



5.	Processo de Fabricação por remoção de material	
5.1	Fundamentos da fabricação por remoção de material	2
5.1.1	Introdução	2
5.1.2	Fundamentos da mecânica da formação do cavaco	3
5.1.3	Tipos de cavaco	5
5.1.4	Forças e potências na usinagem	7
5.1.5	Vida da ferramenta – desgaste e fratura	7
5.1.6	Usinabilidade	11
5.1.7	Materiais para ferramentas de usinagem	12
5.1.8	Fluidos de corte	16
5.1.9	Questões para estudo dirigido	17
5.1.10	Bibliografia	17
5.2	Classificação dos processos de fabricação por remoção de material	
5.2.1	Processos de fabricação de peças assimiláveis a sólidos de revolução	18
5.2.2	Variáveis do processo	20
5.2.3	Máquinas ferramentas – tornos	22
5.2.4	Operações de fresamento	24
5.2.5	Operações de retífica	27
5.2.6	Usinagem química	31
5.2.7	Eletroerosão	33
5.2.8	Questões para estudo dirigido	34
5.2.9	Bibliografia	34
5.3	Introdução ao controle numérico	
5.3.1	Introdução	35
5.3.2	Conceitos básicos de programação CNC	37
5.3.3	Programação manual – torno	41
5.3.4	Questões para estudo dirigido	49
5.3.5	Bibliografia	49
5.4	Metrologia – resolução, repetibilidade e precisão	
5.4.1	Introdução	50
5.4.2	Erros de medição	51
5.4.3	Questões para estudo dirigido	51
5.4.4	Bibliografia	52



5.1 Fundamentos da Fabricação por Remoção de Material

5.1.1 Introdução

As peças fabricadas por fundição, conformação ou soldagem podem em alguns casos ser produzidas com as dimensões finais ou próximas a final (near net shaping), mas normalmente estas peças precisam sofrer operações complementares para chegar as dimensões finais com a tolerância dimensional especificada. A tolerância é utilizada para garantir a funcionalidade do produto e principalmente permitir o intercâmbio das peças. De um modo geral, os processos de fundição, conformação ou soldagem não podem produzir de forma economicamente viável o produto em sua totalidade. Um aspecto importante na seleção dos processos de fabricação é determinar as partes a serem geradas em cada processo e com qual tolerância, de modo a minimizar os custos de fabricação. Os processos de usinagem são classificados em três categorias:

- corte: utilizando ferramentas mono cortantes (por exemplo: torneamento) ou multi cortantes (por exemplo: fresamento);
- abrasivo: utiliza materiais abrasivos por exemplo retificação, lapidação, brunimento;
- outros métodos de remoção de material: elétrico, químico, térmico, hidrodinâmico e laser.

Os processos de usinagem possuem as seguintes vantagens:

- são relativamente mais precisos que os processos de conformação e fundição;
- podem produzir com geometrias complexas que não são difíceis de serem obtidas por outros processos;
- são adequados para operações posteriores aos tratamentos térmicos, para corrigir distorções causados por estes;
- podem gerar superfícies com padrões especiais;
- dependendo do tamanho do lote, para lotes pequenos é mais econômico produzir as peças por usinagem;

e as seguintes limitações ou desvantagens:

- gasto maior de matéria-prima, trabalho, tempo e energia;
- não melhora e pode até degradar as propriedades mecânicas da peça;



Os processos de usinagem e as máquinas ferramenta são indispensáveis na moderna tecnologia de fabricação. Desde a introdução dos tornos em 1700, muitos processos têm sido desenvolvidos. Atualmente tem-se máquina ferramentas controladas por computador e novas tecnologias utilizando laser, eletricidade, química, térmica e hidrodinâmica como base para a usinagem. Os processos de fabricação podem ser modelados como um sistema composto de: peça, ferramenta e máquina. O conhecimento da interação entre estes elementos é importante para a utilização econômica da usinagem.

5.1.2. Fundamentos da Mecânica da Formação de Cavaco

Processos de usinagem removem material da superfície da peça na forma de cavaco. No processo de torneamento a peça gira enquanto a ferramenta se desloca para cortar continuamente o material (Figura 1).

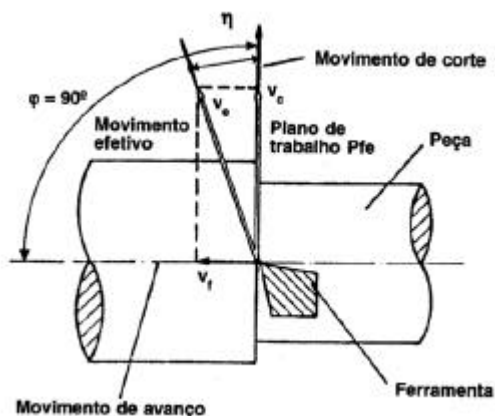


Figura 5.1 – Torneamento (adaptado de DINIZ,2000)

Inicialmente a ferramenta é ajustada a uma certa profundidade de corte (normalmente expresso em mm ou in), ao mesmo tempo em que a peça gira a ferramenta se desloca a uma certa velocidade. O avanço é a distância que a ferramenta percorre a cada volta da peça (expresso em mm/volta ou in/volta), como resultado desses movimentos o cavaco é produzido e move-se sobre a face da ferramenta.



A formação do cavaco, em geral, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou aço rápido ocorre da seguinte forma:

- Durante a usinagem, devido a penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta;
- O material recalcado sofre deformação plástica, que aumenta progressivamente, até que tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento ocorre de acordo com os planos de cisalhamento dos cristais. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, denominada região de cisalhamento. Este região normalmente é aproximada a um plano denominado plano de cisalhamento, a direção deste plano define o ângulo de cisalhamento ϕ .
- Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem.
- Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, em uma nova porção de material inicia-se o mesmo processo.

Considerando-se o exposto, pode-se concluir que o fenômeno de formação do cavaco é um fenômeno periódico, inclusive na formação do cavaco dito contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento para cada porção de material removido.

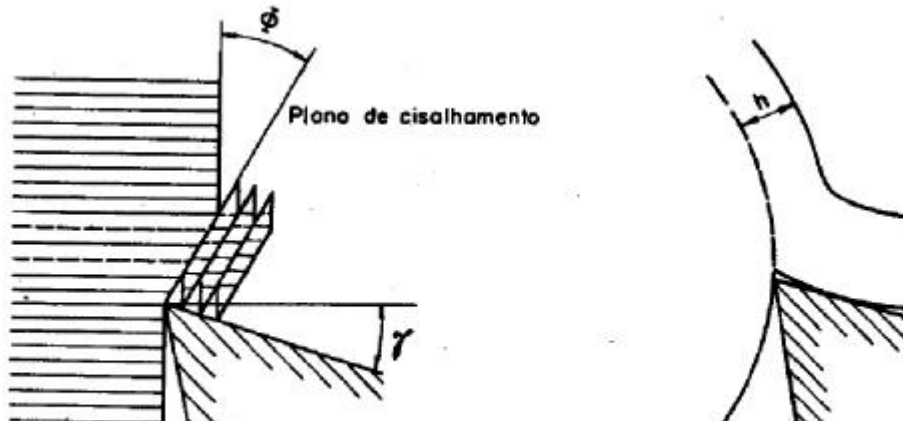


Figura 5.2 – Formação do cavaco (adaptado de FERRARESI,1977)

A espessura do cavaco é relativamente maior que a profundidade de corte. O quociente entre a espessura do cavaco t_c e a profundidade de corte t_0 é denominado grau de recalque do cavaco. Este parâmetro é importante para avaliação das condições de usinagem porque permite o cálculo do ângulo de cisalhamento que influencia a força e a energia necessária, bem como a temperatura de trabalho.

$$t_c/t_0 = \cos(\phi - \gamma) / \sin(\phi) \quad (1)$$

onde γ é o ângulo de saída da ferramenta.

5.1.3 Tipos de cavaco

Os cavacos podem ser classificados em três tipos:

- contínuo : forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos com pequeno e médio avanço;
- de cisalhamento: constituído de grupos lamelares distintos e justapostos, estes elementos foram cisalhados e parcialmente soldados em seguida;
- de ruptura: quando são constituídos de fragmentos arrancados da peça usinada. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão.



A forma o cavaco pode ser classificado em:

- em fita;
- helicoidal;
- espiral
- em lascas ou pedaços.

O cavaco em fita pode provocar acidentes, ocupa muito espaço e é difícil de ser transportado. Geralmente a forma de cavaco mais conveniente é o helicoidal. O cavaco em lascas é preferido quando houver pouco espaço disponível ou quando o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante (por exemplo, no caso de furação profunda).

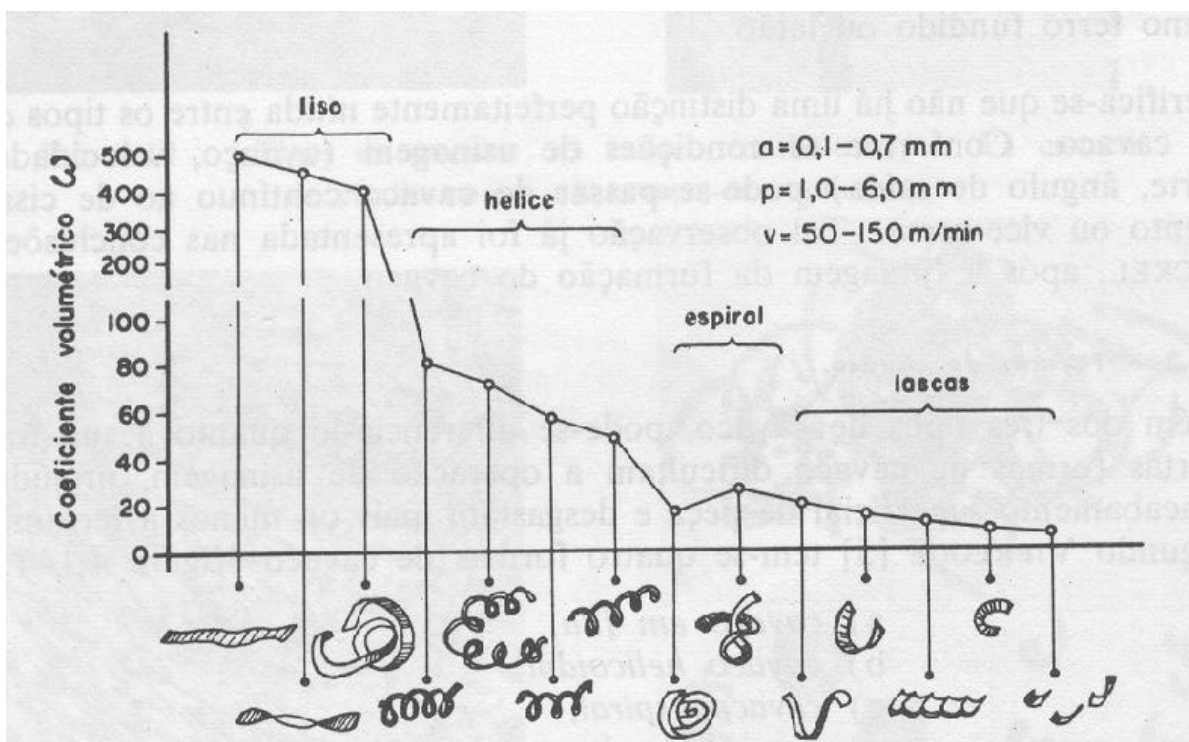


Figura 5.3 - Coeficiente Volumétrico e a forma do Cavaco (adaptado de FERRARESI,1977)



Pode -se provocar a mudança na forma do cavaco através de:

- alterando-se as condições de usinagem;
- superfície de saída da ferramenta;
- dispositivos na superfície de saída da ferramenta.

5.1.4 Forças e Potência na Usinagem

As forças e a potência de usinagem devem ser conhecidas para permitir a seleção adequada da máquina ferramenta e para o projeto de dispositivos de fixação ou de ferramentas.

Por causa de vários fatores envolvidos, a predição da força de corte e potência ainda baseia-se em dados experimentais, a variação no coeficiente deve-se a variação de resistência do material usinado, atrito, fluidos de corte e outras variáveis de processo.

Material	Energia Específica [W. s / mm ³]
Ligas de Alumínio	0,4-1,1
Ligas de Cobre	1,4-3,3
Aços	2.7-9.3

5.1.5 Vida da Ferramenta: Desgaste e Fratura

As ferramentas de usinagem normalmente estão sujeitas as seguintes solicitações: altas tensões localizadas; altas temperaturas, escoamento do cavaco ao longo da superfície de saída e o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada. Estas solicitações provocam o desgaste da ferramenta, ou seja, diminuem a vida útil da mesma, afetando também a qualidade da superfície usinada, a precisão dimensional e conseqüentemente a viabilidade econômica do processo são bastante influenciados pela vida da ferramenta.

O desgaste normalmente é um processo gradual, parecido ao que ocorre com um lápis. A velocidade de desgaste depende dos materiais da peça e da ferramenta, forma da ferramenta, fluidos de corte, parâmetros de processo (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e características da máquina ferramenta.



Existem dois tipos básicos de desgaste, correspondendo a duas regiões da ferramenta: desgaste do flanco e desgaste de cratera.

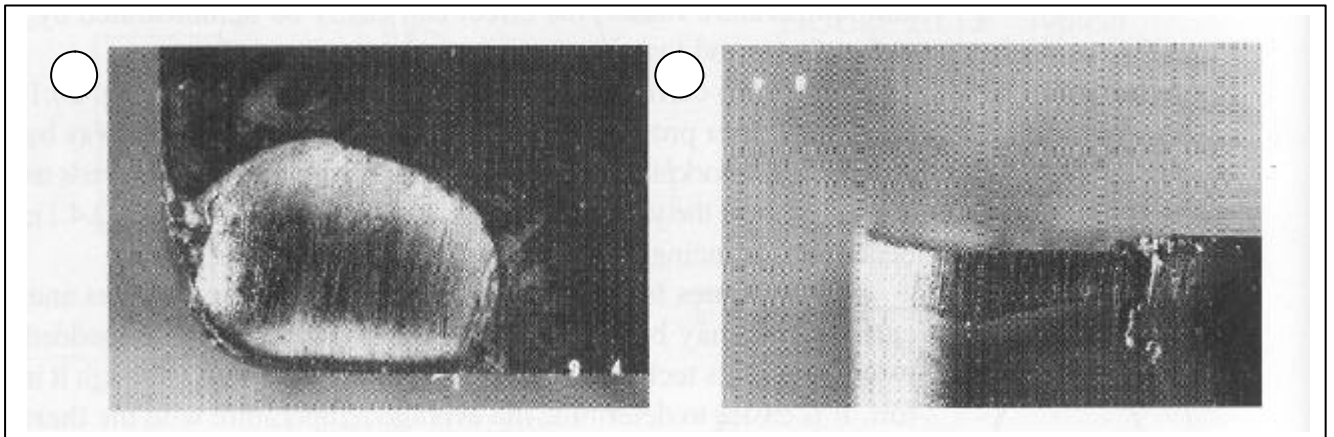


Figura 5.4 – Desgaste de Cratera e de Flanco (adaptado de KALPAKJIAN, 2001).

O desgaste do flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, é causado pelo atrito entre a ferramenta e a superfície usinada que causa desgaste abrasivo ou adesivo, altas temperaturas que afetam as propriedades do material da ferramenta bem como da superfície da peça. Em um estudo clássico na usinagem de aços em 1907, F.W. Taylor apresentou a seguinte relação:

$$V T^n = C \quad (2)$$

onde:

V: = velocidade de corte;

T: = tempo em minutos para que o desgaste atinja um determinado nível ;

n = expoente que depende da ferramenta, material da peça e parâmetros de usinagem e;

C: = uma constante.

Os valores de n e C podem ser determinados experimentalmente, na figura 5.5 apresenta-se a vida para ferramentas de diferentes materiais.

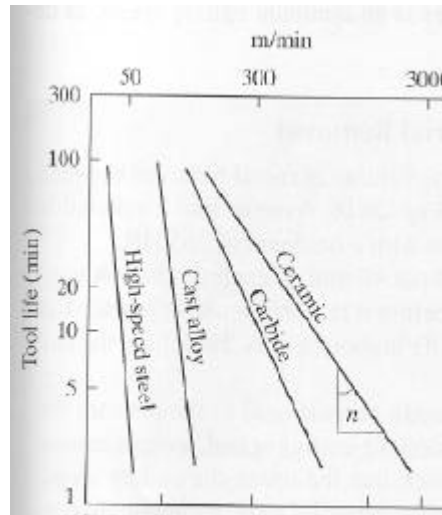


Figura 5.5 – Vida da Ferramenta (adaptado de KALPAKJIAN,2001)

O estudo da vida da ferramenta é vital para a determinação da velocidade de corte para minimizar o custo ou maximizar a produção. O Desgaste de Cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta, como ele altera a geometria dessa superfície ele afeta o processo de corte. Os fatores que mais influenciam neste tipo de desgaste são temperatura na interface ferramenta peça e a afinidade química entre a ferramenta e a peça, e os fatores que influenciam o desgaste do flanco também influenciam o desgaste em cratera. Lascamento é o termo utilizado para descrever a fratura e desprendimento de pequenos pedaços da aresta de corte da ferramenta. Estes pedaços podem ser pequenos, ou podem ser relativamente grandes. Ao contrário do desgaste que é gradual, o lascamento com fratura ocorre de repente provocando a perda de material da ferramenta, resultando em alteração da forma da ferramenta, provocando na peça usinada perda de qualidade da superfície e precisão dimensional. As principais causas do lascamento são choque mecânico devido ao corte não contínuo ou fadiga térmica causada por variações cíclicas da temperatura. O lascamento também pode ocorrer em regiões da ferramenta onde preexistem pequenas trincas ou defeitos. O lascamento ou fratura em ferramentas pode ser evitado através da seleção de ferramentas de materiais de alta tenacidade e resistentes a choque térmico.



Além dos fatores já apontados, a vida da ferramenta pode ser comprometida por deformação plástica devido a diminuição da resistência do material por causa do aquecimento e também na usinagem de materiais com camadas de óxidos o desgaste pode ser bastante acentuado, nestes casos deve-se usinar a peça com uma profundidade de corte suficiente para arrancar toda camada oxidada.

Com a crescente utilização de máquinas ferramentas controladas por computador, e a implementação da automação da manufatura, é importante que a performance das ferramentas de usinagem deva ser confiável e repetitiva. Muitas máquinas ferramenta modernas operam com pouca supervisão do operador, conseqüentemente a falha de uma ferramenta de usinagem pode acarretar sérios efeitos na qualidade das peças produzidas, bem como na eficiência e na viabilidade econômica da operação de fabricação.

Em função disso, é essencial continuamente e indiretamente monitorar a condição da ferramenta quanto ao desgaste ou fratura. Em muitas máquinas modernas, o monitoramento da condição da ferramenta é integrado ao controle da máquina.

As técnicas de monitoramento da ferramenta podem ser de dois tipos: direto ou indireto. O método direto para observar a condição de uma ferramenta de usinagem é baseado na medição óptica do desgaste. Este é a mais comum e confiável técnica e é feita utilizando-se um microscópio. Entretanto, este procedimento requer que a usinagem seja interrompida. Os métodos indiretos de medição do desgaste usam a correlação entre o desgaste da ferramenta com variáveis de processo como: força, potência, temperatura, acabamento superficial e vibração. Uma importante técnica é a baseada na emissão acústica que utiliza sensores piezoelétricos montados no porta ferramenta. Estes transdutores lêem as emissões acústicas (tipicamente acima de 100 kHz) resultantes das ondas de tensões geradas no corte, pela análise destes sinais, o desgaste e lascamento da ferramenta pode ser monitorado. Em máquinas ferramentas comandadas por computador de baixo custo, o monitoramento da vida da ferramenta pode ser feito por ciclo de tempo, ou seja, uma vez determinada a expectativa de vida da ferramenta, esta pode ser programada na máquina que irá solicitar ao operador a troca quando o tempo de trabalho alcançar o tempo programado.



5.1.6 Usinabilidade

A usinabilidade de um material normalmente é definida por quatro fatores:

- Acabamento superficial e integridade da peça usinada.
- Vida da ferramenta.
- Força e potência necessárias.
- Tipo de cavaco.

Boa usinabilidade indica bom acabamento superficial e integridade, vida longa da ferramenta, e baixa força e potência. E quanto ao tipo de cavaco o ideal é em pedaços.

Como os aços são o material mais importante na engenharia, sua usinabilidade tem sido estudada extensivamente. Nestes materiais a usinabilidade pode aumentada pela adição de chumbo e enxofre obtendo-se os aços denominados de usinagem fácil.

Os aços liga contém baixos teores de cromo, cobalto, níquel, molibdênio, tungstênio, vanádio e outros elementos, isolados ou em combinação. O que resulta em aços de usinabilidade mais difícil que os aços carbono comuns.

Os aços inoxidáveis apresentam baixa usinabilidade em relação aos aços de corte fácil. Quando a esses aços, acrescenta-se pequenas quantidades de enxofre, fósforo ou selênio a usinabilidade melhora consideravelmente em até 50%.

A usinabilidade do ferro fundido apresenta grande variação. O ferro fundido cinzento e o nodular são de fácil usinagem enquanto que o ferro fundido branco é de usinagem difícil.

O Alumínio comercialmente puro apesar de extremamente dúctil apresenta baixa usinabilidade. As ligas mais resistentes com cobre tem usinabilidade razoável. As ligas com silício são mais difíceis de usar.

As ligas de magnésio são largamente empregadas na indústria aeronáutica. As ligas mais comuns de magnésio, contém de 4 a 12% de alumínio, 0,1 a 0,3% de manganês e outros elementos como zinco, berílio, cério, cobre, prata, estanho e zircônio podem ser adicionados. Praticamente todas as ligas de magnésio apresentam excelente usinabilidade.



O cobre comercialmente puro é largamente utilizado na indústria elétrica. As pressões específicas de corte do cobre e suas ligas são geralmente baixas, mas a usinabilidade não é boa devido a alta ductilidade.

O níquel puro é um metal dúctil de alta pressão específica de corte e difícil usinagem.

Os termoplásticos podem ser usinados, mas como apresentam baixa condutividade térmica, baixo módulo de elasticidade, e baixa temperatura de amolecimento, a usinagem deve ser realizada com ferramenta com ângulo de saída positivo, ângulo de folga grande, pequena profundidade de corte e avanço, alta velocidade de corte e suporte adequado para a peça. A refrigeração deve garantir que os cavacos não se colem na peça ou ferramenta. A usinagem de termoplásticos podem provocar tensões residuais, para elimina-las as peças devem ser recozidas a temperatura de 80o a 160o C e resfriadas lentamente no ambiente. Os termofixos apresentam usinabilidade semelhante aos termoplásticos entretanto, são frágeis e sensíveis a gradientes de temperatura durante a usinagem. Os plásticos reforçados por causa da presença de fibras são abrasivos e de difícil usinagem.

5.1.7 Materiais para Ferramentas de Usinagem

A seleção de materiais para ferramentas de usinagem para uma determinada aplicação é um fator muito importante para o sucesso da fabricação. As ferramentas durante a usinagem estão sujeitas a : altas temperaturas, altas pressões de contato e atrito com o cavaco e a superfície já usinada da peça. Em função disso a ferramenta deve apresentar as seguintes propriedades:

Dureza: principalmente em temperaturas elevadas para garantir resistência ao desgaste e resistência mecânica nas temperaturas de trabalho.

Tenacidade: a ferramenta deve resistir a impactos e esforços cíclicos, comuns nas operações de usinagem.

Resistência ao desgaste: para garantir uma durabilidade compatível com o processo.

Estabilidade química : não deve reagir com o material da peça ou contamina-lo.



A seguir apresenta-se, na ordem em que foram desenvolvidas, categorias de materiais utilizados na fabricação de ferramentas para usinagem:

- Aços carbono e liga.
- Aços rápidos
- Ligas fundidas
- Metal duro
- Revestidas.
- Cerâmicas
- Diamante.

Os aços carbono e liga tem sido usados na fabricação de ferramentas desde 1880. Apesar de baratas e fáceis de afiar as ferramentas não apresentam dureza a quente e resistência ao desgaste suficiente para utilização em usinagem com altas velocidades de corte.

Os aços rápidos (HSS) são assim denominados porque foram desenvolvidos para trabalhar em altas velocidades de corte. Foram introduzidos por volta de 1900, é o tipo de liga mais trabalhado para obtenção de propriedades. Pode ser endurecido a profundidades reguláveis, apresenta boa resistência ao desgaste e são relativamente baratos. Por causa da sua tenacidade e alta resistência a fratura, os aços rápidos são indicados para fabricação de ferramentas com ângulo de saída positivo e grande, são também indicados para operações de corte não uniforme e para máquinas ferramenta com baixa rigidez sujeitas a vibração.

Existem dois tipos de aço rápido: ao molibdênio (série M) e ao tungstênio (série T). A série M contém até 10% de molibdênio e mais cromo, vanádio, tungstênio e cobalto como elementos de liga. A série T contém de 12% a 18% de tungstênio, com cromo, vanádio e cobalto como elementos de liga. A série M apresenta maior resistência a abrasão, menor distorção em tratamento térmico e é mais barato, por isso, cerca de 95% das ferramentas de aço rápido são do tipo M.

As ferramentas de aço rápido podem ser revestidas ou tratadas superficialmente por tratamento térmico para melhorar seu desempenho.



São utilizadas principalmente na fabricação de ferramentas de formato complexo tais como: brocas, machos, alargadores, cortadores de engrenagens e de forma. A sua limitação está na velocidade de corte que é relativamente menor que a permitida para ferramentas de metal duro.

Introduzidas em 1915, as ligas fundidas de cobalto com 38% a 53% de cobalto, 30% a 33% de cromo e 10% a 20% de tungstênio, apresentam alta dureza e boa resistência ao desgaste. Apesar dessas vantagens não são tenazes como o aço rápido e são sensíveis ao impacto, em função disso normalmente são utilizadas em corte contínuo em operações de desbaste. Com relação ao aço rápido podem ser utilizadas com o dobro da velocidade de corte.

Para operações com alta velocidade de corte, foram introduzidas em 1930, ferramentas feitas de metal duro. Os dois grupos básicos de carbonetos utilizados em ferramentas de metal duro são: tungstênio e titânio.

O carboneto de tungstênio (WC) é um material composto de partículas de carboneto de tungstênio agrupadas numa matriz de cobalto. As ferramentas deste material são fabricadas através da sinterização. A quantidade de cobalto afeta as propriedades da ferramenta, com o aumento do teor de cobalto a resistência, dureza e resistência ao desgaste diminuem enquanto que a tenacidade aumenta. As ferramentas de carboneto de tungstênio são utilizadas na usinagem de aços, ligas fundidas e materiais não ferrosos, tendo substituído as ferramentas de aço rápido por permitir velocidades de corte mais elevadas.

As ferramentas de metal duro são classificadas pela ISO em três grupos denominados P, M e K, e ainda são subdivididos em cada grupo nos subgrupos P01 a P50, M01 a M40 e K01 a K40.

O grupo P é constituído por ferramentas de elevada dureza a quente e resistência ao desgaste, são indicados para usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos tais como aços e materiais dúcteis em geral, que por formarem uma área de atrito grande com a superfície de saída da ferramenta a aquecem a alta temperatura tendendo a desgastá-la na forma de desgaste de cratera.



O grupo K não é resistente ao mecanismo que forma o desgaste de cratera e, por isso é indicado para a usinagem de materiais frágeis que formam cavacos curtos, tais como ferro fundido e latões.

O grupo M é um grupo com propriedades intermediárias, sendo indicado para ferramentas com aplicações múltiplas.

É comum a utilização de pastilhas de metal duro com cobertura de carboneto de titânio, óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio. A finalidade dessas camadas é aumentar a resistência ao desgaste na região que fica em contato com o cavaco, sendo possível dessa forma combinar uma pastilha tenaz com uma superfície bastante dura.

Materiais cerâmicos vem sendo utilizados na confecção de ferramentas desde a década de 50. O material cerâmico apresenta as seguintes características: dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química. Porém algumas propriedades desses materiais são inadequadas, por exemplo: baixa condutividade térmica e principalmente baixa tenacidade.

As ferramentas cerâmicas podem ser à base de óxido de alumínio, nitreto de silício ou de cermets (fase cerâmica e fase metálica).

Os diamantes artificiais podem ser utilizadas no revestimento de ferramentas. A camada de diamante sintético policristalino (PCD) é constituída por partículas finas de diamante sinterizadas com cobalto, pode ser aplicada diretamente sobre uma pastilha de metal duro ou soldada por brasagem. Como propriedades tem-se alta condutividade térmica, altíssima dureza, resistência ao desgaste por abrasão e relativamente alta tenacidade. Como pontos negativos destaca-se dificuldade de lapidação devido a anisotropia e reação química com o ferro em temperaturas moderadas.

Devido a estas propriedades o diamante não pode ser utilizado na usinagem de metais ferrosos como o aço e o ferro fundido, sendo utilizado na usinagem de metais não ferrosos e materiais não metálicos, tais como: ligas de alumínio e cobre, plásticos abrasivos, resinas reforçadas, cerâmicas, metais duros, pedras naturais e concreto.



5.1.8 Fluidos de Corte

São bastante utilizados na usinagem com o intuito de:

- Reduzir o atrito e desgaste.
- Reduzir forças e consumo de energia.
- Resfriar a região de corte
- Auxiliar no transporte dos cavacos.
- Proteger as superfícies usinadas da corrosão.

Um fluido de corte pode ser um refrigerante e/ou um lubrificante. Dependendo do tipo de usinagem um efeito é mais importante de que outro. No caso de usinagem com velocidade de corte elevada o efeito refrigerante é mais importante, por outro lado, em operações como furação, rosqueamento ou brochamento a característica lubrificante é mais importante bem como o transporte dos cavacos. Existem situações onde a utilização de fluidos de corte é indesejável, por exemplo, em operações de fresamento onde o corte é interrompido, o fluido refrigerante pode causar fadiga térmica.

Os fluidos de corte podem ser de quatro tipos:

- Óleos.
- Emulsões.
- Semi-sintéticos.
- Sintéticos.

Na utilização dos fluidos de corte é importante observar os seguintes aspectos:

Método de aplicação: o sistema de aplicação do fluido de corte deve ser suficientemente eficiente e posicionado para garantir que o fluido desempenhe suas funções.

Efeitos na peça: deve-se verificar a compatibilidade química entre o fluido utilizado e o material da peça para evitar o processo de corrosão.

Efeitos na máquina ferramenta: semelhante a efeitos na peça.

Ambiental: intoxicação do operador, poluição do ar ou da água, deve-se considerar a reciclagem ou tratamento do fluido de corte.



5.1.9 Questões para estudo dirigido

- 1) Comente as vantagens e desvantagens dos processos de usinagem.
- 2) Como os processos de usinagem podem ser classificados quanto princípio base de corte.
- 3) Quais os movimentos da ferramenta responsáveis pela geração de cavaco?
- 4) Explique o mecanismo de formação de cavaco.
- 5) Como é calculado e qual a influência do grau de recalque do cavaco?
- 6) Quais são os tipos e formas de cavaco?
- 7) Como a forma do cavaco pode ser controlada?
- 8) Qual a força de corte atuante na usinagem de um eixo de aço 1045, de diâmetro 50 mm, rotação de 2000 rpm, profundidade de corte 2 mm e avanço de 0,5 mm/volta ?
- 9) Quais as variáveis de processo que interferem na vida da ferramenta ?
- 10) Quais são os tipos e mecanismos de desgaste de ferramentas de usinagem?
- 11) Como pode ser monitorada a ferramenta em processo?
- 12) O que é usinabilidade ?
- 13) Quais as propriedades que devem ser levadas em conta na seleção de material para ferramenta?
- 14) Comente a aplicabilidade das ferramentas em função do material da ferramenta.
- 15) Porque os fluidos de corte são utilizados na usinagem ?
- 16) Quais as considerações na seleção e utilização dos fluidos de corte.

5.1.10 Bibliografia

- DINIZ,2000 – Diniz,A.E.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L.; Tecnologia da Usinagem dos Materiais;2000, Editora Artliber.
- KALPAKJIAN,2001 – Kalpakjian,S.;Schmid,S.R.; Manufacturing Engineering and Technology, 2001; 4a. edição; Prentice Hall.
- FERRARESI,1977 – Ferraresi,D.; Fundamentos da Usinagem dos Metais; 1977;Edgard Blucher.
- BATALHA, G. F. – Fabricação e propriedades de metais duros WC-Co, dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, 1987.



5.2 Classificação dos Processos de Usinagem

5.2.1 Processos de fabricação de peças assimiláveis a sólidos de revolução

Os processos apresentados a seguir produzem superfícies de revolução em peças:

- **Torneamento:** pode produzir superfícies cilíndricas, cônicas ou segundo algum perfil, como exemplo de peças produzidas por este processo temos: eixos, pinos, etc.
- **Faceamento:** produz uma superfície plana nas extremidades da peça ou pode ser utilizada para gerar um canal circular neste caso é conhecida como sangramento axial.
- **Perfilamento :** utiliza ferramentas de forma para produzir peças com um determinado perfil.
- **Torneamento interno:** gera superfícies no interior da peça, normalmente utilizado para alargar um furo ou gerar um canal interno.
- **Furação:** gera furos na direção axial no centro da peça.
- **Corte:** utiliza uma ferramenta denominada bedame para cortar a peça.
- **Rosqueamento:** produz roscas de parafuso interna ou externa.
- **Recartilhamento:** utilizado para gerar um padrão superficial.

Estas operações normalmente são executadas em máquinas denominadas tornos, nestas máquinas a peça gira enquanto que a ferramenta desloca-se num plano que passa pelo centro de rotação da peça.

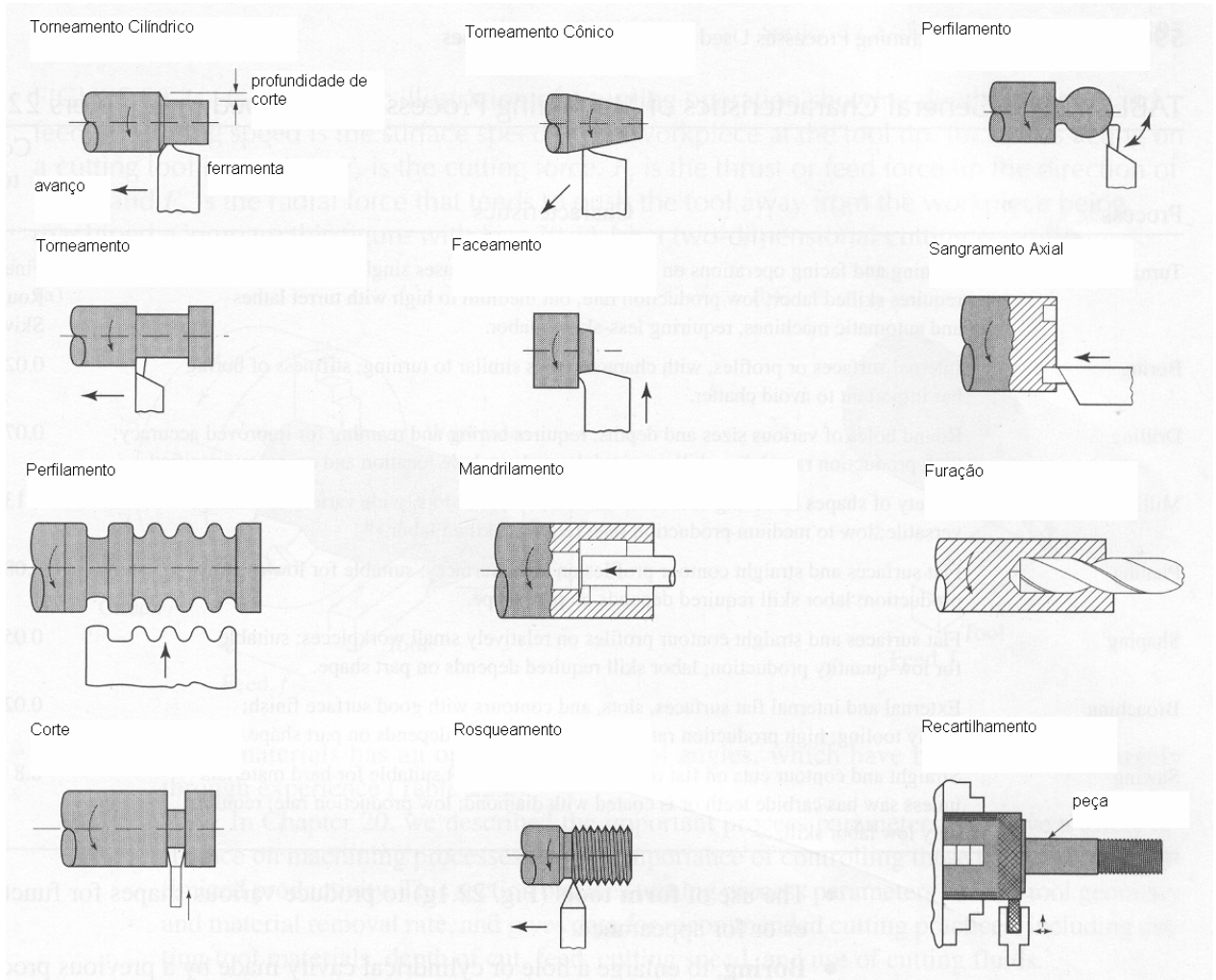


Figura 5.6 – Representação esquemática de operações de usinagem para geração de sólidos de revolução. (adaptado de KALPAKJIAN,2001)



5.2.2 Variáveis de Processo

- Geometria da ferramenta

A ferramenta utilizada nas operações de torneamento normalmente apresenta uma única aresta de corte. Estas ferramentas são normalizadas e tem como característica vários ângulos (oito) que interferem no processo de usinagem, os principais são o ângulo de saída e o ângulo de folga, além dos ângulos, o raio de arredondamento também é importante. O ângulo de saída interfere na força, temperatura e resistência da ferramenta. Um ângulo maior diminui a força e temperatura, mas pode enfraquecer a estrutura da ferramenta. Quanto maior o ângulo de folga menor é o desgaste da face de folga, e menor a resistência da ferramenta. O raio de arredondamento influencia a rugosidade da superfície usinada. Quanto menor o raio, mais rugosa será a superfície e menos resistente a ferramenta, mas raios grandes podem provocar vibração durante a usinagem.

- Taxa de remoção de material

A Taxa de remoção de material (MRR) é a quantidade de material removida por unidade de tempo, pode ser calculada pela expressão:

$$MRR = \pi \cdot (D_0 + D_f) / 2 \cdot d \cdot f \cdot N \quad (3)$$

Onde :

- D_0 : diâmetro original;
- D_f : diâmetro gerado;
- d : profundidade de corte;
- f : avanço
- N : rotação da peça.



- Tempo de Usinagem

É o tempo de usinagem para um passe

$$t = L / (f N) \quad (4)$$

onde: L : comprimento usinado.

- Forças de Usinagem

Forças de Usinagem: pode ser decomposta em três componentes: força de corte, avanço e separação. A força de corte atua na direção da velocidade de corte, a de avanço na respectiva direção e a de separação tende a afastar a ferramenta da peça. A força de corte pode ser calculada a partir da potência de usinagem.

- Acabamento

Passes de desbaste e acabamento: na usinagem é comum dar passes de desbaste com profundidade de corte e avanços grandes e dar um único passe de acabamento com profundidade e avanço pequenos.

- Velocidade de Corte

Material da ferramenta, Avanço e Velocidade de Corte: os valores desses parâmetros podem ser determinados a partir de dados obtidos experimentalmente e pelos fabricantes de ferramentas. A velocidade de corte pode ser calculada através da expressão:

$$V = \pi D N \quad (5)$$

Fluidos de Corte

Fluidos de Corte: pode-se adotar as recomendações do fabricante da ferramenta. Na literatura existem recomendações de caráter geral como em Ferraresi, 1977.



5.2.3 Máquina Ferramenta - Tornos

Podem ser classificados nos seguintes tipos :

- Torno universal.
- Revólver.
- Vertical.
- Copiador.
- Automático.
- CNC controlados por computador.

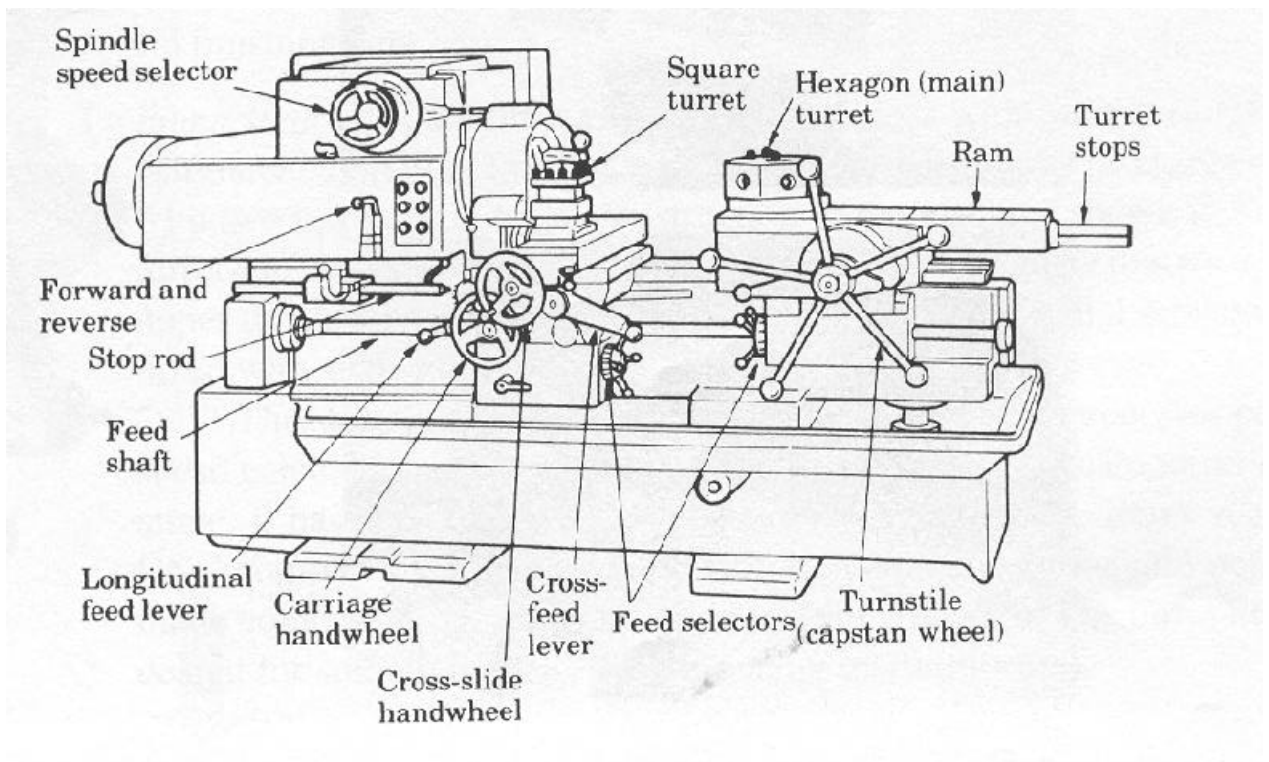


Figura 5.7 – Torno Revólver (adaptado de KALPAKJIAN,2001)



Os tornos normalmente são especificados pelo máximo diâmetro que podem usinar, máxima distância entre pontas e comprimento do barramento. Além destas características os tornos diferem em formas construtivas (tipos) e potência. Nas operações de torneamento são utilizados acessórios: placa universal, placa de arraste, ponto rotativo, placa plana, luneta, mandril pinça.

Com relação a capacidade de produção, a tabela mostra a produção típica de cada tipo de torno em peças por hora.

Torno	Produção
Universal	1 a 10
Copiador	10 a 100
Revólver	10 a 100
CNC	10 a 100
Automático	100 a 1000

A rugosidade superficial R_a obtida em operações de torneamento varia de 6,3 a 0,40 μm , e a tolerância dimensional varia de 0,02 mm a 0,5 mm.



5.2.4 Operações de Fresamento

Em complemento as operações de torneamento que produz seções circulares, outras operações de usinagem podem produzir geometrias mais complexas utilizando ferramentas mono cortantes ou multi cortantes. O processo de fresamento é um processo bastante versátil, neste processo a ferramenta denominada fresa gira e desloca-se em várias direções e ângulos para cortar o material.

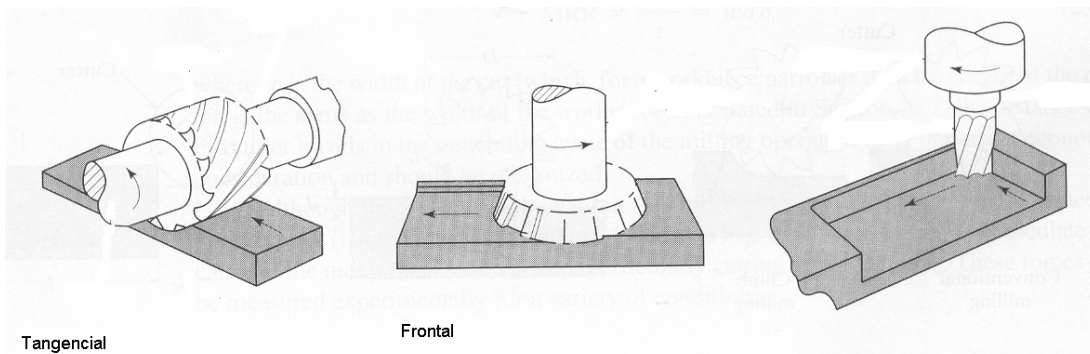


Figura 5.8 – Tipos básicos de fresamento: tangencial, aplainamento e topo. (adaptado de KALPAKJIAN,2001)

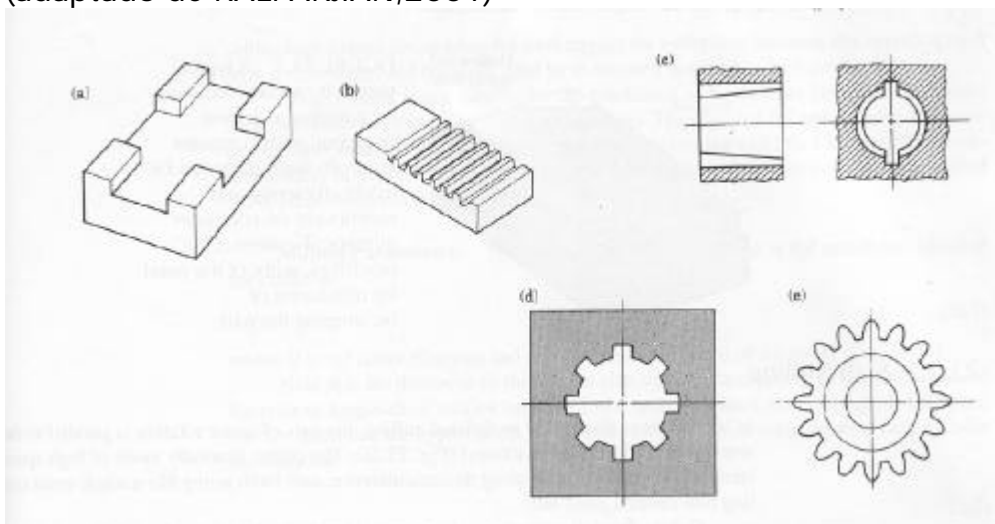


Figura 5.9 – Peças que podem ser produzidas por fresamento. (adaptado de KALPAKJIAN,2001)



Parâmetros de Processo de fresamento

Velocidade de corte

Velocidade de corte pode ser calculada pela expressão:

$$V = \pi D N$$

Onde

D : diâmetro da ferramenta.

N : rotação da ferramenta.

Taxa de remoção de material

A taxa de remoção de material

$$MRR = L w d / t$$

Onde:

L : comprimento usinado.

w : largura usinada.

.d : profundidade de corte.

.t : tempo .

Força de Corte

A força de corte pode ser estimada a partir da potência de usinagem.

Capacidade de Processo

Rugosidade superficial Ra [μm] : 0,8 a 6,3 .

Tolerância [mm] : 0,05 a 0,25 .

Taxa de produção [peças/hora]: 1 a 100.



Fresadoras

- Universal: é bastante versátil , pode se movimentar em vários eixos, pode-se acoplar vários equipamentos e dispositivos. A mesa pode ser posicionada até a 45° , tanto a direita quanto a esquerda. Normalmente o eixo árvore é horizontal, mas pode-se acoplar o cabeçote vertical e o eixo passa a ser vertical.
- Plana.
- Vertical.

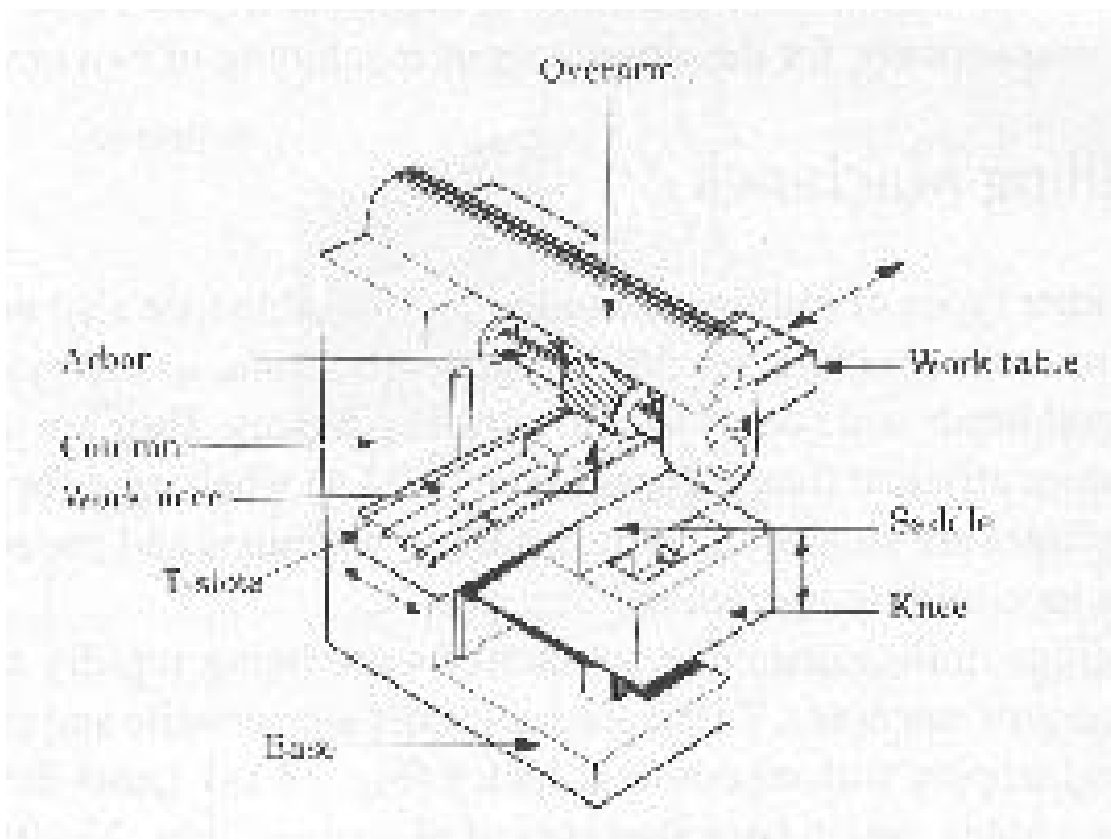


Figura 5.10 – Fresadora Plana . (adaptado de KALPAKJIAN,2001)



5.2.5 - Retificação

A retificação é um processo de fabricação largamente utilizado na indústria metal mecânica. Normalmente é utilizado em situações onde há necessidade de ótimo acabamento superficial, grande precisão dimensional, ou ainda quando o material a usinar é muito duro. Neste processo o material é cortado por grão abrasivos, estes grãos são pequenos, tem formato irregular, são duros e tem arestas cortantes afiadas. O cavaco produzido é bastante pequeno. Os processos de retificação normalmente são classificados em:

- Plana.
- Cilíndrica
- Cilíndrica sem centros.
- Frontal.

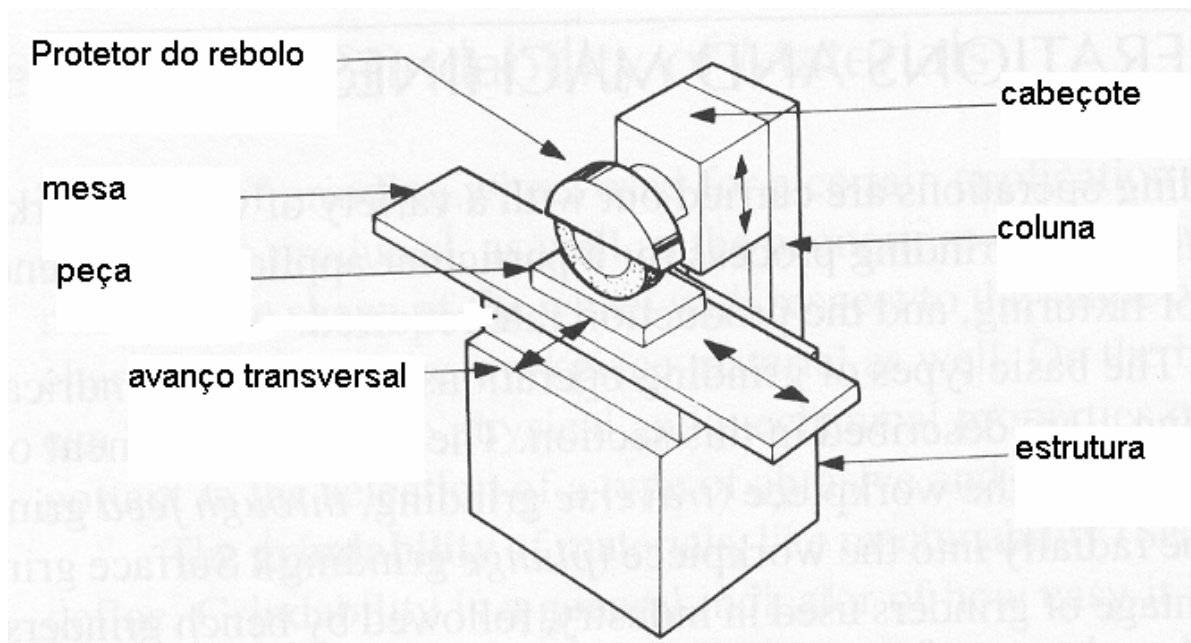


Figura 5.11 – Processo de Retificação Plana (adaptado de KALPAKJIAN,2001)



Abrasivos

Os abrasivos normalmente utilizados em ferramentas de retificação, conhecidas como rebolos são:

- Óxido de Alumínio.
- Carbetto de silício.
- Nitreto cúbico de boro.
- Diamante.

O abrasivo deve possuir elevada dureza e ser capaz de quando fraturado produzir partes cortantes, esta característica é importante para a auto afiação da ferramenta.

Os grão abrasivos são pequenos comparados as dimensões de outras ferramentas utilizadas na usinagem, o tamanho dos grãos é identificado pela granulação e expressos pelo número da peneira pela qual conseguem passar, quanto maior o número da peneira menor o tamanho dos grãos.

Para formar o rebolo os grãos são reunidos através de aglomerante, uma característica importante do aglomerante é ser poroso para que o cavaco possa se alojar até ser retirado pelo fluido refrigerante. Os aglomerantes utilizados são vidro, resina orgânica, borracha e metal.

A codificação dos rebolos é padronizada, há uma codificação para os rebolos de óxido de alumínio e carbetto de silício e outra para os rebolos de diamante e nitreto cúbico de boro.



Para os rebolos de óxido de alumínio e carboneto de silício são utilizados sete campos com o seguinte significado.

- 1 Símbolo do fabricante para indicar o exato tipo do abrasivo (opcional).
- 2 Tipo do abrasivo: A: óxido de alumínio e C: carбето de silício.
- 3 Granulação do abrasivo 8 a 600
- 4 Grau de dureza A - Z (extra macio –extra duro).
- 5 Estrutura 0 – 12 (densa – aberta).
- 6 Tipo do Aglomerante : V –vitricado, S-silicioso, B-resinóide, R-borracha, RF-borracha reforçada, E goma laca, M-metálico, O-oxicloreto de magnésio.
- 7 Identificação do reboło dada pelo fabricante (opcional)

Para os rebolos de diamante e Nitreto cúbico de boro são utilizados 8 campos

- 1 Símbolo do fabricante para indicar o tipo de diamante
- 2 Tipo de abrasivo: D-diamante, B- nitreto cúbico de boro
- 3 Granulação do abrasivo 20 a 1000
- 4 Grau de dureza A – Z (extra macio – extra duro)
- 5 Concentração de diamante 25 – 100 (baixa-alta)
- 6 Aglomerante: B-resinoide, M-metal, V- vitricado.
- 7 Alteração do aglomerante
- 8 Espessura da camada de diamante.



Parâmetros de Processo de retífica

Força

A força de retificação pode ser calculada com base na potência determinada experimentalmente. Na tabela a seguir apresenta-se a energia específica para alguns materiais.

Material	Energia Específica [W s / mm ³]
Alumínio	7 a 27
Aço carbono (1020)	14 a 68
Aço ferramenta T15	18-82

Velocidade de corte

No caso de retificação convencional pode-se adotar as recomendações a seguir para velocidade periférica, velocidade de avanço e profundidade de corte.

Velocidade periférica	1500 a 3000 m/min
Velocidade de avanço	10 a 60 m/min
Avanço	0,01 a 0,05 mm/passe.



5.2.6 Usinagem Química

A usinagem química baseia-se no ataque químico de metais para remover pequenas quantidades de metal da superfície utilizando reagentes como ácidos e soluções alcalinas.

Dos processos de usinagem não convencionais, a usinagem química é o mais antigo, sendo utilizado para marcação de metais e pedras, e mais recentemente na produção de placas de circuitos impressos e chips de microprocessadores.

Na usinagem química, cavidades rasas podem ser produzidas em placas, chapas, forjados e extrudados para redução de peso. A profundidade de cavidade pode chegar até 12 mm. O ataque é seletivo e controlado por camadas de material, denominadas máscaras ou por imersão parcial no reagente.

1. O procedimento de usinagem química é realizado nas seguintes etapas:
2. Remoção de tensões residuais da peça a ser usinada, para evitar deformações posteriores.
3. Limpeza da superfície para remoção de qualquer tipo de resíduo inclusive óxidos resultantes de tratamento térmico. Para permitir perfeita aplicação da máscara e ação do reagente.
4. Aplicação da máscara, na forma de película ou tinta. As máscaras podem ser de borracha, neoprene ou plásticos, é importante que não reaja quimicamente com o reagente.
5. Retirada da máscara nas regiões que devem ser atacadas
6. Aplica-se o reagente, para alumínio utiliza-se hidróxido de sódio, para aços, usa-se ácido nítrico. Durante o ataque deve-se controlar a temperatura e agitação do reagente.
7. Após o ataque deve-se eliminar completamente o reagente por lavagem.
8. Elimina-se a máscara das regiões protegidas, e a peça deve ser novamente lavada.



9. Esta seqüência pode ser repita para obter cavidades com degraus.

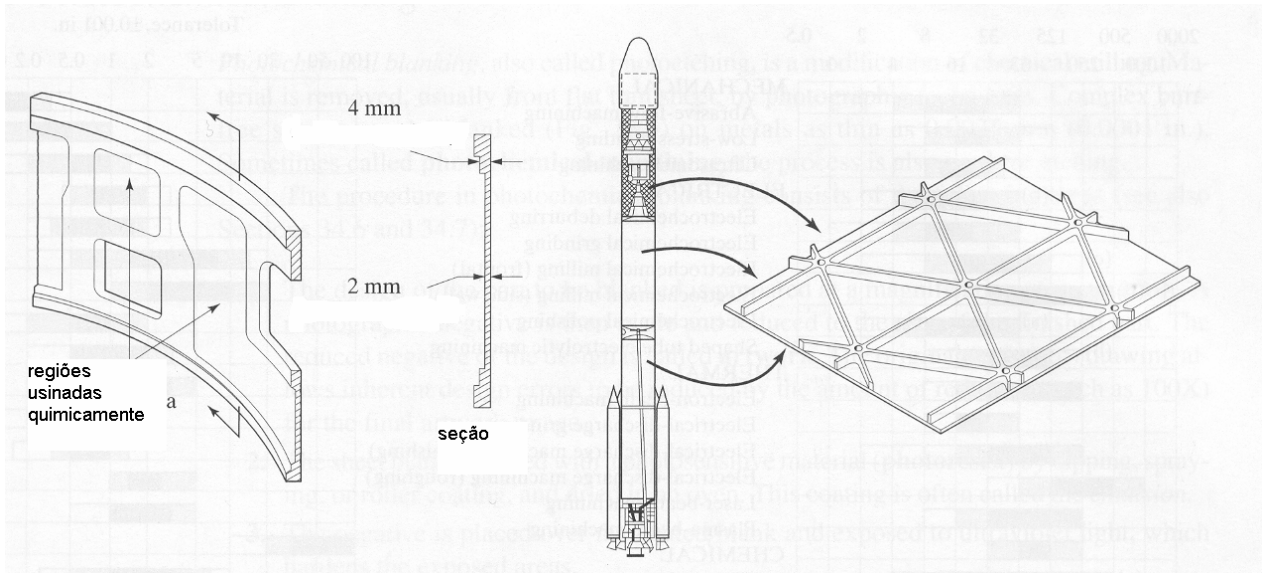


Figura 5.12 – Peças usinadas quimicamente(adaptado de KALPAKJIAN,2001)

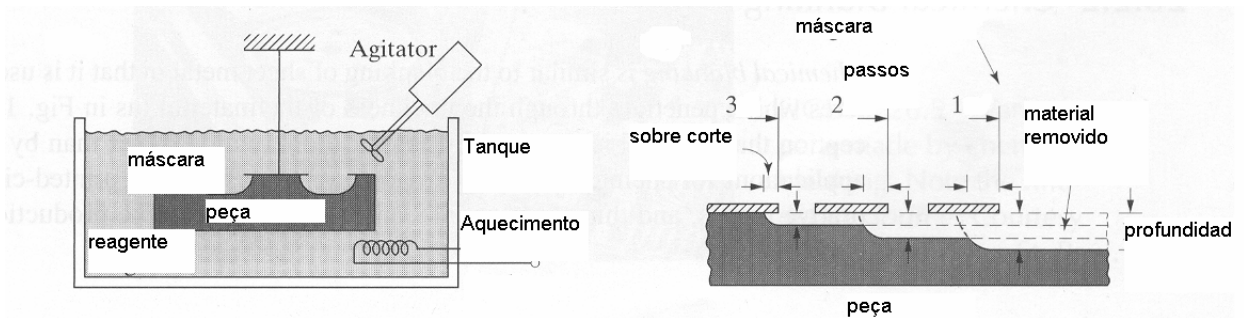


Figura 5.13 – Processo de usinagem química(adaptado de KALPAKJIAN,2001)

Em termos de capacidade do processo, as superfícies usinadas apresentam rugosidade Ra na faixa de 0,8 a 6,3 μm e a tolerância dimensional de 0,025 a 0,1 mm.

Em alguns casos a usinagem química causa problemas como ataque intergranular que diminui a qualidade da superfície.



5.2.7 Eletroerosão

Este processo de usinagem remove o material por erosão causada por descargas elétricas. Apesar do princípio ser conhecido desde a descoberta da eletricidade, somente em 1940 foi construída a primeira máquina que utiliza este processo.

Uma máquina EDM basicamente é composta de eletrodo, peça, fonte DC e fluido dielétrico. Quando a diferença de potencial entre a peça e o eletrodo é suficientemente elevada, uma descarga ocorre através do fluido dielétrico removendo uma pequena quantidade de metal da superfície da peça. Este processo ocorre na frequência entre 50 kHz e 500 kHz, com voltagem entre 50 V a 380 V e corrente de 0,1 a 500 A .

O fluido dielétrico desempenha um papel importante no processo. Ele atua como um isolante até que a diferença de potencial seja suficientemente alta, retira as partículas removidas de metal e resfria o eletrodo e a peça.

Os fluidos dielétricos mais comuns são querosene e água desionizada.

O processo de eletroerosão pode ser utilizado com qualquer material que seja condutor de eletricidade. O ponto de fusão e o calor latente de fusão são importantes para determinar a quantidade de material removido por descarga. Tipicamente a quantidade de material removido por descarga é da ordem de 10^{-6} a 10^{-4} mm³.

Como o processo não trabalha com energia mecânica, a dureza, resistência e tenacidade não influenciam a taxa de remoção de material. A frequência de descarga ou a energia por descarga controlam a velocidade de remoção de material. A velocidade de remoção e a rugosidade da superfície aumentam com o aumento da densidade de corrente e diminuição da frequência.

Os eletrodos para eletroerosão normalmente são feitos de grafite, mas podem ser feitos de cobre ou ligas de cobre. O desgaste do eletrodo compromete a tolerância dimensional da peça produzida, por isso deve ser mínimo. O desgaste está associado ao ponto de fusão do material, por isso, o melhor material para o eletrodo é o grafite.



5.2.8 Questões para estudo dirigido

1. Qual a influência do ângulo de saída na usinagem
2. Quais são as características importantes na seleção de um torno.
3. Qual a aplicabilidade dos processos: torneamento, fresamento e retificação?
4. Estime a força na operação de retificação plana de uma placa de aço 1020 com um rebolo de 200 mm de diâmetro e 10 mm de espessura.
5. Qual o procedimento para realização da usinagem química ?
6. Qual o princípio base do processo de eletroerosão ?
7. Comente a seleção de materiais para fabricação dos eletrodos de eletroerosão.

5.2.9 Bibliografia

DINIZ,2000 – Diniz,A.E.; Marcondes,F.C.; Coppini,N.L.; Tecnologia da Usinagem dos Materiais;2000, Editora Artliber.

KALPAKJIAN,2001 – Kalpakjian,S.;Schmid,S.R.; Manufacturing Engineering and Technology, 2001; 4o edição; Prentice Hall.



5.3 Introdução ao controle numérico

5.3.1 Introdução

O controle numérico (CN) é um método de controle dos movimentos de máquinas pela interpretação direta de instruções codificadas na forma de números e letras. O sistema interpreta os dados e gera o sinal de saída que controla os componentes da máquina.

O primeiro protótipo de máquina CN foi construído em 1952 no Massachusetts Institute of Technology, era uma fresadora vertical copiadora, retrabalhada via "retrofitting" com servomotores, utilizada no fresamento frontal de alumínio. Os dados de entrada foram fornecidos através de fita perfurada, nos experimentos as peças foram fabricadas com sucesso, precisas e de forma repetitiva sem intervenção do operador. Com base neste equipamento, a indústria de máquinas ferramenta passou a projetar e construir e vender máquinas CN. Posteriormente, estas máquinas foram equipadas com controle numérico computadorizado (CNC) aumentando a flexibilidade, precisão e versatilidade.

O controle numérico computadorizado é uma evolução do controle numérico, ele substituiu o controle por hardware por controle por software. Foram desenvolvidos dois tipos de sistemas: o controle numérico direto e o controle numérico computadorizado. A diferença reside no fato que no primeiro um único computador central controla várias máquinas e no segundo cada máquina é equipada com o seu próprio processador. O CNC foi redefinido é atualmente significa controle numérico distribuído, onde um computador central controla várias máquinas equipadas com computador, este sistema permite mais capacidade de memória e processamento e oferece flexibilidade.

O CNC é um sistema em que um microcomputador é utilizado para controlar a máquina, este microcomputador é parte integrante do equipamento. O programa pode ser preparado remotamente em sistema integrados de projeto (CAD-D) e fabricação (CAM, CAPP), em sistemas deste tipo, o operador pode simular o programa CNC para verificar eventuais problemas que poderiam ocorrer durante o



processo real de usinagem. Também é possível preparar o programa na própria máquina que normalmente dispõe de teclado e tela.

As máquinas CNC tem precisão de posicionamento de pelo menos $\pm 3 \mu\text{m}$, repetibilidade é por volta de $\pm 8 \mu\text{m}$ e resolução aproximadamente de $2,5 \mu\text{m}$.

A precisão de posicionamento pode ser definida como o erro entre a posição desejada e a posição real.

A repetibilidade é o erro de posicionamento após repetidos movimentos nas mesmas condições.

A resolução é o menor incremento de movimento que pode ser obtido.

A rigidez e a folga em máquinas CNC devem ser controladas para maximizar a precisão, as máquinas são construídas sobre estruturas bastante rígidas e as folgas nos fusos são eliminadas através do uso de fusos de esferas recirculantes.

A usinagem em máquinas CNC comparada a convencional apresenta as seguintes vantagens:

- Flexibilidade de operação, pode-se produzir formas complexas com boa precisão dimensional, boa repetibilidade com alta produtividade.
- Em alguns casos o custo de ferramentas é diminuído, por exemplo no caso de perfis complexos não há necessidade de modelo (gabaritos ou "chapelona").
- Calibração da máquina é facilitada pelos dispositivos eletrônicos.
- Pode-se executar um número maior de operações a cada preparação da máquina ("setup") e, o tempo de "setup" e usinagem é menor.
- Os programas podem ser preparados rapidamente, podem ser armazenados eletronicamente e recuperados rapidamente, não há necessidade de "papelada".
- Podem ser utilizados para prototipagem rápida.
- Não depende de habilidade do operador.

As desvantagens comparativas do CNC são: maior custo inicial custo e tempo de programação, maior custo de manutenção. De um modo geral, a utilização de máquinas CNC apresenta um retorno financeiro maior.



5.3.2 Conceitos Básicos de Programação CNC

O CNC é um dispositivo eletrônico capaz de receber informações e enviar sinais a máquina ferramenta de forma a executar operações sem a intervenção do operador. A programação CNC, do ponto de vista restrito, significa a preparação dos dados de entrada através de fita perfurada ou disco magnético para que o comando executando o programa movimente ferramentas e outros dispositivos da máquina para produzir a peça. De um ponto de vista mais amplo, a programação CNC começa quando as características da peça são analisadas para determinar os processos de fabricação necessários. A seguir, escolhe-se como fixar a peça, as ferramentas, seqüências de usinagem, e as condições de usinagem. A elaboração de um programa CNC é uma tarefa bastante minuciosa pois envolve uma série de informações relacionadas com a geometria da peça, com o tipo de máquina, com as ferramentas disponíveis e ainda todos os fundamentos de usinagem necessários para obtenção do produto com as características desejadas.

Os métodos de programação CNC podem ser classificados em quatro grupos:

- Programação manual.
- Programação do tipo APT.
- Sistemas Gráfico-interativos.
- Sistemas CAD-CAM.

Nos dois primeiros tipos, o programador elabora o programa, que geralmente é verificado através de sistemas de simulação ou teste na própria máquina. Nos dois últimos, a elaboração do programa é realizada com o auxílio do computador em situações com geometria totalmente definida onde todos os dados necessários são informados, mas a geração final do programa é feita pelo sistema de programação assistida pelo computador. A seguir apresenta-se algum esclarecimento adicional sobre cada tipo de programação.



Programação Manual

A programação manual consiste da elaboração de um programa na linguagem que o Comando Numérico Computadorizado entende. A linguagem de programação é composta por um conjunto de códigos formados por letras e algarismos, alguns parâmetros devem ser fornecidos em função do tipo de comando. Existem diversos comandos normalizados para posicionamento da ferramenta, ligar e desligar a rotação da ferramenta, ativar e desativar o uso de fluido de corte, ativar e desativar a correção de raio da ferramenta, ciclos pré-programados como de furação, rosqueamento, desbaste e outros. Com a linguagem o programador escreve o programa com estes comandos usando os parâmetros necessários e, para o posicionamento, utiliza um sistema de coordenadas que pode ser absoluto ou incremental. Como exemplo, apresenta-se o comando para um deslocamento da ferramenta em trajetória linear.

```
N01 G01 X200 Y400 Z000 F50
```

Onde N01 indica o número da linha;

G01 identifica o comando chamado interpolação linear;

X200, Y400 e Z000 indicam a posição final após o comando;

e F50 indica a velocidade de avanço para esta operação.

Para a execução de uma trajetória circular utiliza-se o comando G02 ou G03, de acordo com o sentido desejado, se horário ou anti-horário, seguido dos mesmos parâmetros do comando G01, acrescidos de parâmetros referentes a posição do centro do arco de circunferência em que a ferramenta se movimentará.

Programação APT

Em função da extensão dos programas elaborados através da programação manual para peças de geometria mais complexa e a dificuldade de sua verificação, foram desenvolvidas linguagens programação de alto nível para facilitar o trabalho de programação. Destas linguagens, a mais difundida foi a APT (Automatically Programmed Tools), que passou a ser amplamente adotada, sendo criadas muitas outras linguagens a partir desta. O programa APT apresenta quatro tipos de declarações:



declaração de geometria: onde são definidos todos os elementos geométricos usados;

declaração de movimentos: onde são descritos os movimentos da ferramenta ;

declarações do pós-processador: onde são especificados a máquina-ferramenta e o comando numérico utilizado;

declarações auxiliares: onde são identificadas ferramentas, tolerâncias, etc...

Na linguagem APT, o programador define as entidades geométricas no próprio desenho da peça e descreve, na seção de declarações de geometria, todos os dados necessários para identificá-las.

A listagem abaixo exemplifica uma definição de geometria.

P0=POINT/0,-1.0,0

P1=POINT/6.0,1.125,0,0

P2=POINT/0,0,0

P3=POINT/6.0,0,0

P4=POINT/1.75,4.5,0

L1=LINE/P2,P3

C1=CIRCLE/CENTER,P1,RADIUS, 1.125

L2=LINE/P4,LEFT,TANTO,C1

L3=LINE/P2,P4

PL1=PLANE/P2,P3,P4.

A seguir são introduzidos comandos de movimentação da ferramenta. Os comandos são relacionados com as entidades previamente definidas, o programa em APT é considerado fácil de ser analisado. Alguns exemplos de comandos: GOTO/P1 comanda a ferramenta para se deslocar até o ponto P1. As declarações do pós-processador também o mesmo padrão, por exemplo, FEDRAT/6.0 indica a velocidade de avanço. O programa escrito nesta linguagem é, então traduzido por um compilador APT, para o CLDATA (Cutter Location Data) que é uma lista das posições da ferramenta. Posteriormente deve ser utilizado um programa pós-processador para cada tipo de máquina-ferramenta (é comum os fabricantes introduzirem alterações e ampliações na linguagem padronizada), para traduzir o CLDATA para a linguagem de programação manual que deverá ser enviada à máquina.



Sistemas Gráficos Interativos

Os sistemas gráficos interativos são sistemas computacionais destinados à programação CNC que utilizam a interação homem-máquina para determinar as condições desejadas na elaboração de um programa. Diante da grande diversificação de sistemas existentes, pode-se classificar os sistemas gráficos quanto a entrada de dados em: com linguagem e sem linguagem. O primeiro tipo utiliza linguagens simbólicas, com declarações que expressam a escolha da ferramenta, definição de geometria por elementos de contorno, determinação dos movimentos da ferramenta e informações complementares de representação gráfica e armazenamento. O segundo tipo usa recursos como ícones, teclas funcionais, mouse, que facilitam a manipulação dos dados.

Sistemas CAD/CAM

Os sistemas CAD e CAM são os meios mais modernos para a elaboração de programas CNC. Tais sistemas permitem uma interpretação da geometria das peças armazenadas em arquivo gráfico criado no CAD e a geração dos programas CNC de acordo com algumas informações fornecidas pelo programador usuário do módulo CAM. Em termos gerais, os sistemas CAD/CAM disponíveis no mercado exigem os seguintes passos para a obtenção de programas CNC:

- preparação das superfícies a serem usinadas;
- seleção dos parâmetros e variáveis de processo (tolerâncias, sobremetal, ferramentas, parâmetros de corte, etc.);
- geração automática das trajetórias das ferramentas;
- pós-processamento dos programas, adequando ao formato do comando numérico específico.

A necessidade de desenvolvimento destas ferramentas de programação foi motivada pela complexidade das formas criadas e a dificuldade de elaboração de programas CNC para estas geometrias, como exemplos, pode-se citar aplicações na indústria aeronáutica e na fabricação de moldes de injeção de plásticos.



5.3.3 Programação Manual – Torno

Neste capítulo, apresentam-se alguns tópicos relacionados a elaboração de programas CNC tais como: sistemas de referência, sistemas de coordenadas e sintaxe de instruções. Um programa exemplo será apresentado para facilitar a compreensão.

Pontos de referência

Normalmente os comandos de máquinas utilizam para referenciar a posição de ferramentas quatro pontos de referência, denominados: ponto zero da máquina, ponto zero da peça, ponto de referência da ferramenta e ponto de referência da máquina.

O ponto zero da máquina encontra-se no nariz da árvore, na altura da superfície de encosto da peça. O sistema de coordenadas da máquina fica definido a partir do ponto zero da máquina e todos os outros pontos de referência se relacionam a ele.

O ponto zero da peça é definido pelo programador ou operador através da posição do ponto zero da peça em relação ao ponto zero da máquina, esta distância resulta da soma do comprimento da placa mais a largura das castanhas e mais: comprimento da peça em bruto menos o sobremetal a direita, para ponto zero do lado oposto da placa e sobremetal da esquerda, caso o ponto zero da peça estiver no lado da placa.

O ponto de referência da ferramenta encontra-se no assento da ferramenta no revólver. A posição deste ponto pode ser definida através dos sistemas de medição pelo processo ATC, o comando calcula a distância da ponta da ferramenta ao ponto de referência da mesma.

O ponto de referência da máquina é uma posição fixa do carro determinada por uma chave limite. Esta posição deve ser sempre sobrepassada pelo carro para referenciar a máquina.

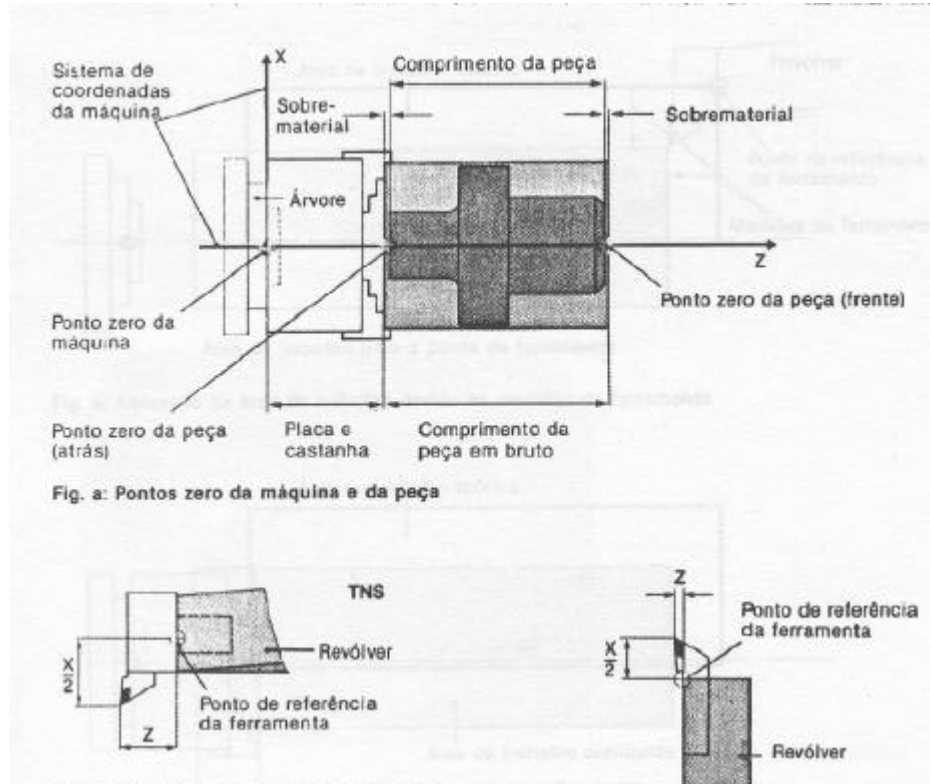


Figura 5.14 – Pontos de referência (adaptado de IFAO,1984)

Sistema de Coordenadas

Para a programação dos deslocamentos da ferramenta durante a usinagem, é utilizado um sistema de coordenadas de duas dimensões, representado por um eixo longitudinal Z e um eixo transversal X. Cada um dos pontos do contorno da peça pode ser programado através das coordenadas de X e de Z.

O eixo Z coincide com a linha de centro da árvore principal e o eixo X está sobre o ponto zero da peça. Como os contornos de peças torneadas são simétricos em relação ao eixo Z, é suficiente que seja representada apenas a metade superior da peça. As medidas com relação ao eixo X são colocadas no programa como a medida do próprio diâmetro da peça.



Na programação de um contorno completo, este pode ser dividido em elementos de contorno, no caso do comando TX-8 da TRAUB pode-se utilizar os elementos:

- reta;
- arcos de círculo;
- chanfro;
- raio de concordância.

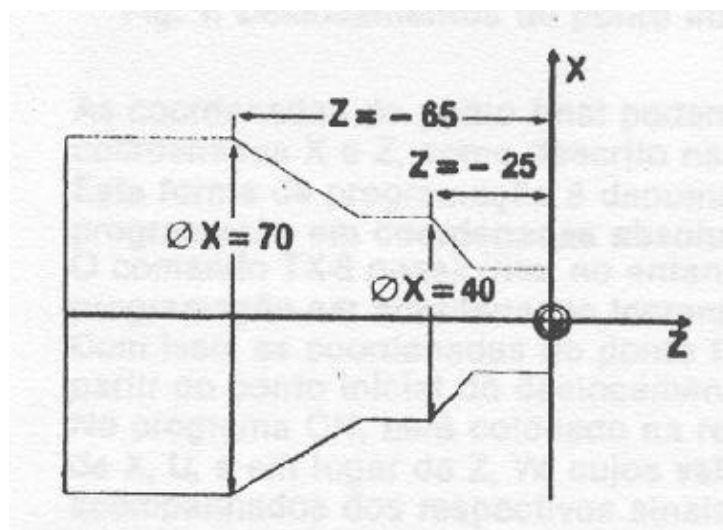


Figura 5.15 – Sistema de Coordenadas (adaptado de IFAO,1984)

Os deslocamentos de uma ferramenta sempre são programados de um ponto inicial até um ponto final, ou seja, ela sai de um ponto já atingido, e desloca-se para um ponto de chegada, cujas coordenadas são dadas como condições adicionais para a operação de deslocamento.

As coordenadas do ponto final podem ser programadas em coordenadas absolutas, como já visto, ou em coordenadas incrementais. As coordenadas incrementais são representadas no programa por U (eixo X) e W (eixo Z).

Os parâmetros de usinagem são representados no programa por: V para velocidade de corte, F para avanço, e S para rotação.



Linguagem de Programação

G00: Avanço em marcha rápida para deslocar rapidamente a ferramenta até o ponto final. O deslocamento é feito em linha reta, por isso deve-se verificar a possibilidade de colisão.

G01: Interpolação linear utilizada para deslocar a ferramenta em trabalho de usinagem da posição até a posição desejada em linha reta. Este comando possui a seguinte sintaxe:

G01 X/U Z/W A C R F S M B

Onde:

X/U Z/W A : coordenada do ponto final.

C : medida do chanfro.

R : medida do raio de arredondamento

F: avanço mm/volta.

S: rotação (rpm).

M: instrução M

B: instrução B.

G02: Interpolação circular no sentido horário.

Sintaxe: G02 X/U Z/W R I K F S M B

R: valor do raio.

I, K : Coordenadas relativas do centro com relação ao ponto inicial, sendo I no eixo X e K no eixo Z.

G03: Interpolação circular no sentido anti-horário.

G24,G25,G26,G27: Avanço rápido em direção ao ponto de troca de ferramenta. Durante o processo de usinagem pode ser necessário trocar a ferramenta, neste caso o porta ferramenta deve se afastar da peça para poder girar sem perigo de colisão.

O comando G24 a ferramenta se desloca na direção X até o ponto de troca de ferramenta. O G25 faz a ferramenta se deslocar na direção Z.

G26 equivale a um G24 seguido por G25.

G27 equivale a G25 seguido de G24.



T: Troca de ferramenta

Sintaxe Teeaa onde ee: número da estação e aa:dados de correção de desgaste da ferramenta.

G40 e G46 : Compensação de raio de ferramenta

A compensação do raio de corte faz com que a ferramenta considere o contorno exato da peça. G46 ativa e G40 desativa.

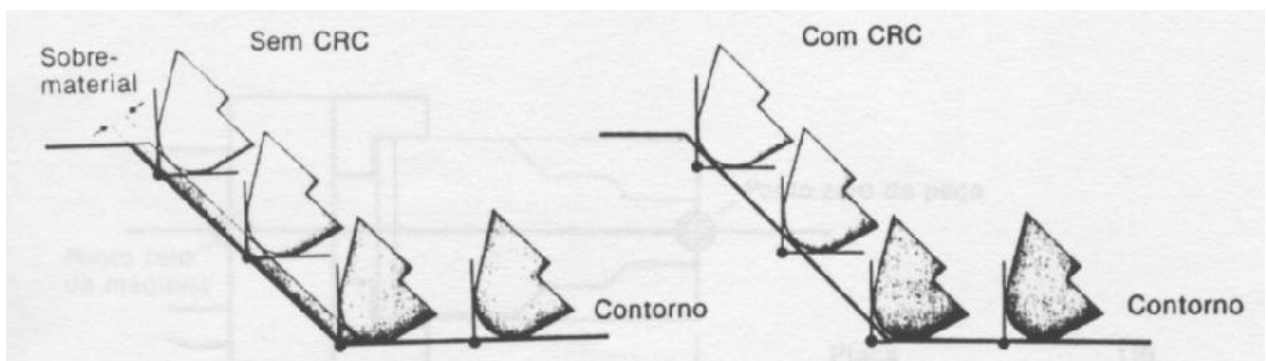


Figura 5.16 – Compensação do raio de corte. (adaptado de IFAO,1984)

G96 : Velocidade de corte constante

Sintaxe G96 V(valor da velocidade de corte)

G92:Limitação da rotação

Sintaxe: G92 P(rotação máxima) Q(rotação mínima)

G71,G72,G73 Ciclos de Desbaste

Antes de ser dado o acabamento é necessário que sejam dados alguns passes de desbaste, isto pode ser feito através da programação de cada passe utilizando as sentenças de deslocamento, ou através da utilização dos ciclos de desbaste. Através de uma única sentença, o ciclo de desbaste usina o material até o contorno final da peça que deve ser programado em algum ponto do programa.

G71 realiza o desbaste com deslocamento longitudinal

G72 desbaste transversal e

G73 desbaste paralelo ao contorno.



O contorno correspondente ao ciclo pode ser programado na forma de subprograma ou no mesmo programa onde o início e o fim devem estar identificados pelo número de sentença.

Sintaxe: G71 A P Q I K D F S

Onde:

A: Número do subprograma.

P e Q: Número da sentença inicial e final respectivamente.

I: Sobremetal na direção X.

K: Sobremetal na direção Z.

D: profundidade de corte.

F: Avanço [mm/volta].

S: Rotação [rpm].

G72 tem sintaxe semelhante a G71.

Antes de serem executadas as instruções G71 ou G72 deve-se posicionar a ferramenta no ponto teórico, um ponto próximo a superfície em bruto da peça.

G73 A P Q U W I K D F S

Onde:

- U , W : coordenada do ponto teórico relativas ao ponto final do contorno.

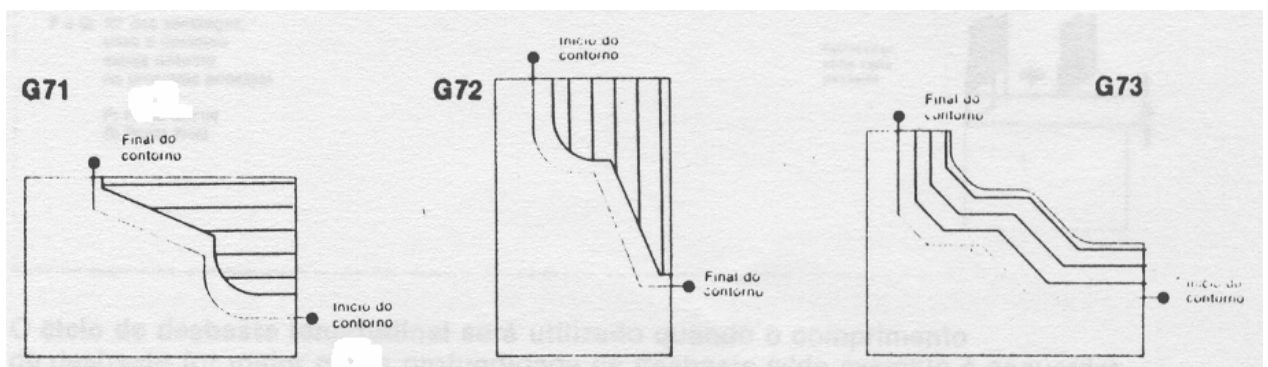


Figura 5.17 - Ciclos de Desbaste. (adaptado de IFAO,1984)



Instruções O

Servem para representar os números de programas e subprogramas.

Instruções M

Possibilitam a programação de funções auxiliares da máquina.

Por exemplo: M03 e M04 determinam o sentido de rotação da árvore principal, M30: indica o fim do programa principal, M00 ou M01 interrompem a usinagem, M07 a M09 ativa ou desativa o uso de fluido refrigerante.

Instruções B

São utilizadas para a programação de funções específicas da máquina e funções adicionais especiais, como por exemplo:

- sistema flexível de manuseio;
- sistema flexível de alimentação;
- acionamento rotativo de ferramentas;
- posicionamento da árvore principal;
- dispositivos de medição.



Exemplo de Programa

O programa apresentado a seguir pode ser utilizado para torneiar a peça da figura, além do desenho da peça deve-se conhecer as dimensões da placa: 110 mm, comprimento das castanhas: 30 mm, sobremetal 1 mm e dimensões da peça em bruto: diâmetro: 80 mm e comprimento: 157 mm.

```
G59 Z296                deslocamento do ponto zero
N1 T101 M4              chamada de ferramenta
G96 V200
G00 X82 Z0
G01 X-1.8 F0.2          Facear
G71 P50 Q60 I0.5 K0.1 D4 F0.35  desbaste
G26
N2 T202 M4
G96 V300
N50
G46                    ativa CRC
G00 X22 Z1             início do contorno final
G01 X28 Z-2 F0.2       chanfro
G01 Z-20
G01 X25 Z-25
G01 Z-47
G02 X45 Z-57 R10
G01 W-28 R8
G01 X75 Z-100
G01 W-30
G01 X81
G00 X81.5
G40
N60
G26
```

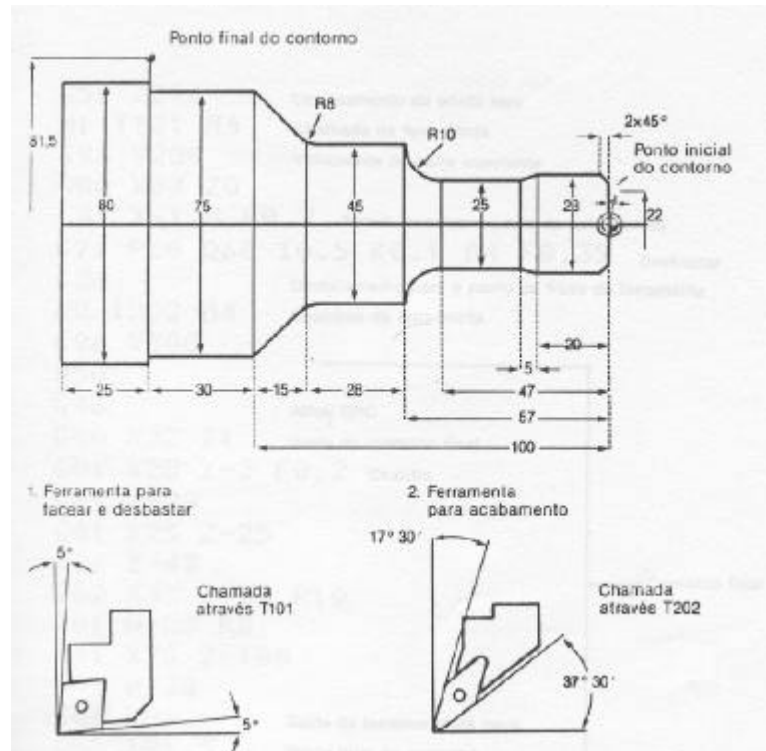



Figura 5.18 – Peça Torneada. (adaptado de IFAO,1984)

5.3.4 Questões para estudo dirigido

1. Comente os tipos de programação para gerar programas CNC
2. Elabore um programa CNC para torneiar uma peça a partir de uma barra em bruto com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento de aço 1045. A peça final deverá ter um diâmetro de 30 mm no comprimento de 20 mm e um diâmetro de 45 mm na parte restante.

5.3.5 Bibliografia

IFAO,1984 – IFAO Institut für angewandte Organisationsforschung; Comando Numérico CNC – Técnica Operacional Torneamento; 1984; Editora EPU.
KALPAKJIAN,2001 – Kalpakjian,S.;Schmid,S.R.; Manufacturing Engineering and Technology, 2001; 4o edição; Prentice Hall.



5.4 Metrologia – Resolução, Repetibilidade e Precisão

5.4.1 Introdução

Os processos de medição ou inspeção dimensional são realizados com o objetivo de verificar se as peças manufaturadas atendem as especificações de dimensão, formas ou rugosidade.

A inspeção verifica se uma característica da peça esta dentro da tolerância de projeto, pode aprovar ou reprovar a peça.

A medição determina a dimensão de uma peça de forma quantitativa.

Como exemplo, considere a verificação de uma dimensão da peça, se esta dimensão é verificada por um calibrador, trata-se de uma inspeção, no caso da dimensão ser verificada por um paquímetro, trata-se de uma medição.

5.4.2 Erros de Medição

O processo de medição está sujeito a erros devido a vários fatores e, para se ter uma noção da dimensão exata da peça com base no valor medido é preciso identificar a natureza do erro e compreender corretamente os fatores que deram origem ao erro. Uma técnica que pode ser utilizada neste processo é a estatística. Quando se utiliza um instrumento de medição para avaliar, por exemplo: o diâmetro de um eixo; o que se quer saber é qual o diâmetro exato ou verdadeiro, porém na realidade o valor medido difere do valor verdadeiro, e esta diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro é o erro de medição. No caso de realizarmos diversas medições do mesmo valor podemos calcular a média e o desvio padrão, isto é válido se considerarmos que os valores medidos seguem a uma distribuição normal.

Os erros podem ter causas determináveis ou aleatórias. As causas determináveis causam erro devido ao objeto da medição, erro devido às falhas e ao erro sistemático que pode ser do instrumento, teórico ou pessoal. As outras causas não controláveis ou previsíveis causam o erro aleatório.

O erro devido ao objeto da medição é o erro devido ao erro geométrico como cilindricidade, circularidade, etc.



O erro devido a falhas é o erro causado de falhas na leitura dos instrumentos, no registro dos valores medidos.

O erro sistemático pode ser diminuído mediante um controle rigoroso dos processos e instrumentos utilizados na medição. O erro devido ao instrumento pode ser reduzido mediante inspeção da precisão e calibração periódica. O erro teórico pode ser reduzido executando-se as medições em condições padrões de temperatura, umidade e pressão e quando isto não é possível deve-se corrigir o erro por meio de cálculos. O erro pessoal pode ser reduzido através do treinamento do técnico que executa a medição. O erro acidental ou aleatório é causado por poeira, por minúsculas variações de temperatura, vibrações, turbulências do ar, oscilação das condições de iluminação, e outros fatores que não podem ser definidos claramente. Devido ao erro aleatório surge uma dispersão nos resultados das medições, se os erros forem do tipo aleatório é possível obter um valor próximo ao valor verdadeiro através da média dos valores medidos. O erro sistemático é responsável pela diferença entre a média e o valor verdadeiro. Com base na análise dos tipos de erro envolvidos no processo de medição pode-se definir os conceitos de precisão e exatidão.

A exatidão refere-se à discrepância entre o valor verdadeiro e o valor medido. Sua quantificação é difícil porque a priori o valor verdadeiro não é conhecido, contudo diminuindo-se os erros sistemáticos aumenta-se a exatidão. A precisão indica o quanto o valor medido em medições sucessivas, encontram-se dispersos. A precisão pode ser quantificada pelo desvio padrão. A resolução é uma característica do dispositivo de medição e indica a menor dimensão que pode ser medida ou cujo incremento pode ser medido.

5.4.3 Questões para estudo dirigido

1) Defina o que é precisão, exatidão, repetibilidade e resolução.

5.4.4 Bibliografia

KALPAKJIAN,2001 – Kalpakjian,S.; Schmid,S.R.; Manufacturing Engineering and Technology, 2001; 4ª. edição; Prentice Hall.