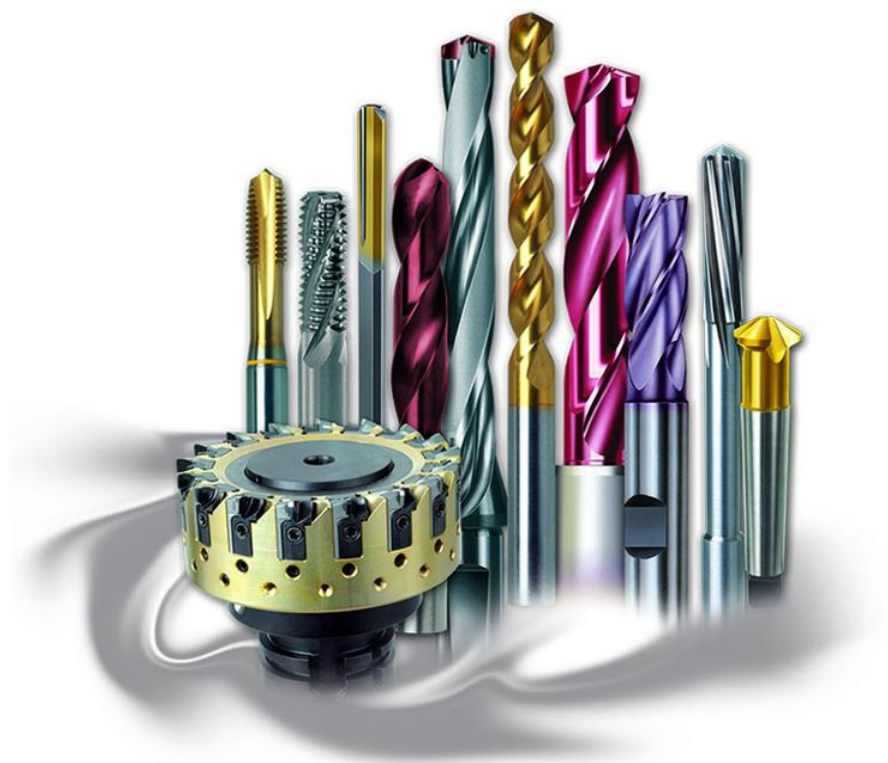






Dissertação do MIEM

Tendências do Corte por Arranque de Apara - Maquinagem

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel

5º Ano

Elaborado Por: Ricardo Batista
Nº Interno FEUP: 090504116
Orientador: Eng. Monteiro Baptista
Emissão: Novembro de 2010



À minha esposa e minha filha...



Resumo

Este trabalho é fruto da experiência adquirida na área da maquinagem, a viver diariamente problemas práticos e encontrar as melhores soluções técnicas.

Os resultados deste trabalho configuram notas técnicas retidas e anotadas ao longo do tempo que são informação valiosa na aprendizagem para os interessados no tema.

Os temas expostos no trabalho têm uma estrutura histórica até aos dias de hoje, demonstrando a evolução dos diferentes factores que influenciam este processo de fabrico.

Em volta deste processo de fabrico, existe um vasto conjunto de outros assuntos relevantes e de conhecimento para melhor entendimento de toda a envolvente no processo de maquinagem: máquinas ferramentas, programação CNC, ferramentas de corte, materiais, desenho técnico, princípios de maquinagem, etc.

O conhecimento de maquinaria e liderança de recursos humanos são factores de sucesso na aquisição de *Know-how*, a humildade de aprender e experimentar são características essenciais no recolher da informação disponível.

Em suma, este trabalho pretende fornecer informação de técnica sobre uma tecnologia de corte utilizada para alteração da forma dos materiais – ***Corte por Arranque de Apara***.

Ao longo do trabalho existe uma abordagem teórica fortemente apoiada pela experiência em chão de fábrica.

O objectivo fundamental é a documentação do processo maquinagem de forma prática sem perder de vista o rigor técnico exigido, sempre em busca da perfeição através da **Investigação, Desenvolvimento e Inovação**.



Abstract

This work is the product of 10 years of acquired experience in the area of machining, of living with daily practical problems and of looking for the best technical solutions.

The results of this work configure technical notes preserved and registered through the times, which constitute valuable information in the process of learning for those interested in this theme.

The themes presented in this work have a historical structure until the present time, showing an evolution of the different factors which influence this process of production.

Around this process of production there is a vast mass of other relevant issues and knowledge which allow a better understanding of the whole involvement in the process of machining: machines, cutting tools, CNC programming, materials, technical drawing, principles of machining, etc.

The knowledge of machinery and leadership of human resources are factors of success in the acquisition of know-how, the humility of learning and experimenting are substantial characteristics when gathering available information.

To sum up, this work intends to provide information about a technique of a cutting technology used to change the shape of materials – Machining.

Throughout the work there is a theoretic approach substantially supported by the experience in the working field.

The main aim is the documentation of the machining process in a practical way without losing the required technical accuracy, always looking for perfection through **Research, Development and Innovation.**



Agradecimentos

A elaboração de uma dissertação é um trabalho académico individual, no entanto, existem contributos para os quais não devo deixar de realçar a sua importância.

Por essa razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Eng.º Monteiro Baptista por toda a sua disponibilidade e orientação ao longo do meu trabalho desde a proposta inicial do tema até à apresentação final.

À minha família pela paciência, incentivo e motivação demonstrada no decorrer do meu trabalho.



Índice de Conteúdos

Página

1. Apresentação Geral do Trabalho e Objectivos	1
2. Introdução	2
3. Evolução Histórica do Processo Maquinagem	3
4. Maquinabilidade dos Materiais	6
4.1 Factores de influência na maquinabilidade	6
4.1.1 Material, composição química e tratamento térmico	6
4.1.2 Ferramenta de corte	7
4.1.3 Máquina ferramenta	7
4.2 Critérios de avaliação da maquinabilidade	7
4.2.1 Maquinabilidade	7
4.3 Inputs – Outputs da Maquinabilidade	10
5. Estudo dos materiais	11
5.1 Propriedade dos materiais	11
5.2 Agrupamento dos materiais	13
5.2.1 Grupo P – Aços	14
5.2.1.1 Aços sem liga	15
5.2.1.2 Aços com liga	15
5.2.2 Grupo M – Aços inoxidáveis	16
5.2.2.1 Aços inoxidáveis ferríticos	17
5.2.2.2 Aços inoxidáveis martensíticos	17
5.2.2.3 Aços inoxidáveis austeníticos	18
5.2.3 Grupo K – Ferros fundidos	20
5.2.3.1 Ferro fundido branco	21
5.2.3.2 Ferro fundido cinzento	21
5.2.3.3 Ferro Fundido maleável	22
5.2.3.4 Ferro Fundido nodular	22
5.2.4 Grupo N – Ligas de alumínio (Ligas não ferrosas)	22
5.2.5 Grupo S – Materiais resistentes ao calor (Ligas termo-resistentes)	23
5.2.6 Grupo H – Aços endurecidos.....	24
5.3 Influência dos elementos de liga nos aços e ligas não ferrosas	24



6. Materiais das Ferramentas de Corte	30
6.1 Propriedades fundamentais dos materiais	30
6.2 Materiais das ferramentas de corte	31
6.2.1 Aços rápidos (HSS)	32
6.2.2 Carbonetos sinterizados – Metal duro (C)	33
6.2.3 Carbonetos sinterizados revestidos (CG)	35
6.2.4 Cermets (CT)	35
6.2.5 Cerâmicos (C)	36
6.2.5.1 Cerâmicas à base de óxido de alumínio	37
6.2.5.1.1 Cerâmicas puras	37
6.2.5.1.2 Cerâmicas mistas	37
6.2.5.1.3 Cerâmicas reforçadas	38
6.2.5.2 Cerâmicas à base de nitreto de silício	38
6.2.5.2.1 Nitreto de silício	38
6.2.5.2.2 Sialon	38
6.2.5.3 Conclusão das cerâmicas	39
6.2. 6 Ultras duros	39
6.2. 6.1 Nitreto de boro cúbico (CBN)	39
6.2. 6.2 Diamante policristalino (PCD)	41
6.2. 6.3 Comparativo CBN e PCD	42
6.3 Revestimentos	43
6.3.1 Principais revestimentos	44
6.3.2 Processos de fabrico	45
6.3.3 Revestimentos de carbonetos sinterizados (Metal duro)	46
6.3.4 Exemplos de revestimentos em cermets, cerâmicos e diamante	47
7. Mecanismo de Formação da Apra	48
7.1 Formação da apra	48
7.2 Apra postiça de corte (Apra aderente)	50
7.3 Tipos de apra	51
7.4 Quebra apra	53
7.4.1 Influência geometria das ferramentas	54
8. Problemas e Soluções: Desgaste de Ferramentas e Acabamento Superficial	56
8.1 Tipos de avaria e desgaste	57



8.1.1 Avarias	58
8.1.2 Desgastes	58
8.1.2.1 Classificação do tipo de desgastes	59
8.2 Problemas e soluções na avaria/desgaste das ferramentas	62
8.2.1 Torneamento	62
8.2.2 Fresagem	64
9. Processos de Maquinagem: Torneamento e Fresagem	65
9.1 Torneamento	65
9.1.1 Dados de corte	67
9.1.2 Formato e raio da ponta pastilha	68
9.1.3 Tecnologia Wiper	69
9.1.4 Porta ferramentas	70
9.1.5 Torneamento interno	74
9.1.5.1 Forças de corte no torneamento interno	74
9.1.6 Nomenclatura e fórmulas em torneamento	75
9.2 Fresagem.....	76
9.2.1 Definições básicas em fresagem	77
9.2.2 Sentido de corte: Concordante ou Discordante	81
9.2.3 Considerações na entrada e saída de fresas	82
9.2.4 Ângulo de posição	84
9.2.5 Métodos de maquinagem de cavidades	85
9.2.5.1 Fresagem em rampa em 2 eixos	85
9.2.5.2 Fresagem em rampa em 3 eixos – Interpolação circular em hélice	86
9.2.5.3 Fresagem pelo método convencional	86
9.2.6 Recomendações aos métodos de fresagem	87
9.2.6.1 Facejamento	87
9.2.6.2 Fresagem em desbaste de grandes cavidades	87
9.2.6.3 Fresagem em mergulho	88
9.2.6.4 Fresagem de canais	88
9.2.6.5 Fresagem de semi-acabamento de cantos	89
9.2.7 Acabamento superficial em fresagem	90
9.2.7.1 Fresas de pastilha alisadora (Wiper)	90
9.2.7.2 Fresa de topo	90



9.2.8 Fresagem afectada por vibrações	91
9.2.9 Nomenclatura e fórmulas em fresagem.....	92
10. Lubrificação, Refrigeração e Fluidos de Corte.....	93
10.1 O que é a lubrificação?	93
10.2 Lubrificação na maquinagem	94
10.3 Propriedades e características dos lubrificantes	95
10.3.1 Propriedades dos fluídos de corte	96
10.3.2 Características dos fluídos de corte	96
10.4 Tipos de lubrificantes e refrigerantes	96
10.4.1 Sólidos	96
10.4.2 Líquidos	97
10.4.2.1 Óleos puros	97
10.4.2.2 Óleos emulsionáveis (Emulsões)	98
10.4.2.2.1 Óleos transparentes	99
10.4.2.2.2 Óleos pesados	99
10.4.2.3 Óleos sintéticos	99
10.4.3 Gasosos	100
10.5 Aditivos	100
10.6 Selecção do Fluido de Corte	101
10.6.1 Material da peça	102
10.6.2 Fluido de corte vantajoso na maquinagem	103
10.6.3 Fluido de corte não interfere na maquinagem	104
10.6.4 Fluido de corte prejudica na maquinagem	104
10.7 Sistema de lubrificação por quantidade mínima (MQL)	105
11. Case Study: Liga de Alumínio e Inox	106
11.1 Disco rotativo em liga alumínio	106
11.1.1 Aplicação da peça em estudo	106
11.1.2 Desenho técnico da peça em alumínio	107
11.1.3 Material	108
11.1.4 Máquina.....	108
11.1.5 Fluido de corte	109
11.1.6 Sequência de maquinagem	110
11.1.6.1 Sequência de Operações	110



11.1.7 Programação CNC da peça	115
11.1.8 Observações técnicas do ensaio	117
11.1.9 Ficha técnica do ensaio	119
11.2 Puxador de porta exterior em inox	120
11.2.1 Aplicação da peça em estudo	120
11.2.2 Desenho técnico da peça em inox	121
11.2.3 Material	121
11.2.4 Máquina	121
11.2.5 Fluido de corte	122
11.2.6 Sequência de maquinagem	123
11.2.6.1 Sequência de Operações	124
11.2.7 Programação CNC da peça	129
11.2.8 Observações técnicas do ensaio	132
11.2.9 Ficha técnica do ensaio	133
12. Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros	134
13. Bibliografia e Referências	136



Índice de Imagens	Página
Figura 1 – Conjunto de ferramentas. Fonte: Sandvik	1
Figura 2 – Torno CNC automático. Fonte: Mazak Corporation	1
Figura 3 – Pormenor da torreta torno CNC. Fonte: Mazak Corporation	2
Figura 4 – Primeira fresadora universal da empresa Brown & Sharpe's	3
Figura 5 – Ferramenta intercambiável. Fonte: Frezite	4
Figura 6 – Peças obtidas por torneamento	5
Figura 7 – Desbaste de uma peça por torneamento. Fonte: Mazak Corporation	5
Figura 8 – Carcaça de um automóvel maquinada. Fonte: Okuma Corporation	6
Figura 9 – Veio de 6 entradas. Fonte: Okuma Corporation	6
Figura 10 – Cabeças de fresagem. Fonte: Mazak Corporation	10
Figura 11 – Performance da maquinabilidade relativamente à condutividade térmica de diferentes materiais. Fonte: Centimfe	12
Figura 12 – Materiais de referência por cada grupo dos carbonetos sinterizados. Fonte: Sandvik	14
Figura 13 – Delimitação áreas de maquinabilidade satisfatória. Fonte: Centimfe	19
Figura 14 – Diferença de dureza desde camada superficial até ao núcleo. Fonte: Centimfe	19
Figura 15 – Influência ductilidade e dureza na maquinabilidade. Fonte: Centimfe	22
Figura 16 – Peças de aço obtidas por torneamento	24
Figura 17 – Torneira de cozinha. Fonte Grohe	25
Figura 18 – Jante de automóvel em alumínio. Fonte: Okuma Corporation	26
Figura 19 – Blocos de motor maquinados em alumínio. Fonte: Okuma Corporation	26



Figura 20 – Passador de canalização	26
Figura 21 – Componentes de tubagens maquinados em latão	26
Figura 22 – Turbina propulsora. Fonte: Rolls-Royce	27
Figura 23 – Peças torneadas de liga Zn e Cu-Zn	28
Figura 24 – Parafusos em titânio	28
Figura 25 – Falange em titânio	28
Figura 26 – Aspecto do silício puro	28
Figura 27 – Casquilhos de liga Ni-Cu	29
Figura 28 – Componentes em liga de níquel	29
Figura 29 – Ilustração de alguns revestimentos. Fonte Sandvik	35
Figura 30 – Pastilha em Cermets. Fonte Sandvik	35
Figura 31 – Óxido de Alumínio 1000x Fonte: Sandvik	37
Figura 32 – Pastilhas reforçadas com whiskers	38
Figura 33 – Pastilha em CBN. Fonte: Seco Tools	39
Figura 34 – Pastilha negativa em PCD. Fonte: Frezite	41
Figura 35 – Pastilha negativa em PCD. Fonte: Frezite	41
Figura 36 – Ferramenta com ponta em PCD. Fonte: Frezite	41
Figura 37 – Diamante usado como revestimento. Fonte: Sandvik	42
Figura 38 – Representa as tecnologias de revestimento PVD e CVD em ferramentas/pastilhas de corte. Fonte: Sandvik	45
Figura 39 – Exemplos de revestimentos em metal duro. Fonte: Sandvik	46
Figura 40 – Exemplos de revestimentos em cermets, cerâmicos e diamante. Fonte Sandvik	47



Figura 41 – Formação da Apra	49
Figura 42 – Regiões de deformação da apra. Fonte: Princípios de Maquinagem, J. Paulo Davim, Almedina	49
Figura 43 – Aspecto da aresta postiça de corte. Fonte: Sandvik	50
Figura 44 – Representação das formas da apra, norma ISO 3685. Fonte: Princípios de Maquinagem, J. Paulo Davim, Almedina	52
Figura 45 – Ilustração dos tipos de apra em função da profundidade de corte (ap) e a velocidade de avanço (fn). Fonte: Sandvik	52
Figura 46 – Diferentes formas de quebra apra. Fonte: Sandvik	53
Figura 47 – Diferentes geometrias do quebra apra em pastilhas. Fonte: Sandvik	53
Figura 48 – Exemplos de geometrias positivas e negativas. Fonte: Sandvik	54
Figura 49 – Ilustração de geometrias positivas e negativas. Fonte: Sandvik	54
Figura 50 – Influência do ângulo de posição na formação da apra. Fonte: Sandvik	55
Figura 51 – Pastilhas positivas para operações de desbaste, semi-desbaste e acabamento. Fonte: Sandvik	55
Figura 52 – Ilustração da rotura em pente. Fonte: Centimfe	58
Figura 53 – Esquema de desgaste das ferramentas. Fonte: Centimfe	58
Figura 54 – Desgaste da face de saída.	60
Figura 55 – Desgaste da face de ataque.	60
Figura 56 – Desgaste por deformação plástica.	60
Figura 57 – Cratera em V (entalhe).	60
Figura 58 – Fractura térmica.	61
Figura 59 – Fractura por fadiga.	61



Figura 60 – Aresta postiça de corte (APC).	61
Figura 61 – Desgastes, causas e soluções para torneamento. Fonte: Sandvik	63
Figura 62 – Desgastes, causas e soluções para fresagem. Fonte: Sandvik	64
Figura 63 – Ilustração torneamento. Fonte: Sandvik	65
Figura 64 – Suporte de torneamento. Fonte: Sandvik	65
Figura 65 – Peça com diferentes operações ao torno. Fonte: Sandvik	66
Figura 66 – Operações em torneamento. Fonte: Sandvik	66
Figura 67 – Perfil de uma peça torneada. Fonte: Sandvik	66
Figura 68 – Movimento radial e axial da ferramenta em torneamento. Fonte: Sandvik	67
Figura 69 – Parâmetros de corte em torneamento. Fonte: Sandvik	67
Figura 70 – Representa 2 pastilhas típicas para desbaste 90° (S) e acabamento 35° (V) Comparação de ângulo de ponta (ϵ), comprimento da aresta de corte (l), comprimento efectivo da aresta de corte (l_a), ângulo de posição (κ_r) e profundidade de corte (a_p). Fonte: Sandvik	68
Figura 71 – Representação do raio de ponta (r_e) da pastilha. Fonte: Sandvik	68
Figura 72 – Influência do raio de ponta e avanço no acabamento superficial. Fonte: Sandvik	69
Figura 73 – Comparação da rugosidade pastilha standard vs pastilha wiper. Fonte: Sandvik	69
Figura 74 – Configuração da ponta da ferramenta. Fonte: Sandvik	70
Figura 75 – Exemplos de sistemas de fixação marca Sandvik. Fonte: Sandvik	71
Figura 76 – Exemplos de porta ferramentas para uso interno e externo. Fonte: Sandvik	73
Figura 77 – Torneamento interno e balanço da ferramenta. Fonte: Sandvik	74
Figura 78 – Evacuação da apara é um factor crítico no torneamento interior. Fonte: Sandvik	74
Figura 79 – Esquema das forças de corte tangencial e radial. Fonte: Sandvik	74
Figura 80 – Nomenclatura e fórmulas em torneamento. Fonte: Seco Tools	75



Figura 81 – Ilustração de operações de fresagem. Fonte: Sandvik	76
Figura 82 – Exemplos de fresas de pastilha ou inteiriças. Fonte: Sandvik	76
Figura 83 – Principais tipos de operações em fresagem. Fonte: Sandvik	77
Figura 84 – Tipos básicos de fresas. Fonte: Sandvik	77
Figura 85 – Definição dos diâmetros nos 3 tipos básicos de fresas. Fonte: Sandvik	85
Figura 86 – Esquematização do avanço, prof. e espessura da apra. Fonte: Sandvik	79
Figura 87 – Vista de topo e lateral de uma fresa com representação dos avanços e profundidades. Fonte: Sandvik	80
Figura 88 – Variação do ângulo de posição de uma fresa. Fonte: Sandvik	80
Figura 89 – Tipos de passo das fresas e suas características. Fonte: Sandvik	81
Figura 90 – Fresagem concordante e discordante. Fonte: Sandvik	82
Figura 91 – Variação de entrada e saída em relação à posição da fresa. Fonte: Sandvik	83
Figura 92 – Efeito do ângulo de saída na aresta de corte. Fonte: Sandvik	83
Figura 93 – Ângulos de posição de fresa mais comuns e seus efeitos nas forças de corte e espessura da apra. Fonte: Sandvik	85
Figura 94 – Fresagem em rampa 2 eixos. Fonte: Sandvik	86
Figura 95 – Fresagem em rampa 3 eixos. Fonte: Sandvik	86
Figura 96 – Método convencional. Fonte: Sandvik	87
Figura 97 – Fresagem interrompida e fresagem sem intermitência. Fonte: Sandvik	87
Figura 98 – Desbaste de grandes cavidades. Fonte: Sandvik	88
Figura 99 – Exemplos de fresagem em mergulho. Fonte: Sandvik	88
Figura 100 – Fresagem de canais. Fonte: Sandvik	88
Figura 101 – Diâmetro máximo para semi-acabamento de cantos. Fonte: Sandvik	89
Figura 102 – Fresagem de ângulos fechados de canto. Fonte: Sandvik	89



Figura 103 – Pastilha alisadora e redonda para acabamento na fresagem. Fonte: Sandvik	90
Figura 104 – Ilustração de vibrações na fresagem. Fonte: Sandvik	91
Figura 105 – Nomenclatura e fórmulas em fresagem. Fonte: Sandvik	92
Figura 106 – Atrito entre superfícies	93
Figura 107 – Distribuição do gradiente térmico	93
Figura 108 – Refrigeração Fresagem	93
Figura 109 – Refrigeração Torneamento	93
Figura 110 – Defeitos por deformação plástica e lascamento na ponta da ferramenta vista ao microscópio. Fonte: Sandvik	94
Figura 111 – Análise pelo método dos Elementos Finitos das temperaturas envolvidas na interface ferramenta/material.	94
Figura 112 – Pastilha c/deformação plástica e lascamento. Fonte: Sandvik	95
Figura 113 – Lubrificação com óleo integral	95
Figura 114 – Lubrificação com emulsão	95
Figura 115 – Óleo puro	97
Figura 116 – Emulsão.	98
Figura 117 – Aparelho refractómetro.	98
Figura 118 – Operação de rectificação.	99
Figura 119 – Sopro de ar.	100
Figura 120 – Quantidade de fluído usado por operação. Fonte: Centimfe	103
Figura 121 – Aresta com trincas térmicas e corte interrompido. Fonte: Sandvik	104
Figura 122 – Esquematização do processo de MQL. Fonte: Sandvik	105
Figura 123 – Vistas de topo e frente do conjunto.	106



Figura 124 – Desenho de conjunto.	106
Figura 125 – Peça torneada.	107
Figura 126 – Desenho técnico da peça.	107
Figura 127 – Geometria da cavilha. Fonte: Wieland	108
Figura 128 – Conjunto aperto por pinça.	108
Figura 129 – Deslocamentos da máquina.	108
Figura 130 – Aspecto geral do torno.	108
Figura 131 – Aspecto geral do alimentador.	108
Figura 132 – Bidão de 25 litros de Cooledge BI. Fonte: Castrol	109
Figura 133 - Broca especial furo do centro	110
Figura 134 – Suporte tornear exterior. Fonte: Sandvik	111
Figura 135 – Suporte e pastilha da caixa frontal baixo-relevo. Fonte: Paul Horn	112
Figura 136 – Suporte e pastilha para ranhurar exterior. Fonte: Sumitomo Tools	113
Figura 137 - Broca especial furos descentrados	114
Figura 138 – Suporte e pastilha para sangramento. Fonte: Iscar Tools	114
Figura 139 – Material agarrado à ferramenta de sangrar.	117
Figura 140 – Aspecto da apara no carro da limalha.	117
Figura 141 – Aspecto da peça na face de sangramento.	117
Figura 142 – Sangramento c/lubrificação. Fonte: Iscar Tools	118
Figura 143 – Pormenor das pastilhas de sangramento. Fonte: Iscar Tools	118
Figura 144 – Fluido sem penetração ferramenta/peça. Fonte: Iscar Tools	118
Figura 145 – Fluido com penetração ferramenta/peça. Fonte: Iscar Tools	118



Figura 146 – Aspecto da face de sangramento das peças no ensaio.	119
Figura 147 – Perspectiva do puxador exterior em inox.	120
Figura 148 – Perspectiva do conjunto.	120
Figura 149 – Desenho técnico do conjunto.	120
Figura 150 – Desenho técnico da peça.	121
Figura 151 – Logótipo do fornecedor. Fonte: Petrochem.	122
Figura 152 – Ficha técnica do fornecedor. Fonte: Petrochem.	124
Figura 153 – Suporte e pastilha para desbaste. Fonte: Kennametal	124
Figura 154 – Suporte e pastilha para acabamento. Fonte: Kennametal	125
Figura 155 – Broca especial D11 para ponto de guiamento.	126
Figura 156 – Broca diâmetro 2,5 mm. Fonte: Guhring.	126
Figura 157 – Macho M3x0,5. Fonte: Guhring.	127
Figura 158 – Suporte e pastilha para sangramento. Fonte: Kennametal.	128
Figura 159 – Aspecto da face de sangramento.	132
Figura 160 – Aspecto do acabamento da peça.	132



Índice de Tabelas	Página
Tabela 1 - Propriedades do aço B1112 (AISI/SAE)	8
Tabela 2 – Índices de Maquinabilidade Fonte: http://www.sme.org	9
Tabela 3 – Influência dos elementos de liga na maquinabilidade dos aços	13
Tabela 4 – Propriedades dos materiais para ferramentas. Fonte: Princípios de Maquinagem J. Paulo Davim, Almedina	32
Tabela 5 – Ficha técnica do ensaio em alumínio	119
Tabela 6 – Diluições em água recomendadas para o Petrocut-EP em função das diferentes operações e tipos de material. Fonte: Petrochem.	123
Tabela 7 – Ficha técnica do ensaio em inox	133



1. Apresentação Geral do Trabalho e Objectivos

Este trabalho é fruto de experiência adquirida na área da maquinagem, a viver diariamente problemas práticos e encontrar as melhores soluções técnicas.

Os resultados deste trabalho configuram notas técnicas retidas e anotadas ao longo do tempo que são informação valiosa na aprendizagem para os interessados no tema.

Os temas expostos no trabalho têm uma estrutura histórica até aos dias de hoje, demonstrando a evolução dos diferentes factores que influenciam este processo de fabrico.



Figura 1 – Conjunto de ferramentas. Fonte: Sandvik

Em volta deste processo de fabrico, existe um vasto conjunto de outros assuntos relevantes e de conhecimento para melhor entendimento de toda a envolvente no processo de maquinagem: máquinas ferramentas, programação CNC, ferramentas de corte, materiais, desenho técnico, princípios de maquinagem, etc.

O conhecimento de maquinaria e liderança de recursos humanos são factores de sucesso na aquisição de *Know-how*, a humildade de aprender e experimentar são características essenciais no recolher da informação disponível.

Em suma, este trabalho pretende fornecer informação de técnica sobre uma tecnologia de corte utilizada para alteração da forma dos materiais – ***Corte por Arranque de Apara***.

Ao longo do trabalho existe uma abordagem teórica fortemente apoiada pela experiência em chão de fábrica.

O objectivo fundamental é a documentação do processo maquinagem de forma prática sem perder de vista o rigor técnico exigido, sempre em busca da perfeição através da **Investigação, Desenvolvimento e Inovação**.



Figura 2 – Torno CNC automático. Fonte: Mazak Corporation



2. Introdução

A competitividade da indústria metalomecânica é determinada pela capacidade de compreender e reagir às necessidades dos seus clientes e, por outro lado, de se ajustar à evolução e mutação das tecnologias e dos recursos humanos.

O domínio das tecnologias de produção nas vertentes de organização industrial e processos de fabrico, capacidade para desenvolver novos produtos, inovação e eficiência constituem factores chave de competitividade numa economia global.

A sobrevivência no mercado, depende do sistema de qualidade e produção a preços competitivos com prazos de entrega curtos.

Uma maior flexibilidade permite uma reacção rápida à necessidade de desenvolvimento e implementação em fábrica de um novo produto.

A optimização dos recursos produtivos, por redução dos tempos improdutivos, a melhor utilização dos equipamentos e ferramentas, é um factor de aumento de produtividade.

Os desenvolvimentos tecnológicos e a inovação têm possibilitado um aumento da competitividade das empresas. Destacam-se pela sua importância, os seguintes:

- Melhor conhecimento do comportamento dos materiais durante o processo de corte;
- Possibilidade de prever e simular comportamentos críticos de processo;
- Tecnologia de ponta disponível pelos fabricantes que permite uma maior autonomia de trabalho e incremento significativo dos parâmetros de corte: máquinas, ferramentas, materiais a maquinar, lubrificantes, etc.
- Redução significativa dos tempos de fabricação, uma maior precisão e melhor acabamento superficial.

Não é possível melhorar a eficiência de um processo produtivo sem um conhecimento profundo das tecnologias de base, e em particular o corte por arranque de apara - Maquinagem.

Os fundamentos de maquinagem serão aqui explicados de forma clara para permitir uma perfeita compreensão.

O tema da maquinagem está hoje associado, tal qual outros processos, a uma variedade de conhecimentos necessários para o bom funcionamento na produção de maquinados, que inicia-se com o know-how de base até à análise de projectos de investimentos de processo e equipamentos, por exemplo.



Figura 3 – Pormenor da torreta torno CNC. Fonte: Mazak Corporation



3. Evolução Histórica do Processo Maquinagem

A Maquinagem não é uma tecnologia nova, tendo tido um papel fundamental no desenvolvimento da civilização.

É importante situar no tempo a evolução desta tecnologia, o torno foi a primeira máquina ferramenta conhecida e até ao século XVIII, trabalhava essencialmente madeira.

As primeiras referências de construção de um torno remontam ao Século XVII, embora são conhecidos vestígios e utensílios dos antigos egípcios com marcas de torneamento.

A primeira fresadora foi um trabalho do inventor americano Eli Whitney em 1818.

A figura 4 é uma fresadora universal, desenvolvida pela firma americana Brown & Sharpe's em 1861.

O trabalho mais antigo de investigação na Maquinagem que se conhece é de Coquillat em 1851, o seu objectivo era medir o trabalho realizado por uma ferramenta de furar na remoção de uma dada quantidade de material.

Os fabricantes de armamento foram o sector de negócio responsável pelo desenvolvimento e progresso no corte de metais.

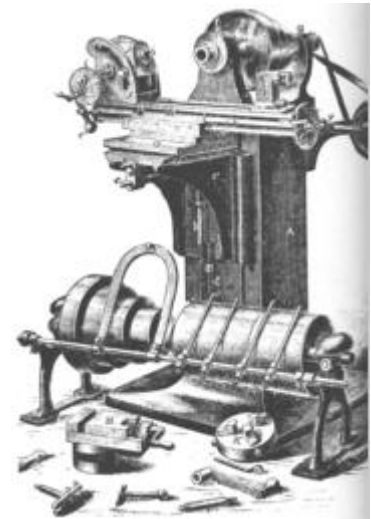


Figura 4 – Primeira fresadora universal da empresa Brown & Sharpe's

A introdução das máquinas ferramentas motorizadas, por recurso a novas fontes de energia, em particular a energia eléctrica, o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas, permite um desenvolvimento espectacular no século XX e consequentemente da civilização.

Os movimentos alternativos das ferramentas foram substituídos por ferramentas rotativas no geral das operações de Maquinagem.

Mais desenvolvimentos marcam a inovação no processo: uso de componentes intercambiáveis (consequência da produção em série) e máquinas com movimentos automáticos.

No fabrico das ferramentas de corte os materiais mais comuns durante o séc. XIX eram aços de alto teor de carbono e aços ao carbono ligados (tratados termicamente), porém com a desvantagem de perderem a dureza rapidamente devido ao calor gerado no processo de corte.

Esta situação foi melhorada com os desenvolvimentos de Fredrick Taylor & White no início do séc. XX, novos materiais como o aço rápido denominado HSS (*High Speed Steel*) permitiram um aumento considerável dos parâmetros de corte, e consequentemente uma redução de 25% nos tempos de Maquinagem.

No início da década de 30 séc. XX, a adição de Cobalto aos aços rápidos dá origem aos aços super rápidos.



Do trabalho de investigação de Taylor, surge o incremento significativo dos parâmetros de corte e o estudo da vida das ferramentas, pois estabelece a equação da vida económica das ferramentas válida para velocidades convencionais.

Na 2ª década do Séc. XX, os elementos de liga ganham força na construção de ferramentas de corte com destaque para o Cobalto (Co), Molibdénio (Mo) e Tungsténio (W).

Estes novos materiais formam carbonetos muito duros, frágeis, difíceis de conformar mecanicamente, mas com uma dureza a quente elevada e permitiram uma redução significativa dos tempos de maquinagem cerca de metade comparados com os HSS e maior rendimento de produção.

Os novos elementos são conformados por processos obtidos através da metalurgia do pó: Sinterização.

Consequentemente, a designação técnica de Carbonetos Sinterizados ou Metal Duro.



Figura 5 – Ferramenta intercambiável. Fonte: Frezite

No entanto, o desenvolvimento das máquinas ferramentas não tinham potência, rigidez e velocidades exigidas pelos novos materiais das ferramentas de corte, a generalização do uso de carbonetos acontece no decorrer da 2ª guerra mundial.

Na Alemanha, é produzida a primeira pastilha de carbonetos sinterizados em meados da década de 20 (séc. XX) e durante a 2ª guerra mundial colocada no mercado a primeira pastilha em material cerâmico, à base de óxido de alumínio ou Alumina.

Material com grande resistência ao desgaste, boa estabilidade química, fixação mecânica ao suporte (pastilhas fixas em construção soldada – Brasagem).

Tensões residuais provocadas pela soldadura e os constantes afiamentos não eram favoráveis à ferramenta.

Nos anos 50, o aperto mecânico substituiu a ligação por Brasagem/Soldadura com a consequente facilidade de substituição e afiação.

No final dos anos 60, a firma sueca Sandvik, inicia o revestimento de pastilhas de metal duro pelo processo de deposição química em fase de vapor (Chemical Vapor Deposition - CVD) resultando alta resistência ao desgaste, substrato tenaz, dureza superficial e elevada performance no corte, em particular, maiores velocidades de corte e aumento da produtividade pela redução dos custos de produção.

O processo consiste na deposição química de uma fina camada de carboneto de Titânio de grão fino com uma espessura de poucos micrometros.

Na década de 70, aparece o diamante policristalino (Polycrystalline Cubic Diamond – PCD) com grande aplicação na Maquinagem de ligas não-ferrosas (Cu-Zn, Al).



As primeiras máquinas de comando numérico por computador (Computer Numeric Control – CNC) foram comercializadas pela firma americana Cincinnati Milacron e os primeiros sistemas CAD/CAM (Computer Aided Design – CAD e Computer Aided Manufacturing – CAM) apareceram no mercado no início dos anos 80, séc. XX.

A indústria aeroespacial foi a responsável nos EUA, pelo grande desenvolvimento das máquinas ferramentas, solicitaram um profundo estudo devido a grande parte de trabalho ser manual, impreciso e ineficiente.

A mudança automática de ferramenta (Automatic Tool Change – ATC), alimentação de matéria-prima com recurso a paletes robotizadas (Automatic Pallet Change – APC), alimentadores de barra, compensação de temperatura (gradientes de temperatura elevada), sistemas anti-vibração, eram os passos que faltavam resolver os problemas de Maquinagem.

Surge os centros de Maquinagem utilizados pela indústria aeroespacial na Califórnia.



Figura 6 – Peças obtidas por torneamento

Numa só máquina, equipada com armazém de ferramentas permitia a execução de várias operações: fresagem, furação, roscagem) num modo sequencial, automático, elevada precisão, redução dos tempos (preparação, produção, paragens) e a excelente qualidade dos componentes fabricados.

Nos dias de hoje, a tecnologia disponível pelos fabricantes de máquinas CNC tem muita investigação, conhecimento e inovação (R&D) departamentos técnicos especializados, formação (Training Centre), consultoria (Technical Support), etc.

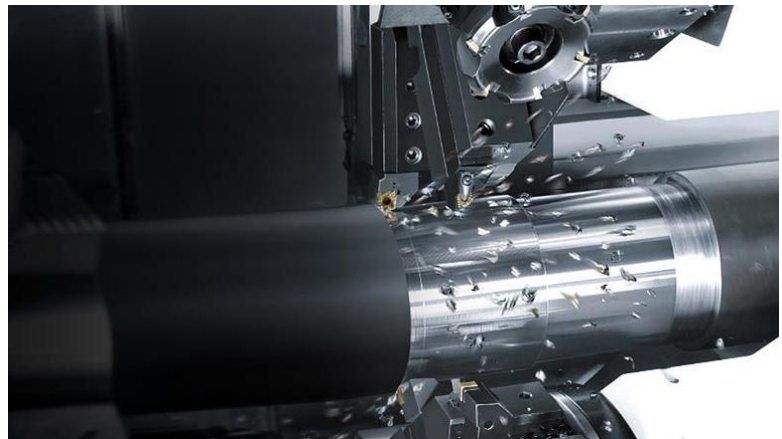


Figura 7 – Desbaste de uma peça por torneamento. Fonte: Mazak Corporation



4. Maquinabilidade dos Materiais

Os materiais mais comuns no processo de Maquinagem são os ferrosos e não ferrosos, mas madeira, polímeros, fibras, materiais compósitos, também podem ser maquinados.

A **maquinabilidade** de um material é definida como aptidão (fácil ou difícil) que um material tem para ser processado com uma ferramenta de corte, alterando a sua forma, através do processo de **Corte por Arranque de Apara - Maquinagem**.



Figura 8 – Carcaça de um automóvel maquinada. Fonte: Okuma Corporation

Os componentes produzidos dependendo do tipo de operação, material a maquinar, tipo componente, máquina-ferramenta, condições de corte, ferramentas, refrigeração, devem ter as seguintes características:



- Precisão dimensional e geométrica;
- Qualidade superficial da peça maquinada;

Figura 9 – Veio de 6 entradas. Fonte: Okuma Corporation

4.1 Factores de influência na maquinabilidade

Os principais factores de influência no processo de corte, podem ser divididos em 3 vectores de análise: material, ferramenta de corte e máquina-ferramenta.

4.1.1 Material, composição química e tratamento térmico

O material a maquinar tem influência primordial na maquinabilidade. Esta é afectada por 3 factores principais: dureza, composição química e tratamento térmico.

Para durezas entre 170-200HB tem boa maquinabilidade, superiores a 300HB podemos usar ferramentas de metal duro em boas condições de trabalho, acima dos 600HB ferramentas de base cerâmica ou PCD e CBN.

A composição química e o tratamento térmico configuram uma grande parte das restantes propriedades do material.

Alguns elementos de liga como o enxofre (S) melhoram a maquinabilidade dos aços, o chumbo (Pb), o telúrio (Te), o selénio (Se) e o bismuto (Bi) também produzem um efeito similar.

O tratamento térmico tem uma importância considerável no material.

Materiais constituídos por uma estrutura de grão grosso tem menos maquinabilidade do que os materiais de grão fino.



Inclusões, constituintes duros, óxidos e outras impurezas “duras” têm um efeito negativo na maquinabilidade.

O Capítulo 5, é dedicado aos materiais a maquinar.

4.1.2 Ferramenta de corte

As ferramentas de corte são construídas principalmente em função do material a maquinar, mas também dependem de factores muito importantes: material, revestimento, geometria, etc.

4.1.3 Máquina ferramenta

O estado da máquina ferramenta, rigidez, precisão, condições de produção e a preparação da peça a maquinar, tem um peso significativo no processo.

4.2 Critérios de avaliação da maquinabilidade

É difícil traduzir a influência das diferentes propriedades dos materiais e da maior ou menor aptidão destes ao corte por arranque de apara através de indicadores de Maquinabilidade.

A Maquinabilidade pode ser avaliada por vários critérios: desgaste da ferramenta, qualidade superficial, forças de corte e tipo de apara produzida.

Existem alguns que reflectem que nenhum deles é totalmente esclarecedor, o que é uma consequência da complexidade do fenómeno de corte resultando ambiguidades nos ensaios e na apreciação dos resultados experimentais.

Alguns dos indicadores de Maquinabilidade, são os seguintes:

- Vida da ferramenta
- Formação da apara
- Estado da superfície e rugosidade superficial
- Volume de apara removida por unidade de tempo
- Potência específica de corte
- Tendência para formação de aresta postiça de corte (Build Up Edge – BUE)
- Maquinabilidade relativa

4.2.1 Maquinabilidade relativa

O material deve ter propriedades que permitam a sua Maquinabilidade, materiais com elevado Índice de Maquinabilidade consideram-se fáceis de maquinar, com menor valor difíceis de maquinar.

A vida da ferramenta de corte é um critério muito utilizado na avaliação de Maquinabilidade.



A maquinabilidade relativa exprime a relação, em percentagem, entra a velocidade de corte V do material a avaliar e a velocidade V_0 de um material padrão, num ensaio standard provocam mesmo desgaste no mesmo tempo.

Consiste na comparação entre materiais a maquinar, daí o termo Maquinabilidade Relativa.

O ensaio padrão, contempla características, tais como: vida da ferramenta, desgaste aresta de corte, força de corte, temperatura na zona de corte e quantidade de material removido.

O índice $=1$ (ou 100%), significa o valor de referência como boa maquinabilidade, (normalmente aço B1112, dureza HB180-200).

- Maquinabilidade relativa $>100\%$ excelente maquinabilidade;
- Maquinabilidade relativa $<100\%$ fraca maquinabilidade;

As propriedades e composição química do aço de referência, são as seguintes:

Tabela 1 - Propriedades do aço B1112 (AISI/SAE).

AISI	SAE	Designação	Dureza HB/HRC	%C	%Mn	%P	%S	Maquinabilidade (%)
B1112	1112	Cold Drawn Bessemer	170-185 120-140	0.08- 0.13	0.60- 0.90	0.90- 0.13	0.16- 0.23	100



A tabela seguinte mostra o índice de maquinabilidade de alguns materiais:

Tabela 2 – Índices de Maquinabilidade Fonte: <http://www.sme.org>.

TABLE 25.1 Approximate Values of Brinell Hardness Number and Typical Machinability Ratings for Selected Work Materials.

Material	Brinell Hardness	Machinability Rating ^a	Material	Brinell Hardness	Machinability Rating ^a
Base steel: B1112	180–220	1.00	Tool steel (unhardened)	200–250	0.30
Low-carbon steel			Cast iron		
C1008, C1010, C1015	130–170	0.50	Soft	60	0.70
Medium-carbon steel			Medium hardness	200	0.55
C1020, C1025, C1030	140–210	0.65	Hard	230	0.40
High-carbon steel			Super alloys		
C1040, C1045, C1050	180–230	0.55	Inconel	240–260	0.30
Alloy steels ^b			Inconel X	350–370	0.15
1320, 1330, 3130, 3140	170–230	0.55	Waspalloy	250–280	0.12
4130	180–200	0.65	Titanium		
4140	190–210	0.55	Plain	160	0.30
4340	200–230	0.45	Alloys	220–280	0.20
4340 (casting)	250–300	0.25	Aluminum		
6120, 6130, 6140	180–230	0.50	2-S, 11-S, 17-S	Soft	5.00 ^c
8620, 8630	190–200	0.60	Aluminum alloys (soft)	Soft	2.00 ^d
B1113	170–220	1.35	Aluminum alloys (hard)	Hard	1.25 ^d
Free machining steels	160–220	1.50	Copper	Soft	0.60
Stainless steel			Brass	Soft	2.00 ^d
301, 302	170–190	0.50	Bronze	Soft	0.65 ^d
304	160–170	0.40			
316, 317	190–200	0.35			
403	190–210	0.55			
416	190–210	0.90			

Values are estimated average values based on [1], [2], [3], [6], and other sources. Ratings represent relative cutting speeds for a given tool life (see Example 25.2).

^a Machinability ratings are often expressed as percents (index number $\times$ 100%).

^b Our list of alloy steels is by no means complete. We have attempted to include some of the more common alloys and to indicate the range of machinability ratings among these steels.

^c The machinability of aluminum varies widely. It is expressed here as MR = 5.00, but the range is probably from 3.00 to 10.00 or more.

^d Aluminum alloys, brasses, and bronzes also vary significantly in machining performance. Different grades have different machinability ratings. For each case, we have attempted to reduce the variation to a single average value to indicate relative performance with other work materials.



4.3 Inputs – Outputs da Maquinabilidade

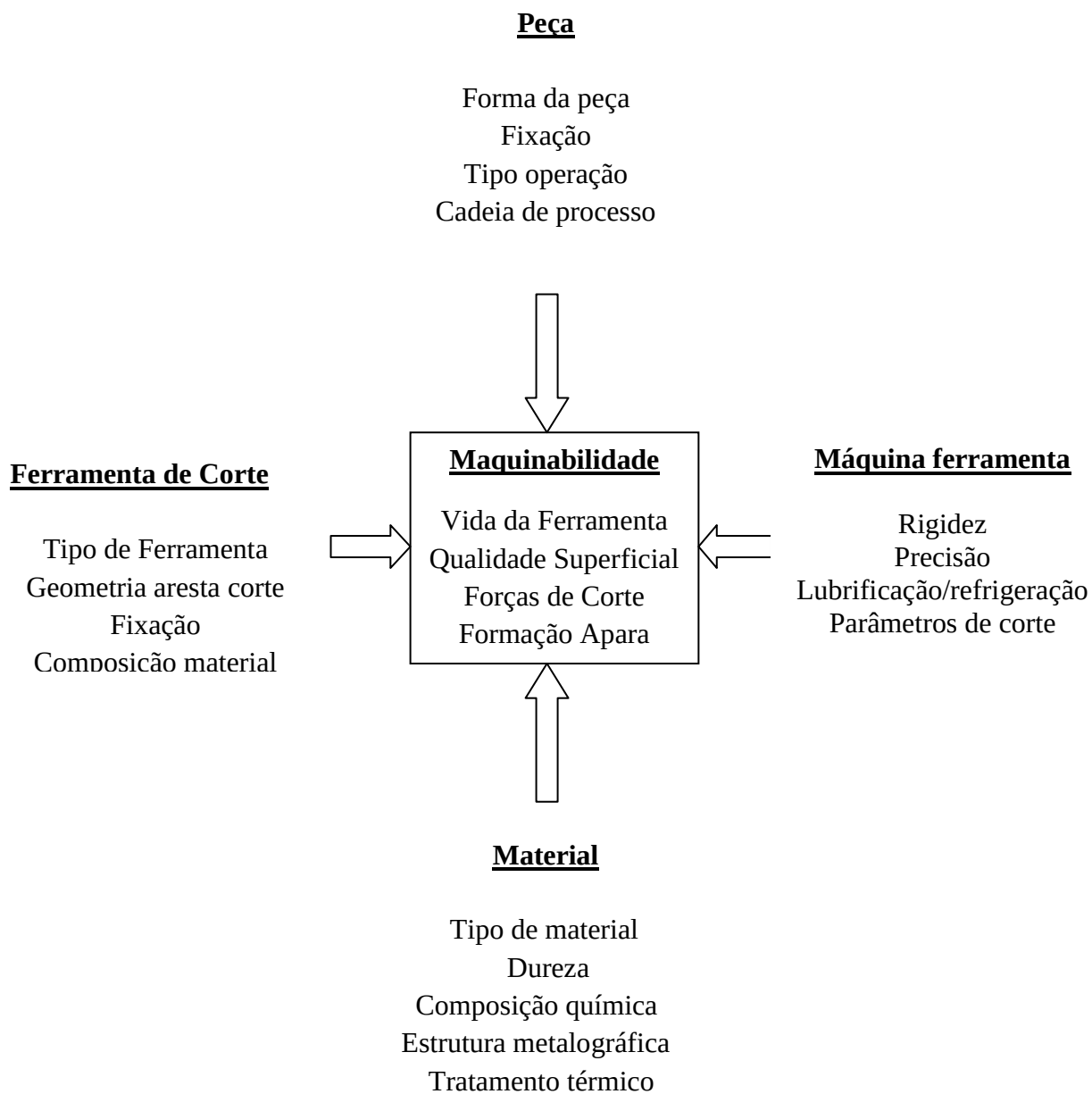


Figura 10 – Cabeças de fresagem. Fonte: Mazak Corporation



5. Estudo dos Materiais

5.1 Propriedade dos materiais

As propriedades mais importantes do material a maquinar e que influenciam a sua maquinabilidade, são:

- Tensão de rotura transversal
- Dureza
- Ductilidade
- Grau de encruamento do material
- Abrasividade
- Composição química
- Condutibilidade térmica
- Coeficiente de atrito
- Tratamento térmico
- Homogeneidade
- Isotropia

Tensão de rotura transversal – Influência directamente as forças de corte e, consequentemente, a potência necessária e a temperatura gerada na zona de corte e em particular na aresta de corte.

Dureza – Para valores baixos favorece a maquinabilidade, no entanto, pode ocorrer a formação da apra aderente, má formação da apra (em fita) e mau estado da superfície, o que implica uma vida curta da ferramenta.

O aumento da dureza, nestes casos, é favorável.

Ductilidade – Define o limite de deformação plástico do material antes da rotura, valores baixos favorecem a maquinação, proporcionando uma boa formação de apra.

A ductilidade varia em sentido inverso da dureza.

Encruamento - Define o grau de endurecimento do material no domínio plástico, influenciando a zona de deformação/corte e em simultâneo o tipo de apra.

O comportamento de um mesmo material, em condições de recozido (tratamento térmico) ou encruado, por efeito de trabalho de deformação mecânica, é muito diferente.

Condutividade térmica – Boa condutibilidade térmica permite uma melhor dissipação do calor gerado na zona de corte, consequentemente boas condições de trabalho.



A figura ao lado estabelece a relação da Maquinabilidade função da condutividade térmica, a performance de trabalho nos materiais, é a seguinte:

1. Ligas de Alumínio
2. Aços sem liga
3. Aços com liga
4. Aços inoxidáveis
5. Ligas resistentes ao calor

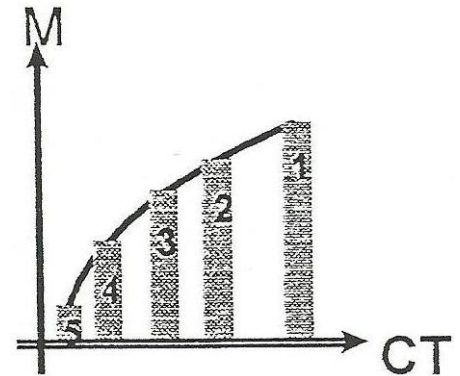


Figura 11 – Performance da maquinabilidade relativamente à condutividade térmica de diferentes materiais. Fonte: Centimfe

Abrasividade – Influência o desgaste, a existência de partículas duras no material promove a rotura por fadiga mecânica, resultado do choque entre a aresta de corte da ferramenta e o material.

Abrasividade pode ser intrínseca ao corte ou induzida.

No primeiro caso, se o material a maquinar for uma peça de fundição esta pode conter grãos de areia prejudicando a maquinabilidade.

No segundo caso, a transformação de fase do material pelo processo de distorção, a austenite é metaestável à temperatura ambiente é possível transformar-se em martensite (muito dura).

As inclusões, podem dividir-se: macro e micro-inclusões.

Macro-inclusões têm dimensões superiores a 100µm e são bastante abrasivas, normalmente aparecem em materiais de má qualidade e provocam o desgaste/rotura das ferramentas.

Micro-inclusões têm presença residual em alguns materiais metálicos, exemplo é o óxido de alumínio (Al_2O_3) indesejável porque é bastante abrasivo.

Menos indesejáveis são o óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de manganês (MnO), são menos abrasivos.

Composição química – Os elementos de liga têm um efeito determinante nas propriedades do material.

O carbono (C) é presença obrigatória nos aços e influencia as propriedades do material, consequentemente a maquinabilidade.

Percentagens muito baixas ou muito elevadas deste elemento químico prejudicam o processo de corte.

Elementos químicos como o níquel (Ni), o cromo (Cr), o molibdénio (Mo), o tungsténio (W), o vanádio (V), influenciam negativamente a maquinabilidade.

Influenciam positivamente os elementos químicos, tais como, o chumbo (Pb), o enxofre (S), o selénio (Se) e o fósforo (P).



Tabela 3 – Influência dos elementos de liga na maquinabilidade dos aços.

Elemento	Mn	Ni	Co	Cr	V	C<0,3%	0,3%<C<0,6%	C>0,6%	Mo	W	Nb	Pb	S	P
Influência	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+

Se o aço contém manganês (Mn) e enxofre (S) em conjunto formam um sulfureto promovendo uma baixa resistência e consequentemente baixa energia necessária no início da rotura do material.

Os sulfuretos constituem propriedades lubrificantes positivas na interface ferramenta/material.

O mesmo material com ou sem enxofre (S) tem um comportamento diferente, o chumbo (Pb) é semelhante, ambos melhoram a maquinabilidade é vulgar a combinação na composição química destes dois elementos.

Neste capítulo, será estudado em pormenor a influência dos elementos de liga na maquinabilidade.

Coefficiente de atrito – Se elevado pode provocar micro-soldaduras no contacto ferramenta/material, o que é uma causa de desgaste prematuro da ferramenta.

Anisotropia – Provocam variações no estado de tensão da ferramenta, com tendência para a fadiga e incremento de vibrações.

Tratamentos térmicos e estrutura do material – Afectam consideravelmente o processo de corte, por exemplo, o carbono (C) é afectado na sua estrutura por elementos de liga, pode existir a formação de carbonetos que são muito duros e abrasivos.

O carbono (C) é o elemento de liga mais importante nos aços de construção e em função da sua percentagem na composição química aparece em diferentes tipos de estrutura do material.

À temperatura ambiente e sem tratamentos térmicos, existem **3 tipos básicos de estruturas** que em combinação com austenite afectam a maquinabilidade:

- Ferrite
- Perlite
- Cementite

5.2 Agrupamento dos materiais

A maior parte dos materiais metálicos utilizados na indústria são ligas à base de ferro, alumínio, cobre ou níquel.

As propriedades mecânicas e metalúrgicas destas ligas são diferentes quando comparadas como elemento dos metais base.



Podemos encontrar materiais com a mesma composição química e diferentes características mecânicas devido ao processo pelo qual foram fabricados e à sua estrutura influenciando a maquinabilidade.

Segundo a norma ISO/ANSI, os materiais a maquinar estão agrupados em **6 grupos de carbonetos sinterizados**, normalmente escolhemos um material de referência para definir as suas características e condições de corte.

Na identificação de cada grupo existe a designação do tipo de material, a letra e cor associada ao grupo, os principais grupos são os seguintes: Aços com e sem liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, ligas de alumínio (e não ferrosas), ligas resistentes ao calor e aços endurecidos.

ISO/ANSI	
P	N
M	S
K	H

ISO P	Aços Material de referência: Aço baixa-liga	ISO N	Ligas de alumínio Material de referência: Fundida, não envelhecida
ISO M	Aços inoxidáveis Material de referência: Aço inoxidável austenítico	ISO S	Ligas resistentes ao calor Material de referência: À base de Ni
ISO K	Ferros fundidos Material de referência: Ferro fundido cinzento Ferro fundido nodular	ISO H	Aços endurecidos Material de referência: Endurecido e temperado

Figura 12 – Materiais de referência por cada grupo dos carbonetos sinterizados. Fonte: Sandvik

5.2.1 Grupo P – Aços

Nos aços, o elemento base é o ferro ligado ao carbono com valores a oscilar entre 0,03%-2,1%.

Quando a percentagem se situa acima dos 2%, estamos na presença de um ferro fundido, para valores inferiores a 0,03% de carbono, denomina-se simplesmente por ferros.

Na classificação dos aços podemos ter os vários critérios: composição química, teor de liga, constituição estrutural, grau de desoxidação, aplicação, etc.

Composição química, podemos considerar 2 tipos de aço:

- Aços sem liga
- Aços com liga:
 - Baixa liga
 - Alta liga





Constituição estrutural, os tipos de são:

- Ferríticos
- Perlíticos
- Austeníticos
- Martensíticos
- Ledeburíticos

5.2.1.1 Aços sem liga

Têm apenas carbono como elemento de liga do ferro, podem nestes aços outros elementos como o manganês, o silício ou outro que não são considerados elementos de liga.

Segundo a percentagem de carbono, são classificados da seguinte forma: hipoeutectóides, eutectóides e hipereutectóides.

Podemos dividir nos seguintes subgrupos:

- Aço extra macio, carbono 0,05%-0,1%
- Aço macio, carbono 0,1%-0,25%
- Aço ao carbono médio, carbono 0,25%-0,55%
- Aço com alto teor de carbono 0,55%-0,8%

Os aços macios são normalmente enformados por processos mecânicos a quente ou a frio os posteriormente recozidos.

Aços de médio teor de carbono são os mais utilizados para a maquinação, alguns sujeitos a tratamentos térmicos.

Os aços endurecidos para ferramentas contêm alto teor de carbono.

Os aços com pequena percentagem de carbono têm uma elevada ductilidade e baixa dureza o que prejudica a sua maquinação pela tendência de formação da aresta postiça de corte, diminuindo a vida da ferramenta, estado superficial pobre e falta de rigor geométrico por deformação plástica.

Ao aumento do teor de carbono corresponde um aumento da dureza, baixando a ductilidade é vantajoso para o processo de maquinação.

Neste grupo de aços, a maquinabilidade varia com a inclusão de elementos de liga livres, caso do manganês com percentagem superior a 2% (condição do elemento livre).

5.2.1.2 Aços com liga

Um aço é de baixa liga quando o teor dos elementos for menor ou igual a 5%, acima desse valor considera-se um aço de alta liga, normalmente estes são mais resistentes e duros do que os aços macios.



A adição de elementos de liga diminui a maquinabilidade porque altera as suas propriedades mecânicas, elementos livres em percentagens inferiores a 1% são adicionados para conferir ao aço propriedades mecânicas: resistência ao desgaste, resistência à corrosão, etc.

Os elementos mais comuns que conferem essas propriedades são: o níquel (Ni), o cromo (Cr), o molibdénio (Mo), vanádio (V), o tungsténio (W) e o cobalto (Co).

Como referido anteriormente, a adição de elementos de liga melhora as condições de corte são, por exemplo: o chumbo (Pb), o silício (Si), o enxofre (S), etc.

Os tratamentos térmicos ou termo-químicos nos aços de liga têm um papel fundamental na maquinação.

Aços de alta liga usados para ferramentas são maquinados após um tratamento de revenido até uma certa dureza (relativamente baixa), o metal duro é uma boa escolha para ferramenta de corte.

Os aços de liga têm uma vasta aplicação industrial com variedade de tratamentos térmicos que alteram as suas propriedades e consequentemente os parâmetros de corte.

Para otimizar esses parâmetros é necessário o conhecimento profundo de todas as características do material a maquinar.

Este trabalho está facilitado devido à evolução das ferramentas de corte, mais duras e resistentes ao calor proporcionando a maquinação de tolerâncias apertadas e bom acabamento superficial.

5.2.2 Grupo M – Aços inoxidáveis

Nos aços inoxidáveis o principal elemento de liga é o cromo (Cr) com percentagem superior a 12%.



Quanto maior o teor de cromo maior será a resistência à corrosão, são tratados termicamente quando a percentagem de carbono é alta.

Os aços inoxidáveis têm outros elementos de liga que melhoram as suas propriedades mecânicas como a resistência à oxidação e mecânica.

Na classificação da sua estrutura, divide-se em 3 grupos:

- Ferríticos
- Martensíticos
- Austeníticos

O cromo é principal responsável pela formação da ferrite, não alterando a sua estrutura já o níquel outro elemento constituinte afecta a estrutura e propriedades mecânicas funciona como estabilizador e aumenta a dureza.

Quando a presença de níquel é alta, obtemos uma estrutura austenítica alterando significativamente a propriedades mecânicas: melhoria da maquinabilidade, tenacidade, resistência ao calor, soldabilidade, resistência à corrosão, etc. O molibdénio (Mo) tem comportamento similar ao cromo, na estrutura, resistência à corrosão e tensão de rotura.



São aços resistentes aos ácidos.

O azoto (N) aumenta bastante a resistência dos aços inox austeníticos e afecta a estrutura da mesma forma que o níquel.

O titânio (Ti) e o nióbio (Nb) em conjunto com o carbono estabilizam o aço inox, outros elementos constituintes são: o manganês, o alumínio e o silício.

Os principais tipos de aços inox utilizados, são:

- Ferríticos 16%-30% Cr, Ni, Mo , máximo de carbono 0,2%
- Martensíticos (endurecidos) 12%-18% Cr, 2%-4% Ni, 0,1%-0,8% C
- Austeníticos 12%-30% Cr, 7%-25% Ni
- Austeníticos grande quantidade de Mn e menor de Ni
- Aços Maraging alta resistência e endurecidos, 9%-25% Ni e percentagens variadas de Cr, Co, Mo, Ti e Al
- Aços Duplex Ferrítico-Austenítico, 22%-25% Cr, 4%-7% ni, Mo, Ni e pouco carbono

5.2.2.1 Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços mais comuns dentro deste sub-grupo, tem 17% de Cr e menos de 0,1% de carbono.

Para os aços ferríticos com alto teor de crómio, o carbono aparece em quantidades de 0,25% excepcionalmente se a percentagem de Silício e Manganês é menor e o crómio o único elemento de liga.

No sentido de melhorar a resistência à corrosão existem aços de liga ferríticos ao Molibdénio em percentagem na ordem dos 0,5%-2%.

Em ligas ferríticas de baixo teor em crómio o elemento mais comum é o enxofre.

Quando a exigência de aplicação do aço é a resistência à corrosão selecciona-se aços com elevado teor de Crómio, em que a influência da adição de Enxofre não pode ser aceite.

Este subgrupo de aços, tem uma estrutura ferrítica, com maior ou menor percentagem de carbonetos de Crómio que não podem ser endurecidos.

5.2.2.2 Aços inoxidáveis martensíticos

Um aço inox com uma percentagem de carbono elevada pode ser endurecido, obtendo-se uma estrutura martensítica.

Existem aços martensíticos com um teor de carbono 0,25-1% e um teor de crómio de 13%-18%.

Também existem com teores baixos de carbono e crómio.

É comum encontrar este tipo de aço fornecido no estado recozido em matriz ferrítica associada a carbonetos de crómio.

O teor de carbono nestes aços é mais elevado que nos aços inoxidáveis ferríticos, a operação de endurecimento é realizada após a maquinação.



Existem muitos tipos de aços inoxidáveis e a sua maquinabilidade varia consideravelmente dentro do mesmo tipo de aço.

5.2.2.3 Aços inoxidáveis austeníticos

Este subgrupo é o mais comum, são os mais resistentes à corrosão os 2 subgrupos anteriores tinha por base o cromo como elemento de liga.

O aço inox austenítico de referência é o 18/8 (18%Cr, 8% Ni).

Para melhorar a resistência à corrosão podemos adicionar Molibdénio, obtendo-se um aço resistente aos ácidos.

Os aços 18/8 e 18/8 + 2% Mo formam a maior parte da aplicação de aços austeníticos, no entanto, existem outras ligas para melhorar a resistência à corrosão, por exemplo: 26% Cr, 22% Ni e Cu.

O aço inox 18/8, existe 3 tipos diferentes:

- Baixo teor de carbono (0,03% C)
- Médio teor de carbono (0,08% C)
- Estabilizado, elemento de equilíbrio o titânio (Ti)

No grupo 18/8 existem alternativas aos elementos de liga, o selénio é um desses elementos.

Outros elementos livres só são utilizados em condições favoráveis de resistência à corrosão porque têm uma influência negativa.

No caso do 18/8 + Mo, existe um baixo teor de carbono, fornecidos no estado recozido e estirados a frio.

Os aços austeníticos recozidos são arrefecidos depois do recozimento para assegurar a sua resistência à corrosão e suas características de maquinabilidade.

Na máquina, aços estirados a frio e recozidos são vantajosos, especialmente nos ferríticos e austeníticos.

A vida da ferramenta diminuirá mas reduzem-se problemas de rebarbas, mau acabamento superficial, formação da aresta postiça de corte e problemas com peças roscadas.

Os aços ferríticos têm boas características de maquinabilidade comparável a aços ao carbono de baixa liga, bem como, aços inox martensíticos com baixos teores de Cr e C.

Geralmente os aços inox austeníticos têm uma maquinabilidade mais baixa que os martensíticos.

A melhor máquina obtém-se com aços de 17%Cr e baixo teor de carbono, se o valor de Cr aumentar diminui a sua maquinabilidade.

Na máquina de aços, com estrutura martensítica um teor de 13% Cr e baixo teor de carbono melhora a performance, o aumento de ambos os elementos piora as condições de corte.



Aços com teores de carbono entre 0,8% e 1% são muito abrasivos devido à formação de carbonetos.

Os aços mais comuns martensíticos são os de baixo teor de Cr e C.

A maioria dos aços martensíticos são maquinados no estado recozido, embora por vezes encontrem-se endurecidos, estes não devem atingir elevadas temperaturas para evitar a sobretêmpera.

O gráfico da figura 13 mostra a indicação de qual a melhor relação velocidade de corte (V_f) e avanço (f) para a maquinagem de aços austeníticos com metal duro.

As limitações de área, são várias:

Zona 1 – Nesta zona ocorre desgaste em cratera.

Zona 2 – Deformação plástica excessiva.

Zona 3 – Aparece a aresta postiça de corte devido às baixas velocidades de corte.

Zona 4 – Acima da linha 4 há tendência para deformação plástica para as velocidades e avanços respectivos.

Zona 5 – Formação de cratera com avanços baixos.

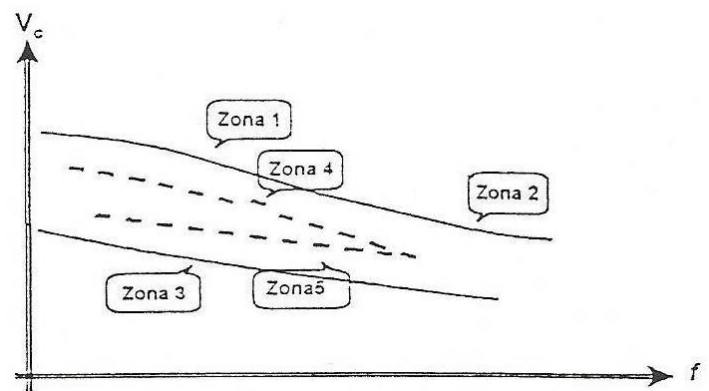


Figura 13 – Delimitação áreas de maquinabilidade satisfatória. Fonte: Centimfe

Os aços austeníticos caracterizam-se por um endurecimento elevado e baixa condutividade térmica originando maquinações difíceis em comparação com aços ligados.

Deformam a aresta de corte e consequentemente rotura da ferramenta de corte.

O endurecimento depende principalmente da transformação de parte da austenite em martensite quando o material é exposto a grandes deformações plásticas.

O efeito do endurecimento durante o trabalho é significativo resultando superfícies com durezas elevadas.

Os aços estirados a frio têm uma variação de dureza desde a camada superficial até ao núcleo, esta diferença de dureza é mais acentuada para aços ferríticos e martensíticos e menor em aços de liga.

Os aços austeníticos, têm uma diferença ainda maior.

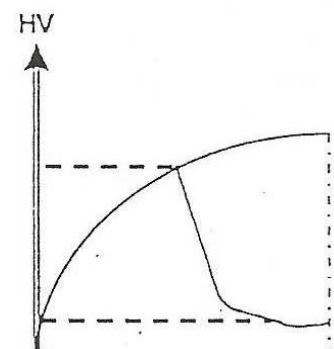


Figura 14 – Diferença de dureza HV desde a camada superficial até ao núcleo. Fonte: Centimfe



Os aços normalizados têm esta diferença de dureza que pode atingir o dobro do valor entre a camada superficial e o núcleo.

É aconselhável, o estudo prévio das condições de corte, velocidades de corte, avanços, profundidade para penetrar nesta camada superficial bastante endurecida.

A maquinagem de aços austeníticos estirados a frio tem vantagens.

Quando se maquinam aços austeníticos surgem alguns problemas, tais como:

- Formação da aresta postiça de corte
- Mau estado das superfícies
- Existência de rebarbas e má formação da apra

No caso dos aços austeníticos, estes problemas são menores, no entanto, deve-se evitar uma estrutura aberta devido ao tamanho de grão para atenuar as desvantagens descritas anteriormente.

Em comparação com aços sem liga (aços ao carbono), os aços inox austeníticos têm uma condutibilidade térmica menor.

O calor gerado na zona de corte para um aço ao carbono é dissipado pela apra devido à sua boa condutibilidade térmica, o contrário acontece nos aços inox austeníticos (menor condutibilidade térmica).

Neste caso, a aresta de corte atinge elevadas temperaturas é recomendável a utilização de um refrigerante para minorar o problema.

A adição de elementos de liga piora a maquinabilidade porque aumenta a dureza a quente também as forças de corte nos aços austeníticos e sua flutuação são maiores que nos aços sem liga.

O processo de formação da apra nos aços sem liga é contínuo e nos aços austeníticos é descontínuo com aspecto de lamelas a apra produzida e a superfície maquinada ondulada.

Graus estabilizados, com adição de Ti maquinam-se mais desfavoravelmente, são muito abrasivos devido às diferentes formas de Ti e consequentemente o teor de Carbono na matriz diminuirá tornando o aço mais sensível à formação da aresta postiça de corte.

Em aços inox, a maquinabilidade melhora com adição de Enxofre (S) ou Selénio (Se) nas devidas proporções, pois provoca alterações em propriedades mecânicas.

Nos aços inox, as propriedades mais importantes são: resistência à corrosão e tensão de rotura do ponto de vista da maquinabilidade têm uma influência negativa.

5.2.3 Grupo K – Ferros fundidos



As ligas de Ferro - Carbono com teores superiores a 2% são consideradas, ferros fundidos.

Estes materiais tem um campo de aplicação muito vasto, a melhoria dos processos de fabrico, controlo, inclusão de elementos de liga, tratamentos térmicos permitiram o desenvolvimento do ferro fundido e a ampliação das suas aplicações na indústria.



O elevado teor de Carbono e a presença de Silício (Si) permitem classificá-lo como, liga ternária Fe-C-Si.

No arrefecimento, a transformação da austenite é complexa originando estruturas com carbono puro ou grafite cuja disposição e quantidade alteram profundamente as propriedades do material.

As estruturas dos ferros fundidos base são: ferrítica e perlítica ou a mistura das duas.

Quando a estrutura é ferrítica, a sua dureza é baixa cerca de 150HB e os ferros fundidos são de fácil maquinagem.

São materiais muito frágeis, não têm tendência à formação da aresta postiza de corte permitindo uma melhor performance no incremento dos parâmetros de corte

Quando a estrutura é perlítica, a dureza sobe para valores até 300HB, os carbonetos na matriz são extremamente duros reduzindo as condições de corte.

Há zonas de maquinagem nas peças em ferro fundido que comprometem o trabalho, por exemplo, quinas ou geometrias das partes exteriores.

A medição da dureza não informa o suficiente sobre a sua abrasividade porque existe uma grande diferença entre a estrutura base e partículas de carbonetos.

Consideramos, os seguintes tipos de ferros – fundidos:

- Ferro fundido branco
- Ferro fundido cinzento
- Ferro maleável
- Ferro nodular

5.2.3.1 Ferro fundido branco

É designado por ferro fundido branco, devido apresentar o carbono quase inteiramente combinado na forma de FeC uma mostra de fractura branca

As suas propriedades mais relevantes são a elevada dureza e resistência ao desgaste o que os torna difíceis de maquinar.

5.2.3.2 Ferro fundido cinzento

Esta liga de ferro-carbono-silício, pela sua fusão e moldagem tem excelente maquinabilidade, resistência mecânica, resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento é a mais usada dentro do grupo de ferros fundidos.

Existe uma enorme variedade de ferros fundidos com diferentes resistências à tracção.

As diferentes classes ASTM correspondem aos limites de resistência à tracção.

Um factor a considerar quando se caracteriza um ferro fundido cinzento é o que relaciona as propriedades mecânicas com a secção das peças, porque para quantidades fixas de carbono total e Silício a resistência diminui à medida que aumenta a espessura ou secção das peças.



5.2.3.3 Ferro Fundido maleável

Este tipo de ferro fundido pode ter estrutura ferrítica, perlítica ou martensítica, resulta de um ferro fundido branco de composição adequada o qual é sujeito a um tratamento térmico de longa duração.

Após tratamento térmico o material que no seu estado natural é frágil adquire ductilidade, maleabilidade e tenacidade.

As melhores propriedades de ductilidade e tenacidade em combinação com a resistência à tracção, fadiga, desgaste e maquinabilidade promovem a sua recomendação em aplicações industriais.

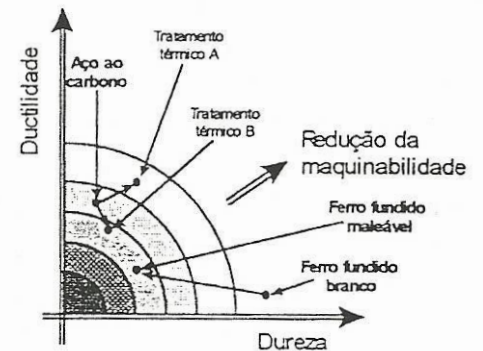


Figura 15 – Influência ductilidade e dureza na maquinabilidade. Fonte: Centimfe

5.2.3.4 Ferro Fundido nodular

Esta liga é caracterizada pela excelente resistência mecânica, tenacidade e ductilidade.

O limite de encruamento é mais elevado do que nos ferros fundidos cinzentos e maleáveis e mesmo do que alguns aços ao Carbono.

A grafite tem forma esferoidal e por isso afecta a continuidade da matriz.

O processo de nodulização consiste na adição no metal fundido de elementos de liga, tais como: o magnésio (Mg), o cério (Ce), o cálcio (Ca), o lítio (Li), o bário (Ba) ou sódio (Na).

A liga mais comum é Mg-Si-Fe, de todos os elementos o Magnésio tem o mais baixo custo.

A estrutura final apresenta grafite esferoidal em matriz perlítica, pode ocorrer também numa matriz de ferrite ou cementite.

O tratamento térmico de recozimento ou normalização decompõe a cementite em ferrite e produz mais grafite esferoidal e elimina tensões no material.

Em conclusão, quanto mais pequena for a percentagem de carbono menor será a maquinabilidade devido ao aumento de dureza na matriz perlite.

As impurezas á superfície (normalmente areias de fundição) e o aumento dos carbonetos baixam a maquinabilidade.

No geral, a maquinabilidade é boa apesar da elevada percentagem de material abrasivo disperso na matriz, este efeito provoca desgaste nas ferramentas de corte, embora os esforços de corte são baixos e consequentemente a temperatura da zona de corte é baixa.

5.2.4 Grupo N – Ligas de alumínio (Ligas não ferrosas)

Alumínio na forma pura tem uma utilização muito limitada devido à sua ductilidade.

Os alumínios utilizados na indústria estão ligados com outros metais,





podemos classificar em 2 grupos:

- Ligas conformadas por processo mecânico (podemos dividir em com ou sem tratamento térmico)
- Ligas fundidas

As ligas de Al obtidas por processo mecânico tem as suas propriedades obtidas na sua forma natural, as que são tratadas termicamente fazem-no por **endurecimento por precipitação**.

Os elementos de liga mais comuns são: o cobre (Co), o ferro (Fe), o zinco (Zn), o magnésio (Mg), o manganês (Mn) e o silício (Si).

O cobre aumenta a resistência mecânica e melhora as condições de maquinabilidade, o manganês melhora a ductilidade, o magnésio e silício melhoram a resistência à corrosão, o ferro e zinco melhoram a resistência e dureza.

As ligas de alumínio, tem boa maquinabilidade as temperaturas são baixas na maquinação e permitem velocidades de corte elevadas.

Mesmo com baixas temperaturas no corte, o ponto de fusão do Al é baixo o que pode provocar microsoldadura entre peça/ferramenta e apra longa contínua.

Logo, um factor importante a considerar é o controlo da apra, por exemplo, através de um eficiente quebra apra: geometria ferramenta e fluído de corte.

A geometria da ferramenta/pastilha deve ser muito positiva para facilitar a evacuação da apra, impedir aderência do material na ferramenta e degradação do acabamento superficial da peça maquinada.

O petróleo ou emulsão são boas soluções para lubrificar e refrigerar a zona de corte.

As partículas de silício (Si) são muito abrasivas provocando um grande desgaste na ferramenta, o material da ferramenta de corte mais eficiente é o PCD devido à sua resistência ao desgaste e o facto das temperaturas em jogo não serem suficientes para transformar a estrutura do diamante.

Estas ferramentas permitem elevadas velocidades e grande remoção de material, no entanto, as condições de corte aconselhadas estão dependentes da tecnologia da máquina, por exemplo, da velocidade de rotação da árvore.

5.2.5 Grupo S – Materiais resistentes ao calor (Ligas termo-resistentes)

Esta família é constituída por um conjunto de elementos com principal destaque para os aços à base de níquel (Ni) resistentes a temperaturas elevadas.

Estas ligas resultam de desenvolvimentos metalúrgicos de metais, para responder às exigências do aumento da resistência à corrosão e resistência ao calor.

Ligas com baixa condutividade térmica produzindo um elevado gradiente de temperatura na aresta de corte e consequentemente um ataque térmico à ferramenta através de microsoldadura na face de ataque formando aresta postiça de corte.





O endurecimento por deformação plástica provoca elevados esforços, pressões e o desgaste rápido das ferramentas.

Deve-se respeitar algumas recomendações de maquinagem destes materiais: geometria de corte positiva, reforço da aresta de corte (revestimento), avanço por dente e profundidades axiais elevadas com fresas de passo grande, metal duro de grão fino, fluido de corte abundante, aperto da peça e ferramenta estável para evitar vibrações, fresa deve trabalhar contra o material - **corte discordante**.

Em conclusão, são ligas resistentes ao calor e mantêm as suas características mecânicas dentro duma determinada solicitação térmica elevada.

5.2.6 Grupo H – Aços endurecidos



Aços endurecidos à base de molibdénio (Mo), crómio (Cr), vanádio (V) e tungsténio (W), formam carbonetos muito duros quando utilizados como elemento de liga.

Estes carbonetos são muito abrasivos provocando enorme desgaste nas ferramentas principalmente na face de saída.

Um método tradicional de maquinagem de aços de liga endurecidos é a rectificação, uso de ferramentas de corte em CBN (Nitreto boro cúbico) e/ou cerâmicas reforçadas em condições de corte estáveis são uma boa alternativa, em particular, no torneamento.

5.3 Influência dos elementos de liga nos aços e ligas não ferrosas

Na composição dos aços e materiais metálicos surge um grande número de elementos de liga., os elementos de liga são aditivos para atribuir ao material as propriedades desejadas.

O elementos de liga quando usados em conjunto com outros podem originar nos aços propriedades ligeiramente diferentes das que lhe dariam se usados isoladamente.

Em seguida, indica-se a influência dos elementos de liga na maquinabilidade dos aços (materiais ferrosos) e materiais metálicos (não ferrosos):

Carbono (C) – É o elemento de liga mais importante nos aços, em teores entre os 0,3% e 0,6% é favorável à maquinagem, se inferior ou superior prejudica o trabalho.

Outra razão, de baixa maquinabilidade é a sua dureza na têmpera que forma carbonetos duros e resistentes ao desgaste.



Figura 16 – Peças de aço obtidas por torneamento



Enxofre (S) – É considerada uma impureza, origina as maiores segregações, provocando através do sulfureto de ferro fissuras a quente, uma vez que o seu estado eutético tem um baixo ponto de fusão reduzindo a coesão.

O enxofre (S) é incluído nos aços de fácil maquinagem para tornos automáticos e facilitam o processo não só porque originam aparas curtas, mas também porque actua como agente lubrificante na aresta de corte da ferramenta diminuindo o atrito entre a ferramenta e a peça a maquinar.

Chumbo (Pb) – Tem a característica de maquinabilidade idêntica ao Enxofre (S), é comum encontrá-los associados.

È adicionado aos aços de fácil maquinagem para tornos automáticos em teores de 0,2% a 0,5%, uma vez não se dissolvendo no aço apresenta uma suspensão fina o que permite uma apara curta, superfícies de corte perfeitas e a melhoria da maquinabilidade.

No latão, liga cobre-zinco (Cu-Zn) existem na sua constituição duas vertentes, com e sem Chumbo (Pb).

Esta liga é muito usada na produção de componentes sanitários, tubagens, acessórios banho/cozinha e torneiras.



Figura 17 – Torneira de cozinha. Fonte Grohe

O uso do chumbo (Pb) pode ser prejudicial para a saúde, no caso de componentes em contacto com água consumível.

Nestes produtos, a utilização de ligas isentas de chumbo (Pb) começa a estar legislada em certos países (por exemplo, nos EUA).

Selénio (Se) – É um metalóide,, melhora a maquinabilidade dos aços ainda mais que o Enxofre (S), é comum encontrar na composição de aços ao carbono (C), inox-ferríticos, martensíticos e austeníticos associado ao enxofre (S).

Fósforo (P) – É considerado um parasita e prejudica o aço, tem tendência a formar segregações primárias na solidificação e secundárias no estado líquido.

No entanto, a sua presença é positiva, em termos de Maquinagem.

Berílio (Be) – É um desoxidante enérgico que tem grande afinidade com o enxofre (S), tóxico, oxida o metal e as suas ligas são difíceis de maquinar.

Alumínio (Al) – É um poderoso desoxidante de utilização corrente e promove a formação de grão fino na sua estrutura.

Material muito usado devido ao seu baixo peso específico, em particular na indústria automóvel, as suas ligas têm normalmente boa maquinabilidade.



Porém, é um material muito dúctil pode formar apara longa e “empapar” devido ao baixo ponto de fusão, depende com que tratamento térmico é fornecido.



Figura 18 – Jante de automóvel em alumínio. Fonte: Okuma Corporation

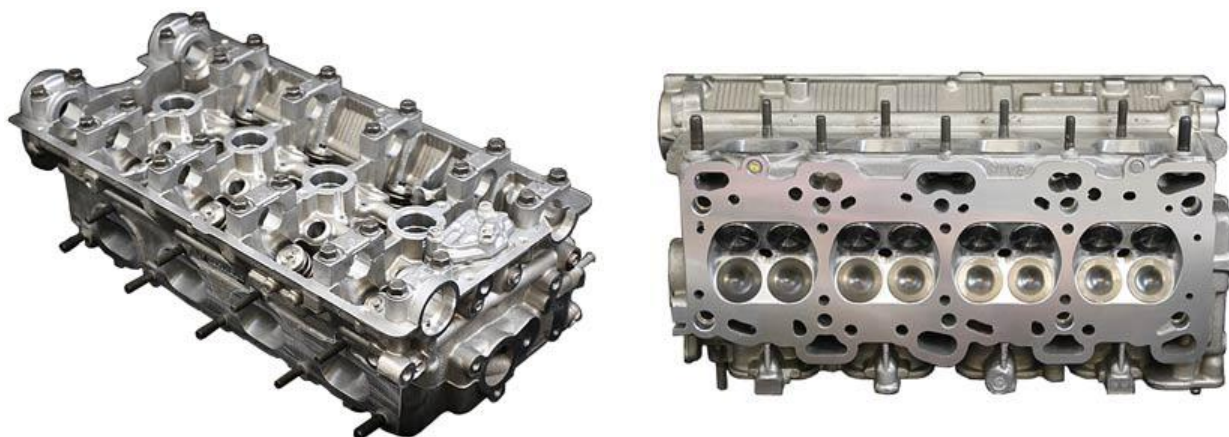


Figura 19 – Blocos de motor maquinados em alumínio. Fonte: Okuma Corporation

Cobre (Cu) – É o principal constituinte do latão (ligas cobre/zinco: Cu-Zn), bronze (ligas cobre/estanho: Cu-Sn) e outras ligas não ferrosas.

A influência na maquinagem depende do 2º maior constituinte da liga e do teor em que ambos aparecem na composição da mesma.

Os componentes á base de cobre são usados em ferragens, parafusos, torneiras, esquentadores, acessórios de canalização, candeeiros, decorativos, etc.



Figura 20 – Passador de canalização



Figura 21 – Componentes de tubagens maquinados em latão



Boro (B) - É um metalóide que, em quantidades pequenas, aumenta a dureza prejudicando a maquinabilidade.

Crômio (Cr) – Aumenta a penetração da têmpera e consequente aumento de dureza e diminui a tenacidade. A sua presença torna o material agressivo em trabalho, reduz a maquinabilidade.

Cobalto (Co) -- O cobalto não forma carbonetos e tem elevada resistência a quente, razão pela qual é aditivo em aços rápidos. É usado em aços resistentes, magnéticos e superligas termoresistentes.

Magnésio (Mg) – A sua maquinabilidade é excelente, no entanto, existe a possibilidade de inflamação e explosão espontânea.

É utilizado em ligas leves e pesadas, de forma a obter materiais com resistência ao choque, peso específico baixo, tenacidade e boa condutibilidade térmica.

Vasta aplicação em componentes na indústria automóvel, aviação e aeroespacial.

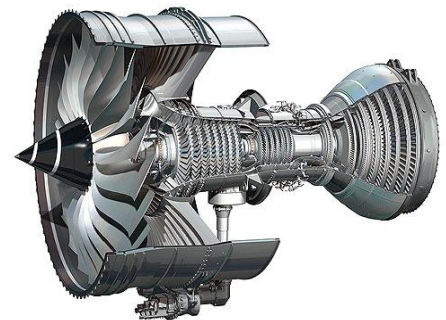


Figura 22 – Turbina propulsora. Fonte: Rolls-Royce

Manganês (Mn) – Em altos teores, o manganês não é magnetizável e é bastante duro em operações de Maquinagem. É necessário reforçar a aresta de corte para evitar o seu desgaste e microsoldadura da apra na mesma, formação de aresta postiça de corte com facilidade.

Cálcio (Ca) – É um desoxidante juntamente com o silício (Si), melhorando a resistência à oxidação a quente dos materiais condutores de calor, a sua presença nos aços favorece a maquinabilidade.

Molibdénio (Mo) – este elemento é um forte formador de carbonetos, melhora a temperabilidade dos aços, resistência a quente, à tracção e limite elástico. É usado nos aços inoxidáveis para melhorar a resistência à corrosão.

Nióbio (Nb) e Tântalo (Ta) – São elementos similares e apresentam-se sempre associados, a baixas velocidades de corte, a maquinabilidade é satisfatória.

Tungsténio (W) – Forma carbonetos muito duros, é utilizado como elemento de liga do aço para melhorar a dureza. Usado na produção de componentes refractários do metal.

Vanádio (V) – aparece combinado com o Crômio, aumentando a resistência e tenacidade.



Zinco (Zn) – É facilmente maquinável e muito utilizado em fundição, é um elemento principal nas ligas de Latão combinado com o Cobre.

Estanho (Sn) – É utilizado como elemento de liga na produção de Bronze (liga Cu-Sn) e metais para casquilhos devido ao seu poder lubrificante entre superfícies em contacto. A maquinabilidade do bronze é normalmente boa ao contrário das ligas de Estanho levantam problemas provocados pela elevada ductilidade.



Figura 23 – Peças torneadas de liga Zn e Cu-Zn

Titânio (Ti) – É um forte formador de carbonetos e quando utilizado na sua forma pura não facilita o processo de maquinação, reduz a vida da ferramenta devido à formação de aresta postíça de corte. No processo de Maquinagem é difícil o seu trabalho, para atenuar este efeito os parâmetros de corte devem ser os correctos. As suas ligas são muito usadas na relojoaria, medicina, indústria militar, automóvel, aviação e aeroespacial. Componentes como blocos, bielas, rolamentos, carcaças, próteses, parafusos, pernos, flanges, tubagens, etc.



Figura 24 – Parafusos em titânio



Figura 25 – Flange em titânio

Silício (Si) – É um elemento em teores superiores a 3% dificulta a maquinação diminuindo progressivamente a vida das ferramentas, no entanto, provoca um bom controlo da apara.

Normalmente, é um elemento constituinte em ligas não ferrosas, tais como, ligas associadas ao Alumínio, Cobre, Manganês, etc.

Nos Sialons, é usado sob a forma de nitreto de silício.



Figura 26 – Aspecto do silício puro



Níquel (Ni) – Reduz a maquinabilidade, favorece a penetração de têmpera e aumento da tenacidade dos aços. As ligas de níquel, tendem a formar aresta postiça de corte devido à sua elevada ductilidade e consequente diminuição da vida da ferramenta.



Figura 27 – Casquilhos de liga Ni-Cu



Figura 28 – Componentes em liga de níquel



6. Materiais das Ferramentas de Corte

Os materiais para ferramentas de corte tiveram um grande desenvolvimento no decurso do séc. XX, em particular, nos anos 30.

Hoje, uma operação de maquinagem é exequível em cerca de 1% do tempo que era necessário no início do séc. XX.

O desenvolvimento da indústria mundial através das duas grandes guerras está associada a esta evolução.

Nesta primeira década do séc. XXI, a evolução continua com os fabricantes de ferramentas de corte a explorar, pesquisar e investigar novas soluções no processo de corte: ferramentas anti-vibração, com lubrificação interna, geometria da ferramenta, novos revestimentos, ferramentas especiais (por tipo de operação, aplicação, indústria, máquina, etc.)

Actualmente existem soluções para os materiais de ferramentas, por forma, a otimizar cada operação de maquinagem.

Existem outros factores de interesse na selecção da ferramenta apropriada:

- Tipo de operação
- Material a maquinar
- Geometria da peça (processo e/ou tratamento térmico anterior)
- Máquina ferramenta
- Estado da superfície exigido
- Estabilidade no corte

Cada um destes factores condiciona a selecção da ferramenta adequada e consequentemente os parâmetros de corte em trabalho.

Basicamente, nas características do corte são necessárias saber qual o tipo de operação desbaste ou acabamento e as operações de corte: fresagem, torneamento, furação, etc.

6.1 Propriedades fundamentais dos materiais

O material caracteriza-se pela sua dureza, estrutura, composição química e integridade da superfície cortante (resistência ao desgaste e calor) e na máquina a potência, rigidez, regulação e condições de aperto da peça.

Existem materiais para ferramentas de corte com capacidade superior nas operações de acabamento do que outros.

A eficiência de uma operação de maquinagem obriga à selecção cuidada dos materiais adequados na execução de ferramentas de corte, esta escolha exige a análise ponderada de factores técnicos e económicos.

Neste estudo, analisámos os factores técnicos, tais como, as propriedades mecânicas e químicas e o seu comportamento com a evolução da temperatura.



As propriedades fundamentais a exigir aos materiais para o fabrico de ferramentas de corte, são as seguintes:

- Dureza a quente e a frio (resistência ao desgaste e calor/deformação)
- Elevada tenacidade (resistência à rotura)
- Resistência ao choque térmico (gradiente térmico)
- Conservação da aresta cortante (grão fino)
- Baixo coeficiente de atrito (diminui a tendência de soldar)
- Elevada condutibilidade térmica (dissipação do calor gerado)
- Baixo coeficiente de dilatação térmico
- Elevado calor específico (variações de temperatura pequenas e lentas)
- Química inerte (afinidade química entre a ferramenta e o material a maquinar)

Algumas destas características são contraditórias e não pode ser satisfeitas por um mesmo material, tal ferramenta que concilie todas estas propriedades seria a ferramenta ideal.

6.2 Materiais das ferramentas de corte

Os materiais que correspondem às solicitações de corte mais utilizados para ferramentas de corte, são os seguintes:

- HSS – Aço rápido
- C – Carbonetos sinterizados
- CG – Carbonetos sinterizados revestidos
- CT – Cermet
- CC – Cerâmica (à base de óxido de Al – pura, mista e reforçada / à base de nitreto de Si)
- CBN – Nitreto de Boro Cúbico
- PCD – Diamante policristalino

Os tempos não produtivos resultantes do desgaste e rotura de ferramentas em Maquinagem condicionam a produtividade.

A selecção do material da ferramenta e a sua qualidade são críticas, uma única qualidade não satisfaz diversas aplicações de Maquinagem.

Os carbonetos sinterizados são os materiais para ferramentas mais utilizados à escala mundial ultrapassando os consumos de aço rápido – HSS.



Tabela 4 – Propriedades dos materiais para ferramentas. Fonte: Princípios de Maquinagem J. Paulo Davim, Almedina

Material	Dureza (HV 10/30)	Tensão Rotura Transversal (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente Dilatação Térmica ($\times 10^{-6}$)	Condutibilidade Térmica W/m.K
Aço rápido	700 - 900	2500 - 4000	2,6 - 3	9 - 12	15 - 48
Carbonetos	1200 - 1800	1300 - 3200	4,7 - 6,5	4,6 - 7,5	20 - 80
Si ₃ N ₄	1350 - 1600	600 - 900	2,8 - 3,2	3 - 3,3	20 - 35
Al ₂ O ₃	1450 - 2100	400 - 800	3 - 4,5	5,5 - 8	10 - 38
CBN	3500 - 4000	500 - 800	6,8	4,9	100
PCD	5000 - 6000	600 - 1100	8,4	1,5	550

A percentagem de utilização de outros materiais é reduzida, no entanto, materiais duros como os cerâmicos permitem em determinadas aplicações velocidades de corte elevadas.

A maior rigidez das máquinas, melhoria dos sistemas de aperto e maior equilíbrio dinâmico das ferramentas permite o aumento da utilização de materiais duros e consequentemente mais frágeis.

6.2.1 Aços rápidos (HSS)

Os aços rápidos tiveram a sua origem nos trabalhos de investigação desenvolvidos por Taylor e White após este progresso, as ferramentas eram executadas em aço ao Carbono.

O principal objectivo da sua aplicação como ferramenta de corte resulta do compromisso entre duas propriedades: dureza e tenacidade.

Os aços rápidos podem ser classificados em duas categorias, segundo a AISI (American Iron and Steel Institute):

- Aços rápidos ao Tungsténio (W) – Grupo T
- Aços rápidos ao Molibdénio (Mo) – Grupo M

São aços fortemente ligados em que os principais elementos de liga são: Tungsténio (W), Molibdénio (Mo), Crómio (Cr), Vanádio (V), e o Cobalto (Co).



No estado recozido, a microestrutura dos aços rápidos são constituídos por uma dispersão de carbonetos complexos em matriz ferrítica, também o processo de fabrico influencia a dimensão dos grãos dos carbonetos que tendem a crescer na solidificação.

Efeito dos diferentes elementos de liga:

- **Tungsténio (W) e Molibdénio (Mo)** – formam carbonetos muito duros e aumentam a dureza a quente;
- **Vanádio (V)** – forma carbonetos muito duros e aumenta a resistência ao desgaste;
- **Crómio (Cr)** – forma carbonetos facilmente solúveis e aumenta a profundidade de têmpera;
- **Cobalto (Co)** – não forma carbonetos, mas aumenta a dureza a quente.

O crómio aparece com uma percentagem entre 3% e 5% o que justifica um bom compromisso entre a dureza e tenacidade.

Este metal é responsável pela elevada temperabilidade dos aços rápidos, endurecendo por completo mesmo em secções elevadas.

Os aços rápidos ao Cobalto têm maior dureza a quente e resistência ao desgaste, as qualidades AISI T5, T6 e T15 são as mais utilizadas no fabrico de ferramentas de corte.

O grupo de aços rápidos com W e Mo, destaca-se o aço M2 de elevada tenacidade e baixo custo, utilizado em ferramentas de geometria complexa para corte ligeiro e velocidades de corte baixas.

As ferramentas de aço rápido sofreram 2 grandes desenvolvimentos no sentido de aumentar as suas características:

- Fabrico através da metalurgia do pó (prensagem e sinterização);
- Revestimento através de CVD (deposição química em fase de vapor) ou PVD (deposição física em fase de vapor).

Desta evolução, deriva os carbonetos sinterizados, ou seja, metal duro.

6.2. 2 Carbonetos sinterizados – Metal duro (C)

As ferramentas de carbonetos sinterizados são as mais utilizadas na indústria devido à possibilidade de combinações da sua composição química obtendo-se as propriedades desejadas: dureza, resistência ao desgaste e tenacidade.



Os carbonetos sinterizados são obtidos através da metalurgia do pó (pulverometalurgia) e são designados na indústria por **metal duro**.

O resultado é um produto de elevada densidade e com excelentes características no corte por arranque de apara, é composto fundamentalmente por um carboneto muito duro e um aglomerante:

Carboneto muito duro: Carboneto de Tungsténio (WC)

Pode estar só ou associado com outros carbonetos, por exemplo: Carboneto de Vanádio (V₄C₃), Carboneto de Nióbio (NbC), Óxido de Crómio (Cr₂O₃) e Carboneto de Tântalo (TaC).

O carboneto de titânio (TiC) actua como inibidor de reacções químicas, aumenta a resistência à formação de cratera e a dureza a quente.

Estes carbonetos, são responsáveis pela dureza a quente e resistência ao desgaste.

Elemento aglomerante: Cobalto (Co)

Tem a função de ligar as partículas duras e garantir a tenacidade do material.

Foram desenvolvidos pelos fabricantes de metal duro uma grande quantidade de carbonetos para diferentes aplicações, de forma a normalizar esta situação a ISO criou uma classificação para os carbonetos

Com o objectivo dos utilizadores reconhecerem as qualidades disponíveis pelos fabricantes e seleccionarem para as suas aplicações os carbonetos desejados.

A ISO recomenda o agrupamento dos carbonetos sinterizados, em 3 grandes grupos:

- Grupo P – Compreende a maquinagem de materiais ferrosos de apara longa: aços c/ e s/liga e as fundições maleáveis.
- Grupo M – A maquinagem de materiais mais difíceis: aços inoxidáveis austeníticos, aços refractários, aços com Manganês, etc.
- Grupo K – Compreende a maquinagem de materiais de apara curta: ferros fundidos, aços endurecidos, e materiais não ferrosos (ligas Al, Cu ou polímeros).

Este grupo foi na última década decomposto em 3 novos grupos N, S e H.



6.2. 3 Carbonetos sinterizados revestidos (CG)

Os carbonetos sinterizados revestidos consistem num substrato tenaz à base de WC + Co e, por vezes, WC + TiC + Co com espessura da ordem dos 5µm a 7µm.

Os revestimentos mais utilizados são: nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e a Alumina (Al₂O₃).



Figura 29 – Ilustração de alguns revestimentos. Fonte Sandvik

Os objectivos a alcançar com um revestimento, são os seguintes:

- Revestir o substrato tenaz garantindo elevada dureza a quente e resistência ao desgaste;
- Conservar uma elevada tenacidade do substrato;
- Diminuir o coeficiente de atrito
- Estabilidade química na interface ferramenta/peça ou menor reactividade (óxido de alumínio);
- Evitar a deformação plástica superficial com material refractário entre as fontes de calor eo substrato;
- Garantir ligação eficaz entre o revestimento e o substrato, evitando fissuração ou lascamento do revestimento (corte interrompido ou desbastes pesados);
- Impedir que os gradientes térmicos e diferentes coeficientes de dilatação dos materiais dos revestimentos e substrato, induzam tensões que permitam a falta de coesão.

6.2. 4 Cermets (CT)

Os cermets são materiais formados pela mistura de material cerâmico numa matriz metálica. A parte cerâmica é formada por compostos refractários: não metálicos, por exemplo, carboneto de titânio (TiC), nitreto de Titânio (TiN), carbonetos de Tungsténio (WC), Tântalo e Nióbio. A parte metálica é o aglomerante de menor ponto de fusão, por exemplo, cobalto, níquel ou molibdénio. Deve ser aplicado numa gama de velocidades inferior à aconselhada para os cerâmicos e superior à dos carbonetos sinterizados, é utilizado



Figura 30 – Pastilha em Cermets. Fonte Sandvik



preferencialmente em operações de acabamento ou desbaste ligeiro para torneamento e fresagem.

Estes materiais apresentam algumas vantagens relativamente aos carbonetos sinterizados (metal duro):

- Menor coeficiente de atrito (consequência do elevado teor de TiN);
- Maior resistência à oxidação (elevada estabilidade química do TiC);
- Maior dureza a quente ($T_{ic}=3200HV$ e $Al_2O_3=1800HV$ para os carbonetos sinterizados revestidos);
- Menor tendência para a adesão.

Os cermets são adequados ao desbaste ligeiro e acabamento de aços ao C, aços ligados, aços inoxidáveis e materiais dúcteis.

Inadequados para desbastes severos e maquinagem de ligas não ferrosas.

6.2.5 Cerâmicos (C)

Os materiais cerâmicos mais utilizados como ferramentas de corte são o óxido de Alumínio (Al_2O_3) e o nitreto de Silício (Si_3N_4).

Estes materiais são caracterizados pela elevada resistência ao desgaste mas fraca resistência ao choque possibilitando altas velocidades de corte mas sem descontinuidade em trabalho.

As principais vantagens dos cerâmicos são as seguintes:

- Conservação da dureza em corte até $1200^{\circ}C$
- Grande estabilidade química e resistência à oxidação e difusão (carbonetos sensíveis a altas temperaturas)
- Baixo coeficiente de atrito, consequentemente pouca aderência (BUE) excepto em ligas não ferrosas (Al, Mg e Ti) podem ocorrer reacções químicas
- Baixo coeficiente de dilatação térmica
- Boa resistência à compressão e fraca à tracção
- Deformação plástica nula

Podemos subdividir em dois tipos de cerâmicas para ferramentas de corte:



A) À base de óxido de Alumínio

- Pura
- Mista
- Reforçada

B) À base de nitreto de Silício

- Nitreto de Silício
- Sialon

6.2.5.1 Cerâmicas à base de óxido de alumínio

6.2.5.1.1 Cerâmicas puras

O óxido de Alumínio puro (alumina branca) tem valores de tenacidade e condutibilidade térmica baixos.

Estas características não são positivas para a maquinação podendo ocorrer roturas frágeis e uma grande susceptibilidade aos choques térmicos em corte interrompido ou inclusões (por exemplo, maquinação de peças fundidas).

A adição de pequenas quantidades de óxido de Zircónio, óxido de cromo e óxido de titânio melhora a tenacidade.

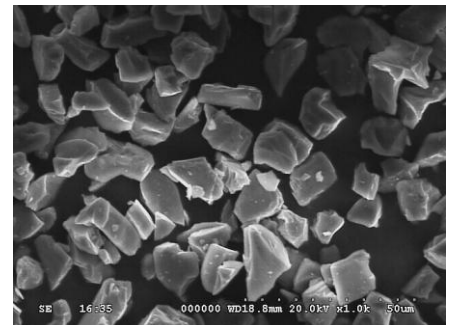


Figura 31 – Óxido de Alumínio 1000x Fonte: Sandvik

6.2.5.1.2 Cerâmicas mistas

A composição química da cerâmica mista é constituída por alumina em cerca de 30% de uma fase metálica formada por elementos duros, tais como, o carboneto de Titânio (TiC) e/ou nitreto de Titânio (TiN).

Este material “alumina preta” apresenta uma melhor resistência ao choque como consequência da maior condutibilidade térmica.

Também existem combinações de alumina/zircónia (proporção 85/15%) a adição de zircónio promove o aumento significativo da tenacidade.



6.2.5.1.3 Cerâmicas reforçadas

Estas cerâmicas à base de óxido de alumínio são reforçadas com fibras de carboneto de Silício (SiC) com 1µm de diâmetro e 20µm de comprimento (whiskers - monocristais de elevada resistência mecânica).

Este reforço permite um incremento considerável na tenacidade e resistência ao choque térmico, minimizando a fragilidade do material cerâmico.

Estas características permitem o uso na maquinação de aços endurecidos, materiais termoresistentes, fundições endurecidas e operações de corte interrompido.



Figura 32 – Pastilhas reforçadas com whiskers

6.2.5.2 Cerâmicas à base de nitreto de silício

6.2.5.2.1 Nitreto de silício

As cerâmicas à base de nitreto de silício (Si_3N_4) são materiais com características diferentes das cerâmicas à base de óxido de alumínio e têm em relação a estas as seguintes vantagens:

- Maior resistência a choques térmicos
- Maior tenacidade

Têm uma dureza a quente superior aos carbonetos, mas não tem a estabilidade química das cerâmicas à base de óxido de Alumínio na maquinação dos aços.

É excelente na maquinação de ferros fundidos a velocidades de corte elevadas e também se obtêm-se bons resultados na maquinagem de ligas termoresistentes (super ligas de Ni).

6.2.5.2.2 Sialon

O Sialon é constituído por uma base de nitreto de silício em que parte do silício é substituída por alumínio e parte do azoto por oxigénio obtendo-se o composto da forma Si-Al-O-N.

Têm resistência a altas temperaturas superiores aos nitretos tradicionais e também valores de coeficiente de dilatação térmica melhores.



6.2.5.3 Conclusão das cerâmicas

As principais aplicações das ferramentas cerâmicas são em ferros fundidos, ferro fundido nodular, ligas termoresistentes e alguns aços endurecidos. Na maquinagem de ferro fundido seja desbaste ou acabamento o óxido de alumínio puro oferece boa performance. As cerâmicas de nitreto de silício tem bom comportamento em operações de corte interrompido e quando existe variação da profundidade de corte.

As cerâmicas mistas e reforçadas (resistência ao choque e dureza a quente) são utilizadas na maquinagem de ligas resistentes ao calor e em aços endurecidos. A resistência ao desgaste e a estabilidade química de novas cerâmicas melhorou substancialmente o rendimento, no entanto, na maquinagem de aços os carbonetos revestidos dominam devido à sua tenacidade.

O êxito da aplicação das cerâmicas depende do tipo de operação, condições de corte, material a maquinar e estabilidade geral.

6.2. 6 Ultra duros

Os materiais mais representativos desta categoria são o Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e o diamante sintético policristalino (PCD). As propriedades mais importantes são: elevada dureza e resistência ao calor.

6.2. 6.1 Nitreto de boro cúbico (CBN)

Este material é obtido de grão muito fino de Nitreto de Boro de estrutura hexagonal, que está sujeito a uma elevada compressão e temperatura.

É um material super abrasivo e no “ranking” de dureza ocupa o segundo lugar.

Na presença de um metal ou material cerâmico (aglomerante) formando uma base sinterizada e policristalina de Nitreto de Boro Cúbico.

Muitas vezes, fornecido sob a forma de pastilhas de várias geometrias ou utilizado em camadas de revestimento em substrato de carbonetos.

As suas propriedades podem variar com o objectivo de obter várias qualidades de diferentes características de corte através da alteração da dimensão dos cristais, percentagem e tipo de aglomerante.



Figura 33 – Pastilha em CBN. Fonte: Seco Tools



Têm uma dureza a frio superior às cerâmicas mas perdem estabilidade química.

Uma percentagem baixa de CBN combinada com um aglomerante cerâmico confere à pastilha excelente resistência ao desgaste por abrasão e estabilidade química.

Esta configuração, permite uma aptidão especial para a maquinagem de aços e ligas fundidas endurecidas.

Maior percentagem de CBN determina uma maior tenacidade.

A aplicação típica deste material é na maquinagem de materiais duros acima dos 48HRC obtêm-se excelente estado da superfície, muitas vezes comparável com um processo de rectificação.

Mais características do material comparativamente ao material cerâmico, são:

- Maior dureza do que as cerâmicas
- Maior resistência ao choque
- Menor estabilidade química
- Garantia de tolerâncias apertadas
- Obtenção de rugosidade baixa
- Vida superior
- Preço mais elevado

As forças de corte são elevadas na maquinagem de material duro e da geometria negativa da aresta de corte utilizada para menor fragilidade, por conseguinte, recomenda-se a utilização de máquinas de elevada rigidez e potência.

Os raios das pastilhas devem ser elevados, velocidades de corte médias, pequenos avanços e evitar o corte interrompido.

O CBN é uma boa solução para acabamento permite a garantia de tolerâncias apertadas, rugosidade baixa ($Ra_{0,1}$) e controlo de tolerâncias geométrica e dimensional de valores a gravitar 0,01mm, em aços duros.

A sua elevada condutibilidade térmica permite a evacuação do calor na aresta de corte de forma eficiente.

A refrigeração deve ser abundante junto à aresta de corte para evitar rotura pela falta de resistência ao choque térmico, com resultados melhores a altas temperaturas (1000°C) do que o PCD.



6.2. 6.2 Diamante policristalino (PCD)

O material mais duro é o diamante monocristalino e quase tão duro é o diamante policristalino sintético (PCD) é obtido através de uma tecnologia de elevadas temperaturas e pressões (atinge uma pressão de 10000000 psi e temperatura de 1700°C, daí a designação High Pressure, High Temperature - HTHP).

A sua elevada dureza, cerca de 5000 HV confere uma resistência ao desgaste por abrasão elevada por esta razão é o material escolhido para a fabricação de mós e pastilhas de corte.

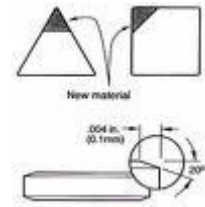


Figura 34 – Pastilha negativa em PCD. Fonte: Frezite

A estrutura cristalina resulta de arranjos cúbicos de faces centradas com orientação desordenada, por forma, a evitar a propagação de uma fractura em qualquer direcção.

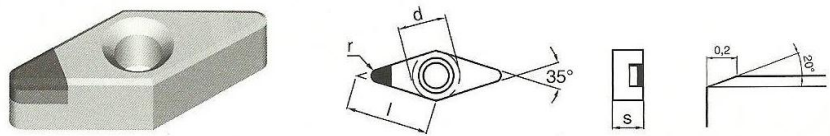


Figura 35 – Pastilha com ponta em PCD. Fonte: Frezite

Os pequenos insertos de diamante são soldados em pastilhas de substrato de metal duro, este confere maior resistência ao choque.

As principais características do PCD, são:

- Elevada dureza (resistência ao desgaste)
- Boa tensão de rotura transversal
- Aumento substancial da vida da ferramenta
- Excelente acabamento superficial
- Elevada condutibilidade térmica (evacuação do calor)
- Coeficiente de dilatação térmico baixo
- Produtividade elevada
- Temperaturas na zona de corte devem ser inferiores a 600°C
- Afinidade química com metais ferrosos (perigo de formação de grafite)

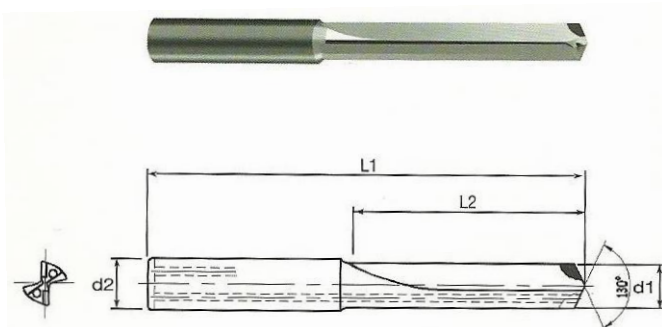


Figura 36 – Ferramenta com ponta em PCD. Fonte: Frezite



Estas duas últimas características do diamante limitam a sua aplicação nas operações de Maquinagem.

As elevadas temperaturas na interface ferramenta/peça a altas velocidades transformam o diamante em grafite em materiais ferrosos devido à afinidade química dos materiais, logo, está condicionada a sua utilização.

Por razão contrária, é uma boa escolha para materiais não ferrosos como ligas de Al e Si.

Quando o critério é boa precisão e estado da superfície também é boa escolha para materiais compósitos de matriz metálica, plásticos reforçados, cerâmicos, metais duros sinterizados, ligas de Cu e Zn.

As máquinas e apertos de peça devem ser estáveis e rígidos.

Dentro das recomendações em trabalho pode ser utilizado combinado com um fluido de corte, velocidade de corte elevada e pequenos avanços/profundidades.

O PCD aumenta substancialmente a vida das ferramentas de corte é também utilizado como revestimento de metal duro.

**CVD diamond coated
carbide (HC)**



CD1810 (N10)

CD1810 is a CVD diamond coated insert based on a specially adapted substrate. The extremely wear resistant coating of 6 – 8 µm high purity diamond provides excellent properties for the machining of non-ferrous alloys.

Figura 37 – Diamante usado como revestimento. Fonte: Sandvik

6.2. 6.3 Comparativo CBN e PCD

Como referido, o PCD e CBN são os materiais ideais para a maquinagem de material abrasivo e ambos constituem tecnologia avançada em trabalho de corte, no entanto, existem algumas diferenças e considerações técnicas relevantes.

O PCD é um material de dureza superior ao CBN.

Para condições de corte, em que os valores da temperatura são elevados a utilização do CBN é recomendada, pois a presença de calor devido ao processo de corte em aços ao C, ligados de Ni ou Co, transforma a estrutura hexagonal do diamante em grafite.

Por esta razão, o uso de diamante nas generalidades dos materiais ferrosos não é recomendável.

O CBN é estável a altas temperaturas cerca de 1000°C e não tem reacção química com os elementos de liga: ferro, níquel ou cobalto.

As ferramentas de corte em PCD são aplicadas com sucesso na maquinagem de ligas não ferrosas, carbono, cerâmicos, fibras, compósitos, plástico e borracha.



Para ferramentas em CBN, as aplicações típicas são em, materiais ferrosos, aços ligados (Ni e Co), aços ao Carbono, e ferros fundidos.

São aplicados (PCD e CBN) em operações de torneamento e fresagem.

Ambos, são constituintes de ferramentas de rectificação, discos, mós e ferramentas abrasivas.

6.3 Revestimentos

As características mecânicas exigíveis aos materiais de ferramentas de corte são, por vezes, contraditórias.

Quando aumenta a dureza diminui a tenacidade e vice-versa, a solução ideal é conferir à ferramenta uma grande dureza e elevada tenacidade.

Os revestimentos conferem à ferramenta uma grande dureza superficial e a protecção do substrato tenaz.

O facto de os revestimentos serem frágeis impede a sua utilização na forma sólida.

Nos anos 60 (séc. XX), a empresa sueca Sandvik iniciou a revestir pastilhas de carbonetos aglomeradas de Cobalto com uma película fina de 5 a 6µm de carboneto de Titânio (TiC).

Este revestimento garantia dureza a quente, resistência ao desgaste e estabilidade química.

Na década de 70 (séc. XX), começa a aparecer no mercado outras qualidades de revestimentos que melhoram a eficiência do corte função do material a maquinar, tipo operação, etc.

O aparecimento de pastilha intercambiáveis de fixação mecânica e os revestimentos permitiram duplicar as velocidades de corte e triplicar os avanços.

O volume de peças produzidas por unidade de tempo aumentou e os custos de ferramentas por peça diminuiu.

Actualmente em larga escala de operações de torneamento e fresagem utiliza-se o metal duro revestido.



6.3.1 Principais revestimentos

Os principais revestimentos são fabricados à base de nitretos, óxidos e carbonetos em multicamadas:

- TiC – Carboneto de titânio
- TiN – Nitreto de titânio
- TiCN – Carbonitreto de titânio
- Al₂O₃ – Óxido de alumínio
- TiAlN – Nitreto de alumínio e titânio
- PCD – Diamante policristalino

Os carbonetos de titânio e o óxido de alumínio são materiais muito duros proporcionando uma boa resistência ao desgaste e estabilidade química (produzem uma barreira química ao calor gerado na interface ferramenta/peça).

O nitreto de titânio não é um material tão duro, mas tem um coeficiente de atrito baixo diminuindo a tendência para a cratera e a formação da aresta postiça de corte.

Os nitretos podem ser aplicados a baixas temperaturas, não afectando a substrato.

Foram desenvolvidas modernas tecnologias de revestimentos que utilizam elevadas temperaturas que são necessárias para outro tipo de revestimentos.

Várias combinações de camadas múltiplas foram desenvolvidas com o objectivo de combinar as melhores propriedades dos diferentes revestimentos função do material a maquinar, tipo operação, etc.

Na selecção do revestimento adequado temos de considerar o que pretendemos: dureza a quente, estabilidade química, coeficiente de atrito, etc.

A baixa condutibilidade térmica destas camadas significa que a transferência de calor por condução é baixa garantindo protecção ao substrato.

O TiCN tem excelentes propriedades de adesão pode ser aplicado sob e sobre o substrato.

A espessura média do revestimento raramente ultrapassa 12µm porque apesar de aumentar a resistência ao desgaste a sua fragilidade também aumenta.

Os substratos a revestir têm a qualidade adaptada ao tipo de revestimento, por exemplo, o carbono livre presente no substrato e à superfície tem um efeito negativo na aresta de corte.

O carbonitreto de titânio é uma boa camada de adesão, mas necessita de uma barreira ao calor fazendo combinação com o óxido de Alumínio na defesa contra o sobreaquecimento.



Tanto o óxido de alumínio como o nitreto de titânio quando combinados com um revestimento intermédio correcto, formam camadas externas diferentes com excelentes propriedades.

Os carbonetos revestidos são a primeira escolha para operações de torneamento e fresagem cobrindo gamas desde P05 ao P45, M10 a M25 e K01 a K25.

6.3.2 Processos de fabrico

Os revestimentos são aplicados na maioria dos casos em carbonetos sinterizados (metal duro), no entanto, também é possível aplicar em HSS, cermets e materiais cerâmicos.

Os parâmetros de deposição são otimizados para minimizar determinados efeitos, tal como, a descarbonização do substrato.

O efeito positivo resultante das tecnologias de camada múltipla é no desenvolvimento de novas geometrias das pastilhas.

As modernas tecnologias de revestimentos (CVD e PVD) conduziram a um melhor desenvolvimento do substrato, a tenacidade da aresta de corte é mantida e a resistência ao desgaste incrementada.



Figura 38 – Representa as tecnologias de revestimento PVD e CVD em ferramentas/pastilhas de corte. Fonte: Sandvik

PVD (Physical Vapour Deposition) – É a deposição física em fase de vapor, o revestimento é obtido pela adição de material sobre o substrato criando uma película de espessura na ordem dos 2µm a 5 µm.

Este revestimento mantém e prolonga em condições de trabalho da aresta de corte evitando os problemas, tais como, aresta postiça de corte, lascamento, deformação plástica, etc.

Os revestimentos mais comuns são: nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (Ti(C,N)), e nitreto titânio/alumínio ((Ti,Al)N)



São utilizados quando pretendemos maior tenacidade, operações severas, problemas de vibração e quebra apara.

Classes em PVD são indicadas para aplicações com baixos avanços onde se exige tenacidade e velocidades de corte moderadas a baixas.

CVD (Chemical Vapour Deposition) – É a deposição química em fase de vapor, os revestimentos aplicados por este método não originam sobreespessura ao substrato, existe uma combinação química entre o substrato e o revestimento (multi-camadas – layers) na zona superficial.

Os revestimentos mais usados por este processo, são: carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (Ti(C,N)) e o óxido de alumínio (Al₂O₃)

Permite o aumento da velocidade de corte, protecção do substrato ao calor e optimização da produção.

Classes em CVD são indicadas para aplicações severas com altos avanços e velocidades de corte moderadas a elevadas.

De seguida, apresenta-se alguns exemplos práticos de revestimentos em diferentes substratos utilizados pela empresa sueca de ferramentas Sandvik.

Os exemplos de revestimentos apresentados são utilizados na concepção de ferramentas/pastilhas para operações de **fresagem e torneamento**.

6.3.3 Revestimentos de carbonetos sinterizados (Metal duro)

Como descrito anteriormente, o metal duro é um composto de carboneto de tungsténio (WC) e Cobalto (Co). Também podem ser utilizados TaC, TiC e NbC para garantir outras propriedades: dureza a quente, resistência ao desgaste e resistência química.

O carboneto é o principal componente para garantir a dureza e o Cobalto material ligante que oferece tenacidade.

São revestidos por PVD ou CVD e podem ter várias combinações de revestimento, são exemplos:

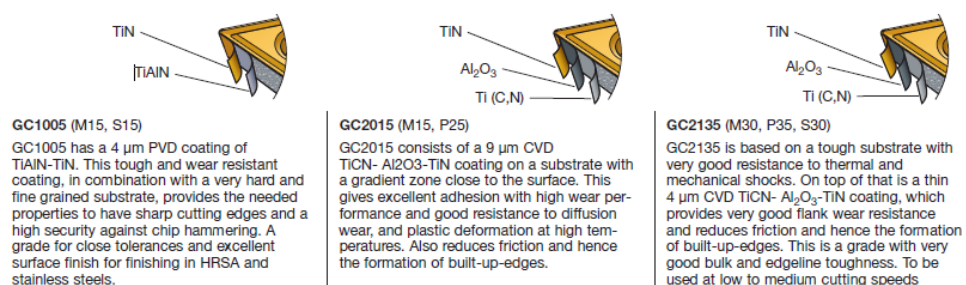


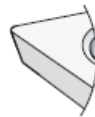
Figura 39 – Exemplos de revestimentos em metal duro. Fonte: Sandvik



6.3.4 Exemplos de revestimentos em cermets, cerâmicos e diamante

CERAMICS

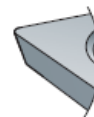
Pure ceramic (CA):



CC620 (K01)

CC620 is a pure oxide ceramic grade based on alumina with a small addition of zirconium oxide to give it improved toughness. CC620 is designed for high cutting speed applications in cast iron and steel under stable conditions. Coolant should not be used.

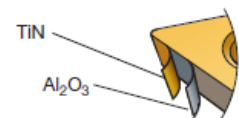
Silicon nitride based ceramic (CN):



CC6080 (S10)

CC6080 is a SiAlON ceramic grade. This grade is well suited for high speed machining of heat resistant super alloys under stable conditions.

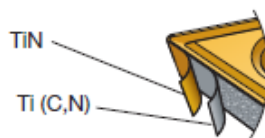
Coated ceramic (CC):



GC1690 (K10)

GC1690 is a silicon nitride substrate with a 1 μm thin Al_2O_3 -TIN coating. The properties of GC1690 make it highly recommendable for light roughing, medium and finishing applications in cast iron.

Coated cermet (HC)



GC1525 (P15,M10)

GC1525 is a PVD coated cermet for finishing and semi-finishing. The substrate is of the same kind as CT5015 but tougher. The 3 μm PVD coating of TiCN-TiN adds wear resistance and resistance to plastic deformation. The coating is chosen due to superior compatibility with the substrate, minimizing the risk of flaking. GC1525 is our toughest available cermet for high process security and good surface finish.

CVD diamond coated carbide (HC)



CD1810 (N10)

CD1810 is a CVD diamond coated insert based on a specially adapted substrate. The extremely wear resistant coating of 6 – 8 μm high purity diamond provides excellent properties for the machining of non-ferrous alloys.

Figura 40 – Exemplos de revestimentos em cermets, cerâmicos e diamante. Fonte Sandvik



7. Mecanismo de Formação da Apara

O corte por arranque de apara é um processo tecnológico de alteração da forma através da remoção do material excedentário necessário à obtenção de um componente mecânico com determinada geometria.

Os parâmetros de corte das várias operações que utilizam esta tecnologia para obtenção da forma das peças são diferentes, embora o processo de corte no essencial permanece comum.

Daí a necessidade de estudar em pormenor o *mecanismo de formação da apara*.

A teoria elementar da maquinagem, os ensaios laboratoriais e a experiência industrial permitiram obter conhecimento e correcção da utilização das ferramentas de corte.

A realização de ensaios permite estudar os mecanismos fundamentais de formação da apara, estabelecer a relação entre os parâmetros de corte, recolher elementos de previsão das forças aplicadas, estado de tensão na interface, potências necessárias, comportamento das ferramentas/máquinas e as temperaturas atingidas.

A análise dos resultados obtidos em ensaios estabelecem as relações referidas num processo sistemático e de recolher informações sobre os factores condicionantes da vida das ferramentas, influência no desgaste e qualquer outra situação de objecto de estudo.

As relações entre o desgaste e as condições de corte devem tomar em consideração a pressão e temperatura na zona de contacto, características mecânicas do material a maquinar, deformação e propriedades mecânicas, físicas, químicas, metalúrgicas dos materiais das ferramentas.

A maquinagem é um processo de formação de apara a sua compreensão obriga ao conhecimento do comportamento dos materiais, temperatura gerada, forças que afectam a potência necessária ao corte e estudo da aresta de corte em determinadas condições de maquinabilidade.

7.1 Formação da apara

Os fenómenos que estão associados ao mecanismo da formação da apara dependem da análise do processo segundo várias ópticas: mecânica dos meios contínuos, transferência de calor e aspectos metalúrgicos do material a maquinar e das ferramentas.

A natureza do mecanismo de formação da apara é muito variável e só é explicada por combinação de vários factores referidos anteriormente.

Mas também, pela geometria da ferramenta e espessura média da apara.



Inicialmente, a aresta de corte da ferramenta penetra na peça/material e encalca uma porção de material contra a face de ataque. A acção do encalque surge por escorregamento da aparta em formação é travado pelo atrito com a face de ataque da ferramenta. A aparta sofre uma deformação plástica que se traduz no aumento da sua espessura.

As forças geradas no processo de corte aumentam progressivamente até que as tensões de corte elevadas promovem o escorregamento sem perda de coesão entre a porção de material removido e a peça.

O plano de corte corresponde à direcção para a qual as tensões são máximas.

Numa segunda fase, a fissuração na região do plano de corte pode ser parcial ou total, originando aparta contínua ou descontínua.

Na continuidade do movimento relativo entre a peça e a ferramenta confirma-se um escorregamento da aparta sobre a face de ataque da ferramenta e no mesmo instante é encalçada uma nova quantidade de material concluindo o ciclo

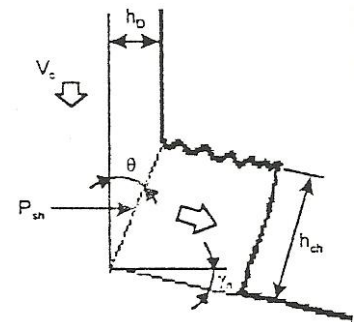


Figura 41 – Formação da Aparta

Na figura 41, o plano que separa o material deformado do não deformado chama-se **plano de corte (P_{sh})**.

O ângulo deste plano com a peça chama-se **ângulo de corte (θ)**.

O material que se encontra à direita do plano de corte é a aparta deformada com uma espessura (h_{ch}) e o material á esquerda é a aparta não deformada (h_D).

A deformação da aparta está relacionada com a espessura da aparta não deformada, ângulo de desprendimento (γ_n) e as propriedades mecânicas.

O mecanismo de formação da aparta é um fenómeno cíclico alternado pela fase de encalque e fase de corte onde a força máxima é obtida na fase de encalque.

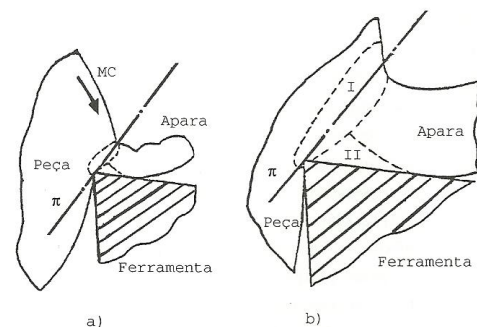


Figura 42 – Regiões de deformação da aparta. Fonte: Princípios de Maquinagem, J. Paulo Davim, Almedina

A figura 42 mostra em a) o plano de corte e em b) as regiões de deformação primária (I) e secundária (II).



A região primária tem grande deformação plástica e a secundária resulta de deformações provocadas pelo atrito entre a apra e a face de ataque da ferramenta.

O comportamento plástico do material no plano de corte tem uma grande influência no processo, o estado de tensão provoca endurecimento na apra e na superfície de corte.

Este promove um aumento das forças de corte, reduz o ângulo de corte e provoca maior atrito sobre a face de ataque da ferramenta.

A quantidade de deformação depende do ângulo de desprendimento da ferramenta.

Quando o ângulo de corte é pequeno a forças de corte necessárias ao corte são elevadas.

Na prática, os factores como o ângulo de desprendimento e os parâmetros de corte influenciam as condições de trabalho.

O atrito produz-se à medida que durante o processo o material é sujeito a grandes pressões e temperaturas.

Por vezes, o material deformado solda na face de ataque da ferramenta e paralisa o deslocamento na superfície de separação o que dificulta o processo de corte.

No entanto, o escorregamento continua entre a peça e a ferramenta gerando mais calor nesta zona estacionária.

7.2 Apra postiça de corte (Apra aderente)

O contacto entre a peça e a ferramenta ao longo da superfície de contacto pode-se dividir em três fases onde ocorrem diferentes reacções: aderência, difusão e abrasão.

Para determinadas condições de corte e principalmente na maquinagem de materiais dúcteis a apra tem tendência para “soldar” em camadas sucessivas à face de ataque da ferramenta e posteriormente endurecer.

Esta porção de material “soldado” é a apra aderente ou também designada por aresta postiça de corte (APC).

O termo da literatura técnica inglesa é **Build Up Edge (BUE)** representa-se o fenómeno na figura 43.

aresta postiça (B.U.E.)

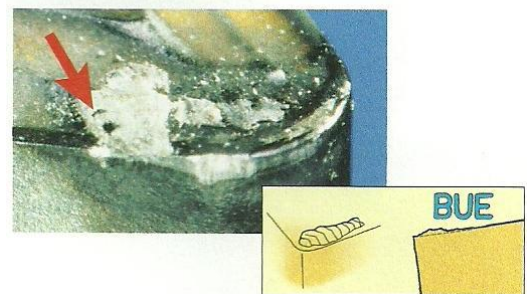


Figura 43 – Aspecto da aresta postiça de corte. Fonte: Sandvik

À medida que o processo segue o seu caminho a apra aderente cresce e atinge uma dimensão instável com ruptura subsequente e reinicia-se a formação de novas camadas na face de ataque da ferramenta.

A apra aderente que “rompeu” sai agarrada à apra ou solda à superfície maquinada originando um insatisfatório acabamento superficial e diminuição da vida da ferramenta.



Existe uma determinada gama de temperaturas/velocidades de corte que contribuem para o crescimento da apra aparente, assim como, determinados materiais de ferramentas mais vulneráveis do que outros.

A resistência da APC diminui quando a temperatura aumenta.

Uma geometria positiva da ferramenta diminui a possibilidade de formação da apra aderente e as altas velocidades de corte abrandam a construção de sucessivas camadas.

Quanto mais elevado for o ângulo de ataque menor é a pressão exercida sobre a face de ataque, menor é a temperatura e consequentemente a diminuição de tendência para a formação de aresta postiça de corte.

Resumindo, as consequências da formação de aresta postiça de corte são o deficiente acabamento superficial e destruição da aresta de corte.

As causas, são: a colagem na face de ataque da ferramenta, velocidade de corte baixa, geometria negativa, material dútil e material da ferramenta vulnerável/inadequado.

As soluções práticas para a resolução do problema, são: aumento da V_c , geometria positiva e refrigeração abundante.

7.3 Tipos de apra

A formação de apra é influenciada pelo material a maquinar, desde aparas curtas nos materiais frágeis (endurecidos) até à apra longa nos materiais dúcteis (Alumínio).

A ruptura não se consegue apenas com a combinação de geometria da ferramenta e V_c .

As forças de corte, as temperaturas e as vibrações são factores que influenciam a formação da apra.

O controlo da apra é um dos factores chave especialmente nas operações de furação e torneamento.

A fresagem cria um comprimento natural na apra graças à limitada implicação do fio de corte.

Na furação o controlo da apra é importante devido ao limitado espaço dentro dos furos que estão a ser maquinados.

Este problema deve ser combatido por um processo de furação de alto rendimento onde a apra constituiu uma forma exacta para o aumento da eficiência de evacuação e evitar o congestionamento, são exemplo de aperfeiçoamento: geometria da hélice, lubrificação interna, estratégia “pica-pau”, revestimento de brocas, etc.

A formação da apra é afectada por vários factores:

- Material da peça – ductilidade, estrutura, dureza e dimensão
- Geometrias de ferramenta – ângulo de posição, ataque afectam o comprimento e direcção da apra, o raio de ponta afecta a apra função da profundidade.
- Parâmetros de corte – Avanço, profundidade, V_c e refrigeração
- Geometria da face ataque – Importante no controlo da apra e sua regulação



As aparas são normalmente classificadas em três tipos:

- Contínua regular – Materiais dúcteis e avanços pequenos
- Contínua irregular com aderência – Materiais dúcteis maquinados a Vc baixa e sem refrigeração
- Descontínua – Materiais frágeis ou condições de corte em que a zona de

deformação primária se estenda para ângulos de corte reduzidos que facilitam a propagação de uma fissura ao longo do plano de corte (ferros fundidos)

Em fita	Tubular	Espiral	Helicoid. em gume	Helicoid. cônica	Em arco	Em lasca	Em agulha
Longa	Longa	Plana	Longa	Longa	Ligada		
Curta	Curta	Cônica	Curta	Curta	Fragmento		
Enrolada	Enrolada		Enrolada	Enrolada			

Figura 44 – Representação das formas da apara, norma ISO 3685. Fonte: Princípios de Maquinagem, J. Paulo Davim, Almedina

Quanto à sua forma as aparas podem ser classificadas do seguinte modo:

- Em fitas ou lisas, de difícil evacuação
- Em espiral, típica de operações de sangramento
- Em helicóide, fácil evacuação
- Em forma de “vírgula”, fácil evacuação
- Em pequenos fragmentos, fácil evacuação na zona de trabalho

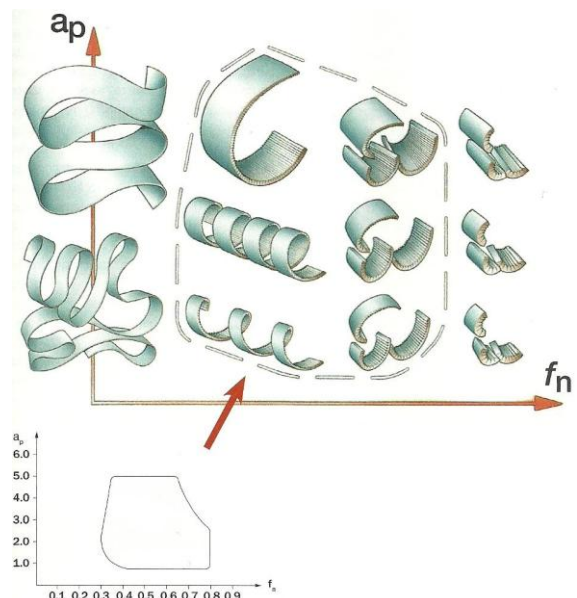


Figura 45 – Ilustração dos tipos de apara em função da profundidade de corte (a_p) e a velocidade de avanço (f_n). Fonte: Sandvik



7.4 Quebra apra

Define-se quebra apra como o romper da apra no processo de corte, existem basicamente três formas para ocorrer a quebra/rompimento da apra:

- A - Auto ruptura
- B - Ruptura por choque com a ferramenta
- C - Ruptura por choque com a peça de trabalho

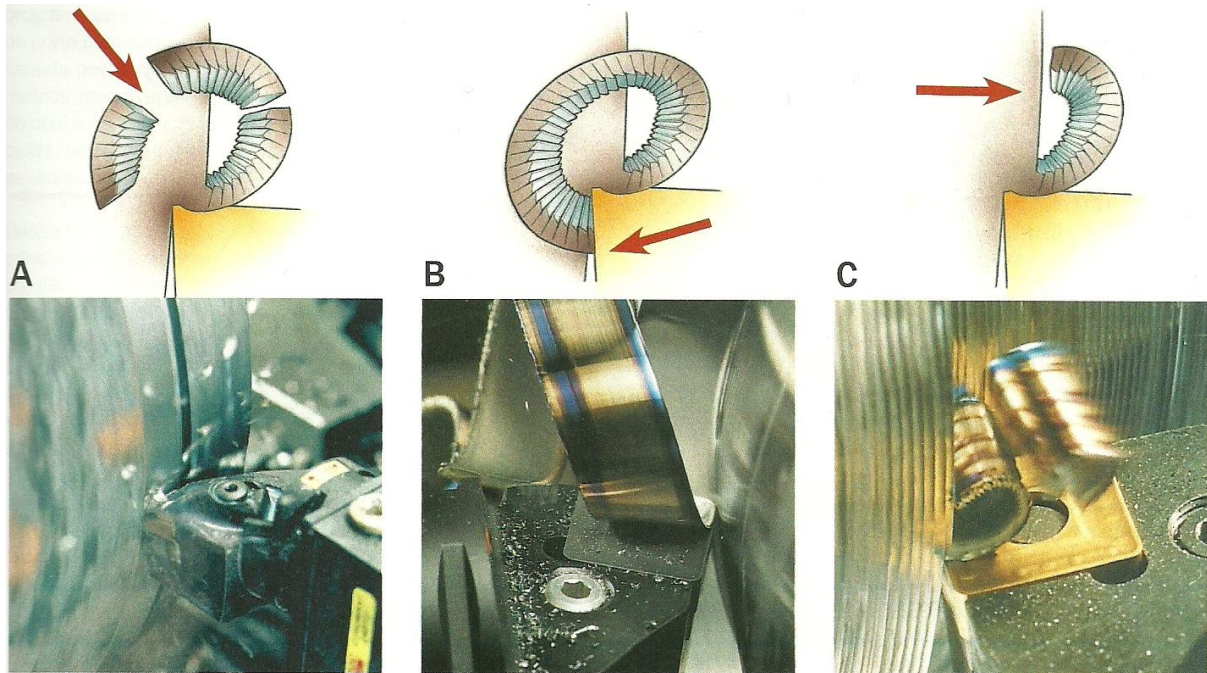


Figura 46 – Diferentes formas de quebra apra. Fonte: Sandvik

Existem algumas vantagens e desvantagens com a utilização das três alternativas.

A auto-ruptura proporciona a obtenção de uma direcção adequada da apra, romper contra a ferramenta tem o inconveniente de fracturar a aresta de corte e contara a peça degradar o acabamento superficial do componente.

Materiais que formam apra curta ou fragmentada não necessitam de uma geometria especial da ferramenta.

Para materiais com apra longa necessitam de quebra apra desenhados na face de ataque da ferramenta com o objectivo de deformar a apra e posteriormente entrar em ruptura.

As modernas pastilhas intermutáveis são uma complexa combinação de ângulos, planos, raios para otimizar a formação da apra.



Figura 47 – Diferentes geometrias do quebra apra em pastilhas. Fonte: Sandvik



7.4.1 Influência geometria das ferramentas

A figura 48 ilustra pastilhas para operação de torneamento com o ângulo de ataque da ferramenta: positivo e negativo.

Geometria positiva aplicada por exemplo à maquinagem de ligas Al e negativa típica de ferramentas em CBN e PCD.

A acção de corte é em grande parte determinada pela geometria da ferramenta que é projectada para maquinar diversos materiais, formação de apara suave e a robustez da aresta de corte.

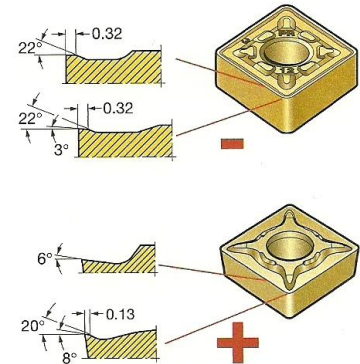


Figura 48 – Exemplos de geometrias positivas e negativas. Fonte: Sandvik

Cada geometria de pastilha é desenvolvida para abranger uma área de aplicação composta por faixas de avanço e profundidade recomendada.

A geometria de acabamento possui uma área menor de avanço e profundidade, uma geometria de desbaste maiores avanços e profundidades e para uso geral uma camada intermédia.

Existe uma distinção na geometria da aresta de corte, entre a geometria positiva e negativa da pastilha.

A pastilha negativa possui um ângulo de ataque de 90° e a positiva um ângulo menor visto de um plano transversal do formato básico da aresta de corte.

A aresta de corte da pastilha está sujeita a variações, a micro-geometria da aresta de corte confere robustez e ao desenvolvimento do desgaste da ferramenta.

A transição de geometria é feita na forma de chanfro ou raio e afecta a resistência da ferramenta, potência de corte, acabamento, vibração e formação da apara.

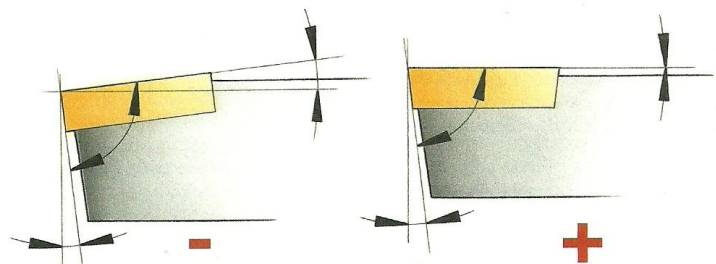


Figura 49 – Ilustração de geometrias positivas e negativas. Fonte: Sandvik

Para um ângulo de inclinação (K_f) positivo a apara afasta-se da peça, se o ângulo de inclinação é negativo a apara flexa para a peça.

A figura 50, mostra a influência do ângulo de posição na formação da apara



O mecanismo de formação da apra depende da profundidade de corte, ângulo de posição, ângulo inclinação, ângulo de ataque, avanço, material e geometria da ferramenta.

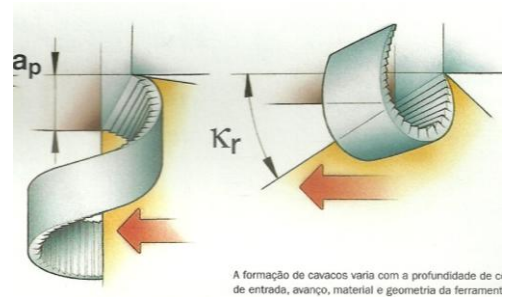


Figura 50 – Influência do ângulo de posição na formação da apra. Fonte: Sandvik

Alguns exemplos de aplicação são apresentados na figura abaixo, os quebra apra como parte integrante da geometria das pastilhas para trabalhar em diferentes avanços e profundidades de áreas de corte.

As pastilhas são positivas, para operações de desbaste, semi-desbaste e acabamento respectivamente.

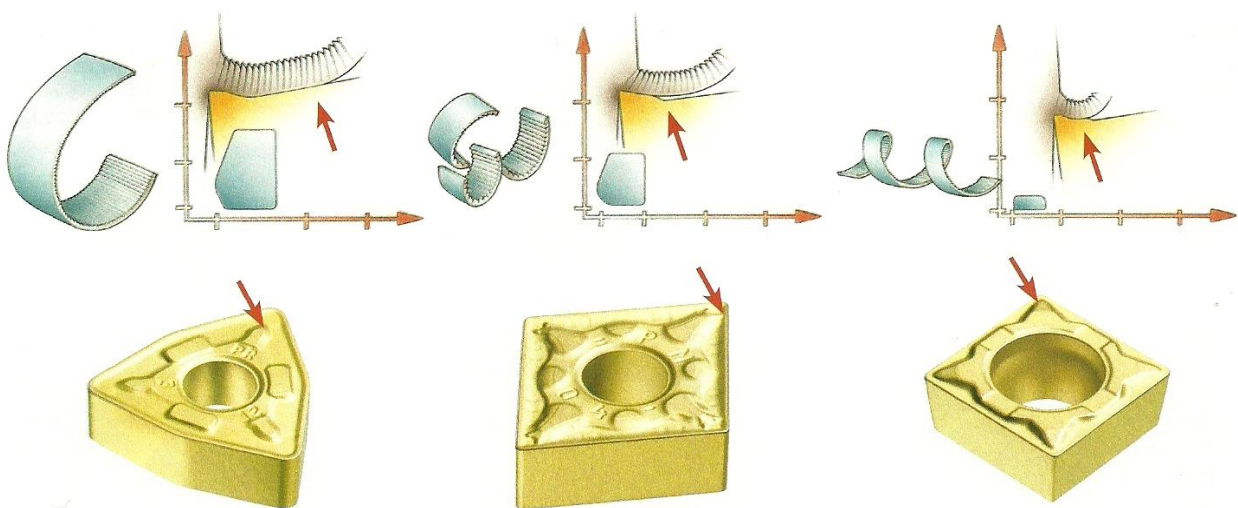


Figura 51 – Pastilhas positivas para operações de desbaste, semi-desbaste e acabamento. Fonte: Sandvik



8. Problemas e Soluções: Desgaste de Ferramentas e Acabamento Superficial

As forças de corte, estado de tensão, elevada temperatura resultante do processo de corte conduzem a efeitos indesejáveis no corte por arranque de apara.

As avarias e o desgaste de ferramentas exigem monitorização, afiamentos periódicos e substituição quando se atinge um determinado desgaste ou completa inutilização por avaria súbita.

Normalmente, todas as ferramentas de corte sofrem continuamente desgaste durante a maquinação até atingirem a sua vida útil.

Com a aplicação correcta de modernos materiais para ferramentas, o processo de maquinação tornou-se produtivo e económico, mas também, muito fiável e previsível.

O tempo ao fim do qual uma ferramenta deve ser retirada para afiamento ou substituição constitui a vida da ferramenta.

Os efeitos indesejáveis sobre a ferramenta, são os seguintes:

- Desgaste da face de ataque e saída
- Deformação plástica da aresta de corte
- Roturas
- Alteração de propriedades originais (por exemplo, dureza)

A preponderância do tipo de desgaste na ferramenta depende, entre outros parâmetros, do material da ferramenta, peça, condições de corte, utilização correcta do lubrificante e estabilidade geral do processo.

As avarias e desgastes são o resultado da interacção entre as ferramentas, material a maquinar e das condições de trabalho e resulta da acção de vários factores:

- Mecânicos
- Térmicos
- Químicos
- Abrasivos



Os critérios que definem a vida das ferramentas, podem ser:

- Aumento da rugosidade superficial dos componentes maquinados
- Aumento das forças de corte e consequente aumento de potência consumida
- Precisão dimensional
- Formação da apra

Qualquer uma destas situações pode ser atingida por desgaste gradual ou por avaria súbita, no entanto, geralmente o desgaste da ferramenta é função do tempo e a avaria tem carácter aleatório.

O estado de tensão e o gradiente de temperaturas na face de ataque/saída condicionam os mecanismos de desgaste.

A variação das condições de corte promove uma modificação do estado de tensão e do gradiente de temperatura, alterando deste modo os mecanismos de desgaste.

Como resultado dos factores de carga aplicados na aresta de corte, a maquinação de metais é dominada pelos seguintes mecanismos de desgaste:

- Desgaste por abrasão
- Desgaste por difusão
- Desgaste por oxidação
- Desgaste por fadiga
- Desgaste por adesão

8.1 Tipos de avaria e desgaste

Considera-se dois grupos no processo de degradação das ferramentas de corte:

- Os que conduzem ao colapso da ferramenta de forma súbita e repentina, como resultado, de tensões de origem mecânica ou térmica, são designadas por *avarias*.
- Os que conduzem a uma remoção gradual e progressiva de material na face de ataque e saída da ferramenta, são designadas por *desgaste*.



8.1.1 Avarias

Existem três formas básicas de avarias: rotura frágil da aresta de corte ou ponta, deformação plástica do gume devido ao seu amolecimento e roturas em forma de “pente” devido a tensões de origem térmica.

As primeiras avarias referem-se essencialmente a estados de tensão de origem mecânica e corte intermitente/interrompido.

As segundas são originadas por elevadas temperaturas e pressões na face de ataque provocando deformação plástica da aresta de corte e consequente má formação da aparta.

Por fim, as roturas em “pente” são originadas por tensões térmicas provocadas por fases sucessivas de aquecimento e arrefecimento brusco na rest de corte das ferramentas para o qual o acesso do fluído é irregular.

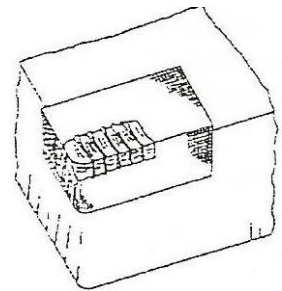


Figura 52 – Ilustração da rotura em pente. Fonte: Centimfe

8.1.2 Desgastes

A análise do desgaste da ferramenta é muito importante para a optimização do processo de corte.

A inspeção pode ser realizada através de um aparelho óptico, lupa, microscópio ou outro que permitem a caracterização do tipo de desgaste na vizinhança da aresta de corte.

Em geral, o desgaste dá-se em duas regiões adjacentes à aresta de corte: face de ataque e face de saída. Em muitos casos, o desgaste na face de saída é designado por linear (VB) não é regular ao longo do comprimento da aresta de corte, apresentando variações com máximos no ponto correspondente à extremidade da aresta de corte (VN) e junto à ponta da ferramenta.

Quando estas irregularidades de VB se estendem por toda a superfície desgastada é a indicação de má qualidade da ferramenta.

O desgaste linear da face de saída é geralmente definido pelo valor médio de VB ou máximo (VB máx) enquanto o desgaste de cratera toma em consideração a profundidade máxima da cratera KT, a sua largura KB e a distância da aresta de corte principal ao eixo da cratera KM.

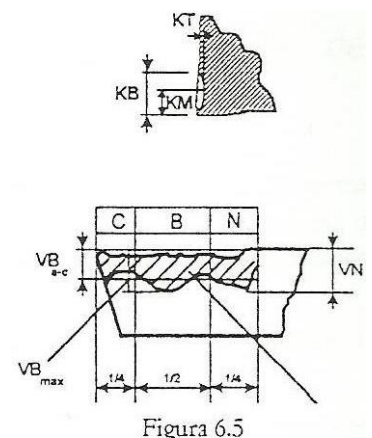


Figura 6.5

Figura 53 – Esquema de desgaste das ferramentas. Fonte: Centimfe



O desgaste linear da face de saída é medido relativamente à aresta de corte original.

Se o desgaste se distribui uniformemente pelas três zonas indicadas o desgaste médio VBa-c é registado.

Em casos em que ocorre desgaste excessivo em qualquer parte da aresta de corte, a recomendação é não considerar esse valor na obtenção do valor médio.

O valor de desgaste excessivo obtido usamos para determinar o desgaste máximo VN, esta zona é analisada separadamente.

Estes dois tipos de desgastes aumentam gradualmente com o tempo de corte, mas o desgaste de cratera varia linearmente ou por vezes em três zonas características.

A zona 1, corresponde ao início do corte, devido à elevada tensão aplicada numa aresta de corte de pequena secção.

O desgaste é muito rápido até que a aresta fique arredondada.

No final desta zona, o desgaste VB aumenta linearmente.

Na zona 2, o desgaste aumenta de forma gradual, controlável e previsível, voltando a aumentar muito rapidamente até à rotura súbita da aresta de corte na zona 3 de desgaste.

8.1.2.1 Classificação do tipo de desgastes

A classificação do tipo de desgastes foi desenvolvida para formar uma importante base de acesso com o objectivo de otimizar as operações de maquinagem através da definição da selecção das ferramentas e condições de corte.

A utilização de ferramentas adequadas, parâmetros de corte correctos e estabilidade geral do processo são os ingredientes necessários para um desenvolvimento ideal do desgaste, os diferentes tipos de desgaste, são os seguintes:

- Desgaste da face de saída
- Cratera na face de ataque
- Deformação plástica
- Cratera em V (entalhe)
- Fractura térmica
- Fractura por fadiga mecânica
- Apara aparente ou aresta postiça de corte (APC)



Desgaste da face de saída – Este desgaste ocorre na face de saída do gume e é devido principalmente ao mecanismo de abrasão, que é o tipo de desgaste mais frequente.

O seu desenvolvimento pode ser positivo, uma vez que torna o gume de corte mais afiado no decorrer da maquinação.

No entanto, para uma dada utilização o atrito contra a superfície maquinada deteriora a performance do gume de corte, porque um excessivo desgaste deste tipo provoca um estado superficial pobre.

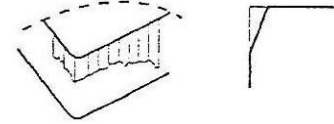


Figura 54 – Desgaste da face de saída.

Cratera na face de ataque – Ocorre na face de ataque da ferramenta onde prevalecem as altas temperaturas e altas pressões através dos mecanismos de abrasão e difusão.

A dureza a quente e a fraca afinidade química entre os materiais minimiza a tendência para este tipo de desgaste.

A formação excessiva deste tipo de desgaste altera a geometria da aresta de corte e pode comprometer uma boa formação da apara, mudar de direcção as forças de corte e o enfraquecimento da aresta de corte.

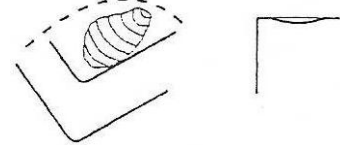


Figura 55 – Desgaste da face de ataque.

Deformação plástica – Ocorre devido à combinação entre as altas temperaturas e as pressões elevadas na aresta de corte.

Os factores que mais influenciam este tipo de desgaste são as altas velocidades de corte, avanços elevados e a dureza do material a maquinar.

Para que um material não se deforme plasticamente a dureza a quente é um factor crítico.

O raio da ponta e a geometria de corte são factores importantes na diminuição deste tipo de desgaste.



Figura 56 – Desgaste por deformação plástica.

Cratera em V (entalhe) – A fractura em V na face de saída é um caso típico de desgaste por adesão, mas também, pode ser provocada por desgaste por oxidação.

Microfissuras sucessivas conduzem à formação da fractura afectando o estado superficial e integridade da aresta de corte.

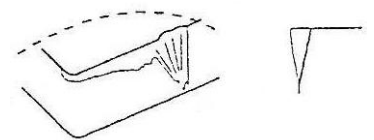


Figura 57 – Cratera em V (entalhe).



Fractura térmica – Deve-se principalmente a um ciclo de fadiga térmica como consequência de mudanças bruscas da temperatura na zona de corte.

Esta situação pode ocorrer em maquinagens intermitentes/corte interrompido ou uma deficiente refrigeração resultando a chamada rotura em “pente”.

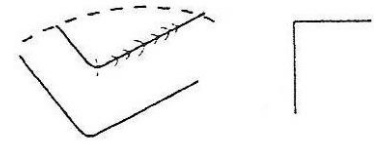


Figura 58 – Fractura térmica.

Fractura por fadiga – A fractura por fadiga mecânica acontece quando as forças de corte e as suas variações são excessivas e cíclicas.

As variações na força de corte e sua direcção podem ser exageradas para a resistência e dureza da aresta de corte.

As fracturas são paralelas à aresta de corte.

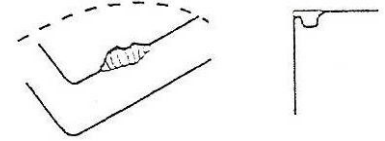


Figura 59 – Fractura por fadiga.

Apara aparente ou aresta postiça de corte (APC) – A formação da aresta postiça de corte ocorre em duas etapas: adesão do material maquinado à face de ataque e crescimento da apra aderente.

Esta adesão depende da compatibilidade metalúrgica, logo da solubilidade recíproca dos dois materiais em presença.

O mecanismo de difusão desempenha um papel relevante, a temperatura na interface apra/ferramenta é de importância fundamental no aparecimento e na aceleração da adesão do material à face de ataque da ferramenta.

Altas pressões são condições ideais para a formação da aresta postiça de corte.

O estado da superfície da peça piora com o aumento da aresta postiça de corte e com a sua progressão existe o risco de quebra da aresta de corte.

Para minimizar os efeitos da APC devemos ter uma boa qualidade superficial da ferramenta e altas velocidades de corte são alguns aspectos que atenuam a formação de apra aderente.

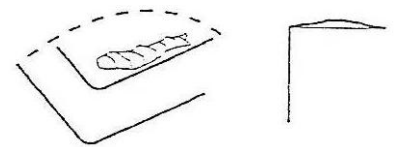


Figura 60 – Aresta postiça de corte (APC).



8.2 Problemas e soluções na avaria/desgaste das ferramentas

A informação seguinte sistematiza dados acerca dos tipos de desgaste, causas frequentes e possíveis soluções para torneamento e fresagem.

8.3.1 Torneamento

Problema:	Causa:	Solução:
Excessivo desgaste tipo entalhe e de flanco 	a. Desgaste rápido de flanco resultando em acabamento superficial insatisfatório ou medidas fora de tolerância. b/c. Desgaste tipo entalhe resultando em acabamento superficial ruim e risco de quebra de aresta.	a. Reduza a velocidade de corte. Selecione uma classe mais resistente ao desgaste. b/c. Oxidação. Selecione uma classe com cobertura de Al₂O₃. Para trabalhar materiais temperados, selecione um ângulo de posição menor ou uma classe mais resistente ao desgaste. b/c. Atrito. Reduza a velocidade de corte. (Ao usar materiais termoresistentes com cerâmicas, aumente a velocidade de corte.) c. Oxidação. Selecione uma classe de cermet
craterização 	Excessiva craterização causando o enfraquecimento da aresta. A quebra da aresta de corte na área em uso resulta em acabamento superficial insatisfatório.	Desgaste por difusão, devido a temperaturas de corte muito altas na face de topo. Selecione uma classe com cobertura de Al₂O₃. Selecione uma pastilha de geometria positiva. Reduza primeiro a velocidade para obter uma temperatura mais baixa, depois reduza o avanço.
deformação plástica 	Deformação plástica. Depressão na aresta ou impressão do flanco. Levando a um mal controle de cavacos e um acabamento superficial insatisfatório. Risco de desgaste excessivo no flanco levando à quebra da pastilha.	Temperatura de corte muito alta somada a uma alta pressão. Selecione uma classe mais dura com melhor resistência à deformação plástica. Depressão na aresta – Reduzir velocidade. Impressão no flanco – Reduzir avanço.
aresta postiça (B.U.E.) 	Aresta postiça causando acabamento superficial ruim e microlasas na aresta de corte quando a aresta postiça (B.U.E.) é removida.	O material da peça é soldado à pastilha devido a: Baixa velocidade de corte. Aumente a velocidade de corte. Geometria de corte negativa. Selecione uma geometria positiva.



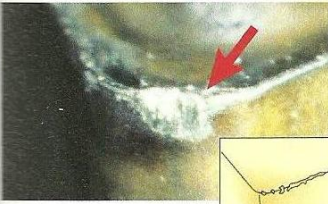
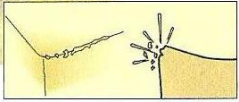
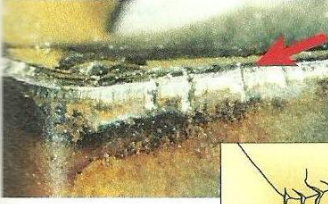
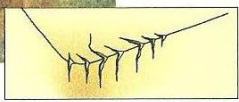
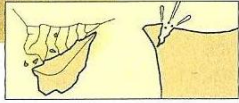
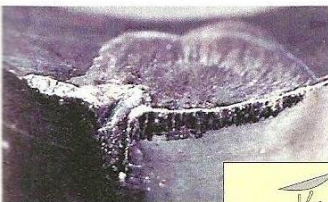
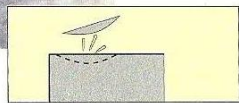
Problema:	Causa:	Solução:
Martelamento de cavacos 	A parte da aresta de corte que não está em uso é danificada pelo martelamento de cavacos. A face de topo e o suporte da pastilha podem ser danificados. Os cavacos são desviados contra a aresta de corte.	Mude o avanço. Selecione uma pastilha com outro tipo de geometria.
microlascas  	Pequenas fraturas na aresta de corte (microlascas) causando acabamento superficial ruim e desgaste de flanco excessivo. Classe muito quebradiça. Geometria da pastilha muito fraca. Aresta postiça.	Selecione uma classe mais tenaz. Selecione uma pastilha com uma geometria mais robusta (chanfro maior para pastilhas de cerâmica). Aumente a velocidade de corte ou selecione uma geometria positiva. Reduza o avanço no início do corte.
trincas por ação térmica  	Pequenas trincas perpendiculares à aresta de corte, causando microlascas e mau acabamento superficial. Trincas por ação térmica resultantes de variações de temperatura causadas por: - Usinagem intermitente. - Variação no fornecimento de refrigerante.	Selecione uma classe mais tenaz com melhor resistência a choques térmicos. O refrigerante deve ser aplicado em abundância ou não ser usado.
quebra de pastilha  	Quebra da pastilha que danifica não só a pastilha, mas também o calço e a peça. Classe muito quebradiça. Carga excessiva sobre a pastilha. Geometria da pastilha muito fraca. Pastilha muito pequena.	Selecione uma classe mais tenaz. Reduza o avanço e/ou a profundidade de corte. Selecione uma geometria mais robusta, de preferência uma pastilha de face única. Selecione uma pastilha mais espessa/menor.
fratura em camadas – cerâmica  	Pressão muito grande da ferramenta.	Reduza o avanço. Selecione uma classe mais tenaz. Selecione uma pastilha com chanfro menor.

Figura 61 – Desgastes, causas e soluções para torneamento. Fonte: Sandvik



8.3.2 Fresagem

Desgaste de ferramentas

		Causa:	Solução:
Desgaste de flanco e tipo de entalhe		a. Desgaste rápido de flanco provocando um acabamento superficial ruim ou medidas fora da tolerância.	a. Velocidade de corte muito alta ou pouca resistência ao desgaste. a. Avanço muito pequeno.
		b/c. Desgaste tipo entalhe provocando um acabamento superficial ruim e risco de quebra da aresta.	b/c. Materiais temperados. b/c. Cascas.
Microlascas		Pequenas fraturas na aresta de corte (microlascas) causando acabamento superficial insatisfatório e desgaste excessivo no flanco.	Classe muito quebradiça. Geometria da pastilha muito fraca. Aresta postiça.
Fissuras térmicas		Pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte, causando microlascas e acabamento superficial insatisfatório.	Fissuras térmicas devido a variações de temperatura causadas por: - Usinagem intermitente. - Fornecimento variado de fluido refrigerante.
Aresta postiça (B.U.E.)		Aresta postiça causando acabamento superficial insatisfatório e microlascas na aresta de corte quando a aresta postiça (B.U.E.) é removida.	O material da peça é soldado à pastilha devido a: Velocidade de corte baixa. Avanço pequeno. Geometria de corte negativa.
Acabamento superficial de má qualidade		Avanço muito grande. Posição errada da pastilha. Deflexão. Má estabilidade.	Reduza a velocidade de corte. Troque a posição. Verifique o balanço. Melhor estabilidade.
Vibrações		Dados de corte errados. Má estabilidade.	Reduza a velocidade de corte. Aumente a velocidade. Mude a profundidade de corte. Reduza o balanço. Melhor estabilidade.

Figura 62 – Desgastes, causas e soluções para fresagem. Fonte: Sandvik



9. Processos de Maquinagem: Torneamento e Fresagem

Neste capítulo, são apresentados os processos mais comuns em maquinagem, destaca-se; o torneamento e a fresagem.

Estas constituem o maior nº de aplicações na prática industrial, embora existam outras operações subsequentes para fabricação dos componentes maquinados.

9.1 Torneamento

Basicamente, o torneamento gera formas cilíndricas com uma ferramenta de corte e uma única aresta de corte, normalmente a ferramenta é fixa e a peça gira a uma dada rotação.

No geral, é o método de corte onde a ferramenta avança em sentido linear com movimentos de ferramenta axial (ao longo do eixo da peça - tornejar) e radial (na direcção do centro da peça - facejar).

Actualmente é um processo altamente otimizado, exigindo uma cuidadosa avaliação dos diversos factores de aplicação.

O processo varia em função da geometria e do material da peça, das condições, exigências, custos – factores esses que podem influenciar na ferramenta de corte.

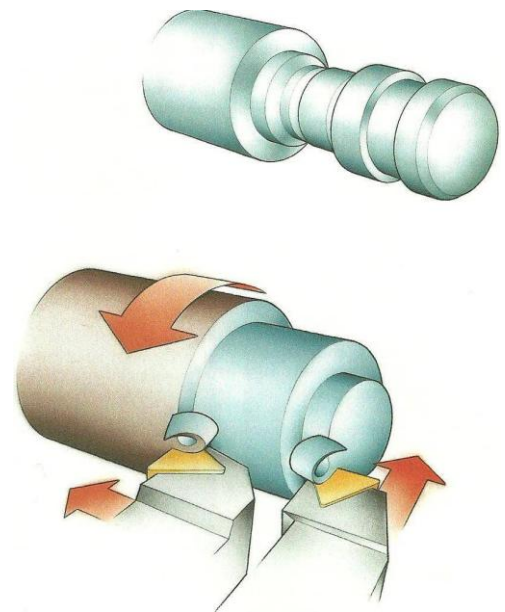


Figura 63 – Ilustração torneamento. Fonte: Sandvik

As ferramentas de corte actuais são projectadas, com base em décadas de experiência, pesquisa e desenvolvimento.

Desde a micro geometria, formato e fixação da pastilha intercambiável no porta ferramentas, convencional ou modular.

Há diversos tipos básicos de operações de torneamento, que exigem tipos específicos de ferramentas para que a operação seja executada da maneira mais eficiente.



Figura 64 – Suporte de torneamento. Fonte: Sandvik



O torneamento é a combinação de dois movimentos: rotação da peça e movimento de avanço da ferramenta.

Em algumas aplicações, a peça pode ser fixa, com a ferramenta em rotação, são exemplos operações de furação com furos laterais e fresagem.

As máquinas que produzem este tipo de componentes possuem um conjunto de eixos para além do eixo X (periferia para o centro da peça) e Z (ao longo da peça).

Estes eixos podem ser laterais, frontais e para manter a peça fixa usa-se ferramentas rotativas através do eixo C que bloqueia árvore permitindo o ataque à peça

Por exemplo, na figura 65, a fresa ataca a peça e a árvore encontra-se parada.

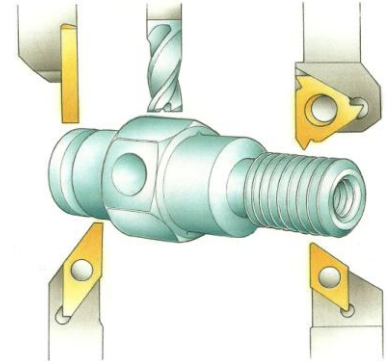


Figura 65 – Peça com diferentes operações ao torno. Fonte: Sandvik

O torneamento pode ser decomposto em várias operações e tipos de ferramentas, dados de corte e programação de certas operações.

Existem diferentes operações na execução de peças ao torno, são exemplo, o sangramento, ranhurar, perfilar e roscar.

Também podem ser classificadas como operações interiores e exteriores.

A figura 66, representa exemplos de várias operações ao torno: ataque frontal, lateral e operações internas e externo.

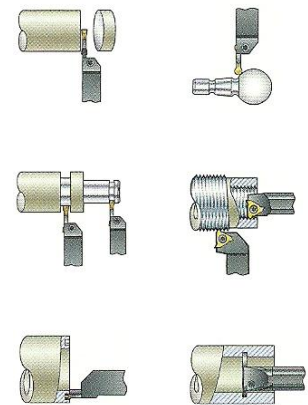


Figura 66 – Operações em torneamento. Fonte: Sandvik

A figura 67, representa uma peça torneada com várias operações possíveis: 1– Sangramento e corte,; 2- Ranhurar exterior; 3 – Torneamento; 4- Perilamento; 5- Ranhura oblíqua; 6- Ranhurar frontal; 7-Roscagem.

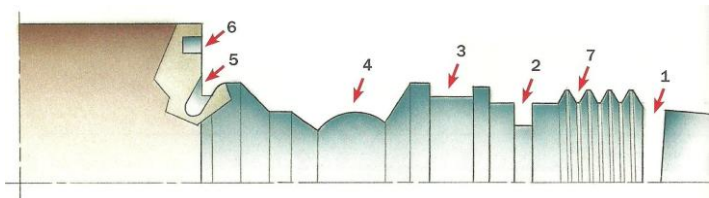


Figura 67 – Perfil de uma peça torneada. Fonte: Sandvik



9.1.1 Dados de corte

A peça gira no torno com uma certa **velocidade da árvore (n)** com um certo nº de rotações/minuto.

A **velocidade de corte (V_c)** varia proporcionalmente com o **diâmetro da peça (D)** a toronar, se o deslocamento ocorre do centro para periferia da peça aumenta V_c , em caso contrário diminui (periferia ate ao centro) considerando $n=constante$.

Esta velocidade de corte (V_c) é igual à velocidade para qual a aresta de corte maquina a peça.

A velocidade de corte é constante enquanto a velocidade de rotação e o diâmetro da peça permanecem com os mesmos valores.

Se a ferramenta avança da periferia para o centro existe variação do diâmetro que deve ser compensada pela rotação da árvore para manter V_c constante.

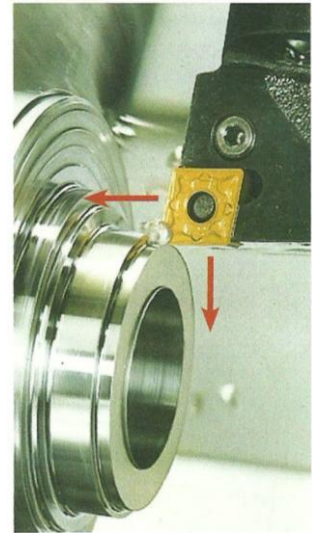


Figura 68 – Movimento radial e axial da ferramenta em torneamento. Fonte: Sandvik

Por exemplo, no facejamento da periferia até ao centro diminuiu o diâmetro e aumenta a rotação da árvore com $V_c=constante$ e vice-versa do centro para a periferia.

Ao longo da variação de diâmetro existe uma faixa onde o diâmetro é muito reduzido e próximo do centro em que essa compensação é impraticável devido à limitação da velocidade da árvore da máquina (para existir compensação n deveria ser infinita).

O **avanço (f_n)** em mm/rot. é o movimento da ferramenta em relação à peça que gira e as suas principais responsabilidades são a qualidade superficial da peça e a formação da apara.

A **profundidade de corte (a_p)** representa a diferença entre a superfície maquinada e não maquinada e é sempre medida em ângulo recto em relação à direcção de avanço da ferramenta.

A posição da aresta de corte é expressa pelo **ângulo de posição (K_r)**, isto é, o ângulo entre a aresta de corte e a direcção do avanço.

É importante na selecção de uma ferramenta para uma dada operação de torneamento e varia entre 45° e 90° .

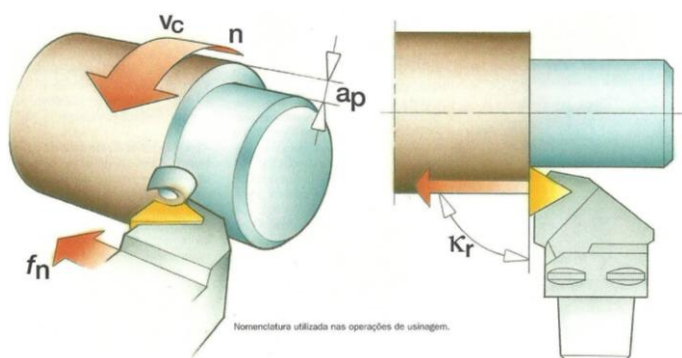


Figura 69 – Parâmetros de corte em torneamento. Fonte: Sandvik



9.1.2 Formato e raio da ponta pastilha

Vista de cima a ferramenta/pastilha possui um formato básico e um raio nos cantos.

O formato da pastilha varia consideravelmente podendo também ser redondo; e o ângulo da ponta pode ser tão pequeno quanto 35° e tão grande como 100° e também a pastilha redonda.

No meio desses extremos estão formatos quadrados, triangulares e rômnicos, com ângulos de ponta de 55° , 60° e 80° .

A faixa de ângulos de ponta apresenta propriedades que vão da mais alta robustez, passando por operações de desbaste, até ângulos de ponta pontiagudos que tenham maior acessibilidade para perfis mais exigentes.

Com a alta resistência da aresta ao longo do fio de corte proporcionado por um ângulo de ponta grande e uma área de contacto maior vem a tendência para vibrações no processo de maquinagem e altas exigências de potência.

Com um ângulo de ponta pequeno, obtêm-se grande acessibilidade, porém a aresta fica mais frágil.

Sempre que possível, é necessário usar uma escolha de equilíbrio para a operação em questão.

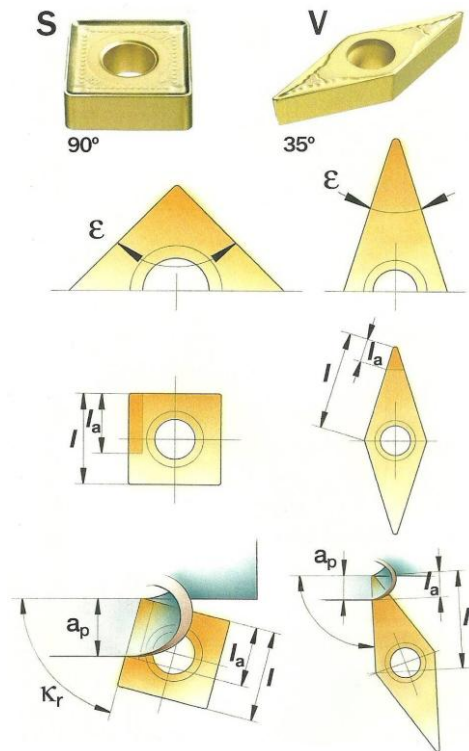


Figura 70 – Representa 2 pastilhas típicas para desbaste 90° (S) e acabamento 35° (V) Comparação de ângulo de ponta (ϵ), comprimento da aresta de corte (l), comprimento efectivo da aresta de corte (l_a), ângulo de posição (k_r) e profundidade de corte (a_p). Fonte: Sandvik

O **raio de ponta (r_ϵ)** é um factor importante em muitas operações de torneamento e deve ser levado em consideração, já que a escolha certa afecta a robustez da aresta de corte e acabamento superficial da peça.

Estão disponíveis pastilhas com diversos raios de ponta, em que o menor é teoricamente zero, mas em que na realidade $0,2 \text{ mm}$ é o menor tamanho encontrado.

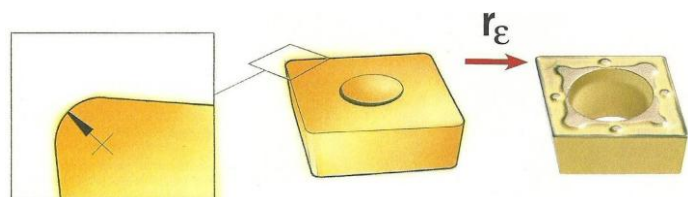


Figura 71 – Representação do raio de ponta (r_ϵ) da pastilha. Fonte: Sandvik



No torneamento por desbaste, pode ser escolhido o maior raio possível, para permitir maior robustez, sem causar aumento de vibrações.

O valor do avanço da ferramenta pode ser afectado pelo raio da ponta ou vice-versa.

Um maior raio de ponta permite uma aresta mais robusta, capaz de suportar altos avanços para uma área de contacto apropriada da aresta de corte.

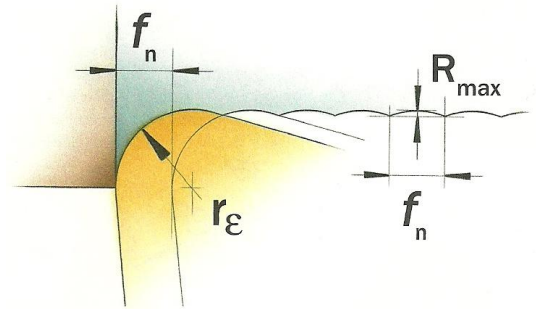
Um menor raio de ponta significa uma ponta mais fraca, porém capaz de cortes com maiores exigências.

Em operações de torneamento, o acabamento superficial gerado será directamente influenciado pela combinação de raio de ponta e o avanço.

A superfície gerada por uma ferramenta de corte único é originada à medida que o raio de ponta move-se ao longo da superfície da peça.

A altura máxima teórica de perfil é calculada por meio de uma fórmula simples, dando indicação dos valores esperados que podem ser comparados com a exigência do desenho técnico.

Para um dado raio de ponta e fixando o valor de $R_{\max}$ podemos obter o valor do avanço.



$$R_{\max} = \frac{f_n^2}{8 \times r_E} \times 1000$$

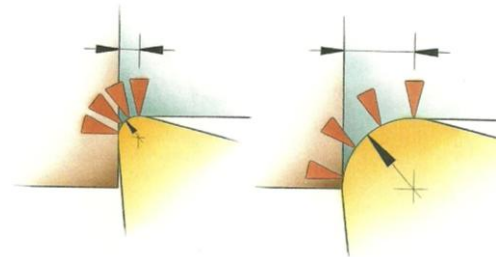


Figura 72 – Influência do raio de ponta e avanço no acabamento superficial. Fonte: Sandvik

9.1.3 Tecnologia Wiper

A tecnologia Wiper foi desenvolvida na última década pela empresa de ferramentas de corte Sandvik.

A geometria da ponta da pastilha é um conjunto de raios e segmentos de recta com o objectivo de diminuir a rugosidade na peça por diminuição da altura do perfil maquinado.

A tecnologia de pastilhas Wiper intercambiáveis oferece uma nova maneira de se obter desempenho de produção melhorado onde o importante é aumentar o valor do avanço.



Avanço	Standard	Wiper	Standard	Wiper
mm	r_E 1.2 R_a μ m	r_E 1.2 R_a μ m	r_E 1.6 R_a μ m	r_E 1.6 R_a μ m
0.15	0.47	0.30	—	—
0.18	0.68	0.34	—	—
0.20	0.83	0.42	0.63	0.32
0.22	1.16	0.58	0.87	0.44
0.25	1.50	0.65	1.12	0.56
0.28	1.88	0.68	1.41	0.70
0.30	2.16	0.72	1.62	0.78
0.35	2.93	0.97	2.20	0.80
0.40	3.83	1.26	2.88	0.95
0.45	5.70	1.88	4.27	1.41
0.50	7.03	2.32	5.27	1.74
0.55	8.51	2.40	6.38	2.10
0.60	10.13	2.53	7.59	2.40
0.65	—	—	8.91	2.50
0.70	—	—	10.34	2.80
0.85	—	—	15.24	3.81
0.90	—	—	17.09	4.27

Figura 73 – Comparação da rugosidade pastilha standard vs pastilha wiper. Fonte: Sandvik



O acabamento superficial e a tolerância gerados são afectados por uma combinação de tamanho de raio, avanço, estabilidade de maquinagem, peça, fixação da ferramenta e condições da máquina.

No torneamento convencional, o acabamento superficial deve estar directamente relacionado com o avanço da ferramenta e o tamanho do raio de ponta.

Um avanço grande gerará tempos de corte menores, mas acabamento superficial pior.

Um grande raio de ponta gera melhor acabamento superficial e proporciona maior resistência.

Mas um raio de ponta excessivo provoca tendência a vibrações e quebra apara insatisfatório.

O fabricante anuncia duas promessas: o dobro do avanço e o mesmo acabamento superficial ou para o mesmo avanço duas vezes melhor o acabamento superficial.

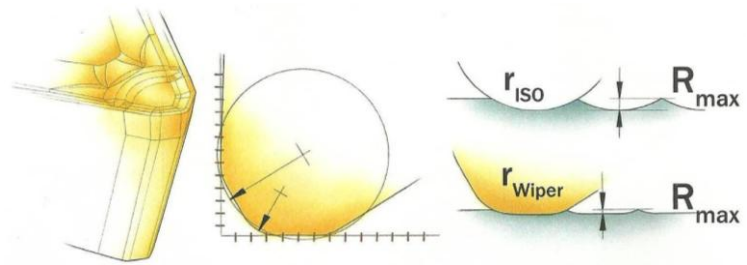


Figura 74 – Configuração da ponta da ferramenta. Fonte: Sandvik

9.1.4 Porta ferramentas

Os modernos porta ferramentas foram projectados a fim de permitirem performance ideal de maquinagem em diferentes aplicações e normalmente em uma área ampla.

O tipo de operação e, em certo grau o tamanho da peça e os cortes, determinam a selecção do sistema de fixação da aresta.

Uma operação de desbaste pesado em peças grandes possui exigências consideravelmente diferentes das de uma operação de acabamento em maquinagem de peças pequenas.

A selecção de um porta ferramentas está ligado à selecção da pastilha, esta escolha é influenciada pelas direcções de avanço, tamanho dos cortes, peça e acessibilidade exigida na máquina.

Os tipos de porta ferramentas são definidos pelo ângulo de posição, formato e tamanho da pastilha a utilizar.

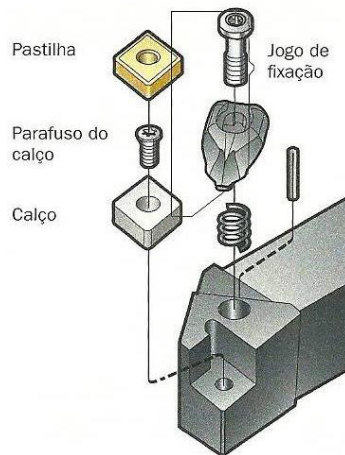
Para garantir estabilidade durante a maquinação, deve ser escolhido o maior tamanho possível de porta ferramenta apropriado para a aplicação.

Isso permite a proporção ferramenta-balanço mais vantajosa e a base mais rígida para a pastilha.

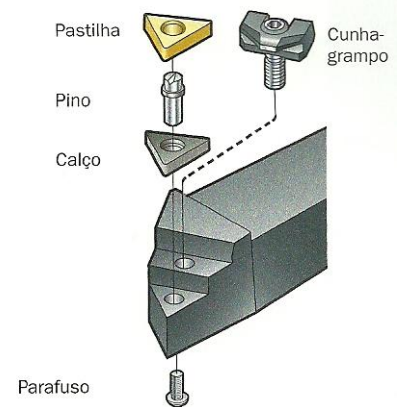


Abaixo estão representados alguns exemplos de sistemas de fixação da marca Sandvik:

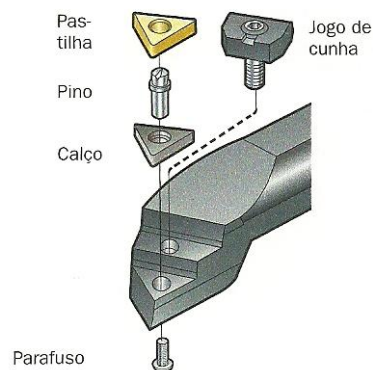
Desenho de fixação rígida (RC)



Desenho da cunha-grampo



Desenho de fixação por cunha



Desenho de fixação por alavanca

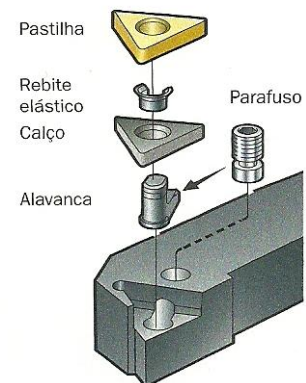
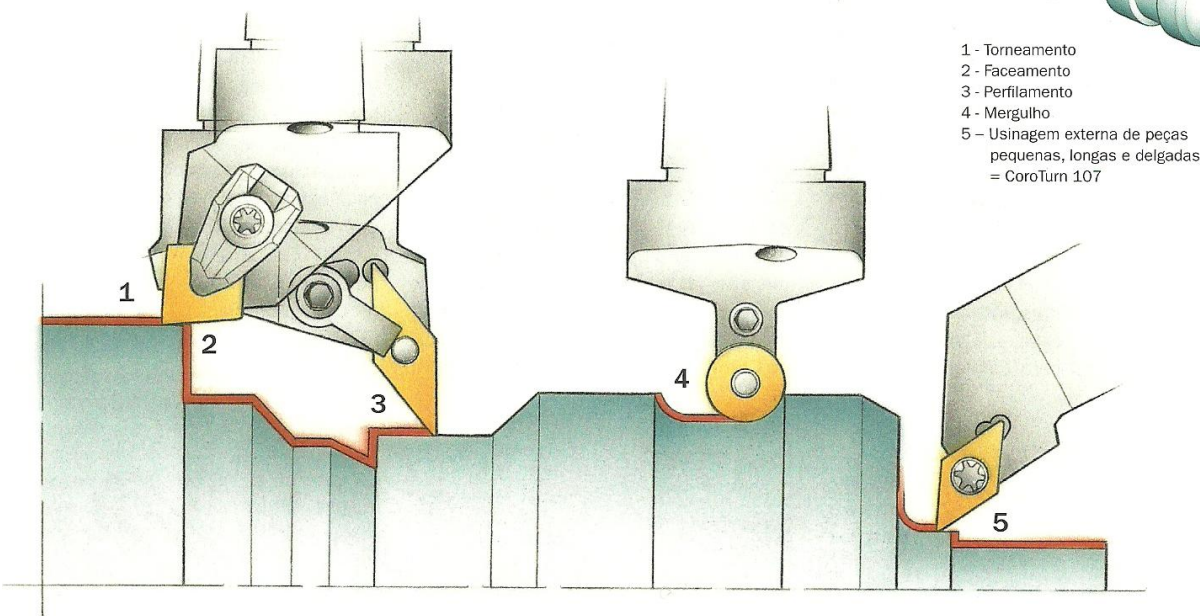


Figura 75 – Exemplos de sistemas de fixação marca Sandvik. Fonte: Sandvik



Torneamento

Porta-ferramentas para torneamento externo



		Pastilhas negativas			Pastilhas positivas CoroTurn 107	Pastilhas de cerâmica e de CBN	
Sistema de ferramenta		CoroTurn RC	T-MAX P			CoroTurn RC	T-MAX
Sistema de fixação		 Fixação rígida	 Fixação por alavanca	 Fixação por cunha-grampo	 Fixação por parafuso	 Fixação rígida	 Fixação por grampo de topo
Operação	torneamento/faceamento 	●●	●	●	●	●●	●
	Perfilamento 	●●	●	●	●●	●●	●
	Faceamento 	●●	●	●	●	●●	●
	Mergulho 	●		●●		●●	

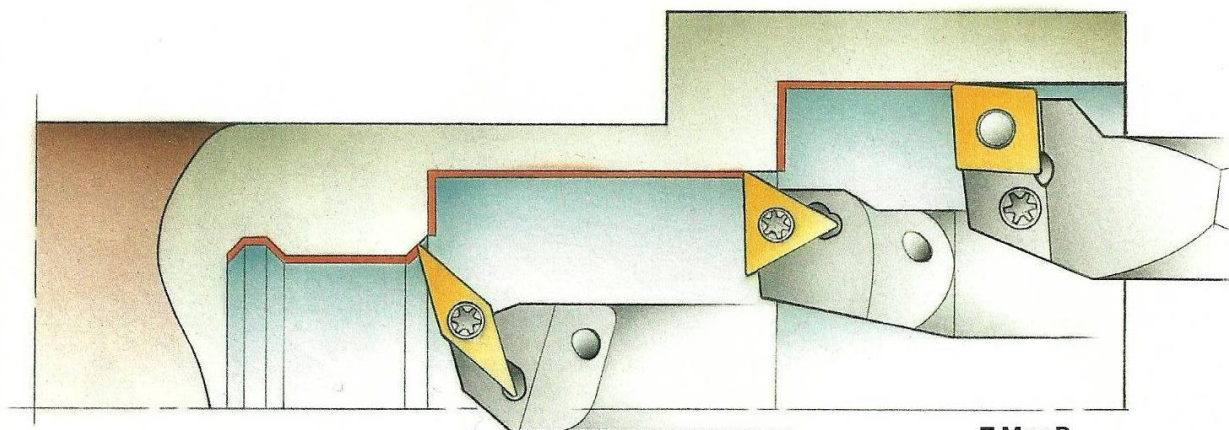
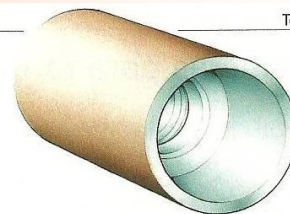
●● = Sistema recomendado de porta-ferramentas

● = Alternativa



Torneamento

Porta-ferramentas para torneamento interno



CoroTurn XS

Usinagem interna de furos de diâmetro extra pequenos, a partir de diâmetros de 1 mm (Usinagem de peças pequenas)



CoroTurn 107

Primeira escolha para usinagem interna de furos pequenos e médios, a partir de 8 mm de diâmetro.

CoroTurn 111

Para otimização de operações de torneamento interno que exijam pequenas forças de corte com balanços de ferramenta longos.

T-Max P

Torneamento interno de furos a partir de 20 mm de diâmetro, com balanços de ferramenta curtos e condições estáveis.

Sistema de ferramenta	Pastilhas negativas			Pastilhas positivas		Pastilhas de cerâmica e de CBN
	CoroTurn RC	T-MAX P		CoroTurn 107	CoroTurn 111	T-MAX
Sistema de fixação	 Fixação rígida	 Fixação por alavanca	 Fixação por cunha-grampo	 Fixação por parafuso		 Fixação por grampo
Operação	 Torneamento/ faceamento	●●	●●	●	●●	●●
	 Perfilamento	●	●		●●	●●
	 Faceamento	●	●		●●	●

●● = Sistema de porta-ferramentas recomendado

● = Alternativa

Figura 76 – Exemplos de porta ferramentas para uso interno e externo. Fonte: Sandvik



9.1.5 Torneamento interno

A maioria das operações de torneamento que ocorre com torneamento externo, também pode encontra-se o torneamento interno.

No torneamento externo, o balanço da ferramenta não é afectado pelo comprimento da peça e o tamanho do porta ferramenta pode ser escolhido de forma que suporte as forças de corte e as tensões que surgem durante a maquinação.

No torneamento interno, a escolha da ferramenta é mais restrita devido ao diâmetro do furo da peça, já que a profundidade do furo determina o balanço.

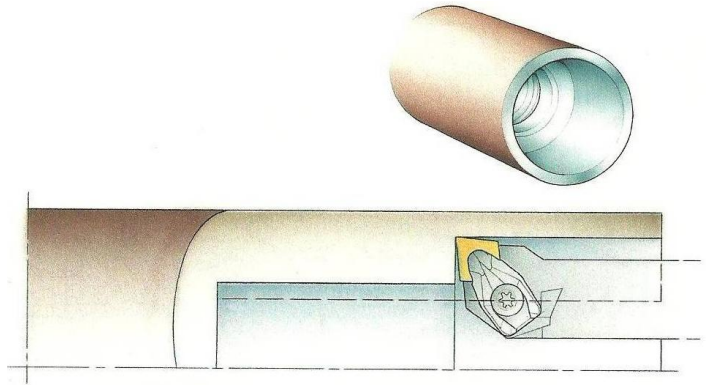


Figura 77 – Torneamento interno e balanço da ferramenta. Fonte: Sandvik

Uma regra geral que se aplica a todas as operações de maquinagem é a de sempre minimizar o balanço da ferramenta e seleccionar o maior tamanho possível, para obter a melhor estabilidade e precisão.

A estabilidade é melhor para diâmetros da ferramenta maiores, mas frequentemente as possibilidades são limitadas devido ao diâmetro do furo na peça e evacuação da apara.

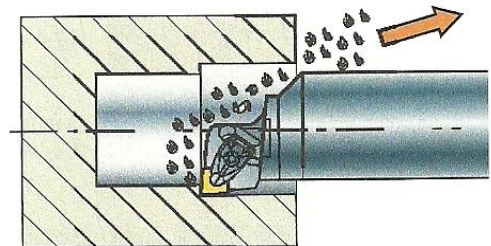


Figura 78 – Evacuação da apara é um factor crítico no torneamento interior. Fonte: Sandvik

9.1.5.1 Forças de corte no torneamento interno

Quando se usa uma ferramenta para torneamento interior, uma força de corte tangencial e uma força de corte radial forçarão a ferramenta à flexão para fora da peça.

A força tangencial força a ferramenta para baixo e para fora da linha de centro provocando a redução do ângulo de folga da ferramenta.

Situação crítica no torneamento interior de furos pequenos devido ao possível contacto entre a ferramenta e a parede do furo.

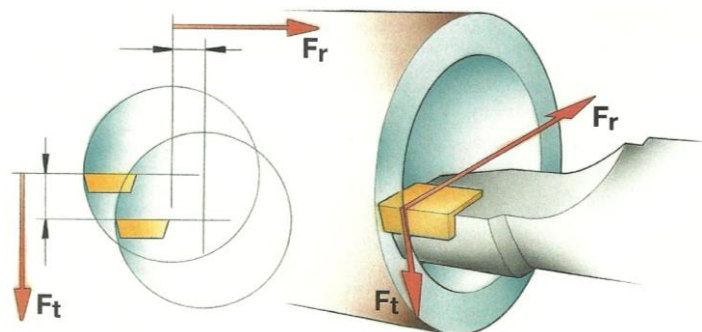
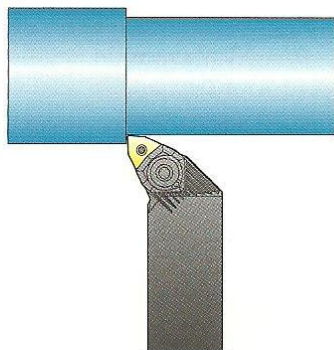


Figura 79 – Esquema das forças de corte tangencial e radial. Fonte: Sandvik



9.1.6 Nomenclatura e fórmulas em torneamento



Rotação do eixo árvore	$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad (1/\text{min})$	
Veloc. de corte	$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_c}{1000} \quad (\text{m/min})$	
Acabamento superficial	$R_a = \frac{f^2 \cdot 50}{r_\epsilon} \quad (\mu\text{m})$ $R_a = \frac{R_t}{3,5} \quad (\mu\text{m})$ $R_y = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (\text{mm})$	
Rugosidade teórica	$R_t = k \cdot \frac{f^2 \cdot 1000}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (\mu\text{m})$	
Potência de corte	$P_c = \frac{v_c \cdot f \cdot a_p}{25} \quad (\text{kW})$ $P_c = \frac{v_c \cdot f \cdot a_p \cdot k_c}{60\,000 \cdot \eta} \quad (\text{kW})$ $k_c = \frac{1-0,01 \cdot \gamma_0}{h_{mc}} \cdot k_{c1.1} \quad (\text{N/mm}^2)$ $h = f \cdot \sin \kappa$	
Taxa de remoção de material	$Q = v_c \cdot f \cdot a_p \quad (\text{cm}^3/\text{min})$	
	$a_p = \text{Prof. de corte} \quad (\text{mm})$ $D_c = \text{Diâmetro da peça} \quad (\text{mm})$ $f = \text{Taxa de avanço} \quad (\text{mm/rot.})$ $h = \text{Espessura do cavaco} \quad (\text{mm})$ $k = \text{Constante}$ 1,4 para aços e aços inoxidáveis 1,0 para ferros fundidos $k_c = \text{Força específica de corte} \quad (\text{N/mm}^2)$ $k_{c1.1} = \text{Força específica (1 mm}^2\text{)} \quad (\text{N/mm}^2)$ (consulte a página 616) $m_c = \text{Expoente (veja a pág 616)}$ $n = \text{Rotação do eixo árvore} \quad (1/\text{min})$ $P_c = \text{Potência de corte} \quad (\text{kW})$ $Q = \text{Taxa de remoção de material} \quad (\text{cm}^3/\text{min})$ $R_a = \text{Acabamento superficial} \quad (\mu\text{m})$ $r_\epsilon = \text{Tamanho do raio de ponta} \quad (\text{mm})$ $R_t = \text{Rugosidade teórica} \quad (\mu\text{m})$ $R_y = \text{Altura máx. do perfil} \quad (\text{mm})$ $v_c = \text{Veloc. de corte} \quad (\text{m/min})$ $\kappa = \text{Ângulo de posição (ataque)} \quad (^\circ)$ $\eta = \text{Rendimento/Eficiência}$ $\gamma_0 = \text{Ângulo de saída efetivo} \quad (^\circ)$	

Figura 80 – Nomenclatura e fórmulas em torneamento. Fonte: Seco Tools



9.2 Fresagem

A fresagem moderna é um processo de maquinagem bastante universal.

Durante os últimos anos, o processo de fresagem evoluiu, lado a lado com o desenvolvimento das máquinas ferramentas, para um processo que envolve uma imensa variedade de configurações.

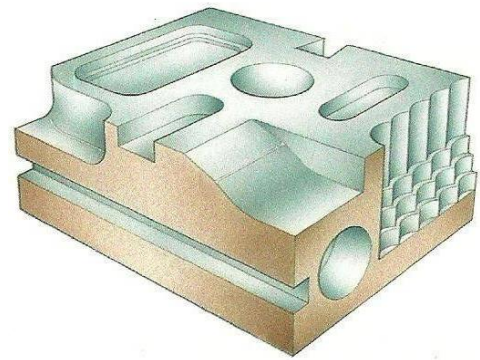


Figura 81 – Ilustração de operações de fresagem. Fonte: Sandvik

Além de todas as aplicações convencionais, a fresagem é uma interessante alternativa para quem precisa de fazer furos, abrir cavidades, maquinar superfície, executar roscar, etc.

O desenvolvimento das ferramentas também tem contribuído com as novas possibilidades, juntamente com ganhos de produtividade, fiabilidade e a constante qualidade que se tem conseguido com a tecnologia de pastilhas intercambiáveis e de fresas inteiriças em metal duro.

A fresagem é, basicamente, o corte com uma ferramenta rotativa de múltiplas arestas de corte que executa movimento programados sobre uma peça em quase todas as direcções.

É esta acção de corte que torna o processo de fresagem um método de maquinagem eficiente e versátil.

Cada aresta de corte remove uma certa quantidade de material, com acção de corte limitada, tornado a formação e saída da apara um aspecto secundário.



Figura 82 – Exemplos de fresas de pastilha ou inteiriças. Fonte: Sandvik

Na maioria dos casos, a fresagem ainda é utilizada na maquinagem de superfícies planas (facejamento) - porém há um aumento significativo de outras formas de maquinação e de superfícies complexas com o aumento do número de centros de maquinação de 5 eixos/multitarefa.

Os principais tipos de operações em fresagem, em relação ao efeito sobre a peça, ou do ponto de vista da trajectória da ferramenta, são os seguintes: 1 - Facejamento; 2 - Fresagem



de cantos a 90°; 3 - Fresagem de perfis; 4 - Fresagem de cavidades; 5 - Fresagem de canais/ranhuras; 6 - Tornofresagem; 7 - Fresagem de roscas; 8 - Cortes; 9 - Fresagem com altos avanços; 10 - fresagem de mergulho; 11 - Fresagem em rampa; 12 - Fresagem por interpolação helicoidal; 13 - Fresagem por interpolação circular; 14 - Fresagem trocoidal.

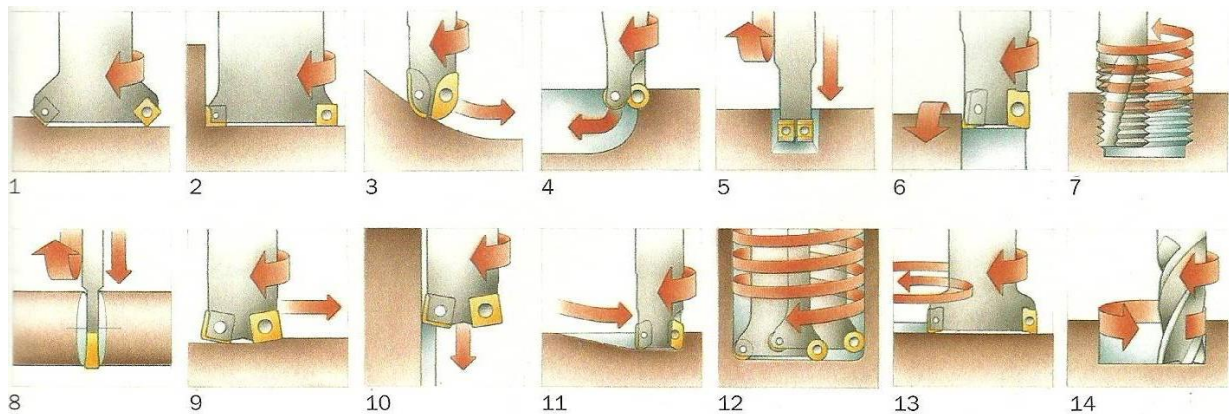


Figura 83 – Principais tipos de operações em fresagem. Fonte: Sandvik

9.2.1 Definições básicas em fresagem

Uma fresa normalmente executa uma ou um grupo das seguintes operações básicas de corte: radial, periférica e axial.

Através das variações dos métodos de fresagem, pode-se redireccionar a operação de corte nesses sentidos de avanço em relação ao eixo de rotação da ferramenta.

Por exemplo, o facejamento é uma operação de corte combinado as aresta de corte; principalmente das periféricas e, até certo ponto daquelas da frente da ferramenta.

A fresa gira, em relação à peça, perpendicularmente à direcção do avanço radial.

Geralmente, na fresagem de disco e facejamento usam-se as arestas de corte periféricas da ferramenta.

A fresa gira em torno do eixo paralelo ao avanço tangencial.

Na fresagem em mergulho usa-se as arestas de corte da face ou extremidade da ferramenta quando ela avança axialmente, executando uma operação parcial de furação.

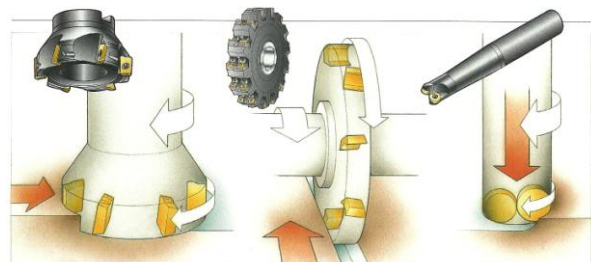


Figura 84 – Tipos básicos de fresas. Fonte: Sandvik



Para preparar a operação de fresagem, deve-se estabelecer uma série de definições.

Assim, definimos a dinâmica da fresa rotativa com um determinado diâmetro (D_c), tendo os diâmetros maiores (D_{c2} ou D_{c3}) avançando contra a peça, com um diâmetro efectivo de corte (D_e), a base da velocidade de corte.

A **velocidade de corte (V_c)** em m/min indica a velocidade superficial na qual a aresta de corte trabalha na peça.

Este é um valor específico da ferramenta e parte e dos dados de corte que garante uma execução eficaz da operação dentro do que se esperado material da ferramenta.

A **velocidade do fuso (n)**, em rpm, é o número de rotações da fresa por minuto.

Este é um valor específico da máquina, que é calculado em função da velocidade de corte recomendada para uma determinada operação.

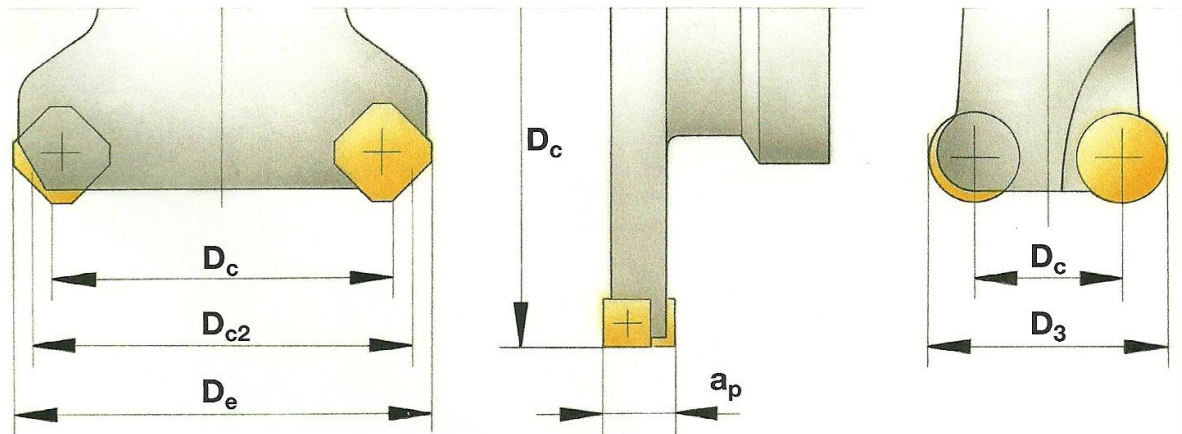


Figura 85 – Definição dos diâmetros nos 3 tipos básicos de fresas. Fonte: Sandvik

Avanço por minuto, também conhecido como avanço da mesa, avanço da máquina ou **velocidade de avanço (V_f)**, em mm/min, é o avanço da ferramenta em relação à peça em unidade de distância por tempo em função do avanço por dente e número de dentes da fresa.

A **espessura máxima da apra (hex)**, em mm, é o mais importante indicador de limitação de uma ferramenta em uma determinada operação.

As arestas de corte de uma fresa são desenvolvidas e testadas com um valor inicial recomendado e valores mínimo e máximo.

O **avanço por dente (f_z)**, em mm, é um valor para cálculo do avanço da mesa no processo de fresagem.

Como a fresa é uma ferramenta com várias arestas de corte, é necessário um valor para garantir o trabalho de cada aresta de corte em condições satisfatórias. É a distância linear percorrida pela ferramenta enquanto um determinado dente está em processo de corte.



O valor de avanço por dente é calculado a partir da espessura máxima recomendada da apara.

O **número de dentes da fresa (z_n)** varia bastante e serve para determinar o avanço da mesa; enquanto o **número efectivo de dentes (Z_c)** é o número de dentes em contacto com o material.

O material, largura da peça, estabilidade, potência e acabamento superficial determinam a quantidade de dentes necessária.

Avanço por rotação (f_n), em mm/rot. é um valor usado para o cálculo de avanço e , geralmente, determinar a capacidade de acabamento de uma fresa.

É um valor auxiliar que indica o quanto a ferramenta se desloca durante a rotação.

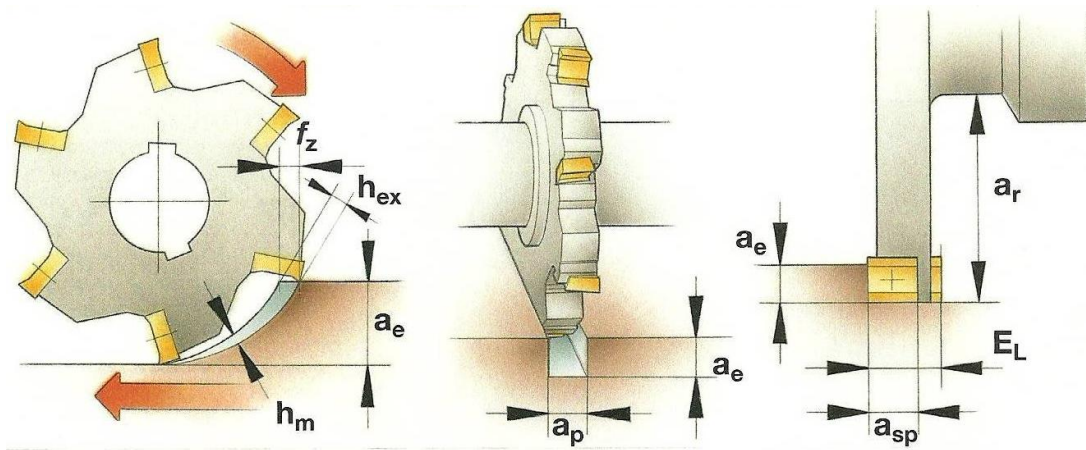


Figura 86 – Esquemática do avanço, profundidade e espessura da apara. Fonte: Sandvik

A **profundidade de corte (a_p)**, em mm (axial), corresponde ao volume de material que a ferramenta remove à peça.

Trata-se da distância que a ferramenta penetra na superfície não maquinada.

A **largura de corte (a_e)**, em mm (radial, é a largura da peça que está sob a acção do diâmetro da fresa.

É a distância transversal em relação à superfície que está a ser maquinada ou, se o diâmetro da ferramenta for menor, é a distância coberta pela ferramenta.

A espessura média da apara (h_m) é um valor importante para determinar a força específica e depois para os cálculos da potência.

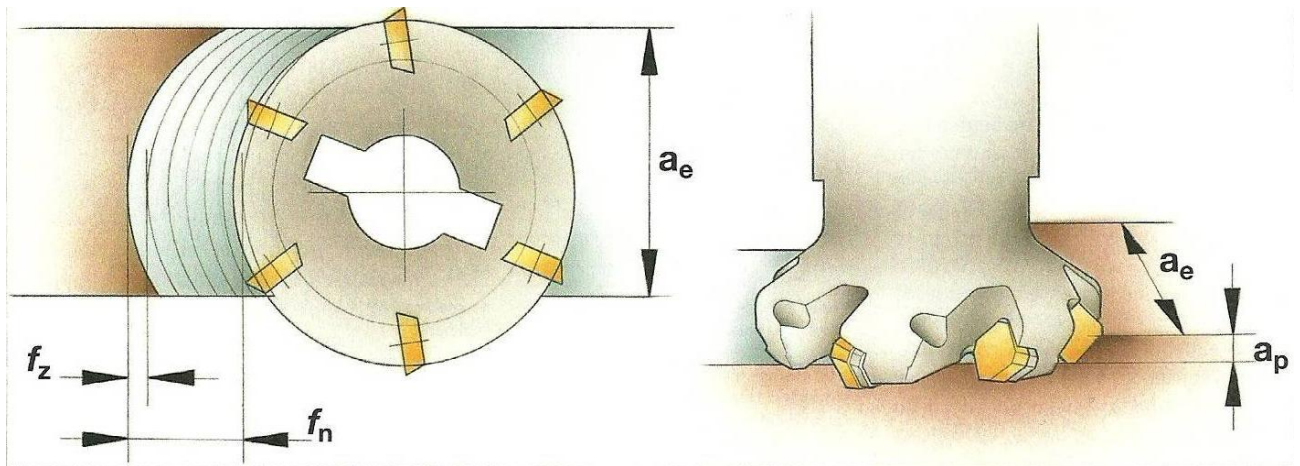


Figura 87 – Vista de topo e lateral de uma fresa com representação dos avanços e profundidades.
Fonte: Sandviik

A taxa de remoção (Q) é o volume de material removido, em mm^3 , em um certo período de tempo e pode ser estabelecida usando os valores da profundidade, largura e avanço de corte.

Tempo de maquinação (T_c), ou período de acção da fresa, é o comprimento de maquinação dividido pelo avanço da mesa.

A força de corte específica (k_{ct}) é um factor de cálculo de potência levando-se em conta o material em questão e a relação com a espessura da aparta.

Potência (P_c) e eficiência (h) são valores específicos de uma máquina ferramenta em que a potência útil pode ser calculada para garantir que a máquina possa trabalhar com a fresa em questão e executar a operação.

Em relação à geometria de corte na fresagem, o ângulo de posição (κ_r), ou o ângulo principal da aresta de corte da fresa, é o mais importante factor de influência na direcção da força de corte e espessura da aparta.

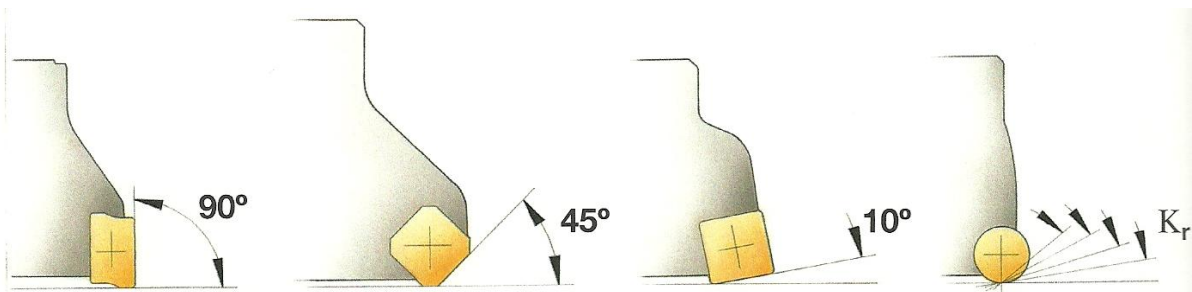


Figura 88 – Variação do ângulo de posição de uma fresa. Fonte: Sandvik



A selecção da geometria da pastilha foi reduzida a três áreas práticas de diferentes efeitos na operação de corte: geometrias de aplicação leve (L), geral (M) e pesada (H).

O passo (u) é a distância entre dentes consecutivos da fresa.

É a distância entre um ponto da aresta de corte para o mesmo ponto da aresta de corte seguinte.

As fresas geralmente são classificadas como de passo largo (L), fino (M) e extra fino (H).

Os diferentes passos influenciam a estabilidade da operação, consumo de potência e adequação do material da peça.

Um passo diferencial significa um espaçamento desigual dos dentes da fresa e trata-se de um meio eficaz de se opor às tendências de vibração.

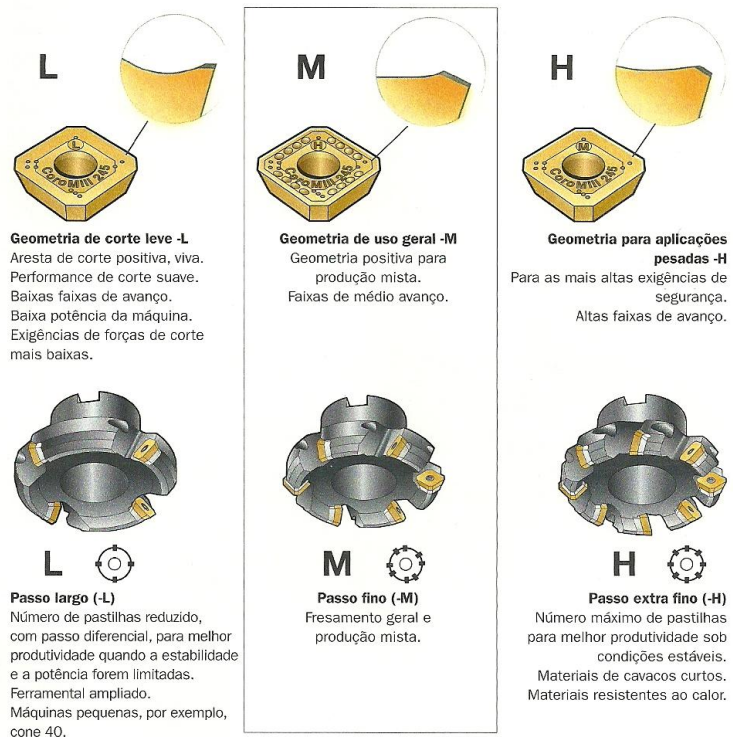


Figura 89 – Tipos de passo das fresas e suas características. Fonte: Sandvik

9.2.2 Sentido de corte: Concordante ou Discordante

Durante a operação de fresagem, a peça pode desloca-se no mesmo sentido ou em sentido contrário ao sentido de rotação e isso afecta a natureza do início e final do corte.

Na fresagem concordante, o sentido de avanço da peça é o mesmo da rotação da fresa na área de corte.

A espessura da apra vai diminuindo, desde o início, até chegar a zero no final do corte em fresagens periféricas.

Na fresagem discordante, o sentido de avanço da peça é oposto ao da rotação da fresa na área de corte.

A espessura da apra começa em zero e vai aumentando até ao final do corte.

Na fresagem discordante, com a pastilha iniciando o seu corte com uma espessura de apra zero, temos grandes forças de corte que tendem a afastar a fresa e a peça uma da outra.

A pastilha tem que penetrar, criando um atrito a altas temperaturas e, geralmente, entra em contacto com uma superfície com encruamento causado pela pastilha anterior por deformação plástica.

As forças tendem a levantar a peça da mesa.

Na fresagem concordante, a pastilha começa a cortar gerando uma apra de grande espessura.



Isso evita o efeito do atrito com menos calor e o mínimo de possibilidade de encruamento por deformação plástica.

A grande espessura da apra é vantajosa e as forças de corte tendem a empurrar a peça contra a fresa, mantendo a pastilha no corte.

Durante a fresagem, a apra muitas vezes aloja-se na aresta de corte e giram até inicia o próximo corte.

Na fresagem discordante, a apra pode facilmente ficar presa ou enfiada entre a pastilha e a peça podendo provocar danos na pastilha.

Na fresagem concordante, a mesma apra se partiria pela metade e não danificaria a aresta de corte.

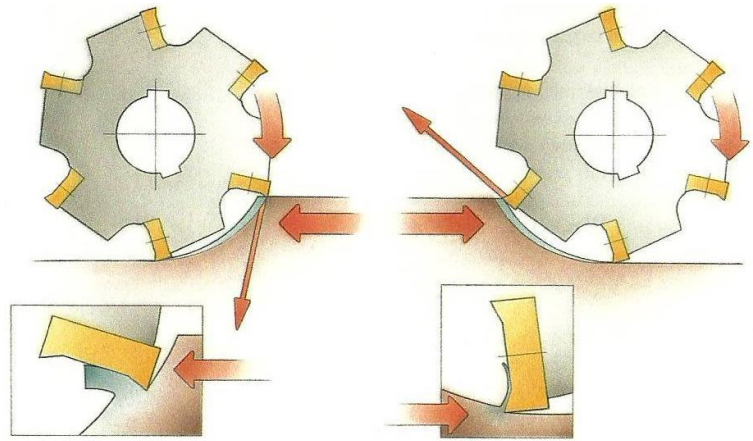


Figura 90 – Fresagem concordante e discordante. Fonte: Sandvik

Sempre que a máquina ferramenta, os acessórios e a peça permitam, é preferível a fresagem concordante.

No entanto, a fresagem concordante tem certas exigências no caso em que as forças tendem a empurrar a fresa enquanto seguram a peça.

Isso exige que a máquina resolva o problema da variação do avanço da mesa através da eliminação da folga.

Quando a ferramenta penetra na peça, o avanço aumenta involuntariamente o que pode resultar em uma espessura excessiva da apra e quebra da aresta de corte.

Nesses casos, deve-se optar pela fresagem discordante.

Também quando houver grandes variações de tolerância no trabalho, a fresagem discordante pode ser mais vantajosa.

Os acessórios devem ser adaptados de modo a prender a peça correctamente, além de se ter o tamanho de fresa correcto para o trabalho.

No entanto, quanto às tendências de vibração, o sentido das forças de corte é mais vantajoso.

9.2.3 Considerações na entrada e saída de fresas

Sempre que uma das pastilhas da fresa em corte, a aresta de corte é submetida a uma carga, que depende da secção transversal da apra, do material da peça e do tipo de corte.

O tipo certo de contacto inicial e final, entre a aresta e o material, é um aspecto importante do processo de fresagem.

O posicionamento correcto da fresa em relação à entrada das arestas de corte é importante, existem três situações distintas:



1. A linha de centro da fresa está bem deslocada em relação à largura da peça e o impacto da entrada é absorvido pela ponta mais externa da pastilha, significando que a carga inicial é absorvida pela parte mais sensível da ferramenta.

A fresa também sai do corte com esta ponta por último, significando que as forças de corte estão agindo na extremidade mais externa até à pastilha sair de repente da peça. Isso é um choque de forças.

2. A linha de centro da fresa está alinhada com a extremidade da peça. A pastilha sai do corte quando a espessura da apra está no máximo resultando cargas muito altas na entrada e saída.

3. A linha de centro da fresa está bem dentro da largura da peça.

O impacto inicial na entrada no corte é depois absorvido ao longo da aresta de corte, longe da extremidade sensível.

Também a saída, a pastilha sai do corte de forma gradual.

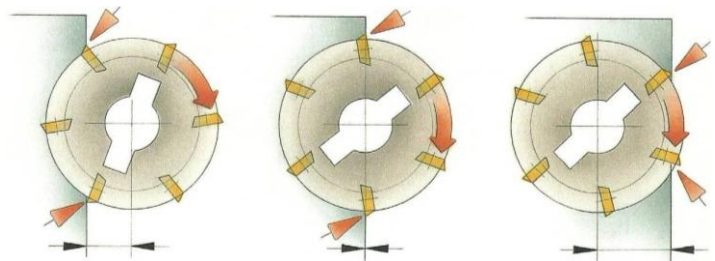


Figura 91 – Variação de entrada e saída em relação à posição da fresa. Fonte: Sandvik

O modo como a aresta de corte sai do material da peça é importante.

Quando o corte está próximo do fim, o resto do material pode ceder um pouco, reduzindo a folga da pastilha.

Também, uma força de tracção momentânea é criada ao longo da parte frontal da pastilha, enquanto a apra sai, quase sempre dando origem a uma rebarba na peça.

Essa força de tracção coloca em risco a segurança da aresta de corte.

Esta situação piora quando a linha de centro da fresa coincide, ou se aproxima da extremidade da peça.

Neste caso, a fresa deve sair da peça em ângulos positivos, e não negativos, em relação às arestas de corte.

Quando há falhas na superfície da peça complica a maquinagem.

Neste caso, a solução, geralmente, é uma aresta de corte mais resistente, enquanto, às vezes, o passo ou a geometria da fresa ter de ser reconsiderada.

A fresagem deve ser analisada como um todo, considerando todos os aspectos para se chegar ao tipo mais adequado de fresa e pastilha.

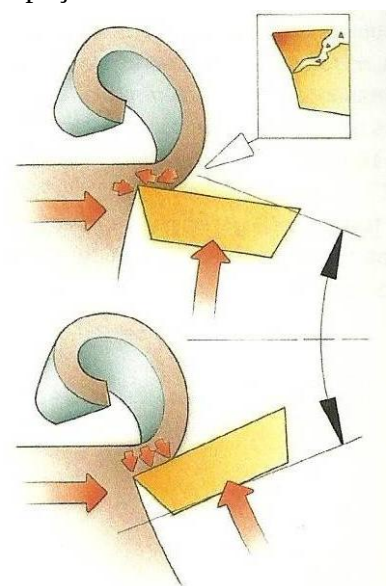


Figura 92 – Efeito do ângulo de saída na aresta de corte. Fonte: Sandvik



9.2.4 Ângulo de posição

O ângulo de posição no processo de fresagem também tem a ver com a espessura da apra.

Este é o ângulo entre a aresta de corte principal da pastilha e o corpo da fresa.

A espessura da apra, as forças de corte e a vida útil da ferramenta são afectadas em especial por este ângulo.

Se diminuir o ângulo de posição, reduz-se a espessura da apra para uma determinada faixa de avanços e essa redução na espessura da apra aumenta a quantidade de material em uma parte maior da resta de corte.

Um ângulo de posição menor também resulta uma entrada/saída mais gradual no corte, reduzindo a pressão radial e protegendo a aresta de corte.

Entretanto, as forças axiais maiores aumentam a pressão na peça.

Hoje em dia, os ângulos de posição mais comuns são 45°, 90° e 10° e os de pastilhas redondas.

A fresa de 90° gera a maior parte das forças radiais, no sentido do avanço.

Isso significa que a superfície que está a ser maquinada não será submetida a mais pressão axial, o que é bom para peças fresadas com estrutura frágil ou paredes finas.

A fresa de 45° tem forças de corte radial e axial que têm quase o mesmo valor, originando uma pressão mais equilibrada e menos exigente à potência da máquina.

Este é o ângulo de posição para facejamento em geral.

Pode ser usado na fresagem de peças com materiais que geram apra curta que se fragmenta em virtude de forças radiais excessivas.

O ângulo de posição a 45° deixa aresta de corte mais delicada no início do corte e dá origem a uma tendência menor de vibrações ao executar operações de fresagem com balanços longos ou porta ferramentas menores.

A apra mais fina garante uma alta produtividade em muitas aplicações por causa do avanço mais alto da mesa enquanto é mantida uma carga moderada na aresta de corte.

Isso geralmente compensa a capacidade menor de profundidade de corte que o ângulo menor impõe.

O ângulo de 10° é usado em fresas de grande avanço e de mergulho.

Isso permite trabalhar com dados de corte bastante altos, onde a espessura da apra é pequena mas o avanço da mesa é bastante elevado.

Baixas forças de corte são também vantajosas quando o sentido dominante é axial, tanto na fresagem radial como axial, limitando as tendências de vibração e oferecendo um potencial para taxas de remoção de material bastante altas.

A fresa com pastilhas redondas garante um ângulo de posição sempre variável, desde zero até 90°, dependendo da profundidade de corte.

O raio da pastilha garante uma aresta de corte resistente, própria para grandes avanços da mesa por causa da apra fina ao longo da aresta de corte.

O efeito de espessura da apra é apropriado para a maquinagem de titânio e ligas resistentes a altas temperaturas.



A mudança na direcção da força de corte ao longo do raio da pastilha e a pressão resultante durante a operação dependem da profundidade de corte.

O desenvolvimento de modernas geometrias de pastilhas tornou as fresas de pastilhas redondas bem mais adequadas por causa da acção de corte mais suave, exigindo menos potência e estabilidade da máquina ferramenta.

Hoje em dia, já não é mais uma fresa especial e deve ser considerada uma eficiente fresa de desbaste, com grande capacidade de remoção de material.

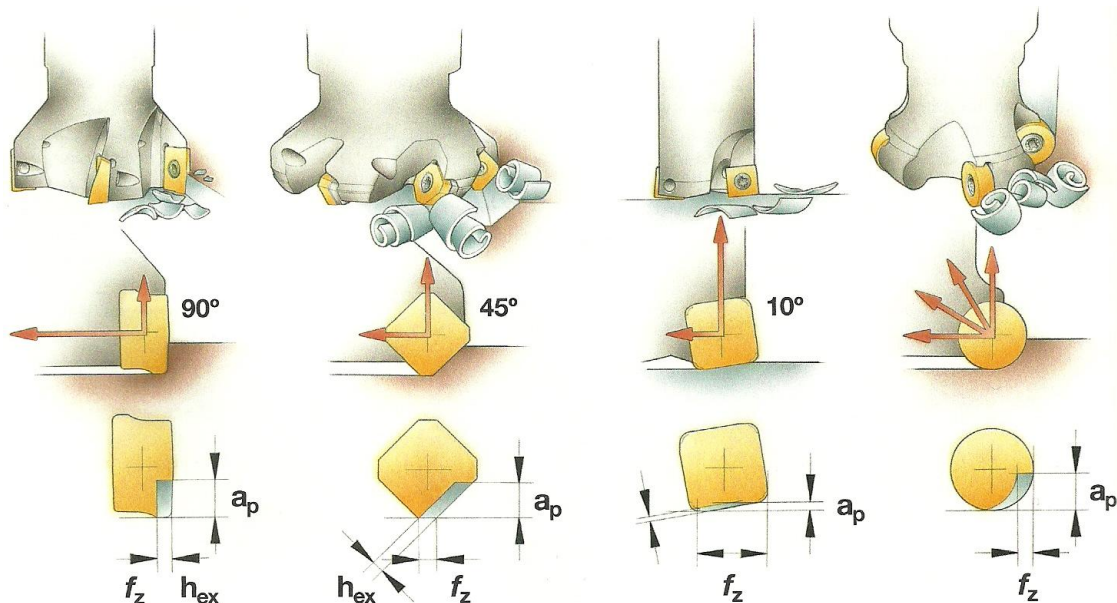


Figura 93 – Ângulos de posição de fresa mais comuns e seus efeitos nas forças de corte e espessura da apra. Fonte: Sandvik

9.2.5 Métodos de maquinagem de cavidades

A fresagem em rampa é uma maneira eficaz de abordar a peça na maquinagem de cavidades.

Para furos maiores, entretanto, a interpolação circular em hélice é muito eficaz e flexível que a utilização de uma ferramenta de mandrilar.

9.2.5.1 Fresagem em rampa em 2 eixos

Um dos melhores métodos para alcançar uma profundidade axial total de corte, é a fresagem em rampa linear nos eixos X/Y e Z.

A escolha do ponto inicial correcto, não há necessidade de se fresar para fora da secção da rampa.

A fresagem em rampa pode iniciar-se de dentro para fora ou de fora para dentro, dependendo da geometria da peça, molde ou matriz. O principal critério é a evacuação da apra da melhor maneira possível, por exemplo, a fresagem com sentido concordante deve ser realizada em corte contínuo.



Quando se inicia uma nova profundidade de corte radial, é importante um movimento de fresagem em rampa ou, preferencialmente, usar movimentos suaves de interpolação circular.

Em aplicações HSM isso é crucial.

O ângulo para a fresagem em rampa depende do diâmetro da fresa usada, da folga para o corpo da fresa, do tamanho da pastilha e da profundidade de corte.

A folga também depende do diâmetro da fresa.

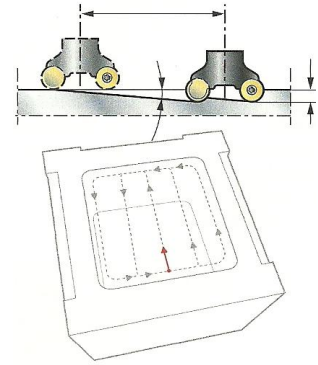


Figura 94 – Fresagem em rampa 2 eixos. Fonte; Sandvik

9.2.5.2 Fresagem em rampa em 3 eixos – Interpolação circular em hélice

O avanço da ferramenta tem uma trajectória em hélice na direcção axial do fuso.

Este método tem várias vantagens na maquinagem de furos de grandes dimensões.

A maquinagem pode ser realizada com apenas uma ferramenta, normalmente sem problemas de quebra e evacuação da apara, ou vibrações, já que o diâmetro da ferramenta é menor quando comparado com o diâmetro do furo. Recomenda-se que o diâmetro do furo seja duas vezes o diâmetro da fresa.

O ângulo máximo de fresagem em rampa também deve ser verificado quando do uso de interpolação circular em hélice.

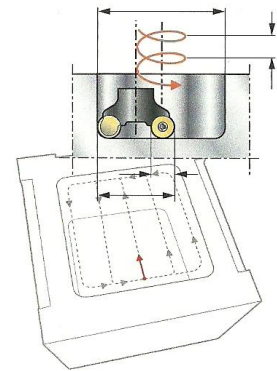


Figura 95 – Fresagem em rampa 3 eixos. Fonte; Sandvik

9.2.5.3 Fresagem pelo método convencional

A furação prévia não é recomendada, pois será necessária uma ferramenta extra.

O tempo improdutivo para posicionamento e troca de ferramenta são factores negativos e também as posições das ferramentas no armazém da máquina são desnecessariamente preenchidas.

A capacidade do avanço axial é uma vantagem em muitas operações.

Furos, cavidades e contornos podem ser maquinados de maneira mais eficaz.

Existem no mercado inúmeras ferramentas disponíveis que também são favoráveis para máquinas de fuso fraco e quando houver grandes balanços, uma vez que as forças de corte estão dirigidas no sentido axial. É comum, usar uma fresa esférica de topo para ciclos de furação pica-pau para se obter uma profundidade de corte axial completa e depois fresar separadamente uma camada da cavidade.



Isso repete-se até que a cavidade seja completamente maquinada.

A desvantagem deste método, está no facto de surgir problemas com o escoamento da apara no centro da fresa de topo.

Um melhor método para alcançar a profundidade de corte axial completa e evacuação da apara é a interpolação circular em hélice.

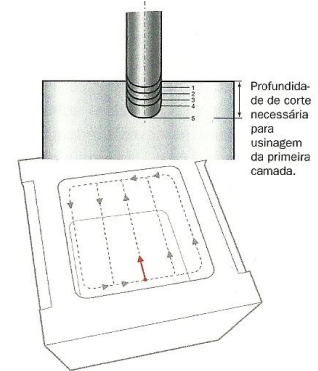


Figura 96 – Método convencional. Fonte: Sandvik

9.2.6 Recomendações aos métodos de fresagem

9.2.6.1 Facejamento

Sempre que possível, evitar a fresagem em furos ou canais, pois esses cortes interrompidos exigem muito das arestas de corte com várias entradas e saídas.

Se possível os furos deve ser executados subsequentemente.

Ou então, reduzir o avanço na área da peça onde estão os furos.

Ao maquinar grandes áreas na superfície da peça, deve-se seleccionar a trajectória da ferramenta com o objectivo de manter a fresa totalmente em contacto em vez de dar vários passes em paralelo.

Ao mudar a direcção, deve-se incluir uma pequena trajectória da ferramenta no sentido radial para manter a fresa sempre em movimento, assim, evita-se a tendência para a vibração e trepidação.

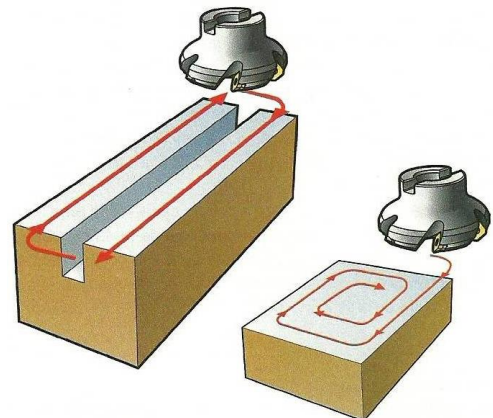


Figura 97 – Fresagem interrompida e fresagem sem intermitência. Fonte: Sandvik

9.2.6.2 Fresagem em desbaste de grandes cavidades

O desbaste de cavidades profundas ou bastante larga deve ser executado através de interpolação circular.

As ferramentas adequadas são brocas de pastilha e fresas de aresta longa para fresagem.

A aplicação é adequada para este método, fazendo primeiro os furos e depois a fresagem com uma fresa de aresta longa.

O diâmetro da broca (D_c) deve ser 5 a 10mm maior que o da fresa de aresta longa.

Após o pré-desbaste com uma broca a fresa deve trabalhar a uma profundidade de corte (ap) no máximo duas vezes o diâmetro da fresa (D_c), vários passes (step-overs) radiais e largura de corte (ae) de 30 a 40% de D_c .



Uma fresa de diâmetro maior tem grande capacidade de remoção de material mas deixa mais material nos cantos para serem maquinados em uma operação subsequente.

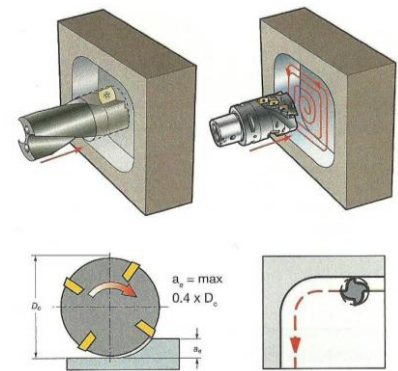


Figura 98 – Desbaste de grandes cavidades. Fonte: Sandvik

9.2.6.3 Fresagem em mergulho

Furação seguida de fresagem em mergulho, quando as cavidades forem mais profundas que o dobro do diâmetro da fresa.

Deve-se usar uma fresa com o máximo diâmetro possível e garantir sempre que haja dois dentes a executar operação

Outra regra, é o uso de uma broca com diâmetro (D_c) 1mm maior do que o diâmetro da fresa.

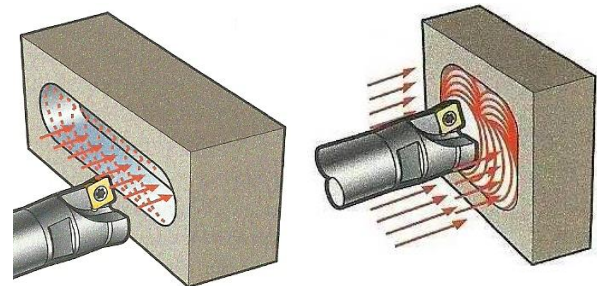


Figura 99 – Exemplos de fresagem em mergulho. Fonte: Sandvik

9.2.6.4 Fresagem de canais

Quando um canal é longo e estreito não é possível fazer uma interpolação circular.

Em primeiro, abrir um furo com um diâmetro menor do que o diâmetro da fresa para possibilitar a sua entrada.

Se a potência da máquina permitir, o diâmetro da fresa deve ser próximo da largura do canal acabado, deixando apenas um pouco de material para o acabamento final.

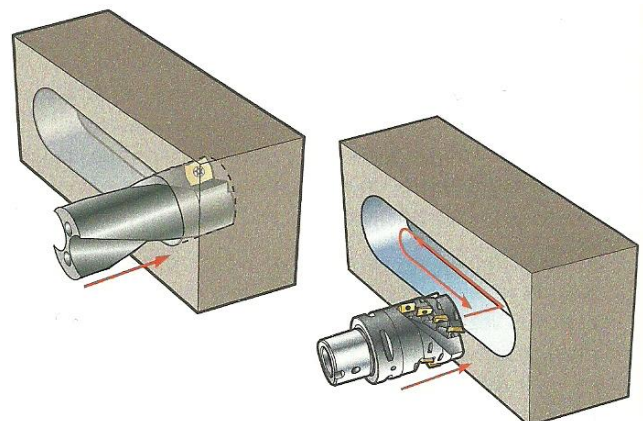


Figura 100 – Fresagem de canais. Fonte: Sandvik



9.2.6.5 Fresagem de semi-acabamento de cantos

Antes das operações de acabamento numa cavidade, geralmente há necessidade de se remover material, na forma de um grande raio, deixado por uma ferramenta de desbaste, esta situação denomina-se por semi-acabamento.

Por causa da necessidade de um raio normalmente pequeno e das cavidades relativamente profundas em questão, as ferramentas devem ser delgadas o suficiente para entrar nos cantos.

Entretanto, esta operação pode demorar muito e vale a pena melhorar, mesmo quando houver necessidade de dois diâmetros de fresa diferentes para terminar.

O raio da fresa deve ser menor que o raio de canto para evitar vibrações.

Por exemplo, a fresagem de um raio de 6mm o diâmetro da fresa não deve ser superior a 11mm.

No exemplo ilustrado, a fresa de acabamento final deve ter um diâmetro inferior a 6mm.

Normalmente, se o diâmetro da fresa for igual ao programado o acabamento da superfície é insatisfatório.

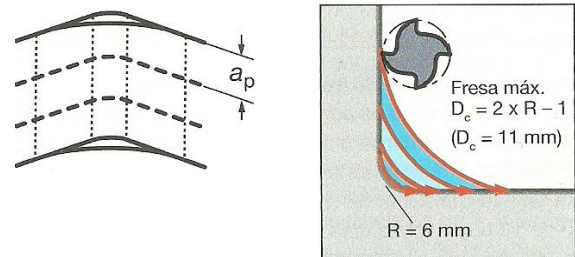


Figura 101 – Diâmetro máximo para semi-acabamento de cantos. Fonte: Sandvik

Para a fresagem de cantos a 90° e com profundidades quatro vezes superiores ao diâmetro da fresa ($prof. = 4 \times D_c$) se for deixado muito material após o desbaste, deve-se providenciar uma estratégia de maquinagem diferente.

A fresa acima de tudo precisa de estabilidade e de uma boa penetração para poder executar os cortes radiais maiores.

Uma boa solução é recorrer ao método de fresagem em mergulho.

Ângulos fechados são uma característica comum em cavidades e, dependendo do ângulo existente entre as duas paredes, pode-se aplicar dois métodos diferentes.

Um alojamento com maquinagem de 5 eixos pode ser acabado com uma fresa de topo ou em uma máquina de 4 eixos.

Quando é especificado um raio, é necessário usar uma fresa redonda para maquinar o raio.

No entanto, este processo de maquinagem exige a utilização de uma máquina de 5 eixos.

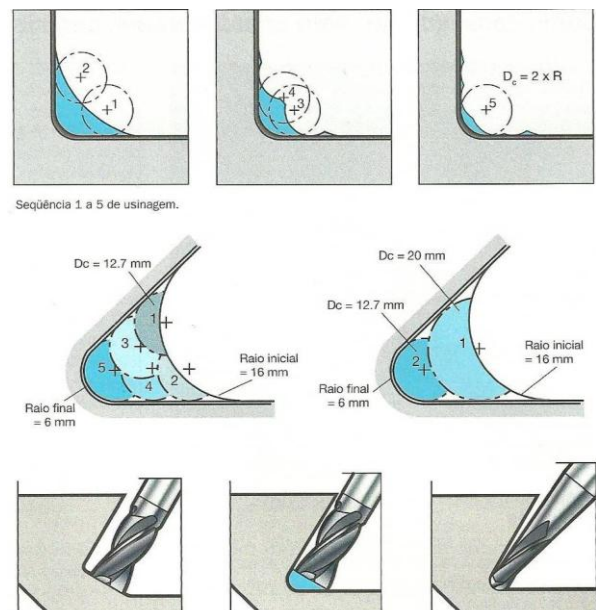


Figura 102 – Fresagem de ângulos fechados de canto. Fonte: Sandvik



9.2.7 Acabamento superficial em fresagem

A melhor maneira de avaliar um acabamento superficial é especificando os valores de rugosidade e ondulação.

A maneira mais adequada de se conseguir um bom acabamento superficial é usar pastilhas de geometria alisadora e sem quebra apara.

9.2.7.1 Fresas de pastilha alisadora (Wiper)

Se o avanço por rotação é menor que o comprimento da fase paralela (b_s), a superfície será produzida pela pastilha mais alta.

O acabamento superficial com pastilhas alisadoras possui uma saliência abaixo das outras pastilhas de aproximadamente 0,05mm.

A fase alisadora é salientada (raio grande) para proporcionar uma superfície lisa para diferentes inclinações do fuso.

O avanço por rotação (f_n) deve ser limitado a 60% da fase paralela para assegurar uma superfície lisa.

A razão mais comum para um resultado insatisfatório com uma pastilha alisadora é a sua montagem incorrecta.

Para montar correctamente a pastilha alisadora, deve-se empurrar a pastilha na direcção radial e deslizar na direcção axial contra o apoio, antes da fixação.

9.2.7.2 Fresa de topo

O acabamento superficial irá depender do batimento radial da fresa de topo e tanto a fresa quanto a sua respectiva fixação devem ser consideradas.

A pior situação é quando um dente gera o acabamento superficial.

Uma mudança de fresagem concordante para fresagem discordante pode melhorar o acabamento superficial em alguns materiais, e o mesmo se aplica para o uso de fluido de corte, especialmente no acabamento de materiais macios.

Para operações de acabamento, a profundidade de corte deve ser mantida baixa, tem um efeito importante na flexão da fresa.

Com uma fresa de topo intercambiável, as tolerâncias e a flexão da fresa contribui para um desvio a partir do canto a 90° real.

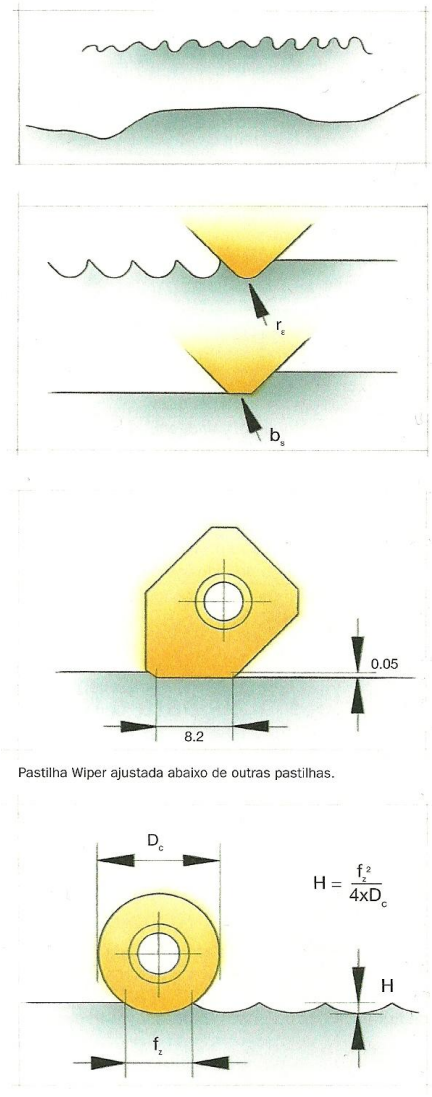


Figura 103 – Pastilha alisadora e redonda para acabamento na fresagem. Fonte: Sandvik



9.2.8 Fresagem afectada por vibrações

As peças, em geral, estão cada vez mais complexas e as operações de maquinagem precisam de ser executadas na ausência de vibrações.

Em muitos casos, a peça não tem suficiente apoio no dispositivo de fixação em cada ponto onde é maquinada, o porta ferramenta é instável, o balanço é excessivo, etc.

Para resolver este tipo de problemas em fresagem temos que determinara a causa e a respectiva acção correctiva.

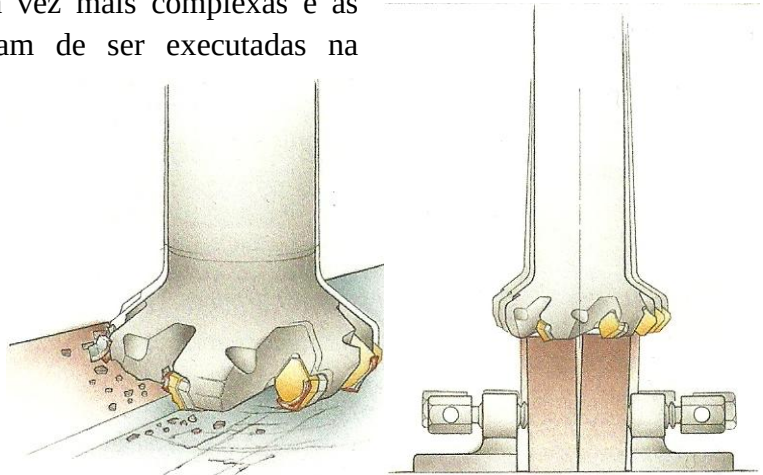


Figura 104 – Ilustração de vibrações na fresagem. Fonte: Sandvik

Em seguida, apresenta-se um conjunto de causas e acções para melhorar os resultados na fresagem:

Porta ferramenta instável:

- Definir o sentido das forças de corte e posicionar correctamente o suporte do material;
- Melhorar a fixação em geral;
- Reduzir as forças de corte diminuindo a profundidade de corte radial e axial;
- Seleccionar uma fresa com passo largo e geometria positiva;

Fixação da peça inadequada:

- Uso de pastilhas positivas;
- Aresta de corte bem afiada e um grande ângulo de saída que gere pequenas forças de corte;
- Reduzir as forças de corte axiais diminuindo a profundidade axial;

Balanço excessivo no fuso ou ferramenta:

- Uso de uma fresa de passo largo;
- Equilibrar as forças radiais e axiais, usar fresas com ângulo de posição a 45°;
- Reduzir o balanço, cada milímetro é importante;
- Usar suportes cónicos antivibratórios.



9.2.9 Nomenclatura e fórmulas em fresagem

Terminologia e unidades para fresamento

D_c	= Diâmetro de corte	mm	z_c	= Número efetivo de dentes	peça
l_m	= Comprimento usinado	mm	k_{c1}	= Força de corte específica (para $h_{ex}=1$ mm)	N/mm ²
D_e	= Diâmetro de corte efetivo	mm	n	= Velocidade do fuso	rotação/min
a_p	= Profundidade de corte	mm	P_c	= Potência útil de corte	kW
a_e	= Condições de operação	mm	η	= Eficiência	
v_c	= Velocidade de corte	m/min	κ_r	= Ângulo principal da aresta de corte	graus
Q	= Taxa de remoção de metal	cm ³ /min	v_{c0}	= Constante de velocidade de corte	
T_c	= Período de trabalho de corte	min	c_{vc}	= Fator de correção da velocidade de corte	
z_n	= Número total de arestas na ferramenta	peça	m_c	= Aumento da força de corte específica (k_c) em função da espessura do cavaco	
f_z	= Avanço por dente	mm	iC	= círculo inscrito	
f_n	= Avanço por rotação	mm			
v_f	= Avanço da mesa (velocidade de avanço)	mm/min			
h_{ex}	= Espessura máxima do cavaco	mm			
h_m	= Espessura média do cavaco	mm			

Fórmulas gerais de fresamento

Velocidade de corte
(m/min)

$$v_c = \frac{\pi \times D_c \times n}{1000}$$

Velocidade do fuso
(rotações/min)

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_c}$$

Avanço da mesa (velocidade de avanço)
(mm/min)

$$v_f = f_z \times n \times z_n$$

Avanço por dente
(mm)

$$f_z = \frac{v_f}{n \times z_n}$$

Avanço por rotação
(mm/rotação)

$$f_n = \frac{v_f}{n}$$

Taxa de remoção
(cm³)

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{1000}$$

Força de corte específica
(N/mm²)

$$k_c = k_{c1} \times h_m^{-mc}$$

Espessura média do cavaco (mm)
(fresamento de disco e faceamento)
quando $a_e/D_c \leq 0.1$

$$h_m \approx f_z \sqrt{\frac{a_e}{D_c}}$$

Espessura média do cavaco (mm)
quando $a_e/D_c \geq 0.1$

$$h_m = \frac{\sin \kappa_r \times 180 \times a_e \times f_z}{\pi \times D_c \times \arcsin \left(\frac{a_e}{D_c} \right)}$$

Tempo de usinagem
(min)

$$T_c = \frac{l_m}{v_f}$$

Potência útil
(kW)

$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 10^6 \times \eta}$$

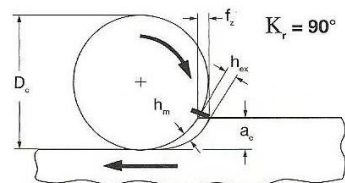
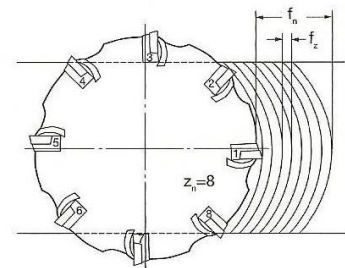


Figura 105 – Nomenclatura e fórmulas em fresagem. Fonte: Sandvik



10. Lubrificação, Refrigeração e Fluidos de Corte

10.1 O que é a lubrificação?

Sempre que duas superfícies trabalham em contacto e existe movimento relativo, surge uma força que se opõe a esse movimento.

Esta oposição ao movimento, chama-se **atrito**.

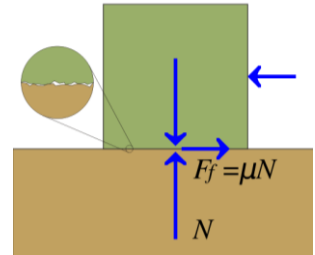


Figura 106 – Atrito entre superfícies

O atrito traduz a força que se opõe ao início (atrito estático) ou continuação (atrito cinético) do movimento, depende fundamentalmente do estado das superfícies e da natureza dos materiais em contacto.

Na maquinagem, o contacto entre a peça e a ferramenta promove atrito cinético, é o que mais interessa no nosso estudo, chamamos unicamente de atrito.

As principais consequências do atrito são o desgaste e sobreaquecimento (possibilidade de deformação térmica, e consequentemente, deformação plástica) das superfícies de contacto, a ciência que estuda o atrito é a tribologia.

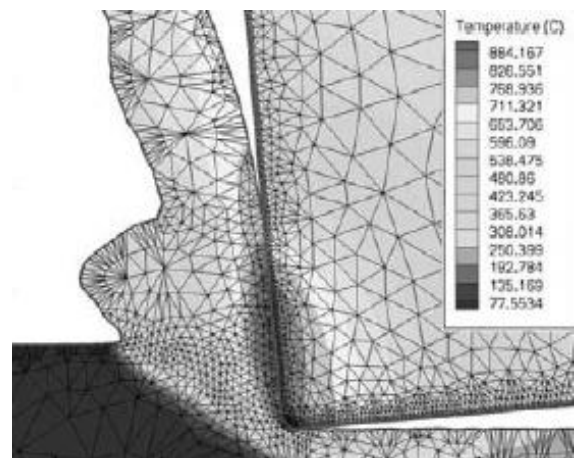


Figura 107 – Distribuição do gradiente térmico

Portanto, o nosso objectivo é reduzir o atrito através da inclusão do lubrificante/refrigerante na zona de contacto da ferramenta sobre a peça, a esta acção chama-se, lubrificação.

A lubrificação/refrigeração é o meio mais eficaz de controlar o desgaste, reduzir o atrito e diminuir gradientes térmicos.



Figura 108 – Refrigeração Fresagem



Figura 109 – Refrigeração Torneamento



10.2 Lubrificação na maquinagem

No processo de Maquinagem, o atrito provoca desgaste e sobreaquecimento na aresta de corte da ferramenta, promove o mau estado da superfície maquinada.

A utilização da lubrificação/refrigeração no corte por arranque de aparta, tem dois objectivos distintos:

- Redução do desgaste (acção lubrificante).
- Diminuição da temperatura (acção refrigerante).

A aplicação de lubrificante/refrigerante tem as seguintes funções:

- Evitar a formação de aresta postiça de corte;
- Aumentar a vida da ferramenta;
- Melhoria da superfície maquinada,
- Evitar deformações na superfície maquinada, devido a gradientes térmicos;
- Alteração da microestrutura do maquinado;
- Melhoria dos parâmetros de corte, em particular, a velocidade de corte (V_c);
- Remoção da limalha produzida no corte,
- Função de quebra aparta quando direccionado o jacto;
- Limpeza dos mecanismos de sincronização;

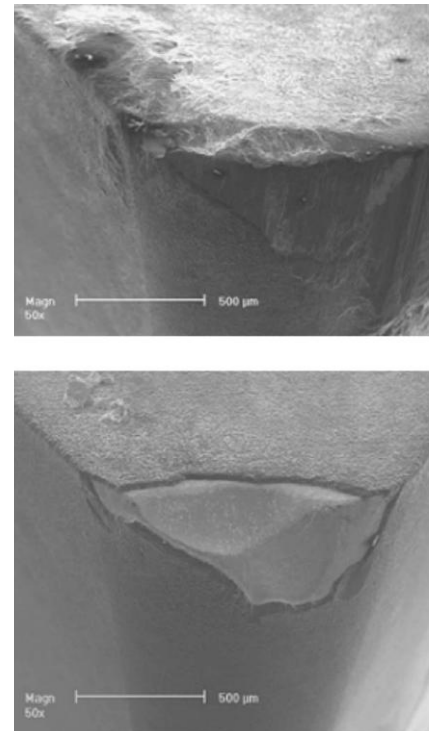


Figura 110 – Defeitos por deformação plástica e lascamento na ponta da ferramenta vista ao microscópio. Fonte: Sandvik

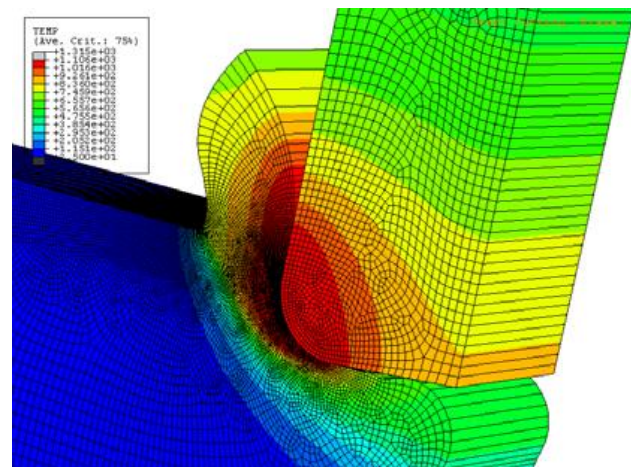


Figura 111 – Análise pelo método dos Elementos Finitos das temperaturas envolvidas na interface ferramenta/material.



Devido à dificuldade de criação de uma película lubrificante e penetração entre o material e a ferramenta, a lubrificação tem uma acção mais importante no transporte do calor do que na redução do atrito., ou seja, uma acção de refrigeração através de um fluído de corte.

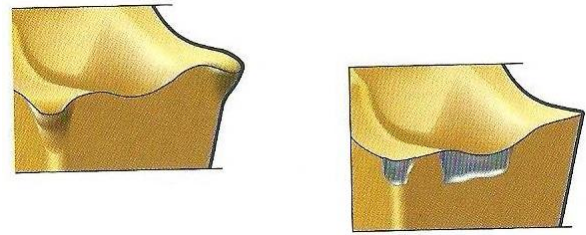


Figura 112 – Pastilha c/deformação plástica e lascamento. Fonte: Sandvik

A aplicação dos fluidos de corte não é tanto para diminuir a força e potência de corte, mas aumentar a vida da ferramenta de corte.

É possível melhoram a qualidade superficial, produtividade, remover avara, proteger a peça da oxidação e evitar o sobreaquecimento por acção mecânica do fluído de corte.

10.3 Propriedades e características dos lubrificantes

É fundamental a formação da película lubrificante entre a ferramenta e a avara para se manter as condições de trabalho, a propriedade responsável pela sua promoção é **viscosidade**.

Outras propriedades dos lubrificantes no processo de maquinagem:

- Não atacar os materiais em atrito, ferramenta e peça.
- Conservar as propriedades lubrificantes a elevada temperatura da zona de corte
- Não se altere a propriedades pelos agentes atmosféricos ou condições de trabalho
- Transporte do calor gerado na interface ferramenta/peça
- Promover anti-corrosão/oxidação no material e ferramenta



Figura 113 – Lubrificação com óleo integral

Das suas características, destacam-se:

- Não atacar a pele e/ou manchar
- Não produzir fumo ou espuma
- Não tóxico e odor aceitável
- Não criar microrganismos, tais como, fungos e bactérias



Figura 114 – Lubrificação com emulsão



10.3.1 Propriedades dos fluídos de corte

Os fluidos de corte líquidos devem apresentar em elevado grau pelo menos uma das seguintes propriedades:

- Condutibilidade térmica
- Calor específico
- Fluidez
- Viscosidade
- Poder molhante
- Características antisépticas

10.3.2 Características dos fluídos de corte

- Ponto de inflamação elevado (risco de incêndio em maquinaria)
- Estabilidade química (formação de depósitos, precipitados e partículas abrasivas)
- Higiénicos (cheiro desagradável, problemas dermatológicos, bactérias e fungos)
- Manutenção do poder lubrificante dos circuitos internos das máquinas (possível mistura)
- Evitar a corrosão (peças maquinadas ou órgãos de máquinas)
- Transparência (visualização do processo)

10.4 Tipos de lubrificantes e refrigerantes

Como explicado, a aplicação dos fluidos de corte no processo de maquinagem não são tanto de diminuir as forças e potência de corte, mas de aumentar a vida das ferramentas.

Consequentemente, é possível melhorar a qualidade superficial, produtividade, protecção da peça à oxidação, remoção da para por acção do fluído de corte.

Os lubrificantes e refrigerantes podem-se classificar da seguinte forma:

- Sólidos
- Líquidos
- Gasosos

10.4.1 Sólidos

A acção dos agentes sólidos pode ser física e química.

A física consiste na aplicação do lubrificante na face de ataque da ferramenta é o caso de uma camada fina de grafite e bissulfato de Mo.



A química consiste na reacção do agente de melhoria de corte como os elementos que participam na Maquinagem é o caso da adição de S ou Pb.

Concluindo, podem ser aplicados de dois modos:

- Lubrificante sólido, massa ou óleo viscoso aplicado na face de ataque da ferramenta.
- Adição de elementos metalúrgicos no material a maquinar (S, Se, Pb, etc.) melhorando a maquinabilidade

10.4.2 Líquidos

Os fluidos líquidos (fluido de corte) comparativamente são os de maior aplicação na prática industrial.

A sua acção principal é a redução do coeficiente de atrito e refrigeração.

Os fluidos de corte podem dividir-se em três grupos:

- Óleos puros
- Óleos emulsionáveis
- Óleos sintéticos

10.4.2.1 Óleos puros

Os óleos puros mais utilizados são de origem mineral (pode ocorrer misturas com óleos de origem animal e vegetal) tem como vantagens a sua variedade e baixo custo.

Os óleos puros podem ser activos ou inactivos (permite o ataque químico em ensaio normalizado).

Os óleos activos são indicados para elevadas pressões e utilizados na Maquinagem de aços em condições de corte severas.



Figura 115 – Óleo puro.

Os óleos inactivos são utilizados com fluido de corte e lubrificação de máquinas ferramentas, não devem ser corrosivos nem oxidantes ao ponto de danificar os órgãos de máquinas por penetração.

Na prática industrial, designa-se por óleos integrais (não emulsionáveis) o seu aspecto é escuro e a cor em tons de “caramelo”.



10.4.2.2 Óleos emulsionáveis (Emulsões)

Os óleos emulsionáveis, são os que permitem a sua mistura com água formando uma emulsão.

A água é um dos melhores agentes de refrigeração, porém tem duas desvantagens: facilita a oxidação (órgãos de máquina e peças maquinadas) e tem baixo poder lubrificante.



Figura 116 – Emulsão.

Esta situação pode ser atenuada com adição de anti-oxidantes e lubrificantes.

A emulsão é uma mistura de óleo em água com proporções entre os valores 1% a 20%, ou seja, uma emulsão de 5% significa 5% óleo e 95% água (rácio de concentração 19:1, leitura é por cada 1litro de óleo é misturada 19 litros de água).

O valor ideal da emulsão é definido pelo fabricante do óleo função das condições de corte.

Para confirmar e validar o valor da emulsão de acordo com o especificado usam-se refractómetros.

Os refractómetros são aparelhos portáteis capazes de medir a concentração da mistura do fluido de corte e utiliza como parâmetro técnico de leitura o **índice de refração (Brix%)**.

É colocada uma porção da mistura na face do refractómetro depois fecha-se e por forma ocular verificamos o valor da concentração na escala de Brix.

As figuras ao lado ilustram a abertura da tampa a respectiva leitura.

O método de aferição da mistura é iterativo até se atingir o valor desejado da emulsão o índice aumenta com o aumento da quantidade de óleo solúvel e diminui com o aumento do volume de água.



Figura 117 – Aparelho refractómetro.

As emulsões mais fracas são indicadas para operações de corte leves onde a necessidade de refrigeração é dominante relativamente à lubrificação.

Por exemplo, na maquinação de ligas de Cu/Zn a emulsão apropriada é de cerca de 3%-5% para ligas de Al os valores gravitam entre 12% e 16%.

O óleo deve ser sempre adicionado à água e não o contrário num tanque de armazenagem, também se deve agitar continuamente até se obter uma emulsão uniforme.



Os óleos emulsionáveis, podem classificar-se em:

- Transparentes
- Pesados
- Opacos

10.4.2.2.1 Óleos transparentes

Os óleos transparentes contêm uma percentagem elevada de sabão que tem por objectivo tornar o líquido quase transparente.

São utilizados em trabalhos de rectificação e esmerilagem.



Figura 118 – Operação de rectificação.

10.4.2.2.2 Óleos pesados

Os óleos pesados apresentam uma maior viscosidade e misturados com água em proporções convenientes formam uma emulsão estável com características de elevada pressão para operações de corte pesadas,

10.4.2.2.3 Óleos opacos

Os óleos opacos representam os óleos emulsionáveis de maior utilização, misturados com água formam uma emulsão de cor branca láctea

São de baixo custo e bons refrigerantes e anti-oxidantes.

10.4.2.3 Óleos sintéticos

Os óleos sintéticos constituem produtos estruturados de agentes químicos em água, os principais produtos químicos usados são:

- Aminas e nitritos (evitam a corrosão)
- Fosfatos e boratos (baixar dureza da água)
- Sabões e agentes de molhabilidade (lubrificação e diminuição da tensão superficial)
- Glicóis (agentes de aglomerantes)
- Germicidas (controlo de bactérias)

As principais vantagens dos óleos sintéticos são a elevada capacidade de refrigeração, vida útil do óleo e acção detergente que mantém as tubagens desobstruídas.



10.4.3 Gasosos

A penetração dos gases é idêntica à dos líquidos e as suas acções principais são: refrigeração e limpeza.

Podemos utilizar ar (baixo custo), CO₂, Azoto (custo elevado).

Os jactos de ar são uma importante ferramenta de remoção da apra na zona de corte para evitar congestionamento e limpeza de órgãos de apoio ao processo: buchas, maxilas, sistemas de aperto/sincronização (evitar marcas de limalha nas peças).



Figura 119 – Sopro de ar.

10.5 Aditivos

Como referido, os fluidos de corte são responsáveis pela refrigeração e lubrificação, deve ainda possuir outras propriedades que melhoram os resultados operacionais em trabalho de corte.

Para o efeito são incorporados aditivos no fluído, podem ser: anti-espumantes, anti-corrosivos, antioxidantes, anti-desgaste, anti-soldadura, capacidade de absorção do calor, transparência, inodoro, não formar névoa, não provocar irritações cutâneas, compatibilidade com o meio ambiente e baixa variação da viscosidade.

A maioria destas propriedades é conferida aos fluidos de corte por meio de *aditivos*, os principais são:

Anti-espumantes: Evitam a formação de espumas que podem impedir boa visibilidade da região de corte e comprometer o efeito de refrigeração do fluído.

Estes aditivos reduzem a tensão superficial do óleo formando bolhas maiores e instáveis. No controlo de espumas geralmente usam-se ceras especiais ou óleos de silicone.

Anti-corrosivos: Protegem a peça, ferramenta e máquina ferramenta da corrosão.

São produtos à base de nitreto de Sódio ou óleos sulfurados.

É recomendável usar nitreto de sódio com precaução é suspeito de ser cancerígeno, deve-se aplicar em baixos teores.

Detergentes: Reduzem a disposição do “lodo”, lamas e borras.

São compostos organometálicos contendo magnésio, bário, cálcio, entre outros.

Emulsionantes: São responsáveis pela formação de emulsões de óleo em água ou vice-versa.

Reduzem a tensão superficial e formam uma película monomolecular semi-estável na interface óleo-água. Os principais tipos de emulsionantes são, os sabões de ácidos graxos, gorduras sulfuradas, sulfunatos de petróleo e emulsionantes não iónicos.



Biocidas: substâncias ou misturas químicas que inibem o desenvolvimento de microrganismos.

Aditivos de extrema pressão (EP): Em operações mais severas em que uma lubrificação adicional é necessária, pode-se utilizar aditivos de extrema pressão.

Conferem reforço na redução do atrito, suportam elevadas temperaturas e pressões do corte.

São compostos que variam na estrutura e composição.

São reactivos com a superfície maquinada, formando compostos fracos na interface, normalmente sais (fosfato de ferro, cloreto de ferro, sulfato de ferro, etc.) que se dissipam a altas temperaturas.

Os mais utilizados, são: aditivos sulfurizados, sulfurados e fosforosos.

10.6 Selecção do Fluido de Corte

A selecção de um fluido de corte ideal para determinada aplicação é difícil, devido à grande variedade de produtos disponíveis no mercado com elevado grau de qualidade e competitividade.

O custo é elevado e a utilização tem que compensar economicamente, isto é, os custos devem superar o custo do produto (relação custo - benefício).

Os óleos emulsionáveis, são os mais utilizados, mas os sintéticos estão a conquistar cada vez mais consumidores.

A maioria dos fabricantes fornece tabelas e diagramas que ajudam a seleccionar o produto onde consta a seguinte informação: nome do produto, descrição, concentração recomendada, material a maquinar, e outras propriedades dos fluidos.

Esta informação é útil e deve ser usada como ponto de partida.

Outros factores de selecção, efeitos na saúde, contaminação e custo podem ser relevantes na escolha.

Existem no mercado muitos tipos de óleos de corte a sua aplicação depende fortemente do tipo de material a maquinar e o tipo de operação.

Um critério de escolha do fluido de corte pode ser a necessidade de aplicação entre a lubrificação e refrigeração.

Se pretendemos uma melhor **lubrificação**, considera-se os seguintes aspectos:

- Baixas velocidades (baixa geração de calor)
- Materiais com baixa maquinabilidade
- Operações severas
- Estado superficial exigente



Se pretendemos uma melhor **refrigeração (arrefecimento)**:

- Altas velocidades (alta geração de calor)
- Materiais de alta maquinabilidade
- Operações simples
- Problemas com a formação de aresta postiça de corte

10.6.1 Material da peça

Metais ferrosos

Ferro fundido: Os ferros fundidos produzem apara de ruptura e são normalmente maquinados a seco.

Um óleo emulsionável pode ser útil na remoção da limalha.

Na maquinagem de ferro fundido maleável, se utilizado óleo de corte deve ser óleo puro ou uma emulsão especial.

Na maquinagem de ferro fundido branco é difícil e geralmente requer aditivos EP nas emulsões.

Aços: Este grupo representa o maior volume de aplicação industrial e existe uma variedade de composições disponíveis.

A escolha depende fundamentalmente da severidade das operações e resistência do aço.

Aços inoxidáveis, aços resistentes ao calor e ligas de Ni tendem a encruar e a escolha do fluído deve ser cuidada.

Metais não ferrosos

Alumínio e suas ligas: Podem ser maquinadas a seco, porém, ligas conformadas ou com alto teor de cobre requerem um fluído de corte com alta capacidade refrigerante.

Para aparas longas e área de contacto grande é exigida boa lubrificação, tal qual, para ligas de silício.

A mistura de óleo mineral/gordura e a maioria das emulsões são uma boa escolha.

O alumínio não exige aditivos EP e o enxofre livre ataca o material instantaneamente.

Magnésio e suas ligas: São normalmente maquinadas a seco, mas a altas velocidades de corte um refrigerante pode ser utilizado.

Emulsões são proibidas porque a água reage com a apara e liberta hidrogénio que apresenta risco de ignição.

Geralmente é usado óleo mineral ou misturas de óleo mineral com gorduras.

Cobre e suas ligas: Na maquinagem este material pode ser dividido em três grupos:



1. Ligas de fácil maquinabilidade, incluem latões e bronzes possuem normalmente elementos que facilitam o corte (Chumbo, Selénio e Telúrio).

Uma emulsão de óleo mineral é suficiente para praticamente todas as situações.

2. Ligas de maquinabilidade moderadas, incluem latões isentos de Pb e alguns bronzes.

Emulsão de óleo mineral ou uma mistura leve de óleo mineral com gordura cumprem a sua função.

3. Ligas de difícil maquinabilidade, tais como, ligas de Pb, ligas de Ni-Ag produzem normalmente apra longa.

A melhor escolha é uma forte mistura de óleo mineral com gordura.

Ligas de níquel, titânio e cobalto: São resistentes ao calor (superligas), difíceis de maquinar e têm tendência para encruar principalmente as ligas de Ni.

A escolha do fluído depende do tipo de operação e tenacidade da liga e a decisão pode recair em qualquer tipo de fluído.

Em condições severas, os aditivos são usados com frequência.

O gráfico da figura mostra várias operações de maquinagem por ordem crescente de exigência do uso de fluído de corte.

Por exemplo, na rectificação é pouco exigente mas para operações de roscagem (torneamento ou macho) o grau de exigência é elevado.

Esta regra não é aplicável em todas as situações, os factores de exigência depende das condições, parâmetros de corte, geometria da ferramenta e material de trabalho.

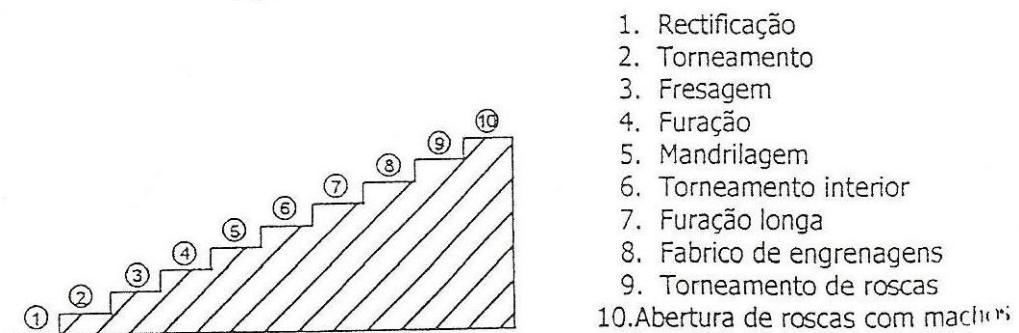


Figura 120 – Quantidade de fluído usado por operação. Fonte: Centimfe

10.6.2 Fluído de corte vantajoso na maquinagem

Na maquinagem com ferramentas de menor resistência, como é o aço rápido exige o uso de fluído de corte porque o calor gerado é susceptível de ocorrer deformação plástica a sua função é primordial na diminuição da temperatura.



Em furação, fresagem, roscagem com ferramentas em HSS são exemplos clássicos de operações com utilização de fluído de corte.

Na execução de peças com de excelente acabamento superficial e tolerâncias dimensionais são situações críticas.

Para o bom acabamento superficial exige boa lubrificação, no cumprimento dimensional exige refrigeração.

Nas situações de furação profunda e apara descontínua (ferro fundido), o fluído de corte assume a função fundamental de transporte da apara.

Em corte contínuo (torneamento, mandrilagem, etc) de qualquer material metálico (ou não metálico) com ferramentas de metal duro (com ou sem revestimento) é realizado com a aplicação de fluído de corte, o uso permite um aumento da vida da ferramenta.

10.6.3 Fluído de corte não interfere na maquinagem

Na realidade, o fluído de corte interfere sempre no processo: poluição do ambiente, impregnado na peça ou componentes mecânicos das máquinas ferramentas, lavagem posterior das peças maquinadas (aderência de posteriores acabamentos, limalha agarrada, etc.).

Na vida da ferramenta pode não ter significado, como são exemplo a maquinação de ferro fundido cinzento (excepto furação profunda ou nos casos em que o desgaste da ferramenta é por difusão), ligas Al e Mg, materiais plásticos e resinas.

Na maquinação de ligas de magnésio pode ocorrer a água da emulsão reagir com a apara e libertar hidrogénio que apresenta risco de ignição.

10.6.4 Fluído de corte prejudica na maquinagem

Existem situações em que o fluído de corte tem um comportamento proibitivo e prejudica significativamente a maquinagem.

Na maquinagem, com utilização de cerâmicas deve ser executada a seco, pois o fluído promove choques térmicos e consequentemente fractura.

As cerâmicas à base de Si_2N_4 e as “whiskers” permitem a aplicação de fluído por possuírem uma tenacidade e resistência ao choque superior.

Outro exemplo, é o corte interrompido na fresagem com ferramentas em metal duro em que o principal tipo de desgaste é o aparecimento de “trincas térmicas” originadas pela flutuação cíclica da temperatura devido à intermitência no corte (ferramenta aquece no corte efectivo e arrefece na falta de material).

Na maquinagem de materiais endurecidos a aplicação do fluído de corte pode prejudicar o rendimento do processo, isto é, devido á sua dureza ($> 30 \text{ HRC}$) o calor gerado funciona como elemento de “deformação/corte” no mecanismo de formação da apara.

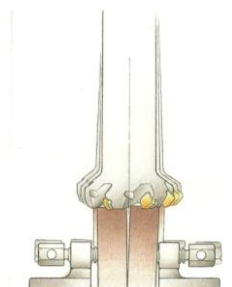
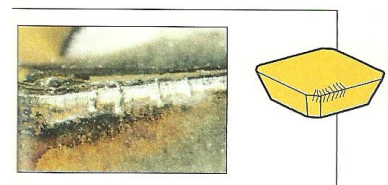
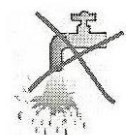


Figura 121 – Aresta com trincas térmicas e corte interrompido. Fonte: Sandvik



10.7 Sistema de lubrificação por quantidade mínima (MQL)

O conceito de quantidade mínima de lubrificação deriva do termo técnico inglês Minimal Quantity Lubrication (MQL), a lubrificação entre a ferramenta e a peça é realizada por um aerossol, ou seja, gotículas de óleo que são dispersas em fluxo de ar formando um filme lubrificante na zona de corte e aplicado a elevada pressão.

Quando não utilizamos qualquer tipo de fluído, o termo apropriado é *maquinagem a seco*.

Problemas económicos e ecológicos associados ao processamento com óleo abundante são reduzidos pela ampla implementação da MQL em operações de produção.

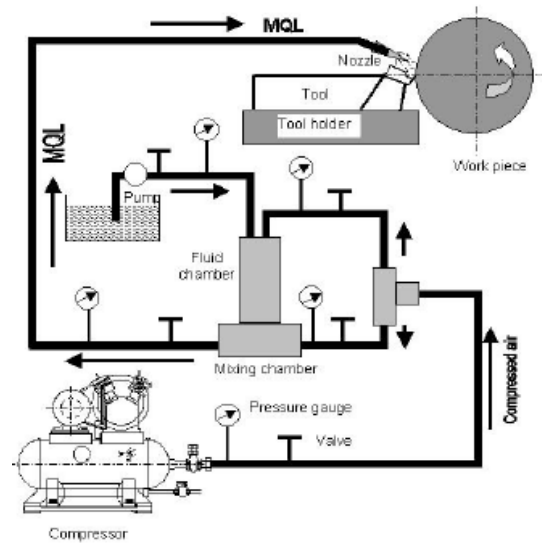


Figura 122 – Esquematização do processo de MQL. Fonte: Sandvik

Uma das tecnologias disponíveis está assente em sistemas de *dosagem volumétrica* tanto o lubrificante quanto o ar são fornecidos a um ponto de mistura ou bocal de pulverização através de linhas de alimentação.

O lubrificante é, então, pulverizado com ar comprimido a aplicado à zona de contacto ferramenta/peça.

Outro sistema é por *dispersão contínua*, o vapor de óleo é gerado na unidade de abastecimento e fornecimento por linhas de alimentação à máquina.

A aplicação; tal qual, o fluído de corte pode ser de dois tipos: externa (jacto direccionado) ou interna (canais internos nas ferramentas).

As vantagens do processo MQL, são as seguintes:

- Lubrificantes para arrefecimento tornam-se redundantes;
- Eliminação da instalação dos componentes: filtros, tubagens, tanque, etc.
- Vida útil das ferramentas aumenta
- Redução dos tempos de produção
- Melhor qualidade superficial
- Processo ecológico
- Aumento da taxa de evacuação da apra
- Redução dos custos em lubrificantes/refrigerantes
- Possibilidade de alternar entre fluído e maquinaria a seco na mesma máquina



11. Case Study: Liga de Alumínio e Inox

Este capítulo, é dedicado a dois ensaios realizados por torneamento para um disco rotativo de ferragem de porta em liga de alumínio e um puxador de porta exterior em inox.

O objectivo é identificar o comportamento e implementação dos novos materiais em produção, ou seja, estudo da viabilidade de processo e toda a cadeia produtiva.

São descritas, quais as ferramentas adequadas a cada material, parâmetros de corte, tipo de lubrificação, ocorrências técnicas e soluções implementadas.

11.1 Disco rotativo em liga alumínio

11.1.1 Aplicação da peça em estudo

A peça do ensaio é um disco rotativo que tem a função de ligar a quadra da fechadura da porta ao puxador.

A peça exige bom acabamento da face do lado do puxador o qual é obtido com operações de lixagem e polimento.

As razões de escolha deste tipo de material estão relacionadas com o baixo custo do material, baixo peso específico e aderência dos acabamentos finais do conjunto.

As setas indicam a nossa peça de estudo.

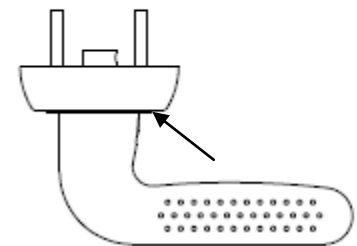
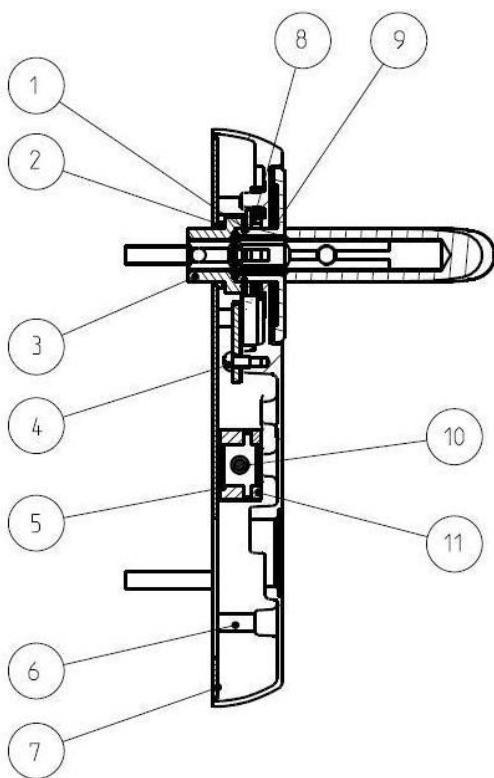
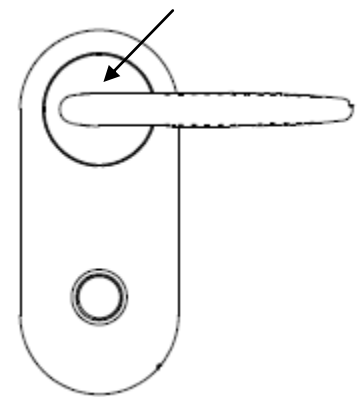


Figura 123 – Vistas de topo e frente do conjunto.

Figura 124 – Desenho de conjunto.

Legenda: 1 – Freio; 2-Casquilho; 3-Disco; 4-Parafuso; 5-Porta motor superior; 6-Perno; 7-Base pernos; **8- Disco rotativo**; 10- Sem-fim embraiagem; 11- Porta motor inferior.



11.1.2 Desenho técnico da peça em alumínio

O diâmetro máximo da peça é 50mm e o seu comprimento 14mm.

O componente em estudo é constituído por um furo central de diâmetro 11mm, dois furos descentrados escalonados e uma ranhura de largura 1,1mm e diâmetro 13,3mm.

Existem raios e chanfros para a quebra das arestas.

O diâmetro 40mm e profundidade de 1mm assinalado no desenho correspondem a uma caixa com baixo-relevo para alojar a anilha anti-fricção.

A peça tem duas operações externas, que não são executadas ao torno: brochar e subsequentemente uma fresagem.



Figura 125 – Peça torneada.

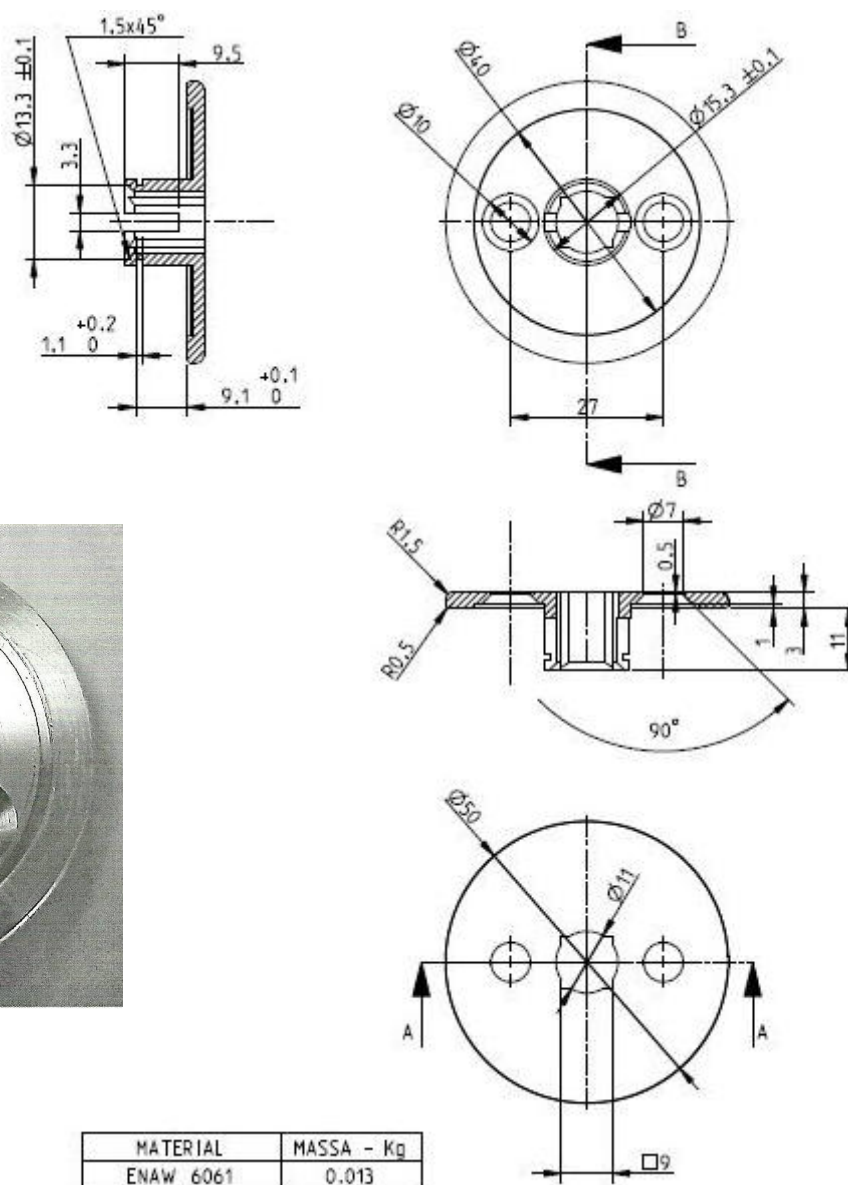


Figura 126 – Desenho técnico da peça.



11.1.3 Material

O material seleccionado para o componente é a liga de alumínio especificada pola norma EN AW 6061 (AlMg1SiCu).

Os principais constituintes são o alumínio, magnésio, silício e cobre a sua massa é 13 gr.

A matéria-prima a maquinar é cavilha redonda estirada de diâmetro 50mm e comprimento 3m com chanfro nas pontas.

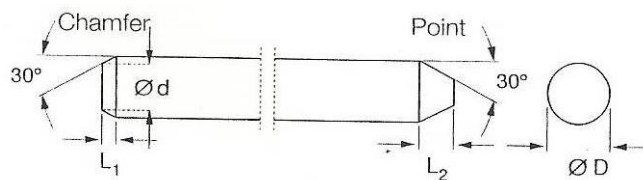


Figura 127 – Geometria da cavilha. Fonte: Wieland.

11.1.4 Máquina

A máquina seleccionada no parque de máquinas disponível é um torno automático CNC com alimentador de cavilha.

È constituído por uma bucha com pinça de diâmetro 50mm de aperto hidráulico, rotação máxima da árvore 3500rpm e uma torreta de doze posições com possibilidade de utilizar ferramentas rotativas.

O tanque para o fluído de corte tem uma capacidade de 200 litros. **Fonte: Biglia**

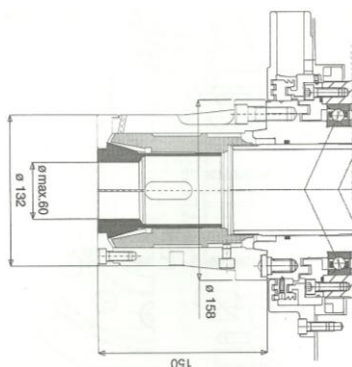


Figura 128 – Conjunto aberto por pinça.

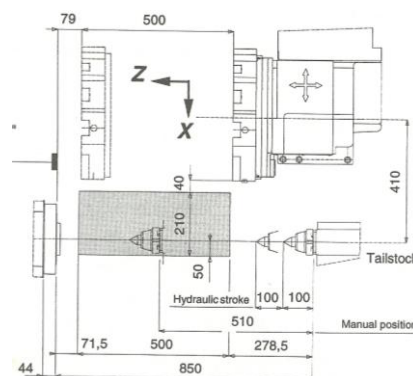


Figura 129 – Deslocamentos da máquina.

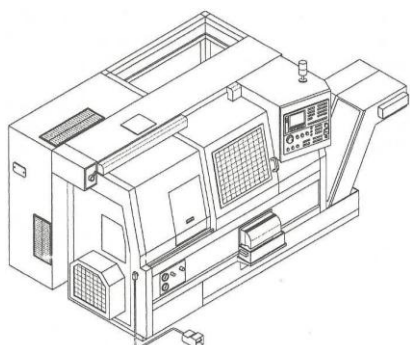


Figura 130 – Aspecto geral do torno.

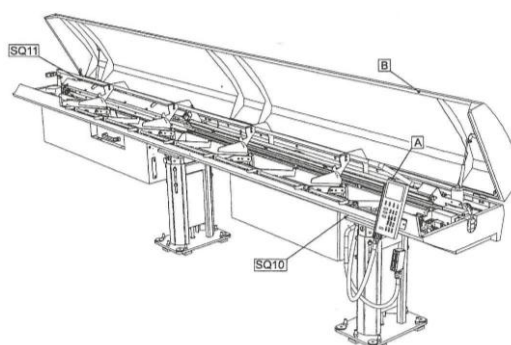


Figura 131 – Aspecto geral do alimentador.



11.1.5 Fluido de corte

A escolha do fluido de corte é importante para ligas de alumínio.

Normalmente na maquinagem destas ligas surgem problemas de colagem ou “empapamento” do material na aresta de corte das ferramentas e consequentemente mau acabamento superficial.

Para diminuir o problema é usada uma emulsão constituída por fluido de corte solúvel no máximo de 14% de concentração.

Após reunião com o fornecedor de lubrificantes e fluidos de corte de uma empresa representante da marca Castrol, as opções aconselhadas pelos técnicos foram duas: Castrol Cooledge BI ou Castrol Alusol XT.



Figura 132 – Bidão de 25 litros de Cooledge BI. Fonte: Castrol

As características técnicas, são as seguintes:

Castrol Cooledge BI - Fluido de corte solúvel, de base, mineral formando uma emulsão branca opaca. Não contém fenóis na sua composição, boas características anti-corrosivas e anti-espuma. Boa capacidade de lubrificação e arrefecimento nas operações de corte. É recomendado para operações de maquinação geral de materiais ferrosos e não ferrosos.

Concentrações: Rectificação 2-5%; Torneamento, Furação 3-5%; Fresagem 3-5%; Mandrilagem 8%.

Propriedades: Densidade (20°C Kg/l) 0.895; PH da emulsão 9.5; Aspecto da emulsão Opaco branco;

Castrol Alusol XT - Fluido de corte solúvel, semi-sintético, desenvolvido principalmente para maquinar Alumínio e suas ligas. Possui óptima resistência ao ataque de microrganismos, assegurando uma maior longevidade da emulsão. A sua utilização evita problemas de micro-soldadura do metal à ferramenta, acabamento da superfície, manchas superficiais e desgaste prematuro da ferramenta. Recomendado para operações de corte em tornos automáticos, furação, brochagem, mandrilagem, fresagem e abertura de engrenagens.

Concentrações: Variam entre 4-12% função da aplicação e material (consulta da ficha técnica do produto)

Propriedades: Densidade (20°C Kg/l) 0.945; PH da emulsão 8.6 a 9.1; Aspecto da emulsão translúcido.

A escolha recaiu sobre a segunda opção, o fluido de corte solúvel Castrol Alusol XT para uma emulsão de 5% num volume de cerca de 200 litros correspondente à capacidade do tanque disponível no torno.

Para uma emulsão de 5%, corresponde a 10 litros de fluido de corte e 190 litros de água totalizando os 200 litros da mistura.



11.1.6 Sequência de maquinagem

A primeira ferramenta a trabalhar é uma ferramenta especial escalonada de D15xD11 executada internamente na empresa.

A face visível da nossa peça é posteriormente sujeita a operações de lixagem e polimento, as restantes áreas maquinadas não exigem um super acabamento no torneamento exterior.

Nesta fase, a ferramenta usada é com uma pastilha positiva adequada a materiais não ferrosos.

A caixa em baixo-relevo de D40x1 é maquinada com uma ferramenta frontal.

A ranhura exterior com uma ferramenta de pastilha de largura de 1mm, esta entra duas vezes para executar a cota 1,1mm (tolerância +0,2/0).

Os furos descentrados são feitos com uma ferramenta especial produzida internamente com as dimensões D11xD7.

Para finalizar, uma ferramenta de sangrar com pastilha incorporada.

11.1.6.1 Sequência de Operações

1ª Operação – Furação ao centro

$V_c = 120 \text{ m/min}$ (para D11 mm)

$n = 3500 \text{ rpm}$

$f = 0,15 \text{ mm/rot.}$

$V_f = 525 \text{ mm/min}$

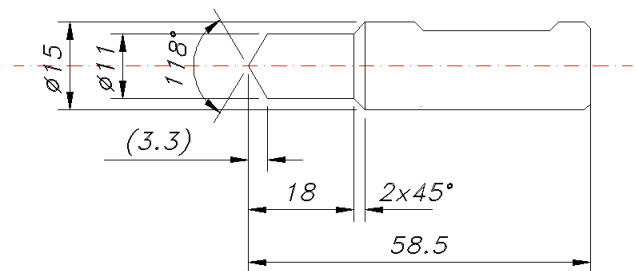


Figura 133 - Broca especial furo do centro



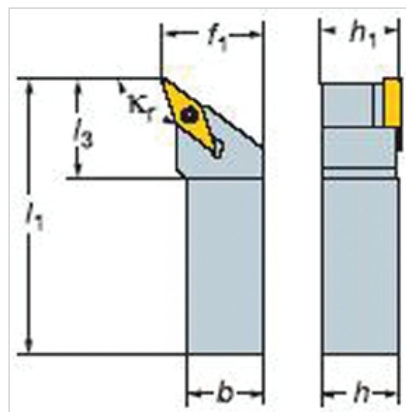
2ª Operação – Torneamento exterior

$V_c = 330$ m/min (para um diâmetro médio de 35 mm)

$n = 3000$ rot/min

$f = 0.1$ mm/rot

$V_f = 300$ mm/min



SANDVIK TOOLHOLDER SVJBR 2020K 16

Order code 201025
Manufacturer [SANDVIK COROMANT](#)
Part number SVJBR2020K16
Description SANDVIK TOOLHOLDER SVJBR 2020K 16

Catalogue 2010 - page 851

Product attributes

Dimension b	20
Dimension f1	25
Dimension h	20
Dimension h1	20
Dimension l1	125
Dimension l3	31.5
Dimension re1	0.8
Insert compatibility	VBMT
Insert size	V 16
Length	125 mm
Right hand	SVJBR 2020K16
RoHS Compliant	NA
Style Code	MR4035
Width, external	20 mm

VCMT / VBMT VCGT / VBGH VCMW / VBMW

HC = Coated carbide
HW = Uncoated carbide
BL = CBN with low CBN content
BH = CBN with high CBN content

Designation

d
mm

l
mm

s
mm

r
mm

D₁
mm

D₂
mm

R
mm

P

HC

M

HC

K

HC

N

HC HW

S

HC

H

BL BH

WPP 01
WPP 10
WPP 20
WPP 30

WAM 20
WSM 20
WSM 30

WAK 10
WAK 20
WAK 30

WXA 10
WK 1

WSM 20
WSM 30

WCB 30
WCB 50

VCGT 110301 – PM 2
VCGT 110302 – PM 2
VCGT 110304 – PM 2
VCGT 110308 – PM 2
VCGT 130301 – PM 2
VCGT 130302 – PM 2
VCGT 130304 – PM 2
VCGT 160404 – PM 2
VCGT 160408 – PM 2
VCGT 160412 – PM 2

6.35
6.35
6.35
6.35
7.94
7.94
7.94
9.525
9.525
9.525

11.0
11.0
11.0
11.0
13.1
13.1
13.1
16.6
16.6
16.6

3.18
3.18
3.18
3.18
3.18
3.18
3.18
4.76
4.76
4.76

0.1
0.2
0.4
0.8
0.1
0.2
0.4
0.4
0.8
1.2

3.75
3.75
3.75
3.75
4.75
4.75
4.75
6.0
6.0
6.0

2.8
2.8
2.8
2.8
3.4
3.4
3.4
4.4
4.4
4.4

1.8
1.8
1.8
1.8
2.5
2.5
2.5
1.5
1.5
1.5

Figura 134 – Suporte e pastilha tornear exterior. Fonte: Sandvik



3ª Operação – Torneamento da caixa frontal baixo-relevo

$V_c = 235 \text{ m/min}$ (para um diâmetro médio de 25 mm)

$n = 3000 \text{ rot/min}$

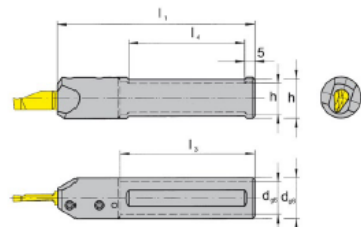
$f = 0.1 \text{ mm/rot}$

$V_f = 300 \text{ mm/min}$

PORTAHERRAMIENTAS Tipo B110
PORTA PASTILHAS Tipo

Desde Ø exterior de ranura	Desde Ø exterior de ranura	20.0 mm
Profundidad de ranura	Profundidade de ranhura	30.0 mm
Ancho de ranura hasta	Largura de ranhura até	3.0 mm

Profundidad extendida de asiento de plaquita
Profundidade extendida de apoio de pastilha



R = mostrado versión a derecha
R = versão à direita

L = versión a izquierda
L = versão à esquerda

Referencia Número de encomenda	d	l ₁	h	l ₂	l ₄
R/LB110.0016.16.2	16	100	14	70	55
R/LB110.0020.16.2	20	100	18	-	55

Seleccione versión R o L
Selecione versão R ou L

Otros dimensiones sobre demanda
Outras medidas sob consulta

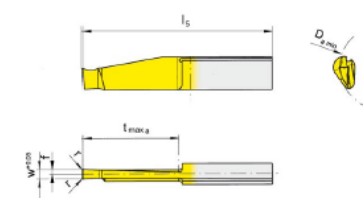


para uso con Plaquita
para uso com Pastilha

Tipo A110
Tipo

PLAQUITA Tipo A110
PASTILHA Tipo

Desde Ø exterior de ranura	Desde Ø exterior de ranura	20.0 mm
Profundidad de ranura	Profundidade de ranhura	30.0 mm
Ancho de ranura	Largura de ranhura	3.0 mm



L = mostrado versión a izquierda
L = versão à esquerda

R = versión a derecha
R = versão à direita

Referencia Número de encomenda	w	r	f	l ₂	t _{max}	D _{ext}	MO12	TN05	T125	TN05
R/LA110.2030.3.0	3	0.2	1.5	50	20	20	•	•	•	•
R/LA110.2030.5.0	3	0.2	1.5	60	30	30	•	•	•	•
R/LA110.5030.3.0	3	0.2	1.5	60	20	20	•	•	•	•
R/LA110.5030.5.0	3	0.2	1.5	60	30	30	•	•	•	•

Dimensiones en mm
Dimensões em mm

Seleccione versión R o L
Selecione versão R ou L

Grado recomendado
Grau recomendado

Material Material			Dureza Dureza Brinell (HB)	Velocidad de corte v_c (m/min) Velocidade de corte v_c (m/min)										
				K10	MG12	P20	TI22 TN32	TI25 TN35	TF45	TF46	TC92	AL96	H20	H54
N	Aleaciones de aluminio Ligas de alumínio	no tratable al calor não tratável ao calor	30-80	1000-600	800-400			1000-600						
		Tratable al calor Tratável ao calor	80-120	400-220	300-200			400-220						
	Aleaciones de fundición de aluminio Ligas de fundição de alumínio	no tratable al calor não tratável ao calor	80	1000-600	800-400			1000-600						
		Tratable al calor Tratável ao calor	100	600-300	400-250			600-300						
	Aleación de cobre Liga de cobre	no tratable al calor não tratável ao calor	90	200-120			200-150	210-130		200-150				
		Tratable al calor Tratável ao calor	100	150-90			150-80	160-90		150-110				

Figura 135 – Suporte e pastilha da caixa frontal baixo-relevo. Fonte: Paul Horn



4ª Operação – Ranhurar exterior o diâmetro 13,3 mm

$V_c = 132 \text{ m/min}$ (para um diâmetro médio de 14 mm)

$n = 3000 \text{ rot/min}$

$f = 0.15 \text{ mm/rot}$

$V_f = 450 \text{ mm/min}$

SCT R/L Series			Cut-Off Holders									
Sumitomo Cat. No.		Gage Insert	Dimensions (Inch/mm)							Insert Screw		Torx Wrench
Right Hand	Left Hand		Stock	A	B	C	E	F	G	Right hand	Left hand	
SCTR08	SCTL08	CTR12	●	.500	.500	6.000	.500	.500	.591	BFTX0410T8R	BFTX0410T8L	TRX08
SCTR10	SCTL10	CTR12	●	.625	.625	6.000	.625	.625	.591	BFTX0410T8R	BFTX0410T8L	TRX08
SCTR12	SCTL12	CTR12	●	.750	.750	6.000	.750	.750	.591	BFTX0410T8R	BFTX0410T8L	TRX08
SCTR1010	SCTL1010	CTR12	★	10.0	10.0	150.0	10.0	10.0	15.0	BFTX0410T8R	BFTX0410T8L	TRX08
SCTR1212	SCTL1212	CTR12	★	12.0	12.0	150.0	12.0	12.0	15.0	BFTX0410T8R	BFTX0410T8L	TRX08
SCTR1616	SCTL1616	CTR12	★	16.0	16.0	150.0	16.0	16.0	15.0	BFTX0410T8R	BFTX0410T8L	TRX08

Swiss Tooling Inserts
for precision turning applications:
• Cut-off
• Back Turn
• Boring Rough
• Boring Finishing

P Steel
M Stainless Steel
K Cast Iron
N Non-ferrous
S Exotic Materials
H Hardened Steel

● USA Stocked Item
 ★ Worldwide Warehouse Item
 ▲ USA Limited Availability Item

CTR for SCT Type Holder (p. 204)		R	N	L	Coated	Cermet	Uncoated
Sumitomo Catalog #		ISO Catalog #					
CTR121005R	CTR121005R	1.0	0.05	19.0	7.0		
CTR121005N	CTR121005N						
CTR121005L	CTR121005L						
CTR121505R	CTR121505R	1.5	0.05	19.0	7.0		
CTR121505N	CTR121505N						
CTR121505L	CTR121505L						
CTR122005R	CTR122005R	2.0	0.05	19.0	7.0		
CTR122005N	CTR122005N						
CTR122005L	CTR122005L						

Maximum cut-off diameter = 12.0 mm

Figura 136 – Suporte e pastilha para ranhurar exterior. Fonte: Sumitomo Tools



5ª Operação – Execução dos furos descentrados

$V_c = 100 \text{ m/min}$ (para D9 mm)

$n = 3500 \text{ rpm}$

$f = 0,07 \text{ mm/rot.}$

$V_f = 245 \text{ mm/min}$

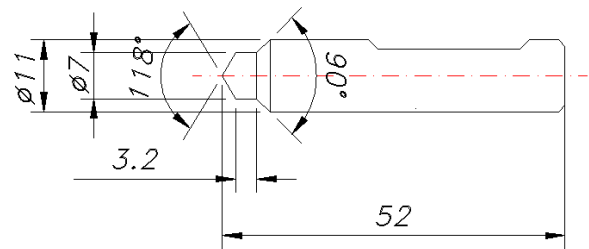


Figura 137 - Broca especial furos descentrados

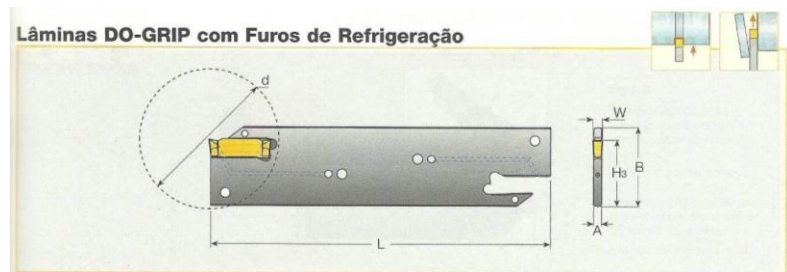
6ª Operação – Sangramento (2ª Opção)

$V_c = 154 \text{ m/min}$ (para um diâmetro médio de 35 mm)

$n = 1400 \text{ rpm}$ (valor experimental)

$f = 0,1 \text{ mm/rot.}$

$V_f = 350 \text{ mm/min}$



DGFH-C

B	W	Descrição	A	L	H _s	D _{max}	Chave ⁽²⁾	Pastilhas
26	3.1	DGFH 26C-3	2.4	110	21.4	36 (50) ⁽¹⁾	EDG 23A	DG C 3...
32	3.1	DGFH 32C-3	2.4	150	24.8	36 (50) ⁽¹⁾	EDG 33A	DG C 3...
	4.0	DGFH 32C-4	3.2	150	24.8	100	EDG 33A	DG C 4...

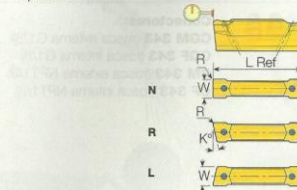
(50) Para pastilha com aresta única (Quando modificado pelo usuário)

Deve ser pedido separadamente.

Para detalhes do bloco, verificar catálogo de Torneamento Completo ISCAR.

DGNC/DGRC/DGLC

Repetibilidade ± 0.1



Tipo-C

- Primeira opção para aplicações de corte de barras, materiais duros e pesados.
- O ângulo positivo e uma única cavidade com fase negativa e rebaixas oferece resistência extra da aresta de corte.
- Avanço de médio a alto.

DGNC/DGRC/LC

Pastilhas de Corte e Canal com Furos de Refrigeração

Condições de Usinagem Recomendada para Corte e Canal

W ⁽¹⁾	Descrição	R	T _{max}	L _{Ref}	K ^o	Material	IC908
3.10	DGNC 3102C	0.20	18	20.8	—	●	V _c (m/min)
3.10	DGRC/LC 3102C-6D	0.20	18	20.8	6	●	130-260
4.00	DGNC 4003C ⁽²⁾	0.30	— ⁽²⁾	20.8	—	●	70-200
4.00	DGRC/LC 4003C-4D ⁽³⁾	0.30	— ⁽²⁾	20.8	4	●	80-210

¹ Pastilha

Pastilha	W
DGN-3-4	+/-0.04

² Sem limite de profundidade.

³ Itens disponíveis no primeiro semestre de 2006.

- Aço Carbono
- Aço Liga
- Aço Inoxidável

Figura 138 – Suporte e pastilha para sangramento. Fonte: Iscar Tools



11.1.7 Programação CNC da peça

□%
G95S200M03
M90
M98P1000
M52
M01

N100T10I10G97S3500M03
(FURAR)
G00X0.0Z5.0M08
G01Z-19.5F0.15
G00Z150.0
M01

N4T0404G97S3000M03
(TORNEAR.EXTERIOR)
G00X42.0Z3.0M08
G01Z-10.9F.1
X55.5F0.3
G00Z3.0
X29.0
G01Z-10.9F.1
X55.5F.3
G00Z3.0
X19.0
G01Z-10.9F.1
X55.5F.3
G00Z3.0
X9.0
G01G42Z0.0F.15
X14.9
X15.3Z-0.2F.1
Z-11.0
X48.7F.15
G03X49.7Z-11.5R0.5F.1
G01Z-12.55
G03X46.7Z-14.05R1.5
G01Z-15.5
X55.5F0.2
G00G40X60.0
X120.Z200.0S3000
M01

N7T0707G97S3000M03
(FAZER CAIXA)
G00X40.8Z-10.0M08
G01Z-11.0F.1
X40.0Z-11.4



Z-12.0
 X21.05
 Z-10.0F.15
 G00X80.0Z200.0
 M01

N11T1111G97S3000M03
 (FAZER RASGO)
 G00X17.3Z-1.8M08
 G01X13.3F.15
 G00X17.3
 Z-2.0
 G01X13.3
 G00X50.0
 Z200.0S500
 M01

N6T0606M10
 (FUROS)
 G97S3500M73
 G28C0.0
 C0.0
 M70
 G00X27.0Z5.M08
 Z-10.0
 G01G94Z-17.5F250
 G00Z-10.0
 M71
 C180.0
 M70
 G04U0.3
 G01Z-17.5F200
 G00Z10.0
 X150.Z150.
 M75
 M71
 M01

N1G95T0101S1400M03
 (SANGRAR)
 G00X57.0Z-14.15M08
 G01X13.0Z-14.0F0.1M22
 X9.0S1000M09
 X0.0S1400
 G00X57.0M23
 Z200.
 M01
 M99

%□



11.1.8 Observações técnicas do ensaio

A sequência de maquinagem foi previamente estudada, por forma, a minimizar e prevenir possíveis problemas ao longo do ensaio.

No entanto, foram detectados alguns desses problemas, nomeadamente na operação de sangramento.

A figura ao lado mostra o aspecto da ferramenta de sangrar, o material agarrou e a apara obtida no processo foi de fita longa devido ao sobreaquecimento na interface ferramenta/peça.

Inicialmente a ferramenta utilizada para sangramento não incorporava lubrificação interna originando a situação descrita.

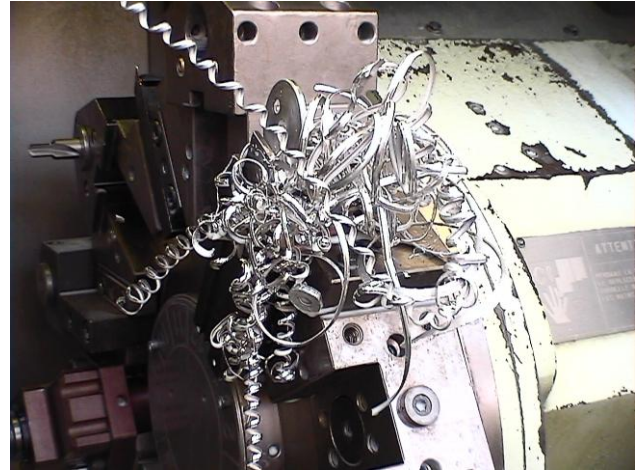


Figura 139 – Material agarrado à ferramenta de sangrar.

Uma das acções tomadas foi a introdução de um tubo ligado a uma das saídas de lubrificação da torreta da máquina na direcção radial da primeira opção da ferramenta de sangrar.

Esta ferramenta inicial tinha a recomendação para materiais não ferrosos.

Os resultados obtidos não foram os melhores, o jacto incidia na zona do sangramento, mas não na aresta de corte persistindo o problema.

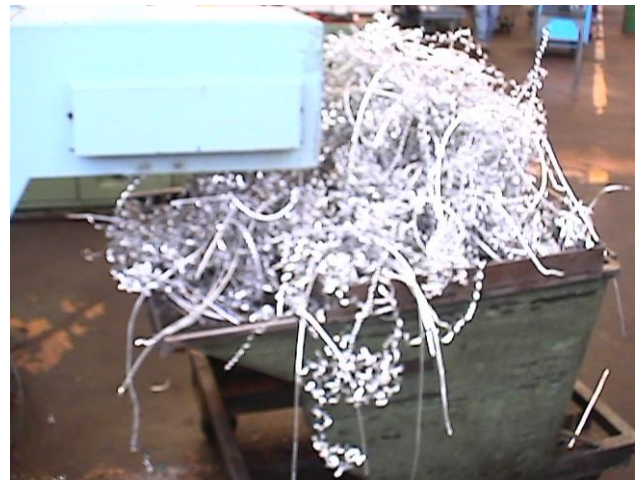


Figura 140 – Aspecto da apara no carro da limalha.

Outra acção foi tomada sobre o material a maquinar devido à geração de apara longa em fita foi o seu endurecimento através de um tratamento térmico por envelhecimento em estufa para aumento da dureza do material da superfície até ao núcleo.

Esta acção diminui a ductilidade do material evitando que a apara deslize sobre a geometria quebra apara da pastilha positiva utilizada.



Figura 141 – Aspecto da peça na face de sangramento.



Embora se tenha mantido uma apara longa, o tratamento térmico atenuou o efeito de escorregamento da apara na face de ataque da ferramenta diminuindo o tamanho da fita.

A resolução do problema estava na utilização de uma ferramenta de sangramento com lubrificação em contacto permanente com a aresta de corte.

Após consulta de fornecedores de ferramentas de corte, surge uma solução interessante de uma ferramenta e pastilha adequada à nossa crítica situação.

A solução encontrada é uma ferramenta com lubrificação interna inclusive na pastilha de sangramento.

A figura ao lado ilustra a operação de sangramento com o jacto dirigido e em contacto permanente com a aresta de corte.

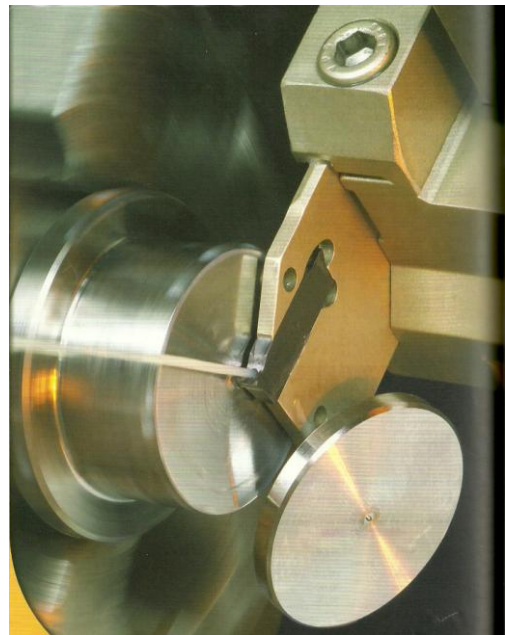


Figura 142 – Sangramento c/lubrificação. Fonte: Iscar Tools

A figura abaixo mostra o orifício na pastilha de sangramento que permite o jacto direccionado.

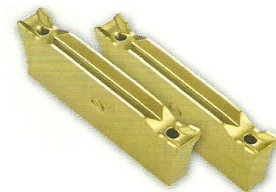


Figura 143 – Pormenor das pastilhas de sangramento. Fonte: Iscar Tools

As figuras ao lado ilustram a situação inicial com jacto dirigido para a zona de sangramento e a situação do jacto em contacto permanente com a aresta de corte.

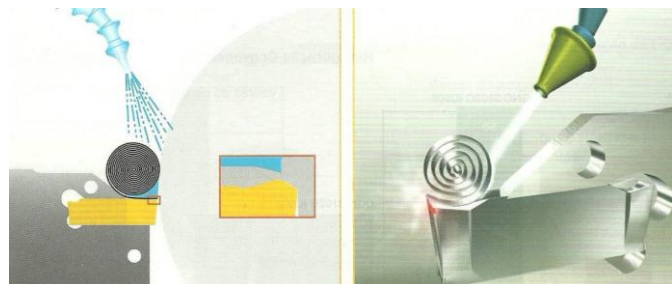


Figura 144 – Fluido sem penetração ferramenta/peça. Fonte: Iscar Tools



Figura 145 – Fluido com penetração ferramenta/peça. Fonte: Iscar Tools



Os resultados obtidos após a utilização da ferramenta de sangramento estão representados nesta figura.

A peça do lado esquerdo foi obtida após a correcção da ferramenta e do lado direito com a primeira opção para a operação de sangramento.

O acabamento superficial melhorou e as rebarbas nos furos descentrados diminuíram.



Figura 146 – Aspecto da face de sangramento das peças no ensaio.

Uma limitação no ensaio, foi o facto da máquina CNC utilizada ter uma limitação de rotação da árvore cerca de 3500 rpm.

A máquina não possui uma sub-árvore para maquinar a zona posterior de acabamento insatisfatório e eliminação das rebarbas.

É necessária uma operação de facejamento.

11.1.9 Ficha técnica do ensaio

Tabela 5 – Ficha técnica do ensaio em alumínio

Ficha Técnica								
Disco rotativo em alumínio								
Tempo de maquinagem	1' 10"		EN AW 6061 (AlMg1SiCu)		Torno CNC automático			
Parâmetros de corte								
Sequência	Operação	Nº	Descrição da Ferramenta - Suporte + Pastilha	Vc (m/min)	n (rpm)	f (mm/rot)	Vf (mm/min)	dm (mm)
1ª	Furação ao centro	T10	Broca Especial D15xD11	120	3500	0,15	525	11
2ª	Torneamento exterior	T04	SVJBR 2020 K16 + VCGT 160404 - PM2 (WK1)	330	3000	0,1	300	35
3ª	Torneamento da caixa frontal baixo relevo	T07	RB110.0016.16.2 + RA110.2030.3.0	235	3000	0,1	300	25
4ª	Ranhurar exterior diâmetro 13,3 mm	T11	SCTR1616 + CTR121005N	132	3000	0,15	450	14
5ª	Furos descentrados	T06	Broca Especial D11xD7	100	3500	0,07	245	9
6ª	Sangramento	T01	DGFH 32C-3 + DGNC 3102C	154	1400	0,1	350	35





11.2 Puxador de porta exterior em inox

11.2.1 Aplicação da peça em estudo

A peça em estudo tem aplicação exterior e o seu material é o inox para evitar a corrosão devido ao contacto com os meios mais agressivos, em particular a humidade.

A peça exige bom acabamento nas suas superfícies exteriores todas são estéticas e com acabamento final.

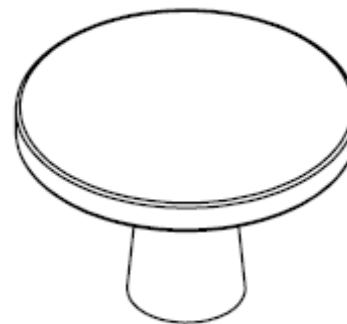


Figura 147 – Perspectiva do puxador exterior em inox.

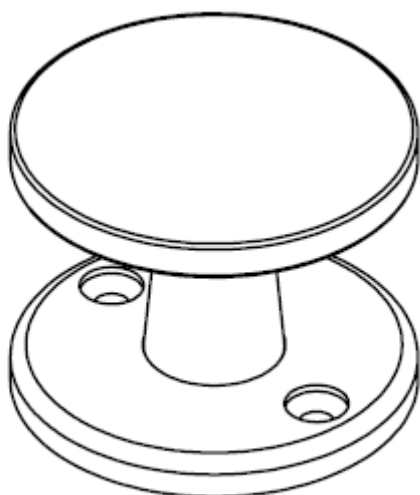


Figura 148 – Perspectiva do conjunto.

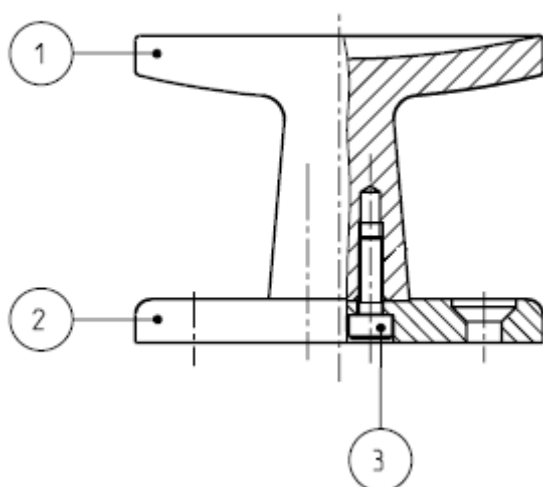


Figura 149 – Desenho técnico do conjunto.

Legenda: **1- Puxador exterior em inox; 2- Base do puxador; 3- Parafuso de ligação**



11.2.2 Desenho técnico da peça em inox

A peça é constituída por dois furos roscados M3 com comprimento de aperto mínimo de 10 mm, para a fixação do puxador à base que por sua vez faz a ligação à porta exterior.

Entre o diâmetro 52mm até um diâmetro de 18mm e a zona inclinada 10°, é retirada uma grande quantidade de material em desbaste.

A zona visível da peça com R110 deve ter excelente acabamento, bem como, todas as superfícies estéticas do puxador.

A zona de R110 tem uma segunda operação de torneamento.

O comprimento dos furos tem um comprimento mínimo a cumprir, para permitir a evacuação da limalha na operação de roscar.

Os machos M3 tem uma relação L/D muito elevada, qualquer obstáculo ao seu trabalho pode provocar a sua quebra.

MATERIAL :
EN10088-2-X5CrNi18 10

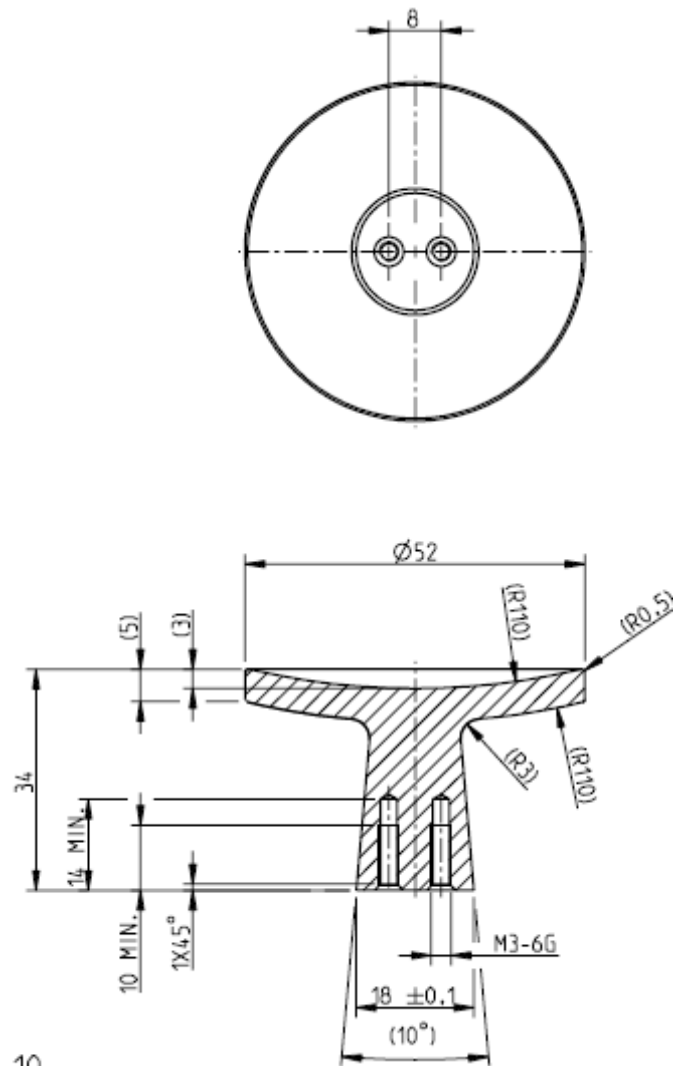


Figura 150 – Desenho técnico da peça.

11.2.3 Material

O material a maquinar é um aço inox, de acordo com a norma EN10088-2-X5CrNi18 10 equivalente a um aço da norma AISI comercialmente conhecido por, aço inox 304.

O diâmetro de cavilha a maquinar é 55mm e comprimento de 3000 mm.

Os principais constituintes são o cromo, níquel e a sua massa é 124 gr.

11.2.4 Máquina

A máquina utilizada é a mesma do ensaio anterior, ou seja, um torno CNC automático de alimentação de cavilha.



11.2.5 Fluido de corte

A escolha do fluido de corte é importante para um aço inox, normalmente na maquinagem surgem problemas de agressividade do material devido à sua percentagem de cromo.

Após consulta de fornecedores de lubrificantes e refrigerantes o fluido seleccionado foi da empresa Petrochem.

O fluido tem nome comercial Petrocut-EP é um óleo refrigerante sintético de baixa produção de espuma e emulsão aconselhada de 1:15, ou seja, por cada litro de fluido 15 de água.

O tanque do torno foi totalmente limpo para evitar contaminação do novo banho.



Figura 151 – Logótipo do fornecedor. Fonte: Petrochem.

A ficha técnica do fluido, é a seguinte:

PETROCUT-EP

**ÓLEO REFRIGERANTE
SINTÉTICO
BAIXA PRODUÇÃO DE ESPUMA**

FEV/07

DESCRIÇÃO

Formulado a partir de substâncias com características lubrificantes e refrigerantes, aditivadas com inibidores de corrosão e sequestrantes.

CARACTERÍSTICAS

Líquido transparente, ligeiramente castanho e inodoro.

PROPRIEDADES

- Elevada acção lubrificante e refrigerante.
- Transparente em qualquer tipo de água, mesmo em águas "duras", permitindo uma visibilidade total do trabalho.
- Não empasta nem cria depósitos nas partes rotativas, reduzindo os tempos de paragem e limpeza.
- Facilmente removível com água ou um desengordurante.
- Não liberta fumos ou vapores.
- Aumenta a duração das ferramentas e permite trabalhar com maior velocidade.
- Diminui a fricção e o desgaste permitindo um acabamento mais perfeito.

CAMPOS DE APLICAÇÃO

Óleo de corte recomendado para trabalhar aço, ferro, alumínio, cobre, bronze, latão e outros metais e suas ligas, em operações de corte, furação, rectificação, fresagem, roscagem, torneação, etc.

MODO DE EMPREGO

As diluições a efectuar variam em função do metal a trabalhar e do tipo de operações a executar.

Como orientação de referência aconselhamos diluições com água de 1:20 até 1:60 (Consultar tabela de diluições no verso).

Antes de utilizar o produto é conveniente proceder à limpeza prévia de todo o sistema de refrigeração com o nosso desengordurante PETROGOR, diluído com 5 partes de água a fim de remover todos os resíduos de produtos anteriormente usados.

Evitar contaminações com óleos vegetais e minerais.

CLASSIFICAÇÃO

Nocivo

Figura 152 – Ficha técnica do fornecedor. Fonte: Petrochem.



Tabela 6 – Diluições em água recomendadas para o Petrocut-EP em função das diferentes operações e tipos de material. Fonte: Petrochem.

Operações	Aços de Elevada Resistência ao Calor	Aços Normais	Aços Ligados	Aços Inox	Ferro Fundido	Titânio	Alumínio	Ligas de Cobre	Ligas de Chumbo
Afiar	1:10	1:10	1:10	1:10	1:20	1:10	1:40	1:20	1:20
Calandrar	1:12	1:20	1:20	1:20	1:20	1:15	1:40	1:20	1:20
Furar	1:10	1:15	1:15	1:15	1:15	1:10	1:40	1:15	1:15
Frezar	1:12	1:20	1:20	1:20	1:20	1:15	1:30	1:20	1:20
Mandrilar	1:7	1:15	1:15	1:10	1:15	1:10	1:30	1:15	1:15
Perfilar	1:10	1:18	1:18	1:18	1:18	1:10	1:40	1:20	1:20
Rectificar	1:60	1:60	1:60	1:60	1:60	1:50	1:70	1:60	1:60
Roscar	1:7	1:10	1:10	1:10	1:10	1:10	1:30	1:15	1:15
Serrar	1:7	1:10	1:10	1:10	1:10	1:10	1:35	1:12	1:12
Tornear	1:12	1:20	1:20	1:20	1:20	1:15	1:30	1:20	1:20

OBS: Se se verificar formação de espuma, utilizar menor quantidade de PETROCUT-EP.

11.2.6 Sequência de maquinagem

A primeira operação é o desbaste, é retirada 3mm de material por banda e em offset com o contorno final para homogeneizar as passagens de desbaste.

Esta situação foi conseguida recorrendo ao Autocad para determinação os pontos de torneamento em desbaste, para permitir sempre a mesma profundidade de corte ao longo do contorno e evitar uma “escada” de material na zona dos raios R3 e R110.

Logo, de seguida a operação de acabamento.

Para os furos roscados, inicialmente uma operação de ponto para guiar as brocas, depois os furos diâmetro 2,5 mm e consequentemente o macho M3-6G para as roscas.

Por fim, a operação de sangramento.

A selecção das ferramentas de corte foi discutida com os representantes portugueses da Kennametal e Guhring.



11.2.6.1 Sequência de Operações

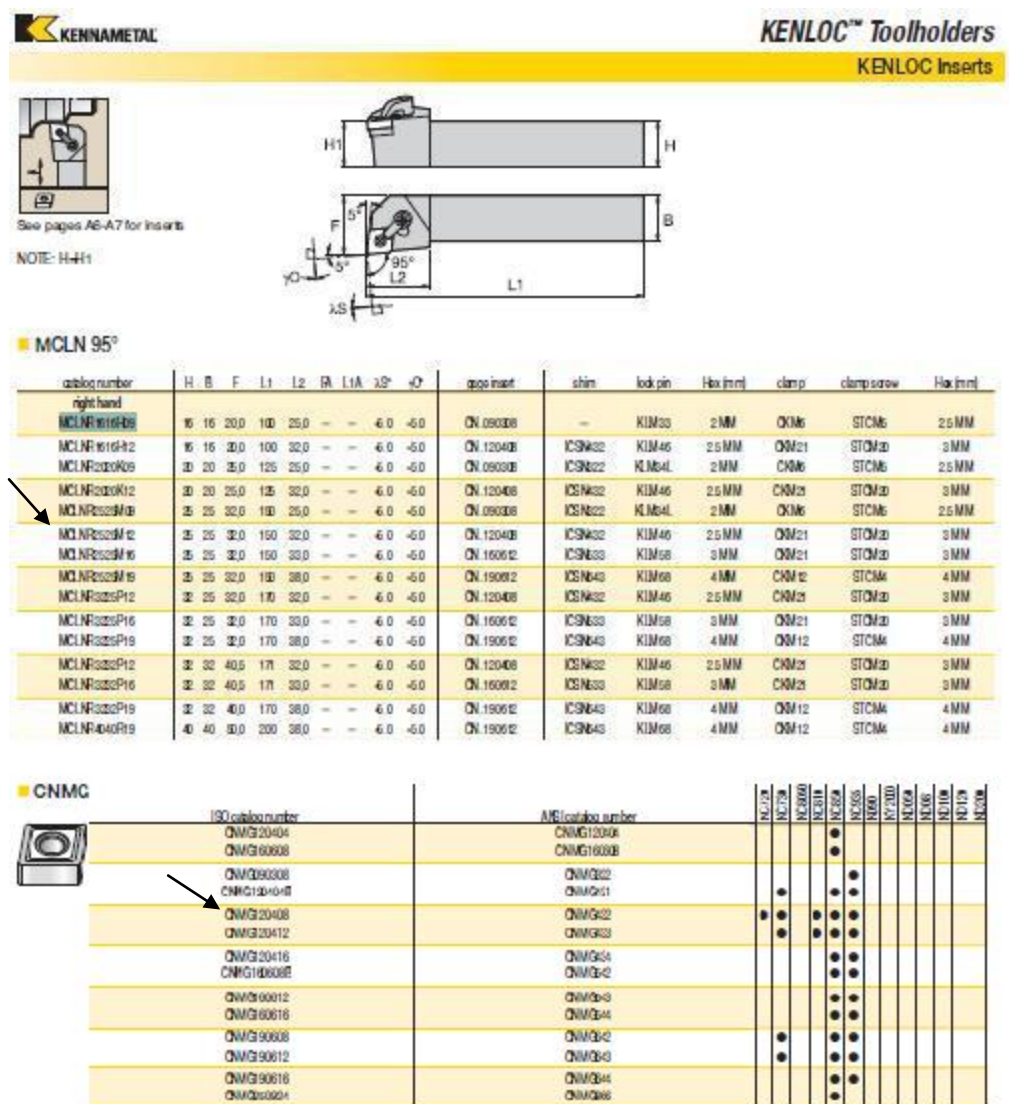
1ª Operação – Desbaste

$V_c = 150 \text{ m/min}$ ($V_c = \text{constante}$, no programa CNC o código G96 limita a rotação)

$n_{\text{máx.}} = 2500 \text{ rpm}$ (varia com o diâmetro)

$f = 0,3 \text{ mm/rot.}$

$V_{f_{\text{máx.}}} = 750 \text{ mm/min}$



Grau: KC935

Figura 153 – Suporte e pastilha para desbaste. Fonte: Kennametal



2ª Operação – Acabamento

$V_c = 70 \text{ m/min}$ ($V_c = \text{constante}$, no programa CNC o código G96 limita a rotação)

$n_{\text{máx.}} = 2500 \text{ rpm}$ (varia com o diâmetro)

$f = 0,3 \text{ mm/rot.}$

$V_{f_{\text{máx.}}} = 750 \text{ mm/min}$



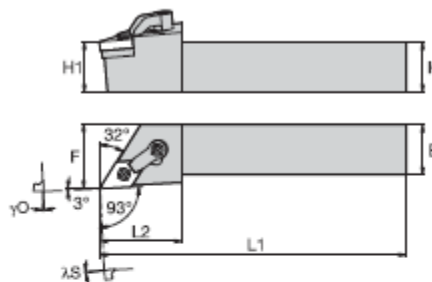
KENLOC™ Toolholders

KENLOC Inserts



See pages A22-A23 for inserts

NOTE: $H=H1$



■ MDJN 93°

catalog number	H	B	F	L1	L2	FA	L1A	λS°	γO°	page insert	shim	lock pin	Hex (mm)	clamp	clamp screw	Hex (mm)
right hand																
MDJNR1616H11	16	16	20,0	100	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL110408	IDSN332	KLM34L	2 MM	CXM7	STCM5	2,5 MM
MDJNR2020K11	20	20	25,0	125	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL110408	IDSN332	KLM34L	2 MM	CXM7	STCM5	2,5 MM
MDJNR2020K15	20	20	25,0	125	36,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150612	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM
MDJNR2525M11	25	25	32,0	150	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL110408	IDSN332	KLM34L	2 MM	CXM7	STCM5	2,5 MM
MDJNR2525M15	25	25	32,0	150	36,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150612	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM
MDJNR3225P15	32	25	32,0	170	36,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150612	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM
MDJNR3225P15	32	32	40,5	173	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150608	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM
left hand																
MDJNL1616H11	16	16	20,0	100	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL110408	IDSN332	KLM34L	2 MM	CXM7	STCM5	2,5 MM
MDJNL2020K11	20	20	25,0	125	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL110408	IDSN332	KLM34L	2 MM	CXM7	STCM5	2,5 MM
MDJNL2020K15	20	20	25,0	125	36,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150612	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM
MDJNL2525M11	25	25	32,0	150	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL110408	IDSN332	KLM34L	2 MM	CXM7	STCM5	2,5 MM
MDJNL2525M15	25	25	32,0	150	36,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150612	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM
MDJNL3225P15	32	25	32,0	170	36,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150612	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM
MDJNL3225P15	32	32	40,5	173	32,0	—	—	-5,0	-5,0	DNL150608	IDSN432	KLM46L	2,5 MM	CXM22	STCM20	3 MM



ISO catalog number

ANSI catalog number

D		L10		S		R _h		D1	
mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in

■ DNMG-MS



DNMG110408MS	DNMG332MS	9,53	3/8	11,63	.458	4,76	3/16	0,8	1/32	3,81	.150
DNMG150401MS	DNMG430MS	12,70	1/2	15,50	.610	4,76	3/16	0,1	.004	5,16	.203
DNMG150402MS	DNMG4305MS	12,70	1/2	15,50	.610	4,76	3/16	0,2	.008	5,16	.203
DNMG150404MS	DNMG431MS	12,70	1/2	15,50	.610	4,76	3/16	0,4	1/64	5,16	.203
DNMG150408MS	DNMG432MS	12,70	1/2	15,50	.610	4,76	3/16	0,8	1/32	5,16	.203
DNMG150412MS	DNMG433MS	12,70	1/2	15,50	.610	4,76	3/16	1,2	3/64	5,16	.203
DNMG150604MS	DNMG441MS	12,70	1/2	15,50	.610	6,35	1/4	0,4	1/64	5,16	.203
DNMG150608MS	DNMG442MS	12,70	1/2	15,50	.610	6,35	1/4	0,8	1/32	5,16	.203
DNMG150612MS	DNMG443MS	12,70	1/2	15,50	.610	6,35	1/4	1,2	3/64	5,16	.203

Figura 154 – Suporte e pastilha para acabamento. Fonte: Kennametal



3ª Operação – Ponto de guiamento da broca

$V_c = 18 \text{ m/min}$ (diâmetro médio de 4mm)

$n = 1400 \text{ rpm}$

$f = 0,04 \text{ mm/rot.}$

$V_f = 50 \text{ mm/min}$

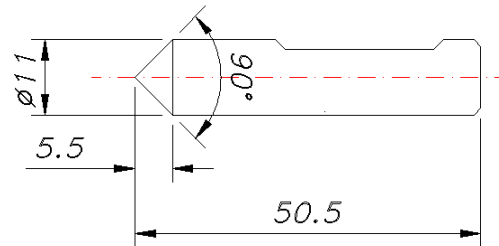


Figura 155 – Broca especial D11 para ponto de guiamento.

4ª Operação – Furação diâmetro 2,5 mm

$V_c = 28 \text{ m/min}$ (diâmetro 2,5 mm)

$n = 3500 \text{ rpm}$

$f = 0,02 \text{ mm/rot.}$

$V_f = 60 \text{ mm/min}$

5xD

Series 605

Application Materials:

Bright Finish

Type Ti

Cobalt, Type Ti, Jobber length, self-centering 130° split point, web thinned >1.0mm dia., standard straight shank, RH helix

Cut / Shank Dia. = H8 tolerance range

External Coolant

Straight Shank

Speeds & Feeds
Information pg 356

$$d_1 = d_2 = d_3$$

Universal Steels

Stainless Steels

Ti & Ni Alloys

Dec. Inch	Frac. Inch	Wm / In	mm	mm
0.0719	1/16	0.300	7.62	3.00
0.0719	1/16	0.400	10.16	5.00
0.0719	1/16	0.440	11.18	5.00
0.0719	1/16	0.480	12.19	5.00
0.0719	1/16	0.520	13.21	6.00
0.0719	1/16	0.560	14.22	7.00
0.0719	1/16	0.600	15.24	8.00
0.0719	1/16	0.640	16.25	9.00
0.0719	1/16	0.680	17.27	10.00
0.0719	1/16	0.720	18.29	11.00
0.0719	1/16	0.760	19.30	12.00
0.0719	1/16	0.800	20.32	13.00
0.0719	1/16	0.840	21.34	14.00
0.0719	1/16	0.880	22.35	15.00
0.0719	1/16	0.920	23.37	16.00
0.0719	1/16	0.960	24.38	17.00
0.0719	1/16	1.000	25.40	18.00
0.0719	1/16	1.040	26.42	19.00
0.0719	1/16	1.080	27.43	20.00
0.0719	1/16	1.120	28.45	21.00
0.0719	1/16	1.160	29.47	22.00
0.0719	1/16	1.200	30.48	23.00
0.0719	1/16	1.240	31.50	24.00
0.0719	1/16	1.280	32.52	25.00
0.0719	1/16	1.320	33.54	26.00
0.0719	1/16	1.360	34.56	27.00
0.0719	1/16	1.400	35.58	28.00
0.0719	1/16	1.440	36.60	29.00
0.0719	1/16	1.480	37.62	30.00
0.0719	1/16	1.520	38.64	31.00
0.0719	1/16	1.560	39.66	32.00
0.0719	1/16	1.600	40.68	33.00
0.0719	1/16	1.640	41.70	34.00
0.0719	1/16	1.680	42.72	35.00
0.0719	1/16	1.720	43.74	36.00
0.0719	1/16	1.760	44.76	37.00
0.0719	1/16	1.800	45.78	38.00
0.0719	1/16	1.840	46.80	39.00
0.0719	1/16	1.880	47.82	40.00
0.0719	1/16	1.920	48.84	41.00
0.0719	1/16	1.960	49.86	42.00
0.0719	1/16	2.000	50.88	43.00
0.0719	1/16	2.040	51.90	44.00
0.0719	1/16	2.080	52.92	45.00
0.0719	1/16	2.120	53.94	46.00
0.0719	1/16	2.160	54.96	47.00
0.0719	1/16	2.200	55.98	48.00
0.0719	1/16	2.240	57.00	49.00
0.0719	1/16	2.280	58.02	50.00
0.0719	1/16	2.320	59.04	51.00
0.0719	1/16	2.360	60.06	52.00
0.0719	1/16	2.400	61.08	53.00
0.0719	1/16	2.440	62.10	54.00
0.0719	1/16	2.480	63.12	55.00
0.0719	1/16	2.520	64.14	56.00
0.0719	1/16	2.560	65.16	57.00
0.0719	1/16	2.600	66.18	58.00
0.0719	1/16	2.640	67.20	59.00
0.0719	1/16	2.680	68.22	60.00
0.0719	1/16	2.720	69.24	61.00
0.0719	1/16	2.760	70.26	62.00
0.0719	1/16	2.800	71.28	63.00
0.0719	1/16	2.840	72.30	64.00
0.0719	1/16	2.880	73.32	65.00
0.0719	1/16	2.920	74.34	66.00
0.0719	1/16	2.960	75.36	67.00
0.0719	1/16	3.000	76.38	68.00
0.0719	1/16	3.040	77.40	69.00
0.0719	1/16	3.080	78.42	70.00
0.0719	1/16	3.120	79.44	71.00
0.0719	1/16	3.160	80.46	72.00
0.0719	1/16	3.200	81.48	73.00
0.0719	1/16	3.240	82.50	74.00
0.0719	1/16	3.280	83.52	75.00
0.0719	1/16	3.320	84.54	76.00
0.0719	1/16	3.360	85.56	77.00
0.0719	1/16	3.400	86.58	78.00
0.0719	1/16	3.440	87.60	79.00
0.0719	1/16	3.480	88.62	80.00
0.0719	1/16	3.520	89.64	81.00
0.0719	1/16	3.560	90.66	82.00
0.0719	1/16	3.600	91.68	83.00
0.0719	1/16	3.640	92.70	84.00
0.0719	1/16	3.680	93.72	85.00
0.0719	1/16	3.720	94.74	86.00
0.0719	1/16	3.760	95.76	87.00
0.0719	1/16	3.800	96.78	88.00
0.0719	1/16	3.840	97.80	89.00
0.0719	1/16	3.880	98.82	90.00
0.0719	1/16	3.920	99.84	91.00
0.0719	1/16	3.960	100.86	92.00
0.0719	1/16	4.000	101.88	93.00
0.0719	1/16	4.040	102.90	94.00
0.0719	1/16	4.080	103.92	95.00
0.0719	1/16	4.120	104.94	96.00
0.0719	1/16	4.160	105.96	97.00
0.0719	1/16	4.200	106.98	98.00
0.0719	1/16	4.240	108.00	99.00
0.0719	1/16	4.280	109.02	100.00

Dec. Inch	Frac. Inch	Wm / In	mm	mm
0.0531	5/16	1.350	40.00	18.00
0.0531	5/16	1.400	41.27	18.00
0.0531	5/16	1.450	42.54	18.00
0.0531	5/16	1.500	43.81	18.00
0.0531	5/16	1.550	45.08	18.00
0.0531	5/16	1.600	46.35	18.00
0.0531	5/16	1.650	47.62	18.00
0.0531	5/16	1.700	48.90	18.00
0.0531	5/16	1.750	50.17	18.00
0.0531	5/16	1.800	51.44	18.00
0.0531	5/16	1.850	52.71	18.00
0.0531	5/16	1.900	53.98	18.00
0.0531	5/16	1.950	55.25	18.00
0.0531	5/16	2.000	56.52	18.00
0.0531	5/16	2.050	57.79	18.00
0.0531	5/16	2.100	59.06	18.00
0.0531	5/16	2.150	60.33	18.00
0.0531	5/16	2.200	61.60	18.00
0.0531	5/16	2.250	62.87	18.00
0.0531	5/16	2.300	64.14	18.00
0.0531	5/16	2.350	65.41	18.00
0.0531	5/16	2.400	66.68	18.00
0.0531	5/16	2.450	67.95	18.00
0.0531	5/16	2.500	69.22	18.00
0.0531	5/16	2.550	70.49	18.00
0.0531	5/16	2.600	71.76	18.00
0.0531	5/16	2.650	73.03	18.00
0.0531	5/16	2.700	74.30	18.00
0.0531	5/16	2.750	75.57	18.00
0.0531	5/16	2.800	76.84	18.00
0.0531	5/16	2.850	78.11	18.00
0.0531	5/16	2.900	79.38	18.00
0.0531	5/16	2.950	80.65	18.00
0.0531	5/16	3.000	81.92	18.00
0.0531	5/16	3.050	83.19	18.00
0.0531	5/16	3.100	84.46	18.00
0.0531	5/16	3.150	85.73	18.00
0.0531	5/16	3.200	87.00	18.00
0.0531	5/16	3.250	88.27	18.00
0.0531	5/16	3.300	89.54	18.00
0.0531	5/16	3.350	90.81	18.00
0.0531	5/16	3.400	92.08	18.00
0.0531	5/16	3.450	93.35	18.00
0.0531	5/16	3.500	94.62	18.00
0.0531	5/16	3.550	95.89	18.00
0.0531	5/16	3.600	97.16	18.00
0.0531	5/16	3.650	98.43	18.00
0.0531	5/16	3.700	99.70	18.00
0.0531	5/16	3.750	100.97	18.00
0.0531	5/16	3.800	102.24	18.00
0.0531	5/16	3.850	103.51	18.00
0.0531	5/16	3.900	104.78	18.00
0.0531	5/16	3.950	106.05	18.00
0.0531	5/16	4.000	107.32	18.00
0.0531	5/16	4.050	108.59	18.00
0.0531	5/16	4.100	109.86	18.00
0.0531	5/16	4.150	111.13	18.00
0.0531	5/16	4.200	112.40	18.00
0.0531	5/16	4.250	113.67	18.00
0.0531	5/16	4.300	114.94	18.00
0.0531	5/16	4.350	116.21	18.00
0.0531	5/16	4.400	117.48	18.00
0.0531	5/16	4.450	118.75	18.00
0.0531	5/16	4.500	120.02	18.00
0.0531	5/16	4.550	121.29	18.00
0.0531	5/16	4.600	122.56	18.00
0.0531	5/16	4.650	123.83	18.00
0.0531	5/16	4.700	125.10	18.00
0.0531	5/16	4.750	126.37	18.00
0.0531	5/16	4.800	127.64	18.00
0.0531	5/16	4.850	128.91	18.00
0.0531	5/16	4.900	130.18	18.00
0.0531	5/16	4.950	131.45	18.00
0.0531	5/16	5.000	132.72	18.00
0.0531	5/16	5.050	133.99	18.00
0.0531	5/16	5.100	135.26	18.00
0.0531	5/16	5.150	136.53	18.00
0.0531	5/16	5.200	137.80	18.00
0.0531	5/16	5.250	139.07	18.00
0.0531	5/16	5.300	140.34	18.00
0.0531	5/16	5.350	141.61	18.00
0.0531	5/16	5.400	142.88	18.00
0.0531	5/16	5.450	144.15	18.00
0.0531	5/16	5.500	145.42	18.00
0.0531	5/16	5.550	146.69	18.00
0.0531	5/16	5.600	147.96	18.00
0.0531	5/16	5.650	149.23	18.00
0.0531	5/16	5.700	150.50	18.00
0.0531	5/16	5.750	151.77	18.00
0.0531	5/16	5.800	153.04	18.00
0.0531	5/16	5.850	154.31	18.00
0.0531	5/16	5.900	155.58	18.00
0.0531	5/16	5.950	156.85	18.00
0.0531	5/16	6.000	158.12	18.00
0.0531	5/16	6.050	159.39	18.00
0.0531	5/16	6.100	160.66	18.00
0.0531	5/16	6.150	161.93	18.00
0.0531	5/16	6.200	163.20	18.00
0.0531	5/16	6.250	164.47	18.00
0.0531	5/16	6.300	165.74	18.00
0.0531	5/16	6.350	167.01	18.00
0.0531	5/16	6.400	168.28	18.00
0.0531	5/16	6.450		



5ª Operação – Roscar os furos M3-6G

$V_c = 24 \text{ m/min}$ (diâmetro de 3 mm)

$n = 2500 \text{ rpm}$

$f = 0,5 \text{ mm/rot.}$ (valor do passo da rosca M3)

$V_f = 1250 \text{ mm/min}$

Stainless Steel and Aerospace Alloys



DIN length - DIN shank

Series 2895 - Cobalt, Metric, 15° helix, TiN coated, DIN 376

Series 2896 - Cobalt, Metric, 15° helix, TiN coated, DIN 371



Size	No. Flutes	Shank dia. mm	Square Size mm	Overall Length mm	ISO2 (6H) Approx. Limits	DIN 376 S Series 2895	DIN 371 S Series 2896	Order No.
M3 X 0.50	3	3.500	2.700	56.000	D2/D3		●	3.000
M4 X 0.70	3	4.500	3.400	63.000	D3/D4		●	4.000
M5 X 0.80	3	6.000	4.900	70.000	D3/D4		●	5.000
M6 X 1.00	3	6.000	4.900	80.000	D4/D5		●	6.000
M8 X 1.25	3	8.000	6.200	90.000	D4/D5		○	8.000
M10 X 1.50	3	10.000	8.000	100.000	D4/D5		○	10.000
M12 X 1.75	3	9.000	7.000	110.000	D5/D6	○		12.000
M14 X 2.00	3	11.000	9.000	110.000	D5/D6	○		14.000
M16 X 2.00	4	12.000	9.000	110.000	D6/D7	●		16.000
M18 X 2.50	4	14.000	11.000	125.000	D6/D7	○		18.000
M20 X 2.50	4	16.000	12.000	140.000	D6/D7	●		20.000
M22 X 2.50	4	18.000	14.500	140.000	D6/D7	○		22.000
M24 X 3.00	4	18.000	14.500	160.000	D7/D8	○		24.000

**METRIC /
METRIC
FINE**



Blind Hole

15° Helix

**Semi-bottoming
Chamfer Lead**

Figura 157 – Macho M3x0,5. Fonte: Guhring.



6ª Operação – Sangramento

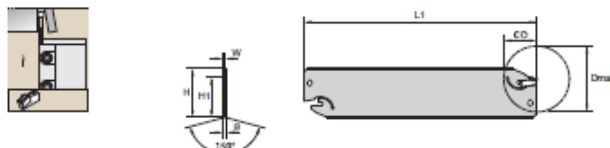
$V_c = 82 \text{ m/min}$ (diâmetro médio de 40 mm)

$n = 650 \text{ rpm}$

$f = 0,05 \text{ mm/rot.}$

$V_f = 35 \text{ mm/min}$

A2 Cut-Off Blades



A2BNSN

H	part size	catalog number	W	H1	L1	B	D max	CD	assembly wrench
10	Ø8	AcBNStak1010	1,4	15,5	86	2	27	14	170 137
10	1	AcBNStak1016	1,6	15,4	86	2	30	16	170 137
10	2	AcBNStak1022	2,2	15,4	86	2	—	20	170 137
20	Ø8	AcBNStak2015	1,4	21,5	90	2	30	15	170 137
20	Ø8	AcBNStak2015	1,4	21,5	110	2	30	15	170 137
20	1	AcBNStak2017	1,6	21,4	110	2	34	17	170 137
20	2	AcBNStak2022	2,2	21,4	110	2	—	25	170 137
20	2	AcBNStak2022	2,2	21,4	90	2	—	25	170 137
20	2	AcBNStak2022	2,2	21,4	110	2	—	25	170 137
20	3	AcBNStak2030	3,0	21,4	110	2	—	40	170 137
20	3	AcBNStak2030	3,0	21,4	110	2	—	40	170 137
20	3	AcBNStak2030	3,0	21,4	90	2	—	40	170 137
20	4	AcBNStak2040	4,0	21,4	110	3	—	40	170 137
20	5	AcBNStak2050	5,0	21,4	110	4	—	40	170 130
20	6	AcBNStak2060	6,0	21,4	110	5	—	40	170 130
30	Ø8	AcBNStak3015	1,4	25,1	110	2	30	15	170 137
30	1	AcBNStak3019	1,6	25,0	110	2	38	19	170 137
30	2	AcBNStak3022	2,2	25,0	110	2	—	60	170 137
30	3	AcBNStak3030	3,0	25,0	110	2	—	60	170 137
30	3	AcBNStak3030	3,0	25,0	110	2	—	60	170 137
30	4	AcBNStak3040	4,0	25,0	110	3	—	60	170 137
30	5	AcBNStak3050	5,0	25,0	110	4	—	60	170 130
30	6	AcBNStak3060	6,0	25,0	110	5	—	60	170 130
30	8	AcBNStak3080	8,0	45,2	210	7	—	110	170 132

A2 Cut-Off Inserts



● fine scratches
○ no fine scratches



Grau: KC5025

AZ-R-GF		W	H1	L1	B	D max	CD	assembly wrench	W	H2	L2	B2	D2 max	CD2	
	10	1,4	15,5	86	2	27	14	170 137	10	1,6	15,4	86	2	30	16
	1	1,6	15,4	86	2	30	16	170 137	10	2,2	15,4	86	2	—	20
	1	1,4	21,5	90	2	30	15	170 137	10	1,6	21,4	110	2	34	17
	1	1,6	21,4	110	2	34	17	170 137	10	2,2	21,4	110	2	—	25
	1	2,2	21,4	110	2	—	25	170 137	10	3,0	21,4	110	2	—	40
	1	2,2	21,4	90	2	—	25	170 137	10	3,0	21,4	110	2	—	40
	1	3,0	21,4	110	3	—	40	170 137	10	4,0	21,4	110	3	—	40
	1	3,0	21,4	90	2	—	40	170 137	10	5,0	21,4	110	4	—	40
	1	4,0	21,4	110	4	—	40	170 137	10	6,0	21,4	110	5	—	40
	1	5,0	21,4	110	5	—	40	170 137	10	8,0	45,2	210	7	—	110
	1	6,0	21,4	110	6	—	40	170 137	10	10,0	68,8	210	9	—	110
	1	8,0	45,2	210	7	—	110	170 132	10	12,0	68,8	210	11	—	110
	1	10,0	68,8	210	9	—	110	170 132	10	16,0	110,0	210	15	—	110
	1	12,0	68,8	210	11	—	110	170 132	10	20,0	110,0	210	19	—	110
	1	16,0	110,0	210	15	—	110	170 132	10	24,0	110,0	210	23	—	110

Figura 158 – Suporte e pastilha para sangramento. Fonte: Kennametal.



11.2.7 Programação CNC da peça

```
G95S300M03
M90
M98P1000
M52
M01

G92S2500
N100T1010G96S150M03
(DESBASTE)
G00X52.5Z2.M08
G01Z-35.0F0.3
X55.5
G00Z3.0
X46.0
G01Z-28.33F0.3
G03X52.0Z-28.78R110.
G00Z3.
X40.0
G01Z-27.56
G03X46.0Z-28.33R110.
G00Z3.
X34.0
G01Z-27.07
G03X40.0Z-27.56R110.
G00Z3.
X28.0
G01Z-26.66
G03X34.0Z-27.07R110.
G00Z3.
X22.0
G01Z-26.33
G03X28.0Z-26.66R110.
G00Z3.
X20.0
G01Z-25.24
G03X22.0Z-26.33R110.
G00Z0.0
G01X-1.0F0.2
G00Z6.
X150.0Z150.0
M01

N11T1111S70
(ACABAMENTO)
G00X19.0Z3.0M08
G01X16.0Z-25.24F0.3
X21.0
```



G00Z3.0
X17.4
G01G42Z.1F0.15
X18.0Z-0.2
X13.95Z-23.16
G02X19.42Z-26.41R3.0
G03X51.6Z-28.98R110.0
G01X52.0Z-29.18
Z-35.0F.05
X55.5
G00G40X120.0Z200.0
M01

N2T0202M10
(PONTO GUIAMENTO BROCA)
G00G28C0.0
C0.0
M70
G00Z3.0M08
X8.
G97S1400M73
G01G94Z-2.2F50
G00Z3.0
M71
C180.0
M70
G01Z-2.2
G00Z100.0
M71
M01

N4T0404M10
(FUROS FRONTAIS)
G00G28C0.0
C0.0
M70
G00X8.Z3.0M08
G97S3500M73
G01G94Z-8.0F60
Z5.0F600
Z-5.0
G01Z-12.5F60
Z5.0F600
Z-9.5
G01Z-17.0F60
G00Z3.0
M71
C180.0
M70
G01Z-8.0F60
Z5.0F600



Z-5.0
 G01Z-12.5F60
 Z3.F600
 Z-9.5
 G01Z-17.0F60
 G00Z150.0
 M75
 M11
 M71
 G95
 M01

 N4T0505M10
 (ROSCAR FUROS)
 G00G28C0.0
 M70
 G00X8.0Z3.0M08
 G97S2500M73
 G32
 G01G95Z-12.0F0.5
 G00Z3.0
 M71
 C180.0
 M70
 G00X-8.0.Z3.0M08
 G32
 G01G95Z-12.0F0.5
 G00Z150.0
 M11
 M71
 M01

 N7T0707G97S650M03
 (SANGRAR)
 G00X57.0Z5.0M08
 Z-34.5
 G01X30.0F0.05
 X40.0F0.5
 X32.0
 X20.0F0.05
 X30.0F0.5
 X22.0
 X10.0F0.05
 X20.0F0.5
 X12.0
 G01X-4.F0.05M22
 G00X57.0M23
 Z150.0M09
 M01
 M30
 %□



11.2.8 Observações técnicas do ensaio

Numa fase inicial, a retirada de material na operação de desbaste foi cuidadosa.

Primeiro foi retirada 1mm por banda, depois 2mm e finalmente 3mm em 7 passagens.

O comportamento da ferramenta de desbaste demonstrou bons resultados, bem como, a operação de acabamento com uma passagem de homogeneização e outra a cumprir o contorno final do desenho.

Na operação de sangramento a figura ao lado mostra o aspecto final na peça.

Nesta operação, foram obtidos resultados satisfatórios (mas não os melhores) devido ao poder refrigerante da emulsão.

Após análise da face de sangramento imediatamente à operação, observou-se que esta tinha mau acabamento e uma temperatura baixa.

No entanto, devido à agressividade do material provocado pelo teor de cromo o acabamento foi mau e a pastilha de sangrar demonstrou algum desgaste.



Figura 159 – Aspecto da face de sangramento.

O ponto antes da furação permite o guiamento da broca para evitar a sua flexão e auto centrar relativamente ao escareado executado previamente.

Na furação, dos furos diâmetro 2,5 mm foi usada a técnica “pica-pau” com a broca a entrar três vezes.

Também na furação, o desenho exige uma cota mínima de 14 mm o comprimento foi executado com 17 mm, permite uma melhor evacuação da limalha e evita que o macho prenda a limalha no fundo dos furos.

A selecção adequada das ferramentas, parâmetros de corte e a refrigeração eficiente permitiram bons resultados no ensaio do inox.

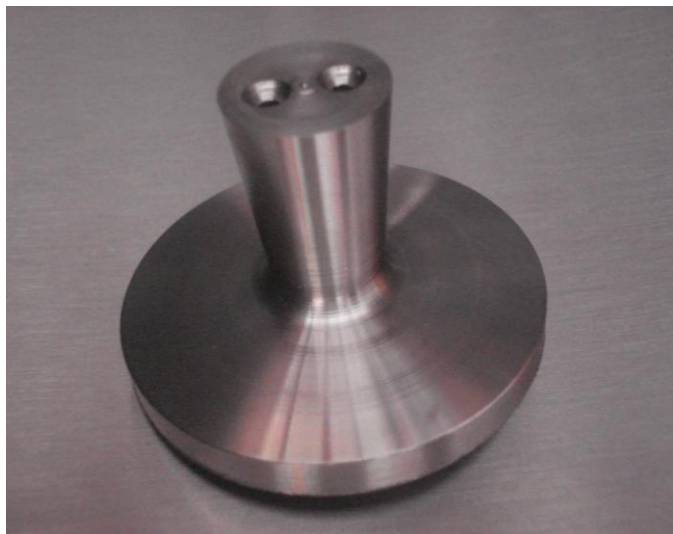


Figura 160 – Aspecto do acabamento da peça.



11.2.9 Ficha técnica do ensaio

Tabela 7 – Ficha técnica do ensaio em inox

Ficha Técnica								
Puxador de porta exterior em inox								
Tempo de maquinagem	1' 30"	EN10088-2-X5CrNi18 10		Torno CNC automático				
Parâmetros de corte								
Sequência	Operação	Nº	Descrição da Ferramenta - Suporte + Pastilha	Vc (m/min)	n (rpm)	f (mm/rot)	Vf (mm/min)	dm (mm)
1ª	Desbaste	T10	MCLNR2525M12 + CNMG020408	150	2500	0,3	750	-----
2ª	Acabamento	T11	MDJNR2525M15 + DNMG150608MS	70	2500	0,3	750	-----
3ª	Ponto guiamento da broca	t02	Broca Especial Guiamento D11	18	1400	0,04	50	4
4ª	Furação dos furos 2,5mm	T04	Broca HSS Diâmetro 2,5 mm	28	3500	0,02	60	2,5
5ª	Roscar a macho M3-6G	T05	Macho HSS M3 revestido TiN	24	2500	0,5	1250	3
6ª	Sangramento	T07	A2BNSN32M04 + A2040R06CF02	82	650	0,05	35	40



12. Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros

No trabalho realizado foram abordados factores que influênciam a maquinagem, no entanto, existe outras considerações importantes e actuais que devem servir para futuro estudo.

De realçar os seguintes assuntos: maquinagem de alta velocidade, tecnologia CAD/CAM, máquinas multi-tarefas, maquinagem de peças pequenas (nanomaquinagem), sistemas de fabrico, metrologia em maquinagem, manutenção dos equipamentos e ferramentas de corte, análise de custos e investimento.

A tecnologia de Maquinagem a Alta Velocidade (MAV) representa uma avançada tecnologia de produção com grande potencial no futuro próximo ou **HSM (High Speed Machining)** ou **HSC (High Speed Cutting)**, como preferem alguns autores.

Em meados dos anos 80, com o desenvolvimento de novas máquinas ferramentas, concepção dos componentes vitais (p.e. rolamentos, chumaceiras, servo-motores e eixos-árvore, etc.), aperfeiçoamento de ferramentas de corte, software CAD/CAM a sua aplicação foi possível desenvolver a tecnologia, em empresas da indústria aeronáutica e automóvel.

Outras conclusões foram surgindo, a qualidade das superfícies maquinadas melhorou como aumento de V_c (valores R_a 0,2 μm e R_z de 3 μm não são raros, eliminação de operações subsequentes de acabamento) e o calor gerado durante o processo de maquinagem a altas velocidades de corte é em grande parte dissipado pela remoção da apara.

É necessário controlar as variáveis de processo fundamentais para a vida da ferramenta e afirmação do conceito de HSM.

Os resultados de aplicação do HSM que tornam o processo vantajoso comparado com o convencional, são:

- Redução tempo maquinação (diminuição custos, set-up máquina, rotação elevada etc.)
- Qualidade superficial e dimensional (eliminação operações, perfeição das superfícies, precisão, maquinagem de paredes finas, cantos, detalhes de difícil acesso, etc)
- Diminuição das forças de corte (aumento da vida da ferramenta, velocidade, etc.)

Uma outra vertente é a maquinagem a seco.

Motivos económicos e ecológicos, como a intensificação de exigências legais e os custos resultantes exigem esforços especiais na redução do uso de fluidos de corte.

Os avanços da maquinagem a seco serão continuados no futuro.

Considerando que a aplicação da maquinagem a seco em certos materiais é difícil e o custo de ferramentas elevado, a aplicação do conceito MQL torna-se uma solução de compromisso viável.

Quantidade de fluído muito baixa e de aplicação precisa na zona de corte é possível alcançar as especificações da peça e muito satisfatória vida das ferramentas de corte.



Por último, a micromaquinagem ou nanomaquinagem é a maquinagem de componentes de reduzidas dimensões, ou seja, produção de peças em miniatura.

São bons exemplos de aplicação desta tecnologia de microfabricação em componentes, tais como, telemóveis, relógios, metrologia, medicina, electrónica, etc.

Execução de diâmetros em furação inferiores a 0,1 mm e tolerâncias de 0,005 mm.

A principal exigência é a integração funcional de todos os componentes pequenos e minúsculos.

A tecnologia é também aplicada nas ferramentas de produção: moldação por injeção, estampagem, electroerosão, etc.

O desafio é a construção de máquinas ferramentas com eixos-árvore de elevada rotação (500000 rpm) para atingir as velocidades de corte necessárias com ferramentas de diâmetros extremamente pequenos.



13. Bibliografia e Referências

- Pinto Soares (5ª edição), Aços características e tratamentos térmicos;
- Centimfe (2002), Manual prático de corte por arranque de apara;
- Sandvik (2003), Usinagem em altíssimas velocidades, Publindústria;
- Paulo Davim (1995), Princípios de maquinagem, Almedina;
- Dino Ferraresi (2003), Fundamentos da usinagem dos metais, Editora Edgard Blucher Ltda;
- Luis Andrade Ferreira (1998), Tribologia 2ª edição;
- Sandvik (2005), Manual técnico de usinagem;
- Sandvik (2010), Catálogo Principal;
- Frezite (2010), Catálogo Principal;
- Seco Tools (2010), Guia de fresagem;
- Seco Tools (2010), Guia de torneamento;
- Kennametal (2008), Catálogo de torneamento;
- Iscar Tools (2010), Catálogo principal;
- Guhring (2010), Catálogo de furação e roscagem;
- Sumitomo Tools, Catálogo de torneamento;
- Paul Horn (2010), Catálogo de ferramentas de ranhurar;
- Walter (2006), Catálogo de torneamento;
- Castrol (2003), Catálogo de produtos;
- Petrochem (2010), Catálogo de produtos;
- Wieland (2008), Catálogo de produtos;
- Practical CNC-Training for Planning and Shop, Part 1: Fundamentals Hanser Publishers
- Computer Numerical Control, Glencoe McGraw-Hill Hans B. Kief T. Frederick Waters
- Fanuc Operator Guide
- Fanuc Programming Instructions Guide
- Fundamentals of metal machining and machine tools, Boothroyd, Geoffrey McGraw Hill



<http://www.coromant.sandvik.com/>

<http://www.secotools.com/>

<http://www.precision-techno.com/turning.htm>

<http://www.gildemeister.com/startpage/en/index.html>

<http://www.gildemeister.com/startpage/en/index.html>

<http://www.kyocera-componentes.com.br/ceratip/classes/pcd.htm>

<http://www.mazak.com/english/index.html>

<http://www.okuma.com/>

<http://www.castrol.com/castrol/castrolhomepage.do?categoryId=3120>

<http://www.fuchs.pt/maquinacao.php?id=76&sub=122>

http://www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids_manual.html

<http://www.mfg.mtu.edu/testbeds/cfest/fluid.html>

<http://www.monroefluid.com/technical-info/product-literature>

<http://www.chevronlubricants.com/products/metalworking-fluids.aspx>

<http://www.guhring.com/>

http://www.jmcabre.com/web%20english/acerca_qui_som.htm

http://www.dcswiss.ch/EN/News_Events/Archives.htm

<http://www.schaublin.ch/>

<http://www.mitsubishicarbide.com/nonflash.html>

<http://www.rohm-products.com/>

http://www.schunk.com/index_select_your_country2.html?r=1

<http://kitagawa.com/>

<http://www.mikron.com/mikron/internet.nsf/ID/HomeEN>

<http://www.sme.org/cgi-bin/getsmepg.pl?communities/mta/mtahome.htm&&&SME&>

<http://www.coxmanufacturing.com/materialsguide.htm>

<http://www.nei.com.br/artigos/artigo.aspx?i=71>

http://www.universallubrificantes.com.br/conteudo_1.php?idmenu=88&idconteudo=52

http://www.webermaq.com.br/produtos.asp?cod_categoria=61

<http://fk.um.edu.my/~icmm2006/CD/P123.pdf>



<http://www.me.ua.edu/PMRF/JMSE07.pdf>

http://www.yl-garden.com/en_article_detail.asp?id=70

http://www.skf.com/portal/skf_lub/home/products?contentId=873226&lang=pt

<http://www.lubcon.com/schmieroele.0.html?&L=1>

<http://www.diamondtool.com/>

<http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/brochure/ENG/C-1140-531.pdf>

<http://www.carbidedepot.com/sandvik-grades.htm>

<http://www.ctemag.com/dynamic.articles.php?id=152>

<http://www.cutting-tool.americanmachinist.com/BDEList.aspx>