



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de Engenharia

DEMEGI – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

LEM – Licenciatura em Engenharia Mecânica

RELATÓRIO DO PROJECTO DE FIM DE CURSO

Optimização do Processo de Fresagem e Benchmarking



Ernesto São Simão, Lda

José Carlos de Campos Neves

Orientadores:

Prof. Eng.º Monteiro Baptista – FEUP

Prof. Eng.º Joaquim Fonseca – FEUP

Eng.º Manuel São Simão – ESS



**Ciência, Inovação
2010**

Programa Operacional Ciência e Inovação 2010

621(047.3)/
LEM
2006/NEVj

Porto, Julho de 2006



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de Engenharia

DEMEGI – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

LEM – Licenciatura em Engenharia Mecânica

RELATÓRIO DO PROJECTO DE FIM DE CURSO

Optimização do Processo de Fresagem e Benchmarking



Ernesto São Simão, Lda

José Carlos de Campos Neves

Orientadores:

Prof. Eng.º Monteiro Baptista – FEUP

Prof. Eng.º Joaquim Fonseca – FEUP

Eng.º Manuel São Simão – ESS



Ciência, Inovação
2010

Programa Operacional Ciência e Inovação 2010

Porto, Julho de 2006



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de Engenharia

DEMEGI – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

LEM – Licenciatura em Engenharia Mecânica

RELATÓRIO DO PROJECTO DE FIM DE CURSO

Optimização do Processo de Fresagem e Benchmarking



Ernesto São Simão, Lda

José Carlos de Campos Neves

Orientadores:

Prof. Eng.º Monteiro Baptista – FEUP

Prof. Eng.º Joaquim Fonseca – FEUP

Eng.º Manuel São Simão – ESS

Porto, Maio de 2006

Agradecimentos

Agradeço aos Professores António Monteiro Baptista (supervisor) e Joaquim Fonseca pela grande disponibilidade e pelas orientações fornecidas no decorrer deste trabalho.

Agradeço igualmente ao meu orientador, Engenheiro Manuel São Simão, pelas sugestões e apoio que me deu e por me ter facultado as melhores condições de trabalho na ESS. Gostaria de agradecer ao Sr. José Manuel, responsável pelo Departamento Técnico-Comercial, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos. Agradecer também aos programadores CAM da ESS nomeadamente André Costa e Pedro Diegues, pela maneira como me receberam e pela ajuda prestada na programação CAM. Agradeço também ao restante pessoal da ESS.

Por último, agradecer ao POCI – Programa Operacional Ciência e Inovação 2010, por ter facultado uma bolsa de estágio que tornou a resolução deste estágio mais fácil.

A todos, muito obrigado.

Agradecimentos

Agradeço aos Professores António Monteiro Baptista (supervisor) e Joaquim Fonseca pela grande disponibilidade e pelas orientações fornecidas no decorrer deste trabalho.

Agradeço igualmente ao meu orientador, Engenheiro Manuel São Simão, pelas sugestões e apoio que me deu e por me ter facultado as melhores condições de trabalho na ESS.

Gostaria de agradecer ao Sr. José Manuel, responsável pelo Departamento Técnico-Comercial, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos. Agradecer também aos programadores CAM da ESS nomeadamente André Costa e Pedro Diegues, pela maneira como me receberam e pela ajuda prestada na programação CAM. Agradeço também ao restante pessoal da ESS.

A todos, muito obrigado.

PROIECT DE LEGE

Art. 1. (1) Prezenta lege are ca scop asigurarea unui cadru legal pentru organizarea și desfășurarea activității de cercetare științifică în domeniul medicinei, în vederea îmbunătățirii calității serviciilor medicale și a sănătății populației.

(2) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(3) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(4) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(5) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(6) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(7) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(8) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(9) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

(10) Prezenta lege se aplică activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de cercetare științifică din domeniul medicinei, precum și activității de cercetare științifică desfășurată în cadrul unităților de învățământ superior de medicină.

Art. 2. (1) Prezenta lege este aplicabilă din data intrării în vigoare.

621(047.3) ILE7226/NEVJ

Un	Punct
Facultate de Medicină	
Disciplină	
Nr	105250
CDU	
Data	24 02 2020

Resumo

Este trabalho insere-se no âmbito da disciplina Projecto Fim de Curso, da opção de tecnologia de moldação por injeção do curso de Engenharia Mecânica e foi realizado na empresa Ernesto São Simão, Lda (ESS), no período de 1 de Setembro de 2005 a 1 de Março de 2006.

Tema do Projecto:

"Optimização de Processo de Fresagem e Benchmarking"

Este tema proposto pela empresa tem como principais objectivos a análise das práticas actuais da empresa, o estudo de software de maquinagem e de diferentes estratégias de maquinagem, de forma a otimizar e reduzir os tempos de fabrico de moldes, a utilidade de outros processos concorrentes como a electroerosão, a rectificação, o torneamento e a pesquisa das melhores práticas nacionais e estrangeiras para implantação na ESS.

Estes temas serão discutidos através da análise de peças padrão produzidas no decorrer de estágio. Serão usadas ferramentas informáticas (CAD) para modelação das peças a maquinar e para a geração dos programas (CAM). Serão analisadas diferentes estratégias em diferentes geometrias da peça padrão. Será também efectuada uma breve abordagem ao tema Benchmarking.

O material utilizado na maquinagem das peças padrão foi o aço 1.2767 (referência RAMADA - Mg50), fornecido no estado recozido dado que ainda é o material mais utilizado na ESS para o fabrico de moldes.

Índice

1. Introdução	10
1.1 Situação actual da indústria Portuguesa de moldes	12
2. Apresentação da empresa	13
2.1 Localização	13
2.2 Constituição da Empresa e Organização	14
2.3 Principais Mercados	14
2.4 Equipamento Produtivo	15
2.5 A Plasticum	16
3. Revisão da Literatura	17
3.1 Maquinagem por Arranque da Aparas	17
3.2 Aspectos Construtivos da Máquina-ferramenta	22
3.2.1 Elementos constituintes	22
3.3 Maquinagem por Electroerosão (EDM)	29
3.3.1 Eléctrodo: a ferramenta da electroerosão	32
3.4 Maquinagem por Abrasão	33
3.5 Formação da Aparas	36
3.5.1 Noções sobre a aparas produzida	37
3.6 Parâmetros de corte	39
3.6.1 Noções base	39
3.6.2 Formulações matemáticas gerais	41
3.6.3 Métodos de trabalho	42
3.6.4 Outros métodos	43
3.7 Ferramentas de Corte	44
3.7.1 Aços Rápidos	45
3.7.2 Ligas Fundidas (Estelites)	46
3.7.3 Carbonetos Sinterizados (Metal Duro)	47
3.7.3.1 Carbonetos sinterizados revestidos	48
3.7.4 Cermets	49
3.7.5 Cerâmicos	49
3.7.6 Ultra duros	51
3.7.6.1 Nitreto de Boro Cúbico (CBN)	51
3.7.6.2 Diamante Policristalino (PCD)	52
3.7.7 Guia de Optimização Sandvik	53
3.8 Lubrificação	55
3.8.1 Agentes de melhoria de corte sólidos	55
3.8.2 Fluidos de corte	56
3.8.2.1 Fluidos de corte líquidos	56
3.8.2.2 Fluidos de corte gasosos	57
3.9 Sistemas CAD/CAM	59
3.9.1 Sistemas CAD	60
3.9.2 Sistemas CAM	60
3.10 Estratégias de Maquinagem	63
3.10.1 Estratégias 2D	63

3.10.2 Estratégias 3D	64
3.10.3 Maquinagem de Formas em Moldes	65
3.11 Acabamento Superficial.....	70
3.11.1 Rugosidade	71
3.11.2 Aplicação dos parâmetros de rugosidade.....	71
3.11.3 Definição de alguns parâmetros de rugosidade	73
3.12 Benchmarking.....	75
3.12.1 Definição	75
3.12.2 Tipos de Benchmarking	76
3.12.3 Princípios Fundamentais do Benchmarking	77
4. Trabalho Experimental	78
4.1 Máquina-ferramenta	78
4.2 Material maquinado	79
4.3 Ferramentas utilizadas	79
4.4 Software utilizado	80
4.5 Análise superficial.....	80
5. Simulação da maquinagem.....	82
5.1 Modelação CAD.....	82
5.2 Programação CAM	83
5.2.1 Peça A.....	83
5.2.1.1 Maquinagem em Contorno (One-Way).....	90
5.2.1.2 Maquinagem em Cópia (0 graus).....	91
5.2.1.3 Maquinagem em Cópia (45 graus)	92
5.2.1.4 Maquinagem em Contorno (Zig-Zag).....	93
5.2.2 Peça B.....	95
5.2.2.1 Peça B_C	99
5.2.2.2 Peça B_S	101
5.2.2.3 Peça B_R.....	103
5.2.2.4 Peça B_O.....	105
6. Resultados e discussão	108
6.1 Peça A.....	109
6.1.1 Influência da Lubrificação	109
6.1.2 Estratégias e inclinações da face	114
6.1.2.1 Faces superiores	114
6.1.2.2 Faces inferiores	118
6.2 Peça B.....	121
6.2.1 Superfície cônica.....	121
6.2.2 Superfície convexa.....	124
6.2.3 Superfície Côncava.....	128
6.2.4 Superfície obtida por Spline	129
6.2.5 Rasgo	132
6.2.6 Furos	135
6.2.7 Peça Optimizada.....	138
6.2.7.1 Medição de Rugosidades	138
6.2.8 Tolerância de Maquinagem – Vantagens e Desvantagens	142
6.2.9 Tempos de Maquinagem	143
7. Conclusões	144
8. Bibliografia	147

Índice de Figuras

Fig. 1 – Análise de custo de um produto de polímero injectado.....	10
Fig. 2 – Localização da ESS.....	13
Fig. 3 – Organigrama da ESS.....	14
Fig. 4 – Variação da temperatura com a velocidade de corte.....	17
Fig. 5 – Comportamento do processo HSC.....	18
Fig. 6 – Gama de velocidades de corte para maquinagem de diferentes materiais.....	19
Fig. 7 – Gama de velocidades de corte para diferentes operações de maquinagem.....	19
Fig. 8 – Processo de maquinagem convencional vs HSC.....	21
Fig. 9 – Fabrico de eléctrodos de grafite.....	21
Fig. 10 – Accionamento por um fuso de esferas recirculantes.....	24
Fig. 11 – Comparação entre motores angulares e lineares.....	25
Fig. 12 – Esquema de armazém de ferramentas. a) tambor rotativo; b) carrocel.....	27
Fig. 13 – Dispositivo de medição de ferramentas.....	28
Fig. 14 – Apalpador.....	28
Fig. 15 – Dureza de uma superfície maquinada por electroerosão.....	30
Fig. 16 – Características de um processo de maquinagem estável.....	37
Fig. 17 – Características de um processo de maquinagem estável.....	38
Fig. 18 – Noções base.....	39
Fig. 19 – Avanço por dente.....	39
Fig. 20 – Parâmetros de maquinagem.....	40
Fig. 21 – Fresa de disco.....	41
Fig. 22 – Fresagem discordante e concordante.....	42
Fig. 23 – Materiais para ferramentas de corte.....	45
Fig. 24 – Fresa aço rápido (HSS).....	45
Fig. 25 – Pastilhas em Metal Duro.....	47
Fig. 26 – Revestimento de uma pastilha.....	48
Fig. 27 – Pastilhas cerâmicas.....	49
Fig. 28 – Pastilhas CBN.....	51
Fig. 29 – Pastilhas Diamante Policristalino.....	52
Fig. 30 – Integração de sistemas de apoio à fabricação de moldes.....	59
Fig. 31 – Malha gerada com diferentes tolerâncias.....	60
Fig. 32 – Etapas para pós-processamento de programas NC.....	62
Fig. 33 – Esquema de uma maquinagem 2D.....	63
Fig. 34 – Principais trajectórias de ferramentas para operações de acabamento.....	64
Fig. 35 – Desbaste por fresa de topo plano e esférica.....	66
Fig. 36 – Aspecto da superfície após desbaste com fresas topo plano e esféricas.....	67
Fig. 37 – Pontos de contacto de uma fresa esférica.....	68
Fig. 38 – Ponto de contacto geometria/peça em função do sentido de corte.....	69
Fig. 39 – Aspecto do acabamento superficial para $f_z=p_r$	70
Fig. 40 – Ilustração do parâmetro de rugosidade R_a	73
Fig. 41 – Ilustração do parâmetro de rugosidade R_{zi}	73
Fig. 42 – Centro de maquinagem vertical.....	78
Fig. 43 – Rugosímetro usado na FEUP.....	80
Fig. 44 – Lupa estereoscópica usada na FEUP.....	81
Fig. 45 – Peça padrão A.....	82
Fig. 46 – Peça padrão B.....	82
Fig. 47 – Após importamento.....	83
Fig. 48 – Peça em posição para se iniciar a programação.....	83
Fig. 49 – Identificação das faces da peça A.....	84
Fig. 50 – Bloco de trabalho.....	89
Fig. 51 – Fresa de ϕ 25mm a desbastar em contorno.....	89
Fig. 52 – Pré-acabamento com fresa ϕ 16mm em.....	89
Fig. 53 – Contorno das letras com fresa de ϕ 1,5mm.....	89
Fig. 54 – Zona assinalada que irá ser maquinada em contorno (one-way).....	90
Fig. 55 – Trajectória da ferramenta.....	90
Fig. 56 – Zona assinalada que irá ser maquinada em cópia (0 graus).....	91

Fig. 57 – Trajectória da ferramenta	91
Fig. 58 – Zona assinalada que irá ser maquinada em cópia (45 graus)	92
Fig. 59 – Trajectória da ferramenta	92
Fig. 60 – Zona assinalada que irá ser maquinada em contorno (zig-zag)	93
Fig. 61 – Trajectória da ferramenta	93
Fig. 62 – Maquinagem das faces A e E	94
Fig. 63 – Maquinagem das faces B e F	94
Fig. 64 – Maquinagem das faces C e G	94
Fig. 65 – Maquinagem das faces D e H	94
Fig. 66 – Peça final obtida após simulação no MasterCam	94
Fig. 67 – Identificação das superfícies da peça B	96
Fig. 68 – Bloco de trabalho com identificação dos furos	97
Fig. 69 – Desbaste da peça B	98
Fig. 70 – Continuação de desbaste da peça B	98
Fig. 71 – Finalização de desbaste da peça B	98
Fig. 72 – Imagem da peça B_C com todas as operações de maquinagem já efectuadas	100
Fig. 73 – Imagem da peça B_S com todas as operações de maquinagem já efectuadas	102
Fig. 74 – Imagem da peça B_R com todas as operações de maquinagem já efectuadas	104
Fig. 75 – Imagem da peça B_O com todas as operações de maquinagem já efectuadas	106
Fig. 76 – Vista 2D da peça padrão A	109
Fig. 77 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno one-way	110
Fig. 78 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno zig-zag	110
Fig. 79 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 45° zig-zag	111
Fig. 80 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 0° zig-zag	111
Fig. 81 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem com lubrificação	113
Fig. 82 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem sem lubrificação	113
Fig. 83 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno one-way	114
Fig. 84 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno zig-zag	114
Fig. 85 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 0° zig-zag	115
Fig. 86 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 45° zig-zag	115
Fig. 87 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento	116
Fig. 88 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	117
Fig. 89 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em cópia 45° zig-zag	117
Fig. 90 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento	118
Fig. 91 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em cópia 0° zig-zag	119
Fig. 92 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	119
Fig. 93 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para a superfície cónica	121
Fig. 94 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	122
Fig. 95 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em radial	122
Fig. 96 – Fotografia da textura superficial da superfície cónica após maquinagem	123
Fig. 97 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para a superfície convexa	124
Fig. 98 – Esquema do funcionamento	125
Fig. 99 – Esquema do funcionamento	125
Fig. 100 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	126
Fig. 101 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em radial	126
Fig. 102 – Fotografia da textura superficial da superfície convexa após maquinagem	127
Fig. 103 – Fotografia da textura superficial da superfície côncava após maquinagem	128
Fig. 104 – Esquema do incremento	128
Fig. 105 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para a superfície obtida por spline	129
Fig. 106 – Esquema do incremento lateral com a estratégia "radial"	130
Fig. 107 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em cópia 45° zig-zag	130
Fig. 108 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	131
Fig. 109 – Fotografia da textura superficial da superfície obtida por spline após maquinagem	131
Fig. 110 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para os rasgos	132
Fig. 111 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno one-way	133
Fig. 112 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	133
Fig. 113 – Fotografia da textura superficial do rasgo após maquinagem	134

Fig. 114 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para os furos....	135
Fig. 115 – Aspecto do perfil de rugosidade na maquinagem em contorno Hélix na peça B_R	136
Fig. 116 – Aspecto do perfil de rugosidade na maquinagem em contorno zig-zag na peça B_S	136
Fig. 117 – Fotografia da textura superficial do furo após maquinagem	137
Fig. 118 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	139
Fig. 119 – Fotografia da textura superficial da	139
Fig. 120 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag	139
Fig. 121 – Fotografia da textura superficial da	139
Fig. 122 – Fotografia da textura superficial da superfície convexa e côncava.....	140
Fig. 123 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em scallop.....	140
Fig. 124 – Esquema que ilustra a importância da tolerância na maquinagem.....	142

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Máquinas na ESS	15
Tabela 2 – Software na ESS	15
Tabela 3 – Máquinas de injeção na Plasticum	16
Tabela 4 – Áreas de aplicação da HSC	20
Tabela 5 – Processos de maquinagem por abrasão, características comparadas	34
Tabela 6 – Materiais para acabamento	34
Tabela 7 – Classes de acabamento	35
Tabela 8 – Trajectórias de maquinagem no acabamento e comparação de designação PowerMill / MasterCam	64
Tabela 9 – Rugosidade média aritmética (R_a) associada aos processos de fabrico de acordo com a norma DIN 4766	72
Tabela 10 – Graus de rugosidade	74
Tabela 11 – Principais características do centro de maquinagem vertical	78
Tabela 12 – Características do material maquinado	79
Tabela 13 – Principais ferramentas utilizadas	79
Tabela 14 – Características do rugosímetro	80
Tabela 15 – Características da lupa estereoscópica	81
Tabela 16 – Estratégias usadas no acabamento da peça A	88
Tabela 17 – Parâmetros de corte	88
Tabela 18 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_C	99
Tabela 19 – Parâmetros de corte da peça B_C	99
Tabela 20 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_S	101
Tabela 21 – Parâmetros de corte da peça B_S	101
Tabela 22 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_R	103
Tabela 23 – Parâmetros de corte da peça B_R	103
Tabela 24 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_O	105
Tabela 25 – Parâmetros de corte da peça B_O	105
Tabela 26 – Observações resultantes dos diversos processos de simulação	107
Tabela 27 – Valores de rugosidade obtidos para maquinagens com e sem lubrificação	112
Tabela 28 – Valores de rugosidade obtidos para maquinagens sem lubrificação	116
Tabela 29 – Valores de rugosidade obtidos para maquinagens com lubrificação	118
Tabela 30 – Tempos de maquinagem na simulação e real	120
Tabela 31 – Valores de rugosidade obtidos para a superfície cónica	121
Tabela 32 – Tempos de maquinagem na simulação e real para a superfície cónica	123
Tabela 33 – Valores de rugosidade obtidos para a superfície convexa	124
Tabela 34 – Tempos de maquinagem na simulação e real para a superfície convexa	127
Tabela 35 – Tempos de maquinagem na simulação e real para a superfície côncava	128
Tabela 36 – Valores de rugosidade obtidos para a superfície obtida por spline	129
Tabela 37 – Tempos de maquinagem na simulação e real para a superfície obtida por spline	131
Tabela 38 – Valores de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias utilizadas no rasgo	132
Tabela 39 – Tempos de maquinagem na simulação e real para o rasgo	134
Tabela 40 – Valores de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias utilizadas nos furos	135
Tabela 41 – Tempos de maquinagem na simulação e real dos furos	137
Tabela 42 – Valores de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias	138
Tabela 43 – Valores de rugosidade média obtidos para as diferentes estratégias	141
Tabela 44 – Valores de profundidade máxima de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias	141
Tabela 45 – Tempos de maquinagem na simulação e real e para diferentes tolerâncias	143

1. Introdução

Actualmente, constata-se em todo o mundo, um crescimento acentuado na utilização de produtos plásticos injectados. Numa pesquisa realizada por FALLBOHMER (1996), na Alemanha, constatou-se que a indústria automóvel é a maior cliente de moldes, seguida pela indústria electrónica e de electrodomésticos. Foi também constatado que mais de 60% do tempo de fabricação de um molde é consumido na fabricação das partes funcionais, as quais incluem por vezes formas complexas e que 30% do custo de um produto plástico injectado é relativo ao fabrico do molde sendo apenas 5% importável ao aço utilizado.

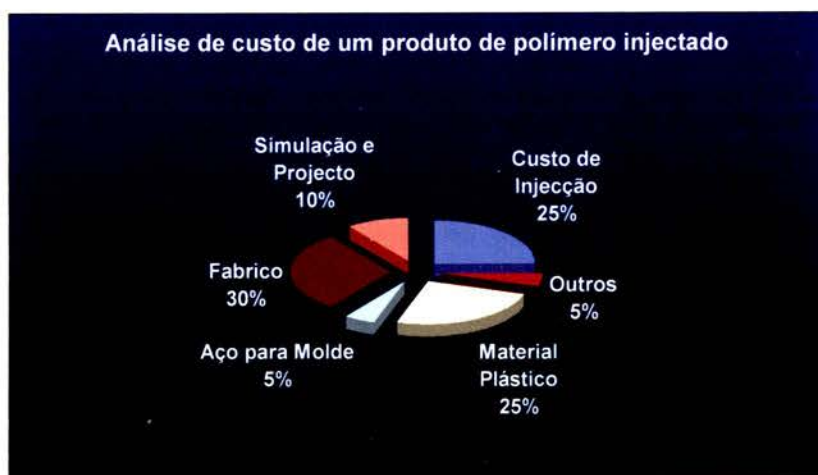


Fig. 1 – Análise de custo de um produto de polímero injectado
Fonte: BOUJELBENE et al (2004)

O fabrico de moldes é, normalmente, um processo demorado porque obriga a ajustes de precisão entre elementos funcionais e qualidades superficiais com elevado grau de exigência. Após maquinagem, a rugosidade deixada nas superfícies do molde não é satisfatória para este ser directamente utilizado na produção. Nestes casos, envolvem-se etapas de acabamento manual, realizadas por trabalhadores, que visam obter o acabamento superficial necessário para o molde entrar em funcionamento. Por mais hábil que seja o trabalhador, a precisão dimensional do molde fica comprometida e além disso, muito tempo de trabalho é dispendido nesta etapa de acabamento,

representando uma considerável parcela no custo final do molde, e o aumento do tempo de fabricação.

Segundo RIGBY (1993), durante a avaliação de custos numa indústria automóvel, constatou-se que o processo de acabamento manual em moldes consome cerca de 38% dos custos totais de trabalho. Isto demonstra que as tecnologias que auxiliem a fabricação de moldes, reduzindo etapas de manuais de acabamento, terão um futuro promissor.

Há que encontrar soluções por forma a reduzir ou mesmo eliminar estas etapas, já que os ciclos de vida dos produtos tendem a ser cada vez mais curtos, séries de produção mais pequenas, o que torna a produtividade e a flexibilidade de todo o processo de fabrico essencial para se obter uma boa economia total. Isto pode levar por vezes à substituição do aço pelo alumínio no fabrico de moldes com óbvias vantagens em termos de facilidade de maquinagem e de tempo. No entanto temos também o aparecimento de novos materiais de difícil maquinagem, como os aços pré-endurecidos e os aços-ferramenta endurecidos, usados cada vez com mais frequência!

Existem algumas possibilidades que visam o melhoramento da maquinagem, sendo talvez a mais atractiva a maquinagem a alta velocidade (HSC – High Speed Cutting).

Segundo FINZER (1998), a utilização da maquinagem a alta velocidade no fabrico de moldes é altamente eficaz já que aliada a uma elevada velocidade de corte existe uma elevada velocidade de rotação o que nos permite obter alta qualidade de acabamento superficial, permitindo uma redução dos tempos envolvidos nas operações manuais de acabamento da ordem de 80% e economia dos custos da ordem de 30%. Segundo GAMARRA (2003), a aplicação da maquinagem a alta velocidade pode representar reduções das operações de acabamento manual entre 60% a 100% reduzindo o tempo total de fabricação em cerca de 50%.

Na maquinagem vários factores devem ser tidos em conta, como: a máquina-ferramenta; a geometria da peça; a ferramenta de corte; os sistemas de fixação; a utilização de sistemas CAD/CAM; as estratégias de maquinagem, entre outros. Todos os factores que influenciam o processo de maquinagem devem ser cuidadosamente estudados para se obter uma aplicação eficiente. De igual forma, após uma breve análise geométrica da peça deverá ser possível seleccionar as estratégias mais convenientes, otimizar as operações de maquinagem de forma a minimizar o número de trocas de ferramenta e afinar os parâmetros do processo como avanços da ferramenta, penetramento, refrigeração, velocidade de rotação...

1.1 Situação actual da indústria Portuguesa de moldes

Portugal ocupa um lugar cimeiro a nível mundial, no âmbito da Indústria de Moldes para plásticos. A sua escolha baseia-se na perícia e experiência dos fabricantes de moldes portugueses, ao nível das normas de qualidade, assistência técnica, prazos de entrega, preços praticados e capacidade tecnológica. Actualmente, o sector de moldes em Portugal possui cerca de 300 empresas com a dimensão típica de PME's (Pequenas e Médias Empresas), empregando cerca de 7500 pessoas. No ano de 2004, cerca de 90% da produção de indústria de moldes portuguesa destinou-se à exportação, tendo como principais mercados a França, Alemanha, Espanha, Reino Unido e EUA. O futuro desta indústria é promissor por via do seu contínuo desenvolvimento tecnológico, do correcto planeamento da produção e controle de qualidade, da modernização constante dos equipamentos e processos em utilização e do investimento na qualificação dos recursos humanos.

2. Apresentação da empresa

2.1 Localização

A ERNESTO SÃO SIMÃO, LDA (ESS), fundada em 1947, é uma pequena empresa (PME) situada na Maia, que tem como actividade principal a **Concepção e Fabrico de Moldes** (CAE 29563), contando presentemente com 19 colaboradores.



Fig. 2 – Localização da ESS

A ESS tem cultivado no mercado uma imagem de empresa respeitadora, cumpridora de prazos, em evolução a nível tecnológico e com trabalhadores com grande experiência.

No ano de 2000, foi certificada pela entidade SGS ICS baseada na Norma ISO 9001:1995, preparando desta maneira o futuro que se avizinha muito competitivo!



2.2 Constituição da Empresa e Organização

A empresa é no momento presente constituída por 3 sócios sendo eles o Sr. Ernesto Reis São Simão, o Eng.º Manuel Ernesto de Afonseca São Simão e o Sr. José Manuel Lopes Almeida.

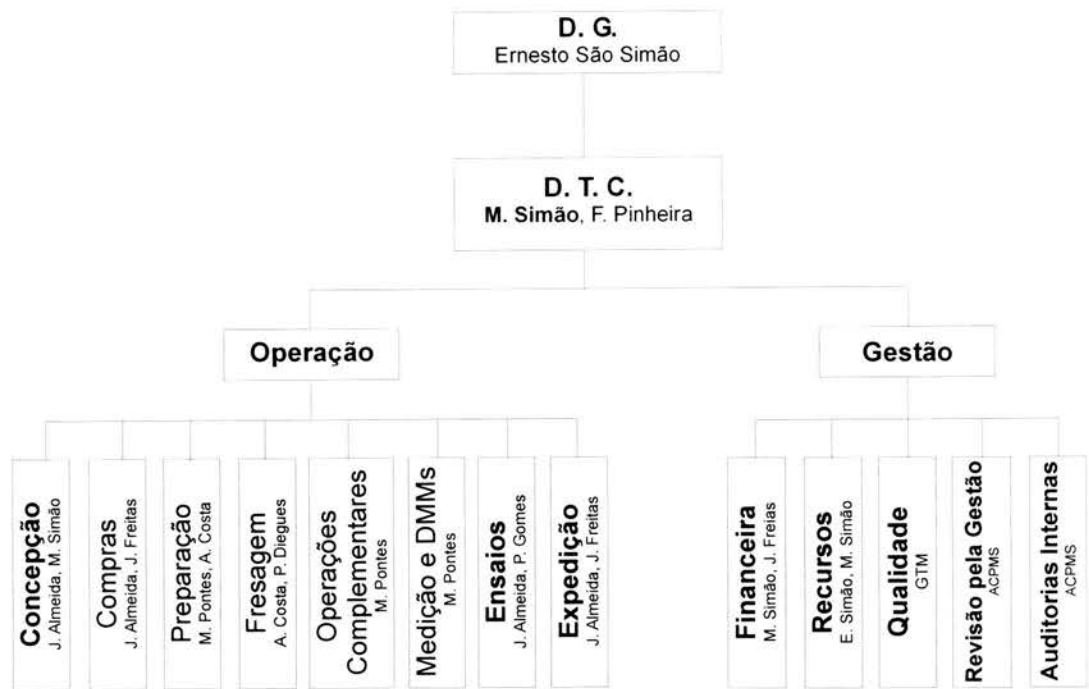


Fig. 3 – Organigrama da ESS

2.3 Principais Mercados

Os produtos fabricados na ESS são moldes de injeção. Cerca de 80% da sua produção destina-se a empresas industriais que utilizam plástico injectado, em diversas áreas de actividade: electricidade, electrónica, acessórios industriais, acessórios para tubos, electrodomésticos, embalagens, brinquedos, artigos domésticos, etc.

Os principais países compradores são, presentemente, a França, USA, Canadá, Holanda, Bélgica, países da EU em geral, Argélia, Angola, etc.

2.4 Equipamento Produtivo

O equipamento produtivo é constituído essencialmente de máquinas da indústria metalomecânica, sobretudo fresadoras, electroerosoras, rectificadoras e tornos, apoiados por equipamento ligeiro. Em apoio à produção existem também vários computadores e periféricos informáticos.

Tabela 1 – Máquinas na ESS

Máquinas na ESS			
	Marca	Modelo	Qt.
Fresadoras CNC	Deckel Maho	f220 linear	1
	Maho	mh600e	1
	Fadal	vmc4020	1
Electroerosoras	Ona	compact2	1
	Charmilles	Isopulse P25	1
Fresadoras	Zayer	5bm	1
	Bridgeport	x166-03	2
Torno Mecânico	Harrison	190	1
Pantógrafo	Parpas	p.t. 15	1
	Deckel	kf 12	1
Rectificadoras	Okamoto	acc-450dxa	1
	Danubat	rt-1200	1
	Ger	s60/40	1
Furadoras	Kitchen Walker	e-2	1
	Mas	vr2	1

Tabela 2 – Software na ESS

Software na ESS	
	Software
Modelação	SolidWorks 2004
	Rhinoceros 3.0
Projecto	Autocad 2004
Programação CNC	MasterCam V9.1

2.5 A Plasticum

Anexa à ESS existe a empresa Plasticum, independente e que se dedica à actividade de moldação por injeção. São sócios dessa empresa o Sr. Ernesto São Simão e o Eng.º Manuel São Simão, que nela detêm cotas iguais. A Plasticum nasceu dentro da ESS e resultou da necessidade de realizar ensaios aos moldes produzidos na ESS e de criar sinergias resultantes da complementaridade das actividades económicas das duas empresas. De ano para ano a Plasticum tem vindo a ganhar maior autonomia, a ponto de ela própria ser simultaneamente fornecedor (de ensaios) e cliente da ESS, ao comprar moldes para os produtos que fabrica.

A Plasticum tem o seu próprio Sistema de Gestão da Qualidade, independente da ESS.

www.plasticum.com

Tabela 3 – Máquinas de injeção na Plasticum

Máquinas na PLASTICUM		
Marca	Modelo	Força de Fecho (ton)
Arburg	520C	200
	220S	25
Battenfeld	BA750CDK	75
Biraghi Monza	380 Linea Horizon	380
Boy	22S	22
Engel	ES600	125

3. Revisão da Literatura

3.1 Maquinagem por Arranque da Aparar

O torno é mais antiga das máquina-ferramenta conhecida e, na sua forma primitiva foi um torno de árvores. Os primeiros tornos foram aplicados ao trabalho da madeira, mas rapidamente se chegou à maquinagem de metais. Em 1677, o inglês Maxon, refere pela primeira vez a construção de um torno mecânico de pequenas dimensões. Por volta de 1740 há também referências da construção de um torno em França mas só mais tarde e por Clément se deu a invenção do primeiro torno de movimentos regulados automaticamente. Daqui em diante, após a introdução das máquina-ferramenta começaram investigações quer a nível de melhores materiais para ferramentas, formação da aparar, lubrificação e refrigeração no arranque da aparar, temperaturas geradas no arranque da aparar...

Num estudo realizado por Salomon, foi utilizada uma ferramenta de grande diâmetro para a maquinagem de aços e materiais não-ferrosos. Na maquinagem as velocidades de corte foram: 440 m/min (aço); 1600 m/min (bronze); 2480 m/min (cobre); 16500 m/min (alumínio). O estudo foi baseado em curvas de velocidade de corte vs temperatura.

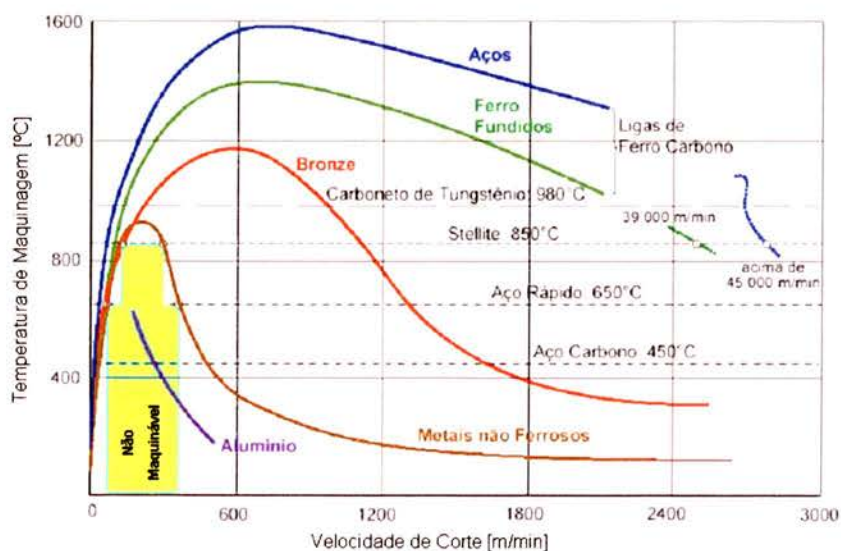


Fig. 4 – Variação da temperatura com a velocidade de corte
Fonte: SCHULZ, H. (1999)

A principal conclusão tirada deste estudo é que a partir de determinadas velocidades de corte, em geral as temperaturas tendem a diminuir. Esta diminuição de temperatura com o aumento da velocidade de corte pode ser explicada pelo facto da maior parte do calor gerado ser removido com a apanha. Este facto tornou-se numa das principais características do processo de maquinagem a alta velocidade.

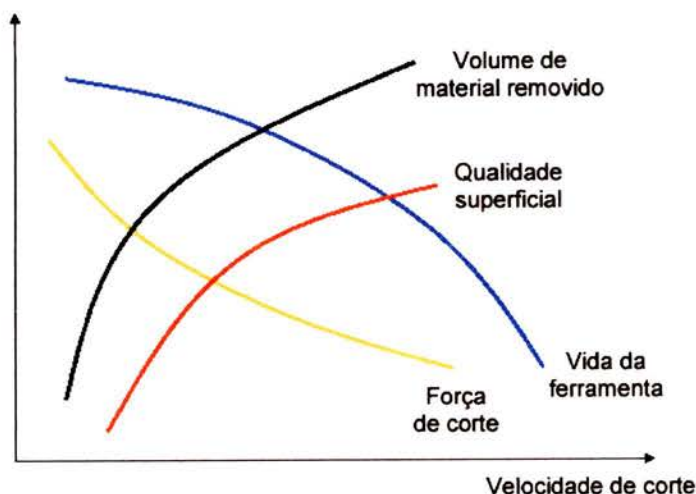


Fig. 5 – Comportamento do processo HSC
Fonte: SCHULZ, H. (1996)

Segundo SCHULZ (1996), a maquinagem a alta velocidade, provoca reduções da força de maquinagem (fruto das elevadas velocidades de rotação da ferramenta diminuimos o avanço por aresta) e também da vida da ferramenta mas aumenta o volume de material removido e a qualidade superficial obtida após maquinagem.

A HSC tem associadas duas condições básicas que são as elevadas velocidades de rotação da árvore e os elevados valores do avanço. Contudo estas duas condições estão relacionadas com o tipo de material, a geometria da peça e mesmo o tipo de operação de maquinagem aplicado.

A seguir são apresentados dois gráficos onde se comparam as gamas de velocidade de corte para diferentes materiais e as diferentes velocidades de corte para diferentes operações de maquinagem.

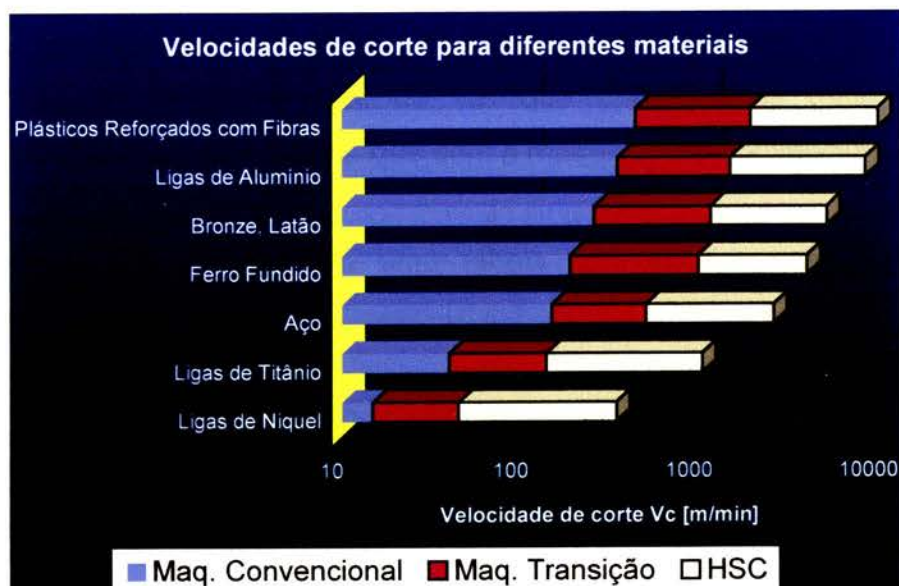


Fig. 6 – Gama de velocidades de corte para maquinagem de diferentes materiais.
Fonte: FALLBOHMER et al, (2000)

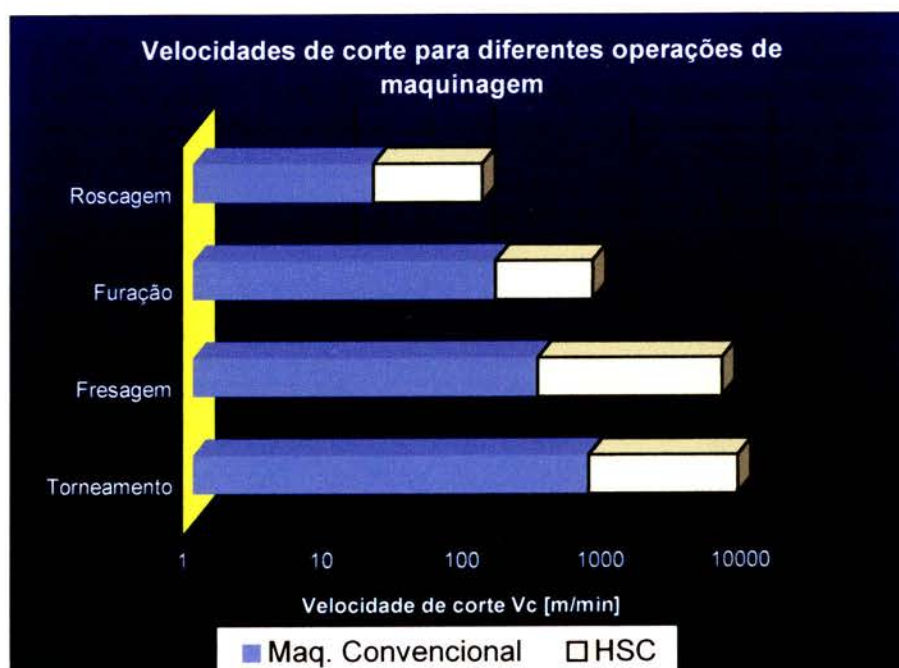


Fig. 7– Gama de velocidades de corte para diferentes operações de maquinagem
Fonte: SELADA et al, (2000)

Podemos constatar que para o mesmo material e na maquinagem convencional, conseguimos velocidades de corte melhores no caso de torneamento e menores no caso da roscagem. Se comparamos o torneamento a alta velocidade com a fresagem a alta velocidade essa diferença é mínima com vantagem novamente para o torneamento. Em qualquer das operações e para qualquer material é fácil de ver que conseguimos muito maiores velocidades de corte com a HSC que com a maquinagem convencional.

A seguir é apresentada uma tabela com os principais campos de aplicação da tecnologia HSC.

Tabela 4 – Áreas de aplicação da HSC

Vantagens HSC	Áreas de aplicação	Exemplos
Grande remoção de material	Ligas leves de metal Ferro fundido	Indústria aeroespacial Indústria de moldes
Alta qualidade de acabamento	Maquinagens de precisão Peças especiais	Indústria óptica e Mecânica fina
Baixas forças de corte	Peças com espessuras finas de parede	Indústria aeroespacial Indústria automóvel
Alta-frequência de excitação	Maquinagens sem vibração em peças de difícil fabrico	Mecânica de precisão Indústria óptica
Dissipação de calor com a apara	Maquinagem com baixas temperaturas de processo	Mecanismos de precisão Ligas de magnésio

As vantagens da utilização da HSC são também visíveis nos exemplos a seguir ilustrados. Foram maquinadas duas ferramentas, uma pelo processo convencional e outra pela tecnologia HSC,

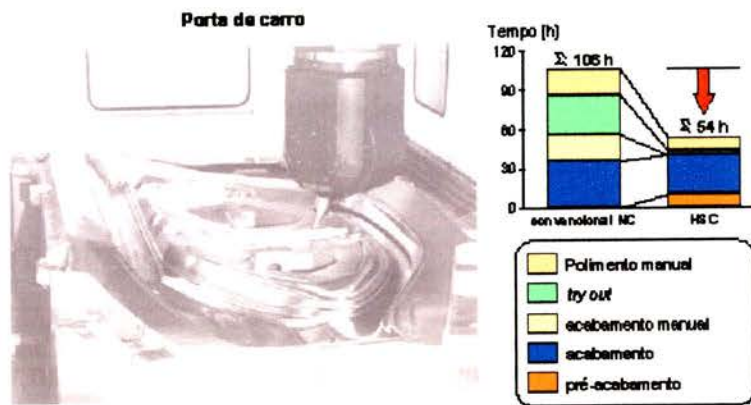


Fig. 8 – Processo de maquinagem convencional vs HSC
Fonte: FINZER, T. (1998)

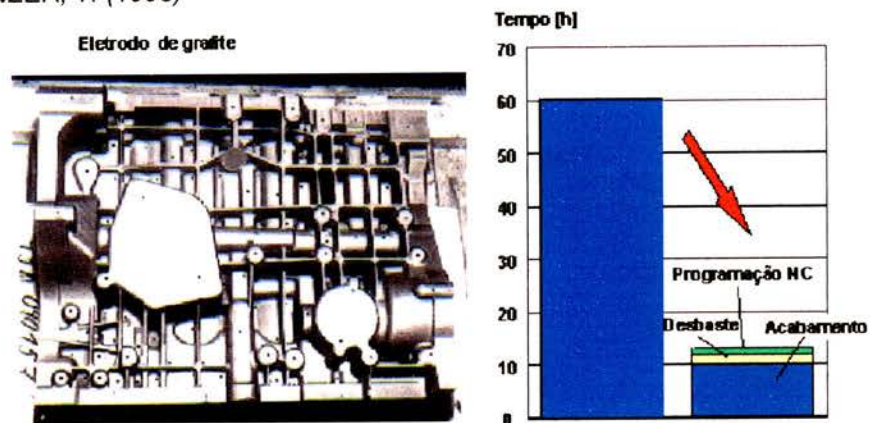


Fig. 9 – Fabrico de eléctrodos de grafite
Fonte: FINZER, T. (1998)

Na figura 8 observou-se uma redução de 52 horas do processo de maquinagem convencional para o HSC. Esta redução não se deve ao tempo de maquinagem propriamente dito, mas sim à eliminação do polimento manual e as etapas de *try-out*, conseguindo com isto, a redução do tempo de fabrico. A figura 9 compara também os dois processos de maquinagem, envolvendo agora, o fabrico de um eléctrodo de grafite. Devido às características favoráveis de maquinagem deste material, reduziu-se em aproximadamente 50 horas o tempo de fabrico.

3.2 Aspectos Construtivos da Máquina-ferramenta

As peças que irão, mais adiante, ser analisadas, foram produzidas na ESS com o auxílio de um centro de maquinagem vertical. Assim iremos analisar mais a fresagem convencional ou de transição, comparando por vezes com a maquinagem a alta velocidade.

3.2.1 Elementos constituintes

As máquinas-ferramenta CNC podem ser consideradas como um conjunto de elementos tecnológicos, os quais interagem para obtenção de um determinado produto.

Numa máquina deste tipo temos:

- Elementos estruturais
 - Componentes fixos (barramento e blindagem);
 - Componentes móveis (mesa e cabeçote);
- Elementos cinemáticos
 - Motores;
 - Transmissões;
 - Fusos;
- Elementos de controlo
 - Controlador;
 - Sensores;
 - Régua ótica;
- Acessórios
 - Armazém de ferramentas;
 - Medição de ferramentas;
 - Apalpadores;
 - Sistemas de alimentação de material;

Os elementos estruturais são os responsáveis pela estabilidade da máquina durante o processo de corte. Também devem permitir um fácil posicionamento das peças e fácil acesso para operações de manutenção. Podemos encontrar centros de maquinagem com diferentes tipos de estrutura e dimensões. Adquirir uma máquina deve ser algo pensado e ponderado já que devido à diversidade existente podemos cair no erro de adquirir qualidades que não necessitamos mas que iremos pagar.

Os centros de maquinagem podem ser considerados pelo tipo de mesa:

- Mesa móvel
 - Zona de trabalho mais limitada que na mesa fixa;
 - Maior flexibilidade;
 - Maior capacidade de aceleração e desaceleração (menores massas na mesa implicam menores inércias);
- Mesa fixa
 - Maior zona de trabalho que na mesa móvel;
 - Maiores massas sobre a mesa;
 - Movimentos do cabeçote em X, Y e Z;

Os elementos cinemáticos são responsáveis pelos accionamentos e movimentos realizados pela máquina. Numa máquina temos movimentos de rotação ou angulares (árvore) e movimentos de translação ou lineares (mesa, cabeçote, coluna).

Tradicionalmente, o accionamento para movimentação de uma parte da máquina, como a mesa, por exemplo, é dado por um servomotor conectado a um fuso de esferas recirculantes.

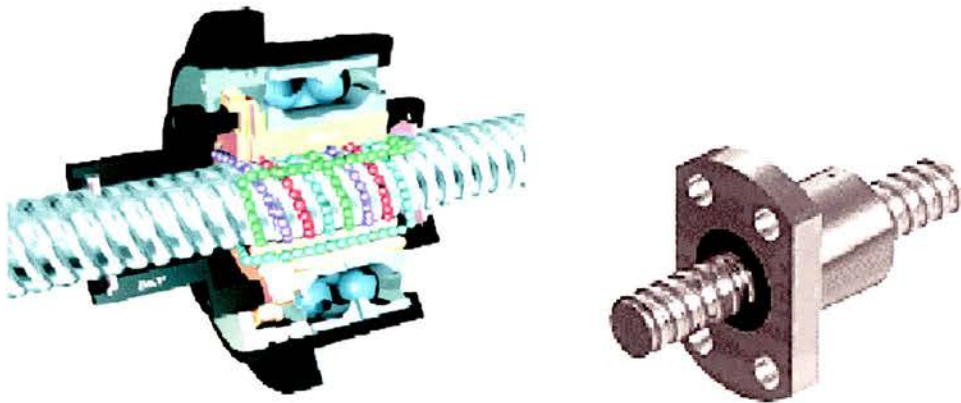


Fig. 10 – Accionamento por um fuso de esferas recirculantes

Desta forma, em máquinas-ferramenta, o movimento de rotação do eixo do servomotor é transformado em movimento linear da parte móvel da máquina. Este é o método mais aplicado para o accionamento de máquinas CNC, fazendo uso de motores eléctricos de corrente alternada. Os sistemas convencionais de movimentação são os actuais factores limitantes para o sistema de accionamento, no que se refere à velocidade, rigidez sob carga, distância de deslocamento e dinâmica. As folgas do fuso de esferas do redutor e do acoplamento afectam a resposta do sistema. Desta maneira, é necessário transformar movimentações angulares (servomotor) em movimentações lineares para o deslocamento da mesa da máquina.

A aplicação de motores lineares é completamente distinta do sistema de transmissão por esferas recirculantes, por não haver a necessidade desta transformação (rotação em translação).

A estrutura do motor é constituída de duas partes principais: a parte móvel, onde a bobina está instalada, e a placa magnética fixa (Figura 11). Um corpo magnético permanente de alto desempenho é usado para a obtenção da máxima força por unidade de área. Mecanismos de refrigeração ficam alojados na parte móvel para a remoção do calor gerado.

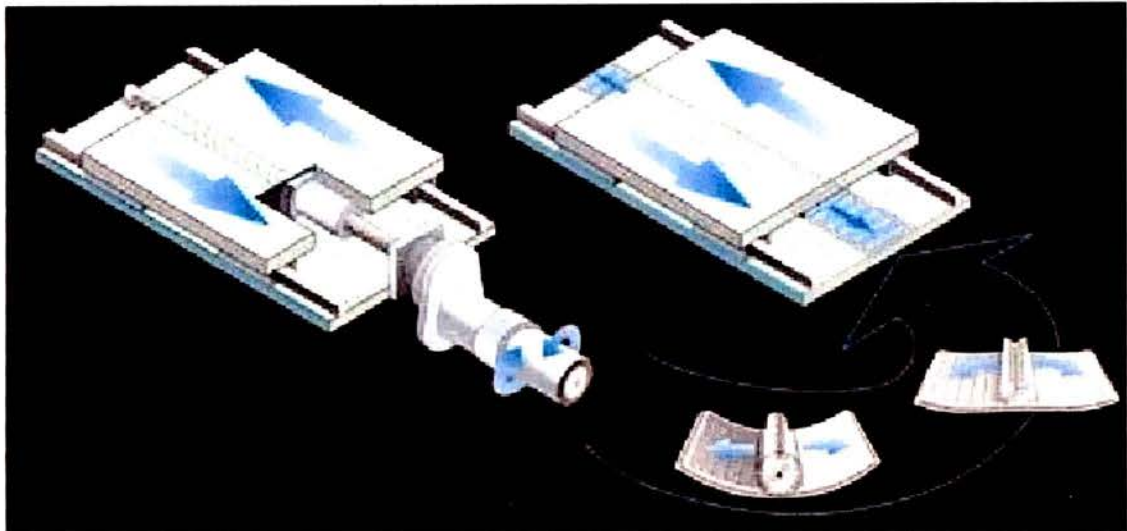


Fig. 11 – Comparação entre motores angulares e lineares

Fonte: MODERN MACHINE SHOP ONLINE, www.mmsonline.com

As vantagens do sistema de motor linear sobre o sistema de motor rotativo são:

- Maior velocidade e aceleração;
- Maior exactidão e maior rigidez;
- Baixa ou nula manutenção;
- Curso “ilimitado”;
- Operação silenciosa;
- Menor quantidade de peças.

As principais desvantagens da utilização de motores lineares são:

- Estrutura magnética aberta causando alta atracção magnética;
- Geração de grande quantidade de calor (deverá ser removido do motor);
- Elevado custo.

Os elementos de controlo são responsáveis por assegurar que todos os sistemas se encontram operacionais (sistemas de trabalho e de segurança). Os controladores podem ser separados em 2 grupos, o comando numérico (CN) e o autómato (PLC). O CN assegura a interface com o utilizador através do monitor e do teclado, além disso controla os eixos, ou seja envia o sinal eléctrico adequado para o servocontrolador que por sua vez controla o servomotor de cada eixo. O sinal eléctrico enviado para o servocontrolador é controlado em malha fechada, a alimentação é realizada por réguas ópticas incrementais associadas a cada eixo. É também o CN que interpreta os programas peça de forma a efectuar os movimentos adequados de cada eixo e da árvore. O CN gere ainda os ficheiros (ficheiros de sistema, programas peça, etc.) armazenados no disco rígido do controlador e controla os dispositivos de comunicação. O PLC comanda todos os dispositivos auxiliares do centro de maquinagem, como por exemplo sensores, electroválvulas e luzes sinalizadoras. O controlo destes dispositivos é programável bastando para isso alterar o programa no PLC. Enquanto que o programa do CN é o mesmo para uma grande variedade de máquinas, o programa PLC tem de ser desenvolvido especificamente para cada máquina. É onde está armazenada a memória do CNC.

Os acessórios são todo um conjunto de ferramentas que apesar de não fazerem parte do equipamento standard da máquina, podem aumentar em muito o rendimento desta.

O armazém de ferramentas é um bom exemplo disso mesmo. Se após cada operação de maquinagem, fosse necessário trocar a ferramenta, seria imperativo controlar a sua altura (medir a ferramenta). Iria ser gasto, no mínimo, uns 3 minutos. Com um armazém de ferramentas, esta troca de ferramentas fica reduzida a uns 10 segundos já que todas as ferramentas aí existentes já estão medidas.

O armazém de ferramentas, tradicionalmente pode ser de 2 tipos:

- Tambor rotativo
- Carrocel

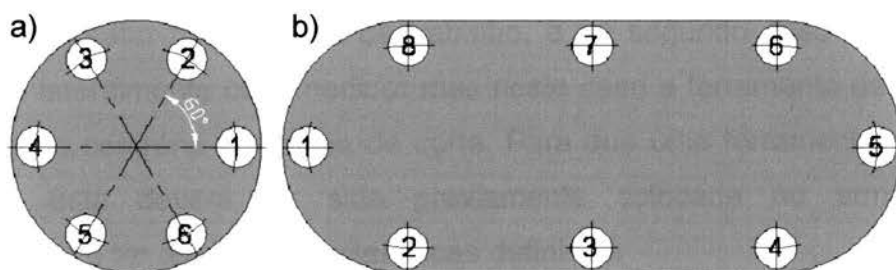
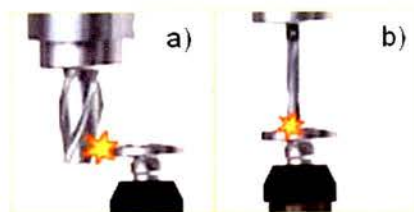


Fig. 12 – Esquema de armazém de ferramentas. a) tambor rotativo; b) carrocel

Em cima, temos esquemas simples de dois tipos de armazém de ferramentas. Estes armazéns têm uma capacidade de armazenamento que varia entre as 6 ferramentas a 100 ferramentas.

Outro acessório muito importante é o medidor de ferramenta que como o próprio nome indica nos permite realizar a medição das ferramentas de uma forma simples e com elevado rigor dimensional.



*Fig. 13 – Dispositivo de medição de ferramentas
a) medição de diâmetro da ferramenta
b) medição do comprimento da ferramenta*

Esta medição da ferramenta é feita quer em altura, quer em diâmetro. No primeiro caso a ferramenta, sem estar em rotação, contacta com o medidor, que deverá estar fixo à mesa de trabalho, e no segundo caso a ferramenta contacta lateralmente com medidor mas neste caso a ferramenta deverá estar em rotação contrária à rotação de corte. Para que uma ferramenta possa ser medida, esta deverá ter sido previamente colocada no armazém de ferramentas e ter as suas características definidas.



Outro acessório importante é o apalpador. Este dispositivo é de extrema importância porque nos permite um centramento da peça na mesa, ou seja, após o material estar apertado na mesa, com este dispositivo conseguimos localizar os limites do bloco a trabalhar e o ponto zero da peça. Este ponto é depois assumido pela máquina, como ponto zero que deverá ser o mesmo que se usou aquando da programação de maquinagem.

Fig. 14 – Apalpador

3.3 Maquinagem por Electroerosão (EDM)

A electroerosão é um processo complexo, em grande parte não visível. Para que a electroerosão ocorra, é necessário que os materiais envolvidos (peça a ser maquinada e ferramenta) sejam bons condutores de electricidade. A ferramenta que produz a erosão, ou seja, o desbaste da superfície maquinada, é o eléctrodo.

Peça e eléctrodo são mergulhados num reservatório que contém um fluido isolante, isto é, não condutor de electricidade, chamado dieléctrico. Em geral, são utilizados como dieléctricos o óleo mineral e o querosene. Este requer cuidados especiais, pois é inflamável e exala um odor forte, prejudicial à saúde e ao ambiente. Tanto peça como eléctrodo estão ligados a uma fonte de corrente contínua. O eléctrodo deverá ter polaridade positiva (ânodo) e a peça polaridade negativa (cátodo) para uma melhor erosão da peça e preservação do eléctrodo. Uma das peças deve ter ligação a um interruptor, que acciona e interrompe o fornecimento de energia eléctrica para o sistema. Ao ser ligado o interruptor, origina-se uma tensão eléctrica entre o eléctrodo e a peça. De início, não há passagem de corrente, já que o dieléctrico actua como isolante. Quando o espaço entre a peça e a ferramenta é diminuído a uma determinada distância, o dieléctrico passa a actuar como condutor, formando uma “ponte” de iões entre o eléctrodo e a peça. Produz-se, então, uma descarga que superaquece a superfície do material, fundindo-a. Estima-se que, dependendo da intensidade da corrente aplicada, a temperatura na região da descarga possa variar entre 2.500°C e 50.000°C.

Este gradiente de temperaturas provoca graves problemas superficiais que podem ser divididos pelas três camadas:

- **Camada exterior ou branca**, esta camada é resultado da fusão e ressolidificação do material. A sua espessura chega a atingir 0.3 mm na erosão em desbaste nos aços temperados.

- **Camada intermédia ou temperada**, camada muito dura sem plasticidade e com fortes tensões de tracção, muito susceptíveis de provocar fissuras ou fracturas. Resulta de ter estado como o nome sugere, a uma temperatura igual ou superior à de austenitização (para têmpera), isto é, tem características duma estrutura martensítica, em parte sobreaquecida, sem revenido. A sua espessura pode atingir 0.05 mm na erosão em desbaste de aços temperados.
- **Camada interior termicamente afectada** esta camada tem estrutura heterogénea em termos de dureza. No entanto a dureza em média é inferior à dureza das camadas anteriores.

A seguir é mostrada uma imagem onde é visível a variação da dureza de uma superfície maquinada por electroerosão

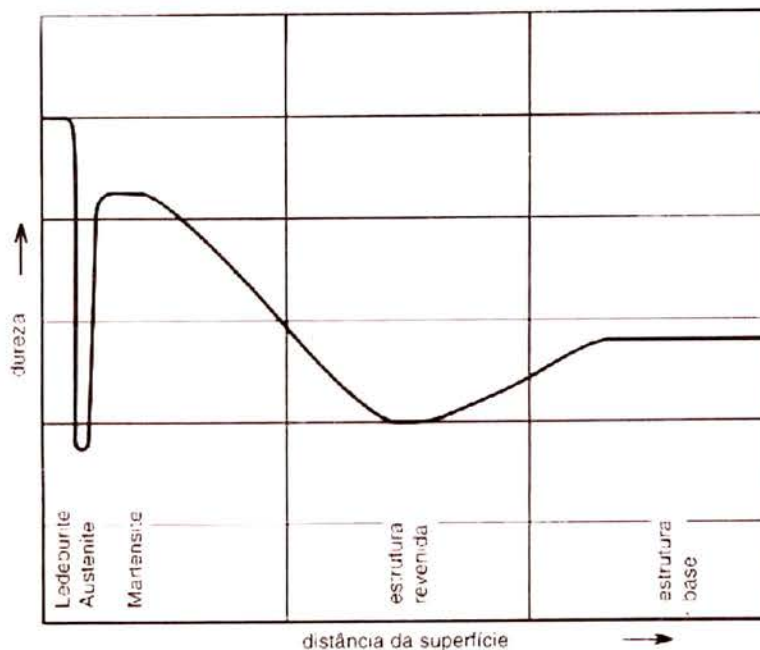


Fig. 15 – Dureza de uma superfície maquinada por electroerosão

O processo de erosão ocorre simultaneamente na peça e no eléctrodo. Com ajustes convenientes da máquina, é possível controlar a erosão, de modo que se obtenha até 99,5% de erosão na peça e 0,5% no eléctrodo.

A distância mínima entre a peça e a ferramenta, na qual é produzida a descarga, é chamada GAP (gap = folga) e depende da intensidade de corrente aplicada. O GAP é o comprimento da descarga e pode determinar a rugosidade da superfície da peça. Com um GAP alto, o tempo de maquinagem é menor mas a rugosidade é maior. Já um GAP mais baixo implica maior tempo de maquinagem mas permite obter menor rugosidade de superfície.

As partículas fundidas, desintegradas na forma de minúsculas esferas, são removidas da região por um sistema de limpeza e, no seu lugar, fica uma pequena cratera. O dieléctrico, além de actuar como isolante, participa nesta limpeza e ainda refrigera a superfície maquinada. O fornecimento de corrente é interrompido pelo afastamento do eléctrodo. O ciclo recomeça com a reaproximação do eléctrodo até à distância correspondente ao GAP, provocando uma nova descarga.

A duração da descarga eléctrica e o intervalo entre descargas são medidos em micro-segundos e controlados por comandos electrónicos. Descargas sucessivas, ao longo de toda a superfície do eléctrodo, fazem a maquinagem da peça. A frequência das descargas pode chegar até 200 mil ciclos por segundo. Na peça fica reproduzida uma matriz, que é uma cópia fiel do eléctrodo, porém invertida.

Para certas finalidades, como a maquinagem de cavidades passantes e perfurações transversais, é preferível usar o processo de electroerosão por fio.

Os princípios básicos da electroerosão por fio são semelhantes aos da electroerosão por penetração. A diferença é que, neste processo, um fio de latão electricamente carregado, atravessa a peça submersa em água desionizada, num movimento constante, provocando descargas eléctricas entre o fio e a peça, as quais cortam o material. Para permitir a passagem do fio, é feito previamente um pequeno orifício no material a ser maquinado. O corte a fio é programado por computador, permitindo o corte de perfis complexos e com exactidão dado que a renovação contínua do eléctrodo garante a manutenção da sua geometria.

3.3.1 Eléctrodo: a ferramenta da electroerosão

Em princípio, todos os materiais condutores de electricidade podem ser usados como eléctrodo. Mas tendo em vista que na fabricação de uma ferramenta por electroerosão o preço de confecção do eléctrodo representa uma parcela significativa dos custos do processo, é importante escolher com cuidado o material a ser utilizado e o método de maquinagem.

Os melhores materiais para produção de eléctrodos são aqueles que têm ponto de fusão elevado, são bons condutores de térmicos e têm boa condutividade eléctrica. De um modo geral, os materiais para eléctrodos podem ser agrupados em três categorias: metálicos, não-metálicos e compósitos metálicos/não-metálicos.

Entre os materiais metálicos, os mais utilizados são: cobre electrolítico, cobre tungsténio e cobre sinterizado. Eléctrodos feitos desses materiais caracterizam-se por apresentarem óptimo acabamento e mínimo desgaste durante o processo de electroerosão, são de fácil maquinagem e baixa resistência eléctrica.

Entre os materiais não-metálicos, a grafite é o principal. Este é um material de fácil maquinagem, porém muito quebradiço e que exige algum cuidado com os pós libertados durante a maquinagem. Os eléctrodos de grafite são muito resistentes ao choque térmico, conservam suas qualidades mecânicas a altas temperaturas, praticamente não se deformam e são leves. Entretanto, são abrasivos, não podem ser moldados ou conformados e não aceitam redução por ácido.

Os compósitos metálicos/não-metálicos são uma mistura das propriedades de dois ou mais materiais. O cobre/grafite é exemplo de um compósito metálico/não-metálico.

Para uma operação de electroerosão em desbaste, o eléctrodo de grafite é mais vantajoso que o de cobre já que se consegue uma elevada velocidade de penetração, no entanto sofre um maior desgaste. Para acabamento, o cobre garante melhores resultados.

No caso dos eléctrodos serem de dimensões razoáveis poderá ser vantajoso utilizar a grafite em vez de cobre. As principais razões são: o menor

peso da grafite quando comparado com o do cobre e também o menor custo volúmico.

Os eléctrodos podem ser produzidos pelos métodos convencionais de maquinagem (fresagem, torneamento, aplainamento), HSC, fundição, extrusão e por técnicas de prototipagem rápida.

3.4 Maquinagem por Abrasão

Nos diversos processos de trabalho de metais por abrasão, o abrasivo pode actuar a pequena ou elevada velocidade (0.1 m/s a 60 m/s), sob a forma de aglomerado (mós ou pedras) ou no estado livre, geralmente em suspensão num fluído de corte e segundo uma determinada trajectória orientada mecanicamente ou não.

Assim, na maquinagem por abrasão podemos distinguir: a rectificação, a rodagem, o superacabamento e o polimento.

A rectificação teve origem na necessidade de obter não só o acabamento superficial exigido, mas também da necessidade de se corrigirem as deformações provocadas pelos tratamentos térmicos ou termoquímicos efectuados nas peças após maquinagem e em geral para se obterem tolerâncias dimensionais e geométricas mais apertadas. As mós são as melhores ferramentas para trabalhar superfícies endurecidas e conforme o acabamento pretendido devemos escolher a mó e o processo de trabalho. Na rectificação, parte da energia fornecida pela máquina é transformada em calor por atrito de escorregamento (fricção), sendo outra utilizada na remoção do material. A maior parte desta energia é absorvida pelo material removido, sendo a restante transmitida à peça provocando uma subida da temperatura. O calor dissipa-se rapidamente para o interior da peça a partir do ponto de contacto com a mó, podendo a temperatura atingir em casos extremos, 1100 a 1200°C. As estrias de rectificação são geralmente paralelas entre si e perpendiculares à direcção de rotação da mó. Estas não são sempre visíveis a olho nú. A sua remoção só é possível com mós macias, de granulometria fina,

com boa refrigeração e com espessuras de corte inferiores ou iguais a 0.005mm.

A rodagem tem por objectivo melhorar a qualidade superficial das peças reduzindo as estrias deixadas na rectificação.

O superacabamento tem como principal função a eliminação da camada de metal modificado pela rectificação a elevada velocidade.

O polimento é uma operação a que se submetem peças em que o acabamento superficial deve ser óptimo, mas sem imposição do carácter geométrico, quer de forma, quer dimensional. O polimento de uma qualquer superfície moldante deve ser efectuado na direcção da desmoldação da peça. Desta forma as estrias da superfície ficam orientadas de modo a não criar na superfície da peça “micro contra-saídas”. O operador deve-se munir do desenho da peça e, se possível, da peça plástica, para se inteirar da forma a polir.

Tabela 5 – Processos de maquinagem por abrasão, características comparadas

Processos de maquinagem por abrasão	Vc (m/s)	Tipo de abrasivo	Trajectória
Rectificação	45	Mó	Circular ou rectilínea
Rodagem	1	Aglomerado ou livre	Cruzada
Superacabamento	0.5	Pedra	Sinusoidal
Polimento	50	Livre	Livre

A sequência de operações a dar a uma peça para obter um determinado acabamento superficial segundo a norma **SPI-SPE**, deve ser:

Tabela 6 – Materiais para acabamento

MATERIAL	GRANULOMETRIA	CÓDIGO SPI – SPE
Pedra	# 320	C – 3
	# 400	C – 2
	# 600	C – 1
Lixa	# 320	B – 3
	# 400	B – 2
	# 600	B – 1
Massa diamantada	# 15	A – 3
	# 6	A – 2
	# 3	A – 1

Tabela 7 – Classes de acabamento

ESCALA ORIGINAL SPI-SPE	Código SPI-SPE	GRANULOMETRIA PROCESSO DE OBTENÇÃO DE GRAU DE ACABAMENTO	RUGOSIDADE Rz [µm]	ASPECTO FINAL
#1	A – 1	Grau 8000 / massa diamantada ≤ # 3	0 - 1	Aspecto de obtenção demorada e cara.
#2	A – 2	Grau 4000 / massa diamantada de # 6	1 - 2	Aspecto espelhado podendo chegar a óptico; A qualidade do aço a polir é importante.
	A – 3	Grau 1200 / massa diamantada de # 15	2 - 3	
#3	B – 1	Lixa de 600	2 - 3	Retira todas as marcas de maquinação; Dá bom acabamento superficial ao molde; Peça moldada reflecte a luz com algum brilho.
	B – 2	Lixa de 400	4 - 5	
	B – 3	Lixa de 320	9 - 10	
#4	C – 1	Pedra de 600	10 - 12	Retira todas as marcas de maquinação; Dá um bom acabamento superficial ao molde; Peça moldada sem brilho.
	C – 2	Pedra de 400	25 - 28	
	C – 3	Pedra de 320	38 - 42	
#5	D – 1	Granalhagem c/ jacto de micro esferas de vidro (Dist.200mm; Pressão 7Kg/cm2: 5 seg.)	10 - 12	Fins decorativos; Ajuda a esconder chupados e outras imperfeições; Peça moldada baça e sem reflexo.
	D – 2	Granalhagem com óxido de alumínio # 240 (Dist.130mm; Pressão 7Kg/cm2: 6 seg.)	26 - 32	
#6	D – 3	Granalhagem com óxido de alumínio # 24 (Dist.130mm; Pressão 7Kg/cm2: 5 seg.)	190 – 230	

3.5 Formação da Apra

Na prática industrial quase todas as superfícies técnicas funcionais são obtidas por maquinagem e não possuem uma forma geométrica exacta. Qualquer que seja o processo de corte por arranque de apra, este deixa sempre as suas impressões, tensões, modificações na superfície do aço e da sua micro-estrutura. Estes problemas são inevitáveis, dado serem uma consequência do próprio mecanismo de formação da apra. A sua intensidade é tanto maior quanto mais violenta for a maquinação.

A formação da apra, quer contínua quer descontínua, pode ser descrita como um processo periódico, com cada ciclo dividido em 4 etapas distintas sendo que na primeira etapa a ferramenta penetra na peça provocando o encalcamento de uma porção de material contra a face de ataque, na segunda etapa há uma deformação sem perda de coesão entre o material e a peça, na terceira uma ruptura que poderá ser parcial ou total e por fim o escorregamento sobre a face de ataque da ferramenta.

Como já foi referido, a maquinagem tradicional por arranque da apra e muitas vezes os tratamentos térmicos, deixam imperfeições na superfície da peça que obrigam a operações de acabamento manual, que vão incrementar os custos finais.

Estas situações, não podendo ser evitadas, podem ser diminuídas através do afinamento dos parâmetros de corte, de uma correcta lubrificação, da eliminação de possíveis vibrações na máquina na ferramenta e na peça e ainda de uma estratégia de maquinagem correcta. Na maioria dos casos, não é só a peça que é reflexo de um mau afinamento dos parâmetros. Podemos encontrar sintomas disso mesmo nas ferramentas e na própria apra.

3.5.1 Noções sobre a apara produzida

As características físicas da apara produzida durante as operações de maquinagem, a sua forma, volume e cor reflectem as características do processo de maquinagem que as gerou. Pequenas modificações observadas na apara podem ser reflexo da qualidade superficial na peça, assim como alterações na vida da ferramenta de corte e desvio dimensional.

Num estudo realizado por *NING (2001)*, utilizou-se para maquinagem uma fresa de topo plano, considerando o eixo da ferramenta de corte perpendicular a superfície maquinada. Nos resultados, são apresentadas diferentes formas de apara que estão relacionadas com estabilidade da maquinagem. A Figura 16 a) apresenta a foto de uma apara gerada por uma maquinagem considerada estável, devido à qualidade superficial obtida. A apara é enrolada possuindo forma próxima de um cone. A Figura 16 b) apresenta um esboço de actuação da ferramenta durante o corte estável.

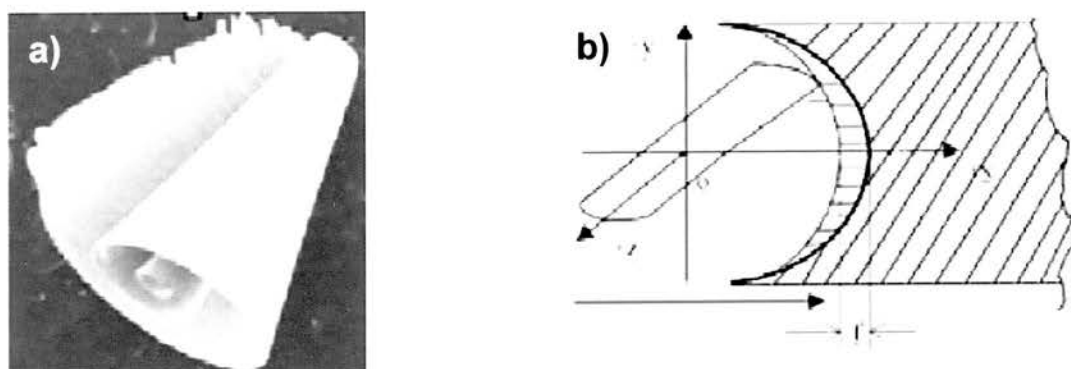


Fig. 16 – Características de um processo de maquinagem estável

a) Apara cônica

b) Processo de corte estável

Fonte: NING, Y. (2001)

Atribuindo parâmetros de corte mais severos, o autor obteve um processo de corte considerado não-estável, resultando numa qualidade superficial de baixa e alterações no mecanismo de geração da apara. Nesta condição de maquinagem verificaram-se acentuadas vibrações repercutindo na forma da apara, como ilustrado pela Figura 17 a).

A aparta é do tipo agulha, proveniente da vibração da ferramenta (e/ou da peça) durante a actuação de uma aresta de corte (Figura 17 b)). Neste caso, mais de uma aparta é gerada durante a actuação de cada aresta. Este facto ocorre devido às oscilações entre a ferramenta e a peça.

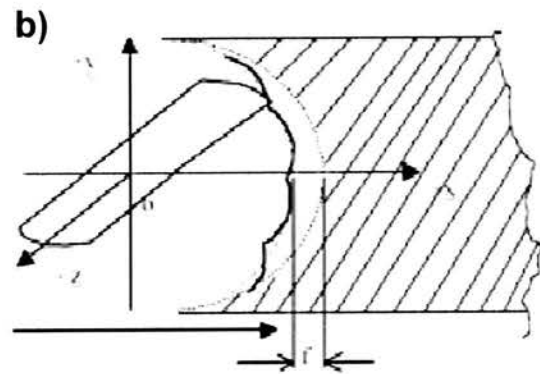
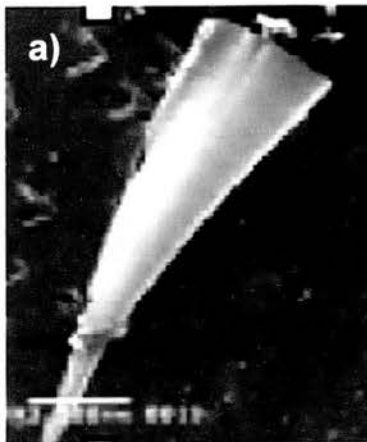


Fig. 17 – Características de um processo de maquinagem estável

a) Aparta cónica

b) Processo de corte estável

Fonte: NING, Y. (2001)

No corte estável, a actuação de cada aresta gera uma única aparta.

3.6 Parâmetros de corte

3.6.1 Noções base

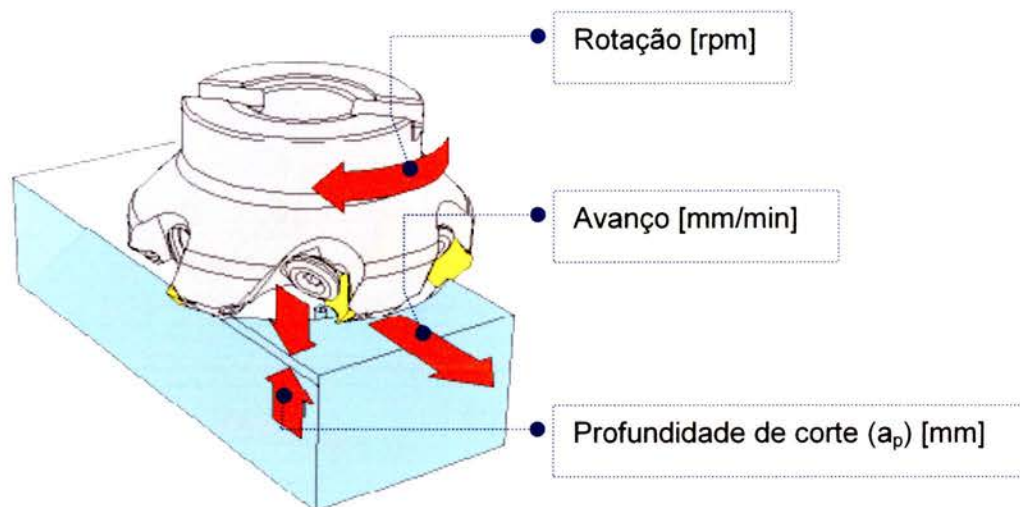


Fig. 18 – Noções base

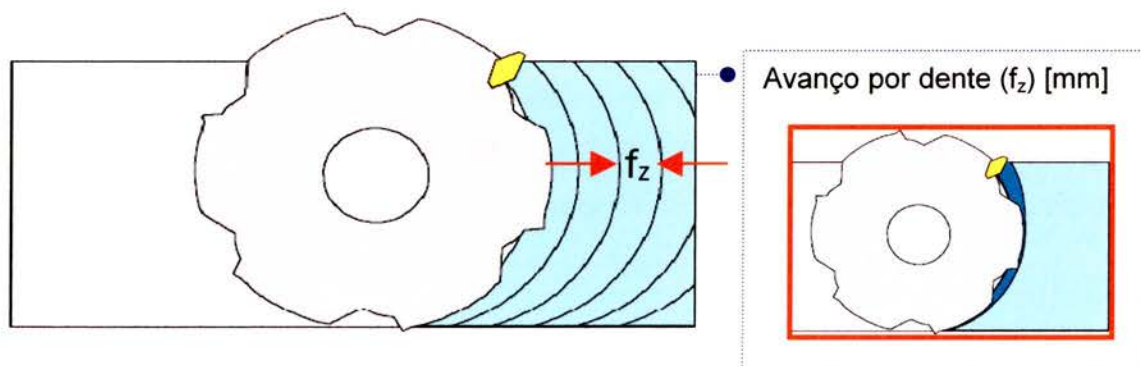


Fig. 19 – Avanço por dente

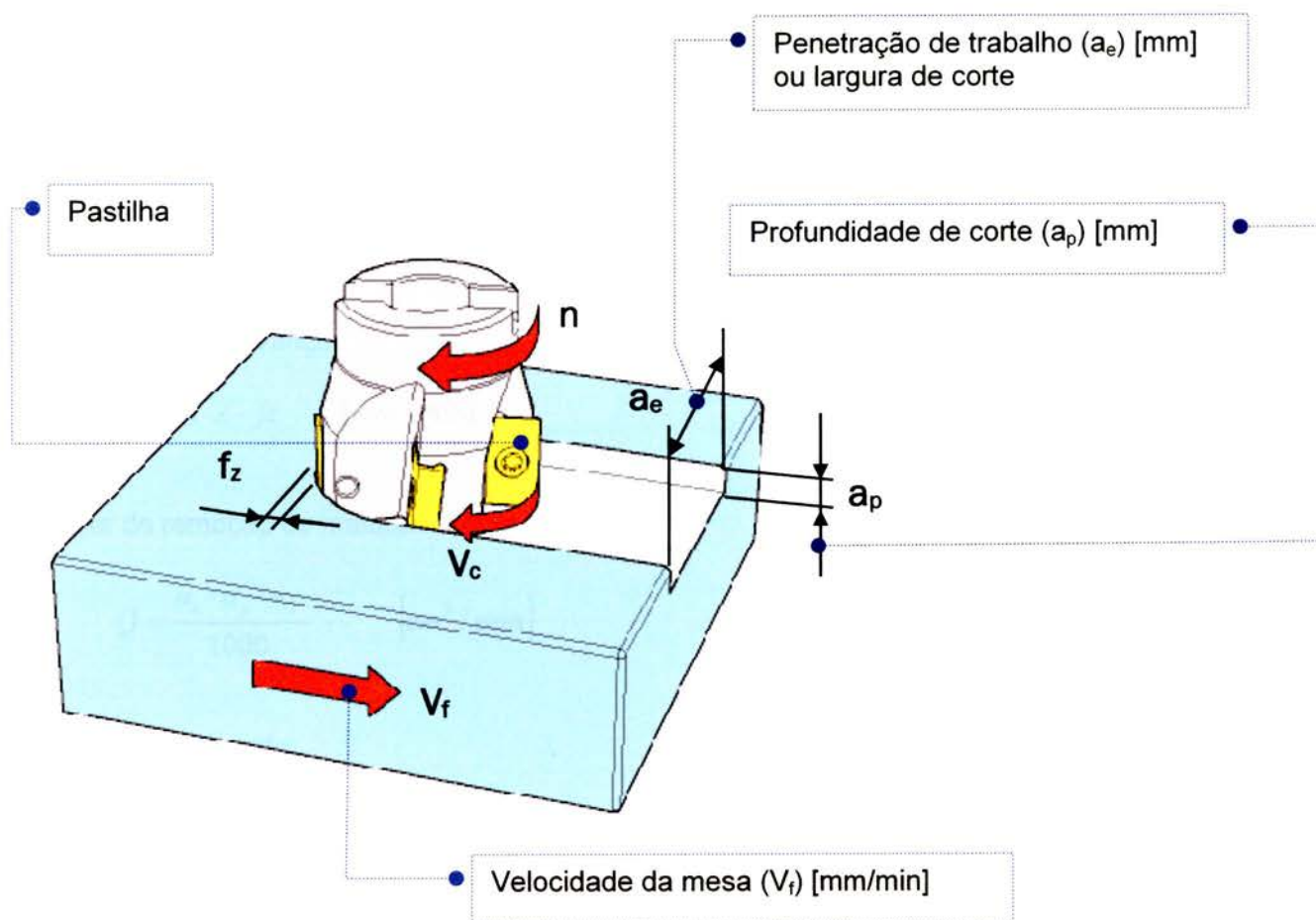


Fig. 20 – Parâmetros de maquinagem

3.6.2 Formulações matemáticas gerais

Rotação:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad [1 / \text{min}]$$

Velocidade de avanço:

$$V_f = n \cdot Z \cdot f_z \quad [mm / \text{min}]$$

Taxa de remoção de material:

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} \quad [cm^3 / \text{min}]$$

Velocidade de corte:

$$V_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_c}{1000} \quad [m / \text{min}]$$

Avanço por rotação:

$$f = Z_n \cdot f_z \quad [mm / \text{rev}]$$

$$f = Z_c \cdot f_z \quad [mm / \text{rev}]$$

Velocidade de corte e rotação para cópia:

$$V_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_w}{1000} \quad [m / \text{min}]$$

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_w} \quad [RPM]$$

$$D_w = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (D_c - a_p)} \quad [mm]$$

Numero efectivo de dentes (Z_c)

O número efectivo de dentes (Z_c) é usado para calcular a velocidade de avanço (V_f) e o avanço por rotação (f). Para muitos tipos de fresas o número efectivo de dentes (Z_c) é igual ao número de dentes da fresa (Z_n). No entanto, existem casos em que o valor Z_c é menor que Z_n .

Exemplo:

Ferramenta: Fresa de disco

Número total de dentes (Z_n) = 12
Número efectivo de dentes (Z_c) = 6

Apesar da fresa ter 12 pastilhas, são utilizadas 6 de cada lado da fresa de forma a cobrir toda a sua largura (a_p).



Fig. 21 – Fresa de disco

3.6.3 Métodos de trabalho

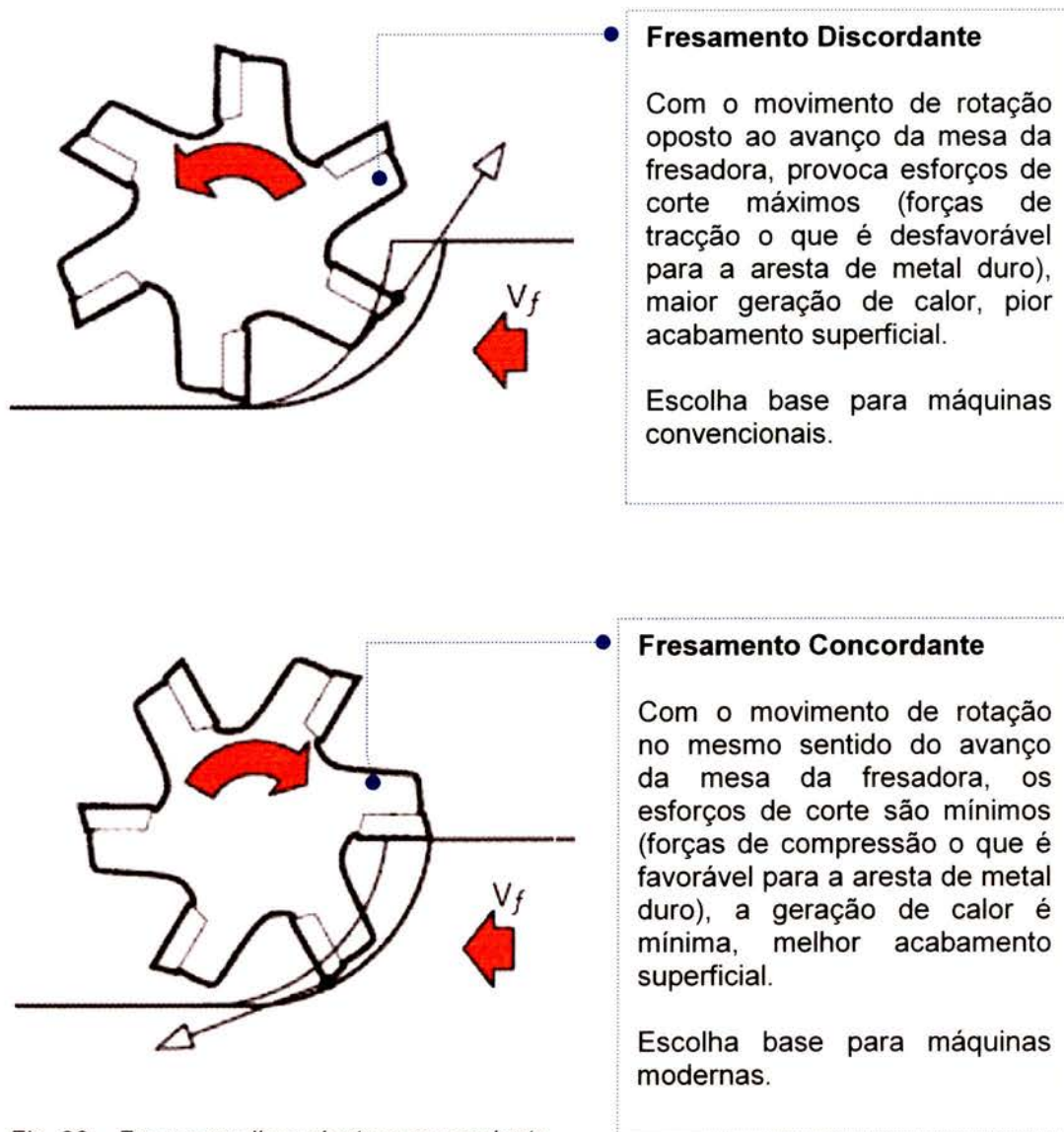
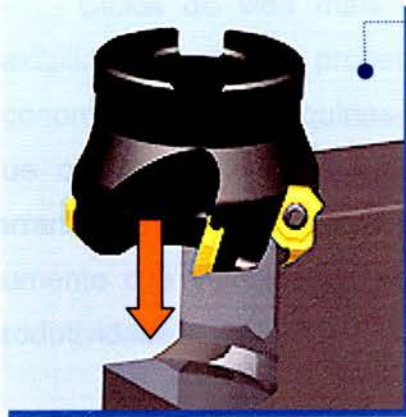


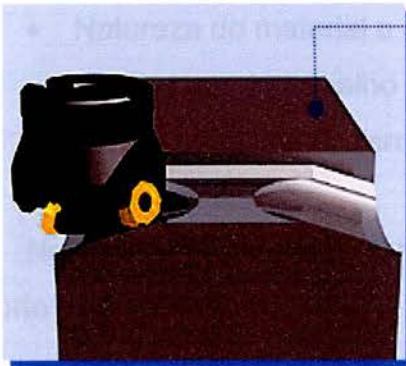
Fig. 22 – Fresagem discordante e concordante

3.6.4 Outros métodos



- **Fresagem em “Mergulho” ou “Plunging”**

Trabalho no sentido axial;
Esforços reduzidos na
cabeça da máquina (eixo Z).



- **Fresagem “Rampa”**

Profundidade de corte progressiva
para a realização de formas cegas
(Ranhas, cavidades)



- **Fresagem por “Interpolação”**

3.7 Ferramentas de Corte

Ciclos de vida mais curtos do produto tornam a produtividade e a flexibilidade de todo o processo de fabrico essenciais para se obter uma boa economia total. As máquinas-ferramenta têm cada vez melhores acelerações o que obriga a melhores ferramentas. Hoje em dia existem materiais para ferramentas que permitem otimizar cada operação de corte, através do aumento das velocidades admissíveis, o que possibilita melhor qualidade e produtividade.

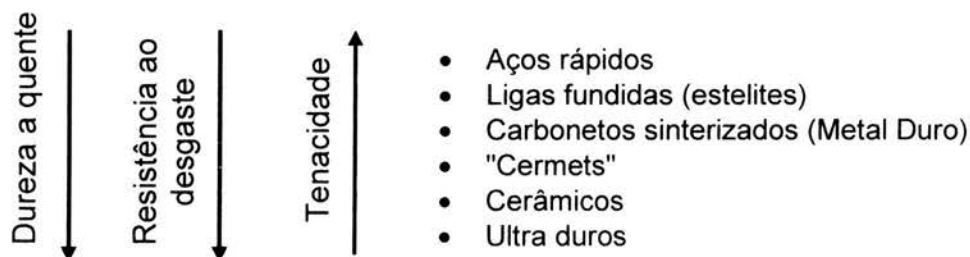
As características mecânicas dos materiais usados nas ferramentas de corte dependem de várias condições, tais como:

- Natureza do material a cortar
- Velocidade de trabalho
- Forma particular da ferramenta, etc.

No entanto as características mais apropriadas para as ferramentas de corte são:

- Elevada resistência ao desgaste
- Elevada dureza a frio e a quente
- Elevada tenacidade
- Baixo coeficiente de atrito
- Elevada condutividade térmica
- Baixo coeficiente de dilatação

Os materiais para ferramentas de corte por arranque de apara podem ser agrupados em seis classes:



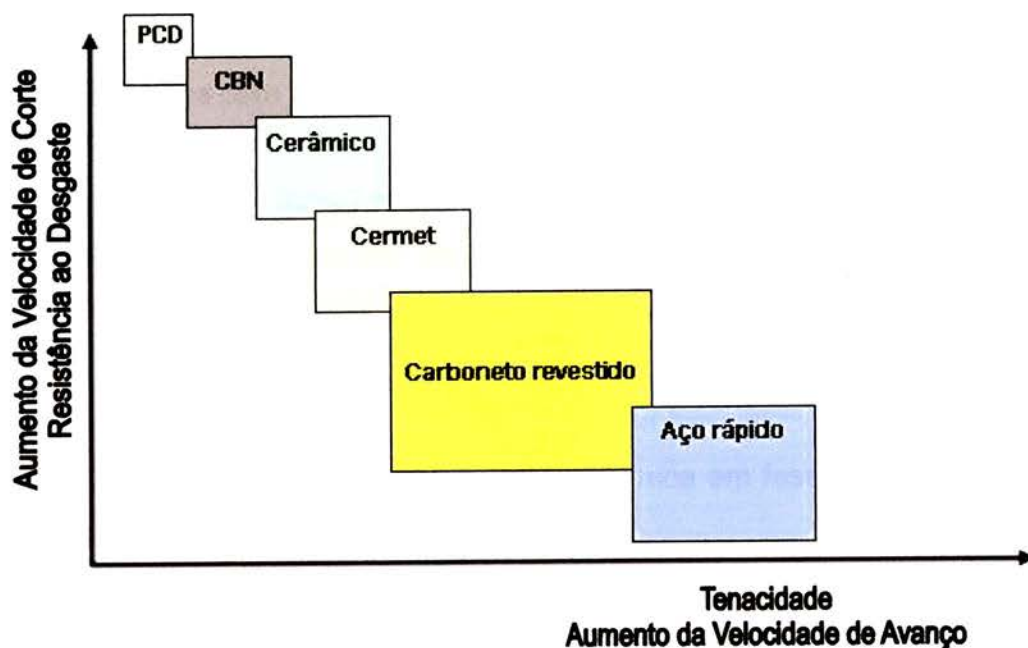


Fig. 23 – Materiais para ferramentas de corte

3.7.1 Aços Rápidos

Os aços rápidos são um excelente compromisso entre a tenacidade e a resistência ao desgaste. Temos no mercado aços rápidos ao tungstênio (Grupo T) e aços rápidos ao molibdénio (Grupo M).



Fig. 24 – Fresa aço rápido (HSS)

Os aços rápidos ao tungstênio preservam a dureza até aos 500-600°C. Este facto só é possível devido à formação de carbonetos de vanádio que são extremamente duros e resistentes à abrasão. Elevadas concentrações de vanádio provocam um aumento da percentagem de concentração de carbono remetendo-nos para os aços super rápidos. O Crómio sempre presente nos aços rápidos, melhora o compromisso entre dureza e tenacidade. Aços rápidos com cobalto têm maior dureza a quente o que possibilita a maquinagem em desbaste a elevada velocidade, situação para a qual são aconselhados.

Os aços rápidos ao molibdênio apresentam uma elevada tenacidade e baixo custo, pelo que são utilizados em ferramentas de geometria complexa e em cortes ligeiros com menores velocidades de corte.

Actualmente, as ferramentas de aço rápido sofreram 2 significativos desenvolvimentos no sentido de lhe aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste:

- ferramentas fabricadas através da pulverometalurgia (prensagem e sinterização);
- revestimentos através de deposição química em fase de vapor (CVD) e deposição física em fase de vapor (PVD);

Os aços rápidos sinterizados permitem uma rectificação e afiamento mais fáceis. Os principais revestimentos aplicados são nitreto de titânio (TiN), carboneto de titânio (TiC), alumina (Al_2O_3) e carboneto de tungsténio (WC).

A deposição física em fase de vapor (PVD) aumenta a vida da ferramenta, aumenta a velocidade de corte e diminui o atrito ferramenta/peça. A principal limitação ao uso dos aços rápidos na prática industrial é a velocidade de corte que é bastante mais baixa que a permitida pelos carbonetos sinterizados.

3.7.2 Ligas Fundidas (Estelites)

As estelites obtêm-se fundindo, a temperaturas de aproximadamente 2800°C, uma liga cuja composição química apresenta como principais elementos o Cobalto (38 a 53%), o Crómio (30 a 32%), o Tungsténio (10 a 18%) e ainda o carbono num teor geralmente superior a 1.5%. Estas ligas são só maquináveis por rectificação e são usadas em forma de pastilhas.

Apresentam uma dureza praticamente constante até 700-800°C e uma elevada resistência à corrosão a quente. São utilizadas a maiores velocidades de corte que os aços rápidos e apresentam uma maior tenacidade, menor dureza a quente e menor resistência ao desgaste que os carbonetos sinterizados.

3.7.3 Carbonetos Sinterizados (Metal Duro)

O Metal Duro é dos materiais mais comuns nas ferramentas de corte. É um produto da pulverometalurgia, designado também por carboneto de tungstênio sinterizado. Essencialmente, o metal duro é formado por dois constituintes: um carboneto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste (WC – carboneto de tungstênio) e um elemento aglomerante ou ligante (Co - cobalto).



Fig. 25 – Pastilhas em Metal Duro

A ISO recomenda o agrupamento do Metal Duro em seis grandes grupos:

- **Grupo P** – Compreendendo as classes empregues na maquinagem de aços, aços fundidos e ferros maleáveis que apresentam aparas longas e dúcteis.
- **Grupo M** – Compreendendo as classes que se destinam a maquinagem de aços inoxidáveis, aços fundidos, aços de corte livre e que apresentam aparas longas ou curtas.
- **Grupo K** – Compreendendo as classes que se destinam a maquinagem de ferros fundidos e ferros maleáveis que apresentam aparas fragmentadas e curtas.
- **Grupo S** – Compreendendo as classes que se destinam à maquinagem de ligas resistentes ao calor e ligas de titânio.
- **Grupo H** – Compreendendo as classes que se destinam à maquinagem de aços endurecidos.
- **Grupo N** – Compreendendo as classes que se destinam à maquinagem de metais não-ferrosos, plásticos e madeira.

Para elevadas velocidades de corte, a temperatura gerada na interface apra/ferramenta aumenta o que provoca uma diminuição da temperatura de solda podendo assim diminuir a percentagem de Cobalto na ferramenta. O mau estado da máquina pode provocar o aumento de vibrações na ferramenta o que nos implicaria uma necessidade de aumentar a tenacidade da ferramenta. Podemos conseguir isto através do aumento da percentagem de Cobalto na ferramenta.

Os carbonetos sinterizados oferecem uma elevada taxa de remoção aliada a elevadas velocidades de corte e proporcionam um bom acabamento superficial da peça maquinada. Com isto conseguimos tempos de produção mais curtos quando os comparamos com os aços rápidos.

O Metal Duro tem aplicações em materiais tais como aços de pouca, média e alta liga, aços inoxidáveis, ferro fundido, latão, cobre, bronze, alumínio, ligas leves, grafite e materiais compósitos.

3.7.3.1 Carbonetos sinterizados revestidos

O revestimento mais comum é constituído à base de carboneto de tungsténio mais cobalto (WC + Co). Por vezes, ao carboneto de tungsténio mais cobalto é adicionado também o carboneto de Titânio (WC + Co + TiC). Este confere uma maior temperatura de solda que o primeiro.

Os revestimentos são aplicados por camadas sendo o carboneto de titânio (TiC) responsável pela adesão ao material base e o nitreto de Titânio (TiN) e a alumina (Al_2O_3) os responsáveis pelo isolamento.

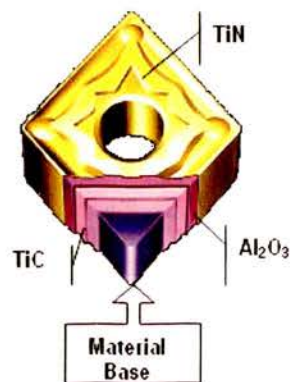


Fig. 26 – Revestimento de uma pastilha

3.7.4 Cermets

Os cermets são materiais formados por agregados de cerâmica, essencialmente nitreto de Titânio (TiN) e carboneto de Titânio (TiC), aglomerados numa matriz metálica de menor ponto de fusão (Cobalto, Níquel ou Molibdénio).

Os cermets possuem uma gama de velocidades de corte inferior à dos cerâmicos mas superior à dos carbonetos sinterizados sendo indicados para operações de acabamento ou desbaste ligeiro quer em torneamento quer em fresagem. São inadequados para desbastes pesados ou maquinagem de ligas não ferrosas.

As principais características são um menor coeficiente de atrito, uma maior dureza a quente, uma maior resistência à oxidação e uma menor tendência para adesão.

3.7.5 Cerâmicos

Os materiais mais utilizados nestas ferramentas são alumina branca (Al_2O_3) prensada a frio e alumina preta ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$) prensada a quente.

Estes materiais apresentam uma elevada resistência ao desgaste, uma baixa tenacidade o que possibilita corte a velocidades elevadas (excepto corte interrompido). A alumina branca é utilizada principalmente na maquinagem de acabamento de aços e ferros fundidos enquanto a alumina preta possibilita o corte interrompido. A velocidade de corte nos cerâmicos deve ser alta para se evitar um elevado desgaste da pastilha. Apresentam uma elevada dureza a quente e resistência ao desgaste, uma baixa condutividade térmica e tenacidade.



Fig. 27 – Pastilhas cerâmicas

Os cerâmicos para pastilhas de corte utilizados actualmente são na sua maior parte constituídos à base de alumina. A alumina branca possibilita elevadas velocidades de corte (500 m/min) e bom acabamento superficial. Os principais inconvenientes são uma baixa condutividade térmica e um elevado coeficiente de dilatação térmica além de baixa tenacidade.

A alumina preta apresenta uma melhor condutividade térmica e resistência ao choque térmico. Não são fáceis de sinterizar. Substituindo o carboneto de Titânio (TiC) por nitreto de Titânio (TiN) pode-se prensar a frio e melhorar a resistência ao choque térmico, para desbaste de ferros fundidos cinzentos e superligas de níquel.

Umas das ferramentas de grande importância na indústria são os SIALON's. A ferramenta é constituída por uma base de nitreto de Silício em que parte do Silício foi substituído por Alumínio e parte do Azoto por Oxigénio, obtendo-se um composto na forma Si-Al-O-N. Esta estrutura apresenta grãos de substituição parcial de nitreto de Silício (Si_3N_4) por alumina (Al_2O_3) (solução sólida), rodeados por uma fase total ou parcialmente cristalina com propriedades de resistência a alta temperatura, superiores aos nitretos tradicionais. Quando comparados com os restantes cerâmicos, os Sialon's apresentam propriedades de elevada resistência ao choque térmico e mecânico, o que os torna especialmente adequados para desbaste e semi-acabamento de ferros fundidos, aços e superligas de Níquel.

Uma inovação prometedora no domínio dos cerâmicos de corte foi o reforço dos óxidos e nitretos com fibras de carboneto de Silício (SiC) (“Whiskers” – monocristais de elevada resistência mecânica). A tenacidade da ferramenta pode duplicar já que as fibras evitam a propagação de fissuras. No entanto, a inalação dos fumos provocados por estas ferramentas pode trazer graves consequências para a saúde.

3.7.6 Ultra duros

Nesta categoria de materiais duros, incluem-se o Nitreto de Boro cúbico (CBN) e Diamante Policristalino (PCD). Caracterizam-se por durezas extremamente elevadas em consequência do carácter fortemente covalente das suas estruturas e simetria de rede cristalina.

3.7.6.1 Nitreto de Boro Cúbico (CBN)

Depois do Diamante Policristalino, é o material para ferramentas de corte mais duro. A partir de grãos muito finos de nitretos de Boro de estrutura hexagonal, que são sujeitos a uma elevada compressão e temperatura na presença de um metal (que forma uma fase aglomerante), é obtida uma massa sinterizada, policristalina, de nitreto de Boro cúbico. Este material pode ser fornecido, dependendo do fabricante, sob a forma de inserts sólidos (redondos, quadrados, rectangulares ou romboidais) ou sob a forma de uma camada de CBN revestindo um substrato de carbonetos. O CBN é um material que apresenta uma dureza a frio e a quente maior que a dos cerâmicos e mesmo uma tenacidade superior á da generalidade dos carbonetos. A sua elevada condutividade térmica, com o consequente aumento da taxa de transferência do calor desenvolvido, a sua estabilidade química e pequena afinidade com os aços a elevadas temperaturas e a sua elevada resistência á oxidação possibilita a maquinagem de aços temperados, rápidos e ferros fundidos brancos. Devem ser usados a seco.

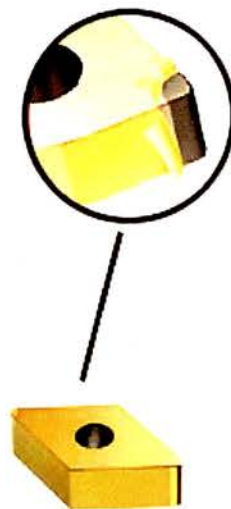


Fig. 28 – Pastilhas CBN

Ainda é necessário fazer referência a outra variante do CBN, o Nitreto de Boro Cúbico Policristalino (PCBN). Este material é idêntico ao CBN com a particularidade de sofrer um processo de sinterização. Esta configuração tem sido adoptada para elevar a produtividade e a qualidade do produto final, reduzindo os custos.

3.7.6.2 Diamante Policristalino (PCD)

Este é o mais duro dos materiais para ferramentas de corte, é um diamante policristalino sintético e a sua dureza é semelhante á do diamante monocristalino que é o material natural mais duro conhecido. A sua dureza considerável faz com que tenha propriedades de elevada resistência ao desgaste por abrasão.

Finos cristais de diamante são ligados durante a sinterização, a altas temperaturas e a grandes pressões. Os cristais são orientados ao acaso para evitar a tendência à fractura, resultando numa elevada resistência ao desgaste e elevada dureza em todas as direcções. A vida útil da ferramenta pode ser maior relativamente à dos carbonetos sinterizados, chegando em alguns casos a ser 100 vezes maior.

No entanto, esta aparente perfeita ferramenta de corte tem alguns pontos fracos, entre os quais:

- A zona de corte não deverá exceder temperaturas acima dos 600 °C;
- Não pode ser usado em materiais ferrosos devido a sua afinidade;
- Não indicado para materiais tenazes.



Fig. 29 – Pastilhas Diamante Policristalino

Tem aplicação em materiais não ferrosos como alumínio, bronze, cobre, zinco, tungsténio sinterizado e materiais não metálicos como grafite, fibra de carbono, cerâmica e fibra de vidro.

3.7.7 Guia de Optimização Sandvik



Possível Causa

Velocidade de corte muito alta ou resistência insuficiente ao desgaste.

Solução possível

Seleccionar uma classe mais resistente ao desgaste;
Para materiais endurecidos seleccionar um ângulo de posição menor;
Reduzir velocidade de corte durante a maquinação de materiais resistentes ao calor.

Desgaste do flanco

Rápido desgaste do flanco causando uma textura de acabamento superficial insatisfatória ou inconsistência na tolerância



Possível Causa

Velocidade de corte muito alta ou resistência insuficiente ao desgaste.

Solução possível

Seleccionar uma classe mais resistente ao desgaste;
Para materiais endurecidos seleccionar um ângulo de posição menor;
Reduzir velocidade de corte durante a maquinação de materiais resistentes ao calor.

Desgaste tipo entalhe

Desgaste tipo entalhe causando textura de acabamento superficial insatisfatório e risco de quebra da aresta.



Possível Causa

Excessivas temperaturas de corte e pressão na face superior das pastilhas.

Solução possível

Reduzir as velocidades de corte para obter uma temperatura mais baixa e reduzir o avanço;
Seleccionar uma classe mais resistente ao desgaste;
Seleccionar uma geometria de aresta mais positiva.

Craterização

Excessivo desgaste tipo crateras causando uma aresta enfraquecida e acabamento de superfície insatisfatório.



Possível Causa

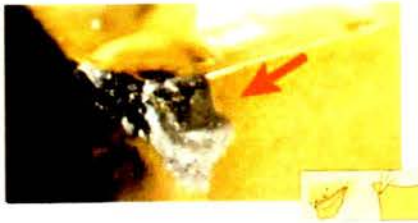
Temperatura na zona de corte muito baixa;
Geometria de corte negativa;
Material muito pastoso, como aços baixo-carbono, aços inoxidáveis e alumínio.

Solução possível

Aumentar a velocidade de corte;
Mudar para uma classe com cobertura mais apropriada;
Seleccionar uma pastilha de geometria mais positiva.

Aresta postiça

Aresta postiça causando acabamento superficial insatisfatório e microlasclas quando a aresta é removida.



Possível Causa

Desgaste excessivo da ferramenta. Classe e geometria muito fracas. Pressão excessiva sobre a pastilha. Formação da aresta postiça.

Solução possível

Reduzir a velocidade e/ou profundidade de corte;
Seleccionar uma geometria mais forte, de preferência uma pastilha de face única;
Seleccionar uma pastilha mais espessa/maior e uma classe mais tenaz;
Melhorar a estabilidade.

Quebra da aresta

Danificações não apenas na pastilha, que podem arruinar o calço e a peça.



Possível Causa

Variações excessivas da temperatura.
Maquinagem intermitente.
Variação no fornecimento de refrigeração.

Solução possível

Seleccionar uma classe de pastilhas mais tenaz;
Refrigeração deve ser aplicada em abundância e não de uma vez.

Fissuras térmicas

Pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte, causando microlascas e acabamento superficial insatisfatório.



Possível Causa

Temperatura de corte e pressão muito elevadas.

Solução possível

Seleccionar uma classe mais resistente ao desgaste, ou seja, que seja mais dura;
Reduzir a velocidade de corte;
Reduzir o avanço.

Deformação plástica

Deformação plástica da aresta, depressão ou impressão do flanco levando a um controle de apara insatisfatório, acabamento de superfície inadequado e quebra da pastilha.



Possível Causa

Arestas de corte quebradiças.
Arestas de pastilhas muito fracas.
Formação de aresta postiça.

Solução possível

Seleccionar uma classe mais tenaz;
Seleccionar uma pastilha de aresta de corte mais robusta;
Aumentar a velocidade de corte.
Seleccionar uma geometria positiva;
Reduzir o avanço no início de corte;
Melhorar a estabilidade.

Formação de apara aderente

Pequena formação de apara aderente à aresta de corte, levando a uma textura superficial inadequada e desgaste excessivo do flanco.

3.8 Lubrificação

Podemos afirmar que a lubrificação usada tantas vezes na maquinaria tem dois objectivos distintos que são:

- Redução do coeficiente de atrito (evitar APC – aresta postiça de corte);
- Diminuição da temperatura, remoção da apara e inibição da corrosão.

Os principais objectivos da utilização de lubrificação e/ou refrigeração na maquinaria são de aumentar a vida das ferramentas de corte, melhorar o acabamento superficial das peças e incrementar a produtividade. No entanto uma má lubrificação pode produzir defeitos na peça e diminuir o tempo de vida das ferramentas de corte. Nestes casos de má lubrificação podemos ter roturas em pente da ferramenta.

Podemos dividir os lubrificantes em dois tipos principais que são:

- agentes de melhoria de corte sólidos;
- fluidos de corte
 - Líquidos
 - Gasosos

3.8.1 Agentes de melhoria de corte sólidos

Os agentes de melhoria de corte sólidos podem usar-se de duas formas:

- Lubrificante sólido
- Aditivo metalúrgico

Estes agentes são de acção física (quando funcionam na interface da face de ataque da ferramenta/apara diminuindo o coeficiente de atrito) ou química (quando são adicionados nos materiais).

Como exemplo:

Quando se adiciona enxofre nos aços, este fica sob a forma de sulfureto de manganês no interior do aço. Durante a maquinagem e por acção do calor este liberta-se e combina-se com o ferro gerando uma fina camada de sulfureto de ferro que se deposita sobre a face de ataque da ferramenta impedindo as micro soldaduras e diminuindo assim o atrito.

3.8.2 Fluidos de corte

3.8.2.1 Fluidos de corte líquidos

Os fluidos de corte líquidos têm acção física, química e de transporte. Geralmente, devem apresentar em elevado grau pelo menos uma das propriedades seguintes: condutibilidade térmica, calor específico, fluidez, viscosidade, poder molhante, ponto inflamação elevado, estabilidade química nas temperaturas de trabalho. Além destas propriedades, devem evitar a corrosão, não devem prejudicar a máquina e podem ser transparentes.

De entre os fluidos líquidos podemos distinguir:

- Óleos puros
- Óleos emulsionáveis
- Óleos sintéticos

Os óleos puros funcionam sem água e podem ser do tipo activo ou inactivo. Um dado óleo será activo se atacar ou não, escurecendo-a, uma barra de cobre quando nele imersa durante 3 horas a uma temperatura de 100°C. Os óleos activos são preferidos para elevadas pressões e condições de corte severas. Os inactivos são óleos puros e misturas com óleos gordos.

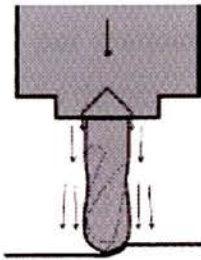
Os óleos emulsionáveis ou emulsões obtêm-se da mistura de um determinado óleo com água. Este tipo de lubrificante tem um grande poder refrigerante que provem da água e um bom poder lubrificante que provem do óleo. Pode-se considerar que uma emulsão fraca (baixo teor de óleo) tem um elevado poder de refrigeração, enquanto uma emulsão forte (elevado teor de óleo) tem um elevado poder lubrificante.

Os óleos sintéticos são agentes químicos com água. Têm como principais vantagens o elevado poder de refrigeração, a prolongada vida útil do óleo e o elevado poder detergente que mantém as tubagens desobstruídas. Como desvantagens a possível contaminação de outros fluídos da máquina, ambiente e um baixo poder lubrificante.

3.8.2.2 Fluidos de corte gasosos

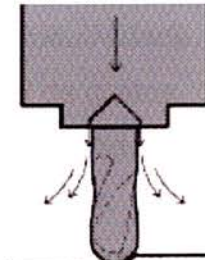
Os fluidos de corte gasosos possuem essencialmente uma acção refrigerante ou de transporte. Os principais fluídos de corte gasosos são o ar, o dióxido de carbono e o azoto.

A seguir estão representados os modos de refrigeração e lubrificação mais usados na indústria. Cada um deles tem as suas vantagens e desvantagens. Vejamos então algumas características.



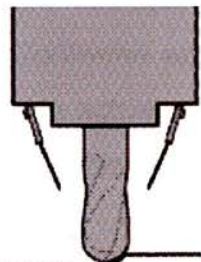
Ar Comprimido

A melhor maneira de assegurar um escoamento perfeito da apara deve ser dirigi-lo para a zona de corte.



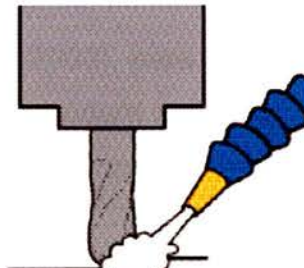
Névoa de Óleo

A segunda melhor maneira é ter névoa de óleo sob alta pressão direccionada para a zona de corte.



Fluido de Corte

A terceira maneira é um bom fluxo de refrigeração com alta pressão (aprox. 70 bar).



Fluido de Corte

O pior caso é comum: baixo fluxo de refrigeração externa com baixa pressão.

Uso de fluido de corte

- Na maquinagem de ligas resistentes ao calor com baixas velocidades de corte;
- Em operações de furacão ou fresagem de canais profundos;
- Para manter a temperatura da peça;
- Para prevenir a geração de calor na ferramenta, sistema de fixação ou fuso;
- No acabamento de aços inoxidáveis e de alumínio, para evitar a abrasão de pequenas partículas à superfície;
- Na maquinagem de paredes finas de modo a evitar a deformação geométrica;
- Para prevenir a corrosão de peças e partes vitais na máquina.

3.9 Sistemas CAD/CAM

Cada vez mais, os sistemas CAD/CAM exercem uma influência decisiva na competição industrial, possibilitando melhoramentos na qualidade dos produtos, introdução de formas mais ou menos complexas impossíveis de fabricar por maquinagem convencional, aumento de produtividade, rapidez na introdução de novos produtos e diminuição considerável de custos.

O modelo do produto a ser fabricado deve ser criado num qualquer sistema CAD que seja capaz de representar objectos em três dimensões, através de um sólido ou de superfícies. Este modelo será depois utilizado para a elaboração do programa de maquinagem NC, poderá ser transferido para um sistema CAE para a realização de análises mecânicas de funcionamento, como a definição dos pontos de injeção do plástico, refrigeração do molde, linhas de soldadura na peça, zonas de fugas de ar, entre outras.

Conforme apresentado por SOUZA e COELHO (2003), para a indústria de moldes actualmente alguns sistemas computacionais podem ser integrados de forma eficiente para auxiliar este fabrico, como ilustra a figura 30.

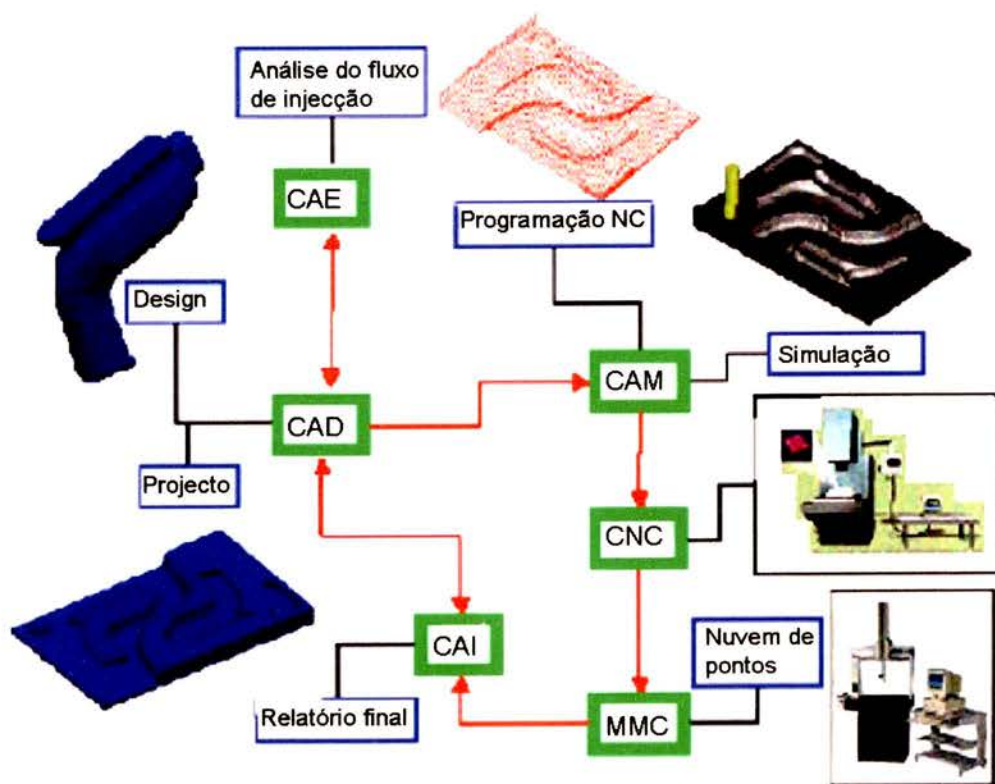


Fig. 30 – Integração de sistemas de apoio à fabricação de moldes
Fonte: SOUZA, A. F. ; COELHO, R.T. (2003)

3.9.1 Sistemas CAD

Entre os sistemas CAD capazes de construir objectos tridimensionais, há diferentes métodos empregues para representação gráfica destes. Há programas que criam modelos baseados em sólidos e outros softwares criam modelos baseados em superfícies. Os modelos criados com um sistema CAD modelador de sólidos são entidades sólidas, contendo informações volumétricas, superficiais e físicas, como por exemplo, massa, centro de gravidade e inércia. Os modelos criados a partir de softwares modeladores de superfícies possibilitam a modelação de formas geométricas complexas. Estes sistemas CAD modeladores de superfícies são os mais empregues no sector de moldes.

3.9.2 Sistemas CAM

Para geração dos programas NC num software CAM, inicialmente é necessário um modelo CAD. A transferência de dados do CAD para o CAM pode ser feita de várias formas sendo umas preferíveis a outras. Muitas vezes utiliza-se uma malha de triângulos (STL) gerada sobre a geometria original no CAD, e é esta malha que será utilizada como modelo geométrico para a geração de programas NC. Esta malha de triângulos aproxima-se da representação geométrica modelada no CAD através de um valor de tolerância definido pelo operador, como mostra a figura 31.

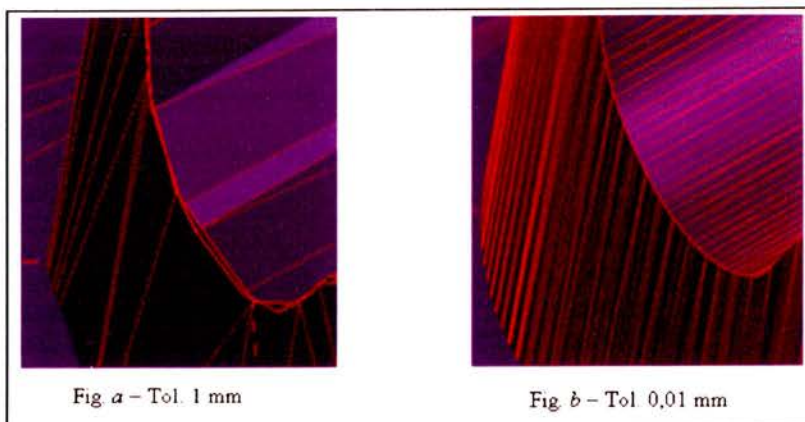


Fig. 31 – Malha gerada com diferentes tolerâncias

Desta maneira, é introduzida a primeira tolerância no processo de fabricação. Quanto menor a tolerância para a triangularização, melhor será a definição da geometria, mas proporcionalmente, aumenta-se o tamanho dos ficheiros de transferência. Outra forma de transferência, talvez a mais usada, é através de ficheiros tipo IGES. Há já softwares CAM, tipo MasterCam, que fazem o carregamento dos ficheiros de modelação geométrica directamente de alguns softwares CAD, tipo SolidWorks.

Com o desenvolvimento dos softwares CAM, cada vez mais há novas possibilidades de trajectórias de ferramenta, principalmente para operações de acabamento. Isto permite flexibilidade ao operador para definir a estratégia de corte mais adequada para determinada aplicação.

Para geração de programas NC utilizando um sistema CAM, o operador deverá possuir inicialmente o modelo geométrico a ser maquinado, definir as dimensões do bloco de matéria-prima, definir os parâmetros tecnológicos, definir as trajectórias da ferramenta e por fim criar um programa (gerar o programa).

Cada sistema máquina/CNC possui características distintas, baseadas nas configurações da estrutura da máquina-ferramenta, envolvendo diferentes possibilidades para movimentação dos eixos, troca de ferramentas, entre outras. O cálculo inicial no sistema CAM gera um arquivo genérico, sem estas especificações. Este arquivo é conhecido como *Cutter Location File* (CLF). Após esta etapa, o programa genérico deverá ser formatado de acordo com as características específicas do equipamento a ser utilizado. O pós-processador é o software que realiza esta conversão, transformando o arquivo CLF em um programa NC específico para uma dada comunicação máquina/CNC (SCHULZ, 1999).

Portanto, dois elementos são necessários para o pós-processamento:

- Trajectória de ferramenta calculada pelo CAM em formato computacional;
- Pós-processador – programa computacional que lê o arquivo CLF e o converte num programa para ser executado numa dada combinação máquina/CNC.

Desta forma, o pós-processador possibilita a utilização de qualquer arquivo CLF para qualquer configuração de equipamento (máquina/CNC), desde que a configuração dos eixos da máquina e do arquivo CLF seja compatível. A figura 32 demonstra um fluxograma da criação de um pós-processador específico para geração de programas NC.

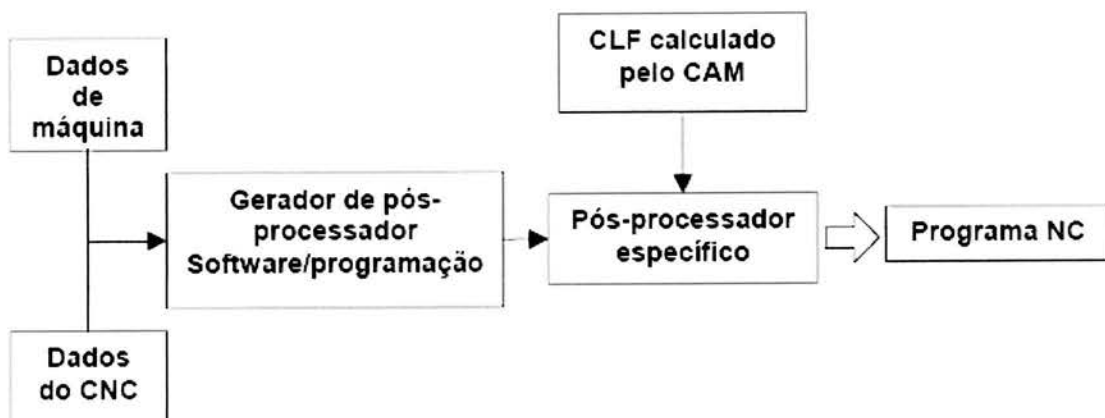


Fig. 32 – Etapas para pós-processamento de programas NC

3.10 Estratégias de Maquinagem

Na indústria portuguesa, os softwares CAM mais utilizados são o PowerMill e o MasterCam. Ambos apresentam diversas estratégias de maquinagem em geometria 2D e 3D, para o acabamento e para o desbaste. O mais analisado neste trabalho será o MasterCam v9.1 SP2.

3.10.1 Estratégias 2D

A maquinagem 2D assenta num plano cartesiano (normalmente XY), variando a sua profundidade (segundo Z). Na estratégia para esta geometria é necessário indicar o trajecto a seguir pela ferramenta. Estes programas são normalmente simples e de pequeno tamanho. Em baixo podemos ver um simples exemplo de uma maquinagem 2D.

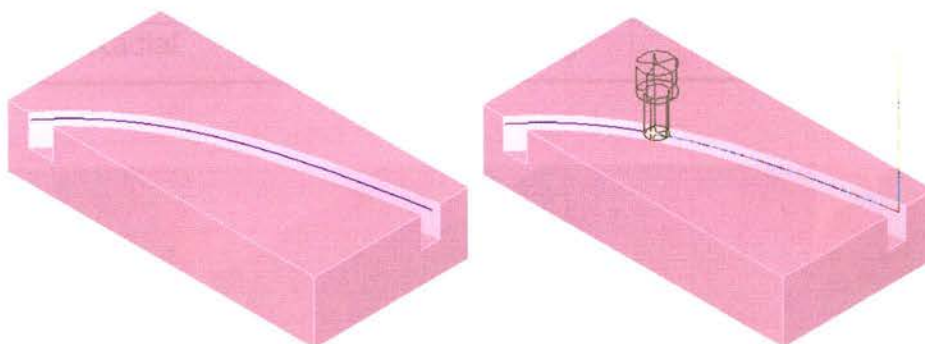


Fig. 33 – Esquema de uma maquinagem 2D

A azul escuro vemos a trajectória que a ferramenta irá executar até uma profundidade indicada. A fresagem “Contour 2D”, é sempre One-Way (concordante ou discordante mediante o ponto de entrada da ferramenta escolhido), ou seja, a ferramenta quando terminar a trajectória, levanta à altura (Z) de segurança e volta ao ponto inicial. Nestas estratégias é necessário algum cuidado pois o software CAM não tem em conta possíveis superfícies existentes e as profundidades deverão ser controladas pelo operador.

3.10.2 Estratégias 3D

Na maquinagem 3D, o software oferece alguma segurança já que trabalhamos com superfícies. Se todas as superfícies fizerem parte da selecção para maquinagem, estas são os limites da peça e a ferramenta irá cumprir todas as sobre-espessuras previamente programadas e desejadas no desbaste e no acabamento. De entre as principais trajectórias de maquinagem para acabamento podemos apontar, comparando *PowerMill* e *MasterCam*:

Tabela 8 – Trajectórias de maquinagem no acabamento e comparação de designação PowerMill / MasterCam

Trajectórias	PowerMill	MasterCam
Horizontais paralelas	Constant Z Finishing	Contour
Verticais paralelas	Raster Finishing	Parallel
em Offset	3D Offset Finishing	Scallop
Radial	Radial Finishing	Radial

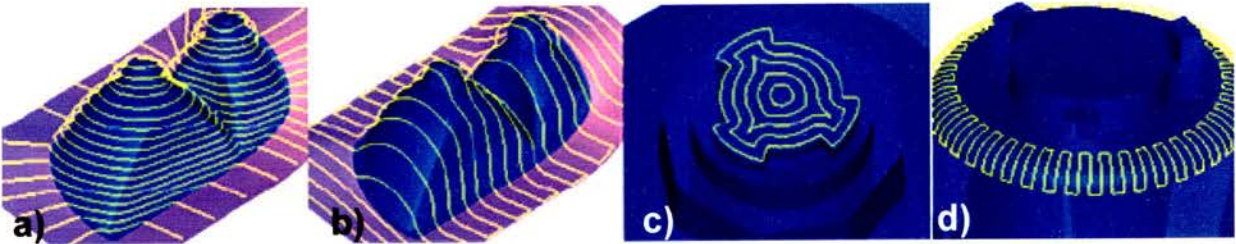


Fig. 34 – Principais trajectórias de ferramentas para operações de acabamento
a) Trajectórias horizontais paralelas
b) Trajectórias verticais paralelas
c) Trajectórias em offset
d) Trajectórias radiais
Fonte: POWERMILL

Cada estratégia de maquinagem pode ser mais adequada para uma determinada geometria como áreas planas, inclinadas, côncavas, convexas, formas spline. A escolha da trajectória de ferramenta pode representar uma grande influência sobre o tempo necessário para a maquinagem, desgaste de ferramentas de corte e qualidade superficial.

3.10.3 Maquinagem de Formas em Moldes

Qualquer molde que se pretenda maquinar requer um determinado intervalo de tempo e a aplicação de várias áreas de conhecimento técnico. Este ciclo pode ser dividido em três grandes fases distintas: Projecto do produto, projecto do molde e fabricação. Dentro da fase de fabricação está a maquinagem do molde.

Tradicionalmente, a fabricação de um molde envolve as seguintes etapas:

Desbaste: Operações de fresamento CNC partindo de um material em bruto. Esta operação é executada em 2½ eixos, pois a ferramenta é posicionada a uma determinada altura em Z e depois executa movimentos em dois eixos para remoção de material deste nível. Quando a remoção de material deste nível é finalizada, a ferramenta posiciona-se a uma nova altura em Z (definida pela profundidade de corte), remove o material deste plano, repetindo este processo até a conclusão do desbaste. Normalmente, deixa-se uma sobre-espessura de metal para a operação final de acabamento.

Alívio de cantos e pré-acabamento: estas operações de fresamento têm a finalidade de eliminar grandes volumes de material deixados pelo desbaste. Pode ser realizado devido à ineficiência do processo ou remover material em áreas onde a ferramenta de desbaste é incapaz de alcançar devido a limitações geométricas.

Acabamento por fresamento: Esta é uma operação de fresamento CNC tridimensional, utilizando 3, 4, ou 5 eixos ou graus de liberdade, conforme a disposição da máquina-ferramenta. Esta operação visa remover todo material excedente das operações anteriores e obter a melhor qualidade superficial possível no fresamento.

Operações manuais de acabamento (polimento e rectificação): após as operações de maquinagem esta etapa é realizada por um operário. Utilizam-se instrumentos tais como: lixas, pedras, polidores manuais, etc. Este processo tem a finalidade de eliminar as imperfeições deixadas pelas operações de maquinagem, influenciando de forma determinante os custos e tempos de produção, podendo a geometria ficar afectada.

Para realizar uma análise sobre as operações de fresamento de formas complexas, é conveniente estudar as condições de contacto ferramenta-peça e as implicações, dificuldades e aproximações realizadas, para se modelar este processo de maquinagem. Na figura 35 a) podemos observar um bloco de material onde se pretende esculpir uma peça com diferentes raios de curvatura. Na figura 35 b) é possível ver o aspecto da superfície e quantidade de material deixado após desbaste com uma fresa de topo plano segundo uma estratégia de desbaste com incremento vertical constante (a_p). A Figura 35 c) mostra o desbaste nas mesmas condições de maquinagem, utilizando uma fresa de ponta esférica, com a mesma estratégia.

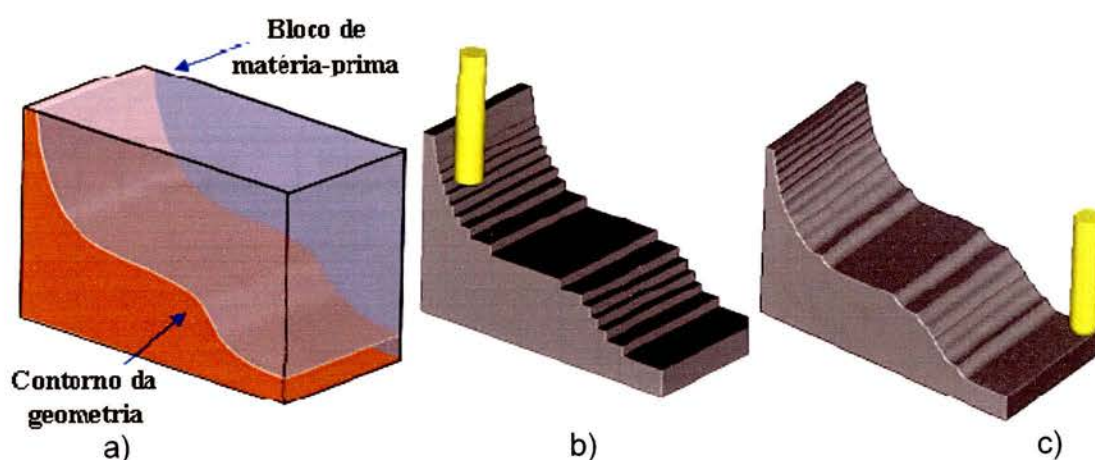


Fig. 35 – Desbaste por fresa de topo plano e esférica

a) Bloco de matéria-prima e contorno

b) Após desbaste com uma fresa de topo plano

c) Após desbaste com uma fresa esférica

Observa-se que a ferramenta esférica permite uma maior aproximação à geometria final da peça, deixando uma espessura de material mais uniforme para o acabamento, no entanto requer maior tempo para desbaste.

Para se ter um processo de maquinagem eficiente, a ferramenta de corte deve permanecer em carregamento constante, mantendo tão estável quanto possível, a força de maquinagem. Para isto a secção de corte deve-se manter a mais constante possível, durante todo o percurso da ferramenta.

A figura 36 ilustra o material remanescente após a operação de desbaste por $2\frac{1}{2}$ eixos em uma superfície com inclinação θ e zonas com forma.

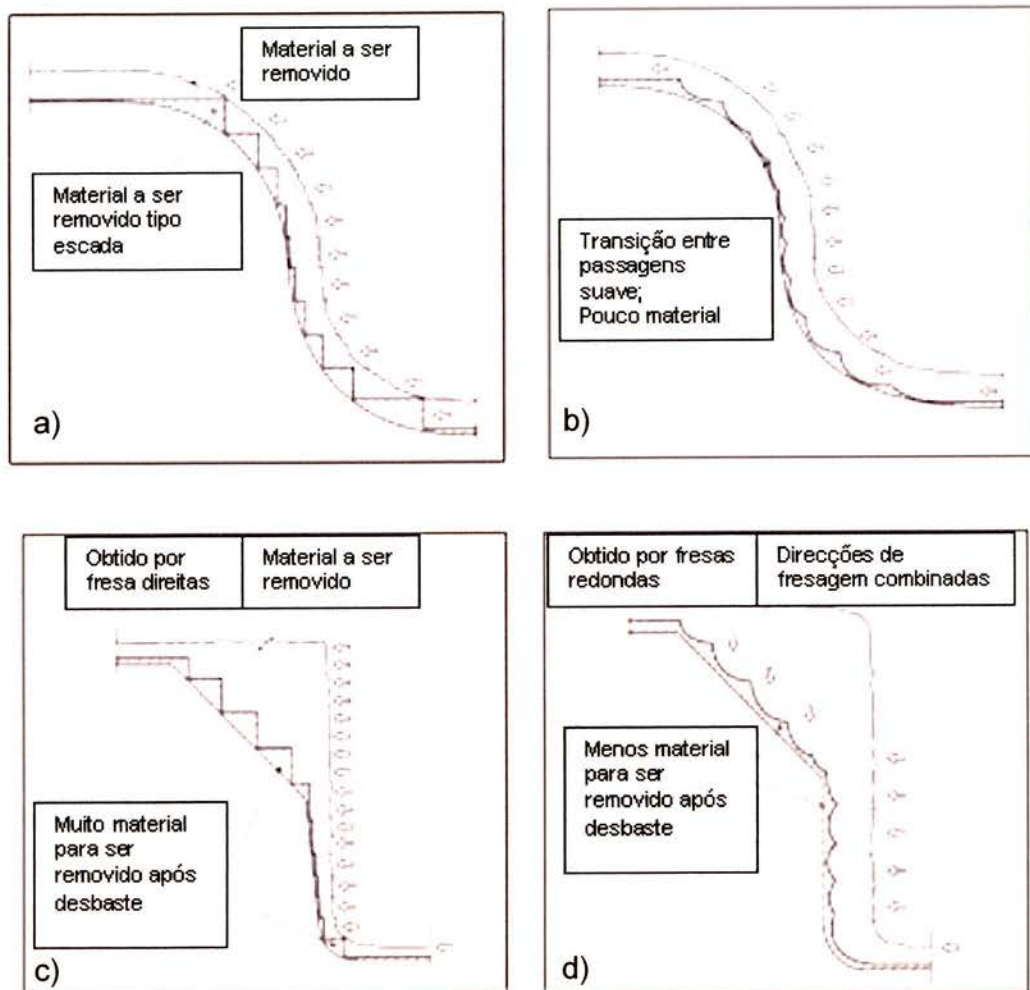
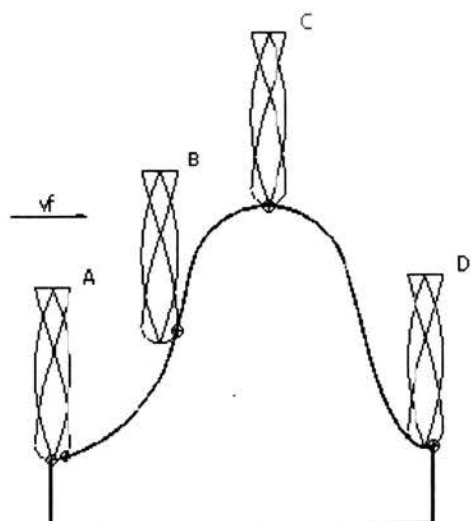


Fig. 36 – Aspecto da superfície após desbaste com fresas topo plano e esféricas
Fonte: SANDVIK (www.coromant.sandvik.com)

Na figura 36 a) vemos que as transições entre passagens são muito menos suaves quando utilizamos uma ferramenta topo plano comparando com uma ferramenta de esférica representado na figura 36 b). Pela comparação entre a figura 36 c) e figura 36 d), para a mesma forma geométrica, vemos a diferença de material deixado após desbaste para ferramentas de topo plano e esféricas. No entanto, para uma maquinagem como está exemplificado na figura 36 d) são necessários dois apertos. Entretanto, o desbaste utilizando a ferramenta esférica exigirá maior tempo de maquinagem, pois o avanço radial de corte (a_e) deve ser reduzido, por questões geométricas, quando comparado com uma ferramenta de topo plano.

No caso de superfícies como as exemplificadas anteriormente, e considerando que a profundidade de corte (a_p) se mantém constante para o desbaste, o volume de material remanescente, além da sobre-espessura, estará em função da curvatura da superfície. Esta quantidade não uniforme de material para ser removida na operação de acabamento é prejudicial. Grandes alterações no volume de material a ser removido durante a maquinagem, em virtude das formas, podem acarretar instabilidades no processo. As velocidades de avanço nestas circunstâncias deverão ser reduzidas para não reduzir a vida útil da ferramenta de corte.

Nas operações de maquinagem das formas geométricas, o acabamento é normalmente realizado por uma ferramenta de ponta esférica, onde ocorrem características peculiares entre a ferramenta de corte e peça, variando o ponto de contacto e seu diâmetro efectivo de corte. Estas características de processo têm fundamental influência no sucesso da maquinagem. No acabamento, usando-se uma estratégia de corte tipo *cópia* (passes paralelos verticais), por exemplo, a forma da apara altera-se constantemente com a variação do sentido de avanço e a posição do ponto de contacto da ferramenta, com a peça. A figura 37 ilustra estas variações para uma forma hipotética em uma passagem da ferramenta pela peça.



A ferramenta na posição **A** pode ter longo contacto com a peça incluindo-se o centro, com velocidade de corte zero. Acompanhando o sentido de maquinagem até a posição **D**, a ferramenta oscila entre sentido de corte ascendente, de **A** para **C** e sentido descendente de **C** a **D**. No ponto **C**, a ferramenta está em contacto com a peça apenas no centro, e na posição **B** a ferramenta utiliza sua periferia para o corte, com o diâmetro efectivo de maquinagem sendo igual ao diâmetro nominal da ferramenta. Nesta posição, a ferramenta atinge a sua maior velocidade de corte.

Fig. 37 – Pontos de contacto de uma fresa esférica

A figura 38 mostra, de forma ilustrativa, a área de contacto da ferramenta com a secção de corte do material, caso o volume de remoção seja uniforme, numa operação de acabamento final. No sentido ascendente, a ferramenta corta com o diâmetro nominal, e no sentido descendente, utiliza a parte esférica, podendo utilizar o centro da ferramenta, com velocidade de corte zero, dependendo da relação entre o sobre-espessura e o raio da fresa.

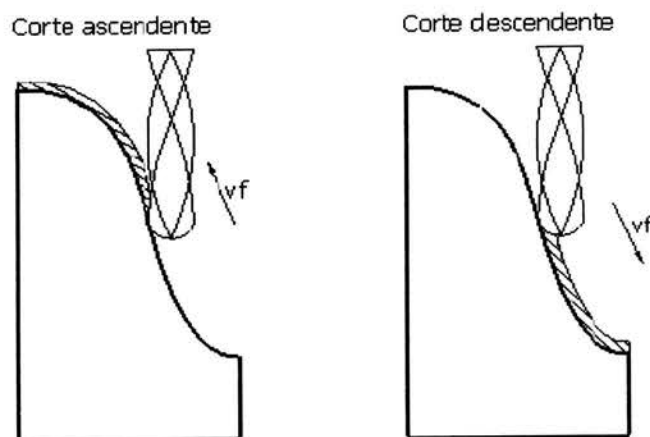


Fig. 38 – Ponto de contacto geometria/peça em função do sentido de corte

No fresamento de superfícies com forma, utilizando uma ferramenta de ponta esférica, em poucas ocasiões a ferramenta utiliza seu diâmetro nominal para corte. Isto ocorrerá na maquinagem de superfícies paralelas a seu eixo. Na maior parte dos casos, a região de contacto entre a ferramenta e a peça varia, do seu centro (diâmetro zero), a um valor que dependerá da profundidade de corte e da inclinação da superfície (SANDVIK, 2000).

3.11 Acabamento Superficial

Na prática industrial quase todas as superfícies técnicas funcionais são obtidas por maquinagem. Podem não apresentar uma forma geométrica exacta e certamente apresentam uma superfície que deverá ser acabada (polimento ou rectificação). Qualquer que seja o processo de corte por arranque de apara, este deixa sempre as suas “impressões” e por maior controlo que se exerça sobre parâmetros de maquinagem, não é possível obter superfícies completamente perfeitas. As características do material, das ferramentas, da máquina, o modo de aperto da peça e as próprias estratégias de maquinagem escolhidas condicionam a textura da superfície.

No acabamento, o objectivo é conseguir o melhor acabamento possível, de modo a evitar possíveis etapas de polimento manual. Como regra geral, deve-se considerar que o avanço por dente (f_z), seja idêntico à profundidade de corte radial (p_r).

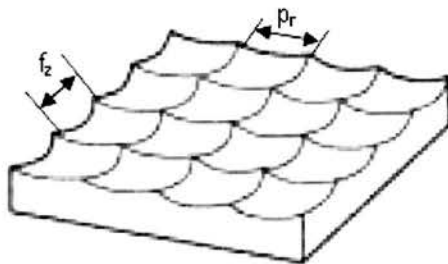


Fig. 39 – Aspecto do acabamento superficial para $f_z=p_r$

As principais vantagens de usar um avanço por dente (f_z) igual à profundidade de corte radial (p_r) são:

- uma superfície com geometria mais homogênea;
- um tempo de maquinagem curto;
- facilidade de polimento caso seja necessário;
- menor numero de defeitos resultantes do arranque da apara.

3.11.1 Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade existentes são valores numéricos resultantes de integrações ou de operações matemáticas simples de perfis amostrais de superfícies. Logo, são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação. Contudo, a sua utilidade é inquestionável: é extremamente útil dispor de valores numéricos para comparação e análise de superfícies, seja para resumir diversas informações contidas numa superfície tridimensional, ou mesmo para separar e classificar superfícies distintas, criadas por diferentes processos de maquinagem.

Muitos dos perfis de rugosidade analisados são obtidos por contacto directo, através de apalpador de um perfilómetro ou de um rugosímetro. Dois grandes efeitos podem modificar a aquisição do perfil analisado, e consequentemente fornecer através destes aparelhos perfis de superfície que não correspondem à realidade: a carga aplicada ao apalpador de leitura e o raio de ponta do apalpador.

3.11.2 Aplicação dos parâmetros de rugosidade

A rugosidade e alguns dos parâmetros utilizados para identifica-la fornecem informação que poderá ser utilizada em termos de projecto, desgaste, atrito e lubrificação.

A tabela 9, adaptada da Norma DIN 4766, indica os valores de rugosidade que é possível obter, pelos diferentes processos de fabrico:

Tabela 9 – Rugosidade média aritmética (R_a) associada aos processos de fabrico de acordo com a norma DIN 4766

Grupo	Processo de fabrico designação	Rugosidade média aritmética (μm)															Rebas
		0.006	0.012	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50		
Fundição	em areia															1)	
	em carapaça															1)	
	em coquilha																
	injectada																
	em cera perdida																
Conformação	forjamento																
	laminagem (chapas)																
	embutidura profunda																
	extrusão																
	estampagem																
Maquinagem	laminagem (perfis)																
	corte																
	torneamento-cilindrico																
	torneamento-facejar																
	torneamento-ranhurar																
	aplainamento c/ plaina																
	aplainamento c/ limador																
	acabamento-engrenagens																
	furação																
	alargamento de furos																
	escariar/rebaixar																
	mandrilagem. de furos																
	fresagem cilíndrica																
	fresagem de topo																
	brochagem																
	limagem																
	rectificação cilíndrica																
	rectificação de face																
	rectificação mergulhante																
	rectificação tangencial																
	rectificação frontal																
	polimento																
	"honning"																
	super-acabamento																
	rodagem cilíndrica																
	rodagem plana																
	ultra-sons																
	lapidagem																
	grenalhagem																
	rebarbagem por vibrador																
oxicorte																	

1) Com este método de fundição devem esperar-se valores para a rugosidade até 125 μm para peças com peso até 250 kg.

3.11.3 Definição de alguns parâmetros de rugosidade

A rugosidade média, denominada R_a , é possivelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Pode ser expresso como sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos pontos do perfil em relação à sua linha média (DIN 4768 e ISO / DIS 4287/1E). Se definirmos a função $Z(x)$ como a distância entre cada ponto do perfil e a linha média no comprimento de cálculo, temos:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Z(x)| dx$$

Um exemplo gráfico é apresentado em baixo:

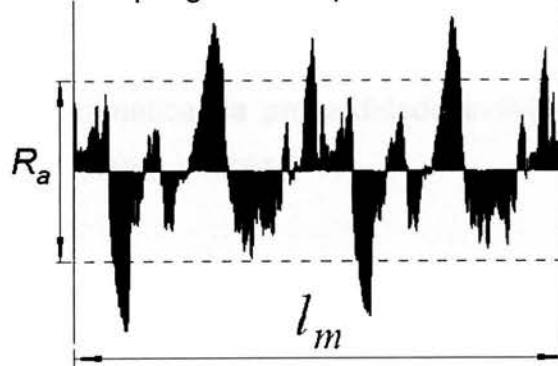


Fig. 40 – Ilustração do parâmetro de rugosidade R_a

Este parâmetro de rugosidade tem a desvantagem de não esclarecer ou caracterizar a variabilidade dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado.

A profundidade individual da rugosidade, R_{zi} , define-se como sendo a distância na vertical entre o maior pico e o maior vale no comprimento de base (l_m). Um exemplo gráfico é apresentado em baixo:

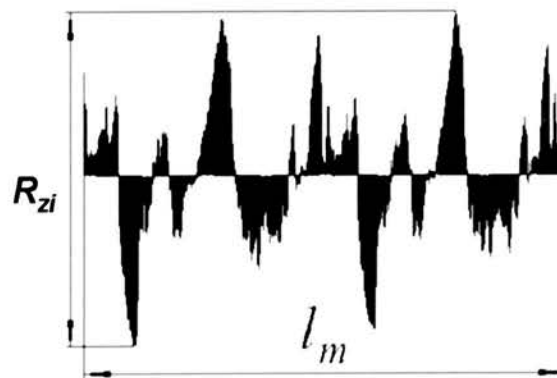


Fig. 41 – Ilustração do parâmetro de rugosidade R_{zi}

Existe ainda um parâmetro de rugosidade semelhante ao R_{zi} que é a profundidade média da rugosidade, R_z , onde existem duas definições utilizadas correntemente:

Norma internacional ISO 468 – À média das diferenças de ordenada entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos, pesquisados no comprimento de base medido a partir duma linha paralela à linha média e não cortando o perfil.

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 z_{pi} - \sum_{i=1}^5 z_{vi} \right)$$

Norma DIN 4768 – À média aritmética da profundidade individual da rugosidade de cinco comprimentos de base (L) sucessivos.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{zi}$$

Classificação da rugosidade segundo a norma DIN/ISO 1302

Tabela 10 – Graus de rugosidade

GRAU DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE R_a [μm]
N 12	50
N 11	25
N 10	12,5
N 9	6,3
N 8	3,2
N 7	1,6
N 6	0,8
N 5	0,4
N 4	0,2
N 3	0,1
N 2	0,05
N 1	0,025

3.12 Benchmarking

Cada vez mais, a inovação, na perspectiva da criação de sinergias entre as competências dos Recursos Humanos, Tecnológicos e de Gestão, é reconhecida como um factor determinante na melhoria da competitividade das empresas, sobretudo nas de menor dimensão. Torna-se necessário então fomentar e dinamizar iniciativas que coloquem estas empresas ao nível das melhores da sua classe aplicando o *Benchmarking*.

3.12.1 Definição

Não há uma única definição de *Benchmarking* mas várias são aceites pela sociedade.

Segundo *Watson*, *Benchmarking* é um método estruturado de aprendizagem de outras organizações e a aplicação desse conhecimento na melhoria dos processos de trabalho.

Para *Spendolini*, *Benchmarking* é um processo sistemático e contínuo para a avaliação de produtos, serviços e processos de trabalho de organizações, as quais são reconhecidas como as melhores práticas implementadas, com o objectivo de melhoria de todo o sistema organizacional.

Podemos então dizer que *Benchmarking* é um processo de pesquisa que permite às organizações realizar comparações de processos e práticas, empresa-a-empresa, para identificar o melhor do melhor e alcançar um nível de superioridade ou de vantagem competitiva. Ao contrário de outras ferramentas de gestão, o *Benchmarking* estimula as empresas a procurar, além das suas próprias operações ou indústrias, factores chave que influenciam a produtividade e os resultados. Esta filosofia pode ser aplicada a qualquer função (vendas, distribuição, investigação e desenvolvimento, engenharia, recursos humanos), embora produza geralmente melhores resultados quando aplicada à empresa como um todo.

No quadro em baixo está descrito de forma reduzida, o que **é** e o que **não é Benchmarking**.

<i>Benchmarking é:</i>	<i>Benchmarking não é:</i>
• Um processo contínuo • Uma procura que fornece informação valiosa • Um processo de aprendizagem • Um leque de oportunidades • Uma análise aos processos • Uma ferramenta de gestão, aplicável aos processos da empresa	• Um acto isolado • Um livro de receitas • Uma cópia ou uma imitação • Reinventar o que já foi inventado • Uma constatação de factos • Uma moda de gestão

O principal objectivo do *Benchmarking*, é aprender!

3.12.2 Tipos de Benchmarking

1. Benchmarking Interno

Neste processo, a análise é focada na mesma organização, comparando diferentes funções ou processos, partindo do pressuposto que há unidades ou funções mais eficientes que outras.

2. Benchmarking Competitivo

Envolve a comparação dos produtos, serviços e processos de trabalho da empresa, com os seus concorrentes directos.

3. Benchmarking Funcional

Consiste em identificar as melhores práticas de qualquer tipo de organização, considerada excelente na área funcional sujeita a *Benchmarking*. Estuda uma função específica dentro da indústria.

4. Benchmarking Genérico

Neste tipo de estudo, a empresa não está limitada à concorrência ou à indústria. O sucesso depende da sua capacidade para descobrir processos análogos, cujas práticas de bom desempenho possam ser adaptadas à empresa.

A seguir é apresentado um quadro com as principais características de cada um dos tipos de *Benchmarking* falados anteriormente.

Tipos de Benchmarking	Adaptabilidade da Informação	Recolha de Dados	Potencial de Inovação
Interno	Fácil	Fácil	Baixo
Competitivo	Complexo	Elevado	Médio
Funcional	Exigente	Razoável	Elevado
Genérico	Exigente	Reduzido	Elevado

3.12.3 Princípios Fundamentais do Benchmarking

1. Reciprocidade

O *Benchmarking* é uma prática baseada em relações recíprocas, na qual todos os participantes beneficiam da partilha de informação.

2. Analogia

Consideram-se processos semelhantes ou análogos, quando há uma transferência de conhecimentos entre os parceiros do estudo.

3. Medição

O *Benchmarking* é uma comparação de desempenho entre empresas, que passa pela compreensão das razões que justificam os melhores resultados e as diferenças em relação às empresas líderes. Os sistemas de medição e as ferramentas utilizadas nessa análise dependem dos indicadores seleccionados.

4. Validade

A fiabilidade dos estudos pode ser validada por métodos estatísticos. Os participantes não devem confiar na sua intuição ou em suposições que poderão pôr em causa as conclusões do *Benchmarking*.

4. Trabalho Experimental

4.1 Máquina-ferramenta

A parte experimental de maquinagem foi realizada na ESS com o auxílio de um centro de maquinagem vertical existente. Este centro é da marca Deckel Maho, modelo DMF 220 Linear. Este centro já possui um eixo linear, responsável pelo movimento rápido da máquina em X. A seguir são apresentadas as principais características desta máquina.

Tabela 11 – Principais características do centro de maquinagem vertical

Área de trabalho (X, Y, Z)	2200 x 560 x 720	mm
Área da mesa de trabalho (X, Y)	2600 x 600	mm
Carga máxima admitida sobre a mesa	2200	Kg
Potência máxima	35	KW
Potência à rotação máxima	16	KW
Cones de fixação da ferramenta à árvore	ISO 40	
Rotação máxima	até 12000 (variável)	rpm
Capacidade do armazém de ferramentas	30 (carrocel)	
Máxima velocidade de avanço programável (eixo linear X)	20000	mm/min
Movimentos rápidos (X, Y, Z)	100 / 50 / 50	m/min
Precisão	0,001	mm
Peso máximo da ferramenta	6	Kg
Peso máximo da máquina (com armazém de 30 ferramentas)	12500	Kg
Controlador	Heidenhain iTNC 530	

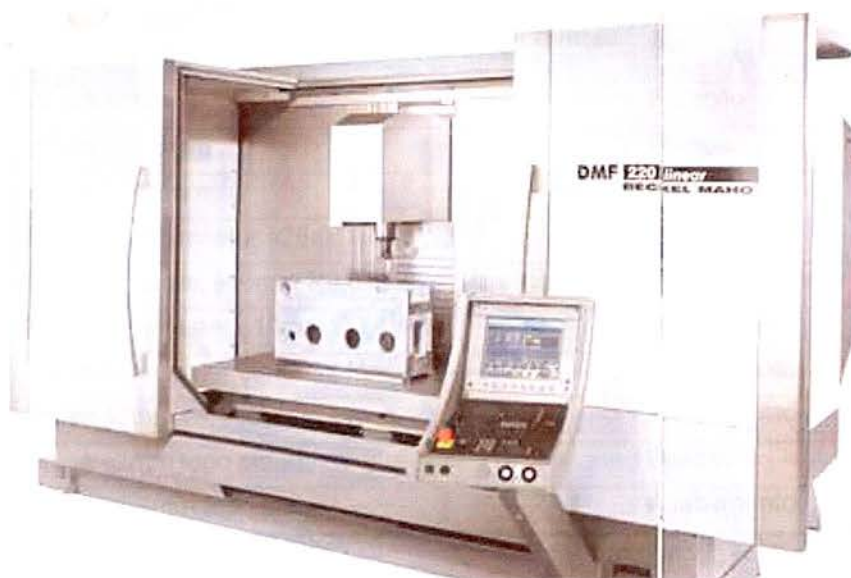


Fig. 42 – Centro de maquinagem vertical

4.2 Material maquinado

O material maquinado foi um aço com a referência 1.2767. Na tabela abaixo temos a composição química, propriedades mecânicas e físicas e principais aplicações deste material.

Tabela 12 – Características do material maquinado

Fonte: Catálogo RAMADA

Composição química em percentagem do aço 1.2767. (Norma DIN: X45NiCrMo4)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0.45	0.25	0.4	1.4	0.25	4
Estado de fornecimento: Recozido					
Dureza máxima (HB): 250					
Principais aplicações: Ferramentas para estampar talheres, matrizes para estampagem e lâminas para corte de materiais grossos, cunhos para medalhas. Moldes para plásticos.					

4.3 Ferramentas utilizadas

As ferramentas usadas diariamente na ESS foram as usadas nesta maquinagem e são na sua grande parte da marca Seco. As principais ferramentas usadas são apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 13 – Principais ferramentas utilizadas

Designação	Nº de dentes Z_n	Aplicação
Broca ponto	-----	Furação
Broca $\phi 11,5\text{mm}$	-----	Furação
Mandril $\phi 12\text{mm}$	-----	Mandrilagem
Fresa Combimaster $\phi 25\text{mm R}1,5^{1)}$	3	Desbaste
Fresa Secodex $\phi 16\text{mm R}0,8^{1)}$	2	Pré-acabamento
Fresa Minimaster $\phi 10\text{mm R}0,4^{1)}$	2	Acabamento
Fresa Minimaster $\phi 6\text{mm esférica}^{1)}$	2	Acabamento
Fresa $\phi 3\text{mm esférica}$	2	Acabamento
Fresa $\phi 2\text{mm topo plano}$	2	Desbaste
Fresa $\phi 1,5\text{mm topo plano}$	2	Acabamento

Nota: ¹⁾ Referência SECO

4.4 Software utilizado

Os programas mais utilizados durante este estágio foram o SolidWorks (software CAD) e o MasterCam (software CAM).

4.5 Análise superficial

A análise superficial das peças maquinadas foi feita de duas formas na FEUP. Mediu-se a rugosidade e tiraram-se fotografias às diferentes peças maquinadas. O equipamento utilizado para medir rugosidades pode ser visto na figura seguinte:



Fig. 43 – Rugosímetro usado na FEUP

Tabela 14 – Características do rugosímetro

Marca	HommelWerke
Controlador	Hommel Tester T4000
Apalpador	TKL 300
Comprimento de palpagem (λ)	4,8 mm
Comprimento de medição filtrado (λ_c)	4 mm
Unidade de medição	μm

Para aquisição de imagens foi utilizada uma lupa estereoscópica com câmara digital integrada que pode ser visualizada a seguir:



Fig. 44 – Lupa estereoscópica usada na FEUP

Tabela 15 – Características da lupa estereoscópica

Marca	Olympus
Ampliação Máxima	20x

5. Simulação da maquinagem

5.1 Modelação CAD

Este trabalho tinha como principal objectivo a optimização do processo de fresagem existente na ESS. Para isto, e após discussão com os orientadores, optei pela maquinação de duas peças padrão que contivessem o maior número possível de superfícies que vulgarmente se encontram em moldes. Assim, era necessário criar superfícies de revolução, com raios e inclinações, formas geométricas complexas, faces inclinadas e rasgos finos profundos. Para criação destes modelos usei o SolidWorks 2004, versão existente na ESS. Os modelos criados são apresentados a seguir.

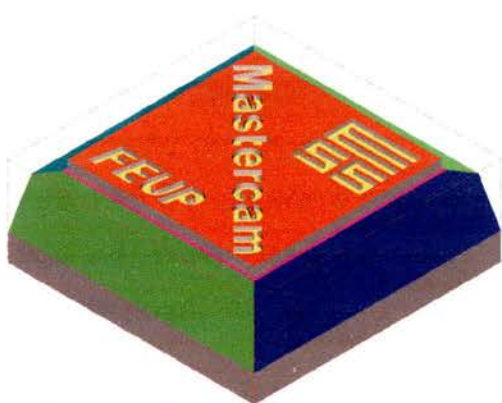


Fig. 45 – Peça padrão A

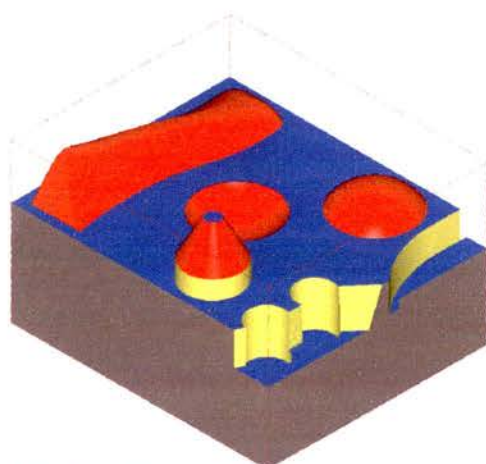
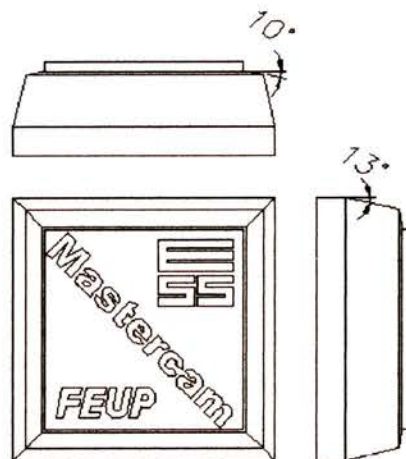
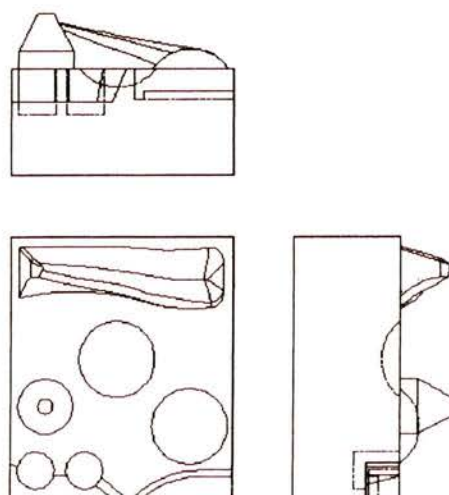


Fig. 46 – Peça padrão B



5.2 Programação CAM

Após termos criado estes dois modelos, tornou-se necessário criar os programas de maquinagem. Os programas foram criados através do software MasterCam v9.1 SP2. A seguir é descrito, de forma mais ou menos detalhada, o procedimento a ter para a maquinagem das peças.

5.2.1 Peça A

Começando pela peça A e olhando para a figura 44, vemos que ela é composta principalmente por superfícies inclinadas. Pretendia-se com esta peça, avaliar o desempenho de uma ferramenta de ponta esférica na maquinagem de rampas com e sem lubrificação. A figura 44 mostra as faces que terão diferentes maquinagens, com cores diferentes.

Após recepção dos ficheiros CAD, tornou-se necessário colocar a peça na posição de maquinagem e localizar a origem do referencial. A seguir na figura 46 é mostrada a peça quando foi importada do CAD para o CAM, e na figura 47 pode ser vista a imagem de como deve ficar orientada e a posição da origem do referencial.

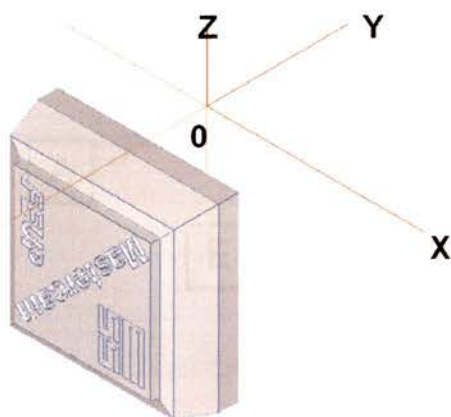


Fig. 47 – Após importamento

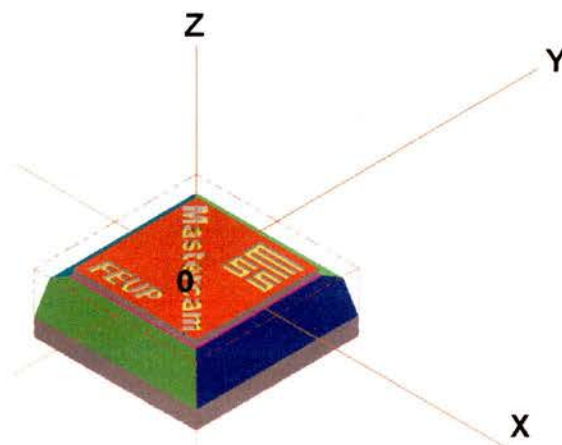


Fig. 48 – Peça em posição para se iniciar a programação

A origem do referencial esta localizada na face superior e ao centro da peça. Esta deve ser a centragem feita no bloco de aço que irá ser maquinado. É necessário algum conhecimento do software para localização da origem na modelação o que normalmente se consegue através de rotações e translações.

Para uma fácil identificação das faces além da utilização de cores vamos utilizar também letras, isto porque temos inclinações diferentes em zonas que possuem a mesma cor.

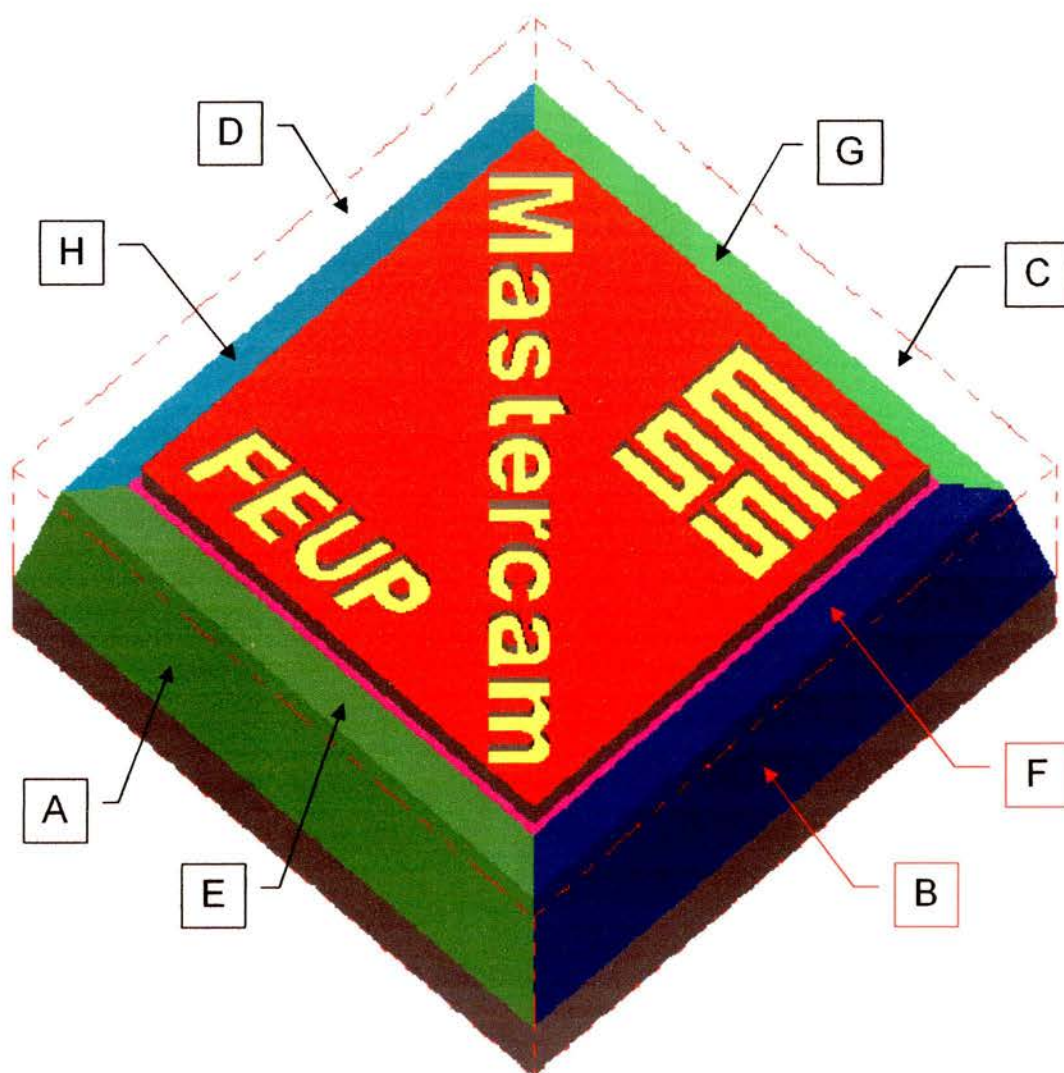
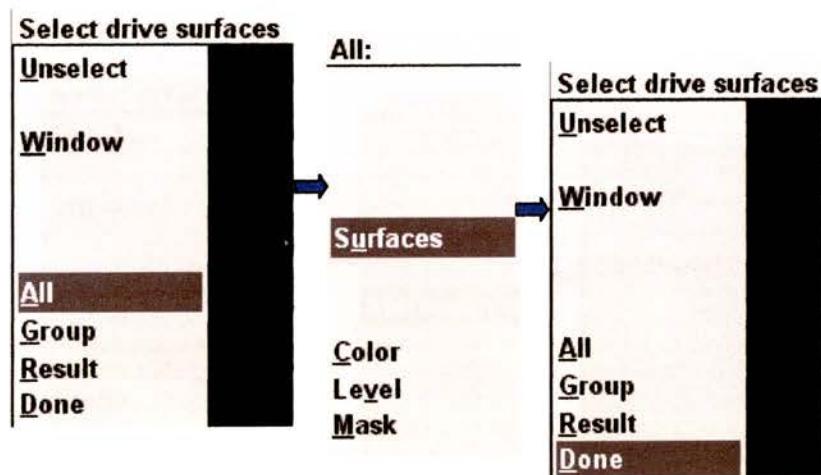
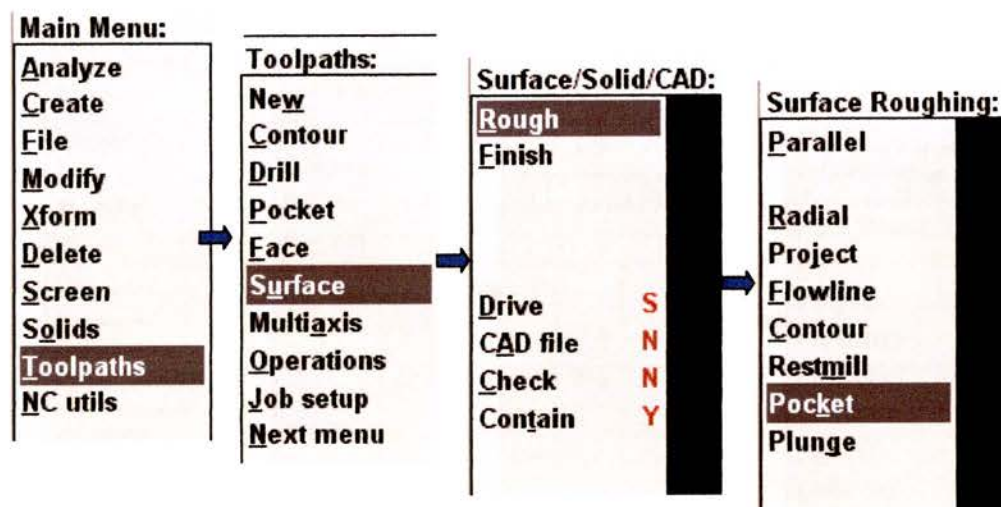


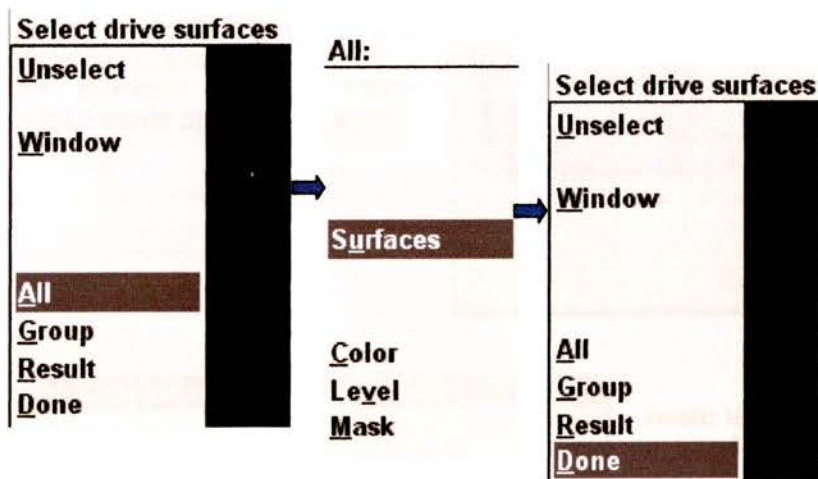
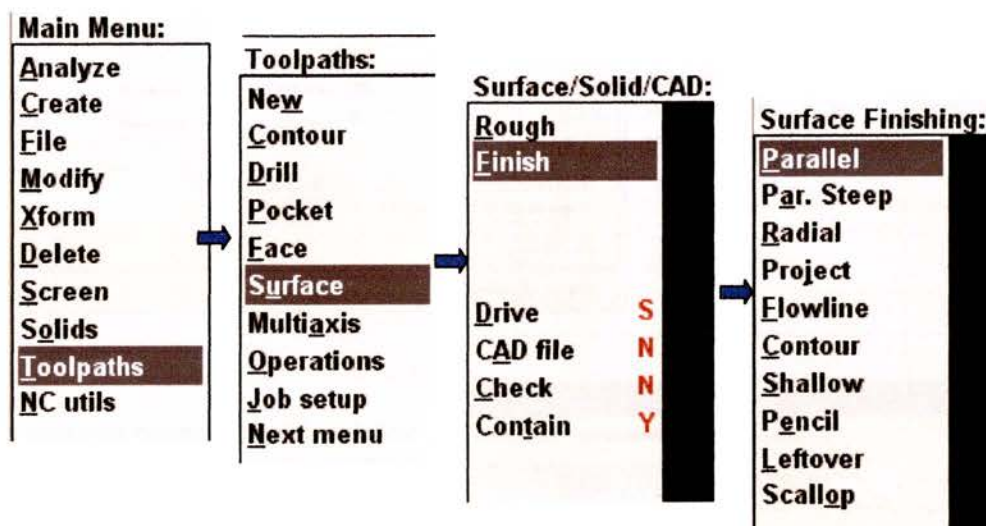
Fig. 49 – Identificação das faces da peça A

A seguir é mostrada uma sequência que poderia ser seguida para maquinar uma peça com a estratégia “Pocket” considerando todas as superfícies. A escolha de todas as superfícies tem a vantagem de evitar possíveis colisões ou enterradelas.



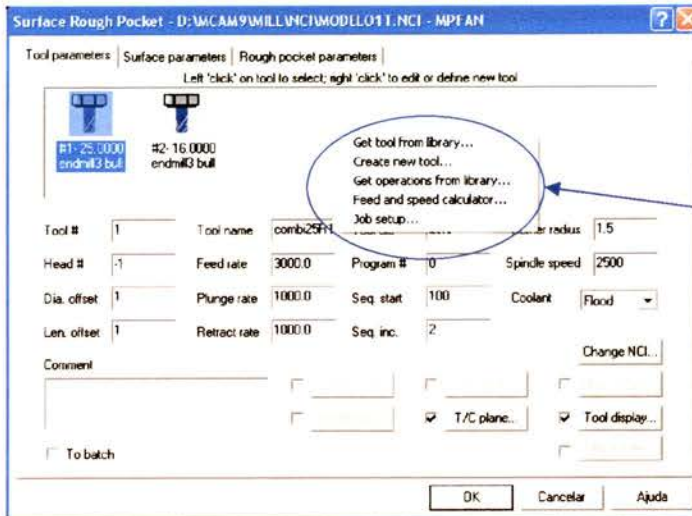
Isto é só um exemplo, dependendo do que pretendamos, devemos seguir as opções existentes. Estas opções são usadas para desbastes (Rough).

A seguir é mostrada uma sequência que poderia ser seguida para maquinar uma peça com a estratégia “Parallel”, vulgarmente denominada de cópia, considerando todas as superfícies. A escolha de todas as superfícies tem a vantagem de evitar possíveis colisões ou enterradelas.



Isto é só um exemplo, dependendo do que pretendamos, devemos seguir as opções existentes. Estas opções são usadas para acabamentos (Finish).

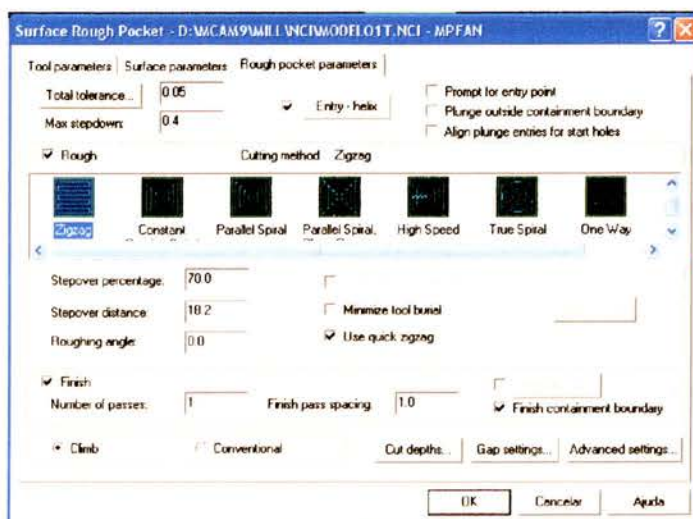
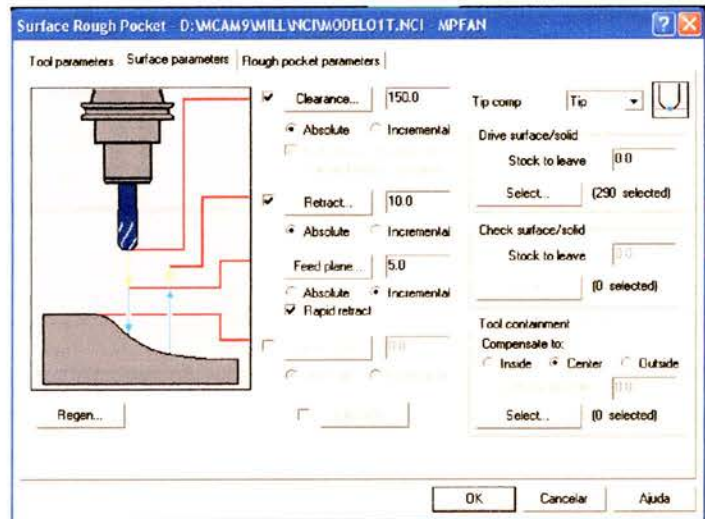
Após qualquer um destes percursos, teremos um quadro como o apresentado a seguir:



Posteriormente torna-se necessário criar as ferramentas. Isto consegue-se clicando na zona branca com o botão direito do rato e escolher a opção “Create new tool”.

Nesta opção deverão ser introduzidos todos os parâmetros de modo a caracterizar a ferramenta como o avanço, a rotação, o diâmetro, a velocidade de penetramento e velocidade de recuo.

Neste segundo quadro, devemos definir a altura a que a ferramenta se situa após maquinagem, a altura a que a ferramenta sobe para de seguida introduzir novas passagens e a altura a que a ferramenta deixa de se deslocar em movimento rápido e passa para a velocidade de penetramento. Também devemos definir a sobre-espessura a deixar após maquinagem.



Neste terceiro quadro, devemos definir a tolerância máxima, o penetramento máximo dado pela ferramenta, o tipo de entrada, a estratégia usada, o valor do penetramento radial e as profundidades de corte.

A seguir é apresentada uma tabela com a identificação da superfície (através de cores e letras) e a estratégia de maquinagem correspondente.

Tabela 16 – Estratégias usadas no acabamento da peça A

Cor	Letra	Estratégia usada	Ferramenta usada	Descrição
Verde Escuro	A – E	Maquinagem em Contorno (Contour one-way ¹⁾)	Minimaster ϕ 6mm esférico²⁾ Ferramenta composta por haste + pastilha sendo a haste em metal duro anti-vibratória e a pastilha é um metal duro revestido. (Referência SECO)	A ferramenta executa um movimento na horizontal, incrementando Z de um valor constante. Realiza passagens de corte em um só sentido.
Azul Escuro	B – F	Maquinagem em Cópia (Parallel 0° zig-zag ¹⁾)		A ferramenta executa um movimento na vertical, incrementando X ou Y, dependendo da posição da peça, de um valor constante. Realiza passagens de corte em dois sentidos.
Verde Claro	C – G	Maquinagem em Cópia (Parallel 45° zig-zag ¹⁾)		A ferramenta executa movimento na diagonal, com uma inclinação de 45°, incrementando X ou Y, de um valor constante. Realiza passagens de corte em dois sentidos.
Azul Claro	D – H	Maquinagem em Contorno (Contour zig-zag ¹⁾)		A ferramenta executa um movimento na horizontal, incrementando Z de um valor constante. Realiza passagens de corte em dois sentidos.

Nota: ¹⁾ Referência MasterCam

²⁾ Referência SECO

Tabela 17 – Parâmetros de corte

Cor na peça	Letras	Rotação n (rpm)	Vel. de avanço V _f (mm/min)	Profundidade de corte a _p (mm)	Penetramento radial a _e (mm)	Tolerância (mm)
Verde Escuro	A – E	8000	2000	0.05	0.1	0.05
Azul Escuro	B – F	8000	2000	0.1	0.05	0.05
Verde Claro	C – G	8000	2000	0.1	0.05	0.05
Azul Claro	D – H	8000	2000	0.05	0.1	0.05

De seguida são mostradas as simulações de maquinagem desde o desbaste até ao acabamento. Notar que deixamos após desbaste uma sobre-espessura de meio milímetro e após pré-acabamento uma sobre-espessura de duas décimas para o acabamento.

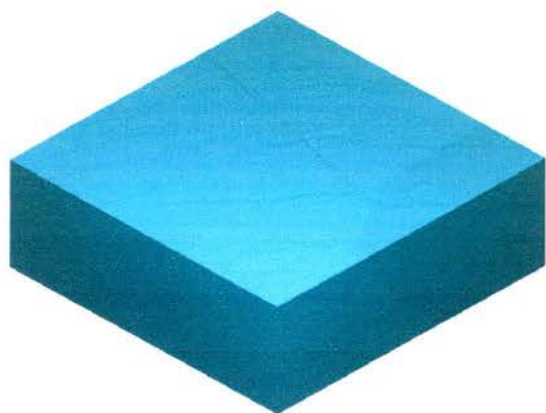


Fig. 50 – Bloco de trabalho

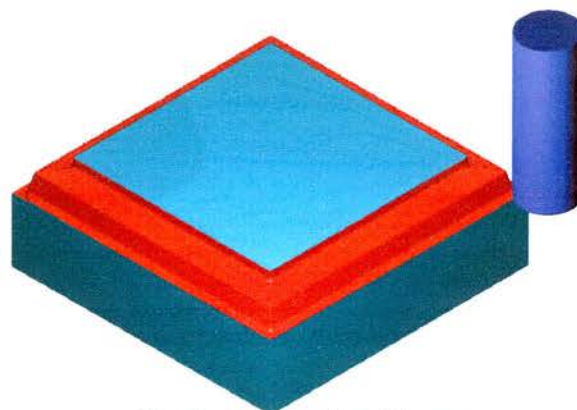


Fig. 51 – Fresa de ϕ 25mm a desbastar em contorno



Fig. 52 – Pré-acabamento com fresa ϕ 16mm em contorno

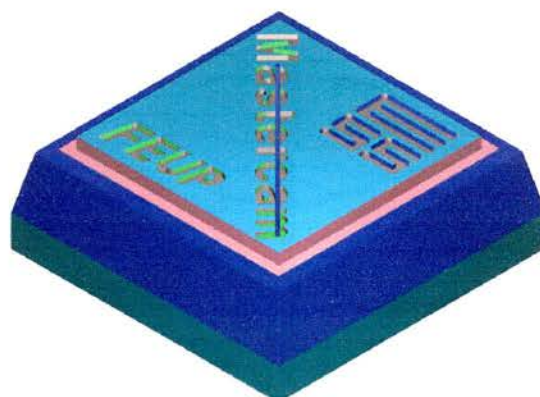


Fig. 53 – Contorno das letras com fresa de ϕ 1,5mm

5.2.1.1 Maquinagem em Contorno (One-Way)

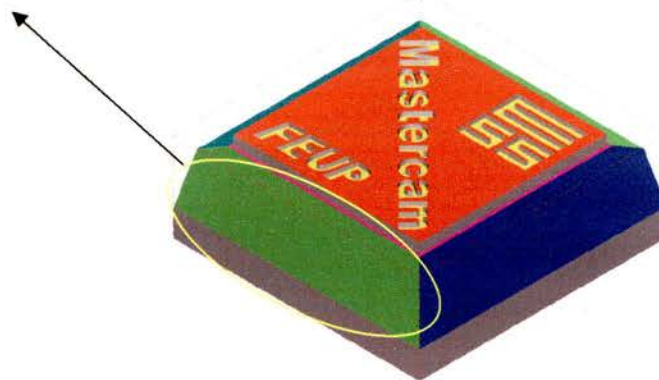


Fig. 54 – Zona assinalada que irá ser maquinada em contorno (one-way)

Estas faces A e E, foram maquinadas em contorno, com a ferramenta a cortar em um só sentido (sentido concordante). Na imagem seguinte é visível o sentido de corte da ferramenta (direita – esquerda) e é também visível o problema dos incrementos constantes em Z. Na face E, face de menor inclinação o espaçamento entre passagens “stepover” é muito maior que na face de maior inclinação, face A.

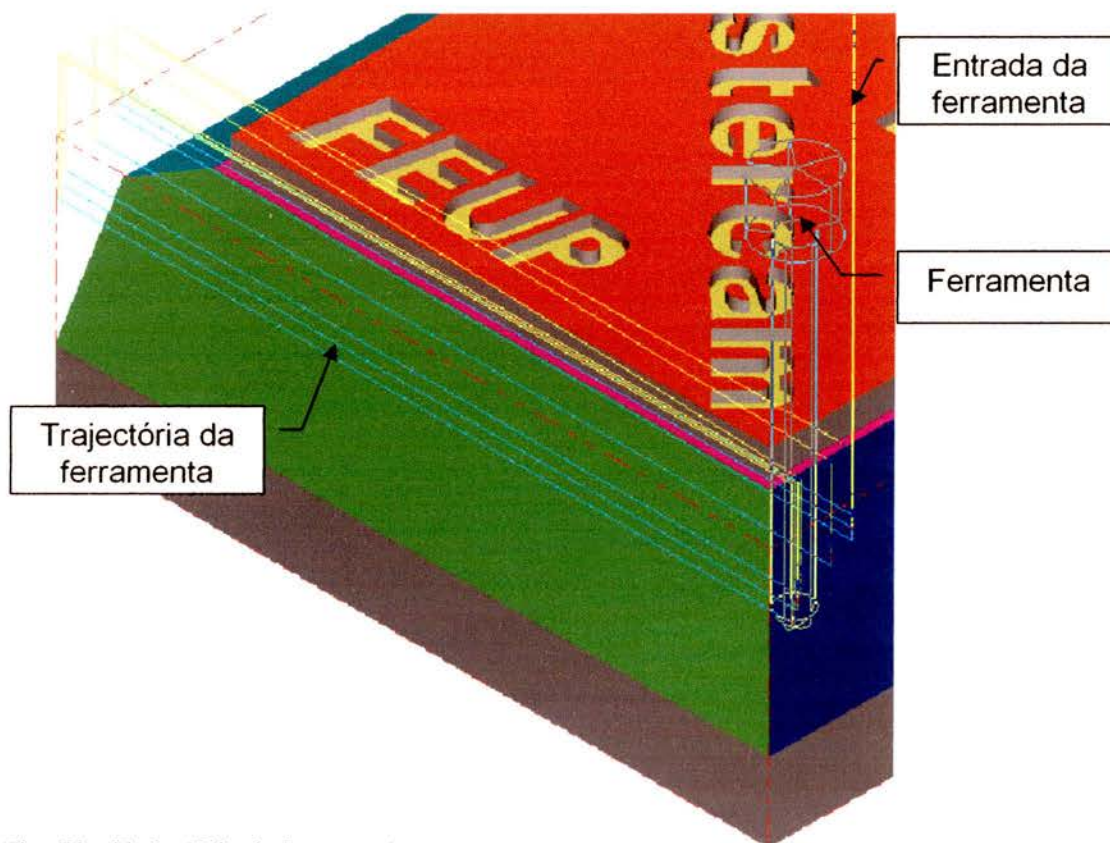


Fig. 55 – Trajectória da ferramenta

5.2.1.2 Maquinagem em Cópia (0 graus)

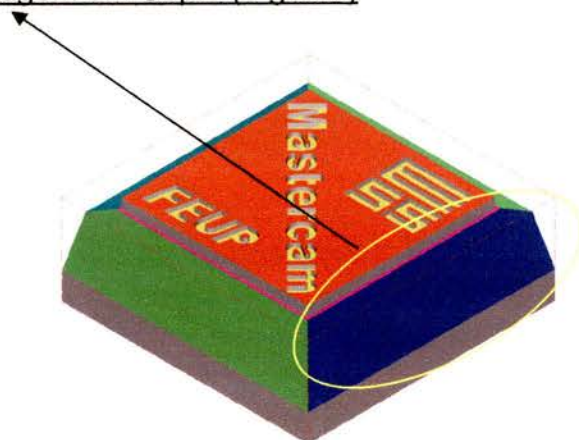


Fig. 56 – Zona assinalada que irá ser maquinada em cópia (0 graus)

Esta face foi maquinada em cópia a zero graus, com a ferramenta a cortar em ambos os sentidos (zig-zag). Na imagem seguinte é visível o sentido de corte da ferramenta.

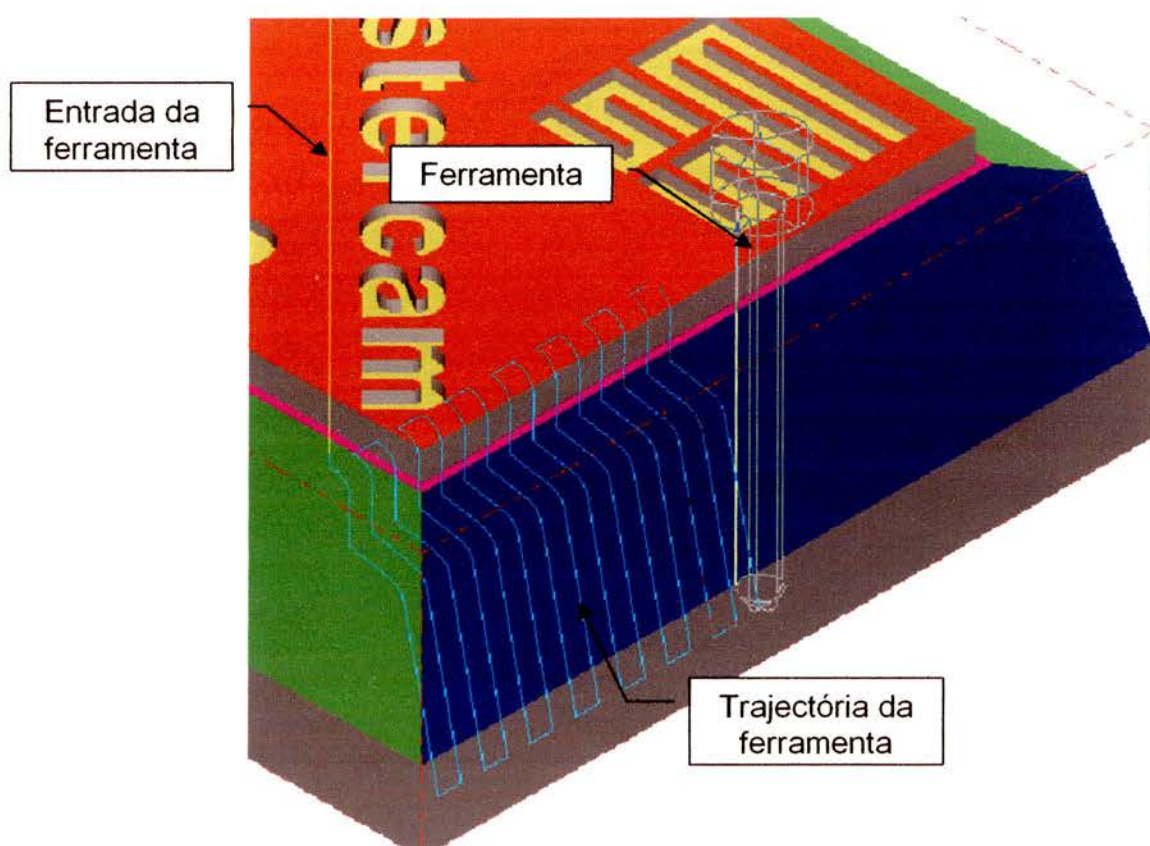


Fig. 57 – Trajectória da ferramenta

5.2.1.3 Maquinagem em Cópia (45 graus)

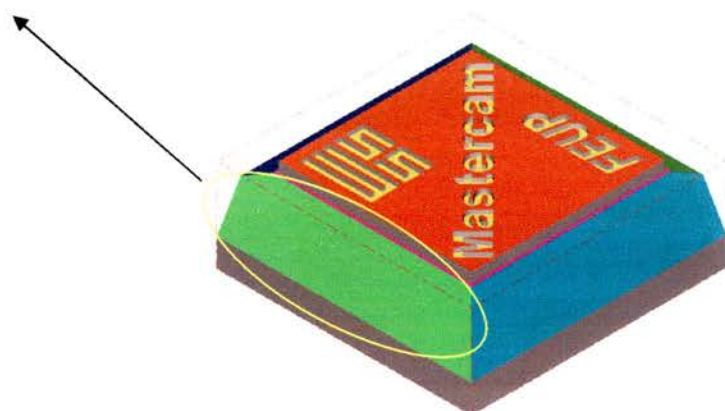


Fig. 58 – Zona assinalada que irá ser maquinada em cópia (45 graus)

Esta face foi maquinada em cópia a 45 graus, com a ferramenta a cortar em ambos os sentidos (zig-zag). Na imagem seguinte é visível o sentido de corte da ferramenta.

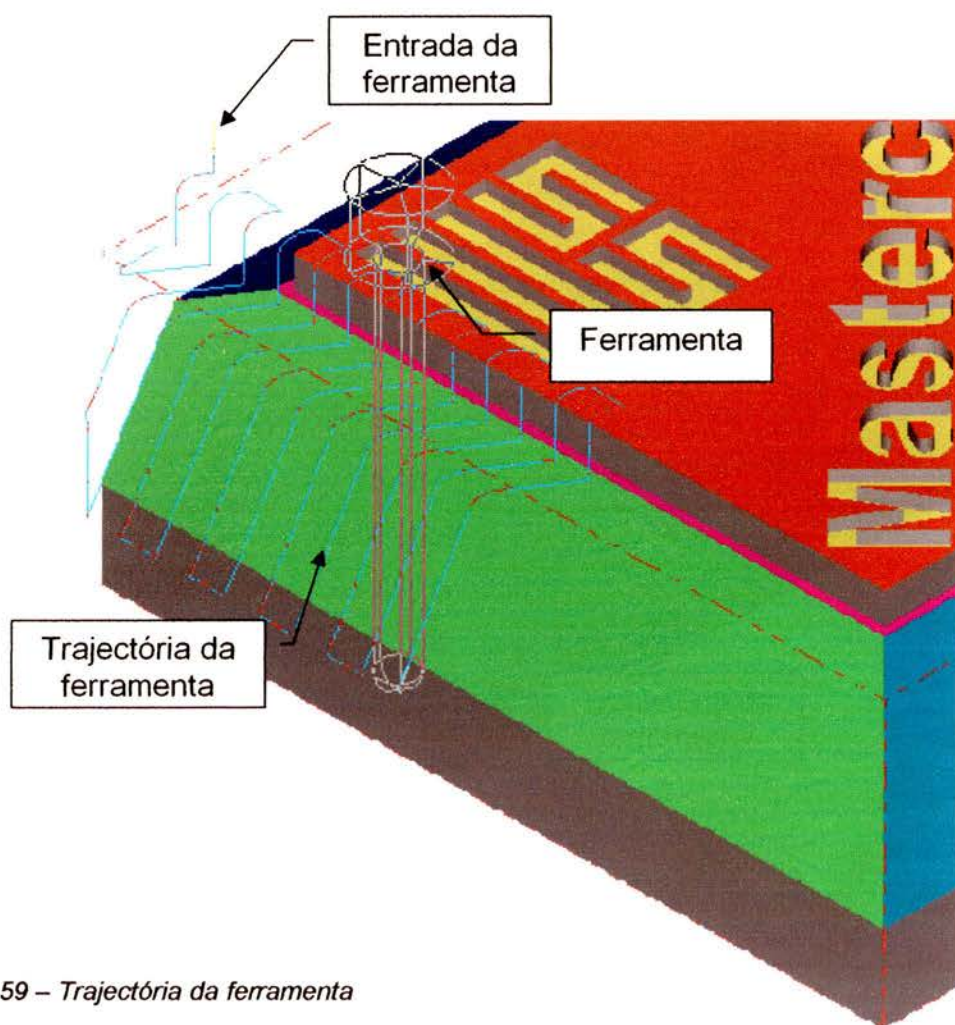


Fig. 59 – Trajectória da ferramenta

5.2.1.4 Maquinagem em Contorno (Zig-Zag)

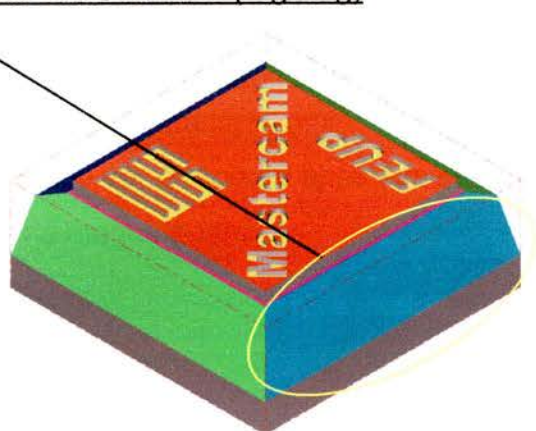


Fig. 60 – Zona assinalada que irá ser maquinada em contorno (zig-zag)

Esta face foi maquinada em contorno, com a ferramenta a cortar em ambos os sentidos (zig-zag).

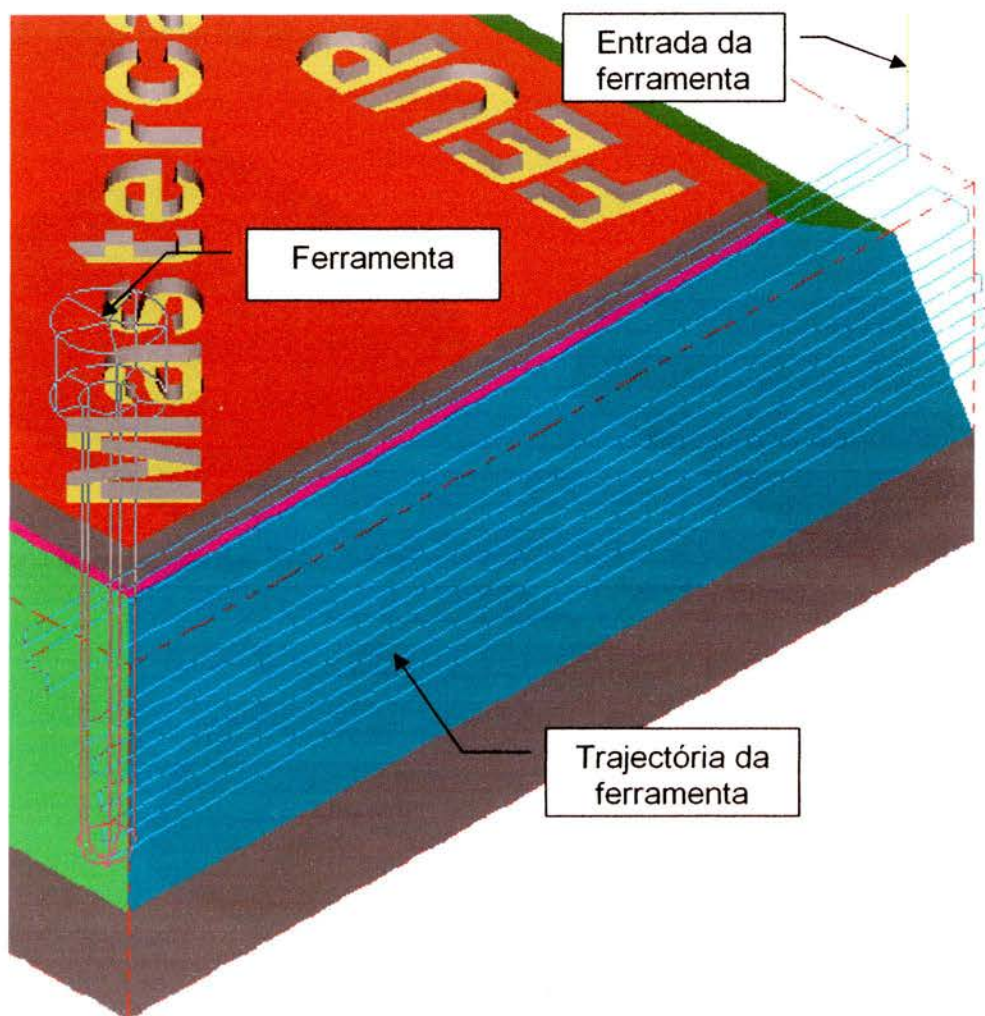


Fig. 61 – Trajectória da ferramenta

A face superior foi toda ela obtida através de uma estratégia em contorno com uma redução progressiva de fresas que variou do diâmetro de 3mm até um diâmetro de 1,5mm.

A seguir podemos ver o modelo após simulação no MasterCam, com os parâmetros usados na maquinagem.

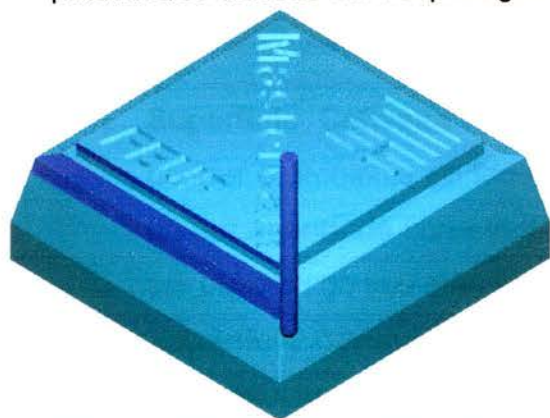


Fig. 62 – Maquinagem das faces A e E

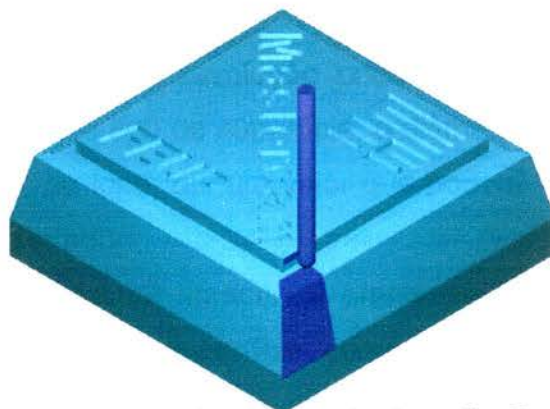


Fig. 63 – Maquinagem das faces B e F

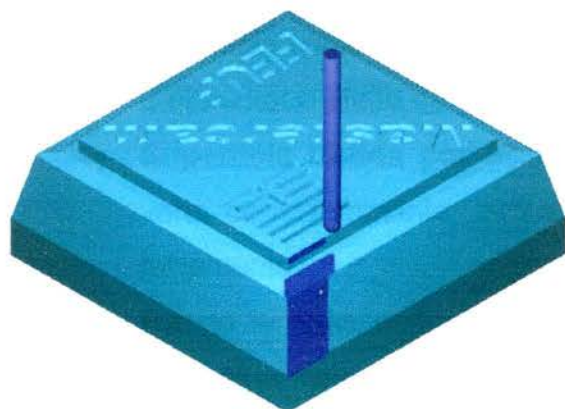


Fig. 64 – Maquinagem das faces C e G

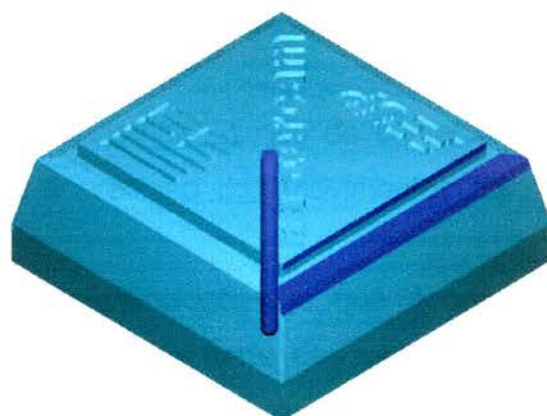


Fig. 65 – Maquinagem das faces D e H

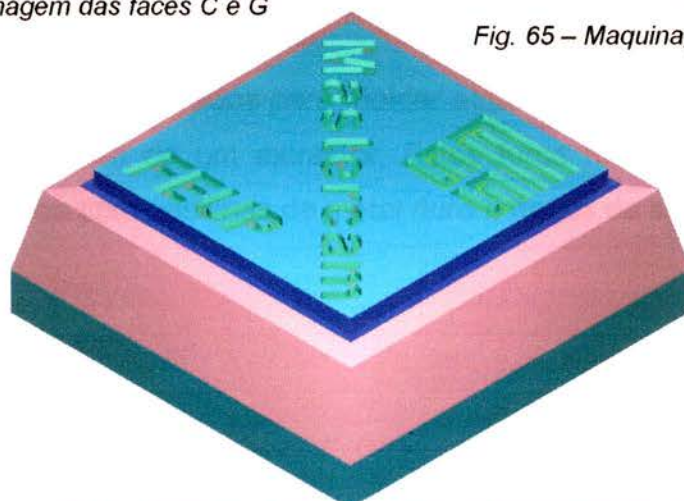


Fig. 66 – Peça final obtida após simulação no MasterCam

5.2.2 Peça B

A peça B contém formas comuns em moldes, onde é necessária a aplicação de uma estratégia de maquinagem correcta para se conseguir uma qualidade superficial final satisfatória e que evite o mais possível o acabamento manual. Estas superfícies criadas têm algumas particularidades que passo a descrever:

- **Superfície Convexa** – é uma superfície de revolução onde poderá ocorrer o problema do facetamento. Neste tipo de superfície, o diâmetro da ferramenta de corte varia de zero, no topo, até um valor que poderá ser próximo do seu diâmetro na zona inferior.
- **Superfície Côncava** – esta superfície deverá apresentar praticamente os mesmos problemas apontados para a superfície convexa mas invertidos.
- **Cone** – esta superfície é constituída por uma base cilíndrica e uma superfície cónica. Permite-nos controlar a precisão dimensional na base e observar o efeito de facetamento no cone.
- **Superfície obtida por Spline** – nesta superfície, o raio de curvatura varia constantemente, o que dificulta a precisão dos movimentos da ferramenta.
- **Rasgo** – esta geometria traz evidentes dificuldades já que é uma geometria estreita e profunda, realizada grande parte das vezes por electroerosão. Realizamos este rasgo por fresagem e analisamos a superfície.
- **Furos** – furos calibrados para moldar alguma parte da peça ou mesmo para passagem de um extractor. Estes furos foram maquinados com broca, fresa com pastilhas de metal duro e fresas de aço rápido.

Foram maquinadas três peças todas com estratégias diferentes sendo posteriormente uma remaquinada com as estratégias otimizadas e fazendo a tolerância diminuir de 0,05mm para 0,005mm. A seguir é feita uma legenda das superfícies para mais fácil identificação.

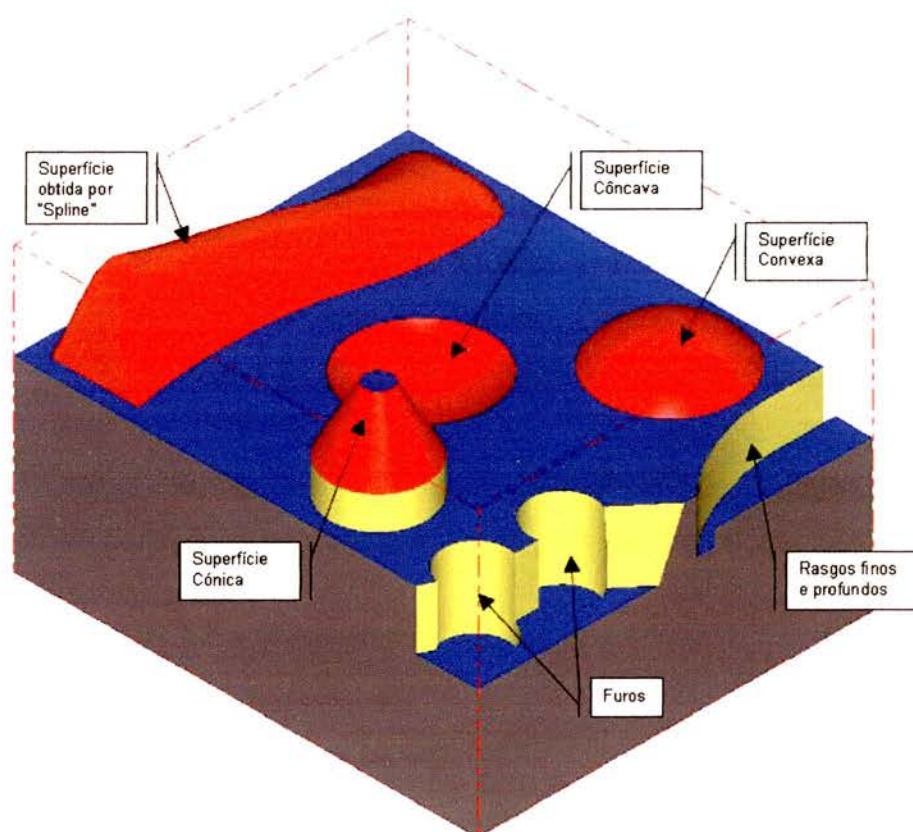


Fig. 67 – Identificação das superfícies da peça B

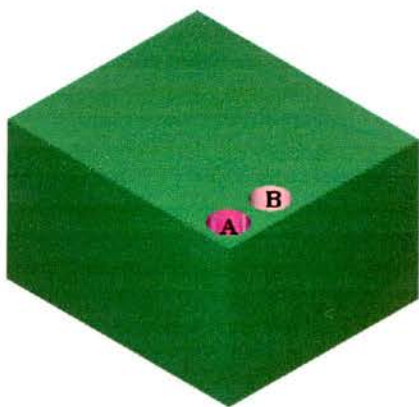
Foram efectuadas quatro programações diferentes sendo uma referente à maquinagem em contorno, outra em offset, outra em cópia e uma final com as estratégias optimizadas e uma redução no valor da tolerância de maquinagem. Nas três primeiras programações a única variável em estudo era o tipo de estratégia aplicada a uma determinada superfície. Na última programação, já com as estratégias optimizadas fez-se diminuir o valor da tolerância de maquinagem sendo esta a variável em estudo.

Para uma fácil identificação, atribuíram-se as seguintes designações a cada programação:

- Peça B_C relativa à estratégia Contorno
- Peça B_S relativa à estratégia Scallop
- Peça B_R relativa à estratégia Radial e Cópia
- Peça B_O relativa à aplicação das estratégias optimizadas

A seguir é apresentada uma sequência de imagens que nos demonstram como foi efectuada a maquinagem destas peças, desde a furação até ao pré-acabamento.

Furação



A primeira operação efectuada na maquinagem foi a furação. Na peça B_C ambos os furos foram maquinados com o auxílio de uma broca sendo o furo A posteriormente mandrilado. Na peça B_S e B_R após furação, os furos foram maquinados com uma fresa.

Fig. 68 – Bloco de trabalho com identificação dos furos

Desbaste

Podemos considerar que o desbaste foi efectuado em duas etapas. Numa primeira, desbastamos o material até à altura do início do rasgo (figura 68). A esta altura demos início à maquinagem do rasgo (figura 69) e depois acabamos o desbaste até à altura mínima da peça (figura 70). A seguir é apresentada uma sequência que explica isso mesmo.

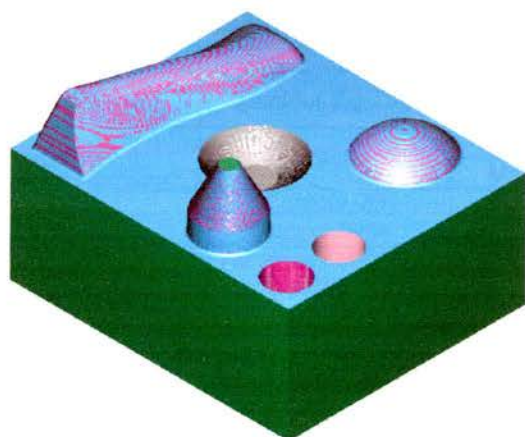


Fig. 69 – Desbaste da peça B

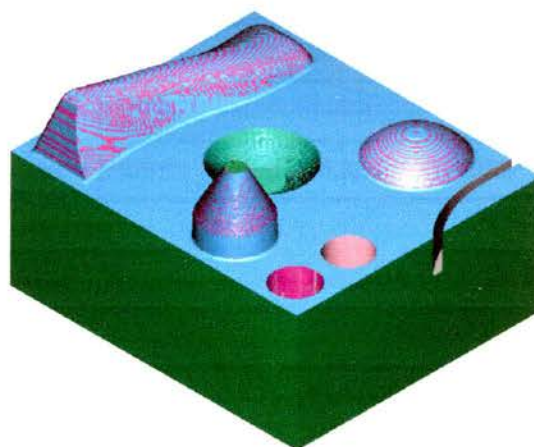


Fig. 70 – Continuação de desbaste da peça B

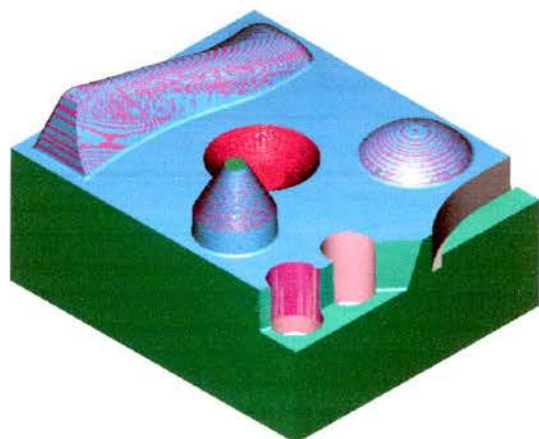


Fig. 71 – Finalização de desbaste da peça B

Estas operações de furação e desbaste são comuns às três peças daí não se fazer referência em mais nenhuma das apresentações seguintes.

5.2.2.1 Peça B_C

Nesta peça foi utilizada uma estratégia de maquinagem em contorno (contour) em todas as superfícies para acabamento sendo usada a lubrificação.

Tabela 18 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_C

Forma na peça	Estratégia usada	Ferramenta usada	Referência da pastilha ou fresa
"Spline"	Contour Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Cone	Contour Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Convexa	Contour Zig-Zag	Fresa ϕ 3mm esférica (HSS) ⁽²⁾	R216.42-01030-AC30P
Côncava	Contour Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Furos	Furação	Broca ϕ 12mm (HSS) Mandril ϕ 12mm (HSS)	_____
Rasgo	Contour 2D concordante	Fresa ϕ 2mm direita (HSS) ⁽²⁾	R216.32-01030-AC30P

Nota: 1) Ferramenta SECO
2) Ferramenta SANDVIK

Tabela 19 – Parâmetros de corte da peça B_C

Forma na peça	Rotação n (rpm)	Velocidade de avanço V _f (mm/min)	Profundidade de corte a _p (mm)	Penetramento radial a _e (mm)	Tolerância (mm)
"Spline"	8000	2000	0.05	0.1	0.05
Cone	8000	2000	0.05	0.1	0.05
Convexa	8000	2000	0.05	0.1	0.05
Côncava	8000	2000	0.05	0.1	0.05
Furos	600	18 (broca) 10 (mandril)	_____	_____	_____
Rasgo	6000	500	0.03	2	0.05

Acabamento

Nas operações de acabamento foi usada uma lubrificação externa de baixa pressão mas abundante. Esta lubrificação foi usada em todas as peças já que é a existente na máquina utilizada para a realização do trabalho experimental. De seguida são apresentadas imagens obtidas após simulação no MasterCam:

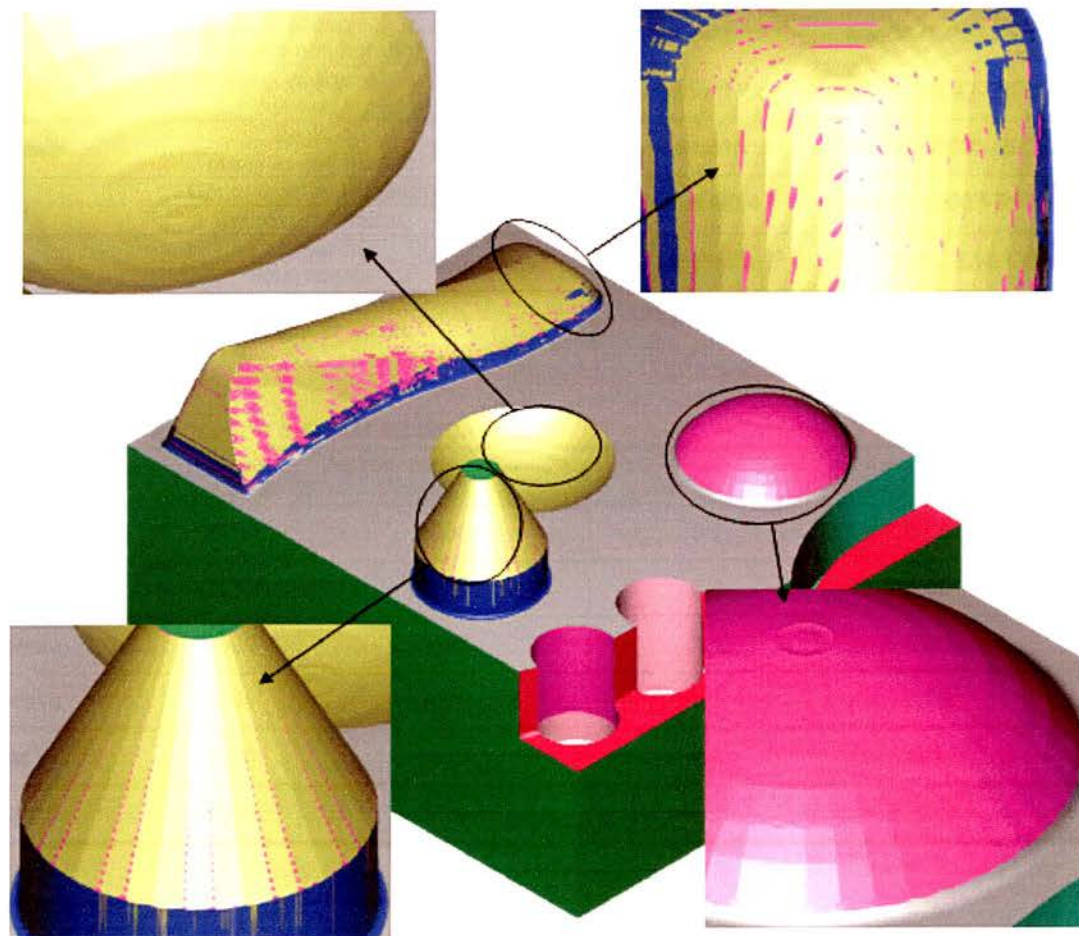


Fig. 72 – Imagem da peça B_C com todas as operações de maquinagem já efectuadas

Da observação da simulação é possível verificar que a zona superior e inferior da superfície convexa e côncava respectivamente, apresentam irregularidades. Em todas elas é possível verificar o efeito de facetamento.

5.2.2.2 Peça B S

Nesta simulação, após desbaste, foi utilizada uma estratégia de maquinagem em offset (scallop) em todas as superfícies para acabamento.

Tabela 20 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_S

Forma na peça	Estratégia usada	Ferramenta usada	Referência da pastilha ou fresa
"Spline"	Scallop (sentido anti horário)	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Cone	Scallop (sentido anti horário)	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Convexa	Scallop (sentido anti horário)	Fresa ϕ 3mm esférica (HSS) ⁽²⁾	R216.42-01030-AC30P
Côncava	Scallop (sentido anti horário)	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Furos	Contour (c/ incremento) Contour (c/ Hélice)	Minimaster ϕ 10mm R0.4 ⁽¹⁾	MM10-10007-R04-MD04 F30M
Rasgo	Contour 2D discordante	Fresa ϕ 2mm direita (HSS) ⁽²⁾	R216.32-01030-AC30P

Nota: 1) Ferramenta SECO
2) Ferramenta SANDVIK

Tabela 21 – Parâmetros de corte da peça B_S

Forma na peça	Rotação n (rpm)	Velocidade de avanço V_f (mm/min)	Profundidade de corte a_p (mm)	Incremento lateral a_e (mm)	Tolerância (mm)
"Spline"	8000	2000	0.1	0.05	0.05
Cone	8000	2000	0.1	0.05	0.05
Convexa	8000	2000	0.1	0.05	0.05
Côncava	8000	2000	0.1	0.05	0.05
Furos	6200	2000	0.1	0.1	0.05
Rasgo	6000	500	0.03	2	0.05

Acabamento

De seguida são apresentadas imagens obtidas após simulação no MasterCam:

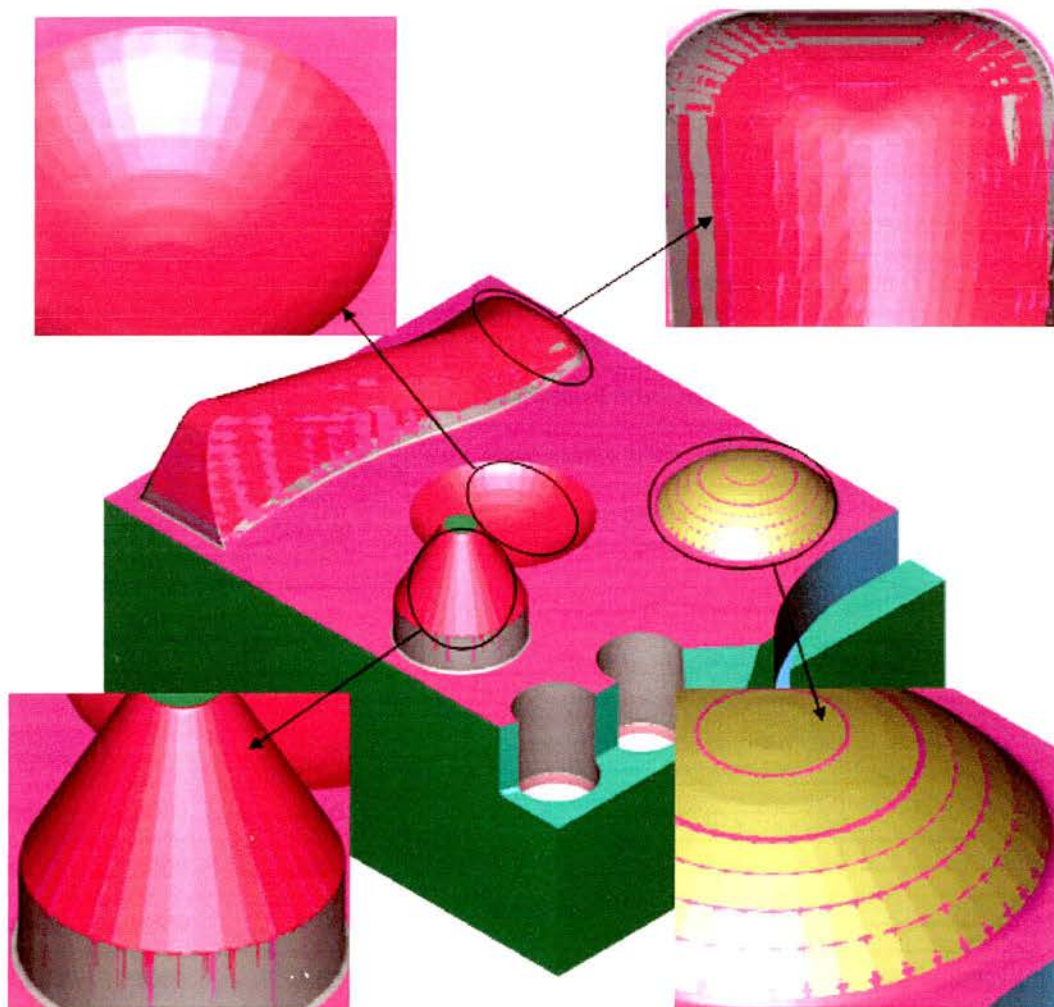


Fig. 73 – Imagem da peça B_S com todas as operações de maquinagem já efectuadas

5.2.2.3 Peça B_R

Nesta simulação, após desbaste, foi utilizada uma estratégia de maquinagem em radial (radial) e em cópia (parallel). Na superfície criada com “spline”, a estratégia radial iria conduzir a resultados insatisfatórios daí termos optado por uma estratégia em cópia para esta zona.

Tabela 22 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_R

Forma na peça	Estratégia usada	Ferramenta usada	Referência da pastilha ou fresa
“Spline”	Parallel 45° Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Cone	Radial Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Convexa	Radial Zig-Zag	Fresa ϕ 3mm esférica (HSS) ⁽²⁾	R216.42-01030-AC30P
Côncava	Radial Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Furos	Contour (c/ incremento)	Minimaster ϕ 10mm R0.4 ⁽¹⁾	MM10-10007-R04-MD04 F30M
	Contour (c/ Hélice)		
Rasgo	Contorno 3D Zig-Zag	Fresa ϕ 2mm direita (HSS) ⁽²⁾	R216.32-01030-AC30P

Nota: 1) Ferramenta SECO
2) Ferramenta SANDVIK

Tabela 23 – Parâmetros de corte da peça B_R

Forma na peça	Rotação n (rpm)	Velocidade de avanço V_f (mm/min)	Profundidade De corte a_p (mm)	Máximo incremento angular (°)	Incremento lateral a_e (mm)	Tolerância (mm)
“Spline”	8000	2000	0.1	_____	0.05	0.05
Cone	8000	2000	0.1	0.25	_____	0.05
Convexa	8000	2000	0.1	0.25	_____	0.05
Côncava	8000	2000	0.1	0.25	_____	0.05
Furos	6200	500	0.1	_____	2.5	0.05
Rasgo	6000	500	0.03	_____	2	0.05

Acabamento

De seguida são apresentadas imagens obtidas após simulação no MasterCam:

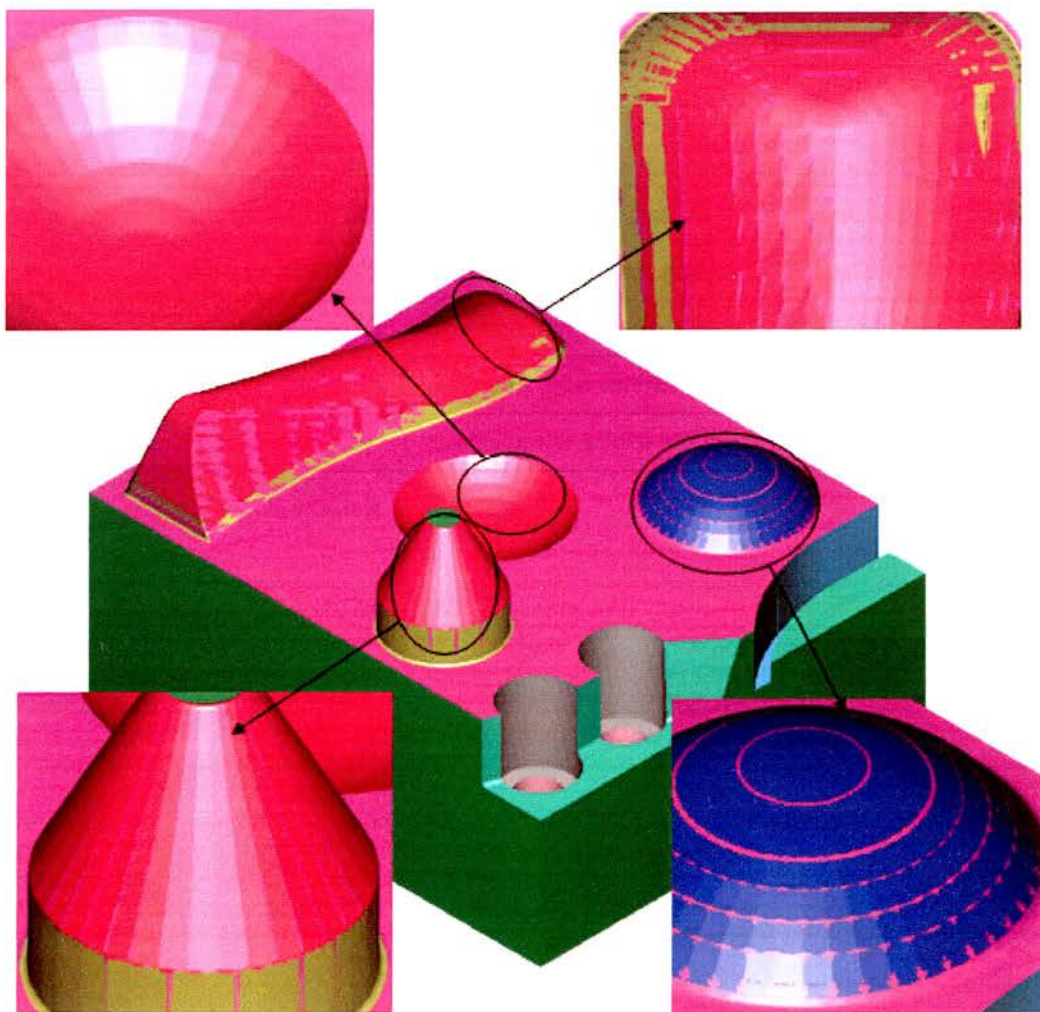


Fig. 74 – Imagem da peça B_R com todas as operações de maquinagem já efectuadas

5.2.2.4 Peça B_O

Nesta simulação foram reunidas as estratégias que melhor se adequavam a cada zona. Foi utilizada uma estratégia de maquinagem em radial (radial), em cópia (parallel), em offset (scallop) e em contorno (contour). Foi também diminuída a tolerância de maquinagem de 0.05mm para 0.005mm. Continuou a ser usada a lubrificação.

Tabela 24 – Estratégia, ferramenta e referência usada na maquinagem da peça B_O

Forma na peça	Estratégia usada	Ferramenta usada	Referência da pastilha ou fresa
"Spline"	Parallel 45º Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Cone	Contour Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M
Convexa	Scallop (sentido anti horário)	Fresa ϕ 3mm esférica (HSS) ⁽²⁾	R216.42-01030-AC30P
Côncava	Radial Zig-Zag	Minimaster ϕ 6mm esférico ⁽¹⁾	MM06-06006-B90-MD02 F30M

Nota: 1) Ferramenta SECO
2) Ferramenta SANDVIK

Tabela 25 – Parâmetros de corte da peça B_O

Forma na peça	Rotação n (rpm)	Velocidade de avanço V _f (mm/min)	Profundidade de corte a _p (mm)	Máximo incremento angular (º)	Incremento lateral a _e (mm)	Tolerância (mm)
"Spline"	8000	2000	0.1	_____	0.05	0.005
Cone	8000	2000	0.1	0.25	_____	0.005
Convexa	8000	2000	0.1	_____	0.05	0.005
Côncava	8000	2000	0.1	_____	0.05	0.005

Acabamento

De seguida são apresentadas imagens obtidas após simulação no MasterCam:

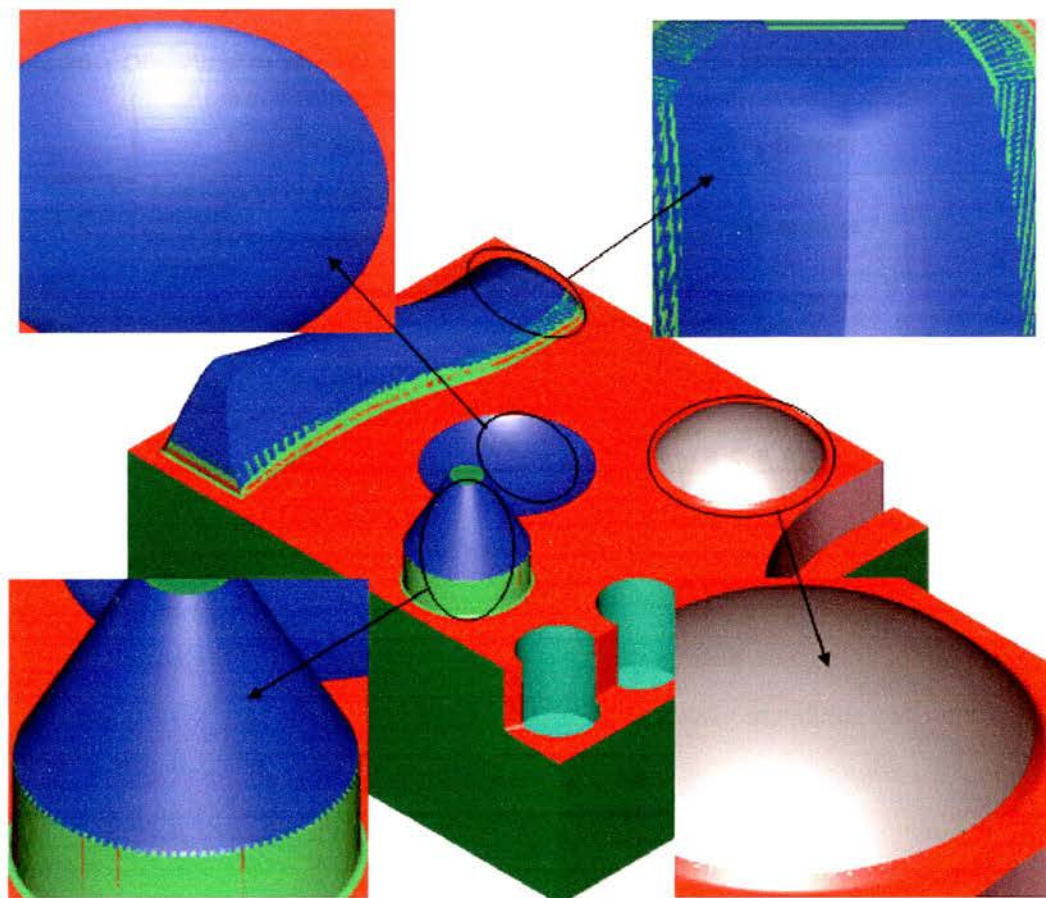


Fig. 75 – Imagem da peça B_O com todas as operações de maquinagem já efectuadas

Da observação desta última simulação é possível verificar que as irregularidades são mínimas e que principalmente o efeito de facetamento foi muito diminuído.

Para estas quatro simulações é possível verificar que existem estratégias que se adequam melhor a determinadas superfícies que outras. É também possível verificar que o efeito de facetamento é visível em todas as maquinagens. A seguir é apresentado um quadro com as principais observações resultantes da simulação.

Tabela 26 – Observações resultantes dos diversos processos de simulação

	Aparecimento de Cristas		Aparecimento de facetas	
	Sim (Onde)	Não	Sim (Onde)	Não
Peça B_C	Zona superior da superfície Convexa; Zona inferior da superfície Côncava;		Todas as zonas	
Peça B_S		Não	Todas as zonas	
Peça B_R	Zona inferior da superfície Convexa; Zona superior da superfície Côncava;		Todas as zonas	
Peça B_O		Não	Todas as zonas embora muito mais pequenas que nas peças B_C, B_S e B_R.	

6. Resultados e discussão

As maquinagens realizadas tinham como principais objectivos:

- O estudo da influência das diferentes estratégias de maquinagem nas diversas formas de superfície;
- A influência do parâmetro tolerância na maquinagem;
- A influência da lubrificação na maquinagem e na obtenção de peças de bom aspecto/acabamento superficial.

Na peça A foram testadas as estratégias de maquinagem mais aconselhadas para superfícies planas. Foram também maquinadas, numa mesma face, zonas com lubrificação e zonas sem lubrificação.

A peça B foi toda maquinada em acabamento com a presença de lubrificação. Aqui foram testadas em três peças diversas estratégias tendo em conta as diferentes formas superficiais.

Após a maquinagem das peças A e B foram medidas as rugosidades em todas as superfícies e tiradas fotografias à peça.

Para finalizar foi remaquinada uma peça B com as estratégias optimizadas, usando a lubrificação e diminuindo a tolerância de maquinagem sendo posteriormente feita uma nova medição da rugosidade e nova aquisição de fotografias.

6.1 Peça A

Na peça A possuímos oito diferentes faces que foram alvo de análise, tendo quatro faces (E, F, G, H) uma inclinação com a horizontal próxima dos 10° e as restantes quatro faces (A, B, C, D) uma inclinação próxima dos 80° . A seguir é apresentado um desenho 2D que nos mostra as essas inclinações.

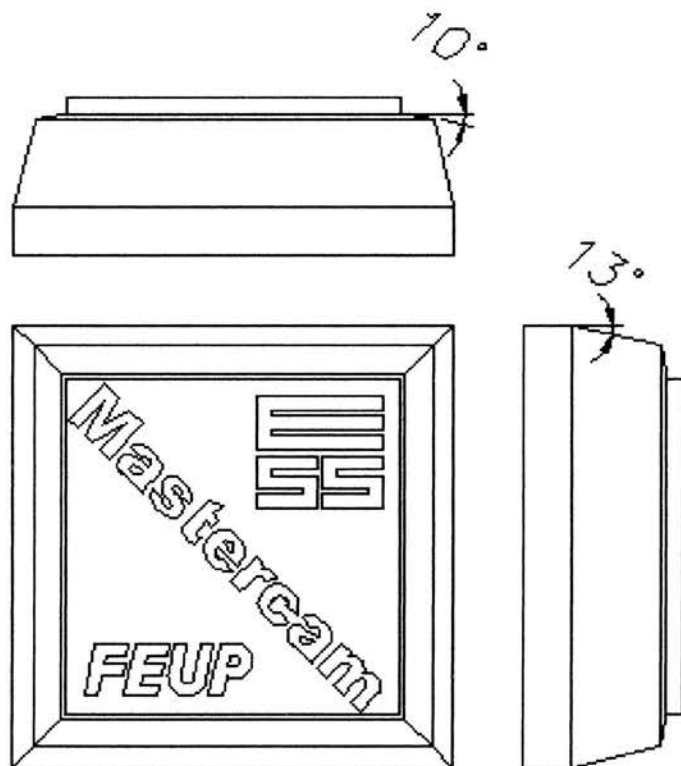
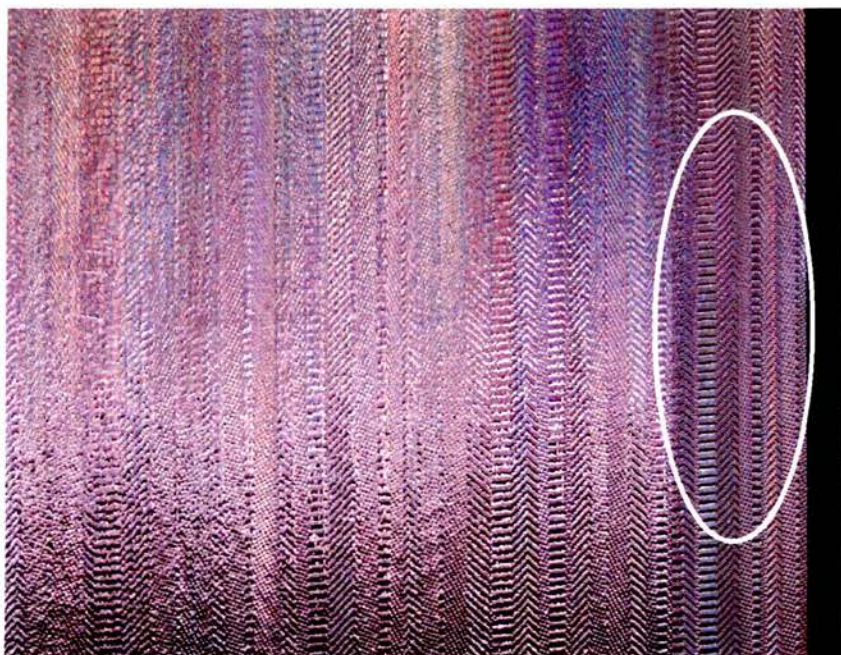


Fig. 76 – Vista 2D da peça padrão A

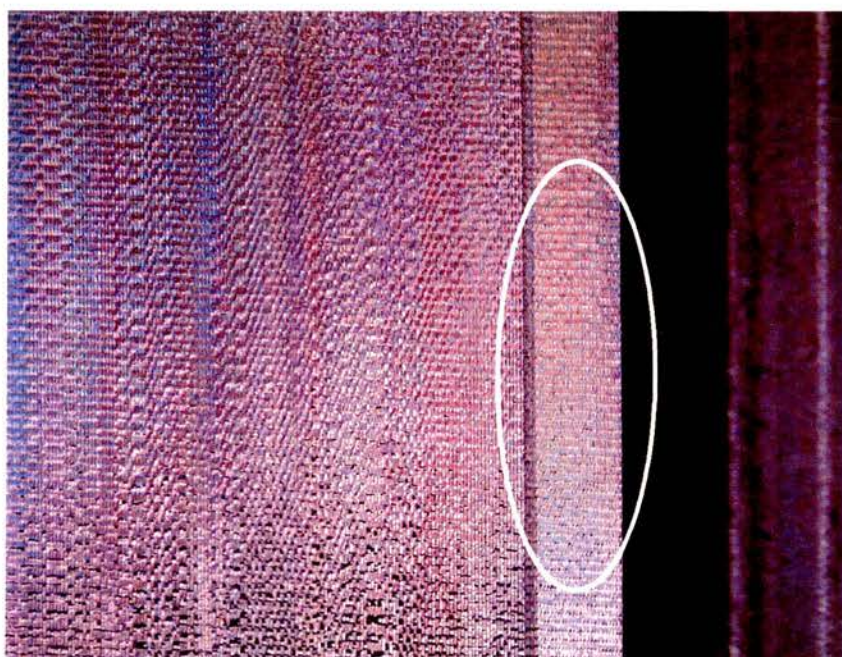
6.1.1 Influência da Lubrificação

A lubrificação no acabamento é essencial para se obter uma bom aspecto e acabamento superficial. De seguida são apresentadas imagens que nos mostram a diferença de aspecto superficial com e sem lubrificação para diferentes estratégias de maquinagem. As figuras seguintes são todas obtidas das faces inferiores (A, B, C, D).



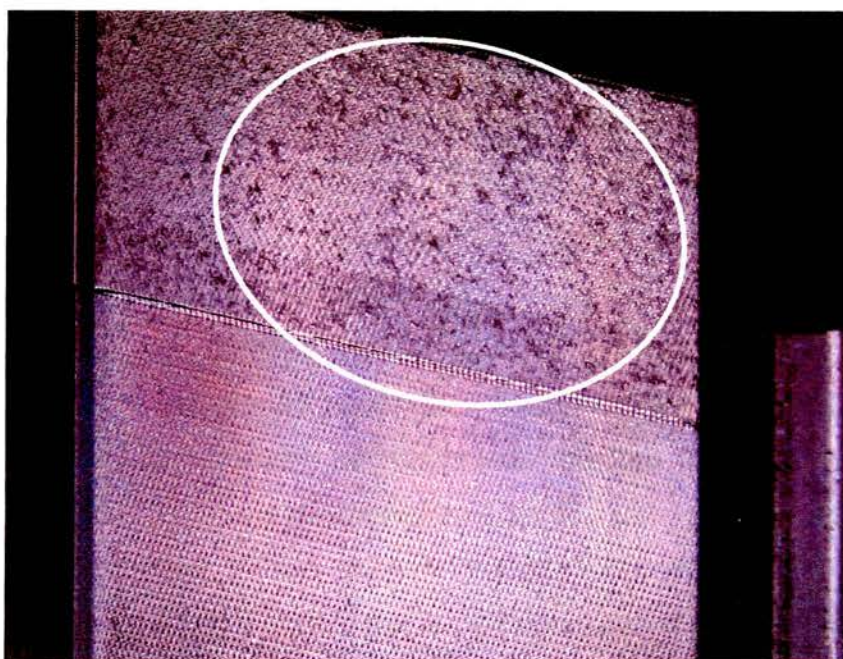
Esta fotografia é originária da face maquinada com uma estratégia em contorno one-way, no sentido concordante. Este não é o melhor exemplo mas mesmo assim é visível a diferença de aspecto entre a zona maquinada com a lubrificação (mais à esquerda) e a zona sem a lubrificação (mais à direita circunscrita pela elipse de cor branca).

Fig. 77 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno one-way (2x)



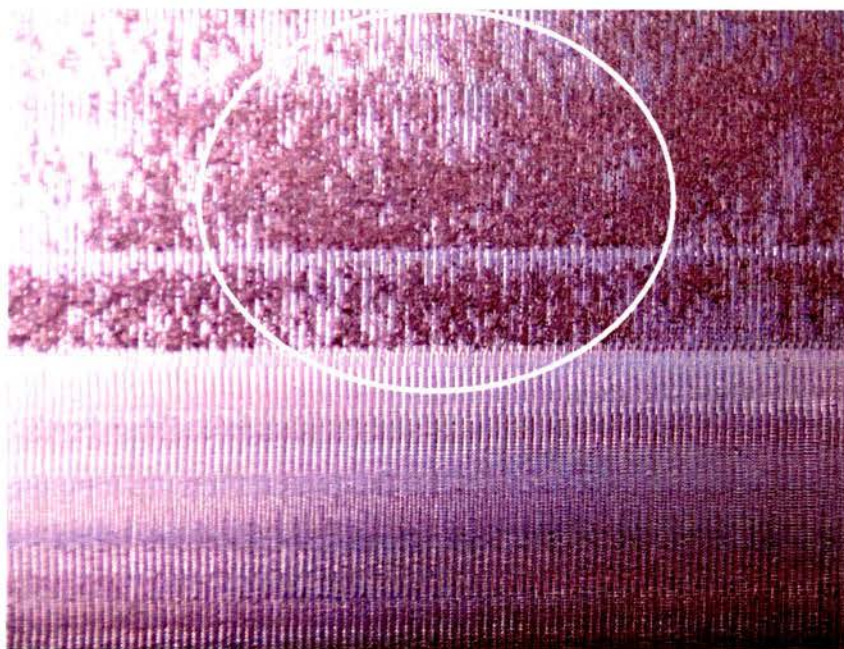
Esta fotografia é originária da face maquinada com uma estratégia em contorno Zig-Zag. Este é um bom exemplo da importância do uso da lubrificação na maquinagem. É visível a diferença de aspecto entre a zona maquinada com a lubrificação (mais à esquerda) e a zona sem a lubrificação (mais à direita circunscrita pela elipse de cor branca).

Fig. 78 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno zig-zag (2x)



Esta fotografia é originária da face maquinada com uma estratégia em cópia a 45 graus e em Zig-Zag. Este também é um bom exemplo da importância do uso da lubrificação na maquinagem. É visível a diferença de aspecto entre a zona maquinada com a lubrificação (zona inferior) e a zona sem a lubrificação (zona superior circunscrita pela elipse de cor branca).

Fig. 79 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 45° zig-zag (2x)



Esta fotografia é originária da face maquinada com uma estratégia em cópia a 0 graus e em Zig-Zag. Este também é um bom exemplo da importância do uso da lubrificação na maquinagem. É visível a diferença de aspecto entre a zona maquinada com a lubrificação (zona inferior) e a zona sem a lubrificação (zona superior circunscrita pela elipse de cor branca).

Fig. 80 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 0° zig-zag (2x)

A nível visual, através da observação das figuras anteriores, torna-se claro que a falta de lubrificação no acabamento é prejudicial ao bom aspecto superficial.

Mas ao nível de acabamento superficial será vantajosa lubrificação? Como variará a rugosidade?

Os valores de rugosidade foram medidos na FEUP. De seguida são apresentados valores de rugosidade máxima (R_{zi}), a profundidade média de rugosidade (R_z) e a rugosidade média (R_a) para algumas superfícies analisadas anteriormente. Vamos analisar a superfície maquinada em contorno one-way (com e sem lubrificação) e a superfície maquinada em cópia a 0 graus em Zig-Zag.

Foram efectuadas em cada um dos casos 3 análises para cada uma das diferentes zonas sendo posteriormente feita a média de cada um dos parâmetros.

Tabela 27 – Valores de rugosidade obtidos para maquinagens com e sem lubrificação

Estratégia	Sentido de medição	Lubrificação	R_{zi} (μm)	R_z (Din 4768) (μm)	R_a (μm)
Contour One-Way	Z	Sim	5.9	5.0	0.8
		Não	9.6	8.7	2.3
Parallel 0 graus Zig-Zag	Y	Sim	4.2	2.2	0.4
		Não	10	7.1	1.0

É possível verificar que em ambas as maquinagens, a presença de lubrificação conduziu a valores de rugosidade mais baixos. De notar também que entre estas duas estratégias, a maquinagem em cópia a 0° se traduziu na estratégia que nos conduziu a uma rugosidade menor.

De seguida são apresentadas duas figuras, obtidas a partir da medição de rugosidade para uma maquinagem em contorno one-way. A primeira é resultante da análise de rugosidade de uma superfície maquinada com lubrificação enquanto a segunda não possui lubrificação

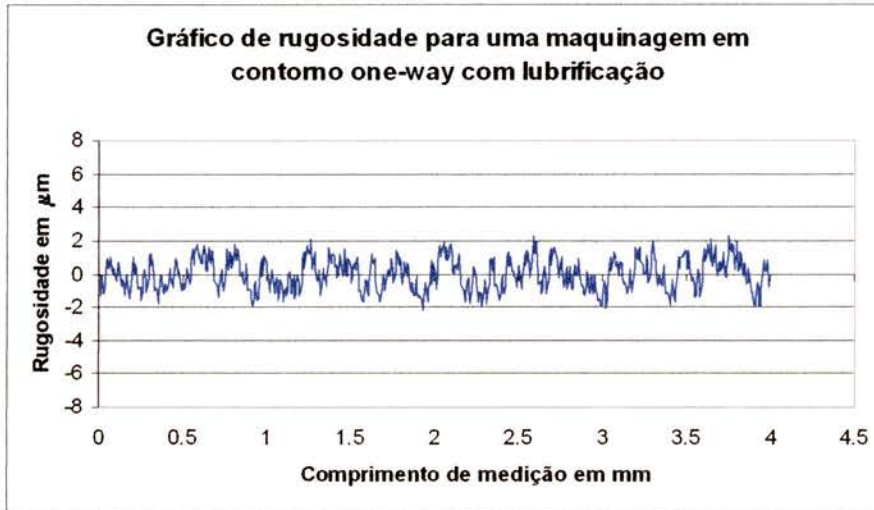


Fig. 81 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem com lubrificação

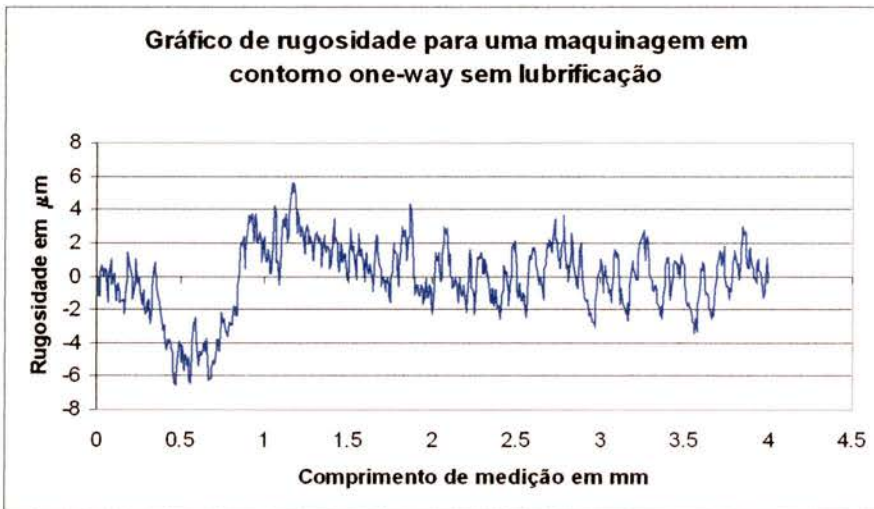


Fig. 82 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem sem lubrificação

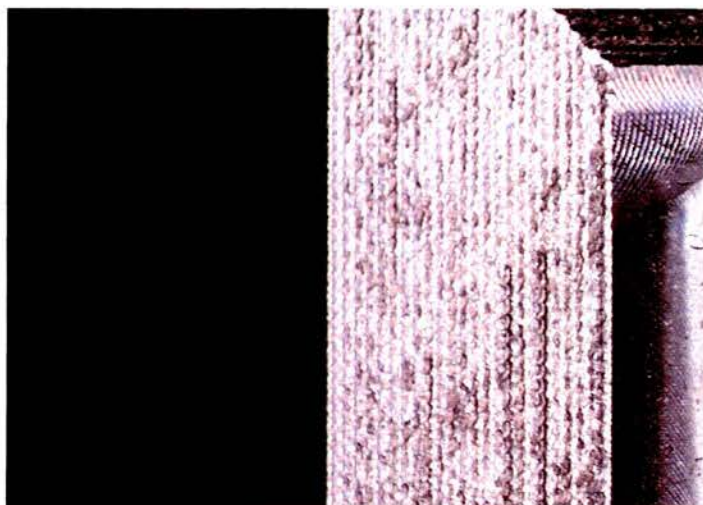
É visível a maior irregularidade de perfil na zona maquinada sem lubrificação.

6.1.2 Estratégias e inclinações da face

Vamos agora analisar as diferentes estratégias aplicadas às diversas faces e o seu comportamento com a variação da inclinação.

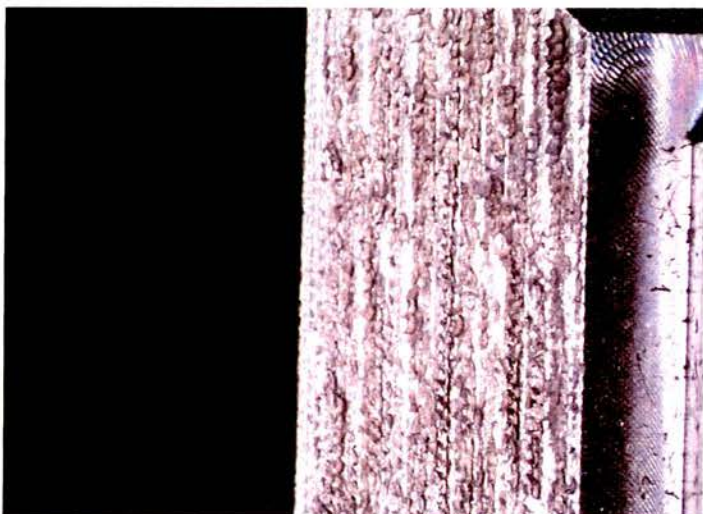
6.1.2.1 Faces superiores

Estas faces são praticamente horizontais possuindo só um ângulo de 10° com a horizontal (ver figura 76). A seguir são apresentadas imagens das superfícies. Estas faces serão comparadas entre si através de zonas onde não houve maquinagem com lubrificação.



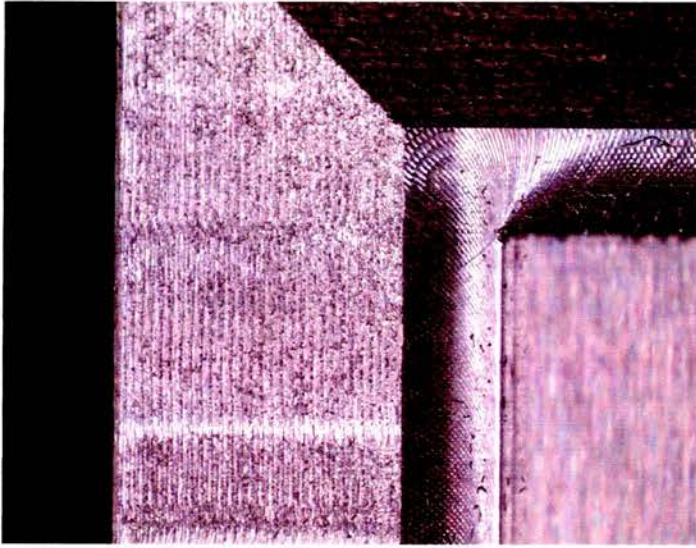
Fotografia da face maquinada com uma estratégia em contorno One-Way. Vêmos que o aspecto superficial desta face superior para a face inferior maquinada com a mesma estratégia é bastante pior (ver figura 77)

Fig. 83 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno one-way (1.5x)



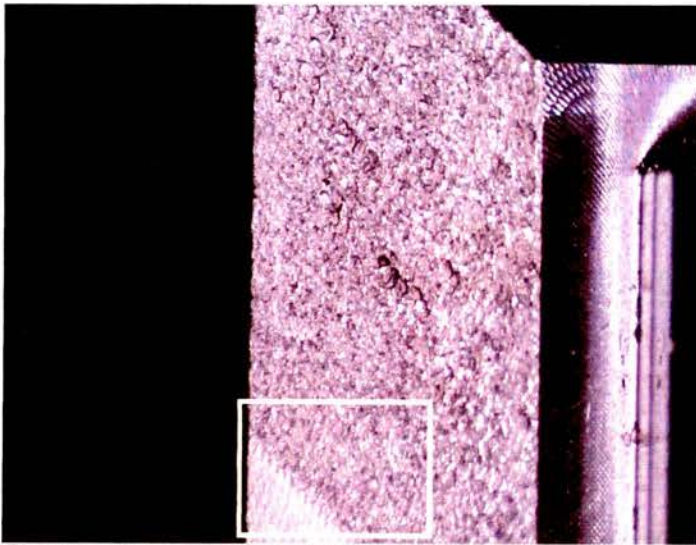
Fotografia da face maquinada com uma estratégia em contorno Zig-Zag. Esta parece ser a face com um pior acabamento.

Fig. 84 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em contorno zig-zag (1.5x)



Fotografia da face maquinada com uma estratégia em cópia a 0 graus e em Zig-Zag. É visível uma melhoria no aspecto superficial das figuras anteriores para esta.

Fig. 85 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 0° zig-zag (1.5x)



Fotografia da face maquinada com uma estratégia em cópia a 45 graus e em Zig-Zag. Esta, a nível visual parece ser a face com melhor acabamento.

Nota: no rectângulo a branco é possível ver uma zona maquinada com lubrificação a contrastar com outra zona maquinada sem lubrificação. Mais uma vez se verifica que a zona maquinada com lubrificação tem muito melhor aspecto.

Fig. 86 – Fotografia da textura superficial após maquinagem em cópia 45° zig-zag (1.5x)

Vamos analisar as rugosidades e verificar se o constatado através das imagens anteriores corresponde à realidade do acabamento superficial.

Tabela 28 – Valores de rugosidade obtidos para maquinagens sem lubrificação

Estratégia	Sentido de medição	R _{zi} (μm)	R _z (Din 4768) (μm)	R _a (μm)
Contour One-Way	Z	30.3	21.9	4.0
Parallel 0° Zig-Zag	Y	11.1	10.3	2.4
Parallel 45° Zig-Zag	X	7.3	6.3	0.9
Contour Zig-Zag	Z	37.0	30.3	6.2

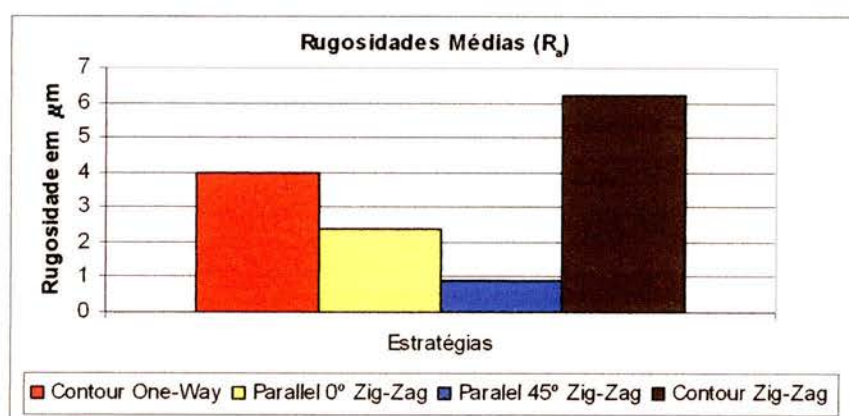


Fig. 87 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento

Da tabela acima vemos que a cópia a 45 graus é a que nos conduz aos parâmetros de rugosidade analisados mais baixos.

Para termos uma ideia mais aproximada do tipo de perfil que obtivemos no pior caso de rugosidade (face maquinada em contorno zig-zag) e no melhor (face maquinada em cópia a 45° em zig-zag) é apresentada a seguir uma figura obtida aquando da medição de rugosidades.

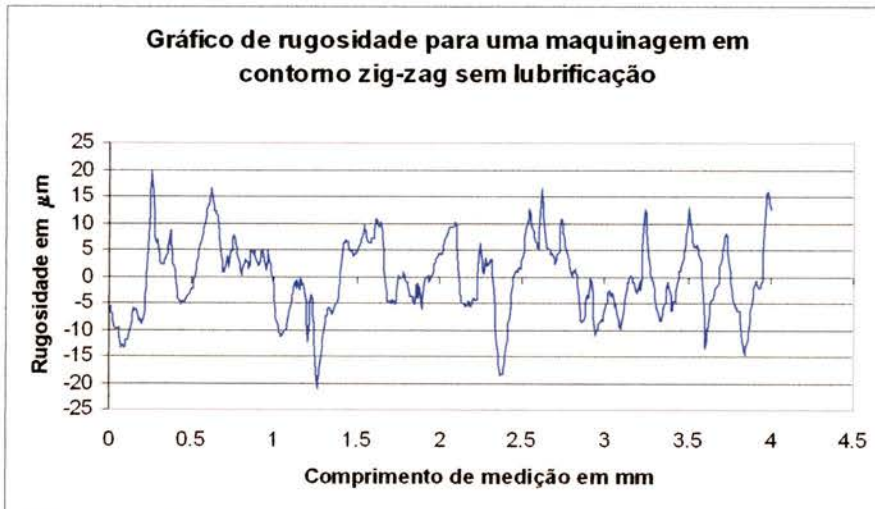


Fig. 88 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag

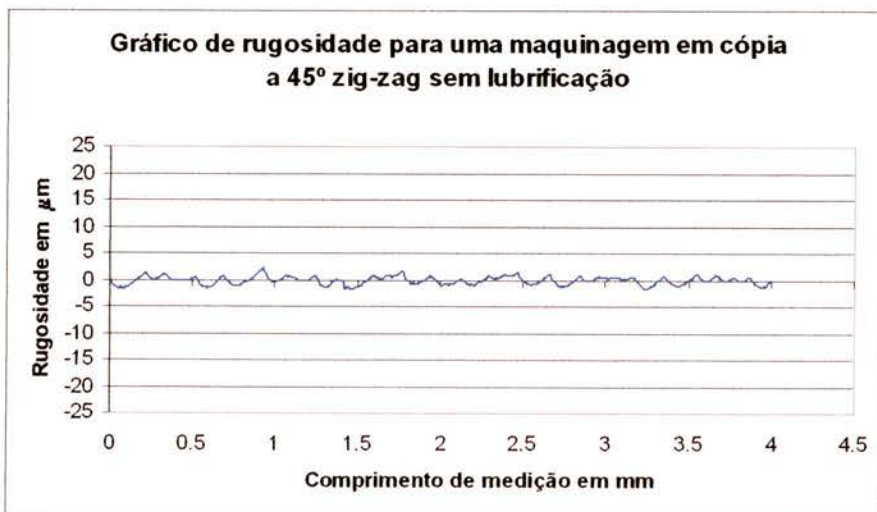


Fig. 89 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em cópia 45° zig-zag

Nota: Todos os valores de rugosidade apresentados daqui em frente foram obtidos em superfícies onde o acabamento foi efectuado na presença de lubrificação.

6.1.2.2 Faces inferiores

Começamos por analisar as rugosidades de todas as faces inferiores. As imagens obtidas das faces inferiores são as figuras 77, 78, 79 e 80.

Tabela 29 – Valores de rugosidade obtidos para maquinagens com lubrificação

Estratégia	Sentido de medição	R _{zi} (μm)	R _z (Din 4768) (μm)	R _a (μm)
Contour One-Way	Z	5.9	5.0	0.8
Parallel 0 graus Zig-Zag	Y	4.2	2.2	0.4
Parallel 45 graus Zig-Zag	X	5.8	5.0	1.0
Contour Zig-Zag	Z	8.4	6.8	1.2

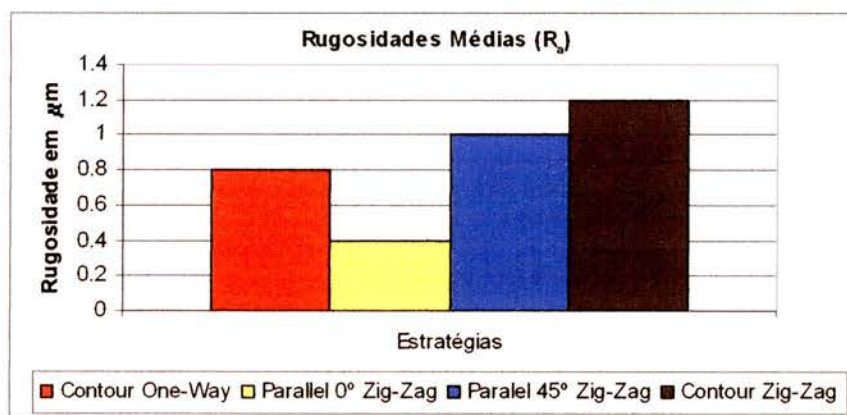


Fig. 90 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento

Da tabela acima vemos que a cópia a 0 graus é a que nos conduz aos parâmetros de rugosidade analisados mais baixos. Para termos uma ideia mais aproximada do tipo de perfil que temos no pior caso de rugosidade (face maquinada em contorno zig-zag) e no melhor (face maquinada em cópia a 0° em zig-zag) é apresentada a seguir uma figura obtida aquando da medição de rugosidades.

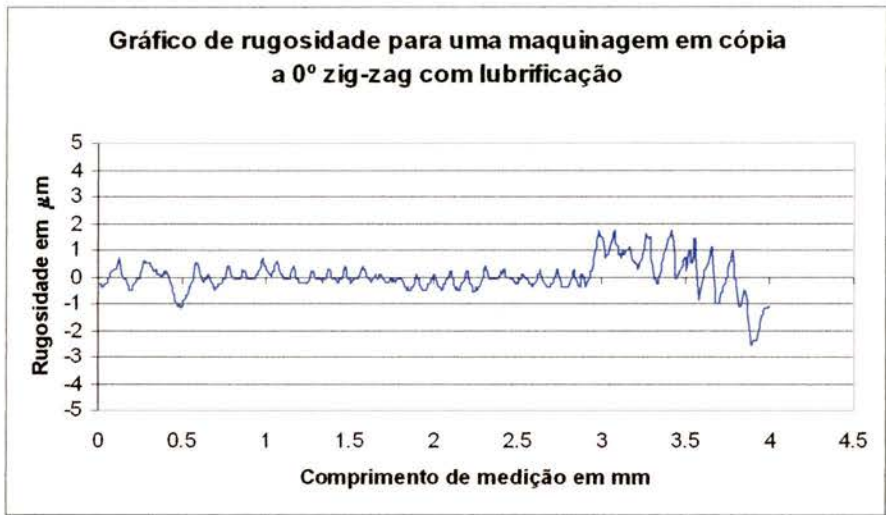


Fig. 91 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em cópia 0° zig-zag

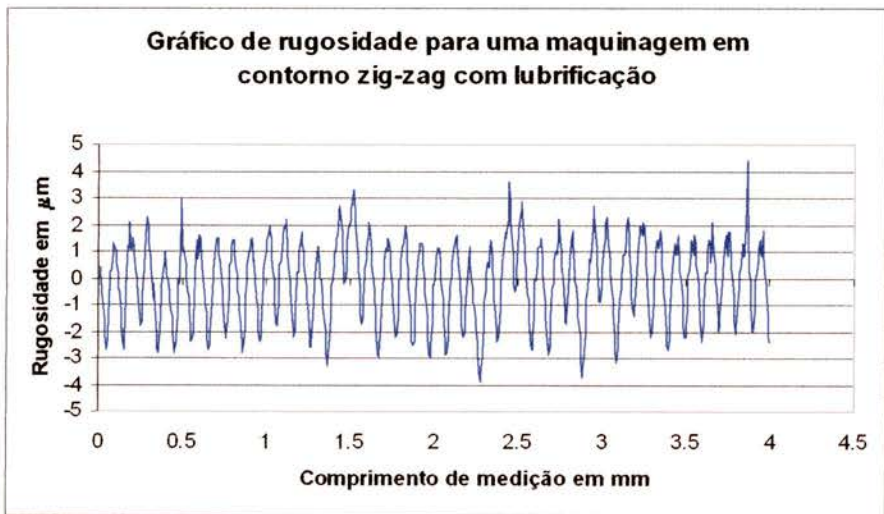


Fig. 92 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag

Até agora analisamos unicamente o aspecto visual e superficial. Chegamos a conclusões mas há um factor importante que devemos ter atenção que é o factor tempo. Este factor é de elevada importância porque é necessário definir até onde se torna rentável estar a maquinar ou não. A seguir é apresentada uma tabela com os tempos de maquinagem onde para cada face está englobado o tempo de maquinagem da face superior e inferior.

Tabela 30 – Tempos de maquinagem na simulação e real

Estratégia de maquinagem	Tempo de maquinagem (Simulação do MasterCam)	Tempo de maquinagem real (medido aquando da maquinagem)
Contour One-Way	69.1 min	70.0 min
Parallel 0° Zig-Zag	54.0 min	54.0 min
Parallel 45° zig-zag	49.3 min	50.0 min
Contour Zig-Zag	62.7 min	63.0 min
Tempo total	235.1 min $\cong$ 3h55min	237.0 min $\cong$ 3h57min

Após análise dos tempos de maquinagem verificamos que as estratégias que nos conduziram a melhores resultados a nível superficial (aspecto e qualidade) são também as menos demoradas. Os tempos de maquinagem obtidos na simulação são praticamente os mesmos obtidos na maquinagem “real”.

6.2 Peça B

A peça B foi essencial para o estudo das melhores estratégias a aplicar em formas geométricas de revolução, furos e rasgos, geometrias muito habituais em moldes e que implicam algum cuidado na escolha da estratégia de maquinagem. Posteriormente apresentamos os resultados otimizados.

6.2.1 Superfície cônica

Pretendia-se a escolha da melhor estratégia aplicada a uma determinada superfície. A superfície cônica foi maquinada em contorno (contour), em offset (scallop) e em radial. Tentou-se que os parâmetros de maquinagem usados fossem os mesmos para as três peças. A seguir é apresentada uma tabela com os valores de rugosidade.

Tabela 31 – Valores de rugosidade obtidos para a superfície cônica

Estratégia	R _{zi} (μm)	R _z (Din 4768) (μm)	R _a (μm)
Contour zig-zag	4.6	4.1	0.6
Scallop (sentido anti horário)	6.7	5.3	0.7
Radial Zig-Zag	8.3	6.1	0.9

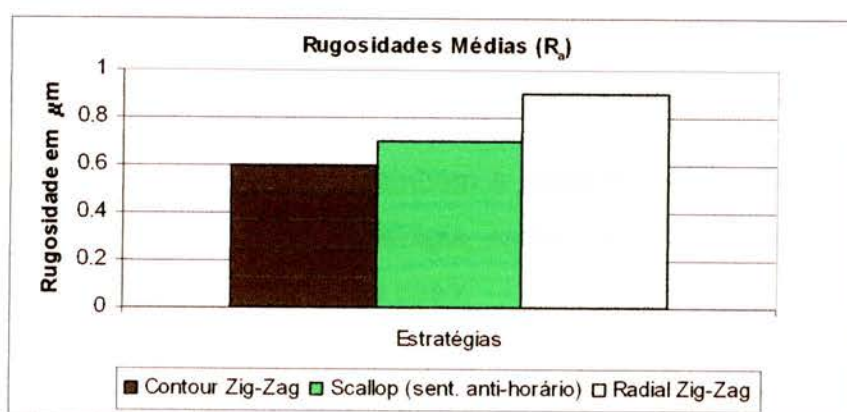


Fig. 93 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para a superfície cônica

É visível através da análise dos gráficos seguintes a maior irregularidade superficial da peça maquinada com a estratégia radial comparativamente à peça maquinada com a estratégia em contorno.

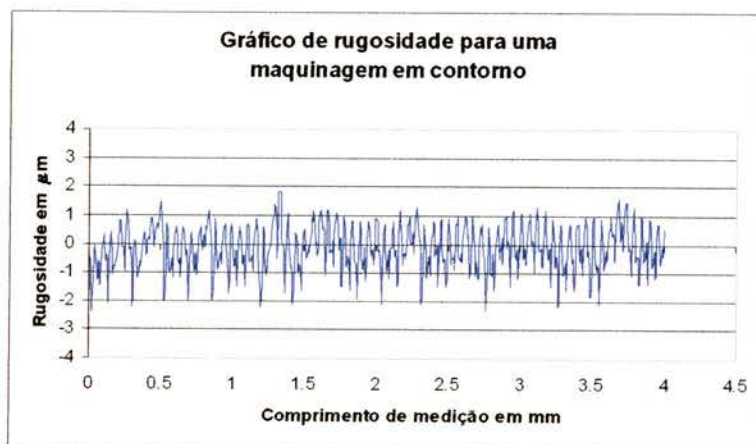


Fig. 94 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag

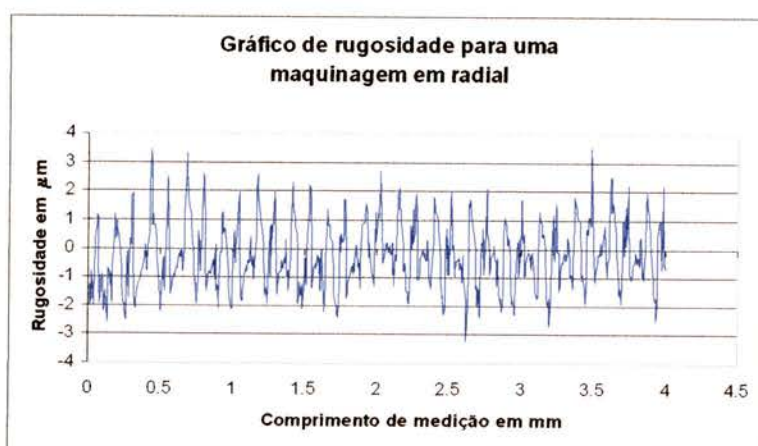


Fig. 95 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em radial

Pelas imagens fotográficas também é possível verificar a pior qualidade da peça maquinada com a estratégia radial, sendo visível o efeito de facetamento, muito acentuado neste caso.

Este facetamento vem-nos provar que a estratégia radial não é aconselhada para este tipo de superfície já que conseguimos melhores acabamentos com as outras estratégias (contour e scallop) nas mesmas condições de maquinação.

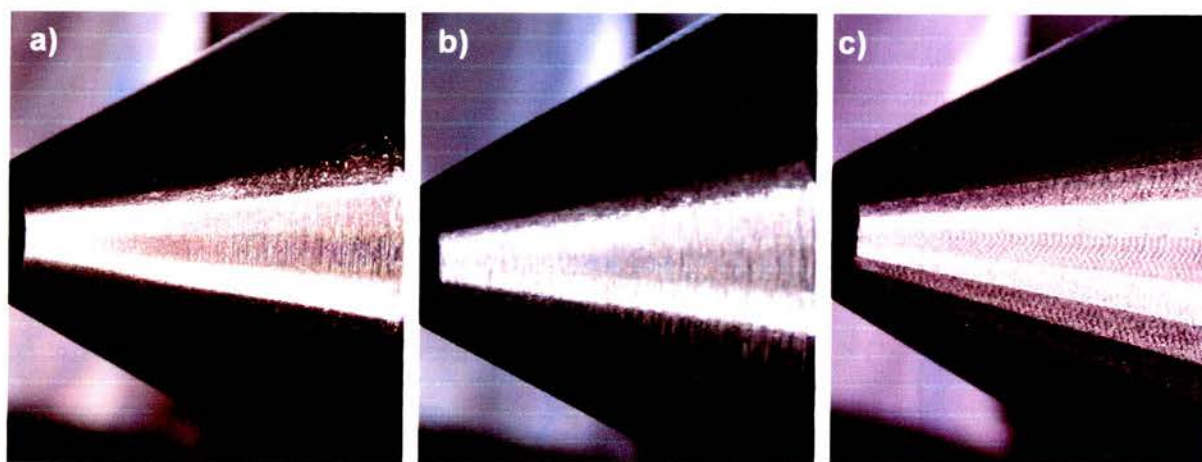


Fig. 96 – Fotografia da textura superficial da superfície cônica após maquinação

- a) superfície cônica maquinada em contorno zig-zag (2.5x)
- b) superfície cônica maquinada em scallop (2.5x)
- c) superfície cônica maquinada em radial (2.5x)

Os tempos de maquinação foram praticamente os mesmos sendo na simulação a estratégia em contorno mais rápida o que se veio a confirmar na maquinação.

Tabela 32 – Tempos de maquinação na simulação e real para a superfície cônica

Estratégia de maquinação	Tempo de maquinação (Simulação do MasterCam)	Tempo de maquinação real (medido aquando da maquinação)
Contour Zig-Zag	8.9 min	10 min
Scallop (sentido anti-horário)	11.1 min	20 min
Radial Zig-Zag	15.2 min	20 min

6.2.2 Superfície convexa

A superfície convexa foi maquinada em contorno (contour), em offset (scallop) e em radial. A seguir é apresentada uma tabela com os valores de rugosidade e as imagens obtidas das superfícies convexas, maquinadas com as diferentes estratégias.

Tabela 33 – Valores de rugosidade obtidos para a superfície convexa

Estratégia	R_{zi} (μm)	R_z (Din 4768) (μm)	R_a (μm)
Contour zig-zag	33.9	13.4	8.6
Scallop (sentido anti horário)	13.1	9.1	3.4
Radial Zig-Zag	12.2	9.7	3.2

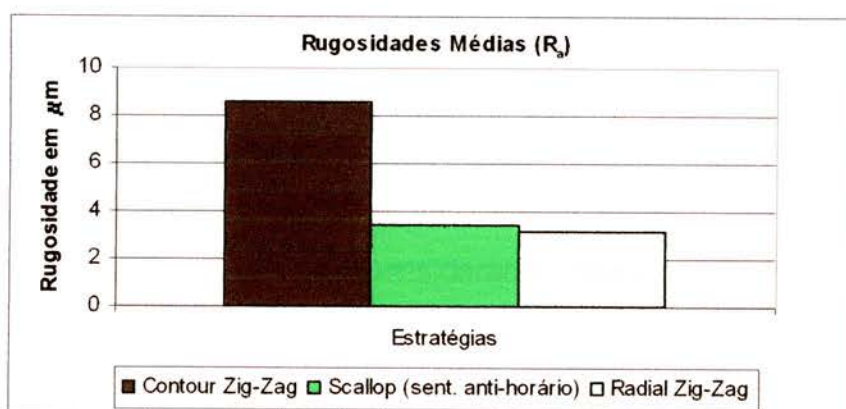


Fig. 97 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para a superfície convexa

Nas peça maquinadas com as estratégias scallop e radial, conseguimos baixos valores de rugosidade média sendo para este caso a estratégia em contorno a que nos garante piores resultados. Isto pode ser explicado devido ao facto de a estratégia em contorno, funcionar com penetramentos constantes (de igual valor) em Z.

A seguir é apresentada uma figura que exemplifica o modo de funcionamento de uma estratégia em contorno (contour) e em cópia (parallel):

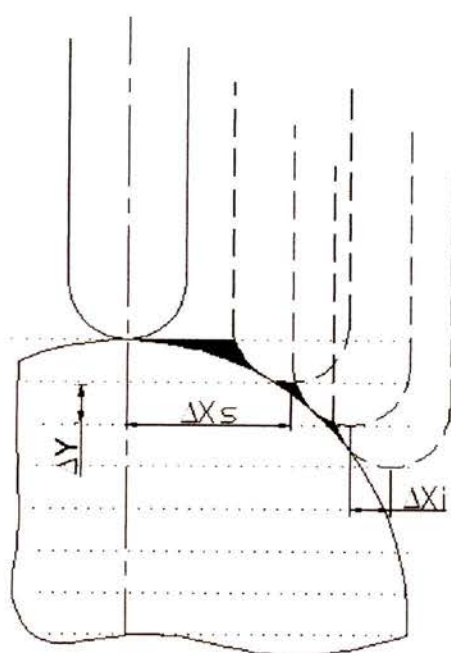


Fig. 98 – Esquema do funcionamento da estratégia em contorno "contour"

Considerando que no instante inicial a ferramenta se encontra no ponto superior da peça e que se irá deslocar por incrementos constantes ΔY (assinalado pelas linhas de pontos), o deslocamento ΔX_s é muito maior que o deslocamento ΔX_i , o que irá implicar maiores quantidades de material remanescente na zona superior (assinalado a preto). Podemos concluir que a estratégia contorno não é aconselhada para zonas com inclinações próximas da horizontal o que poderá ser evidenciado nas fotos apresentadas a seguir.

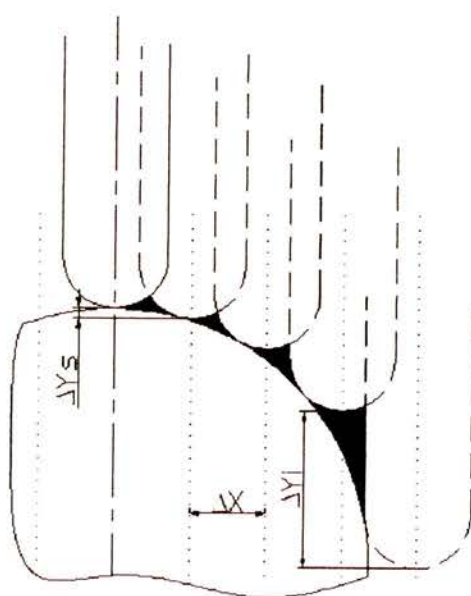


Fig. 99 – Esquema do funcionamento da estratégia em cópia "parallel"

Considerando agora que o deslocamento da ferramenta é feito de uma forma constante mas no sentido X, ou seja com incrementos constantes ΔX , o deslocamento da ferramenta na zona superior da peça ΔY_s é menor que o deslocamento na zona inferior, ΔY_i o que implicará uma maior concentração de material remanescente na zona inferior da peça.

Podemos afirmar que para zonas esféricas as estratégias de maquinagem em contorno e em cópia conduzem a superfícies maquinada irregulares.

Em baixo vemos o que a maquinagem em contorno deixa uma maior irregularidade superficial que a estratégia radial ou scallop.



Fig. 100 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag



Fig. 101 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em radial

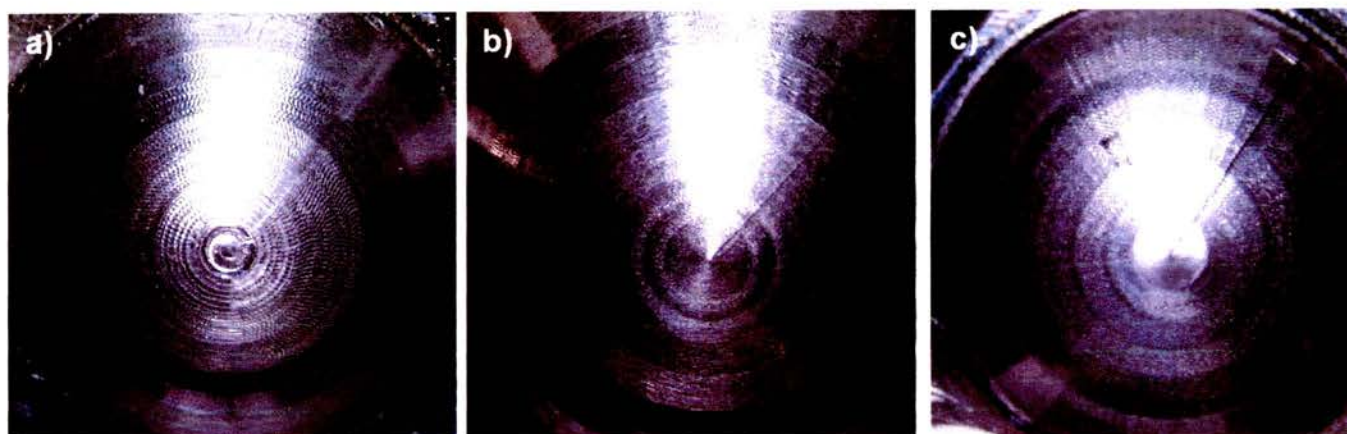


Fig. 102 – Fotografia da textura superficial da superfície convexa após maquinagem

- a) superfície convexa maquinada em contorno zig-zag (3.5x)
- b) superfície convexa maquinada em scallop (3.5x)
- c) superfície convexa maquinada em radial (3.5x)

As imagens fotográficas evidenciam uma pior qualidade superficial, especialmente na zona superior, da peça maquinada em contorno. Ao nível de tempos, a estratégia que nos garantiu uma melhor qualidade superficial, foi também a mais demorada. Neste tipo de superfícies devemos optar ou pela estratégia em scallop ou pela radial. Em contorno é a estratégia mais rápida mas é também a que nos conduz a maiores valores de rugosidade.

Tabela 34 – Tempos de maquinagem na simulação e real para a superfície convexa

Estratégia de maquinagem	Tempo de maquinagem (Simulação do MasterCam)	Tempo de maquinagem real (medido aquando da maquinagem)
Contour Zig-Zag	4.1 min	5 min
Scallop (sentido anti-horário)	6.9 min	12 min
Radial Zig-Zag	11.1 min	13 min

6.2.3 Superfície Côncava

Na superfície côncava, por limitações geométricas não foi possível realizar a medição de rugosidades mas acreditamos serem da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para a superfície convexa. A seguir ficam as imagens obtidas para as estratégias contour, scallop e radial.

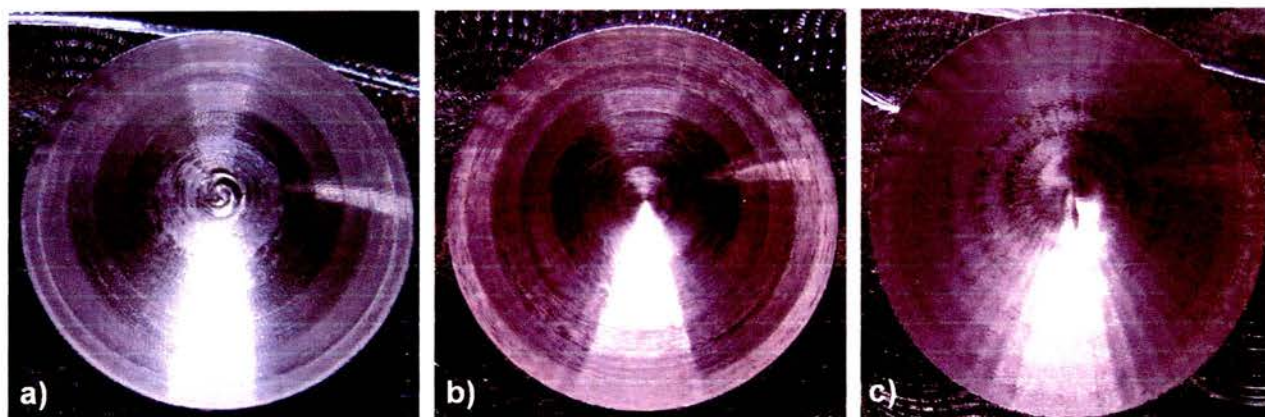


Fig. 103 – Fotografia da textura superficial da superfície côncava após maquinagem

- a) superfície côncava maquinada em contorno zig-zag (3.5x)
- b) superfície côncava maquinada em scallop (3.5x)
- c) superfície côncava maquinada em radial (3.5x)

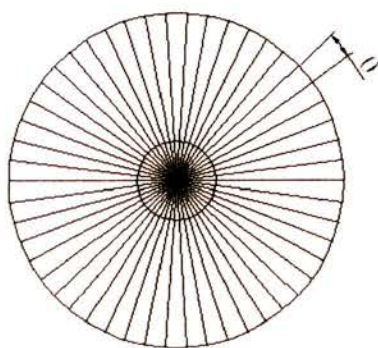


Fig. 104 – Esquema do incremento lateral com a estratégia "radial"

Observa-se da Fig.103c) que a estratégia radial conduz a superfícies onde é mais visível o efeito de facetamento. Neste caso, o deslocamento da ferramenta é feito do centro para a periferia, com um incremento lateral de valor θ . O centro fica com um bom acabamento devido à sobreposição de passagens enquanto na periferia há um afastamento entre passagens adjacentes.

Tabela35 – Tempos de maquinagem na simulação e real para a superfície côncava

Estratégia de maquinagem	Tempo de maquinagem (Simulação do MasterCam)	Tempo de maquinagem real (medido aquando da maquinagem)
Contour Zig-Zag	3.3 min	4 min
Scallop (sentido anti-horário)	6.1 min	11 min
Radial Zig-Zag	10.6 min	12 min

6.2.4 Superfície obtida por Spline

A superfície criada por “spline” foi maquinada em contorno (contour), em offset (scallop) e em cópia a 45° (parallel). A seguir é apresentada uma tabela com os valores de rugosidade e as imagens obtidas das superfícies, maquinadas com as diferentes estratégias.

Tabela 36 – Valores de rugosidade obtidos para a superfície obtida por spline

Estratégia	R _{zi} (μm)	R _z (Din 4768) (μm)	R _a (μm)
Contour zig-zag	8.1	6.3	2.9
Scallop (sentido anti horário)	10.4	7.8	2.7
Parallel 45° Zig-Zag	8.4	6.5	2.1

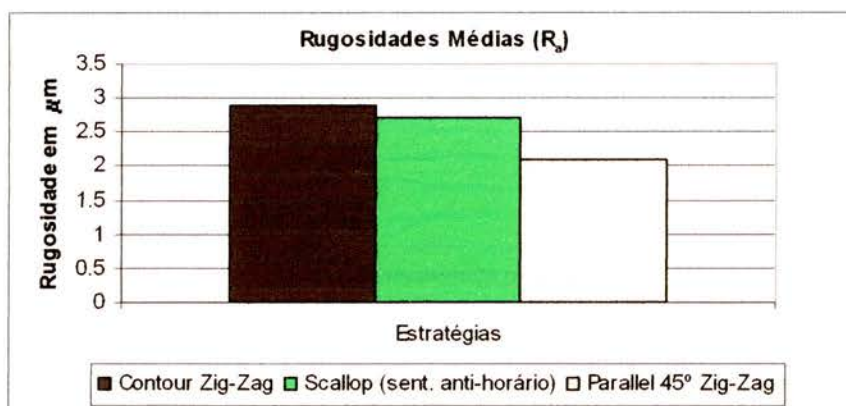


Fig. 105 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para a superfície obtida por spline

Esta superfície é de muita importância para este estudo porque praticamente todas as formas existentes em moldes contêm raios de curvatura que variam constantemente. É difícil escolher qual a melhor estratégia mas há uma que neste caso iria conduzir a resultados superficiais muito maus. É o caso da estratégia radial. De seguida é mostrada uma imagem onde pode ser visualizado isso mesmo:

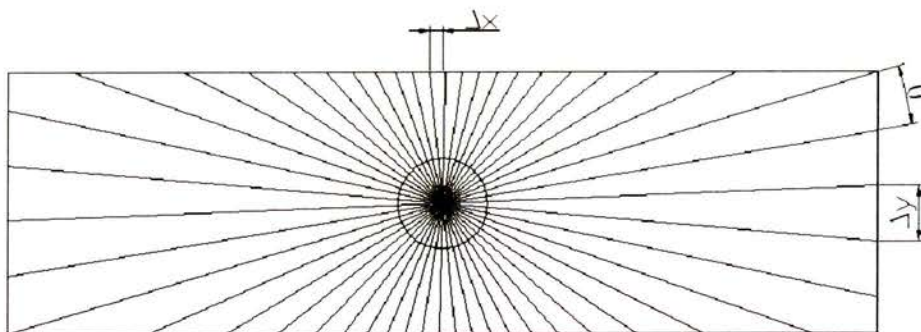


Fig. 106 – Esquema do incremento lateral com a estratégia “radial”

Se considerarmos o círculo central como sendo a ferramenta e o rectângulo envolvente como sendo uma vista superior da zona a ser maquinada, vemos que há uma sobreposição de passagens na zona central e um afastamento das passagens adjacentes na periferia, tanto maior quanto maior for a distância ao centro em virtude do incremento ser dado de uma forma angular.

Tendo em conta as estratégias utilizadas, a que produziu melhores resultados foi a cópia (parallel). São mostradas duas figuras que nos comparam a melhor qualidade superficial (obtida por Parallel) com a pior (obtida por contour)



Fig. 107 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinação em cópia 45° zig-zag



Fig. 108 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag

Apesar da diferença de rugosidade não ser muito acentuada entre as três maquinagens, através das imagens seguintes é visível que maquinagem em contorno deixou um pior aspecto superficial e é a estratégia onde o efeito de facetamento é mais visível.

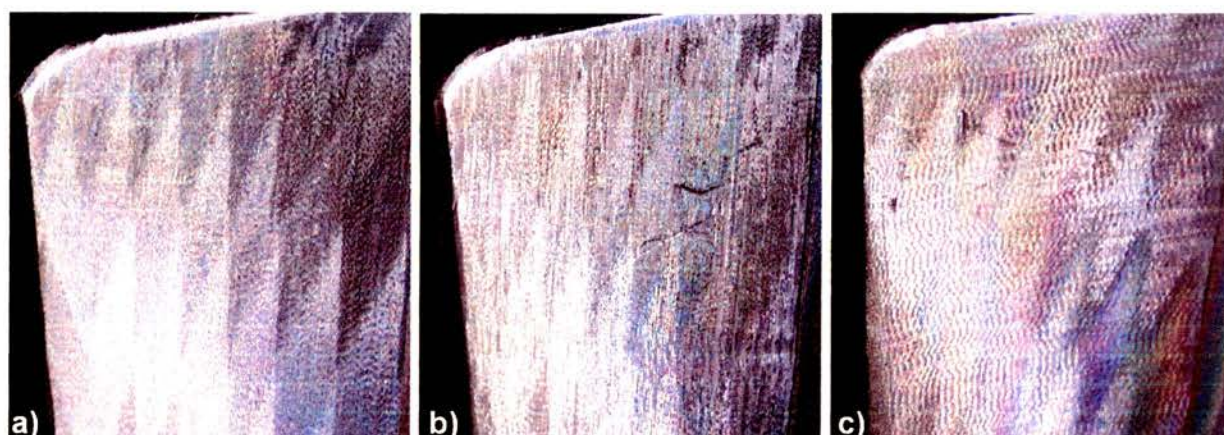


Fig. 109 – Fotografia da textura superficial da superfície obtida por spline após maquinagem
a) superfície obtida por spline maquinada em contorno zig-zag (2.5x)
b) superfície obtida por spline maquinada em scallop (2.5x)
c) superfície obtida por spline maquinada em cópia 45° (2.5x)

A estratégia em contorno é mais rápida que o scallop ou a cópia. Mas perante os resultados que temos vindo a obter não podemos considerar o factor tempo como sendo o único factor de decisão existente.

Tabela 37 – Tempos de maquinagem na simulação e real para a superfície obtida por spline

Estratégia de maquinagem	Tempo de maquinagem (Simulação do MasterCam)	Tempo de maquinagem real (medido aquando da maquinagem)
Contour Zig-Zag	19.9 min	25 min
Scallop (sentido anti-horário)	25.3 min	35 min
Parallel 45° Zig-Zag	20.3 min	30 min

6.2.5 Rasgo

Esta forma foi criada nas três peças, com uma estratégia em contorno. Na peça B_C o contorno foi realizado no sentido concordante, na peça B_S no sentido discordante e na peça B_R foi realizada em zig-zag. A seguir são apresentados os resultados:

Tabela 38 – Valores de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias utilizadas no rasgo

Estratégia	R _{zi} (μm)	R _z (Din 4768) (μm)	R _a (μm)
Contour 2D one-way (sentido concordante)	5.6	3.8	1.0
Contour 2D one-way (sentido discordante)	6.3	4.2	1.2
Contour 3D Zig-Zag	11.3	8.8	1.9

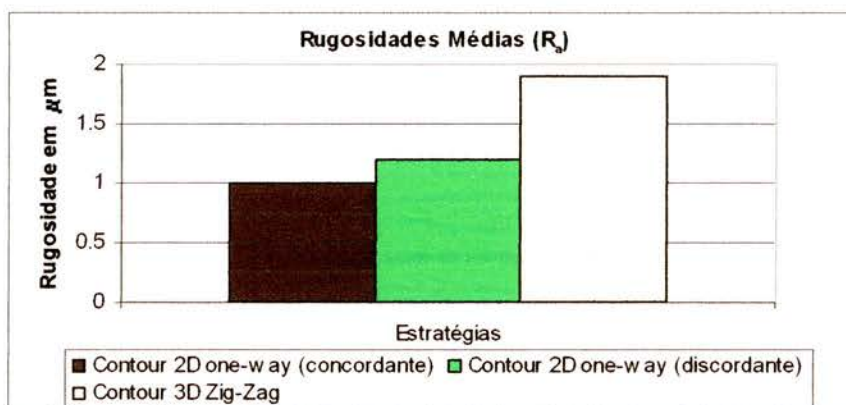


Fig. 110 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para os rasgos

A estratégia em contorno e principalmente a estratégia zig-zag, conduziram a um acabamento superficial de pior qualidade. Como era esperado a melhor qualidade superficial foi obtida com o contorno one-way no sentido concordante. A seguir são apresentados gráficos relativos ao perfil de rugosidades dessa zona.

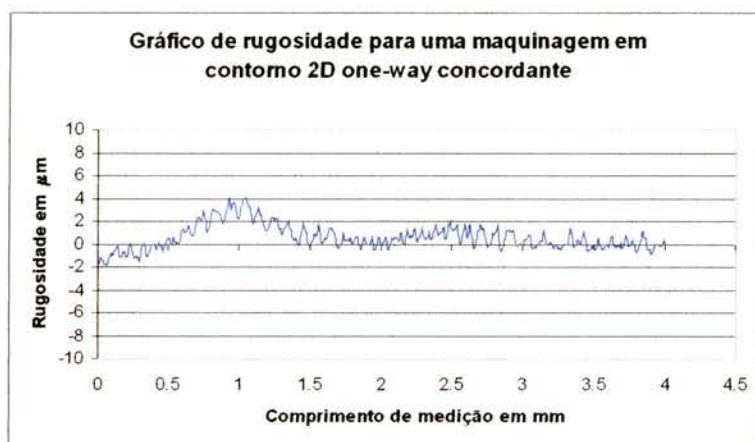


Fig. 111 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno one-way

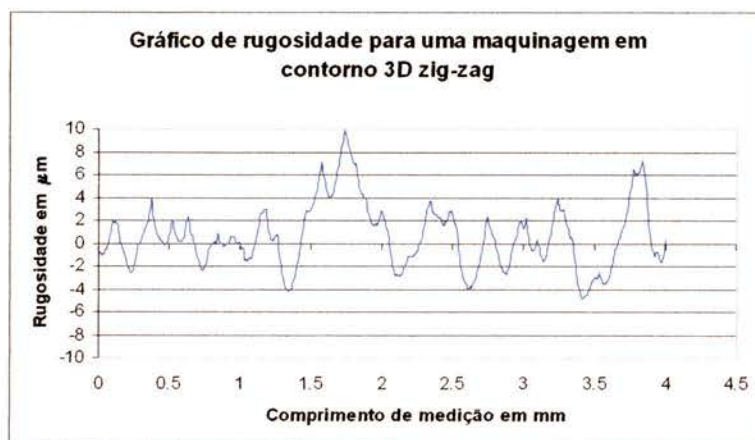


Fig. 112 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag

A maior ondulação no gráfico relativo à maquinagem em zig-zag deixa bem evidente o tipo de perfil irregular que esta superfície possui. Isso também pode ser visto nas imagens fotográficas seguintes. São visíveis, na face maquinada em zig-zag, marcas de relevo superficial muito superiores às restantes peças.

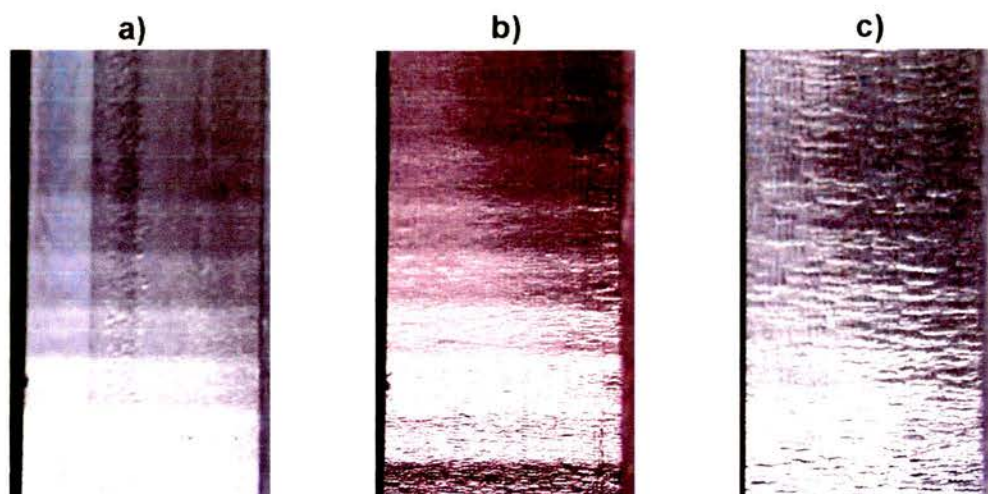


Fig. 113 – Fotografia da textura superficial do rasgo após maquinagem

- a) rasgo maquinado em contorno one-way no sentido concordante (2x)
 b) rasgo maquinado em contorno one-way no sentido discordante (2x)
 c) rasgo maquinado em contorno zig-zag (2x)

Tabela 39 – Tempos de maquinagem na simulação e real para o rasgo

Estratégia de maquinagem	Tempo de maquinagem (Simulação do MasterCam)	Tempo de maquinagem real (medido aquando da maquinagem)
Contour one-way (sentido concordante)	27.7 min	28 min
Contour one-way (sentido discordante)	27.7 min	28 min
Contour zig-zag	24 min	25 min

Neste caso é bem evidente que devemos optar por uma maquinagem no sentido concordante, pois para uma maquinagem mais demorada só três minutos conseguimos uma melhoria na rugosidade média de 47,4%.

6.2.6 Furos

As furações foram realizadas com a intenção de avaliar qual a melhor estratégia a aplicar para obter a melhor qualidade superficial. Cada peça tem dois furos cegos e em cada furo foi aplicada uma estratégia diferente. A seguir é apresentada uma tabela com a identificação dos furos e estratégias aplicadas.

Tabela 40 – Valores de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias utilizadas nos furos

Peça	Furo	Estratégia	R _{zi} (μm)	R _z (Din 4768) (μm)	R _a (μm)
Peça B_C	A	Furação	-----	-----	-----
	B	Mandrilagem	-----	-----	-----
Peça B_S	A	Fresagem Contour Zig-Zag (c/ incremento em Z)	2.0	0.8	1.4
	B	Fresagem Contour Zig-Zag (em Hélix)	11.8	5.9	0.8
Peça B_R	A	Fresagem Contour Zig-Zag (c/ incremento em Z)	8.4	5.2	0.8
	B	Fresagem Contour Zig-Zag (em Hélix)	3.9	3.0	0.3

Só nas peças B_S e B_R foram efectuadas medições de rugosidades isto porque a peça B_C apresentava uma textura muito má sendo de imediato considerada a de pior qualidade.

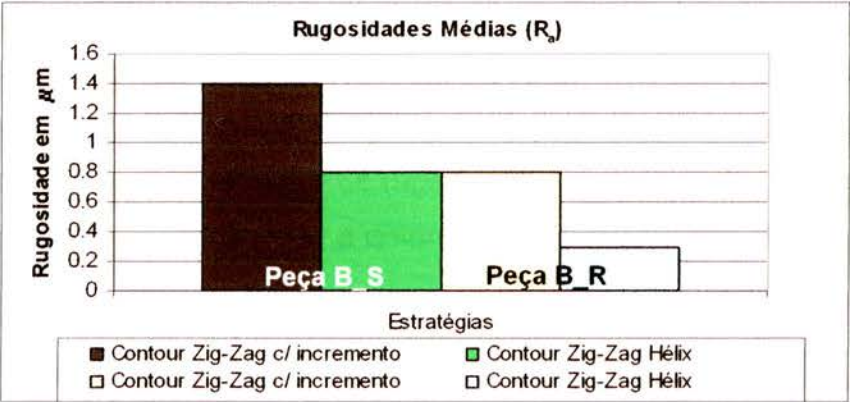


Fig. 114 – Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento para os furos

São apresentados de seguida gráficos para melhor e pior qualidade superficial obtida.



Fig. 115 – Aspecto do perfil de rugosidade na maquinagem em contorno Hélix na peça B_R

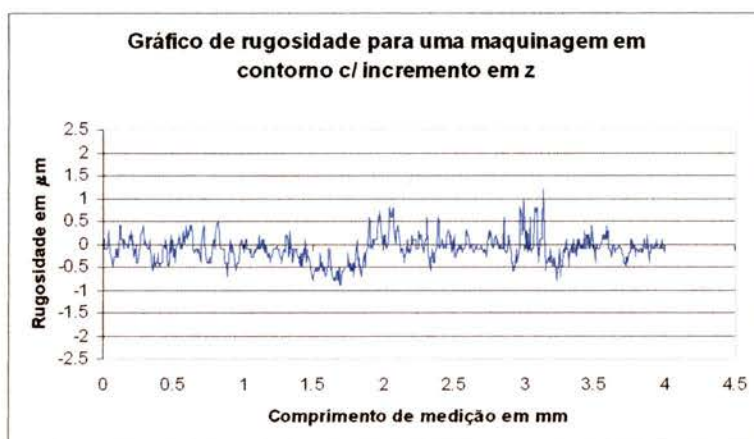


Fig. 116 – Aspecto do perfil de rugosidade na maquinagem em contorno zig-zag na peça B_S

Os valores obtidos para estas rugosidades devem ser alvo de análise já que possuímos um perfil de amplitude muito mais irregular na peça B_R que na peça B_S, o que nos levaria a admitir que a peça B_R tem um pior acabamento superficial. No entanto, os valores obtidos nas medições não demonstram isso possuindo a peça B_R um valor de rugosidade média mais baixo. As imagens fotográficas obtidas também dão a entender um pior acabamento superficial da peça B_R.

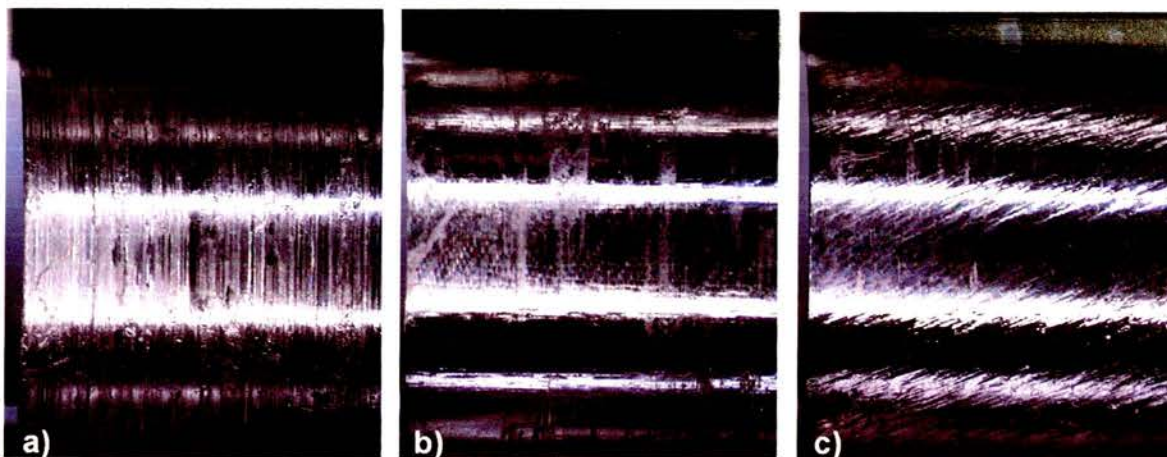


Fig. 117 – Fotografia da textura superficial do furo após maquinagem

- a) furo maquinado por furacão com uma broca (1.5x)
 b) furo maquinado em contorno hélix com sobre-espessura de 0.1 mm (1.5x)
 c) furo maquinado em contorno hélix com sobre-espessura de 2.5mm (1.5x)

Tabela 41 – Tempos de maquinagem na simulação e real dos furos

Peça	Furo	Estratégia	Tempo de maquinagem (Simulação do MasterCam)	Tempo de maquinagem real (medido aquando da maquinagem)
Peça B_C	A	Furação	4.4 min	5 min
	B	Mandrilagem	3.3 min	9 min (total)
Peça B_S	A	Fresagem Contour Zig-Zag (c/ incremento em Z)	4.4 min (furação) + 1 min (fresagem)	7 min (total)
	B	Fresagem Contour Zig-Zag (em Hélix)	4.4 min (furação) + 30seg (fresagem)	6 min (total)
Peça B_R	A	Fresagem Contour Zig-Zag (c/ incremento em Z)	4.3 min (furação) + 6.6 min (fresagem)	12 min (total)
	B	Fresagem Contour Zig-Zag (em Hélix)	4.3 min (furação) + 5.1 min (fresagem)	11 min (total)

A diferença de tempo de maquinagem da peça B_R para a peça B_S é explicada pela diferente velocidade de avanço. Na peça B_S foi usada uma velocidade de 2000 mm/min enquanto na peça B_R só 500 mm/min. Esta redução na velocidade de avanço foi introduzida para compensar o aumento do penetramento radial, na peça B_S de 0,1mm para 2,5mm na peça B_R.

6.2.7 Peça Optimizada

6.2.7.1 Medição de Rugosidades

Nesta peça, após maquinagem obtivemos uma qualidade superficial muito boa. A melhor estratégia aplicada a cada forma geométrica só por si era uma boa optimização mas para melhorar ainda mais, diminuimos a tolerância de 0.05 para 0.005mm, mantendo todos os parâmetros de maquinagem usados nas primeiras experimentações, de forma que a tolerância fosse o único factor em estudo. Vejamos de seguida a tabela de rugosidades obtida.

Tabela 42 – Valores de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias

Forma Geométrica	Estratégia	R_{zi} (µm)	R_z (Din 4768) (µm)	R_a (µm)
Superfície criada com "Spline"	Parallel 45° Zig-Zag	4.1	3.1	1.8
Superfície cónica	Contour zig-zag	4.1	3.8	0.6
Superfície côncava	Radial Zig-Zag	---	---	---
Superfície convexa	Scallop (sentido anti horário)	7.1	5.8	2.9

Após medição de rugosidades, concluímos que a diminuição da tolerância de maquinagem conduziu a valores de rugosidade mais baixos. A nível de visual, os resultados desta diminuição foram ainda mais evidentes já que conseguimos superfícies brilhantes e um efeito de facetamento praticamente inexistente. De seguida são apresentadas imagens fotográficas e perfis de rugosidade obtidos desta peça optimizada.



Fig. 119 – Fotografia da textura superficial da superfície cônica após maquinagem em contorno na peça B_O (2.5x)

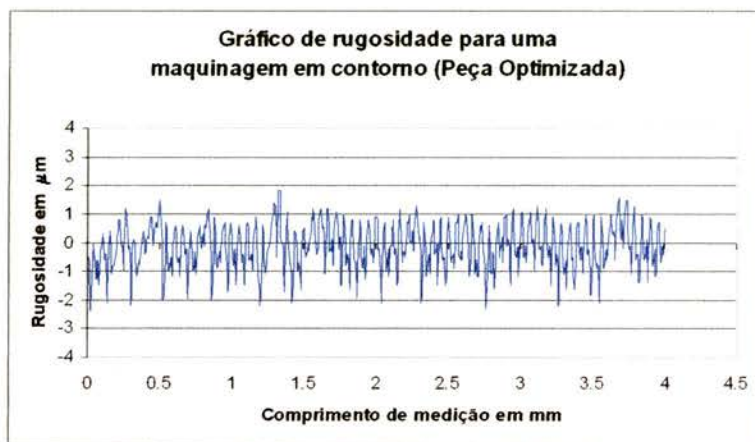


Fig. 118 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag

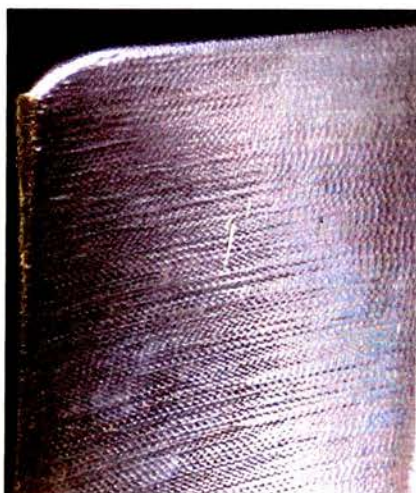


Fig. 121 – Fotografia da textura superficial da superfície obtida por spline após maquinagem em cópia a 45° na peça B_O (2.5x)

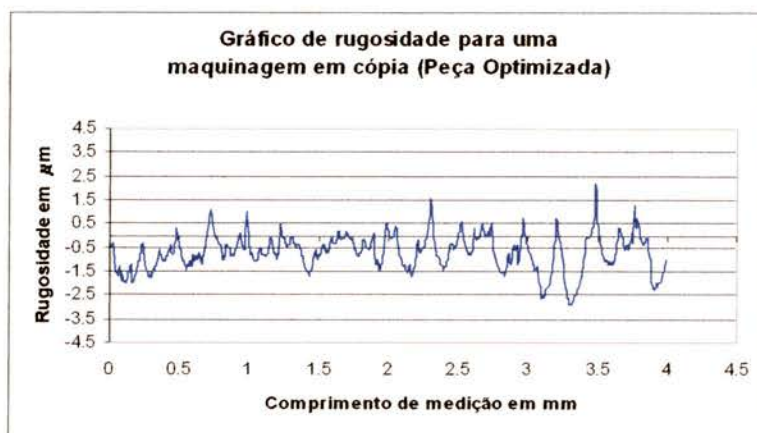


Fig. 120 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em contorno zig-zag

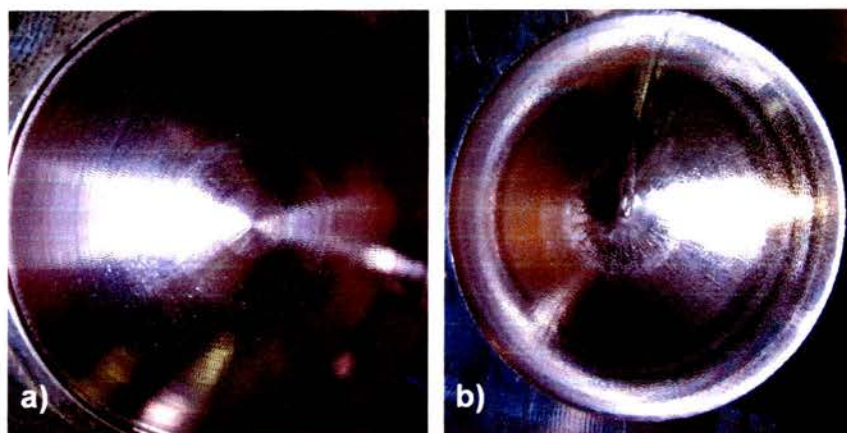


Fig. 122 – Fotografia da textura superficial da superfície convexa e côncava
a) superfície maquinada com uma estratégia scallop (3.5x)
b) superfície maquinada com uma estratégia radial (3.5x)

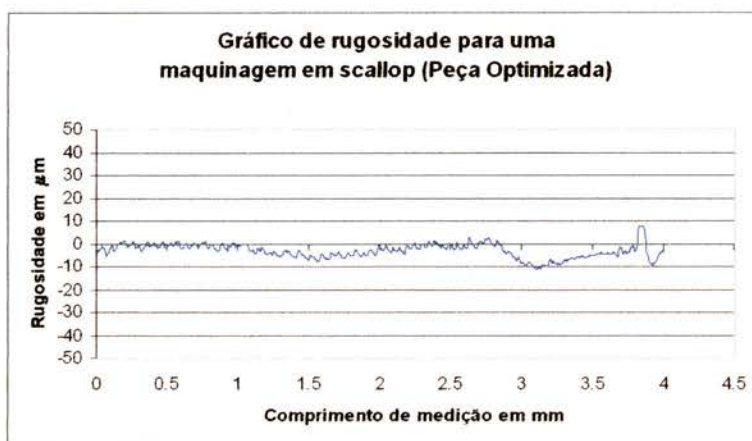


Fig. 123 – Aspecto do perfil de rugosidade numa maquinagem em scallop

Dado que possuímos duas formas geométricas parecidas, superfícies côncava e convexa, e sabendo que as estratégias que melhor se adequam são a maquinagem em scallop e em radial, maquinamos a superfície côncava em radial e a conexa em scallop. A nível visual as duas formas parecem-nos com um bom acabamento mas não conseguimos realizar medições de perfil na superfície côncava pelo que não podemos afirmar ser a melhor estratégia a aplicar nestes casos.

Tabela 43 – Valores de rugosidade média obtidos para as diferentes estratégias

Rugosidade Média (R_a)				
Forma Geométrica	Estratégia	Tolerância 0.05mm	Tolerância 0.005mm	Melhoria (%)
Superfície criada com “Spline”	Parallel 45° Zig-Zag	2.1 μm	1.8 μm	14.3
Superfície cônica	Contour zig-zag	0.6 μm	0.6 μm	0
Superfície côncava	Radial Zig-Zag	-----	-----	-----
Superfície convexa	Scallop (sentido anti horário)	3.4 μm	2.9 μm	14.7

Tabela 44 – Valores de profundidade máxima de rugosidade obtidos para as diferentes estratégias

Profundidade Máxima de Rugosidade (R_{zi})				
Forma Geométrica	Estratégia	Tolerância 0.05mm	Tolerância 0.005mm	Melhoria (%)
Superfície criada com “Spline”	Parallel 45° Zig-Zag	8.4	4.1	51.2
Superfície cônica	Contour zig-zag	4.6	4.1	10.9
Superfície côncava	Radial Zig-Zag	-----	-----	-----
Superfície convexa	Scallop (sentido anti horário)	13.1	7.1	45.8

Por comparação dos valores obtidos, pode ver-se que a diminuição do valor de tolerância conduziu a uma redução do valor de rugosidade média em praticamente todas as superfícies. Também a profundidade máxima de rugosidade diminuiu. Isto é vantajoso porque permite conseguir um perfil de rugosidades mais homogêneo com vantagens para o acabamento superficial.

6.2.8 Tolerância de Maquinagem – Vantagens e Desvantagens

Qualquer maquinagem deverá ser efectuada com uma tolerância que poderá ser maior ou menor consoante o grau de exigência pretendido, sendo o resultado final tanto melhor quanto menor for o valor da tolerância. Para melhor se compreender o significado de tolerância é apresentada a seguir uma imagem que pretende ilustrar isso mesmo.

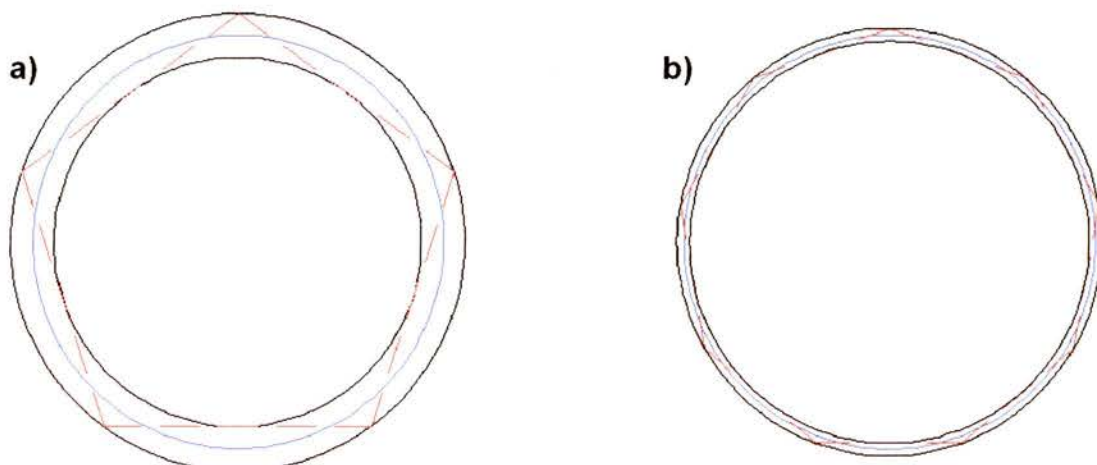


Fig. 124 – Esquema que ilustra a importância da tolerância na maquinagem

A azul está representado o contorno a maquinar, a preto os limites da tolerância e a vermelho o percurso da ferramenta. É bem visível, por comparação das duas imagens que o campo de deslocamento da ferramenta na situação b) é muito mais restrito que na situação a). Na situação a), a ferramenta executa cinco movimentos (segmentos de recta) para efectuar o contorno enquanto na situação b) a ferramenta executa nove movimentos. A superfície facetada irá ser muito mais visível no caso a) que no caso b).

As desvantagens associadas à diminuição da tolerância de maquinagem são:

- aumento do tempo de processamento de programas;
- aumento do tamanho de programas;
- aumento do tempo de transferência CAM/Máquina.

Apesar destes aumentos, os tempos de maquinagens em alguns casos, permanecem praticamente constantes.

6.2.9 Tempos de Maquinagem

Apesar da diminuição da tolerância de maquinagem, os tempos de maquinagem não sofreram alteração. A seguir são comparados os tempos para uma tolerância de 0.05 e 0.005mm para as superfícies spline, cônica, convexa e côncava.

Tabela 45 – Tempos de maquinagem na simulação e real e para diferentes tolerâncias

Forma Geométrica	Estratégia	Tolerância 0.05mm (simulação MasterCam)	Tolerância 0.005mm (simulação MasterCam)	Tolerância 0.05mm (maquinagem real)	Tolerância 0.005mm (maquinagem real)
Superfície criada com “Spline”	Parallel 45° Zig-Zag	20.3 min	20.3 min	30 min	31 min
Superfície cônica	Contour zig-zag	8.9 min	8.9 min	10 min	10 min
Superfície côncava	Radial Zig-Zag	10.6 min	10.6 min	12 min	12 min
Superfície convexa	Scallop (sentido anti horário)	6.9 min	6.9 min	12 min	12 min

Podemos ver que os tempos obtidos na simulação e medidos durante a maquinagem permaneceram constantes. Isto vem provar que é boa prática diminuir o valor de tolerância para conseguirmos obter as melhores maquinagens possíveis.

É também visível que há uma diferença de tempos entre a simulação e a maquinagem real isto porque o CNC, apesar de ter na programação um valor de avanço constante, este valor varia (diminui) para que a máquina se adapte às diversas formas geométricas da peça.

7. Conclusões

Após análise dos resultados obtidos deste trabalho, podemos tirar algumas conclusões que são apresentadas a seguir:

- O uso de lubrificação durante a maquinagem beneficia o acabamento superficial. Porém, uma má escolha de fluido lubrificante ou método de lubrificação, facilita o aparecimento da aresta postiça de corte na ferramenta diminuindo a sua vida útil.
- A fresagem concordante permite obter um melhor acabamento superficial que a fresagem discordante. O fresamento one-way garante sempre melhores acabamentos superficiais. No entanto o fresamento em zig-zag é o menos demorado.
- A estratégia utilizada é fundamental para a qualidade das superfícies obtidas na maquinagem de geometrias complexas. Cada geometria deve ser encarada como um caso particular havendo uma estratégia mais adequada à sua maquinagem.
- A tolerância para cálculo dos programas NC e a curvatura da superfície influenciam o comprimento dos segmentos de recta do programa NC, afectando o tempo de processamento e dimensão dos programas.
- A diminuição da tolerância aumenta o tempo de processamento do CAM, o tempo de transferência CAM/Máquina e dimensão do ficheiro. Ficou demonstrado que a diminuição da tolerância é vantajosa para a obtenção de superfícies de elevada qualidade superficial sem que para isso aumente o tempo de maquinagem. Provavelmente no futuro as máquinas terão que evoluir para processadores mais rápidos e espaços de armazenamento maiores.

- Constatou-se a grande ineficiência de maquinagem utilizando ferramentas de ponta esférica, quando o seu centro permanece na região de corte ficando a qualidade superficial nesta zona fortemente afectada.
- Verificaram-se vantagens na utilização de pastilhas redondas na fresagem já que nos permite obter uma sobre-espessura para acabamento mais uniforme.
- Em parte da literatura consultada, a definição de diâmetro efectivo de corte, quando utilizada uma ferramenta de ponta esférica é apresentada apenas para maquinagens onde o eixo da ferramenta de corte é perpendicular à superfície maquinada. Na maquinagem de formas complexas o diâmetro varia constantemente.
- O centro de maquinagem utilizado diminuía a velocidade de avanço na maquinagem de formas não rectilíneas. Isto pode ser apontado à velocidade de processamento do CNC ser maior que o tempo de resposta da máquina o que é pouco provável. O mais provável é o tempo de resposta da máquina ser maior que o de processamento ou então ser uma protecção da própria máquina como forma de diminuir esforços devido a inércia dos componentes e garantir a precisão dos movimentos.
- A simulação do MasterCam revela-se uma grande ajuda na pré-visualização da peça final obtida. Esta simulação é de grande qualidade na medida que nos permite visualizar todos os defeitos de forma que iremos encontrar no final da maquinagem.

Baseado em conclusões apresentadas e na experiência adquirida com este trabalho, sugiro as seguintes propostas de estudo para futuros trabalhos:

- Analise das forças de maquinagem no fresamento de moldes.
- A flexão sofrida pela ferramenta durante a maquinagem e como isso afecta o resultado final.
- A utilização métodos de lubrificação alternativos.
- A maquinagem de materiais não convencionais.

8. Bibliografia

BOUJELBENE, M. ; MOISAN, A. ; TOUNSI, N. ; BRENIER, B. ; "Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of continuous tool path" *International Journal of Machine Tool & Manufacture*; nº 1; p. 101-107; 2004.

DAVIM, J. P. ; "Princípios da Maquinagem"; Livraria Almedina; 1995.

FALLBÖHMER, P. ; RODRÍGUES, C. A. ; ÖZEL, T. ; ALTAN, T. ; "Highspeed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing"; *Journal of Materials Processing Technology*; Amsterdam; nº 1; p. 104-115; 2000.

FINZER, T. ; "High speed machining of sculptured Surfaces in die and mold manufacturing"; 1998.

MUMMERY, L. ; "Surface Texture Analysis - The Handbook"; Hommelwerke.

NING, Y. ; RAHMAN, M. ; WONG, Y.S. ; "Investigation of chip formation in high speed end milling"; *Journal of Materials Processing Technology*; p. 360-367; 2001.

QUINTÃ, A. F. ; SANTOS, J. P. O. ; "Habilitar um sistema de troca automática de ferramentas"; Departamento de Engenharia Mecânica; Universidade de Aveiro.

SANDVIK; "Fabricação de moldes e matrizes: guia de aplicações"; 2002.

SCHULZ, H. ; "High speed milling machines"; 1996.

SELADA, A. ; FERREIRA, J. ; "Maquinação a alta velocidade"; *O Molde*; nº 44, p. 25-27; 2000.

SOUZA, A.F. ; COELHO, R.T. ; "O Caminho para atingir o estado-da-arte é o bom entendimento"; **Máquinas e Metais**; nº 455; p. 82-97; 2003.

www.cefamol.pt

www.mmsonline.com

www.coromant.sandvik.com

www.secotools.com

www.delcam.com

www.mastercam.com

www.heidenhain.com



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105250