

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

**FRESAMENTO POR REGIÕES COMO UMA ALTERNATIVA
NA USINAGEM DE CAVIDADES PARA MOLDES DE INJEÇÃO
ATRAVÉS DE SISTEMA CAD/CAM**

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

MARIANO SARAIVA DA SILVA FILHO

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2000

**FRESAMENTO POR REGIÕES COMO UMA ALTERNATIVA NA USINAGEM DE
CAVIDADES PARA MOLDES DE INJEÇÃO ATRAVÉS DE SISTEMA CAD/CAM**

MARIANO SARAIVA DA SILVA FILHO

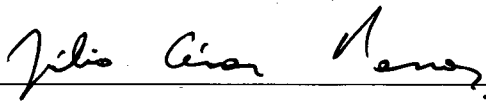
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

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

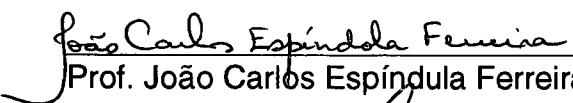

Orientador: Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.

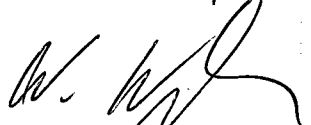

Co-orientador: Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.


Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do CURSO - CPGEM/UFSC

BANCA EXAMINADORA


Prof. Aureo Ferreira Campos, Ph.D.
PRESIDENTE


Prof. João Carlos Espíndula Ferreira, Ph.D.


Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas cimjectianos Alexandre, Ângelo, Armando, Aurélio (Leio), Clênio, Cristóvão (Cristo), Dauri, Fábio, Jean, Júlio, Marcelo (Malone), Marcelo Fraga, Marlus, Otávio, Pablo, Ricardo Fialkowski, Ricardo Gomide, Ricardo Santana (Tete), Ubiratan (Bira) e Valter, pelo apoio técnico e moral na realização deste trabalho. Em especial ao Jorge que sempre esteve disponível nas horas mais críticas, inclusive sábados e domingos.

Aos agora professores Andrei, Diovani e Peixoto, por participarem do trabalho desde a definição do tema, sugerindo linhas de pesquisa.

Aos meus orientadores Caico e Rolf, pela vontade de levar a diante um trabalho de cooperação entre dois laboratórios, sempre encontrando o melhor caminho para contornar as dificuldades.

Ao pessoal do LMP, Aroldo, Cleiton, Eduardo, Gerson, Pablo, Sérgio, e todos que de alguma forma colaboraram na integração dos laboratórios CIMJECT e LMP.

Ao Delmonte e o pessoal do USICON, que também fazem parte deste trabalho, pois muitas das conclusões foram obtidas naquele laboratório.

À Sandvik e à Seacam/Delcam, por fornecerem os meios necessários para que um trabalho prático pudesse ser desenvolvido.

Ao curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e seu corpo docente, por fornecer a infra-estrutura para a realização do mestrado.

A minhas irmãs, meus primos e, especialmente meus tios, pelo incentivo veemente em vista da realização de um curso de pós-graduação e pelo apoio que me deram desde o curso de graduação.

À Emiliane, por tornar melhores ainda os fins de semana nesta ilha fantástica que é Florianópolis.

À Floripa, que acolhe e fascina quem visita esta terra ou mora por aqui.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
SIMBOLOGIA.....	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1- INTRODUÇÃO	1
1.1- ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	1
1.2- OBJETIVO DO TRABALHO.....	5
1.3- ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1- ASPECTOS GERAIS DO FRESAMENTO	7
2.1.1- Fresamento de topo.....	12
2.2- ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	15
2.2.1- Acabamento em cavidades.....	21
2.3- PROGRAMAÇÃO DO FRESAMENTO COM AUXÍLIO DE SISTEMAS CAD/CAM.....	23
2.3.1- Sistemas CAD/CAM.....	23
2.3.2- Planejamento da programação via CAD/CAM.....	24
2.3.3- Escolha das ferramentas	26
2.3.4- Delimitação das áreas a usinar.....	28
2.3.5- Seleção das estratégias.....	29
3- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	35
3.2- PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	35
3.2.1- Variáveis de entrada.....	37
3.2.2- Variável de saída	38

3.2.3- Material utilizado nos ensaios	39
3.2.4- Ferramentas de corte.....	39
3.2.5- Máquina-ferramenta.....	39
3.2.6- Equipamento para verificação da qualidade superficial	40
3.3- REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	40
3.3.1- Paredes com ângulo para extração	41
3.3.2- Planos inclinados	42
3.3.3- Superfícies côncavas e convexas.....	46
3.3.4- Calotas.....	49
3.3.5- Semi-esferas.....	50
4- ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
4.1- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE PAREDES COM ÂNGULO PARA EXTRAÇÃO	52
4.2- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE PLANOS INCLINADOS.....	54
4.2.1- Usinagem ascendente e descendente.....	54
4.2.2- Ângulo da trajetória em Planos paralelos	55
4.2.3- Influência da geometria da fresa esférica	57
4.2.4- Sobremetal.....	58
4.2.5- Fresa toroidal no acabamento	59
4.3- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE SUPERFÍCIES CÔNCAVAS E CONVEXAS	59
4.3.1- Planos paralelos x Perfilamento 2½ eixos	59
4.3.2- Fresa toroidal no acabamento	60
4.3.3- Influência do sentido de corte.....	61
4.3.4- Raio da fresa igual ao do arredondamento.....	62
4.4- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE CALOTAS.....	63
4.4.1- Trajetória em Perfilamento 2½ eixos	63
4.4.2- Trajetória em Patamares em hélice.....	63
4.4.3- Trajetória em Projeção radial.....	64
4.4.4- Trajetória em Planos paralelos	64
4.4.5- Utilização da fresa toroidal no acabamento	65
4.5- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE SEMI-ESFERAS.....	65

4.5.1- Trajetória em Perfilamento 2½ eixos	65
4.5.2- Trajetória em Patamares em hélice	67
4.5.3- Trajetória em Planos paralelos	68
4.5.4- Trajetória em Projeção radial.....	68
4.5.5- Utilização da fresa toroidal no acabamento	69
4.6- CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5- AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA USINAGEM POR REGIÕES EM UM SISTEMA CAM (ESTUDO DE CASOS)	72
5.1- PREPARAÇÃO INICIAL.....	72
5.1.1- Sistema CAM utilizado.....	72
5.1.2- Peças a serem analisadas.....	73
5.1.3- Definição dos recursos a serem analisados	73
5.2- REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASOS.....	74
5.2.1- Cavidades para fabricação de uma peça com núcleo perdido	74
5.2.2- Cavidade para injeção de um fone de aparelho telefônico	81
5.2.3- Pára-choque de automóvel.....	82
6- CONCLUSÃO	89
6.1- CONSIDERAÇÕES QUANTO AO ESTUDO DE CASOS	89
6.1.1- Relativas à delimitação de regiões feita por pontos.....	89
6.1.2- Relativas à geração automática de limites.....	91
6.1.3- Relativas ao perfil de rugosidade obtido na usinagem.....	93
6.1.4- Relativas às trajetórias da ferramenta	95
6.1.5- Relativas aos tempos de programação.....	100
6.2- CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
6.3- SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	104
ANEXO I	112
ANEXO II	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Direções e sentidos de corte	3
Figura 2.1: Tipos de fresas.	8
Figura 2.2: Sentidos de corte no fresamento	9
Figura 2.3: Influência do diâmetro da fresa na espessura do cavaco.....	11
Figura 2.4: Tipos de fresas de topo com haste cilíndrica	12
Figura 2.5: Fresa de topo com pastilha redonda (topo toroidal)	14
Figura 2.6: Geometria da fresa de topo semi-esférico	15
Figura 2.7: Superfícies com mesmo valor de R_a e diferentes valores de R_y	18
Figura 2.8: Parâmetros de rugosidade	18
Figura 2.9: Parâmetros verticais e horizontais	18
Figura 2.10: Tipos de perfil de rugosidade	19
Figura 2.11: Ângulos de inclinação das elevações, das reentrâncias e dos picos das elevações	19
Figura 2.12: Regiões de picos, central e de reentrâncias do perfil	20
Figura 2.13: Dependência e independência da direção de medição.....	20
Figura 2.14: Cristas ou <i>scallops</i> formados por passadas paralelas de fresas esféricas.....	22
Figura 2.15: Rugosidade teórica e medida para diversos avanços e raios de quina de ferramentas no torneamento, segundo Moll e Brammertz	23
Figura 2.16: Criação da superfície para fechar a região e limitar a usinagem.....	29
Figura 2.17: Criação de limites calculados automaticamente pelo CAM, limitando a área de acordo com a inclinação	29
Figura 3.1: Exemplo de forma geométrica classificada como parede.....	41
Figura 3.2: Exemplo de forma geométrica classificada como plano inclinado.....	42
Figura 3.3: Direção da trajetória classificada como A.....	43
Figura 3.4: Direção da trajetória classificada como B.....	43
Figura 3.5: Direção da trajetória classificada como C.....	44
Figura 3.6: Direção da trajetória classificada como D.....	44
Figura 3.7: Direção da trajetória classificada como E.....	44
Figura 3.8: Exemplo de forma geométrica classificada como côncava.	47

Figura 3.9: Exemplo de forma geométrica classificada como calota.	49
Figura 3.10: Exemplo de forma geométrica classificada como semi-esfera.	50
Figura 4.1: Superfícies resultantes do ensaio em paredes.	53
Figura 4.2: Usinagem ascendente e descendente	54
Figura 4.3: Superfícies de um plano usinado com varredura em 3 eixos em ângulo de 45° obtidas através de um rugosímetro.	55
Figura 4.4: Gráficos representando os resultados das medições de rugosidade em planos com inclinações de 30° e 45°.	56
Figura 4.5: Gráficos representando os resultados das medições de rugosidade em planos de inclinações de 60° e de 2,5° a 20°.	57
Figura 4.6: Gráficos representando os resultados das medições de rugosidade para diferentes valores de sobremetal.	58
Figura 4.7: Superfícies resultantes do ensaio em geometria côncava.	60
Figura 4.8: Superfícies resultantes dos ensaios em geometria convexa com fresa toroidal.	61
Figura 4.9: Superfícies resultantes do ensaio em arredondamento de cantos.	63
Figura 4.10: Superfícies resultantes do ensaio em calota com estratégia Perfilamento 2½ eixos.	63
Figura 4.11: Superfícies resultantes do ensaio em calota com estratégia Patamares em hélice.	64
Figura 4.12: Superfícies resultantes do ensaio em calota com as estratégias Projeção radial e Planos paralelos.	65
Figura 4.13: Superfícies resultantes do ensaio em calota com estratégia Projeção radial e Planos paralelos com fresa toroidal.	66
Figura 4.14: Superfícies resultantes do ensaio em ½ esfera com estratégia Perfilamento 2½ eixos.	66
Figura 4.15: Superfícies resultantes do ensaio em ½ esfera com estratégia Patamares em hélice.	67
Figura 4.16: Superfícies resultantes do ensaio em ½ esfera com as estratégias Planos paralelos e Projeção radial.	68
Figura 4.17: Superfícies resultantes do ensaio em ½ esfera com as estratégias Planos paralelos e Projeção radial com fresa toroidal.	69
Figura 4.18: Gráfico da rugosidade teórica e medida, para plano com inclinação de	

45°	70
Figura 5.1: Cavidades para fundição do núcleo e para injeção da peça em plástico.	75
Figura 5.2: Parte da cavidade para fundição do núcleo (Peça 2).	80
Figura 5.3: Parte da cavidade para injeção da peça em plástico (Peça 4).	80
Figura 5.4: Fone de um aparelho telefônico.	81
Figura 5.5: Trajetórias criadas para o acabamento de arredondamentos.....	83
Figura 5.6: Pára-choque de automóvel.....	84
Figura 5.7: Trajetórias para acabamento com a programação convencional.	86
Figura 5.8: Trajetórias para acabamento dos arredondamentos.	87
Figura 5.9: Trajetórias para acabamento com a programação por regiões.	88
Figura 6.1: Limites criados para geometria com pouca inclinação (sem compensação do raio da ferramenta).	89
Figura 6.2: Limites criados para geometria com muita inclinação (<i>offset</i> no valor do raio da ferramenta).	90
Figura 6.3: Limites criados para geometria com muita inclinação (<i>offset</i> com valor inferior ao raio da ferramenta). Trajetória incompleta.....	90
Figura 6.4: Defeito na criação das trajetórias para acabamento de arredondamentos (<i>bug do software</i>).....	92
Figura 6.5: Perfil com reentrâncias.	93
Figura 6.6: Elevações com ângulo de pico (γ) pequeno e ângulo de inclinação (β) grande.	95
Figura 6.7: Influência do período das elevações no acabamento manual.	95
Figura 6.8: Elevações com amplitudes grandes.	97
Figura 6.9: Efeito do acabamento manual nos arredondamentos.	98
Figura 6.10: Trajetória de acabamento de arredondamentos na direção E.	99
Figura 6.11: Desnível entre duas regiões usinadas com ferramentas diferentes.	99
Figura 6.12: Excesso de material em alguns pontos, quando não é utilizada a estratégia correta.....	100
Figura A1: Efeito da projeção da trajetória no incremento lateral a_e	113
Figura A2: Planilha para cálculo do passo lateral em superfícies inclinadas.....	115
Figura A3: Relações para o cálculo do diâmetro efetivo de corte.....	116
Figura A4: Planilha para cálculo da rugosidade teórica, diâmetro efetivo de corte, avanço e velocidade de corte.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Desvio de forma das superfícies técnicas	17
Tabela 2.2: <i>Softwares</i> de CAM mais utilizados na indústria nacional	25
Tabela 2.3: Passos no planejamento das operações de acabamento	26
Tabela 2.4: Fresas empregadas na fabricação de cavidades para moldes.....	27
Tabela 2.5: Estratégias para acabamento	30
Tabela 2.6: Estratégias 3D classificadas pelo tipo de movimento gerado.....	33
Tabela 3.1: Fatores influentes no acabamento superficial em superfícies fresadas.....	38
Tabela 4.1: Tempos de usinagem em paredes com diferentes estratégias.....	52
Tabela 4.2: Valores de rugosidade e tempo de usinagem na superfície convexa.....	62
Tabela 4.3: Orientações para fresamento de geometrias de complexidade baixa.....	71
Tabela 5.1: Trajetórias geradas na parte da cavidade para fundição do núcleo.....	76
Tabela 5.2: Trajetórias geradas na parte da cavidade para injeção da peça em plástico.....	78
Tabela 6.1: Estimativa de tempo para as duas formas de programação.....	101
Tabela A1: Materiais mais utilizados pela indústria de moldes	120
Tabela A2: Influência dos elementos de liga nas propriedades do aço.....	120

SIMBOLOGIA

α	-	Ângulo de inclinação do plano
α_o	-	Ângulo de flanco
β	-	Ângulo de direção da trajetória
β	-	Ângulo de hélice
β	-	Ângulo de inclinação das elevações
δ	-	Ângulo de abertura das reentrâncias
γ	-	Ângulo de pico
γ_r	-	Ângulo de saída radial
γ_f	-	Ângulo de saída axial
φ	-	Ângulo de ataque ou direção de avanço
σ	-	Desvio-padrão da amostra
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_e	-	Engajamento; incremento ou passo lateral
a_p	-	Profundidade de corte; penetração passiva; ou profundidade de corte axial
B	-	Distância do centro da fresa até o início do gume
CAD	-	Projeto assistido por computador (Computer Aided Design)
CAM	-	Fabricação assistida por computador (Computer Aided Manufacturing)
CNC	-	Controle numérico computadorizado (Computer Numerical Control)
D	-	Diâmetro
D	-	Dimensão
f	-	Velocidade de avanço
F_c	-	Força de corte
f_z	-	Avanço por dente
$h_{cu,f}$	-	Espessura do cavaco
HSC	-	Alta velocidade de corte (High Speed Cutting)
HSS	-	Aço-rápido (High Speed Steel)

IGES	-	International Graphics Exchange Standard
k_c	-	Pressão de corte; força específica de corte
l_e	-	Comprimento de medição (<i>cut off</i>)
l_m	-	Comprimento total de medição ($5 \times l_e$)
MD	-	Metal-duro
n	-	Frequência
NC	-	Controle numérico (Numerical Control)
R_a	-	Rugosidade média
R_k	-	Região central
$R_{máx}$	-	Maior rugosidade dentre os intervalos l_e
R_{pk}	-	Região de picos (Elevações)
R_{vk}	-	Região de reentrâncias (Reentrâncias)
R_y , P-V ou R_t	-	Maior distância de pico a vale no comprimento l_m
STEP	-	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	-	Stereolithography File
Ti(C,N)	-	Carbonitreto de titânio
v_c	-	Velocidade de corte
v_f	-	Velocidade de avanço
X	-	Eixo X de um sistema de coordenadas cartesiano
Y	-	Eixo Y de um sistema de coordenadas cartesiano
Z	-	Eixo Z de um sistema de coordenadas cartesiano
z	-	Número de dentes

RESUMO

Em função da crescente complexidade geométrica das cavidades em moldes de injeção é cada vez maior o emprego de sistemas CAD/CAM na programação de operações de fresamento em formas livres (*free-forms*). A obtenção de programas NC capazes de assegurar uma usinagem adequada da cavidade depende, basicamente, dos recursos oferecidos pelo sistema e da experiência do programador. Desta forma, a obtenção da qualidade superficial da cavidade a ser usinada dependerá da capacidade do programador atribuir as condições tecnologicamente mais indicadas para fresar cada forma geométrica, atividade esta muitas vezes realizada de forma empírica.

Visando apresentar uma alternativa para a problemática em questão, este trabalho busca avaliar o emprego do fresamento por regiões na programação NC via CAD/CAM. Com base em ensaios de usinagem, realizados em geometrias classificadas como de complexidade baixa, foram obtidas recomendações relativas ao seu fresamento. Objetivando avaliar a aplicabilidade da sistemática proposta e das recomendações na programação via CAM de cavidades, foi realizado um estudo de casos em um sistema CAM que possui recursos dedicados à área de moldes.

ABSTRACT

Due to the growth of the geometric complexity in injection mold cavities, the use of CAD/CAM systems as an aid the free-form milling operations have been increasing considerably. The elaboration of NC programs, which are able to ensure adequate cavity milling basically depends on the resources offered by such system, as well as the programmer's expertise. Thus the cavity's surface quality relies on the programmer's skill to assign the most suitable manufacturing conditions to mill each geometric shape. Such practice is often carried out empirically.

In order to propose an alternative solution to the problem described above, this study intends to evaluate the use of CAD/CAM systems in NC programming through the "milling-by-regions" procedure. Results obtained from milling experiments of low complexity surfaces have provided recommendations for milling these shapes. Some case studies in a mold-oriented CAD/CAM system have been carried out in order to evaluate the applicability of systematic proposed.

1- INTRODUÇÃO

1.1- ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

As ferramentarias brasileiras procuram, cada vez mais, ganhar mercado frente a indústrias estrangeiras como, por exemplo, as de Portugal, onde o prazo de entrega e a qualidade do produto são as principais vantagens. Nestas empresas, a aquisição de porta-moldes padronizados, o uso de modernas tecnologias para o projeto e fabricação de moldes (sistemas CAD/CAM) e a disponibilidade de mão-de-obra especializada, propiciam a redução no tempo de concepção da ferramenta e uma melhor qualidade da cavidade usinada.

Buscando atingir níveis de produção e qualidade de serviço compatíveis com as empresas estrangeiras, grande parte das ferramentarias nacionais adquiriu máquinas CNC e sistemas CAD/CAM, esperando obter ganhos consideráveis de produtividade e precisão no fresamento de cavidades e eletrodos [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Entretanto, a utilização de sistemas CAD/CAM ainda não é feita de forma otimizada, pois o programador, muitas vezes, não está preparado para extrair o melhor do sistema [4, 6]. Em tais ferramentas de auxílio computacional, as etapas mais problemáticas são a programação e a execução das operações de acabamento, uma vez que estas etapas demandam o maior custo para produção do molde (cerca de 25% do custo total) e determinam a precisão e qualidade superficial da cavidade [7].

O resultado da programação estará atrelado à entrada correta ou não de dados no sistema, podendo, assim, obter-se resultados desejados ou atraso nos serviços, quebra de ferramentas, refugos e retrabalhos. Portanto, alcançar os níveis de qualidade e prazo de entrega desejados depende, basicamente, de programadores com conhecimento em tecnologia de usinagem e da potencialidade da ferramenta CAM utilizada.

Embora o conhecimento em tecnologia de usinagem, aparentemente, não seja um problema para a maioria dos programadores (pois grande parte destes trabalhava com fresadoras convencionais ou CNC, acumulando boa experiência), em situações onde é preciso recorrer à teoria para uma otimização das condições de corte, estes

profissionais podem não corresponder ao que se espera de um bom programador [16]. Por outro lado, para programadores mais novos, vindos de escolas técnicas e universidades, o conhecimento tecnológico do processo é bastante teórico. Nos dois casos, seja pela falta de conceitos teóricos (antigos operadores de máquinas) ou pela necessidade da prática (profissionais recém-formados), existem deficiências que devem ser sanadas, em termos de conhecimento do processo de fresamento [6].

Fatores relacionados à movimentação da ferramenta e parâmetros de corte geram incertezas quando o programador está frente a uma tela de computador, principalmente na indústria de moldes, onde as geometrias usinadas variam muito e cada produto (molde) é único [7]. Alguns dos questionamentos que surgem no momento da programação do acabamento são:

- Na usinagem de superfícies inclinadas, a fresa deve cortar somente subindo, somente descendo, nos dois sentidos, na direção longitudinal ou em uma direção intermediária (Figura 1.1)?
- Quais as conseqüências que cada uma destas opções terá em termos de diâmetro efetivo de corte e acabamento superficial?
- Existem vantagens em usinar somente no sentido de corte concordante, já que este resultaria num melhor acabamento superficial?
- O que acontece com relação à força de usinagem e, conseqüentemente, às vibrações geradas para cada sentido (concordante e discordante)?
- O menor tempo de usinagem, utilizando os dois sentidos, pode ser vantajoso? Qual a diferença, em termos de rugosidade, para a usinagem com apenas um sentido de corte?

Estas e outras dúvidas se referem a parte tecnológica do fresamento e surgem no momento de executar a entrada de dados no *software* de CAM. Contudo, existem ainda os fatores referentes à programação via CAM, que podem facilitar ou limitar a usinagem da cavidade.

A programação das trajetórias para o fresamento de cavidades deve começar com um planejamento das operações de desbaste, pré-acabamento e acabamento ou, em alguns casos, somente desbaste e acabamento. Ainda se deve verificar quais ferramentas estão disponíveis e prever a fixação do bloco na mesa da fresadora para evitar colisões da fresa com os elementos de fixação [6]. A programação propriamente

dita começa com a preparação da geometria, para que sobre estas sejam geradas as trajetórias de ferramenta. Portanto, já nesta fase devem estar definidas a linha de abertura do molde e as áreas onde será empregado o processo de eletroerosão. De acordo com a linha de abertura, definida no projeto do molde e baseada nas características geométricas da peça, fica determinado o número e a forma das superfícies que formarão a cavidade.

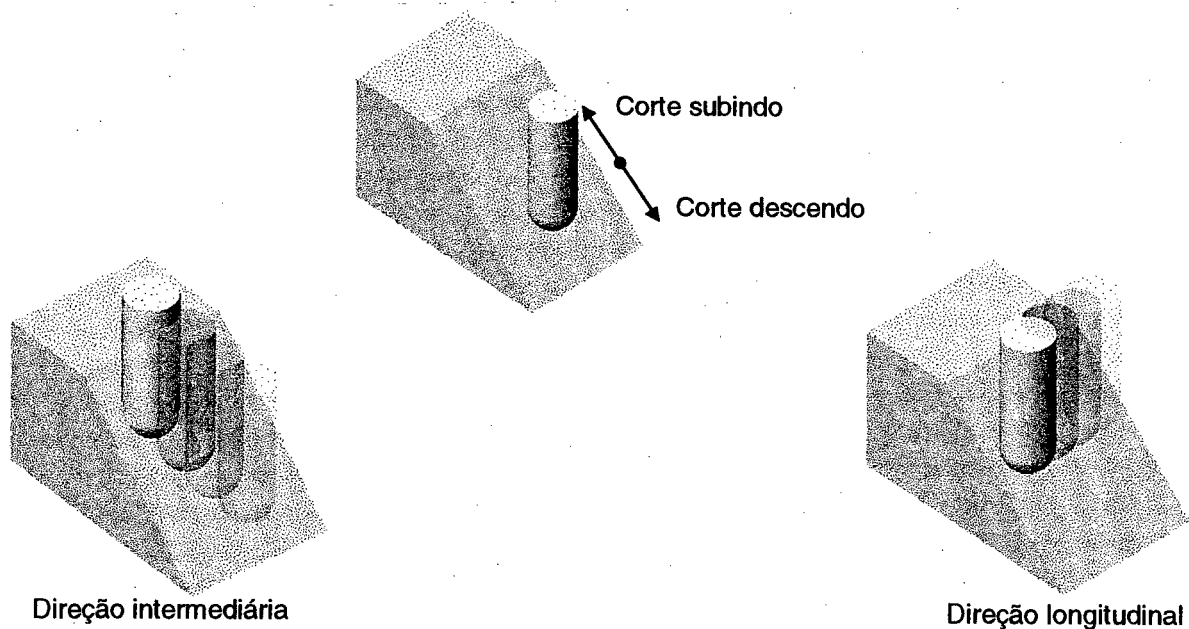


Figura 1.1: Direções e sentidos de corte

A partir deste momento, o programador depara-se com um conjunto de geometrias que devem ser usinadas e uma variedade de estratégias que o CAM oferece. Para cada opção, existe um campo onde o usuário deve fornecer alguns parâmetros como velocidade de corte, avanço, passo lateral e selecionar opções como tipo de entrada da ferramenta no material e sentido de corte. Estes fatores dependem da fresa que está sendo utilizada, do material do bloco e da etapa que está sendo realizada (desbaste ou acabamento). Pode-se notar que o número de variáveis é bastante grande, e o número de combinações destas maior ainda, gerando dificuldades na busca da melhor opção. Além disso, a condição mais apropriada para a usinagem pode ser diferente para cada forma geométrica da cavidade.

Entretanto, um dos maiores problemas para o programador é a escolha certa da

estratégia de acabamento, pois existe um grande número destas estratégias [7], e os manuais dos *softwares* não indicam qual a mais adequada em função do tipo de geometria a ser usinada.

Identificar a estratégia mais adequada para usinar certa geometria não é uma tarefa simples. Isto é feito, basicamente, de três formas:

- Baseado em experiências anteriores do programador, tendo este programado o fresamento de uma variedade considerável de formas geométricas;
- Utilizando uma ou duas estratégias, alegando que, se estas não são as mais adequadas, pelo menos não comprometem o trabalho;
- Ou então, por tentativas, onde o usuário do *software* executa um grande número de cálculos de trajetórias e verifica qual delas aparentemente está mais adequada.

No primeiro caso, as ferramentarias que possuem um operário qualificado e com experiência, produzem bons moldes. Entretanto, caso este funcionário vier a se afastar do serviço, a empresa perde o seu "histórico". Na segunda hipótese, fica claro que as trajetórias não serão as melhores para todos os casos, principalmente pelas características da indústria de moldes, onde a variedade de formas geométricas é grande, existindo sempre uma estratégia que melhor se adapta a cada geometria. Outra técnica é a geração de várias trajetórias para escolher dentre elas a melhor, além de demandar um bom tempo de programação, a otimização da usinagem nem sempre é atingida.

Pode-se constatar que nenhuma destas maneiras é a mais adequada para gerar um programa NC otimizado em um tempo aceitável. Portanto, buscar obter uma maneira de organizar informações sobre fresamento capazes de direcionar a escolha da estratégia de acabamento, baseada na geometria da cavidade, se constitui numa importante atividade a ser realizada.

√ As geometrias complexas, em alguns casos, devem ser separadas por meio de insertos e/ou gavetas para facilitar a fabricação e extração do moldado. O artifício de separar a geometria em partes, usiná-las e depois montar, foi bastante empregado quando não se dispunha de máquinas CNC, nem do auxílio computacional na fabricação do molde. Nos dias de hoje, este problema é contornado, utilizando sistemas CAD/CAM. Entretanto, é desejável que o sistema CAM possibilite separar

regiões com características diferentes, em uma mesma geometria complexa, para que esta seja usinada de forma a obter a melhor condição de corte.

Esta decomposição virtual da peça, de certa forma se assemelha à decomposição descrita anteriormente, porém, com o objetivo de otimizar a usinagem sob o ponto de vista tecnológico. A tendência no desenvolvimento dos *softwares* de CAM, os *knowledge-based CAM*, tem princípio semelhante, sendo que o CAM reconhece as características da peça e, baseado nelas, gera o programa NC da melhor forma, quase sem interferência do usuário [8, 9]. Contudo, o nível de desenvolvimento destes produtos ainda não se encontra em patamares onde se possa dispensar o conhecimento do programador.

Entretanto, saber como obter o melhor acabamento superficial, não significa que se possa facilmente seguir estas recomendações, uma vez que a aplicação da maneira mais adequada para usinar certa característica geométrica depende dos recursos que o sistema CAD/CAM oferece.

1.2- OBJETIVO DO TRABALHO

Com base no que foi exposto, este trabalho tem como objetivo propor o fresamento por regiões como uma sistemática para a usinagem de cavidades de moldes e avaliar a aplicabilidade desta alternativa utilizando um sistema CAM.

Dentro deste contexto, deverão ser elaboradas orientações que servirão de apoio para a programação da usinagem de acabamento, utilizando os recursos disponíveis nos *softwares* de CAM. Para tanto, são ainda proposições do trabalho:

- Analisar variáveis de trabalho para o fresamento de topo, visando a melhor qualidade no acabamento superficial. Assim, procurar obter recomendações para a usinagem de geometrias comumente encontradas em cavidades de moldes, uma vez que a literatura sobre o assunto é insuficiente.
- Avaliar a aplicabilidade dos resultados obtidos anteriormente, na usinagem de cavidades, com os recursos que um sistema CAM oferece. Quando não for possível a aplicação das recomendações, devido a limitações do sistema CAM, apontar onde o *software* deve ser melhorado, para permitir a programação por regiões.

1.3- ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 são apresentados os principais fatores que exercem influência no fresamento de cavidades de moldes. É apresentada também uma revisão sobre acabamento superficial e parâmetros para medição da rugosidade, bem como o estado da arte na fabricação de moldes assistida por computador, com as estratégias comumente encontradas em *softwares* de CAM.

No Capítulo 3 é mostrada uma classificação das geometrias mais encontradas em cavidades de moldes. Baseado neste conjunto de formas geométricas básicas, a programação por regiões é proposta. Com o intuito de gerar informações sobre o fresamento destas geometrias, são descritos ensaios envolvendo algumas variáveis da tecnologia de usinagem e estratégias disponíveis no CAM.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, no Capítulo 4 são estabelecidas orientações para o fresamento do conjunto de geometrias classificadas anteriormente. Com isso, pode-se conhecer qual combinação de ferramenta, estratégia e geometria estudada fornece melhor acabamento superficial.

Para comprovar a aplicabilidade da programação por regiões, é realizado um estudo de casos no Capítulo 5, com o qual se pôde avaliar a real aplicação desta sistemática em peças da indústria de plásticos. Seguindo orientações obtidas nos ensaios do Capítulo 4 e a literatura sobre o assunto, procurou-se analisar os recursos e limitações que um *software* de CAM oferece.

O capítulo 6 contém as considerações finais relacionadas a aspectos importantes da fabricação de cavidades, conclusões e sugestões para novos trabalhos.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- ASPECTOS GERAIS DO FRESAMENTO

Semelhante a outros processos de usinagem, como o torneamento, furação e retificação, no fresamento a retirada de material é promovida pelo movimento relativo entre a ferramenta e a peça. O movimento de corte, obtido pela rotação da ferramenta e pelo avanço, pode ser normal ou oblíquo à direção do eixo de rotação. O avanço, é dado pelo deslocamento da fresa, da mesa e, raras vezes, de ambos.

O fresamento é o processo mais utilizado na confecção de cavidades, mesmo sendo um dos mais complexos dentre os processos de usinagem [12]. Isto se deve à grande variedade de ferramentas e máquinas e às altas taxas de remoção de material. Outros fatores relevantes são a possibilidade de obtenção de superfícies complexas e o bom acabamento superficial proporcionado.

Existem diferentes tipos de fresas (Figura 2.1), assim como formas adotadas para efetuar sua classificação. *Stemmer* [11] classifica as fresas para geração de superfícies quanto à forma geométrica em:

- Fresas cilíndricas (circunferenciais);
- Fresas de disco (frontais);
- Fresas angulares;
- Fresas detalonadas ou de forma;
- Fresas de haste ou de topo.

No fresamento o gume da ferramenta penetra na peça, removendo uma porção de material, sendo que existem duas diferenças básicas na formação do cavaco em relação, por exemplo, ao torneamento ou à furação:

- 1) O fresamento consiste de corte interrompido, onde cada gume ou dente atua durante um tempo inferior ou igual à metade do tempo gasto para completar uma revolução;
- 2) A espessura do cavaco varia constantemente ao longo do corte, devido ao movimento combinado de rotação da fresa e avanço da peça.

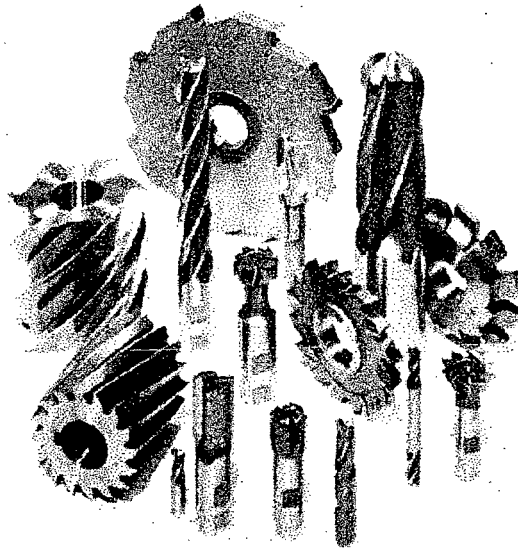


Figura 2.1: Tipos de fresas.

Com a descontinuidade na remoção de material a cada rotação da fresa, as formas do primeiro e último contato entre a ferramenta e a peça são de fundamental importância no desgaste e lascamento da ferramenta. Com isto, as solicitações térmicas e dinâmicas alternantes, no gume da fresa, podem levar à formação de fissuras e à quebra do gume por fadiga [10].

Portanto, os materiais para confecção de fresas devem ter alta tenacidade, elevada resistência a solicitações térmicas e alta resistência de gume. O material que propicia maior produtividade na usinagem de aços é o metal-duro (MD), devido a boas características de tenacidade e resistência de gume, apesar do aço-rápido (HSS) ainda ter grande aplicação. A cerâmica tem limitações quanto à resistência a solicitações térmicas, embora seja mais resistente ao desgaste e a altas temperaturas que o MD e o HSS. Sua aplicação é mais freqüente na usinagem fina de ferro fundido [10]. Tem-se ainda o nitreto de boro cúbico (CBN), com aplicação crescente no fresamento em altíssimas velocidades [13] e o diamante policristalino, empregado na usinagem de ligas de alumínio e materiais sintéticos [10].

A combinação dos movimentos de corte e avanço definem o sentido de corte. Considerando que o deslocamento é realizado pela mesa onde é presa a peça, o sentido de corte pode ser: concordante, quando o sentido da velocidade de corte (v_c) é o mesmo da velocidade de avanço (v_f) e discordante, quando o sentido da v_c é oposto ao da v_f . Outra forma de saber qual o sentido de corte é pela espessura inicial e final do

cavaco. No fresamento concordante, o corte inicia com espessura máxima (valor do avanço por dente) e termina com espessura teoricamente zero. No sentido discordante, a espessura inicial é zero e a final, máxima. Dependendo da posição da ferramenta em relação à peça, pode-se ter, também, os dois sentidos simultaneamente (Figura 2.2).

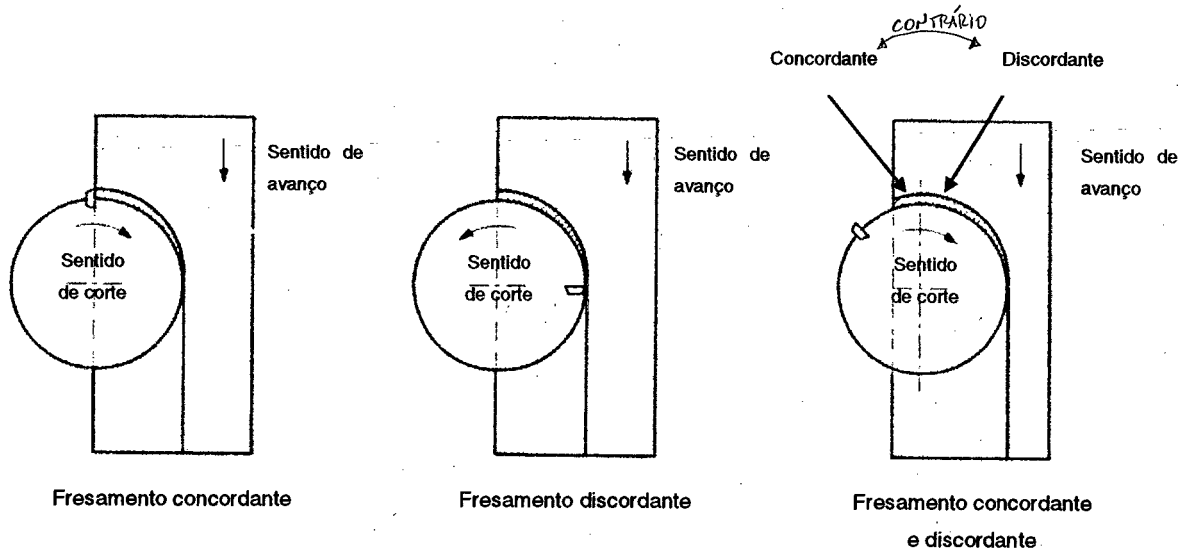


Figura 2.2: Sentidos de corte no fresamento [11].

No fresamento discordante, a espessura de usinagem no início do corte é teoricamente zero, ou seja, até atingir a espessura mínima de corte, a ferramenta apenas comprime o material, encruando-o. Em decorrência disto, há o aumento do desgaste abrasivo no gume que atrita sobre a superfície endurecida pelo dente anterior. Pode ocorrer, ainda, a adesão de material ao dente da fresa, podendo provocar a quebra deste quando entrar novamente no corte. Entretanto, em alguns casos, é aconselhável utilizar o fresamento discordante, principalmente nas seguintes situações [10,11]:

- Quando houver folgas na máquina-ferramenta;
- Se a peça a ser usinada tiver resíduos de areia de fundição ou for proveniente do processo de forjamento.

Utilizar o fresamento concordante traz benefícios, comparado com o discordante, nos seguintes aspectos:

- Minimiza as vibrações, uma vez que a força de corte pressiona a peça contra

a mesa da máquina;

- Proporciona um desgaste da ferramenta menor;
- Reduz a força de avanço;
- Melhora a qualidade superficial da peça usinada.

Stemmer [11] cita que existem fatores determinantes no processo de fresamento que influenciam no resultado do trabalho, portanto devem ser conhecidos:

a) Influência da profundidade de corte a_p (chamada também de penetração passiva e profundidade de corte axial): a força de corte F_c é proporcional à profundidade de corte a_p . Com o aumento de a_p , irão aumentar a força de usinagem, o que pode gerar vibrações.

b) Influência do incremento lateral a_e (chamado também de engajamento, passo lateral, penetração de trabalho e profundidade de corte radial): quando se trabalha com corte lateral na fresa, o aumento de a_e até um valor igual ao raio da fresa resulta no crescimento da força de corte. Porém, a força de corte aumenta em valores menores que os proporcionais, ou seja, se o valor do incremento lateral dobrar, a força de corte aumenta mas não chega a dobrar de valor. Neste caso, a pressão ou força específica de corte (k_c) é reduzida à medida que aumenta a espessura do cavaco, o que deixa clara a vantagem de utilizar-se a maior penetração possível. Isto é limitado quando a força passiva torna-se grande, ocasionando vibrações. Já quando se trabalha com corte central, aumentar a_e significa diminuir a média da espessura do cavaco, aumentando a pressão de corte.

c) Influência da velocidade de avanço (v_f , f): geralmente, quando se determina v_f , a_p e a_e já foram escolhidos. Desta forma, v_f fica limitado pela resistência à flexão da ferramenta e pela potência de corte disponível na máquina. Como, no corte lateral, a pressão de corte diminui com o aumento da espessura do cavaco, um valor de v_f grande irá produzir uma usinagem mais econômica. Entretanto, a espessura do cavaco depende da velocidade de corte, do número de dentes e da relação a_e/D . A escolha da velocidade de avanço também é feita juntamente com a velocidade de corte, em função do acabamento superficial desejado.

d) Influência da velocidade de corte (v_c): mantendo v_f constante para um

determinado diâmetro da fresa D , a velocidade de corte torna-se função apenas da rotação n . Diminuindo a velocidade de corte, as forças atuantes em cada dente aumentam, o que também acontece com a espessura do cavaco, mas como a F_c não cresce na mesma proporção da espessura do cavaco, a potência de corte diminui. Existem fatores que limitam a escolha de uma velocidade de corte muito baixa ou muito alta; dentre eles, estão as forças elevadas sobre cada gume, acabamento superficial, utilização econômica do equipamento e desgaste da ferramenta.

e) Influência do diâmetro da fresa (D): mantendo o avanço igual, a espessura de corte $h_{cu.f}$ é menor em uma fresa com diâmetro maior (Figura 2.3), o que leva a pressões de corte k_c mais altas. Assim, a potência total absorvida por uma fresa de diâmetro pequeno é um pouco menor do que a absorvida por uma fresa de diâmetro grande.

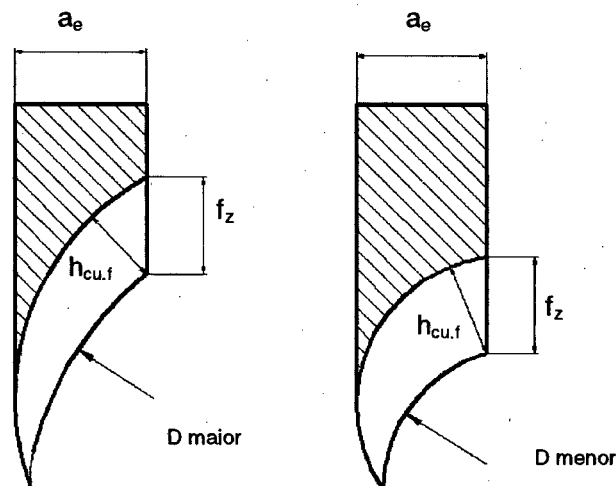


Figura 2.3: Influência do diâmetro da fresa na espessura do cavaco.

f) Influência do número de dentes (z): mantendo constante as demais condições de corte, quanto menor for z , maiores serão a força e a potência de corte. Deve ser evitado que apenas um dente esteja em contato com a peça, o que levaria a grandes oscilações da força. Outro fator determinante para o número de dentes, é o material a ser usinado, tendo em vista que, com z muito grande, o espaço para alojamento de cavacos diminui.

g) Influência do ângulo de hélice (β): quanto maior for β , maior será o grau de recobrimento, fornecendo um corte mais uniforme e menos vibrações. A força e a potência de corte aumentam lentamente com β até um valor de 40° . Acima deste valor,

as forças tornam-se muito elevadas.

h) Influência dos ângulos de saída (γ_f , γ_p): deve ser adotado os maiores ângulos de saída possíveis para diminuir as forças de corte, dentro dos limites de resistência do gume e boa formação de cavaco.

2.1.1- Fresamento de topo

Os métodos de fresamento podem ser classificados de acordo com a superfície gerada, com a forma da ferramenta e com a cinemática dos movimentos [11]. Dentre estes métodos, destaca-se o fresamento de topo, largamente empregado na fabricação de cavidades para moldes, seja na execução de cavidades ou na confecção de eletrodos, usados para erodir as cavidades.

Sendo o avanço normal à direção do eixo da ferramenta, o corte é efetuado pelos gumes periféricos que são principais, e os gumes frontais (secundários) tem a função de alisamento. Em operações de fresamento, o incremento lateral (a_e) máximo é determinado pelo diâmetro da fresa, e a máxima profundidade de corte (a_p) é determinada pelo comprimento axial dos gumes.

As fresas de topo usadas para a usinagem de moldes e matrizes são fabricadas em diversas formas, conforme a norma DIN 1889. A Figura 2.4 mostra as variantes mais comuns para uma fresa de topo com haste cilíndrica. Para fixação da ferramenta na máquina, além da haste cilíndrica (fixação por pinça), estas fresas são fabricadas com haste cônica (cone Morse), cone ISO e HSK. Distinguem-se, ainda, ferramentas de corte à direita ou à esquerda, assim como ferramentas de hélice direita ou esquerda ou dentes retos [10, 11].

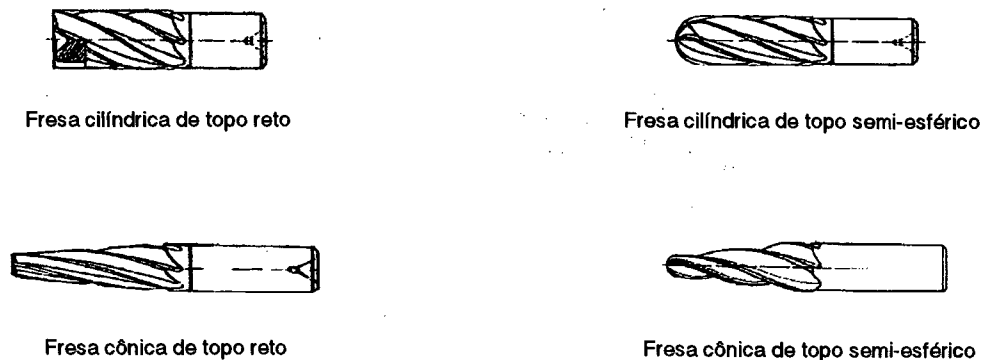


Figura 2.4: Tipos de fresas de topo com haste cilíndrica [11].

Este tipo de ferramenta apresenta, além da configuração reta ou semi-esférica para o seu topo, as fresas de topo reto afiadas com um raio de arredondamento e fresas com topo toroidal [6].

Na indústria de moldes, o uso de aços com grande resistência à tração na fabricação de cavidades restringe o campo de materiais aplicáveis a ferramentas. O metal-duro torna-se a solução mais viável em termos de produtividade [16].

As fresas de topo reto são utilizadas no desbaste e no acabamento de superfícies planas horizontais e verticais. Encontram-se fresas inteiriças, com insertos brasados e com insertos intercambiáveis. Por este tipo de ferramenta (fresa de topo) ser utilizado, na maioria das situações, para desbaste, onde a remoção de material é grande, compensa o investimento em fresas com pastilhas intercambiáveis, pela alta produtividade proporcionada. São empregadas, geralmente, fresas com ângulo de posição de 90° , com pastilhas triangulares ou quadradas.

Entretanto, fresas com pastilhas redondas, chamadas fresas toroidais, têm mostrado rendimento muito superior às com pastilhas quadradas ou triangulares. Inicialmente, estas ferramentas foram desenvolvidas para a usinagem de materiais muito duros. Não demorou muito para a indústria de moldes descobrir suas vantagens, e os fabricantes de ferramentas desenvolverem fresas específicas para o ramo. Com este tipo de ferramenta, é possível executar rampas, rasgos, cópias em 3 e 5 eixos e furação. A geometria da pastilha redonda faz com que esta seja bastante robusta, suportando muito bem vibrações e condições de corte difíceis, causadas pela presença de cavacos na usinagem de bolsões [14]. Os valores de avanço por dente são altos, comparados com outros tipos de pastilhas da mesma classe. O número de gumes é outra vantagem da geometria circular e dependerá da relação entre o diâmetro da pastilha e a profundidade de corte. Para uma pastilha de diâmetro igual a 10 mm, usinando com profundidade de corte de 1 mm, pode-se aproveitar 10 gumes para cada inserto. A Figura 2.5 mostra a configuração deste tipo de ferramenta, sendo que o suporte é fornecido em diâmetros que variam de 16 mm até 80 mm e com os mais variados tipos de fixação. Contudo, no acabamento de superfícies planas, principalmente quando são requeridas fresas de diâmetro pequeno, utilizam-se ferramentas sólidas ou com insertos brasados.

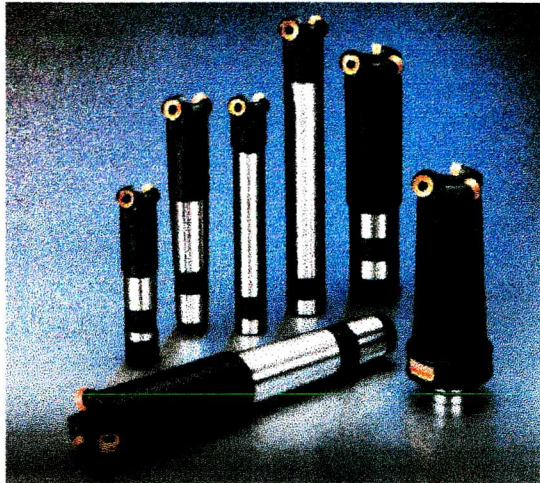


Figura 2.5: Fresa de topo com pastilha redonda (topo toroidal) [48].

No acabamento da cavidade de um molde, principalmente constituído de superfícies de representação matemática complexa (*free-forms*), são empregadas fresas de topo semi-esférico ou toroidal. A utilização de fresas toroidais melhora o acabamento em superfícies com pouca inclinação [15]. Mesmo com as vantagens em se utilizar uma ferramenta toroidal, existem situações onde é indispensável a aplicação de fresas com topo semi-esférico, principalmente na usinagem de geometrias com dimensões que impossibilitam o acesso de fresas toroidais. Como exemplos, têm-se a usinagem de cavidades onde a distância entre paredes é menor que 16 mm e, a usinagem de arredondamentos com raios menores que 4 mm, devido ao menor diâmetro de pastilha disponível ser 8 mm.

A geometria da fresa cilíndrica de topo semi-esférico (Figura 2.6) propicia o corte de material em qualquer inclinação da superfície entre 0° e 90° com relação ao plano normal ao eixo da ferramenta. Na usinagem em 3 eixos, várias partes do gume efetuam o corte, podendo mudar conforme a trajetória da fresa sobre a cavidade. Dependendo da forma e inclinação da superfície, cada ponto da fresa em contato com a peça está submetido a diferentes condições de corte. Contudo, a região central da ferramenta é a mais crítica, onde a velocidade de corte é muito pequena, resultando no amassamento do material e num acabamento superficial ruim.

Embora existam fresas de ponta esférica com insertos intercambiáveis que cumprem a mesma função das inteiriças, com as vantagens (melhor desempenho, facilidade de reparo em caso de quebra das pastilhas) e desvantagem (alto

investimento inicial), geralmente são empregadas fresas inteiriças na operação de acabamento das cavidades [16].

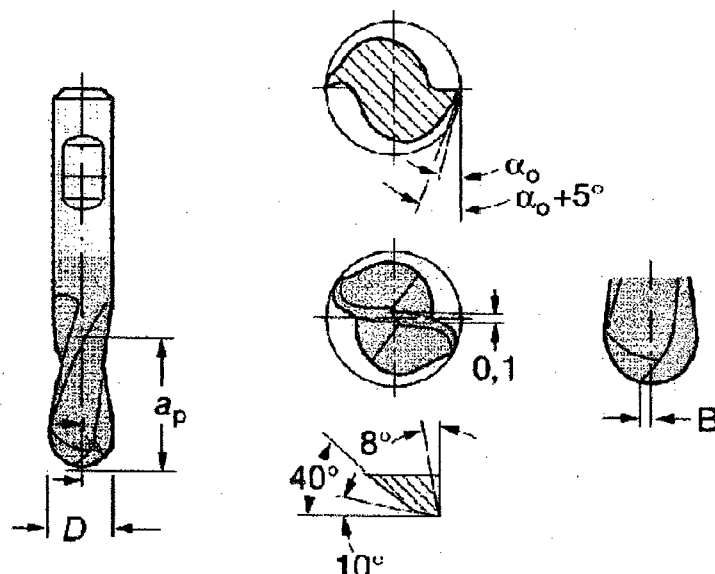


Figura 2.6: Geometria da fresa de topo semi-esférico [48].

A vibração, conseqüência da deflexão da ferramenta, é ocasionada pela flutuação da força de usinagem. No fresamento com fresa de topo semi-esférico, somente nos últimos anos começaram a ser desenvolvidos modelos matemáticos para previsão da força de usinagem, devido à complexidade do processo [17]. Reduzir as vibrações no corte, o que conduz a menores erros de forma na peça, pode ser feito através da diminuição do comprimento em balanço da fresa. Por outro lado, a combinação da melhor geometria da ferramenta, com condições de corte apropriadas, permite manter estes erros dentro de limites aceitáveis [10].

2.2- ACABAMENTO SUPERFICIAL

Para atender as especificações de projeto, uma superfície técnica necessariamente deve possuir certas propriedades tecnológicas (físicas e químicas) e geométricas. Propriedades físicas e químicas podem ser verificadas através de ensaios do material, e propriedades geométricas, através de ensaios de forma e superfície [18]. Em se tratando de propriedades geométricas, foco principal deste trabalho, *Mesquita*

[18] cita os desvios de forma, classificados pela norma DIN 4760 em seis diferentes ordens, conforme a Tabela 2.1, que apresentada, ainda, exemplos para os tipos de desvios e para a sua origem.

Segundo *Tabenkin* [19], o acabamento superficial ou textura pode ser descrito pela quantidade e direção dos picos e vales que compõem uma superfície. A análise da superfície, em termos práticos, pode ser feita baseada em três componentes: rugosidade, ondulação e forma. Geralmente, os três existem simultaneamente, sobrepostos. Em muitas situações, é desejável examinar cada condição independentemente. Na maioria dos casos, pode-se afirmar que a rugosidade tem o comprimento de onda menor que a ondulação que, por sua vez, tem o comprimento de onda menor que o desvio de forma.

A medição dos componentes do acabamento superficial é realizada usando unidades de comprimento distintas, chamadas *cutoffs*. O comprimento selecionado do *cutoff*, juntamente com várias técnicas de filtros elétricos, permite a medição de cada um dos componentes separadamente [18,19].





Na produção de peças em máquinas-ferramentas modernas, com velocidades e avanços usuais, a rugosidade pode ser definida como qualquer irregularidade com comprimento de onda menor que 0,76 mm (0,030 pol.); para a ondulação, com valores entre 0,76 mm e 7,62 mm (0,030 pol. e 0,300 pol.); e os erros de forma, com comprimento de onda maior que 7,62 mm (0,300 pol.). Porém, são faixas de valores flexíveis, existindo padrão para rugosidade com comprimento de onda abaixo de 0,075 mm e acima de 25 mm [19].

O acabamento superficial tende a ser uma condição estável, devendo permanecer constante de peça para peça se não houverem mudanças nas condições de processo. Os engenheiros de fabricação podem estimar aproximadamente o acabamento que o processo irá fornecer, conhecendo o material, a máquina-ferramenta, a ferramenta de corte, o fluido, o avanço, a velocidade e a profundidade de corte. Por esse motivo, a medição do acabamento superficial tem sido usada, fundamentalmente, para monitorar a estabilidade do processo.

Os parâmetros verticais são as medidas quantitativas usadas para descrever e comparar características de superfícies. Embora existam mais de 100 parâmetros, na prática utilizam-se um ou dois, os mais adequados para cada situação. A medição destes parâmetros é feita, normalmente, em cinco comprimentos de medição (*cutoffs*)

contínuos [19].

Tabela 2.1: Desvio de forma das superfícies técnicas [18].

Desvios de forma (representado numa seção do perfil)	Exemplos para tipos de desvios	Exemplos para origem dos desvios
1ª ordem: Desvio de forma 	Não plano Ovalado	Defeitos nas guias das máquinas-ferramentas; deformação por flexão da máquina ou da peça; fixação errada da peça; deformações devido à temperatura, desgaste.
2ª ordem: Ondulação 	Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa; vibrações da máquina-ferramenta, da ferramenta ou da peça.
3ª ordem: Rugosidade 	Ranhuras	Forma do gume da ferramenta; avanço ou profundidade de corte.
4ª ordem: Rugosidade 	Estrias Escamas Ressaltos	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço); jateamento de areia; tratamento galvânico.
5ª ordem: Rugosidade Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (ex. decapagem), processos de corrosão.
6ª ordem: Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura reticulada do material	Processos físicos e químicos da estrutura do material; tensões e deslizamentos na rede cristalina.

No monitoramento do processo, a rugosidade média R_a representa, de forma efetiva, a estabilidade. Assim, compreende-se porque este é o parâmetro predominantemente usado nas indústrias. Entretanto, medindo-se somente o R_a , não são detectadas ocasionais elevações ou reentrâncias, importantes em uma superfície moldante. Para detectar estas anomalias, geralmente utiliza-se R_y . Na Figura 2.7, são mostradas duas superfícies que têm valores de R_a quase idênticos, mas valores de R_y muito diferentes. Dessa forma, $R_{máx}$, R_z e R_y são amplamente utilizados quando estas

características precisam ser detectadas. Os parâmetros são descritos na Figura 2.8.



Figura 2.7: Superfícies com mesmo valor de R_a e diferentes valores de R_y [19].

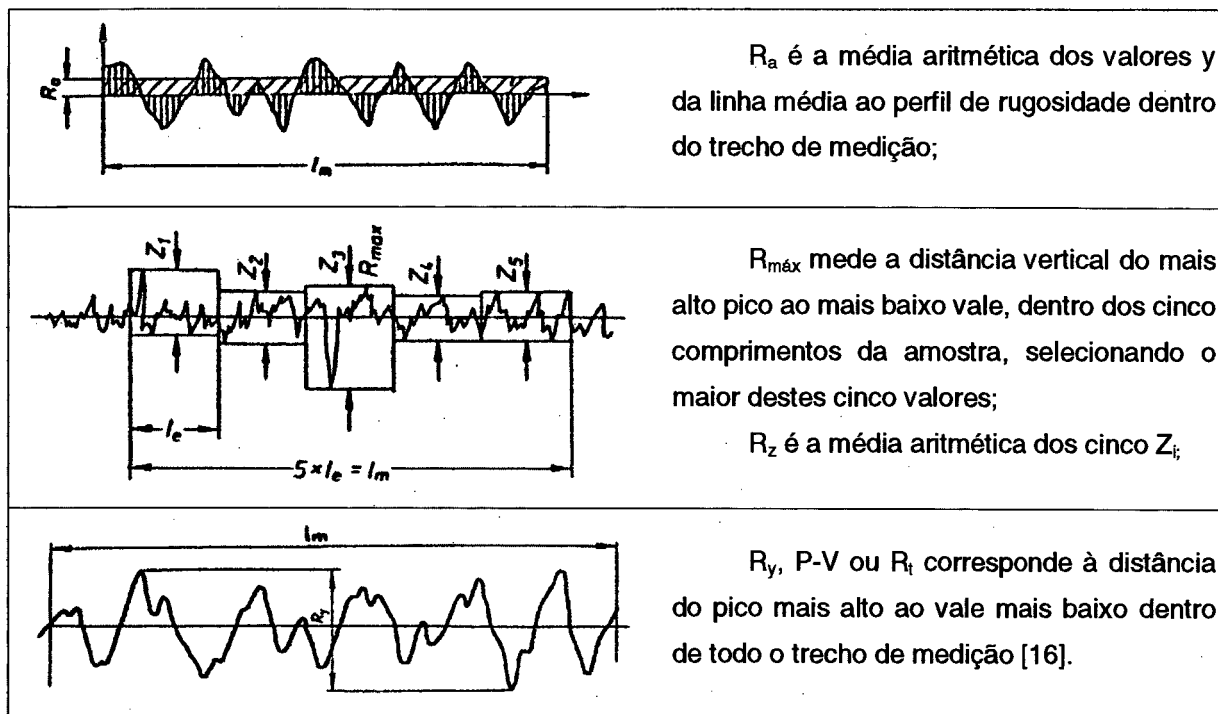


Figura 2.8: Parâmetros de rugosidade [18].

Os parâmetros citados anteriormente representam a amplitude dos desvios geométricos e são chamados de parâmetros verticais. Os períodos dos desvios são os parâmetros horizontais, representados juntamente com a amplitude na Figura 2.9. Dependendo da função que o componente usinado irá atender, opta-se pela medição do(s) parâmetro(s) mais adequado(s).

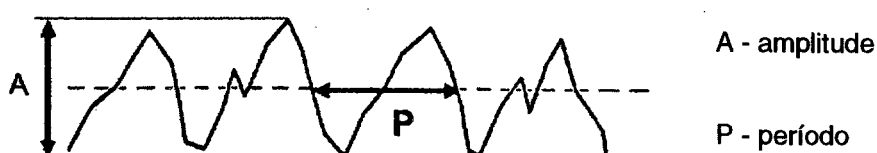


Figura 2.9: Parâmetros verticais e horizontais [18].

Contudo, em algumas situações, apenas a medição de parâmetros geométricos verticais e horizontais não é suficiente para descrever uma superfície. São necessárias, também, informações quanto à forma do perfil e se este é aleatório, periódico e/ou platafórmico. Na Figura 2.10 são mostrados alguns exemplos dos diferentes tipos de perfis classificados. O número de reentrâncias e elevações, bem como o ângulo de inclinação destas, é que determinam o tipo de perfil formado.





	Períódico: picos de rugosidade
	Platafórmico: vales de rugosidade
	Aleatório: picos e vales de rugosidade
	Períódico: perfil abaulado

Figura 2.10: Tipos de perfil de rugosidade [18].

Como mostra a Figura 2.11, segmentos de retas podem representar de maneira aproximada um perfil. Os ângulos formados por estes segmentos também são parâmetros relevantes para definição de uma superfície. Segundo [18], dentre os principais ângulos, tem-se o ângulo de inclinação das elevações (β), o ângulo de pico (γ) e o ângulo de abertura das reentrâncias (δ).

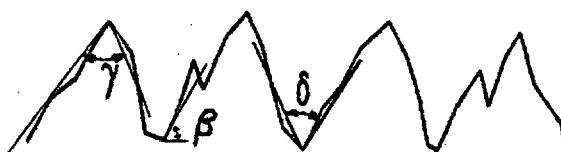


Figura 2.11: Ângulos de inclinação das elevações, das reentrâncias e dos picos das elevações [18].

A quantidade de reentrâncias e elevações é medida pelos parâmetros mostrados na Figura 2.12, bem como as regiões características em um perfil de rugosidade. Superfícies que precisam fornecer boa lubrificação devem apresentar grande número de reentrâncias e, quando o requisito é suportar carregamentos, devem possuir pequena região de picos. Observa-se que, para cada aplicação, existem os parâmetros mais indicados a serem controlados, tornando a inspeção mais direcionada e objetiva.

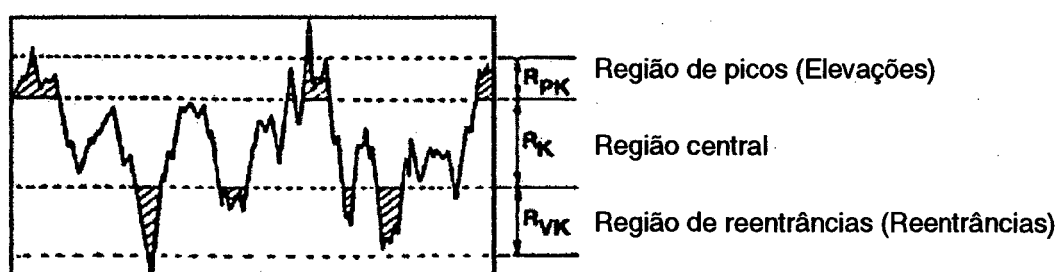
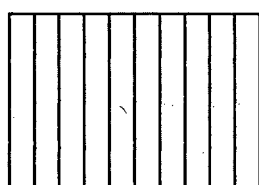
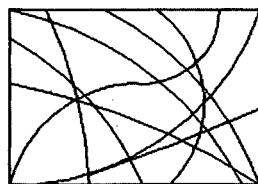


Figura 2.12: Regiões de picos, central e de reentrâncias do perfil [18].

Deve-se atentar, ainda, para a direção em que se realiza a medição dos parâmetros verticais e horizontais, pois esta pode exercer influência nos resultados obtidos. Antes de efetuar a medição da rugosidade, procura-se saber se a textura é dependente ou independente da direção de medição (Figura 2.13), e com isso determina-se a direção na qual os parâmetros serão medidos. Em superfícies fresadas, caracterizadas por sulcos ordenados, há dependência da direção na qual é efetuada a medição [18], sendo que a diferença entre a rugosidade longitudinal e transversal aos sulcos pode ser muito grande. Isto porque, quando se mede longitudinalmente, não são captados os desvios de 3ª ordem.



Dependente da direção
 R_a transversal \neq R_a longitudinal
 fresamento, torneamento



Independente da direção
 R_a transversal \cong R_a longitudinal
 lapidação

Figura 2.13: Dependência e independência da direção de medição.

2.2.1- Acabamento em cavidades

Por cavidade entende-se o volume limitado pelas superfícies das placas macho e fêmea, quando o molde está fechado. Na cavidade será injetado o material plástico, que reproduzirá fielmente a forma e o acabamento superficial das superfícies moldantes, originando o componente que se deseja obter [3]. As cavidades e/ou os eletrodos utilizados em sua confecção são produzidos, geralmente, por máquinas CNC controladas por programas NC gerados em *softwares* de CAM.

De maneira global, um programa NC para o fresamento de cavidades deve garantir a 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. Deve assegurar, ainda, a integridade da ferramenta de corte, bem como uma duração da fresa dentro de limites econômicos. Além disso, o tempo de usinagem deve ser compatível com a disponibilidade da máquina-ferramenta a ser utilizada e com os prazos de entrega estabelecidos [6].

Na usinagem de cavidades com fresas de topo semi-esférico, são gerados, principalmente, desvios de 3ª ordem (rugosidade cinemática) e de 4ª ordem (rugosidade devido ao processo de formação do cavaco), visto que desvios de 1ª e de 2ª ordem são minimizados com o uso de ferramentas de metal-duro e máquinas de comando numérico de alta precisão.

A rugosidade cinemática (3ª ordem) é decorrente da forma esférica do topo da fresa e do movimento relativo entre a peça e a ferramenta; neste caso, o passo lateral ou incremento lateral [10]. O material deixado entre dois passes, chamado de altura de crista (*cusp* ou *scallop*), está representado na Figura 2.14 (a).

O incremento 2D (a_e programado) 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, especifica-se diretamente um valor para o incremento 2D ou determina-se a altura máxima das cristas, deixadas entre um passe e outro, como ilustrado na Figura 2.14 (b) [20, 21]. Esta última opção permite constância e maior controle da rugosidade cinemática na superfície usinada. Porém, quando apenas o incremento 2D pode ser especificado, deve-se atentar que o incremento em superfícies inclinadas (3D) será maior que o programado. Este valor depende da inclinação da superfície com relação à horizontal e

da direção da trajetória da fresa. A relação entre os fatores e uma maneira simplificada de compensar o incremento lateral podem ser vistas no Anexo I.

Fenômenos que ocorrem no gume da ferramenta e que estão relacionados ao material que se está usinando, geram a rugosidade de processo. Dentre os principais, pode-se citar o processo de formação do cavaco e a interrupção do corte, gerando as vibrações e deflexões discutidas no item 2.1.1.

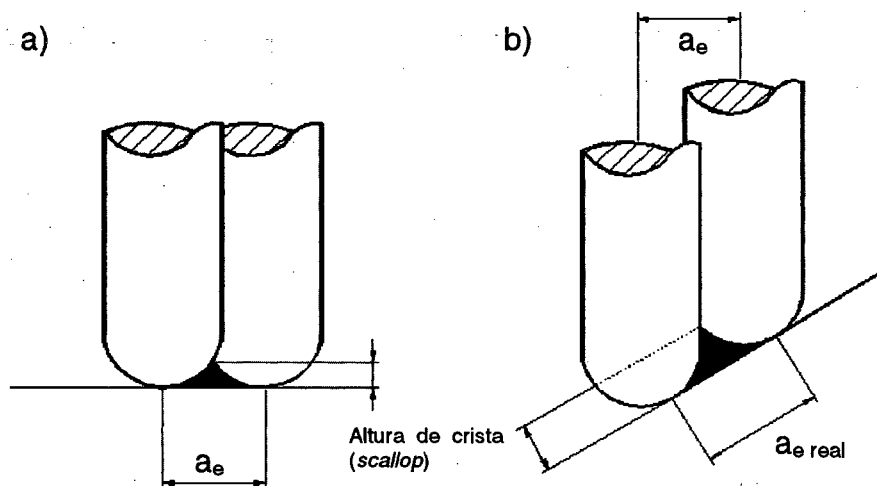


Figura 2.14: Cristas ou *scallops* formados por passadas paralelas de fresas esféricas.

No entanto, devido às exigências funcionais da superfície moldante (baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste e aspectos visuais), é necessário que, após o acabamento por fresamento ou eletroerosão, se proceda o acabamento manual. Através do chamado trabalho de bancada é que se obtém o acabamento superficial adequado. Com a usinagem em altas velocidades (HSC) obtém-se uma qualidade superficial muito boa após o fresamento, podendo-se diminuir consideravelmente a etapa de acabamento manual e, em certos casos, até eliminá-la.

A comparação entre os valores de rugosidade medidos e os valores calculados, para o processo de torneamento, é mostrada na Figura 2.15. Este desvio entre a rugosidade calculada e a real ocorre de forma semelhante no fresamento e está correlacionado com a espessura mínima de usinagem [10]. Para o fresamento de topo com fresa esférica, a espessura de usinagem varia com o diâmetro da fresa, o ângulo de ataque ou direção de avanço (φ), a largura de engajamento (a_e) e a profundidade de corte (a_p). Segundo König [10], a profundidade de corte exerce muito pouca influência sobre a qualidade superficial, desde que esta seja maior que uma profundidade

mínima. No torneamento, quando se trabalha com profundidades de corte menores que r_e a espessura de cavaco varia constantemente, mudando o mecanismo de formação do cavaco e influenciando de forma expressiva na qualidade superficial da peça usinada. Para o fresamento com fresa de topo semi-esférico, pode-se fazer uma analogia com esse fenômeno observado no torneamento, sendo a espessura mínima função do raio da fresa.

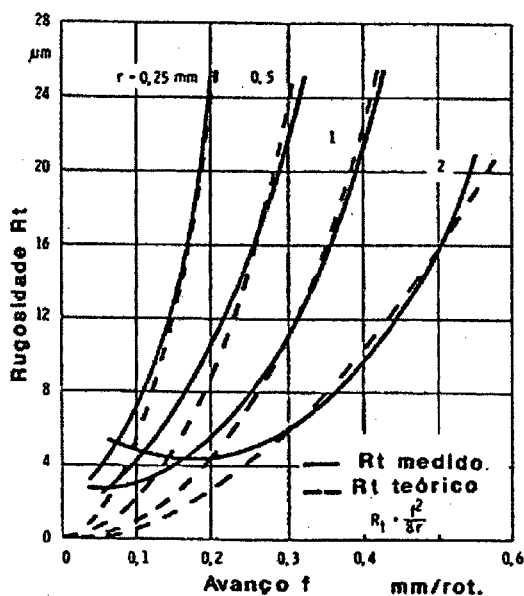


Figura 2.15: Rugosidade teórica e medida para diversos avanços e raios de quina de ferramentas no torneamento, segundo Moll e Brammertz [10].

2.3- PROGRAMAÇÃO DO FRESAMENTO COM AUXÍLIO DE SISTEMAS CAD/CAM

2.3.1- Sistemas CAD/CAM

Até a década de 70, as cavidades com geometrias tridimensionais eram produzidas por fresamento de cópia. O advento dos sistemas CAD/CAM, aliado a máquinas-ferramentas de três eixos, com movimentos simultâneos e controladas numericamente (CNC), trouxe grandes evoluções para a área de moldes. Não mais era preciso dispor do modelo do produto para fabricar a cavidade; podia-se, então, fabricar

moldes com as mais variadas geometrias. Os limites para criatividade passaram a ser mais amplos, assim com o número de variáveis do processo. A partir deste momento, começaram os estudos para tentar descrever o processo e aperfeiçoar os sistemas.

Ahrens [1, 23] cita a classificação dos sistemas CAM quanto à geração de programas em CAM 2½ D e 3 D, respectivamente, para usinagem de modelos 2 D em 2 ½ eixos e, para usinagem de modelos 3 D em 3, 4 ou 5 eixos.

Nos sistemas CAD/CAM, pode-se trabalhar com representação geométrica em *wireframe*, superfícies, sólidos e malhas de triângulos [24, 25, 26, 27, 28], as quais foram descritas por Cavalheiro [6]. A malha de triângulo é um formato de arquivo confiável e que armazena apenas características (*features*) essenciais para a representação do modelo geométrico [29]. Assim, alguns sistemas CAM, como o *PowerMILL*, adotam-na como forma de representar seus modelos, pois simplifica a geração de trajetórias e reduz seu tempo de cálculo, apesar de dificultar a manipulação e edição da geometria e exigir mais espaço para armazenamento do arquivo [28, 30]. Entretanto, deve-se atentar para o tamanho dos triângulos, pois estes determinarão a precisão de forma da cavidade [29].

Ainda com relação ao modelo, mais especificamente quanto à integração dos recursos de modelamento, os sistemas CAD/CAM podem ser: totalmente integrados, CAM integrado a um CAD independente e CAM dedicado [6]. Os sistemas CAM dedicados necessitam importar modelos geométricos, sobre os quais as trajetórias serão criadas. Para tanto, utilizam-se interfaces neutras como IGES, STEP e STL.

Com a grande evolução dos computadores pessoais (PC), que são consideravelmente mais baratos que as *workstations*, a tendência é que maioria dos sistemas CAD/CAM operem em PC. Rodando, geralmente, em Windows NT, obtiveram-se melhorias na instalação, visualização gráfica, operação e interface com usuário, edição e integração de dados ou imagens com editores gráficos e de texto [31, 32]. Os principais sistemas CAM que vêm sendo utilizados na fabricação de moldes no mercado nacional estão relacionados na Tabela 2.2.

2.3.2- Planejamento da programação via CAD/CAM

Os passos gerais da fabricação de cavidades de moldes auxiliada por computador, relacionados por Volpato [2] e descritas com detalhes por Cavalheiro [6],

são:

- 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.

Tabela 2.2: *Softwares* de CAM mais utilizados na indústria nacional (adaptada de Cavalheiro [6]).

<i>Software</i>	<i>Origem</i>	<i>Integração de recursos</i>
CATIA	EUA/França	Totalmente integrado
I-DEAS	EUA	Totalmente integrado
PRO/ENGINEER	EUA	Totalmente integrado
UNIGRAPHICS	EUA	Totalmente integrado
CIMATRON	Israel	Totalmente integrado
EUCLID QUANTUM	França	Totalmente integrado
CAMAND-CAMAX	EUA	Totalmente integrado
I/EMS	EUA	Totalmente integrado
MASTERCAM	EUA	Totalmente integrado
POWERMILL	Reino Unido	Dedicado
SURFCAM	EUA	Dedicado
SMARTCAM	EUA	Dedicado
TEKSOFT	EUA	Dedicado
MASTERCAM	EUA	Integrado a um CAD (SolidWorks)
SURFCAM	EUA	Integrado a um CAD (SolidWorks)
CAMSTATION	Brasil	Integrado a um CAD (Microstation)

Nesse trabalho, são abordados somente aspectos relacionados à seleção da estratégia e à escolha de parâmetros para o cálculo das trajetórias na etapa de acabamento. A etapa de acabamento consiste em aproximar o tanto quanto possível a geometria da cavidade usinada com a da projetada, considerando as limitações

técnicas e de ordem econômica.

Segundo *Cavalheiro* [6], um planejamento bem feito pode ser a diferença entre obter o resultado esperado e retrabalhos. Assim, as etapas do planejamento das operações de acabamento a serem cumpridas consistiriam em definir os 9 passos mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Passos no planejamento das operações de acabamento [6].

<i>Passos</i>	<i>ACABAMENTO</i>
1	Definição dos critérios de programação
2	Planejamento das operações e seleção de estratégias
3	Delimitação das áreas a usinar
4	Escolha das ferramentas
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

Na programação (entrada de dados no *software*), esta ordem não é necessariamente a mesma. Além disso, muitas decisões devem ser tomadas simultaneamente, pois uma depende diretamente da outra [6]. O exemplo mais claro é a escolha da ferramenta, a seleção da estratégia e a delimitação da área a ser usinada, que não devem ser feitas de forma seqüencial. Uma escolha tomada em conjunto pode levar a melhores resultados. Sabendo que estes três fatores ou a combinação deles é que definirão a qualidade superficial da cavidade usinada, deve-se conhecer como cada fator pode influenciar o acabamento superficial. Dessa forma, estes três fatores serão enfatizados a seguir.

2.3.3- Escolha das ferramentas

Os diversos tipos de fresas empregadas na fabricação de moldes, bem como sua influência no acabamento superficial gerado foram discutidos na seção 2.1. A Tabela

2.4 resume as principais características das fresas mais utilizadas na indústria de moldes.

Tabela 2.4: Fresas empregadas na fabricação de cavidades para moldes.

Ferramenta	Aplicação	Característica
Fresa cilíndrica de topo reto	Desbaste em geral e acabamento de superfícies planas horizontais e verticais.	Foi durante muito tempo considerada a ideal para desbaste, devido à maior taxa de remoção de material [33, 34, 35, 36]. Outro motivo era que os insertos intercambiáveis, que aumentam a durabilidade e possibilitam maiores velocidades, eram inicialmente disponíveis somente para fresas de topo reto [37]. As fresas de topo reto são geralmente aplicadas em cavidades com paredes quase verticais [7] ou quando é mais vantajoso um maior incremento lateral para um mesmo diâmetro.
Fresa cilíndrica com topo arredondado (toroidal)	Desbaste em geral, também aplicada no acabamento.	Com o desenvolvimento de insertos redondos, as fresas toroidais mostraram-se muito eficientes para o desbaste, principalmente por reduzir o excesso de material em forma de degrau deixado pela fresa cilíndrica [38]. São muito robustas, estáveis, vibram menos e suportam melhor as condições pesadas de corte [14, 38]. Fresas toroidais também são utilizadas para operações de acabamento, pois reúnem vantagens de fresas cilíndricas e esféricas [38].
Fresa cilíndrica com topo semi-esférico (inteiriça)	A mais popular para operações de acabamento	Apropriada para geometrias de forma complexa, com grandes e constantes variações nos graus de curvatura e inclinação, como nas superfícies de forma livre [15, 33, 35, 38].
Fresa cilíndrica com topo semi-esférico (com inserto intercambiável)	Também utilizada para acabamento, podendo, em algumas situações, serem usadas no desbaste.	Com características semelhantes às fresas de topo semi-esférico inteiriças (diferença nos ângulos), costumam ser utilizadas também no desbaste de cavidades pequenas, cuja geometria apresente muitas curvaturas [39]. O advento dos insertos intercambiáveis para estas ferramentas possibilita o uso de maiores velocidades de avanço, compensando o menor incremento lateral necessário.

Em se tratando de dimensão, a ferramenta deve ter o maior diâmetro possível, desde que atinja todas as regiões do modelo [15, 34, 38]. Porém, quando a peça

possui regiões muito estreitas em relação à área total da cavidade ou cantos internos com pequenos raios de arredondamento, são utilizadas operações em separado para tais regiões. A usinagem de toda cavidade com uma ferramenta muito pequena, tornar-se-ia improdutiva. Assim, deve-se utilizar a ferramenta maior para o restante da cavidade e, nestas áreas, efetuar a remoção por eletroerosão ou programas de pré-acabamento antes do acabamento fino nos cantos [30].

2.3.4- Delimitação das áreas a usinar

No planejamento da programação, pode-se optar por usinar todo o modelo com um único programa ou selecionar estratégias diferentes para cada região, caso a aplicação de uma única estratégia não seja adequada para usinar a geometria inteira [6]. A delimitação destas regiões é feita de acordo com os recursos oferecidos pelo CAM, mas são basicamente duas as maneiras: seleção de superfícies e criação de limites ou contornos em um plano.

Para fazer a seleção de superfícies, o programador indica as superfícies a usinar, selecionando-as diretamente na tela, ou por listas (pilha, menu) de superfícies, dependendo do *software* utilizado [6]. No acabamento, é muito comum utilizar um programa para apenas uma superfície ou um pequeno grupo de superfícies e, conforme o *software* e a estratégia, sem a necessidade de criação de um bloco [20, 21, 22]. Algumas geometrias exigem, ainda, superfícies de apoio para viabilizar uma solução melhor de usinagem. Uma operação muito comum é estender superfícies ou criar entidades para fechar regiões abertas (em destaque na Figura 2.16), evitando que o algoritmo gere trajetórias no interior destas áreas [6].

Existem outras maneiras para selecionar a área que deve ser acabada e que a maioria dos *softwares* disponibiliza. Algumas estratégias costumam exigir o modelamento de uma ou mais curvas. A projeção destas sobre o modelo indica ao algoritmo onde gerar as trajetórias para o acabamento [21, 22]. Outras estratégias requerem um contorno aberto, um contorno fechado ou dois contornos abertos [21]. Nos *softwares* de CAM que usam representação por triângulos (STL), os modelos não são compostos por várias superfícies e sim por uma única entidade representando toda a cavidade. Contudo, para algumas estratégias, este tipo de CAM não exige a execução de muitas tarefas, ao contrário dos exemplos anteriores, apresentando

recursos de seleção já dentro do menu da estratégia escolhida [20]. Dentre estes recursos estão a determinação de um ângulo de inclinação máximo da geometria, onde apenas as partes do modelo cuja inclinação esteja abaixo deste valor são usinadas (Figura 2.17), e o posicionamento de entidades (pontos, linhas ou planos) a partir das quais ou para as quais as trajetórias são projetadas sobre a peça [6].

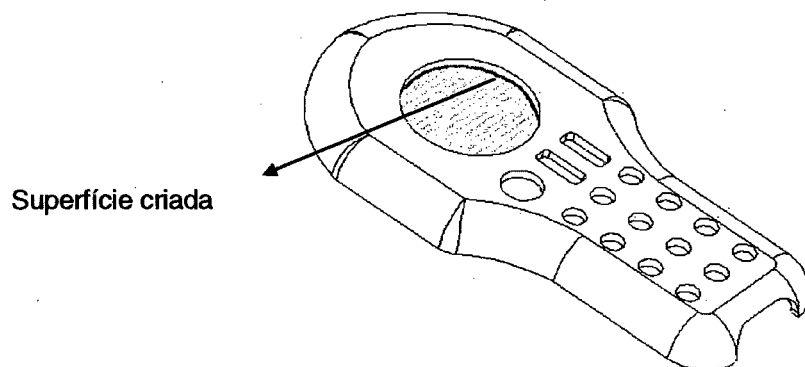


Figura 2.16: Criação da superfície para fechar a região e limitar a usinagem.

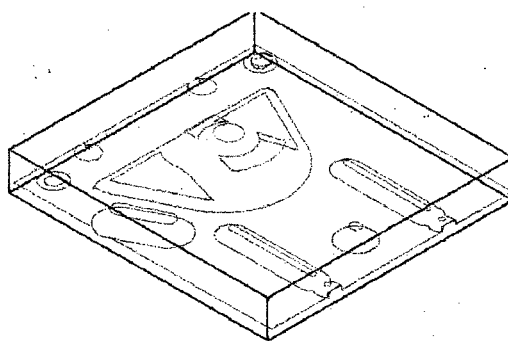


Figura 2.17: Criação de limites calculados automaticamente pelo CAM, limitando a área de acordo com a inclinação [6].

2.3.5- Seleção das estratégias

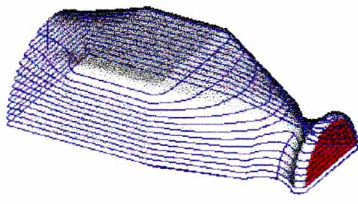

O significado literal da palavra estratégia é: “a arte de aplicar os meios disponíveis com vista à execução de objetivos específicos, ou ainda, arte militar de escolher onde, quando e como travar um combate” [40]. De maneira análoga, no CAM precisa-se determinar a forma e a orientação dos movimentos da ferramenta que serão criados sobre a peça, e isto é feito através da definição da estratégia.

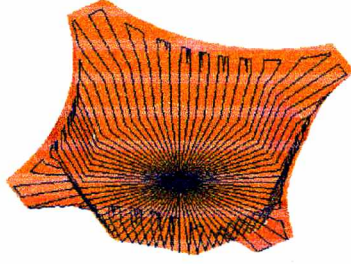
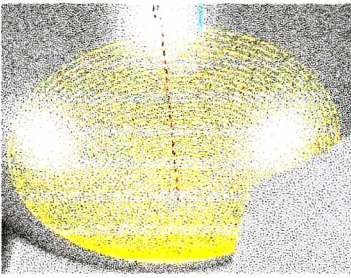
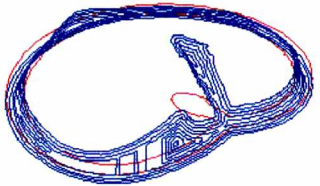
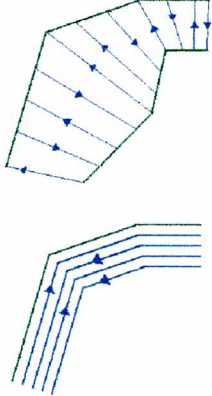
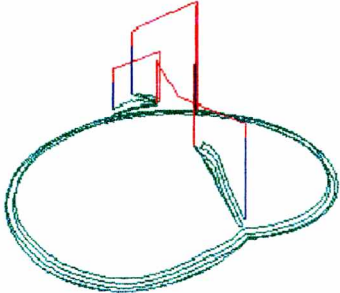
As estratégias oferecidas pelos *softwares* de CAM são semelhantes, diferem

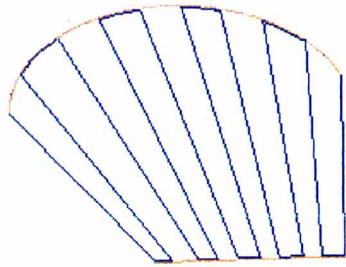
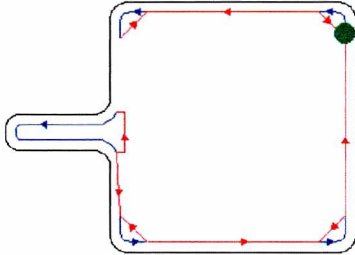
apenas na interface com o usuário, em algumas opções para movimentos de conexões e na nomenclatura utilizada pelos seus desenvolvedores. Para o acabamento, as alternativas são muito maiores que para o desbaste. Dessa forma, é possível usinar de maneira mais apropriada cada geometria, ou seja, obter a qualidade superficial adequada nas diversas geometrias, normalmente complexas, encontradas em cavidades de moldes [6]. Na Tabela 2.5 são apresentadas as estratégias para acabamento de geometrias 3D presentes na maioria dos sistemas CAM. É feita, ainda, uma breve descrição de como são geradas as trajetórias, bem como são mostrados exemplos de trajetórias criadas.

Portanto, a programação via CAM do fresamento de cavidades requer um conjunto de conhecimentos relativos à usinagem e também aos recursos disponíveis no *software*. Uma estratégia é adequada ou não, dependendo de onde é aplicada. Assim, um CAM é adequado se oferece opções suficientes de movimentação da ferramenta e facilidade na determinação da área onde a trajetória será criada.

Tabela 2.5: Estratégias para acabamento (adaptada de Cavalheiro [6]).

Estratégia	Trajetória criada	Descrição
A) Perfilamento em 2½ eixos		<p>Executa uma passada que acompanha estes contornos, com sentido determinado pelo programador, patamar por patamar. A distância entre cada patamar pode ser especificada tanto pelo valor de um incremento em Z, como por uma altura máxima de crista.</p>
B) Usinagem por planos paralelos		<p>O mais antigo e mais conhecido método de fresamento de geometrias complexas [31]. Nele, o programador escolhe a direção de um plano, e vários planos paralelos ao especificado cortam as áreas do modelo selecionadas para usinagem. São criadas, então, trajetórias tridimensionais em zigue-zague ou apenas em um sentido, com movimentos em rápido para posicionamento no início da passada adjacente.</p>

<p>B) Projeção radial</p>		<p>As trajetórias partem de um ponto central, determinado pelo usuário, radialmente até o limite da área selecionada. Entre outros parâmetros, o programador especifica o espaçamento entre cada raio, o sentido de desenvolvimento das passadas e os ângulos inicial e final.</p>
<p>C) Projeção helicoidal ou patamares em hélice</p>		<p>Uma espiral é projetada sobre o modelo, 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. Este tipo de estratégia ainda é oferecido por poucos <i>softwares</i> (entre os quais o <i>PowerMILL</i>, empregado por várias ferramentarias nacionais), mas foi considerado interessante por diversos programadores consultados [2, 38], por se constituir em uma alternativa às estratégias de usinagem radial e perfilamento em 2 ½ eixos.</p>
<p>D) Usinagem por <i>offset</i> de contornos</p>		<p><i>Offsets</i> progressivos de um contorno fechado, selecionado pelo programador, são projetados sobre a superfície do modelo, utilizando espaçamentos constantes (<i>iso-offsets</i>) ou variáveis (<i>iso-scallops</i>).</p>
<p>E) Perfilamento em 3 eixos</p>		<p>O usuário cria ou seleciona duas curvas ou dois contornos com o mesmo número de segmentos. Planos passando por um ponto em cada contorno interceptam o modelo, gerando curvas de interseção que guiam as trajetórias, paralelamente ou perpendicularmente aos contornos. Outras estratégias deste tipo pedem a seleção de apenas um contorno e geram o número de passadas paralelas determinado pelo programador.</p>
<p>F) Usinagem de cantos</p>		<p>A curva que representa a interseção entre duas superfícies não-tangentes é o caminho da ferramenta. Geralmente utilizadas para acabamento de cantos vivos ou pequenos arredondamentos côncavos (<i>fillets</i>). Na maioria dos <i>softwares</i> isto é feito em uma única passada, mas alguns podem gerar mais passes (paralelos ou perpendiculares à curva de interseção entre as duas superfícies).</p>

<p>G) Usinagem segundo projeção isoparamétrica</p>		<p>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. A diferença em relação às estratégias anteriores está no fato de que a superfície não precisa ser criada.</p> <p>Este recurso é muito útil quando se deve gerar a usinagem do modelo do produto, extraído desta geometria as duas metades do molde. Neste tipo de operação, freqüentemente, se devem criar superfícies para ocultar algumas aberturas que fazem parte do produto, mas não do molde.</p>
<p>H) Estratégias para remoção de material remanescente ou "reusinagem"</p>		<p><i>Softwares</i> que apresentam este tipo de recurso calculam automaticamente áreas não-usinadas pela ferramenta da operação anterior [28, 32, 41, 42]. Uma maneira é através da seleção de uma das operações já executadas. As áreas com excesso de material são usinadas com uma estratégia semelhante à da operação anterior, porém com uma ferramenta menor. Outra forma é por contornos (<i>boundaries</i>) que limitam as áreas não-usinadas, os quais são criados a partir da especificação de uma "ferramenta anterior" (<i>old tool, rest tool</i>).</p>

As Estratégias 3D apresentam movimentos ou trajetórias semelhantes, porém com nomenclatura diferente. Segundo Cavalheiro [6], estas podem ser classificadas em categorias, chamadas grupos de estratégias, como pode ser visto na Tabela 2.6 para alguns *softwares* comerciais.

No *software PowerMILL*, existe um conjunto de estratégias que cria a trajetória para arredondamento de cantos com uma dependência menor do programador, que é o *Corner Finish*. Entretanto, as possibilidades na delimitação das regiões e tipo de movimentação (estratégias) são grandes. Para esclarecer melhor e propor uma nomenclatura em português para estas estratégias, é descrito abaixo este conjunto de recursos para usinagem de cantos.

A determinação dos limites para arredondamentos é feita automaticamente pelo *PowerMILL*. As opções oferecidas, relacionadas à delimitação de áreas, são as seguintes:

- *Shalow*: para arredondamentos com inclinação menor que um ângulo definido

pelo programador;

- *Steep*: para arredondamentos com inclinação maior que um ângulo definido pelo programador.

Tabela 2.6: Estratégias 3D classificadas pelo tipo de movimento gerado (adaptada de Cavalheiro [6]).

GRUPOS DE ESTRATÉGIAS	<i>AlphaCAM</i>	<i>Cimatron</i>	<i>Powermill</i>	<i>Pro/MFG</i>
VARREDURA EM ZIGUE-ZAGUE	Z CONTOUR	WCUT	AREA CLEARANCE	VOLUME e POCKET
VARREDURA EM ESPIRAL	Z CONTOUR	WCUT	AREA CLEARANCE	VOLUME
PERFILAMENTO 2½ EIXOS	HORIZONTAL Z CONTOURS	WCUT	CONSTANT Z e PROJECTION	PROFILE
PLANOS PARALELOS	ALONG LINE IN XY PLANE	SRFPRF	RASTER PATTERN e PROJECTION	CONVENTIONAL SURFACE
PROJEÇÃO RADIAL	RADIAL	SRFPKT	RADIAL PATTERN e PROJECTION	
PATAMARES EM HÉLICE			SPIRAL PATTERN e PROJECTION	
OFFSET DE CONTORNOS	PROJECTED CONTOURS	SRFPKT	3D OFFSET	CONTOUR PROJECTED
PERFILAMENTO 3 EIXOS		SRFPRF		CONTOUR CUT LINE
PERFILAMENTO 3 EIXOS POR PATAMAR		ZCUT		
USINAGEM DE CANTOS	ALONG INTERSECTION	RE MACHINE (pencil)	CORNER FINISHING	
GRAVAÇÕES	ENGRAVING			GROOVING
RANHURAS	ALONG 3D POLYLINE/SPLINE	CURVE MX		TRAJECTORY
ISOPARAMÉTRICA P/ SUPERF. INDIVIDUIAS OU SEQUENCIAIS	PARAMETER LINES	SURMILL		CONTOUR SRF BY SRF
ISOPARAMÉTRICAS P/ SUPERFÍCIES REGRADAS	SURFACES WITH THE TOOL SIDE	RULED MX		
PROJEÇÃO ISOPARAMÉTRICA		SURCLR		
REMOÇÃO EM ÁREAS NÃO USINADAS PREVIAMENTE		RE MACHINE	*	LOCAL MILL

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

Ainda é possível fornecer uma referência para a criação da delimitação, sendo que o *software* identifica onde restou material da usinagem anterior. São elas:

- Uma ferramenta (*tool*): toma como base um diâmetro de fresa que teria executado uma usinagem anterior naquela região;
- Uma trajetória (*toolpath*): toma como base uma trajetória já criada.

As trajetórias ou caminhos de usinagem são definidos em conjunto com os fatores de limitação de regiões, antes de executar o cálculo. Existem ainda, três tipos de trajetórias que cada uma das estratégias citadas a seguir cria, quais sejam:

- a) *Pencil*: executa a usinagem em um único passe na direção paralela ao raio do arredondamento (direção E). Pelo fato desta estratégia basear-se no 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 [12].
- b) *Along*: executa vários passes na direção perpendicular ao raio do arredondamento (direção A), sendo que o número destes depende da altura de crista desejada, fornecida pelo programador.
- c) *Stitch*: executa vários passes na direção paralela ao raio do arredondamento (direção E), sendo que o número destes depende da altura de crista fornecida pelo programador.

3- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme os objetivos descritos no item 1.3, são necessárias maiores informações relacionadas a variáveis de trabalho no fresamento de topo, principalmente com a utilização de fresas com topo semi-esférico. O estudo desenvolvido neste trabalho para obtenção de orientações relativas ao fresamento de cavidades aborda, além das variáveis de usinagem, a forma geométrica a ser fresada. Dessa maneira, requer-se que seja definida uma classificação das geometrias contidas em cavidades de moldes. Como não existem normas que as classifiquem, foi adotada a classificação feita por *Cavalheiro* [6], baseada em termos comumente utilizados por profissionais da indústria de moldes, quais sejam:

a) Geometria com complexidade baixa: Refere-se a modelos construídos somente por planos inclinados, planos horizontais, superfícies regradas derivadas de retas e curvas planas, raios constantes no arredondamento de cantos, etc.

b) Geometria com complexidade média: Caso as entidades com complexidade baixa estejam irregularmente distribuídas pelo modelo ou a combinação destas acabe resultando em formas irregulares, considera-se uma geometria de complexidade média.

c) Geometria com complexidade alta: São considerados de complexidade alta os modelos geométricos 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), etc.

3.2- PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Como a variedade de geometrias de complexidade média e alta é muito grande e,

por se tratar de um primeiro trabalho nesta linha de pesquisa, envolvendo os laboratórios CIMJECT e LMP, os ensaios de fresamento foram definidos para geometrias de complexidade baixa. Baseado nas recomendações obtidas com a usinagem destas geometrias, consideradas como entidades básicas, propõe-se uma sistemática de trabalho no CAM. Tal sistemática consiste em desmembrar geometrias complexas, nas quais deve ser programado o fresamento, em um conjunto formado pelas entidades básicas, buscando aplicar as recomendações obtidas nos ensaios.

Assim, o conjunto de informações fornecido ao *software* de CAM que, processado, resultará no caminho ou trajetória da ferramenta, deve estar adequado à geometria e baseado em conhecimentos tecnológicos. Usinar cada geometria de maneira otimizada poderia diminuir o trabalho de acabamento manual despendido em cavidades de moldes. Porém, existem poucos estudos envolvendo estratégias de acabamento com fresas de topo semi-esférico, relacionando-as a diferentes tipos de geometrias básicas encontradas em peças.

Contudo, para avaliar os recursos oferecidos por um *software* na programação via CAM requer-se, primeiramente, uma base de conhecimento sobre operações de acabamento no fresamento de cavidades. Assim, foram realizados ensaios em algumas geometrias, com a finalidade de obter dados que possam servir como referencial, juntamente com a literatura, na posterior análise de aplicação em um sistema CAM. O objetivo dos ensaios é determinar qual a melhor maneira de usinar um conjunto de superfícies, ou seja, tipo de estratégia e condição de corte (a_p). Estes fatores, combinados com o tipo de geometria, proporcionam resultados diferentes com relação ao critério qualidade superficial [43].

Para cada grupo de geometria ensaiado, foram mantidas constantes a velocidade de corte e o avanço, tendo em vista não ser objetivo deste trabalho estudar estas variáveis. Entretanto, para manter a velocidade de corte constante quando se utilizam fresas de topo semi-esférico, precisa-se conhecer o diâmetro efetivo de corte que varia conforme a inclinação da superfície. Neste sentido, foi desenvolvida uma fórmula através de relações trigonométricas (Anexo I), com a qual se pode encontrar este valor. Os valores utilizados para v_c e v_f são os indicados pelo fabricante da ferramenta.

Outra variável que deve ser corrigida é a largura de engajamento a_e , já que muitos dos algoritmos utilizam a projeção da trajetória, criada em um plano (2D), sobre a peça. Então, devido à inclinação da superfície, o passo lateral real não é o mesmo

programado. Estas e outras fórmulas que auxiliam no cálculo dos parâmetros a serem fornecidos ao CAM, foram agrupadas em uma planilha de cálculo (ver Anexo I). O passo lateral foi mantido o mesmo para grupos a serem defrontados, mas procurou-se variar entre os grupos, com a finalidade de comprovar a validade dos resultados calculados na planilha, numa faixa mais abrangente.

As trajetórias de usinagem utilizadas são do tipo *projection* e perfilamento em 2 ½ eixos, as mais simples possíveis e que a maioria dos sistemas CAM para fresamento possuem.

Por considerar que o objetivo do trabalho não é realizar o levantamento preciso da influência de cada variável de processo, mas sim obter informações qualitativas para serem empregadas na avaliação da etapa de programação via CAM, foram realizadas usinagens com o maior número possível de combinações entre geometrias e estratégias (ver item 3.3).

3.2.1- Variáveis de entrada

Para verificar a influência de cada uma das variáveis separadamente sobre o resultado final, a combinação destas deve ser feita de tal forma que apenas uma sofra alteração, mantendo-se as demais constantes [44, 45]. No fresamento de cavidades, há um grande número de variáveis de entrada ou independentes que podem exercer alguma influência no acabamento superficial, como mostra a Tabela 3.1.

Como neste trabalho pretende-se avaliar aspectos do acabamento superficial, foram alvo do estudo apenas variáveis que influenciam diretamente na rugosidade. Entretanto, a velocidade de corte e o avanço, que também exercem influência na rugosidade de processo, foram mantidos constantes, tendo em vista que o número de combinações destas condições de corte com as trajetórias de ferramenta e geometrias inviabilizaria os ensaios. Sendo assim, o conjunto de variáveis de entrada foi definido como sendo:

- Trajetória gerada por uma estratégia;
- Geometria do topo da ferramenta;
- Profundidade de corte;
- Geometria da superfície ensaiada.

Tabela 3.1: Fatores influentes no acabamento superficial em superfícies fresadas.

Fatores que exercem influência no acabamento superficial	Causas possíveis para o aparecimento das irregularidades
Rugosidade cinemática	<ul style="list-style-type: none"> - Movimento relativo entre ferramenta e peça - Forma e dimensão do topo da fresa
Rugosidade de processo	<ul style="list-style-type: none"> - Mecanismo de corte e deformação na região do gume, região de recalque e gume postiço - Modificações no flanco (condições de atrito e desgaste)
Outros fatores	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrações - Contato de cavacos com a peça - Esmagamento das ranhuras do incremento lateral

3.2.2- Variável de saída

A verificação da influência das variáveis de entrada é realizada através de variáveis de saída ou dependentes [45]. O critério adotado na avaliação das variáveis foi a qualidade superficial. Em cavidades fresadas para moldes, não basta apenas ter o conhecimento da rugosidade média obtida, pois uma reentrância profunda pode aumentar bastante o trabalho manual a ser feito posteriormente.

Portanto, o parâmetro mais adequado para constatar este tipo de anomalia é o R_y (ver seção 2.2). Através da medição do parâmetro R_y , é possível a comparação entre diferentes situações, e a constatação de quais trajetórias, combinadas com quais condições de corte e ferramentas, geram desvios indesejáveis.

Foram realizadas cinco medições em paralelo e eqüidistantes na direção transversal aos sulcos do fresamento, para cada região usinada. Os cinco valores obtidos foram submetidos a um tratamento estatístico, tendo-se uma melhor representação do acabamento superficial.

3.2.3- Material utilizado nos ensaios

Tendo em vista reproduzir as condições reais de usinagem enfrentadas pelas ferramentarias, optou-se pela utilização do aço ABNT P20 beneficiado (conforme Anexo II) para a realização dos ensaios, pois em torno de 60% das cavidades são confeccionadas com este tipo de aço. No Anexo II, são listados, ainda, os materiais mais empregados na fabricação de cavidades [46], bem como a composição química e propriedades mecânicas dos aços [47].

3.2.4- Ferramentas de corte

A determinação do tipo de fresa e o material de que estas são constituídas, está vinculada ao material a ser usinado e às estratégias que são alvo do estudo. Nestes ensaios, buscou-se avaliar estratégias de acabamento, onde o uso de fresas de topo com ponta esférica tem larga aplicação [14, 48]. Desta forma, foi feita a escolha por este tipo de geometria de ferramenta. Também foi utilizada uma fresa com geometria “toroidal” para verificar a diminuição no tempo de usinagem, comparando com a fresa esférica para o mesmo acabamento superficial.

Devido ao uso do aço P20, material de com dureza em torno de 29 HRc, selecionaram-se fresas de metal-duro para resistir às condições de usinagem mais severas, sendo que estas também são as mais utilizadas nas indústrias. Tendo como parceiros no trabalho a empresa fabricante de ferramentas Sandvik, foram solicitadas fresas com insertos e inteiriças. São elas:

- Fresa Coromill com insertos retangulares para desbaste (sendo que não serão analisadas variáveis desta etapa), diâmetro 40 mm;
- Fresa Coromill com insertos redondos (toroidal) para operações de desbaste e acabamento, diâmetro 25 mm;
- Fresas inteiriças de metal-duro com revestimento de Carbonitreto de Titânio Ti(C,N), diâmetros 4, 6, 8 e 10 mm.

3.2.5- Máquina-ferramenta

Os ensaios foram realizados na fresadora Romi Polaris F400, disponível no

Laboratório de Mecânica de Precisão (UFSC). O comando da máquina é o Diadur mach7 (Heidenhain 630 R). A execução dos programas gerados no CAM foi feita através de um computador ligado via interface RS-232 ao CNC. O *software* utilizado na transmissão dos programas foi o TNC, que realiza a transmissão de dados por blocos.

3.2.6- Equipamento para verificação da qualidade superficial

Para a medição da qualidade superficial, utilizou-se a estrutura do Laboratório de Análise de Superfícies Usinadas (GRUCON - UFSC). Foram realizadas medições no rugosímetro digital PERTHEN S8P, com apalpador mecânico de diamante, sendo o raio de 10 μm . O aparelho possibilita medições em paralelo e tratamento estatístico dos dados, com uma incerteza de medição de $\pm 5\%$. Os principais parâmetros medidos pelo aparelho são: R_a , R_z , R_{pm} , R_p , $R_{m\acute{a}x}$, R_y , P_t e W_t .

3.3- REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Observando peças de plástico em diversos ramos da indústria, como automotivo, eletrônico, eletrodoméstico, informática e de brinquedos, constata-se que grande parte das geometrias presentes nestes produtos é ser formada pela combinação de um conjunto de geometria simples ou entidades básicas. Assim, o conjunto das geometrias consideradas de complexidade baixa foi definido como sendo:

- Paredes com ângulo para extração;
- Planos inclinados;
- Superfícies côncavas e convexas;
- Calotas;
- Semi-esferas.

Contudo, não significa que a maneira com que foram classificadas as geometrias de complexidade baixa seja única, sendo esta uma proposta considerada adequada para analisar as variáveis de trabalho a serem estudadas.

Para cada geometria, foram estudadas estratégias e parâmetros diferentes, sendo que em cada caso são explicadas quais variáveis foram analisadas, bem como as

condições de corte empregadas, como é descrito a seguir. São mostrados, ainda, exemplos de peças e regiões da cavidade, nos mais variados ramos da indústria, onde se encontra o tipo de geometria em questão. Em todos os ensaios, foi utilizado como fluido de corte emulsão de óleo em concentração de 6%.

3.3.1- Paredes com ângulo para extração

Neste ensaio, foram usinadas paredes com ângulo de extração, simulando paredes de cavidades de moldes. Estudar este tipo de geometria é importante, porque geralmente os moldes possuem superfícies com ângulo para extração do moldado. Como no CAM pode-se optar por um sentido ou outro de corte, pretende-se obter dados sobre o acabamento, dos quais possam ser extraídas as melhores formas para a usinagem de paredes. A figura 3.1 mostra uma impressora e a cavidade do molde para o componente (a lateral, no detalhe), sendo um exemplo de onde é encontrada a geometria referida. Qualquer superfície com inclinação maior que 80° com relação à horizontal foi classificada como parede, incluindo superfícies com curvatura.

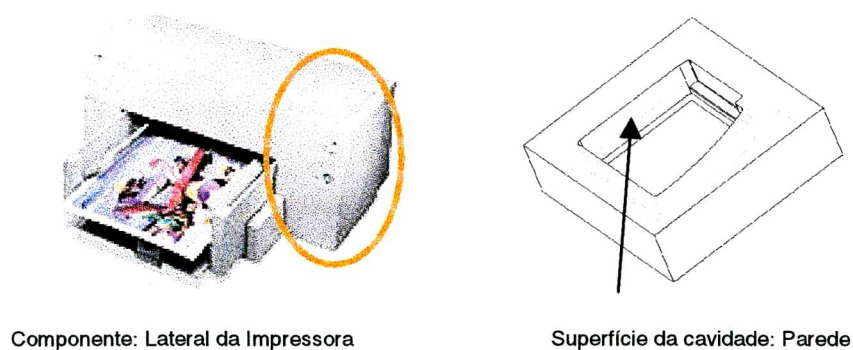


Figura 3.1: Exemplo de forma geométrica classificada como parede.

As estratégias de fresamento usadas foram a Perfilamento $2\frac{1}{2}$ eixos e a Planos paralelos, ambas com uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 8 mm. As condições de corte mantidas constantes para todas as variações de estratégias foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

Para realizar o ensaio, dividiu-se o corpo de prova em 5 regiões. Pretendeu-se, assim:

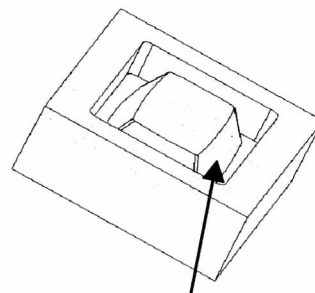
- Avaliar qual sentido de corte fornece o melhor acabamento (concordante, discordante ou os dois simultaneamente) utilizando a estratégia Perfilamento 2½ eixos, com a opção de manter a altura de crista constante.
- Constatar o que representaria o uso de apenas um sentido de corte no tempo total de usinagem. Para contornos fechados, não há diferença.
- Avaliar o uso da estratégia do tipo Planos paralelos em subida e descida, comparando com os resultados obtidos pela estratégia do tipo Perfilamento 2½ eixos, uma vez que existe a possibilidade de executar o acabamento de paredes com esta estratégia e muitos programadores a utilizam [14].

3.3.2- Planos inclinados

Uma das formas geométricas mais básicas é o plano, podendo-se encontrar esta geometria em grande parte das peças plásticas. A Figura 3.2 mostra um televisor e a cavidade para injeção do painel frontal, no qual predominam os planos inclinados.



Painel frontal do televisor



Superfície em plano inclinado

Figura 3.2: Exemplo de forma geométrica classificada como plano inclinado.

Na programação de superfícies planas a estratégia mais adequada é a de Planos paralelos [20]. Contudo, a principal dúvida na usinagem de planos inclinados, é saber qual a melhor direção da trajetória. Através dos ensaios, poderão ser constatadas algumas características da estratégia de Planos paralelos, que é uma das mais utilizadas na etapa de acabamento em cavidades para moldes [16].

Nestes ensaios, foram analisados planos com inclinações diferentes e variações

de ângulo da estratégia. A inclinação do plano refere-se ao ângulo formado entre este e um plano normal ao eixo da ferramenta. Com relação à direção das trajetórias na estratégia de Planos paralelos, as cinco maneiras descritas a seguir foram utilizadas. No restante do trabalho, far-se-á referência somente à direção, que corresponderá à descrição feita aqui.

Direção A (Figura 3.3): usinagem na direção longitudinal ao perfil usinado, ou seja, trajetória na direção de uma reta paralela ao plano da superfície.

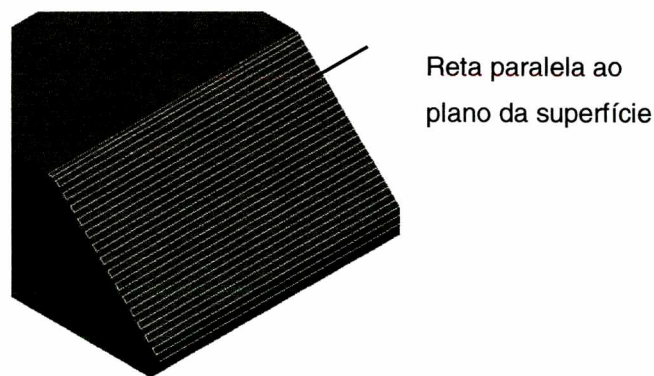


Figura 3.3: Direção da trajetória classificada como A.

Direção B (Figura 3.4): trajetória tem ângulo de 30° em relação a uma reta paralela ao plano da superfície.

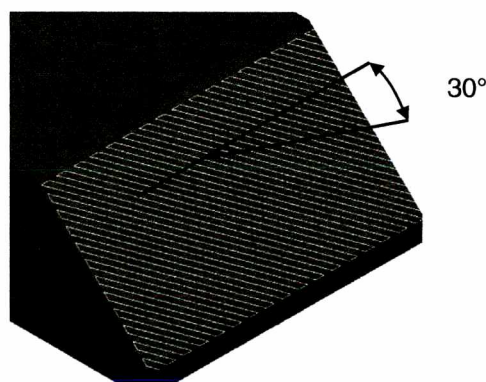


Figura 3.4: Direção da trajetória classificada como B.

Direção C (Figura 3.5): trajetória tem ângulo de 45° em relação a uma reta paralela ao plano da superfície.

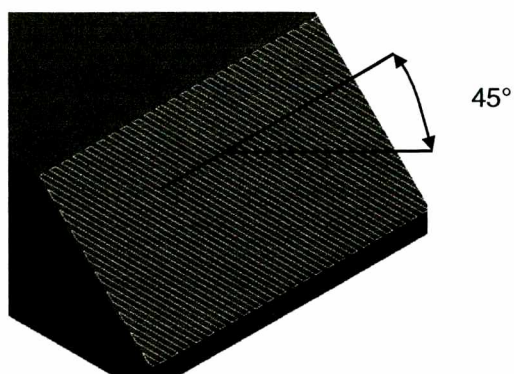


Figura 3.5: Direção da trajetória classificada como C.

Direção D (Figura 3.6): trajetória tem ângulo de 60° em relação a uma reta paralela ao plano da superfície.

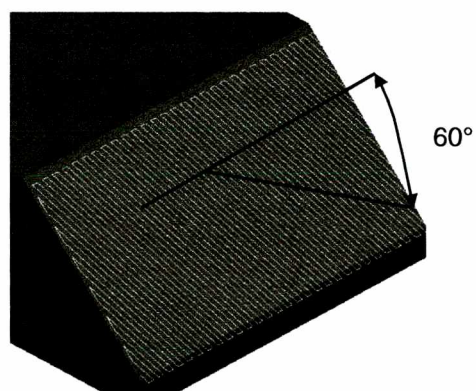


Figura 3.6: Direção da trajetória classificada como D.

Direção E (Figura 3.7): trajetória tem ângulo de 90° em relação a uma reta paralela ao plano da superfície.

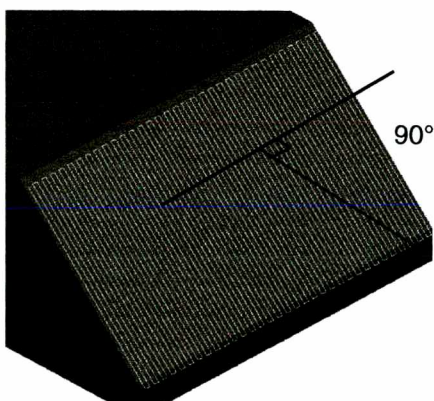


Figura 3.7: Direção da trajetória classificada como E.

Foram realizados 4 grupos de usinagens para planos inclinados, sendo que diferentes variáveis são analisadas em cada grupo:

a) Usinagem de planos com inclinações de 30°, 45° e 60°

Cada plano foi dividido em 10 regiões. A programação das regiões foi feita utilizando as diferentes direções da estratégia de Planos paralelos. Pretendeu-se com isso:

- Verificar qual das 10 maneiras fornece o melhor acabamento superficial;
- Constatar diferenças na usinagem de cima para baixo e de baixo para cima, nas direções A, B, C e D;
- Constatar diferença em subir concordante ou discordante na maneira E;
- Comprovar a confiabilidade dos valores fornecidos pela planilha para rugosidade, utilizando a compensação do passo lateral devido à projeção da trajetória.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 10 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

b) Usinagem de planos com inclinações de 2,5°, 5°, 7,5°, 10°, 12,5°, 15° e 20°

Foram usinadas 14 regiões com 7 diferentes inclinações. Para tanto, foi utilizada a mesma estratégia (Planos paralelos direção A), mas 7 das regiões com fresamento em subida e 7 com fresamento em descida. Para avaliar os resultados retirados da planilha na compensação do passo lateral, os tempos de usinagem foram defrontados. Considerando que o incremento lateral e o diâmetro efetivo de corte foram compensados, não há a interferência destas variáveis. Pode-se, então, verificar se existe influência da geometria da fresa no acabamento superficial, à medida que a inclinação do plano diminui.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 10 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

c) Usinagem de planos com fresa toroidal

Para comprovar as possíveis vantagens com o uso da fresa toroidal, foram realizados ensaios em planos com inclinação de 5° e de 45° , com o uso da estratégia de Planos paralelos nas direções A e C.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de diâmetro 25 mm com pastilha redonda de metal-duro com revestimento triplo de Ti(C,N), Al_2O_3 e TiN. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 120$ m/min, $v_f = 400$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

d) Usinagem de planos (30° e 60°) com diferentes valores de sobremetal

A influência do valor do sobremetal na qualidade superficial foi testada através da usinagem de dois planos. As regiões foram desbastadas deixando-se três valores diferentes de sobremedida: 0,15 mm, 0,30 mm e 0,45 mm. Para cada inclinação de superfície e valor de sobremetal, empregaram-se ainda duas direções da estratégia de Planos paralelos (C e E), totalizando 12 regiões.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico diâmetro 10 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min.

3.3.3- Superfícies côncavas e convexas

Este tipo de forma geométrica caracteriza-se pela mudança na inclinação em cada ponto da superfície, à medida que se percorre o raio. Conhecer mais sobre a usinagem de superfícies côncavas e convexas fornecerá base para o fresamento de superfícies curvas e arredondamentos, os chamados *fillets*. Está presente em diversos produtos (Figura 3.8), com raios grandes ou pequenos.

As duas estratégias mais empregadas no fresamento deste tipo de geometria são: Planos paralelos em diferentes direções e Perfilamento $2\frac{1}{2}$ eixos. A usinagem na direção longitudinal não deve ser feita utilizando Planos paralelos, pois o passo lateral modifica-se por consequência da projeção da trajetória, que é criada em 2D, e da mudança de inclinação da superfície. Caso o fresamento venha a ser feito neste sentido, deve-se usinar usando Perfilamento $2\frac{1}{2}$ eixos, calculada pela altura da crista (*cusp*), que mantém a rugosidade constante ao longo da superfície.

Com isso, pôde-se:

- Avaliar qual estratégia fornece o melhor acabamento, uma longitudinal criada por Perfilamento 2½ eixos ou uma por Planos paralelos na direção tangencial ao raio de curvatura (direção E);
- Verificar a influência do uso da estratégia de Planos paralelos nas direções B, C e D para a usinagem deste tipo de geometria.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 8 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

c) Usinagem de superfícies côncavas e convexas com fresa toroidal.

Foram, ainda, usinadas superfícies côncavas e convexas com uma fresa toroidal. No entanto, a estratégia Perfilamento 2½ eixos não foi aplicada, uma vez que a ferramenta comportar-se-ia como uma fresa esférica de diâmetro igual ao da pastilha que esta possui, não havendo vantagens em usar a fresa toroidal com diâmetro relativamente grande. Portanto, foi testado apenas o comportamento da estratégia de Planos paralelos em três direções A, B e D. Com isso, pretendeu-se:

- Avaliar as vantagens proporcionadas com a utilização da fresa toroidal no acabamento;
- Verificar se a rugosidade obtida fica próxima à calculada, já que este valor corresponde à rugosidade que uma fresa esférica proporcionaria.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de diâmetro 25 mm com pastilha redonda de metal-duro com revestimento de Ti(C,N), Al_2O_3 e TiN. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 120$ m/min, $v_f = 400$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

d) Usinagem de superfícies côncavas com raio igual ao da fresa.

Na usinagem de arredondamentos, pode-se ter a trajetória da ferramenta em qualquer das direções citadas no item 3.7.2, sendo que, geralmente, as direções A e E são as utilizadas. Na direção A, as trajetórias podem ser em um único passe ou em vários, este último retirando o material mais suavemente. Além das opções de direção da trajetória, tem-se o sentido de corte que pode influenciar no resultado obtido. Desta

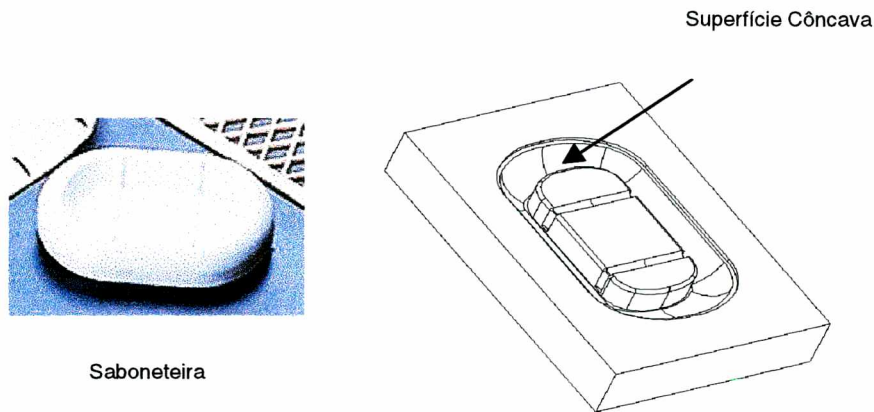


Figura 3.8: Exemplo de forma geométrica classificada como côncava.

Da mesma forma que para planos inclinados, nos 4 grupos de usinagens estudados, as variáveis de entrada foram escolhidas conforme os fatores a serem analisados:

a) Usinagem de superfícies côncavas e convexas com Planos paralelos na direção E.

Foram realizadas usinagens em uma superfície côncava e uma convexa, utilizando apenas a estratégia de Planos paralelos. As superfícies foram divididas em seis regiões cada, nas quais foram testados o fresamento em concordância, em discordância, com dois sentidos simultaneamente, em subida e em descida (direção E). Através deste ensaio, pôde-se avaliar qual sentido de corte fornece o melhor acabamento superficial (concordante ou discordante), bem como constatar quanto diminui o tempo de usinagem, utilizando os dois sentidos e qual a relação com a rugosidade.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 10 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

b) Usinagem de superfícies côncavas e convexas com Perfilamento 2½ eixos e Planos paralelos.

Para defrontar as estratégias Perfilamento 2½ eixos e Planos paralelos, realizaram-se ensaios, dividindo as superfícies em 3 regiões: uma usinada com Perfilamento 2½ eixos, uma com Planos paralelos na direção A e outra na direção B.

?(E)

forma, pretendeu-se verificar qual direção e sentido de corte, na usinagem de arredondamentos com a fresa de raio igual ao da geometria, fornece o melhor acabamento.

A ferramenta utilizada foi uma fresa inteiriça de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 4 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

3.3.4- Calotas

São geometrias onde a altura é consideravelmente menor que o raio (Figura 3.9), encontradas principalmente em fundos de potes, carcaças de eletrônicos e equipamentos de informática. As recomendações obtidas para este tipo de geometria servirão como base para o fresamento de formas livres, além de possibilitar a avaliação do comportamento de várias estratégias disponíveis em sistemas CAM.



Cobertura do Acionamento da Buzina

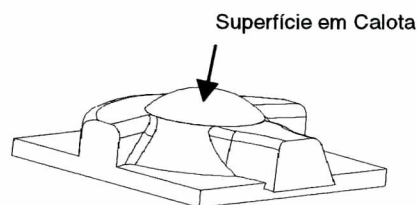


Figura 3.9: Exemplo de forma geométrica classificada como calota.

Os ensaios foram realizados em 3 grupos de usinagens:

a) Usinagem com as estratégias **Projeção radial e Planos paralelos**.

Em uma calota, foram aplicadas as duas estratégias. A Projeção radial, segundo o fabricante do *software*, adapta-se melhor a este tipo de geometria. Entretanto, a de Planos paralelos é bastante utilizada por programadores [16]. O objetivo é comparar os resultados obtidos, partindo de valores programados para rugosidades iguais.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 10 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

b) Usinagem com as estratégias Perfilamento 2½ eixos e Patamares em hélice.

Pretende-se com estes grupos de estratégias verificar o acabamento (rugosidade), o tempo de execução da usinagem e entradas e saídas da ferramenta no material;

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 10 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

c) Usinagem utilizando a fresa toroidal com as estratégias Projeção radial e Planos paralelos.

Os mesmos parâmetros utilizados para fresa esférica são testados agora adotando um fresa de topo reto com pastilhas redondas. Assim, pode-se verificar a redução no tempo de usinagem e o acabamento superficial gerado.

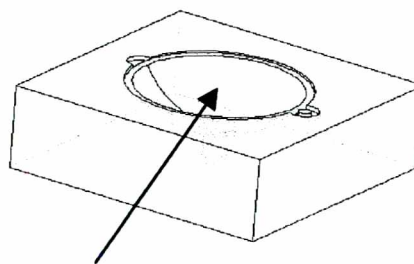
A ferramenta utilizada foi uma fresa de diâmetro 25 mm com pastilha redonda de metal-duro com revestimento de Ti(C,N), Al_2O_3 e TiN. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 120$ m/min, $v_f = 400$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

3.3.5- Semi-esferas

Neste tipo de geometria, a altura é igual ao raio (Figura 3.10). Como a inclinação da superfície e a orientação do vetor normal à superfície variam constantemente, a usinagem torna-se mais complicada, restringindo a aplicação de estratégias a poucos grupos.



Funil



Superfície em ½ esfera

Figura 3.10: Exemplo de forma geométrica classificada como semi-esfera.

Semelhante ao aplicado para calotas, em semi-esferas os mesmos três grupos de usinagem foram adotados:

a) Usinagem com as estratégias Projeção radial e Planos paralelos.

O uso da estratégia de Planos paralelos no fresamento de semi-esferas ocorre com alguma frequência, apesar de não ser a mais aconselhável, pois existem grandes variações na inclinação e direção da superfície, principalmente na usinagem de formas livres onde programadores “viciados” geralmente a utilizam para toda a geometria [16]. Já a estratégia do tipo Projeção radial parece ser mais apropriada, por efetuar o corte sempre na direção E, apesar da constante mudança na direção da normal à superfície. Com os valores de rugosidade medidos nas superfícies geradas pelas duas estratégias pôde-se comparar e determinar qual fornece o melhor acabamento.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 10 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

b) Usinagem com as estratégias Perfilamento 2½ eixos e Patamares em hélice.

Pretendeu-se verificar comparando as estratégias Perfilamento 2½ eixos e Patamares em hélice o acabamento (rugosidade), entradas e saídas da ferramenta no material, gerando trajetórias com o mesmo tempo de usinagem. As duas estratégias proporcionam a usinagem na mesma direção (A), mas o Perfilamento 2½ eixos com incremento no eixo Z após cada passe, e a Patamares em hélice com incremento simultâneo nos três eixos.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de metal-duro com revestimento de Ti(CN), topo semi-esférico de diâmetro 8 mm. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 80$ m/min, $v_f = 350$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

c) Usinagem utilizando a fresa toroidal com as estratégias Projeção radial e Planos paralelos.

Os mesmos parâmetros utilizados para fresa esférica foram testados adotando um fresa de topo reto com pastilhas redondas. Assim, pode-se avaliar a redução no tempo de usinagem e o acabamento superficial gerado.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de diâmetro 25 mm com pastilha redonda de metal-duro com revestimento de Ti(C,N), Al_2O_3 e TiN. As condições de corte mantidas constantes foram: $v_c = 120$ m/min, $v_f = 400$ mm/min, $a_p = 0,3$ mm.

4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3, é realizada neste capítulo a análise comparativa entre as estratégias e parâmetros utilizados para usinar determinada geometria, tendo-se como foco a rugosidade gerada. Cabe ressaltar que os resultados obtidos foram para o aço P20, fresas de metal-duro Sandvik, fresadora Romi F400 e as condições de corte indicadas em cada caso.

4.1- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE PAREDES COM ÂNGULO PARA EXTRAÇÃO

A Tabela 4.1 mostra o tempo consumido na usinagem com cada uma das estratégias, além da rugosidade programada e a medida. Os tempos indicados na Tabela 4.1 incluem os movimentos em vazio (posicionamento e aproximação), uma vez que para os ensaios foram utilizados corpos de prova com contorno aberto. Sendo assim, o tempo para usinagem com apenas um sentido de corte é, aproximadamente, o dobro das outras estratégias. Caso fosse um contorno fechado, ter-se-ia em torno de 5 minutos, como no fresamento concordante e discordante. Nota-se ainda, que utilizando a estratégia Perfilamento em 2½ eixos, a rugosidade obtida tanto no sentido concordante como no discordante foi menor que a programada, como mostram os valores de R_y teórico e o R_y medido, com o desvio-padrão da amostra (σ) entre parênteses.

Tabela 4.1: Tempos de usinagem em paredes com diferentes estratégias.

<i>Estratégia</i>	<i>Ry teórico μm</i>	<i>Ry μm (σ)</i>	<i>Tempo</i>
Perfilamento 2½ eixos concordante e discordante	7,0	8,1 (0,3)	4 min 58 s
Perfilamento 2½ eixos concordante	7,0	5,4 (0,1)	8 min 1 s
Perfilamento 2½ eixos discordante	7,0	5,8 (0,8)	8 min 1 s
Planos paralelos (direção E) descendo concordante	6,9	6,5 (0,2)	4 min 4 s
Planos paralelos (direção E) descendo discordante	6,9	9,7 (0,9)	4 min 4 s

O uso de uma estratégia de Planos paralelos (1ª e 2ª regiões na Figura 4.1), subindo e descendo a parede, gera resultados satisfatórios, desde que a fresa desça com o sentido de corte concordante (conseqüentemente suba discordante). Desta forma, o tempo de usinagem é menor (comparado com o Perfilamento 2½ eixos) e os valores de rugosidade atingidos foram semelhantes ao programado. O fato das linhas de usinagem ficarem no sentido de extração do produto moldado, costuma ser a justificativa de programadores para o uso desta estratégia em paredes [16]. Entretanto, este argumento não é consistente, visto que estas linhas são eliminadas no acabamento manual antes do primeiro teste de injeção (*try-out*) do molde [16].

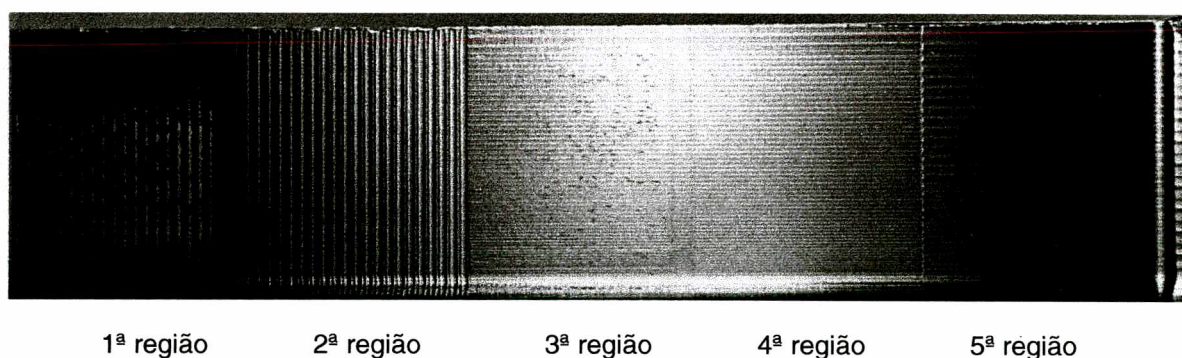


Figura 4.1: Superfícies resultantes do ensaio em paredes.

Deve-se ter em vista que, na maioria dos produtos, as paredes são formadas por um contorno fechado e, de acordo com os resultados obtidos no ensaio, seria mais aconselhável a utilização da estratégia de Perfilamento 2½ eixos em fresamento concordante. Com esta condição, é gerado o melhor acabamento superficial e, sendo um contorno fechado, não há perdas de tempo em posicionamentos. Contudo, diminuindo o passo lateral na estratégia Planos paralelos, poder-se-ia chegar à mesma rugosidade, com um tempo de usinagem próximo ao do Perfilamento 2½ eixos. Entretanto, o uso de trajetórias na direção E gera grandes esforços tanto na subida, pela maior espessura de corte, quanto na descida, pelo amassamento de material (Figura 4.2). Um estudo comparativo com maior profundidade para esta situação fica como proposta para futuros trabalhos relacionados à área.

Como orientação geral, deve-se utilizar a estratégia de Planos paralelos para paredes de contornos abertos, e a de Perfilamento 2½ eixos para contornos fechados.

Dependendo da situação, o programador opta por uma ou outra, ressaltando que se deve atentar para as diferenças entre a rugosidade programada e a obtida na estratégia de Perfilamento 2½ eixos, ou seja, prever que o valor gerado será menor que o programado (a possível causa será discutida no item 6.2).

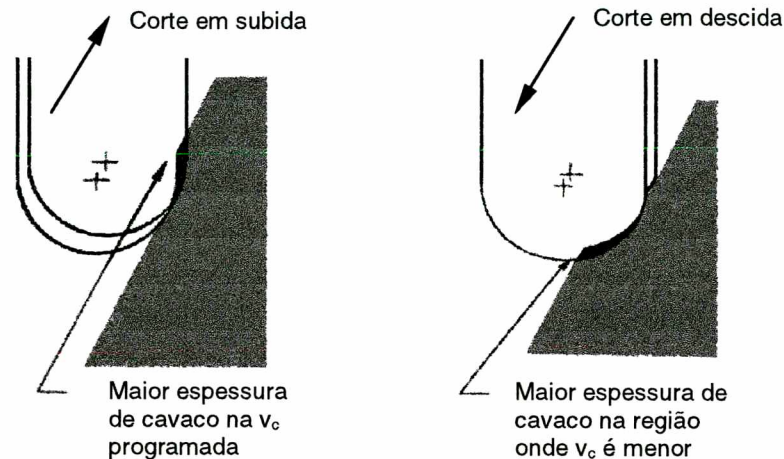


Figura 4.2: Usinagem ascendente e descendente [49].

4.2- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE PLANOS INCLINADOS

4.2.1- Usinagem ascendente e descendente

Conforme mostram os gráficos da Figura 4.4, para planos com inclinações que variam de $2,5^\circ$ até 60° e utilizando os dois sentidos de corte, deve-se optar pela usinagem de baixo para cima (ascendente). Este resultado pode ser extrapolado para planos com qualquer inclinação, pois quando a fresa usina de cima para baixo, há o amassamento de material, porque a velocidade de corte é menor no centro da ferramenta. O amassamento ocorre com maior intensidade em planos com inclinações menores, devido ao contato da parte central da fresa com a peça, causando picos que aumentam a rugosidade. Através da Figura 4.3, obtida no rugosímetro e que descreve a superfícies ensaiadas, pode-se fazer um comparativo entre a superfície usinada de cima para baixo (A) e a usinada de baixo para cima (B). Usinando de cima para baixo, a irregularidade é bastante grande, aumentando em torno de 20 % a média e, em mais de 100%, o desvio-padrão na medição em paralelo.

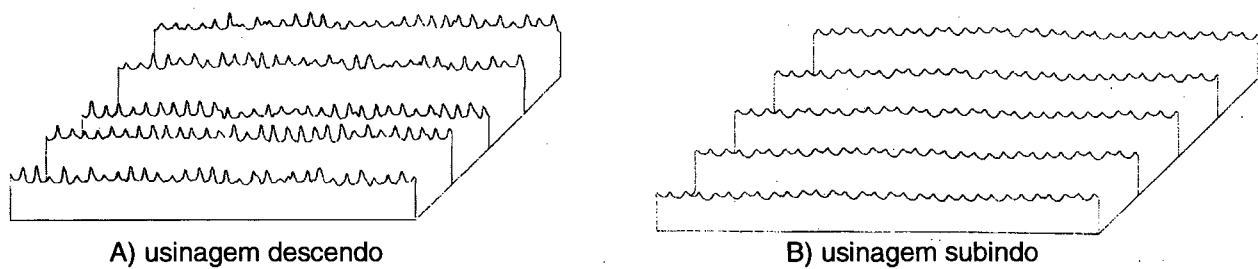


Figura 4.3: Superfícies de um plano usinado com varredura em 3 eixos em ângulo de 45° obtidas através de um rugosímetro.

4.2.2- Ângulo da trajetória em Planos paralelos

Com relação ao ângulo da trajetória da ferramenta na estratégia Planos paralelos, as seguintes orientações foram obtidas:

- Como pode ser visto no Gráfico 1 (Figura 4.4), em planos com inclinação de 30° e usinagem descendente, a rugosidade tem forte dependência do ângulo da estratégia. O valor de R_y cresce até um máximo para direção C e decresce novamente à medida que o ângulo da trajetória aumenta; R_y obtido para direção C é mais que o dobro do valor obtido na direção E. Já para usinagem ascendente, a tendência é inversa e menos acentuada, obtendo-se valores menores e mais uniformes de rugosidade. Neste caso, obteve-se o menor valor de R_y para a direção C, que também é o melhor resultado para planos com inclinação de 30° . Deve-se atentar para o fato que o ângulo da trajetória e o sentido da usinagem (ascendente ou descendente) pode levar a obter resultados melhores, por exemplo, diminuir a rugosidade em torno de $11 \mu\text{m}$ (direção C, descendente) para aproximadamente $5 \mu\text{m}$ (direção C ou D, ascendente). Com a usinagem na direção E obtiveram-se bons resultados tanto subindo em corte discordante e descendo concordante quanto subindo concordante e descendo discordante.
- Para planos com inclinação de 45° ($R_{y\text{teórico}} = 6,2 \mu\text{m}$), o comportamento da rugosidade é o mesmo tanto para usinagem ascendente quanto descendente (Gráfico 2, Figura 4.4). Na usinagem ascendente, a rugosidade na direção C ($\cong 5 \mu\text{m}$) aumentou em torno de 35% com relação à direção E ($\cong 7 \mu\text{m}$), voltando ao patamares anteriores na direção A. Novamente aparece uma

diferença entre a rugosidade com a usinagem ascendente e descendente, esta última sendo em média 10% maior. Não há diferença significativa entre estratégias nas direções B, C e D, na usinagem ascendente ou descendente. Entretanto, a utilização de trajetórias nas direções A e E mostrou resultados melhores e muito semelhantes.

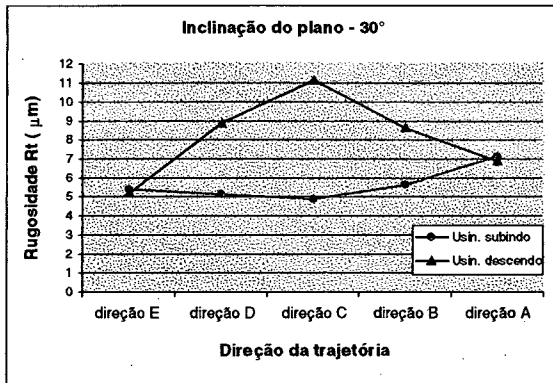


Gráfico 1

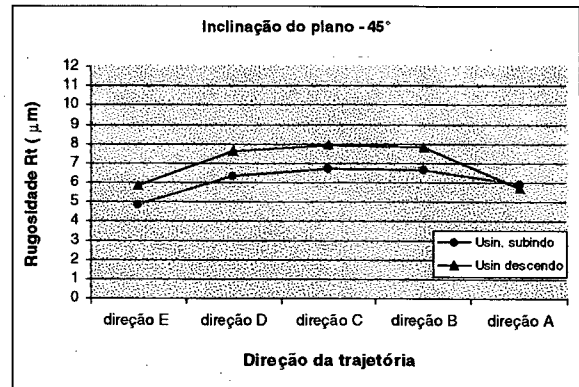


Gráfico 2

Figura 4.4: Gráficos representando os resultados das medições de rugosidade em planos com inclinações de 30° e 45°.

- Em planos com inclinação de 60° não houve uma tendência, ou seja, aumentar ou diminuir o ângulo de direção da trajetória não significa melhorar ou piorar o acabamento, sendo que os resultados alternam-se à medida que a direção da trajetória muda (Gráfico 3, Figura 4.5). Nota-se, principalmente, que as direções D e A resultaram no pior acabamento, com a rugosidade acima de 8 µm para direção D e em torno de 10 µm para a direção A, sendo que a rugosidade programada era de 10 µm. Apesar dos valores de R_y para estas direções estarem próximos do programado, nas direções E e C os resultados obtidos são melhores, chegando a aproximadamente 6 µm na direções E com corte ascendente.

Contudo, nos três planos estudados, apesar de valores programados de R_y muito diferentes (de 2,3 µm a 10 µm), a rugosidade obtida para a melhor situação em cada inclinação de plano variou de 5 µm a 6 µm. As possíveis razões para este distanciamento da rugosidade programada são comentadas na seção 4.6.

Como uma orientação geral, válida para inclinações entre 30° e 60°, deve-se

optar por Planos paralelos na direção E, com a qual se obtiveram os melhores resultados nos ensaios. Além disso, ao utilizar esta opção, o programador deve dar preferência à usinagem descendo discordante e subindo concordante.

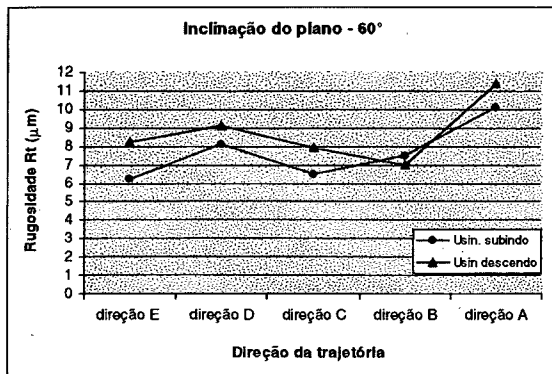


Gráfico 3

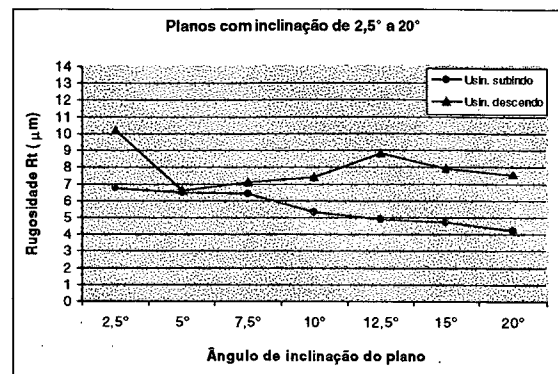


Gráfico 4

Figura 4.5: Gráficos representando os resultados das medições de rugosidade em planos de inclinações de 60° e de 2,5° a 20°.

4.2.3- Influência da geometria da fresa esférica

Em outro ensaio, utilizando planos com inclinações de 2,5°, 5°, 7,5°, 10°, 12,5°, 15° e 20°, pretendia-se avaliar a eficácia da planilha desenvolvida para calcular o incremento lateral real e a velocidade efetiva de corte (Anexo I). Realizando a programação em 7 planos com a mesma área, pôde-se comprovar que a planilha fornece valores corretos na compensação do incremento lateral, sendo que os tempos de usinagem foram iguais para os 7 planos. Contudo, na usinagem ascendente, à medida que diminui a inclinação da superfície, a rugosidade aumenta (Gráfico 4 da Figura 4.5), o que não deveria acontecer, uma vez que incremento lateral e a velocidade de corte reais foram mantidos constantes. Para compreender melhor a causa desta piora de acabamento superficial, seria necessário estudar a geometria da fresa de topo semi-esférico, o que foge ao escopo deste trabalho. No entanto, vale a pena ressaltar que, quanto menor a inclinação do plano (entre 20° e 2,5°), mais alta será a rugosidade obtida e, conseqüentemente, mais distante do valor pretendido.

Nos 7 planos onde se utilizou a usinagem descendente, houve uma grande variação nos valores de rugosidade (Gráfico 4 da Figura 4.5). Isto mostra que a instabilidade no corte, devido ao amassamento de material na região central da fresa, acaba mascarando os desvios provocados pela geometria da ferramenta.

4.2.4- Sobremetal

Usinando-se planos inclinados com a estratégia na direção E, dentro da faixa de valores de sobremetal recomendada para o acabamento de cavidades (entre 0,15 mm e 0,45 mm) [6], houve uma pequena melhora na qualidade superficial, à medida que a espessura aumenta. No Gráfico 5 (Figura 4.6), pode-se ver que, para uma estratégia em Planos paralelos na direção E, a rugosidade diminui para valores de sobremetal maiores. Porém, em casos onde a rugosidade de processo é alta, devido à estratégia ou outra variável, esta influência acaba não existindo. O Gráfico 6 (Figura 4.6) elucida este fato, onde apenas se mudou o ângulo de varredura da, obtendo-se rugosidades maiores e a não-percepção de influência do sobremetal.

Optar por um valor baixo de sobremetal (0,15 mm por exemplo), faz com que as forças de corte e as temperaturas diminuam, podendo-se utilizar velocidades maiores ou proporcionar o aumento da vida da fresa. Entretanto, em condições normais, este valor não deve ser menor que 10 μm , pois um sobremetal pequeno dificulta a formação do cavaco, provocando o amassamento do material e uma qualidade superficial ruim [10]. Valores maiores podem ser previstos quando se procura melhorar o acabamento superficial, desde que se saiba que outros fatores não terão uma influência negativa maior no processo (como as forças de corte). Para cavidades que passarão por tratamento térmico antes do acabamento, deve-se deixar uma sobremedida na ordem de 0,5 mm, devido ao empenamento sofrido pela cavidade [6,16].

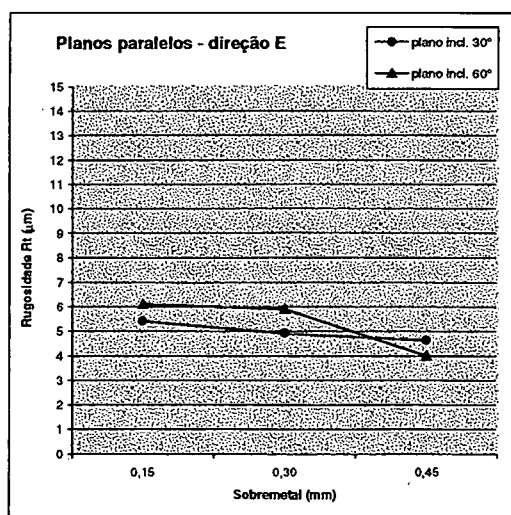


Gráfico 5

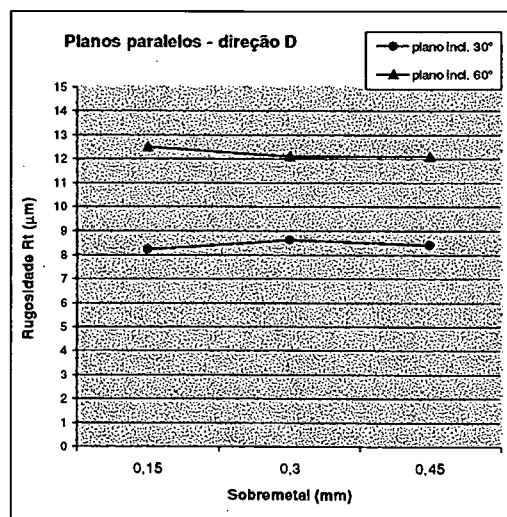


Gráfico 6

Figura 4.6: Gráficos representando os resultados das medições de rugosidade para diferentes valores de sobremetal.

4.2.5- Fresa toroidal no acabamento

O uso de fresas com insertos redondos de metal-duro, as chamadas toroidais, em planos com inclinação pequena (em torno de 5°) mostrou-se problemático. As causas das irregularidades superficiais observadas podem ser devido:

- Ao início e o final do corte nestas condições ser caracterizado por uma pequena quantidade de material removido. A ferramenta permanece em contato com a superfície sem efetuar o corte, apenas amassando o material e gerando uma rugosidade bastante alta;
- À diferença na dimensão dos gumes, ocasionada por um desvio dimensional na fabricação do suporte, uma vez que a ferramenta apresenta uma certa tolerância de fabricação, que para o suporte usado pode estar além do aceitável.

Para compreender qual fator afetou a rugosidade ou se existe a influência tanto das condições de processo como da característica construtiva da fresa, seria necessário um estudo mais aprofundado, o que não é objetivo deste trabalho.

Porém, em planos com inclinação mais acentuada, obtiveram-se valores de R_y muito semelhantes aos programados, com a rugosidade medida praticamente igual à teórica. Para calcular o passo lateral (função da rugosidade desejada), foi considerado que seria utilizada uma fresa esférica com o mesmo diâmetro da toroidal. A aproximação feita mostrou-se não só possível, como também bastante precisa.

4.3- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE SUPERFÍCIES CÔNCAVAS E CONVEXAS

4.3.1- Planos paralelos x Perfilamento $2\frac{1}{2}$ eixos

Em superfícies côncavas e convexas, a inclinação da superfície pode variar de 0° a 90° . Ao utilizar a estratégia de Planos paralelos nas direções B, C, e D, considera-se a maior inclinação para efeito de cálculo ao determinar o valor de a_e . No entanto, isto gera um incremento lateral muito pequeno nas regiões pouco inclinadas, o que, além de aumentar o tempo de usinagem, pode gerar um acabamento superficial ruim, se a

espessura de usinagem for menor que a admissível. Portanto, nestas situações, deve-se procurar estratégias que evitem este tipo de problema. A trajetória na direção A, com incremento lateral calculado pela altura de crista (estratégia Perfilamento 2½ eixos), que poderia ser uma boa alternativa, mostrou-se ineficiente para manter a rugosidade cinemática constante. Isto se deve, talvez, a problemas no algoritmo que calcula as trajetórias (limite do mínimo *stepdown*), em regiões onde a inclinação é quase nula (plano quase horizontal), como mostra a Figura 4.7.

Dessa forma, optar pela direção E da estratégia Planos paralelos, na qual a distância entre passes não é afetada pela inclinação da superfície, torna-se a opção mais adequada para esse tipo de geometria. Com a estratégia de Planos paralelos, obteve-se melhor resultado do que com a de Perfilamento 2½ eixos, sendo que a rugosidade gerada foi em média 20% menor, porém com um aumento do tempo de usinagem em torno de 30%.

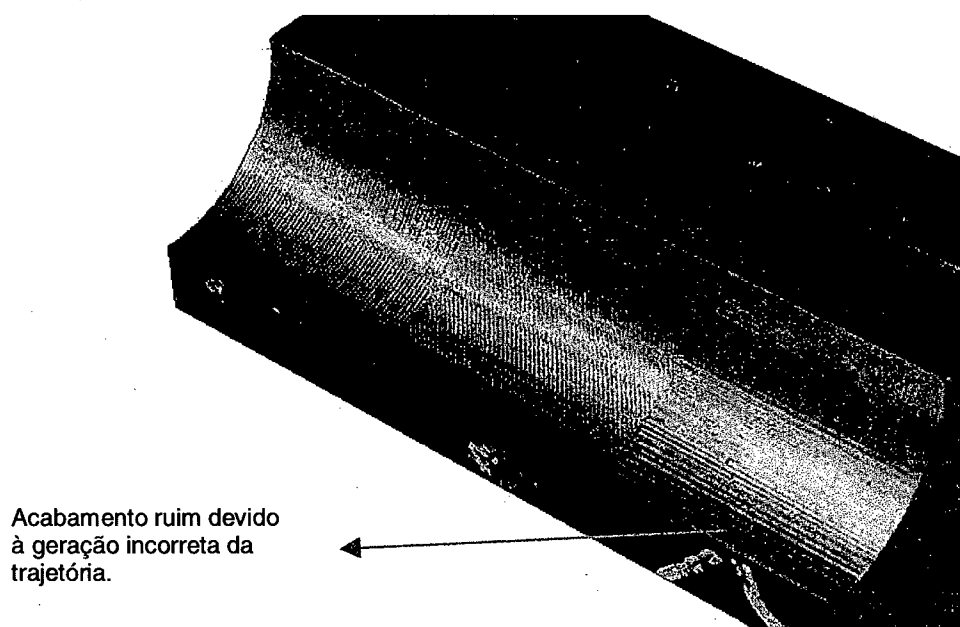


Figura 4.7: Superfícies resultantes do ensaio em geometria côncava.

4.3.2- Fresa toroidal no acabamento

As fresas com insertos redondos (toroidais) podem trazer benefícios em termos de minimizar a rugosidade de processo. Nos ensaios realizados com trajetórias na direção tangencial ao raio da curvatura (direção E), a rugosidade obtida foi muito

semelhante à programada (considerando, para o cálculo, que se está usando uma fresa esférica de mesmo diâmetro). Em direções como B, C e D, a fresa comporta-se como um misto de esférica com diâmetro igual à da toroidal, e esférica com diâmetro igual à do inserto, obtendo-se resultados ruins em certas regiões da geometria (Figura 4.8). Portanto, para esta combinação ferramenta/geometria, é aconselhável usar somente a estratégia de Planos paralelos na direção E.

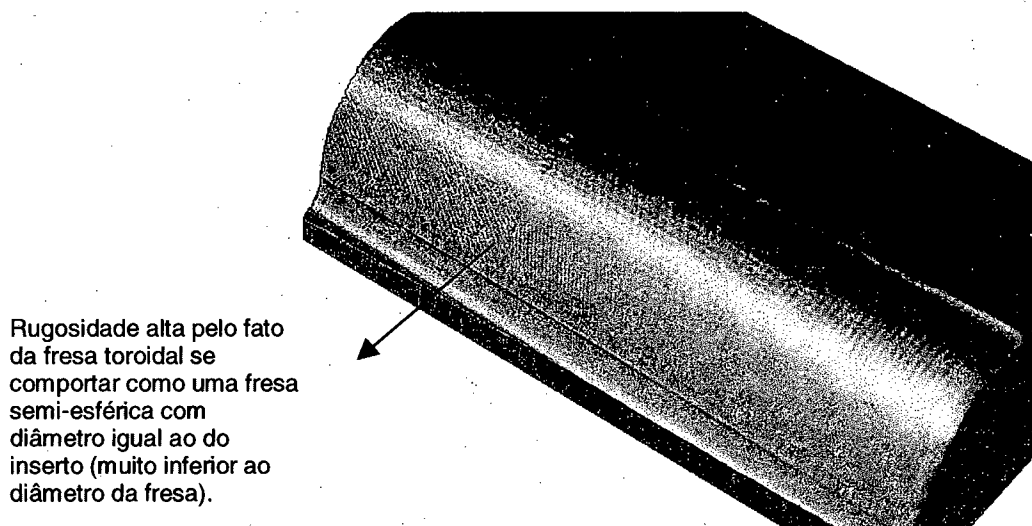


Figura 4.8: Superfícies resultantes dos ensaios em geometria convexa com fresa toroidal.

4.3.3- Influência do sentido de corte

Com relação à utilização de apenas um sentido de corte (concordante ou discordante), para obter um melhor acabamento superficial, foi constatado que a redução da rugosidade não é significativa, comparado com o aumento do tempo de usinagem, devido aos movimentos de posicionamento e aproximação da ferramenta. A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para uma superfície convexa, sendo que, para superfícies côncavas, os resultados são semelhantes. A utilização de somente um sentido de corte representa uma redução da rugosidade de até 20%, mas o tempo de usinagem aumenta em 40%.

Tabela 4.2: Valores de rugosidade e tempo de usinagem na superfície convexa.

<i>Sentido de corte</i>	<i>Rt μm (σ)</i>	<i>Tempo</i>	<i>Fresa</i>
Concordante descendo	5,6 (1,1)	6 min 57s	Esférica (10 mm)
Concordante subindo	5,2 (0,7)	6 min 57s	Esférica (10 mm)
Discordante descendo	4,6 (1,7)	6 min 57s	Esférica (10 mm)
Discordante subindo	5,4 (3,0)	6 min 57s	Esférica (10 mm)
Subindo discordante e descendo concordante	6,1 (1,8)	4 min 57s	Esférica (10 mm)
Descendo discordante e subindo concordante	5,6 (1,1)	4 min 57s	Esférica (10 mm)

4.3.4- Raio da fresa igual ao do arredondamento

Na usinagem de arredondamentos côncavos com o mesmo raio da fresa e utilizando um único passe na direção longitudinal (direção E), obteve-se melhor acabamento com o sentido de corte discordante que com o concordante (respectivamente, regiões 2 e 1 da Figura 4.9). A rugosidade pior obtida com o fresamento concordante foi ocasionada, provavelmente, por uma anomalia não detectada no corte. Normalmente, o corte concordante resulta numa qualidade superficial superior ao discordante e é recomendado [10, 11], caso não se tenha nenhum dos fatores impeditivos descritos na seção 2.1.

Uma maneira de não sobrecarregar a ferramenta é utilizar a estratégia *Along*, descrita no item 2.3.5, que executa passes sucessivos na direção E. Com este tipo de trajetória, o acabamento superficial obtido é muito bom (regiões 3 e 5 da Figura 4.9), tanto com um único sentido de corte (concordante), quanto utilizando os dois sentidos, o que diminui o tempo de usinagem.

A usinagem na direção \textcircled{A} resulta num acabamento razoável, desde que se utilize o sentido de corte concordante quando a fresa sobe (região 4 da Figura 4.9). Entretanto, deve-se evitar a usinagem em descida com o sentido concordante, e a usinagem em subida com o sentido discordante (região 6 da Figura 4.9), a fim de minimizar a rugosidade de processo.

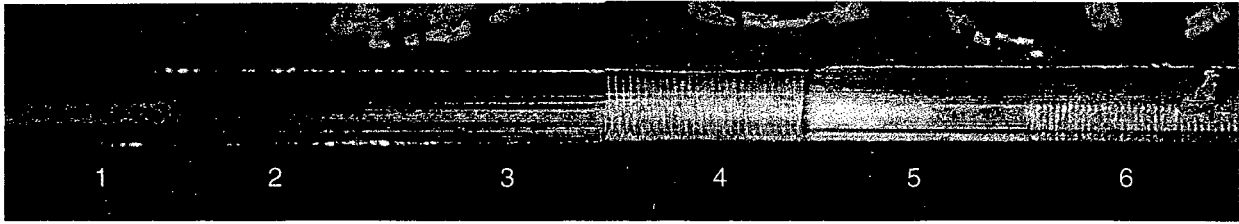
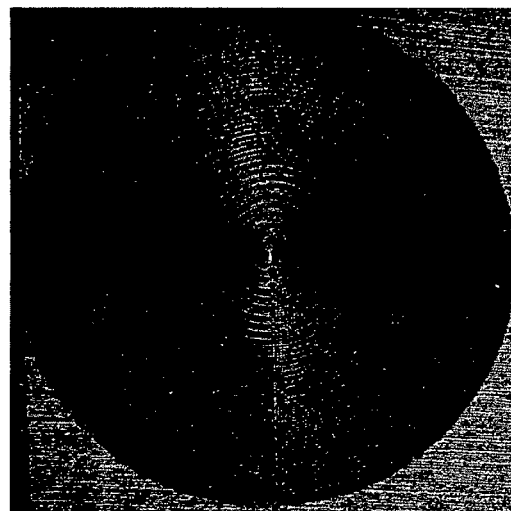


Figura 4.9: Superfícies resultantes do ensaio em arredondamento de cantos.

4.4- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE CALOTAS

4.4.1- Trajetória em Perfilamento 2½ eixos

Neste tipo de geometria, em que há pouca inclinação com relação à horizontal, a estratégia Perfilamento 2½ eixos não é adequada, pois o incremento é dado em Z. Principalmente na parte central da geometria, onde a inclinação é praticamente inexistente, os passos acabam ficando muito distantes, gerando uma rugosidade alta (Figura 4.10).



Trajectoria 2½ eixos gerando acabamento ruim na região central da calota.

Figura 4.10: Superfícies resultantes do ensaio em calota com estratégia Perfilamento 2½ eixos.

4.4.2- Trajetória em Patamares em hélice

Através da estratégia de projeção de uma espiral sobre a geometria, obtiveram-se

valores mais uniformes de rugosidade ao longo do raio. Além disso, os valores obtidos na medição de R_y foram mais próximos do valor programado para a rugosidade (Figura 4.11).

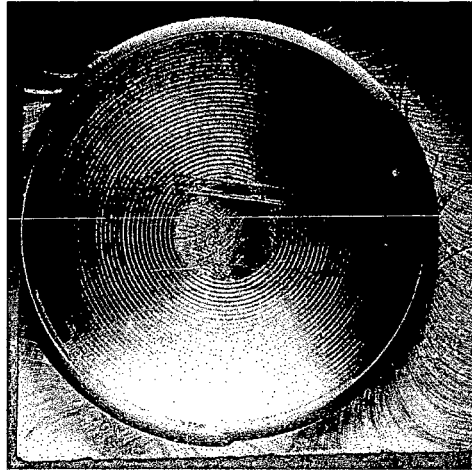


Figura 4.11: Superfícies resultantes do ensaio em calota com estratégia Patamares em hélice.

4.4.3- Trajetória em Projeção radial

Na usinagem com a estratégia de Projeção radial, as linhas de usinagem ficam bastante densas na parte central da calota (ocasionando uma reusinagem) e muito afastadas na periferia (Figura 4.12). Com isso, não se obteve o acabamento esperado, tanto na região central, devido à pequena espessura do cavaco (conseqüentemente, o amassamento de material), quanto na periferia, devido ao aumento da distância entre os passes (Figura 4.12). A estratégia Projeção radial pode ser usada quando há uma pequena variação de raio, por exemplo, no arredondamento do fundo de recipientes. Cabe ressaltar que o valor que é fornecido ao CAM para o passo lateral, é obtido no raio igual a 54 mm; para raios menores, o valor diminui até 0 (centro) e, para raios maiores, o passo lateral aumenta.

4.4.4- Trajetória em Planos paralelos

Utilizando a estratégia de Planos paralelos, os valores de rugosidade obtidos foram mais uniformes e menores que com a estratégia do tipo Projeção radial, apesar de um pouco acima do programado (Figura 4.12). Este fato se deve à pouca inclinação

da superfície com relação ao plano normal ao eixo da ferramenta, provocando um aumento pequeno no incremento lateral.

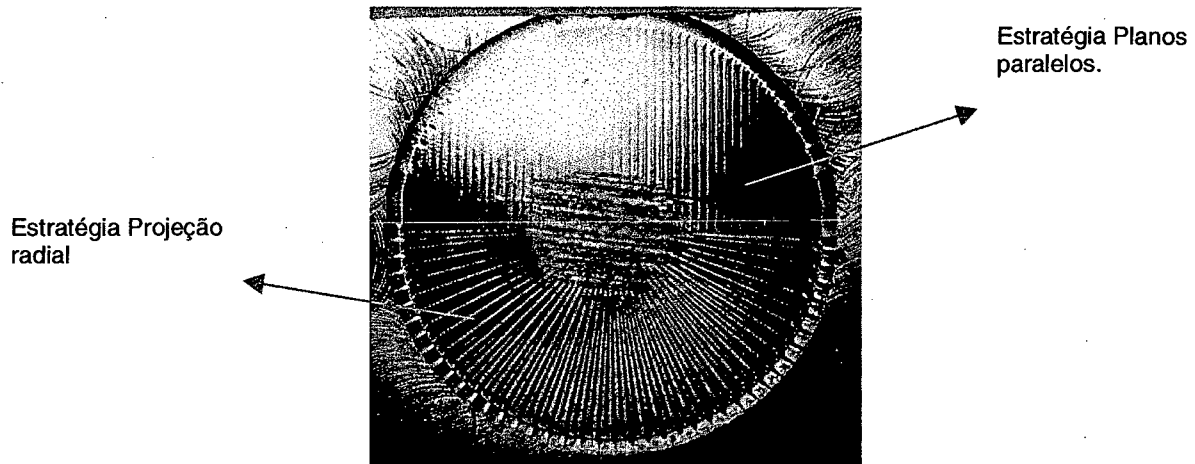


Figura 4.12: Superfícies resultantes do ensaio em calota com as estratégias Projeção radial e Planos paralelos.

4.4.5- Utilização da fresa toroidal no acabamento

A utilização da fresa toroidal para o fresamento deste tipo de geometria fica restrita às estratégias de Planos paralelos e de Projeção radial. Com a estratégia de Planos paralelos, obtiveram-se resultados muito bons em termos de acabamento superficial, atingindo-se, em algumas regiões, valores de rugosidade menores que o programado. Na estratégia do tipo Projeção radial, com fresa toroidal, ocorreram os mesmos problemas descritos no item 4.4.3 para a fresa esférica. Entretanto, os valores de rugosidade são mais uniformes (Figura 4.13), provavelmente pelo diâmetro da fresa ser maior.

4.5- COM RELAÇÃO À USINAGEM DE SEMI-ESFERAS

4.5.1- Trajetória em Perfilamento 2½ eixos

Dois problemas foram detectados com o uso da estratégia de Perfilamento 2½ eixos:

- 1) Nas regiões em que a inclinação da superfície é próxima à horizontal e à vertical (parte central e parte inferior), a rugosidade atinge valores elevados devido a uma condição desfavorável de usinagem ou, provavelmente, por um erro na geração das trajetórias, ocasionado por um defeito no algoritmo de cálculo da estratégia do *software*;
- 2) A cada passe há a interrupção do corte, com a ferramenta entrando novamente no material no momento em que é dado o incremento em Z. Esta situação é indesejável por aumentar o risco de micro-lascamentos da fresa e deixar marcas na cavidade (Figura 4.14).



Figura 4.13: Superfícies resultantes do ensaio em calota com estratégia Projeção radial e Planos paralelos com fresa toroidal.

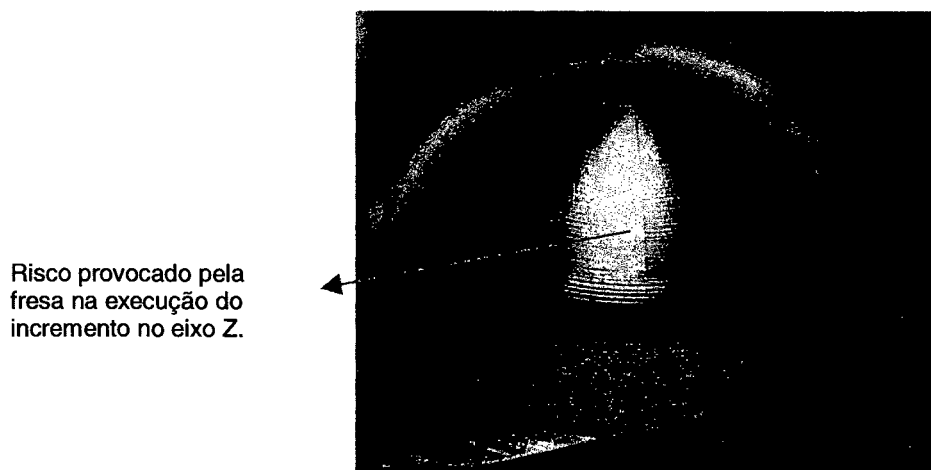


Figura 4.14: Superfícies resultantes do ensaio em $\frac{1}{2}$ esfera com estratégia Perfilamento $2\frac{1}{2}$ eixos.

4.5.2- Trajetória em Patamares em hélice

Com a usinagem feita pela estratégia do tipo Patamares em hélice, tem-se melhor acabamento superficial na parte central, comparado com a Perfilamento 2½ eixos, mas ainda ruim na parte inferior devido à projeção da espiral (Figura 4.15). A utilização de uma estratégia Patamares em hélice proporciona um corte contínuo, sem as interrupções existentes no Perfilamento 2½ eixos para incremento em Z. Entretanto, na usinagem em Patamares em hélice, há constantemente o deslocamento em X, Y e Z, o que gera um arquivo grande do programa NC. Assim, quando não se tem um comando com capacidade suficiente para armazenamento do programa inteiro¹, e a transmissão dos dados é feita com a interface RS-232 (taxa de transmissão - *Baud rate* de 9600), podem ocorrer paradas momentâneas da mesa e do cabeçote. Estas pequenas paradas são prejudiciais ao acabamento superficial e à integridade da ferramenta. As paradas são provocadas, provavelmente, por um destes motivos:

- a) A quantidade de dados consumida pelo comando é maior que a quantidade de dados que o CNC recebe por unidade de tempo (ocasionado pela baixa taxa de transmissão);
- b) A velocidade com a qual o comando processa as informações (em maior número porque cada linha do programa NC contém dados de deslocamentos em X, Y e Z) é menor que a necessária para manter o movimento contínuo.

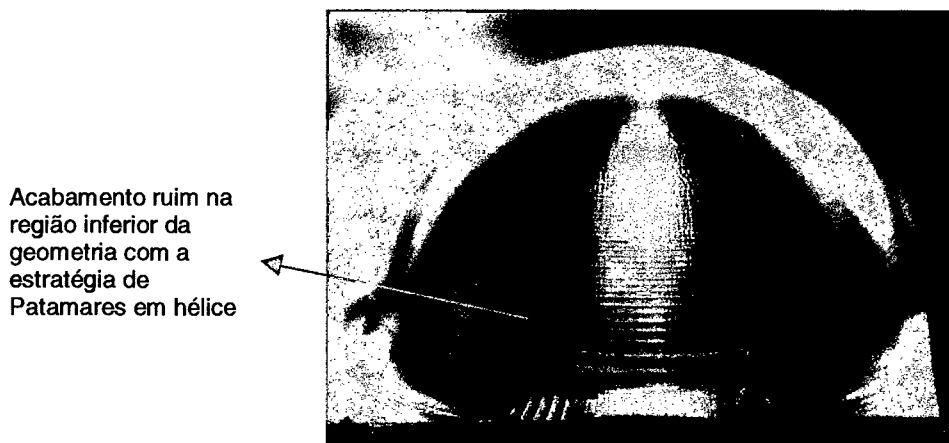


Figura 4.15: Superfícies resultantes do ensaio em ½ esfera com estratégia Patamares em hélice.

¹ Apesar de já existirem CNCs com grande capacidade de armazenamento, inclusive com discos rígidos, a maioria dos CNCs da indústria nacional ainda possui capacidade limitada de memória.

Além disso, há uma dependência direta da velocidade de avanço utilizada, pois esta é que determina a quantidade de dados necessária por unidade de tempo. No fresamento HSC torna-se inviável o uso de comandos deste tipo.

4.5.3- Trajetória em Planos paralelos

O uso da estratégia Planos paralelos neste tipo de geometria é desaconselhável, uma vez que nas regiões onde a superfície se torna perpendicular à direção da varredura (Figura 4.16), o passo lateral aumenta devido à projeção das linhas e, conseqüentemente, a rugosidade é maior.

4.5.4- Trajetória em Projeção radial

A estratégia Projeção radial proporciona resultados melhores, comparados aos obtidos com Planos paralelos, com a rugosidade sendo mais homogênea e próxima do valor máximo programado. Os resultados são semelhantes aos obtidos com a estratégia Patamares em hélice, onde a rugosidade é um pouco superior na região inferior da geometria, neste caso devido ao aumento da distância entre os passes conforme o valor do raio da trajetória. Contudo, os valores são mais uniformes que os obtidos na usinagem de calotas. Na parte central, ocorre a reusinagem e amassamento do material, gerando a região de pior qualidade na geometria (Figura 4.16).

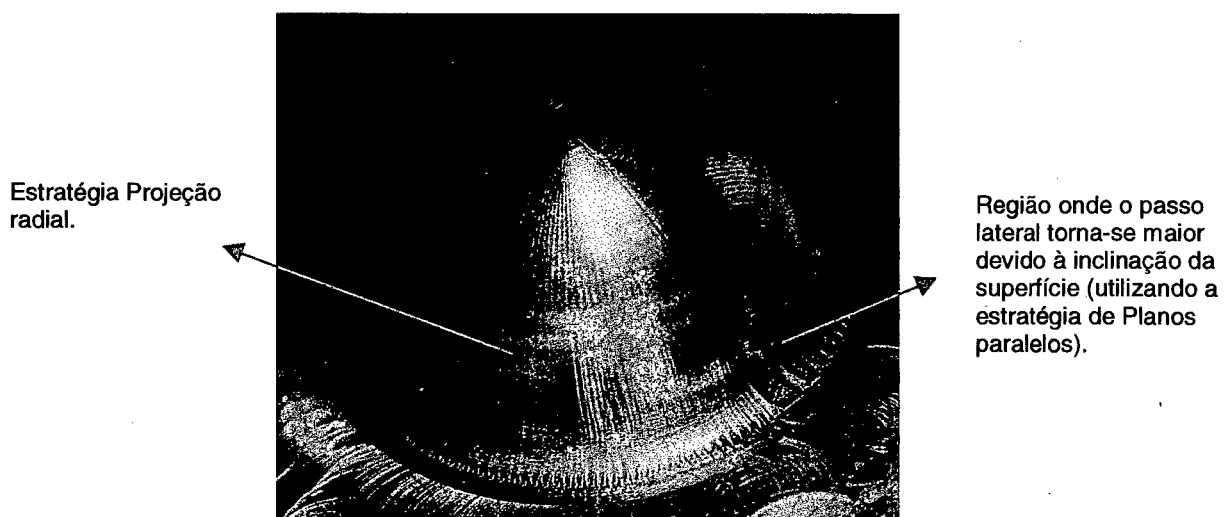
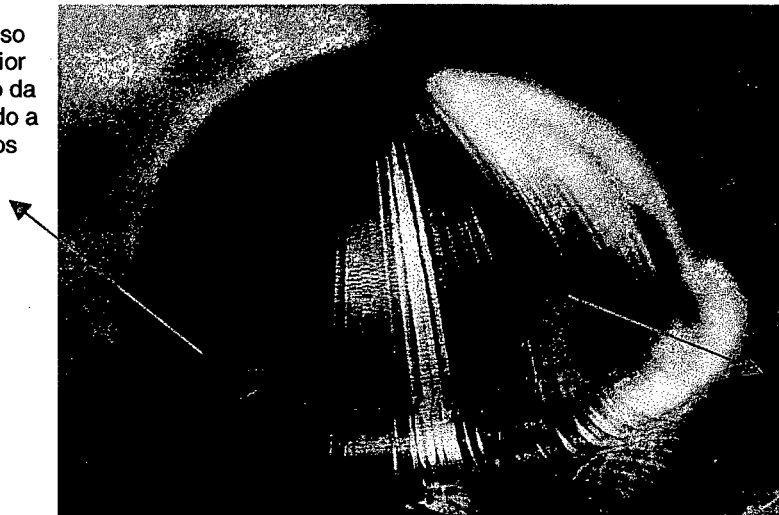


Figura 4.16: Superfícies resultantes do ensaio em $\frac{1}{2}$ esfera com as estratégias Planos paralelos e Projeção radial.

4.5.5- Utilização da fresa toroidal no acabamento

Embora o emprego da fresa toroidal esteja limitado, uma vez que os fornecedores deste tipo de ferramenta não possuem diâmetros pequenos (o menor diâmetro fornecido pela empresa Sandvik é 16 mm), deve-se escolher essa ferramenta sempre que possível. Da mesma forma que, para fresas esféricas, o uso da estratégia de Planos paralelos deve ser evitado. Porém, a combinação fresa toroidal/estratégia Projeção radial mostrou-se muito eficaz, pois qualidade da superfície resultante foi uniforme e com valores de rugosidade muito baixos, como pode ser visto na Figura 4.17.

Região onde o passo lateral torna-se maior devido à inclinação da superfície (utilizando a estratégia de Planos paralelos).



Estratégia Projeção radial.

Figura 4.17: Superfícies resultantes do ensaio em $\frac{1}{2}$ esfera com as estratégias Planos paralelos e Projeção radial com fresa toroidal.

4.6- CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Figura 4.18 mostra a relação entre a usinagem obtida e programada. Como tem-se apenas 3 valores de incremento lateral ensaiados, pode-se ter somente um valor aproximado do ponto de deflexão. Percebe-se que para um valor de passo lateral menor que 0,5 mm com uma fresa semi-esférica de diâmetro que resultariam em valores de rugosidade menores que 5 μm , começa a haver o desvio da rugosidade obtida com relação à rugosidade teórica.

Contudo, para valores de rugosidade programados maiores, seria esperada uma

concordância com o valor medido, o que também não ocorreu. Para afirmar que esta tendência é verdadeira, necessitar-se-ia de uma série de ensaios que não cabem a este trabalho. Entretanto, este desvio pode ter acontecido devido à quebra das cristas ocasionada pela geometria esférica do topo da fresa em combinação com a inclinação da superfície.

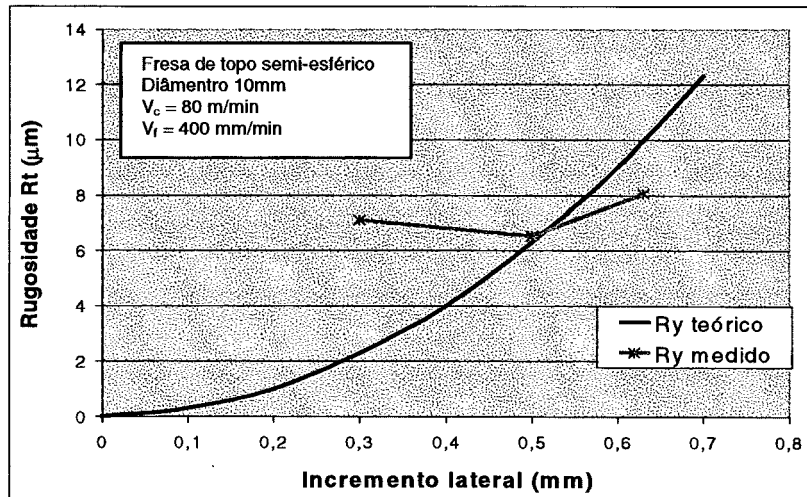


Figura 4.18: Gráfico da rugosidade teórica e medida, para plano com inclinação de 45° .

A Tabela 4.3 (próxima página) resume os resultados obtidos nos ensaios de usinagem realizados, comparando a rugosidade gerada por diferentes estratégias, no conjunto de geometria classificado como de baixa complexidade. A partir desta síntese de recomendações, pode-se avaliar a aplicação do fresamento por regiões nas mais variadas formas geométricas presentes em cavidades (descrito no capítulo 5).

Tabela 4.3: Orientações para fresamento de geometrias de complexidade baixa*.

Estratégia	Paredes c/ ângulo 1°	Planos inclinados	Superfícies côncavas e convexas	Calotas	Semi- esferas
Perfilamento em 2½ eixos concordante e discordante	Desaconselhável	Inviável ou não testado	Recomendável	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Perfilamento em 2½ eixos concordante	Recomendável	Inviável ou não testado	Desaconselhável	Desaconselhável	Satisfatório
Perfilamento em 2½ eixos discordante	Satisfatório	Inviável ou não testado	Desaconselhável	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Planos paralelos direção E descendo concordante e subindo discordante	Recomendável	Satisfatório	Satisfatório	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Planos paralelos direção E descendo discordante e subindo concordante	Desaconselhável	Recomendável	Recomendável	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Planos paralelos direção D em subida	Inviável ou não testado	Satisfatório	Satisfatório	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Planos paralelos direção C em subida	Inviável ou não testado	Satisfatório	Satisfatório	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Planos paralelos direção B em subida	Inviável ou não testado	Satisfatório	Satisfatório	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Planos paralelos direção A em subida	Inviável ou não testado	Satisfatório	Desaconselhável	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Planos paralelos direção A, B, C, D, E em descida	Inviável ou não testado	Desaconselhável	Desaconselhável	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado
Projeção radial	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado	Desaconselhável	Satisfatório
Projeção helicoidal ou patamares em hélice	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado	Inviável ou não testado	Recomendável	Satisfatório

 Recomendável
  Satisfatório
  Desaconselhável
  Inviável ou não testado

* Utilizando-se fresa semi-esférica inteira de metal-duro com revestimento de Ti(C,N) e as seguintes condições de corte: $v_c = 80$ m/min; $v_f = 400$ mm/min.

5- AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA USINAGEM POR REGIÕES EM UM SISTEMA CAM (ESTUDO DE CASOS)

5.1- PREPARAÇÃO INICIAL

5.1.1- Sistema CAM utilizado

Como o objetivo deste estudo de casos é avaliar se um sistema CAM possibilita aplicar certas recomendações, e as facilidades e limitações em se fazer isto, procurou-se trabalhar com um *software* que:

- Possua recursos direcionados à fabricação de cavidades para moldes;
- Represente o nível de desenvolvimento (estado da arte) dos sistemas CAM;
- Tenha uma parcela considerável do mercado nacional.

O sistema CAM disponível nos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina que se enquadra neste perfil é o *PowerMILL*, desenvolvido pela empresa DELCAM INTERNATIONAL da Inglaterra e distribuído no Brasil pela SEACAM. Segundo a empresa, o *PowerMILL* é utilizado por 30% das ferramentarias nacionais.

O *software PowerMILL* surgiu do DUCT, fabricado pela mesma empresa, que decidiu separar o sistema CAD/CAM. Desta forma, cada módulo é independente, podendo também operar integrado. Desde 1993, quando foi realizado o primeiro estudo relacionado aos recursos disponíveis neste *software* na UFSC [2], percebe-se que o desenvolvimento do produto é direcionado para a indústria de moldes.

Segundo Cavalheiro [6], quando se fala em estratégias de usinagem, os *softwares* de CAM possuem basicamente as mesmas opções, com nomenclatura e alguns recursos diferentes. Portanto, a escolha do *software PowerMILL* preenche também o requisito de representar o estado da arte dos sistemas CAM.

5.1.2- Peças a serem analisadas

Na escolha das cavidades para o estudo de casos, procurou-se encontrar peças que fossem representativas na indústria de moldes e que atendessem pré-requisitos, principalmente geométricos. Para avaliar o nível de desenvolvimento em termos de facilidade para programação otimizada, optou-se por peças com complexidades geométricas diferentes.

A primeira peça a ser estudada foi criada no próprio laboratório, de forma que fosse utilizada em um trabalho de doutorado e possuísse geometria de interesse para o estudo no CAM. As cavidades foram usinadas de duas formas: com a programação por regiões, levando em consideração as condições mais apropriadas de corte para cada característica geométrica, e com a que geralmente é utilizada nas ferramentarias, onde os programadores pouco atentam para esses fatores.

Para o segundo caso, procurou-se uma peça que tivesse vários tipos de geometrias e intersecções entre estas. Sendo assim, optou-se por um fone de aparelho telefônico, o qual representa uma variedade grande de geometrias encontradas na indústria de moldes.

No terceiro caso, contactou-se a empresa Peguform, que injeta peças para indústria automobilística, principalmente pára-choques. A fabricação deste componente pode ser considerada uma das mais dispendiosas e que requer longos tempos de programação via CAM e usinagem.

Desta maneira, o estudo torna-se representativo, abrangendo grande parte do conjunto de geometrias encontrado em cavidades de moldes.

5.1.3- Definição dos recursos a serem analisados

Serão analisados, principalmente, os recursos que o *software* de CAM *PowerMILL* oferece para facilitar a seleção de áreas para usinagem. Também se pretende avaliar se o *software* possibilita definir a condição de corte mais indicada na área selecionada. Assim, os recursos analisados em cada cavidade foram:

- Nas cavidades para a peça injetada e núcleo perdido, foi realizado um estudo comparativo em termos de acabamento superficial entre os dois modos de programação (por regiões e a convencional);

- Na cavidade para o fone, foram estudados os recursos para acabamento de arredondamentos;
- Na cavidade do pára-choque, foi realizado um estudo comparativo em relação ao tempo de programação entre a usinagem por regiões e a convencional.

5.2- REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASOS

O modelamento e a preparação das geometrias para a geração das trajetórias foram realizados no CAD *Solidworks* e exportados para o *software PowerMILL* através do padrão STL, o qual mostrou-se mais adequado à transferência dos arquivos.

Foram definidos, preliminarmente, aspectos da programação como ferramentas, parâmetros de corte e seqüência das operações. Não serão descritos aqui a programação e execução das operações de desbaste e pré-acabamento, pois é objetivo do trabalho estudar apenas aspectos da etapa de acabamento.

Nos casos estudados procurou-se defrontar os resultados obtidos com as diferentes formas de programação em relação às opções de movimentação da ferramenta e seleção de regiões para aplicação da melhor trajetória.

5.2.1- Cavidades para fabricação de uma peça com núcleo perdido

As cavidades mostradas na Figura 5.1 servirão para um trabalho de doutorado, cujo estudo aborda a injeção de peças com núcleo perdido. Foram confeccionadas duas cavidades, uma para fundir o núcleo e outra para injetar a peça plástica. O nível de complexidade geométrica pode ser considerado baixo, sendo que a cavidade não possui formas livres ou curvas com raios variáveis.

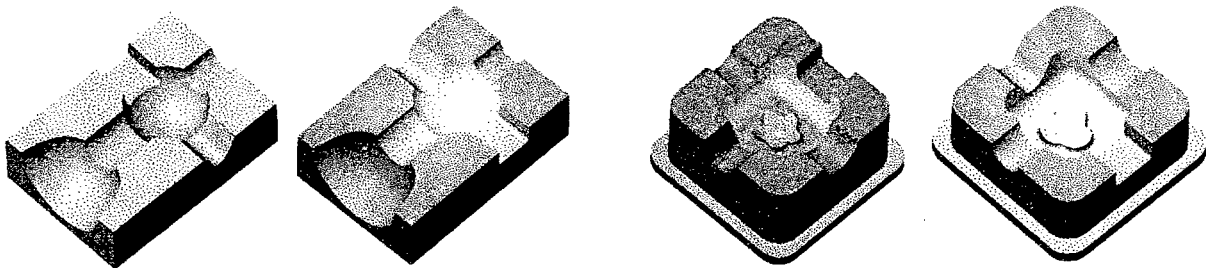


Figura 5.1: Cavidades para fundição do núcleo e para injeção da peça em plástico.

Neste caso, pretende-se avaliar se os recursos disponíveis no *software PowerMILL*, para limitação da área a ser usinada, permitem a programação por regiões de forma não muito complicada e que não exija um excessivo tempo de programação. Para tanto, duas peças (uma parte de cada uma das cavidades) foram programadas da maneira mais simples, utilizando uma estratégia para a usinagem de toda peça, e as outras duas com a sistemática proposta no trabalho.

Para limitação de regiões, o *software* de CAM utilizado disponibiliza um recurso chamado *Boundary*, que são fronteiras onde a usinagem fica delimitada. Estas fronteiras podem ser criadas automaticamente pelo *software*, ou manualmente pelo programador.

- a) Limites criados pelo programa: o recurso para limitar regiões automaticamente, permite que o programador diferencie regiões somente pela inclinação da superfície com relação ao plano normal ao eixo Z da ferramenta. Restringe-se, assim, bastante a aplicação das recomendações para o conjunto de geometrias proposto no capítulo 3.
- b) Limites criados manualmente: os limites da área a ser usinada, criados pelo programador, através da inserção de pontos com o *mouse* ou via coordenadas proporcionam maior liberdade ao usuário do *software*. Entretanto, o método é trabalhoso e depende do pleno domínio do recurso. Mesmo assim, muitas vezes a fronteira não limita exatamente a região desejada, principalmente em superfícies curvas ou interseções destas, visto que este limite é construído em 2D e a usinagem projetada sobre a superfície.

Planejamento da programação

Para duas das quatro peças, procurou-se utilizar os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 4, onde se fez uma analogia com as geometrias, conforme a sistemática proposta. Desta forma, a seleção das estratégias de acabamento para cada região das cavidades foi baseada nas recomendações contidas na Tabela 4.3, visando obter o melhor acabamento superficial.

Nas outras peças, a programação foi realizada sem atentar para aspectos tecnológicos, executando a usinagem da peça inteira com apenas um tipo de estratégia.

Delimitação das regiões

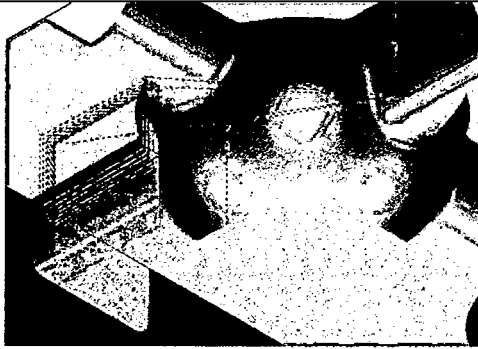
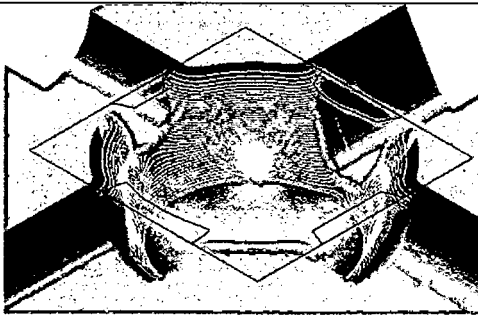
Por considerar ineficiente a criação automática dos limites, esta tarefa foi realizada manualmente. Na programação por regiões, para cada característica geométrica considerada semelhante às estudadas nos ensaios, criaram-se limites para que estas pudessem receber a trajetória adequada. Nas Tabelas 5.1 e 5.2, pode ser vista a delimitação das regiões; as fronteiras são representadas pelas linhas pretas, sendo que nas usinagens onde estas não aparecem é porque não são necessárias no cálculo da trajetória. Nas peças que foram programadas com apenas uma estratégia, a determinação dos limites foi realizada também por fronteiras, porém uma única para cada peça, como pode ser visto nas Figuras 5.2 e 5.3.

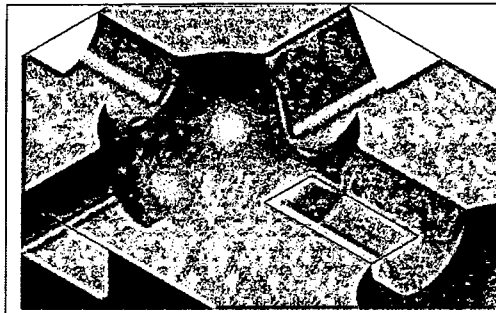
Geração das trajetórias

As trajetórias de acabamento geradas para as peças 1 e 3 (Tabelas 5.1 e 5.2), bem como as estratégias utilizadas para criá-las, foram definidas baseadas em características geométricas. A seguir, é descrito como a geometria foi "separada" e qual a usinagem utilizada para cada região.

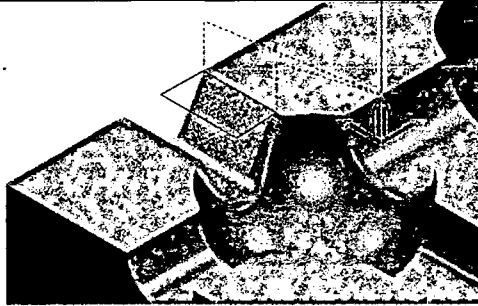
Peça 1

Tabela 5.1: Trajetórias geradas na parte da cavidade para fundição do núcleo.

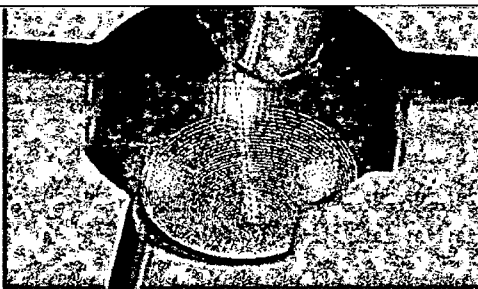
Estratégia	Sistemática de cálculo
	<p>1) Paredes planas: usinagem em Perfilamento 2½ eixos (<i>Constant Z</i>), fresamento concordante, com fresa esférica.</p> <p>Plano horizontal: usinagem em Planos paralelos (<i>Raster</i>), usando os dois sentidos de corte com fresa esférica. Obs: para planos horizontais, é aconselhável o uso de fresa com topo reto, entretanto não se dispunha de uma fresa deste tipo em condições para executar a usinagem.</p>
	<p>2) Paredes com curvaturas: usinagem em Perfilamento 2½ eixos (<i>Constant Z</i>), fresamento concordante, com fresa esférica.</p>



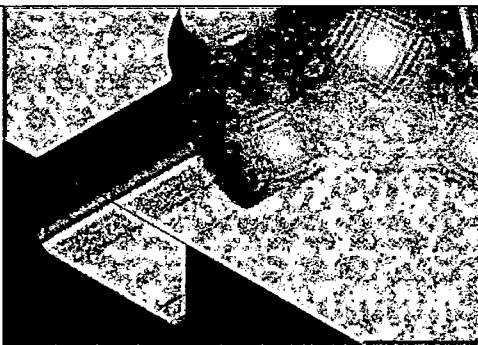
3) Superfícies curvas: usinagem em Planos paralelos na direção do raio de curvatura (*Raster*), utilizando os dois sentidos de corte com fresa esférica.



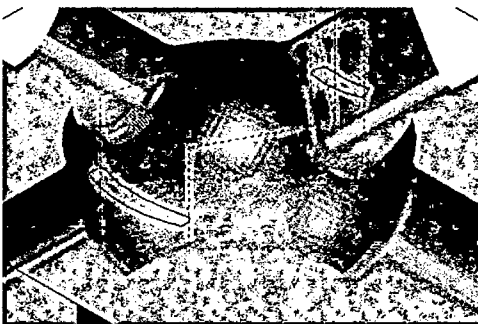
4) Planos inclinados: usinagem em Planos paralelos na direção do raio de curvatura (*Raster*), utilizando os dois sentidos de corte com fresa esférica.



5) Superfície côncava: usinagem por Patamares em hélice (*Spiral*), sentido concordante de corte, utilizando fresa esférica.



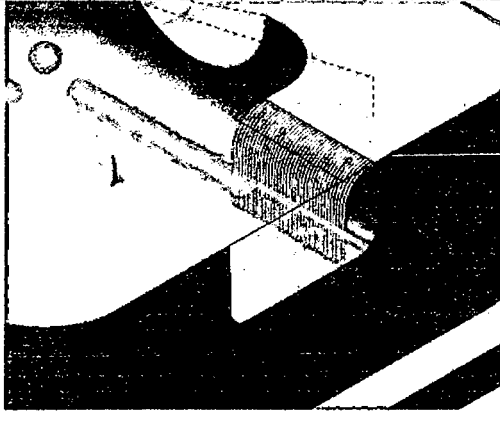
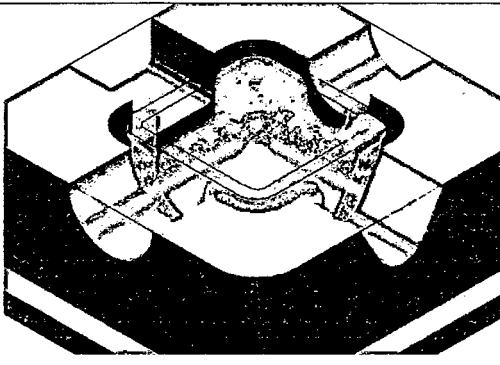
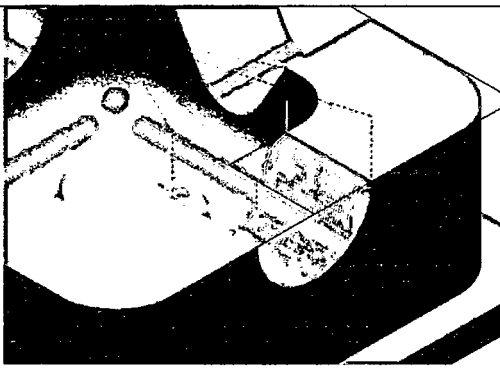
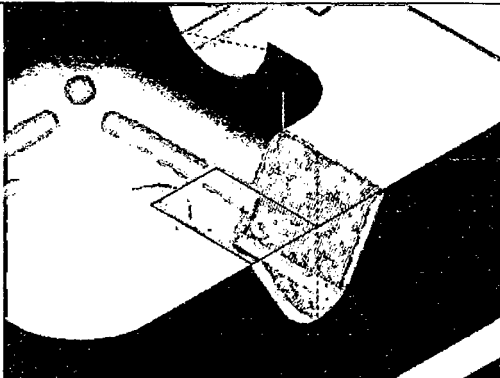
6) Arredondamento côncavo: Usinagem de cantos na direção A (*Corner finishing - Along*), utilizando os dois sentidos de corte com fresa esférica.



7) Arredondamento convexo com pouca inclinação: usinagem em Planos paralelos com limites criados por pontos (linhas pretas).

Peça 3

Tabela 5.2: Trajetórias geradas na parte da cavidade para injeção da peça em plástico.

Estratégia	Sistemática de cálculo
	<p>1) Paredes planas: usinagem em Perfilamento 2½ eixos (<i>Constant Z</i>), fresamento concordante, com fresa esférica.</p> <p>Planos horizontais: usinagem em Planos paralelos (<i>Raster</i>), usando os dois sentidos de corte com fresa esférica. Obs: para planos horizontais, é aconselhável o uso de fresa com topo reto, entretanto não se dispunha de uma fresa deste tipo em condições para executar a usinagem.</p>
	<p>2) Paredes com curvaturas com grande inclinação: usinagem em Perfilamento 2½ eixos (<i>Constant Z</i>), fresamento concordante, com fresa esférica.</p>
	<p>3) Superfície côncava: usinagem em Planos paralelos na direção do raio de curvatura (<i>Raster</i>), utilizando os dois sentidos de corte com fresa esférica.</p>
	<p>4) Planos inclinados: usinagem em planos paralelos na direção do raio de curvatura (<i>Raster</i>), utilizando os dois sentidos de corte com fresa esférica.</p>

	<p>5) Parte inferior da cavidade: estratégia Projeção radial com limites criados por pontos, utilizando fresa esférica.</p>
	<p>6) Detalhe com pouca curvatura e inclinação: usinagem em Planos paralelos (<i>Raster</i>), utilizando os dois sentidos de corte com fresa esférica.</p>
	<p>7) Arredondamento côncavo: usinagem utilizando a estratégia de Usinagem de cantos na direção A (<i>Corner finishing - Along</i>), com os dois sentidos de corte e fresa esférica.</p>

Nas peças 2 e 4 (Figuras 5.2 e 5.3), optou-se por utilizar uma estratégia para cada peça, aproximando-se do que muitas vezes é feito em ferramentarias.

Peça 2

Foi utilizada a varredura em Planos paralelos (*Raster*) para criar as trajetórias de usinagem da peça 2. A Figura 5.2 mostra, em amarelo, as linhas da trajetória da fresa.

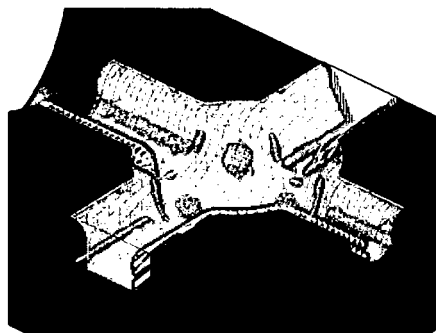


Figura 5.2: Parte da cavidade para fundição do núcleo (Peça 2).

Peça 4

Para a peça 4, foi utilizada a estratégia de Perfilamento 2½ eixos (*Constant Z*). A Figura 5.3 mostra as linhas da trajetória da fresa.

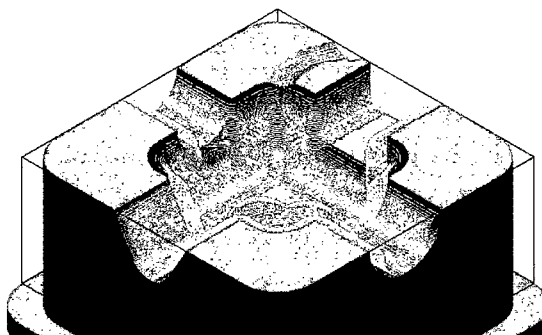


Figura 5.3: Parte da cavidade para injeção da peça em plástico (Peça 4).

Simulação e execução da usinagem

Através do simulador da usinagem, pode-se identificar erros na criação das trajetórias e movimentos em vazio da ferramenta, ou aprovar e pós-processar o programa NC. Outro recurso bastante útil é o tempo de usinagem fornecido, o qual corresponde ao tempo real, desde que o avanço no comando seja mantido conforme o programado, ou seja, o operador não o mude via potenciômetro da máquina CNC. Desta forma, pode-se fazer um comparativo do resultado obtido na simulação e o tempo gasto na execução da usinagem, entre diferentes estratégias.

5.2.2- Cavidade para injeção de um fone de aparelho telefônico

A geometria da peça, que constitui o fone de um aparelho telefônico (Figura 5.4), apresenta algumas variações de raios e inclinações de superfícies, podendo ser considerada uma geometria de complexidade média. O número de intersecções de superfícies, com arredondamento, nas mais variadas direções e inclinações, torna a cavidade representativa para este tipo de característica geométrica.

Freqüentemente, o acabamento dos arredondamentos é realizado em separado, pois o raio destes é, na maioria das vezes, consideravelmente menor que o da fresa que realiza o acabamento do restante da cavidade [6]. Além disso, o acabamento manual feito posteriormente exige habilidade e é dispendioso, devendo o programador

procurar atingir um bom acabamento superficial no fresamento. Desta forma, foram avaliados os recursos para programação da usinagem em separado dos *fillets*; recursos relacionados à limitação de área e a opções de movimentação da ferramenta na área delimitada.

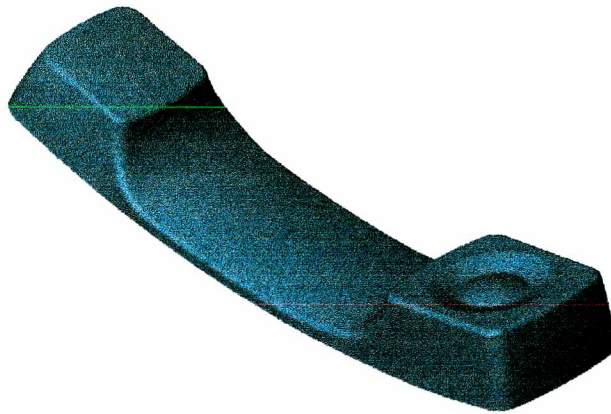


Figura 5.4: Fone de um aparelho telefônico.

O *software* CAM utilizado disponibiliza uma estratégia para acabamento de arredondamentos côncavos, que reconhece automaticamente esta geometria, baseado em parâmetros fornecidos pelo programador. Isto é feito determinando-se o diâmetro da ferramenta anterior que efetuou alguma usinagem, ou indicando uma trajetória calculada anteriormente. É possível ainda limitar regiões onde a inclinação é pequena (aproximadamente horizontais) ou com uma inclinação maior. Além dos recursos para limitação de área, é possível executar trajetórias ao longo do arredondamento com um único passe; com vários passes ao longo do arredondamento; ou com passes perpendiculares.

Para arredondamentos convexos, o *software* oferece pouca facilidade, ficando a cargo do programador limitar as regiões que pretende usinar, através de um desenho de fronteiras 2D ou usiná-los juntamente com outras regiões.

Pretende-se avaliar, neste estudo, se os recursos oferecidos são suficientes na programação deste tipo de característica e se o *software* gera trajetórias confiáveis, ou seja, sem defeitos ou movimentos desnecessários.

Delimitação das regiões

Na determinação das áreas a serem executadas o acabamento, utilizaram-se as duas opções que cada estratégia oferece, descritas na seção 2.3.5. Como referência optou-se por uma ferramenta também esférica e com diâmetro de 10 mm, maior que a utilizada para efetuar o acabamento dos arredondamentos (4 mm).

Geração das trajetórias

As trajetórias ou caminhos de usinagem são definidos em conjunto com os fatores de limitação de regiões, antes de executar o cálculo. Foram utilizadas as três possibilidades para criação das trajetórias oferecidas pela estratégia (mostradas na Figura 5.5 e descritas na seção 2.3.5), variando-se também as condições de delimitação.

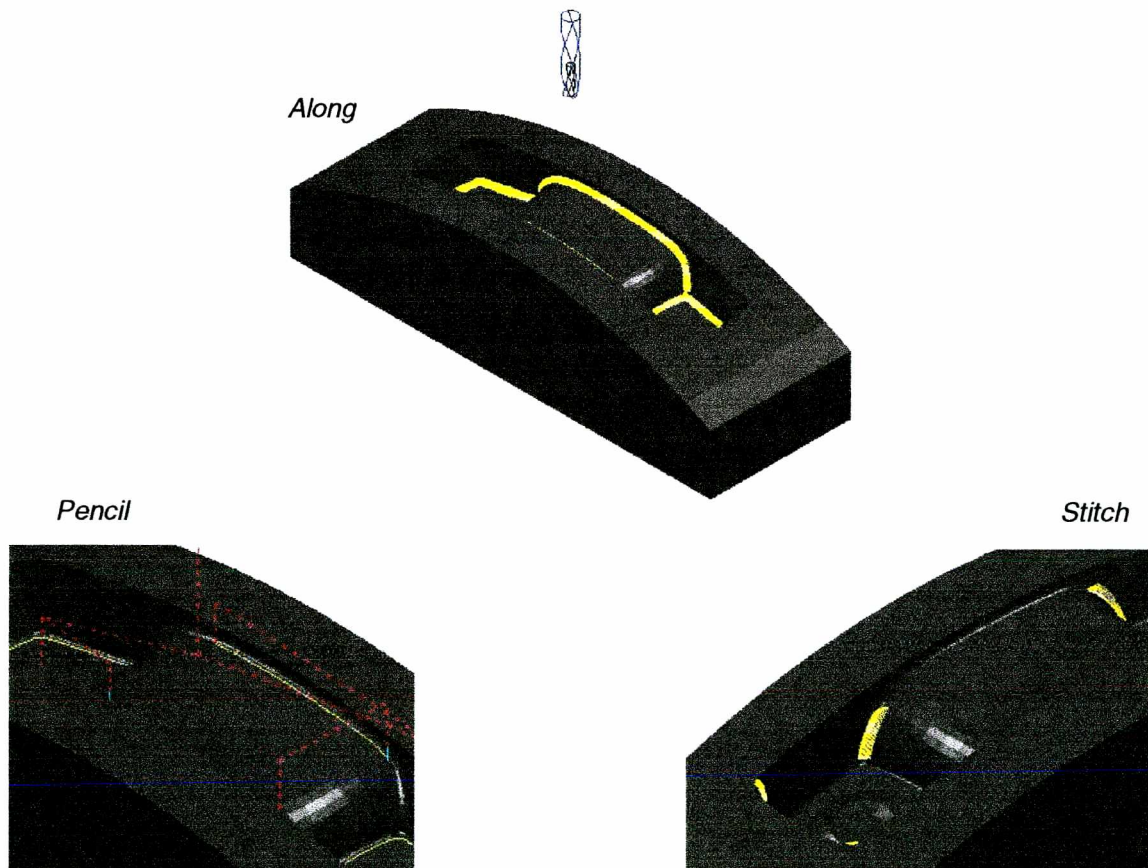


Figura 5.5: Trajetórias criadas para o acabamento de arredondamentos.

5.2.3- Pára-choque de automóvel

A fabricação da cavidade do pára-choque de automóvel é uma das mais complicadas e dispendiosas. Os pára-choques apresentam uma variedade e complexidade elevadas (ponto de vista da usinagem) de formas geométricas (Figura 5.6). Neste caso, realizou-se um estudo comparativo com relação ao tempo de execução das etapas, entre a programação por regiões e a convencional.

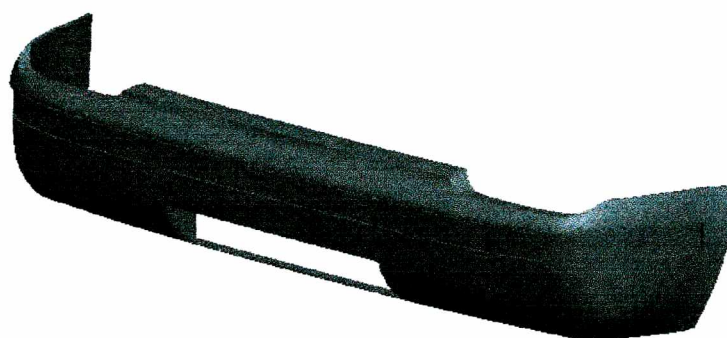


Figura 5.6: Pára-choque de automóvel.

Em certas partes da cavidade, é inviável fazer o fresamento direto, por limitações técnicas do processo, devendo então ser utilizada a eletroerosão. Contudo, para fins de levantamento do tempo gasto na programação, pode-se assumir que toda a usinagem será feita por fresamento, pois, de forma semelhante, seria executada a usinagem dos eletrodos. Existe, ainda, o tempo para preparação das geometrias e criação dos eletrodos. Embora este tempo seja consideravelmente grande, é idêntico para as duas formas de programação, não influenciando nas diferenças que venham a ocorrer.

Sendo o objetivo levantar o tempo de programação, isto deve ser feito considerando todas as etapas, desde o planejamento até a execução da usinagem. No planejamento, é definida como será feita a retirada de material em cada região (o diferencial entre as duas maneiras de programação), correspondendo aos passos 2 e 3 do planejamento da etapa de acabamento (Tabela 2.3) descrito por Cavalheiro [6]. Os demais passos não têm muita influência no tempo de programação, pois dependem de fatores que não são influenciados pela estratégia ou área a ser usinada.

Na programação propriamente dita, as diferenças em termos de tempo de

execução estão na delimitação das regiões e no cálculo das trajetórias. Como na programação por regiões tem-se um número maior de divisões da superfície, conseqüentemente maior número de programas, o tempo para simulação e aprovação das trajetórias cresce um pouco. Da mesma forma, o pós-processamento e a execução da usinagem requerem um pouco mais de tempo, devido ao maior número de programas e às paradas na execução destes. São descritas, a seguir, as etapas mais importantes da programação, e feita uma estimativa de tempo para cada uma das formas de programação utilizadas.

Programação convencional

a) Planejamento da programação

A definição de quais áreas seriam usinadas, com qual estratégia, foi realizada dividindo a geometria da cavidade em três regiões, nas quais pode-se ter a mesma trajetória: duas laterais, com inclinação acentuada, e uma central, com inclinação média pequena. Posteriormente, foi realizado o acabamento dos arredondamentos com raios pequenos. Na escolha da estratégia, definiu-se: Planos paralelos na região central, Perfilamento 2½ eixos nas laterais e a opção *Along* da estratégia *Corner finish* para os arredondamentos. A etapa de planejamento das operações de acabamento foi concluída em aproximadamente 60 minutos.

b) Execução da programação

O primeiro passo é a delimitação das 3 áreas, realizada por *Boundary* de forma manual, como mostra a Figura 5.7, onde os limites são representados pela linha vermelha. Esta etapa não requisitou grande esforço de programação, pois foram apenas 3 áreas, consideravelmente grandes, ocupando em torno de 30 minutos do programador para completar a delimitação. Na usinagem dos arredondamentos, a delimitação é feita pelo *software* no momento do cálculo da trajetória.

O tempo para cálculo das trajetórias nas três regiões não se mostrou problemático, o que seria esperado, pois as dimensões da peça eram grandes. Isto se deve ao fato de utilizar-se uma tolerância de 0,1 mm, superior à que é normalmente estipulada (0,01 mm); o uso de uma tolerância de 0,01 mm poderia consumir um tempo de cálculo bem mais elevado. Contudo, uma tolerância de 0,1 mm para uma peça com

dimensões que chegam a 2000 mm, percentualmente é equivalente ao utilizado nas outras cavidades. A Figura 5.8 mostra as trajetórias criadas em uma lateral e na região central da cavidade.

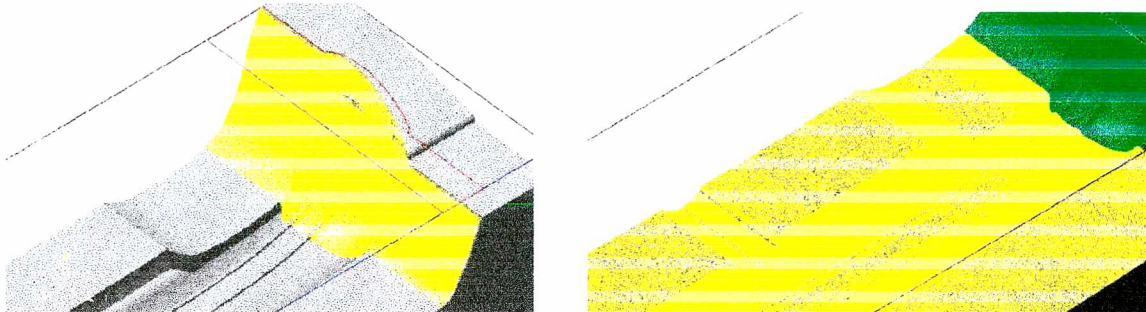


Figura 5.7: Trajetórias para acabamento com a programação convencional.

Na geração das trajetórias para o acabamento dos arredondamentos, empregou-se a estratégia *Corner finish*. Entretanto, como a ferramenta anterior deixou grande quantidade de material, precisou-se efetuar um pré-acabamento. A estratégia utilizada foi a mesma, empregando uma fresa de topo reto com um diâmetro intermediário. O tempo gasto na entrada de dados e cálculo de todas as trajetórias de acabamento foi de aproximadamente 120 minutos. Na Figura 5.8 podem ser vistos os caminhos de usinagem para o acabamento dos arredondamentos.

c) Outras operações

A simulação é realizada após o cálculo da trajetória. Assim, pode-se verificar se a retirada de material será conforme o pretendido. Esta etapa é realizada entre cada programa gerado e não consome muito tempo, exceto quando o número de programas for grande. Neste caso, foram gastos em torno de 20 minutos para simulação de todas as trajetórias geradas.

O pós-processamento dos CLdata, transformando estes em programas NC específicos para a máquina onde vai ser executada a usinagem, é tarefa simples e não necessita mais que 10 minutos. O maior tempo gasto nesta etapa é com a preparação das folhas de processo, onde constam o número do programa, a ferramenta a ser utilizada e o tipo de operação que será executada.

As paradas no final da execução de cada programa, com eventuais trocas de ferramenta, constituem a fase crítica desta etapa. Em muitos casos, o tempo secundário chega a ser maior que o tempo de usinagem, chegando a 80 % do tempo

total de máquina [50, 51]. Somente o tempo de usinagem, fornecido pelo CAM, foi de 100 horas para a execução de todos os programas.

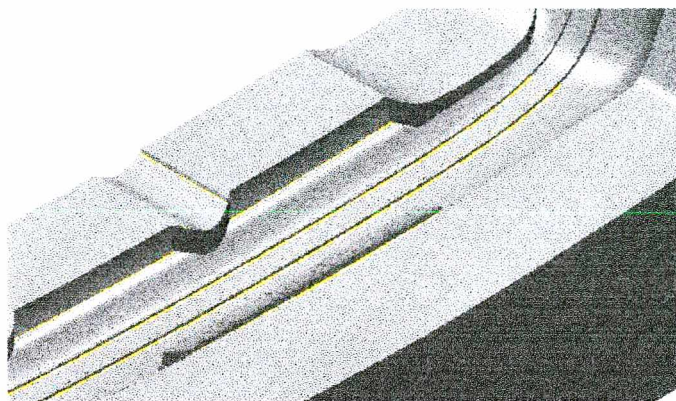


Figura 5.8: Trajetórias para acabamento dos arredondamentos.

Programação por regiões

a) Planejamento da programação

O planejamento na usinagem por regiões deve ser realizado com uma ênfase maior no aspecto tecnológico do processo de fresamento. Portanto, esta etapa passa a ser mais trabalhosa, exigindo um tempo bem maior de programação. Todas as regiões com características geométricas semelhantes às definidas nos ensaios foram identificadas e, para cada uma, foi definida a melhor condição de corte. Como na cavidade existem os mais variados tipos de geometrias, as regiões separadas também são numerosas. O tempo necessário para o planejamento foi de, aproximadamente, 120 minutos.

b) Execução da programação

Na delimitação das regiões definidas no planejamento, foi necessário muito trabalho “braçal”. O principal problema são as conexões entre as regiões pois, em decorrência da projeção e do diâmetro da fresa, comentados no Capítulo 3, geralmente não se obtém a correta delimitação na primeira vez em que esta é realizada. Na maioria dos casos, tem-se que efetuar o cálculo da trajetória e simular a usinagem, para só então ajustar os limites e recalculá-la. Esta tarefa de fazer os limites e ajustá-los consumiu em torno de 180 minutos. A Figura 5.9 mostra, em vermelho

escuro, algumas das fronteiras criadas.

Na geração das trajetórias com a programação por regiões, o tempo consumido também é maior que na programação convencional, devido a dois motivos:

- 1) Maior número de regiões, sendo que antes de calcular a trajetória, o *software* prepara o modelo, e este tempo não diminui na proporção da região limitada;
- 2) Recálculo da trajetória por motivo de ajuste nos limites criados em 2D.

Com isto, o tempo de execução desta etapa passou para 150 minutos. Na Figura 5.9 estão algumas das trajetórias calculadas.

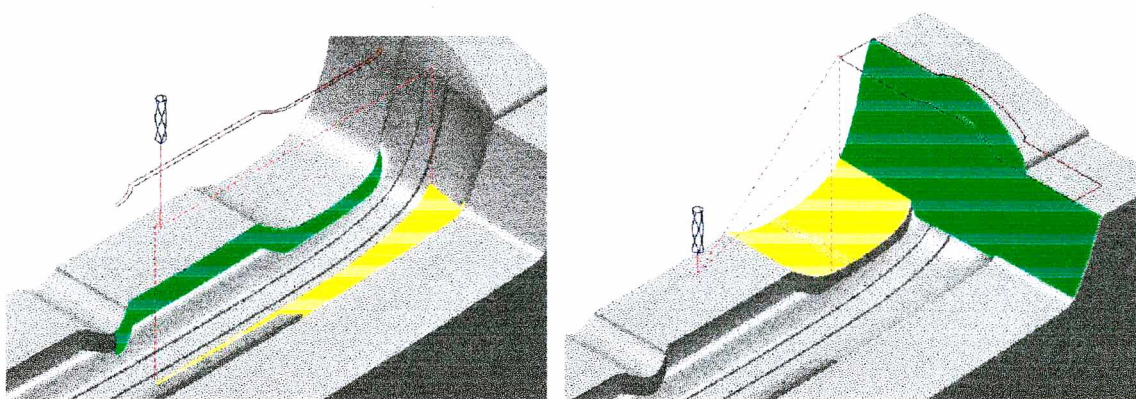


Figura 5.9: Trajetórias para acabamento com a programação por regiões.

A usinagem dos arredondamentos foi programada após o cálculo da trajetórias de acabamento da cavidade e semelhante ao executado na programação convencional (Figura 5.8). Consumiu-se, assim, praticamente o mesmo tempo (60 minutos).

c) Outras operações

O recurso de simulação foi utilizado com mais frequência, principalmente para conferir se os limites criados estavam de acordo com o desejado. Porém, o aumento não foi muito significativo, sendo que o tempo consumido na simulação foi de 30 minutos.

No pós-processamento, houve um ligeiro aumento do tempo devido ao número de programas ser maior, totalizando, aproximadamente, 15 minutos. Entretanto, o tempo de execução da usinagem deve ser maior, tanto pela troca de ferramentas, quanto pelo número de paradas e reinício dos programas. Especificamente no comando da máquina utilizada, consumia-se um tempo maior, devido à necessidade de recompor

(*reset*) os parâmetros para linguagem ISO a cada programa executado.

Em suma, o tempo para programação, atentando para aspectos tecnológicos do fresamento, ficou em aproximadamente 550 minutos, e o tempo previsto pelo CAM para a usinagem, em 110 horas.

6- CONCLUSÃO

6.1- CONSIDERAÇÕES QUANTO AO ESTUDO DE CASOS

6.1.1- Relativas à delimitação de regiões feita por pontos

A liberdade para obtenção de limites definidos por pontos, via *mouse* ou teclado, é a grande vantagem do recurso oferecido no sistema *PowerMILL*. No entanto, esta tarefa exige paciência e bastante trabalho “braçal” para efetuar os ajustes.

Como a delimitação é feita em 2D e determina os limites da trajetória do ponto de controle da ferramenta (centro), deve-se sempre levar em consideração o raio da fresa que está sendo utilizada. Além disso, tem-se que considerar a inclinação da superfície com relação ao plano normal ao eixo da ferramenta, porque o raio utilizado deve ser o efetivo de corte, que varia conforme esta inclinação. Em superfícies com inclinações aproximadamente horizontais, a região na qual será feita a usinagem é a mesma que foi limitada pela fronteira, pois o corte é efetuado pela parte central da fresa (raio de corte tendendo a zero). A figura 6.1 mostra um exemplo de limites criados para este caso.

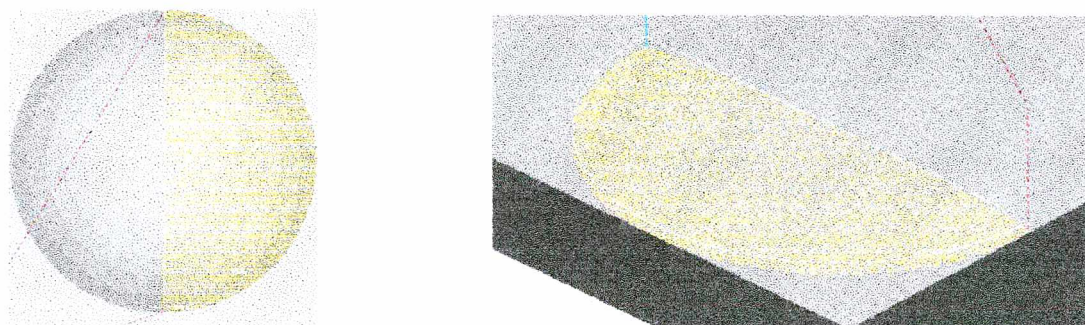


Figura 6.1: Limites criados para geometria com pouca inclinação (sem compensação do raio da ferramenta).

Em superfícies bastante inclinadas, o desenho da fronteira pode ser feito considerando o raio da fresa. Assim, fazem-se os limites como se fosse um *offset* da

região desejada, com a expansão no valor do raio da ferramenta (Figura 6.2).

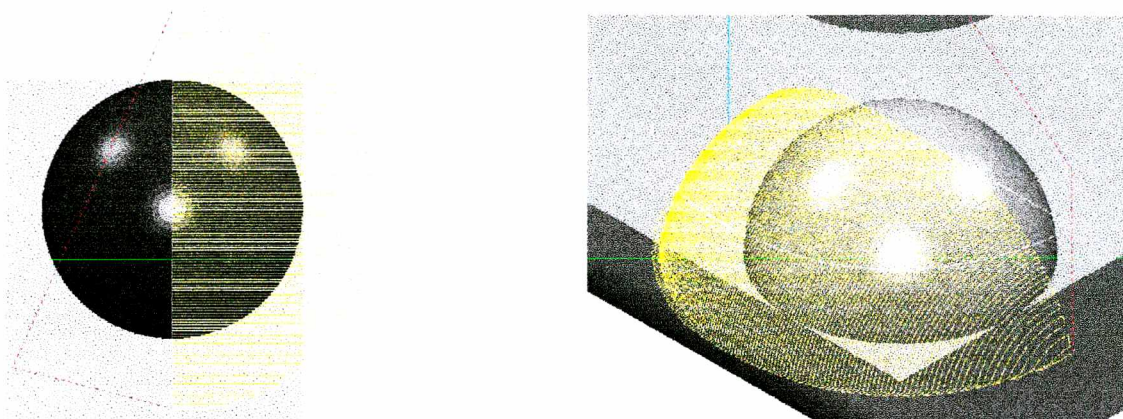


Figura 6.2: Limites criados para geometria com muita inclinação (*offset* no valor do raio da ferramenta).

Caso a delimitação fosse definida com uma expansão menor que o raio da ferramenta, esta não entraria na parte inferior da região a ser usinada. A Figura 6.3 mostra como o *software* interpreta os limites colocados pelo programador. O centro da ferramenta não pode passar dos pontos que limitam a região, conseqüentemente não executa a usinagem na base do ressalto.

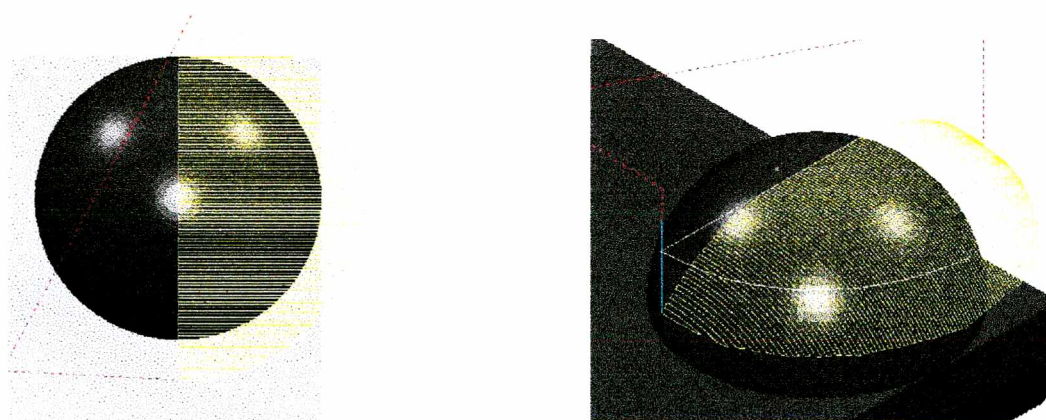


Figura 6.3: Limites criados para geometria com muita inclinação (*offset* com valor inferior ao raio da ferramenta). Trajetória incompleta.

Para superfícies com inclinações intermediárias, deve-se proceder da mesma

forma descrita anteriormente, mas considerando o raio efetivo de corte na expansão dos limites.

Todo este procedimento requer, muitas vezes, que se faça uma simulação para conferir se a delimitação está correta. Isto representa, além do grande esforço na criação dos limites, um maior número de simulações e cálculos da trajetória, devido aos ajustes quase sempre necessários.

6.1.2- Relativas à geração automática de limites

O recurso de delimitação automática poderia pôr em prática a sistemática de programação proposta, em tempo hábil. Porém, o desenvolvimento deste recurso ainda não chegou nos patamares desejáveis. No *PowerMILL*, existe apenas a possibilidade de usinar superfícies com inclinação menor que um valor estipulado pelo programador e arredondamentos côncavos. Considerou-se que determinar áreas apenas pela inclinação com relação à horizontal, onde não é considerada sequer a curvatura da geometria, estaria em desacordo com a sistemática proposta no trabalho. Assim, apenas estratégias para acabamento de arredondamentos côncavos foram analisadas. Na avaliação realizada no estudo de caso, foram testadas as possibilidades em termos de criação dos limites e de movimentação da ferramenta.

Na usinagem de arredondamentos, o *software* utilizado (*PowerMILL*) disponibiliza recursos que geram resultados satisfatórios na delimitação deste tipo de geometria. Entretanto, em alguns pontos, aparecem falhas em regiões que deveriam estar inclusas dentro dos limites. Existem duas possibilidades para este defeito na geração das trajetórias: um erro na rotina de cálculo ou uma falha no modelo importado do CAD, que não pode ser detectada, uma vez que o *software* CAM em questão não oferece este recurso. Como, aparentemente, o modelo não apresentava falhas, presume-se, então, que há um problema no algoritmo que calcula a fronteira (*boundary*). A Figura 6.4 mostra, em detalhes, algumas das regiões que apresentaram as falhas na delimitação dos arredondamentos. Contudo, aumentando a tolerância no cálculo de *fillets* 3D, o problema é amenizado. Já em arredondamentos retilíneos, paralelos ao eixo X ou Y, esse tipo de erro não foi constatado, o que aumenta a possibilidade de ser uma deficiência ou, ainda, a fase inicial de desenvolvimento do recurso no *software*.

Em se tratando de opções de movimentação da ferramenta, as três alternativas

disponíveis e descritas na seção 5.2.2, preenchem as necessidades na usinagem de arredondamentos. Porém, sendo a usinagem dependente dos limites criados, tem-se como consequência dos defeitos na delimitação, trajetórias incompletas e a impossibilidade de uso destas. Com o desenvolvimento do *software*, nas próximas versões, este problemas (*bugs*) já deverão estar solucionados. Por enquanto, cabe uma revisão completa das trajetórias, bem como a simulação da usinagem, antes de pós-processar o programa.

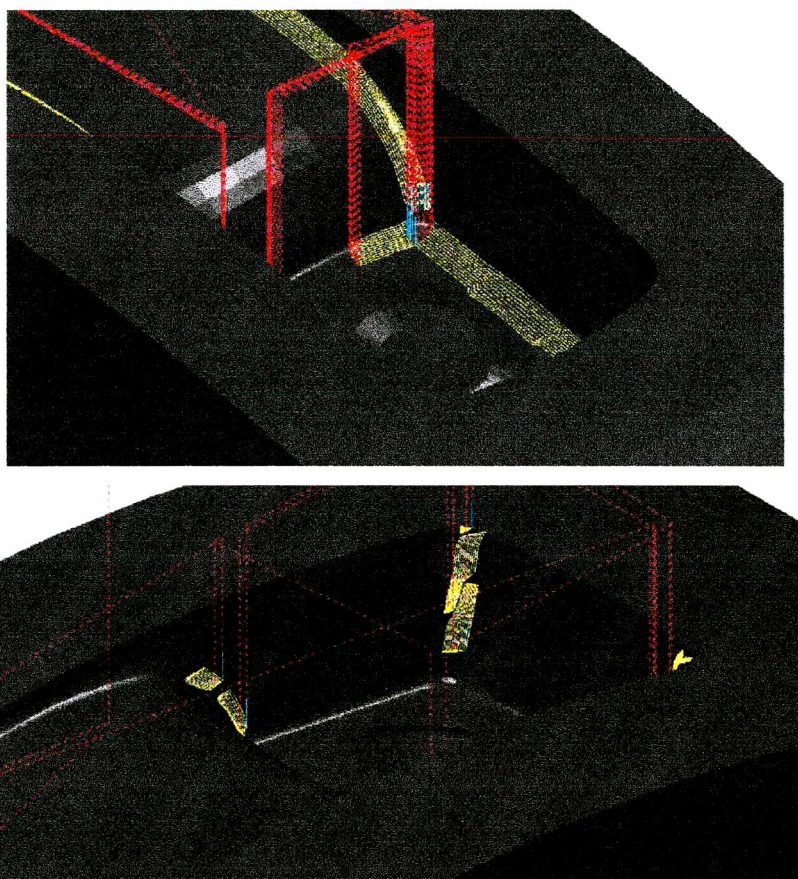


Figura 6.4: Defeito na criação das trajetórias para acabamento de arredondamentos (*bug do software*).

Contudo, apenas limitar a região não basta para se obter o melhor resultado. É preciso aplicar a maneira tecnologicamente mais indicada na usinagem.

6.1.3- Relativas ao perfil de rugosidade obtido na usinagem

A superfície de uma cavidade fresada deve conter o menor número de elevações e reentrâncias possível. Entretanto, ao sair de um processo de usinagem, uma superfície ainda apresenta muitas destas irregularidades, as quais serão eliminadas com o acabamento manual. Para facilitar o trabalho posterior, procura-se obter uma rugosidade apropriada no fresamento, ou seja, uma superfície deve apresentar características como: ausência de reentrâncias ou o menor número possível das mesmas, com ângulo de abertura (δ) grande; elevações com ângulo de inclinação (δ) acentuado; período pequeno, ou seja, espaçamento entre picos não muito grande.

Para cavidades de moldes talvez não seja imprescindível um valor de rugosidade baixo. Pode-se pensar que é mais importante o tipo de perfil obtido. O perfil mostrado na Figura 6.5 deve ser evitado, pois, por menos profundas que sejam as reentrâncias, é necessário trabalho extra na remoção destas. Não podem haver marcas na superfície, pois estas são fielmente reproduzidas na peça. Por isso, tendo uma reentrância na superfície (risco), toda área ao redor desta tem que ser retirada. Em um material com dureza 29 HRc, retirar grandes áreas com abrasivos não é fácil nem aceitável.

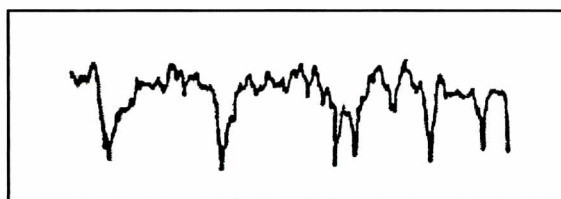


Figura 6.5: Perfil com reentrâncias.

As reentrâncias são formadas pelo arrancamento de material ou pelo amassamento do mesmo. As causas são o desgaste da ferramenta, que altera a formação do cavaco, bem como diferenças na dimensão dos dentes da fresa, devido a desvios oriundos da fabricação destas. Este problema ocorre, principalmente, no fresamento de superfícies planas com fresa de topo reto.

Assim, utilizar ferramentas de melhor qualidade, com pequenos desvios dimensionais e ter controle sobre a vida útil das fresas, são as maneiras de minimizar estas irregularidades superficiais. Caso não se disponha de uma fresa de topo reto em condições para efetuar o acabamento de superfícies planas, é preferível que a usinagem seja feita com uma fresa esférica, apesar do tempo de usinagem aumentar

significativamente. No entanto, evitam-se as reentrâncias indesejáveis.

Reentrâncias menos profundas e com maior frequência podem aparecer, devido à maneira com que a fresa efetua o corte e às forças e vibrações geradas. Estas são mais fáceis de serem eliminadas que as citadas anteriormente; entretanto, pode-se diminuir consideravelmente o aparecimento destas irregularidades, utilizando trajetórias e condições de corte apropriadas para cada tipo de geometria. Ensaios como os realizados no Capítulo 3 podem fornecer os dados necessários para cada combinação de ferramenta, material usinado, geometria e estratégia.

Elevações ou picos são inevitáveis no fresamento com ferramenta de ponta esférica, sendo uma característica do processo. Entretanto, pode-se diminuir a altura dos picos, diminuindo-se o incremento lateral na usinagem, o que acarreta, por outro lado, maior número de picos, considerando-se uma mesma área. Mesmo assim, em relação ao acabamento manual, é preferível ter picos mais próximos e menores. Existem, ainda, dois fatores que limitam a diminuição do incremento lateral, que são a espessura de usinagem e tempo de execução. Os limites de espessura mínima de usinagem devem ser respeitados para não haver apenas o amassamento de material, o que resultaria em um acabamento superficial ruim. Diminuir o incremento lateral representa um aumento no tempo de usinagem, que deve também respeitar os limites de utilização da máquina-ferramenta. Contudo, reduzir o incremento lateral a valores muito baixos é plausível no caso da utilização de altas velocidades (HSC), pois se trabalha com espessuras de corte menores e velocidades de corte e de avanço bem maiores [13].

Como, na indústria nacional, a usinagem em altas velocidades ainda não é uma realidade, tem-se que respeitar os limites do processo, para produzir cavidades com o melhor acabamento possível dentro dos recursos disponíveis e em tempo hábil. Conforme os resultados dos ensaios realizados, em geral, rugosidades programadas R_y menores que $5 \mu\text{m}$ dificilmente são atingidas (para as condições de corte, fresas e máquina-ferramenta usadas). Assim, um passo lateral menor que o necessário para atingir este valor, somente aumentará o tempo de usinagem sem melhorar a qualidade superficial.

As elevações com ângulo de inclinação grande e ângulo de pico pequeno (Figura 6.6) são desejáveis, um vez que estes picos podem ser facilmente retirados no acabamento manual.



Figura 6.6: Elevações com ângulo de pico (γ) pequeno e ângulo de inclinação (β) grande.

Os períodos, ou seja, a distância entre os picos também é importante. Períodos longos, em relação aos instrumentos utilizados pelo ferramenteiro, dificultam o acabamento. A Figura 6.7 mostra duas situações que podem ocorrer: na primeira, o abrasivo interfere na região inferior entre as elevações; no segundo caso, o abrasivo mantém contato apenas com os picos, sem o risco de alterar as dimensões da cavidade.

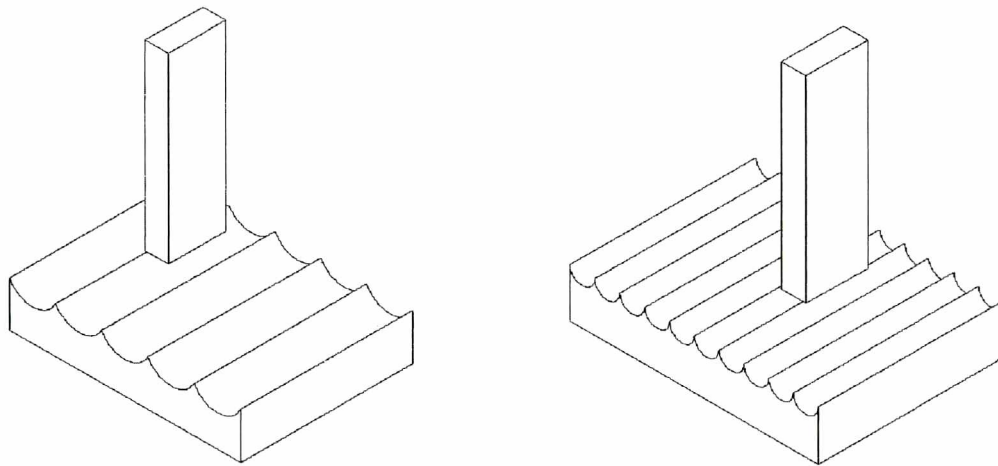


Figura 6.7: Influência do período das elevações no acabamento manual.

6.1.4- Relativas às trajetórias da ferramenta

As trajetórias definem a maneira com que o corte será executado, ou seja, de acordo com a trajetória, a ferramenta pode estar submetida a condições mais estáveis ou mais severas, com forças excessivas e vibrações grandes. Num corte estável, obtém-se ganhos, principalmente, em termos de rugosidade de processo. Quando a ferramenta efetua o corte em condições adequadas, a qualidade superficial da peça é

melhor e o desgaste da fresa torna-se menos intenso. Por outro lado, trajetórias com passes eqüidistantes possibilitam que a rugosidade cinemática mantenha-se próxima do valor programado.

Amassar e arrancar material é inevitável nos processos de usinagem. Porém, manter sob controle estes fenômenos pode trazer vantagens no que diz respeito ao acabamento superficial. No fresamento de cavidades, existem dois fatores definidos pela trajetória escolhida que exercem forte influência na rugosidade de processo: o sentido de corte e o sentido do deslocamento da fresa em relação a uma superfície inclinada. Por proporcionar menos amassamento do material e vibrações no fresamento concordante, a qualidade superficial obtida é melhor que no discordante. Os resultados comprovaram o esperado, com uma exceção, descrita na seção 4.3.4. No entanto, utilizar trajetórias com apenas um sentido de corte acarreta maior tempo na usinagem (gasto em movimentos de posicionamento e aproximação), com um ganho nem sempre expressivo na qualidade superficial. Assim, a não ser na usinagem de paredes com contornos fechados por Patamares em 2½ eixos, onde não existe perda de tempo quando se opta por apenas um sentido de corte, deve-se utilizar os dois sentidos de corte simultaneamente.

Contudo, na usinagem de planos inclinados e superfícies côncavas e convexas com trajetórias na direção E, usando os dois sentidos, obtiveram-se melhores resultados quando a ferramenta sobe, usinando com o sentido concordante e desce, com o sentido discordante. Esta razão é desconhecida e deve ser analisada mais profundamente em trabalhos futuros. Com trajetórias na direção A, o corte será sempre na mesma posição da fresa, ou seja, o diâmetro efetivo de corte é o mesmo, mudando apenas o sentido de corte a cada passe. Neste caso, deve-se preferir o corte ascendente ou reverso, ao invés do descendente (em mergulho), por que a vida da ferramenta e a qualidade superficial melhoram, devido aos menores ângulos de incidência [19]. Os ensaios realizados comprovaram as vantagens em efetuar o corte reverso, pois o amassamento de material tende a diminuir quando a maior espessura de cavaco é retirada com o diâmetro efetivo de corte maior (Figura 4.2). Para direções intermediárias, B, C e D, por exemplo, deve-se atentar tanto para o sentido de corte (concordante na subida) quanto para o sentido de varredura (ascendente).

Para obter uma rugosidade cinemática uniforme, deve-se procurar manter constante a distância entre os passes adjacentes. Em certas estratégias, tem-se a

apresentar outro tipo de irregularidade. Usinando na direção longitudinal (direção A), foram observadas marcas distribuídas aleatoriamente ao longo do arredondamento. A consequência disto são superfícies com vales profundos e difíceis de serem eliminados na etapa de acabamento manual. Para retirar estas marcas, será necessário lixar todo o arredondamento, podendo ocorrer um desvio dimensional. Em partes fêmeas, como cavidades de potes, o produto pode ficar preso no lado fixo da máquina injetora, o que não é desejável², devido à retirada excessiva de material nestes locais. A Figura 6.9 mostra o desvio que pode ser gerado em uma cavidade após o acabamento manual.

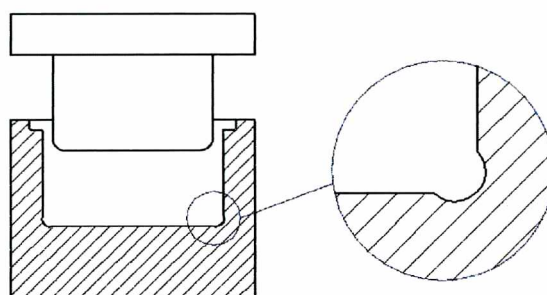


Figura 6.9: Efeito do acabamento manual nos arredondamentos.

No entanto, este fato não ocorreu em arredondamentos retilíneos, na direção de um dos eixos X ou Y, como nos ensaios do Capítulo 4. Dessa forma, chegou-se à conclusão que a causa poderia ser a interpolação de curvas por segmentos retilíneos e, conseqüentemente, paradas do comando devido à transmissão dos dados. Como qualquer movimento, seja em 2 ou 3 eixos simultâneos, é realizado por pequenos segmentos de retas, o número de dados a serem lidos e executados pelo comando é maior que sua capacidade de processamento, provocando as paradas para leitura e interpretação de dados. Neste caso, é preferível optar por uma trajetória de ferramenta na direção E (Figura 6.10), a qual evita as reentrâncias profundas.

Separar uma cavidade em regiões e usiná-las da maneira tecnologicamente mais correta, proporciona um melhor acabamento superficial. Contudo, existe a possibilidade de surgirem marcas no encontro de duas regiões com estratégias diferentes, principalmente quando a criação dos limites não é executada de forma adequada.

² Como há contração do plástico, projeta-se o sistema de extração no macho da cavidade e, posiciona-se este, no lado móvel da máquina, para não precisar de nenhum dispositivo especial para extração.

tempo de cálculo das trajetórias irá aumentar em 5 vezes.

Atividades com simulação e pós-processamento sofrem as conseqüências do maior número de programas gerados. Na simulação, ainda há a influência das correções feitas na delimitação, que a cada alteração deve ser verificada. Contudo, o tempo gasto nestas etapas, com a programação por regiões, é aproximadamente 50% maior do que o necessário para a programação convencional.

A Tabela 6.1 resume os tempos estimados parciais e o total, para as duas maneiras de programação utilizadas. Nota-se que o tempo total de programação foi quase 2,5 vezes maior, quando são observados os aspectos tecnológicos.

Tabela 6.1: Estimativa de tempo para as duas formas de programação.

Etapa	Programação convencional		Programação por regiões	
Planejamento	60 minutos	1	120 minutos	2
Delimitação das áreas	30 minutos	1	180 minutos	6
Cálculo das trajetórias	120 minutos	1	150 minutos	1,25
Simulação e pós-processamento	30 minutos	1	45 minutos	1,5
Total	240 minutos	1	550 minutos	2,3

6.2- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o exposto anteriormente, existe uma série de variáveis no acabamento de cavidade que podem ser controladas para que a superfície resultante do fresamento tenha características apropriadas, visando diminuir o trabalho manual posterior. Contudo, a principal dúvida é qual o ganho em termos de acabamento superficial obtido, quando os aspectos tecnológicos são considerados à risca, e qual a relação com o tempo gasto na programação.

Em média, obteve-se uma diminuição da ordem de 20% no parâmetro R_y , o que não parece muito expressivo. Entretanto, deve-se ressaltar que o tipo de perfil obtido na programação por regiões é consideravelmente melhor que na convencional, facilitando a etapa posterior de acabamento manual.

Os tempos de usinagem não apresentam diferenças significativas. A maior

diferença está na programação, onde é despendido grande tempo para construir os limites de forma adequada. Em muitos casos, limita-se a região e executa-se o cálculo da trajetória. Caso seja constatado que esta não está adequada, altera-se os limites e executa-se novamente o cálculo, repetindo esses passos até a delimitação da região estar de acordo com o desejado. Este aumento de tempo na programação foi em torno de 250%.

Dessa forma, é preciso realizar um estudo de viabilidade econômica, para saber quanto seria gasto a mais em programação e quanto se economizaria em acabamento manual. Estes dados podem servir, ainda, para saber o potencial de redução de custos, caso os *softwares* de CAM facilmente possibilitem este tipo de aplicação. Assim, questiona-se: compensa pagar horas a um programador para executar a delimitação das regiões, uma vez que esta tarefa requer praticamente só trabalho “braçal”?

Além disso, a etapa de acabamento manual não seria eliminada, sendo somente reduzida. Portanto, com o atual nível de desenvolvimento dos sistemas CAM, a aplicação do fresamento de cavidades por regiões, parece ainda não ser totalmente viável. Isto se deve, principalmente, ao tempo que é gasto na programação, ou seja, na separação de geometrias com características semelhantes.

Existem alternativas na limitação das áreas, que estão disponíveis em *softwares* que trabalham com superfícies. Estes possibilitam a seleção da área a ser usinada através da escolha de superfícies. O recurso é bastante útil, entretanto, o modelamento no CAD já deve ser realizado em função da melhor maneira para se usinar cada característica geométrica. Geralmente, o modelamento e a programação não são feitos pela mesma pessoa, o que exigiria um trabalho muito grande de cooperação. Além disso, em alguns casos, torna-se inviável proceder o modelamento desta forma, em termos de tempo e/ou recursos do CAD.

No fresamento de cavidades, com as condições descritas nos ensaios e estudo de casos, atingir valores de rugosidade R_y menores que $5 \mu\text{m}$ mostrou-se inviável para quase todas as geometrias. No entanto, em paredes com apenas o ângulo de extração como inclinação, pode-se chegar a valores menores, talvez pela combinação dos ângulos da ferramenta naquela posição de contato. É importante ressaltar, ainda, que o valor obtido de rugosidade neste caso, foi menor que o programado. Isto se deve, provavelmente, a uma margem de segurança utilizada pelo algoritmo no cálculo da trajetória. Entretanto, esta melhor qualidade é obtida a custo de um maior tempo de

usinagem pois, para atingir a rugosidade programada, estipulando o valor do incremento e não a altura de crista, o tempo de usinagem seria menor.

A busca por eliminar etapas no processo de fabricação de cavidades para moldes, como o acabamento manual e a eletroerosão, continua sendo o objetivo de engenheiros e pesquisadores. Neste sentido, são utilizados os recursos de altas velocidades de corte (HSC) e máquinas-ferramentas 5 eixos [7,13]. A sistemática proposta neste trabalho, em separar cada região, a fim de usiná-las de maneira que forneça o melhor acabamento superficial, é o que se busca também no fresamento em altas velocidades. Neste tipo de fresamento, é imprescindível a ferramenta usinar da forma mais adequada a cada região, sob o risco de quebra da fresa, já que as ferramentas para HSC são mais frágeis que as utilizadas no fresamento convencional [7, 13].

Portanto, atender os requisitos para o fresamento HSC, o que se assemelha à sistemática proposta, depende do desenvolvimento de *softwares* para controle. De maneira que, primeiramente, é indispensável o aprimoramento dos recursos dos *softwares* de CAM voltados para este objetivo. Assim, com a finalidade de tornar facilmente aplicável a usinagem por regiões, os *softwares* de CAM deveriam disponibilizar recursos como:

- A separação de geometrias através de valores de curvatura e inclinação com relação a um plano normal ao eixo da ferramenta e/ou;
- Estratégias voltadas para cada característica geométrica, que reconheça esta em uma cavidade e crie as trajetórias apenas naquela região.

Estes são alguns exemplos de recursos que podem ser desenvolvidos em sistemas CAM e que, de certa forma, já estão começando a ser implementados nos chamados *knowledge based CAM*, mas ainda em níveis aquém do necessário.

Neste trabalho, constatou-se também a deficiência em termos de conhecimento do processo de fresamento com fresas esféricas. Devido à complexidade e o grande número de variáveis envolvidas, bem como as diversas direções de trajetórias possíveis e geometrias usináveis com estas ferramentas, é que ainda não se conhece com mais clareza as características dessa variante do fresamento. Este é um dos fatores, conseqüente da rápida evolução tecnológica, que torna difícil a otimização no processo de confecção de moldes. Além disso, nas ferramentarias nacionais, não há

um adequado investimento em qualificação da mão-de-obra e, se o objetivo é ganhar mercado, esta mentalidade deveria mudar.

6.3- SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

A fabricação de cavidades para moldes envolve diversas áreas de conhecimento, desde usinagem e tolerâncias até informática e programação. Assim, existe uma série de fatores que ainda necessitam de estudo mais profundo, bem como a influência que cada um exerce sobre o outro.

O fresamento com fresa de topo semi-esférico envolve um número muito grande de variáveis, e grande parte ainda não foi estudada. Neste sentido, são propostos trabalhos envolvendo os seguintes temas:

- Estudo da influência de condições de corte como velocidade e avanço na qualidade superficial, com as geometrias e estratégias utilizadas neste trabalho;
- Verificar os desvios dimensionais ocasionados por cada estratégia nas diferentes formas geométricas. Medir as forças de corte e deflexão da fresa para condições de “ataque” (estratégias) variadas;
- Analisar a influência do tipo de fluido de corte, assim como a quantidade deste, no acabamento superficial, utilizando as mesmas formas geométricas estudadas;
- Identificar quais as direções de trajetórias geram menores vibrações e desgaste da ferramenta, também envolvendo o conjunto de geometrias utilizado;
- Estudar a aplicação de fresas esféricas com insertos intercambiáveis, tendo em vista comparar com os resultados obtidos para fresa esférica inteiriça;
- Gerar conhecimento também para usinagem com fresa esférica em altas velocidades, uma vez que esta tendência começa a ser implementada no Brasil;

- Estudar, com maior profundidade, a importância do tipo de perfil gerado na superfície fresada, sendo que esta passará pelo processo de acabamento manual.

De acordo com o que foi concluído neste trabalho, tão importante quanto conhecer como cada variável do fresamento influencia na qualidade superficial, é conseguir aplicar as melhores condições, utilizando a programação via CAM. Assim, deve-se procurar desenvolver soluções e recursos que facilitem a programação. Neste sentido, as sugestões para trabalhos são:

- Realizar um estudo de viabilidade econômica com o atual nível de desenvolvimento dos CAM;
- Desenvolver os recursos para delimitação de áreas para facilitar a programação com vistas aos aspectos tecnológicos. Implementar em sistemas CAM novos algoritmos que reconheçam características geométricas específicas;
- Realizar um estudo semelhante, porém com vistas às exigências tecnológicas do fresamento em altas velocidades (HSC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AHRENS, C. H. ***Características desejáveis para a implantação e o emprego de sistemas CAE/CAD/CAM no setor de moldes de injeção de plásticos.*** Florianópolis, 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [2] VOLPATO, N. ***Recursos CAD/CAM voltados ao modelamento e à usinagem de cavidades para moldes, com estudo de casos de aplicação.*** Florianópolis, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] 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.*** Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [4] 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.*** Florianópolis, 1995. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] MIRANDA, H. J. A, SILVA, R. M. F. Sistemas de CAD/CAM na Indústria de Moldes - Ficção e Realidade. ***O Molde***. CEFAMOL, n.6, p.44-48, dez. 1989.
- [6] CAVALHEIRO, A. Z. ***Sistematização do planejamento da programação via CAM do fresamento de cavidades de moldes para peças injetadas.*** Florianópolis, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [7] FINZER, T. High-Speed Machining (HSC) in Die and Mold Manufacturing. SEMINÁRIO DE ALTA TECNOLOGIA: USINAGEM COM ALTÍSSIMA

- VELOCIDADE DE CORTE E ALTA PRECISÃO, 2., 1997, Santa Bárbara d'Oeste. **Anais**. Santa Bárbara d'Oeste: UNIMEP, 1997.
- [8] BEARD, T. Building 3D machining knowledge into CAM. **Modern Machine Shop**. nº 11, 1998. Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com>. 10 nov. 1998.
- [9] ALBERT, M., BEARD, T. Die/mold machining on the march. **Modern Machine Shop**. nº 4, 1999. Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com>. 3 abr. 1999.
- [10] KÖNIG, W. **Tecnologia de fabricação: Tornear, Fresar e Furar**. Tradução por Walter L. Weingaertner. Florianópolis: 1996, v. 1, 410p. Original em alemão.
- [11] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995, p.141–215.
- [12] MACEDO, S. E. M. **Fresamento com fresas de topo de aço-rápido: avaliação de forças de corte**. Florianópolis, dez. 1998. Projeto de dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [13] GOMES, J. O. **Fabricação de cavidades por fresamento**. Florianópolis, set. 1998. Exame de qualificação para doutoramento submetido à Universidade Federal de Santa Catarina.
- [14] FARIA, J. Ferramentas de Corte para a Indústria de Moldes. **O Molde**. CEFAMOL, n.13, p.15-17, set. 1991.
- [15] ZHU, C. How to obtain a good surface finish in NC machining of free-formed surfaces. **Computers in Industry**. SSDI 0166-3615, p.229-233, 1993.
- [16] SILVA FILHO, M. S. **Relatório de estágios e visitas técnicas a ferramentarias em 1999**; Florianópolis: CIMJECT/UFSC, 1999. 14p.

- [17] FENG, H., MENQ, C. A flexible ball-end milling system model for cutting force and machining error prediction. *Jornal of Manufacturing Science and Engineering*. vol. 118, nov. 1996.
- [18] MESQUITA, N. G. M. *Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação*. Florianópolis, 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [19] TABENKIN, A. Surface finish: a machinist's toll. A design necessity. *Modern Machine Shop*. nº 3, 1999. Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com>. 7 mar. 1999.
- [20] DELCAM plc. *Powermill Reference Manual*. Birmingham (GBR), 1996.
- [21] CIMATRON Co. *NC* (manual do usuário), 1996.
- [22] AUDACES Automação e Informática Industrial. *CAM Station, Manual do Usuário*. Florianópolis, 1995.
- [23] AHRENS, C. H. *CAE/CAD/CAM para Moldes de Injeção: Manual de Orientação*. Florianópolis: CIMJECT/GRUCON/UFSC, 1995.
- [24] CHRISTMAN, A. Basics of NC Programming. *American Machinist*. p.45-47, dez. 1995.
- [25] KOIKE, T. *Integração do projeto e da fabricação de moldes para injeção de plásticos com auxílio de tecnologias CAD/CAE/CAM*. Florianópolis, 1995. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [26] O'HALLORAN, J. 3D Modelling. *CADCAM*. p. 45, jan. 1994.
- [27] BEARD, T. Machining from STL files. *Modern Machine Shop*. v6, 1998.

Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com>. 21 out. 1998.

- [28] CHRISTMAN, A. Product Review: PowerMILL 2.2. **Computer Aided Engineering**. abr. 1997.
- [29] GUNNINK, J. W. **How to speed up prototyping & tooling processes by using STL-technology**. Time-Compression Technologies '98 Conference, 1998.
- [30] BEARD, T. Machining from STL files. **Modern Machine Shop**. v1. 1997.
Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com>. 16 mar. 1998.
- [31] DIEHL, L. Machining Methods for Complex Models. **Modern Machine Shop**. v6, jul. 1996. Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com>. 16 mar. 1998.
- [32] MARTIN, R., MARTIN, C. **The Windows Trio powers CAM software**; Computer Aided Engineering, março, 1996.
- [33] ZHU, C. Tool-Path Generation in Manufacturing Sculptured Surfaces with a Cylindrical End-Milling Cutter. **Computers in Industry**. Elsevier Science Publishers, v.17, p.385-389, 1991.
- [34] HELD, M., LUKÁCS, G., ANDOR, L. Pocket machining based on contour-parallel tool paths generated by means of proximity maps. **Computer-Aided Design**. v. 26(3), p.189-203, mar. 1994.
- [35] 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**. v.26(11), p.787-795, nov. 1994.
- [36] CATANIA, G. A Computer-Aided Prototype System for a NC Rough Milling of Free-Form shaped Mechanical Part-Pieces. **Computers in Industry**. Elsevier Science Publishers, v.20 (3), p.275-293, 1992.

- [37] VICKERS, G., QUAN, K.W. Ball-Mill Versus End-Mills for Curved Surface Machining. *Journal of Engineering for Industry (Transactions of the ASME)*. v.111, p.22-26, fev. 1989.
- [38] CAVALHEIRO, A. Z. *Relatório de estágio curricular*; Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, 1995.
- [39] FREIMUTH Jr., A. K. Resolving Conflicts Between CAD&CAM. *Computer Aided Engineering*. dez. 1996.
- [40] FERREIRA, A. B. H. Novo dicionário aurélio da língua portuguesa. 2.ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986.
- [41] PTC. *New Pro/MFG - Pro/NC-Check - User's Guide for Release 17.0*. Parametric Technology Corporation, Waltham (EUA), 1996.
- [42] LEE, Y.S., CHANG, T.C. CASCAM—An automated system for sculptured surface cavity machining. *Computers in Industry*. Elsevier Science Publishers, v.16, p.321-342, 1991.
- [43] SINHOFF, V., ALTMÜLLER, S.; EISENBLÄTTER, G. *A usinagem a seco em alta velocidade: revolução ou evolução?* Máquinas e Metais, setembro, 1999.
- [44] SCHROETER, R. B. *Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável*. Florianópolis, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [45] SCHNEIDER, C., ALBERTAZZI, A. *Notas de aula - disciplina de técnicas de pesquisa experimental*. Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica (UFSC). Florianópolis, 1992.
- [46] SANTANA, R. R. *Seleção de materiais para moldes de injeção*. Trabalho

realizado na disciplina Projeto para Manufatura da Pós-graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

- [47] VILLARES SIDERURGIA. **Aços para ferramentas**. Catálogo do fabricante, 1995.
- [48] SANDVIK COROMANT. **Ferramentas rotativas**. Catálogo do fabricante. São Paulo, 1996.
- [49] OLIVEIRA, F., MARCONDES, F. HSM - Usinagem em altíssimas velocidades na produção de moldes e matrizes. **Metal Mecânica**. São Paulo, abr./mai. 1998.
- [50] SILVA, I., DURÁN, O. Reduzindo os tempos de preparação de máquinas em uma fábrica de autopeças. **Máquinas e Metais**. Aranda Editora, n.385, p.70-88, fev. 1998.
- [51] BROWN, C. R. O ferramental de troca rápida contribui para a competitividade de indústrias. **Máquinas e Metais**. Aranda Editora, n.378, p.50-89, fev. 1998.
- [52] GERDAU - Aços Finos Piratini. **Manual do aço**. Ed. atualizada , 1998.

ANEXO I

PLANILHA PARA AUXÍLIO À PROGRAMAÇÃO VIA CAM

Visando facilitar a entrada de parâmetros durante o uso do CAM, foi desenvolvida uma planilha contendo informações e equações úteis na programação, principalmente com relação ao incremento lateral. Esta planilha, se utilizada em conjunto com o CAM, torna-se uma importante ferramenta, que minimiza o tempo gasto em cálculos e na procura de informações em catálogos.

Considerando que em algumas estratégias é possível apenas estipular o passo lateral antes da projeção desta sobre a superfície e que este incremento irá modificar-se devido à inclinação da geometria e ao ângulo da trajetória, deve-se conhecer quanto aumenta este valor e compensá-lo no momento de estipular o valor no CAM. Através de relações trigonométricas utilizando o ângulo de inclinação da superfície (α) e o ângulo de direção da trajetória (β), é possível obter a equação para o cálculo do incremento lateral real.

O primeiro passo consiste em verificar qual distância entre dois passes (incremento lateral) o *software* de CAM adota, se a criada em 2D com a trajetória ou a projetada sobre a peça. Medindo esta distância no software, pode-se constatar que o incremento lateral usado no cálculo da trajetória não considera o ângulo da trajetória nem a inclinação do plano (Figura A1).

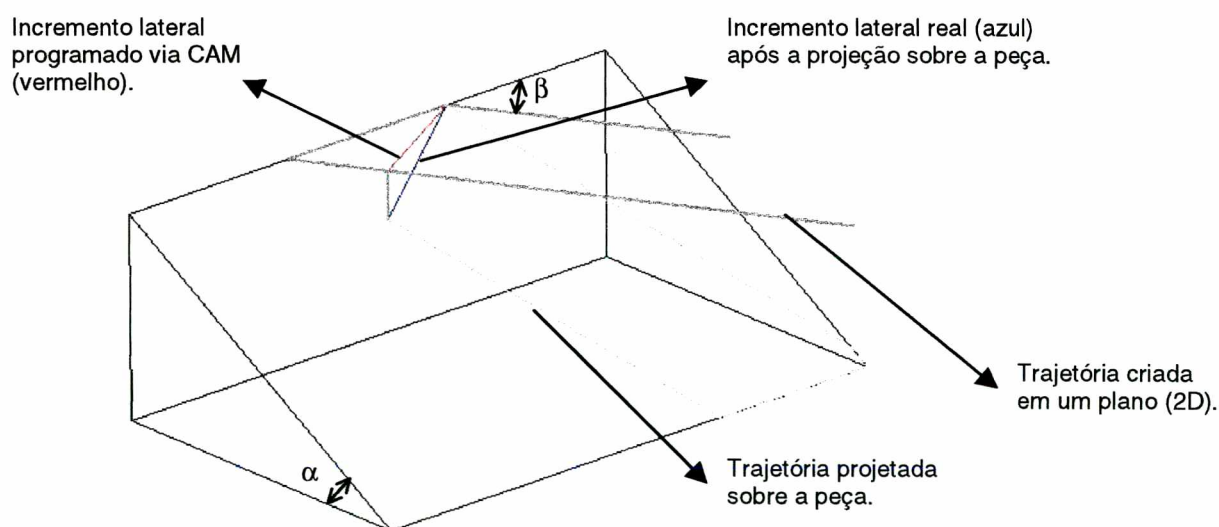


Figura A1: Efeito da projeção da trajetória no incremento lateral a_e .

A projeção das trajetórias, criadas em um plano, sobre a geometria modifica o

valor do incremento lateral. Assim, decompõe-se o incremento nas componentes X e Y.

$$a_{ex} = a_e \cdot \cos \beta \quad (A2)$$



$$a_{ey} = a_e \cdot \text{sen} \beta \quad (A3)$$

Projetando as duas componentes sobre um plano com inclinação α tem-se as duas componentes do incremento lateral real.

$$a_{ex_{real}} = a_{e_{teórico}} \cdot \cos \beta \quad (A4)$$

$$a_{ey_{real}} = \frac{a_{e_{teórico}} \cdot \text{sen} \beta}{\cos \alpha} \quad (A5)$$

Utilizando a soma dos quadrados:

$$(a_{e_{real}})^2 = (a_{ey_{real}})^2 + (a_{ex_{real}})^2 \quad (A6)$$

Conseqüentemente:

$$a_{e_{real}} = \sqrt{\left(\frac{a_{e_{teórico}} \cdot \text{sen} \beta}{\cos \alpha}\right)^2 + (a_{e_{teórico}} \cdot \cos \beta)^2} \quad (A7)$$

$a_{e_{teórico}}$ - passo lateral 2D, em mm.

β - ângulo de direção da trajetória.

α - ângulo de inclinação da superfície.

A Figura A1 mostra a planilha construída, onde dados que o programador deve fornecer estão em azul e os valores calculados em preto (negrito). Em superfícies não

planas onde a inclinação varia ao longo da geometria pode-se adotar a maior inclinação (pior situação) na compensação do passo lateral.

Cálculo do passo lateral a_e		
	em mm	
Passo Lateral teórico	0,268	0,268
	em graus	
Angulo de inclinação do plano (α)	30	0,5235987755983
Angulo da estratégia	45	0,7853981633974
Valor do passo lateral (mm)	0,289	




Figura A2: Planilha para cálculo do passo lateral em superfícies inclinadas.

Para facilitar a programação, foram inseridas, ainda, algumas fórmulas à planilha. Assim, pode-se saber qual a rugosidade teórica, considerando a inclinação da geometria e o diâmetro efetivo de corte, conforme as equações

$$Ry_{teórico} = \left(d - \sqrt{d^2 - 4 \cdot \left(\frac{a_{e_{real}}}{2} \right)^2} \right) \cdot 500 \quad (A8)$$

O diâmetro efetivo de corte para fresa esférica na usinagem em plano horizontal e considerando o sobremental, conforme o catálogo Sandvik, é:

$$d_{eh} = \sqrt{d^2 - (d - 2 \cdot a_p)^2} \quad (A9)$$

Entretanto, para planos inclinados, o diâmetro efetivo de corte pode ser calculado somando-se as duas componentes d_1 e d_2 , conforme mostra a Figura A3.

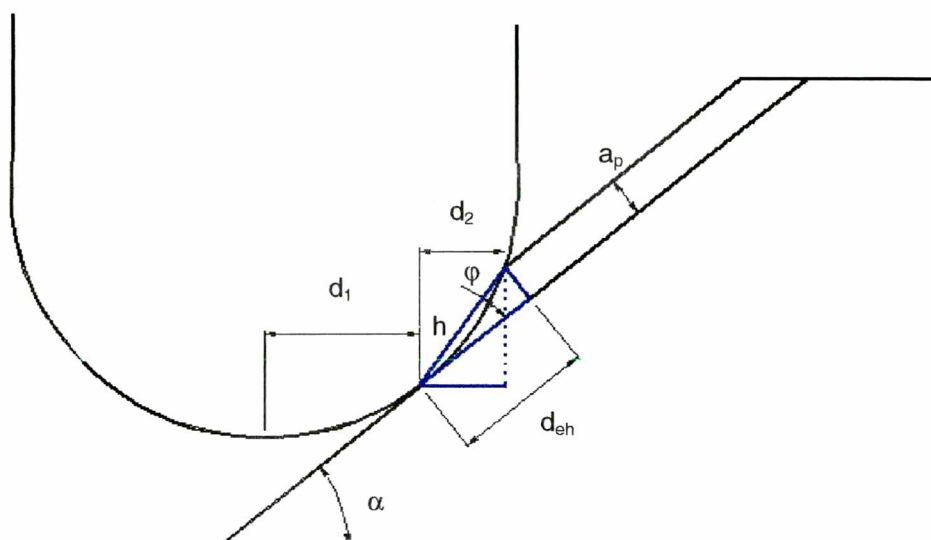


Figura A3: Relações para o cálculo do diâmetro efetivo de corte.

Por relações trigonométricas, obtém-se as equações:

$$d_1 = d \cdot \text{sen} \alpha \quad (\text{A10})$$

$$d_2 = h \cdot \text{cos}(\alpha + \varphi) \quad (\text{A11})$$

Onde:

$$\varphi = \text{arctg}(a_p / d_{eh}) \quad (\text{A12})$$

$$h = \frac{a_p}{\text{sen} \varphi} \quad (\text{A13})$$

Logo:

$$d_{\text{efetivo}} = d \cdot \text{sen} \alpha + h \cdot \text{cos}(\alpha + \varphi) \quad (\text{A14})$$

A Figura A4 mostra as fórmulas já inseridas na planilha. Além disso, foram introduzidos dados e fórmulas de catálogos de ferramenta para cálculo do avanço e velocidade de corte (baseados também no diâmetro efetivo de corte).

Cálculo da rugosidade teórica (plano horizontal)			
Passo real (mm)		Diâmetro da fesa esférica (mm)	
0,289473085		10	
Rugosidade (microns)			
	2,1		
Componente d1		sobremetal (mm)	0,3
5,0		Diâmetro efetivo	7,8
0,087705975		plano horizontal	3,4
Cálculo do avanço f a partir do avanço por dente fz			
fz (mm/rot) = 0,07		veloc. corte (m/min) = 80	
Nº de cortes = 2		rot. calc. (rpm) = 3263	
Avanço f (mm/min) = 457			

Figura A4: Planilha para cálculo da rugosidade teórica, diâmetro efetivo de corte, avanço e velocidade de corte.

ANEXO II

MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE MOLDES

A escolha dos materiais que serão utilizados na fabricação dos diversos componentes do molde influencia diretamente nos processos de fabricação, custos de fabricação e qualidade do componente. Em média o custo dos materiais que compõem o molde corresponde a 10% do custo total. Neste contexto a escolha dos materiais não deve ser baseada apenas no custo da matéria-prima, mas considerando também outros requisitos, que são [46]:

- **Tempo de vida do molde**, ou número de ciclos que este deve suportar;
- **Fabricação econômica**, sendo adequada ao processo de fabricação;
- **Capacidade de ser tratado termicamente** (têmpera e revenido, entre outros);
- **Capacidade de receber tratamento superficial** (nitretação, cementação, entre outros);
- **Suficiente resistência** a esforços mecânicos previsíveis;
- **Suficiente dureza**, para suportar a abrasão do polímero e/ou aditivos, movimentos relativos e pressão de injeção;
- **Resistência ao calor**, devido à temperatura de trabalho;
- **Resistência ao desgaste**, devido à abrasão do polímero e/ou aditivos e movimentos relativos;
- **Alta condutividade térmica**, objetivando proporcionar o resfriamento da peça injetada para posterior extração;
- **Resistência à corrosão**, devido ao tipo de massa a ser injetada (ambiente agressivo, geração de gases corrosivos no processamento do polímero, ataque químico devido ao polímero e/ou aditivos);

Os materiais mais comumente utilizados na indústria de moldes, bem como os percentuais do elementos químicos presentes na composição, podem ser vistos na Tabela A1.

Tabela A1: Materiais mais utilizados pela indústria de moldes [47].

Material	C (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	Si (%)	V (%)
P 20	0,28 - 0,40	0,60 - 1,00	1,40 -2,00	0,30 -0,55	0,20 - 0,80	-
H 13	0,32 - 0,45	0,20 - 0,60	4,75 -5,50	1,10 - 1,75	0,80 - 1,25	0,80 - 1,20
1045	0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	-	-	-	-

Dentre estes materiais, o mais utilizado em cavidades para moldes de injeção de plástico é o aço ABNT P20 [16, 38]. Este aço foi desenvolvido para atender as exigências do ramo de moldes, oferecendo características desejáveis como resistência ao desgaste e bom polimento. Para tanto, cada elemento químico exerce uma função específica, promovendo a melhoria das propriedades, como mostrado na Tabela A2.

Tabela A2: Influência dos elementos de liga nas propriedades do aço [52].

Elemento de liga	Si	Mg ¹	Mg ²	Cr	Ni ¹	Ni ²	Al	Tu	Va	Co	Mo	Cu	En	Pb
Resistência mecânica a quente	↑	~	-	↑	↑	↑↑↑	-	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑	-	-
Elasticidade	↑↑↑	↑	-	↑	-	-	-	-	↑	-	-	-	-	-
Resistência ao impacto	↓	~	-	↓	~	↑↑↑	↓	~	↑	↓	↑	~	↓	↓↓↓
Estricção	~	~	~	↓	~	↑↑	↓	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
Alongamento	↓	~	↑↑↑	↓	~	↑↑↑	-	↓	~	↓	↓	~	↓	↓
Limite de escoamento	↑↑	↑	↓	↑↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	↑↑	-	↑↑
Resistência à tração	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑
Dureza	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓↓	-	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑

1 - em aços perlíticos

2 - em aços austeníticos



Aumenta



Diminui

~ Constante

- Não característico ou desconhecido

* Diversas flechas significa efeito mais pronunciado.

O P20 é normalmente fornecido no estado beneficiado (temperado e revenido), na faixa de dureza entre 29 HRc e 34 HRc, com uma alta tenacidade e resistência ao amolecimento. A resistência a tração situa-se entre 95 kgf/mm² e 110 kgf/mm².

A usinabilidade deste aço, com relação a forças de corte e desgaste da ferramenta, é diminuída devido aos elementos acrescentados à liga, mas, com relação à formação do cavaco, é considerado de média a alta usinabilidade (também graças a elementos adicionados). No entanto, as temperaturas e forças na região de corte são elevadas, exigindo ferramentas com grande resistência mecânica e térmica.