

Capítulo 6

Usinagem:

parâmetros,

fluidos de corte,

cavacos e

ferramentas

Na indústria, os conhecimentos e competências de metrologia, usinagem, desenho mecânico, segurança industrial e outros são praticados com interdisciplinaridade. O termo “usinagem” faz parte de uma gama universal, em que toda operação tem por característica dois objetivos relacionados com a funcionalidade e condição de trabalho a que será sujeita a peça:

- obter **forma e dimensão** dentro dos limites de tolerâncias dimensionais e geométricas do projeto;
- realizar na superfície um **grau de rugosidade** (acabamento superficial).

A figura 6.1 mostra alguns exemplos de peças obtidas por usinagem.

Figura 6.1

Peças obtidas por usinagem.



Uma peça usinada é, muitas vezes, um subproduto do que o consumidor final recebe. Os processos de usinagem predominam nos produtos industrializados, direta ou indiretamente. Por exemplo, para produzir este material impresso foram necessárias máquinas, montadas por peças que eventualmente foram usinadas, ou usaram moldes e ferramentas diversas para serem produzidas e receberam operações de usinagem.

O processamento de usinagem passa por etapas chamadas fases de processo. Por exemplo, em processo de usinagem mostrado na figura 6.2, para produzir peças com um pedaço de material laminado, pode-se usinar diretamente nele ou recorrer ao forjamento (colocando-se um pedaço de material laminado em uma matriz para gerar um perfil). A avaliação custo/benefício é o que determinará o melhor fornecimento de matéria-prima antes da usinagem. As etapas de fabricação são descritas e seguidas na folha de processos ou de operações.



U.S. NAVY PHOTO BY ERIC S. GARST

Figura 6.2

Processo de usinagem.

Em uma visão generalista, a administração dos parâmetros, ferramentas e fluidos de corte, assim como o controle dos cavacos, oscila desde totalmente exigente e cuidadosa na maioria das empresas, até de forma nem tanto exigente em outras.

A avaliação criteriosa do custo/benefício na adoção dos insumos em usinagem é mais evidente nas empresas que adotam produção contínua em massa. Já em uma empresa que trabalhe fabricando lotes com poucas peças, o lote de produção poderá encerrar antes que o operador saiba se a ferramenta é melhor ou pior do que outra que usou anteriormente naquela mesma atividade. Teria de acompanhar a quantidade de serviços que cada uma realizou até atingir o fim da vida útil, atividade possível se utilizados os modernos equipamentos CNC, porém de difícil execução e organização. Na empresa que administra e executa com base em folha de processo e operações, é determinante sempre empregar os tipos de ferramentas, parâmetros e acessórios que estão inseridos, pois houve, previamente, uma avaliação minuciosa de custo/benefício visando a economia e a produtividade.

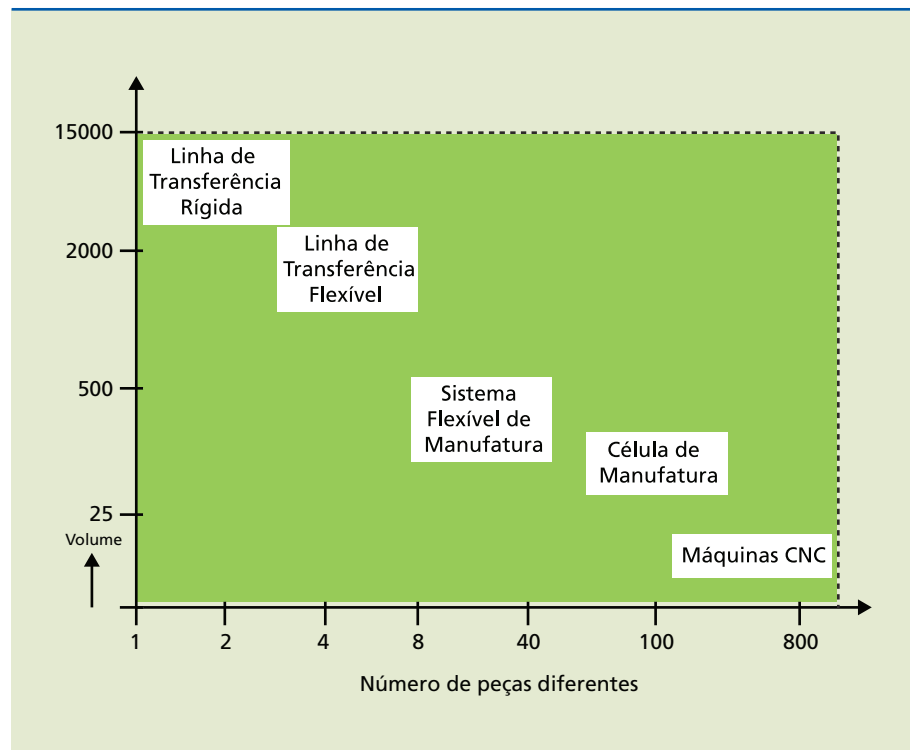
Por causa da competitividade, as empresas precisam se adaptar às constantes buscas de redução nos custos e de aumento da produtividade. Ao adotarmos máquinas mais econômicas e identificarmos o intervalo mais eficiente dos parâmetros de corte, sem prejuízo na qualidade, obtemos maior produtividade nas

usinagens. Os melhores parâmetros e o melhor método permitem menor tempo de uso das máquinas. O fator máquina é o maior custo na usinagem, e o custo é definido na equação: custos da máquina = custo hora (R\$) multiplicado pelo tempo necessário para usinagem (min).

Os processos de transformação precisaram adaptar-se à redução de estoques, seja de material e insumos antes da transformação, seja de produtos acabados após a transformação. A administração da produção modificou a forma de produzir, deixando de fazê-la pela previsão de venda para, então, produzir pela demanda solicitada pelos clientes. Basicamente é a entrega da quantidade certa na hora certa e combinada, definida em contrato e ajustada dia a dia, de acordo com o volume de produção do cliente. Trabalha-se com a mínima quantidade de estoque, com a maior flexibilidade possível, redução do tempo de preparação (*setup*) entre as mudanças de um lote de produção para outro, fabricação em lotes de quantidade mínima de peças, sem deixar de atender a entrega necessária solicitada pelo cliente. O ambiente de produção organiza-se em células e sistemas flexíveis de manufatura, com envolvimento maior das tecnologias CAD/CAM/CNC, das folhas de processo e operações e outras metodologias.

Figura 6.3

Relação entre quantidade de peças por lote (volume) e número de peças/lotes diferentes.



Verifica-se que os equipamentos controlados por comando numérico computadorizado (CNC) são cada vez mais aplicados na usinagem em pequenas, médias e grandes empresas, pois possibilitam flexibilidade e melhor adaptação aos sistemas de produção. Alguns tipos de produtos ainda justificam a existência de sistemas rígidos de produção, pela complexidade e/ou altíssimo volume de produção em baixíssima variedade de peças.

No gráfico da figura 6.3 é mostrada a abrangência geral da forma de produção, relacionando a quantidade de peças por lote (volume) com o número de peças/lotes diferentes. Aplica-se a máquina CNC desde lotes unitários e diversificados até lotes de volumes maiores e pequeno número de peças diferentes.

Ao longo do tempo, o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas leva à evolução das máquinas; outras vezes, as máquinas levam à evolução de novas ferramentas (materiais e geometrias). O avanço na engenharia de materiais tem provocado uma evolução mais rápida e contínua das ferramentas de corte para usinagem, tanto no desenvolvimento de materiais novos quanto no aperfeiçoamento dos materiais e geometrias existentes.

As novas geometrias e a possibilidade de novas camadas superficiais de revestimentos (chamadas cobertura da ferramenta) permitem melhorar o desempenho das ferramentas. As novas geometrias são desenvolvidas por sistemas computadorizados (CAD e outros) e métodos numéricos, simulando o desempenho das ferramentas pela análise dos esforços térmicos e mecânicos, antes mesmo de serem testadas e utilizadas na prática.

Os recursos de projeto e simulação computadorizados também são usados na fabricação das máquinas. Criam-se bases de máquinas mais leves, mais rígidas e estáveis, máquinas com melhor escoamento dos cavacos, árvores de máquinas para maiores rotações para atender o aumento da velocidade de corte dos diversos tipos de ferramentas. A eletroeletrônica é grande aliada da mecânica no desenvolvimento das máquinas-ferramenta da atualidade, dando origem à mecatrônica.

6.1 A importância e a formação do cavaco

Usinagem é considerada uma técnica empírica, na qual se inicia o processo que busca o acerto baseado em experiências anteriores e dados diversos, para depois, se necessário, corrigir os parâmetros e procedimentos.

Cavaco é a “porção de material da peça retirada pela ferramenta” (FERRARESI, 1977) para que ocorra a usinagem. Possui forma geométrica regular ou irregular. Na usinagem, é necessário ocorrer um movimento favorável ao corte entre um material e uma ferramenta mais dura do que esse material e com geometria adequada ao corte.

Por analogia, ao descascar uma laranja ou maçã com o uso de uma faca, o movimento giratório da fruta (peça), realizado pelas mãos (máquina), contra a aresta de corte afiada e mais dura da faca (ferramenta) retira a casca (cavaco). Se a faca girar em sentido contrário ao corte, ou não tiver aresta devidamente preparada para o corte e não for mais dura, a operação de retirar a casca da fruta será difícil ou impossível de ser executada.

As operações de torneamento, furação e fresamento são as de maior ocorrência industrial entre todos os processos de usinagem convencionais. Com base no estudo

da matéria-prima e do cavaco gerado nesses processos de usinagem, a aplicação é aperfeiçoada e se define como e quando utilizar os parâmetros e os fluidos de corte.

As ferramentas de usinagem são constituídas de arestas cortantes para remover cavacos. São selecionadas conforme a aplicação, sobretudo pela usinabilidade do material da peça.

Usinabilidade é a propriedade dos materiais que possibilita a remoção de cavacos com mais ou menos facilidade, seja pela dificuldade de controle de cavaco, seja pela durabilidade da ferramenta, pela conservação da geometria ou pela precisão e acabamento superficial da peça usinada.

Existem materiais cuja usinagem só é possível ou viável com a aplicação adequada do material e da geometria da ferramenta de corte e, ainda, nas condições (parâmetros) corretas, incluindo o uso ou não de fluidos de corte.

A experiência anterior e o conhecimento são importantes para o sucesso da usinagem. Por exemplo, a usinagem do alumínio requer ferramentas de corte com arestas extremamente positivas e com face de saída do cavaco polida, em vez de receber coberturas.

Tabela 6.1

Propriedades e usinabilidade do material.

Propriedade	Problema	Menor vida da ferramenta	Alto esforço de usinagem	Altas temperaturas de usinagem	Acabamento superficial ruim	Baixo controle de cavacos
Dureza	Alta	X	X			
Resistência mecânica	Alta	X	X	X		
Encruamento	Grande	X		X	X	X
Condutividade térmica	Baixa	X			X	
Ductibilidade	Grande				X	X
Afinidade química	Grande				X	X

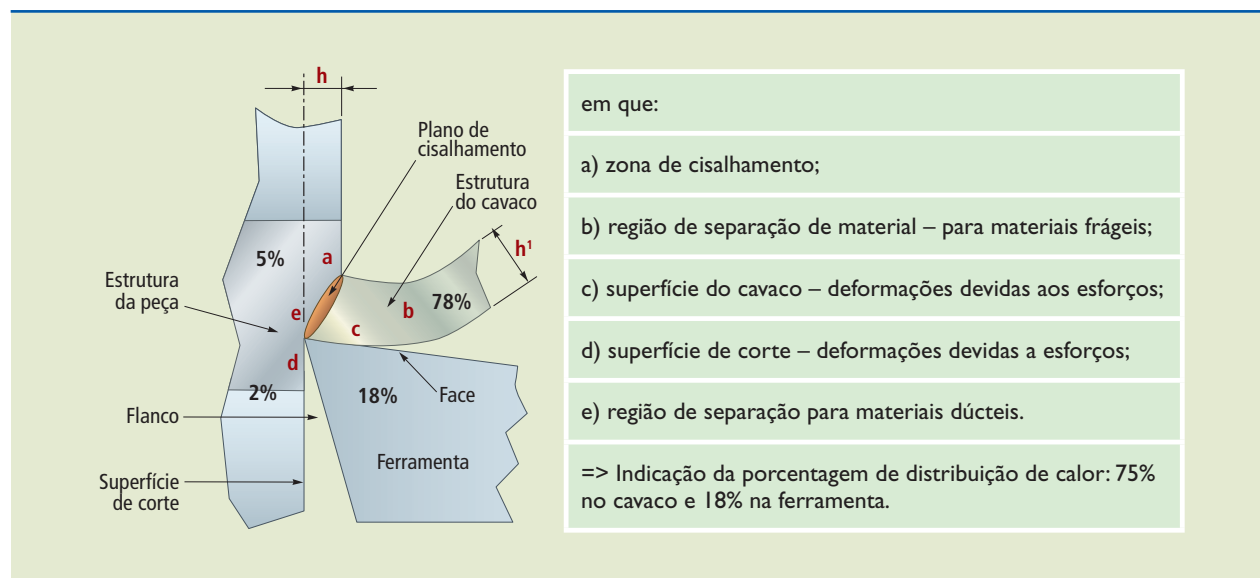
Analisando as propriedades dos materiais e os problemas que ocorrem na usinagem, identificamos na tabela 6.1, por exemplo, que o baixo controle dos cavacos tem origem na ocorrência de grande encruamento, alta ductibilidade e alta afinidade química entre o material e a ferramenta. Nos meios produtivos, sabe-se que materiais tenazes tendem a formar cavacos longos, e a afinidade química tende a formar arestas postiças.

Como mostra ainda a tabela 6.1, a menor vida da ferramenta ocorre pela alta dureza do material, alta resistência mecânica (o material tende a maiores esforços e temperaturas de usinagem), o maior encruamento e a menor condutividade térmica.

O **encruamento** é o endurecimento por deformação plástica. Ele modifica a estrutura dos metais. A deformação plástica realizada abaixo da temperatura de recristalização causa o endurecimento do metal. Quando uma peça é usinada em torneamento com vários passes de desbaste, cada passe causa aumento da dureza por encruamento, comprometendo a vida da ferramenta de corte. A figura 6.4 ilustra o contato da ferramenta com a peça e a retirada do cavaco.

Figura 6.4

Contato da ferramenta com a peça.



Fases definidoras dos tipos de cavaco

No contato da ferramenta com o material, sob determinados valores dos parâmetros de profundidade de corte, avanço e velocidade de corte, ocorrem as fases que definem os tipos de cavaco:

- o **recalque** do material da peça contra a face da ferramenta;
- a **deformação plástica** que aumenta até o valor da tensão atingir a tensão limite de cisalhamento, iniciando o **deslizamento** do material recalcado segundo os planos de cisalhamento;
- a **ruptura parcial ou completa** na região de cisalhamento, dependendo também da ductibilidade do material;
- o **escorregamento** de material deformado e cisalhado sobre a face da ferramenta.

Fonte: Projeto de máquinas-ferramentas. UFSC, www.imp.ufsc.br.

Os cavacos longos ou contínuos são considerados indesejáveis, dificultam o manuseio e a armazenagem, causam risco de acidentes ao operador, obstruem e travam o transportador de cavacos causando paradas de máquina ou até quebras. Podem enrolar e causar danos na ferramenta, bem como refugos, e prejudicam a tolerância e o acabamento superficial da peça. Procura-se formar

Figura 6.5
Tipos de cavacos.

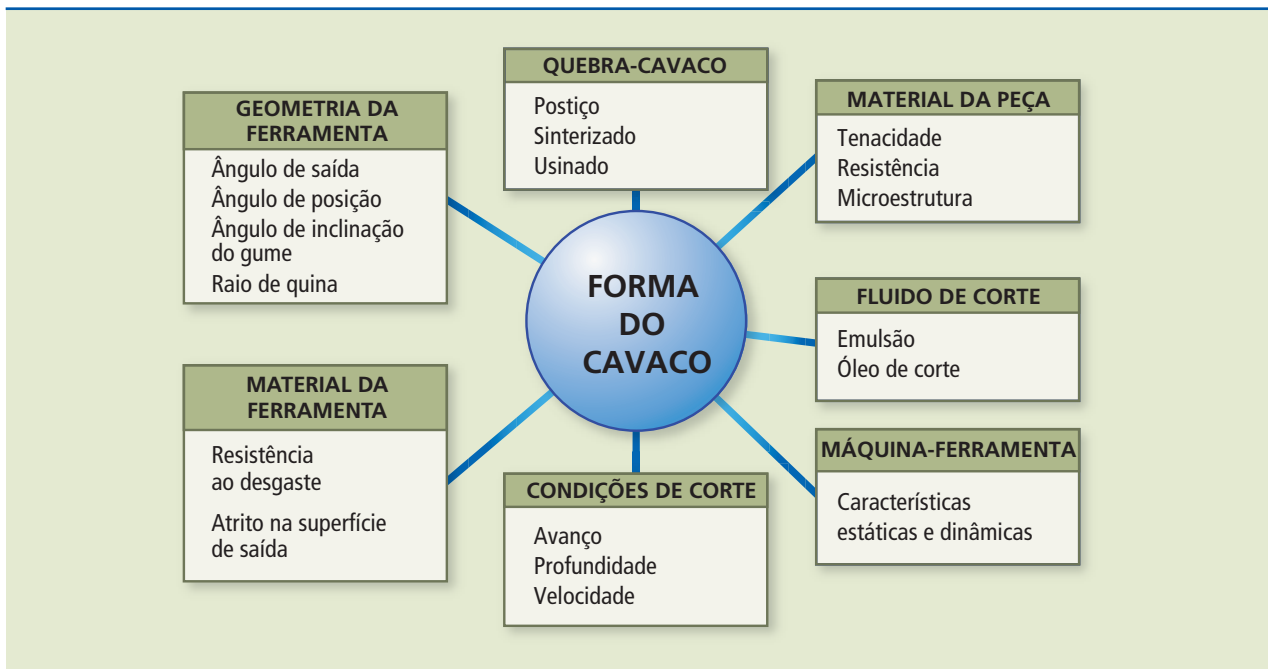
cavacos favoráveis, do tipo hélice espiral, que ocupam pouco volume, não obstruem o local de trabalho e são removidos facilmente. A figura 6.5 mostra os tipos de cavacos.

Fita	Emaranhado	Hélice Plana	Hélice Oblíqua	Hélice Longa	Hélice Curta	Hélice Espiral	Espiral	Vírgula	Arrancados
Desfavorável		Médio		Favorável			Médio		

6.2 Influências que definem o tipo e a forma do cavaco

Com a melhor avaliação e aplicação dos parâmetros e da **geometria de corte da ferramenta**, busca-se um processo mais contínuo. A seleção e alteração do método e de parâmetros de corte podem reduzir o tamanho dos cavacos. O aumento do **avanço** (f) e a redução da velocidade de corte (V_c) são alternativas para produzir cavacos curtos, mas precisam ser avaliados o raio da ferramenta, a rugosidade, o tempo de usinagem e a durabilidade da ferramenta. A figura 6.6 mostra os fatores que influenciam a forma do cavaco.

Figura 6.6
Fatores que influenciam a forma do cavaco.



As medidas da **profundidade de corte (ap)**, principalmente nas operações de torneamento, precisam ser maiores do que a distância da ponta da ferramenta ao quebra-cavaco (é o desenho na face de saída da ferramenta, figura 6.7), para garantir a passagem do cavaco nessa região da ferramenta criada para reduzir seu tamanho. As pastilhas possuem quebra-cavacos específicos para as operações de desbaste, semiacabamento e acabamento.



Figura 6.7
Pastilhas com
quebra-cavaco.

Na figura 6.8, o gráfico profundidade de corte (ap) *versus* avanço (f) mostra o efeito desses parâmetros no tipo de cavaco. Maiores avanços e/ou maiores profundidades de corte tendem a resultar em cavacos mais curtos e maior potência de corte. O aumento do avanço, assim como o da profundidade de corte devem ser avaliados, visando a uma potência de corte menor do que a potência disponível no motor da máquina utilizada para a usinagem.

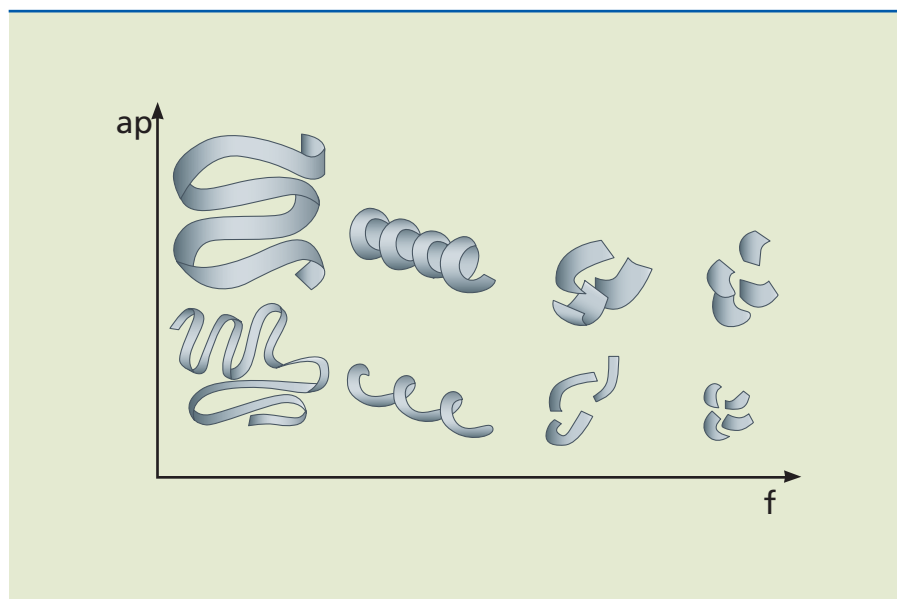
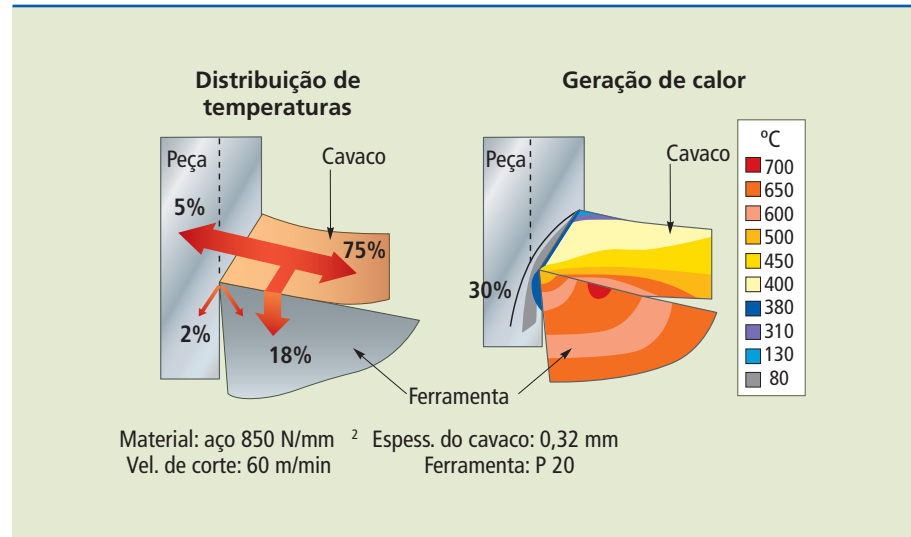


Figura 6.8
Influência da profundidade
de corte e do avanço
no tipo de cavaco.

No momento do corte do material, o impacto e o atrito da ferramenta geram calor. A figura 6.9 é apenas um exemplo da geração e distribuição de calor no momento do corte, pois esses valores dependem do tipo de material da peça, do tipo e material da ferramenta, das condições de corte e geometria do cavaco. Basicamente, se os cavacos tiverem o menor contato possível na face de saída da ferramenta, ou se existir excelente refrigeração, é transmitido menos calor para a ferramenta, o que aumenta sua durabilidade.

Figura 6.9
Geração e distribuição de calor durante o corte.



6.3 Fluidos de corte

Fluidos de corte são os líquidos (podem ser também gases) aplicados na região de corte, para facilitar ou até viabilizar a operação, quando as condições de usinagem são desfavoráveis. Definem-se como **lubrificantes** ou **refrigerantes** porque reduzem o **atrito** entre a ferramenta e o material, diminuem a **temperatura** na região de corte, **controlam** os cavacos e até auxiliam sua remoção, por exemplo, em operações de torneamento interno (figura 6.10). O uso de fluidos de corte possibilita diminuir o calor gerado na aresta de corte, prolongar a vida da ferramenta, manter o controle dos cavacos e a precisão da peça usinada.

No final do século XIX, já se usava água como refrigerante na região de corte, com o benefício de aumento da velocidade de corte, redução dos tempos de usinagem sem grande prejuízo para a vida das ferramentas, mas esse procedimento corroía as peças. Atualmente, utilizam-se fluidos sintéticos e minerais misturados com água, na proporção média de 5%, ou óleos integrais, dependendo da aplicação. Nos fluidos em geral são colocados aditivos.

A escolha correta dos fluidos de corte, assim como sua aplicação possibilitam muitas **vantagens**, como a diminuição dos custos operacionais e melhora da qualidade do acabamento superficial das peças e da produtividade. Precisam ser manipulados e tratados corretamente, para deixarem de ser **nocivos** à saúde dos usuários e ao meio ambiente.

**Figura 6.10**

Uso de fluido no processo de torneamento interno.

Os fluidos de corte precisam ter “propriedades e características anticorrosivas, antiespumantes, antioxidantes e de lavagem; compatibilidade com o meio ambiente; alta capacidade de umectação; boas propriedades antidesgaste e antisolda ou EP; estabilidade durante a estocagem e o uso; ausência de odor forte e/ou desagradável; ausência de precipitados sólidos e outros de efeito negativo; viscosidade adequada e transparência, se possível”. (Fonte: www.cimm.com.br)

“Os custos com refrigerantes atingem perto de 16% dos custos de usinagem. Destes, 40% são custos de estoque, 22% são custos de descarte, 24% são custos operacionais e de compra, 7% são custos de manutenção.” (Fonte: MITSUBISHI CARBIDE, 2007.)

6.3.1 Classificação dos fluidos de corte

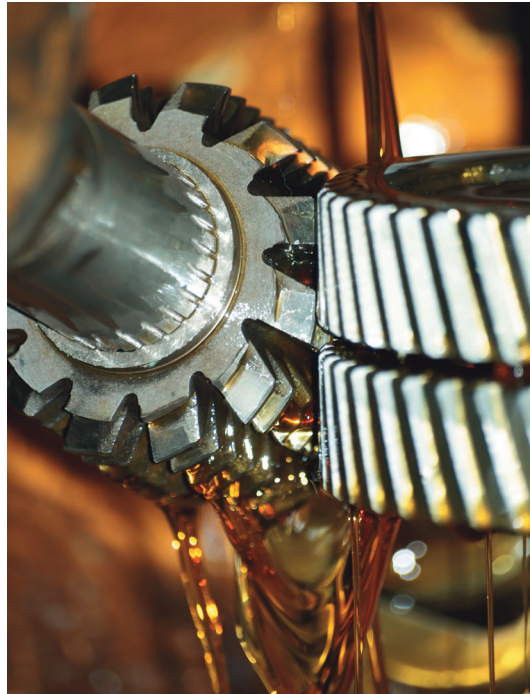
Os tipos principais de fluidos de corte são os solúveis (as **emulsões** e as **soluções**) e os **óleos integrais**.

- **Emulsões** – os fluidos semissintéticos são formadores de emulsões e apresentam menor concentração de óleo na emulsão. Essa característica aumenta a vida do fluido, diminui os riscos à saúde e torna o óleo indicado para altas velocidades.
- **Soluções** – os óleos solúveis são compostos de óleo mineral e grande quantidade de aditivos. Ao se misturar com a água, a solução torna-se translúcida. É usado principalmente em retificadoras e centros de usinagem.
- **Óleos integrais** – são constituídos basicamente de óleos graxos e óleos minerais, que podem ser usados puros, misturados ou com aditivos (ver figura 6.11).

- **Com aditivos ativos:** – para altas pressões e temperaturas, para reagir quimicamente com a superfície nascente do cavaco, melhorar condições de atrito (cisalhamento).
- **Com outros aditivos (inativos):** – óleos minerais puros, óleos graxos, compostos de óleo mineral e óleos graxos puros, aditivos antifricção, anticorrosão, antioxidante.

Figura 6.11

Exemplo de emprego de óleo integral em fresamento de engrenagem.



SLAVIKBIGSHUTTERSTOCK

Na tabela 6.2, uma comparação entre propriedades dos fluidos de corte como orientação de aplicação e uso revela, por exemplo, que, quanto ao poder refrigerante, as soluções são mais aplicadas do que os óleos; porém, quanto ao poder lubrificante, os óleos são mais indicados.

Tabela 6.2

Emprego de soluções, emulsões e óleos em função das propriedades do fluido de corte

Propriedades do fluido de corte	Soluções	Emulsões	Óleos
Poder lubrificante	Baixo	Intermediário	Alto
Poder refrigerante	Alto	Intermediário	Baixo
Velocidade de corte (V_c) empregada	Alta	Alta	Baixa
Admite aditivo EP	Sim	Sim	Sim
Suscetível à infecção bacteriana*	Não	Sim	Sim
Propriedades anticorrosivas**	Fracas	Fracas	Boas

* A manutenção do fluido e uso correto de bactericidas amenizam o problema.

** Para problemas de corrosão com fluidos solúveis, em geral, usam-se aditivos antiferrugem.

Os fluidos de corte são modificados com **aditivos** – compostos químicos que melhoram as propriedades dos fluidos ou lhes atribuem novas características. Os aditivos mais usados são: de extrema pressão (EP), antiferrugem, antisséptico e antiespuma.

Óleos com aditivos de extrema pressão (EP) são compostos de enxofre, cloro ou fósforo, que reagem em altas temperaturas (200 a 1 000 °C), gerando uma película contra a formação do gume postiço na ferramenta de corte.

6.3.2 Formas de aplicação dos fluidos de corte

O conjunto de fotos e desenhos mostrados na figura 6.12 ilustra exemplos de formas de aplicação dos fluidos de corte.

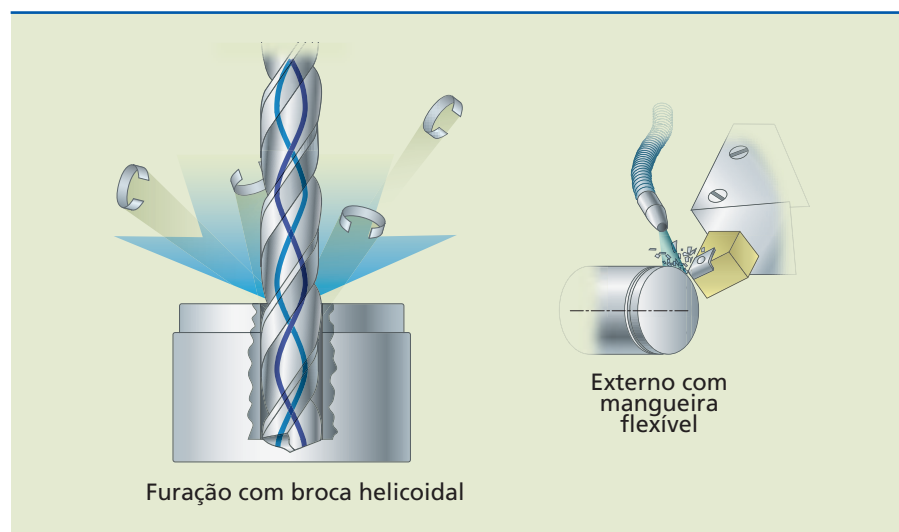


Figura 6.12

Formas de aplicação dos fluidos de corte.

O fluido deve ser aplicado com jato abundante e controlado na área de corte. Além de jato abundante, aplicam-se maiores pressões de refrigeração e de gases e névoas.

Gases e névoas são usados em operações de mecânica de precisão, usinagem de altas velocidades e em MQL (quantidade mínima de lubrificante – fluido de corte). O uso de MQL é favorável à consciência ambiental, com menor consumo e menor necessidade de descarte. A MQL é empregada em sistemas de névoa em que o fluido é disperso na forma de *spray* sobre a região que se quer refrigerar ou lubrificar (mistura ar + óleo).

Na indústria de moldes e matrizes, por exemplo, é utilizada principalmente a operação de fresamento em *high speed machining* (HSM) ou *high speed cutting* (HSC) – designação mundial para processos de usinagem a altas taxas de velocidade de corte e avanço com baixa profundidade de corte. Indica-se a MQL, pois, ao se aplicar o fluido refrigerante em corte interrompido, as mudanças bruscas de temperatura provocam trincas térmicas na ferramenta, enquanto a opção de usinagem sem refrigeração provoca dilatação térmica e dificuldades de manuseio dos cavacos sob altas temperaturas, além de comprometer o acaba-

mento superficial. O ar comprimido é utilizado para melhorar a retirada de calor e expulsão do cavaco da região de corte.

Como desvantagens da MQL podem ser citadas a necessidade de um sistema de exaustão da névoa gerada e a capacidade limitada de lubrificação e refrigeração.

6.3.3 Problemas comuns no uso de fluidos de corte

O uso de fluidos de corte exige cuidados especiais na manipulação, manutenção, transporte, armazenagem e descarte, para não colocar em risco a saúde dos operadores e o meio ambiente com uma possível contaminação do produto. Não existe um fluido de características universais. A melhoria de certas qualidades pode provocar a piora de outras.

Uma das formas de contaminação dos fluidos por sujeiras ou impurezas pode ocorrer com a adição do óleo lubrificante das guias das máquinas. Com os ciclos de lubrificação periódica das máquinas automáticas e computadorizadas, o óleo lubrificante é levado pelo fluido ao reservatório, sem se misturar. Com o passar do tempo, produz-se uma película de óleo sobrenadante no reservatório e mau cheiro. Outro problema decorrente é a corrosão de peças e/ou da máquina que sofrem ataque do fluido fora da especificação de concentração. Além disso, alguns fluidos podem atacar a pintura da máquina.

No ambiente industrial, podem ocorrer problemas de saúde ao usuário pela inalação de vapores surgidos da refrigeração sob alta pressão e resultantes de operações em máquinas de alto rendimento, bem como de uma concentração de máquinas utilizando óleos integrais. Nesses casos, é recomendada a instalação de exaustores de névoas nas máquinas. Outro problema de saúde, atualmente já não tão frequente, é a possibilidade de irritações e doenças na pele do usuário em contato com fluidos de corte. Nesses casos, é recomendado avaliar a troca do fluido, ou o uso de luvas, ou mudar o operador de posto de trabalho, caso seja identificado um problema específico de alergia.

6.3.4 Purificação de fluidos de corte

Os fluidos de corte podem ser submetidos a processos de purificação através de sistemas individuais ou centralizados (para várias máquinas), tendo por objetivo:

- permitir o controle da concentração dos fluidos em sistemas centralizados;
- a redução do descarte com a possibilidade de remoção de partes metálicas finas e outros contaminantes;
- o aumento da vida útil do fluido de corte;
- a redução de paradas de máquinas e da mão de obra na limpeza de reservatórios.

Métodos de purificação

- **Decantação** – é um processo de separação por gravidade, no qual são empregados dispositivos como chicanas de separação etc.



- **Filtração** – o fluido passa por filtragem em meios porosos, por exemplo, papel filtrante.
- **Sistemas qualificadores de fluido de corte** – removem cavacos e retiram parcialmente óleos sobrenadantes nos fluidos de corte. Esses sistemas são aplicados na purificação do fluido de retificadoras, brochadeiras, centros de usinagem, equipamentos de broqueamento profundo, usinagem com ferramentas de alto rendimento e precisão, entre outros.

6.4 Ferramenta de corte

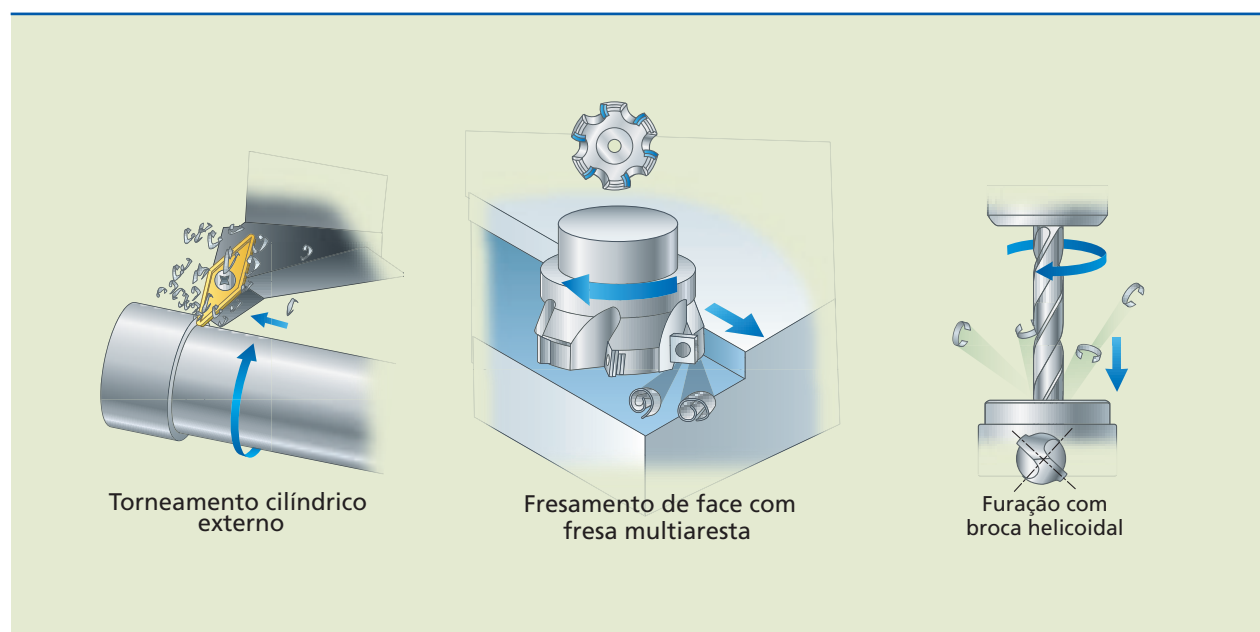
A ferramenta de corte é muito importante para o sucesso da usinagem. Embora seu custo inicial seja de 3% a 5% dos custos totais do processo, a seleção correta do material, da classe e geometria, bem como dos parâmetros de corte da ferramenta, permite otimização de recursos ao reduzir o tempo de usinagem, o tempo de máquina, o consumo de energia elétrica etc.

As ferramentas de usinagem são constituídas de arestas cortantes, destinadas à remoção do cavaco. As ferramentas monocortantes possuem apenas uma superfície de corte e predominam no torneamento, enquanto as ferramentas multicortantes possuem mais de uma superfície de corte e predominam na furação e fresamento. Em geral, existem as ferramentas inteiriças, ferramentas com adição de material mais resistente soldado, como aresta de corte, e as ferramentas indexáveis (com pastilhas ou insertos intercambiáveis). A figura 6.13 mostra três tipos de ferramentas de corte.

A escolha do material da ferramenta, da geometria e dos parâmetros de corte está associada ao tipo de material que vai ser usinado, às características da atividade a ser executada, aos objetivos que se quer atingir e em qual máquina-ferramenta será aplicado. A geometria da ferramenta e os parâmetros de corte influenciam na formação do cavaco, nas forças de corte, no desgaste da ferramenta e na qualidade final do trabalho.

Figura 6.13

Ferramentas de corte.



6.4.1 Requisitos desejados em ferramenta de corte

Uma ferramenta de corte deve apresentar em geral:

- condutibilidade térmica, calor específico e expansão térmica adequados;
- resistência à compressão;
- dureza;
- tenacidade;
- resistência ao calor e à abrasão;
- resistência ao desgaste e à oxidação;
- pequena tendência à fusão e caldeamento.

Muito dificilmente uma ferramenta atende a todos os requisitos. É importante conhecer os materiais das ferramentas e a geometria para o sucesso da usinagem.

6.4.2 Evolução dos principais materiais para ferramenta de corte

Aço rápido – desde 1900

É um aço para ferramentas que pode usinar em altas velocidades (em inglês, HSS – *high speed steel*). Com dureza de 60 a 67 HRC após tratamento térmico complexo, resiste a uma temperatura de até aproximadamente 600 °C. É universal, aplicado em ferramentas para todas as operações de usinagem, tais como: machos e cossinetes de roscas, brocas helicoidais, alargadores e fresas de todos os tipos, cortadores de engrenagens, escareadores, ferramentas para tornear, enfim, em aplicações que exigem dureza e elevada tenacidade.

Aplicando revestimentos (TiC, TiN), proporciona menor atrito, redução no desgaste e aumento da vida da ferramenta.

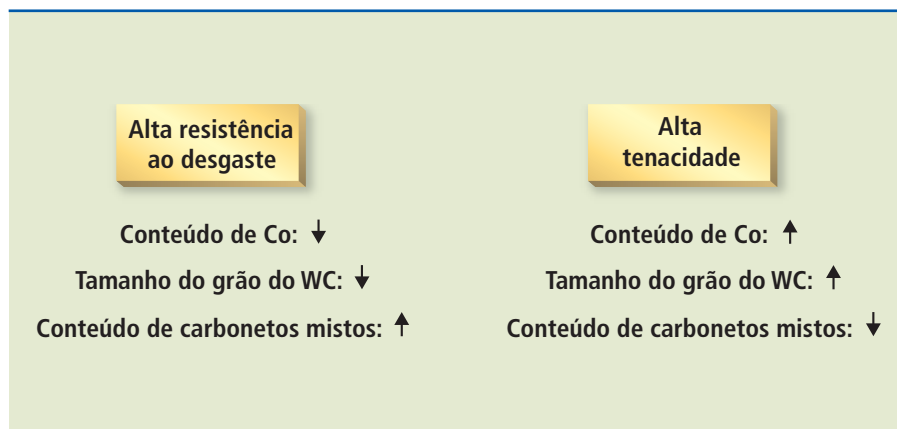
Metal duro – desde 1926

O metal duro é aplicado como ferramenta para quase todas as operações de usinagem (sob a forma de insertos intercambiáveis), brocas helicoidais inteiriças, fresas de topo, alargadores e outras aplicações.

O metal duro possui muitas propriedades requeridas para ferramentas de corte. É feito com carboneto de tungstênio (WC) em pó, cobalto (Co) em pó e elemento liga. A mistura é sinterizada em atmosfera controlada e fica com menor volume e mais peso específico do que antes da sinterização. Resiste a temperaturas da ordem de 1 000 °C.

As ferramentas fabricadas com metal duro podem trabalhar com maiores velocidades em relação àquelas com aços rápidos e têm aumento na vida útil. O quadro da figura 6.14 ilustra a influência dos elementos que compõem o metal duro em suas características.

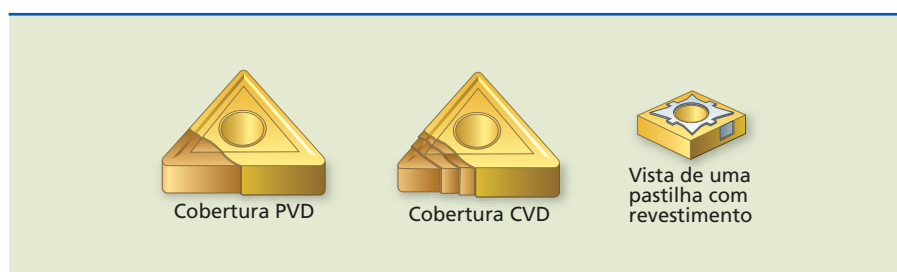


**Figura 6.14**

Influência dos elementos que compõem o metal duro.

É possível obter propriedades específicas com variações da composição de carbonetos. Nos anos 1970, surgiram os metais duros revestidos e os primeiros *cermet* (metais duros à base de TiC), ainda aplicados atualmente, possibilitando o uso de maiores velocidades. Nos anos 1990, com a redução do tamanho do grão de WC, o metal duro adquiriu estrutura denominada microgrão, ou seja, tamanho de grão menor de $1\ \mu$, o que melhorou suas características de aplicação e possibilitou maiores velocidades e maior vida útil, facilitando a deposição de camadas.

Atualmente, os processos de revestimentos CVD (deposição por vapor químico) e PVD (deposição por vapor físico) predominam entre os fabricantes de pastilhas de usinagem. Os revestimentos CVD são de alta tenacidade e necessitam de substrato especial, enquanto os revestimentos PVD são de alta dureza, sem exigência de substrato especial. Partindo de substrato tenaz, aplicam-se um ou vários revestimentos duros, como TiC, TiN, Ti(C,N), Al_2O_3 e outros. Podem combinar alta resistência a choques com alta resistência a desgaste (maior vida útil da ferramenta). A figura 6.15 mostra pastilhas com vários revestimentos.

**Figura 6.15**

Pastilhas com revestimentos.

Tipos e propriedades das camadas de revestimento dos insertos de metal duro

- **carboneto de titânio (TiC)** – alta dureza, proteção contra o desgaste na superfície de saída;
- **nitreto de titânio (TiN)** – estabilidade termodinâmica;
- **carbonitreto de titânio [Ti (C,N)]** – alta dureza, comportamento frágil, estabilidade térmica;

- **nitreto de alumínio-titânio [(Ti, Al)N]** – boa resistência à oxidação, boa dureza a quente;
- **óxido de alumínio (Al₂O₃)** – boa resistência à abrasão, boa resistência à oxidação.

No início do século XXI, teve início a aplicação de revestimentos de baixa tensão. As características buscadas foram tornar as pastilhas PVD mais tenazes, com revestimentos na face de saída do cavaco que reduzem a porosidade e facilitam o escoamento do cavaco.

Cerâmicas – desde 1938

Características gerais: alta resistência à compressão, alta estabilidade química, limitações na aplicação por causa do comportamento frágil, aplicação indispensável em áreas como fabricação de autopeças (exemplo: discos e tambores de freio). Dividem-se em cerâmicas óxidas e não óxidas.

- **Cerâmica óxida à base de Al₂O₃** – é a cerâmica de coloração branca, composição Al₂O₃ com adição de óxido de zircônio (ZrO₂), usada em torneamento de semiacabamento e acabamento de FoFo cinzento, em velocidades moderadas e sem refrigerante de corte.
- **Cerâmica óxida mista** – base de Al₂O₃ adicionado de componentes não óxidos (TiC ou TiN), coloração escura. Possui grãos finos conferindo melhor tenacidade, resistência ao desgaste e de quina, pequena resistência a choques térmicos. Aplicada em torneamento e fresamento leves de FoFo cinzento e usinagem de aços cementados e temperados, em velocidades moderadas e sem refrigerante de corte.
- **Cerâmicas não óxidas** – são cerâmicas à base de carbonetos, nitretos, boretos, silicatos, principalmente materiais à base de Si₃N₄. Aplicadas em usinagem em corte interrompido de FoFo, torneamento de discos de freio, com altas velocidades sem refrigerante quando se estiver usinando corte interrompido. Usada em superligas à base de níquel em velocidades moderadas.

Aplicando revestimentos CVD, aumenta a resistência em desbastes e cortes interrompidos de ferro fundido em altas velocidades, podendo ser usado refrigerante.

Nitreto de boro cúbico (CBN) – após 1950

Campo de aplicação – indicado para usinar os seguintes materiais:

- aços temperados com dureza maior que 45 HRC – torneamento, fresamento, furação.
- aço rápido (de ferramentas de corte) e aços resistentes a altas temperaturas;
- ligas duras e material sinterizado;
- em operações de corte interrompido, desbaste ou acabamento;
- usinagem de aços e ferros fundidos resistentes ou endurecidos, que não são usinados com diamante em função da afinidade química.

**Figura 6.16**

Nitreto de boro cúbico policristalizado sinterizado a uma base de carboneto.

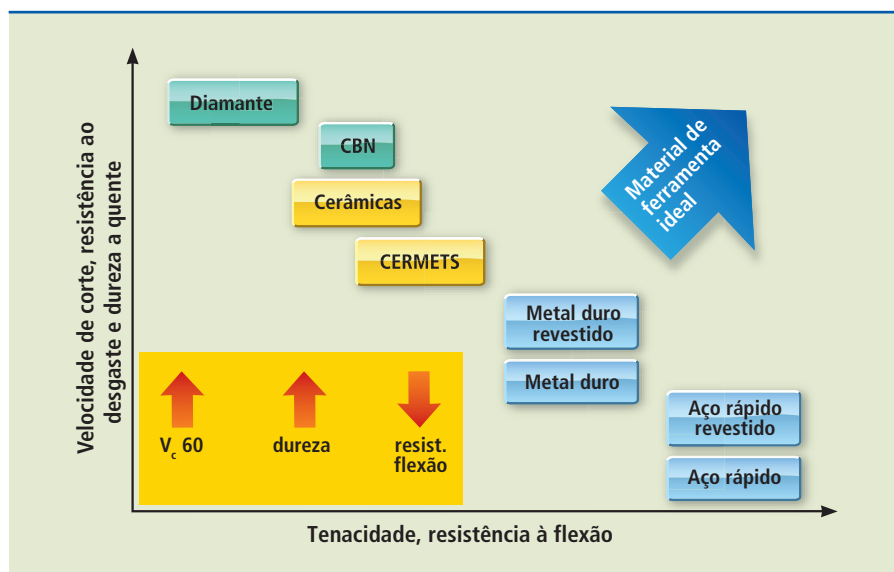
Diamante – após 1970

Geralmente é chamado PCD (policristalino). A vida das ferramentas PCD é cerca de 50 a 80 vezes maior que a das ferramentas de metal duro. São classificados:

- **quanto à origem** – naturais (normalmente na forma monocristalina) e sintéticos (fabricação sob temperatura e pressão elevadas, produção de partículas de diamante monocristalino transformado em policristalino por compressão a quente).
- **quanto à composição do inserto** – monocristalino e policristalino (diversos cristais aglutinados por galvanização).

Aplicação: usinagem de precisão e ultraprecisão, com pequenas profundidades e avanços em altas velocidades em materiais não ferrosos (possui afinidade química com Fe–C, motivo pelo qual não se usa em materiais ferrosos), como plásticos, pedras, ligas de cobre e alumínio em altas velocidades. Usinagem com tolerâncias estreitas (baixa resistência à flexão das ferramentas).

O gráfico mostrado na figura 6.17 apresenta as propriedades dos principais materiais utilizados na fabricação das ferramentas de corte.

**Figura 6.17**

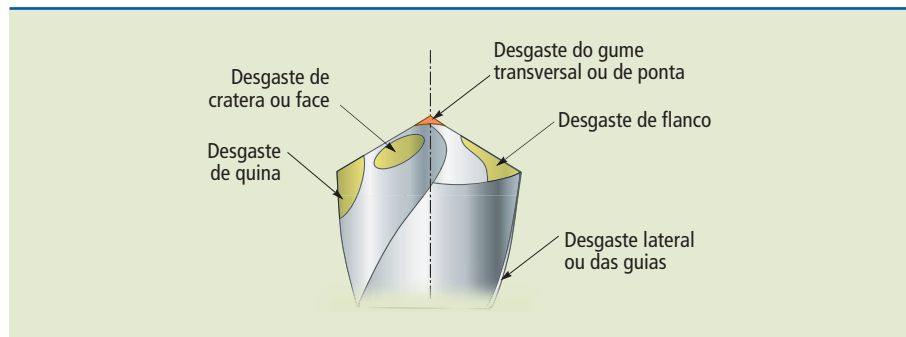
Propriedades dos principais materiais das ferramentas de corte.

6.4.3 Desgaste e avarias das ferramentas

Os danos **normais** nas ferramentas são o desgaste frontal (flanco) e de saída (cra-terização) (figura 6.18), ocasionados pela abrasão com o material. Ocorrendo os desgastes normais, a ferramenta sempre deve ser trocada quando eles chegarem ao limite de aplicação (vida útil), para evitar a quebra.

Porém, se os danos forem prematuros, deve-se substituir a classe da ferramenta por outra que melhor se adapte à aplicação. Ou corrigir parâmetros de corte como o avanço e a V_C (velocidade de corte). Ocorrendo os desgastes normais, a ferramenta sempre deve ser trocada quando eles chegarem ao limite de aplicação (vida útil), para evitar a quebra da ferramenta e maiores problemas com a peça ou a máquina.

Figura 6.18
Danos sofridos pelas ferramentas de corte.



Formas de avaliação do desgaste (ou final da vida)

O desgaste das ferramentas de corte pode ser avaliado por:

- **medição direta** – inspeção visual feita com lupas ou óptica (microscópios e câmeras);
- **medição indireta** – observando o aumento das vibrações, do ruído, piora da qualidade, quebra de bordas ou aparecimento de rebarbas excessivas na peça, rejeição dimensional e aumento de esforços de corte.

Entre os **desgastes anormais** que devem ser evitados, podemos citar como os mais importantes:

- **aresta postiça** – usinagem de material que gruda na aresta de corte por adesão térmica. Solucionar com o aumento da V_C (velocidade de corte), geometria mais positiva ou uso de refrigerante de corte.
- **lascamento do gume** – ocasionado por forças de corte excessivas, inclusões duras na peça e em usinagem de corte interrompido com classe muito dura. Inicia-se com microlascamento, que leva à fratura e quebra. Pode ser solucionado com a diminuição de esforços de avanço, aplicação de classe mais tenaz e formato mais estável de ferramenta.
- **trincas térmicas** – ocorrem quando a aresta de corte é submetida a grandes choques térmicos. Entre as soluções, deve-se utilizar uma classe mais tenaz, aumentar a quantidade ou remover definitivamente o fluido de corte.

- **deformação plástica** – causada por altos avanços e esforços, que elevam a temperatura. O avanço e a velocidade devem ser reduzidos ou trocar por uma ferramenta mais resistente.
- **trinca mecânica** – caracterizada por cortes interrompidos quando há variação de esforços na ferramenta. Deve ser utilizada uma classe mais tenaz, reduzindo o avanço e a profundidade de corte.

6.5 Parâmetros e grandezas de corte

Os principais parâmetros em usinagem são a velocidade de corte (V_C), a rotação por minuto (N), o avanço (f_n) e a profundidade de corte (ap). Para cada operação, são importantes, ainda, a rugosidade, a largura de corte e as características da máquina-ferramenta empregada.

6.5.1 Velocidade de corte (V_C)

Na usinagem, é necessário que a ferramenta e o material se movimentem em sentido favorável ao arranque de cavaco a uma velocidade de corte (V_C) e velocidade de avanço (V_f). Essas duas velocidades, em somatório vetorial, formam a velocidade resultante chamada velocidade efetiva de corte. (Ver exemplo para torneamento na figura 6.19.)

A velocidade de corte “é a velocidade instantânea do ponto de referência (parte da aresta cortante próxima à ponta da ferramenta), segundo a direção e sentido de corte” (FERRARESI, 1977), na unidade metros por minuto (m/min). Com o valor selecionado da V_C , podemos calcular as rpm (rotações por minuto) em que a peça (em torneamento) ou ferramenta (em furação e fresamento) giram. O valor das rpm possibilita conhecer qual potência de motor estará disponível para executar a usinagem, consultando o conjugado gráfico de torque/potência fornecido pelo fabricante da máquina-ferramenta (figura 6.20).

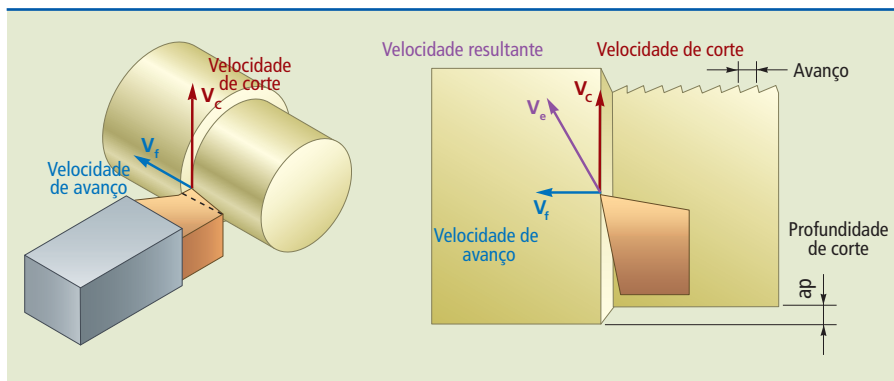


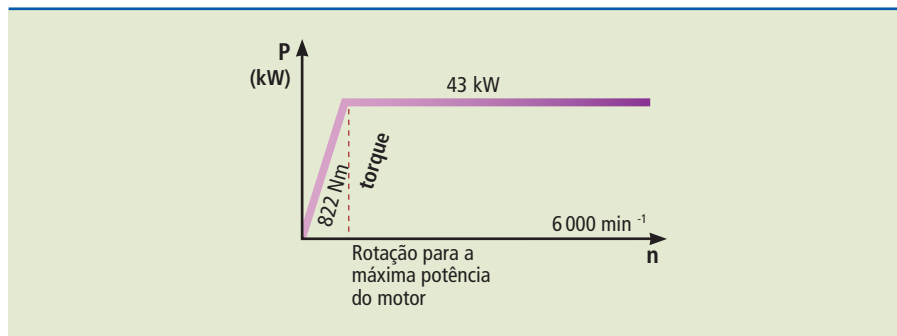
Figura 6.19

Velocidade de corte no torneamento.

A V_C é considerada o principal parâmetro na usinagem, responsável pela definição da vida útil da ferramenta, dos tempos produtivos e do acabamento da peça usinada. Velocidades excessivas diminuem a vida útil da ferramenta por desgaste e velocidades muito baixas geralmente causam aresta postiça e não são econômicas por resultar em maior tempo de usinagem.

Figura 6.20

Gráfico de torque/potência.



A motorização da máquina no exemplo da figura 6.20 é de 6 000 rpm(n), torque de 822 Nm. É preciso atingir um valor de rpm para ter a máxima potência do motor disponível (43 kW). Abaixo do valor de rpm, é requerido o uso de gráficos detalhados para saber qual potência do motor estará disponível.

A seleção da velocidade de corte depende de alguns fatores, como:

- material da peça – com maior dureza do material, geralmente aplica-se menor V_C ;
- material da ferramenta – materiais mais resistentes suportam maior V_C ; por exemplo, o metal duro é mais resistente que o aço rápido e permite maior V_C ;
- seção e formato da peça – formas delgadas (torneamento fino), maior velocidade; formas espessas (desbaste), menor velocidade; para corte interrompido em torneamento, é recomendado o uso de menor velocidade do que para corte contínuo;
- refrigeração de corte – com refrigeração, principalmente em corte contínuo, admite-se velocidade de corte até 40% maior – em fresamentos por via seca é comum maior velocidades de corte do que em via úmida;
- modelo construtivo da máquina – máquinas robustas e rígidas permitem maior velocidade de corte;
- fixação da peça e ferramenta – procura-se fixação estável para aplicar maior velocidade de corte.

O valor da V_C para cada aplicação e operação é sugerido pelos fabricantes de ferramentas em faixas de valores obtidos de dados experimentais para certo tempo de vida da ferramenta, em corte realmente efetivo. Pode ser calculada a rotação (rpm) com esse valor sugerido de V_C , por exemplo, para o uso de uma broca. Pode ser calculada a V_C quando são conhecidos a rotação (rpm) e o diâmetro. Ou seja, podemos calcular e definir a rotação a ser usada, bem como podemos calcular a V_C ao ver uma aplicação, para conferir com valores sugeridos.

Para o cálculo da rpm (revoluções por minuto) em função da velocidade de corte, utilizamos

$$N = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

Para o cálculo da V_C caso a rpm seja conhecida, utilizamos

$$V_C = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$$

em que:

$$V_c = \text{velocidade de corte (m/min)} \quad D = \text{Diâmetro (mm)}$$

$$\pi = 3,14 \text{ (constante)} \quad N = \text{rotação do eixo árvore (rpm)}$$

Na operação de torneamento, considera-se o diâmetro da peça que a ferramenta está usinando. Para o fresamento ou furação, no cálculo da rotação (em rpm) da ferramenta, considera-se o diâmetro da fresa ou da broca.

Exemplo

Determinar a rotação (rpm) para desbastar no torno convencional um tarugo de aço ABNT 1045 e produzir na peça um diâmetro de 20 mm, usando uma ferramenta de metal duro, se foi indicada uma V_c média de 150 m/min.

$$V_c \text{ sugerida} = 150 \text{ m/min}$$

$$D = 20 \text{ mm}$$

Por arredondamento, usar rpm mais próxima de 2 387.

Solução

Substituindo os valores, temos:

$$N = \frac{150 \cdot 1000}{\pi \cdot 20}$$

$$N = 2\,387,3 \text{ rpm}$$

A figura 6.21 mostra o gráfico histórico comparativo da velocidade de corte de diferentes materiais das ferramentas.

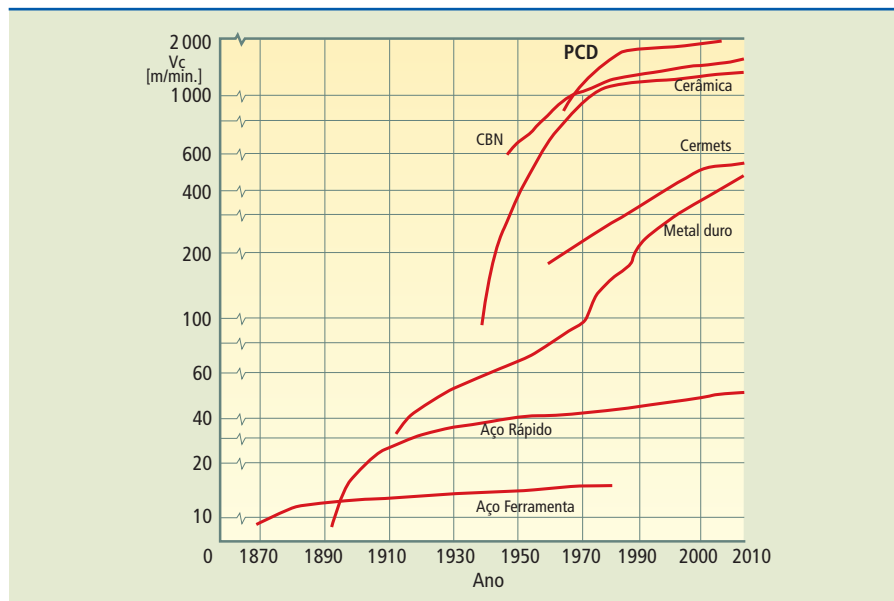


Figura 6.21

Histórico comparativo da velocidade de corte para diferentes materiais das ferramentas de corte.

6.5.2 Avanço (f_n) e velocidade de avanço (V_A)

O movimento de avanço é o deslocamento da ferramenta por rotação da peça, ou da própria ferramenta, medido no plano de trabalho. O avanço a ser utilizado depende principalmente do **acabamento superficial** exigido e de outros fatores, como:

- a potência e a estabilidade da máquina;
- o material e o formato da peça;
- a ferramenta: seu formato, o raio de ponta, o tamanho da pastilha, o quebra-cavacos, a classe e o ângulo de posição.

Para selecionarmos o avanço, verificamos as recomendações do fabricante para aquele tipo de ferramenta. Prosseguimos verificando se a combinação avanço/raio de quina (ponta) alcançará o acabamento superficial esperado. O avanço máximo deve ser sempre menor que o tamanho do raio de quina. Avanços muito pequenos normalmente resultam em um fluxo de cavacos ruim, uma vida da ferramenta mais curta e maior tempo de usinagem. Se o avanço for muito alto, produz aumento de esforços e maior potência de corte, o que prejudica o acabamento superficial e causa avarias na ferramenta, como as trincas mecânicas e deformação plástica.

Em geral, no torneamento utiliza-se o avanço em mm/rpm. Com ferramentas multicortantes (fresas), é comum a especificação do avanço por dente ou aresta da fresa (f_z), mas regulam-se ou programam-se as máquinas pela velocidade de avanço, calculada pela expressão:

$$V_A = f_n \cdot z \cdot N$$

V_A = velocidade de avanço (mm/min)

f_n = avanço (mm/rpm)

z = quantidade de facas ou arestas (1 p/torneamento e furação; para fresamento contar os dentes ou cortes da fresa)

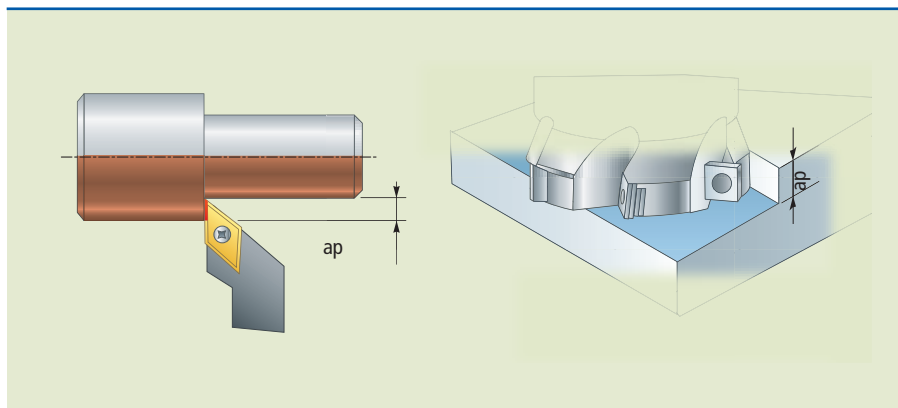
N = rotação do eixo árvore (rpm)

6.5.3 Profundidade de corte (ap)

É a profundidade ou largura de penetração da ferramenta, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No torneamento, é o valor retirado no raio da peça (resultando alteração no diâmetro de duas vezes o valor da ap). A figura 6.22 ilustra dois exemplos, um em torneamento e outro em fresamento. A profundidade de corte máxima depende dos seguintes fatores:

- potência da máquina;
- estabilidade;
- material da peça;
- formato e tamanho da pastilha;
- raio de ponta;
- quebra-cavacos;
- classe e ângulo de posição da ferramenta.



**Figura 6.22**

Profundidade de corte (ap) em torneamento e fresamento.

A seleção da profundidade ideal começa com a verificação da necessidade de usinagem, o tamanho da aresta da ferramenta (pastilha) e as recomendações para o quebra-cavaco escolhido. A profundidade de corte máxima ideal é o resultado dessas informações, e a adoção do valor real depende da potência disponível no motor. Devemos evitar que a profundidade de corte mínima seja menor que o tamanho do raio de ponta da ferramenta.

Em operações de acabamento no torneamento, principalmente interno, usa-se o mínimo raio de ponta possível e ângulo de saída positivo, para obter menor pressão de corte, o que evita a deformação da geometria usinada, como os desvios de circularidade e cilindricidade.

A utilização de grandes profundidades de corte aumenta a quantidade de metal removido por unidade de tempo, mas, em compensação, provoca significativos acréscimos na potência de corte e no desgaste e quebra das ferramentas. Usar uma profundidade muito pequena causa perda do controle dos cavacos, possíveis vibrações, além de não ser econômico, por precisar passar a ferramenta mais vezes para remover a quantidade de material requerida.

6.6 Cálculo do tempo de usinagem

Os parâmetros de corte são responsáveis pelo tempo efetivo de corte na usinagem. Pode-se calcular o tempo efetivo de usinagem t pela seguinte equação:

$$t = \frac{\text{espaço}}{V_A} \text{ (min)}$$

em que:

t = tempo (min);

espaço = espaço percorrido pela ferramenta (mm);

V_A = velocidade de avanço (mm/min).

O valor é calculado em minutos. Multiplicando o resultado por 60, temos a conversão do tempo de minutos para segundos.

Percebe-se a importância dos parâmetros para fazer a usinagem mais econômica. O espaço percorrido pela ferramenta tem influência na profundidade de corte, em que maiores profundidades geram menor quantidade de passes de desbaste e menor espaço percorrido. A velocidade de avanço tem a influência inicial da velocidade de corte (V_c) (que determina a rotação, rpm) e do valor de avanço para gerar maior velocidade.

A aplicação correta das ferramentas pode trazer muitos benefícios, utilizando os parâmetros adequados, garantindo o menor tempo de usinagem e a maior vida possível da ferramenta.

Os valores da **força de corte** e da **potência de corte** são calculados conforme o processo de usinagem a ser realizado: torneamento, fresamento ou furação.