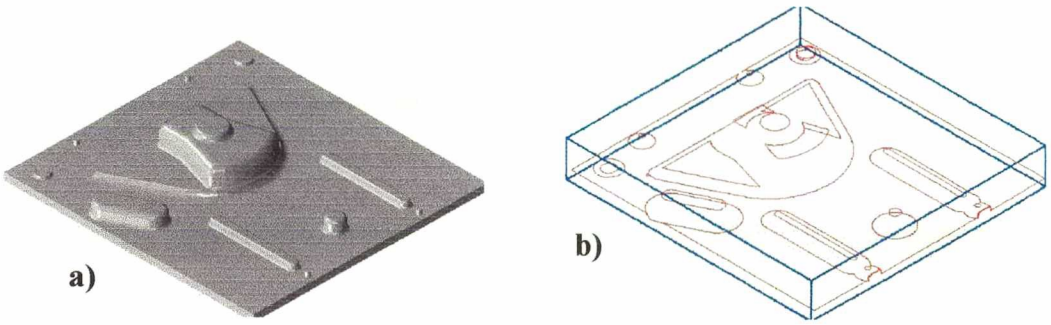


Figura 10 – Contornos delimitadores da área de usinagem (4): a) modelo do molde; b) contornos automaticamente calculados pelo software, limitando áreas com inclinação zero; em azul, o bloco de usinagem, que limita as regiões para as quais devem ser calculados os contornos

3.3.7 PARÂMETROS RELATIVOS AO POSICIONAMENTO E AOS MOVIMENTOS LOCAIS DA FERRAMENTA

Embora os sistemas CAM possuam seus próprios modos de trabalho, interfaces gráficas, nomês-fantasia para suas funções, etc., existe uma série de parâmetros principais que são comuns à maioria dos *softwares* e que de alguma forma devem ser especificados pelo programador. Estes parâmetros são relacionados abaixo, acompanhados por um ou mais termos em inglês, nos casos em que este(s) freqüentemente denominam o parâmetro, tanto na literatura quanto nos *softwares*.

PONTO INICIAL (*HOME*)

Ponto de onde parte a ferramenta no início do programa e para o qual a mesma retorna ao término da usinagem. Em casos de programas com troca automática de ferramenta, o "*home*" é o ponto de troca.

ZERO-PEÇA

Origem das coordenadas dos códigos do programa NC, deve ser informado ao controle CNC para que este o referencie em relação à origem da coordenadas da máquina, o ponto **zero-máquina**. A informação das coordenadas do zero-peça ao controle da máquina é um procedimento conhecido como "**zeramento**", no qual o operador da máquina-ferramenta utiliza apalpadores, *pre-sets*, ou até a própria ferramenta de corte. Por isso, o programador deve posicionar o zero-peça da maneira mais apropriada possível, geralmente no **centro da face superior** do bloco ou em um dos **cantos superiores** [14, 38]. O **zero-máquina**, por sua vez, não é determinado pelo programador do CAM, pois sua posição é definida pelo fabricante da máquina.

PLANO DE SEGURANÇA (*SAFE, CLEAR, TRAVERSE*)

Neste plano acontecem os movimentos em avanço rápido, necessários para diminuir o tempo dos movimentos de posicionamento da ferramenta. Deve estar afastado da peça o suficiente para evitar colisões com o bloco, com dispositivos de fixação ou com a própria superfície da peça. Planos muito altos, contudo, prolongam os movimentos de retração e descida da ferramenta, portanto aumentando o tempo da usinagem desnecessariamente.

PLANO DE INÍCIO OU SAÍDA (*START, Z UP*)

Posicionado entre a peça e o plano de segurança, todos os movimentos abaixo deste plano são feitos com a velocidade de avanço de corte programado, porém em alguns *softwares*, a retração da ferramenta é sempre em avanço rápido.

Opções de planos de segurança e início incrementais em relação à superfície podem ser encontradas em alguns *softwares*, conforme mostra a figura 11 [42].

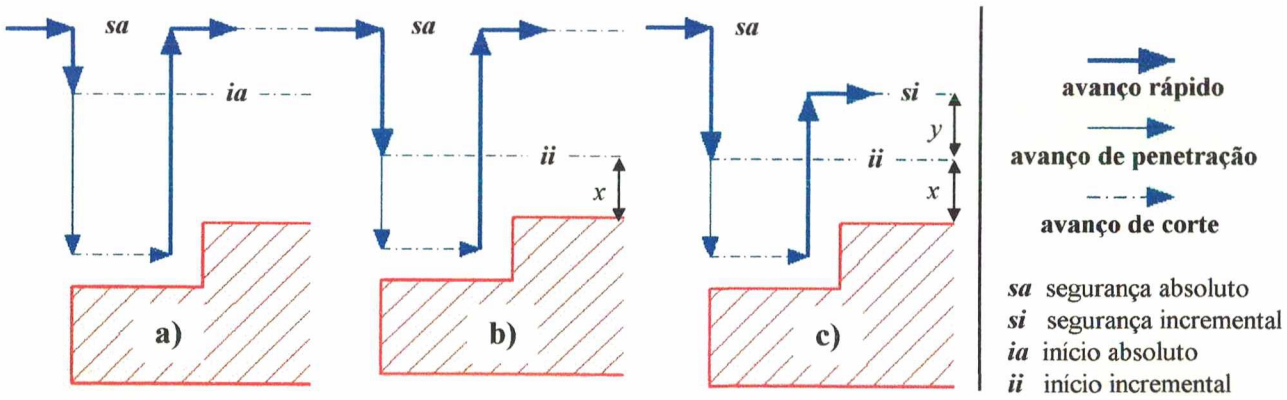


Figura 11 – Planos de segurança e início: a) planos com altura absoluta; **b)** plano de segurança com altura absoluta e plano de início com altura incremental segundo um valor x sobre a superfície da peça; **c)** planos de segurança e início incrementais por valores x e y

PENETRAÇÃO LATERAL, INCREMENTO LATERAL OU PROFUNDIDADE DE CORTE RADIAL – a_e (*STEP OVER, SIDE STEP*)

Parâmetro usado para o desbaste, seu valor corresponde a distância entre dois passes paralelos da ferramenta. Geralmente, o incremento lateral é igual a 70 ou 80% do diâmetro de fresas cilíndricas [44]. Com fresas toroidais, costuma-se usar um milímetro ou alguns décimos de milímetro a menos do que o diâmetro do topo, para evitar que seu raio de quina deixe uma estreita faixa de material entre cada passada paralela da ferramenta [14, 38]. O incremento ótimo para fresas esféri-

cas varia em cada caso, porém, normalmente, é igual a um valor que produza cristas (*scallops*) cuja altura, somada ao sobrematerial, possa ser removida pela fresa de acabamento [38].

PENETRAÇÃO PASSIVA, INCREMENTO VERTICAL OU PROFUNDIDADE DE CORTE AXIAL – a_p (*STEP DOWN*)

No desbaste, a profundidade de corte axial é definida pela altura dos patamares de corte, planos perpendiculares ao eixo da ferramenta que cortam a geometria da peça e são definidos pelo programador (ver ítens 4.1.4 e 4.2.) Estratégias de acabamento em 2½ eixos, como as que utilizam patamares semelhantes ao desbaste, também exigem a definição de um incremento perpendicular ao eixo da ferramenta [41, 42, 53, 54, 55, 56].

INCREMENTO 2D E INCREMENTO 3D

Estes parâmetros são usados em estratégias de acabamento no lugar dos anteriores, a_e e a_p. O incremento 2D representa a distância entre cada passada paralela, medido no plano perpendicular ao eixo da ferramenta, enquanto o incremento 3D é a menor distância entre cada passada paralela, medida em um plano contendo ambas as passadas. Dependendo do *software* e da estratégia, as trajetórias de acabamento podem ser calculadas especificando-se diretamente um valor ou através da determinação de uma **altura máxima das cristas** (*cusp height, scallop height*) deixadas entre um passe e outro, como se vê na figura 12 [42, 53, 55]. Esta opção permite constância e maior controle das ondulações da superfície usinada.

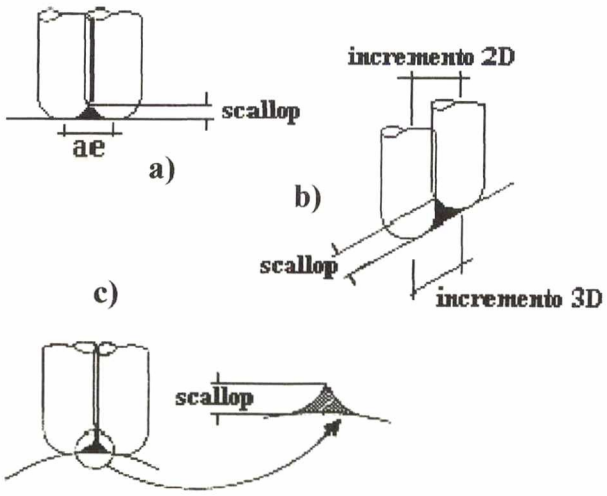


Figura 12 – Cristas ou *scallops* formados por passadas paralelas de fresas esféricas: a) usinagem de um plano horizontal; b) usinagem de um plano inclinado; c) usinagem de uma superfície convexa.

DIREÇÃO E SENTIDO DAS TRAJETÓRIAS

Em boa parte dos *softwares*, determinadas estratégias de acabamento exigem a especificação de direções e sentidos para o corte. Por exemplo, quando se seleciona uma superfície como a da figura 13, para ser usinada segundo suas curvas isoparamétricas (ver item 4.1.5), o programador informa ao *software* se quer usinar segundo as curvas ***u*** ou segundo as curvas ***v***. Selecionando a direção das curvas ***u***, ele ainda especifica o sentido, de baixo para cima ou de cima para baixo. Se a escolha recai sobre a direção ***v***, a próxima informação é o sentido da esquerda para a direita ou da direita para esquerda. O ponto (na superfície ou no contorno de apoio) a partir do qual começa a usinagem, ou seja, ponto de entrada da ferramenta, também pode ser um parâmetro a ser especificado pelo programador.

Em estratégias tipo zig-zag, seja para desbaste, seja para acabamento, pode-se optar em movimentar a ferramenta apenas em um dos sentidos, fazendo com que o movimento de posicionamento entre dois passes laterais seja feito em avanço rápido (*UNIDIR / BIDIR*).

Outra facilidade é a geração de trajetórias sobre uma determinada região com incrementos apenas ascendentes ou apenas descendentes (*UP ONLY / DOWN ONLY*), conforme os requisitos tecnológicos da operação (ver figura 14).

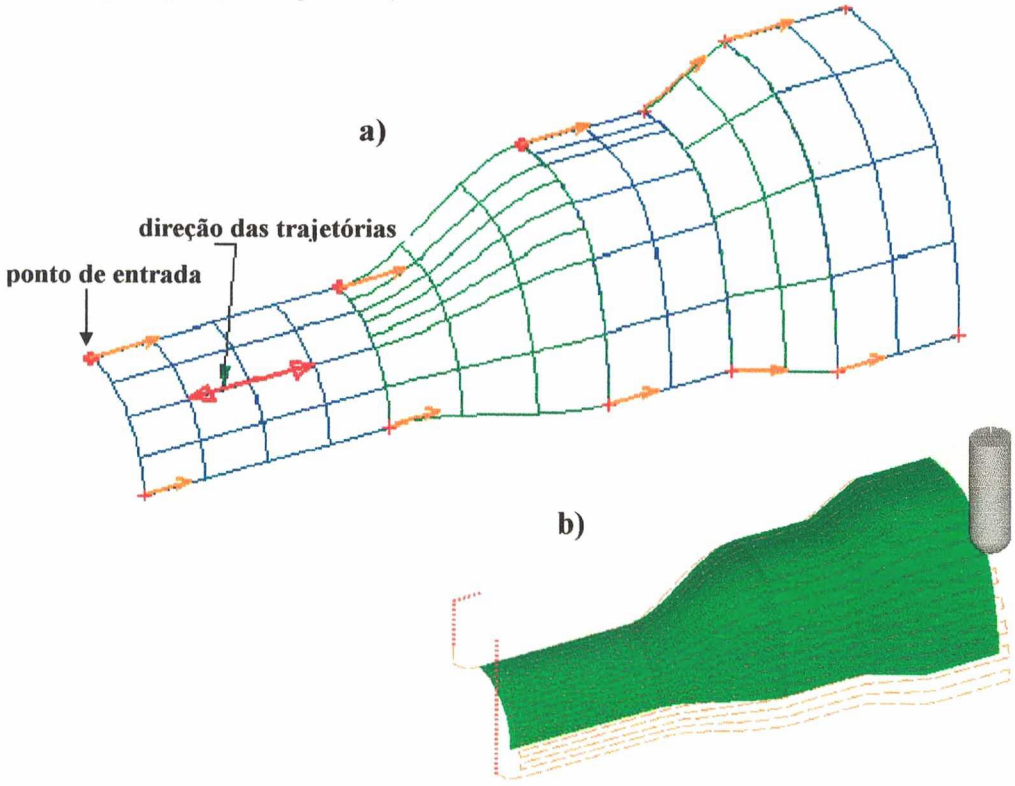


Figura 13 – Direção e sentido das trajetórias: a) determinação do ponto de entrada da ferramenta e direção das trajetórias para a usinagem do grupo de superfícies contíguas em azul e verde; **b)** trajetórias geradas por estratégia isoparamétrica (ver capítulo 4)

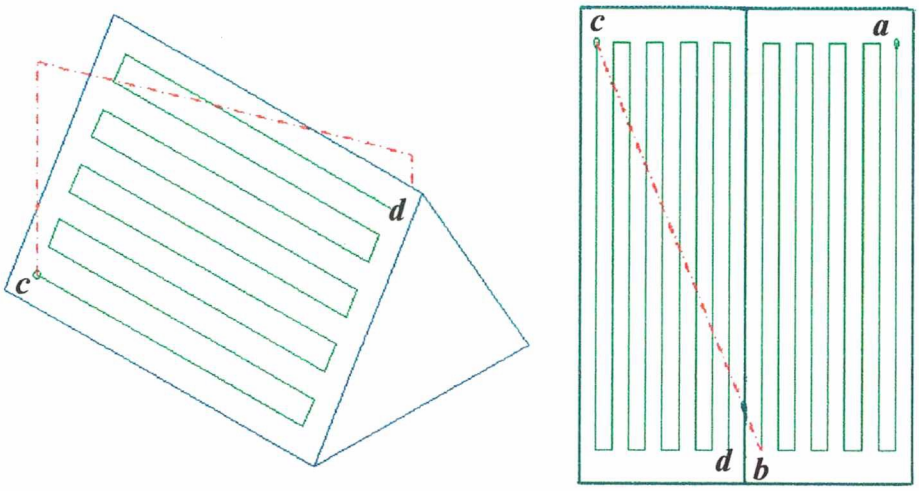
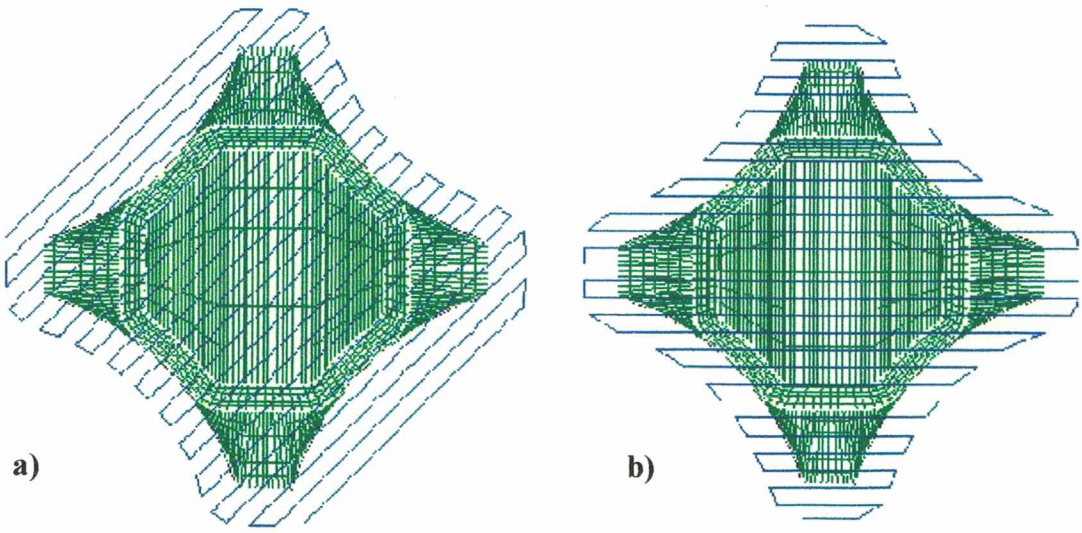


Figura 14 – Usinagem "*up only*": a ferramenta inicia a usinagem no ponto *a*, incrementando apenas para cima, com trajetórias bidirecionais até o ponto *b*; neste ponto (em avanço rápido) a ferramenta retrai, move-se para ao projeção do ponto *c* e inicia a usinagem da segunda face do modelo triangular da mesma forma que a anterior, até o ponto *d*

ÂNGULO DE USINAGEM

Tanto no desbaste quanto no acabamento pode-se definir a direção da usinagem, medida no plano perpendicular à ferramenta. Nas estratégias para usinagem em 3 eixos o plano é projetado sobre a superfície (figura 15).



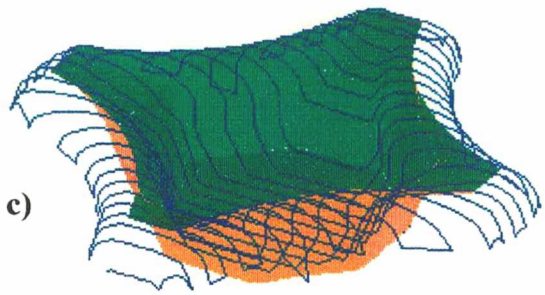


Figura 15 – Ângulo de usinagem: uma mesma peça (verde) usinada com a mesma estratégia em zig-zag (azul), mas com ângulos diferentes; em **a)** as passadas obedecem um ângulo de 45° em relação ao eixo X, enquanto em **b)** elas seguem a direção do eixo X; **c)** vista tridimensional da usinagem mostrada em b)

SENTIDO DE CORTE (*MILLING DIRECTION*)

Algumas estratégias apresentam a possibilidade de se fresar somente no sentido **discordante** (usinagem para cima, *conventional milling, up milling*) ou somente no **concordante** (usinagem para baixo, *climb milling, down milling*) ou ainda utilizado os dois, para otimizar a usinagem em relação ao tempo (figura 16). Porém, a usinagem somente é sempre concordante ou sempre discordante se a ferramenta penetra lateralmente no material com a metade ou menos do seu diâmetro, pois do contrário existem os dois tipos de corte. O que este parâmetro realmente especifica é a posição da ferramenta em relação ao material não removido, como se vê na figura 17, determinando cortes **predominantemente concordantes** ou **predominantemente discordantes**.

Sempre que possível, deve-se selecionar a usinagem concordante, pois promove menores vibrações, menos desgaste da ferramenta e melhor acabamento superficial [44, 57, 52], principalmente para os aços-ferramenta para moldes de injeção como o P20 e o H-13. A usinagem discordante é mais vantajosa somente em alguns casos específicos, como no corte de materiais com camadas superficiais de menor usinabilidade [52]. Porém, são muito comuns as usinagens de acabamento utilizando os dois sentidos de corte, pois para a remoção de sobrematerais muito pequenos os efeitos prejudiciais da usinagem discordante são menos pronunciados [14, 38]. Além disso, no caso da usinagem completamente concordante, a ferramenta teria de retrair-se, movimentar-se para o início do próximo passe e novamente descer sobre a peça, o que aumenta o tempo de usinagem (ainda que esses movimentos sejam em avanço rápido) e também pode prejudicar o acabamento em alguns casos [14, 38].

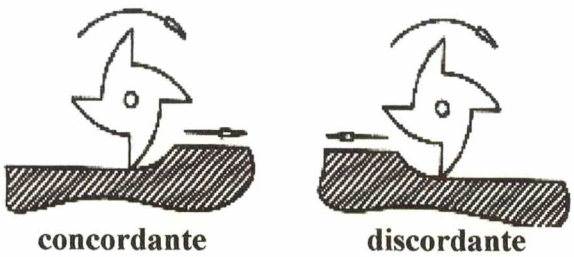


Figura 16 – Sentido de corte (1): fresa de topo com quatro gumes cortando o "material à direita", ou seja, no sentido concordante (sentido do avanço) e com "material à esquerda" ou no sentido discordante (contrário ao avanço); as setas retas mostram o sentido do movimento da ferramenta em relação à peça.

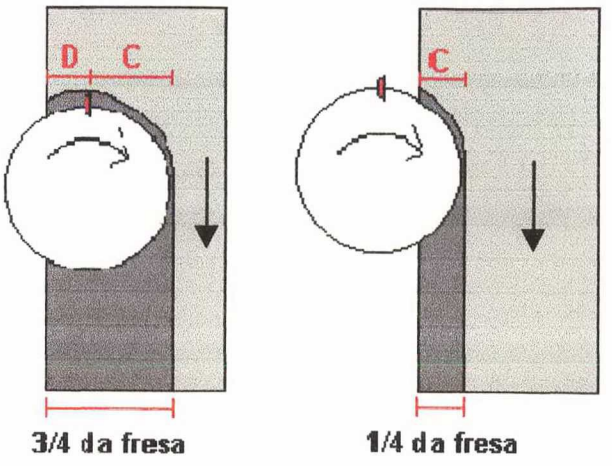


Figura 17 – Sentido de corte (2): com a fresa penetrando mais do que a metade do seu diâmetro, mesmo com o material todo "à direita", o início do corte é discordante (D); o sentido de corte só será totalmente concordante se a fresa penetrar menos da metade do seu diâmetro.

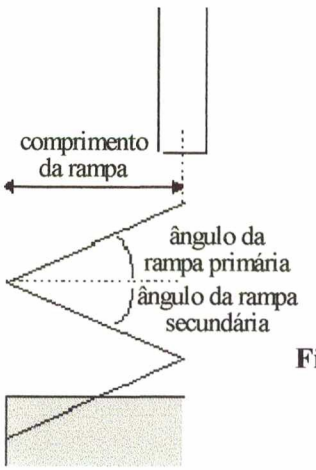
MOVIMENTOS DE ENTRADA E SAÍDA (*APPROACH/RETRACT*)

Cada *software* oferece diferentes opções para o movimento de ataque da ferramenta desde o plano de saída de usinagem até penetrar o material, com os incrementos lateral e/ou axial programados. Sua importância é maior para o desbaste, pois como o volume de material removido é, normalmente, grande, movimentos impróprios podem causar danos à ferramenta. Alguns *softwares* possibilitam também a programação de movimentos especiais para retração da ferramenta, ao sair do material e retornar ao plano de saída, incluindo prolongamentos da trajetória para fora da peça, antes da retração.

Três movimentos básicos estão disponíveis em quase todos os sistemas [14, 41, 42, 53, 55, 58]. Um é a **penetração axial** (perpendicular ao plano de trabalho, geralmente XY), como se a fresa fosse uma broca, o que, contudo, não é possível com todas as ferramentas. Outra é a **entrada em rampa**, que inclina a trajetória segundo ângulos geralmente inferiores a 5°, valor que varia para cada ferramenta e que pode ser encontrado nos manuais dos seus fornecedores. Em alguns *softwares*, além do ângulo, o programador pode especificar também o comprimento e a direção da rampa ou até mesmo o ângulo de uma rampa secundária, no sentido contrário à inicial (figura 18). A terceira opção força a ferramenta a realizar uma **aproximação lateral** por fora do bloco, penetrando-o com a lateral da ferramenta, seja **normalmente** à parede do mesmo, seja com **arcos circulares**, tangenciando-o. Alguns *softwares* disponibilizam combinações destes movimentos, como entradas tangenciais segundo arcos em planos perpendiculares ao plano horizontal (XY) [42, 53, 55]. Vários *softwares* disponibilizam esses tipos de opções de movimentos de ataque (ou saída) da ferramenta não só para o início (ou fim) de cada estratégia, mas também para o ataque (ou saída) a cada

nova passada (*lead in / lead out*), caso os movimentos de conexão sejam feitos em planos de segurança, como mostra a figura 19 [42, 53].

Ainda outra alternativa consiste em posicionar a entrada sobre furos pouco menores que o diâmetro da ferramenta. Alguns *softwares* geram programas adicionais específicos para a usinagem destes **pré-furos**, posicionando-os automaticamente onde for necessário, mas permitindo alteração pelo programador [42, 58].



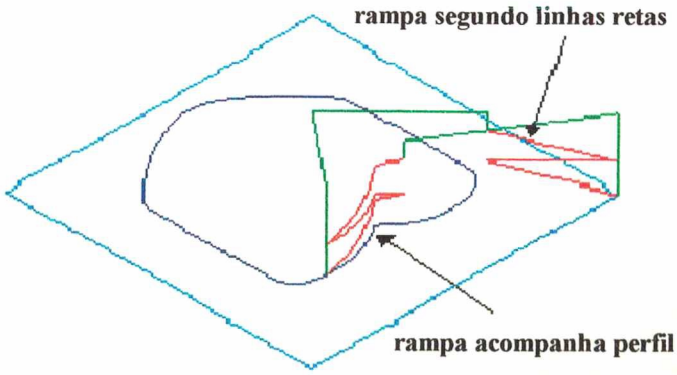


Figura 18 – Entrada da ferramenta em rampa: acima dois estilos de entradas em rampa para a usinagem de um patamar; em azul os contornos da superfície no patamar, em vermelho os movimentos de entrada em rampa e em verde os movimentos em avanço rápido entre dois pontos de entrada; ao lado, parâmetros de programação dos movimentos de entrada em rampa [42].

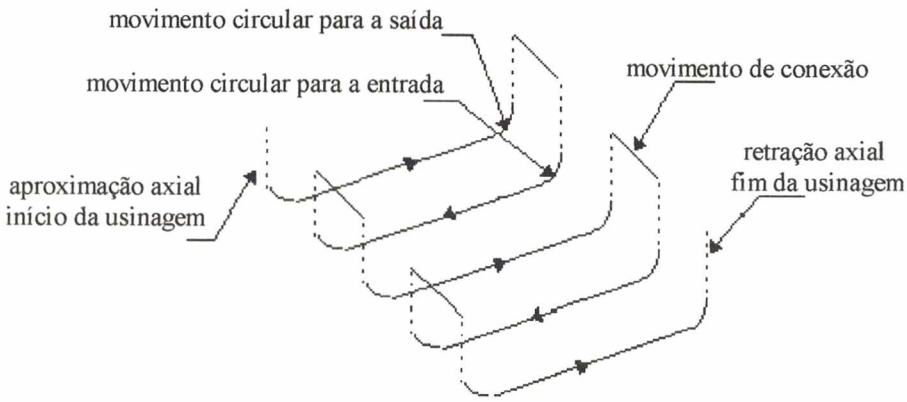


Figura 19 – Movimentos de entrada e saída: tanto a entrada da ferramenta, no início da usinagem, quanto os ataques a cada incremento lateral são movimentos combinados de aproximação axial com um arco circular que tangencia o plano de trabalho. A saída de cada passada, incluindo a final, é realizada com o mesmo tipo de movimento.

MOVIMENTOS DE CONEXÃO ENTRE PASSADAS ADJACENTES (*LINKS, TRANSITION, CONNECT MOVES*)

Semelhantemente aos movimentos de entrada e saída, alguns *softwares* disponibilizam várias alternativas de movimentos que conectam duas passadas adjacentes da ferramenta, normalmente em estratégias de zig-zag . As mais comuns são as seguintes (ver figura 20): [14, 41, 42, 53, 55, 56,]

- em avanço rápido, retraindo ao plano de segurança (ou em uma determinada altura) para mover-se perpendicularmente às passadas até o início da adjacente, em trajetórias bidirecionais;
- em avanço rápido, também retraindo ao plano de segurança (ou em uma determinada altura) porém recuando diagonalmente até o início da passada adjacente em trajetórias unidirecionais;
- perpendicular às passadas, acompanhando a superfície da peça ou em linha reta (desconsiderando a superfície da peça), em avanço de usinagem;
- segundo um arco, em avanço de usinagem, de forma a diminuir a desaceleração da ferramenta; usado principalmente quando se empregam valores altos para a velocidade de avanço da ferramenta;
- acompanhando o perfil das superfícies;

É muito importante que o *software* verifique se existe risco de colisão entre ferramenta e peça nos movimentos de conexão e de entrada e saída, modificando-os automaticamente em caso afirmativo [23].

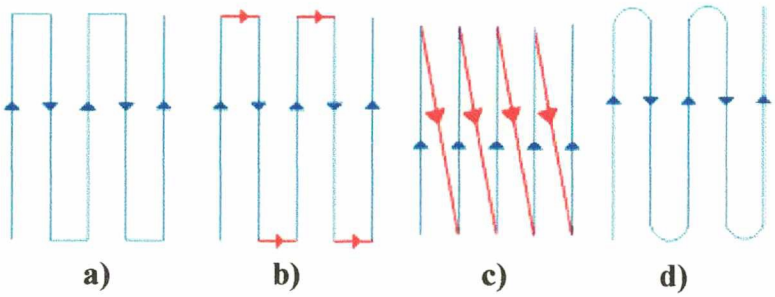


Figura 20 – Tipos mais freqüentes de movimentos de conexão entre passadas: a) movimento reto em avanço de corte sobre a superfície da peça; **b)** movimento em avanço rápido no plano de segurança (vermelho); **c)** movimento em avanço rápido (vermelho) para usinagens unidirecionais; **d)** arcos circulares sobre a superfície da peça

TOLERÂNCIAS (*TOLERANCE, CHORDAL TOLERANCE, MAXIMUM DEVIATION*)

A tolerância representa o máximo desvio permitido entre a curva que define o modelo geométrico e a trajetória gerada, como mostra a figura 21. Além da tolerância relativa à superfície do modelo, em *softwares* que trabalham com curvas que limitam a área de aplicação de suas estratégias, pode ser necessário especificar uma tolerância também para estas entidades de apoio, independentemente da tolerância das trajetórias em relação à superfície [55]. Quanto menor for o valor da

tolerância, maior será a precisão da usinagem, porém, também maior será o tamanho do programa gerado e, principalmente, o tempo de processamento para o cálculo das trajetórias.

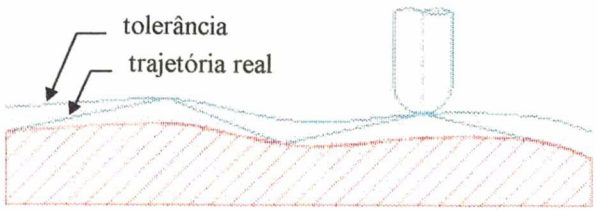


Figura 21 – Tolerância de usinagem: a trajetória da ferramenta é composta por segmentos de reta que não se afastam da geometria da peça além do valor da tolerância programado, eqüidistante da geometria a usinar

3.4 VERIFICAÇÃO [59]

Devido à complexidade das geometrias de uma cavidade, e por conseqüência, das trajetórias calculadas, se um programa gerado no CAM fosse transferido diretamente para a máquina, muito provavelmente a peça usinada não estaria em conformidade com o seu projeto, podendo haver retrabalho ou perda total da peça, danos à máquina-ferramenta ou quebra de ferramentas. Os problemas listados abaixo são muito freqüentes e devem ser detectados e eliminados antes do início da usinagem da peça final.

- *"overcut"* ou interferência, ou seja, a ferramenta retira mais material do que o pretendido, interferindo na superfície da peça;
- *"undercut"*, isto é, excesso de material não removido pela ferramenta;
- colisão das partes não cortantes da ferramenta ou do suporte com a peça, com elementos de fixação ou com partes da máquina;
- entrada inadequada da ferramenta;
- marcas de entrada, interrupção ou parada brusca;
- velocidade de corte ou avanço muito altos.

Mesmo que um programa não apresente erros que ponham em risco peça, máquina e ferramenta, pode não estar **otimizado**. Excesso de **cortes em vazio** gerados pelo programa, **avanços** de usinagem abaixo do possível, **acabamento superficial** inadequado e **movimentos de posicionamento** em avanço de usinagem aumentam sem necessidade o tempo do processo. Outros problemas tais como uso incorreto do **fluido de corte** ou excesso de **vibração** também deveriam ser eliminados.

A simulação gráfica das trajetórias geradas é extremamente importante para o processo [59, 60], pois é um método de baixo custo para assegurar a eficiência de um programa NC [61]. Quase

sempre os sistemas CAM trazem consigo um **módulo específico** para a simulação que exibe o processo na tela. Os sistemas mais simples representam os modelos da ferramenta e da peça usinada em ***wireframe*** e mostram apenas a trajetória do centro da ferramenta com representações diferentes para os avanços de usinagem e movimentos em marcha rápida. Este tipo de simulador só permite a detecção de erros grosseiros e ainda assim o programador deve fazer uma observação muito atenta para verificar interferências, materiais não-removidos e colisões. Muito mais eficiente é a representação **sólida**, onde os volumes de material removido são mostrados à medida que a ferramenta avança sobre a peça. Neste caso, proporcionam comandos para modelamento de um sólido que representa o bloco a partir do qual será usinada a peça. Estes simuladores podem incluir recursos como apresentação passo a passo, cortes no modelo sólido da peça pronta segundo seções escolhidas, checagem de colisões e medição de distâncias, volumes e áreas.

Além dos módulos de simulação dentro de sistemas CAD/CAM existem **pacotes isolados**, *softwares* específicos que, por isso, são maiores, mais detalhistas e mais eficientes. Ao contrário dos módulos dos CAD/CAM, os pacotes isolados podem receber além dos arquivos CLDATA (*Cutter Location Data*, ver item 4.1.1), qualquer pacote de CAM, arquivos APT (*Automatic Programming Tool*) e em código de máquina (escritos manualmente ou pós-processados). A grande vantagem de se interpretar estes arquivos é a exatidão da simulação, pois o pós-processamento de um arquivo CLDATA para o código do controlador da máquina pode gerar erros de conversão, comprometendo todo o processo.

Porém, por mais recursos gráficos que o simulador apresente, a simples análise visual gera muitas dúvidas de interpretação revelando-se imprecisa e ineficiente em muitos casos. Para resolver este problema alguns pacotes são capazes de importar o geometria projetada num CAD e comparar seu modelo matemático com uma base de dados relativa à imagem da peça usinada na simulação.

Através de cores o simulador representa áreas onde houve *undercuts* ou *overcuts*. Para que isto seja possível é necessário um algoritmo [62, 63, 64] que construa uma **estrutura de dados geométricos** e não represente apenas o **status** da peça com uma simples imagem, como na maioria dos simuladores incorporados a um sistema CAM. Outras vantagens deste tipo de simulador são rotações e translações dinâmicas, *zooms*, simulação em *background*, seleção de determinados passos do programa, cálculo da

remoção de material (possibilitando otimização de velocidades de corte e avanços). A figura 22 mostra imagens de simuladores gráficos de *softwares* de CAM e dedicados.

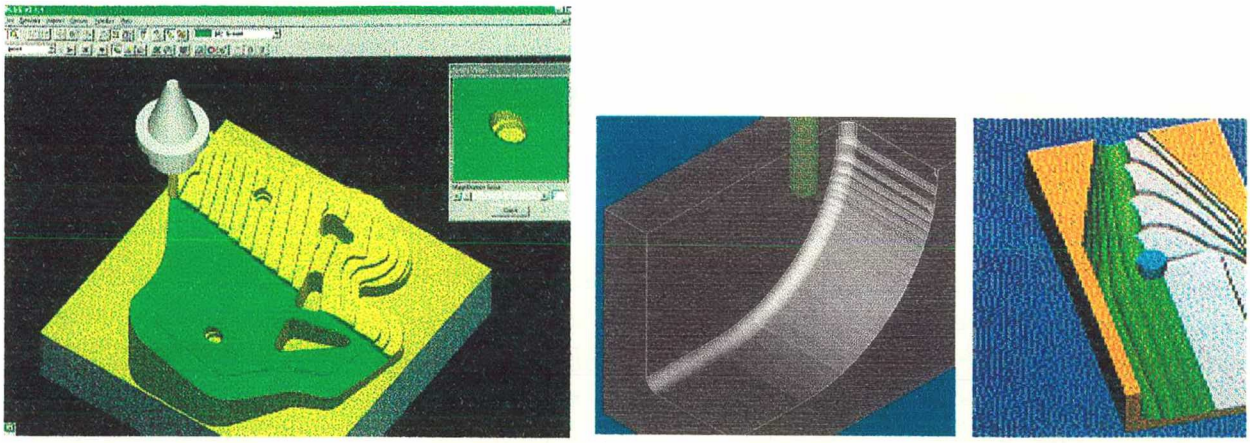
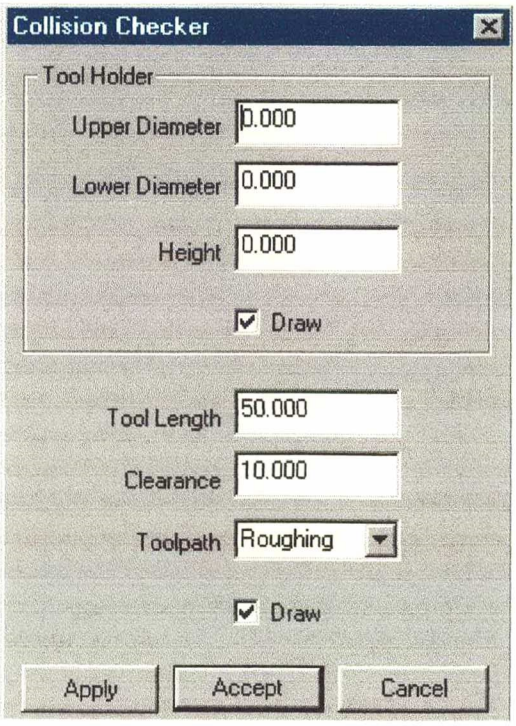


Figura 22 – Simuladores de usinagem: à esquerda e ao centro, respectivamente, os módulos de simulação dos sistemas CAM *Surfcam* e *Powermill*; à direita, o simulador dedicado *Vericut*.

Alguns *softwares* incluem um **verificador de colisões** entre suas funções, independente do simulador. Este recurso permite detectar pontos de colisão entre a haste e o suporte da ferramenta em programa selecionado, informando-se ao *software* as dimensões (diâmetros e alturas) destes elementos (ver figura 23) [42, 53, 65].



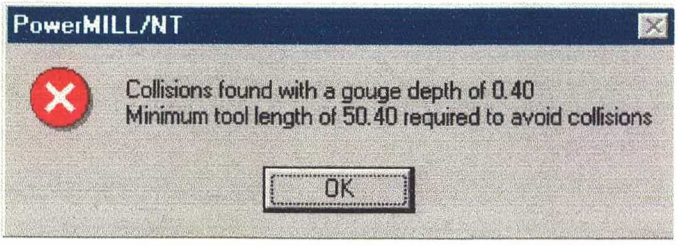


Figura 23 – Verificador de colisões: à esquerda, parte do menu de parâmetros do verificador de colisões que, quando ativado, processa as trajetórias geradas em busca de pontos de interferência entre a geometria da peça e a geometria do suporte da ferramenta segundo as dimensões informadas pelo programador; acima, a janela de aviso do *software*, que no caso, informa que foram encontradas regiões de colisão (com 0,4 mm de profundidade) e que a altura livre mínima da ferramenta para a qual não haveriam colisões seria de 50,4 mm

Após verificado o programa, em um editor de texto (como os editores do *DOS*, *Unix* e *Windows*) é possível proceder a correção direta e manual das informações contidas no arquivo CLDATA, mas desde que se identifique em quais instruções houve problema. Todavia a eliminação de problemas mais complexos passa pela geração de novas trajetórias ou pela edição manual das trajetórias impróprias dentro do *software* de CAM.

3.5 CORREÇÕES E MODIFICAÇÕES – EDIÇÃO POSTERIOR

Cada pacote de CAM possibilita a edição das trajetórias geradas de maneiras diversas. A **edição manual** de trajetórias não só é utilizada para correção de defeitos, mas também para copiar, espelhar, mover, cortar por um plano ou contorno e anexar trajetórias adequadas, poupando-se o tempo de geração de novos movimentos para a ferramenta.

Recursos de correção de trajetórias com pequenos defeitos costumam incluir adição e remoção de pontos ou de segmentos de trajetórias, alteração de parâmetros de corte, modificação, inserção e exclusão de movimentos de entrada e saída em pontos específicos, etc. Dependendo do modo de trabalho do CAM, além das trajetórias, contornos e patamares também podem sofrer o mesmo tipo de edição manual descrita acima.

A otimização da rotação e da velocidade de avanço para cada segmento da trajetória é uma facilidade oferecida por alguns sistemas CAM, executada automaticamente a partir da análise da percentagem do diâmetro da ferramenta empregado no corte, em confronto com uma biblioteca de dados de corte.

Em alguns *softwares*, a grande maioria das modificações e correções nos programas já gerados implica o total reprocessamento da estratégia, ou seja, todos os cálculos para a geração de trajetórias são refeitos desde o início. Poucos pacotes de CAM possuem a fortemente desejável capacidade de **regenerar um programa modificado** consumindo pouco tempo, recalculando apenas as alterações feitas pelo programador. Contudo, pelo menos nos *softwares* até agora desenvolvidos, quando se alteram dimensões e tipo de ferramenta, dimensões do bloco, modelo geométrico, contornos de apoio e tolerâncias, é obrigatório o reprocessamento completo .

Sistemas CAD/CAM paramétricos e variacionais costumam regenerar um programa para adaptá-lo a pequenas mudanças no modelo geométrico. O arquivo contendo as trajetórias geradas

no módulo de CAM é vinculado ao arquivo do modelo geométrico previamente construído no CAD. Quando este sofre uma modificação, o programador reabre o arquivo do CAM e roda novamente o programa, sem a necessidade de selecionar estratégias, bloco, ferramenta, parâmetros, etc., e automaticamente as trajetórias se modificam em função da nova geometria, respeitando os parâmetros anteriormente determinados.

3.6 ETAPAS FINAIS

Normalmente, o CAM trabalha em "**sessões**", armazenando em uma **lista** (ver figura 24) cada grupo de trajetórias geradas pelo programador com uma determinada estratégia, com uma determinada ferramenta e com os parâmetros necessários especificados [41, 42, 55]. Por exemplo, tome-se um caso onde se deve programar um desbaste, um pré-acabamento e quatro acabamentos diferentes, um para cada região de um determinado molde. Um programa para cada operação é gerado, mesmo fora de ordem, e é colocado na lista. Com os programas prontos, o programador pode colocá-los em uma ordem lógica, com o *software* se encarregando de gerar os movimentos de ligação entre as regiões de dois programas que utilizam a mesma ferramenta [41, 42, 55].

Com cada programa gerado, verificado e devidamente corrigido, alguma função do *software* se encarrega de produzir arquivos de programa (*cutfile*) em um formato próprio de cada sistema, geralmente chamado de CLDATA. O CLDATA é um formato neutro para códigos de posição do centro da ferramenta e instruções de avanços, rotações, acionamento e desacionamento do fuso e do fluido refrigerante, troca automática de ferramenta e outros. Cada programa recebe um nome ou código e é armazenado neste formato. *Softwares* mais sofisticados imprimem uma **ficha de programação**, como a da figura 25, contendo o nome de cada programa, dados geométricos das ferramentas e parâmetros de corte utilizados em cada um, observações do programador, *croquis* da peça a ser usinada e esquema de fixação, auxiliando o operador da máquina durante o processo em chão-de-fábrica.

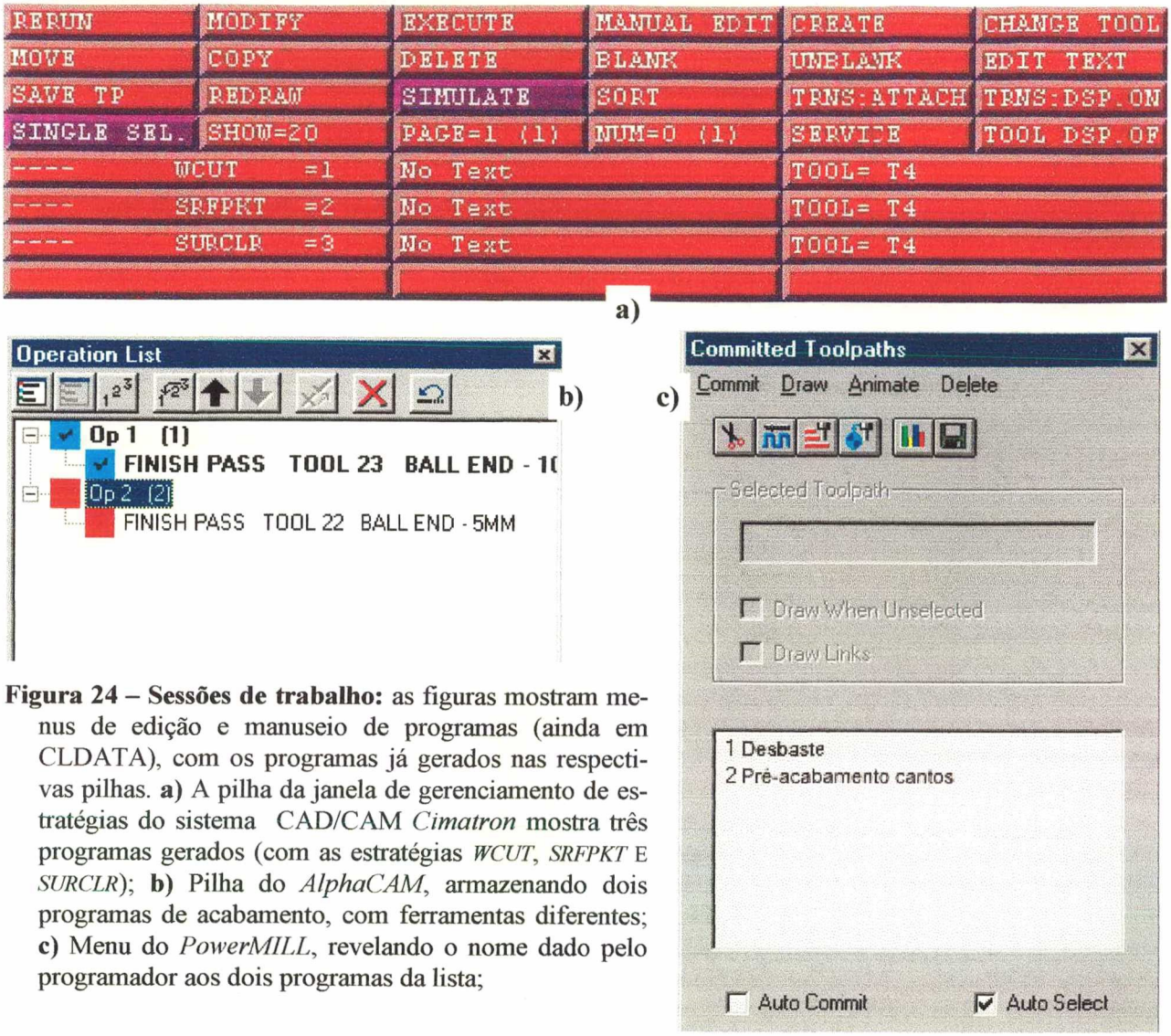


Figura 24 – Sessões de trabalho: as figuras mostram menus de edição e manuseio de programas (ainda em CLDATA), com os programas já gerados nas respectivas pilhas. **a)** A pilha da janela de gerenciamento de estratégias do sistema CAD/CAM *Cimatron* mostra três programas gerados (com as estratégias *WCUT*, *SRFPKT* E *SURCLR*); **b)** Pilha do *AlphaCAM*, armazenando dois programas de acabamento, com ferramentas diferentes; **c)** Menu do *PowerMILL*, revelando o nome dado pelo programador aos dois programas da lista;

Como cada fabricante de controles CNC para máquinas-ferramenta desenvolve sua própria linguagem, os programas escritos no código CLDATA do CAM devem ser transformados para as normas de sintaxe da linguagem do controle, normalmente a linguagem ISO ou "G" ou linguagens interativas como a dos controles *Heindenhain.* Esta tradução é realizada por programas chamados **pós-processadores**, que atuam como uma interface direta, específica para um determinado par CAM-CNC. Um pós-processador pode ser desenvolvido pelo fornecedor do CAM, por empresas desenvolvedoras de *software* ou pelo próprio usuário do CAM, quando este inclui no seu pacote um módulo com ferramentas para geração de pós-processadores [1].

Nas primeiras décadas de uso do comando numérico computadorizado, a transferência do arquivo de programa pós-processado do computador ou estação de trabalho do CAM para o controle

da máquina, costumava ser feita por um cartão perfurado ou de uma fita cassete, ou ainda com a digitação do programa no teclado do próprio controle (procedimento conhecido como MDI - *Manual Data Input*). Contudo, estes métodos convencionais não são adequados para programas de usinagem de moldes, pois os mesmos costumam ter dezenas de milhares de linhas com instruções. O grande tamanho dos programas é problemático mesmo para técnicas mais modernas, como a transmissão de dados via um cabo conectado à interface RS-232 da máquina, pois a memória da grande maioria dos controles não suporta tamanha quantidade de instruções.

Uma solução bastante utilizada é um sistema de distribuição de programas comando numérico, ou **DNC** [1, 2, 6, 66, 67], um *software* de gerenciamento de transmissão de dados entre o CAM e o controle CNC. Caso a distância entre o CAM e a máquina seja inferior a cerca de 15 m, o sistema DNC pode ser instalado na mesma plataforma do CAM, com um cabo ligado à interface RS-232 do controlador CNC da máquina. Para distâncias maiores, quando a transmissão de dados pelo tipo de cabo anterior não é recomendada (situação predominante), costuma-se instalar o DNC em um PC dedicado, colocado junto à máquina. Assim, os dados chegam ao DNC por cabos de rede local (redes *LAN* com protocolo *Ethernet*, por exemplo [66, 68]), propícios à transmissão de dados a maiores distâncias, e são passados à máquina pelo "cabo de impressora" conectado à RS-232. Outra possibilidade, ainda mais adequada, prevê a instalação do DNC no controle da máquina, com a aquisição de dados realizada através de uma rede local.

Vários parâmetros devem ser cuidadosamente programados no *software* de DNC e no *software* do controle da máquina, tais como taxa de transmissão, *bit* de parada, número de *bits* dos dados, protocolo de transmissão, paridade, etc... Outra característica de *softwares* para DNC é a possibilidade de se editar o programa pós-processado, permitindo ao operador da máquina efetuar pequenas correções, sem ter que retornar o programa ao setor de CAM.

FERRAMENTARIA - FICHA DE PROGRAMAÇÃO CNC				ORDEM Nº 562364	
78011227CN		MODELO: CARCAÇA00187 B2	FERRAMENTAL: 79000187-7	MATERIAL: ALUMÍNIO LAMINADO	MÁQUINA: 2547
DIRETÓRIO: PROJETOS/FERFAB/7900187/	POSIÇÃO: 78011227CN	DESENHO: 78011227CN	PROGRAMADOR: JOÃO	DATA: 15 / 09 /97	FOLHA: 1 DE 1

Nº DO PROGRAMA	OPERAÇÃO	FERRAMENTA								HASTE REBAIX	RPM	AV	SOBRE MAT	OBSERVAÇÕES	TEMPO DE USINAGEM
		T	INS./MAT.	CORTES	DIAM.	RAIO	ALTURA	PROL	MULT						
35037	DESB	1	TOR_APKR	1	32.0	3.00	70.0			4.5	5500	2200	1	FIXAR EM BASE COM ANG.	0:46:05
35038	PRÉ / ACAB	2	TOR_APKR	1	25.0	3.00	60.0				4100	1500	0	OPER. PRINC. FACEAR PROF=50.25	1:53:00
35039	ACAB	3	ESF_MD	2	10.0	5.00	50.0				4000	1200	0		0:27:21
35040	ACAB	4	TOR_MD	2	10.0	1.00	30.0				4000	1200	0		0:16:02
35041	ACAB	4	TOR_MD	2	10.0	1.00	30.0				4000	1200	0		0:07:08
														TOTAL	4:15:36

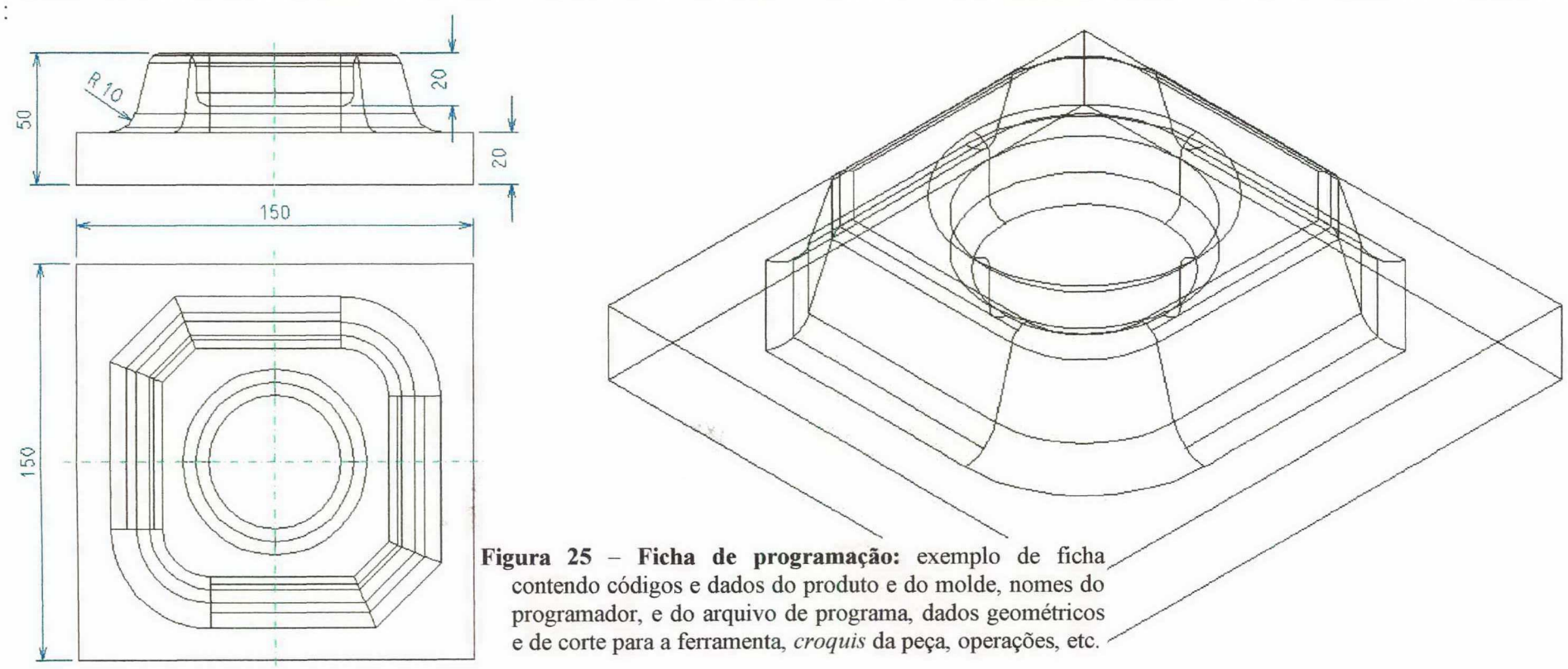


Figura 25 – Ficha de programação: exemplo de ficha contendo códigos e dados do produto e do molde, nomes do programador, e do arquivo de programa, dados geométricos e de corte para a ferramenta, *croquis* da peça, operações, etc.

4. ESTRATÉGIAS PARA FRESAMENTO EM 2½ E 3 EIXOS

4.1 MÉTODOS E ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS

Assim como cada fornecedor de sistemas CAD/CAM define um formato para armazenar seus arquivos, um algoritmo para definir as entidades geométricas e outro para representar graficamente o objeto na tela, cada produtor de sistemas CAM se utiliza de um algoritmo para calcular as posições da ferramenta de corte em relação à geometria que deve ser usinada, definindo desta forma as trajetórias de usinagem. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos tipos de algoritmos, variando entre si em maior ou menor grau, para atingir objetivos específicos em relação à fabricação de peças. Novos métodos são desenvolvidos à medida em que avança a capacidade computacional dos *hardwares*, que aumenta a necessidade de produção de geometrias complexas, que se aperfeiçoa a tecnologia de máquinas e ferramentas e que se otimizam os processos.

4.1.1 PONTOS GERADOS PELO CAM

Segundo *Zhu* [43], *Sarma* e *Dutta* [69], trajetórias são o lugar geométrico dos **pontos de contato CC** (*cutter contact)* da ferramenta com a superfície do modelo. Porém, o que precisa ser entendido pelo controle CNC da máquina-ferramenta é a localização da ferramenta, os **pontos CL** (*cutter location*) e, por isso, o *software* gera códigos (CLDATA) que contém as coordenadas destes pontos e não dos pontos de contato CC (figura 26). O ponto de referência tomado na ferramenta para as coordenadas CL depende do *software*, embora geralmente seja o seu centro, como se vê na figura 27.

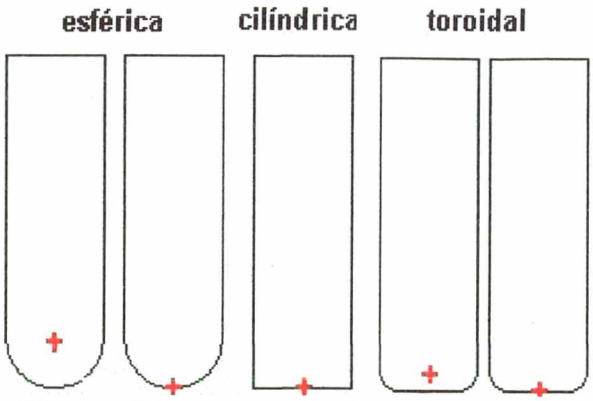


Figura 26 – Pontos de referência na ferramenta de corte para as coordenadas CL

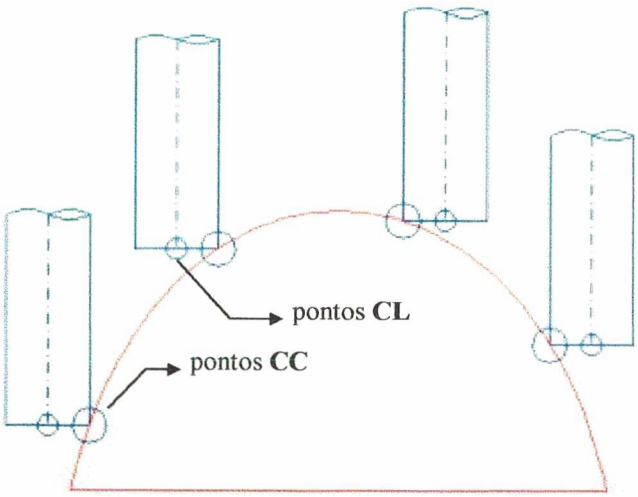


Figura 27 – Pontos CC e CL.

4.1.2 TIPOS DE INTERPOLAÇÃO

Em termos do movimento da ferramenta na máquina, durante a usinagem, o ideal é movimento contínuo sobre a superfície usinada. Porém, uma vez que os métodos de geração de trajetórias calculam pontos (CC ou CL) para, então, uni-los com **segmentos de retas**, o movimento real da ferramenta (comandado pelo controle CNC da máquina-ferramenta) será também por passos, de comprimentos geralmente inferiores a 1mm [3, 70, 71]. O passo é a distância entre dois pontos CL, determinando o comprimento de cada segmento de reta nas interpolações lineares (discretização). Existem três maneiras de se informar seu comprimento ao algoritmo de geração de trajetórias: diretamente informando o seu **valor**; determinando um **número de pontos** para compor cada trajetória; informando a **tolerância** ou erro máximo entre dois pontos consecutivos em relação à superfície da peça [3]. Das três, a especificação da tolerância, já mencionada no capítulo 3, é a forma encontrada pela maioria dos *softwares* para possibilitar ao programador maior flexibilidade e controle sobre o algoritmo. Quanto mais apertada for a tolerância, melhor é reproduzida a superfície da peça e maior será o tempo gasto pelo cálculo das trajetórias.

Embora a maioria dos algoritmos dos *softwares* de CAM comerciais tradicionalmente usem a **interpolação linear** para gerar suas trajetórias, este método não é o mais adequado para a usinagem de formas livres [72, 73, 74], uma vez que pode ser responsável por vários problemas de programação, tais como:

- programas muito grandes, conforme referido no capítulo anterior;
- velocidades de avanço reais inferiores às programadas, para se poder manter a precisão dos contornos; experimentos já mostraram que, em determinados casos, até mesmo 90%

do tempo total de usinagem é desperdiçado em acelerações, desacelerações ou pausas entre instruções em linhas de programa consecutivas [73];

- qualidade inferior da reprodução da superfície do modelo, pois curvas tornam-se "facetadas";
- ocorrência maior de marcas de parada na peça;
- constantes acelerações, desacelerações e pausas podem, a longo prazo, trazer danos à máquina;
- rápidas e repetitivas inversões do sentido do avanço da ferramenta, enquanto o controle processa seqüências de linhas de programa responsáveis pela usinagem de segmentos muito curtos.

Outros tipos de interpoladores vêm sendo desenvolvidos para suplantar as deficiências dos interpoladores lineares. Os controles das máquinas-ferramenta possuem capacidade de executar **interpolações circulares planares**[1], sendo que os mais modernos podem seguir até mesmo interpolações segundo curvas mais complexas[2]. Em contrapartida, poucos *softwares* de CAM apresentam algoritmos que consigam habilitar a geração deste tipo de programa [3, 73, 75]. *Ferreira* [71] e *Corrêa* [3], citam interpolações **circulares**, **parabólicas** e **cúbicas** (*splines*), as últimas mais freqüentes para usinagem em 5 eixos. *Vickers* e *Bradley* [73] elaboraram um método de geração de trajetórias com interpolações circulares, conseguindo reduções de tempo de usinagem (5:1), redução do tamanho dos programas (11:1), além de preservar as velocidades de avanços otimizadas, suavizar a operação da máquina-ferramenta e melhorar a reprodutibilidade da superfície usinada em relação ao modelo geométrico. *Moreton, Parkinson* e *Wu* [75] sustentam que o uso de interpolações segundo arcos planares simples para gerar trajetórias sobre modelos definidos por contornos cúbicos (*splines*), é insuficiente para representar suavemente a superfície do modelo embora reduza o tempo de usinagem. Desta feita, propõem um algoritmo mais eficiente, usando dois arcos circulares, contíguos e com raios diferentes, para cada interpolação entre duas instruções do programa. Já o *software* comercial *PowerMILL*, em um ensaio realizado pelo seu forne-

---

[1] como as funções *G02* e *G03* dos controles que seguem o padrão *ISO (ou código G)*, ou *CC* e *CR* para aqueles que trabalham com a programação interativa *Heidenhain*.

[2] *Fanuc* e *Siemens*, tradicionais fabricantes de controles CNC, recentemente anunciaram controles que não só possuem funções para movimentos segundo curvas do tipo NURBS, mas que também importam modelos e geram trajetórias de corte [80].

cedor [74], conseguiu reduzir o tamanho do programa para uma peça automotiva em 60% e o tempo de sua usinagem em 40%, utilizando interpolações segundo curvas do tipo NURBS.

4.1.3 ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS EM 2½ EIXOS PARA MODELOS 2½D

Os métodos de cálculo de trajetórias para modelos 2D e 2½D são relativamente simples quando a geometria do modelo em *wireframe* é composta por apenas poucas linhas e arcos. Porém, quando um número de entidades muito grande ou curvas livres (p. ex., *splines*) são utilizadas para formar contornos fechados para a usinagem, a complexidade dos algoritmos cresce.

Oliveira [22] relaciona vários algoritmos para cavidades arbitrárias (bolsões com ou sem ilhas) representadas por geometrias em *wireframe* extrudadas (modelos 2½D), citando algumas características relativas à arquitetura, ao custo computacional e ao tipo de trajetórias geradas, destacando os trabalhos de *Persson* [76], de *Yeh e Ying* [110], de *Guyder* [111], de *Hansen* e *Arbad* [112], de *Cota et al.* [113] e de *Held, Lukákcs* e Andor [44]. Basicamente, estes métodos dividem a cavidade em planos paralelos a XY, espaçados por um determinado valor, para então, a cada plano, delimitar a área de atuação da ferramenta com contornos e calcular um padrão (passadas paralelas ao contorno ou paralelas a uma direção determinada) para as trajetórias dentro e/ou sobre estes. Parte dos métodos emprega contornos eqüidistantes (*offsets)* dos contornos da geometria por um valor igual ao raio da ferramenta, devidamente aparados ou "trimados". Outra parte dos métodos emprega diagramas, como o de *Voronoi*, que se baseia na divisão da cavidade em sub-áreas através da determinação de bissetrizes em seus vértices (figura 28) [22, 44, 76].

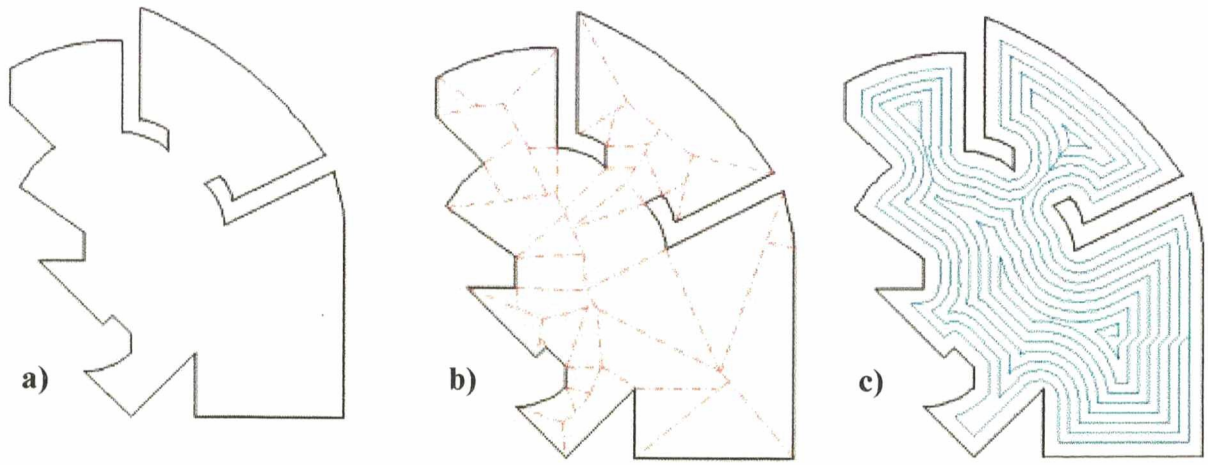


Figura 28 – Geração de trajetórias em 2½ eixos a partir de diagramas de *Voronoi*: a) contorno da geometria 2D da cavidade (bolsão); **b)** diagrama de *Voronoi*; **c)** trajetórias paralelas ao contorno

4.1.4 ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS EM 2½ EIXOS PARA MODELOS 3D

Vários algoritmos foram desenvolvidos para o fresamento em 2 ½ eixos de machos e fêmeas construídas por superfícies. *Lee*, *Kim* e *Hong* [16] desenvolveram um método para modelos sólidos com representação por *octree*. *Lee* e *Chang* [108] apresentam um método semelhante para superfícies de forma livre definidas por NURBS. *Elber* e *Cohen* [77] e *Marshall* e *Griffths* [78] propuseram algoritmos semelhantes, também visando a usinagem de superfícies de forma livre.

De modo geral, em todos estes métodos (ver figura 29), hipotéticos **planos XY** (patamares, lâminas), espaçados por valores determinados pelo usuário, interceptam a superfície do modelo e os limites do bloco, gerando **contornos poligonalizados** de acordo com uma determinada **tolerância**. Para se considerar o **sobrematerial** e o **raio da ferramenta** especificados pelo usuário, são gerados ***offsets*** destes contornos. Com resultados finais similares, alguns métodos, como o do *z-map*, não geram *offsets* dos contornos, mas sim da própria superfície do modelo, conforme a ferramenta e o sobrematerial. Finalmente, desde o topo até o fundo do bloco, patamar por patamar, são **calculadas trajetórias** que preencham as áreas fechadas e limitadas pelos contornos gerados, normalmente com orientação **paralela aos contornos** ou **paralelas a uma direção determinada** (figura 30). Algoritmos semelhantes calculam trajetórias de acabamento, com a ferramenta apenas **perfilando** os contornos gerados pelas interseções entre os planos e a superfície do modelo, sem varrer as áreas fechadas.

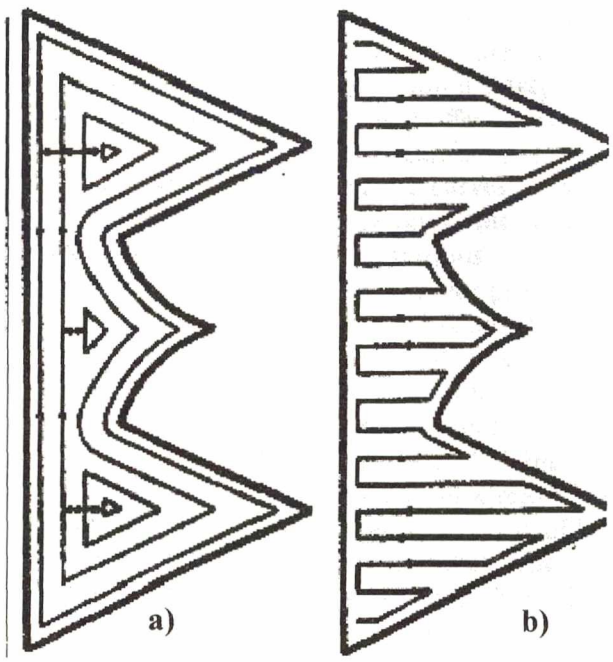


Figura 30 – Trajetórias de desbaste de bolsões em z constante: a) paralelas ao contorno; **b)** paralelas a uma direção.

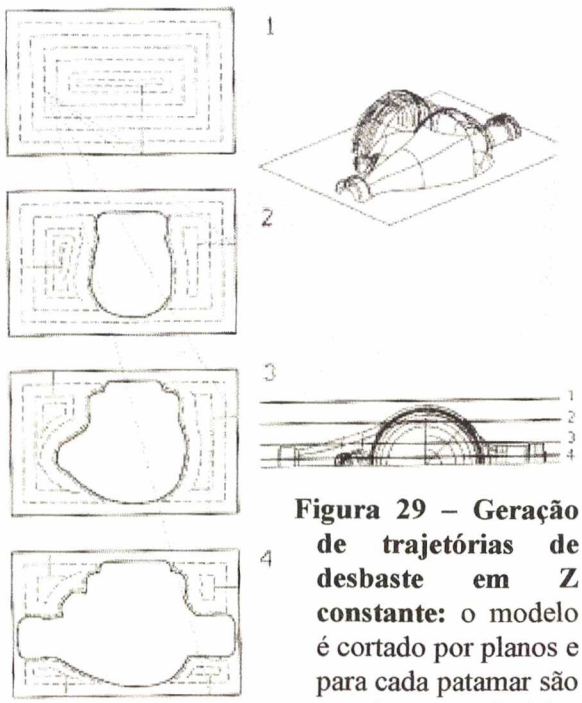


Figura 29 – Geração de trajetórias de desbaste em Z constante: o modelo é cortado por planos e para cada patamar são geradas trajetórias paralelas ao contorno

Li, Dong e *Vickers* [45] desenvolveram um interessante algoritmo que primeiramente agrupa patamares pela semelhança dos seus contornos e depois escolhe o padrão de varredura mais adequado para cada grupo de patamares. A decisão automática é baseada na comparação da eficiência de seis tipos diferentes de varredura, entre eles as varreduras *paralela aos contornos do bloco e da ilha*, *paralela a uma direção principal* e combinações das mesmas. A aplicação do método, contudo, é restrita a cavidades com apenas uma ilha.

4.1.5 ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS EM 3 EIXOS PARA MODELOS 3D

A bibliografia cita três tradicionais e consagrados métodos para geração de trajetórias em 3 eixos para modelos tridimensionais [3, 69, 79, 80, 81], a partir dos quais os fornecedores de *softwares* de CAM desenvolveram seus próprios algoritmos, aprimorando-os e adaptando-os aos objetivos de seus produtos:

MÉTODO ISOPARAMÉTRICO

A ferramenta se move na direção das curvas isoparamétricas que matematicamente definem a superfície, como mostra a figura 31a. As trajetórias são geradas no espaço paramétrico onde são paralelas e igualmente espaçadas. Primeiramente, os pontos de contato CC são calculados sobre as curvas u ou sobre as curvas v. Em uma segunda rotina, o algoritmo utiliza vetores tangenciais e normais para gerar os pontos CL [3]. Algoritmos deste tipo foram desenvolvidos por *Rogers et al.*[109], *Loney* e *Ozsoy* [82] e *Broomhead* e *Edkins* [115], para estratégias de acabamento. *Catania* [46] desenvolveu um algoritmo para desbaste que usina isoparametricamente camadas eqüidistantes (*offsets*) da superfície do modelo por uma determinada altura, ao invés de patamares, como no desbaste em 2½ eixos.

A grande vantagem alegada por estes autores é o baixo custo computacional para o cálculo das trajetórias por este método. Contudo, três desvantagens são relevantes [3, 69, 79]:

- como o espaçamento entre as passadas é constante no espaço paramétrico (intervalo paramétrico), o intervalo entre duas passadas seguidas no espaço tridimensional se torna variável, aumentando e diminuindo conforme as bordas da superfície usinada; desta forma, o intervalo paramétrico deve ser definido pelo pior caso em relação ao limite

máximo da altura de cristas, resultando na geração de trajetórias redundantes, ou seja, sobre regiões já usinadas e já dentro da tolerância;

- a grande maioria destes algoritmos não garante trajetórias livres de interferências da ferramenta com a superfície da peça, a não ser que se procedam cálculos adicionais;
- a orientação do movimento da ferramenta se torna dependente do modo de construção da superfície e do seu grau de discretização.

MÉTODO APT

Gera trajetórias sobre as curvas de interseção entre superfícies-guia (*drive-surface*) definidas pelo usuário e a superfície do modelo (*part-surface*), conforme pode ser visto pela figura 31b. As superfícies do modelo ou as trajetórias podem ser limitadas por superfícies de checagem (*check-surface*), que são outras superfícies do próprio modelo, a superfície de um bloco de usinagem ou criadas pelo usuário. *Bobrow* [56], desenvolveu um algoritmo em que planos paralelos interceptam um modelo sólido representado por CSG, gerando trajetórias **isoplanares** para usinagens em zigue-zague e *Huang* e *Oliver* [93] aplicaram técnica semelhante a superfícies paramétricas. Algoritmos mais desenvolvidos permitem que superfícies não-planares atuem com superfície-guia.

MÉTODO CARTESIANO

Utiliza entidades construídas sobre um plano (geralmente horizontal) e as projeta as sobre um *offset* da superfície do modelo para obter curvas ligando pontos CC (ver figura 31c [3]). Depois calcula *offsets* destes pontos para obtenção das trajetórias segundo coordenadas CL. Outros métodos geram superfície do modelo e obtém os pontos CL diretamente pelas curvas de interseção com as projeções [3, 84, 80, 81]. *Hwang* [84] desenvolveu um método de geração de trajetórias **isoplanares** que poligonaliza (faces de triângulos) a superfície do modelo, cria *offsets* dos poliedros e gera os pontos CL das trajetórias em zigue-zague a partir de interseções entre linhas verticais com estes *offsets* .

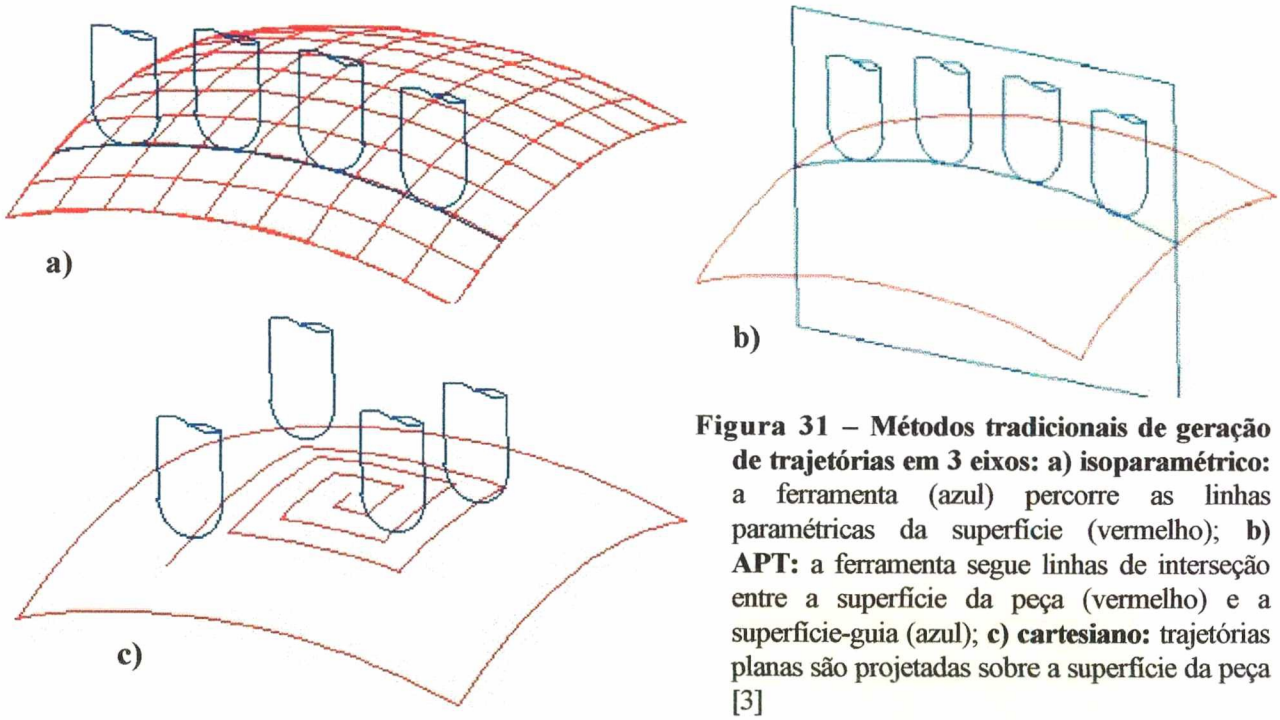


Figura 31 – Métodos tradicionais de geração de trajetórias em 3 eixos: a) isoparamétrico: a ferramenta (azul) percorre as linhas paramétricas da superfície (vermelho); **b) APT:** a ferramenta segue linhas de interseção entre a superfície da peça (vermelho) e a superfície-guia (azul); **c) cartesiano:** trajetórias planas são projetadas sobre a superfície da peça [3]

A tabela 7 [3, 22, 69, 79, 77, 78, 80, 81, 84,] resume as vantagens e desvantagens destes três tipos de algoritmo:

	isoparamétrico	*APT*	*cartesiano*
custo computacional	baixo	alto	alto
intervalo entre passadas	depende do pior caso de altura de crista	depende do pior caso de altura de crista	depende do pior caso de altura de crista
trajetórias redundantes	sim	não	não
orientação das trajetórias	restrita à direção das curvas u ou v	mais flexível que o isoparamétrico	mais flexível que os anteriores
garantia contra interferências	exige dispendiosos cálculos adicionais	problemático para conjuntos de superfícies	maior do que nos anteriores
aplicação a superfícies complexas	aumenta a tendência a trajetórias redundantes e interferências	iterações podem não convergir	mais adequado que os anteriores

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens dos métodos tradicionais de geração de trajetórias

Outros métodos para fresamento 3 eixos foram e vêm sendo desenvolvidos, tentando aprimorar a eficiência dos algoritmos tradicionais:

- **Método das isocurvas adaptativas.** O algoritmo de *Elber* e *Cohen* [77] elimina trechos redundantes de curvas isoparamétricas de uma superfície eqüidistante do modelo (*offset*), gerando trajetórias mais compactas para um mesmo acabamento superficial conseguido pelas isoparamétricas convencionais, porém com maior custo computacional.

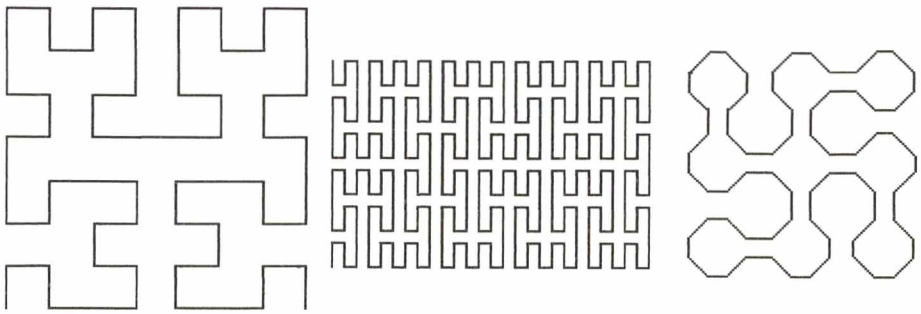
- **Método do *Z-map* ou *offset* inverso.** Desenvolvido por *Suzuki*, *Sakamoto* e *Koresawa* [70], verifica a interferência entre a ferramenta invertida (rotacionada 180° em relação ao seu centro) e a superfície da peça a partir dos valores contidos no *z-map*, determinando ponto a ponto a trajetória do centro da ferramenta sobre uma superfície eqüidistante (*offset*) da superfície do modelo. O *Z-map* ou *Z-Buffer* é uma coleção de valores de coordenadas Z, computadas em uma matriz retangular de pontos no plano XY, dentro de um domínio de interesse do usuário, gerado pela interseção das superfícies da ferramenta e da peça com linhas verticais passando pelos pontos da grade. Embora gere trajetórias livres de interferência, adapte-se a qualquer tipo de extremidade de fresas de topo e tenha um algoritmo simples, o método peca pelo longo tempo de cálculo do *offset* da superfície do modelo e pela memória exigida para se armazenar no *Z-map* um número de pontos suficientes para uma boa resolução [70, 84]. O método pode ser utilizado para acabamento em 2½ eixos e 3 eixos e desbaste em 2½ eixos e helicoidal. No desbaste helicoidal, que não é uma estratégia muito comum nos *softwares* comerciais, a ferramenta se posiciona sobre uma coordenada XY e penetra no bloco com um movimento em hélice, segundo um raio especificado, que vai diminuindo à medida em que a ferramenta desce, evitando a interferência com as paredes inclinadas da superfície do modelo.
- **Método dos *iso-offsets*.** Variação do método cartesiano e proposto por *Suh* e *Lee* [114], é considerado um algoritmo mais apropriado que os anteriores para usinagem de superfícies de forma livre com variações de curvatura não muito grandes [79]. As trajetórias são a projeção, sobre a superfície do modelo, de *offsets* progressivos e constantemente espaçados de um contorno formado por linhas, arcos ou curvas livres. Com contornos fechados, o resultado é uma usinagem espiral resultante, que pode ter início a partir dos contornos ou a partir do centro da área limitada pelos contornos. Usinagem em zigue-zague, semelhante ao método isoplanar é conseguida quando o contorno é representado por uma linha reta. Seu custo computacional é maior do que na usinagem isoparamétrica, mas é consideravelmente menor do que o método APT [79].

Novamente, sua desvantagem é o intervalo constante entre passes adjacentes, gerando um excesso de trajetórias desnecessárias em regiões de pequena ou nenhuma curvatura.

- **Método dos *iso-scallops*.** *Suresh* e *Yang* [79] propuseram um método semelhante ao anterior em termos de forma de trajetórias e custo computacional, porém que modifica automaticamente o intervalo entre passadas conforme a curvatura da superfície, mantendo constante a altura de crista especificada pelo computador com um mínimo de passadas. Entretanto, tanto este método quanto o método dos *iso-offsets* permite pouca flexibilidade de controle local e global da orientação das trajetórias pelo programador, uma vez que dependem do contorno selecionado [79].
- **Método da "distribuição de *scallops*"** [3]**.** O algoritmo desenvolvido por *Sarma* e *Dutta* [69] também produz trajetórias paralelas a um determinado contorno, mas calcula trajetórias para qualquer distribuição de altura de cristas (inclusive a constante) na superfície produzida, baseado na curvatura geodésica das superfícies. Segundo os autores, esta característica sobrepuja o método dos *iso-scallops* quando as superfícies tem graus de curvatura mais acentuados e/ou bordas irregulares e quando os contornos são muito irregulares. Além disso, traz vantagens em termos de flexibilização da manufatura, correção de problemas na geração de trajetórias, como a violação da constância das alturas de crista devido a defeitos nos *offsets* gerados por este método. Trajetórias mais longas do que com o método dos *iso-scallops*, principalmente para grandes curvaturas, são a desvantagem do método, de acordo com seus desenvolvedores.
- **Método das curvas de preenchimento.** *Cox et. al.* [85] discutem a aplicação de vários padrões de preenchimento (ver figura 32 [85]) como trajetórias para usinagem de superfícies, inclusive as de forma livre. *Griffiths* [86] desenvolveu um algoritmo para geração de trajetórias que seguem as curvas de preenchimento de *Hilbert*. Segundo estes pesquisadores, a grande vantagem da utilização deste tipo de trajetória é a produção de um acabamento superficial homogêneo, sem orientação das cristas, independente da complexidade da geometria, diminuindo o tempo gasto com operações posteriores de polimento.

---

[3] Nome adotado devido a não-denominação do método pelos seus autores.



a) b) c)

Figura 32 – Curvas de preenchimento espacial: a) curvas de *Hilbert*; **b)** curvas de *Peano*; **c)** curvas de *Moore*

4.1.6 PROBLEMAS E DEFEITOS NA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS

Qualquer que seja o método utilizado, é fundamental que os algoritmos calculem as trajetórias evitando **interferências** (*gouge*) da ferramenta na superfície da peça. Estes problemas são mais freqüentes em *softwares* mais simples ou antigos, pois utilizam algoritmos menos eficientes, especialmente na usinagem de superfícies de forma livre. Porém, mesmo os algoritmos mais complexos de *softwares* maiores estão eventualmente sujeitos a este tipo de problema, principalmente quando se usam fresas de extremidade plana ou toroidal em programas de acabamento (ver figura 33). Exatamente por isso, um dos mais importantes índices da qualidade de um CAM é o seu poder em detectar e eliminar os pontos onde existem interferências [3]. Alguns tipos de interferências são mostrados na figura 34 [3].

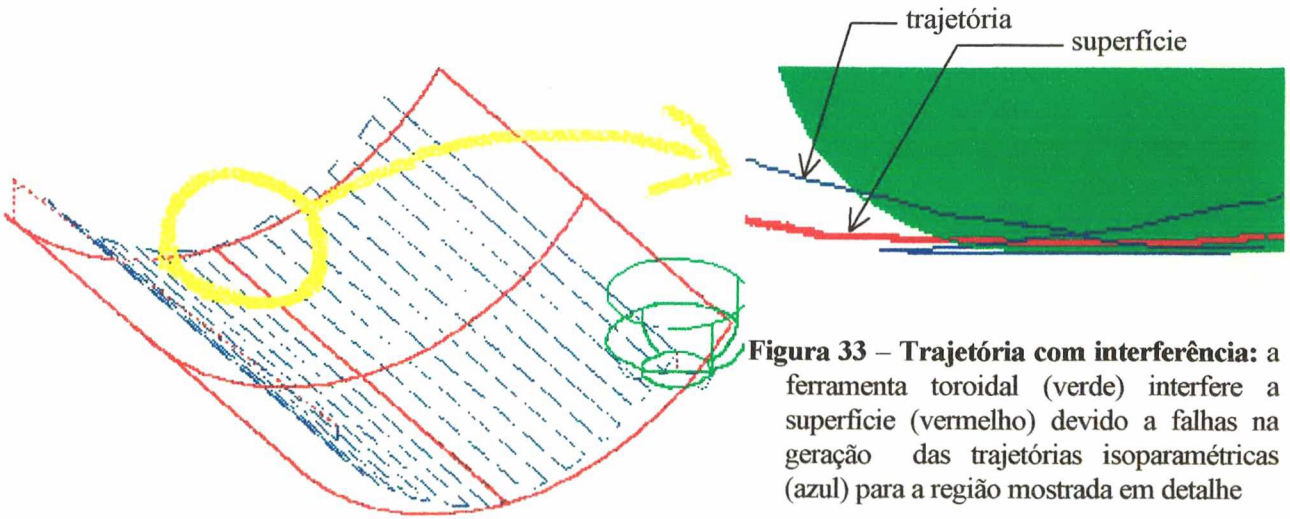


Figura 33 – Trajetória com interferência: a ferramenta toroidal (verde) interfere a superfície (vermelho) devido a falhas na geração das trajetórias isoparamétricas (azul) para a região mostrada em detalhe

Uma fonte muito freqüente de erros e problemas é o incorreto modelamento de superfícies, que pode produzir defeitos como superfícies sobrepostas (*overlaps*), superfícies invertidas (vetor normal voltado para dentro), falhas na junção de superfícies (*gaps*), poligonalização excessiva da superfície (tolerância de modelamento muito aberta), etc.

A geração de *offsets* também pode ser defeituosa ou trabalhosa, especialmente para ferramentas toroidais e de forma, para as quais a geração *de offsets* requer técnicas bem complexas e poucos algoritmos são capazes de gerá-los [3]. Algumas falhas na geração de *offsets* de curvas e superfícies são mostrados pela figura 35 [3, 87].

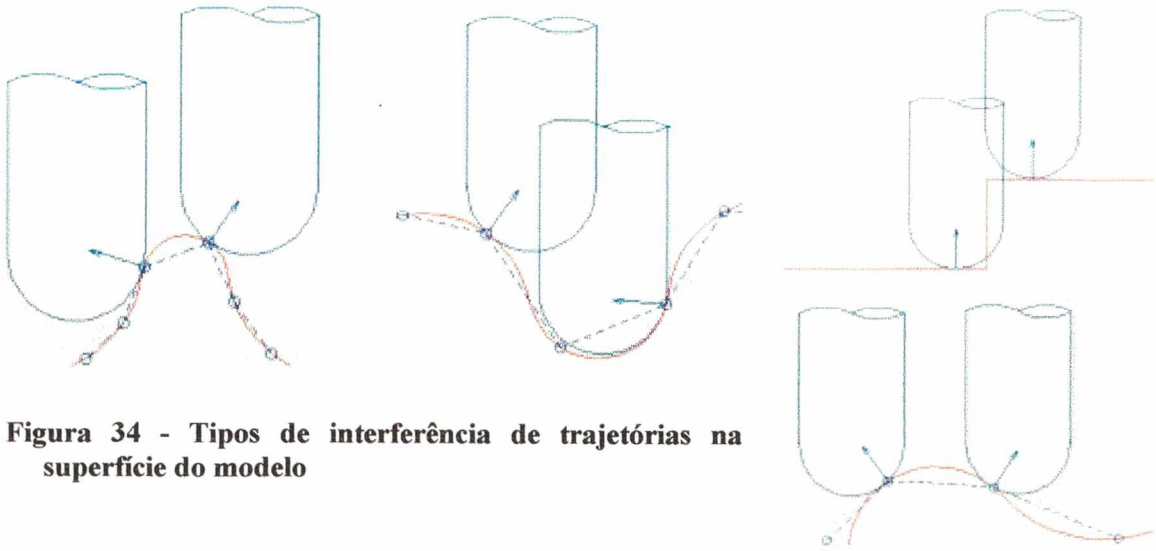


Figura 34 - Tipos de interferência de trajetórias na superfície do modelo

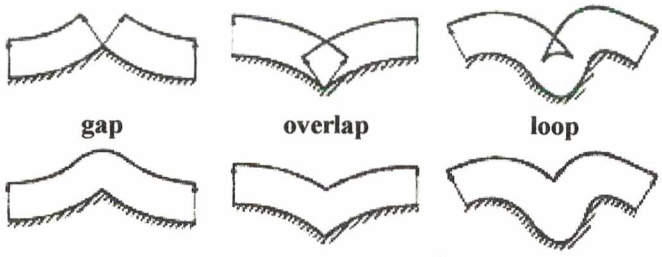


Figura 35 – Falhas na geração de *offsets* da superfície do modelo: na parte superior, três tipos básicos de erros na geração de *offsets*, que podem ocasionar trajetórias com interferências e anomalias; na parte inferior, os *offsets* corretos para as três situações correspondentes

Em sistemas CAM que usinam a partir de modelos sólidos a dificuldade de geração de *offsets* é consideravelmente maior do que para superfícies, embora o contínuo desenvolvimento dos *softwares* conceda às novas gerações de produtos um desempenho bem superior às primeiras [3]. A grande maioria dos *softwares* do atual mercado de CAD/CAM transformam internamente seus modelos sólidos em superfícies para gerar as trajetórias de usinagem.

4.2 ESTRATÉGIAS PARA FRESAMENTO OFERECIDAS PELOS SISTEMAS CAM

Conforme já mencionado, com base nos algoritmos descritos, cada fornecedor de sistemas CAM desenvolve seus próprios métodos de geração de trajetórias, criando diferentes estratégias no intuito de adequar a remoção de material por fresamento à diversidade de elementos geométricos que formam a superfície de uma peça. Mas, geralmente, os *softwares* de CAM oferecem

estratégias semelhantes, diferentes apenas na interface com o usuário, em alguns parâmetros/opções para movimentos locais e no nome que recebem dos seus desenvolvedores, considerando-se sistemas de um mesmo nível tecnológico e que adotem representações geométricas semelhantes. Por exemplo, não se pode exigir que um CAM de poucos recursos computacionais ofereça toda a gama de estratégias disponíveis nos poderosos sistemas CAD/CAM corporativos, ou que um *software* que trabalhe apenas com modelos representados por malhas de triângulos possibilite trajetórias segundo as linhas isoparamétricas de uma superfície.

As estratégias para fresamento em 2½ e 3 eixos dos *softwares* de CAM atualmente disponíveis no mercado se agrupam em quatro categorias principais [11], mais uma categoria adicional, com estratégias especiais para otimização da remoção de material:

- **Estratégias para trajetórias segundo curvas definidas pelo usuário:** são estratégias para usinagem em 2½ eixos de modelos 2D ou 2½D, cujas trajetórias são direcionadas e limitadas por contornos (pontos, retas, arcos, curvas livres) selecionados e/ou construídos pelo programador.

- **Estratégias para usinagem em Z constante:** utilizam os algoritmos para movimentação em 2½ eixos que interceptam planos horizontais com a superfície do modelo, tanto para desbaste como para acabamento.

- **Estratégias para trajetórias segundo interseções de entidades:** agrupam as estratégias que produzem trajetórias sobre curvas geradas pela interseção da superfície do modelo[4] com outras superfícies ou planos (método APT), através da projeção de entidades planas construídas em operações separadas (método cartesiano) ou da projeção utilizada em métodos tipo *iso-offsets* e *iso-scallops*.

- **Estratégias para trajetórias segundo "linhas de fluxo".** Utilizam os algoritmos do método isoparamétrico que guiam a ferramenta pelas curvas ***u*** ou ***v***, que definem parametricamente uma superfície ou um grupo de superfícies.

---

[4]Apenas com a manipulação do *software* é difícil detalhar o algoritmo de geração de trajetórias que é utilizado em cada estratégia. Assim, o termo *superfície do modelo*, quando relacionado à geração de curvas para guiar as trajetórias, pode estar se referindo ao *offset* da superfície, dependendo da lógica do algoritmo do *software*.

- **Estratégias para remoção de material remanescente.** Embora possam ser enquadradas dentro das categorias anteriores, estas estratégias merecem particular denominação em vista de sua aplicação diferenciada. São utilizadas geralmente em operações de pré-acabamento ou acabamento fino para remover material de áreas não atingidas pela ferramenta de uma operação anterior.

A partir das informações obtidas na pesquisa relatada no capítulo 2, principalmente pela observação dos oito *softwares* selecionados, relacionaram-se os tipos de estratégias oferecidas pelos sistemas CAM e aplicáveis ao fresamento de cavidades e outras partes/componentes de moldes. A seguir, nas seções 4.2.1 e 4.2.2 são apresentadas estas estratégias.

4.2.1 ESTRATÉGIAS PARA FRESAMENTO DE GEOMETRIAS 2D E 2½D

Os *softwares* de CAM que usinam a partir de modelos 2D e 2½D, normalmente o fazem com quatro tipos de estratégias, todas com movimentos simultâneos de no máximo dois eixos, geralmente X e Y, permanecendo o eixo Z apenas para indexação e posicionamento.

Os quatro grupos de estratégias para fresamento 2 ½ eixos de modelos 2D (vistas planas) e 2½D (modelos tridimensionais em *wireframe*) são:

A) TRAJETÓRIAS PONTO A PONTO (*PONT-TO-POINT, HOLEMAKING*)

A ferramenta se move de uma coordenada XY específica até outra, segundo uma trajetória linear. Embora existam *softwares* que executam ranhuramentos desta forma, o mais comum é a utilização deste tipo de movimentação para execução de furos. Neste caso, o movimento da ferramenta se dá no plano de segurança (paralelo ao de trabalho) e em avanço rápido, com a ferramenta incrementando em Z com avanço de furação apenas sobre a coordenada especificada.

B) PERFILAMENTO OU CONTORNO (*PROFILING*) E RANHURAMENTO 2D

Neste grupo de estratégias o movimento da ferramenta é guiado por uma entidade linear ou curvilínea. Se o centro da ponta da ferramenta segue a curva, pode-se usinar ranhuras ou canais com a geometria igual a da ferramenta. Porém, quando se compensa o raio da ferramenta, esta contorna a curva pelo lado especificado, para perfilamento de contornos abertos ou fechados. Neste caso, além de uma profundidade de corte, também incrementos laterais podem ser

programados, possibilitando o desbaste da lateral de um bloco até uma distância da curva igual ao valor de um sobrematerial também programado. Tanto para a ferramenta sobre o contorno quanto para ao lado do contorno, a profundidade de corte deve ser especificada, para um único passe (acabamento) ou vários passes incrementados em Z (desbaste). Outra possibilidade de perfilamento é indicar um ângulo de inclinação (*draft angle*) entre o contorno selecionado e os planos XY contendo as trajetórias. Isto é usado para desbaste de paredes inclinadas ou acabamento das mesmas com ferramentas cônicas com o mesmo ângulo de inclinação.

C) USINAGEM DE BOLSÕES (*POCKETING*)

Estas estratégias geram movimentos em zigue-zague ou paralelos (*offset*) a um contorno fechado, também definido por linhas ou curvas. Semelhantemente à usinagem de perfis, pode-se especificar as alturas do topo e a base do material bruto, permitindo desbaste em planos XY incrementados em Z segundo uma determinada profundidade de corte.

D) USINAGEM DE BOLSÕES COM ILHAS (*POCKETING WITH ISLANDS*)

Muito parecida com a estratégia anterior, com a diferença de se poder selecionar não só um contorno fechado externo, mas também outros contornos menores (ilhas) internos ao mesmo. O limite do número de contornos externos e internos simultaneamente selecionáveis depende de cada *software*, variando entre um único e várias centenas.

4.2.2 ESTRATÉGIAS PARA FRESAMENTO DE GEOMETRIAS 3D

Ao contrário do que acontece para o fresamento 2D e 2½D, os *softwares* para fresamento de modelos tridimensionais costumam oferecer uma ampla gama de estratégias, principalmente no que diz respeito ao fresamento em 3 eixos. Os principais e mais freqüentemente oferecidos grupos de estratégias para fresamento de modelos 3D são apresentados a seguir:

A) VARREDURA DE ÁREA EM 2½ EIXOS – EM ZIGUE-ZAGUE OU PARALELA AO CONTORNO

Planos perpendiculares ao eixo da ferramenta espaçados um do outro por um valor definido pelo usuário cortam o bloco e o modelo, gerando um contorno externo (limites do bloco) e um ou mais contornos internos. Para cada plano ou patamar, a região interna ao contorno externo e externa aos contornos internos é varrida pela ferramenta. Na maioria dos casos a distância entre cada patamar é fixa, igual ou abaixo do valor máximo de profundidade de corte permitido pela

ferramenta. Os *softwares* de CAM geralmente oferecem duas técnicas de varredura principais [44]:

Usinagem paralela a uma determinada direção, mais conhecida como usinagem em **zigue-zague** (*lace cutting, raster*), movimenta a ferramenta em passes paralelos, espaçados por um incremento lateral especificado e conectados por trajetórias em avanço de corte ou rápido (ver movimentos de conexão no capítulo 3). Dependendo do *software*, ao encontrar ilhas (contornos internos no patamar de usinagem) a ferramenta pode executar vários tipos de movimentação, conforme se vê na figura 36 [42], à escolha do programador.

Usinagem paralela ao contorno ou em **espiral** [5] (*spiral, stock offset, meander*), cujas trajetórias seguem *offsets* dos contornos, começando do centro da geometria para fora ou o contrário, ao gosto do usuário (figura 37).

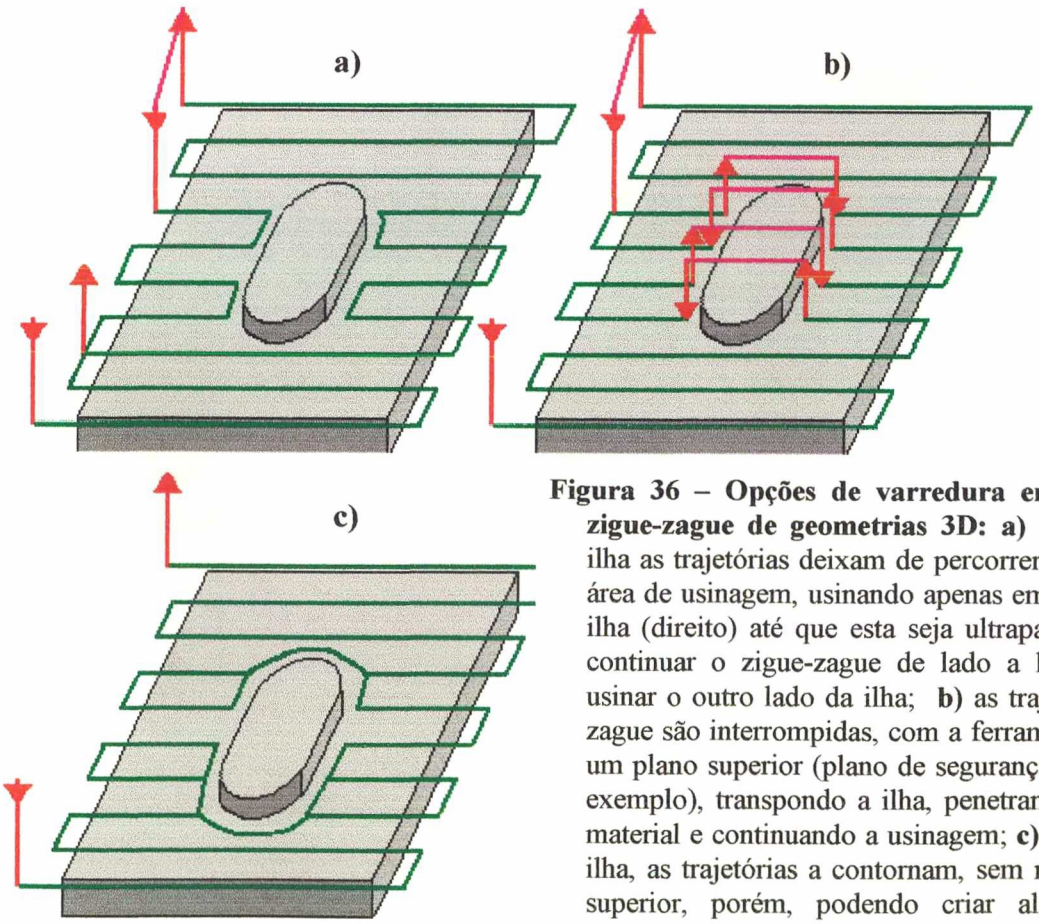
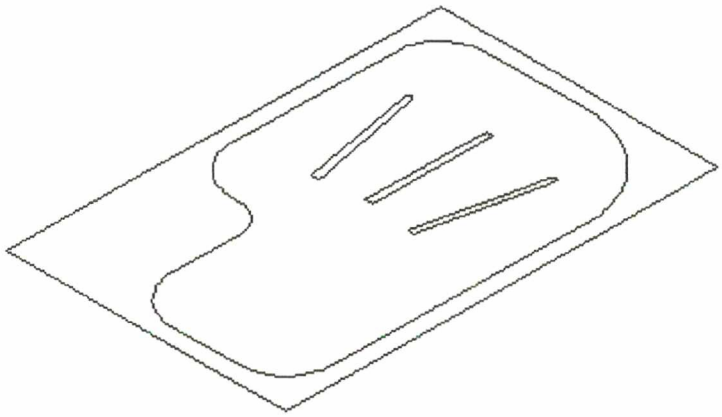


Figura 36 – Opções de varredura em 2 ½ eixos em zigue-zague de geometrias 3D: a) ao encontrar uma ilha as trajetórias deixam de percorrer toda a largura da área de usinagem, usinando apenas em um dos lados da ilha (direito) até que esta seja ultrapassada, para então continuar o zigue-zague de lado a lado e finalmente usinar o outro lado da ilha; **b)** as trajetórias em zigue-zague são interrompidas, com a ferramenta retraindo até um plano superior (plano de segurança incremental, por exemplo), transpondo a ilha, penetrando novamente no material e continuando a usinagem; **c)** ao encontrar uma ilha, as trajetórias a contornam, sem retrair a um plano superior, porém, podendo criar algumas trajetórias redundantes

[5] Apesar da denominação, as trajetórias não se afastam (ou se aproximam) continuamente do centro, como uma espiral verdadeira, pois as passadas são aproximadamente paralelas, conectadas com movimentos retilíneos



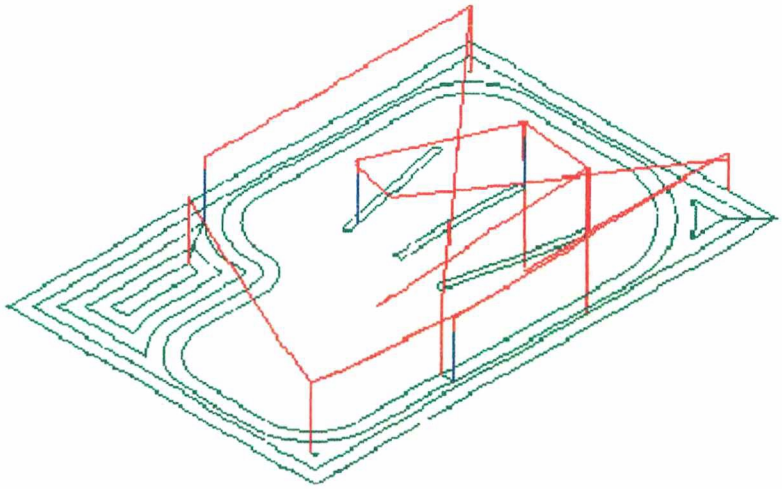


Figura 37 – Varredura espiral em 2½ eixos de geometrias 3D: acima o contorno da geometria em um determinado patamar; ao lado as trajetórias de corte em espiral (verde), os movimentos de posicionamento e retração em avanço rápido (vermelho) e de penetração em avanço de corte (azul)

B) PERFILAMENTO EM 2½ EIXOS

Aproveitam o mesmo método de geração de contornos das estratégias de desbaste, mas ao invés de varrerem uma área, executam uma passada que acompanha estes contornos, com sentido determinado pelo programador, patamar por patamar. A distância entre cada patamar pode ser especificada tanto por um valor de um incremento em Z ou por uma altura de crista máxima admissível (figura 38).

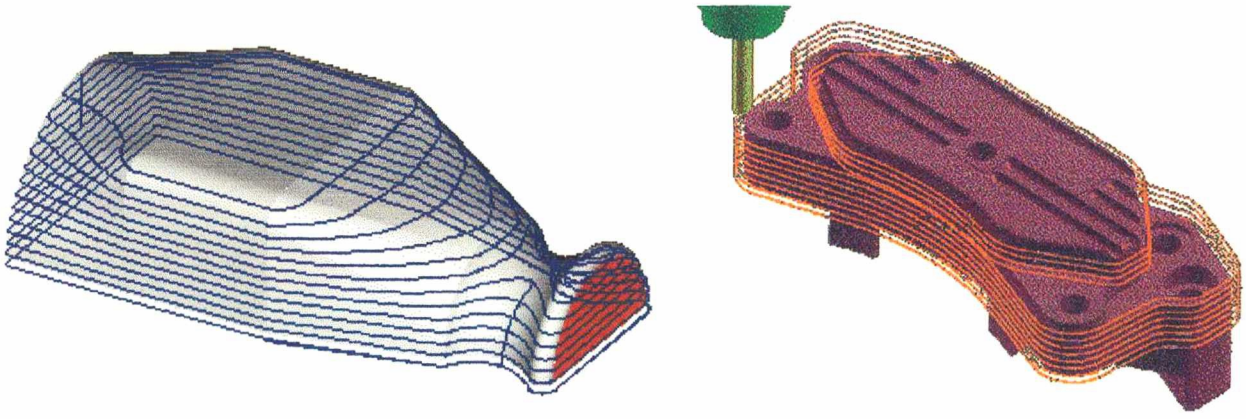


Figura 38 – Perfilamento em 2½ eixos: duas peças usinadas com a ferramenta movimentando-se segundo trajetórias em Z constante, perfilando as geometrias em cada patamar de corte; à esquerda, as trajetórias são mostradas em azul; à direita, as trajetórias estão representadas em laranja e, em verde, a ferramenta de corte e seu suporte

C) USINAGEM POR PLANOS PARALELOS

O mais antigo e mais conhecido método de fresamento de geometrias complexas [23]. Nele, o programador escolhe a direção de um plano e vários planos paralelos ao especificado cortam as áreas do modelo selecionadas para usinagem, criando trajetórias tridimensionais em zigue-zague (ou, como no desbaste, apenas em um sentido, com movimentos em rápido para posicionamento no início da passada adjacente) por toda esta área segundo a direção escolhida (figura 39).

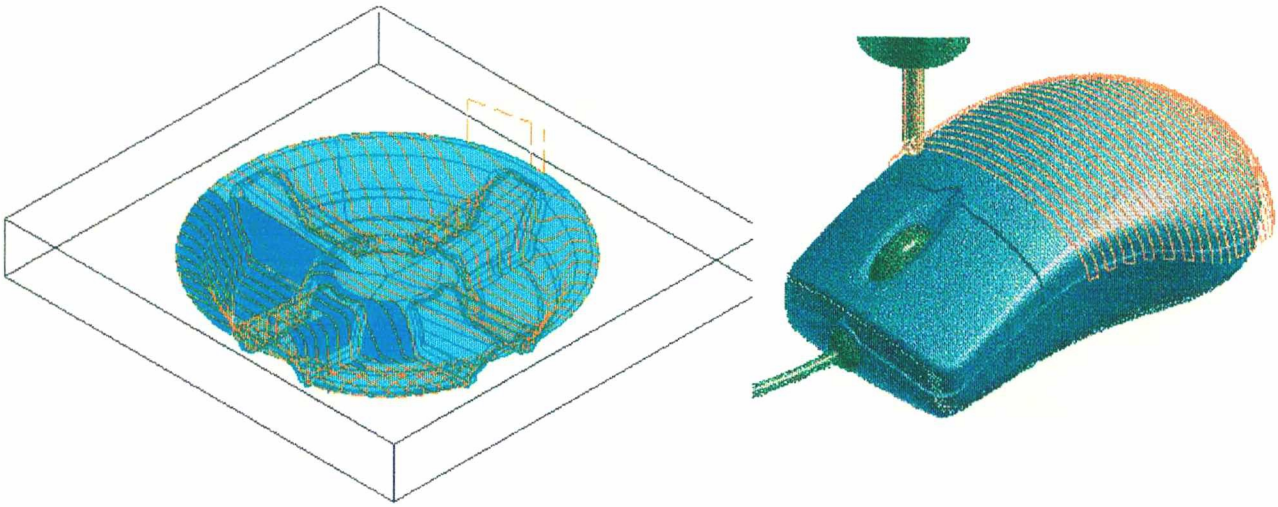


Figura 39 – Estratégia de usinagem por planos paralelos: a) as trajetórias em zigue-zague (laranja) geradas pelo CAM *Teksoft* perfilam as geometrias dos modelos (azul) contidas dentro de um bloco (preto) que delimita o campo de usinagem; **b)** trajetórias segundo planos paralelos para a usinagem da superfície convexa de um modelo exemplo do sistema *Surfcam*.

D) PROJEÇÃO RADIAL

As trajetórias partem de um ponto central, determinado pelo usuário, radialmente até o limite da área selecionada. Raios adjacentes podem ser ou não conectados, fazendo com que a ferramenta contorne a superfície perpendicularmente aos raios (ver figura 40). Entre outros parâmetros, o programador especifica o espaçamento entre cada raio, o sentido de desenvolvimento das passadas e os ângulos inicial e final (ver figuras 41 e 42 [42]).

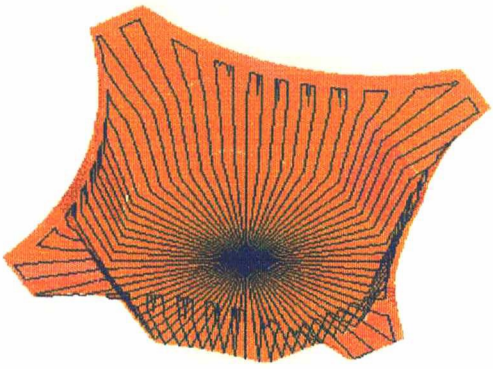


Figura 40 – Estratégia de projeção radial: as trajetórias (azul) radiais, geradas pelo *software Alphacam*, partem do centro da geometria e perfilam a superfície (laranja) do modelo em ida e volta; trajetórias perpendiculares conectam as passadas radiais

Figura 41- Opções de usinagem radial (1): sentidos e ângulos determinando a forma das trajetórias radiais ainda não projetadas sobre a superfície do modelo

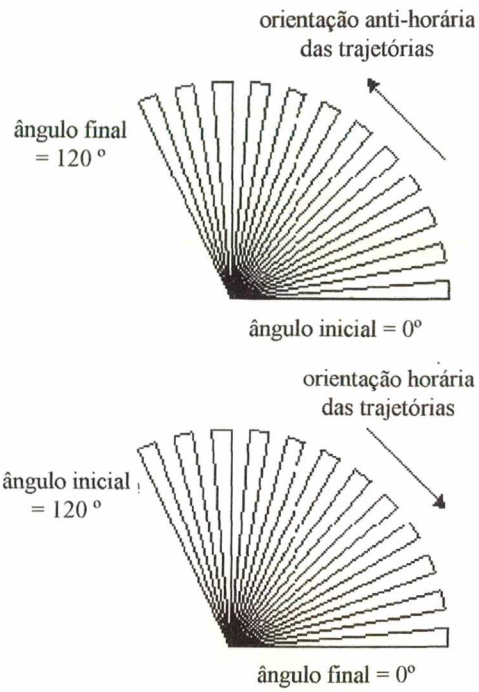
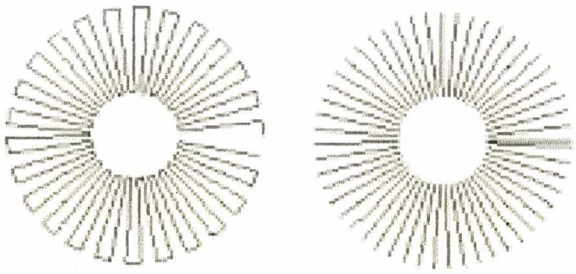


Figura 42 - Opções de usinagem radial (2): Trajetórias radiais (não projetadas) conectadas e não conectadas por passadas perpendiculares; quando a opção de conexão não é utilizada, as passadas são interligadas por movimento em avanço rápido feitos no plano de segurança



E) PROJEÇÃO HELICOIDAL OU PATAMARES EM HÉLICE

Um padrão espiral é projetado sobre a superfície selecionada, fazendo com que a ferramenta se afaste de um ponto determinado em uma espiral contínua até atingir os contornos da área a ser usinada, ou que comece pelos contornos e se dirija ao centro. Parâmetros semelhantes aos da estratégia anterior são também aqui especificados (figura 43 [42]). Este tipo de estratégia ainda é oferecido por poucos *softwares* (entre os quais o *PowerMill*, empregado por várias ferramentarias nacionais), mas foi considerado interessante por diversos programadores de moldes consultados [14, 38, 65], por se constituir uma alternativa às estratégias de usinagem radial e perfilamento em 2 ½ eixos.

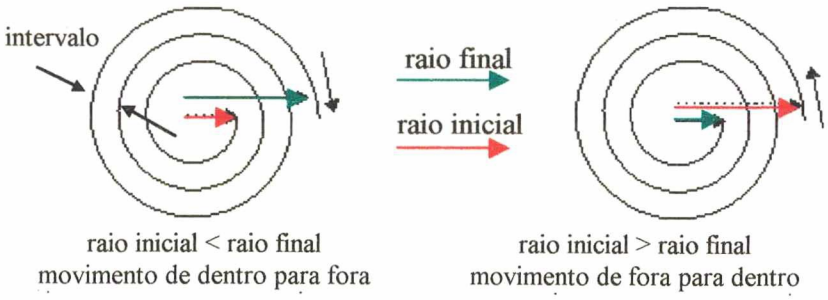


Figura 43 – Estratégia de projeção helicoidal; parâmetros utilizados no controle das trajetórias helicoidais: *intervalo entre passadas, raios inicial e final, ângulos inicial e final*

F) USINAGEM POR *OFFSET* DE CONTORNOS

Offsets progressivos de um contorno fechado selecionado pelo programador são projetados sobre a superfície do modelo, utilizando espaçamentos constantes (*iso-offsets*) ou variáveis (*iso-scallops*) (ver figuras 44 [53] e 45 [42]).

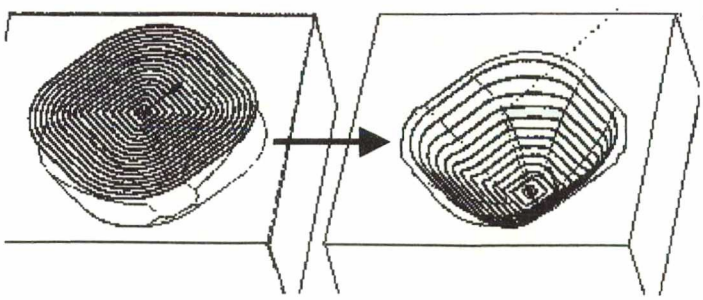


Figura 44 - Estratégia de projeção de contornos (1): o CAM *Pro/mfg* projeta curvas de um contorno sobre a superfície, gerando as trajetórias

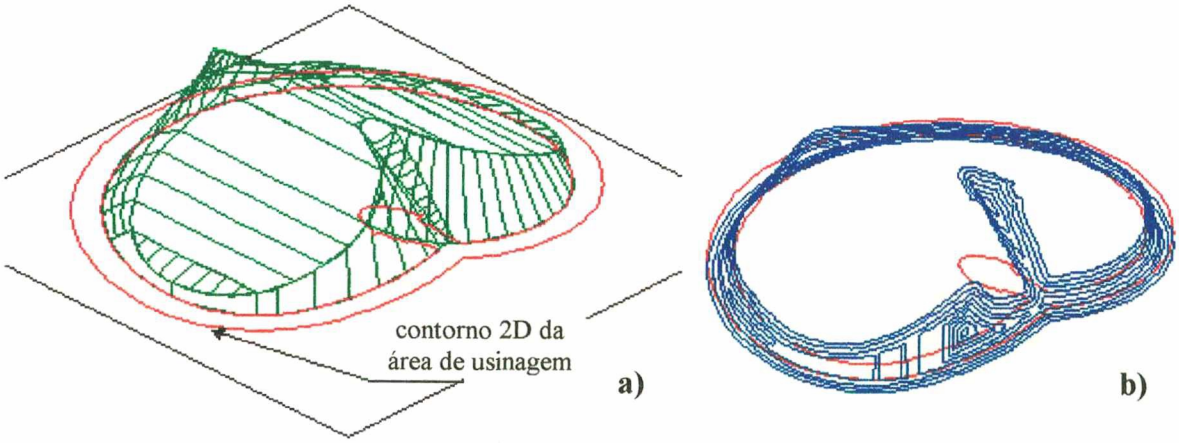


Figura 45 - Estratégia de projeção de contornos (2): a) o sistema calcula o contorno (vermelho) formado pela projeção da geometria (verde) sobre um plano XY na base do modelo, levando em conta o diâmetro da ferramenta escolhida; **b)** depois, *offsets* do contorno gerado são projetados sobre a superfície do modelo, gerando as trajetórias (azul) de corte

G) PERFILAMENTO EM 3 EIXOS

O usuário cria ou seleciona duas curvas, ou dois contornos com o mesmo número de curvas. Planos passando por um ponto em cada contorno (pontos equivalentes em cada curva de cada contorno) interceptam o modelo, gerando curvas de interseção que guiam as trajetórias, paralelamente ou perpendicularmente aos contornos. Da mesma forma que na usinagem por planos paralelos, o programador determina o tipo de conexão de passadas e seu espaçamento (por incremento lateral ou por altura máxima de crista).

Outras estratégias deste tipo pedem a seleção de apenas um contorno e geram um número de passadas paralelas determinado pelo programador. Estas estratégias são capazes de gerar trajetórias adicionais acima e abaixo das passadas paralelas, limitadas por planos máximos e mínimos e segundo incrementos em Z igualmente determinados pelo programador. A figura 46 mostra duas maneiras diferentes de utilização de estratégias de perfilamento em 3 eixos.

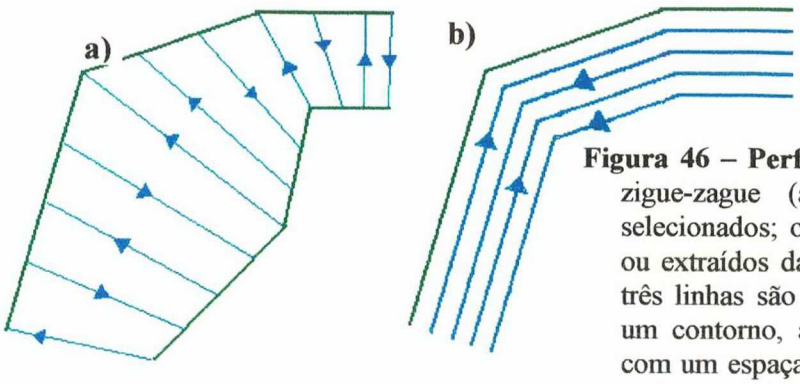


Figura 46 – Perfilamento em 3 eixos: a) trajetórias em zigue-zague (azul) unem dois contornos (verde) selecionados; os contornos podem ter sido modelados ou extraídos da borda de uma ou mais superfícies; **b)** três linhas são selecionadas (ou criadas) para formar um contorno, a partir do qual são geradas trajetórias com um espaçamento definido pelo programador; OBS: embora as figuras não mostrem, estas trajetórias são projetadas sobre superfícies (individuais ou, geralmente, em grupo) tridimensionais, fazendo com que a ferramenta perfile suas geometrias

H) VARREDURA EM 3 EIXOS POR PATAMAR

É um misto das usinagens por *planos paralelos* e *em Z constante*. Primeiramente o modelo é dividido em planos XY espaçados por uma profundidade de corte especificada. Uma direção de usinagem e um incremento lateral são determinados, e planos paralelos à direção de usinagem interceptam a superfície selecionada do modelo e os planos XY. Assim, a ferramenta percorre a interseção do plano de usinagem com o modelo até encontrar um plano XY, passando a usinar segundo a interseção destes até atingir novamente um contorno. Superfícies já usinadas são evitadas por retrações da ferramenta (figura 47). Variações deste tipo de estratégia permitem trajetórias radiais ou paralelas ao contorno ao invés de zigue-zague por planos paralelos. Embora seja muito citada na literatura, esta estratégia é pouco encontrada nos *softwares* comerciais (ver tabela 8).

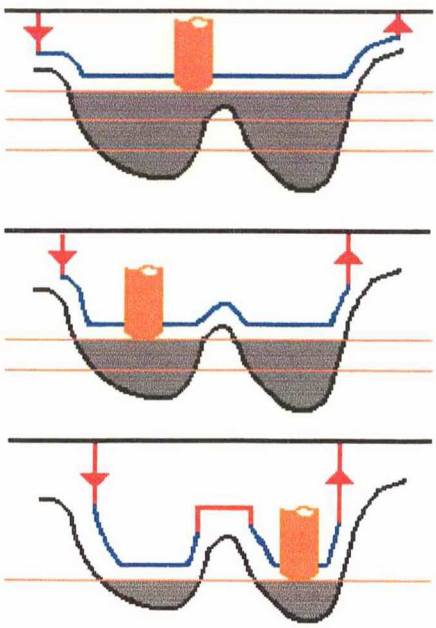


Figura 47 – Varredura em 3 eixos por patamar: planos XY (laranja) interceptam a geometria do modelo, para que sejam geradas trajetórias (azul) em zigue-zague para remoção do material (cinza) em cada patamar, respeitando o sobrematerial (preto) estabelecido pelo programador. A ferramenta desce do plano de segurança (preto) até encontrar a geometria a usinar, a qual é perfilada até a altura do patamar mais próximo; para os patamares seguintes, o procedimento se repete, porém, a ferramenta não volta a usinar as superfícies acima do patamar que estiver sendo varrido, retraindo a um plano superior, como um plano de segurança incremental, por exemplo

A curva que representa a interseção entre duas superfícies não-tangentes é o caminho da ferramenta, gerando uma única passada, geralmente para acabamento de cantos vivos ou pequenos arredondamentos côncavos (*fillets*), não atingíveis pelas ferramentas com arredondamento da ponta (toroidais ou esféricas) ou com diâmetro muito grande, respectivamente, de operações de acabamento anteriores. Alguns *softwares* podem gerar mais passes (paralelos ou perpendiculares à curva de interseção entre as duas superfícies) quando o programador determina uma distância lateral para ambos os lados (*overlap)*, limitando a área de aplicação da estratégia (figura 48 [42]).

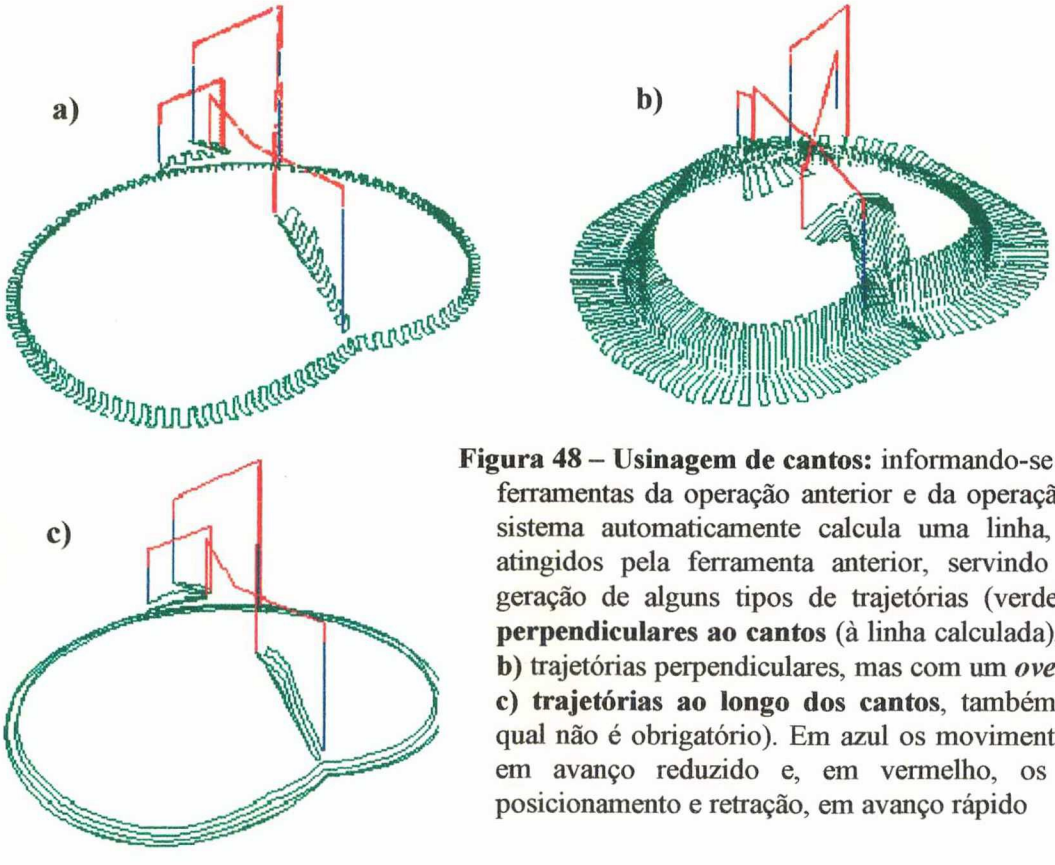


Figura 48 – Usinagem de cantos: informando-se as dimensões das ferramentas da operação anterior e da operação a programar, o sistema automaticamente calcula uma linha, nos cantos não atingidos pela ferramenta anterior, servindo de base para a geração de alguns tipos de trajetórias (verde): **a) trajetórias perpendiculares ao cantos** (à linha calculada), em zigue-zague; **b)** trajetórias perpendiculares, mas com um ***overlap*** programado; **c) trajetórias ao longo dos cantos**, também com *overlap* (o qual não é obrigatório). Em azul os movimentos de penetração, em avanço reduzido e, em vermelho, os movimentos de posicionamento e retração, em avanço rápido

J) GRAVAÇÕES (*ENGRAVING*)

Estratégias especiais para usinagem de caracteres, símbolos, desenhos livres planos ou em relevo sobre a superfície da peça. A ferramenta é guiada pela projeção destes elementos sobre o modelo (figura 49 [41]).

Figura 49 – Gravação ou *engraving*: tela do sistema *Alphacam*, mostrando um símbolo a ser usinado na superfície da peça (direita) e a simulação gráfica da usinagem

K) RANHURAS

Uma curva ou seqüência de curvas (contorno) é criada (ou selecionada) para guiar uma ferramenta, geralmente uma fresa de forma, segundo uma profundidade especificada pelo usuário ao longo da superfície, em um ou mais passes em Z.

L) USINAGEM ISOPARAMÉTRICA PARA SUPERFÍCIES INDIVIDUAIS OU SEQÜENCIAIS

No primeiro caso, uma única superfície é selecionada e duas direções podem ser escolhidas, segundo as curvas *u* ou segundo as curvas *v*. Desta forma, a ferramenta acompanha as curvas que definem a geometria da superfície, geralmente com passadas de ida e vinda (bidirecional) espaçadas conforme um incremento ou um altura máxima de crista especificados. Várias superfícies podem ser selecionadas, mas são usinadas uma a uma, cada uma com uma direção independente. Para o segundo caso, o tipo de movimento gerado é o mesmo, contudo várias superfícies contíguas ou em seqüência são usinadas como se fossem uma só, numa única direção (figura 50).

M) USINAGEM ISOPARAMÉTRICA PARA SUPERFÍCIES REGRADAS

Também seguem as curvas que definem a geometria, mas são específicas para superfícies regradas (*ruled surfaces*). A diferença em relação às estratégias anteriores está no fato de que a superfície não precisa ser criada, somente as duas curvas ou contornos que a definem, com o algoritmo do *software* calculando as trajetórias como se fossem as próprias curvas que unem os pontos de cada contorno selecionado. Este recurso é muito útil quando deve-se gerar a usinagem do modelo do produto, extraindo desta geometria as duas metades do molde, pois neste tipo de operação, freqüentemente se deve criar superfícies para ocultar algumas aberturas que fazem parte do produto, mas não do molde (figuras 51 e 52 [13]).

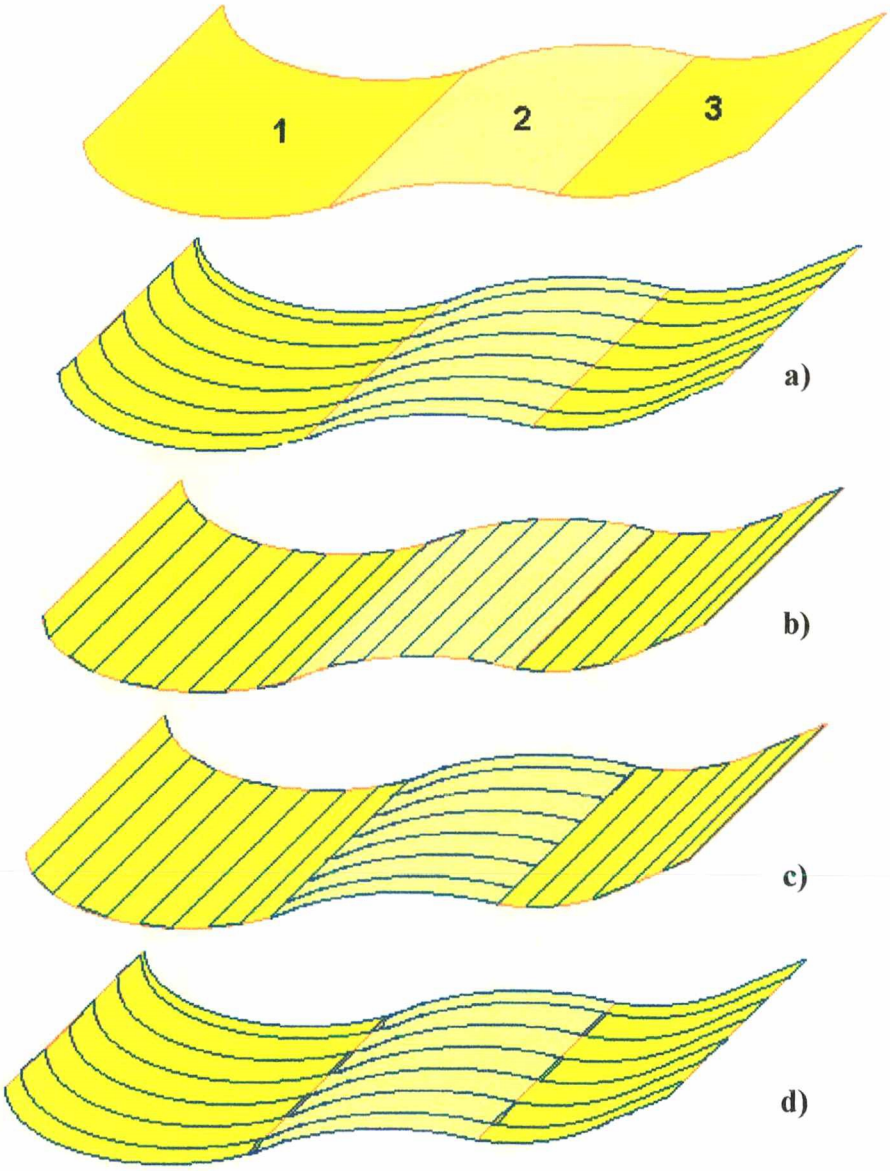


Figura 50 – Estratégias isoparamétricas: várias são as possibilidades de usinagem das três superfícies mostradas ao lado: **a)** selecionar as três em grupo e usiná-las como se fossem uma única, na direção das curvas *v*; **b)** semelhante à opção anterior, porém na direção das curvas *u*; **c)** seleciona-las e usiná-las em separado, cada uma com a direção mais adequada; **d)** selecioná-las e usiná-las em separado, porém, todas na mesma direção.

N) USINAGEM SEGUNDO PROJEÇÃO ISOPARAMÉTRICA

Dois contornos selecionados pelo usuário definem uma superfície paramétrica plana. Suas curvas isoparamétricas são projetadas sobre as superfícies do modelo localizadas entre os contornos, gerando trajetórias paralelas ou perpendiculares aos contornos. Este tipo de estratégia produz resultados muito semelhantes aos conseguidos com estratégias de perfilamento em 3 eixos com seleção de 2 contornos.

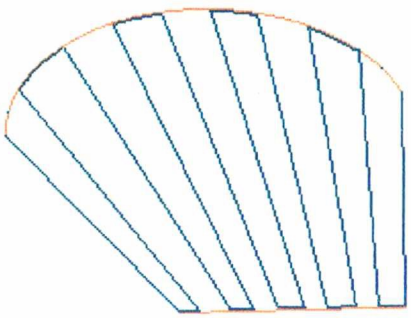


Figura 51 – Usinagem de superfícies regradas (1): dois contornos são selecionados para a criação de trajetórias isoparamétricas, sem, contudo, ter sido modelada a superfície que une os contornos

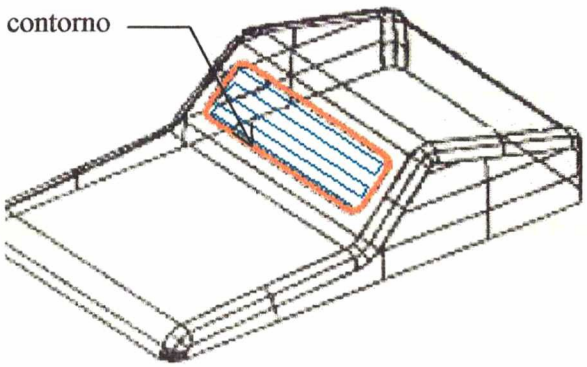


Figura 52 – Usinagem de superfícies regradas (2): O modelo mostrado na figura 9, pode ser usinado sem a criação da superfície que fecha a abertura (contorno laranja). Os contornos da abertura são extraídos do modelo e selecionados para a usinagem isoparamétrica (azul) da região

O) ESTRATÉGIAS PARA REMOÇÃO DE MATERIAL REMANESCENTE OU "REUSINAGEM"

Softwares que apresentam este tipo de recurso calculam automaticamente áreas não-usinadas pela ferramenta da operação anterior [29, 42, 53, 55, 58]. A maneira como se desenvolve este tipo de operação varia muito com o *software*, mas duas são as mais encontradas. Na primeira, o programador seleciona uma das operações já executadas. As áreas com excesso de material são calculadas, transformadas em superfícies e usinadas com uma estratégia semelhante à da operação anterior, porém com uma ferramenta menor.

No outro método, contornos (*boundaries*) que limitam as áreas não-usinadas são criados a partir da especificação de uma "ferramenta anterior" (*old tool, rest tool*). O programador, então, seleciona uma estratégia apropriada, informando ao *software* que esta deve ser aplicada somente à região dentro do contorno (figura 53).

Pelo fato destas estratégias, em sua maioria, se basearem num reconhecimento da superfície residual, e não do volume residual, apenas uma passada é gerada pelo programa. Isto pode oferecer riscos à integridade da ferramenta de corte, caso a espessura de material a ser removido seja maior do que o que pode ser suportado pela mesma [107].

Embora o resultado seja semelhante ao conseguido com uma estratégia de usinagem de cantos, o tipo de trajetória gerado e o método de cálculo costumam ser diferentes.

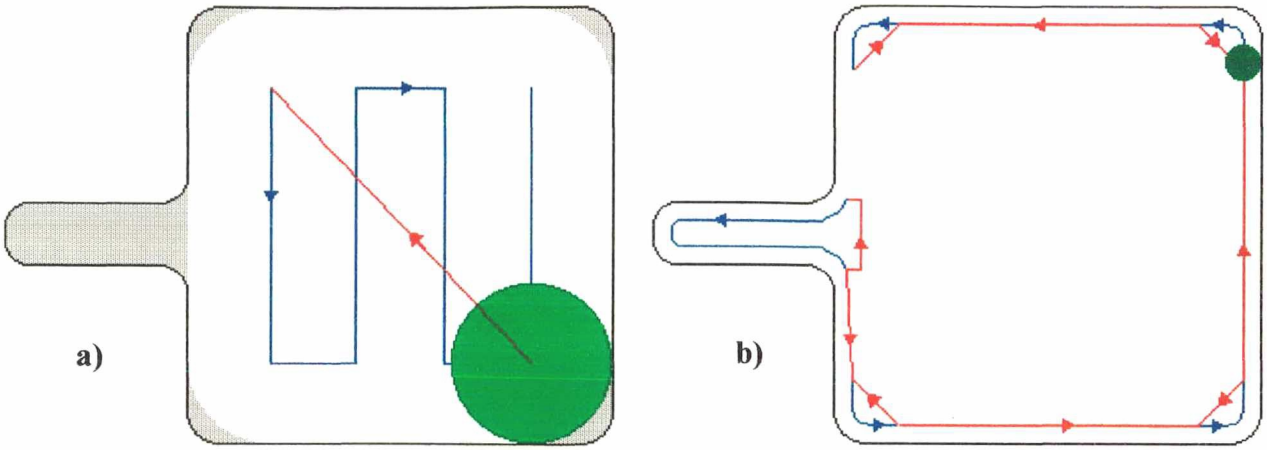


Figura 53 – Estratégia de reusinagem: o bolsão acima é usinado com duas ferramentas diferentes: a) a ferramenta (verde) remove a maioria do material com uma estratégia de varredura em 2 ½ eixos, em zigue-zague (a figura mostra, em azul, as trajetórias para um patamar e, em vermelho os movimentos de posicionamento em avanço rápido entre cada patamar); **b)** o material não removido pela ferramenta anterior (cinza) é usinado pela ferramenta da segunda operação, com estratégias de perfilamento em 2 ½ eixos (por patamares); o sistema se encarrega de calcular trajetórias apenas para estas áreas, além de movimentos rápidos para o posicionamento entre patamares e entre as diferentes áreas.

A tabela 8 (próxima página) classifica, nas devidas categorias, as estratégias comerciais para fresamento 3D de cada um dos oito sistemas CAM analisados e as identifica segundo a semelhança dos movimentos globais gerados com os tipos de estratégias relacionados neste item do trabalho.

GRUPOS DE ESTRATÉGIAS	*AlphaCAM*	*camand*	*CAMSTATION*	*CIMATRON*	*hyperMILL*	*powerMILL*	*pro/MFG*	*TEKSOFT*
VARREDURA EM ZIGUE-ZAGUE	Z CONTOUR	ROUGH		WCUT	Z-LEVEL	AREA CLEARANCE	VOLUME e POCKET	POCKETING
VARREDURA EM ESPIRAL	Z CONTOUR	ROUGH		WCUT	Z-LEVEL	AREA CLEARANCE	VOLUME	POCKETING
PERFILAMENTO 2½ EIXOS	HORIZONTAL Z CONTOURS	CONTOUR	CONTORNO	WCUT	Z-LEVEL	CONSTANT Z e PROJECTION	PROFILE	POCKETING
PLANOS PARALELOS	ALONG LINE IN XY PLANE	PARALLEL PLANE	VARREDURA DO BLOCO	SRFPRF	3D PROFILE	RASTER PATTERN e PROJECTION	CONVENTIONAL SURFACE	SLICE CUTTING
PROJEÇÃO RADIAL	RADIAL	PROJECTION		SRFPKT		RADIAL PATTERN e PROJECTION		
PATAMARES EM HÉLICE						SPIRAL PATTERN e PROJECTION		
OFFSET DE CONTORNOS	PROJECTED CONTOURS	PROJECTION		SRFPKT		3D OFFSET	CONTOUR PROJECTED	
PERFILAMENTO 3 EIXOS		SWEPT PLANE		SRFPRF	3D PROFILE		CONTOUR CUT LINE	TOPOGRAPHICAL CUTTING
PERFILAMENTO 3 EIXOS POR PATAMAR				ZCUT				
USINAGEM DE CANTOS	ALONG INTERSECTION	DUAL CONTACT		REMACHINE (pencil)	PENCIL MILLING	PENCIL e CORNER FINISHING		
GRAVAÇÕES	ENGRAVING						GROOVING	ENGRAVE
RANHURAS	ALONG 3D POLYLINE/SPLINE		RANHURA 3D	CURVE MX			TRAJECTORY	
ISOPARAMÉTRICA P/ SUPERF. INDIVIDUIAS OU SEQUENCIAIS	PARAMETER LINES	FLOW LINE		SURMILL	3D PROFILE		CONTOUR SRF BY SRF	UV CUTTING
ISOPARAMÉTRICAS P/ SUPERFÍCIES REGRADAS	SURFACES WITH THE TOOL SIDE			RULED MX	3D PROFILE			
PROJEÇÃO ISOPARAMÉTRICA				SURCLR				
REMOÇÃO EM ÁREAS NÃO USINADAS PREVIAMENTE				REMACHINE (cleanup, optimize)	3D REST MILLING	*	LOCAL MILL	

Tabela 8 – Classificação dos tipos de estratégias para fresamento 3D

estratégias para usinagem em Z constante

estratégias para trajetórias segundo linhas de luxo

estratégias para trajetórias segundo interseções

estratégias para remoção de material remanescente

* todas as estratégias podem ser usadas para reusinagem, quando se usa uma opção que limitadas áreas não usinadas pela ferramenta anterior.

5. ORIENTAÇÕES E PROCEDIMENTOS PARA O PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO VIA CAM DO FRESAMENTO 3D DE MOLDES

5.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Conforme descrito anteriormente, uma vez que o planejamento do processo de fabricação do molde já esteja definido, que a peça já tenha sido modelada, que seu modelo geométrico já tenha sido transferido para o CAM e que este já tenha sido preparado (erros de transferência corrigidos, contração do plástico considerada, macho, fêmea e postiços separados, eletrodos extraídos, fechamento criado, entre outras edições), tem início, então, a **elaboração dos programas** NC de fresamento.

Nesta etapa, porém, o programador deve desenvolver duas atividades distintas. No **planejamento da programação**, o usuário do CAM estabelece as operações necessárias para o fresamento da cavidade, seleciona as estratégias para tal e determina os parâmetros de programação. Com o trabalho planejado, ele passa para sua segunda atividade, a **programação propriamente dita**, na qual interage com o *software* de CAM, primeiramente realizando o modelamento de geometrias de apoio à usinagem e modificações de detalhes da geometria da peça (que só poderiam ser realizadas após o planejamento da programação) para, então, alimentar o *software* com os dados determinados no planejamento e ordenar o processamento destas informações. Com os dados transferidos ao sistema, o CAM calcula e apresenta na tela as trajetórias do fresamento programado, para que o programador possa verificá-las, corrigi-las, pós-processar o(s) programa(s) e, finalizando uma seção de trabalho, enviá-los para o controle da máquina-ferramenta.

A *programação propriamente dita* é, de modo geral, simplesmente uma fase de execução, em que o trabalho do programador é quase que inteiramente "braçal". Por isto, o sucesso da elaboração via CAM de programas NC depende principalmente das ações tomadas na fase de planejamento da programação, e não da interação programador-*software*. Seqüências de operações (desbaste, pré-acabamento, acabamento) mal planejadas, estratégias e parâmetros inadequadamente selecionados refletir-se-ão diretamente na qualidade do(s) programa(s) gerado(s) e, conseqüentemente, na qualidade e na confiabilidade da usinagem do molde.

Tendo em vista o exposto, este capítulo propõe um conjunto de **procedimentos e orientações** para auxiliar o programador NC a organizar o planejamento da programação via CAM do fresamento de cavidades de moldes, passo a passo, para operações de desbaste e de acabamento, enfocando, principalmente, a **seleção de estratégias de usinagem** e a especificação de **parâmetros relativos ao posicionamento e aos movimentos locais da ferramenta de corte**. Adicionalmente, são apresentados quadros que **sistematizam diversas tomadas de decisão** por parte do programador, durante o planejamento da programação, esquematizando as orientações propostas.

A tabela 9 mostra os passos propostos para o **planejamento da programação das operações de desbaste**. No primeiro passo, o planejamento das operações, o programador deve decidir o número de programas de desbaste necessários para a peça em questão e o emprego (ou não) de operações intermediárias entre o desbaste e o acabamento (pré-acabamento). Depois, deve escolher a ferramenta de desbaste e seus parâmetros de corte (os quais não são abordados neste trabalho, pois podem ser obtidos em diversas outras fontes). O terceiro passo está estreitamente ligado aos dois primeiros, pois a definição das áreas a serem usinadas depende das decisões anteriormente tomadas. Seguem-se então as definições do sobrematerial para a próxima operação e da tolerância de usinagem. O sexto passo é a determinação dos movimentos globais através da seleção da estratégia de usinagem, imediatamente seguida da definição dos patamares de corte. Com a estratégia definida, o programador passa a estudar e decidir os valores e as opções a serem utilizadas para os diversos parâmetros oferecidos pelo *software*, o que ocorre nos passos de 8 a 15 (ver descrição detalhada no item 5.2).

passos	*DESBASTE*
1	PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES
2	ESCOLHA DA FERRAMENTA
3	DELIMITAÇÃO DA ÁREA DA USINAGEM
4	DEFINIÇÃO DO SOBREMATERIAL
5	ESPECIFICAÇÃO DA TOLERÂNCIA
6	SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA - MOVIMENTOS GLOBAIS
7	DEFINIÇÃO DA ALTURA DOS PATAMARES DE CORTE
8	ESCOLHA DO PONTO INICIAL
9	ESPECIFICAÇÃO DOS PLANOS DE SEGURANÇA E INÍCIO
10	DEFINIÇÃO DO INCREMENTO LATERAL
11	ESCOLHA DA ORIENTAÇÃO DA VARREDURA
12	UTILIZAÇÃO DE PASSES ADICIONAIS EM ESTATÉGIAS DE VARREDURA
13	DEFINIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONEXÃO ENTRE PASSADAS
14	SELEÇÃO DO TIPO DE ENTRADA DA FERRAMENTA NO BLOCO
15	HABILITAÇÃO DA OPÇÃO DE "USINAGEM POR REGIÃO"

Tabela 9 – Passos no planejamento das operações de desbaste

Os passos do **planejamento da programação das operações de acabamento** são mostrados na tabela 10. Para que possa iniciar o planejamento das operações, o programador precisa, inicialmente, dispor de informações a respeito do molde e do produto moldado, para decidir se seus programas vão primar mais pela tecnologia ou mais pela redução do tempo de usinagem. Após esta pré-definição, o programador deve analisar o modelo geométrico na tela do CAM e planejar as operações necessárias para reproduzir sua geometria no bloco de material. Entretanto, na programação do acabamento, o planejamento das operações, a delimitação das áreas a serem usinadas e a seleção de estratégias são ações interdependentes, praticamente constituindo um único passo. Da mesma forma, a escolha da direção e do sentido das trajetórias se confunde com a própria seleção da estratégia de acabamento, ao contrário do que ocorre no desbaste. Seguem-se as decisões quanto a ferramenta, tolerância, e parâmetros para movimentos locais e de posicionamento. Assim, como na orientação da programação do desbaste, considerações para a especificação destes parâmetros são limitadas àqueles principais, ou seja, tanto aqueles cuja determinação é indispensável ao cálculo das trajetórias pelo CAM e quanto os que não são fundamentais, mas são oferecidos pela maioria dos *softwares* de CAM que se aplicam ao fresamento de moldes (ver descrição mais detalhada no item 5.3).

passos	ACABAMENTO
1	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE PROGRAMAÇÃO
2	PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES E SELEÇÃO DE ESTRATÉGIAS – MOVIMENTOS GLOBAIS
3	DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS A USINAR
4	ESCOLHA DA FERRAMENTA
5	DEFINIÇÃO DO INTERVALO ENTRE PASSADAS
6	ESPECIFICAÇÃO DA TOLERÂNCIA
7	DEFINIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONEXÃO ENTRE PASSADAS
8	DETERMINAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE ENTRADA E SAÍDA
9	ESPECIFICAÇÃO DO PONTO INICIAL E PLANOS DE SEGURANÇA E INÍCIO

Tabela 10 – Passos no planejamento das operações de acabamento

A ordem em que o programador planeja a programação pode ser sensivelmente diferente da seqüência das ações realizadas durante a transferência das informações para o *software* (na programação propriamente dita), pois além desta seqüência variar muito de CAM para CAM, como mostrado pela tabela 11, algumas decisões devem ser tomadas em conjunto, mesmo que relativas a diferentes passos do planejamento.

PowerMILL	*Cimatron*	*AlphaCAM*
área da usinagem	estratégia	ferramenta
ferramenta	área da usinagem	estratégia
parâmetros de corte	orientação da varredura	passadas adicionais
planos de segurança e início	sobrematerial	orientação da varredura
ponto inicial	tolerância	patamares de corte
patamares de corte	patamares de corte	planos de segurança e início
estratégia	incremento lateral	sobrematerial
tolerância	conexão entre passadas	incremento lateral
sobrematerial	tipo de entrada	área da usinagem
incremento lateral	usinagem por região	PROCESSAMENTO DOS DADOS
orientação da varredura	passadas adicionais	tipo de entrada
tipo de entrada	ponto inicial	
usinagem por região	planos de segurança e início	
passadas adicionais	ferramenta	
PROCESSAMENTO DOS DADOS	PROCESSAMENTO DOS DADOS	
tipo de entrada		
conexão entre passadas		

Tabela 11– Seqüência de programação em três *softwares* de CAM: os ítens dentro de uma mesma célula são programados (informados ao *software*) em uma mesma etapa (mesmo menu, por exemplo) sem ordem específica

5.1.1 CONSIDERAÇÕES QUANTO A TERMOS EMPREGADOS NO CAPÍTULO

Grande parte das orientações e procedimentos propostos nas seções 5.2 e 5.3 envolvem a avaliação da geometria do modelo (ou parte do modelo) na tela do CAM, por parte do programador. Assim, para identificar regiões na cavidade, o capítulo emprega termos comumente utilizados por profissionais que atuam na área de CAM, tais como, *geometria complexa*, *pouca inclinação*, *superfícies com muita curvatura*, dentre outros.

Tendo em vista a grande variedade de formas geométricas que cavidades de moldes de injeção podem apresentar, a inexistência de uma norma que conceitue claramente os termos normalmente utilizados pelos profissionais da área e no sentido de propiciar o melhor entendimento das orientações e procedimentos propostos por este trabalho, são adotados os seguintes termos:

- **Geometrias complexas.** Este termo se refere a modelos geométricos (ou partes do modelo já selecionadas para usinagem) construídos (modelados) total ou principalmente com superfícies de forma-livre construídas a partir de entidades bicúbicas, superfícies regradas derivadas de entidades de terceiro grau, superfícies de arredondamento de cantos com raio variável, superfícies de arredondamento de três cantos nos quais dois são côncavos e um convexo (ou vice-versa), superfícies de união (*blends)*, e outros tipos de superfícies de forma livre.
- **Geometrias simples.** Se refere a modelos construídos somente ou na quase totalidade por planos inclinados, planos horizontais, superfícies regradas derivadas de retas e curvas planas, raios constantes no arredondamento de cantos, cantos vivos, etc. Estes tipos de entidades, entretanto, podem também constituir uma geometria considerada complexa, caso estejam irregularmente distribuídos pelo modelo e/ou suas combinações acabem resultando em um grande número de formas irregulares.
- **Curvaturas simples.** São superfícies curvas modeladas a partir de dois contornos planos de 2º grau, raios constantes no arredondamento de cantos e contornos com curvas suaves.
- **Superfícies/paredes pouco/muito inclinadas.** Não existe uma orientação de valores limites para o grau de inclinação se superfícies que possa definir, com precisão, se são muito ou pouco inclinadas. Nos trabalhos de *Finzer* [49], os valores para o grau de inclinação se aplicam à seleção do tipo de ponta da ferramenta de corte, não exatamente

à seleção de estratégias em função da geometria. Superfícies planas ou não, cujo grau de inclinação esteja próximo de zero, ou seja, próximo da horizontal[1], são, evidentemente, consideradas como "pouco inclinadas". Da mesma forma, paredes aproximadamente verticais são claramente enquadradas no conceito de "muito inclinadas". Porém, a classificação de uma superfície com inclinação de 30°, por exemplo, depende da análise que o **programador** deve fazer, em função de outras considerações quanto à geometria, da ferramenta de corte escolhida ou das estratégias disponíveis no CAM.

- **Superfícies com muita/pouca curvatura.** A classificação do grau de curvatura de uma superfície também depende de uma análise de programador. Em linhas gerais, superfícies com pouca curvatura são aquelas cujo graus de inclinação (ângulo do vetor normal à superfície) varia muito pouco num intervalo pequeno em relação ao diâmetro da ferramenta de corte, segundo o programador. Por outro lado, se o programador considera que as superfícies da região a ser usinada apresentam muita variação do grau da curvatura em um pequeno espaço, sempre em relação à ferramenta de corte, as mesmas são consideradas como tendo muita curvatura.
- **Muitas/poucas curvaturas.** Este julgamento se relaciona ao número total de superfícies que formam o modelo ou a parte do mesmo que foi selecionada para uma determinada operação. Assim, por exemplo, cabe ao programador avaliar se, em um modelo composto por quinze superfícies, três ou quatro superfícies pequenas (em relação às demais) com muita curvatura podem determinar que o modelo geométrico seja considerado como tendo um número muito pequeno de curvaturas.
- **Muitas/poucas inclinações.** Semelhantes considerações feitas acima, porém relativas ao número de superfícies do modelo que possuem grandes inclinações.
- **Curvatura/inclinação constantes.** Descrevem modelos geométricos cuja maior parte das superfícies que os compõem apresentam graus de curvatura ou inclinação semelhantes, não interessando se estes graus podem ser considerados pelo programador como pequenos ou grandes.

[1] Considerando-se como horizontal um plano perpendicular ao eixo da ferramenta de corte.

- **Raios pequenos/grandes.** Estes termos se referem a raios de arredondamento de cantos que, na opinião do programador são pequenos/grandes em relação à ferramenta de corte de uma determinada operação ou em relação à maioria da geometria do modelo ou região a ser usinada.
- **Contornos irregulares ou complexos.** Um contorno delimitador de uma área de usinagem pode ser composto por uma ou mais entidades. Quando composto por mais de uma entidade, pode ser considerado complexo aquele contorno que apresenta combinações de entidades muito diferentes, curvas muito acentuadas, constantes mudanças bruscas de direção, etc. Quando composto por uma única entidade, pode ser considerado complexo, por exemplo, um contorno formado por uma curva livre bicúbica, com raios muito pequenos para a fresa selecionada para a operação.
- **Bolsões pequenos/estreitos.** São geometrias do tipo fêmea cuja dimensão seja considerada pequena em comparação com a mais adequada ferramenta de corte a ser utilizada na operação, segundo a opinião do programador quanto ao tempo de usinagem, por exemplo.
- **Ilhas assimétricas.** Ilhas no fundo de um bolsão ou protusões de uma placa-macho (ou ainda contornos destes elementos quando do uso de estratégias de 2½ eixos) que estão dispostas de uma forma irregular, que possa impedir o deslocamento da ferramenta em uma determinada direção, forçando a contínuas interrupções das trajetórias, tanto por retrações da ferramenta quanto por mudanças de direção do movimento de corte para contorno de obstáculos (o que gera trajetórias redundantes e cortes em vazio).

5.1.2 INTERPRETAÇÃO DOS QUADROS SISTEMATIZADORES

As orientações e recomendações propostas para os passos do planejamento da programação do desbaste e do acabamento nas seções 5.2 e 5.3 foram organizadas em quadros de consulta rápida que sistematizam tomadas de decisão relativas a determinados passos do referido planejamento. Para os passos do planejamento que não envolvem uma tomada de decisão, mas, tão somente a determinação ou indicação de um valor específico ou a realização uma seqüência de ações e tomada de precauções, não se justificou a criação de quadros. Também para a seleção de estratégias de acabamento não foi criado um quadro, pois, devido à multiplicidade de opções

quanto as mesmas e a grande complexidade de sua seleção (ver item 5.3.3), o mesmo não seria prático, tanto do ponto de vista da sua confecção quanto em relação à sua interpretação.

A figura 54 representa uma padronização dos quadros sistematizadores propostos. Cada linha descreve um fator de decisão, uma situação que requer como melhor solução a ação ou o parâmetro no alto da respectiva coluna. O programador deve identificar os fatores de decisão correspondentes a situações válidas para o trabalho em execução (geometria da peça, requisitos tecnológicos, ferramental, etc.), verificar qual ação é indicada para cada um deles e selecionar a ação que for indicada o maior número de vezes. Porém, como os quadro são genéricos, é fundamental que se atribuam pesos maiores aos fatores de decisão que porventura forem considerados mais relevantes pelo programador, ou até mesmo determinantes, para a programação em questão, uma vez que na fabricação de moldes praticamente não existem duas combinações iguais de geometria, *software*, requisitos tecnológicos, requisitos de produção e ferramentas e máquinas disponíveis, e de produção. Por exemplo, se para uma certa combinação peça-ferramenta-máquina-requisitos de acabamento, um determinado fator de decisão acarretar uma situação ou problema que pode inviabilizar a usinagem (na opinião do programador NC), deve ser afastada a hipótese de selecionar-se a estratégia indicada para tal fator, mesmo que possua o maior número de indicações, segundo o quadro.

Figura 54 – Quadro sistematizador exemplo

Convém salientar que o grau de importância atribuído a cada fator de decisão, bem como a avaliação da opção/ação recomendada ou mais indicada em cada passo da programação são dependentes da interpretação e da avaliação do programador. O uso dos quadros sistematizadores propostos objetivou tão somente facilitar as tomadas de decisão, não cabendo julgar se os fatores foram ou não adequadamente avaliados pelo programador.

5.2 ORIENTAÇÃO PASSO A PASSO PARA O PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DO DESBASTE

5.2.1 PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES (PASSO 1)

Antes do início da programação do desbaste, é preciso tomar duas decisões fundamentais:

- Julgar a necessidade de operações intermediárias entre as de desbaste e de acabamento, baseando-se principalmente na necessidade de uniformizar a espessura do sobrematerial (sobremedida) deixado para a operação de acabamento;
- Determinar se o desbaste será executado por apenas um programa ou se será dividido em mais de um programa, com estratégias e/ou ferramentas diferentes para diferentes regiões da peça.

NECESSIDADE DE OPERAÇÕES DE PRÉ-ACABAMENTO

A programação de operações de pré-acabamento é recomendada quando:

⇒ o sobrematerial para a operação de acabamento deve ser uniformizado por toda a peça e sua geometria for considerada complexa, com muitas curvaturas e com variação nas inclinações;

⇒ o modelo possui cantos vivos ou pequenos raios de arredondamento;

⇒ não estiverem planejadas (ou quando se quiser evitar) operações de eletroerosão para remoção de material em cantos de bolsões;

⇒ o tempo estimado para o desbaste com uma fresa de raio igual (ou muito próximo) aos raios de arredondamento de cantos internos for maior do que o tempo estimado para o desbaste com uma fresa maior, somado ao tempo de pré-acabamento dos cantos (incluindo-se os tempos secundários);

Por sua vez, a **uniformização do sobrematerial** é necessária em duas situações principais:

⇒ quando em algumas regiões a espessura do sobrematerial deixado pelo desbaste for maior do que a espessura máxima recomendada para a fresa de acabamento;

⇒ quando o esforço de corte deve ser mantido aproximadamente constante, para evitar danos e/ou diminuição da vida útil da ferramenta da operação de acabamento, bem como não prejudicar o acabamento superficial.

Os quadros 1 e 2, a seguir, reúnem estas recomendações, de forma esquemática, auxiliando ainda mais o programador a organizar e realizar o planejamento da programação. Para os demais passos cujas orientações são complementadas por quadros, estes serão apresentados logo após as mesmas.

UNIFORMIZAÇÃO DO SOBREMATERIAL	
uniformizar	*não uniformizar*
sobrematerial maior do que a ferramenta de acabamento pode remover em uma só passada	a espessura do sobrematerial pode ser removida pela ferramenta de acabamento em um único passe
variação contínua do esforço de corte desgasta demasiadamente a ferramenta e/ou prejudica acabamento superficial	a variação esforço de corte pouco desgasta a ferramenta e/ou prejudica acabamento superficial
desgaste da ferramenta é mais importante que os tempos de usinagem e programação	desgaste da ferramenta é menos importante que os tempos de usinagem e programação

Quadro 1 – Sistematização da decisão quanto à uniformização do sobrematerial

USO DE PRÉ-ACABAMENTO	
usar	*não usar*
sobrematerial p/ acabamento deve ser uniforme	sobrematerial p/acabamento pode ser irregular
geometria complexa	geometria simples
superfícies pouco inclinadas	paredes verticalizadas
muita variação de inclinação das superfícies	pouca variação de inclinação das superfícies
curvaturas acentuadas	poucas curvaturas
cantos internos são vivos ou têm pequenos raios	cantos internos têm raios grandes
tempo de desbaste não precisa ser minimizado	tempo de usinagem deve ser minimizado
material nos cantos não será removido por EDM	material nos cantos será removido por EDM
tempo de usinagem com ferramenta menor é maior do que o tempo de desbaste com ferramenta maior + tempo de pré-acabamento	tempo de usinagem com ferramenta menor é menor do que o tempo de desbaste com ferramenta maior + tempo de pré-acabamento

Quadro 2 – Sistematização da decisão quanto ao uso de pré-acabamento

DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE PROGRAMAS DE DESBASTE

Embora o desbaste de cavidades seja tradicionalmente executado com um único programa [14, 38], existem situações em que é mais vantajoso dividir esta operação entre dois ou mais programas, conforme análise da geometria e do ferramental disponíveis. Alguns casos típicos em

que se recomenda dividir o desbaste em programas com estratégias e/ou ferramentas diferentes estão relacionados abaixo e sistematizados no quadro 3:

⇒ a peça possui bolsões ou regiões de dimensões muito diferentes, sendo mais rápido desbastá-las em separado, com fresas de diâmetros apropriados para cada uma, do que desbastá-las com um único programa usando somente o máximo diâmetro de fresa permitido para a menor região ou bolsão;

⇒ uma ou algumas regiões da peça possuem geometrias muito diferentes, que seriam melhor desbastadas por estratégias diferentes;

⇒ as grandes variações nos graus de curvatura ou de inclinação das paredes de um bolsão ou protusão sugerem desbastes com profundidades de corte variáveis e/ou diâmetros de ferramentas diferentes, principalmente se o material deve ficar uniformizado e não estiver planejado um pré-acabamento;

⇒ quer-se evitar (ou não é possível) a remoção por eletroerosão do material de bolsões ou detalhes pequenos em relação ao restante da geometria da peça.

NÚMERO DE OPERAÇÕES DE DESBASTE	
desbaste único de todo o modelo	*desbastes localizados por região do modelo*
peça possui uma única cavidade	peça possui cavidades de dimensões muito diferentes
tempo de desbaste em única operação com ferramenta para menor região é menor do que o total das operações com ferramentas selecionadas por região	tempo de desbaste em única operação com ferramenta para menor região é maior do que o total das operações com ferramentas selecionadas por região
todas as regiões do modelo apresentam geometria que pode ser desbastada pela mesma estratégia	regiões do modelo apresentam geometrias muito diferentes, que seriam melhor desbastadas por estratégias diferentes
haverá pré-acabamento posterior	não haverá pré-acabamento posterior
detalhes sofrerão operação de EDM posterior	detalhes não sofrerão operação de EDM posterior
geometria com inclinação/curvatura constantes	geometria com grandes variações na inclinação/curvatura

Quadro 3 – Sistematização da decisão quanto ao número de programas de desbaste

5.2.2 ESCOLHA DA FERRAMENTA (PASSO 2)

Caso haja à disposição do programador um amplo magazine de ferramentas de corte, a escolha da fresa a ser utilizada no desbaste se dá em função da geometria a usinar e da estratégia

escolhida. Porém, se as opções de ferramenta são restritas, o que é mais freqüente, este é o primeiro passo após o planejamento das operações. A seleção da ferramenta de corte engloba, geralmente, a determinação de três variáveis:

- Geometria do tipo de ponta da ferramenta;
- Diâmetro da ferramenta;
- Altura da ferramenta.

DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DA PONTA

Esta tomada de decisão pode ser auxiliada pelo quadro 4, que sistematiza as informações e recomendações a seguir.

DETERMINAÇÃO DO TIPO DE PONTA DA FERRAMENTA		
cilíndrica	*toroidal*	*esférica*
fêmeas e machos em geral	fêmeas e machos em geral	bolsões com área pequena
geometrias simples	superfícies complexas	superfícies complexas
superfícies sem/pouca curvatura	superfícies com muita curvatura	superfícies com muita curvatura
geometrias planas	geometrias planas	peça sem geometrias planas
geometrias com inclinação entre 85° e 90° [2]	geometrias com inclinação entre 1° e 15°	geometrias com inclinação entre 15 ° e 85°
cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou bases de protusões e não se pretende usar pré-acabamento	raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões bases de protusões	raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões bases de protusões
taxa de remoção de material deve ser maximizada	taxa de remoção de material é importante	taxa de remoção de material tem importância secundária
uniformização do material é menos importante que a taxa de remoção de material	uniformização do sobrematerial é pretendida	maximizar uniformização do sobrematerial com desbaste em 3 eixos
pré-acabamento planejado	pré-acabamento planejado ou não	pré-acabamento não planejado

Quadro 4 – Sistematização da decisão quanto ao tipo de ponta da ferramenta de desbaste

Conforme já comentado, as fresas cilíndricas e toroidais são tradicionalmente as mais empregadas para o desbaste de moldes, devido à maior taxa de remoção de material. Contudo, recomenda-se o uso de **fresas esféricas** para desbaste de bolsões (fêmeas) pequenos, estreitos e de geometria com muitas curvaturas e poucas áreas com inclinação inferior a 15° [49]. Esta

[2] Segundo estudos de *Finzer* [115]

combinação geométrica é um caso típico em que fresas toroidais ou cilíndricas conseguiriam remover pouco material, deixando a peça com um sobrematerial muito irregular e exagerado para a fresa de menor diâmetro, na próxima operação.

As **fresas toroidais** são as recomendadas para casos gerais, principalmente quando as paredes da ilha ou bolsão tiverem inclinações entre 1° e 85° (mais especificamente entre 1° e 15°) [49] e quando se quiser uniformização do sobrematerial.

Por sua vez, as **fresas cilíndricas**, com taxa de remoção de material ainda maior, devem ser usadas quando a uniformização do sobrematerial for menos importante que o tempo de desbaste, quando for usado pré-acabamento e este se encarregar de remover o material em forma de degrau, em bolsões e ilhas com paredes quase verticais (acima de 85° de inclinação), com poucas curvaturas e com cantos vivos ou pequenos raios de curvatura entre paredes e fundos.

DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO

De modo geral, deve ser especificado o maior diâmetro capaz de atingir toda a geometria da região selecionada para o desbaste, considerando que é recomendável usar apenas 75% do seu diâmetro no corte.

Na usinagem de bolsões, o diâmetro escolhido deve deixar um sobrematerial nos cantos capaz de ser removido pelo acabamento ou pelo pré-acabamento (quando este for executado com uma estratégia de acabamento) em um único passe. No caso do uso de pré-acabamento, isto significa dizer que a espessura do material deixado no canto deve ser igual ou inferior a 75% do diâmetro da fresa de pré-acabamento menos o valor especificado do sobrematerial para acabamento.

A equação 3 calcula a espessura máxima do material deixado por uma fresa em um canto a 90°:

$$\text{espessura} = 0{,}414.(R + s - r) \qquad (3)$$

onde: R = raio da fresa;

r = raio do canto;

s = espessura do sobrematerial

DETERMINAÇÃO DA ALTURA

Para evitar a flexão e vibrações da ferramenta, uma fresa inteiriça deve ter o maior comprimento de haste possível adentrando o suporte (figura 55). O "possível", neste caso, significa a mínima altura livre de haste para a qual não existam possibilidades de colisão do conjunto ferramenta, suporte e cabeçote da máquina com a peça ou com elementos de fixação e partes da máquina. Assim, embora este dado, muitas vezes, não seja pedido pelo *software* ou não seja relevante durante a programação, o programador deve determinar a montagem do conjunto ferramenta–suporte de forma que a altura da ferramenta externa ao suporte[3] corresponda ao valor do mínimo comprimento que evite colisões, somado ao valor de segurança (em torno de 5 a 10 mm [14]). Da mesma forma, a altura livre para um suporte de ferramenta de insertos deve ser a mínima possível.

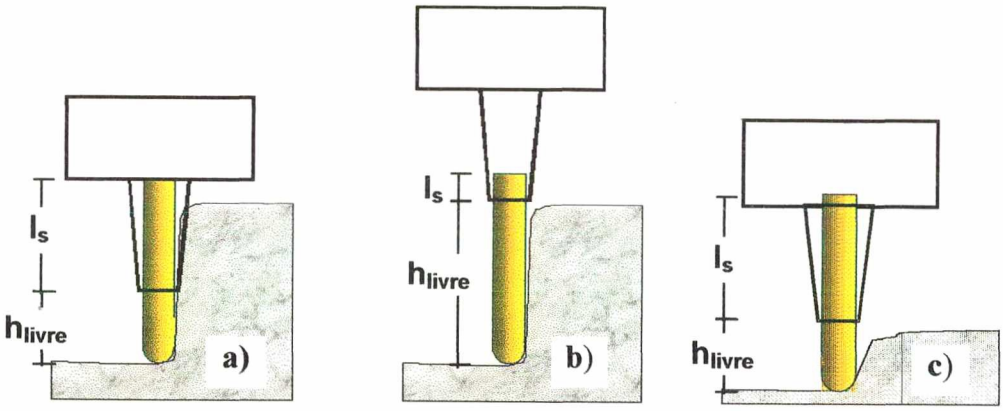


Figura 55 – Altura da ferramenta de corte: em **a)**, embora seja grande o comprimento da haste da ferramenta (**l_s**) dentro seu suporte, este colide com a peça; em **b)**, para que não haja colisões, a geometria da peça exige uma grande altura livre (**h_{livre}**), o que prejudica a estabilidade da ferramenta, uma vez que o suporte tem apenas um pequeno comprimento de haste para fixar a ferramenta; em **c)**, para a usinagem de uma peça menos profunda que em **a)** e **b)**, a ferramenta está presa ao suporte por um grande comprimento de haste, tornando-a menos sujeita a vibrações, e sua altura livre é a mínima para que não ocorram colisões, ou seja, a profundidade da peça mais um valor de segurança

5.2.3 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DA USINAGEM (PASSO 3)

Na maioria dos *softwares* a limitação da área de aplicação das trajetórias de desbaste se dá pela criação do bloco de usinagem diretamente pelos pontos mínimos e máximos da geometria (mais um sobrematerial opcional) ou pela seleção de contornos e das superfícies a usinar. Assim, neste passo do planejamento, o programador deve analisar os recursos do *software* e definir como a região a desbastar, definida no planejamento das operações, será limitada na programação do

[3] Em geral, a prática considera uma ferramenta inteiriça muito alta quando menos do que a metade do seu comprimento total está preso no interior do suporte, favorecendo o surgimento de vibrações e deflexões da ferramenta [14, 38].

software. A importância do planejamento deste passo decorre do desperdício de tempo de programação que poderia ocorrer no caso de se verificar apenas na fase de alimentação de dados, que *software* não tem recursos para limitar eficientemente a região desejada. Algumas considerações importantes seguem-se abaixo:

⇒ cuidar para que ao usinar uma determinada região em separado a ferramenta não invada nenhuma geometria ou elemento de fixação, avariando e/ou inutilizando o molde;

⇒ sempre selecionar como superfícies de checagem (se o *software* incluir este recurso) todas as regiões que se supõe possam ser invadidas pela ferramenta;

⇒ geralmente, o topo de um macho, quando plano, e o fechamento de uma placa fêmea são deixados "na medida"[4] pela máquina-ferramenta que preparou o bloco; assim, o programador deve escolher a coordenada Z máxima destas geometrias como limite superior do bloco;

⇒ não é necessário definir o bloco de material no CAM com as mesmas dimensões do bloco real a ser usinado, o que permite o emprego de artifícios de programação que promovem uma seleção mais eficiente da área a usinar.

Um destes artifícios é usado quando a distância entre o contorno do bloco e o contorno de uma superfície de uma placa-macho, medida no plano horizontal de corte, é menor do que o diâmetro da ferramenta e o *software* não permite que a ferramenta passe, deixando de contornar esta superfície e não removendo o material entre esta e o limite do bloco; a solução é programar o bloco com sobrematerais laterais (eixos X e Y) maiores do que o diâmetro da ferramenta, mesmo que para o bloco real isto seja raro. Um artifício deste tipo pode ser visto na figura 6, no capítulo 3, onde o contorno que delimita a área de usinagem possui uma curvatura (à esquerda), necessária para que a ferramenta possa contornar a parte da ilha mais próxima ao limite da peça.

---

[4] Este consagrado termo de chão-de-fábrica significa a medida final, exata de uma região, peça, geometria etc.

5.2.4 DEFINIÇÃO DO SOBREMATERIAL (PASSO 4)

Os valores correntemente usados nas ferramentarias nacionais, são mostrados pela tabela 12, abaixo [38, 14]:

	operação posterior	
	acabamento	*pré-acabamento*
aços P20 e H-13	**0,05 - 0,5 mm**	**0,1 - 0,8 mm**
alumínio	**0,2 - 1,0 mm**	**1,0 - 2,0 mm**

Tabela 12 – Sobrematerial em operações de desbaste

Os valores mínimos das faixas costumam ser especificados para superfícies que exigem excelente acabamento no fresamento. Em casos gerais, recomenda-se utilizar como sobrematerial um valor igual ao da máxima espessura de material recomendada (ver tabela 13) para a fresa da operação seguinte. Contudo, a rigidez da máquina-ferramenta, a usinabilidade do material e a robustez da ferramenta de acabamento são fatores que influem na determinação deste parâmetro, podendo determinar o emprego de valores menores.

A tabela 13 [14, 38, 89] recomenda a máxima espessura removível por fresas inteiriças de metal duro em operações de acabamento, para moldes em aço P20.

diâmetro da fresa	*espessura máxima recomendada para aço P20*
de 4 a 6 mm	**0,15 mm**
de 8 a 12 mm	**0,30 mm**
de 14 a 18 mm	**0,50 mm**

Tabela 13 – Espessura máxima de aço P20 removível para fresas de diâmetro entre 4 e 18 mm

5.2.5 ESPECIFICAÇÃO DA TOLERÂNCIA (PASSO 5)

Para casos gerais, recomenda-se usar uma tolerância de 0,1 mm, de forma a acelerar a geração das trajetórias. Porém, é importante verificar com um simulador gráfico se ocorrem interferências ou se algumas áreas não estão sendo removidas. Em caso de erros, deve-se diminuir a tolerância até um valor em que não mais se repitam.

Quando o sobrematerial for muito pequeno (0,1-0,2 mm) e sua uniformização for muito importante, deve-se usar tolerâncias menores, em torno de 0,05 mm [14, 38]

5.2.6 SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA - MOVIMENTOS GLOBAIS (PASSO 6)

Esta seção do trabalho primeiramente discute as estratégias utilizadas para desbaste, para então propor orientações para sua seleção.

TIPOS DE ESTRATÉGIAS PARA DESBASTE

Das estratégias apresentadas no capítulo anterior, três foram desenvolvidas especificamente para programas de desbaste 3D: *varredura paralela ao contorno*, *varredura em zigue-zague* (ambas em 2 ½ eixos) e *varredura em 3 eixos por patamar*:

- **Paralela ao contorno.** Com a usinagem espiral, a ferramenta não precisa retrair ao final de uma passada para que o sentido de corte se mantenha sempre concordante, ao contrário da estratégia em zigue-zague. Outra vantagem é a possibilidade de remoção de material em áreas "escondidas", que não podem ser atingidas pela ferramenta, pois uma passada na direção determinada causaria interferência nos contornos. Dependendo da geometria dos contornos em cada patamar, do tipo de ponta e diâmetro da fresa e do incremento lateral especificado, este tipo de estratégia pode produzir um excesso de passadas com corte em cheio e/ou deixar de usinar pequenas áreas (semelhantes a triângulos) entre duas passadas paralelas a cantos internos, como mostra a figura 56. Para solucionar este último problema, alguns *softwares* geram trajetórias retilíneas para remoção destas áreas.

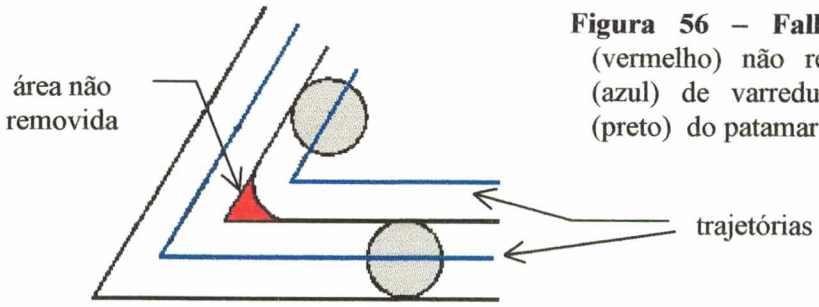


Figura 56 – Falha na varredura: área (vermelho) não removida pelas trajetórias (azul) de varredura paralela ao contorno (preto) do patamar de corte

- **Zigue-zague.** A usinagem em zigue-zague sempre foi historicamente preferida à paralela ao contorno porque a geração dos *offsets* consumia muito tempo de processamento e era muito propensa a erros, o que já foi superado pela evolução de *software* e *hardware*,

proporcionando o aproveitamento das vantagens da usinagem em espiral [44]. Contudo, segundo *Li et. al.* [45], o desbaste em zigue-zague ainda é mais eficiente que o espiral para contornos convexos sem ilhas, principalmente com o uso do **perfilamento dos contornos**. Esta opção é oferecida por alguns *softwares* como complemento à estratégia de desbaste em zigue-zague (*rough+finish*, *raster+profile*). Para cada patamar, o perfilamento pode ser realizado *antes*, *durante* ou *depois* da varredura da área entre os contornos, resultando em melhor remoção de material, principalmente no caso de áreas "escondidas" por contornos irregulares. O perfilamento complementar remove das paredes o excesso de material que permanece no intervalo entre cada passada adjacente devido ao raio da ferramenta. Quanto maior o diâmetro da fresa e quanto maior o incremento lateral maior será a quantidade de material a ser removido das paredes. Em termos gerais, o resultado da remoção de material do zigue-zague com perfilamento é muito semelhante ao da usinagem em espiral, porém na maioria dos casos é mais demorada, uma vez que é freqüente a excessiva geração de trajetórias sobre áreas já removidas durante a varredura.

- **3 eixos por patamar.** Tipo de desbaste indicado principalmente para bolsões não muito grandes, com pouco volume a remover e com superfícies com muita curvatura, usando geralmente uma fresa esférica [51] ou uma toroidal. Este método resulta num sobrematerial regularmente distribuído sobre a superfície, facilitando a usinagem de acabamento. Em *softwares* que não incluem este tipo de estratégia, é possível obter semelhante resultado com uma operação de pré-acabamento após o desbaste por varredura com z constante, normalmente usando uma estratégia de planos paralelos.

Além destas três, estratégias de acabamento podem executar operações de desbaste, em casos especiais nos quais estas estratégias promovem uma remoção de material mais adequada do que as estratégias específicas para desbaste. Entretanto, este procedimento só é possível se a estratégia incluir a determinação de um sobrematerial entre os seus parâmetros.

ORIENTAÇÕES PARA SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA

Com base nos argumentos apresentados no item anterior, foram relacionados diversos fatores de decisão que influem na seleção de uma das três principais estratégias para desbaste.

Contudo, tendo em vista a simplificação e a objetividade do trabalho, estas orientações são apresentadas diretamente no quadro sistematizador 5.

SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA GLOBAL PARA OPERAÇÕES DE DESBASTE		
varredura em zigue-zague	*varredura em espiral*	*3 eixos por patamar*
	machos, em geral	
	fêmeas sem ilhas, em geral	
bolsões grandes	bolsões grandes	bolsões pequenos
superfícies com geometria pouco complexa	superfícies com geometria pouco complexa	superfícies com geometria complexa
poucas superfícies com curvaturas acentuadas	poucas superfícies com curvaturas acentuadas	muitas superfícies com curvaturas acentuadas
muitas superfícies com muita inclinação	muitas superfícies com muita inclinação	poucas superfícies com pouca inclinação
modelo apenas com paredes verticais planos horizontais	modelo apenas com paredes verticais planos horizontais	superfícies com inclinações muito variadas
contornos dos patamares são convexos e sem ilhas	contornos dos patamares são irregulares	contornos dos patamares são irregulares
ilhas com mesma dimensão e posicionamento assimétrico	ilhas com tamanhos irregulares e posicionamento assimétrico	ilhas com tamanhos irregulares e posicionamento assimétrico
foi planejado o uso de pré-acabamento	foi planejado o uso de pré-acabamento	não foi planejado o uso de pré-acabamento
sobrematerial não precisa ser uniformizado pelo desbaste	sobrematerial não precisa ser uniformizado pelo desbaste	sobrematerial deve ser uniformizado pelo desbaste
minimização das retrações da ferramenta tem importância secundária ✠	retrações da ferramenta devem ser minimizadas	minimização das retrações da ferramenta tem importância secundária
cortes em cheio devem ser minimizados*	cortes em cheio são permitidos	**
prefere-se o material a usinar sempre à direita da ferramenta (corte predominantemente concordante) ✦	sentido de corte tem importância secundária	**
ferramenta não pode ou não deve usinar com seu topo	ferramenta não pode ou não deve usinar com seu topo	ferramenta pode usinar com seu topo
deficiências no algoritmo da varredura em espiral (ver fig. 5-10)	não há deficiências no algoritmo da varredura em espiral (ver fig. 5-10)	**

*** desde que o perfilamento dos contornos seja realizado durante ou depois da varredura;**
**** acompanha as vantagens e desvantagens do padrão de trajetórias utilizado (zigue-zague ou espiral);**
✦ desde que com trajetórias unidirecionais;
✠ com trajetórias bidirecionais o resultado é melhor do que com trajetórias unidirecionais;

Quadro 5 – Sistematização da seleção da estratégia de desbaste

5.2.7 DEFINIÇÃO DA ALTURA DOS PATAMARES DE CORTE (PASSO 7)

Neste passo duas são as principais decisões a serem tomadas. Primeiro, decidir pela constância ou não dos intervalos entre cada patamar e, em segundo lugar, definir qual o valor do incremento ou dos incrementos. Após uma breve discussão sobre o assunto, são apresentadas orientações para as duas questões.

O valor do espaçamento entre os planos é limitado pela máxima profundidade de corte permitida pela ferramenta e grande parte dos *softwares* de CAM permite apenas intervalos constantes. No entanto, esta solução está longe da ideal para superfícies com muita curvatura e planos inclinados, pois estas requerem menor intervalo entre cada patamar do que paredes verticais, para minimizar o sobrematerial em forma de degrau (ou ombro).

Outra situação indesejável é quando planos cortam o modelo em níveis (alturas) que determinam um excesso de material sobre algumas áreas, maior do que o sobrematerial especificado no menu da estratégia, como já mostrado na figura 3. Embora mais trabalhosa, a especificação individual das alturas dos patamares aumenta a eficiência do desbaste ao proporcionar melhor uniformização da espessura do sobrematerial para acabamento.

Muitos *softwares*, porém, permitem apenas a especificação de um intervalo constante entre patamares. Assim, quando se utilizar um *software* deste tipo e a geometria da peça apresentar graus de curvatura ou inclinação diferentes para determinadas profundidades (em fêmeas) ou alturas (em machos), é recomenda-se gerar mais de um programa de desbaste, usando a mesma ferramenta e a mesma estratégia, mas com diferentes profundidades de corte, para cada região.

EMPREGO DE INTERVALOS CONSTANTES OU OTIMIZADOS ENTRE OS PATAMARES DE CORTE

A partir do exposto e conforme sistematizado no quadro 6, recomenda-se otimizar o intervalo entre os patamares quando:

- as paredes da peça apresentarem pouca inclinação ou grandes variações de curvatura e/ou inclinação;
- de modo geral, a geometria da peça for complexa;
- o programador tiver decidido por não ser programar pré-acabamentos;
- o tempo de desbaste, estimado pelo programador, for menos importante do que a uniformização do sobrematerial para a próxima operação; por exemplo, quando

em uma determinada situação, o programador pode concluir que uma uniformização total do sobrematerial trará mais benefícios à operação de acabamento, mesmo que para isso a operação de desbaste consuma mais tempo.

Da mesma forma, a otimização dos intervalos entre patamares é dispensável quando:

- as paredes apresentarem a inclinação e graus de curvatura constantes ou praticamente constantes;
- a geometria global da peça for simples;
- o modelo apresentar, basicamente, paredes muito inclinadas e superfícies com pouca curvatura;
- o sobrematerial não precisa obrigatoriamente ser regularizado;
- for utilizado um pré-acabamento posterior e este for capaz de uniformizar o sobrematerial com uma única passada;
- o programador presumir que a soma de tempo das operações de desbaste sem otimização e pré-acabamento (incluindo os tempos secundários de troca de ferramenta) seja menor do que o tempo de desbaste com o maior número de patamares de corte;
- o tempo de desbaste deve ser minimizado, a despeito da uniformização do sobrematerial (situação contrária, na opinião do programador, à citada anteriormente);

QUADRO 6	DETERMINAÇÃO DOS PATAMARES
patamares com intervalos otimizados	*patamares constantemente espaçados*
grandes variações na inclinação/curvatura da geometria	**inclinação/curvatura constante da geometria**
paredes pouco inclinadas / com muita curvatura	**paredes muito inclinadas / com pouca curvatura**
geometrias complexas	**geometrias simples**
uniformização do sobrematerial é importante	**sobrematerial não precisa ser regularizado**
pré-acabamento não planejado	**pré-acabamento planejado**
minimização do tempo de desbaste é menos importante que a uniformização do sobrematerial	**minimização do tempo desbaste é mais importante que a uniformização do sobrematerial**

Quadro 6 – Sistematização da decisão quanto à constância do intervalo entre patamares de corte

VALOR DA PROFUNDIDADE DE CORTE PARA CADA PATAMAR (VALOR DO INTERVALO)

Com base na discussão anterior, o máximo valor para o intervalo entre patamares é a profundidade de corte máxima admitida pela ferramenta para o material do molde, dado que é encontrado no manual do fornecedor da ferramenta ou no manual técnico da ferramentaria. A máxima profundidade de corte é indicada quando:

- as geometrias não forem complexas, tiverem pouca curvatura e muita inclinação e se quiser uma taxa de remoção de material o mais alta possível;
- o sobrematerial não precisar ser uniformizado ou quando houver pré-acabamento para uniformização;
- a ferramenta estiver adequadamente montada, sem riscos de vibração e flexão, conforme descrito no passo 2 (determinação da altura da ferramenta);
- quando o tempo de desbaste precisar ser minimizado.

Porém, seja com intervalos otimizados como com intervalos constantes, seu valor pode ser menor do que este máximo. Recomenda-se, portanto, usar valores menores quando:

- as geometrias forem complexas, tiverem muita curvatura ou pouca inclinação e o tempo de desbaste for menos importante que a remoção uniforme de material;
- o sobrematerial precisar ser uniformizado e não estiver planejado o uso de pré-acabamento;
- quando for necessário reduzir o esforço de corte, como por exemplo, quando um bolsão for muito profundo ou um macho muito alto, obrigando a montagem de uma ferramenta com haste muito longa (conforme abordado pelo item 5.3.2) ou quando a máquina-ferramenta não for rígida e potente o suficiente.

O quadro 7, abaixo, agrupa as recomendações e orientações propostas, sistematizando a tomada de decisão quanto ao valor do intervalo entre patamares. O quadro oferece duas opções de ação: o uso de um valor para o intervalo igual à profundidade de corte máxima, recomendada pelo fabricante da fresa, ou um valor inferior a esta profundidade máxima.

VALOR DO INTERVALO ENTRE PATAMARES	
profundidade de corte máxima recomendada	*prof. abaixo do máximo recomendado*
geometrias com pouca curvatura	geometrias com muita curvatura
geometrias com muita inclinação	geometrias com pouca inclinação
geometrias pouco complexas	geometrias complexas
haverá pré-acabamento posterior	pré-acabamento não planejado
sobremetal não precisa ser regularizado	sobremetal deve ser regularizado
tempo de desbaste deve ser minimizado	tempo de desbaste é menos importante que uniformização do sobrematerial
esforço de corte não precisa ser reduzido	esforço de corte deve ser reduzido
ferramenta de corte adequadamente montada	ferramenta muito alta

Quadro 7 – Sistematização da decisão quanto ao valor do intervalo entre os patamares de corte

5.2.8 ESCOLHA DO PONTO INICIAL (PASSO 8)

O ponto inicial deve estar, acima ou sobre o plano de segurança, em uma coordenada tal que os movimentos da ferramenta (para troca, posicionamento, zeramento, etc.), a partir deste ponto ou para este ponto, não provoquem colisões com peça, bloco, elementos de fixação e partes da máquina-ferramenta.

5.2.9 ESPECIFICAÇÃO DOS PLANOS DE SEGURANÇA E INÍCIO (PASSO 9)

Uma vez que para as especificações dos valores dos parâmetros este passo, geralmente, não implica nenhuma tomada de decisão, e sim cuidados e verificações, uma seqüência de ações é recomendada:

⇒ verificar a altura máxima do bloco real;

⇒ verificar a altura e o posicionamento dos elementos de fixação;

⇒ estabelecer o plano de segurança alguns milímetros acima do mais alto obstáculo à movimentação da ferramenta; valores correntemente empregados giram em torno de 3 a 5 mm;

⇒ estabelecer o plano de início a 1 ou 2 mm do topo do bloco;

⇒ utilizar, sempre que possível, planos incrementais para diminuir os tempos secundários;

⇒ verificar a segurança dos movimentos entre e em direção a estes planos; geralmente o *software* exibe as trajetórias com risco de colisão em cores diferentes das trajetórias seguras.

5.2.10 DEFINIÇÃO DO INCREMENTO LATERAL (PASSO 10)

O valor geralmente usado para o incremento lateral é 75% do diâmetro da fresa [44]. Contudo, este valor padrão pode ser alterado por vários fatores, tais como os requisitos tecnológicos do fresamento quanto ao sentido do corte, o tipo de material, e os esforços de corte permitidos.

Quando todas as trajetórias devem resultar em usinagens com sentido de corte somente concordante, sem nenhuma parcela discordante, o incremento lateral não pode ser maior do que a metade do diâmetro da ferramenta. Por outro lado, se o sentido de corte não for importante para a usinagem em questão, pelo menos por este critério, o incremento lateral pode ser acrescido ao máximo, isto é, todo o diâmetro da ferramenta.

As influências do tipo de material e da profundidade de corte dizem respeito aos esforços de corte. Por exemplo, profundidades altas[5] na usinagem de materiais duros recomendam cautela na determinação do incremento lateral, que pode ficar abaixo do padrão. O caso contrário, material de alta usinabilidade em combinação com baixas profundidades de corte, tem efeito naturalmente também contrário no incremento lateral, que pode ser estabelecido acima do padrão 0,75D se não houver outras influências adversas.

Rigidez e potência de máquinas-ferramenta, robustez e material da ferramenta de corte, como qualquer outro fator que influencie o esforço de corte, também podem desviar o valor do incremento lateral do seu padrão.

É importante, também, que o programador esteja atento a porções de material não removidas entre passadas paralelas (situação já mostrada pela figura 54). Este problema ocorre com certa freqüência em trajetórias geradas por estratégias de varredura em espiral, em *softwares* cujo algoritmo não seja capaz de gerar sempre trajetórias adicionais eficientes para sua remoção

[5] Por exemplo, profundidades próximas ao limite geométrico de um inserto intercambiável, normalmente recomendado em catálogo pelo seu fabricante.

[14, 38]. Para trechos de trajetórias a 90°, deve ser utilizado no máximo 85% do diâmetro da fresa, valor que diminui conforme decresce o ângulo entre dois trechos contíguos das trajetórias [44].

Organizando e resumindo as informações e orientações explicadas neste item, o quadro 8 auxilia o programador a estabelecer o incremento lateral dentro, acima ou abaixo do padrão de ¾ do diâmetro da fresa, sistematizando esta tomada de decisão

VALOR DO INCREMENTO LATERAL		
acima do padrão (0,75D)	*padrão*	*abaixo do padrão*
corte pode ser tanto concordante quanto discordante	corte pode ter uma pequena parcela discordante	corte deve ser somente concordante (ae ≤ O,5D)
tempo de desbaste deve ser minimizado	tempo de desbaste não precisa ser minimizado	tempo de desbaste não precisa ser minimizado
profundidade de corte pequena	profundidade de corte padrão	profundidade de corte muito grande
esforço de corte não precisa ser reduzido	esforço de corte não precisa ser reduzido	esforço de corte deve ser reduzido
não há risco de áreas não removidas entre passadas paralelas	não há risco de áreas não removidas entre passadas paralelas	risco de áreas não removidas entre passadas paralelas

Quadro 8 – Sistematização da decisão quanto ao valor do incremento lateral

5.2.11 ESCOLHA DA ORIENTAÇÃO DA VARREDURA (PASSO 11)

O ângulo das trajetórias, medido sobre o plano de corte, para o desbaste em **zigue-zague** geralmente deve ter a direção em que as trajetórias vão encontrar menos obstáculos em cada patamar, de forma a minimizar as interrupções da trajetória, as retrações da ferramenta e o tempo de desbaste. Entretanto, é necessário ater-se ao fato de que a direção escolhida deve, principalmente, promover adequada remoção do material, segundo os requisitos de uniformização de sobrematerial e da tecnologia do fresamento.

O sentido das trajetórias em **espiral** deve ser *de fora para dentro*, na usinagem de protusões, para permitir a aproximação externa da ferramenta e *de dentro para fora*, na usinagem de bolsões, evitando o maior número de cortes em cheio gerados pela outra opção.

5.2.12 UTILIZAÇÃO DE PASSES ADICIONAIS EM ESTRATÉGIAS DE VARREDURA (PASSO 12)

Alguns *softwares* de CAM (principalmente os que não permitem especificação individual dos planos de corte) oferecem movimentos em Z constante ou de contorno do topo das geometrias cujo sobrematerial ficou acima do especificado, complementando as estratégias tradicionais de desbaste, e sua ativação depende dos mesmos fatores que determinam o uso de pré-acabamento e de varredura em 3 eixos. Esta opção é muito útil quando se quer uniformizar o sobrematerial sobre o topo das geometrias mas não se pretende programar um pré-acabamento.

Outro tipo de trajetória adicional é o perfilamento posterior à varredura em zigue-zague que, conforme já mencionado, produz o mesmo sobrematerial que a aplicação da varredura em espiral, porém, geralmente demanda mais tempo de corte e aumenta os tempos secundários. Por este motivo, sua programação, em substituição à varredura em espiral, é recomendada apenas quando os cortes em cheio devem ser imperativamente evitados, o que não é garantido com tal estratégia.

5.2.13 DEFINIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONEXÃO ENTRE PASSADAS (PASSO 13)

Assim como no passo 9, para a definição deste parâmetro se faz necessária somente uma série de verificações e cuidados. Desta forma, é recomendável que o programador siga uma seqüência de tarefas:

⇒ identificar as opções oferecidas pelo *software* que provavelmente reduzem ao mínimo os tempos secundários e retrações; quando a estimativa destes tempos for muito vaga, proceder testes executando a programação até aqui planejada e utilizar os recursos do CAM de estimativa de tempo para comparação das alternativas de movimentos;

⇒ identificar quais são as opções mais adequadas (em relação aos esforços de corte e remoção de material) para a entrada da ferramenta no material a cada passada;

⇒ verificar a segurança contra colisões destes movimentos;

⇒ selecionar a opção mais apropriada com uma solução de compromisso entre minimização dos tempos secundários, maior taxa de remoção de material, segurança e preservação da ferramenta.

5.2.14 SELEÇÃO DO TIPO DE ENTRADA DA FERRAMENTA NO BLOCO (PASSO 14)

O tipo de entrada deve ser selecionado principalmente com base em três fatores: esforço de corte permitido, geometria da região a desbastar e características da ferramenta.

De modo geral, recomenda-se empregar parâmetros ou ativar funções do CAM que obriguem a ferramenta a se aproximar por fora do bloco de usinagem, penetrando-o radialmente. Porém, conforme a geometria da peça, este tipo de entrada pode ser impossível, como em placas-fêmea, por exemplo. Uma alternativa é a entrada em rampa, que também pode não ser possível se a cavidade não oferecer espaço suficiente para o ângulo de inclinação necessário. A alternativa é a penetração axial diretamente sobre o material, a qual possui desvantagens do ponto de vista de vibrações e esforço de corte (ver próximo parágrafo) e nem sempre é permitida pela geometria da ferramenta. Outra possibilidade é a penetração axial sobre pré-furos que, por sua vez, deve ser evitada por causa da clara desvantagem de exigir um programa extra, com conseqüente aumento dos tempos secundários na usinagem.

Durante a penetração no material a ferramenta causa um brusco aumento do **esforço de corte**, o que muitas vezes, de acordo com o material do molde e com o material e a robustez da ferramenta, pode ser indesejado. Nestes casos, aconselha-se a programação de uma entrada que proporcione gradual penetração, através de movimentos sobre **arcos circulares** ou de **entradas em rampa**, respectivamente, ao invés das convencionais penetrações radiais com aproximação normal e axial.

A penetração axial com fresas de inserto (quando possível), mesmo em situações cujo esforço de corte é baixo, causa vibrações quando do início do fresamento, devido ao material localizado no miolo da ferramenta, como mostra a figura 57.

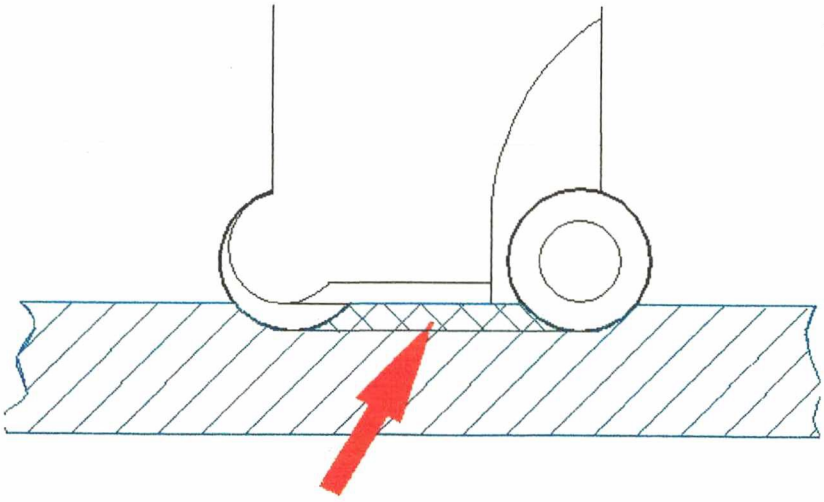


Figura 57 – Material no miolo de uma fresa toroidal de insertos após penetração axial

Outra influência da **geometria da ferramenta** diz respeito à limitação do ângulo máximo da inclinação da trajetória de aproximação nas entradas em rampa com fresas de insertos, valor que é encontrado em catálogos de fabricantes de ferramentas. Assim, cavidades muito pequenas podem não comportar o comprimento necessário para a trajetória em rampa.

Baseando-se no exposto acima, recomenda-se o uso de:

⇒ aproximação externa, sempre que a geometria permitir;

⇒ emprego de arcos tangenciais, quando o programador desejar suavizar a penetração da ferramenta no material;

⇒ entradas em rampa, quando não for possível a aproximação externa;

⇒ penetrações axiais, quando não for possível aproximação externa nem houver espaço para rampa;

⇒ penetrações axiais, preferencialmente à entrada em rampa somente quando a profundidade de corte for pequena (em relação ao recomendado pelo fabricante da fresa) e a combinação máquina-ferramenta-material não provocar excessivo aumento dos esforços de corte durante a penetração e no início do fresamento;

⇒ entradas em pré-furos somente quando não houver outra possibilidade ou quando o material usinado for excessivamente duro, a fresa não estiver adequadamente montada e outras situações que comprometam a integridade da ferramenta devido ao alto esforço de corte.

Resumindo e organizando estas recomendações, o quadro 9 sistematiza a escolha do tipo entrada da ferramenta no bloco de material bruto, oferecendo quatro ações para o programador.

TIPO DE ENTRADA DA FERRAMENTA NO BLOCO			
aproximação externa	*em pré-furos*	*em rampa*	*penetração axial*
machos	fêmeas	fêmeas	fêmeas
esforço de corte na penetração deve gradual	esforço de corte na penetração deve ser minimizado	esforço de corte na penetração deve ser gradual	esforço de corte não precisa ser reduzido
vibrações devem ser evitadas	vibrações devem ser evitadas	vibrações devem ser evitadas	vibrações não precisam ser evitadas
redução drástica dos esforços na penetração não é mais importante que o aumento dos tempos secundários	redução drástica dos esforços na penetração é mais importante que o aumento dos tempos secundários	redução drástica dos esforços na penetração não é mais importante que o aumento dos tempos secundários	redução drástica dos esforços na penetração não é mais importante que o aumento dos tempos secundários
geometria da fresa não permite penetração axial na profundidade desejada	geometria da fresa não permite penetração axial na profundidade desejada	geometria da fresa não permite penetração axial na profundidade desejada	geometria da fresa permite penetração axial na profundidade desejada
cavidade não tem espaço suficiente para a entrada em rampa	cavidade não tem espaço suficiente para a entrada em rampa	cavidade tem espaço suficiente para a entrada em rampa	cavidade não tem espaço para suficiente a entrada em rampa
geometria permite aproximação externa	geometria não permite aproximação externa	geometria não permite aproximação externa	geometria não permite aproximação externa

Quadro 9 – Sistematização da decisão quanto ao movimento de entrada da ferramenta

5.2.15 HABILITAÇÃO DA OPÇÃO "USINAGEM POR REGIÃO"

Muitos dos *softwares* de CAM empregados pelo setor e moldes [29, 42, 53, 55] costumam oferecer a opção de **usinagem por regiões** (*by region, pocket machine, rough-to-depth*) para estratégias de desbaste em 2½ eixos. Com esta opção ativada, regiões mais profundas são usinadas em separado, patamar por patamar até o fundo, de forma a reduzir os movimentos de posicionamento da ferramenta (figura 58). Contudo, o *software* pode apresentar deficiência no cálculo deste tipo de usinagem, sendo necessário que o programador observe atentamente a simulação gráfica para detectar possíveis erros que resultem na remoção de alturas de material maiores do que o suportável pela ferramenta.

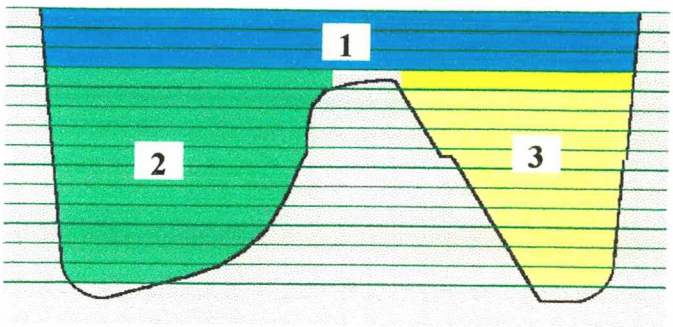


Figura 58 – Usinagem por região: a fresa remove material, normalmente dos patamares em azul (1), depois usina a região em verde (2), patamar por patamar e, se retrai ao plano de segurança e passa a remover a área em amarelo (3), patamar por patamar

5.3 ORIENTAÇÃO PASSO A PASSO PARA O PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DO ACABAMENTO

5.3.1 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE PROGRAMAÇÃO – PROPORÇÃO TECNOLOGIA/TEMPO (PASSO 1)

Para auxiliar o planejamento da programação no CAM, o programador deve ter informações a respeito da função do molde, do produto por ele moldado e do funcionamento do molde. O programador deve dispor de informações principalmente sobre a qualidade superficial exigida para cada região do produto, os processos pelos quais o molde passará após o fresamento (eletroerosão, polimento manual, retificação, etc.), a direção e o sentido do movimento de extração do produto moldado, partes internas do produto cujas respectivas regiões do molde requeiram somente acabamento de fresamento e outros dados do gênero. O levantamento deste tipo de informação, embora pertinente à programação das operações de acabamento, pode ser ainda mais útil se for realizado antes do planejamento do desbaste, pois pode, em alguns casos, implicar certas tomadas de decisão no seu planejamento, como, por exemplo, a especificação do sobrematerial para o acabamento.

De posse destas informações, o programador deve traçar os objetivos a serem alcançados pela programação que está sendo iniciada. Os critérios para a seleção de estratégias e parâmetros para usinagens de acabamento devem estar de acordo com a solução de compromisso adotada, entre adicionar **qualidade e tecnologia** à usinagem e reduzir o **tempo de usinagem**, conforme os requisitos do molde e do produto, prazo de entrega do molde e disponibilidade de máquinas e ferramentas.

Assim, como os critérios de programação dependem, principalmente, de requisitos estabelecidos por analistas de processo, projetistas de moldes, chefes, gerentes e diretores, e não

pelo programador do CAM, sua definição não será abordada por este trabalho, cujo objetivo é auxiliar a geração de trajetórias de usinagem.

5.3.2 PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES E SELEÇÃO DE ESTRATÉGIAS (PASSO 2)

A primeira decisão a ser tomada pelo programador é optar por uma das duas técnicas que costumam ser usadas em ferramentarias quanto ao planejamento das operações. Uma delas é a utilização de **estratégias diferentes** para cada região do modelo, incluindo programas de **acabamento fino** com estratégias de contorno de cantos ou reusinagem e ferramentas menores do que as anteriores. A busca da estratégia mais adequada a cada geometria da peça, embora mais trabalhosa, pode significar aumento da qualidade do acabamento superficial e redução do tempo de usinagem e do desgaste da ferramenta.

Outra consiste em empregar uma **única estratégia** que cubra toda a superfície do modelo, com a posterior aplicação de operações de acabamento fino. As vantagens deste procedimento são a simplificação das atividades do programador com conseqüente redução do tempo de programação e a redução dos tempos secundários gastos com montagens e trocas de ferramentas. Quando este tipo de programação for escolhido, recomenda-se a utilização de estratégias de **planos paralelos**, com trajetórias na direção que proporcione o contato da ferramenta com todas as regiões da peça e a remoção total e uniforme do sobrematerial. Como isso nem sempre é possível, devido à complexidade geométrica de certos modelos, uma solução é gerar um programa complementar, com trajetórias ortogonais às anteriores, o que, porém, duplica o tempo de usinagem. Como a direção mais apropriada para as trajetórias não é uma escolha óbvia e varia de cavidade para cavidade, é muito comum encontrá-la somente após alguns testes, nos quais o programador executa um programa e avalia os resultados apresentados na tela do CAM.

O critério de programação pré-estabelecido é fundamental na decisão entre a usinagem de todo o modelo ou região por região. Em linhas gerais, quanto maior for a proporção de *tecnologia e qualidade* em relação à *minimização do tempo*, mais recomendável será o procedimento de gerar programas específicos para cada região da peça. Porém é importante que o programador analise de que maneiras o *software* pode limitar as regiões a usinar, imagine as trajetórias geradas pela aplicação das estratégias disponíveis e pondere sobre a sua adequação à usinagem de cada região

ou de todo o modelo. A partir desta decisão, o programador pode, então, selecionar a estratégia mais adequada para a(s) região(ões) mentalmente delimitada(s).

Além dos programas principais de acabamento, muitas vezes são necessários programas para otimização da remoção de material ou acabamento fino. A decisão pelo emprego destas operações deve ser feita em conjunto com o planejamento das operações principais, pois uma depende da outra.

Tal tipo de programa normalmente utiliza estratégias de reusinagem ou estratégias de usinagem de cantos, conforme a necessidade. Recomenda-se programar **estratégias de reusinagem** quando:

⇒ decidir-se por utilizar apenas um programa para todo um modelo de geometria complexa, pois neste tipo de procedimento nem sempre as trajetórias conseguem varrer uniformemente todas as regiões;

⇒ a peça apresentar regiões com curvaturas pequenas ou estreitamentos que exigem uma fresa menor do que a fresa ótima para o restante da geometria; assim, uma fresa maior aumenta a eficiência da remoção de material no acabamento principal deixando o material nas regiões menores para a fresa menor;

⇒ o sistema CAM não oferecer estratégias adequadas para remoção total do material desejado ou quando há suspeitas de que as estratégias anteriores não removeram todo o material desejado e não for desejável refazer a programação, para não atrasar outros serviços do setor de CAD/CAM da empresa.

Programas com estratégias de **usinagem de cantos** devem ser utilizados quando:

⇒ a peça apresentar cantos com pequenos arredondamentos em relação ao resto da geometria, semelhantemente à aplicação de estratégias de reusinagem (a diferença é o tipo de trajetórias geradas, geralmente uma passada única na usinagem de cantos e varredura de áreas nas estratégias de reusinagem);

⇒ o acabamento principal usar fresas toroidais ou esféricas em modelos com cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou entre paredes e bases de ilhas.

Outro tipo de operação de acabamento fino consiste em selecionar estratégias que varram homogeneamente toda a região a acabar, preferencialmente em direções perpendiculares às usadas nos programas principais de acabamento, para que a ferramenta remova apenas as cristas ou pequenas falhas de material deixadas pelas operações anteriores. Este procedimento deve ser utilizado quando for necessário um determinado acabamento de fresa que minimize o processo de polimento manual, como por exemplo, no caso de moldes espelhados [14].

Sistematizar a tomada de decisão referente à seleção da estratégia de acabamento em função da geometria é uma tarefa difícil, senão impossível, uma vez que cada molde, por pertencer a um produto diferente, tem uma forma ímpar para sua(s) cavidade(s). Contudo, algumas geometrias básicas são encontradas com muita freqüência, sendo que muitas vezes a combinação de duas ou mais destas geometrias compõe toda a forma da cavidade. Para estas geometrias genéricas são apresentadas diversas informações e recomendações quanto à aplicação de estratégias:

A) SUPERFÍCIES COM CURVATURA EM PLANOS XZ OU YZ

Em termos gerais, a usinagem de geometrias do gênero deve ser executada por um destes métodos:

- na direção da curvatura, incrementando lateralmente e usinando de cima para baixo, de baixo para cima, ou em ambas direções; geralmente com estratégias **isoparamétricas** ou de **planos paralelos**;
- ao longo da curvatura, com incrementos em Z, de baixo para cima ou de cima para abaixo, com sentido apenas concordante ou em ida e volta; este tipo de trajetória é conseguido com estratégias de **perfilamento em 2½ eixos**.

As pesquisas sobre usinagem de alta velocidade de *Schulz* [88] e *Finzer* [49] mostram que quando se usina somente **de baixo para cima**, tanto em trajetórias ao longo da curvatura quanto na sua direção, a rugosidade e o desvio entre a superfície gerada pela usinagem e a do modelo são menores, principalmente nas regiões mais verticalizadas. Outra vantagem deste tipo de usinagem é a maior vida útil alcançada pela ferramenta, uma vez que diminuem as vibrações provocadas pelas condições de corte desfavoráveis no seu topo. Para um mesmo comprimento total de trajetórias de

corte, passadas paralelas na direção da curvatura produzem melhor acabamento superficial que passadas paralelas perpendiculares à direção da curvatura [80].

B) PAREDES E PLANOS INCLINADOS

Geometrias muito inclinadas, muitas vezes bem próximas a 90° (devido aos pequenos ângulos de extração da ordem de 1° a 3° [5]) costumam ser usinadas de duas maneiras:

- por perfilamento com Z constante (2½ eixos);
- com trajetórias em sobe e desce, segundo diversos tipos de estratégias;

Paredes de bolsões, protusões e pequenas ilhas são **perfiladas em 2½ eixos** com um incremento que proporcione a rugosidade pedida. Quanto mais vertical a parede maior pode ser o incremento, desde que não ultrapasse os limites tecnológicos e geométricos da ferramenta (por exemplo, esforço de corte e altura do gume, respectivamente).

Uma alternativa recomendada para rampas não tão inclinadas e em paredes isoladas, são movimentos da ferramenta subindo ou subindo e descendo a geometria, com um ângulo entre 60 e 45° [14], conforme ilustra a figura 59. As trajetórias nesta direção tornam mais eficiente a usinagem de paredes não tão inclinadas do que com perfilamento em 2½ eixos, pois garantem a homogeneidade das alturas de crista com um número de passadas menor. A inclinação das trajetórias reduz a altura da área de contato da lateral da ferramenta com o material, reduzindo esforços de corte e melhorando o acabamento e possibilitando o uso de fresas com insertos também para acabamento, cujo gume geralmente não é muito alta [89]. Contudo, em relação ao perfilamento com Z constante a usinagem ao longo da inclinação da parede aumenta o número de interrupções das trajetórias, principalmente quando se prima pelo critério *qualidade e tecnologia*, orientando as trajetórias de corte somente de baixo para cima para evitar o contato do topo da ferramenta.

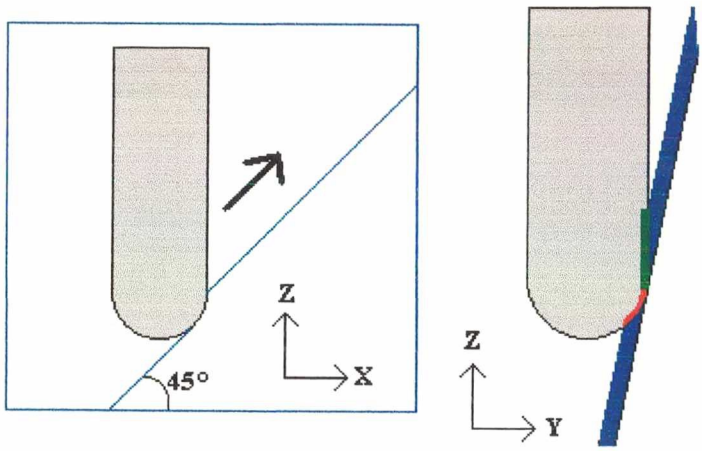


Figura 59 – Usinagem de rampa com fresa subindo inclinadamente: em vermelho, o contato do topo da fresa na usinagem em descida; em verde, o contato lateral na subida

C) SUPERFÍCIES HEMISFÉRICAS CÔNCAVAS OU CONVEXAS (CALOTAS)

Este tipo de geometria é freqüentemente usinada por **trajetórias em Z constante** [14, 38], como mostrado pela figura 60. Estratégias de **patamares em hélice** também podem ser utilizadas, com resultados semelhantes, porém com a vantagem de não promoverem interrupções nas trajetórias (figura 61). Devido à existência de superfícies paralelas ao eixo da ferramenta (ver figura 62), seja qual for sua direção, trajetórias segundo **planos paralelos** não conseguem uniformizar a remoção de material por toda a geometria. Se o intervalo entre as trajetórias paralelas for definido pela máxima altura de crista permitida, os resultados podem se ligeiramente melhores, contudo [77]. Uma alternativa para a usinagem de calotas é a **usinagem radial**, que (como na usinagem de superfícies tipo planos inclinados) produz ondulações (cristas) mais regulares que o perfilamento 2½ eixos, mas aumenta o número de trajetórias (figura 63).

Estudos de *Zhu* [43] comparam a usinagem isoparamétrica com fresa cilíndrica de uma superfície (tipo *Coons*) em forma de calota pelas suas linhas *u* (paralelos) com a usinagem segundo suas linhas *v* (meridianos). Seus resultados mostram que, para um mesmo intervalo entre passadas adjacentes, as trajetórias conduzidas pelas linhas *v* removem o material de forma mais eficiente, pois não deixam área em forma de degrau como nas trajetórias conduzidas pelas linhas *u* (que realizam nada mais do que um perfilamento em 2½ eixos). Contudo, o comprimento total das trajetórias radiais é consideravelmente maior do que o das trajetórias de perfil. Em *softwares* que não dispõem de trajetórias isoparamétricas, como os que trabalham com modelos STL, ou em superfícies cuja direção destas linhas seja diferente da configuração meridianos-paralelos, o uso de estratégias de **usinagem radial** gera trajetórias similares às guiadas pelos meridianos de uma semiesfera.

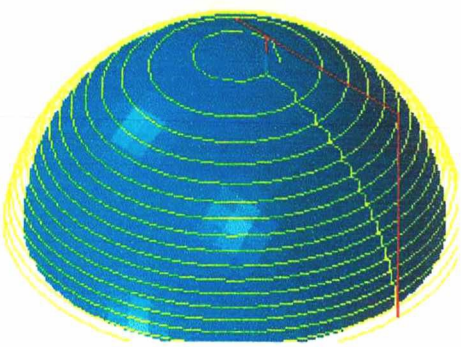


Figura 60 - Usinagem de calotas com estratégia de perfilamento em 2½ eixos (z constante): no CAM *Powermill*, o intervalo constante entre os patamares de corte (em z) gera poucas passadas no topo da superfície e acumula trajetórias próximo à base, produzindo cristas de tamanhos diferentes e em forma de degrau

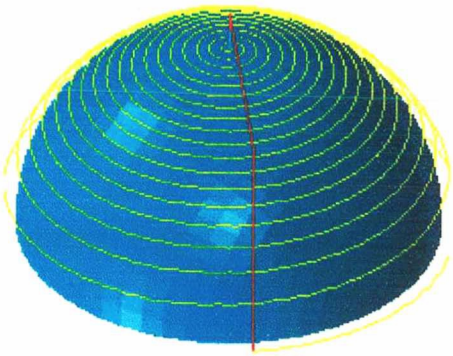
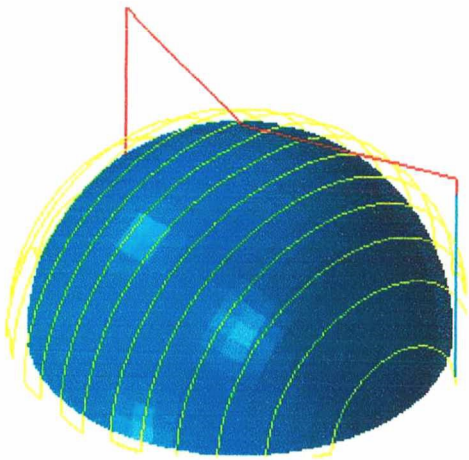


Figura 61 - Usinagem de calotas com estratégia de patamares em hélice: as cristas produzidas são mais uniformes do que na usinagem em Z constante, pois o intervalo constante 2D (perpendicular ao eixo da ferramenta) produz trajetórias no topo e não acumula trajetórias na base; porém, a quantidade de material não removido é semelhante

Figura 62 - Usinagem de calotas com estratégia de planos paralelos: a remoção de material não é uniforme sobre a superfície da peça; nas regiões praticamente paralelas ao eixo da ferramenta (canto inferior direito da figura), maiores faixas de material não são removidas



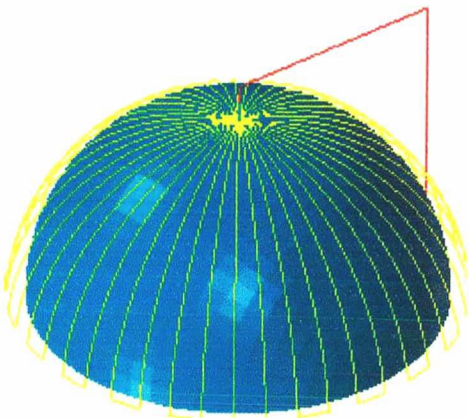
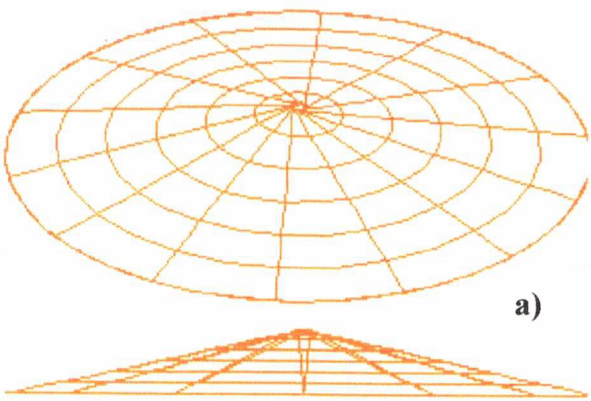


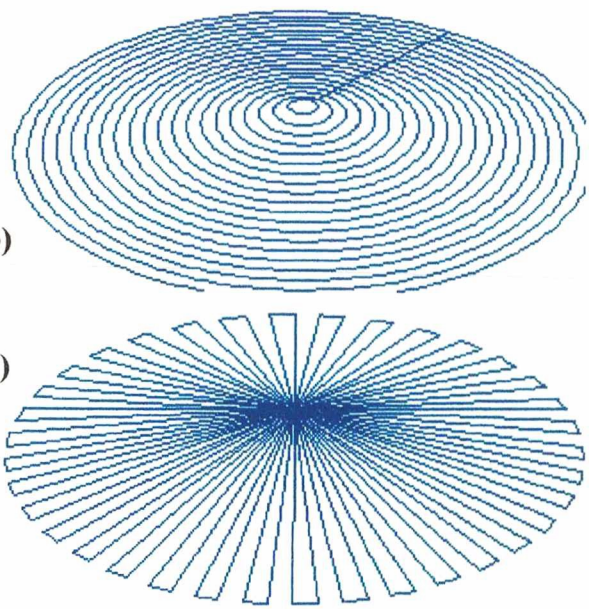
Figura 63 - Usinagem de calotas com estratégia de usinagem radial: a quantidade de material removido é maior, as cristas são mais regulares, embora haja trajetórias redundantes no topo

D) SUPERFÍCIES CIRCULARES POUCO INCLINADAS (DISCOS)

Estratégias que promovam trajetórias **paralelas ao contorno**, **espirais** ou **radiais** são as mais adequadas. À medida em que aumenta a inclinação da superfície, melhores resultados são conseguidos pelas trajetórias radiais, pelos mesmos motivos expostos para a usinagem de calotas.



a)



b)

c)

Figura 64 - Usinagem de discos: a) duas vistas de uma superfície em forma de disco, com inclinação de 15°; **b)** trajetórias de projeção de contornos (*offsets* da borda do disco); **c)** trajetórias radiais para a superfície em disco

E) PLANOS HORIZONTAIS

Este tipo de superfície costuma ser melhor usinado **por planos paralelos** ou por estratégias de ***offset* de contornos**, tendo os limites da área plana como contornos.

F) SUPERFÍCIES DE CONTORNO COMPLEXO

A direção das passadas deve acompanhar a direção principal da superfície, para que o número de interrupções, acelerações e desacelerações seja diminuído, minimizando o tempo de usinagem. Da mesma forma, para a usinagem de partes de um modelo definidas por várias superfícies, as trajetórias devem ser geradas continuamente para o conjunto, ao longo da maior direção possível [51]. A usinagem de grupos de superfícies adjacentes, em seqüência, além de reduzir as interrupções das trajetórias, resulta em melhor acabamento superficial, visto que não deixa marcas nas fronteiras entre superfícies [51].

Superfícies isoladas ou em seqüência são, geralmemente, usinadas por **trajetórias isoparamétricas** [14, 38]. Porém, em algumas regiões de superfícies com formas semelhantes às da figura 65, geralmente há um acúmulo de trajetórias redundantes que aumenta desnecessariamente o tempo de usinagem. A estratégia de **planos paralelos,** ao contrário, não gera trajetórias redundantes, porém aumenta consideravelmente o número de interrupções (figura 66). Já as estratégias de **perfilamento em 3 eixos** e ***offset* de contornos** produzem trajetórias paralelas aos contornos da superfície selecionada, tornando-se uma solução mais adequada para este caso específico de geometria, desde que empregue intervalos tridimensionais constantes entre as passadas. Dependendo dos contornos da superfície, estratégias de **projeção isoparamétrica** também produzem estratégias semelhantes às conseguidas pelo *perfilamento em 3 eixos* (figura 67).

G) SUPERFÍCIES COMPLEXAS DE FORMA LIVRE

Uma vez que as superfícies possuem formas *livres,* a estratégia mais apropriada varia de caso para caso. Para superfícies cuja geometria se aproxima das já relacionadas, as mesmas considerações podem ser válidas. Geometrias com constantes alterações de inclinação e grau de curvatura devem ser usinadas com estratégias de **planos paralelos**, quando selecionado todo o modelo ou regiões que englobem superfícies com geometria variada e pouco contínua entre si, e **isoparamétricas** quando selecionada uma única superfície ou um grupo de superfícies contínuas.

Entretanto, o uso de estratégias de **perfilamento em 3 eixos** e ***offset* de contornos** não deve ser descartado, pois, para casos específicos, podem trazer bons resultados.

G) CAVIDADES GENÉRICAS DE MOLDES

Como regra geral recomenda-se gerar as trajetórias na direção em que sofrerão **menos interrupções** (ver figura 68), a menos que isso interfira nos critérios de programação estabelecidos pelo programador no início do planejamento.

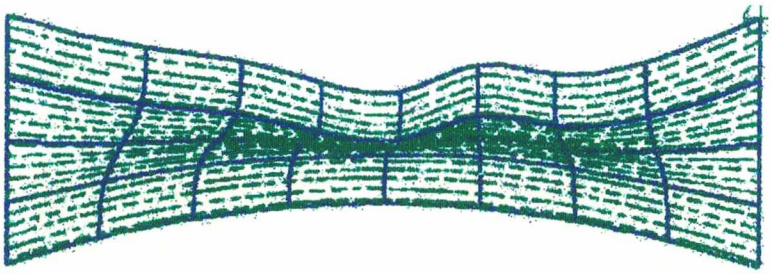


Figura 65 – Trajetórias isoparamétricas redundantes: as trajetórias (verde) geradas pelo *software* se acumulam no estreitamento da região central da superfície (azul), devido ao pequeno intervalo paramétrico das linhas construtivas da superfície nesta região

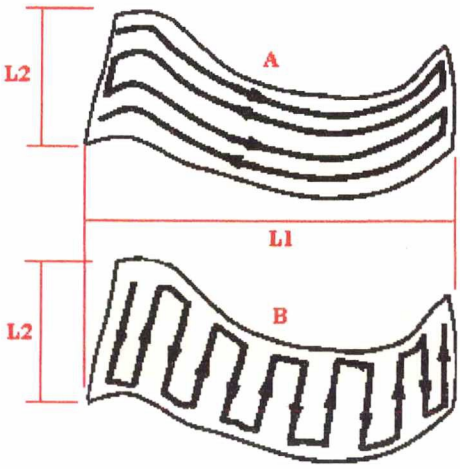


Figura 68 – Direção das trajetórias (1): como L1>L2 a direção das trajetórias em B produz menos interrupções

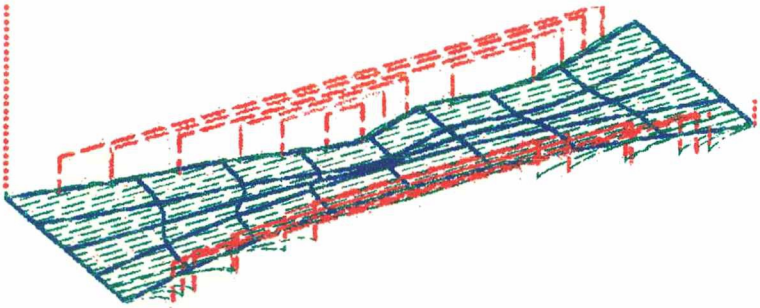


Figura 66 – Trajetórias em planos paralelos (verde); em vermelho, os movimentos rápidos de posicionamento

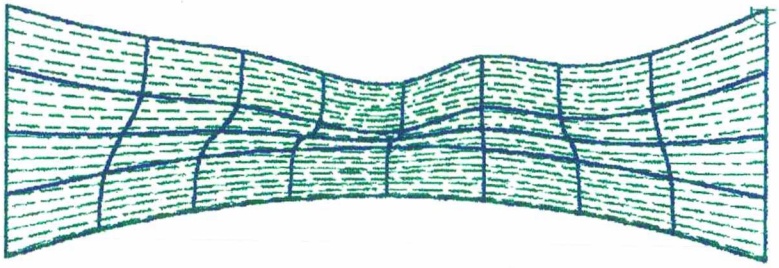


Figura 67 – Trajetórias de projeção isoparamétrica (verde) geradas no *software Cimatron*.

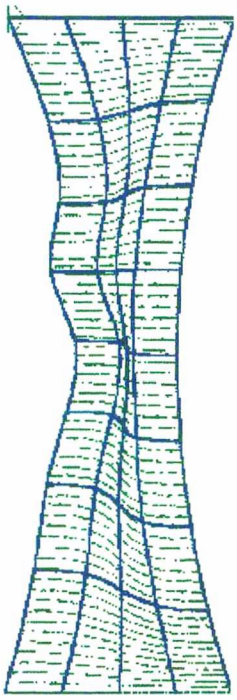


Figura 69 – Direção das trajetórias (2): para a mesma superfície (azul) mostrada na figura 59, as trajetórias isoparamétricas (verde) em outra direção não apresentam redundâncias, mas, possuem um maior número de interrupções, por acompanharem a menor direção da superfície

Outras recomendações para este passo do planejamento são:

⇒ Para superfícies de machos que devam ter apenas acabamento de fresa, deve-se orientar as trajetórias na direção da extração do produto, fazendo com que as cristas não tendam a reter a peça no molde [38, 14].

⇒ Em usinagens por planos paralelos (ou outras ao estilo zigue-zague) é comum que os algoritmos dos *softwares* (inclusive os de alto nível) falhem e gerem trajetórias com anomalias de orientação e espaçamento[6]. Detectando este tipo de problema o programador deve modificar a direção dos planos até conseguir trajetórias regularmente formadas; em modelos de geometria complexa, a orientação dos planos de corte não é óbvia [77] e muitas vezes, não resta outra alternativa senão o "método" da tentativa e erro;

⇒ Quando se empregar estratégias segundo isoparamétricas é importante verificar áreas com um excesso de trajetórias (trajetórias redundantes). A modificação da direção das trajetórias pode amenizar ou resolver este problema, porém pode igualmente aumentar o numero de interrupções, como se vê na figura 69. Cabe então ao programador avaliar se o aumento dos tempos secundários é compensado com vantagem pela redução do tempo de corte e, baseado nos seus critérios de programação, tomar a decisão mais apropriada;

⇒ Em estratégias de *perfilamento em 3 eixos* e *offset de contornos*, é freqüente a imprópria definição dos contornos que limitam e orientam as trajetórias [14, 38]; mudanças em suas formas e posições podem trazer os resultados esperados.

5.3.3 DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS A USINAR (PASSO 3)

Conforme já mencionado, este passo é planejado ao mesmo tempo em que se definem as operações necessárias e as estratégias a aplicar. No capítulo 3 foram descritas várias maneiras de selecionar a região de usinagem, as quais dependem da trajetória selecionada. Contudo, três recomendações gerais são aqui propostas:

---

[6] Programações acompanhadas em visitas e estágios mostraram que em alguns casos simplesmente os *softwares* não geravam algumas passadas, criando falhas nas trajetórias ou então geravam trajetórias com freqüentes e abruptas trocas de direção.

⇒ Em peças que apresentam regiões simétricas ou repetições de geometrias idênticas (por exemplo, moldes de cavidades múltiplas), limitar a aplicação da estratégia selecionada a apenas uma destas áreas e usar recursos de edição para copiar, mover ou espelhar as trajetórias, com o objetivo de diminuir o tempo de cálculo e simplificar a programação;

⇒ Assim como no desbaste, o programador deve observar atentamente o modelo na tela e verificar mentalmente as possibilidades de colisão ou interferência em áreas não selecionadas. Muitas vezes esta avaliação determina a ordem dos programas de acabamento;

⇒ Devem ser selecionadas como superfícies de checagem aquelas que são contíguas às usinadas e qualquer outra que possa ser invadida por movimentos de retração e posicionamento da ferramenta. Aparentemente, o número de superfícies de checagem não resulta em acréscimos relevantes no tempo de cálculo [14].

5.3.4 ESCOLHA DA FERRAMENTA (PASSO 4)

Assim como no planejamento do desbaste devem ser determinados:

- Geometria do tipo de ponta da ferramenta;
- Diâmetro da ferramenta;
- Altura da ferramenta (sua determinação segue exatamente as mesmas considerações feitas para a altura da ferramenta de desbaste e, por isso, não são aqui repetidas);

DEFINIÇÃO DO TIPO DE PONTA DA FERRAMENTA

Fresas esféricas são as mais utilizadas para casos gerais de cavidades de moldes, devido ao fato de suas geometrias, normalmente, apresentarem arredondamentos, curvaturas simples e superfícies de forma livre. As fresas cilíndricas, devido ao seu topo reto, têm seu emprego restrito a machos e fêmeas com geometrias prismáticas, superfícies horizontais planas, cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou bases de protusões (geralmente em programas de acabamento fino com estratégias de usinagem de cantos) e paredes verticalizadas.

Em cavidades que apresentam tanto curvaturas quanto planos horizontais, a utilização de fresas toroidais minimiza o tempo de usinagem, uma vez que possibilita um menor número de

trajetórias (para uma dada condição de acabamento) do que fresa cilíndrica em superfícies curvas e do que a fresa esférica em superfícies com menos de 15° de inclinação [49].

Outra vantagem da fresa toroidal é o menor gradiente de velocidade de corte desde a lateral até o topo, diminuindo os problemas da usinagem a baixas velocidades de corte que podem ocorrer com as fresas esféricas [49], como mostra a figura 70.

O quadro 10 sistematiza a escolha do tipo de ponta da ferramenta de corte para um programa de acabamento

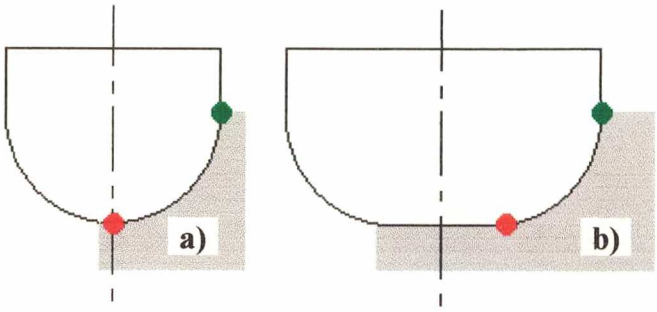


Figura 70 - Gradiente de velocidade de corte entre a lateral e o centro do topo de uma fresa: a) fresa esférica; **b)** fresa toroidal; na usinagem de um raio de canto, por exemplo, com uma mesma velocidade de corte nos pontos verdes (na lateral das fresas), no ponto vermelho (centro da fresa e início do raio da geometria) a fresa de bola teria velocidade de corte zero, prejudicando a qualidade da usinagem. O mesmo não ocorre na usinagem com a fresa toroidal, cujo centro possui velocidade de corte bem maior do que zero.

DETERMINAÇÃO DO TIPO DE PONTA DA FERRAMENTA		
esférica	*toroidal*	*cilíndrica*
curvaturas simples ou superfícies de forma livre	**curvaturas simples ou superfícies de forma livre**	**superfícies com geometria prismática s/ curvaturas**
modelo sem planos horizontais	**planos horizontais / inclinações até 15°**	**planos horizontais**
perfilamento em 2½ eixos de superfícies com inclinação intermediária (15°-85°)	**perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas**	**perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas**
raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões bases de protusões	**raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões bases de protusões**	**cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou bases de protusões**
problemas com a usinagem com o centro da fresa esférica são pouco importantes	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**

Quadro 10 – Sistematização da decisão quanto ao tipo de ponta da ferramenta de acabamento

ESPECIFICAÇÃO DO DIÂMETRO DA FERRAMENTA

A recomendação geral consiste em estabelecer o raio da fresa com base no mínimo raio e nos estreitamentos da geometria da região a usinar. Porém, se a fresa exigida pela mínima curvatura da geometria for muito pequena em relação à fresa exigida pelo restante da geometria, aconselha-se utilizar uma fresa maior e programar uma operação de acabamento fino exclusiva para as áreas (geralmente cantos) menores com uma ferramenta menor.

Deve-se sempre analisar se a ferramenta a ser utilizada em operações anteriores ou posteriores de uma mesma programação (não só em relação ao diâmetro, mas também quanto ao tipo de extremidade) pode realizar a usinagem em questão sem prejuízos à tecnologia do processo nem ao tempo da operação. Este procedimento pode reduzir tempos secundários, como o gasto com trocas de ferramenta, além de facilitar as operações de montagem e *pre-setting* das mesmas. É importante, contudo, verificar se uma operação não desgastaria a ferramenta de forma a inviabilizá-la para a operação seguinte, com o que tal procedimento não traria nenhuma vantagem ao processo, pois a ferramenta deveria ser trocada.

5.3.5 DEFINIÇÃO DO INTERVALO ENTRE PASSADAS (PASSO 5)

Seja qual for a estratégia selecionada, o intervalo entre as trajetórias é um parâmetro determinante da qualidade do acabamento. De posse das informações sobre os requisitos de acabamento o programador deve primeiramente identificar, no *software*, como a estratégia selecionada define o intervalo entre passadas, para então determinar o tipo e o valor do intervalo mais adequado para a usinagem em programação. Conforme referido no capítulo 3, a maioria das estratégias define o intervalo entre passadas através de incrementos bidimensionais ou tridimensionais, ou ainda, segundo uma altura de crista máxima.

Para esta determinação, são apresentadas algumas recomendações:

⇒ verificar se a determinação do incremento por um valor 2D constante gera passadas adjacentes muito distantes, diminuindo a eficiência da remoção de material, principalmente em regiões muito inclinadas e curvaturas acentuadas; em caso positivo, especificar intervalo pela altura de crista ou aplicar programa específico para estas áreas, com um intervalo menor;

⇒ verificar se a determinação do incremento por um valor 3D constante gera passadas adjacentes muito próximas, produzindo cristas muito abaixo do especificado, aumentando em demasia o tempo de usinagem, principalmente em regiões muito inclinadas e curvaturas acentuadas; novamente, especificar o intervalo pela altura de crista ou gerar um programa específico para estas regiões, com um intervalo maior;

⇒ em estratégias de planos paralelos usar incrementos 2D pequenos, da ordem de 10% do diâmetro da ferramenta, mesmo com fresas cilíndricas, para um acabamento de fresa convencional [14];

⇒ determinar o valor do incremento 2D/3D ou a altura de crista limite, conforme estratégia selecionada, baseando-se nos proporção *tempo/tecnologia* pré-estabelecida; em termos gerais, quanto maior o incremento, menor o tempo de usinagem e pior o acabamento superficial (rugosidade, marcas, etc.).

A tabela 14 apresenta os valores correntemente empregados, em casos gerais, para a altura de crista máxima no fresamento de cavidades (aços P-20 e H-13), em milímetros [14, 38]:

requisito de acabamento / qualidade	***fino***	***convencional***	***grosseiro***
acabamento p/ posterior retificação e/ou polimento manual	**0,001**	**0,003**	**0,01**
acabamento de fresa para interiores	**0,003**	**0,005**	**0,01**
acabamento de fresa para partes externas	**0,0001**	**0,001**	**0,005**

Tabela 14 – Altura máxima de crista para operações de acabamento

Uma vez que a tabela 14 só apresenta valores em termos de altura de crista e nem todos os *softwares* oferecem a possibilidade de determinar o intervalo entre as trajetórias desta maneira, apresenta-se a equação 4, que fornece o valor do intervalo bidimensional necessário para uma determinada altura de crista [81]:

$$\text{intervalo} = \frac{|\rho|.\left(4.(R+\rho)^2.(h+\rho)^2 - \left(\rho^2 + 2.R.\rho + (h+\rho)^2\right)^2\right)^{1/2}}{(R+\rho).(h+\rho)} \qquad (4)$$

onde : R = raio da ferramenta

h = altura de crista especificada

ρ = raio de curvatura da superfície; $\rho > 0$ para sup. convexa e $\rho < 0$ para côncava

Para superfícies planas ou com raio muito maior do que a fresa [74] é possível a seguinte aproximação, dada pela equação 5:

$$\text{intervalo} = 2.\sqrt{h.(2.R - h)} \qquad (5)$$

5.3.6 ESPECIFICAÇÃO DA TOLERÂNCIA DE USINAGEM (PASSO 6)

Em casos gerais de acabamento de molde de injeção, costuma-se especificar valores entre 0,01 e 0,001 mm. Tolerâncias de até um centésimo de milímetro são utilizadas quando se exige maior precisão e alto acabamento superficial, embora o processamento para geração das estratégias exija um desempenho de *hardware* extremamente alto para não inviabilizar o tempo de programação [14, 38]. Como regra geral, recomenda-se especificar uma tolerância menor do que o valor máximo permitido para a altura das cristas. Quando se executar uma estratégia apenas para verificação da sua aplicação especificar a tolerância em 0,1 ou 0,05 mm, para acelerar os cálculos [38].

De qualquer forma, é importante que, após executada a estratégia, se verifique a existência de *loops* nas trajetórias exibidas na tela, os quais geralmente são produzidos por falhas no algoritmo, resultando em interferência. Também é aconselhável verificar com um simulador gráfico a ocorrência de interferências ou de áreas que não estejam sendo usinadas por erro do *software*, embora a visualização destes problemas seja bem mais difícil do que os erros grosseiros de desbaste. Em caso de detecção de erros, a tolerância deve ser diminuída até um valor em que não mais se repitam.

5.3.7 DEFINIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONEXÃO ENTRE PASSADAS (PASSO 7)

Uma vez que os tipos de movimentos de conexão entre passadas de acabamento consecutivas são os mesmos para trajetórias de desbaste, propõe-se a seqüência de ações relacionadas abaixo, de forma semelhante ao recomendado para o planejamento do desbaste:

⇒ verificar as opções oferecidas pelo *software* que reduzem ao mínimo os tempos secundários e retrações; esta verificação pode ser baseada na experiência do programador (comparando com programas que o mesmo já tenha realizado outrora, para situações semelhantes) ou executando programas teste;

⇒ verificar a segurança das opções disponíveis contra colisões e interferência, através dos mesmos métodos descritos na ação anterior;

⇒ avaliar o risco de marcas na superfície causadas por movimentos de retração brusca ou de entrada com o topo da fresa sobre a superfície e por desaceleração e aceleração em movimentos circulares de pequeno raio ou perpendiculares a passadas adjacentes;

⇒ selecionar a opção mais apropriada como uma solução de compromisso entre minimização dos tempos secundários, acabamento superficial (marcas), e segurança quanto a colisões;

5.3.8 DETERMINAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE ENTRADA E SAÍDA (PASSO 8)

O início e o fim de cada trajetória de acabamento deve ser modificado para suavizar o contato da ferramenta com o material a ser usinado, de forma a evitar marcas de entrada e saída na superfície acabada da cavidade e/ou diminuir o esforço de corte na usinagem de materiais muito duros, principalmente quando a espessura do sobrematerial for considerável.

Deste modo, a ferramenta deve movimentar-se tangenciando a superfície a ser usinada, fazendo com que a ferramenta penetre gradualmente no material, através de trajetórias segundo arcos horizontais (sobre planos perpendiculares ao eixo da ferramenta), tanto na entrada quanto na saída. Este tipo de movimento é conhecido como "entrada em gota", quando o ponto de entrada é o mesmo de saída, e costuma ser muito utilizado em trajetórias geradas por estratégias de *perfilamento em 2½ eixos*. Porém, para determinados tipos de geometria, os arcos horizontais podem produzir marcas em superfícies coplanares já usinadas, sendo mais aconselhável a programação de arcos verticais. Prolongamentos do início e do fim das trajetórias devem ser

utilizados quando tanto arcos horizontais como verticais não podem ser utilizados porque marcam superfícies já usinadas, porque não há espaço suficiente ou porque não são permitidos pelo *software*. Finalmente, recomenda-se evitar entradas sobre o material com o topo da ferramenta.

5.3.9 ESPECIFICAÇÃO DO PONTO INICIAL E DOS PLANOS DE SEGURANÇA E SAÍDA (PASSO 9)

Na maioria dos *softwares*, os planos de segurança/saída e o ponto inicial são definidos apenas uma vez, permanecendo ativos para todos os programas da seção de trabalho, exceto se o programador decidir por modificá-los. De qualquer forma, as considerações quanto as suas especificações são as mesmas já feitas para a programação do desbaste.

5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE PROGRAMAÇÃO DO PRÉ-ACABAMENTO

O planejamento da programação de operações de pré-acabamento deve ser realizado conforme as mesmas orientações e procedimentos propostos para as operações de acabamento, pois os *softwares* de CAM não oferecem estratégias específicas para tal tipo de operação. Para a geração de trajetórias de pré-acabamento, o programador deve utilizar estratégias para acabamento, porém, com a especificação de um sobrematerial. Estratégias para desbaste costumam ser menos utilizadas [14, 38], pois são, geralmente, limitadas a movimentos em 2½ eixos (à exceção, claro, da varredura em 3 eixos por patamar), não trazendo vantagens sobre as estratégias de 2½ eixos para acabamento, quando empregadas em programas de pré-acabamento.

Devido à semelhança com a usinagem de acabamento, o planejamento da programação do fresamento de pré-acabamento deve ser orientado pelas mesmos procedimentos e recomendações propostos na seção anterior. Desta forma, não sendo necessária uma repetição dos mesmos, apenas considerações genéricas para o planejamento do pré-acabamento serão abordadas.

Em primeiro lugar, pelo fato das operações de pré-acabamento serem decorrentes tanto do que foi feito no desbaste quanto do que se pretende realizar no acabamento, recomenda-se fazer o seu planejamento somente após o planejamento das demais operações.

Conforme referido, a escolha da **estratégia** para o programa de pré-acabamento é semelhante ao que ocorre no planejamento de uma operação de acabamento. Existem, basicamente, dois tipos diferentes de pré-acabamento. Um que se restringe à limpeza de cantos

internos da peça, para que a ferramenta de acabamento não encontre um excesso de material, e outro relativo a usinagens sobre toda a geometria da peça. Para o primeiro caso, estratégias de usinagem de cantos são claramente a melhor opção, enquanto que para o segundo caso, o programador deve proceder a seleção como se estivesse planejando a programação de uma usinagem de acabamento de todo o modelo.

A seleção da **ferramenta** para um pré-acabamento segue, igualmente, as recomendações propostas para o planejamento de operações de acabamento. Entretanto, o valor do seu diâmetro depende fundamentalmente dos diâmetros selecionados para as ferramentas de desbaste e acabamento. Geralmente, a seleção da ferramenta de pré-acabamento se dá em função da escolha do diâmetro da ferramenta de acabamento, a qual por sua vez, depende do raio interno mínimo da geometria. A equação 3, mostrada na seção 5.3, pode ser útil para a determinação do diâmetro da fresa para a operação de pré-acabamento.

Se estratégia, ferramenta e quantidade de material a remover se assemelham a uma operação de acabamento, a determinação do **intervalo entre passadas** consecutivas deve seguir as recomendações feitas para esta operação. Caso a usinagem seja mais semelhante a um desbaste, pelos mesmos motivos, deve ser seguido o proposto para este tipo de operação. Contudo, muitas vezes, seleciona-se uma fresa igual ou semelhante à que será usada posteriormente no acabamento (o mesmo em relação à estratégia), mas com uma maior espessura de material (profundidade de corte) a ser removido. Para diminuir o tempo da usinagem, neste caso, deve-se empregar um intervalo de passada maior do que para o acabamento, para que o tempo de usinagem não seja tão grande quanto para esta operação. É importante, porém, que o programador avalie se a quantidade de material a mais na espessura e na lateral submete à ferramenta um esforço de corte muito elevado.

As **tolerâncias** empregadas dependem de cada caso, mas recomenda-se especificar um valor menor do que o especificado para desbaste e não tão apertado quanto o especificado para acabamento, exceto quando o sobrematerial para acabamento for muito reduzido (0,1 mm, por exemplo) e bastante uniformizado. Para a definição do sobrematerial, recomenda-se observar as tabelas 12 e 13.

5.5 SEQÜÊNCIA DE PROCEDIMENTOS PARA A PROGRAMAÇÃO VIA CAM

Embora não seja objetivo principal deste trabalho propor sistemáticas para a programação propriamente dita, ou seja, a fase da programação via CAM na qual o programador interage com o *software*, é conveniente organizar o trabalho do programador durante uma seção de trabalho no CAM, para que fique clara a ligação do **planejamento** com a **programação propriamente dita.**

Desta forma, em uma seção de trabalho, cuja cavidade a ser usinada deva sofrer operações de desbaste e acabamento, além de um possível pré-acabamento, recomenda-se que o programador siga a seqüência abaixo descrita e mostrada pelos fluxogramas das figuras 71 e 72:

1) **Esboço da seqüência de operações**. A análise visual do modelo geométrico tridimensional do molde ou da peça (na tela do CAM), da própria peça e/ou do projeto técnico do molde deve fornecer os primeiros indicativos sobre a seqüência e operações a serem realizadas para transformar um bloco de material bruto na geometria do modelo magnético. Nesta etapa , o programador deve identificar os raios mínimos da geometria, a presença e a extensão de áreas planas, a execução da usinagem de pequenos detalhes da geometria, etc. Deve-se também identificar o valor do mínimo raio interno da geometria e pesquisar uma ferramenta que possa realizar o acabamento de tais geometrias.
2) **Planejamento da programação do desbaste.** Este procedimento deve seguir as orientações, procedimentos e os quadros sistematizadores propostos;
3) **Programação propriamente dita - Execução dos programas necessários para o desbaste**. O procedimento resume-se a informar ao sistema os parâmetros selecionados no planejamento, criar geometrias auxiliares, selecionar regiões, em outras palavras, manusear o *software* de CAM para que este calcule automaticamente as trajetórias de usinagem, mostre-as na tela e crie um programa em código CLDATA. Alguns passos do planejamento do desbaste que envolvem seleção de parâmetros para movimentos locais da ferramenta (tipo de entrada, conexão entre passadas, usinagem por região, entre outros) podem ser realizados nesta etapa, quando o programador tem, na tela do CAM, suas janelas/menus/campos abertos para a programação. Embora importantes, estes parâmetros geralmente têm influências somente na operação que está sendo programada e não nas operações seguintes, além de regerem apenas aspectos simples e isolados da programação. De forma geral, o mesmo discurso se aplica aos diversos outros parâmetros secundá-

rios ou específicos de cada *software*, que não foram apresentados nos capítulo 3, 4 e 5.

4) **Verificação dos resultados e correção dos programas de desbaste.** Após a geração das trajetórias do(s) programa(s) de desbaste, o programador precisa verificá-los, de maneira a detectar erros e problemas. Pronta a verificação, efetuam-se as correções necessárias e edições pertinentes de detalhes das trajetórias ou decide-se pela reprogramação da operação.

5) **Planejamento da programação do acabamento.** Recomenda-se a realização deste procedimento antes do planejamento do pré-acabamento, pois as decisões tomadas nesta etapa influenciam diretamente a programação de tais operações, conforme já citado na seção 5.5. O procedimento é semelhante ao realizado para o desbaste, seguindo as proposições da seção 5.4.

6) **Planejamento da programação do pré-acabamento (se necessário).** Semelhante aos demais planejamentos de operações.

7) **Programação propriamente dita - Execução dos programas necessários para o pré-acabamento.** Embora o planejamento desta operação se dê somente após o planejamento do acabamento, a execução de seus programas deve ser feita primeiramente, pois deve-se simular os programas de acabamento a partir do material (imagem do simulador) deixado pelos programas de pré-acabamento.

8) **Verificação dos resultados e correção dos programas de pré-acabamento.** Semelhante ao procedimento 4.

9) **Programação propriamente dita - Execução dos programas necessários para o acabamento.** Semelhante aos procedimentos 3 e 7.

10) **Verificação dos resultados e correção dos programas de acabamento.** Procede-se normalmente como nas etapas 8 e 4. Porém, após esta etapa pode ser necessário alterar a programação do pré-acabamento, devido a possíveis resultados insatisfatórios quanto à aplicação das estratégias às geometrias em função da quantidade e da localização do material excedente deixado pelo pré-acabamento.

11) **Avaliação geral dos resultados dos programas.** Aqui o programador deve decidir entre a aprovação final ou a reprovação dos programas, o que pode significar novas correções ou total reprogramação de uma ou mais operações.

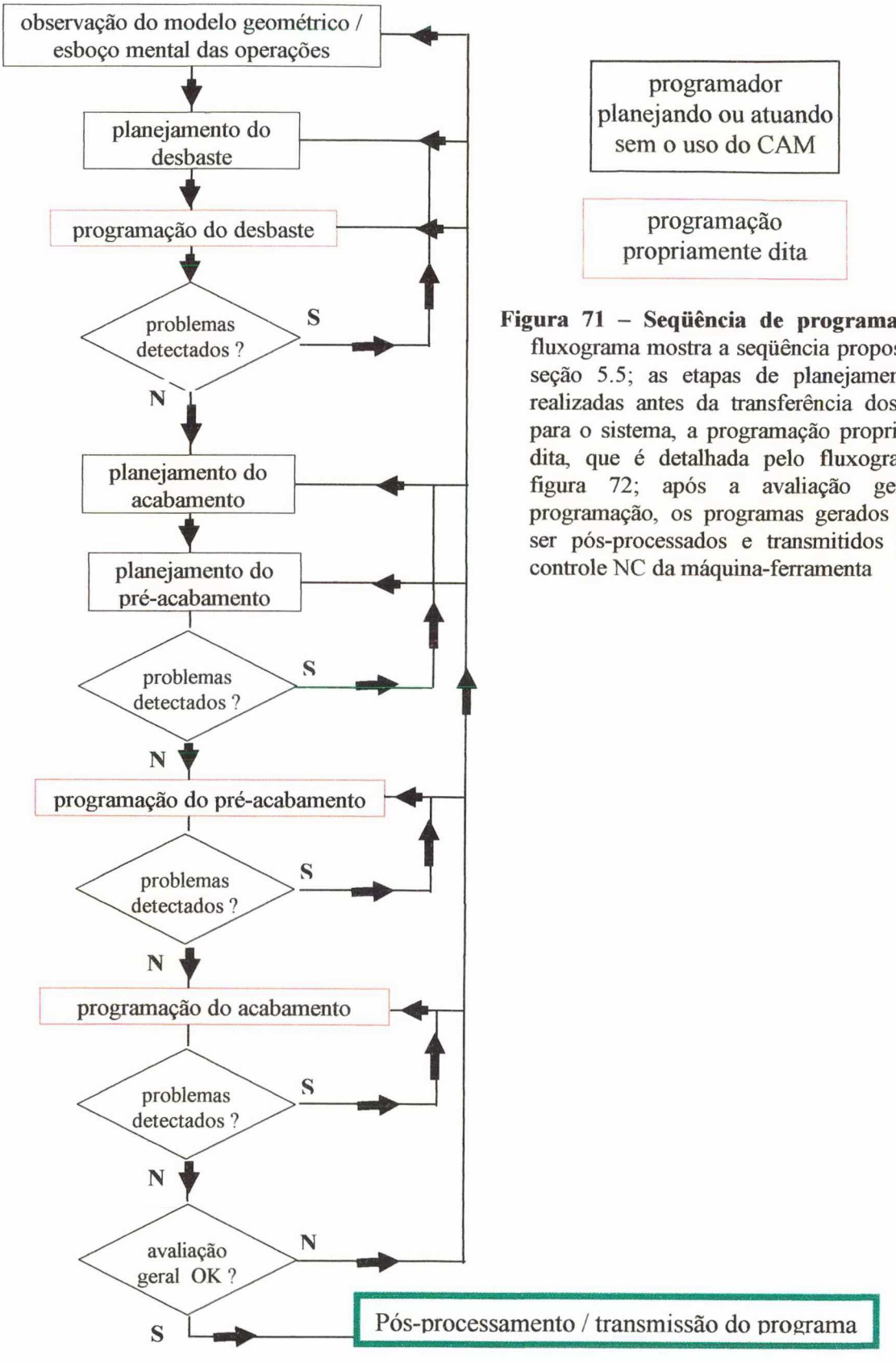


Figura 71 – Seqüência de programação: o fluxograma mostra a seqüência proposta pela seção 5.5; as etapas de planejamento são realizadas antes da transferência dos dados para o sistema, a programação propriamente dita, que é detalhada pelo fluxograma da figura 72; após a avaliação geral da programação, os programas gerados podem ser pós-processados e transmitidos para o controle NC da máquina-ferramenta

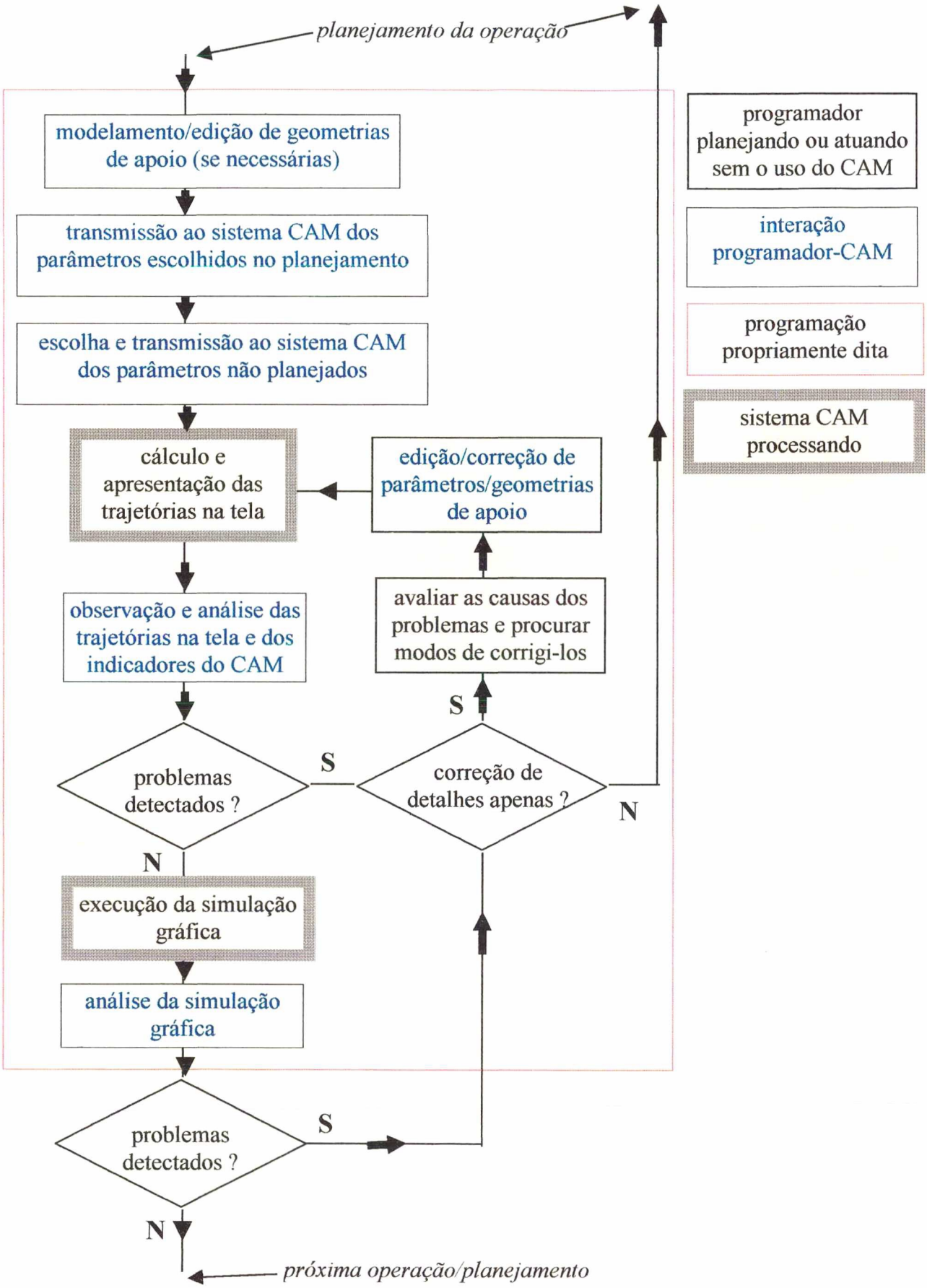


Figura 72 – Programação propriamente dita: o fluxograma mostra as fases da programação propriamente dita de uma operação genérica

6. DESCRIÇÃO DE UM ESTUDO PRÁTICO DE PROGRAMAÇÃO

Para facilitar o entendimento das orientações propostas no capítulo 5, bem como da utilização dos quadros sistematizadores, é apresentada neste capítulo uma descrição passo a passo da programação via CAM da usinagem da cavidade de um molde de injeção. O estudo foi realizado nos equipamentos instalados no GRUCON/CIMJECT, na Universidade Federal de Santa Catarina.

6.1 ESPECIFICAÇÃO DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para desenvolver o exemplo de aplicação, como objeto de estudo foi selecionada a carcaça de proteção do compressor de um sistema de condicionamento de ar para automóveis, mostrada na figura 73. Sua seleção se deveu ao fato de suas formas geométricas serem freqüentemente encontradas em peças injetadas cuja fabricação é normalmente realizada pelo processo de fresamento em máquinas CNC. Sua geometria inclui superfícies de forma livre como arredondamentos de dois cantos côncavos e um convexo, arredondamentos de raio variável, além de planos horizontais, paredes com ângulo de extração, cantos arredondados e superfícies curvas com raio constante.

O projeto CAD tridimensional do molde, com suas respectivas placas-macho e fêmea, bem como demais componentes, foi desenvolvido em um estudo no CIMJECT, que estabeleceu para a produção da carcaça, um molde de duas cavidades. Neste exemplo prático é apresentado o desenvolvimento da programação da placa-macho do molde, incluindo sua superfície de fechamento. A figura 74 mostra o modelo geométrico utilizado para a usinagem da placa no CAM.

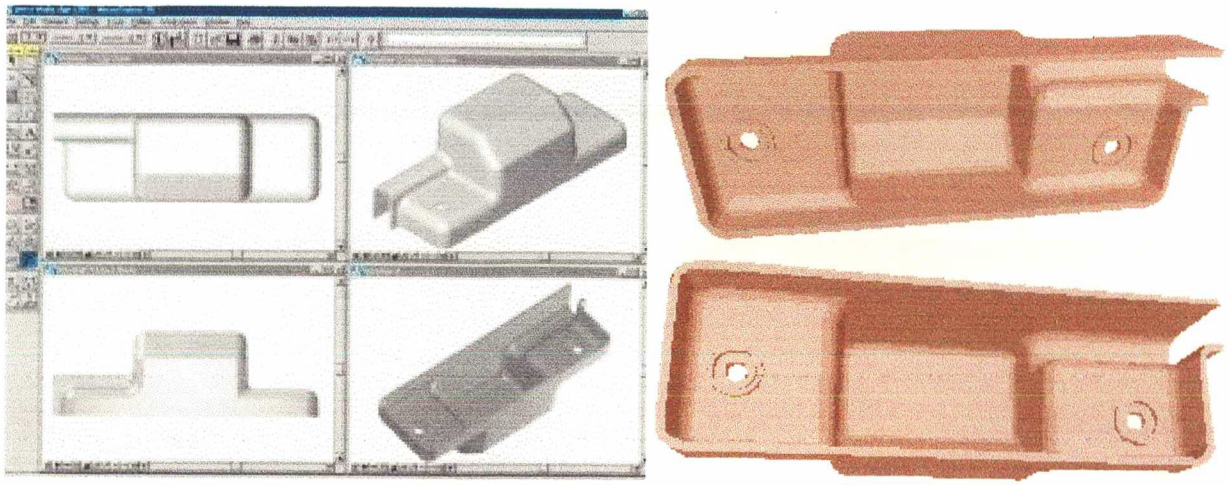


Figura 73 – Peça selecionada para o exemplo de aplicação: à esquerda, quatro vistas da *carcaça*, exibidas na tela do sistema CAD *Microstation*; à direita, duas vistas da parte interior da peça, a qual é moldada pela placa-macho do molde

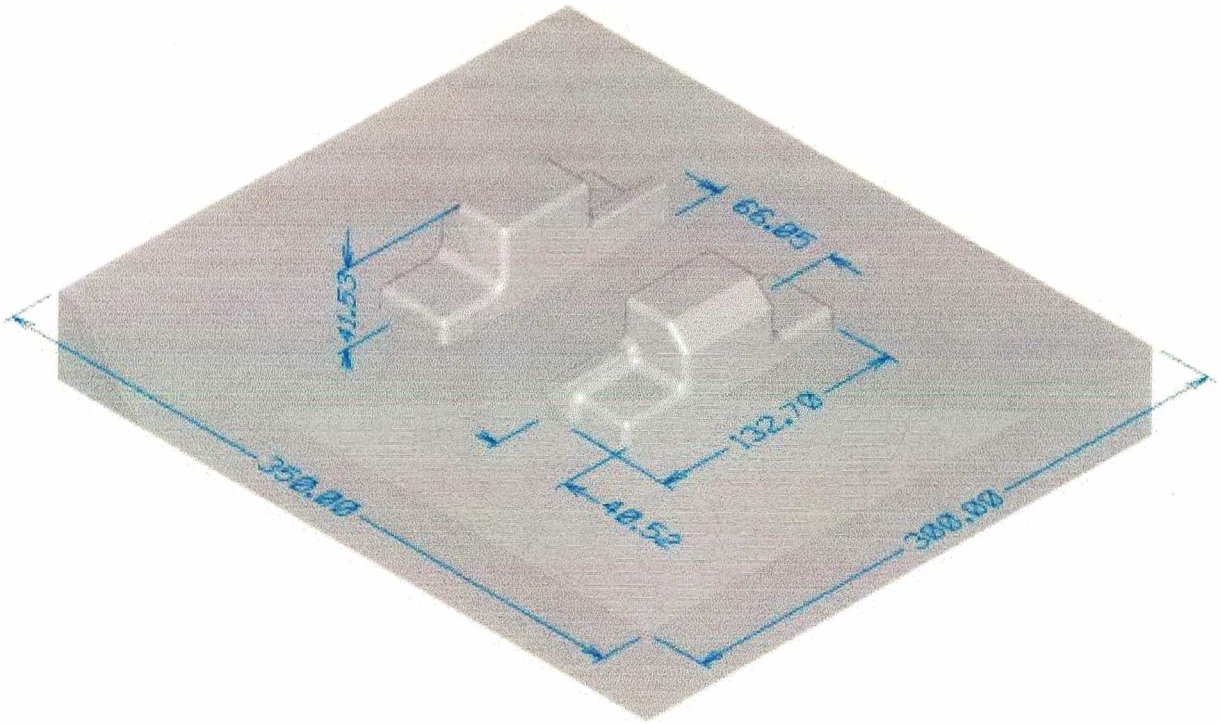


Figura 74 – Molde para a *carcaça*: vista tridimensional em *shade* do modelo da placa macho, com as dimensões principais cotadas

6.2 SISTEMA CAM UTILIZADO

Dentre os sistemas CAM instalados no grupo **CIMJECT,** o ***PowerMILL 2.37*** foi escolhido por ser o mais adequado para fresamento 3D de moldes, devido aos seus recursos para usinagem de geometria consideradas complexas e à diversidade de estratégias oferecidas (ver tabela 8 no capítulo 4).[1]

[1] Deste ponto do trabalho em diante, o *Powermill* será referido como *sistema A*.

6.3 PREPARAÇÃO DO ESTUDO

6.3.1 PROCEDIMENTOS

De acordo com o proposto no capítulo anterior, o estudo seguiu a seguinte seqüência de procedimentos:

1) **Esboço da seqüência de operações**;
2) **Planejamento da programação do desbaste** segundo as orientações e os quadros sistematizadores propostos no capítulo 5;
3) **Execução dos programas** necessários para o desbaste;
4) **Verificação** dos resultados e **correção** dos programas de desbaste;
5) **Planejamento da programação do acabamento** segundo as orientações propostas no capítulo 5;
6) **Planejamento da programação do pré-acabamento** segundo as orientações e os quadros sistematizadores propostos no capítulo 5;
7) **Execução dos programas** necessários para o pré-acabamento;
8) **Verificação** dos resultados e **correção** dos programas de **pré-acabamento**;
9) **Execução dos programas** necessários para o acabamento;
10) **Verificação** dos resultados e **correção** dos programas de acabamento;
11) **Análise geral** dos resultados dos programas.

6.3.2 RESTRIÇÕES SIMULADAS

Algumas restrições foram impostas à programação, para que se pudesse enfrentar problemas que geralmente acontecem na rotina da elaboração de programas NC via CAM, quais sejam:

1) Foram consideradas disponíveis somente as ferramentas constantes no manual de uma ferramentaria brasileira [89], para simular uma freqüente dificuldade encontrada pelos programadores NC: a limitação de diâmetros, geometrias e materiais de ferramentas de corte;
2) Os parâmetros de corte seguiram os valores mostrados no mesmo manual, inclusive a velocidade de avanço rápido e rotação máxima, fixadas em 6.000 mm/min e 3.000 rpm, respectivamente, características de uma das máquinas-ferramenta daquela ferramentaria;
3) As duas protusões (machos) apresentam um rebaixo circular de poucos milímetros de lar-

gura em um de seus planos horizontais que, no entanto, não devem ser fresados, mas erodidos. As operações de eletroerosão foram restringidas apenas a estas geometrias, impossibilitando seu uso para complementação do fresamento das demais regiões do modelo;

4) O topo plano das protusões foi deixado sem sobrematerial pela fresadora que esquadrejou o bloco de material bruto, antes deste passar à máquina CNC, não necessitando, portanto, sofrer novas operações de usinagem.

6.3.3 DETERMINAÇÃO DO ZERO-PEÇA

Conforme referido no capítulo 3, para facilitar o zeramento da peça na máquina-ferramenta, pelo seu operador, costuma-se, no CAM, posicionar o zero-peça no centro da face superior do bloco. O sistema A posiciona automaticamente o zero-peça sobre a origem das coordenadas do modelo geométrico proveniente do CAD. Como a origem encontrava-se em um dos cantos da base da placa, foi necessário mover o modelo, no CAM, para uma posição na qual o zero-peça (origem das coordenadas no CAM) se localizasse no centro da placa (em relação ao plano perpendicular ao eixo da ferramenta, XY) e na coordenada Z do topo das protusões.

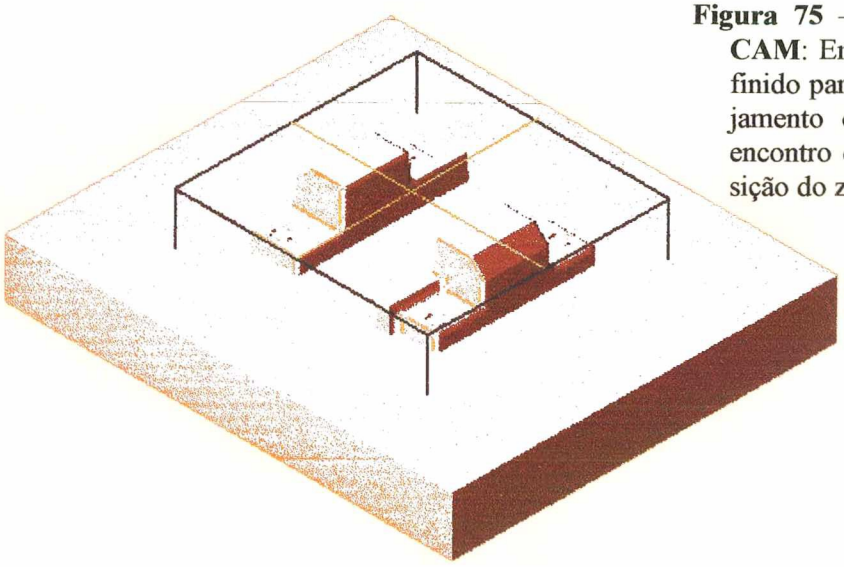


Figura 75 – Modelo da placa-macho no CAM: Em azul, o bloco de usinagem definido para o CAM (ver passo 3 do planejamento do desbaste no item 6.4.2); o encontro das linhas amarelas marca a posição do zero-peça

6.3.4 INTERPRETAÇÃO DOS QUADROS SISTEMATIZADORES

Para facilitar o entendimento de quais opções/ações foram selecionadas em cada um dos quadros sistematizadores deste exemplo de aplicação, os fatores de decisão são mostrados em cores diferentes, que representam os diferentes pesos que lhes foram atribuídos.

Fatores referentes a uma característica geométrica (do modelo) são mostrados em verde

quando se considerou tal característica como predominante ou constituinte de uma parte considerável da geometria global do modelo (ou da região selecionada para uma determinada operação). Em situações em que se considerou que o modelo apresenta regiões com tal tipo de geometria, mas em quantidade ou extensão menos expressivas, o fator é apresentado em azul. Se o modelo não possui tal geometria ou se sua extensão ou quantidade tenha sido considerada desprezível, em relação às demais, o fator é mostrado em preto. Porém, caso a característica geométrica, isoladamente, impedisse ou não recomendasse uma determinada ação, o fator se apresenta em vermelho.

Quando o fator de decisão é relativo a requisitos ou características tecnológicas (da remoção de material, do acabamento superficial, da ferramenta, do tempo de usinagem ou do *software*), a interpretação deve ser semelhante. Porém, ao invés de levar em conta "quantidades", o fator foi avaliado e lhe foi atribuído um determinado grau de importância. Assim, requisitos ou características que tenham sido consideradas fundamentais são mostrados em verde enquanto os que não recomendavam ou impediam uma determinada ação, aparecem em vermelho. Em preto são mostrados fatores considerados pouco relevantes à programação em questão e, em azul, aqueles que são importantes, mas em menor grau do que os apresentados em verde.

A opção/ação recomendada em cada quadro orientativo, de acordo com os pesos atribuídos pelo programador a cada fator de decisão, é mostrada em verde.

6.4 DESENVOLVIMENTO PASSO A PASSO DA PROGRAMAÇÃO

6.4.1 ESBOÇO DA SEQÜÊNCIA DE OPERAÇÕES

Pelas características da peça e do modelo do molde, visualizado na tela do CAM, a idéia inicial foi de que operações de pré-acabamento deveriam ser necessárias, assim como mais de um programa de acabamento. Sendo o valor do menor raio interno da geometria igual a 5 mm, as ferramentas para as operações de acabamento das protusões deveriam ter um diâmetro máximo de 10 mm. Como o restante da geometria apresenta muitas áreas propícias ao emprego de fresas maiores, esta condição fortaleceu ainda mais a idéia da realização de operações de pré-acabamento ou, pelo menos, de um programa de acabamento adicional, específico para as regiões com raios pequenos.

Portanto, a seqüência inicialmente esboçada indicou um desbaste geral com uma fresa de diâmetro grande (em relação às geometrias do modelo), operações de pré-acabamento e programas de acabamento, com fresas de diâmetros pequenos, iguais ou menores do que 10 mm. Todavia, é conveniente ressaltar que estas operações estão sujeitas a modificações, de acordo com o desenvolvimento passo a passo do planejamento de cada operação, através das orientações e quadros sistematizadores das principais tomadas de decisão, conforme será observado posteriormente.

6.4.2 PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DO DESBASTE

1) PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES

De acordo com as proposições do capítulo 5, o primeiro passo do planejamento da programação do desbaste foi uma série de decisões quanto à uniformização do sobrematerial para acabamento, a utilização de programas de pré-acabamento e ao número de programas de desbaste.

O quadro 11, abaixo, foi empregado para sistematizar e auxiliar a tomada de decisão quanto à uniformização do sobrematerial.

UNIFORMIZAÇÃO DO SOBREMATERIAL	
uniformizar	***não uniformizar***
sobrematerial maior do que a ferramenta de acabamento pode remover em uma só passada	**a espessura do sobrematerial pode ser removida pela ferramenta de acabamento em um único passe**
variação contínua do esforço de corte desgasta demasiadamente a ferramenta e/ou prejudica acabamento superficial	**a variação esforço de corte pouco desgasta a ferramenta e/ou prejudica acabamento superficial**
desgaste da ferramenta é mais importante que os tempos de usinagem e programação	**desgaste da ferramenta é menos importante que os tempos de usinagem e programação**

Quadro 11 – Emprego do quadro sistematizador 1 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"

Embora as ferramentas de desbaste e de acabamento ainda não tivessem sido escolhidas, a análise preliminar da geometria da peça permitiu observar que os raios internos mínimos da peça (5 mm) são muito pequenos em relação às suas dimensões principais, ficando claro que a ferramenta de desbaste deixaria um sobrematerial nestas regiões muito superior ao que a ferramenta de acabamento (10 mm no máximo) seria capaz de remover. Além disso, como foi considerado que a

variação contínua do esforço de corte, devido a um sobrematerial irregularmente distribuído pela superfície da peça, poderia prejudicar o acabamento superficial final (embora este fator fosse de menor importância que o anterior), o quadro 11 indicou a **uniformização do sobrematerial** para a operação de acabamento.

Com o auxílio do quadro 12, foi tomada a decisão de se **utilizar programas de pré-acabamento** para uniformização de espessura do sobrematerial sobre a peça e limpeza dos raios de canto, de forma que a ferramenta de acabamento pudesse, em um único passe, produzir um acabamento superficial adequado.

USO DE PRÉ-ACABAMENTO	
usar	*não usar*
sobrematerial p/ acabamento deve ser uniforme	sobrematerial p/acabamento pode ser irregular
geometria complexa	geometria simples
superfícies pouco inclinadas	paredes verticalizadas
muita variação de inclinação das superfícies	pouca variação de inclinação das superfícies
curvaturas acentuadas	poucas curvaturas
cantos internos são vivos ou têm pequenos raios	cantos internos têm raios grandes
tempo de desbaste não precisa ser minimizado	tempo de usinagem deve ser minimizado
material nos cantos não será removido por EDM	material nos cantos será removido por EDM
tempo de usinagem com ferramenta menor é maior do que o tempo de desbaste com ferramenta maior + tempo de pré-acabamento	tempo de usinagem com ferramenta menor é menor do que o tempo de desbaste com ferramenta maior + tempo de pré-acabamento

Quadro 12 – Emprego do quadro sistematizador 2 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"

Esta decisão baseou-se não só na necessidade de se uniformizar o sobrematerial, mas também, como mostra o quadro 12, devido às características geométricas da peça (em maior ou menor extensão, conforme explicado nos ítens 5.1.1 e 6.3.4), à não-utilização pré-definida de operações de eletroerosão e à suposição de que o tempo total das operações de desbaste e pré-acabamento não ultrapassaria o tempo de uma operação de desbaste com uma ferramenta cujo diâmetro (menor) pudesse uniformizar o sobrematerial para o acabamento.

Finalizando este passo do planejamento da programação, seguiu-se a indicação do quadro 13, ou seja, foi decidido realizar **apenas um programa de desbaste**, para todo o modelo. Tal decisão foi baseada em três fatores principais:

- As duas cavidades do molde são idênticas (no quadro foi considerado como se o molde tivesse apenas uma cavidade, pois ambas moldam o mesmo produto);
- Foi considerado que as regiões da peça poderiam ser desbastadas por uma mesma estratégia e com uma mesma ferramenta, sem que o tempo desta operação fosse (supostamente) maior do que os tempos somados de vários programas diferentes, cada qual empregando uma determinada ferramenta/estratégia para cada região geometricamente diferenciada do modelo;
- Como já havia sido definida a programação de um pré-acabamento, este possibilitaria o uso de uma ferramenta cujo diâmetro e, conseqüentemente, a taxa de remoção de material, fossem maiores do que para uma ferramenta que conseguisse, já no desbaste, usinar todas as geometrias do modelo sem deixar um sobrematerial irregularmente distribuído.

NÚMERO DE OPERAÇÕES DE DESBASTE	
desbaste único de todo o modelo	***desbastes localizados por região do modelo***
peça possui uma única cavidade	**peça possui cavidades de dimensões muito diferentes**
tempo de desbaste em única operação com a ferramenta para menor região é menor do que o total das operações com ferramentas selecionadas por região	**tempo de desbaste em única operação com ferramenta para menor região é maior do que o total das operações com ferramentas selecionadas por região**
todas as regiões do modelo apresentam geometria que pode ser desbastada pela mesma estratégia	**regiões do modelo apresentam geometrias muito diferentes, que seriam melhor desbastadas por estratégias diferentes**
haverá pré-acabamento posterior	**não haverá pré-acabamento posterior**
detalhes sofrerão operação de EDM posterior	**detalhes não sofrerão operação de EDM posterior**
geometria com inclinação/curvatura constantes	**geometria com grandes variações na inclinação/curvatura**

Quadro 13 – Emprego do quadro sistematizador 3 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"

2) ESCOLHA DA FERRAMENTA

Baseado nas características geométricas da peça, nas já definidas uniformização do sobrematerial e programação de pré-acabamento, bem como na importância atribuída a uma alta taxa

de remoção de material, o quadro sistematizador 14 indicou o **emprego de uma fresa toroidal**.

DETERMINAÇÃO DO TIPO DE PONTA DA FERRAMENTA		
cilíndrica	*toroidal*	*esférica*
fêmeas e machos em geral	fêmeas e machos em geral	bolsões com área pequena
geometrias simples	superfícies complexas	superfícies complexas
superfícies sem/pouca curvatura	superfícies com muita curvatura	superfícies com muita curvatura
geometrias planas	geometrias planas	peça sem geometrias planas
geometrias com inclinação entre 85° e 90°	geometrias com inclinação entre 1° e 15°	geometrias com inclinação entre 15 ° e 85°
cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou bases de protusões e não pretende-se usar pré-acabamento	raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões ou bases de protusões	raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões bases de protusões
taxa de remoção de material deve ser maximizada	taxa de remoção de material é importante	taxa de remoção de material tem importância secundária
uniformização do material é menos importante que a taxa de remoção de material	uniformização do sobrematerial é pretendida	maximizar uniformização do sobrematerial com desbaste em 3 eixos
pré-acabamento planejado	pré-acabamento planejado ou não	pré-acabamento não planejado

Quadro 14 – Emprego do quadro sistematizador 4 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"

Consultando o manual de ferramentas, as únicas fresas toroidais de insertos intercambiáveis disponíveis eram as de diâmetro 24, 30 e 52 mm, todas com insertos redondos RPHT. A fresa de 52 mm foi de início descartada por ser muito grande em relação à geometria da peça. Para um sobrematerial de 0,5 mm para a operação de pré-acabamento, a fresa de 30 mm deixaria 10.6 mm de material neste raio enquanto a fresa de 24 mm, apenas 8,0 mm (foi usada a equação 3). Com esta espessura de material no canto, um pré-acabamento com uma fresa de diâmetro 10 mm poderia deixar um sobrematerial constante e idêntico ao sobrematerial deixado no restante da peça. Assim, foi preferida uma menor taxa de remoção de material em favor do uso de uma ferramenta menor para o pré-acabamento, com raio igual ao mínimo raio de canto da peça.

O valor da altura da fresa não é requerido pelo sistema A para a geração de trajetórias, mas deve ser definido para informar ao operador da máquina ou ajustador como montá-la. A altura máxima (fechamento-topo do bloco) é de 42 mm. Como todas as operações se dão na região dos machos, afastadas dos elementos de fixação, a altura dos elementos de fixação não é importante. Este tipo de ferramenta consiste em um cabeçote com dois insertos, montado em um suporte. Tal

conjunto tem uma altura total de 100 mm e uma altura livre máxima de 70 mm, a qual excede os 55-60 mm necessários para evitar colisões (já considerando um valor de segurança). Assim, a altura livre foi definida em 60 mm (altura do gume somado ao comprimento da haste da ferramenta externo ao elemento de fixação no cone da máquina). A tabela 15 resume os parâmetros geométricos e de corte definidos para a ferramenta selecionada.

parâmetros relativos à ferramenta						
dados geométricos			**dados de corte**			
diâmetro	*raio da ponta*	*altura livre*	*rotação*	*avanço de corte*	*avanço de penetração*	*avanço rápido*
24 mm	0,4 mm	60 mm	1870 rpm	440 mm/min	100 mm/min	6.000 mm/min

Tabela 15 – *Carcaça*: parâmetros relativos à ferramenta de desbaste

3) DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE USINAGEM

Conforme o projeto do molde, sua superfície de fechamento deve ser um ressalto retangular restrito à região dos machos, 0,1 mm mais alto do que o restante da base da placa, a qual será posteriormente usinada por um programa NC elaborado pelo próprio programador da máquina-ferramenta.

Uma vez que, no sistema A, o único modo de limitar o campo de desbaste se dá através da criação de um bloco de material bruto, foi criado um bloco retangular cujos lados observassem uma distância mínima de 20 mm do contorno da geometria dos machos (de acordo com o projeto do molde). A altura máxima do bloco foi definida como sendo a altura do topo dos machos, pois o bloco já foi previamente esquadrejado e deixado sem sobrematerial no topo.

O bloco definido para esta operação foi mostrado na figura 75, e suas dimensões são apresentadas na tabela 16, conforme os parâmetro requisitados pelo sistema A.

eixo	**dimensões do bloco de material bruto do *software*** *máximo (mm)*	*mínimo (mm)*
Z	0,0	-50,0
X	+99,0	-99,0
Y	+94,0	-94,0

Tabela 16 – *Carcaça*: parâmetros relativos ao bloco programado para o desbaste

4 E 5) ESPECIFICAÇÃO DE SOBREMATERIAL E TOLERÂNCIA

Estes dois valores foram especificados diretamente seguindo as recomendações propostas no capítulo 5 e são mostrados na tabela 17.

	desbaste	*pré-acabamento*
sobrematerial (mm)	0,5	0,2
tolerância (mm)	0,1	0,05

Tabela 17 – *Carcaça*: sobrematerial e tolerância para desbaste e pré-acabamento.

6) SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA DE DESBASTE

O sistema A oferece duas estratégias específicas para desbaste, *AREA CLEARANCE_RASTER* e *AREA CLEARANCE_OFFSET*, que produzem, respectivamente, trajetórias de *varredura em zigue-zague* e *varredura em espiral*. Estas duas opções foram avaliadas de acordo com o quadro 15, que exclui a estratégia de desbaste em *3 eixos por patamar*, pelo fato de que a mesma não é oferecida pelo sistema A.

A escolha recaiu sobre a estratégia de **varredura em espiral**, segundo os fatores de decisão que foram considerados como relativos às características geométricas do molde e aos requisitos de processo. Além disso, testes realizados com a estratégia de varredura em zigue-zague, não se demonstraram eficientes, pois mesmo com o uso das opções de perfilamento complementar dos contornos, as trajetórias geradas resultaram num excesso de retrações e entradas com o topo da ferramenta sobre o material, além de um tempo de usinagem 50% maior (o sistema A pode apresentar estes indicadores logo após a geração das trajetórias, mesmo sem a simulação gráfica). Estes testes, por comparação através dos mesmos indicadores, confirmaram a indicação da varredura em espiral, obtida no quadro 15.

SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA GLOBAL PARA OPERAÇÕES DE DESBASTE		
varredura em zigue-zague	*varredura em espiral*	*3 eixos por patamar*
	machos, em geral	
	fêmeas sem ilhas, em geral	
bolsões grandes	bolsões grandes	bolsões pequenos
superfícies com geometria pouco complexa	superfícies com geometria pouco complexa	superfícies com geometria complexa
poucas superfícies com curvaturas acentuadas	poucas superfícies com curvaturas acentuadas	muitas superfícies com curvaturas acentuadas
muitas superfícies com muita inclinação	muitas superfícies com muita inclinação	poucas superfícies com pouca inclinação
modelo apenas com paredes verticais planos horizontais	modelo apenas com paredes verticais planos horizontais	superfícies com inclinações muito variadas
contornos dos patamares são convexos e sem ilhas	contornos dos patamares são irregulares	contornos dos patamares são irregulares
ilhas com mesma dimensão e posicionamento assimétrico	ilhas com tamanhos irregulares e posicionamento assimétrico	ilhas com tamanhos irregulares e posicionamento assimétrico
foi planejado o uso de pré-acabamento	foi planejado o uso de pré-acabamento	não foi planejado o uso de pré-acabamento
sobrematerial não precisa ser uniformizado pelo desbaste	sobrematerial não precisa ser uniformizado pelo desbaste	sobrematerial deve ser uniformizado pelo desbaste
minimização das retrações da ferramenta tem importância secundária ✠	retrações da ferramenta devem ser minimizadas	minimização das retrações da ferramenta tem importância secundária
cortes em cheio devem ser minimizados*	cortes em cheio são permitidos	**
prefere-se o material a usinar sempre à direita da ferramenta (corte predominantemente concordante) ✦	sentido de corte tem importância secundária	**
ferramenta não pode ou não deve usinar com seu topo	ferramenta não pode ou não deve usinar com seu topo	ferramenta pode usinar com seu topo
deficiências no algoritmo da varredura em espiral (ver fig. 56)	não há deficiências no algoritmo da varredura em espiral (ver fig. 56)	**

*** desde que o perfilamento dos contornos seja realizado durante ou depois da varredura;**
**** acompanha as vantagens e desvantagens do padrão de trajetórias utilizado (zigue-zague ou espiral);**
✦ desde que com trajetórias unidirecionais;
✠ com trajetórias bidirecionais o resultado é melhor do que com trajetórias unidirecionais;

Quadro 15 – Emprego do quadro sistematizador 5 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"

7) DEFINIÇÃO DA ALTURA DOS PATAMARES DE CORTE

Através do quadro 16, foi tomada a decisão de se determinar **diferentes intervalos entre cada patamar de corte**, pois como o próprio quadro mostra, considerou-se que a geometria global

do modelo da placa-macho apresenta consideráveis variações de inclinação, curvatura, bem como geometrias simples (como os planos horizontais e as paredes de 89°) e complexas (encontro de cantos), justificando o emprego de intervalos otimizados para melhor uniformizar a distribuição do sobrematerial para a operação de pré-acabamento.

Quanto aos valores destes intervalos, o quadro 17 indicou ambas as ações, quais sejam, utilizar a profundidade de corte máxima recomendada e utilizar uma profundidade menor, pois houve um equilíbrio entre os fatores de decisão considerados para cada coluna. Embora, inicialmente, isto pareça paradoxal, a indicação do quadro simplesmente refletiu as já referidas variações de inclinação, curvatura e complexidade da geometria, sugerindo que, embora os 3,0 mm de profundidade de corte (máximo) indicados para a ferramenta (dado do manual) pudessem ser empregados, intervalos menores que este valor permitiriam uma distribuição mais uniforme do material.

Assim, de acordo com as indicações dos quadros 16 e 17, determinou-se o posicionamento dos patamares de corte, utilizando, nas regiões em que a geometria é muito inclinada, a profundidade máxima permitida para a ferramenta, enquanto profundidades menores foram especificadas para regiões com menores graus de inclinação, como mostra a figura 76.

Outros planos foram determinados de acordo com o sobrematerial de 5,0 mm para os topos de algumas partes da peça. Devido a isto, a profundidade de corte para os patamares 12, 13 e 14 se tornou superior à recomendada pelo manual de ferramentas. Contudo, o inserto RPHT possui um gume de 4 mm e o valor excedente não ultrapassava 0,07 mm. Em outras palavras, considerou-se que os centésimos de milímetro a mais não deveriam fazer diferença quanto aos esforços de corte. A tabela 18 relaciona os planos de corte especificados com suas respectivas alturas em relação ao zero-peça, bem como a profundidade de corte (ou seja a diferença entre cada dois planos seguidos) da varredura em cada um deles.

DETERMINAÇÃO DOS PATAMARES	
patamares com intervalos otimizados	*patamares constantemente espaçados*
grandes variações na inclinação/curvatura da geometria	inclinação/curvatura constante da geometria
paredes pouco inclinadas / com muita curvatura	paredes muito inclinadas / com pouca curvatura
geometrias complexas	geometrias simples
uniformização do sobrematerial é importante	sobrematerial não precisa ser regularizado
pré-acabamento não planejado	pré-acabamento planejado
minimização do tempo de desbaste é menos importante que a uniformização do sobrematerial	minimização do tempo desbaste é mais importante do que a uniformização do sobrematerial

Quadro 16 – Emprego do quadro sistematizador 6 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça".

VALOR DO INTERVALO ENTRE PATAMARES	
profundidade de corte máxima recomendada	*prof. abaixo do máximo recomendado*
geometrias com pouca curvatura	geometrias com muita curvatura
geometrias com muita inclinação	geometrias com pouca inclinação
geometrias pouco complexas	geometrias complexas
haverá pré-acabamento posterior	pré-acabamento não planejado
sobremetal não precisa ser regularizado	sobremetal deve ser regularizado
tempo de desbaste deve ser minimizado	tempo de desbaste é menos importante que uniformização do sobrematerial
esforço de corte não precisa ser reduzido	esforço de corte deve ser reduzido
ferramenta de corte adequadamente montada	ferramenta muito alta

Quadro 17 – Emprego do quadro sistematizador 7 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"

patamar	*coordenada Z (mm)*	*profundidade de corte (mm)*	*patamar*	*coordenada Z (mm)*	*profundidade de corte (mm)*
1	-3,00	3,00	9	-24,17	2,47
2	-6,00	3,00	10	-26,54	2,37
3	-9,00	3,00	11	-28,85	2,31
4	-12,00	3,00	12	-31,92	3,07
5	-15,00	3,00	13	-34,95	3,07
6	-18,00	3,00	14	-37,98	3,05
7	-19,90	1,90	15	-40,98	3,00
8	-21,70	1,80			

Tabela 18 – Carcaça: patamares de corte para o desbaste: em vermelho, as profundidades de corte maiores do que a planejada; estes pequenos excessos, contudo, estão dentro do permitido pela geometria da ferramenta e não aumentando substancialmente o esforço de corte

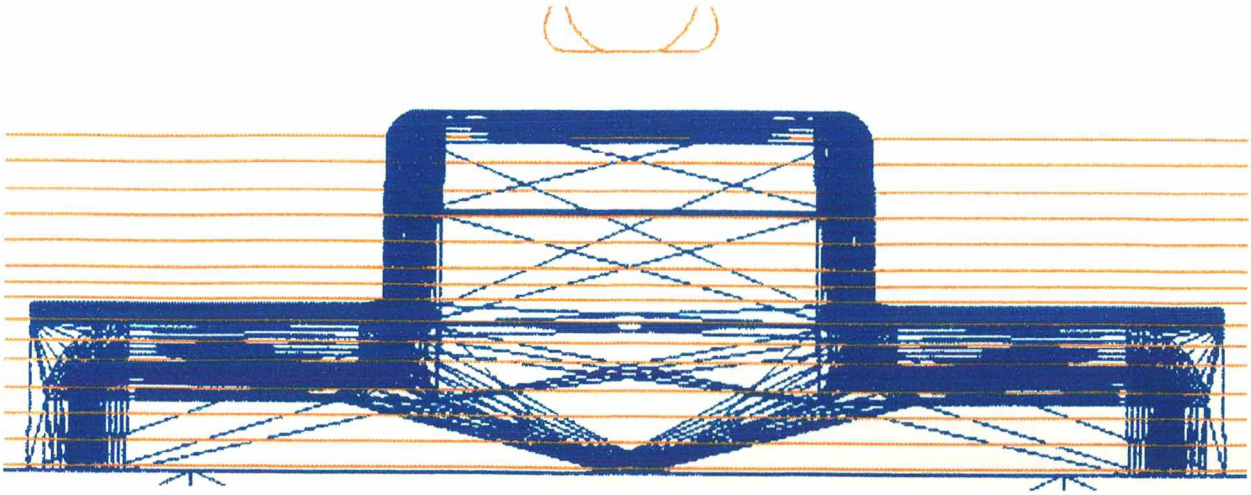
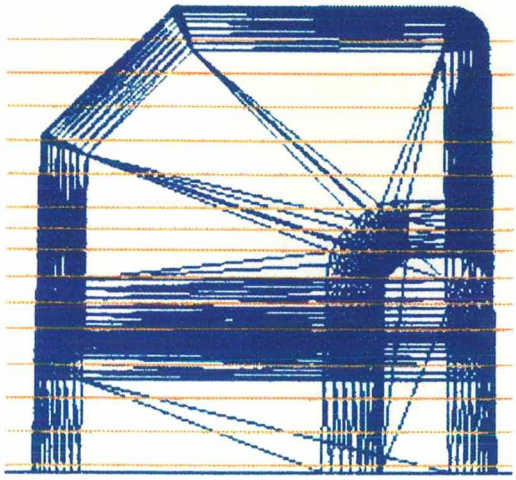


Figura 76 – Patamares de corte selecionados (laranja) **para desbaste:** em relação à duas vistas da geometria (azul) de uma das protusões do molde; o modelo do molde está representado por seu formato *DMT* de malha de triângulos; na parte superior da figura acima mostra-se a ponta ferramenta toroidal de desbaste, para comparação com os intervalos dos patamares e com a geometria do molde



8 E 9) ESPECIFICAÇÃO DO PONTO INICIAL E DOS PLANOS DE SEGURANÇA E INÍCIO

Os **planos de segurança e início** de usinagem foram especificados respectivamente a 35mm acima do topo do bloco (5 mm acima dos elementos e fixação) e a 2 mm acima do topo. De forma a se economizar tempo em cada retração da ferramenta, foi selecionada a opção que habilita planos incrementais (5 mm para segurança e 2 mm para saída). O **ponto inicial** da ferramenta foi determinado no centro do bloco, sobre o plano de segurança, opção *default* do sistema A. As coordenadas dos planos e do ponto inicial em relação ao zero-peça são mostradas na tabela 19.

	bloco		**plano de segurança**		**plano de saída**		**ponto inicial**
	máx	***mín***	***absoluto***	***incremental***	***absoluto***	***incremental***	
Z	0,0	-50,0	+35,0	5,0	+2,0	2,0	+35,0
X	+99,0	-99,0	–	–	–	–	0,0
Y	+94,0	-94,0	–	–	–	–	0,0

Tabela 19 – *Carcaça*: coordenadas do bloco de material bruto e dos planos de posicionamento (em mm).

10) DETERMINAÇÃO DO INCREMENTO LATERAL

O valor **padrão,** indicado pelo quadro sistematizador 18, para a ferramenta toroidal de 24 mm, é o diâmetro do seu topo, ou seja, 16 mm. Contudo, para evitar a formação de pequenas faixas de material não removido, o incremento lateral foi especificado em **15 mm**.

VALOR DO INCREMENTO LATERAL		
acima do padrão (0,75D)	*padrão*	*abaixo do padrão*
corte pode ser tanto concordante quanto discordante	corte pode ter uma pequena parcela discordante	corte deve ser somente concordante (ae ≤ O,5D)
tempo de desbaste deve ser minimizado	tempo de desbaste não precisa ser minimizado	tempo de desbaste não precisa ser minimizado
profundidade de corte pequena	profundidade de corte padrão	profundidade de corte muito grande
esforço de corte não precisa ser reduzido	esforço de corte não precisa ser reduzido	esforço de corte deve ser reduzido
não há risco de áreas não removidas entre passadas paralelas	não há risco de áreas não removidas entre passadas paralelas	risco de áreas não removidas entre passadas paralelas

Quadro 18 – Emprego do quadro sistematizador 8 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça"

11) ESCOLHA DA ORIENTAÇÃO DA VARREDURA

Conforme recomendado no capítulo 5, para usinagem em espiral de protusões, foi escolhida a orientação da movimentação da ferramenta de fora para dentro, para que esta realmente possa se aproximar por fora do bloco e para que se reduza o número de passadas com cortes em cheio.

12) UTILIZAÇÃO DE PASSES ADICIONAIS

Como o sistema A não disponibiliza nenhum tipo de passe adicional para a *varredura em espiral*, esta fase da programação foi ignorada.

13) DEFINIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONEXÃO ENTRE PASSADAS

Este parâmetro não foi inicialmente especificado, pois as passadas da *varredura em espiral* são praticamente contínuas, sem trajetórias de ligação entre passadas e, pela geometria da peça, exigindo pouquíssimas retrações ao plano de segurança, conforme pôde ser confirmado mais tarde, na etapa de verificação (ver item 6.4.4).

14) SELEÇÃO DO TIPO DE ENTRADA DA FERRAMENTA NO BLOCO

Com o auxílio do quadro 19, foi selecionada a **aproximação externa**, com conseqüente entrada normal à parede lateral do bloco, evitando que a ferramenta penetrasse com o topo (mesmo que sua geometria permita penetrações de até 3 mm de profundidade) e economizando tempos secundários. No sistema A, este tipo de movimento é conseguido habilitando-se o parâmetro que obriga a aproximação externa (*APPROACH OUTSIDE*) da ferramenta, pois as opções de entrada oferecidas para estratégias de desbaste incluem somente pré-furos, rampa e penetração axial.

TIPO DE ENTRADA DA FERRAMENTA NO BLOCO			
aproximação externa	*em pré-furos*	*em rampa*	*penetração axial*
machos	fêmeas	fêmeas	fêmeas
esforço de corte na penetração deve gradual	esforço de corte na penetração deve ser minimizado	esforço de corte na penetração deve ser gradual	esforço de corte não precisa ser reduzido
vibrações devem ser evitadas	vibrações devem ser evitadas	vibrações devem ser evitadas	vibrações não precisam ser evitadas
redução dos esforços na penetração não é mais importante que o aumento dos tempos secundários	redução dos esforços na penetração é mais importante que o aumento dos tempos secundários	redução dos esforços na penetração não é mais importante que o aumento dos tempos secundários	redução dos esforços na penetração não é mais importante que o aumento dos tempos secundários
geometria da fresa não permite penetração axial na profundidade desejada	geometria da fresa não permite penetração axial na profundidade desejada	geometria da fresa não permite penetração axial na profundidade desejada	geometria da fresa permite penetração axial na profundidade desejada
cavidade não tem espaço suficiente para a entrada em rampa	cavidade não tem espaço suficiente para a entrada em rampa	cavidade tem espaço suficiente para a entrada em rampa	cavidade não tem espaço para suficiente a entrada em rampa
geometria permite aproximação externa	geometria não permite aproximação externa	geometria não permite aproximação externa	geometria não permite aproximação externa

Quadro 19 – Emprego do quadro sistematizador 9 no planejamento da programação do desbaste do molde para a peça "carcaça".

15) HABILITAÇÃO DA OPÇÃO DE "USINAGEM POR REGIÃO"

Seguindo as recomendações do capítulo 5, determinou-se que esta opção do sistema A seria ativada durante a programação propriamente dita.

6.4.3 EXECUÇÃO DO PROGRAMA DE DESBASTE

Os parâmetros especificados e as opções escolhidas no planejamento da programação do desbaste foram passadas ao sistema através de seus menus, janelas e campos de preenchimento de dados. A tabela 20 apresenta estas informações, inclusive os valores/opções escolhidos para outros parâmetros de programação, que não foram incluídos no planejamento por serem específicos do sistema A e por serem relativos a detalhes de programação que não são objetivo deste trabalho.

parâmetro do sistema A	*valor / opção escolhidos*
bloco de material bruto	**+99,0 a -99,0 / +94,0 a -94,0 / 0,0 a -50,0**
plano de segurança	**z = 35,0 (incremental = 5,0 mm)**
plano de saída	**z = 2,0 (incremental = 2,0 mm)**
ponto inicial	**0,0 / 0,0 / 3,5 (x, y, z)**
zero-peça	**0,0 / 0,0 / 0,0 (x, y, z)**
tipo de ferramenta	**toroidal**
diâmetro da ferramenta	**24 mm**
raio de canto da ferramenta	**4 mm**
altura livre da ferramenta	**60 mm**
rotação	**1870 rpm**
avanço de corte	**440 mm/min**
avanço de penetração	**100 mm/min**
avanço rápido	**6.000 mm/min**
estratégia	**varredura em espiral**
orientação da varredura	**de fora para dentro**
incremento lateral	**15 mm**
sentido de corte	**concordante**
tolerância	**0,1 mm**
sobrematerial	**0,5 mm**
movimento de entrada	**penetração axial**
aproximação externa da ferramenta	**sim**
usinagem por região	**sim**
usinagem da fêmea da geometria	**não**
perfilamento do contorno externo	**não**

Tabela 20 – *Carcaça*: parâmetros e opções do programa inicial de desbaste

6.4.4 VERIFICAÇÃO E CORREÇÃO DO PROGRAMA DE DESBASTE

Através da análise da simulação gráfica no módulo de verificação do sistema A, problemas foram detectados e, então, corrigidos (ver tabela 21):

1) **Falhas na varredura**. Algumas estreitas faixas e pequenos "triângulos" de material não eram removidos a cada patamar; a remoção destas regiões se dava na varredura do pata-

mar imediatamente inferior, aumentando a profundidade de corte nestes locais. A medição da altura nestas regiões, através do visualizador de coordenadas da ferramenta do simulador gráfico, indicou valores de até 0,5 mm, que foi considerado muito alto, pois no patamar seguinte a ferramenta removia 3,5 mm, aumentando os esforços de corte. Com a utilização de um valor menor para o incremento lateral (13,5 mm) minimizou-se o problema, uma vez que a altura das regiões de falha da varredura não ultrapassou 0,06 mm.

2) **Cortes em cheio e cortes com pouca largura.** Apesar da especificação de um incremento lateral, ao redor dos contornos mais internos o algoritmo gerou várias passadas em que todo o diâmetro da ferramenta era utilizado para o corte. Em outras passadas, o problema foi o contrário, pois a ferramenta removia uma largura de material muito inferior ao incremento programado, aumentando o tempo de usinagem. Para resolver estes problemas tentou-se, por ordem, inverter o sentido de desenvolvimento das trajetórias (orientação da varredura), desativar a usinagem por região, ativar a opção de perfilamento do contorno externo, diminuir tolerância de usinagem e diminuir gradativamente o incremento lateral. Porém, em todos os testes realizados, a simulação gráfica mostrou que o problema se mantinha ou aumentava. Assim, a programação original foi mantida, pois embora os cortes em cheio pudessem acelerar o desgaste da ferramenta, não inviabilizariam a usinagem.

3) **Cortes discordantes.** Além dos cortes em cheio (metade do corte é concordante e a outra metade discordante), em algumas trajetórias a ferramenta usinou com o material à esquerda. Testes semelhantes aos descritos no parágrafo anterior foram realizados, mas, da mesma forma, não tiveram sucesso em resolver ou amenizar o problema. Porém, assim como para os cortes em cheio, devido à robustez da ferramenta, estes problemas não justificariam o uso de estratégias de zigue-zague, pois estas aumentariam em demasia o tempo da usinagem. Portanto, novamente, manteve-se a programação inicial.

4) **Patamares ignorados.** Todo o patamar mais baixo (15), bem como algumas regiões nos patamares número 8 e 10, foram ignorados pela ferramenta, não havendo remoção de material. Isto ocorreu porque a distância do patamar até a geometria estava abaixo ou muito próxima (acima da tolerância, 0,1 mm) do sobrematerial especificado. Diminuindo-se em um

décimo de milímetro a espessura do sobrematerial, o problema foi resolvido para os patamares 8 e 10. Para o patamar 15, porém, o problema se manteve, obrigando a elevação de sua coordenada Z em 0,1 mm. Este aumento do sobrematerial, contudo, não foi considerado como relevante, do ponto de vista do aumento do esforço de corte.

5) **Penetração axial com o topo.** Por motivos desconhecidos, a aproximação externa não foi respeitada, e a ferramenta penetrou axialmente no bloco. A investigação sobre as possíveis causas deste problema, que poderiam ir desde uma deficiência do próprio sistema até a falta do domínio de operação do mesmo, não levou a nenhuma conclusão. Desta forma, procurou-se uma forma de contornar o problema, com o uso de uma opção de edição dos movimentos de entrada, que criou dois movimentos: a) descida da ferramenta do plano de segurança até a altura do patamar, por fora do bloco, em velocidade de avanço de penetração axial; b) avanço da ferramenta normalmente à parede lateral do bloco, em z constante, por um distância programada, executado em velocidade de avanço de corte. O valor da distância do eixo do movimento de descida até o contorno mais externo da geometria a ser usinada foi fixado em 140 mm após varias tentativas insatisfatórias com valores menores, começando por 60 mm (valor correspondente à maior distância entre a geometria e o limite do bloco somada ao diâmetro da fresa).

problema	tentativas de solução	resultado	ação (alteração programada)
falhas na varredura	**diminuição do incremento lateral**	**problema minimizado**	**incremento reduzido p/ 13,5 mm**
cortes em cheio e cortes com pouca espessura	**inversão da orientação da varredura; diminuição da tolerância; ativação da opção *perfilamento dos contornos externos*; desativação da opção *usinagem por região; diminuição do incremento lateral***	**problema piorado**	**nenhuma**
cortes discordantes	**inversão da orientação da varredura; diminuição da tolerância;**	**problema piorado**	**nenhuma**
patamares 8 e 10 ignorados	**diminuição do sobrematerial**	**problema resolvido**	**sobrematerial diminuído para 4,9 mm**
patamar 15 ignorado	**diminuição do sobrematerial; aumento na altura do patamar**	**problema resolvido**	**altura do patamar aumentada para -40,95 mm**
penetração com o topo	**edição manual do movimento**	**problema resolvido**	**entrada posicionada a 140 mm do contorno mais externo da peça**

Tabela 21 – *Carcaça:* resolução dos problemas encontrados no programa de desbaste

6.4.5 RESUMO DOS PARÂMETROS DO PROGRAMA FINAL DE DESBASTE

Uma vez que entre os parâmetros corrigidos estavam incluídos tolerância e sobrematerial, o sistema A recalculou o *offset* da malha de triângulos e suas interseções com os planos de corte (para geração dos contornos de cada patamar), para, então, gerar as trajetórias finais para o novo programa de desbaste. Após nova verificação, os parâmetros/opções mostrados pela tabela 22 tornaram-se definitivos, assim como o programa de desbaste gerado.

parâmetro do sistema A	*valor / opção escolhidos*
bloco de material bruto	+99,0 a -99,0 / +94,0 a -94,0 / 0,0 a -50,0
plano de segurança	z = 35,0 (incremental = 5,0 mm)
plano de saída	z = 2,0 (incremental = 2,0 mm)
ponto inicial	0,0 / 0,0 / 3,5 (x, y, z)
zero-peça	0,0 / 0,0 / 0,0 (x, y, z)
tipo de ferramenta	toroidal
diâmetro da ferramenta	24 mm
raio de canto da ferramenta	4 mm
altura livre da ferramenta	60 mm
rotação	1870 rpm
avanço de corte	440 mm/min
avanço de penetração	100 mm/min
avanço rápido	6.000 mm/min
estratégia	varredura em espiral
orientação da varredura	de fora para dentro
incremento lateral	13,5 mm
sentido de corte	concordante
tolerância	0,05 mm
sobrematerial	0,49 mm
movimento de entrada	penetração com o topo
aproximação externa da ferramenta	sim
tipo de entrada	axial, estendida em 140 mm p/ fora do bloco
usinagem por região	sim
usinagem da fêmea da geometria	não
perfilamento do contorno externo	não

Tabela 22 – *Carcaça*: parâmetros e opções do programa corrigido de desbaste

6.4.6 PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DO ACABAMENTO

1) DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE PROGRAMAÇÃO

Devido às características da aplicação da peça carcaça (peça da indústria automobilística, porém, pertencente a um sistema interno) decidiu-se que as alturas de crista permitidas devem ter os valores geralmente empregados para peças com acabamento de fresa para interiores de peças e que não são admitidas marcas superficiais profundas ou muito grandes em relação à peça.

Desta forma, foi definido que o critério *tecnologia* deve prevalecer sobre o critério *tempo* desde que não provoque aumentos excessivos nos tempos de corte e, principalmente, nos tempos secundários. Ou seja, o critério *tempo* prevalece sobre o *tecnologia* na especificação de parâmetros que proporcionam uma grande redução do tempo da operação em detrimento de apenas um pequeno ganho de qualidade, relativo aos padrões de acabamento superficial e vida de ferramentas adotados preliminarmente.

2) PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES E SELEÇÃO DE ESTRATÉGIAS

A primeira decisão tomada foi a realização de **vários programas de acabamento**, cada qual utilizando uma estratégia mais adequada para cada região do modelo, ao invés de um único programa que utilizasse uma única estratégia para todo o modelo. Esta decisão se justifica com base no tipo de geometria global da placa-macho do molde, pois a mesma apresenta tanto regiões planas quanto paredes quase verticais, tanto superfícies complexas como simples, tanto cantos vivos quanto cantos internos com pequenos raios de arredondamento, além de algumas regiões com grandes variações do grau de curvatura. Desta forma, pressupôs-se que nenhuma das estratégias oferecidas pelo sistema A seria capaz de remover o sobrematerial sobre a superfície do molde de forma eficiente. Esta eficiência, no caso, estaria relacionada com a remoção uniforme de todo o sobrematerial, considerando a altura de crista máxima permitida, em um tempo total de usinagem tido como aceitável pela experiência do programador[2].

A análise visual do modelo geométrico permitiu separar a peça em três grupos de regiões geometricamente semelhantes:

1) **Regiões horizontais planas** (perpendiculares ao eixo da ferramenta de corte): topo das protusões, superfície de fechamento e mais duas áreas em cada protusão;

---

[2] O programador em questão foi o autor deste trabalho.

2) **Regiões com cantos vivos**: contorno da base das protusões, que apresenta superfícies não-tangenciais, com ângulo de 91° (devido ao ângulo de extração);
3) **Regiões inclinadas ou curvadas**: todas as demais regiões, ou seja, diversos raios de arredondamento entre duas superfícies, duas superfícies de forma livre no encontro de três raios de arredondamento (incluindo uma raio de arredondamento variável), paredes verticalizadas com ângulo de extração e um plano inclinado em cada protusão.

A análise da geometria do modelo conjuntamente com a observação das potencialidades das estratégias de usinagem para acabamento e de seleção de áreas a usinar do sistema A, bem como das ferramentas de corte disponíveis, conduziu ao planejamento inicial de quatro programas de acabamento, cada um para uma determinada região do modelo:

1) **Superfície de fechamento** (FEC): separou-se a superfícies de fechamento do restante dos planos horizontais para que um programa diferente, com uma ferramenta maior, pudesse remover mais rapidamente o sobrematerial;
2) **Planos horizontais** (PLA);
3) **Paredes inclinadas e arredondamentos côncavos e convexos** (PAR);
4) **Cantos vivos entre a base da peça e a superfície de fechamento** (CAN).

Baseando-se neste planejamento inicial e nos critérios de programação pré-determinados, observou-se as orientações propostas no capítulo 5 quanto à aplicação de estratégias segundo geometrias básicas, para auxiliar a escolha das estratégias de usinagem em cada programa, conforme é explicado a seguir.

Para os programas **FEC** e **PLA** foi selecionada uma usinagem *por planos paralelos* (ziguezague) bidirecional, cuja movimentação da ferramenta é, no sistema A, é realizada pela estratégia *RASTER PATTERN*. O outro tipo de estratégia recomendada para a usinagem de planos horizontais (ver capítulo 5), uma *projeção de contornos*, foi preterido em virtude da maior dificuldade para seleção da área a usinar[3] e por não diminuir o tempo de corte nem proporcionar uma remoção mais uniforme do sobrematerial.

---

[3] No sistema A existem diversas maneiras de proceder a seleção das áreas a usinar, porém cada estratégia aceita apenas algumas. No caso citado, em relação à seleção das áreas para a estratégia *RASTER PATTERN*, a geração dos contornos para a estratégia de projeção de contornos do sistema seria mais trabalhosa, mais demorada e menos precisa, de-

Para as paredes verticais e regiões inclinadas do modelo, o capítulo 5 recomendou o uso de estratégias de *perfilamento em 2½ eixos* ou de estratégias que gerassem trajetórias "em sobe-e-desce". No sistema A, trajetórias em sobe-e-desce podem ser obtidas pelas estratégias *RASTER PATTERN* ou *PLANE PROJECTION*, mas, para o caso específico da peça a ser usinada, estas estratégias implicariam a geração de programas separados para as paredes verticais, planos inclinados e curvaturas, bem como uma seleção de áreas mais trabalhosa e mais propensa a imprecisões[4]. Além disso, graças à subdivisão dos programas, provavelmente o tempo de usinagem total aumentaria, em relação a um programa único.

Desta forma, a escolha dos movimentos globais da ferramenta de corte para o programa **PAR** recaiu sobre o *perfilamento em 2½ eixos*, obtido, no sistema A, pela estratégia *CONSTANT Z FINISHING*. Optou-se pela programação de trajetórias unidirecionais, de forma a se conseguir um sentido de corte sempre concordante (seguindo recomendações do capítulo 5). Nos programas anteriores (FEC e PLA), no entanto, selecionou-se o *zigue-zague bidirecional*, para evitar as constantes retrações e reentradas da ferramenta.

Finalmente, para o programa **CAN**, foi selecionada a estratégia *PENCIL FINISHING* do sistema A, específica para a remoção do excesso de material em cantos formados por superfícies não tangenciais. A tabela 23 apresenta as estratégias selecionadas para cada programa.

programa	região do modelo	tipo de estratégia	estratégia do sistema A
FEC	***superfície de fechamento***	planos paralelos	*raster pattern*
PLA	***planos horizontais***	planos paralelos	*raster pattern*
PAR	***superfícies inclinadas e curvas***	perfilamento em 2½ eixos	*constant z finishing*
CAN	***cantos vivos***	usinagem de cantos	*pencil finishing*

Tabela 23 – *Carcaça*: estratégias selecionadas para os programas de acabamento

vido ao tipo de geometria do modelo em conjunto com os tipos de parâmetros utilizados pelo sistema A para definilos.

[4] Semelhantemente ao explicado na nota anterior.

3) DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS A USINAR

A seleção das áreas de aplicação para cada estratégia se deu da seguinte forma:

- Programa **FEC** → foi utilizado o parâmetro de edição de áreas *EDIT_BOUNDARY_BY SHALLOW ANGLE = 0*, que gera contornos a partir do cálculo das regiões do modelo com inclinação zero; um bloco de material bruto foi criado para limitar externamente o contorno gerado, de forma a incluir somente a área da superfície de fechamento (ressalto de 1 mm em relação ao restante da placa); após a geração dos contornos, foi ainda necessária a exclusão (através de edição manual) dos contornos das regiões planas dos machos, visto que este programa se destinava somente à usinagem do fechamento;
- Programa **PLA** → foi empregado o mesmo método de seleção de áreas empregado no programa FEC, porém com a exclusão do contorno externo (criado segundo os limites do bloco de usinagem então ativo) para que não fosse reusinada a superfície de fechamento; as usinagens dos planos horizontais dos machos e da superfície de fechamento foram separadas para que se ganhasse tempo com o emprego de uma ferramenta maior para o fechamento, a qual não poderia ser usada para a usinagem dos planos;
- Programa **PAR** → a estratégia selecionada para este programa identifica automaticamente as regiões com inclinação, ignorando os planos horizontais;
- Programa **CAN** → a estratégia escolhida para este programa requer somente a indicação do ângulo máximo entre duas superfícies não-tangenciais para selecionar as áreas a usinar; foi escolhido o valor de 95° (*default* do sistema A) para limitar a aplicação da estratégia aos cantos entre todas paredes com ângulos abaixo deste limite, garantindo a usinagem de todas as regiões com cantos vivos e impedindo a desnecessária reusinagem de outras áreas;

Para modelos com geometrias repetidas, como as duas protusões das placa-macho, o capítulo 5 recomenda que sejam geradas trajetórias para apenas uma das regiões e que estas sejam, então, copiadas, movidas, rotacionadas e/ou espelhadas para as demais regiões idênticas. Contudo, em todos os quatro programas de acabamento, os já descritos recursos do sistema A automaticamente geraram contornos delimitadores para ambas as protusões. Assim, em contradição com o recomendado, o bom senso fez com que fossem geradas trajetórias para ambas as protusões, pois, no caso específico da programação da usinagem desta placa macho pelo sistema A, copiar e mover

as trajetórias de uma protusão para outra resultaria num tempo de programação maior e num ganho de apenas alguns segundos no cálculo das trajetórias.

Quanto à ordem de execução dos programas, a usinagem dos cantos vivos (CAN) deveria ser a última operação, para que a ferramenta removesse uma pequena quantidade de material e produzisse um bom acabamento. A primeira usinagem do fechamento (FEC) deveria, obrigatoriamente, ser anterior à operação de fresamento das superfícies inclinadas e curvas (PAR), para que a ferramenta não penetrasse com seu topo em cheio sobre o material ainda não removido na base da peça. Por motivos semelhantes, era recomendável que a operação de acabamento dos planos (PLA) precedesse a das paredes (PAR). Assim, a ordem inicial de programação FEC, PLAN, PAR e CAN foi selecionada, podendo, porém, ser alterada conforme os resultados da simulação gráfica.

4) ESCOLHA DA FERRAMENTA

Os quadros 20, 21 e 22 foram utilizados para auxiliar a determinação da geometria da ponta das ferramentas para, respectivamente, os programas FEC, PLA e PAR. A indicação recaiu sobre a fresa toroidal para os programas PLA e PAR e sobre a fresa cilíndrica para o programa FEC. Não foi necessário o auxílio de um quadro sistematizador para a decisão quanto à ferramenta para o programa CAN, pois devido ao canto vivo entre a parede das protusões e a superfície de fechamento na base da placa, a escolha de uma fresa de extremidade cilíndrica tornou-se óbvia.

Os diâmetros para as ferramentas dos programas que são responsáveis por deixar os raios internos acabados (ou seja, PLA, PAR e CAN) deveriam, obrigatoriamente, ser iguais ou menores que o dobro destes raios, isto é, 10 mm ou menos. Já o programa FEC, devido à geometria plana horizontal da superfície de fechamento, deveria utilizar uma ferramenta maior, de forma a reduzir o tempo da usinagem. A tabela 24 mostra as ferramentas selecionadas após consulta ao manual de ferramentas e observação das recomendações propostas no capítulo 5.

programa de acabamento	**dados geométricos**				**dados de corte**			
	tipo de ponta / número de arestas	***diâmetro*** mm	***raio da ponta*** mm	***altura livre*** mm	***rotação*** rpm	***avanço de corte*** mm/min	***avanço de penetração*** mm/min	***avanço rápido*** mm/min
FEC	toroidal APKT/ 3	25	0,8	60	1.790	750	180	6.000
PLA	toroidal / 2	10	2,0	60	1.600	290	70	6.000
PAR	toroidal / 2	10	2,0	60	1.600	290	70	6.000
CAN	cilíndrica / 2	10	---	60	1.600	290	70	6.000

Tabela 24 – *Carcaça*: ferramentas e dados de corte selecionados para os programas de acabamento

Embora o quadro 20 tivesse indicado uma ferramenta cilíndrica para o programa FEC, foi selecionada a fresa com insertos APKT com raio de quina de 0,8 mm por não se disponibilizar de fresas cilíndricas com diâmetro superior a 18 mm, com o qual a usinagem teria um tempo desnecessariamente mais alto. Como não havia nenhuma restrição ao uso de um fresa toroidal e o pequeno raio de 0,8 mm pouco aumentaria a quantidade de material a ser removido pelas demais operações de acabamento, optou-se pela fresa toroidal. Como o contorno da base de cada protusão apresenta um raio interno de 5 mm, nesta região qualquer ferramenta com diâmetro maior do que 10 mm deixaria uma quantidade de material maior do que para o restante do contorno, o que poderia representar uma limitação ao tamanho da ferramenta do programa FEC. Contudo este excesso de material seria removido pelo perfilamento das paredes no programa PAR, sem grandes prejuízos. Isto porque com a ferramenta de 25 mm, a quantidade de material deixado no canto corresponde a apenas cerca de 3,2 mm (segundo a fórmula 3), equivalente a 1/3 do diâmetro da fresa do programa PAR.

Para os programas PAR, PLA e CAN foram selecionadas as ferramentas com o maior diâmetro possível que assegurasse a limpeza dos raios internos. A fresa toroidal dos programas PLA e PAR pode, inclusive, ser a mesma ferramenta utilizada no pré-acabamento, caso seu desgaste não prejudique o acabamento superficial da peça nem a precisão dimensional dentro da tolerância admitida.

DETERMINAÇÃO DO TIPO DE PONTA DA FERRAMENTA - PROGRAMA FEC		
esférica	*toroidal*	*cilíndrica*
curvaturas simples ou superfícies de forma livre	**curvaturas simples ou superfícies de forma livre**	**superfícies com geometria prismática s/ curvaturas**
modelo sem planos horizontais	**planos horizontais e inclinações até 15°**	**planos horizontais**
perfilamento em 2½ eixos de superfícies com inclinação intermediária (15°-85°)	**perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas**	**perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas**
raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões bases de protusões	**raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões bases de protusões**	**cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou bases de protusões**
problemas com a usinagem com o centro da fresa esférica são pouco importantes	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**

Quadro 20 – Emprego do quadro sistematizador 10 no planejamento do programa de acabamento da superfície de fechamento

DETERMINAÇÃO DO TIPO DE PONTA DA FERRAMENTA - PROGRAMA PLA		
esférica	*toroidal*	*cilíndrica*
curvaturas simples ou superfícies de forma livre	curvaturas simples ou superfícies de forma livre	superfícies com geometria prismática s/ curvaturas
modelo sem planos horizontais	**planos horizontais e inclinações até 15°**	**planos horizontais**
perfilamento em 2½ eixos de superfícies com inclinação intermediária (15°-85°)	perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas	perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas
raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões ou bases de protusões	**raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões ou bases de protusões**	**cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou bases de protusões**
problemas com a usinagem com o centro da fresa esférica são pouco importantes	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**

Quadro 21– Emprego do quadro sistematizador 10 no planejamento do programa de acabamento dos planos horizontais

DETERMINAÇÃO DO TIPO DE PONTA DA FERRAMENTA - PROGRAMA PAR		
esférica	*toroidal*	*cilíndrica*
curvaturas simples ou superfícies de forma livre	**curvaturas simples ou superfícies de forma livre**	**superfícies com geometria prismática s/ curvaturas**
modelo sem planos horiz.	**planos horizontais e inclinações até 15°**	**planos horizontais**
perfilamento em 2½ eixos de superfícies com inclinação intermediária (15°-85°)	**perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas**	**perfilamento em 2½ eixos de paredes muito inclinadas**
raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões ou bases de protusões	**raios de arredondamento entre paredes e fundo de bolsões ou bases de protusões**	**cantos vivos entre paredes e fundos de bolsões ou bases de protusões**
problemas com a usinagem com o centro da fresa esférica são pouco importantes	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**	**usinagem com o centro da fresa esférica é problemática**

Quadro 22 – Emprego do quadro sistematizador 10 no planejamento do programa de acabamento das paredes e curvaturas. Embora o quadro indique duas opções de ferramenta, optou-se pelo emprego de uma fresa toroidal, para que a utilização da mesma ferramenta do programa anterior (PLA) evitasse uma desnecessária troca de ferramenta na máquina

5) DEFINIÇÃO DO INTERVALO ENTRE PASSADAS

Conforme orientação do capítulo 5 em relação à usinagem de planos horizontais com estratégias de planos paralelos, o incremento para o programa PLA foi estabelecido em 10% do diâmetro da ferramenta, ou seja, 1 mm. Para o programa FEC, porém, decidiu-se pela programação de um intervalo maior do que os 10% recomendados, tendo em vista a diminuição do tempo de usinagem da extensa superfície de fechamento. Portanto, como foi também considerado que a superfície de fechamento poderia ter um acabamento superficial inferior às superfícies da cavidade, programou-se um incremento maior, de 0,4 mm. Um valor maior do que este resultaria numa maior quantidade de material deixado na base das protusões, o que poderia trazer prejuízos à usinagem posterior, realizada pelo programa CAN.

Para o programa PAR, foi determinada uma altura de crista máxima permitida de 0,005 mm, conforme indicação da tabela 14 (capítulo 5) para acabamento de fresa convencional de partes internas de peças injetadas, ficando, portanto, o algoritmo do CAM encarregado de calcular o incremento lateral a cada nova passada (durante o cálculo das trajetórias, após a programação propriamente dita).

A estratégia empregada no programa CAN gera uma única passada ao longo do contorno dos cantos vivos, não havendo, portanto, incrementos laterais.

A tabela 25 mostra as informações a serem passadas ao sistema A durante a programação propriamente dita.

programa de acabamento	incremento lateral	
	valor direto do incremento	valor segundo a altura de crista máxima
FEC	4 mm	-----
PLA	1 mm	-----
PAR	-----	0,005 mm

Tabela 25 – *Carcaça*: incrementos laterais para as trajetórias de acabamento

6) ESPECIFICAÇÃO DA TOLERÂNCIA

Conforme recomendação proposta no capítulo 5, uma tolerância de 0,01 mm foi especificada para o acabamento, devido ao requisito de acabamento superficial convencional e ao previsível aumento demasiado do tempo de processamento do sistema (ao menos com o *hardware* utilizado) causado por uma tolerância de 0,001 mm.

7) DEFINIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONEXÃO ENTRE PASSADAS

Segundo as recomendações propostas no capítulo 5, selecionou-se movimentos que, segundo a observação do modelo na tela do CAM e a experiência no uso do *software*, fossem seguros (sem risco de colisão) e que promovessem a remoção do sobrematerial sem provocar marcas na superfície acabada da peça.

Assim, para os programas FEC e PLA, que utilizam o mesmo tipo de estratégia, foram definidos movimentos em avanço de corte, perpendiculares às trajetórias, acompanhando a superfície da peça. Para a usinagem das paredes (programa PAR) com um perfilamento em 2½ eixos, preferiu-se um movimento em avanço rápido entre cada patamar, segundo uma linha reta afastada da superfície da protusão, para diminuir o tempo da operação e evitar marcas na peça (ver figura 77).

É importante lembrar que estes movimentos devem ser atentamente verificados durante a simulação gráfica, para que se possa ter certeza quanto a possíveis colisões e excesso de material removido.

8) DETERMINAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE ENTRADA E SAÍDA

De forma a minimizar o esforço de corte, vibrações e possíveis marcas na superfície acabada da peça determinou-se movimentos de entrada com aproximação lateral externa ou por arcos e movimentos de saída segundo arcos suaves (ver figura 77).

A tabela 26 mostra os parâmetros escolhidos para cada programa de acabamento. O parâmetro *distância* se refere ao comprimento de uma linha reta, cujas extremidades são o eixo de descida da ferramenta (cuja ponta estava no plano de segurança) e um ponto de entrada perpendicular à superfície da peça, sendo os valores programados, 14 e 6 mm, iguais ao raios da ferramentas dos respectivos programas, mais um milímetro de segurança.

programas de acabamento	**entrada**			**saída**		
	tipo	***distância ou ângulo***	***raio***	***tipo***	***distância ou ângulo***	***raio***
FEC	aproximação lateral	14 mm	----	arco vertical	90°	25 mm
PLA	aproximação lateral	6 mm	----	arco vertical	90°	10 mm
PAR	arco horizontal	90°	10 mm	arco horizontal	90°	10 mm
CAN	arco vertical	90 °	10 mm	arco vertical	90°	10 mm

Tabela 26 – *Carcaça*: movimentos de entrada e saída para os programas de acabamento

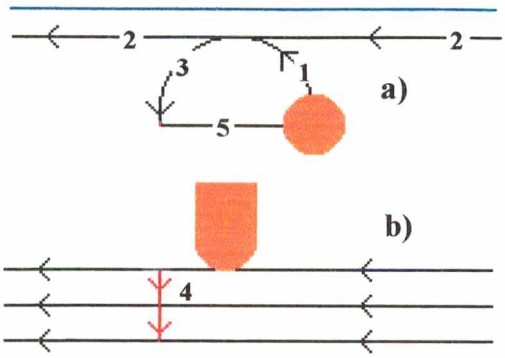


Figura 77 – *Carcaça*: Movimentos de entrada/saída/conexão do programa PAR: a) vista superior, mostrando em azul, parte do contorno do topo de uma das protusões, em preto, as trajetórias em avanço de corte e, em laranja, a ferramenta de corte; **b)** vista lateral de uma das protusões, mostrando, em vermelho, trajetórias em avanço rápido; um arco horizontal (**1**) de raio 10 mm é foi programado para a entrada da ferramenta no sobrematerial da parede da protusão; após o perfilamento do contorno da mesma (**2**), a ferramenta sai segundo outro arco (**3**), move-se para baixo (**4**), até o patamar inferior seguinte (conexão entre passadas) e, com um movimento horizontal (automaticamente gerado pelo CAM), paralelo ao contorno da protusão (**5**) atinge o ponto de início de um novo movimento de entrada

10) ESPECIFICAÇÃO DO PONTO INICIAL E PLANOS DE SEGURANÇA E INÍCIO

As coordenadas empregadas nos programas de desbaste e pré-acabamento não precisam ser alteradas. Durante a programação das operações de acabamento, o sistema A, inclusive, mantém automaticamente ativas as últimas informações quanto a estes parâmetros, ou seja, os valores utilizados nas operações anteriores.

6.4.7 PLANEJAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DO PRÉ-ACABAMENTO

Por coerência com o exposto na seção 5.4, e para simplificação do capítulo[5], esta seção do estudo não apresenta a seqüência de planejamento detalhada passo a passo. Relata-se apenas as operações realizadas e as justificativas para as principais tomadas de decisão.

1) PLANEJAMENTO DAS OPERAÇÕES, SELEÇÃO DAS ESTRATÉGIAS E DEFINIÇÃO DO SOBREMATERIAL

Conforme determinado pelo planejamento das operações de desbaste, o molde em questão deve sofrer operações de pré-acabamento para uniformização da espessura do sobrematerial sobre toda sua superfície. Contudo, decidiu-se por não se realizar este tipo de operação na superfície de fechamento da placa-macho, pois além do sobrematerial de 0,55 mm já estar uniformizado, segundo o proposto pela tabela 13, esta espessura ainda é adequada para a remoção por uma ferramenta de insertos, mais robusta (entenda-se como uma ferramenta maior do que as que serão utilizadas para a remoção das demais áreas), menos suscetível a vibrações e ao desgaste, desde que

[5] Já que a aplicação das orientações propostas no capítulo 5 para as operações de desbaste já foi demonstrada e para as operações de acabamento o será na próxima seção deste capítulo.

se utilize um incremento lateral pequeno para reduzir os esforços de corte e não prejudicar a qualidade do acabamento superficial.

As demais áreas da peça, ou seja, as superfícies horizontais planas, paredes e curvaturas das protusões (machos), deveriam, após o pré-acabamento, possuir sobre si uma espessura de sobrematerial constante, menor do que os 0,5 mm deixados pelo desbaste e maior do que 0,1 mm, segundo a tabela 12. Assim, segundo os valores apresentados pelas tabelas 12 e 13 (capítulo 5), definiu-se um valor de 0,2 mm para o sobrematerial deixado para as operações de acabamento, uma vez que o raio da fresa para as operações de acabamento das superfícies dos machos deve ser igual ou pouco menor do que os mínimos raios internos (5 mm) da geometria

Dentro das estratégias de desbaste e acabamento oferecidas pelo sistema A e considerando as orientações propostas no capítulo 5, determinou-se a utilização de estratégias de planos paralelos e perfilamento em 2½ eixos para, respectivamente, as usinagem dos planos horizontais e das superfícies inclinadas (paredes e arredondamentos), semelhantemente ao planejado para as operações de acabamento destas duas regiões.

A tabela 27 mostra os parâmetros/opções definidos neste passo do planejamento do pré-acabamento.

programa de pré-acabamento	estratégia	sobrematerial p/ acabamento
planos horizontais	planos paralelos em 2½ eixos bidirecional	0,2 mm
paredes e curvaturas	perfilamento em 2½ eixos unidirecional (concordante)	0,2 mm

Tabela 27 – *Carcaça*: estratégias e sobrematerial selecionado para os programas de pré-acabamento.

2) ESCOLHA DAS FERRAMENTAS

Para que se remova o excesso de material nos raios de arredondamento internos de forma a uniformizar a espessura do sobrematerial (0,2 mm) nestas regiões em relação ao restante da peça, a ferramenta selecionada deve ter um diâmetro máximo de 10,2 mm. Desta forma, consultando o manual de ferramentas, encontrou-se como solução a utilização da mesma fresa toroidal de diâmetro 10 mm selecionada para as operações de acabamento das paredes (PAR) e dos planos (PLA), pois sendo as mesmas estratégias escolhidas para usinagem das mesmas geometrias, não

havia motivos para selecionar ferramentas diferentes. A tabela 28 mostra os parâmetros geométricos e de corte das ferramentas escolhidas.

programa de acabamento	dados geométricos				dados de corte			
	tipo de ponta / número de arestas	*diâmetro* mm	*raio da ponta* mm	*altura livre* mm	*rotação* rpm	*avanço de corte* mm/min	*avanço de penetração* mm/min	*avanço rápido* mm/min
paredes	toroidal / 2	10	2,0	60	1.200	210	50	6.000
planos	toroidal / 2	10	2,0	60	1.200	210	50	6.000

Tabela 28 – *Carcaça*: dados geométricos e de corte para as ferramentas de pré-acabamento

3) DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS A USINAR

A delimitação das regiões da peça para aplicação das trajetórias foi realizada exatamente como nos programas de acabamento PAR e PLAN.

4) DEFINIÇÃO DO INTERVALO ENTRE PASSADAS

Para o perfilamento em 2½ eixos das inclinações e curvaturas (paredes) foi definido um incremento em z de 1 mm a cada nova passada. Enquanto no programa PAR de acabamento destas regiões foi utilizado um incremento variável, dependente da altura de crista formada por duas passadas consecutivas, no pré-acabamento optou-se pela definição direta do intervalo, pois este método simplifica a programação e porque as cristas formadas são removidas pela operação de acabamento. As cristas, obviamente, aumentam o sobrematerial, não o deixando perfeitamente uniformizado, o que, porém, não se traduz em problema para a operação de acabamento já que a altura destas cristas é muito pequena (inferior a 0,05 mm).

Devido aos requisitos de acabamento superficial menos exigentes para operações de pré-acabamento, na usinagem dos planos horizontais com a estratégia de planos paralelos (bidirecional) a ferramenta pode incrementar lateralmente um valor maior do que no programa PLA de acabamento. Assim, definiu-se um valor de 3 mm para o incremento lateral a cada passada paralela, equivalente a apenas 30% do diâmetro da ferramenta, assegurando em esforço de corte relativamente baixo, embora maior ao que acontece na respectiva operação de acabamento (PLA).

A tabela 29 esquematiza as decisões tomadas para este passo do planejamento.

programa de pré-acabamento	estratégia	intervalo entre passadas
planos horizontais	planos paralelos em 2½ eixos bidirecional	3,0 mm
paredes e curvaturas	perfilamento em 2½ eixos unidirecional (concordante)	1,0 mm

Tabela 29 – *Carcaça*: intervalo entre passadas para as trajetórias de pré-acabamento

5) ESPECIFICAÇÃO DA TOLERÂNCIA

Determinou-se uma tolerância de usinagem intermediária entre desbaste (0,1) e acabamento (0,01), isto é, 0,05 mm.

6) DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE MOVIMENTOS LOCAIS

Por coerência, os movimentos de entrada e saída, bem como os de conexão entre passadas, repetem os empregados nos programas PAR e PLAN de acabamento.

7) ESPECIFICAÇÃO DOS PLANOS DE SEGURANÇA E INÍCIO E DO PONTO INICIAL

Não houve necessidade de alterar suas coordenadas em relação às utilizadas na programação do desbaste e do acabamento.

6.4.8 EXECUÇÃO DOS PROGRAMAS DE PRÉ-ACABAMENTO

Como ocorrido nas operações anteriores, os parâmetros especificados e as opções escolhidas foram passadas ao sistema, para o cálculo automático das trajetórias. O programa de usinagem dos planos horizontais foi executado antes do programa de usinagem das paredes, da mesma forma que se planejou a execução dos programas de acabamento para as respectivas regiões da peça, e pelos mesmos motivos já expostos na descrição do planejamento destas operações. A tabela 30 apresenta os dados dos programas de pré-acabamento.

parâmetro do sistema A	*valor / opção escolhidos*	
	paredes/curvaturas	*planos horizontais*
bloco de material bruto	**mesmas coordenadas do desbaste dados inalterados**	
plano de segurança		
plano de saída		
ponto inicial		
zero-peça		
tipo de ferramenta	**toroidal**	**toroidal**
diâmetro da ferramenta	**10 mm**	**10 mm**
raio de canto	**2 mm**	**2 mm**
altura livre da ferramenta	**60 mm**	**60 mm**
rotação	**1.200 rpm**	**1.200 rpm**
avanço de corte	**210 mm/min**	**210 mm/min**
avanço de penetração	**50 mm/min**	**50 mm/min**
avanço rápido	**6.000 mm/min**	**6.000 mm/min**
estratégia	*constant z finishing*	*raster pattern*
intervalo 3D	**1 mm**	**3 mm**
intervalo por "scallop"	**não**	**—**
direção das trajetórias	**unidirecional (concordante)**	**bidirecional**
movimento de entrada	**arco horizontal**	*(automático)*
movimento de saída	**arco horizontal**	**arco vertical**
ponto de entrada	*(automático)*	**x e y mínimos**
conexão entre passadas	**sim**	**sim**
ângulo XY das trajetórias	**—**	**0°**
passadas complementares perpendiculares ao ângulo XY	**—**	**não**
usinagem por região	**sim**	**—**
usinagem da fêmea da geometria	**não**	**—**
tolerância	**0,05 mm**	**0,05 mm**
sobrematerial	**0,2 mm**	**0,2 mm**

Tabela 30 – *Carcaça*: parâmetros e opções dos programas de pré-acabamento

6.4.9 VERIFICAÇÃO E CORREÇÃO DOS PROGRAMAS DE PRÉ-ACABAMENTO

Calculadas e apresentadas na tela as trajetórias dos programas de pré-acabamento, verificou-se os resultados através da análise visual da usinagem no simulador gráfico do sistema A e da observação dos indicadores numéricos fornecidos pelo sistema. O único problema visualizado foi uma interferência da fresa toroidal no sobrematerial ainda não removido das paredes, o que poderia danificar a ferramenta, já que o altura da área interferida foi grande (cerca de 20 mm).

Para resolver este problema foi invertida a ordem de geração dos dois programas, ou seja, primeiro procedeu-se com o pré-acabamento das paredes. Com isto, as interferências não mais se registraram, embora na usinagem dos últimos planos de corte, a fresa da usinagem das paredes tenha penetrado 1mm (intervalo entre passadas, ou seja, entre os planos) em cheio no material ainda

não retirado pelo programa de pré-acabamento dos planos horizontais. As figuras 78 e 79 mostram as trajetórias dos programas de pré-acabamento.

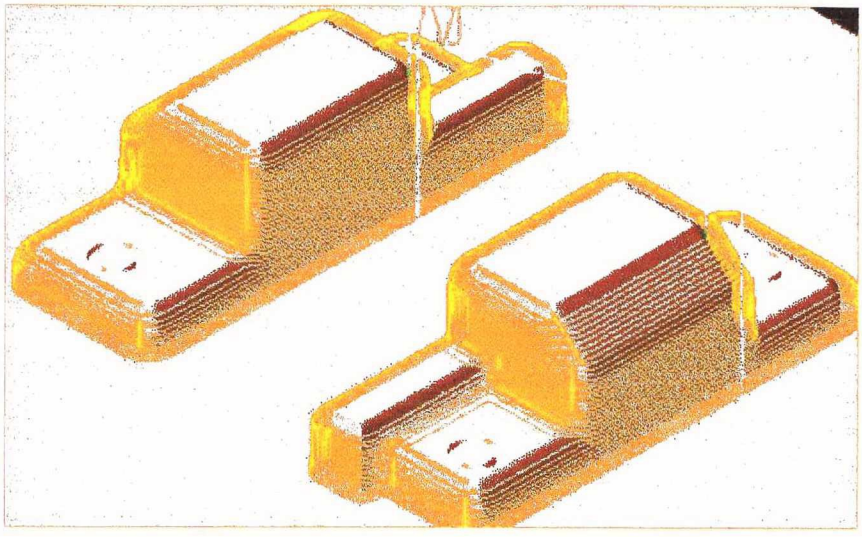


Figura 78 – *Carcaça*: Trajetórias de pré-acabamento das paredes e curvaturas; em vermelho as, trajetórias de posicionamento em avanço rápido

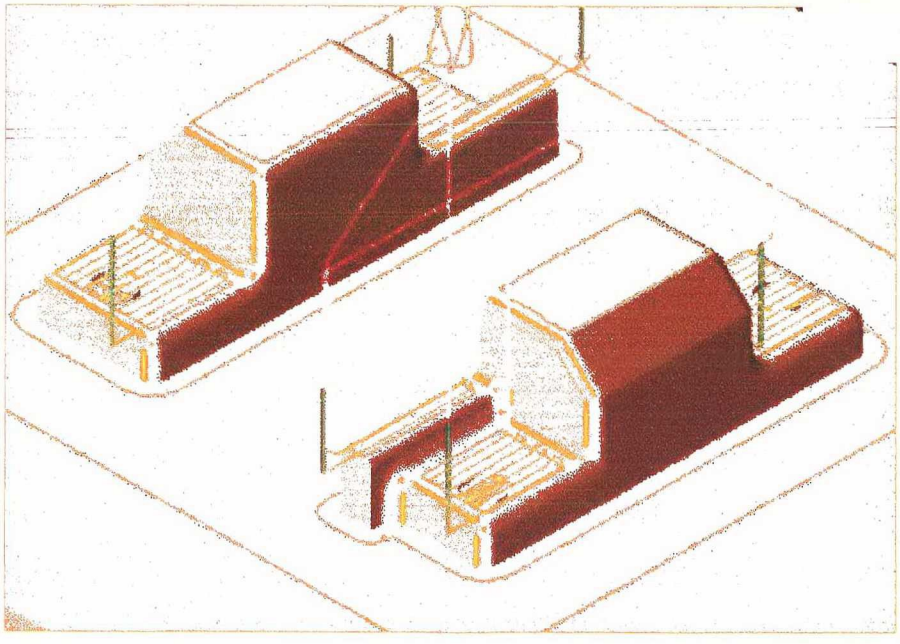


Figura 79 – *Carcaça*: Trajetórias de pré-acabamento dos planos horizontais; os contornos em branco indicam as áreas de aplicação da estratégia, calculadas pelo sistema A e editadas pelo programador

6.4.10 EXECUÇÃO DOS PROGRAMAS DE ACABAMENTO

Da mesma forma como no desbaste, após a etapa de planejamento, os parâmetros especificados e as opções escolhidas foram passadas ao sistema através de seus menus, janelas e campos de preenchimento de dados. A tabela 31 apresenta as informações planejadas e passadas ao sistema para cálculo das trajetórias de acabamento.

parâmetro do sistema A	*valor / opção escolhidos*			
	FEC	*PAR*	*PLA*	*CAN*
bloco de material bruto	**mesmas coordenadas do desbaste / dados inalterados**			
plano de segurança	**mesmas coordenadas do desbaste dados inalterados**			
plano de saída				
ponto inicial				
zero-peça				
tipo de ferramenta	**toroidal**	**toroidal**	**toroidal**	**cilíndrica**
diâmetro da ferramenta	**25 mm**	**10 mm**	**10 mm**	**10 mm**
raio de canto	**0,8 mm**	**2 mm**	**2 mm**	**——**
altura livre da ferramenta	**60 mm**	**60 mm**	**60 mm**	**60 mm**
rotação	**1.790 rpm**	**1.600 rpm**	**1.600 rpm**	**1.600 rpm**
avanço de corte	**750 mm/min**	**290 mm/min**	**290 mm/min**	**290 mm/min**
avanço de penetração	**180 mm/min**	**70 mm/min**	**70 mm/min**	**70 mm/min**
avanço rápido	**6.000 mm/min**	**6.000 mm/min**	**6.000 mm/min**	**6.000 mm/min**
estratégia	*raster pattern*	*constant z finishing*	*raster pattern*	*pencil finishing*
intervalo 3D	**4 mm**	**0, 001 mm**	**1 mm**	**—**
intervalo por "scallop"	**—**	**0,005 mm**	**—**	**—**
direção das trajetórias	**bidirecional**	**unidirecional (concordante)**	**bidirecional**	*(automático)*
movimento de entrada	*(automático)*	**arco horizontal**	*(automático)*	**arco vertical**
movimento de saída	**arco vertical**	**arco horizontal**	**arco vertical**	**arco vertical**
ponto de entrada	**x e y mínimos**	*(automático)*	**x e y mínimos**	*(automático)*
conexão entre passadas	**sim**	**sim**	**sim**	**—**
ângulo XY das trajetórias	**0°**	**—**	**0°**	**—**
passadas complementares	**não**	**—**	**não**	**—**
ângulo máximo do canto	**—**	**—**	**—**	**95°**
usinagem por região	**—**	**sim**	**—**	**—**
usinagem da fêmea da geometria	**—**	**não**	**—**	**—**
tolerância	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**
sobrematerial	**0**	**0**	**0**	**0**

Tabela 31 – *Carcaça*: parâmetros e opções dos programas de acabamento

6.4.11 VERIFICAÇÃO E CORREÇÃO DOS PROGRAMAS DE ACABAMENTO

Com as trajetórias de todos os programas de acabamento geradas (ver figuras 80 a 83), procedeu-se a análise visual da usinagem através do simulador gráfico do sistema A e da observação dos indicadores numéricos fornecidos pelo sistema. Como nenhum problema foi detectado, foram realizados apenas pequenos ajustes nos movimentos de entrada e saída (relativos a parâmetros que controlam a extensão dos movimentos) e nas conexões entre passadas.

A ordenação inicial dos programas (FEC, PLA, PAR, CAN) foi confirmada, pois, tanto através da simulação gráfica quanto pelo verificador de colisões, não foi verificado nenhum tipo de colisão entre a ferramenta e a geometria da peça (com e sem sobrematerial), afastando qualquer suspeita da ferramenta do programa PLA colidir com o sobrematerial ainda não usinado das paredes verticais da peça.

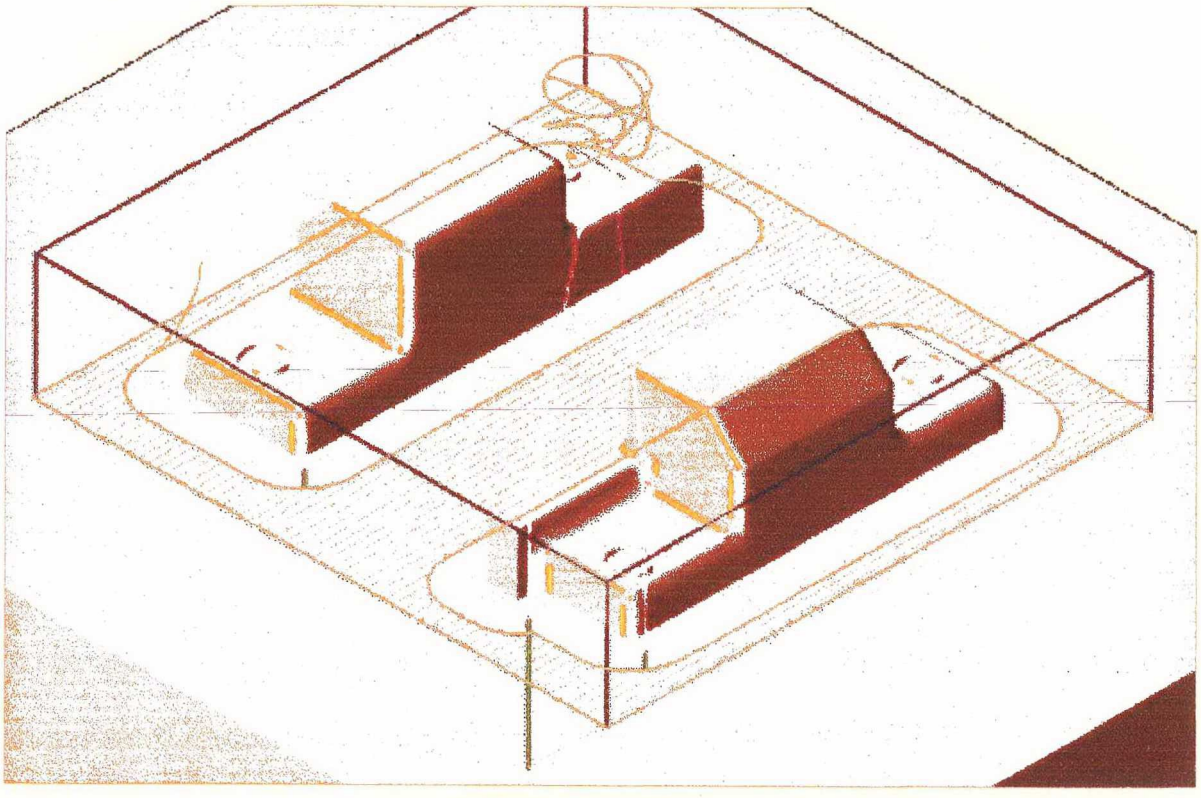


Figura 80 – *Carcaça*: **Trajetórias de acabamento do programa FEC;** em azul o bloco programado, em branco os contornos delimitadores da área automaticamente calculada

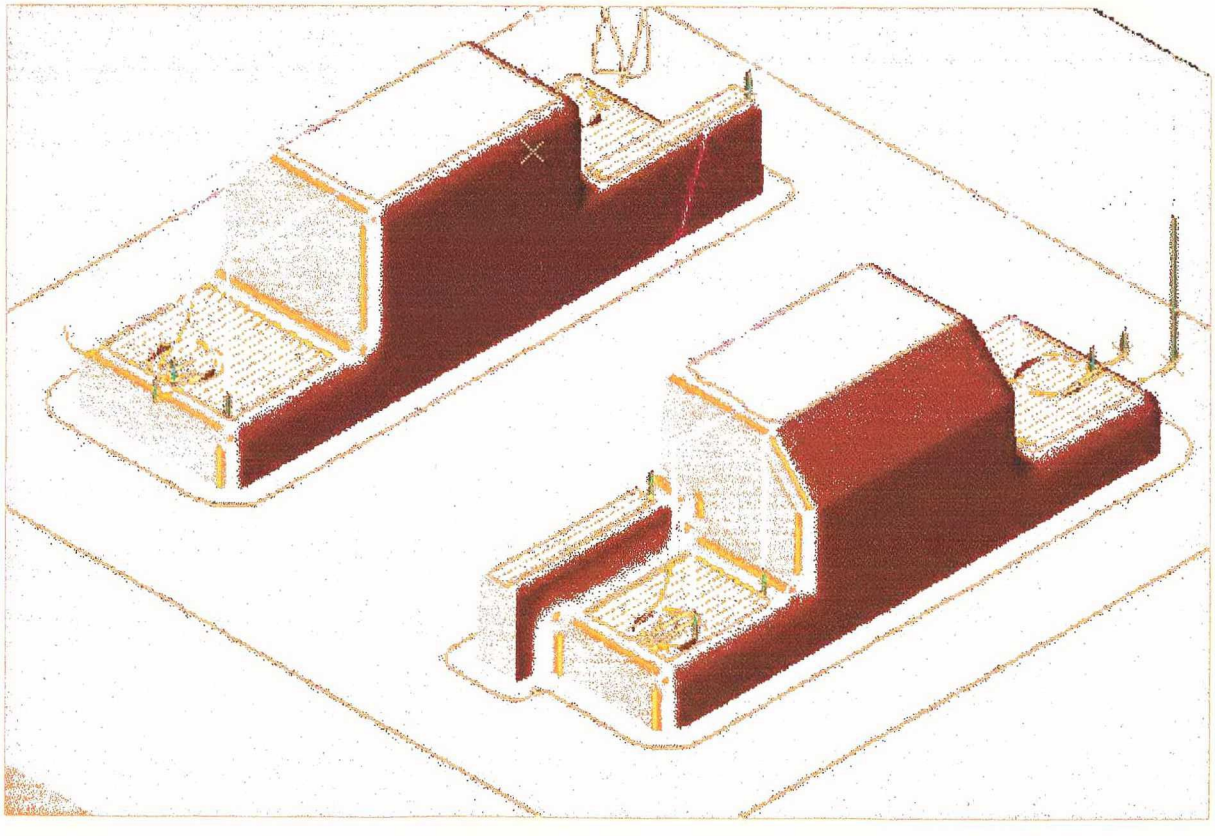


Figura 81 – *Carcaça*: **Trajetórias de acabamento do programa PLA;** em branco os contornos delimitadores das áreas com inclinação igual a zero; as trajetórias do topo das protusões e da base (fechamento) foram editadas e excluídas

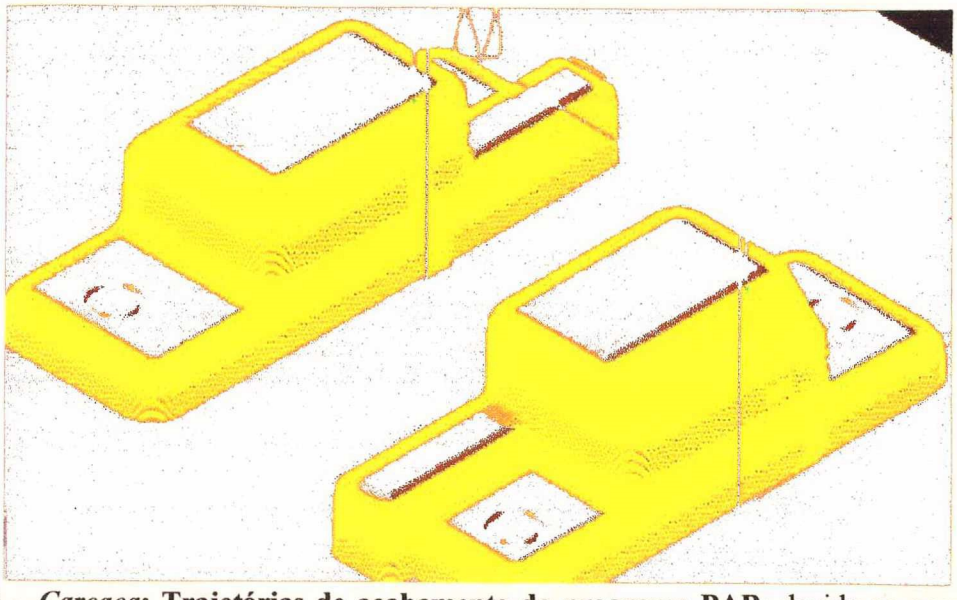


Figura 82 – *Carcaça*: **Trajetórias de acabamento do programa PAR**; devido ao pequeno intervalo entre as passadas, a figura não permite distingui-las, mas mostra as áreas onde foram geradas trajetórias de perfilamento dos contornos da geometria, em 2½ eixos

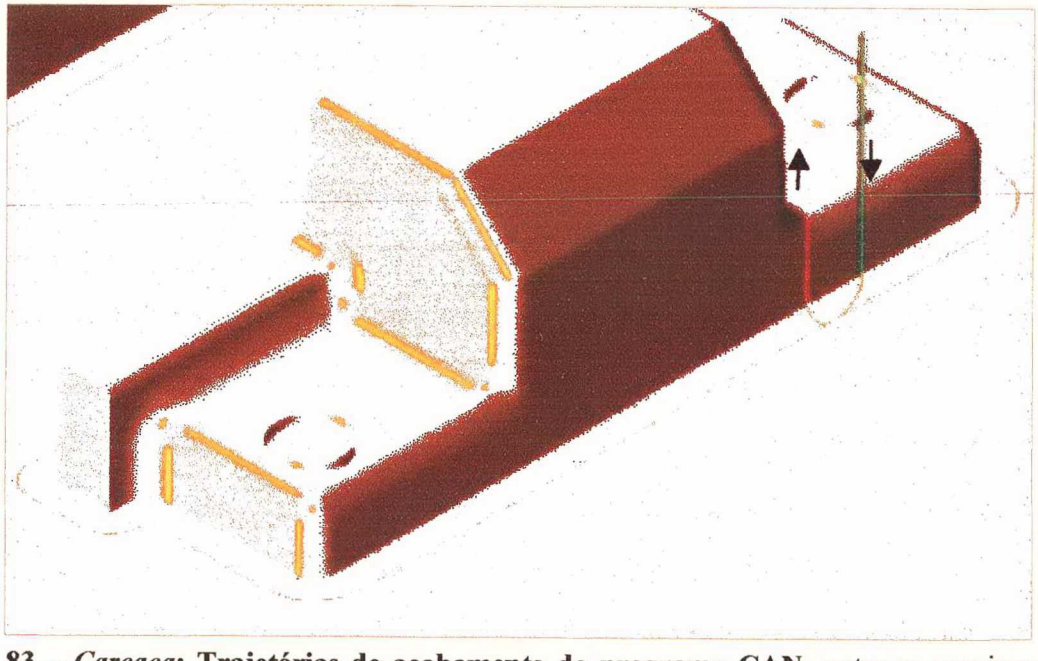


Figura 83 – *Carcaça*: **Trajetórias de acabamento do programa CAN;** notar os movimentos de entrada e saída: a ferramenta se aproxima axialmente em avanço de penetração desde o plano de início (azul), penetra o sobrematerial com um movimento circular, contorna a base da protusão, limpando o canto vivo, volta ao ponto de entrada e sai igualmente com um arco vertical para, finalmente, retrair em avanço rápido ao plano de segurança

6.4.12 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA FINAL DE DESBASTE

Um programador de CAM somente poderá conferir o sucesso de seu trabalho durante a execução do programa na máquina-ferramenta CNC. Contudo, as imagens da simulação gráfica e indicadores do tempo de usinagem, número de retrações, comprimento das trajetórias e outros (que dependem de cada CAM) podem, ao menos, ajudá-lo a ter uma previsão do resultado real.

A tabela 32 resume a avaliação dos resultados do programa corrigido de desbaste, em termos dos indicadores que o sistema A foi capaz de oferecer, quais sejam, o tempo de usinagem, o número de retrações e as imagens da simulação gráfica durante a usinagem e a quantidade de material removido, mostrada pela imagem final da simulação.

indicador	*resultado*
tempo de usinagem	**1:13`: 54``**
número de retrações	**5**
observação da simulação	**satisfatório**
remoção de material	**satisfatória**

Tabela 32 – *Carcaça*: resultados do programa de desbaste

1) **Tempo de usinagem** (movimentos de corte mais movimentos em avanço rápido). Como este valor foi considerado dentro do esperado para uma peça do gênero e para os valores de incremento lateral e profundidade de corte programados, presumiu-se que o programa não continha nenhum erro grosseiro quanto à redundância de trajetórias e excesso de cortes em vazio; testes com a utilização de estratégias de varredura em zigue-zague com perfilamento dos contornos apresentaram tempo de usinagem muito superior (30-50%).
2) **Número de retrações.** Para um programa de mais de uma hora de usinagem, o baixo número de retrações da ferramenta (5) pôde ser considerado como aceitável, contribuindo para um menor desgaste da ferramenta, menores riscos quanto a marcas na superfície acabada, e menor tempo de usinagem;
3) **Observação da simulação**. Apesar dos já referidos cortes em cheio e cortes discordantes, a simulação não apresentou nenhum problema que indicasse a inviabilidade da usinagem e a conseqüente reprogramação do desbaste; não houve movimentos perigosos para a ferramenta, cortes em vazio, aparentes falhas na remoção de material e aparentes interferências na geometria;
4) **Remoção do material.** A geometria toroidal da ponta da ferramenta, com o raio maior do que a profundidade de corte, o posicionamento otimizado dos patamares de corte e a o perfilamento dos contornos internos feito pela estratégia de varredura em espiral, fizeram com que o material deixado para pré-acabamento tivesse a unifor-

mização pretendida, o que pôde ser confirmado pelas imagem final da simulação gráfica, mostrada na figura 84:

- O material em forma de degrau, característico do desbaste com fresas cilíndricas, não existe; apenas na rampa da parte superior dos machos o material se torna um pouco mais irregular neste sentido;
- Os cantos contém um excesso de material facilmente removível por uma ferramenta de pré-acabamento que possui o mesmo raio, o que, por sua vez, otimiza o acabamento destas regiões;
- Os planos horizontais apresentam o mesmo sobrematerial presente nas paredes e inclinações.

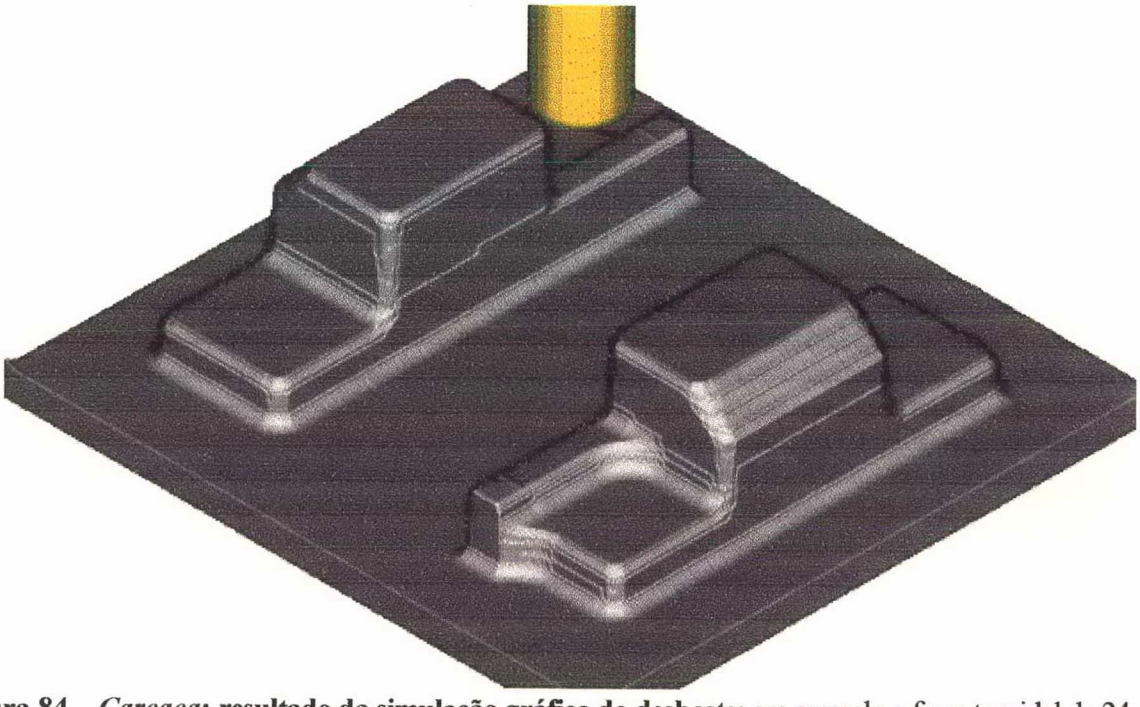


Figura 84 – *Carcaça*: **resultado da simulação gráfica do desbaste;** em amarelo a fresa toroidal de 24 mm

6.4.13 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS PROGRAMAS FINAIS DE PRÉ-ACABAMENTO

Abaixo são apresentados os resultados dos programas de pré-acabamento, os quais são resumidos pela tabela 33:

1) **Tempo de usinagem.** Para todos os programas gerados, os tempos de usinagem foram considerados dentro de uma margem aceitável.

2) **Número de retrações.** Considerou-se satisfatório o baixo número de retrações (oito) na soma dos dois programas, pelos mesmos motivos citados na avaliação do programa de desbaste.

3) **Observação da simulação**. A simulação não apresentou nenhum problema aparente, como cortes em vazio, falhas na remoção de material, movimentos que ameaçassem a integridade da ferramenta e interferências na geometria.

4) **Remoção do material.** A forma da peça após as operações de pré-acabamento, pelo menos segundo as imagens fornecidas pelo simulador gráfico, mostradas pelas figuras 85 e 86, correspondem ao resultado esperado, tanto na usinagem das paredes e curvaturas como na usinagem dos planos horizontais.

indicador	*resultado*	
	paredes / curvaturas	*planos horizontais*
tempo de usinagem	1h16`18``	07`21``
número de retrações	2	6
observação da simulação	satisfatório	satisfatório
remoção de material	satisfatória	satisfatória

Tabela 33 – *Carcaça:* resultados dos programas de pré-acabamento

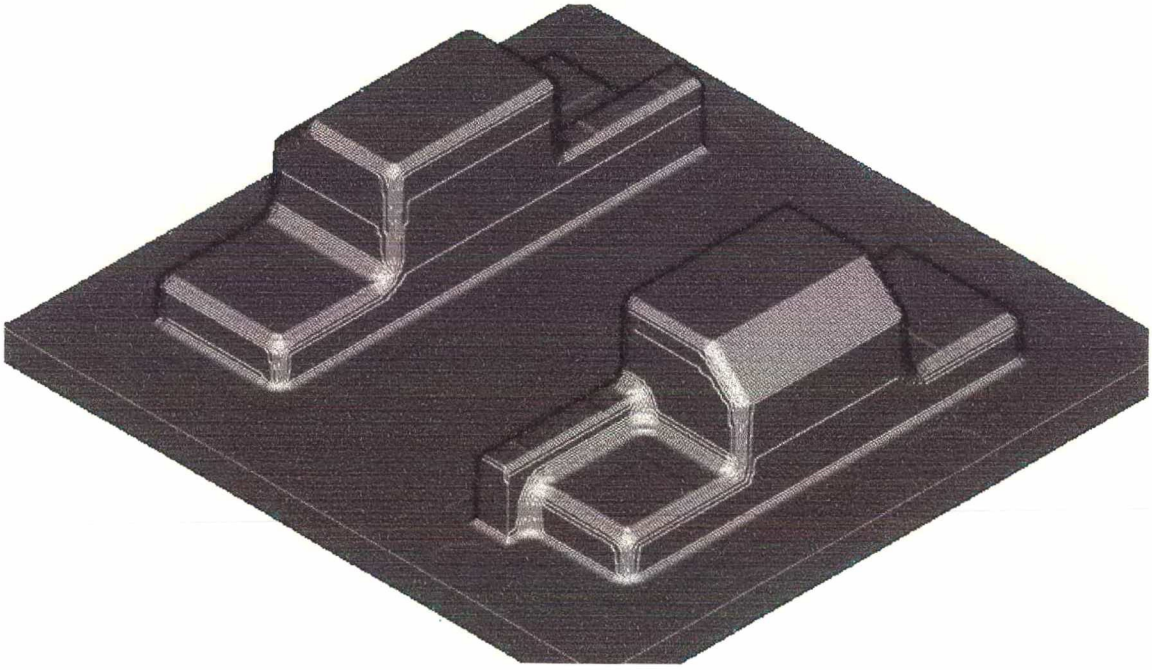


Figura 85 – *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do pré-acabamento das paredes e das curvaturas das protusões.

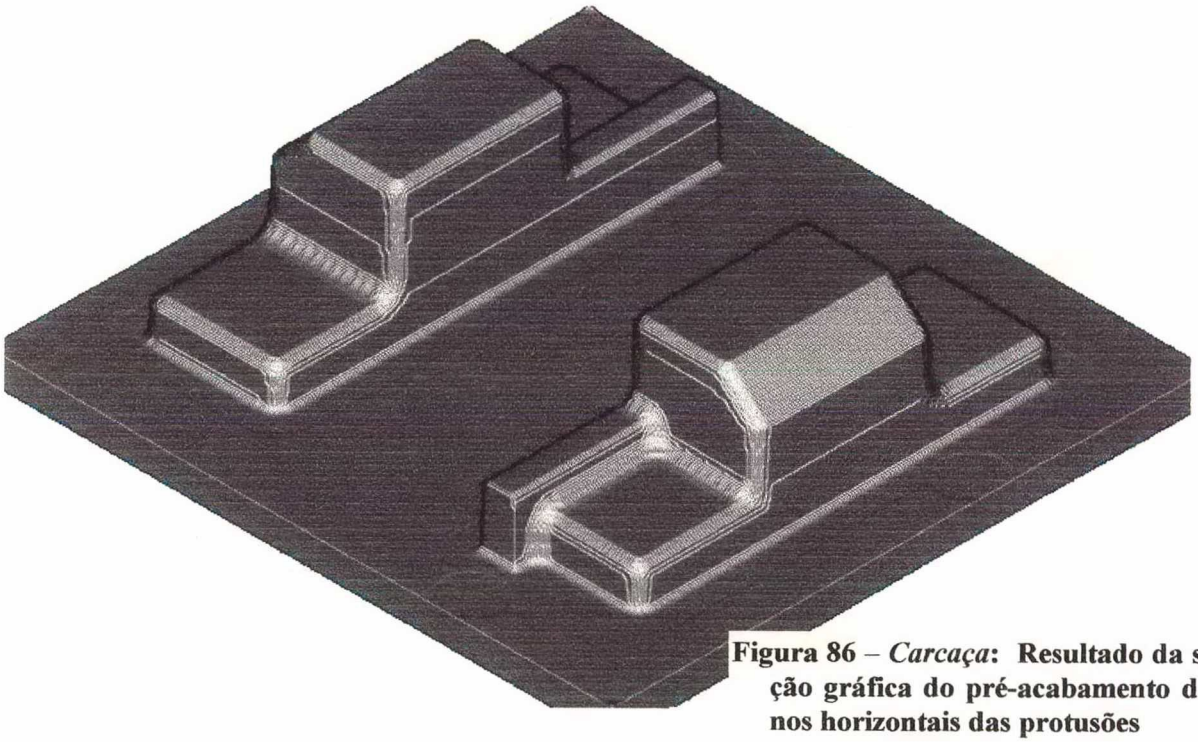


Figura 86 – *Carcaça*: Resultado da simulação gráfica do pré-acabamento dos planos horizontais das protusões

6.4.14 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS PROGRAMAS FINAIS DE ACABAMENTO

Abaixo são apresentados os resultados dos programas definitivos de acabamento, os quais são resumidos pela tabela 34:

1) **Tempo de usinagem.** Os tempos individuais dos programas de acabamento foram considerados aceitáveis, assim como o tempo global das operações de acabamento, qual seja 2h 27', que, entretanto não inclui os tempos de troca de ferramenta.

2) **Número de retrações.** Todos os programas apresentaram um número muito baixo de retrações da ferramenta, à exceção do programa PLA com 12 retrações em apenas 4 minutos. Estas retrações, contudo, não acrescentaram um tempo significativo ao total da programação, nem prejudicam o acabamento superficial, uma vez que o tipo de entrada escolhido suaviza a penetração no sobrematerial.

3) **Remoção do material.** A remoção final de material conseguida por cada programa pode ser visto nas figuras 87, 88, 89 e 90. Um simulador gráfico como o do sistema A fornece apenas uma imagem plana, ou seja, não informa nem quantitativamente, nem qualitativamente os valores do sobrematerial sobre superfície da peça. Considerando, portanto, esta limitação, supôs-se que todo o material em excesso teria sido removido pelas trajetórias de acabamento, com a reprodução da superfície do modelo geométrico, dentro da tolerância admitida programada. Embora o tipo de algoritmo utilizado, bem como o

relato de alguns usuários e a afirmação dos seus fornecedores, contribuam para a imagem de que o sistema A produza sempre trajetórias 100% livres de interferências na superfície da peça, não é possível, na prática, assegurar que os programas de acabamento realmente não provoquem este tipo de problema. Contudo, ao menos dentro dos recursos de simulação gráfica disponíveis, não foi detectada nenhuma região com interferências grosseiras.

4) **Observação da simulação.** A simulação não apresentou nenhum problema aparente, como cortes em vazio, falhas na remoção de material e interferências na geometria.

	resultado por programa			
indicador	*FEC*	*PAR*	*PLA*	*CAN*
tempo de usinagem	07'29''	2h14'29''	04'04''	01'27''
número de retrações	3	2	12	2
observação da simulação	satisfatório	satisfatório	satisfatório	satisfatório
remoção de material	satisfatória	satisfatória	satisfatória	satisfatória

Tabela 34– *Carcaça*: resultados dos programas de acabamento

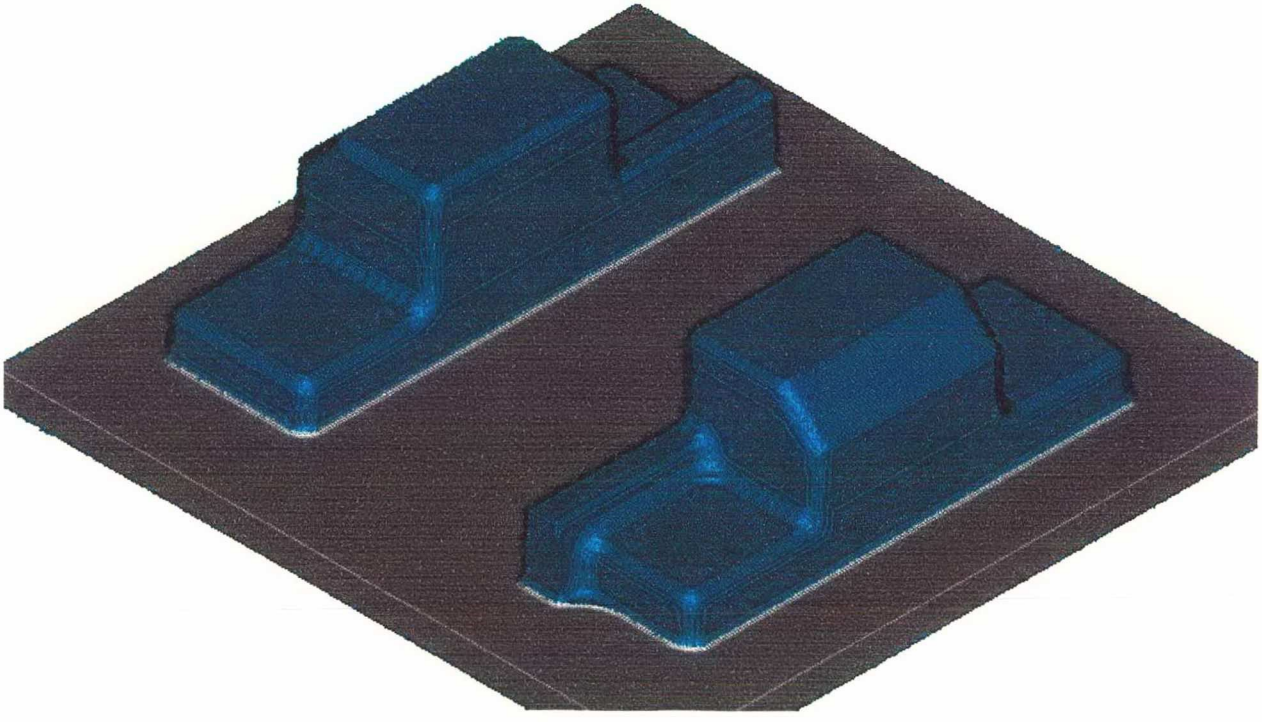


Figura 87 – *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do acabamento da superfície de fechamento (FEC); o sobrematerial (0,2 mm) ainda não removido pelas demais operações, é mostrado em azul

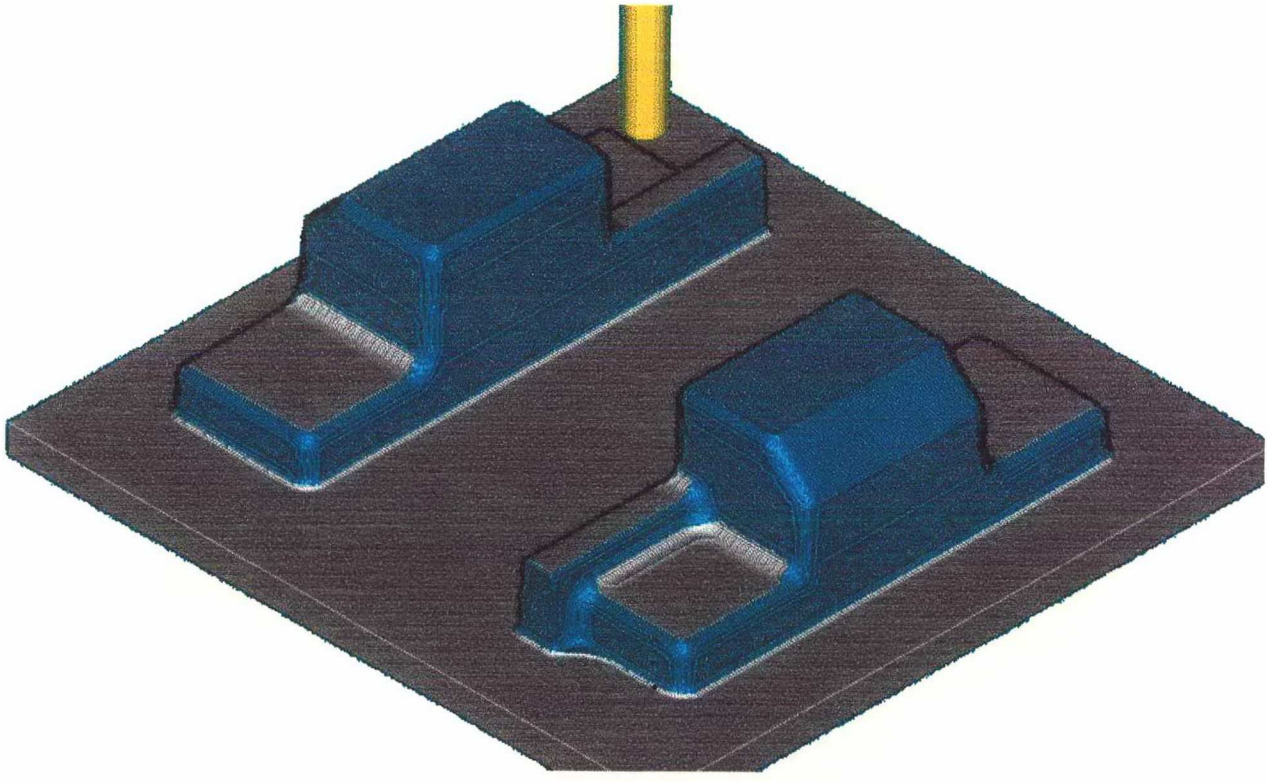


Figura 88 – *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do acabamento das superfícies com inclinação zero (PLA)

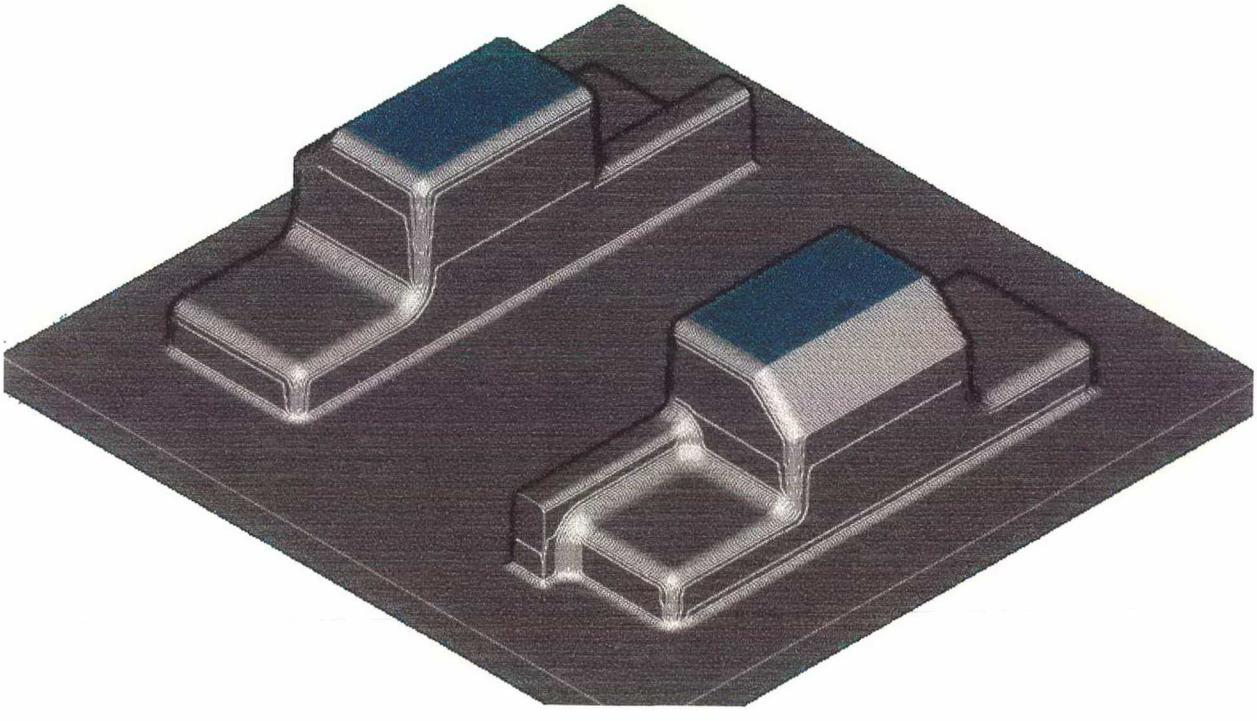


Figura 89 – *Carcaça*: resultado da simulação gráfica do acabamento das superfícies com inclinação (PAR)

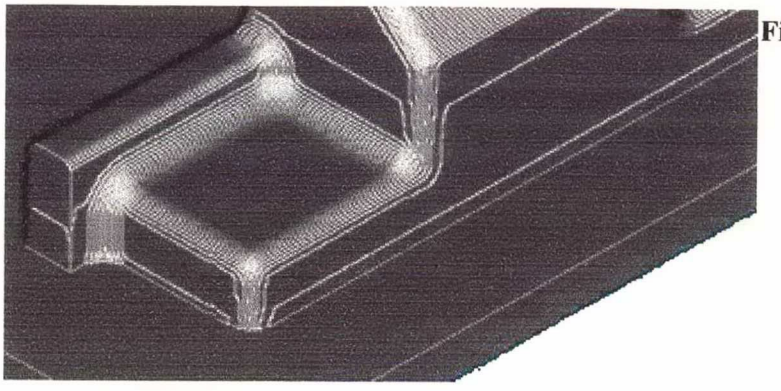


Figura 90 – *Carcaça*: detalhe do resultado da simulação gráfica do acabamento dos cantos vivos (CAN)

6.4.15 AVALIAÇÃO GERAL DA PROGRAMAÇÃO

Assim como os resultados individuais de cada programa, o resultado final da programação global do molde foi considerado satisfatório, sendo desnecessário proceder alterações nos parâmetros ou na ordem de programação. Desta forma, os programas gerados poderiam ter sido pós-processados e transmitidos para o controle de uma máquina-ferramenta, o que, porém, não foi realizado por não ser do objetivo do trabalho.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do desenvolvido e exposto nos capítulos 2 a 6, que constituem o corpo do trabalho, este capítulo apresenta comentários adicionais, as conclusões finais e sugestões para novos trabalhos.

7.1 COMENTÁRIOS ADICIONAIS

CRITÉRIO DE PROGRAMAÇÃO: TEMPO X TECNOLOGIA

No fresamento de moldes, ao contrário da usinagem de séries, pequenos ganhos na vida útil da ferramenta de corte, normalmente, não se convertem em redução de custos. Por vezes, é interessante usar altas velocidades de avanço e taxas de remoção de material, mesmo que isso aumente consideravelmente o desgaste da ferramenta, pois a diminuição no tempo de fabricação do molde pode justificar os custos adicionais com ferramentas de corte. Obviamente que isto só será compensatório se as trocas mais freqüentes de ferramenta não acrescentarem tempos secundários significativos. Este é um típico caso em que o critério *TEMPO* é prioritário em relação ao critério *TECNOLOGIA*, ao menos no que diz respeito ao emprego ótimo da ferramenta de corte. Da mesma forma, o critério *TEMPO* costuma sobrepor o critério *TECNOLOGIA* quando o acabamento superficial requerido após a operação de fresamento permite, dentro de um certo limite de aceitação, a utilização de estratégias de zigue-zague bidirecionais, cortes discordantes, penetrações axiais, vibrações da ferramenta, altos esforços de corte, etc. O ideal é que isto ocorra somente nos casos em que o acabamento superficial resultante do fresamento não implique aumentos nos tempos de polimento manual, um tipo de operação notoriamente dispendiosa.

RECOMENDAÇÕES AO PROGRAMADOR

- Antes de iniciar o planejamento das operações, verificar atentamente as maneiras possíveis de fixação do material bruto na mesa da máquina e selecionar a mais adequada, tanto do ponto de vista do desenvolvimento da programação no CAM quanto da colocação e posicionamento na máquina;
- Antes de iniciar o planejamento das operações, verificar as ferramentas de corte disponíveis, e se possível, reservá-las, para que se evite perdas de tempo com modificações de última hora nos programas enviados para o controle da máquina-ferramenta;
- Sempre verificar os programas gerados, utilizando para isto simuladores gráficos adequados ao grau de exigência e complexidade das operações; é importante analisar não só o resultado final, mas prestar total atenção às imagens apresentadas durante a simulação, verificando a exeqüibilidade e a segurança de todos os movimentos da ferramenta;
- Explorar os recursos de personalização do *software* de CAM, para reduzir o tempo de programação, principalmente através de:
  - ⇒ construção de bibliotecas de materiais e de ferramentas;
  - ⇒ **gravação de macros**, ou seja, arquivos com uma seqüência pré-definida de procedimentos, aplicáveis a processos repetitivos ou relativamente freqüentes;
  - ⇒ modificação da área de trabalho da interface gráfica do *software*, para agilização das ações durante a programação;
  - ⇒ criação de funções específicas através de *kits* de desenvolvimento na linguagem de programação do *software*, recurso permitido, por exemplo, em alguns sistemas CAM escritos em C++.

7.2 CONCLUSÕES

A seguir, são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho, dividas em três ítens, quais sejam: quanto aos objetivos específicos do trabalho (citados no capítulo introdutório);

quanto ao seu objetivo global, ou seja, as orientações, recomendações e procedimentos propostos; quanto às estratégias de usinagem e os recursos dos *softwares* de CAM atualmente encontrados no mercado.

a) Quanto aos objetivos específicos do trabalho

Os capítulos 2, 3 e 4 formam uma base de dados para consulta em programação CNC via CAM para moldes, constituída por informações genéricas e descrições dos recursos, algoritmos de geração de trajetórias, estratégias de usinagem e parâmetros de programação relativos aos *softwares* de CAM comerciais. Além disso, foi apresentada uma descrição de cada etapa de uma sessão de trabalho em um sistema CAM genérico. Tal conjunto de informações é capaz de introduzir iniciantes na área à programação via CAM, proporcionando-lhes condições para visualizarem os tipos de dificuldades encontradas, o grau de complexidade das escolhas e decisões a serem tomadas durante a programação de um molde, bem como as vantagens e desvantagens do fresamento de moldes assistido por computador.

b) Quanto ao objetivo global do trabalho

A realização deste trabalho confirmou que, na programação do fresamento de cavidades via CAM, o importante não é estabelecer regras definindo qual estratégia aplicar a cada geometria, mesmo por que as geometrias de cada molde são quase sempre diferentes. O programador deve, isto sim, proceder uma criteriosa avaliação do que deve realizar e ter domínio do *software* e conhecimento tecnológico suficientes para rapidamente saber visualizar a maneira mais adequada de usinar as geometrias selecionadas, identificar uma ou mais estratégias adequadas e prever o resultado global aproximado destas sobre a região a usinar, para então selecionar aquela que produzirá os melhores resultados (remoção total do excesso de material, acabamento superficial, tempo total de molde na máquina-ferramenta, desgaste da ferramenta, entre outros).

O exemplo prático realizado no capítulo 6 demonstrou como as recomendações propostas são aplicadas a um caso real de programação, comprovando sua função de facilitar e sistematizar o planejamento da programação. Tão importante quanto isto, porém, foram as demonstrações de que a programação do fresamento de moldes pode ser muito complexa e de que metodologias e

sistematizações da programação auxiliam o programador do CAM, mas não o isentam de alguns predicados fundamentais: inteligência, domínio do *software*, conhecimento tecnológico do fresamento e criatividade.

Programadores iniciantes que não dominem a tecnologia do fresamento, certamente terão maior dificuldade em obter sucesso nos seus programas e deverão, obrigatoriamente, dedicar parte de seu tempo ao acompanhamento da fabricação de moldes junto à máquina-ferramenta e, até mesmo, à sua operação. É importante ressaltar que este trabalho não colabora para esta parte do aprendizado de um programador de CAM, pois parte do pressuposto que o mesmo tenha definido claramente os resultados que quer alcançar com sua programação.

Este trabalho, através da organização de uma seqüência de passos para o planejamento da programação, em conjunto com as orientações e recomendações propostas, proporciona ao programador iniciante um aprendizado rápido da aplicação do *software* de CAM, delineando um caminho a ser seguido para os primeiros programas a serem criados. Com isto, reduz-se o tempo que o programador levará para começar a produzir bons resultados.

Com o tempo, o programador vai absorvendo as orientações e recomendações gerais propostas e adaptando-as à sua realidade, desenvolvendo sua própria mentalidade de programação via CAM, e passando a realizar a etapa de planejamento sem a necessidade de consultá-las, quase que simultaneamente à programação propriamente dita.

Em relação aos programadores mais antigos, principalmente aos ex-operadores de máquinas-ferramenta, a contribuição destas orientações decorre do fato de que este tipo de profissional pode estar "acostumado demais" com determinados tipos de programação, geometrias, estratégias, etc. O programador que se prende a determinados "vícios de programação" enfrenta problemas para a obtenção de programas otimizados quando uma determinada conjunção *software*-geometria-operação-ferramenta, diferente da normalmente enfrentada, exige critérios de programação e de avaliação de estratégias/parâmetros bem definidos e uma correta seqüência de passos.

Desta forma, este trabalho contribui para a solução da problemática do fresamento de cavidades via CAM por **propor uma forma de organização** da programação, através de seu planejamento passo a passo com **orientações** e **recomendações** de parâmetros, alternativas e

procedimentos, e por **chamar a atenção do programador** para pontos importantes da programação.

c) Quanto às estratégias de usinagem e aos recursos dos softwares de CAM

Embora mudem de nome e apresentem diferentes formas de aplicação e parâmetros auxiliares, as estratégias para fresamento em 2½ e 3 eixos dos *softwares* de CAM comerciais produzem os mesmos tipos básicos de trajetórias, mostrados na tabela 8 (capítulo 4). Embora academicamente continue se pesquisando trajetórias diferentes das habituais, como as baseadas nas curvas de *Hilbert*, os fornecedores de CAM não têm mostrado novidades em seus últimos lançamentos. Seus esforços concentram-se na agilização do trabalho do programador, na confiabilidade e velocidade dos algoritmos de cálculo de trajetórias (inclusive para usinagem a partir de modelos sólidos), na melhoria dos recursos de detecção de erros e simulação gráfica e na eficiência das estratégias de reusinagem. Isto provavelmente se deve à menor relação custo/benefício referente ao desenvolvimento destas características de *softwares* de CAM, em relação a avanços na área de trajetórias de corte. Em outras palavras, é mais fácil e mais propenso ao sucesso procurar a otimização de algoritmos já existentes (por exemplo, para reduzir trajetórias de corte em vazio) do que pesquisar e desenvolver um novo tipo de estratégia que gere trajetórias mais eficientes que as existentes, do ponto de vista do acabamento superficial, do tempo de usinagem e do tempo de cálculo das mesmas.

No entanto, os sistemas CAM comerciais com módulos para programação do fresamento em 4 ou 5 eixos ainda oferecem poucos tipos de estratégias, as quais, em sua maioria, são adaptações das utilizadas para fresamento em 3 eixos. Da mesma forma, recursos de programação via CAM para a usinagem de alta velocidade também constituem um campo aberto a pesquisas, embora não tanto em relação às estratégias em si, mas mais propriamente relativo a trajetórias de conexão entre passadas, acelerações e desacelerações da ferramenta de corte, etc.

Mesmo que o programador tenha a liberdade de escolher entre os vários tipos de estratégias, selecionar diversos parâmetros auxiliares e verificar os resultados mostrados por indicadores do CAM (número de retrações, tempo de usinagem, comprimento das trajetórias, etc.) e/ou simuladores gráficos, os *softwares* atuais não permitem determinação direta ou a previsão da qualidade do acabamento, em termos de rugosidade. Para isto, seria necessário

desenvolver algoritmos inteligentes para definição do diâmetro ótimo da ferramenta, das formas das trajetórias e do incremento entre passadas, em função do material do molde, do acabamento superficial requerido e da potência máxima a ser exigida da máquina-ferramenta.

7.3 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Finalizando, baseado no discutido durante o desenvolvimento do trabalho e nas conclusões finais, são sugeridos temas para futuros trabalhos na área de programação do fresamento de moldes via CAM:

- Avaliação das recomendações e orientações propostas, a partir de resultados práticos da execução de programas em máquina-ferramenta;
- Revisão das recomendações e orientações propostas e extensão para casos específicos, com estudo de caso comparando uma programação orientada com uma convencional (em relação ao que se faz atualmente nas ferramentarias brasileiras);
- Elaboração de recomendações e orientações para o fresamento em 4 e 5 eixos, semelhantemente às propostas neste trabalho;
- Elaboração de recomendações e orientações para o fresamento em alta velocidade, semelhantemente às propostas neste trabalho;
- Informatização das recomendações e orientações propostas através do desenvolvimento de um sistema de apoio às decisões tomadas no planejamento da programação, complementar e intermediário ao CAPP e ao CAM;
- Desenvolvimento de um metodologia para a utilização da verificação de programas através de simuladores gráficos, informando ao programador como utilizá-los, quais os ítens de verificação mais importantes, como interpretar as imagens mostradas na tela, etc.;
- Pesquisa, desenvolvimento e avaliação de novos tipos de estratégias específicas para o fresamento de moldes em 2½ e 3 eixos, com posterior desenvolvimento de um *software* de CAM que ofereça ao programador estratégias complementares às já disponíveis nos sistemas CAM comerciais distribuídos no Brasil, como as estratégias baseadas nas

curvas de *Hilbert* (ou outros tipos de *space-filling curves*) [85, 86], estratégias para desbaste por furação [90] e desbaste helicoidal [70];

- Pesquisa, desenvolvimento e avaliação de estratégias específicas para o fresamento de alta velocidade em 5 eixos, para posterior desenvolvimento de sistema CAM específico, uma vez que o atual mercado de *softwares* ainda não supre, de forma satisfatória, este crescente segmento;
- Determinação dos valores ótimos de diâmetro de ferramenta e incremento entre passadas, em função do tempo de usinagem e da potência de máquina requerida, para as principais estratégias de fresamento em 2½ eixos para desbaste, aplicadas sobre geometrias básicas, através de ensaios práticos em máquina-ferramenta;
- Determinação dos valores ótimos de diâmetro de ferramenta e incremento entre passadas, em função do tempo de usinagem e do acabamento superficial final, para as principais estratégias de fresamento 3D para acabamento, aplicadas sobre geometrias básicas, através de ensaios práticos em máquina-ferramenta;
- Desenvolvimento de um algoritmo inteligente (ou *software knowledge-based*) para aplicação prática dos dois últimos trabalhos sugeridos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] VOLPATO, N.; ***Recursos CAD/CAM voltados ao modelamento e à usinagem de cavidades para moldes, com estudo de casos de aplicação;*** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis 1993.

[2] VANDRESEN, M.; ***Comparação entre a programação via CAD/CAM e a programação utilizando ciclos fixos do comando: Estudo de casos na indústria de moldes para plástico;*** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis 1997.

[3] CORRÊA, W. S.; ***Análise da viabilidade do emprego de sistemas CAD/CAM na fabricação de cavidades para moldes de injeção em plataforma PC com estudo de casos;*** Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis 1995.

[4] MIRANDA, H. J. A; SILVA, R. M. F. da; ***Sistemas de CAD/CAM na Indústria de Moldes - Ficção e Realidade;*** O Molde, CEFAMOL, pg. 44-48, N° 6, dezembro, 1989

[5] AHRENS, C. H.; ***Características desejáveis para a implantação e o emprego de sistemas CAE/CAD/CAM no setor de moldes de injeção de plásticos.;*** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis 1994.

[6] KOIKE, T.; ***Integração do projeto e da fabricação de moldes para injeção de plásticos com auxílio de tecnologias CAD/CAE/CAM;*** Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis 1995.

[7] DIEHL, A.; ***Transferring files from CAD to CAM;*** Computer Aided Engineering, janeiro, 1996.

[8] FIDIA; ***HI-MILL - The FIDIA CAM for Real Time Milling;*** http://www.fidia.it/himill101.html, 1997. (página acessada em 04/09/1998)

[9] RIBEIRO, A. Jr.; ***Utilização do método AHP em testes de Benchmark, apoiados por computador, para selecionar sistemas CAD/CAM para a área de projeto e fabricação de moldes para plásticos;*** Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis 1996.

[10] CORONADO, J.; ***Programas avançados abreviam tempo em design e manufatura;*** Plástico Moderno nº 271, novembro, 1996.

[11] CHRISTMAN, A.; ***Basics of NC Programming;*** American Machinist, pg. 45-47, dezembro, 1995.

[12] LAMY, F.; ***CAD/CAM World;*** http://www.cam.org/~flamy, 1997 (página acessada em 04/09/1998)

[13] AHRENS, C. H.; ***CAE/CAD/CAM para Moldes de Injeção: Manual de Orientação;*** CIMJECT/GRUCON/UFSC, Florianópolis, 1995.

[14] CAVALHEIRO, A. Z.; ***Relatórios e notas de estágios e visitas técnicas a ferramentarias em 1997;*** Florianópolis, 1997.

[15] MILLS, R.; ***Mechanical Design;*** Computer Aided Engineering pg. 18-28, dezembro, 1989.

[16] LEE, K.; KIM, T.J.; HONG, S.E.; ***Generation of toolpath with selection of proper tools for rough cutting process;*** Computer-Aided Design, vol 26(11), pg. 822-831, novembro, 1994.

[17] NOAKER, P.; ***CAM at the Outer Limits;*** Manufacturing Engineering, pg. 45-49, novembro, 1991.

[18] CAM WRITE; ***Information on the CamWrite Range of Products;*** http:// ourworld.compuserve.com/homepages/tech_group/products.htm#CamWrite, 1997. (página acessada em 06/1997)

[19] SIEBEL, S.; ***Trends in CAD/CAM that will shape the future;*** Modern Machine Shop, pg. 85-93, julho, 1991.

[20] O'HALLORAN, J.; ***3D Modelling;*** CADCAM, pg. 45, janeiro, 1994.

[21] FERREIRA, J. V.R.; YOGUI, R.; ***Modeladores de Sólidos e sua Integração com CAM;*** Cadware, pg. 28-29 agosto, 1997.

[22] OLIVEIRA, L.; ***Um Sistema de Geração de Trajetórias de Ferramentas em 3 eixos;*** Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 1997.

[23] DIEHL, L.; ***Machining Metods for Complex Models;*** Modern Machine Shop, julho, 1996.

[24] ROGERS, D.; ADAMS, J. A.; ***Mathematical Elements for Computer Graphics;*** segunda edição, McGraw-Hill, New York, 1990.

[25] BEARD, T.; ***Machining from STL files;*** Modern Machine Shop, janeiro, 1997.

[26] CHRISTMAN, A.; ***Product Review: PowerMILL 2.2;*** Computer Aided Engineering, abril, 1997.

[27] MARTIN, R.; MARTIN, C.; ***The Windows Trio powers CAM software;*** Computer Aided Engineering, março, 1996.

[28] GREGO, M.; ***Novas Armas para a Engenharia;*** Informática Exame, pg. 54-59, Março, 1994.

[29] CHRISTMAN, A.; ***Product Review: hyperMILL 4.0;*** Computer Aided Engineering, junho, 1997.

[30] KOELSCH, J.; ***Better data handling makes the best molds;*** Manufacturing Engineering, vol 118 (6), Junho, 1997.

[31] VIDOTTO, R.; CAVALHEIRO, A. Z.; MYLLA, A.Y.F.; AHRENS, C. H.; ***Integração das Tecnologias CAD/CAE/CAM no Projeto de Moldes de Injeção p/Peças Plásticas com a Utilização de Conceitos de Engenharia Concorrente;*** XIII CRICTE, ABENGE-PUC-RS, Porto Alegre, 1997.

[32] CADESIGN; ***Windows 95 muda a cara dos PCs;*** ano I, nº7, pg 36, 1995.

[33] CASTRO, R.C.V.; ***CAD/CAM/CIM - Que Perspectivas para a Indústria de Moldes;*** 3° Congresso da Indústria de Moldes, CEFAMOL, Marinha Grande (POR), novembro, 1988.

[34] DIBBLE, M.A; ***Fortune 500 companies sitch to comprehensive CAM;*** American Machinist, pg. 47-50, março, 1994.

[35] NOAKER, P; ***CAM's Solid Modelling Connection;*** Manufacturing Engineering, vol. 117(5), novembro, 1996.

[36] SABINO NETTO, A. C.; BRAIDA, M. A.; AHRENS, C. H.; ***Customização de Desenhos de Moldes de Injeção de Polímeros em Sistemas CAD com a Criação de Bibliotecas;*** XII CRICTE, ABENGE-UFPR, Curitiba, 1996.

[37] LIMA, A.; RODRIGUES, V. Neto; ***Projeto e Fabricação de Moldes para Injeção de Plástico;*** Máquinas e Metais, pg. 96-101, agosto, 1994.

[38] CAVALHEIRO, A. Z.; ***Relatório de estágio curricular;*** Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, 1995.

[39] KOCHAN, D.; ***Solid Free-Form Manufacturing;*** Editora Elsevier, Amsterdam (HOL), 1993.

[40] CHRISTMAN, A.; ***Esprit knows machining;*** Computer Aided Engineering, janeiro, 1997.

[41] LICOM; ***AlphaCAM*-Catálogo virtual;** http://www.licom.com/general.html, 1997. (página acessada em 04/09/1998)

[42] DELCAM plc.; ***Powermill Reference Manual;*** Birmingham (GBR), 1996.

[43] ZHU, C.; ***Tool-Path Generation in Manufacturing Sculptured Surfaces with a Cylindrical End-Milling Cutter;*** Computers in Industry, Elsevier Science Publishers, vol.17, pg. 385-389, 1991.

[44] HELD, M.; LUKÁCS, G.; ANDOR, L.; ***Pocket machining based on contour-parallel tool paths generated by means of proximity maps;*** Computer-Aided Design, vol 26(3), pg. 189-203, março, 1994.

[45] LI, H.; DONG, Z.; VICKERS, G. W.; ***Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part roughing machining using fuzzy pattern analysis;*** Computer-Aided Design, vol 26(11), pg. 787-795, novembro, 1994.

[46] CATANIA, G.; ***A Computer-Aided Prototype System for a NC Rough Milling of Free-Form shaped Mechanichal Part-Pieces;*** Computers in Industry, Elsevier Science Publishers, vol. 20 (3), pg. 275-293, 1992.

[47] VICKERS, G.; QUAN, K.W.; ***Ball-Mill Versus End-Mills for Curved Surface Machining;*** Journal of Engineering for Industry (Transactions of the ASME), vol. 111, pg. 22-26, fevereiro, 1989.

[48] FARIA, J.; ***Ferramentas de Corte para a Indústria de Moldes;*** O Molde, CEFAMOL, pg. 15-17, N° 13, setembro, 1991.

[49] FINZER, T.; ***High-Speed Machining (HSC) in Die and Mold Manufacturing;*** 2° Seminário de Alta Tecnologia: "Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte e Alta Precisão", UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, julho, 1997.

[50] ZHU, C.; ***How to obtain a good surface finish in NC machining of free-formed surfaces;*** Computers in Industry, SSDI 0166-3615, pg. 229-233, 1993.

[51] FREIMUTH Jr., A. K.; ***Resolving Conflicts Between CAD&CAM;*** Computer Aided

Engineering, dezembro, 1996.

[52] STEMMER, C. E.; ***Ferramentas de Corte I;*** 3ª edição, Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993 .

[53] PTC; ***New Pro/MFG - Pro/NC-Check - User's Guide for Release 17.0;*** Parametric Technology Corporation, Waltham (EUA), 1996.

[54] SURFWARE Inc.; ***SUFRCAM - CAD/CAM Systems by Surfware - Catálogo de produto;*** 1997.

[55] CIMATRON Co.; ***NC*** (manual do usuário), 1996.

[56] AUDACES Automação e Informática Industrial; ***CAM Station, Manual do Usuário;*** Florianópolis, 1995.

[57] EKBACK, M.; ***Cut Longer and Better;*** American Machinist, pg. 51-54, novembro, 1996.

[58] EDS Corp.; ***Unigraphics - Catálogo virtual;*** http://www.ug.eds.com/ug/verview.html, Eletronic Data Systems Corp., 1997. (página acessada em 06/1998)

[59] LENCINA, D. C.; CAVALHEIRO, A.Z; ; ***Simulação do Processo de Usinagem;*** Cadeira de Fabricação Assistida por Computador, PPGEM UFSC, setembro,1997.

[60] PRUN, J.; ***NC Troubleshooting;*** Computer Aided Engineering, pg. 66-70, maio, 1990.

[61] MASON, F.; ***Verificação: o que de melhor aconteceu à programação CNC;*** Máquinas e Metais, pg. 16-23, agosto, 1993.

[62] JERARD R; DRYSDALE, R. L.;. B.; SCHAUDT, B.; HAUCK, K. ; ***Discrete Simulation of NC Machining;*** Algorithmic, vol. 4(1), pg. 33-60,1989.

[63] DRYSDALE, R. L.; JERARD R. B.; SCHAUDT, B.; HAUCK, K; MAGEWICK, J. ; ***Methods for Detecting Error in Numerically Controled Machining of Sculptured Surfaces;*** IEEE Computer Graphics & Applications, vol. 9(1), pg. 26-

39, 1989.

[64] SAITO, T; TAKAHASHI,T. ; ***Comprehesible Rendering of 3-D Shapes;*** Computer Graphics, vol. 24, (4), pg. 197-206, 1990.

[65] CREMONINI, R. B.; ***Benchmarking – Avaliação de Sistemas CAM;*** Multibrás S.A. Eletrodomésticos, Departamento de Ferramentaria, Joinville, dezembro, 1995.

[66] MILLS, R.; ***15 ways to link CAD and CAM;*** Computer Aided Engineering pg. 48-56, outubro, 1989.

[67] WEINGAERTNER, W. L.; MALVEIRA, N.V.; ***Integração de máquinas EDM e sistemas CAD/CAM via DNC;*** Máquinas e Metais, 54-56, outubro, 1991.

[68] DERFLER, F. J.; FREED,E L. ; ***Como Funcionam as Redes;*** Editora Quark, São Paulo, 1993.

[69] SARMA, R.; DUTTA, D.; ***The Geometry and Generation of NC Tool Paths;*** Journal of Mechanical Design (Transactions of ASME), vol. 119, pg. 253-258, junho, 1997.

[70] SUZUKI, H.; KORESAWA, H.; SAKAMOTO, M.; ***Development of Real Time CAM System Based on Paralell Processing and the Inverse Offset Method;*** Transactions of NAMRI/SME, vol. 21, pg. 303-309, 1993.

[71] FERREIRA, Á. C.; ***La Filosofia de Utilizacíon de Máquinas de Control Numérico en La Manufactura;*** Apostila da cadeira "Programação de Máquinas de Comando Numérico" do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

[72] BEARD, T; ***Machining In Circles;*** Modern Machine Shop, julho, 1996.

[73] VICKERS, G; BRADLEY, C.; ***Curved Surface Machining Though Circular Arc Interpolation;*** Computers in Industry, Elsevier Science Publishers, vol.19, pg. 329-337, 1992.

[74] DELCAM plc.; ***NURBS-Based Machining;*** News.Delcam, issue number 4, Birmingham (GBR), 1997.

[75] MORETON, D.N.; PARKINSON, D.B.; WU, W.K.; ***The Application of a Biarc Technique in CNC Machining;*** Computer-Aided Engineering Journal, pg. 54-60, abril, 1991.

[76] PERSSON, H.; ***NC Machining of Arbitrarily Shaped Pockets;*** Computer-Aided Design, vol 10(3), pg. 169-174, maio, 1978.

[77] ELBER, G.; COHEN, E.; ***Toolpath Generation for Freeform Surface Models;*** Computer-Aided Design, vol. 26 (6), pg. 490-496, junho, 1994

[78] MARSHALL, S.; GRIFFITHS, J.G.; ***A new cutter-path topology for milling machines;*** Computer-Aided Design, vol 26(3), pg. 204-214, março, 1994.

[79] SURESH, K.; YANG, D. C. H.; ***Constant Scallop-height Machining of Free-form surfaces;*** Journal of Engineering for Industry (Transactions of the ASME), vol. 116, pg. 253-259, maio, 1994.

[80] CHEN, Y.D.; NI, J.; WU, S.M.; ***Real-Time CNC Tool Path Generation for Machining IGES surfaces ;*** Journal for Engineering in Industry (Transactions of the ASME), vol. 115, pg. 480-486, novembro, 1993.

[81] CHOI, B.K.; LEE, C.S., HWANG, J.S.; JUN, C.S.; ***Compound surface modelling and machinig;*** Computer-Aided Design, vol 20(3), pg. 127-136, abril, 1988.

[82] LONEY, G.C.; OZSOY, T. M.; ***NC machining of free frm surfaces;*** Computer-Aided Design, vol 19(2), pg. 85-90, março, 1987.

[83] GRABOWSKI, R.; ***Tower of Babel;*** CADCAM Microstation World.

[84] HWANG, J.S.; ***Interference-Free Tool-Path Generation;*** Computer-Aided Design, vol. 24 (12); pg. 667-676, 1992.

[85] COX, J.J.; TAKEZAKI, Y.; FERGUSSON, H.R.P.; KOHKONEN K.E.; MULKAY, E.L.; ***Space-filling curves in tool-path applications;*** Computer-Aided Design, vol

26(3), pg. 215-224, março, 1994.

[86] GRIFFITHS, J.G.; ***Toolpath based on Hilbert`s curve;*** Computer-Aided Design, vol 26(11), pg. 839-844, novembro, 1994.

[87] CHOI, B K; CHUNG, Y C; PARK, J W; KIM, D H; ***Unified CAM-System arhiteture for Die and Mould Manufacturing;*** Computers in Industry, Elsevier Science Publishers, vol. 26(3), pg. 235-243, 1994.

[88] SCHULZ, H.; ***State of Art and Trends of High-Speed Machinig;*** 2° Seminário de Alta Tecnologia: "Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte e Alta Precisão", UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, julho, 1997.

[89] CAVALHEIRO, A. Z.; ***Manual Técnico de Ferramentas;*** Multibrás Eletrodomésticos S.A., Unidade Joinville, Departamento de Ferramentaria, janeiro, 1996.

[90] BEARD, T.; ***Plunge into faster roughing;*** Modern Machine Shop, fevereiro, 1997.

[91] DELCAM plc.; ***High Speed Milling For Engineers;*** Birmingham (GBR), 1997.

[92] BATES, C. A.; ***Benchwork be gone;*** American Machinist, pg. 33-34, julho, 1997.

[93] HUANG, Y.; OLIVER, J.H.; ***Non-Constant Parameter NC Tool Path Generation of Sculptured Surfaces;*** Computers in Engineering, ASME, vol. 1, 1992.

[94] BEARD, T.; ***Building 3D Machining Knowledge;*** Modern Machine Shop, outubro, 1996.

[95] CHANG, T.C.; ***Expert Process Planning for Manufacturing;*** Addison Wesley Publisinhg Company, 1990.

[96] LUSCOMBE, A.M.; TONCICH, D.J.; ***A Geometrical Approach to Computer-Aided Process Planning for Computer-Controlled Machine Tools;*** International Journal for Advanced Manufacturing Technology, vol 11, pg 83-90, Springer-Verlag, London, 1996.

[97] LYE, S.W.; LEE, S.G.; YEONG, H.Y.; ***An Integrated, Computer-Assisted Process Planner for the Machinig of Moulds for Expanded Polystyrene Foam;*** Integrated Manufacturing Systems, vol. 7 (4), pg. 53-60, 1996.

[98] BOOGERT, R.M.; KALS, H.J.J.; VAN HOUTEN, F.J.AM.; ***Tool Paths and Cutting Technology in Computer-Aided Process Planning;*** International Journal for Advanced Manufacturing Technology, vol 11, pg 186-197, Springer-Verlag, London, 1996.

[99] SILVEIRA, C. L. da; ***Metodologias para Identificação e Aplicação de Features em CAD/CAM;*** Monografia (Pós-graduação "Lato Sensu" em Informática) – UDESC, Joinville, 1997.

[100] JOVANOWSKI, D; MUTHSAM, H.; ***Workpiece Modeling for Computer Aided Process Planning;*** International Journal for Advanced Manufacturing Technology, vol 10, pg 404-410, Springer-Verlag, London, 1995.

[101] WANG, K.K.; FISCHER, A; ***An Interaction Mechanism for 3D Object-Oriented Feature-Based Models in Interactive Design and Simulation;*** Annals of the CIRP, vol 44 (1), pg. 101-104, 1995.

[102] TÖNSHOFF, H.K.; AURICH, J.C.; EHRMANN, M.; D'AGOSTINO, N.; ***An Unified Approach to Free-Form and Regular Feature Modeling;*** Annals of the CIRP, vol. 45 (1), pg. 125-128, 1996.

[103] PEDRA, A.; ***Há evidências de que os sistemas CAD passarão por uma revolução tecnológica ;*** Máquinas e Metais, pg. 123-130, setembro, 1997.

[104] ALTAN, T.; LILLY, B.W.; et alli.; ***Advanced Techniques for Die and Mold Manufacturing;*** Annals of the CIRP vol 42 (2) pg. 707-716, 1993.

[105] HALLUM, D.; ***Noncontact Digitizing, a New Wave in prototyping;*** American Machinist, pg. 61-63, maio, 1995.

[106] MELLO, L.B.; SANTOS, E.T.; ***Digitalizadores capturam imagens em 3D;***

CADesign, ano I, nº6, pg. 38-40, 1995.

[107] GOMES, J. O; ***Fabricação de cavidades por fresamento***; Exame de Qualificação para Doutoramento – Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, 1998.

[108] LEE, Y.S.; CHANG, T.C.; ***CASCAM–An automated system for sculptured surface cavity machining;*** Computers in Industry, Elsevier Science Publishers, vol. 16, pg. 321-342, 1991.

[109] ROGERS, D; SATTERFIELD, S.; RODRIGUEZ, F.; ***Ship Hulls, B-Splines surfaces and CAD/CAM***; IEEE Comp., Graphics & Applic., vol.3(9), pg. 37-45, dezembro, 1983.

[110] YEH, Z.; YING, D; ***An automated interface between CAD and CAM;*** Computer & Graphics, vol 12(3), pg. 349-357, 1988.

[111] GUYDER, M.K.; ***Automating the optimization of 2½ axis milling***; Computers in Industry, vol. 15. pg. 152-182, 1990

[112] HANSEN, A.; ARBAB, F; ***An algorithm for generating NC tool paths for arbitrarily shaped pockets with islands;*** ACM Transactions on Graphics, vol. 11(2), pg. 152-182, abril, 1992.

[113] COTA, F.E.; QUEIROZ, A.A.; GONÇALVES Fº, E.; ***Usinagens de cavidades em formas arbitrárias em máquinas-ferramentas de comando numérico***; Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM, 1993, pg. 1599-1602, Brasília, 1993.

[114] SUH, Y.S.; LEE, K.; ***NC Milling tool path generation for arbitrary pockets defined by sculptured surfaces***; Computer Aided Design, vol. 22(5), junho, 1990.

[115] BROOMHEAD, P.; EDKINS, M.; ***Generating NC data at the maching tool for the manufacture of free-form surfaces;*** International Journal of Production Research, vol 24(1), pg. 1-14.

[116] BOBROW, J.E.; ***NC machine tool path genetration from CSG part representation;*** Computer-Aided Design, vol.17(2), pg. 69-76, março, 1985.

ANEXO - RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS QUANTO À PROGRAMAÇÃO DO FRESAMENTO DE ELEMENTOS DE MOLDES

1 USINAGEM DE SUPERFÍCIES DE FECHAMENTO [14, 38]

A superfície de fechamento de placas com cavidades é geralmente pré-usinada em uma máquina convencional com um pequeno sobrematerial, removido por retificação após a usinagem CNC da cavidade. Para as placas-macho de difícil retificação, pode ser adotado o acabamento conseguido pela operação de fresamento. É muito freqüente que os moldes tenham um pequeno ressalto (cerca de 0,1 mm) na região envolta do macho. A superfície de fechamento fica então reduzida a uma área com largura de 10 a 20 mm a partir do contorno do macho, como mostra a figura 91. Isto diminui a superfície de contato entre as duas metades do molde, de forma a reduzir o esforço da máquina injetora para manter o molde fechado. Enquanto o restante da placa é usinado em máquinas-ferramenta convencionais, a superfície de fechamento do molde é acabada juntamente com o modelo, utilizando um programa específico, com uma fresa de topo em zigue-zague com incremento lateral de 3/4D para minimizar o tempo de usinagem, ou pelo mesmo programa que usina o macho, com fresas de bola ou toroidais. De qualquer forma, o acabamento superficial não deve apresentar cristas maiores do que 5 μ.

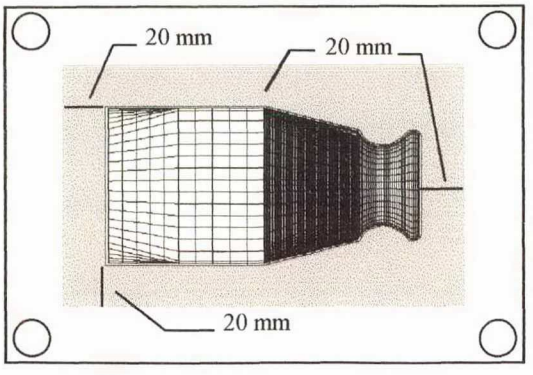


Figura 91 - Ressalto na superfície de fechamento do molde: as dimensões do ressalto (em cinza) de uma placa-macho obedecem uma cota de 20 mm, a partir dos pontos extremos do contorno da geometria

2 USINAGEM DE CANAIS DE INJEÇÃO [14, 38]

Os canais de injeção são geralmente usinados convencionalmente ou erodidos. Porém, em alguns casos, o programador pode optar por inclui-los na programação de uma placa-macho ou fêmea.

Canais semicirculares poderiam ser fresados por uma ferramenta com raio igual ao canal em uma só passada. Porém, de maneira geral, a recomendação da prática é usar uma ferramenta menor e gerar trajetórias isoparamétricas (poucas passadas) em ida e volta. Para que as cristas não tendam a manter o canal na fêmea, a direção das passadas deve ser ao longo do comprimento do canal. Canais em leque são normalmente erodidos, mas uma estratégia de planos não paralelos poderia ser empregada caso se optasse por usinagem. Alturas de crista da ordem de 3 a 5 μ são geralmente o requisito de acabamento de canais.

3 UTILIZAÇÃO E FABRICAÇÃO DE ELETRODOS [14, 38]

3.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA

Eletrodos devem ter três partes, como se vê na figura 92. O corpo é modelado a partir da geometria do detalhe do molde que deve ser erodido enquanto a cabeça, que possibilita sua adequada fixação na máquina, é normalmente um paralelepípedo modelado à parte. Uma única cabeça pode ser comum a vários eletrodos. Para que a cabeça do eletrodo não tome parte na erosão, danificando a superfície do molde, deve-se estender por alguns milímetros a geometria da seção superior, no sentido da penetração do eletrodo, formando uma folga entre o corpo do eletrodo e sua cabeça.

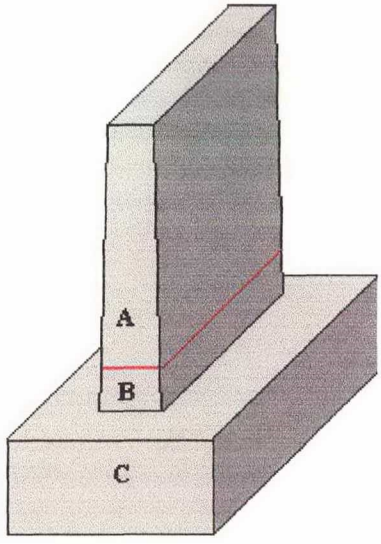


Figura 92 – Eletrodo tipo palheta: A – parte ativa do eletrodo, responsável pela erosão do molde; B – folga; C – cabeça para fixação na máquina de eletroerosão

Os eletrodos possuem formas e tamanhos muito variados, pois dependem da cavidade ou do detalhe que produzirão. Um dos tipos mais comuns são os eletrodos em forma de palheta, como o da figura 92, utilizado para a abertura de detalhes muito estreitos e/ou profundos para uma fresa.

3.2 CONSIDERAÇÃO DO *GAP*

Para que o arco voltaico seja aberto entre o eletrodo e a superfície do molde é necessária uma pequena distância, chamada *gap*. Portanto o corpo do eletrodo deve ter geometria menor do que a do detalhe erodido. O programador pode construir a geometria do eletrodo já com sua dimensão real ou, para facilitar seu modelamento, usar dois artifícios na programação das trajetórias. Pode-se especificar um sobrematerial negativo, no valor do *gap* ou um diâmetro da ferramenta no CAM menor do que o seu diâmetro real, como por exemplo, programar a usinagem para uma ferramenta de 11,3 mm e usar uma fresa de 12 mm na máquina. Neste caso, o *gap* produzido seria de 0,35 mm. Contudo, para fresas de topo plano ou mesmo para fresas de bola em softwares que consideram o a ponta da ferramenta para geração dos pontos CL, este artifício não pode ser usado, a não ser para as paredes de um eletrodo.

Os valores de *gaps* geralmente utilizados para eletrodos de cobre ou grafite estão entre 0,3 e 0,5 mm para eletrodos de desbaste e entre 0,12 e 0,15 mm para eletrodos de acabamento.

3.3 ALÍVIO

Sempre que possível se reduz o material que deve ser erodido para que a remoção por eletroerosão se torne mais rápida. Em cantos vivos, por exemplo, é usual se programar uma usinagem de alívio com uma fresa de pequeno diâmetro, removendo o excesso de material deixado pela ferramenta de desbaste. Outro exemplo é o desbaste feito em cavidades onde o acabamento é feito por um eletrodo no seu formato ao invés de uma fresa, como cavidades profundas com raios pequenos.

3.4 PROGRAMAÇÃO DA USINAGEM DO ELETRODO

A usinagem de um eletrodo é muito semelhante à de qualquer outra peça, utilizando-se desbaste com fresa de ponta cilíndrica a partir de um bloco de material e acabamento da geometria com fresa esférica. Costuma-se especificar uma altura de crista máxima entre 0,01 (grosseiro) e 0,001 mm (excelente) para a operação de acabamento de eletrodos para moldes de injeção padrão.

Eletrodos pouco espessos e muito altos como os do tipo palheta tem o corpo acabado com uma estratégia de **perfilamento com Z constante** ou com um **perfilamento helicoidal** para evitar vibrações e a flexão do eletrodo. Aumento da rotação e diminuição do avanço por gume também

são recursos para reduzir estes corriqueiros problemas na usinagem de paredes finas. Vibrações e flexão na usinagem do topo (ponta) de eletrodos deste tipo são evitadas quando primeiro se desbasta e acaba esta parte, para depois desbastar e acabar o corpo e a cabeça.

Estratégias para usinagem 2½D são muito utilizadas para eletrodos de formas simples. Paredes inclinadas podem ser perfiladas em Z constante inclinadas de um eletrodo desde que exista a opção de *draft angle*. Este tipo de usinagem pode ser feito com uma fresa cônica, com inclinação igual à da parede, conseguindo-se uma superfície sem cristas. Porém, o afiamento cônico de uma fresa para diminuir o número de passadas só se justifica para usinagem de eletrodos grandes ou de um grupo de eletrodos com mesma inclinação.

3.5 REFERENCIAMENTO

Além de gerar o programa, o programador também deve informar ao operador de eletroerosão a posição em que o eletrodo deve penetrar no molde. Apesar de parecer uma tarefa simples, é muito comum a danificação de moldes devida ao referenciamento impróprio do eletrodo, resultando em refugo ou retrabalho (soldagem da abertura e nova erosão). Normalmente, o eletrodo é referenciado ao zero-peça do molde pelo centro da cabeça, em XY, e pelo topo (ponta), no eixo Z.