

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Unidade de Araranguá
Coordenação Geral de Cursos Técnicos
Curso Técnico em Eletromecânica



Módulo III:

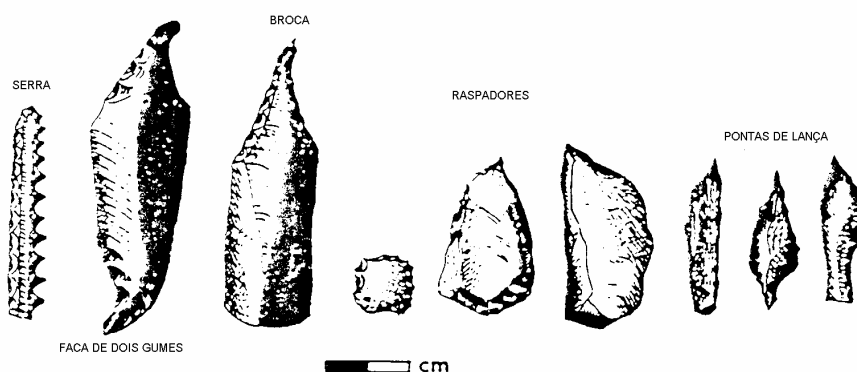
Usinagem Básica

Material instrucional selecionado pelo
Prof. Joel Brasil Borges, para uso no
CEFET/SC, Unidade de Araranguá.
Fonte: www.ebah.com.br

Fevereiro
2009

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Um subgrupo da norma DIN 8580 sob o termo "Separar", compreende os processos de fabricação com remoção de cavaco com ferramenta de geometria definida, que se caracteriza pela aplicação de ferramentas com características geometricamente definidas. Já a aproximadamente 12 a 50 mil anos o homem estava em condições de produzir ferramentas de pedras com gumes afiados por lascamento, como nos mostram achados arqueológicos da idade da pedra (figura abaixo).



Ferramentas de pedra lascada.

Mas um fato marcante para o desenvolvimento tecnológico foi a descoberta dos metais, como: cobre, zinco e ferro. Já a partir de 700 anos Antes de Cristo, praticamente todas as ferramentas eram executadas em ferro, e a partir do século XVII foram descobertas constantes melhoras no processo de fabricação do ferro e na siderurgia do aço, que colocaram o aço em posição vantajosa em relação aos metais até então conhecidos. Estudos sistemáticos sobre a tecnologia de usinagem no entanto, só iniciaram no início do século XIX e levaram entre outros a descoberta de novos materiais de corte. No início de 1900, o americano F. W. Taylor com a descoberta do aço rápido, determinou um passo marcante no desenvolvimento tecnológico da usinagem.

Os metais duros sinterizados e os materiais de ferramentas baseados em materiais oxicerâmicos são outros resultados de uma pesquisa intensiva na área de materiais para ferramentas que até hoje ainda não está concluída e sim está submetida a uma melhora constante; isto referido à fabricação e utilização de materiais para ferramentas como por exemplo os materiais nitreto de boro cúbico e ferramentas de diamante.

Para poder satisfazer as exigências crescentes feitas a qualidade das peças e a viabilidade econômica do processo de fabricação, as ferramentas devem ser usadas de forma econômica para que todas as grandezas que participam no processo de usinagem como, geometria da ferramenta, condições de corte, material da peça e materiais auxiliares, tenham a sua influência e seu efeito sobre o resultado do trabalho considerados. O conhecimento da interdependência funcional dos diversos fatores, permite o aproveitamento das reservas tecnológicas disponíveis. Ponto básico no processo de usinagem, é o processo de corte propriamente dito com o que inicia esta apostila.

No estudo das operações dos metais, distinguem-se duas grandes classes de trabalho:

As operações de usinagem

As operações de conformação

Como *operações de usinagem* entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três bens, produzem *cavaco*. Definimos *cavaco*, a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. Além desta característica, estão envolvidos no mecanismo da formação do cavaco alguns fenômenos particulares, tais como o *recalque*, a *aresta postiça de corte*, a *craterização* na superfície de saída da ferramenta e a *formação periódica do cavaco* (dentro de determinado campo de variação da velocidade de corte)*.

Como *operações de conformação* entendemos aquelas que visam conferir à peça a forma ou as dimensões, ou o acabamento específico, ou ainda qualquer combinação destes três bens, através da deformação plástica do metal. Devido ao fato da operação de *corte em chapas* estar ligada aos processos de estampagem profunda, dobra e curvatura de chapas, essa operação é estudada no grupo de operações de conformação dos metais.

1. Classificação e nomenclatura dos processos mecânicos de usinagem

1 - TORNEAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes¹. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser *retilíneo* ou *curvilíneo*.

1.1 - *Torneamento retilíneo*- Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. O torneamento retilíneo pode ser:

1.1.1 - *Torneamento cilíndrico* - Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser *externo* (figura 1) ou *interno* (figura 2).

Quando o torneamento cilíndrico visa obter na peça um entalhe circular, na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, o torneamento é denominado *sangramento axial* (figura 3).

1.1.2 - *Torneamento cônico* - Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser *externo* (figura 4) ou *interno* (figura 5).

1.1.3 - *Torneamento radial* - Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina.

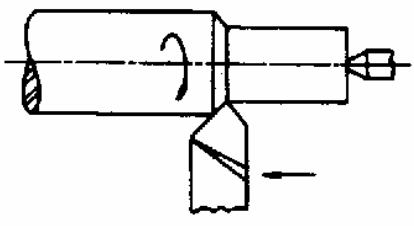
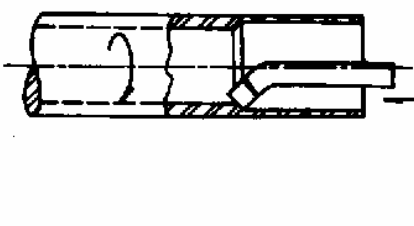
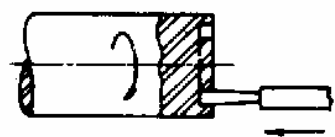
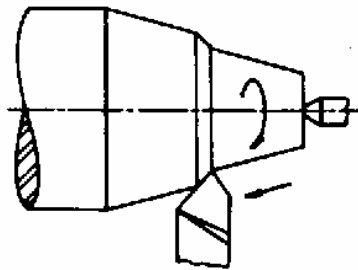
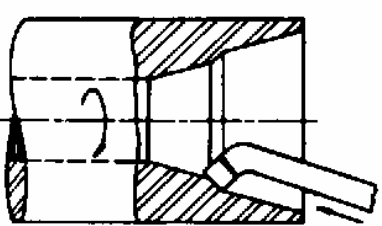
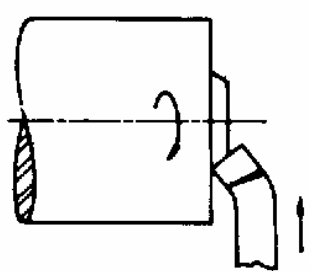
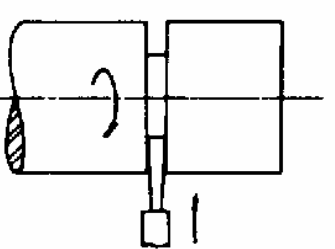
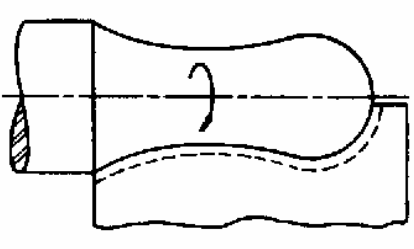
Quando o torneamento radial visa a obtenção de uma superfície plana, o torneamento é denominado *torneamento de faceamento* (figura 6). Quando o torneamento radial visa a obtenção de um entalhe circular, o torneamento é denominado *sangramento radial* (figura 7).

1.1.4 - *Perfilamento* - Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea radial (figura 8) ou axial (figura 9), visando a obtenção de uma forma definida, determinada pelo perfil da ferramenta.

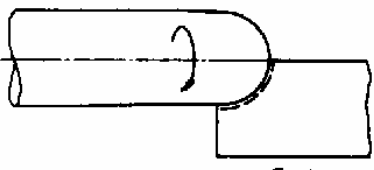
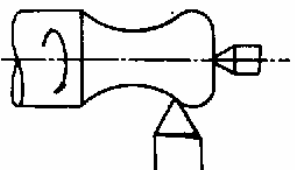
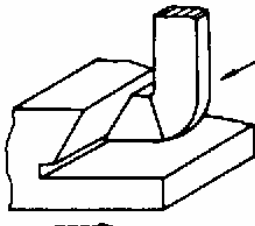
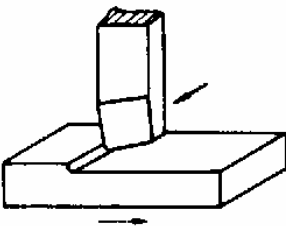
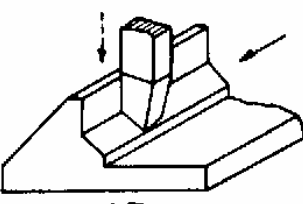
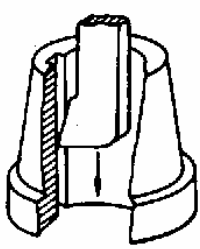
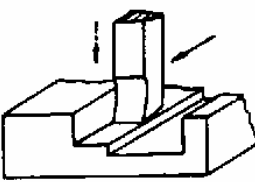
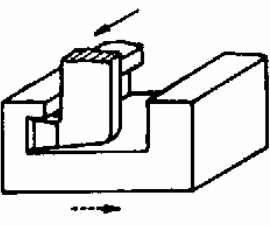
¹ Denomina-se ferramenta de usinagem mecânica a ferramenta destinada à remoção de cavaco. No caso de possuir uma única superfície de saída, a ferramenta é chamada ferramenta monocortante; quando possuir mais de uma superfície de saída, é chamada ferramenta multicortante.

1.2 - *Torneamento curvilíneo* - Processo de torneamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea (figura 10).

Quanto à finalidade, as operações de torneamento podem ser classificadas ainda em *torneamento de desbaste* a *torneamento de acabamento*. Entende-se por acabamento a operação de usinagem destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos. O desbaste é a operação de usinagem, anterior a de acabamento, visando a obter na peça a forma a dimensões próximas das finais.

TORNEAMENTO	
<p>Fig.1 - Torneamento cilíndrico externo</p> 	<p>Fig.2 - Torneamento cilíndrico interno</p> 
<p>Fig.3 - Sangramento axial</p> 	<p>Fig.4 - Torneamento cônico externo</p> 
<p>Fig.5 - Torneamento cônico interno</p> 	<p>Fig.6 - Torneamento de faceamento</p> 
<p>Fig.7 - Sangramento radial</p> 	<p>Fig.8 - Perfilamento radial</p> 

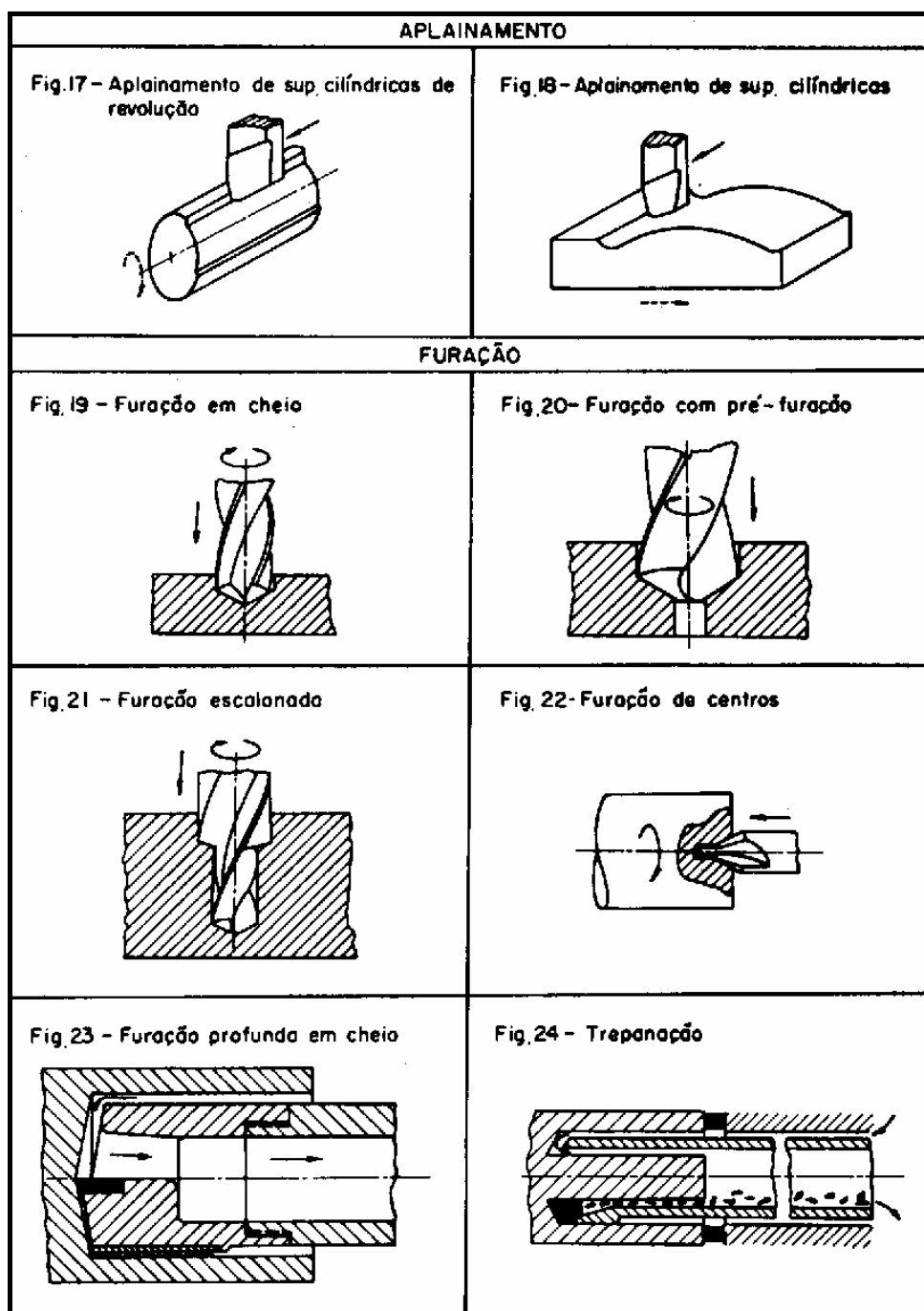
2 - APLAINAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies regradas, geradas por um movimento retilíneo alternativo da peça ou da ferramenta. O aplainamento pode ser *horizontal* ou *vertical* (figuras 11 a 18). Quanto à finalidade, as operações de aplainamento podem ser classificadas ainda em *aplainamento de desbaste* a *aplainamento de acabamento*.

TORNEAMENTO	
<p>Fig.9 - Perfilamento axial</p> 	<p>Fig.10 - Torneamento curvelíneo</p> 
APLAINAMENTO	
<p>Fig.11 - Aplainamento de guias</p> 	<p>Fig.12 - Aplainamento de superfícies</p> 
<p>Fig.13 - Aplainamento de perfis</p> 	<p>Fig.14 - Aplainamento de rasgo de chave</p> 
<p>Fig.15 - Aplainamento de rasgos</p> 	<p>Fig.16 - Aplainamento de ranhuras em "T"</p> 

3 - FURAÇÃO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. A furação subdivide-se nas operações:

3.1 - *Furação em cheio* - Processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo todo o material compreendido no volume do furo final, na forma de cavaco (figura 19). No caso de furos de grande profundidade

há necessidade de ferramenta especial (figura 23).



3.2 - *Escareamento*- Processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça pré-furada (figura 20).

3.3 - *Furação escalonada* - Processo de furação destinado à obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros, simultaneamente (figura 21).

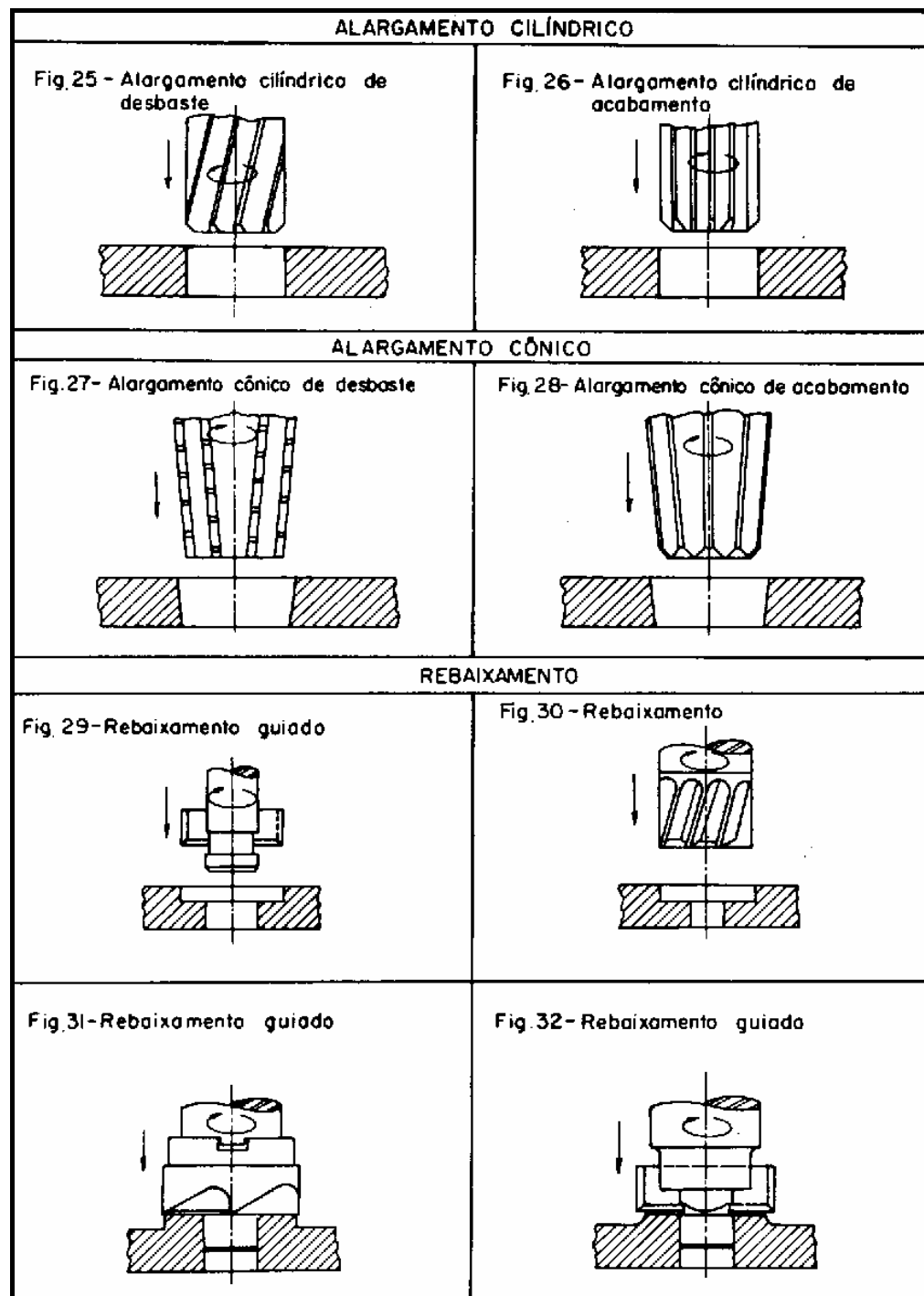
3.4 - *Furação de centros* - Processo de furação destinado à obtenção de furos de centro, visando uma operação posterior na peça (figura 22).

3.5 - *Trepanação* - Processo de furação em que apenas uma parte de material compreendido no volume do furo final é reduzida a cavaco, permanecendo um núcleo maciço (figura 24).

4 - ALARGAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado ao desbaste ou ao acabamento de furos cilíndricos ou cônicos, com auxílio de ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta. O alargamento pode ser:

4.1 - *Alargamento de desbaste* - Processo de alargamento destinado ao desbaste da parede de um furo cilíndrico (figura 25) ou cônico (figura 27).

4.2 - *Alargamento de acabamento* - Processo de alargamento destinado ao acabamento da parede de um furo cilíndrico (figura 26) ou cônico (figura 28).



5 – REBAIXAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de uma forma qualquer na extremidade de um furo. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta (figuras 29 a 34)².

6 - MANDRILAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam simultaneamente segundo uma trajetória determinada.

6.1 - *Mandrilamento cilíndrico* - Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é cilíndrica de revolução, cujo eixo coincide com o eixo em torno do qual gira a ferramenta (figura 35).

6.2 - *Mandrilamento radial* - Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é plana e perpendicular ao eixo em torno do qual gira a ferramenta (figura 36).

6.3 - *Mandrilamento cônico* - Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é cônica de revolução, cujo eixo coincide com o eixo em torno do qual gira a ferramenta (figura 37).

6.4 - *Mandrilamento de superfícies especiais* - Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é uma superfície de revolução, diferente das anteriores, cujo eixo coincide com o eixo em torno do qual gira a ferramenta. Exemplos: *mandrilamento esférico* (figura 38), *mandrilamento de sangramento*, etc..

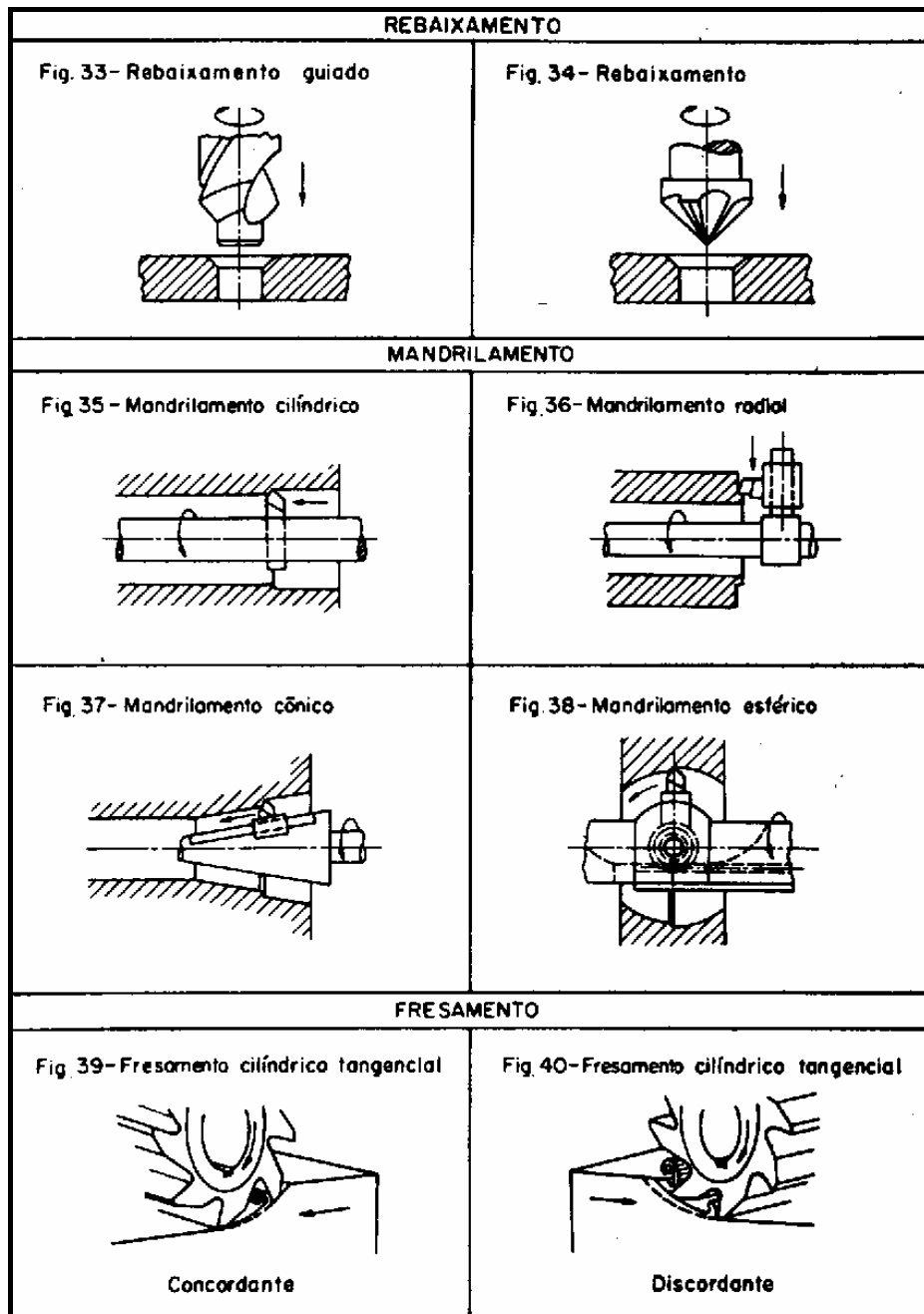
Quanto à finalidade, as operações de mandrilamento podem ser classificadas ainda em *mandrilamento de desbaste* e *mandrilamento de acabamento*.

7 - FRESAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Distinguem-se dois tipos básicos de fresamento:

7.1 - *Fresamento cilíndrico tangencial* - Processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta (figuras 39,

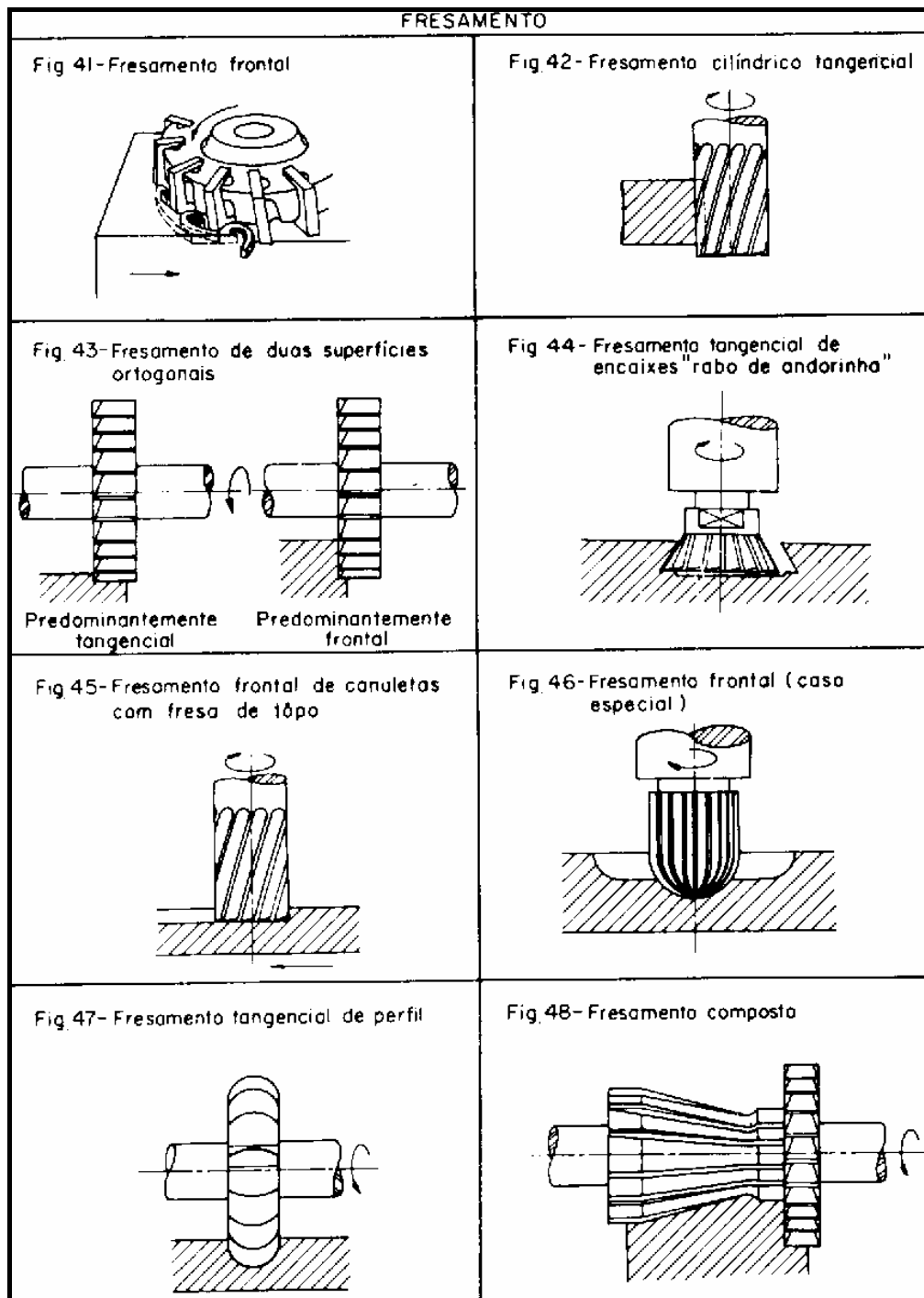
² As operações indicadas nas figuras 33 a 34 são denominadas por alguns autores, de *escareamento*.

40 a 42). Quando a superfície obtida não for plana ou o eixo de rotação da ferramenta for inclinado em relação à superfície originada na peça, será considerado um processo especial de fresamento tangencial (figuras 44 a 47).



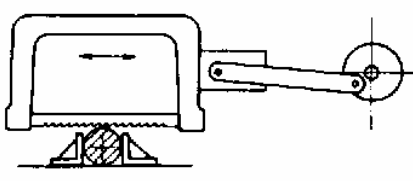
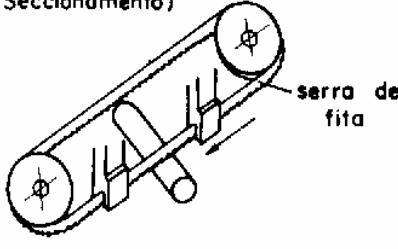
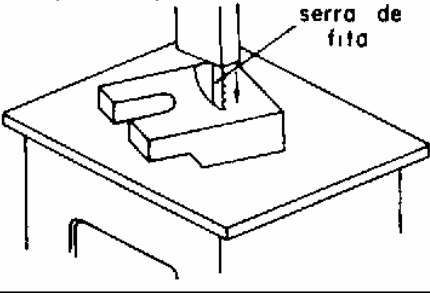
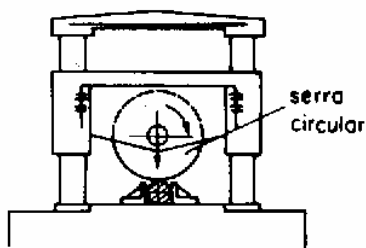
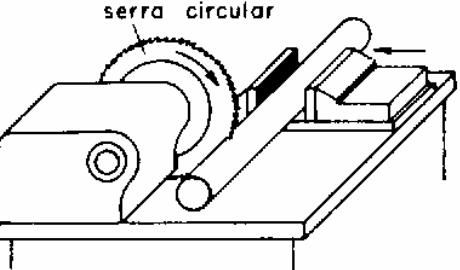
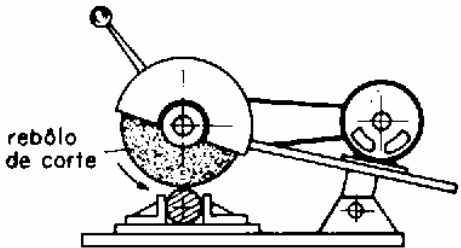
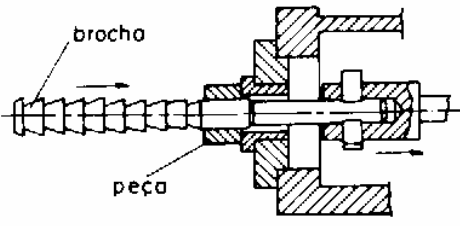
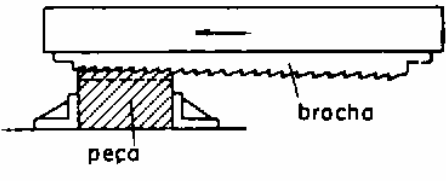
7.2 - Fresamento frontal - Processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (figuras 41 a 45). O caso de fresamento indicado na figura 46 é considerado como um caso especial de fresamento frontal.

Há casos que os dois tipos básicos de fresamento comparecem simultaneamente, podendo haver ou não predominância de um sobre outro (figura 43). A operação indicada na figura 48 pode ser considerada como um fresamento composto.



8 - SERRAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado ao seccionamento ou recorte com auxílio, de ferramentas multicortantes de pequena espessura. Para tanto, a ferramenta gira ou se desloca, ou executa ambos os movimentos e a peça se desloca ou se mantém parada. O serramento pode ser:

8.1 -- *Serramento retilíneo* - Processo de serramento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. com movimento alternativo ou não. No primeiro caso, o serramento é *retilíneo alternativo* (figura 49); no segundo caso, o serramento é *retilíneo contínuo* (figuras 50 a 51).

SERRAMENTO	
<p>Fig 49- Serramento alternativo</p> 	<p>Fig.50- Serramento contínuo (Seccionamento)</p> 
<p>Fig 51- Serramento contínuo (Recorte)</p> 	<p>Fig.52- Serramento circular</p> 
<p>Fig 53- Serramento circular</p> 	<p>Fig 54- Serramento circular</p> 
BROCHAMENTO	
<p>Fig.55- Brochamento interno</p> 	<p>Fig.56- Brochamento externo</p> 

8.2 - Serramento circular - Processo de serramento no qual a ferramenta gira ao redor de seu eixo e a peça ou ferramenta se desloca (figuras 52 a 54).

9 - BROCHAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com auxílio de ferramentas multicortantes. Para tanto, a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo da ferramenta. O brochamento pode ser:

9.1 - Brochamento interno - Processo de brochamento executado num

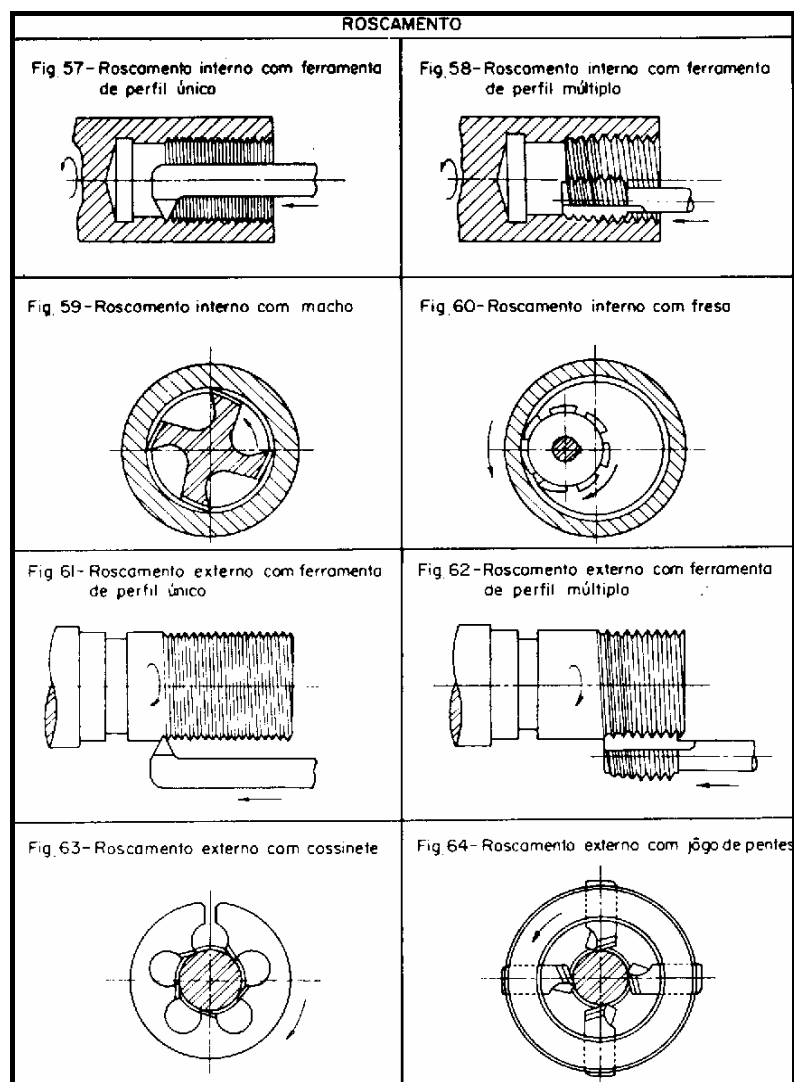
furo passante da peça (figura 55).

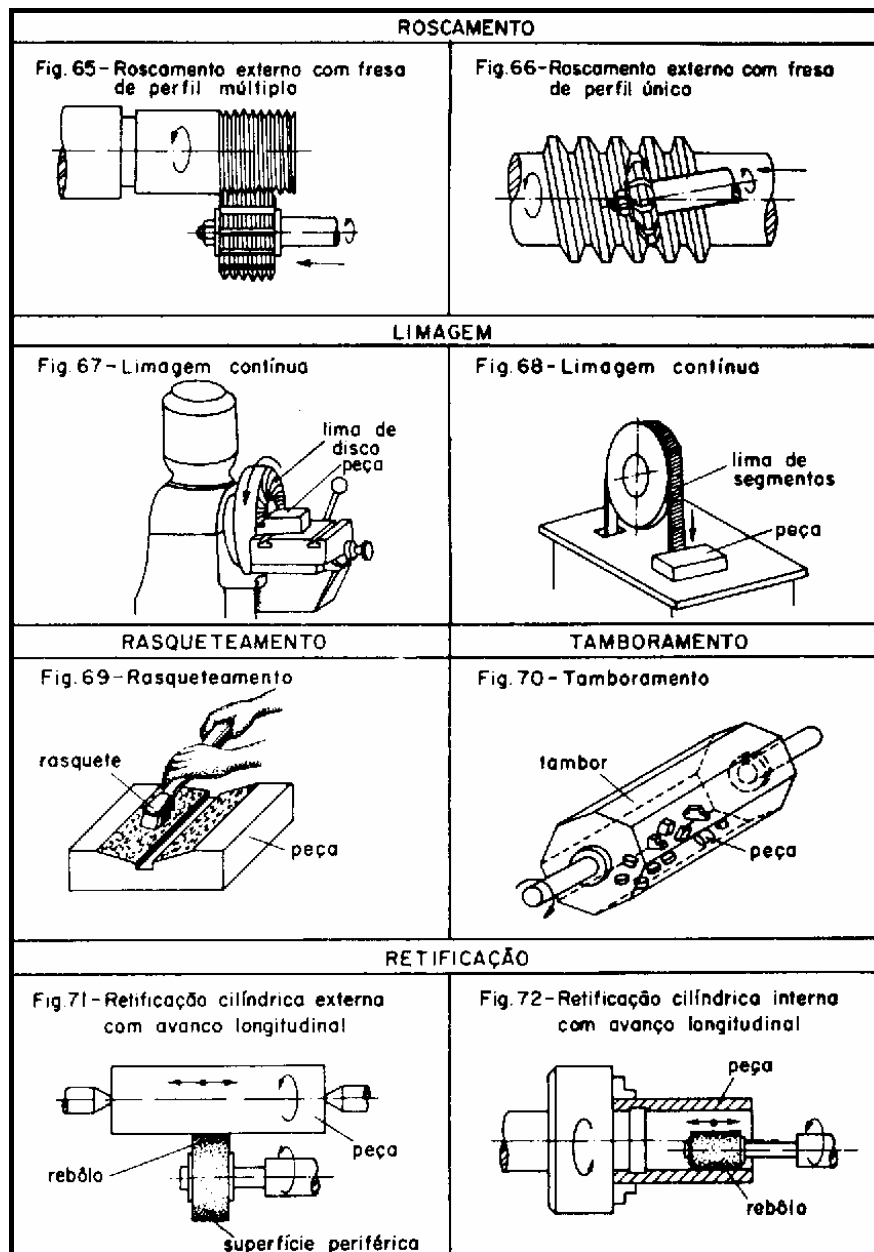
9.2 - *Brochamento externo* - Processo de brochamento executado numa superfície externa da peça (figura 56).

10 - ROSCAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira a uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação. O roscamento pode ser *interno ou externo*.

10.1 - *Roscamento interno* - Processo de roscamento executado em superfícies internas cilíndricas ou cônicas de revolução (figuras 57 a 60).

10.2 - Roscamento externo - Processo de roscamento executado em superfícies externas cilíndricas ou cônicas de revolução (figuras 61 a 66).





11 - LIMAGEM - Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies quaisquer com auxílio de ferramentas multicortantes (elaboradas por picagem) de movimento contínuo ou alternativo (figuras 67 a 68).

12 - RASQUETEAMENTO - Processo manual de usinagem destinado à ajustagem de superfícies com auxílio de ferramenta monocortante (figura 69).

13 - TAMBORAMENTO - Processo mecânico de usinagem no qual as peças são colocadas no interior de um tambor rotativo, juntamente ou não com materiais especiais, para serem rebarbadas ou receberem um acabamento (figura 70).

14 - RETIFICAÇÃO - Processo de usinagem por abrasão destinado à obtenção de superfícies com auxílio de ferramenta abrasiva de revolução³. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória determinada, podendo a peça girar ou não.

A retificação pode ser tangencial ou frontal.

14.1 - Retificação tangencial - Processo de retificação executado com a superfície de revolução da ferramenta (figura 71). Pode ser:

14.1.1 - Retificação cilíndrica - Processo de retificação tangencial no qual a superfície usinada é uma superfície cilíndrica (figuras 71 a 74). Esta superfície pode ser externa ou interna, de revolução ou não.

Quanto ao avanço automático da ferramenta ou da peça, a retificação cilíndrica pode ser com avanço longitudinal da peça (figura 71), com avanço radial do rebolo (figura 73), com avanço circular do rebolo (figura 74) ou com avanço longitudinal do rebolo**.

14.1.2 - Retificação cônica - Processo de retificação tangencial no qual a superfície usinada é uma superfície cônica (figura 75). Esta superfície pode ser interna ou externa.

Quanto ao avanço automático da ferramenta ou da peça, a retificação cônica pode ser com avanço longitudinal da peça (figura 75), com avanço radial do rebolo, com avanço circular do rebolo ou com avanço longitudinal do rebolo.

14.1.3 - *Retificação de perfis* - Processo de retificação tangencial no qual a superfície usinada é uma superfície qualquer gerada pelo perfil do rebolo (figuras 76 a 77).

14.1.4 - *Retificação tangencial plana* - Processo de retificação tangencial no qual a superfície usinada é uma superfície plana (figura 78).

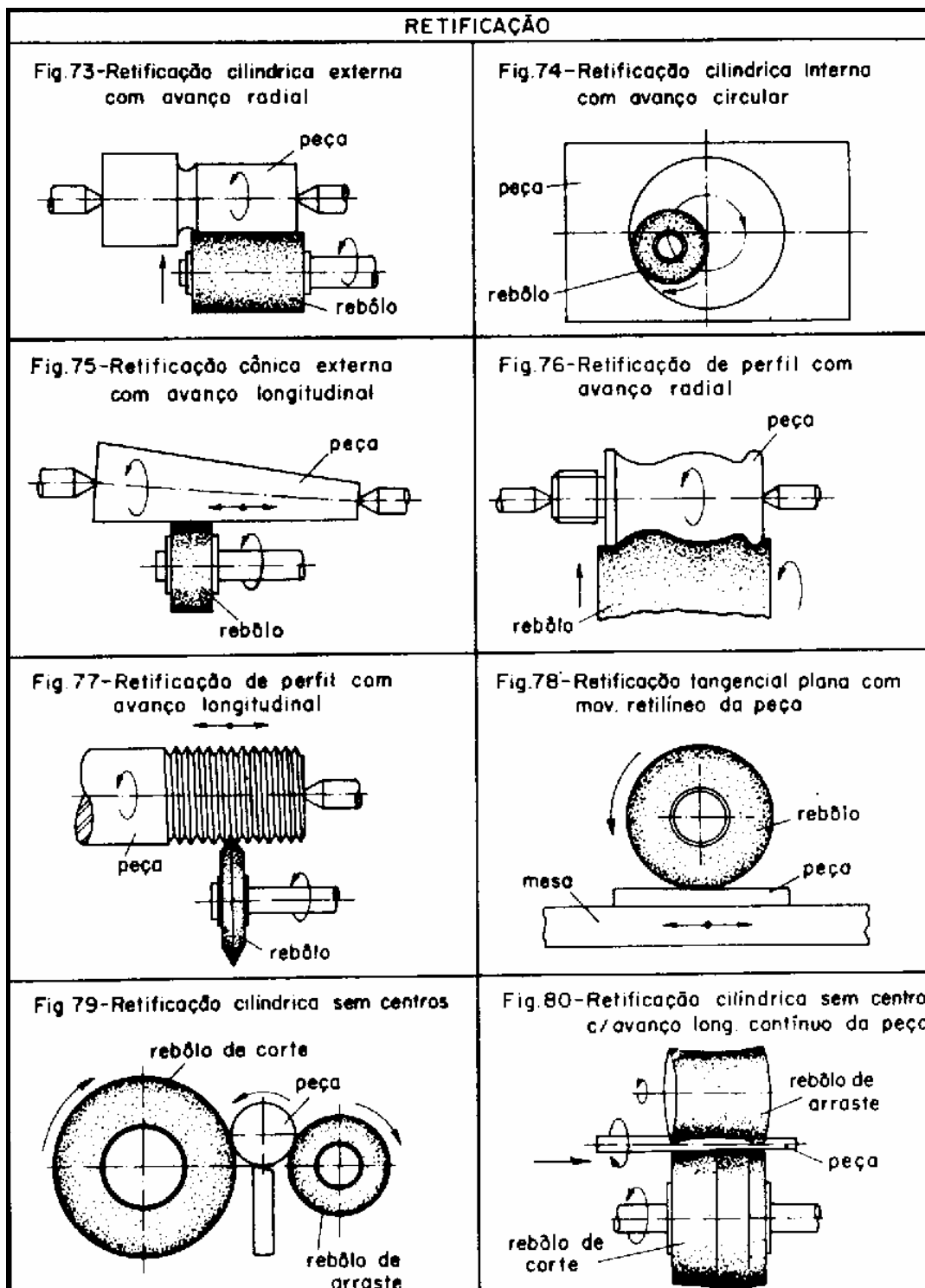
14.1.5 - *Retificação cilíndrica sem centros* - Processo de retificação cilíndrica no qual a peça sem fixação axial é usinada por ferramentas abrasivas de revolução, com ou sem movimento longitudinal da peça (figuras 79 a 82).

³ Denomina-se de usinagem por abrasão ao processo mecânico de usinagem no qual são empregados abrasivos ligados ou soltos. Segundo a Norma PB-26 - Ferramentas Abrasivas da A. B. N. T., denomina-se ferramenta abrasiva a ferramenta constituída de grãos abrasivos ligados por aglutinante, com formas e dimensões definidas. A ferramenta abrasiva com a forma de superfície de revolução adaptável a um eixo, é denominada rebolo abrasivo. Não são considerados rebolos abrasivos rodas ou discos de metal, madeira, tecido, papel, tendo uma ou várias camadas de abrasivos na superfície.

A retificação sem centros pode ser com avanço longitudinal da peça (retificação de passagem) ou com *avanço radial do rebolo* (retificação em mergulho) (figuras 80 a 82).

14.2 - *Retificação frontal* - Processo de retificação executado com a face do rebolo. É geralmente executada na superfície plana da peça, perpendicularmente ao eixo do rebolo.

A retificação frontal pode ser com *avanço retilíneo da peça* (figura 83), ou com *avanço circular da peça* (figura 84).



RETIFICAÇÃO	
<p>Fig.81-Retificação cilíndrica sem centros com avanço em "fileira de peças"</p>	<p>Fig.82-Retificação cilíndrica sem centros com avanço radial</p>
<p>Fig.83-Retificação frontal com avanço retilíneo da peça</p>	<p>Fig.84-Retificação frontal com avanço circular da peça</p>
BRUNIMENTO	LAPIDAÇÃO
<p>Fig.85-Brunimento</p>	<p>Fig.86-Lapidação</p>
SUPER ACABAMENTO	
<p>Fig.87-Super-acabamento cilíndrico</p>	<p>Fig.88-Super-acabamento plano</p>

15 - BRUNIMENTO - Processo mecânico de usinagem por abrasão empregado no acabamento de furos cilíndricos de revolução, no qual todos os grãos ativos da ferramenta abrasiva estão em constante contato com a superfície da peça e descrevem trajetórias helicoidais (figura 85). Para tanto, a ferramenta ou a peça gira e se desloca axialmente com movimento alternativo.

16 - SUPERACABAMENTO - Processo mecânico de usinagem por abrasão empregado no acabamento de peças, no qual os grãos ativos da ferramenta

abrasiva estão em constante contato com a superfície da peça. Para tanto, a peça gira lentamente e a ferramenta se desloca com movimento alternativo de pequena amplitude a frequência relativamente grande (figuras 87 a 88).

17 - LAPIDAÇÃO - Processo mecânico de usinagem por abrasão executado com abrasivo aplicado por porta-ferramenta adequado, com objetivo de se obter dimensões especificadas da peça (figura 86)⁴.

18 - ESPELHAMENTO - Processo mecânico de usinagem por abrasão no qual é dado o acabamento final da peça por meio de abrasivos, associados a um porta-ferramenta específico para cada tipo de operação, com o fim de se obter uma superfície especular.

19 - POLIMENTO - Processo mecânico de usinagem por abrasão no qual a ferramenta é constituída por um disco ou conglomerado de discos revestidos de substâncias abrasivas (figura 89 a 90).

20 - LIXAMENTO - Processo mecânico de usinagem por abrasão executado por abrasivo aderido a uma tela e movimentado com pressão contra a peça (figuras 91 a 92).

21 - JATEAMENTO - Processo mecânico de usinagem por abrasão no qual as peças são submetidas a um jato abrasivo, para serem rebarbadas, asperizadas ou receberem um acabamento (figura 93).

22 - AFIAÇÃO - Processo mecânico de usinagem por abrasão, no qual é dado o acabamento das superfícies da cunha cortante da ferramenta, com o fim de habilitá-la desempenhar sua função. Desta forma, são obtidos os ângulos finais da ferramenta (figura 94).

23 - DENTEAMENTO - Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de elementos denteados. Pode ser conseguido basicamente de duas

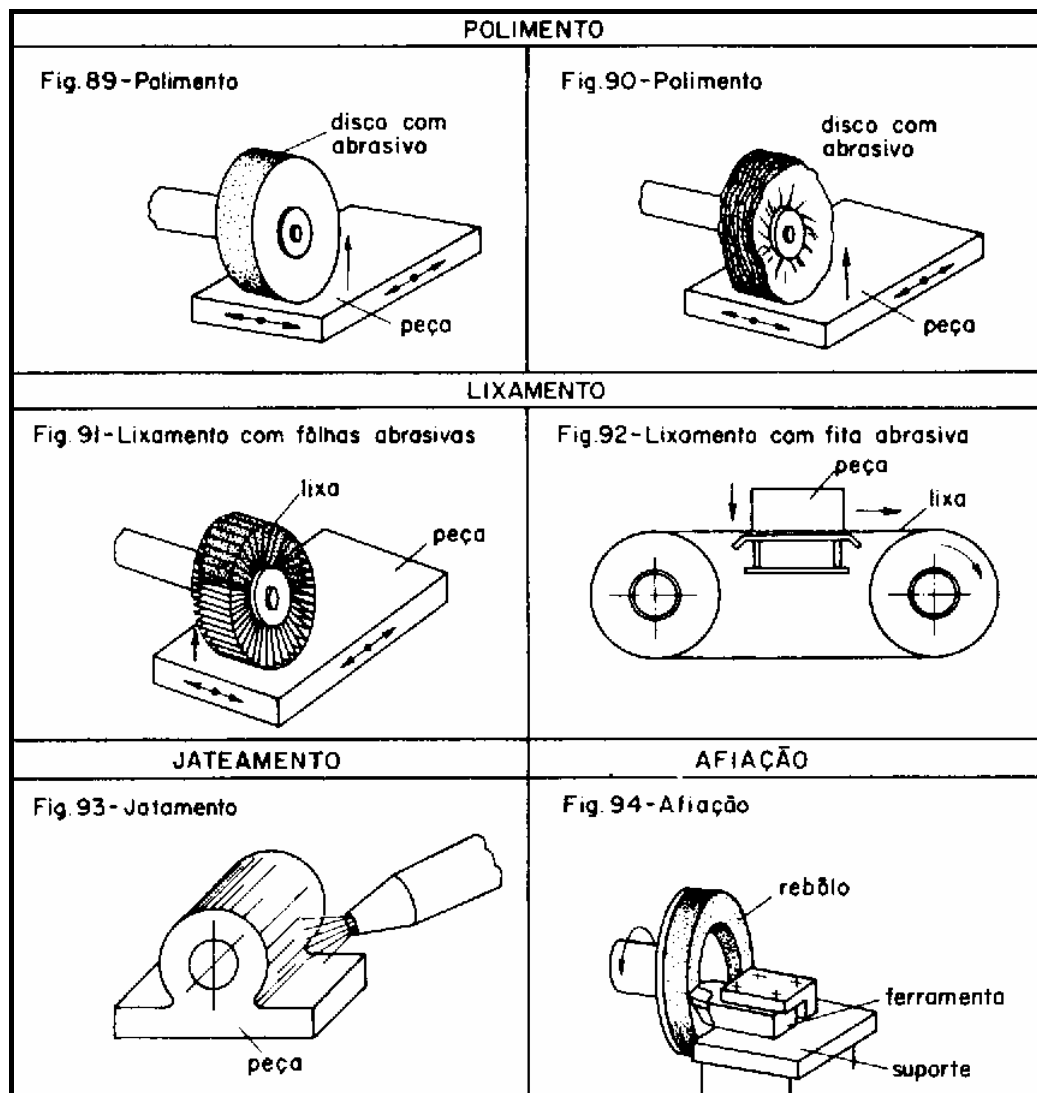
⁴ Segundo a Padronização Brasileira PB-26 da A. B. N. T., abrasivo é um produto natural ou sintético, granulado, usado de várias formas, com a finalidade de remover o material das superfícies das peças até o desejado.

maneiras: *formação* e *geração*.

A *formação* emprega uma ferramenta que transmite a forma do seu perfil à peça com os movimentos normais de corte a avanço.

A *geração* emprega uma ferramenta de perfil determinado, que com os movimentos normais de corte, associados aos característicos de geração, produz um perfil desejado na peça.

O estudo deste processo não é feito aqui, por fugir do nosso objetivo de fornecer os conhecimentos gerais dos processos de usinagem.



Capítulo 2 - FUNDAMENTOS DA USINAGEM COM FERRAMENTAS DE GEOMETRIA DEFINIDA

1. GENERALIDADES

Para o estudo racional dos ângulos das ferramentas de corte, das forças de corte e das condições de usinagem é imprescindível a fixação de conceitos básicos sobre os movimentos e as relações geométricas do processo de usinagem. Estes conceitos devem ser seguidos pelos técnicos e engenheiros que se dedicam à usinagem, à fabricação das ferramentas de corte e máquinas operatrizes. Desta forma, torna-se necessária a uniformização de tais conceitos, objeto das associações de normas técnicas. Cada país industrializado tem assim, as suas normas sobre ângulos das ferramentas, formas e dimensões das mesmas, etc. Na falta de norma brasileira sobre esse assunto, vamos seguir a norma DIN 6580, a qual é a mais completa e a que melhor se aplica aos diferentes processos de usinagem. Esta norma contém os fundamentos sobre uma sistemática uniforme de usinagem, constituindo a base para uma série de normas referentes ao corte dos metais. Aplica-se fundamentalmente a todos os processos de usinagem. Quando resultam limitações através de particularidades sobre certas ferramentas (por exemplo, ferramentas abrasivas), as mesmas são indicadas através de anotações. A numerosidade de conceitos, que servem somente para uma ferramenta ou um processo de corte, não é tratada nesta norma. Por outro lado, a validade universal do conceito para todos os processos de usinagem fornece a possibilidade de reduzir ao mínimo a quantidade de conceitos necessários à prática.

Os conceitos tratados nessa norma se referem a um ponto genérico da aresta cortante, dito *ponto de referência*. Nas ferramentas de barra este ponto é fixado na parte da aresta cortante próximo à ponta da ferramenta.

2. MOVIMENTOS ENTRE A PEÇA E A ARESTA CORTANTE

Os movimentos no processo de usinagem são movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante. *Estes movimentos são referidos à peça*, considerada como parada.

Deve-se distinguir duas espécies de movimentos: os que causam diretamente a saída de cavaco a aqueles que não tomam parte direta na formação do cavaco. Origina diretamente a saída de cavaco o *movimento efetivo de corte*, o qual na maioria das vezes é o resultante do *movimento de corte* e do *movimento de avanço*.

✦ **MOVIMENTO DE CORTE**

O movimento de corte é o movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única remoção de cavaco. durante uma volta ou um curso (Figura 2.1 e Figura 2.3).

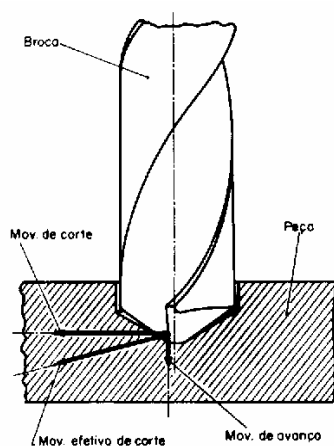


Figura 2.1 - Furação com broca helicoidal, mostrando os movimentos de corte e avanço.

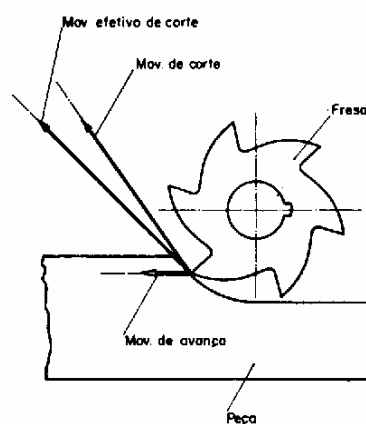


Figura 2.2 - Fresamento com fresa cilíndrica, mostrando os movimentos de corte e avanço.

✦ **MOVIMENTO DE AVANÇO**

O movimento de avanço é o movimento entre a peça e a ferramenta, que, juntamente com o movimento de corte, origina um levantamento repetido ou contínuo de cavaco, durante várias revoluções ou cursos (Figura 2.1, e Figura 2.3).

O movimento de avanço pode ser o resultante de vários movimentos componentes, como por exemplo o *movimento de avanço principal* e o *movimento de avanço lateral* (Figura 2.4).

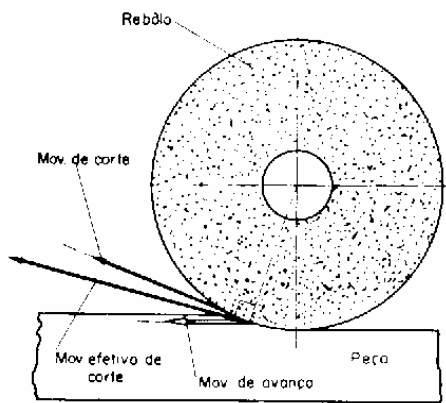


Figura 2.3 - Retificação plana tangencial mostrando os movimentos de corte e avanço.

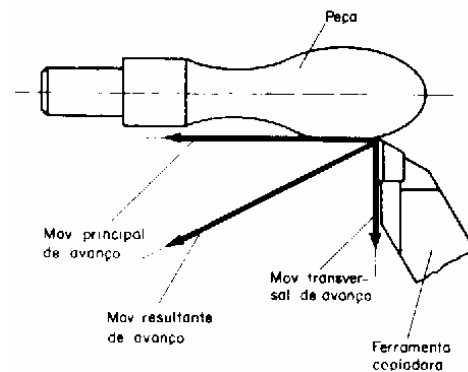


Figura 2.4 - Copiagem de uma peça mostrando as componentes do movimento de avanço: avanço principal e avanço lateral.

✦ MOVIMENTO EFETIVO DE CORTE

O movimento efetivo de corte é o resultante dos movimentos de corte e de avanço, realizados ao mesmo tempo.

Não tomam parte direta na formação do cavaco o *movimento de posicionamento*, o *movimento de profundidade* e o *movimento de ajuste*.

✦ MOVIMENTO DE POSICIONAMENTO

É o movimento entre a peça e a ferramenta, com o qual a ferramenta, antes da usinagem, é aproximada à peça. Exemplo: a broca é levada à posição em que deve ser feito o furo.

✦ MOVIMENTO DE PROFUNDIDADE

É o movimento entre a peça e a ferramenta, no qual a espessura da camada de material a ser retirada é determinada de antemão. Exemplo: fixação, no torno, da profundidade a_p (Figura 2.5) da ferramenta.

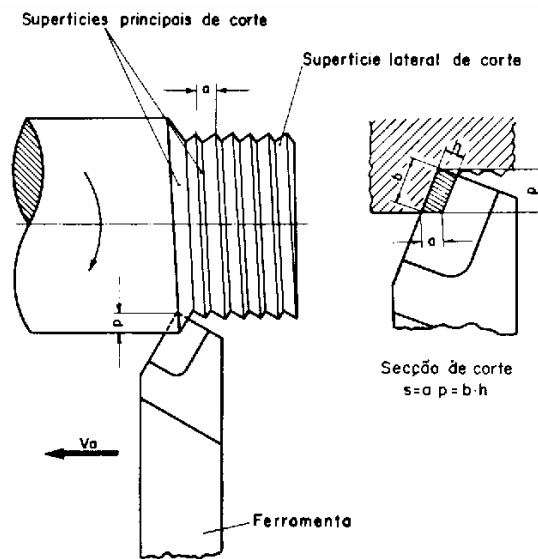


Figura 2.5 - Torneamento. Superfície principal e lateral de corte.

✦ MOVIMENTO DE AJUSTE

É o movimento de correção entre a peça e a ferramenta, no qual o desgaste da ferramenta deve ser compensado. Exemplo: movimento de ajuste para compensar o desgaste do rebolo na retificação.

3. DIREÇÕES DOS MOVIMENTOS

Deve-se distinguir a *direção de corte*, *direção de avanço* e *direção efetiva de corte*.

✦ DIREÇÃO DE CORTE

É a direção instantânea do movimento de corte.

✦ DIREÇÃO DE AVANÇO

É a direção instantânea do movimento de avanço.

✦ DIREÇÃO EFETIVA DE CORTE

É a direção instantânea do movimento efetivo de corte.

4. PERCURSO DA FERRAMENTA EM FRENTE DA PEÇA

Deve-se distinguir o *percurso de corte*, o *percurso de avanço* e o *percurso efetivo de corte*.

✦ PERCURSO DE CORTE

O percurso de corte l_c , é o espaço percorrido sobre a peça pelo *ponto de referência* da aresta cortante, segundo a *direção de corte* (Figura 2.6).

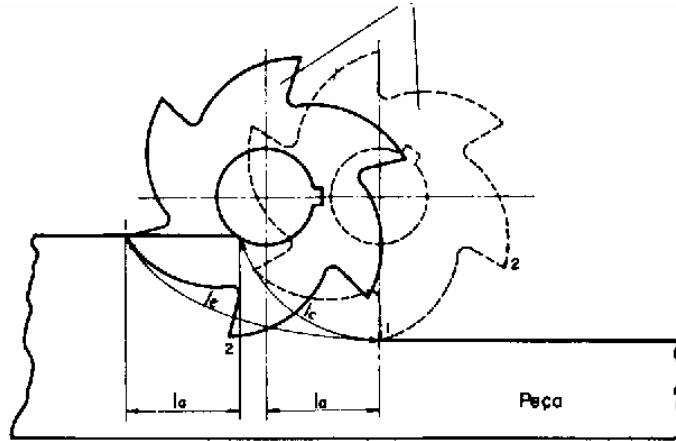


Figura 2.6 - Fresamento tangencial com fresa cilíndrica. Percurso de corte l_c , percurso efetivo de corte l_e ; percurso de avanço l_f (Os dentes 1 e 2 mostram o movimento da fresa).

✦ PERCURSO DE AVANÇO

O percurso de avanço l_f é o espaço percorrido pela *ferramenta*, segundo a *direção de avanço* (Figura 2.6). Deve-se distinguir as diferentes componentes do movimento de avanço (Figura 2.4).

✦ PERCURSO EFETIVO DE CORTE

O percurso efetivo de corte l_e é o espaço percorrido pelo *ponto de referência* da aresta cortante, segundo a *direção efetiva de corte* (Figura 2.6).

5. VELOCIDADES

Deve-se distinguir a *velocidade de corte*, a *velocidade de avanço* e a *velocidade efetiva de corte*.

✦ VELOCIDADE DE CORTE

A velocidade de corte v é a velocidade instantânea do *ponto de referência* da aresta cortante, segundo a direção a sentido de corte.

✦ **VELOCIDADE DO AVANÇO**

A velocidade de avanço v_f é a velocidade instantânea da *ferramenta* segundo a direção e sentido de avanço.

✦ **VELOCIDADE EFETIVA DE CORTE**

A velocidade efetiva de corte v_e é a velocidade instantânea do *ponto de referência* da aresta cortante, segundo a direção efetiva de corte. Pode-se ter ainda, conforme o item 2, as velocidades de *posicionamento*, de *profundidade* e de *ajuste*.

6. GRANDEZAS DE CORTE

As grandezas de corte são as grandezas que devem ser ajustadas na máquina direta ou indiretamente para a retirada do cavaco.

✦ **AVANÇO**

O avanço f é o percurso de *avanço* em cada volta (Figura 2.5) ou em cada curso (Figura 2.9).

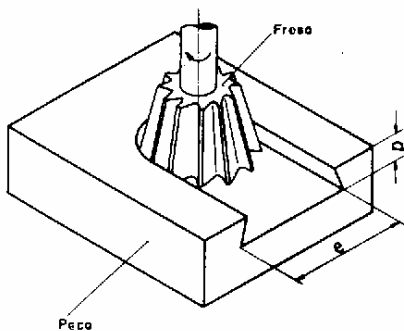


Figura 2.7 - Fresamento tangencial. Largura de corte a_p ; espessura de penetração e .

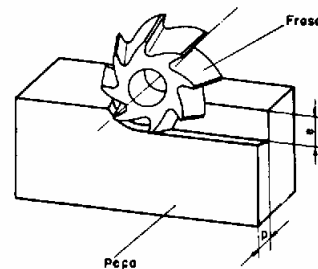


Figura 2.8 - Fresamento frontal. Profundidade de corte a_p ; espessura de penetração e .

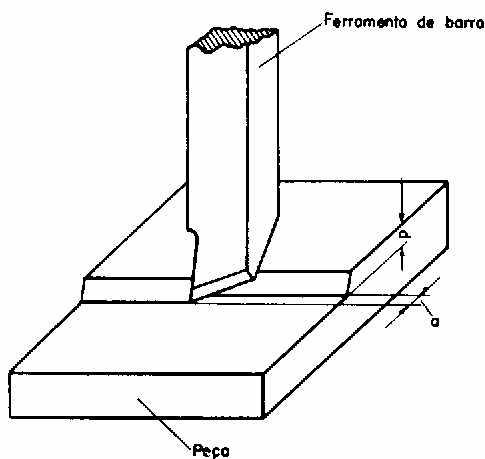


Figura 2.9 - Aplainamento. Profundidade de corte a_p ; avanço $f=f_c$.

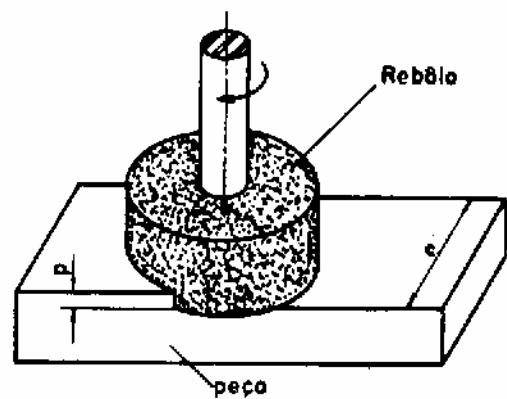


Figura 2.10 - Retificação frontal. Profundidade de corte a_p ; espessura de penetração e .

✦ PROFUNDIDADE OU LARGURA DE CORTE

É a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, *medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho* (Figura 2.5 e Figura 2.7 e 1.19).

No torneamento propriamente dito, faceamento, aplainamento, fresamento frontal e retificação frontal (ver tabela da Introdução), a_p corresponde à *profundidade de corte* (Figura 2.5. Figura 2.8, Figura 2.9 e Figura 2.10).

No sangramento, brochamento, fresamento tangencial (em particular fresamento cilíndrico) e retificação tangencial (ver tabela da Introdução), a_p corresponde à *largura de corte* (Figura 2.7, Figura 2.11e Figura 2.12).

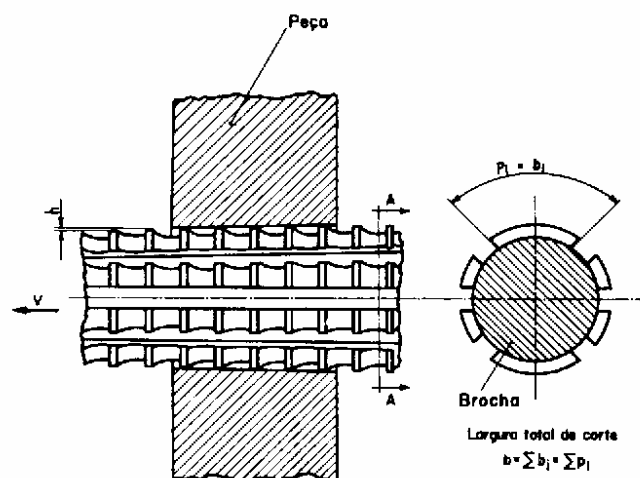


Figura 2.11 - Brochamento.

Na furação (sem pré-furação), a_p corresponde à metade do diâmetro da broca (Figura 2.13).

A grandeza a_p é sempre aquela que, multiplicada pelo avanço de corte f , origina a área da secção de corte s . Ela é medida num plano perpendicular ao plano de trabalho, enquanto que o avanço de corte f_c é medido sempre no plano de trabalho. Em alguns casos recebe a denominação de *profundidade de corte* (Figura 2.5, Figura 2.8, Figura 2.9 e Figura 2.10), enquanto que noutros casos recebe a denominação de *largura de corte* (Figura 2.7, Figura 2.11 e Figura 2.12); porém, é sempre representada pela letra a_p .

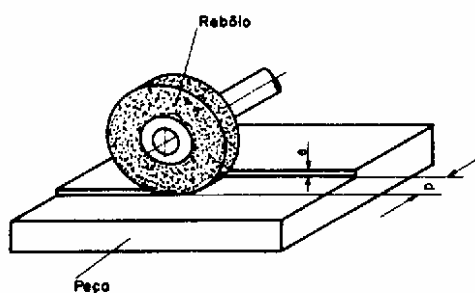


Figura 2.12 - Retificação plana tangencial. Largura de corte a_p ; espessura de penetração e .

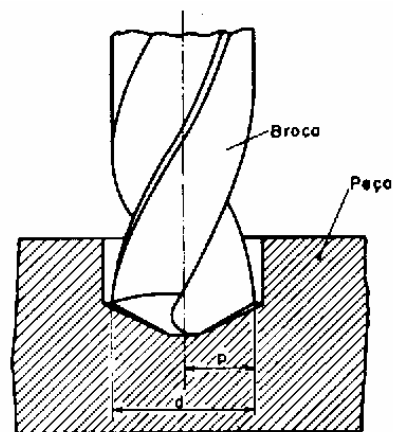


Figura 2.13 - Furação. Largura de corte $a_p = d/2$.

✦ ESPESSURA DE PENETRAÇÃO

A espessura de penetração e é de importância predominante no fresamento e na retificação (Figura 2.7, Figura 2.8, Figura 2.10 e Figura 2.12). É a espessura de corte em cada curso ou revolução, *medida no plano de trabalho a numa direção perpendicular à direção de avanço*.

7. GRANDEZAS RELATIVAS AO CAVACO

Estas grandezas são derivadas das grandezas de corte e são obtidas através de cálculo. Porém, não são idênticas às obtidas através da medição do cavaco, que no momento não nos interessam.

✦ COMPRIMENTO DE CORTE

O comprimento de corte b é o comprimento de cavaco a ser retirado, medido na

superfície de corte. segundo a direção normal à direção de corte .

É, portanto, medido na intersecção da superfície de corte com o plano normal à velocidade de corte, passando pelo ponto de referência da aresta cortante. Em ferramentas com aresta cortante retilínea a sem curvatura na ponta tem-se.

$$b = AP = \frac{a_p}{\sin \chi} \quad (2.1)$$

onde χ é o ângulo de posição da aresta principal de corte.

✦ **ESPESSURA DE CORTE**

A espessura de corte h é a espessura calculada⁵ do cavaco a ser retirado, medida normalmente à superfície de corte e segundo a direção perpendicular à direção de corte .

Em ferramentas com aresta cortante retilínea e sem curvatura da ponta, tem-se

$$h = f_e \cdot \sin \chi \quad (2.2)$$

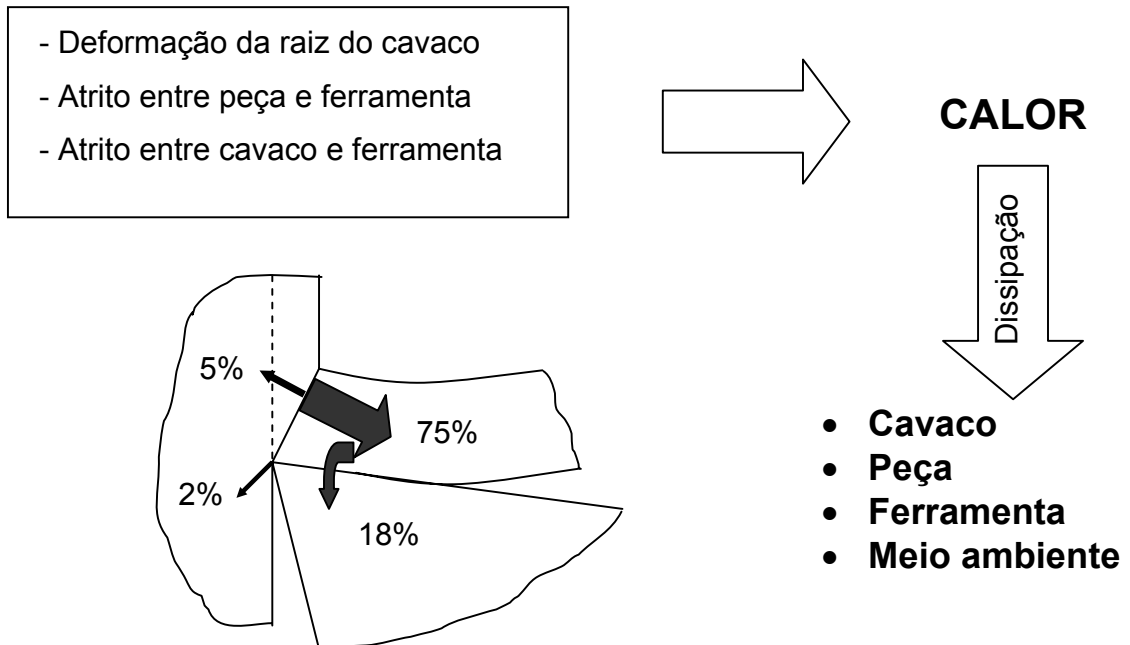
✦ **ÁREA DA SECÇÃO DE CORTE**

A área da secção de corte s (ou simplesmente secção de corte) é a área calculada⁶ da secção de cavaco a ser retirado, medida no plano normal à direção de corte.

⁵ A espessura calculada de cavaco não deve ser confundida com a espessura de cavaco h' obtida pela medição (com instrumento de medida: micrômetro, paquímetro, etc.). A primeira é obtida por cálculo trigonométrico, conforme a fórmula (2.2).

⁶ A área calculada da secção de cavaco não deve ser confundida com a área da secção de cavaco a qual é obtida pela medição do cavaco através de instrumentos de medida.

Capítulo 3 - TEMPERATURA DE CORTE



Os valores das proporções variam com:

- o tipo de usinagem: torneamento, fresamento, brochamento, etc.;
- o material da ferramenta e da peça;
- a forma da ferramenta;
- as condições de usinagem.

Exemplo: quantidade de calor gerada na deformação plástica para aços de construção:

$v_c = 50\text{m/min} \longrightarrow 75\%$ do total do calor gerado

$v_c = 200\text{m/min} \longrightarrow 25\%$ do total do calor gerado

logo, nos regimes de corte altos, o atrito é a fonte básica de calor.

A temperatura da ferramenta se elevará de acordo com o calor específico e a condutibilidade térmica dos corpos em contato, além das dimensões das seções onde se escoa o calor.

A temperatura é o principal fator limitante da utilização das ferramentas de corte em regimes de trabalho elevados, fixando, portanto as condições máximas de produtividade e

duração das ferramentas.

Como as deformações e forças de atrito se distribuem irregularmente, o calor produzido também se distribui de forma irregular.

A quantidade de calor devida ao atrito do cavaco com a superfície de saída e *que vai à ferramenta*, é relativamente pequena. Porém, como esta superfície de contato é reduzida, desenvolvem-se ali temperaturas significantes.

A quantidade de calor gerada aumenta com a velocidade e com a força de corte. Conseqüentemente, a temperatura cresce com o aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade.

Este aumento de temperatura é acelerado com o desgaste da ferramenta, o qual aumenta o valor do coeficiente de atrito e conseqüentemente a força de corte.

Para aumentar a produtividade da ferramenta deve-se aumentar a velocidade, o avanço e a profundidade de corte. Todos estes fatores aumentam a temperatura. Portanto deve-se procurar diminuir esta temperatura além de empregar materiais de corte resistentes a altas temperaturas e ao desgaste.

O meio mais barato para a diminuição da temperatura de corte é o emprego de fluidos de corte.

Capítulo 4 - FORÇA DE USINAGEM

O conhecimento da força de usinagem F ou de suas componentes: força de corte F_c , força de avanço F_f e da força passiva F_p , é a base:

















- Para o projeto de uma máquina ferramenta (dimensionamento das estruturas, acionamentos, fixações, etc.);
- Para a determinação das condições de corte em condições de trabalho;
- Para a avaliação da precisão de uma máquina ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça);
- Para a explicação de mecanismos de desgaste.

A força de usinagem é também um critério para a determinação da usinabilidade de um material de peça.

Os componentes da força de usinagem (F_c , F_f e F_p) diminuem com o aumento da velocidade de corte v_c devido à diminuição da resistência do material com o aumento da temperatura.

Os componentes da força de usinagem aumentam com o aumento da profundidade de corte a_p de uma forma proporcional (só vale para a_p maior que o raio de quina).

Influência do ângulo de saída γ e do ângulo de inclinação λ lateral sobre os componentes da força de usinagem:

Influência sobre a força de usinagem por grau			
	F_c	F_f	F_p
 Âng. de saída γ	1,5% 	5,0% 	4,0% 
 Âng. de inclinação lateral λ	1,5% 	1,5% 	10,0% 
 Âng. de saída γ	1,5% 	5,0% 	4,0% 
 Âng. de inclinação lateral λ	1,5% 	1,5% 	10,0% 

Uma variação do ângulo de incidência na faixa de $3^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ não tem influência considerável sobre as componentes da força de usinagem.

Uma variação do raio de quina não influencia a força de usinagem, desde que a condição $2r \leq a_p$ seja satisfeita.

A força de usinagem aumenta linearmente com o aumento do teor de carbono da peça e da ferramenta.

Pode-se ter variações consideráveis pela variação dos teores de elementos de liga que atuam sobre a diminuição da força de corte, como por exemplo pelo enxofre.

O tipo de material da ferramenta, atua principalmente no coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e em decorrência disso, principalmente sobre a força passiva e a força de avanço.

Com o aumento da condutividade térmica do material da ferramenta, em regra geral, verifica-se o aumento da força de corte.

O desgaste de cratera sobre a face da ferramenta que leva à formação de um ângulo de saída mais positivo, em regra, leva à diminuição das componentes da força de usinagem.

O desgaste do flanco da ferramenta aumenta as componentes da força de usinagem devido ao aumento da superfície de atrito entre peça e superfície de incidência.

Capítulo 5 - POTÊNCIA DE USINAGEM

A força principal de corte F_c é a base para o cálculo da potência de usinagem. No caso do torneamento, pode-se estabelecer a seguinte relação entre a força de corte e a área da seção de usinagem:

$$F_c = k_c \cdot A = k_c \cdot a_p \cdot f \quad [N]$$

em que k_c é a pressão específica de corte em $[N/mm^2]$.

O valor de k_c é equivalente à energia de corte por unidade de volume e_c , ou seja, a energia necessária para remover uma unidade de volume da peça. Equivale ainda a potência de corte para remover a unidade de volume da peça por unidade de tempo, p_c .

$$k_c [N/mm^2] = e_c [J/cm^3] = p_c [W.s/cm^3]$$

Os valores de k_c para alguns materiais segundo a norma alemã AWF-158 são dados na tabela abaixo:

Valores orientativos das pressões específicas de corte (AWF – 158)

MATERIAIS	σ_T [N/mm ²] (ou dureza)	kc [N/mm ²]			
		Avanço em [mm/rot]			
		0,1	0,2	0,4	0,8
ST3411, St3711, St4211 (ABNT 1015 a 1025)	até 500	3600	2600	1900	1360
ST5011 (ABNT 1030 a 1035)	500 a 600	4000	2900	2100	1520
STR6011 (ABNT 1040 a 1045)	600 a 700	4200	3000	2200	1560
ST7011 (ABNT 1060)	700 a 850	4400	3150	2300	1640
ST 85 (ABNT 1095)	850 a 1000	4600	3300	2400	1720
Aço fundido	300 a 350	3200	2300	1700	1240
	500 a 700	3600	2600	1900	1360
	> 700	3900	2850	2050	1500
Aço Mn, aços Cr-Ni, aços Cr-Mo e outros aços ligados	700 a 850	4700	3400	2450	1760
	850 a 1000	5000	3600	2600	1850

	1000 a 1400	5300	3800	2750	2000
	1400 a 1800	5700	4100	3000	2150
Aço inoxidável	600 a 700	5200	3750	2700	1920
Aço ferramenta	1500 a 1800	5700	4100	3000	2150
Aço manganês-duro	-	6600	4800	2500	2520
Ferro fundido GG12, GG14	HB até 200	1900	1360	1000	720
Ferro fundido GG18, GG26	HB 200 A 250	2900	2080	1500	1080
Ferro fundido ligado	HB 250 A 400	3200	2300	1700	1200
Ferro fundido maleável		2400	1750	1250	920
Ferro fundido duro	Shore 65/90	3600	2600	1900	1360
Cobre		2100	1520	1100	800
Cobre com mica (coletores)		1900	1360	1000	720
Latão	HB 80/120	1600	1150	850	600
Bronze vermelho (10Sn, 4Zn, 86Cu)		1400	1000	700	520
Bronze de fundição		3400	2450	1800	1280
Ligas de zinco		940	700	560	430
Alumínio puro		1050	760	550	400
Ligas de Al, c/ alto teor de Si (11-13%)		1400	1000	700	520
Ligas p/ Al-Si (11-13,5% Si) (tenaz)		1400	1000	700	520
Pistão G Al-Si (11-13,5% Si)		1250	900	650	480
Outras ligas de alumínio para fundição e trabalho a frio	até 300	1150	840	600	430
	300 a 420	1400	1000	700	520
	420 a 580	1700	1220	850	640
Ligas de magnésio		580	420	300	220
Borracha dura, ebonite		480	350	250	180
Baquelite, Pertinax, Novotext (massas isolantes prensadas, isentas de borracha)		480	350	250	180
37.Papel duro		380	280	200	140

A **potência de corte P_c** é a potência disponível no gume da ferramenta e consumida na operação de remoção de cavacos. É ela que interessa no cálculo de forças e pressões específicas de corte.

A **potência de acionamento P_a** é a potência fornecida pelo motor à máquina-ferramenta. Ela difere da potência de corte pelas perdas que ocorrem por atrito nos mancais, engrenagens, sistemas de lubrificação e refrigeração, sistema de avanço, etc.

A potência de avanço, embora seja uma parcela utilizada na operação de corte, é muito

pequena em relação à potência de corte, sendo mais prático reuni-la no grupo das “perdas”.

A **potência em vazio P_o** é a potência consumida pela máquina-ferramenta ligada, com o mecanismo de avanço funcionando, porém sem que tenha lugar qualquer operação de corte.

O rendimento da máquina é dado por:

$$\eta = \frac{P_c}{P_a} \cdot 100 = \frac{P_a - P_o}{P_a} \cdot 100$$

Valores usuais estão entre 60% e 80%.

A potência de corte pode ser calculada pela equação:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60000} = \frac{k_c \cdot A \cdot v_c}{60000} = \frac{k_c \cdot a_p \cdot f \cdot v_c}{60000} \quad [kW]$$

onde,

P_c = potência de corte necessária no gume da ferramenta [kW].

F_c = força de corte [N].

k_c = pressão específica de corte [N/mm^2].

A = seção de corte [mm^3].

$A \cdot v_c$ = volume de cavacos produzidos na unidade de tempo [mm^3/min]

a_p = profundidade de corte [mm].

f = avanço [mm/rot].

v_c = velocidade de corte [m/min].

As dimensões de corte são o fator de influência preponderante na força e na potência necessária para a usinagem. De um modo geral verifica-se que a pressão específica de corte k_c diminui com as dimensões do cavaco, sendo esta diminuição mais notada para um aumento do avanço do que para um aumento da profundidade de corte.

Com base nas afirmações anteriores, pesquisadores determinaram fatores de correção para k_c , sendo que o que mais se aproxima da realidade é Kienzle, propondo a seguinte fórmula:

$$k_c = k_{c1.1} \cdot h^{-mc}$$

ou seja,

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc}$$

$k_{c1.1}$ = pressão específica de corte para um cavaco de $A = b \cdot h = 1 \times 1 \text{ mm}^2$.

$$h = f \cdot \sin \kappa \quad [mm] = \text{espessura do cavaco}$$

$$b = a_p \div \sin \kappa \quad [mm] = \text{largura de corte}$$

A fórmula de Kienzle se mostrou válida no cálculo da força de corte nos diversos processos de usinagem com espessura h constante do cavaco (tornear, plainar, furar, brochar) como também em processos com espessura variável (fresagem, serramento, denteamento de engrenagens), utilizando um valor médio h_m .

A tabela abaixo fornece, a título de exemplo, valores de $1-mc$ e $k_{c1.1}$ para alguns materiais.

Material DIN	ABNT equivalente	σ_r [N/mm ²]	$k_{c1.1}$ [N/mm ²]	$1-mc$
St 50	1030/1045	520	1990	0,74
St 60	1040/1045	620	2110	0,83
C 22	1020	500	1800	0,83
Ck 45	1045	670	2220	0,86
Ck 60	1060	770	2130	0,82
65 Si 7	9260	960	1270	0,73
100 Cr 6	52100	640	1600	0,71
100 Cr 6 recozido	52100	710	2400	0,79
GG L 14	F ^o F ^o cinzento com		950	0,79
GG L 18	grafite lamelar	124	750	0,87
GG 26	F ^o F ^o cinzento	HB 200	1160	0,74
GTW, GTS	Maleável branco/preto	> 400	1200	0,79
GS 45	Aço fundido	300...400	1600	0,83
GS 52	Aço fundido	500...700	1800	0,84

Capítulo 6 - MATERIAIS USADOS PARA FERRAMENTAS

8. Exigências básicas para um material de corte:

Elevada dureza a quente;

Elevada dureza a frio bem superior à da peça usinada;

Tenacidade para resistir aos esforços de corte e impactos;

Resistência à abrasão;

Estabilidade química;

Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Nenhum material dispõe de todas essas características. Deve-se, portanto verificar quais as primordiais e as secundárias.

9. Classificação dos materiais de corte:

1. Aços ferramenta
2. Aços rápidos comuns
3. Aços rápidos ao cobalto
4. Ligas fundidas
5. Carbonetos sinterizados
6. Cerâmicas de corte
7. Diamantes
8. Nitreto de boro cristalino cúbico (CBN)

✦ AÇOS FERRAMENTA

0,8% a 1,5 de C e mínima porcentagem de outros elementos de liga

Até 1900 eram os únicos materiais disponíveis para ferramentas

Obtém dureza por tratamento térmico

Baixa resistência a quente ($\sim 200^{\circ}\text{C}$) – baixas velocidades de corte ($\sim 25\text{m/min}$) – impróprios para usinar aços de alta resistência.

Aplicações secundárias, tais como: limas, cinzéis, serras para madeira, ferramentas domésticas, ferramentas de forma para usinagem de latão e ligas de alumínio, ferramentas para serem utilizadas uma única vez ou para poucas peças.

Para melhorar a sua qualidade adiciona-se à sua composição pequenas quantidades de Cr, V e W.

Principais vantagens:

Baixo custo

Facilidade de usinagem (gumes muito vivos)

Fácil tratamento térmico

Quando bem temperado, elevada dureza e resistência ao desgaste

Boa tenacidade.

✦ **AÇOS RÁPIDOS**

• **Aços rápidos comuns**

Criados em 1900, por F.W. Taylor

Originalmente usavam W, Cr e V como elementos de liga além de teores mínimos de Mn para evitar a fragilidade

No decorrer dos anos foram adicionados outros elementos de liga

Durante a Segunda Guerra Mundial a escassez de tungstênio (W) levou a sua substituição parcial ou total por Mo.

Aços ao Mo são mais baratos que os ao W.

Mantém a dureza até temperaturas em torno de 600° C.

Maior resistência à abrasão associada à resistência a quente permitem a utilização de velocidades de corte maiores que os aços ferramenta.

Desvantagens: preço elevado e difícil tratamento térmico.

• **Aços rápidos com cobalto**

Surgiram em 1921

O cobalto aumenta a dureza a quente e a resistência ao desgaste, mas diminui a tenacidade

Teor de Co varia de 5 a 12%

• **Aço rápido com revestimento de TiN**

Revestimento de TiN (1 a 3 µm de espessura) aplicado por processos PVD (Physical Vapor Deposition) abaixo de 550° C conferem aparência dourada

Redução do desgaste da face e do flanco, pelo aumento da dureza

Diminuição do coeficiente de atrito reduzindo F_c e melhorando o acabamento superficial

TiN protege o metal base contra temperatura

Sucesso da ferramenta depende mais da adesão do revestimento do que da sua espessura

Lascamento do revestimento tem sido a principal causa de falha

Bons resultados em usinagem com corte interrompido (fresamento, plainamento, etc.)

- **Aço rápido sinterizado**

Obtidos por processos de metalurgia do pó (sinterização).

Estrutura cristalina muito fina e uniforme

Menor deformação na têmpera e no revenido

Menos tendência a trincas e tensões internas

Tenacidade um pouco mais alta

Vida mais longa

Melhor aderência de revestimentos de TiN

Ligas fundidas

Descobertas por Haynes em 1922

Altas porcentagens de W, Cr e Co

As ligas são fundidas e vazadas em moldes, sendo as peças depois limpas de carepas de fundição e retificadas até a medida final.

Nomes comerciais: Stellite, Tantung, Rexalloy, Chromalloy, Steltan (Brasil).

Composição típica:

W = 17%, Cr = 33%, Co = 44%, Fe = 3%

Elevada resistência a quente permite utilização em temperaturas em torno de 800° C.

Qualidades intermediárias entre o aço rápido e o metal duro.

- ♦ **METAL DURO**

Tungstênio (W)

metal de mais alto ponto de fusão (3387° C)

maior resistência à tração (4200 N/mm²)

mais baixo coeficiente de dilatação térmica

A dificuldade de fusão do W levou ao desenvolvimento da metalurgia do pó.

A Osram (fabricante de lâmpadas alemã) cedeu seus estudos sobre o desenvolvimento de filamentos de W para lâmpadas a Krupp, que os usou como base para pesquisas de aplicação do

carboneto de tungstênio para a usinagem de metais.

Em 1927 a Krupp lançou o produto Widia (“Wie diamant” – como diamante). Composição típica: 81% de W, 6% de C e 13% de Co.

- **Técnica de fabricação do metal duro**

O minério Scheelita ou tungstato de cálcio (CaWO_4) é reduzido a trióxido de tungstênio (WO_3).

Redução do trióxido de tungstênio (WO_3) pelo hidrogênio (H_2) dá origem ao tungstênio (W) puro em partículas.

O W é misturado a carbono puro (negro de fumo) e a mistura é levada a um forno onde se obtém carboneto de tungstênio.

O carboneto é moído e misturado em um moinho de bolas com pó muito fino e puro de cobalto (Co).

A mistura é comprimida ($\sim 400\text{Mpa}$) a frio em matrizes obtendo-se pastilhas no formato desejado.

As pastilhas são levadas a um forno de sinterização que trabalha sob vácuo ou em atmosfera de hidrogênio (1350 a 1600°C). O material sofre uma contração de 15 a 22%.

Elevada resistência à compressão (3500 N/mm^2), dureza de 9,7 Mohs, mantendo elevada dureza até $\sim 1000^\circ\text{C}$.

Empregadas com sucesso na usinagem do ferro fundido e de materiais não ferrosos.

Não se prestam para usinagem de aço devido ao forte atrito entre ferramenta e cavaco. O cavaco escorrega com grande pressão e sob elevada resistência, com forte geração de calor, formando-se rapidamente uma cratera sobre a face da ferramenta e lavando o gume ao esfacelamento.

- **Componentes dos metais duros e suas propriedades**

Adição de carboneto de titânio e de tântalo ao metal duro reduz grandemente o atrito. Estes carbonetos apresentam dureza maior que o de tungstênio.

Atualmente são usados como componentes dos metais duros:

WC – Co:

O carboneto de tungstênio é solúvel no cobalto, e em decorrência disso temos uma alta correspondência entre a resistência de ligação interna com boa resistência de gume.

Por outro lado, o carboneto de tungstênio tem limitações de velocidade de corte devido a sua alta afinidade de difusão em temperaturas mais elevadas.

TiC:

Pouca tendência à difusão —> maior resistência a quente
 menor resistência de ligação interna —> menor resistência do gume
 metais duros com altos teores de TiC são frágeis e de fácil fissura
 usados para usinagem de materiais ferrosos em altas velocidades

TaC:

Pequenas quantidades diminuem o tamanho dos grãos aumentando a tenacidade e a resistência do gume

NbC:

Efeito semelhante ao TaC

Tabela 1 - Efeito de alguns elementos sobre o metal duro.

Elemento	Quantidade relativa	Efeito sobre			
		Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Resistência à formação de cratera	Resistência mecânica
Co	Pequena	Aumenta muito	Aumenta	Aumenta ligeiramente	Diminui muito
	Grande	Diminui muito	Diminui	Diminui ligeiramente	Aumenta muito
WC	Pequena	Diminui muito	Diminui	Diminui ligeiramente	Aumenta muito
	Grande	Aumenta muito	Aumenta	Aumenta ligeiramente	Diminui muito
TaC e NbC	Pequena	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente
	Grande	Diminui ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta grandemente	Diminui ligeiramente
TiC	Pequena	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Diminui ligeiramente
	Grande	Aumenta grandemente	Aumenta grandemente	Aumenta moderadamente	Diminui grandemente
Grão fino	Pequena	Aumenta ligeiramente	Pequeno efeito	Aumenta ligeiramente	Diminui grandemente
	Grande	Aumenta grandemente	Pequeno efeito	Aumenta consideravelmente	Diminui grandemente
Grão grosseiro	Pequena	Diminui ligeiramente	Pequeno efeito	Diminui ligeiramente	Aumenta ligeiramente
	Grande	Diminui grandemente	Pequeno efeito	Diminui consideravelmente	Aumenta grandemente

Subdivisão dos metais duros

Metais duros convencionais (ISO – 153-1975)

Grupo P

Simbolizado pela cor azul

Usinagem de aço, aço fundido, F^oF^o maleável, nodular, ou ligado, ou seja, materiais de cavaco comprido.

Alta resistência a quente, pequeno desgaste abrasivo

Além de WC tem percentagens mais ou menos elevadas de TiC (até 35%) e de TaC (até 7%)

Grupo M

Simbolizado pela cor amarela

Usinagem de aço, aço fundido, aço ao Mn, F^oF^o ligado, aços inoxidáveis austeníticos, F^oF^o maleável e nodular e aços de corte livre uso universal em condições satisfatórias

Intermediário entre os grupos P e K

Resistência a quente relativamente boa e boa resistência a abrasão

Grupo K

Simbolizado pela cor vermelha

Usinagem de F^oF^o comum e coquilhado, F^oF^o maleável de cavaco curto, aços temperados, não ferrosos, não metálicos, pedra e madeira, ou seja, materiais de cavaco curto.

Menor resistência a quente e alta resistência ao desgaste

Constituídos quase que totalmente de WC-Co

Os metais mais duros são usados para usinagens de acabamento (altas v_c e baixas a_p).
Em geral ângulo de saída negativo.

Os menos duros e mais tenazes (alto Co) são usados em cortes pesados de desbaste, baixas v_c , cortes interrompidos, vibrações, máquinas velhas, etc.

- **Metais duros de múltiplas faixas de aplicação**

Matéria-prima de maior pureza e maior controle da sinterização

Pastilhas de elevada resistência à flexão com mínima perda de dureza devido a:

Granulometria mais fina e uniforme

Distribuição mais perfeita dos carbonetos

Melhor solubilidade dos carbonetos no metal de ligação

Pastilhas cobrem mais faixas de aplicação reduzindo os tipos necessários

Existem inclusive estudos para eliminar o grupo M.

- **Metais duros com uma camada de revestimento**

Desenvolvidos com o objetivo de explorar melhor as vantagens isoladas de alguns materiais de elevada dureza e estabilidade química.

Compostos por uma base de metal duro tenaz sobre a qual se aplica uma ou mais camadas finas, duras, resistentes à abrasão e de fina granulometria de um material composto de carbonetos (TiC, HfC, ZrC, etc.), nitretos (TiN, HfN, ZrN, etc.), carbonitretos (TiCN) ou de óxidos (p. ex. Al_2O_3).

Os revestimentos aumentam varias vezes a vida de ferramenta

Aplicações típicas em torneamento e fresamento

Processo mais utilizado é a deposição de um vapor químico (CVD - Chemical Vapor Deposition).

Para a geração de uma camada de TiC, vaporiza-se uma mistura de tetra-cloreto de titânio ($TiCl_4$) e metano (CH_4). A mistura gasosa é levada para uma campânula , na qual estão colocados milhares de pastilhas de metal duro, numa atmosfera protetora de hidrogênio (para evitar a formação de óxidos, que reduzem a aderência entre o revestimento e o metal duro). Numa temperatura de 900 a 1100°C e uma pressão levemente inferior à atmosférica, produz-se uma reação química, na qual é formado TiC. O vapor condensa sobre as pastilhas, produzindo uma camada de revestimento que cresce muito lentamente.

Revestimento com uma camada de carboneto de titânio : TiC

O TiC tem menor coeficiente de atrito que os metais duros convencionais de WC e TiC – Co.

A redução do atrito e o baixo coeficiente de condutibilidade térmica do revestimento, produzem temperaturas mais baixas no gume diminuindo a difusão entre ferramenta e peça. Isto reduz o desgaste por abrasão e difusão.

O TiC é mais duro que o TiN, o que o torna mais resistente ao desgaste por abrasão.

Menores forças de usinagem devido ao menor atrito e menor aderência.

O coeficiente de dilatação térmica menor o torna vantajoso em operações com variações de temperatura, como o fresamento.

A espessura das camadas vai de 4 a 8 μm .

Revestimento com uma camada de nitreto de titânio : TiN

O TiN é quimicamente mais estável que o TiC, ou seja, tem menor tendência à difusão com aços.

Isto reduz o desgaste por formação de crateras na superfície de saída.

O desgaste do flanco é maior que no TiC.

A aderência sobre o material de base não é muito boa.

A espessura da camada vai de 5 a 7 μm e tem a cor dourada.

Revestimento com uma camada de óxido de alumínio : $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

Elevada dureza a quente.

Resistência à oxidação a altas temperaturas e ataques químicos.

Isto proporciona uma elevada resistência ao desgaste de cratera.

O mais frágil de todos os materiais duros (pequena resistência a choques e a oscilações de temperatura).

Pouca aderência sobre bases de metal duro.

- **Metais duros com múltiplas camadas de revestimento**

Menor tendência ao lascamento do revestimento que os de camada única.

Revestimentos de carbonitreto de titânio : TiC-Ti (C,N)-TiN

Combina a resistência ao desgaste do flanco do TiC com a resistência ao desgaste de cratera e desgaste por oxidação do TiN.

Sobre o material de base aplica-se uma camada de TiC puro, que assegura uma boa aderência.

Aplica-se em seguida uma camada de TiN, gerando-se uma passagem progressiva do TiC

para o TiN.

Como o TiN é menos frágil e apresenta menores coeficientes de atrito que o TiC, ocorrem menores forças de usinagem e há condições de utilização em cortes interrompidos, como o fresamento.

Aplica-se para usinagem de aço, aço fundido, F^oF^o cinzento, F^oF^o maleável e semelhantes, materiais duros com alta velocidade de corte.

Não são adequados para a usinagem de materiais que tenham afinidade com o TiC ou o TiN, como ligas de alumínio, magnésio e titânio, materiais com altas ligas de níquel, aços de nitretação e alguns aços resistentes à corrosão e aos ácidos.

Revestimentos de TiC-Al₂O₃

Como a aderência do óxido de alumínio ao metal base, usa-se aqui uma camada intermediária de TiC.

Usinagem de aço fundido e F^oF^o.

Vida de ferramenta 6 vezes maior que o metal duro não revestido na usinagem de F^oF^o e 3 vezes maior para o aço.

Usinagem de peças forjadas e fundidas com vida da ferramenta 120 a 140% maior.

✦ **CERÂMICAS DE CORTE**

Muito importantes nos últimos anos na usinagem em alta velocidade de aço e F^oF^o.

A velocidade de corte pode ser de 4 a 5 vezes maior que as ferramentas de metal duro (menor tempo de usinagem).

A possibilidade de usar pequenos avanços (da ordem de 0,1 mm/rot) e altas velocidades de corte (da ordem de 1000 m/min) permite excelente acabamento (semelhante à retificação).

Durante muitos anos não obtiveram sucesso comercial por exigirem máquinas-ferramenta de alta velocidade de corte, grande potência e extrema rigidez.

A alta velocidade de corte implica num fluxo intenso de cavacos tornando necessária sua eficiente remoção e proteção do operador.

- **Classificação dos materiais cerâmicos de corte**

As cerâmicas de corte são classificadas segundo o seu teor de óxidos de alumínio em cerâmica óxida e cerâmica mista.

Cerâmica óxida

Materiais com óxido de alumínio superior a 90% o que dá a cor branca.

Componente principal é o coríndon (Al_2O_3), o qual é uma forma estável α da alumina.

Material de partida é um pó finíssimo (1 a 10 μm).

Peças obtidas pela prensagem a frio da matéria-prima que pode ser Al_2O_3 com 99,98% de pureza, ou então, uma composição de 90 a 99% de coríndon e o restante de óxido de silício, de Mn, de Cr ou de Ni ou, ainda, outros componentes.

Hoje se adiciona ZrO_2 na cerâmica pura para obter maior tenacidade.

O material prensado ainda apresenta-se muito poroso, sendo sinterizado a $\sim 1700^\circ\text{C}$.

Durante a sinterização o material contrai diminuindo a porosidade.

A qualidade de uma ferramenta de cerâmica depende de sua pequena porosidade associada a pequenos tamanhos de grãos. Isto exige controle rigoroso da sinterização.

- **Vantagens das ferramentas de cerâmica**

Alta dureza a quente (maior que as cerâmicas mistas), que se mantém até $\sim 1600^\circ\text{C}$, permitindo altas velocidades de corte (5 a 10 vezes maiores que as do metal duro comum).

Elevada estabilidade química do óxido de alumínio, que se mantém até aproximadamente o seu ponto de fusão (2050°C). Não há pois fenômenos de oxidação ou difusão como no metal duro.

Como a cerâmica é isolante térmico, não há risco de desgaste eletro-químico.

Alta resistência à compressão.

Baixo coeficiente de atrito.

Nenhuma afinidade química com o aço, não se formando gume postiço.

Excelente acabamento superficial.

Menor desgaste assegura melhor precisão dimensional.

- **Problemas na aplicação de ferramentas de cerâmica**

Grande fragilidade, o que a torna deficiente na usinagem interrompida, no emprego em máquinas pouco rígidas, grandes balanços das ferramentas, vibrações.

Condutibilidade térmica muito baixa, o que a torna sensível a variações bruscas de temperatura. Por isso, não se recomenda o uso de fluidos refrigerantes.

Quase todos os materiais podem ser usinados com cerâmica. As poucas exceções são:

Alumínio, que reage quimicamente com Al_2O_3 .

Ligas de titânio, com alto teor de Ni e materiais resistentes ao calor, pela tendência a reações químicas.

Magnésio, berílio e zircônio, que são inflamáveis na temperatura de trabalho da cerâmica

Cerâmicas mistas

Teor de Al_2O_3 menor que 90%, com adição de óxidos e carbonetos metálicos, especialmente O TiC e o WC.

Também denominados CERMETS (cerâmica+metal).

Obtidas por prensagem a quente, o que produz uma estrutura mais fechada.

Geralmente de cor preta.

A presença de carbonetos de titânio e outros óxidos inibe o crescimento dos grãos. Isto dá elevada dureza, maior tenacidade e resistência a impactos, ao desgaste do gume e à formação de crateras.

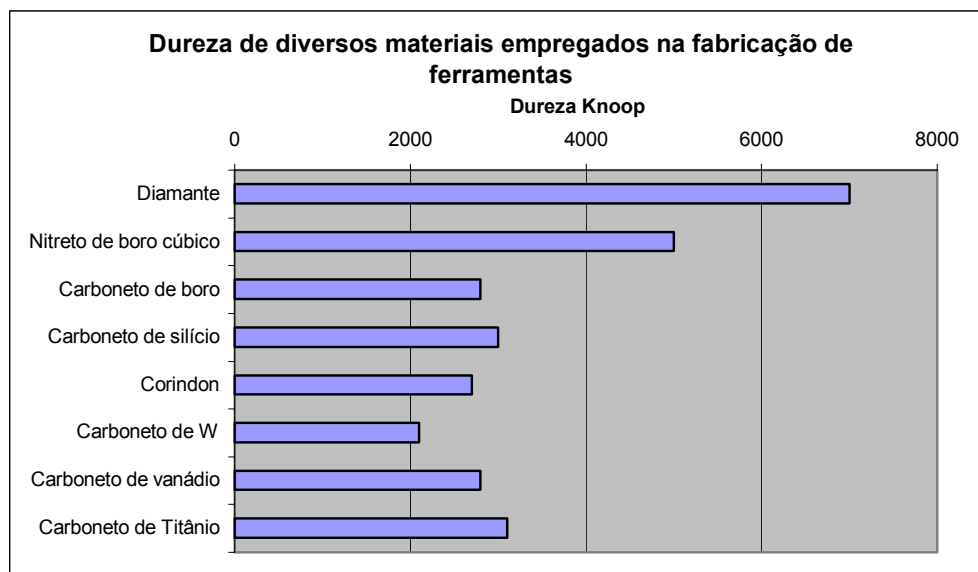
São condutores elétricos, tem razoável condutibilidade térmica e são menos frágeis.

São menos sujeitas as trincas térmicas do que as cerâmicas oxidadas.

Empregada para desbaste e acabamento de ferro fundido duro, ferro fundido maleável, esferoidal e cinzento até dureza de 700HB e de aços (aços de cementação, beneficiamento, aço rápido e aço de alta liga) com dureza até 64 HRC.

✦ **DIAMANTE**

Material mais duro conhecido.



Classificam-se em diamantes naturais e sintéticos

- **Diamantes naturais**

Classificados em Carbonos, Ballos e Borts.

Os **carbonos** ou **diamantes negros** são aparentemente “amorfos” e perdem a dureza por aquecimento. São empregados em aplicações especiais, como ferramentas para afiar rebolos, pontas de brocas para minas, assim como para trabalhar fibras, borrachas e plásticos.

Os **ballos** são diamantes claros, de crescimento irregular; especialmente duros em função de sua estrutura. Por serem redondos, não se aplicam à fabricação de ferramentas de corte e de rebolos.

O **bort**, especialmente o africano, é claro. Seu valor depende da dureza, da qualidade e do número de bordos naturais de trabalho que oferece. Os gumes podem ser lapidados em ângulos apropriados.

São monocristalinos e anisotrópicos (as propriedades mecânicas variam com a direção).

Tem 4 direções preferenciais de clivagem.

A lapidação deve ser feita na direção de menor dureza.

A montagem no porta-ferramenta deve ser feita na direção de máxima dureza.

Indicados para usinagens de metais leves, bronze, cobre, ligas de estanho, borracha dura e mole, vidro, plásticos e pedras.

Usinagem fina (grande precisão e qualidade superficial semelhante ao polimento).

A usinagem de aço e $F^{\circ}F^{\circ}$ não é possível, em virtude da afinidade do ferro com o carbono. Na zona de contato da peça com a ferramenta o carbono, devido à alta temperatura, transforma-se em grafite e reage com o ferro. Isto leva a um rápido desgaste do gume.

A velocidade de corte praticamente não tem limite superior. Velocidades de 2000 m/min foram experimentadas com sucesso.

A velocidade de corte mínima é de 100 m/min.

Avanços entre 0,02 e 0,06 mm/rot.

Profundidades de corte entre 0,01 e 0,2 mm (excepcionalmente 1mm).

- **Diamante sintético**

Em 1973 foi apresentada uma ferramenta revestida com uma camada de diamante sintético policristalino.

A matéria-prima é partículas muito finas de diamantes sintéticos, de granulação muita

definida para se obter o máximo de homogeneidade e densidade.

A camada de diamante policristalino é produzida pela sinterização de partículas de diamante com cobalto num processo de alta pressão (6000 a 7000 Mpa) e alta temperatura (1400 a 2000° C).

A camada de 0,5mm de espessura, ou é aplicada diretamente sobre a pastilha de metal duro pré-sinterizado ou então é ligada ao metal duro através de uma fina camada intermediária de um metal de baixo módulo de elasticidade.

A camada é isotrópica e nunca atinge a dureza do diamante monocristalino na direção de máxima dureza.

Para usinagem de metais leves, latão, cobre, bronze, estanho, plásticos, asbesto, fibras reforçadas de vidro carbono, carvão grafite, metal duro pré sinterizado.

Para acabamento e desbaste.

Especial aplicação na usinagem de ligas alumínio-silício, que são de difícil usinagem.

✦ **NITRETO DE BORO CÚBICO CRISTALINO (CBN)**

Depois do diamante é o material mais duro que se conhece.

Obtido sinteticamente pela reação de halogenetos de boro com amoníaco.

Como no diamante existe uma forma macia, hexagonal, de estrutura cristalina igual a do grafite e uma forma dura, cúbica, de estrutura igual a do diamante.

O CBN foi obtido pela primeira vez em 1957, pela transformação do nitreto de boro de estrutura hexagonal em estrutura cúbica sob pressões de 5000 a 9000 Mpa e temperaturas de 1500 a 1900°C, na presença de um catalisador, (geralmente lítio).

O CBN é quimicamente mais estável que o diamante, especialmente contra a oxidação.

Sob pressão atmosférica o CBN é estável até 2000°C, o diamante grafitiza ao redor de 900°C.

As pastilhas de CBN são fabricadas da mesma forma que as de diamante policristalino. Uma camada de 0,5mm de espessura, de partículas de CBN é sinterizada num processo de alta pressão e altas temperaturas, na presença de uma fase ligante, sobre uma base de metal duro.

Empregadas na usinagem de aços duros (45 a 65 HRC), mesmo em condições difíceis, aço rápido, ligas resistentes a altas temperaturas a base de Ni e Co, revestimentos duros com altas porcentagens de WC ou Cr-Ni.

Velocidades de corte de 50 a 200m/min.

Avanços de 0,1 a 0,3mm.

Profundidade $a_p \leq 2,5\text{mm}$.

Pela sua resistência ao impacto podem ser usadas em cortes interrompidos, abrasivos, peças forjadas e fundidas e peças de F^oF^o coquilhado.

Para cortes interrompidos, desbaste e acabamento, usinagem fina.

Rugosidades inferiores a $1\mu\text{m}$, dispensando retificação.

Capítulo 7 - USINABILIDADE

10. Definições:

Usinabilidade é a propriedade que os materiais têm de se deixarem trabalhar por ferramentas de corte.

Alguns materiais podem ser trabalhados com grande facilidade enquanto outros oferecem problemas tais como:

- Desgaste rápido ou super aquecimento da ferramenta;
- Empastamento ou enganchamento da ferramenta pelo material da peça;
- Lascamento do gume de corte;
- Mau acabamento superficial da peça usinada;
- Necessidade de grandes forças ou potências de corte.

11. Variáveis que influenciam a usinabilidade:

A usinabilidade depende das seguintes variáveis:

1. VARIÁVEIS DEPENDENTES DA MÁQUINA:

- Rigidez estática da máquina, do porta-ferramenta e do dispositivo de sujeição da peça;
- Rigidez dinâmica: amortecimento e frequências próprias de vibração na faixa de trabalho;
- Potência e força de corte disponíveis na ponta da ferramenta;
- Gama de velocidades de corte e de avanço.

B - VARIÁVEIS DEPENDENTES DA FERRAMENTA:

- Geometria da ferramenta: ângulos, raio de quina, dimensões, forma do gume, etc.
- Material da ferramenta: composição química, dureza a quente, tenacidade, tratamento térmico, etc.
- Qualidade do gume: grau de afiação, desgaste, trincas, rugosidade da face e dos flancos, etc.

✦ **VARIÁVEIS DEPENDENTES DA PEÇA:**

- Forma, dimensões, rigidez da peça;
- Propriedades, físicas, químicas e mecânicas da peça: dureza, resistência à tração, composição química, inclusões, afinidade química com o fluido de corte ou com a ferramenta, microestrutura, etc.
- Temperatura da peça.

✦ **VARIÁVEIS DEPENDENTES DO FLUIDO DE CORTE:**

- Propriedades refrigerantes;
- Propriedades lubrificantes;
- Temperatura do fluido;
- Forma e intensidade de aplicação.

✦ **VARIÁVEIS DEPENDENTES DO PROCESSO:**

- Velocidade de corte;
- Dimensões de usinagem: avanço e profundidade;
- Modo de atuação da ferramenta sobre a peça: condições de entrada e saída, corte contínuo ou interrompido, comprimento de contato entre o gume e a peça, etc.

12. Critérios para avaliação do grau de usinabilidade de um material

- Vida da ferramenta entre duas reafiações sucessivas (expressa de diversas formas);
- Grandeza das forças que atuam sobre a ferramenta e da potência consumida;
- Qualidade do acabamento superficial obtido pela usinagem;
- Facilidade de deformação do cavaco.

Destes critérios, apenas os três primeiros podem ser expressos em valores numéricos, sendo portanto os mais utilizados para a avaliação do grau de usinabilidade.

Estes fatores definem também, em grande parte, o custo do trabalho de usinagem realizado na fábrica. Assim:

A vida da ferramenta entre duas afiações sucessivas tem grande influência no custo da operação;

A força e a potência necessárias limitam as dimensões máximas de corte e, portanto, o volume de material removido por hora-máquina.

Em certas peças, a exigência de um acabamento de alta qualidade pode ser causa da rejeição, influenciando assim no custo da usinagem.

Como os valores obtidos para a vida da ferramenta, força e potência de corte, e acabamento superficial, na usinagem de um dado material, variam ainda em função dos fatores dependentes da máquina, da ferramenta, do fluido de corte e do processo, é praticamente impossível de se determinar um “índice de usinabilidade” como característica clara e definida de um material.

Entretanto, os valores dados em publicações e manuais são de grande valor como uma primeira idéia sobre o comportamento efetivo do material na usinagem.

A significação e a importância desses valores serão maiores quanto mais exatamente forem indicadas as condições sobre as quais os ensaios foram realizados.

Em ensaios mais rápidos, onde se deseja reduzir o tempo e o custo dos ensaios, utilizam-se variáveis de mais fácil mensuração, tais como:

- Força axial de avanço da broca, em operações de furação;
- Tempo de execução de um furo de dimensões dadas, com um mesmo esforço axial de avanço da broca;
- Temperatura da ferramenta e do cavaco;
- Grau de encruamento do cavaco;

13. Falha e desgaste da ferramenta de corte

A falha de uma ferramenta de corte pode ocorrer de três formas distintas:

- Lascamento do gume;
- Desgaste do flanco (superfície de incidência) formando uma **marca de desgaste**;
- Desgaste da face (superfície de saída) sob a forma de uma **cratera**;

Lascamento:

Quebra de pedaços do gume, produzindo superfícies ásperas e irregulares devido a sobrecargas térmicas e/ou mecânicas.

São causas do lascamento:

Ferramenta pouco resistente devido a:

- Ângulo de cunha β_n ou ângulo de quina ε_r muito pequenos;
- Mau acabamento do gume;
- Pastilha muito dura ou pouco tenaz para o serviço que está sendo executado;

Sobresolicitações mecânicas devido a:

- Cortes interrompidos ou impactos, especialmente na usinagem de materiais muito tenazes;
- Inclusões duras no material da peça. Estas inclusões provocam lascamentos parciais, especialmente nos graus mais duros e resistentes ao desgaste de metal duro e nas cerâmicas. Os aços rápidos são pouco sensíveis a este tipo de sobresolicitação;
- Dimensões excessivas do cavaco;
- Vibrações de qualquer origem, principalmente em ferramentas de metal duro ou cerâmicas.

Sobresolicitações térmicas, causando um fissuramento do gume devido a um resfriamento brusco de pastilhas muito quentes, na afiação ou na usinagem.

O problema do lascamento pode ser eliminado na maioria dos casos pela correção dos defeitos acima. Recomenda-se:

- Usar ângulos de incidência adequados;
- Empregar ângulos de saída negativos em todos os trabalhos severos com pastilhas de metal duro ou cerâmicas, especialmente em cortes interrompidos, usinagem de fundidos com inclusões duras, peças com cordões de solda, etc;
- Emprego de metal duro de grau adequado;
- Retificado fino ou polido da face e do flanco da ferramenta;
- Na usinagem com fortes impactos devidos a cortes interrompidos ou com grandes avanços, ou de materiais com inclusões de alta dureza, tem-se obtido ótimos resultados com um leve “cegamento” do gume por meio de uma pedra de afiar (“oilstone”). A pedra, segura num ângulo de 30 a 45°, é passada no gume até que se forma um pequeno chanfro com largura igual a aproximadamente 20% do avanço.

Marca de desgaste

É a faixa desgastada no flanco da ferramenta, sendo que a sua largura exprime o grau de desgaste.

Esta largura, em geral, não é uniforme, mas é maior nos extremos da marca e na quina da ferramenta.

Um raio de quina adequado pode diminuir a largura da marca nesta zona.

Uma marca de desgaste irregular é devida normalmente a um microlascamento do gume.

Cratera

É a concavidade que se forma na face (superfície de saída) da ferramenta devido ao atrito da mesma com o cavaco.

A cratera é caracterizada pela sua profundidade KT e pela distância ao meio do gume KM.

O colapso da ferramenta pode dar-se pela cratera, pela marca de desgaste ou pelo efeito combinado.

O desgaste provoca um deslocamento do gume.

14. Causas do desgaste da ferramenta

Os fatores principais de desgaste são:

- Deformação plástica
- Abrasão
- Aderência
- Difusão
- Oxidação
- Correntes elétricas iônicas

Deformação plástica

Ocorre quando a dureza a quente do material da ferramenta não é mais

suficiente para resistir às pressões de usinagem, o que se verifica especialmente com maiores avanços.

Abrasão

É o arrancamento de finas partículas de material, em decorrência do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta.

Aumenta com o número de inclusões e partículas duras no aço (como carbonetos e óxidos).

A presença de Al_2O_3 no aço é nociva devido a sua elevada dureza e abrasividade.

A resistência à abrasão depende essencialmente da dureza do material da ferramenta.

O aumento da v_c aumenta a velocidade de desgaste, em virtude principalmente da redução da resistência ao desgaste da ferramenta causada pelo aumento da temperatura.

Aderência

A aderência entre o material da peça e as asperezas superficiais da ferramenta se deve à ação das altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte e o fato de que a superfície inferior do cavaco, recém arrancada, apresenta-se limpa, sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, quimicamente muito ativa.

A prova de que tais aderências se podem formar, é o gume postiço; formado por partículas que se soldam na face da ferramenta e apresentam um elevado grau de deformação a frio, isto é, estão encruadas, duras e resistentes.

Elas dificultam o deslizamento do cavaco, aumentando o coeficiente de atrito na face e provocando um maior recalque do cavaco.

O aumento do atrito provoca um aumento progressivo da força de deslizamento do cavaco, até que as partículas soldadas são arrancadas.

O arrancamento destas partículas pode-se dar por cisalhamento das asperezas da ferramenta, por separação na solda ou por cisalhamento dentro das próprias partículas.

No primeiro caso ocorre maior desgaste na face da ferramenta.

De modo geral, o deslocamento de partículas encruadas e duras separadas do

gume postiço, sob alta pressão, provoca desgaste abrasivo no flanco e na face da ferramenta.

O gume postiço ocorre em baixas velocidades de corte. O desgaste aumenta, inicialmente, com a velocidade, pois vão se alcançando temperaturas e pressões que favorecem a aderência.

Já as velocidades mais elevadas, a temperatura sobe a ponto de amolecer as partículas aderidas, que recristalizam, enquanto o material da ferramenta, muito mais resistente ao calor, não é afetado.

Não havendo mais condições de formação do gume postiço, o desgaste da ferramenta diminui, bem como o recalque do cavaco, pois o mesmo desliza mais facilmente pela face da ferramenta.

Difusão

Ocorre em temperaturas mais elevadas, em que as moléculas adquirem certa mobilidade.

Para ferramentas de aço carbono e aço rápido, esta forma de desgaste não tem significação, pois a faixa de temperaturas de difusão é bem mais alta que a temperatura de amolecimento da ferramenta.

Diferente é a situação nos metais duros, nos quais podem ocorrer os seguintes fenômenos em temperaturas na faixa de 700 a 1300°C:

Difusão do ferro na base do cobalto, formando uma liga de baixo ponto de fusão e de fácil desgaste.

Difusão do cobalto no aço, com formação de uma camada de cristais mistos.

Difusão do carbono, que é retirado dos carbonetos duros e imigra para o aço.

Dissolução do carboneto de tungstênio na liga pastosa cobalto-carboneto de tungstênio-ferro, com formação de carbonetos mistos e duplos do tipo $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $(\text{FeW})_6$ e $(\text{FeE})_{23}\text{C}_6$ e liberação de carbono.

O aumento da temperatura gera tensões no esqueleto de carbonetos do metal duro. Como o cobalto tem um coeficiente de expansão térmica cerca de quatro vezes maior do que o esqueleto de carbonetos, o aumento da temperatura provoca a expulsão sob alta pressão do cobalto e a geração de tensões no interior do metal duro.

Oxidação

Oxidação, como ocorre no aquecimento de peças a altas temperaturas com a formação de carepas, pode ser causa de desgaste.

A oxidação em baixas temperaturas é normalmente evitada por camadas protetoras de material oxidado.

Aços-carbono, aços rápidos e Stellites só formam carepas em temperaturas bem superiores à de amolecimento da ferramenta.

Metais duros já iniciam a formação de carepas em temperaturas de 700 a 800°C, ou seja, em temperaturas usuais de usinagem com este material.

Experiências feitas demonstram, efetivamente, que na usinagem com metal duro em altas velocidades, o desgaste é menor numa atmosfera neutra do que na presença do ar.

Correntes elétricas

Produzem-se no contato entre peça e ferramenta durante a usinagem.

Estas correntes podem ser explicadas como um fenômeno termoelétrico, gerando-se pelo aquecimento do ponto de união de um par de materiais distintos (termopar).

Ensaio minuciosos realizados pelo Prof. Opitz e seus assistentes na Escola Superior Técnica de Aachen, levaram à conclusão que:

Na usinagem, dependendo do par de materiais, a ferramenta constitui usualmente o pólo negativo.

Em virtude das diferenças de temperatura nos diversos pontos da zona de corte, ocorrem na própria ferramenta circuitos fechados de corrente, os quais explicam a magnetização freqüente observada na mesma. A corrente medida no circuito máquina-peça-ferramenta é, portanto, apenas uma fração da corrente total gerada.

A isolação pura e simples provoca, em alguns casos, uma pequena redução do desgaste da ferramenta.

A aplicação de uma corrente de compensação produz geralmente uma redução mais notável do desgaste, no flanco da ferramenta.

15. Critérios para determinação do fim de vida da ferramenta

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações mais ou menos profundas no processo de usinagem.

A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram, o acabamento superficial piora.

Em condições extremas, ocorre um faiscamento intenso no corte, a superfície usinada se apresenta áspera.

Com ferramentas de aço rápido, ocorre um sobreaquecimento do gume, que amolece e fica com aspecto de queimado, ao mesmo tempo em que ocorre, subitamente, um violento efeito de frenagem da ferramenta sobre a peça, na qual se forma uma faixa altamente polida pelo atrito.

Em ferramentas de metal duro o aumento das forças de corte, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total do gume.

A utilização de uma ferramenta até este ponto é de todo desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com a remoção de uma extensa camada de material de corte, antes que se possa restabelecer um gume adequado.

A fixação do ponto representativo do fim de vida de uma ferramenta é fundamental no estudo da usinabilidade.

São utilizados na prática e nos ensaios de laboratório diversos critérios para determinar mais ou menos com exatidão este ponto, dependendo a escolha, em grande parte, das exigências da usinagem (precisão de medidas, grau de acabamento) e do material da ferramenta. Pode-se citar:

Falha completa da ferramenta:

Inabilita para o corte, por superaquecimento (queima), lascamento ou quebra.

Na prática não se recomenda ir até este ponto devido ao alto custo de reafiação ou aquisição da ferramenta.

Falha preliminar da ferramenta:

Acusada pelo aparecimento na superfície usinada ou transitória da peça, de uma estreita faixa altamente polida, indicando forte atrito de escorregamento com o flanco da ferramenta.

Ocorre faiscamento intenso.

Este é um critério freqüentemente usado no emprego de ferramentas de aço rápido.

Largura da marca de desgaste no flanco:

Este é o critério de emprego mais freqüente na indústria para a determinação do fim de vida da ferramenta de metal duro e cerâmica.

As ferramentas de metal duro perdem a eficiência de corte com 0,8 a 2mm de marca de desgaste.

Ferramentas maiores, mais tenazes e em velocidades de corte mais baixas admitem maiores marcas de desgaste.

Pastilhas mais duras e frágeis, como a cerâmica, admitem no máximo 0,5mm de marca de desgaste.

Vibrações intensas da peça ou da ferramenta, ruídos fortes por vibração da máquina:

Impedem o prosseguimento da usinagem.

Podem ter origem no desgaste no flanco da ferramenta.

Profundidade de cratera KT ou distância KL:

A profundidade KT de cratera pode ameaçar o lascamento da pastilha.

A faixa remanescente KL entre o gume e o início da cratera pode se reduzir até ameaçar a integridade do gume.

Deficiência de acabamento superficial:

Ocorre freqüentemente de maneira súbita e pronunciada do grau de acabamento superficial, a qual pode ser tomada como limite de vida da ferramenta.

Formação de rebarbas de usinagem na peça.

Brusca variação na forma dos cavacos.

Alterações de dimensões da peça:

O desgaste provoca um deslocamento do gume, o que por sua vez determina

uma alteração nas dimensões da peça usinada.

Um deslocamento de 0,1mm no gume resulta um aumento de 0,2mm no diâmetro da peça.

Força de corte, torque ou potência.

Aumento da força de avanço:

Usado especialmente em brocas.

O aumento da força de avanço está intimamente ligado ao desgaste do flanco e, portanto, com a marca de desgaste.

Aumento na temperatura do gume.

16. Métodos usuais na especificação da vida de uma ferramenta de corte entre duas reafiações sucessivas:

- Tempo de máquina (principalmente em máquinas automáticas).
- Tempo efetivo de corte (mais usual).
- Volume do metal removido.
- Número de peças usinadas.
- Velocidade de corte equivalente (ou velocidade de Taylor): é a velocidade de corte que, sob um determinado conjunto de condições de corte, permite obter um tempo pré-fixado. Exemplo: V_{60} é a velocidade de corte para uma vida efetiva de 60 minutos.

Capítulo 8 - MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES PARA A USINAGEM

Meios lubri-refrigerantes para a usinagem:

17. Objetivos:

O emprego de meios lubri-refrigerantes (também chamados fluidos de corte, óleos de corte, meios de lubrificação e arrefecimento, líquidos refrigerantes, etc) tem por finalidade:

- Aumentar a vida da ferramenta
- Aumentar a eficiência de remoção de material
- Melhorar o acabamento superficial
- Reduzir a força e potência de corte.

18. Funções:

Os meios lubri-refrigerantes têm as seguintes funções básicas:

- Refrigeração
- Lubrificação
- Proteção contra corrosão
- Arrastamento dos cavacos
- Eliminação do gume postiço

Refrigeração da ferramenta - É especialmente importante em altas velocidades de corte. Quando se utiliza ao máximo as possibilidades ao máximo as possibilidades da ferramenta e a temperatura do gume se aproxima do ponto de amolecimento, pequeno esfriamento pode provocar grande aumento na vida da ferramenta. Assim, num ensaio sob determinadas condições de corte, o abaixamento da temperatura para 700°C para 650°C provocou um aumento de vida de 4 para 20 minutos e uma nova redução de temperatura para 600°C elevou a vida da ferramenta para várias horas. A Tabela 2 indica a possibilidade de praticar velocidades de corte até 40% maiores com o uso de refrigeração intensa, mantida a mesma vida da ferramenta.

Tabela 2 - Coeficientes de correção da velocidade de corte para aços rápidos.

Tipo de aço rápido	Coeficiente multiplicador para usinagem com refrigeração		
	a seco	média	intensiva
14-4-1	0,83	1,04	1,17
18-4-1	0,94	1,18	1,32
18-4-2	1,00	1,25	1,40
18-4-3	1,08	1,35	1,51
18-4-2 com 10% Co	1,28	1,60	1,80
18-4-2 com 18% Co	1,33	1,67	1,86

Lubrificação - Deve atuar especialmente na zona de contato da peça e do cavaco com a face da ferramenta. Para diminuir a temperatura no gume da ferramenta pode-se eliminar pela refrigeração o calor gerado, como também procurar reduzir a geração de calor. Este segundo caminho é realizado pela lubrificação. Verifica-se que o aquecimento se deve a dois fatores: atrito com a peça e com o cavaco, responsável por 25% do calor gerado; trabalho de dobramento do cavaco, responsável por 75% do calor gerado. A lubrificação atua, pois, diretamente, apenas sobre uma pequena parcela do calor gerado. Indiretamente, porém, verifica-se que a lubrificação diminui o fator de recalque do cavaco e, com isto, reduz, também, o trabalho de dobramento do cavaco. Tem sido muito discutido o mecanismo de atuação do fluido lubrificante, uma vez que a existência de pressões de contato entre cavaco e superfície de saída, da ordem de 2700 MPa e temperaturas por vezes superiores a 600°C, tornam de todo impossível a hipótese de lubrificação hidrodinâmica, com formação de uma cunha de óleo semelhante à que ocorre em mancais. A viscosidade do lubrificante não tem nenhum efeito sobre o coeficiente de atrito. Uma explicação do mecanismo de lubrificação é a seguinte: as superfícies do cavaco e da peça não são absolutamente planas, mas apresentam irregularidades, nas quais pode penetrar o fluido de corte por capilaridade ou outra ação mecânica.

Em face das pressões extremamente altas, entre as superfícies metálicas que escorregam uma sobre a outra, gera-se uma situação de atrito limite. As rugosidades mais salientes, em contato metálico, atrim-se e soldam-se momentaneamente. Fora

dos pontos de contato existe uma película de lubrificante de espessura apenas molecular. Os aditivos existentes no lubrificante formam por absorção ou por reação química camadas intermediárias, que reduzem o atrito metálico entre as superfícies não é possível na usinagem.

As películas de adsorção são formadas por aditivos de atuação física (que tem forte aderência, como os óleos graxos). As películas de adsorção são eficientes até temperaturas de aproximadamente 150°C e portanto, muito baixas por uma boa atuação sob condições pesadas de usinagem.

Aditivos de extrema pressão (EP), de ação química, formam películas resistentes a pressões e temperaturas mais elevadas. A parte inferior do cavaco, sem nenhuma exposição anterior ao meio ambiente, apresenta-se quimicamente muito ativa, o que somado às altas pressões e temperaturas, favorece as reações químicas. Estas geram películas sólidas, fixas, que impedem as soldagens, resistem às altas pressões e diminuem a resistência ao cisalhamento das rugosidades das superfícies em contato. São usados como aditivos compostos de fósforo, cloro e enxofre, bem como enxofre puro (não combinado). Estes aditivos tornam-se atuantes em temperaturas na faixa de 200 a 1000°C. A reação com o Cl forma uma camada de FeCl_2 ou de Fe_2Cl_6 , cuja resistência ao cisalhamento é de apenas 380, respectivamente 155 N/mm², contra 1330 N/mm² do aço. Da mesma forma, a presença de enxofre determina a formação de FeS e FeS_2 , com uma redução de 60% no atrito e abaixamento da temperatura na zona de corte. Os componentes ativos adicionados ao meio lubri-refrigerante devem ser selecionados especificamente de acordo com o tipo de operação de usinagem.

À medida que aumenta a velocidade de corte, o tempo para a entrada do fluido entre as superfícies atritantes e para a reação química dos aditivos se torna insuficiente, perdendo-se progressivamente o efeito lubrificante. Em altas velocidades, de qualquer forma o efeito refrigerante é mais importante que a lubrificação.

Proteção contra a corrosão - O fluido de corte deve proteger a peça, assim como a máquina contra a corrosão. Isso obriga, no caso de utilização de água, que tem excelentes qualidades de refrigeração, ao emprego de óleos com emulsificantes ou de aditivos anticorrosão.

Arrastamento de cavacos - O fluido de corte, quer por ação mecânica de

arrastamento, quer pelo esfriamento brusco e fragilização do cavaco, quer por alteração da forma do cavaco, tem uma importante função na eliminação dos cavacos da área de trabalho. Esta ação é especialmente útil na furação profunda, na trepanação e na furação com brocas canhão, onde se usa fluido injetado sob pressão, através da ferramenta de corte, para forçar os cavacos para fora do furo.

Eliminação do gume postiço - O gume postiço se forma especialmente em baixas velocidades de corte, prejudicando seriamente o acabamento superficial. A lubrificação da face da ferramenta (superfície de saída) por fluidos com aditivos de extrema pressão (EP) ou por óleos graxos, pode evitar a formação do gume postiço.

Qualidades acessórias – Os meios lubri-refrigerantes devem ter ainda as seguintes qualidades acessórias:

- Resistência a infecção por bactérias e fungos.
- Não ter tendência ao envelhecimento (formação de borras, espumas, oxidação, perda de estabilidade).
- Não afetar a saúde, quer pelo contato direto, quer pelos seus vapores e névoas.
- Facilidade de preparação e manutenção.
- Não atacar metais, plásticos, tintas, borrachas, elementos de vedação e outras peças da máquina.
- Não atacar ligantes dos rebolos (na retificação).
- Boa transparência, para permitir a observação do processo de usinagem.
- Baixa inflamabilidade.
- Não afetar ou poluir o meio ambiente, nem na utilização nem no descarte.
- Não ter cheiro incomodativo.
- Poder de remover impurezas.
- Boa molhabilidade e resistência a altas pressões.
- Boa filtrabilidade.
- Não formar espuma.

As qualidades exigidas variam de acordo com a aplicação e, as vezes, são até

extraordinárias. Não existe um fluido de características universais, que atende a todas as exigências. No desenvolvimento de meios lubri-refrigerantes, a melhoria de certas qualidades, por exemplo pelo uso de aditivos, induz freqüentemente a piora de outras. Daí a necessidade do estudo de cada caso por especialistas, para a seleção do tipo de lubri-refrigerante mais adequado.

Do ponto de vista econômico - A análise é em geral bastante complexa, pois devem ser computados os custos globais de aquisição, estocagem, aplicação, manutenção e descarte, os quais devem ser balanceados com os benefícios obtidos. O custo simples do meio lubri-refrigerante tem pouca significação, representando em geral menos de 1 a 2% do custo da usinagem.

19. Tipos de meios lubri-refrigerantes empregados

Os inúmeros tipos de meios lubri-refrigerantes hoje empregados podem ser classificados como segue:

- **Meios lubri-refrigerantes miscíveis com a água:**
 - Soluções aquosas (representam poucos % do consumo)
 - Emulsões (representam 40% do consumo)

- **Meios lubri-refrigerantes não miscíveis com a água:**
(representam, em conjunto, 60% do consumo)
 - óleos minerais puros
 - óleos graxos
 - óleos mistos
 - óleos com aditivos polares
 - óleos com aditivos de extrema pressão (ativos e inativos).

- **Gases e névoas.**

- **Sólidos.**

- **Meios lubri-refrigerantes miscíveis com a água**

A água é o mais eficiente absorvente e condutor de calor, mas seu uso em máquinas é limitado porque acelera a corrosão e tem pequeno efeito lubrificante. Em virtude da baixa viscosidade a água tem ótimas características de arraste de sua vida limitada, exige despesas mais elevadas de controle, manutenção, manipulação e descarte. Suas características refrigerantes, em relação aos óleos podem ser deduzidas dos dados abaixo:

	Óleo mineral	água
Calor específico (J/gK)	cerca 1,9	4,2
Condutibilidade térmica (W/mK)	cerca 0,13	0,6
Calor de vaporização (J/g)	cerca 210	2.260

Para melhorar as qualidades lubrificantes e evitar o efeito corrosivo da água, usam-se aditivos. Distinguem-se dois tipos de meios lubri-refrigerantes miscíveis com a água:

Soluções aquosas

Decorrem da mistura com água, de um concentrado de produtos orgânicos ou inorgânicos, solúveis em água. Não contém derivados de petróleo. A adição de sais alcalinos e soluções de nitrito de sódio (até 5%), boratos, fosfato trisódico, alcanolamina, trietanolamina, sabão e derivados de ácidos orgânicos são usados para controlar a corrosão. Tem a vantagem da limpeza, da transparência (facilitando a visão do processo de usinagem) e do alto poder de refrigeração. São denominados, por vezes, de “fluidos químicos” ou “fluidos sintéticos”, tendo encontrado aplicação crescente face a elevação dos preços dos derivados de petróleo.

O pH das soluções é mantido em geral entre 8 e 9,5 para evitar a corrosão. As soluções distinguem-se das emulsões pelos seguintes aspectos principais:

As soluções são mais resistentes às bactérias e tem, portanto, vida mais longa;
São menos sensíveis à dureza da água;
A mistura é mais fácil, sendo necessário apenas um pouco de agitação;
São usados em concentrações menores, na faixa de 1:50 a 1:100;
Tem mostrado bons resultados na retificação, mas são utilizáveis, com formulação adequada, em todas as operações de usinagem em que usa emulsões;
Repelem óleos infiltrados provenientes de sistemas hidráulicos e de lubrificação;
Tem lubricidade muito limitada. Podem lavar películas lubrificantes aderentes a guias, causando emperramentos;
Alta detergência pode irritar a pele de operadores sensíveis;
Podem atacar vernizes e vedantes e formar gomas aderentes, se penetrarem em sistemas de lubrificação ou acionamentos hidráulicos;
Tendência a formar espumas (pode ser corrigida por formulação adequada);
Alguns problemas de descarte, pela dificuldade de remover os produtos químicos da fase líquida;
Problemas decorrentes em torno da controvérsia sobre as nitrosaminas. (Sob certas condições de pH e de temperatura, as misturas de alcanolaminas com nitritos, podem formar nitrosaminas, as quais injetadas em animais tem mostrado efeitos cancerígenos).
As soluções podem ser aditivadas com agentes “molhantes”, que permitem que as guias, torres e outras partes móveis da máquina funcionem sem problemas. Em operações difíceis, pode-se usar aditivos de extrema pressão (EP), que contém enxofre, cloro ou fósforo. Estas soluções são usadas na faixa de concentração de 1:5 a 1:30.
Para obter qualidades lubrificantes, usa-se às vezes adicionar uma pequena quantidade de óleo mineral mais aditivos para reforçar as qualidades lubrificantes. Fala-se então em “fluidos semiquímicos” ou “fluidos semi-sintéticos”.

Emulsões

Consistem da mistura de óleo com água, com a adição de um agente emulsificador, que faz com que o óleo fique distribuído, de modo uniforme e estável, na água, sob a forma de finas gotículas. São utilizadas, usualmente, quando a ocorrência de altas temperaturas de usinagem constitui um problema. São mais conhecidas pela denominação errônea de “óleos solúveis”. Em sua forma original, estes produtos são

compostos líquidos ou pastosos de sabões e óleos, os quais misturados com uma larga proporção (1:10 a 1:50) de água, formam um fluido de corte leitoso ou translúcido.

Com emulsificadores se usam sabões, sulfatos e sulfonatos.

Sabões

Como emulsificadores clássicos são conhecidos os sais de sódio e sais amínicos de ácidos graxos de cadeia longa (ácidos esteáricos e oléicos), mas também sabões naftênicos. Os sabões alcalinos têm a desvantagem de que só atingem plena efetividade com alcalinidades muito altas (pH em volta de 10). Sabões amínicos ainda são efetivos com pH igual a 8. Ambos tem a desvantagem de formarem com íons de Ca e de Hg sabões insolúveis na água, que se separam. Sabões naftênicos têm a vantagem de sua relativa insensibilidade eletrolítica, mas pode ter a desvantagem da maior formação de espuma.

Sulfatos

Entre eles conhece-se óleos graxos sulfatados e álcoois graxos.

Sulfonatos

Entre os quais se distinguem os sulfonatos alifáticos e sulfonatos aromáticos. Além de suas propriedades emulsificantes, representam um papel importante nos fluidos de corte de metais, pela sua boa proteção contra a corrosão.

São usados, ainda, como agentes emulsificantes, produtos etoxilados, como fenóis alquílicos, éteres de sorbita, álcoois graxos e amidos de ácidos graxos.

O óleo a ser emulsificado pode ser um óleo derivado de petróleo, um óleo graxo ou qualquer combinação destes e outros óleos de corte. Usualmente, além do sabão e do óleo, entra, ainda na composição um solvente mútuo, tal como um álcool ou um glicol. O efeito principal dos óleos solúveis é o de refrigeração.

O fabricante do produto pode variar a formulação, de modo a levar em conta as condições químicas e biológicas de água. Na hora de preparação da emulsão deve-se ter presente este fato, pois um óleo feito para água dura pode espumar excessivamente em água mole, enquanto que o produto feito para água mole provavelmente se separa na água dura.

Com o uso, a concentração de óleo na emulsão irá se reduzindo gradualmente, porque mais óleo do que água adere aos cavacos e às peças acabadas. Há pois necessidade de adicionar, periodicamente, óleo, para manter a efetividade da emulsão.

Micro-organismos na água encurtam a vida útil das emulsões de óleo. Três tipos

de micro-organismos são freqüentemente encontrados nas emulsões: bactérias, algas e fungos. Podem ser combatidos com bactericidas e fungicidas, em quantidades restritas pois os mesmos têm limitada solubilidade na água.

As emulsões também podem ser formuladas com aditivos de extrema pressão, contendo enxofre, cloro, fósforo e óleos graxos, para oferecer condições de lubrificação e operações de usinagem mais difícil. Estas emulsões são usadas em concentrações maiores, na faixa de 1:5 a 1:20. Em algumas operações de usinagem como brochamento e fresamento por geração de engrenagens, as emulsões EP têm substituído os meios lubri-refrigerantes não miscíveis em água.

O custo inicial das soluções e emulsões é baixo, porém em virtude de sua vida limitada, exigem despesas mais elevadas de controle, manutenção, manipulação e descarte.

- **Meios lubri-refrigerantes não miscíveis com água**

Os meios lubri-refrigerantes não miscíveis com a água são constituídos pelos óleos graxos e óleos minerais, que podem ser usados puros, misturados ou com aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos e inativos. São usados em geral, em processos de usinagem de baixa velocidade ou com metais de difícil usinabilidade. Custo elevado, perigos decorrentes de névoas e incêndio, bem como efeitos nocivos à saúde limitam sua utilização.

Óleos graxos

As moléculas dos óleos graxos são formadas por longas cadeias e átomos de carbono, cujos extremos polarizados aderem fortemente às superfícies, formando uma película lubrificante que reduz o atrito e o desgaste. Isto confere aos óleos graxos excelentes qualidades de lubrificação, mesmo em situações de extrema pressão. Tem, entretanto, o inconveniente de rancificarem com o tempo, apresentando, então um odor desagradável. São usados tanto óleos de origem animal como vegetal, tais como óleo de baleia, sebo, banha, óleo de algodão, de colza, de amendoim, de mamona, de soja, de girassol, de palma, etc.

Óleos minerais puros

São utilizados para certas operações leves em máquinas automáticas, para a usinagem de aço, latão, alumínio, magnésio e metais antifricção. Sua principal vantagem é a lubrificação simultânea de guias e partes móveis da máquina, assim com a proteção contra a corrosão. Do ponto de vista da refrigeração as qualidades são muito inferiores às da água e as qualidades de lubrificação, nas condições extremas de pressão e temperaturas que ocorrem entre cavaco e ferramenta, também são muito limitadas. Os óleos minerais puros não são corrosivos e, mantidos limpos, podem ser usados por longo tempo.

Óleos mistos

São óleos formulados pela mistura de óleos minerais com óleos graxos de origem animal ou vegetal. Estes aditivos, pelas suas características polares, aumentam a “molhabilidade” e a aderência do meio lubri-refrigerante, reduzindo o atrito entre a face da ferramenta e o cavaco. Óleos minerais naftênicos ou misturas de parafínicos-naftênicos, pela sua maior compatibilidade com os aditivos, são os mais empregados. Os óleos mistos apresentam boa parte das vantagens de lubrificação sob extrema-pressão dos óleos graxos. Quando a temperatura ultrapassa 150°C a película lubrificante perde sua efetividade. Por isto são empregados em processos difíceis de usinagem, de baixa velocidade, onde ocorre pouca elevação de temperatura e se exige bom acabamento superficial, como em máquinas de roscar, na usinagem de aço doce, latão, bronze, cobre ou alumínio. Os óleos mistos não mancham os metais, tem tendência a formar gomas. Modernos aditivos polares foram aperfeiçoados para evitar estes inconvenientes, inclusive pelo uso crescente de substâncias sintéticas, como éster de ácido carbônico.

Óleos com aditivos de extrema-pressão (EP)

Em aplicações em que as condições de usinagem são particularmente difíceis e as forças de corte elevadas, usam-se óleos minerais ou óleos graxos com aditivos EP. Estes são compostos de enxofre, cloro ou fósforo, que reagem em altas temperaturas (200°C a 1000°C), formando na zona de corte sulfetos, cloretos ou fosfetos, constituindo uma película anti-solda na face da ferramenta e assim, minimizando a

formação do gume postiço. Se a quantidade de aditivo for pequena e fortemente ligada quimicamente, os óleos não mancham os metais e são denominados de óleos inativos. Se houver enxofre livre ou cloro e fósforo em forma ativa, formam-se películas EP estáveis e resistentes, especialmente úteis em aplicações de alta temperatura e alta pressão. Estes óleos EP ativos mancham alguns metais.

Óleos sulfurados

Aditivos na base de enxofre formam camadas sulfetos metálicos que agem como lubrificantes sólidos até temperaturas de 700°C. Aços doces exigem usualmente um teor mais elevado de enxofre. Aços duros precisam menos enxofre. Operações difíceis, como brochar e roscar são feitas com óleo de alto teor de enxofre. Óleos com baixo teor (menos de 2%) de enxofre são usados para furar, alargar, tornear e fresar. Latão e outras ligas metálicas são enegrecidos por óleos de alto teor de enxofre.

Óleos clorados

Produzem um filme de cloreto de baixa resistência ao cisalhamento, que reduz o atrito até temperaturas de cerca de 400°C. Acima desta temperatura o filme se decompõe. São usados especialmente no brochamento.

Óleos fosforados

Provocam a redução do atrito, do fator de recalque e do desgaste da ferramenta. Seus efeitos em geral são menos dramáticos que os do enxofre e do cloro.

Óleos sulfo-clorados

Tanto de origem mineral como óleos graxos, oferecem características de EP e anti-soldagem, efetivos sobre uma larga faixa de temperaturas de corte.

- **Gases refrigerantes**

Têm sido ensaiados em operações de corte. Tem-se obtido alguns resultados

promissores com emprego de uma névoa de óleo com ar comprimido de 600 kPa (6kg/cm^2) de pressão.

Bissulfeto de molibdênio (Molikote)

Pelas suas características de lubrificante em condições de extrema pressão, tem dado excelentes resultados. Basta muitas vezes uma leve pintura da superfície de saída da ferramenta com pasta de MoS_2 .

20. Seleção dos meios lubri-refrigerantes para a usinagem de metais

A seleção do meio lubri-refrigerante depende dos objetivos que se quer alcançar: aumento da produção, vida mais longa da ferramenta, arraste de cavacos, melhor acabamento superficial, etc. Não é tarefa fácil, pois deverão ser observadas todas as condições gerais do processo de fabricação envolvendo:

- Processo de usinagem, variáveis de usinagem, material da peça e da ferramenta;
- Qualidade da usinagem, precisão de forma e de medidas, acabamento superficial;
- Máquinas-ferramentas usadas: simples, múltipla usinagem; produção individual, em série, em massa;
- Armazenagem, limpeza, tratamentos posteriores das peças;
- Sistemas de recirculação dos meios lubri-refrigerantes: sistemas individuais, múltiplos, centralizados; tipo, tamanho e componentes do sistema de recirculação; adução dos meios lubri-refrigerantes à zona de corte;
- Análise econômica: custos de preparação, manipulação, controle, transporte, manejo, armazenagem; benefícios obtidos;
- Segurança: efeitos sobre a saúde, névoas de óleo, risco de incêndios, descarte;
- Condições de fornecimento: apoio técnico do fornecedor, garantias de fornecimento, etc.

- **Seleção do fluido lubri-refrigerante em função do processo de usinagem**

Como regra, em processos de usinagem difícil usam-se baixas velocidades de corte, recomendando-se o uso de fluidos que tenham boas características de lubrificação. Ao contrário, em processos de usinagem fácil, usa-se altas velocidades de corte e o fluido deve ter, preponderantemente, qualidades refrigerantes. O quadro a seguir dá uma classificação orientativa dos vários processos de usinagem.



Para aços pode-se estabelecer as seguintes regras orientativas:

- Para processos de usinagem difícil usam-se óleos com aditivos EP.

Para processos de usinagem fácil usam-se emulsões ou soluções.

A

Tabela 3 dá uma orientação sobre os fluidos de corte recomendados em distintas operações de corte e diferentes materiais.

Processo de usinagem Dificuldade	Velocidade	
	de corte	de usinagem
	Alta	Baixa
Fazer roscas		
Escanhoar engrenagens		
Geração por plainamento		
Furação profunda		
Cortar com bedame		
Trabalhos em tornos automáticos		
Furar		
Geração por fresamento		
Fresar		
Serrar		
	Baixa	Alta

Operação	Aços com índice de usinabilidade			Ligas de cobre	Ligas de alumínio
	> 70%	55 a 75%	< 55%		
Plainar, tornear e furar	S (30:1), O-2, O-4	S (30:1), O-2, O-4	S (20:1), O-3, O-4, O-7	S (20:1), O-1	S (30:1), O-a
Serrar	S (30:1) O-1	S (30:1) O-1	S (30:1) O-1	S (20:1) O-1	O-a S (30:1)
Fresar, mandrilar	S (20:1) O-4, O-2	S (15:1) O-2, O-3	S (10:1) O-3, O-4	S (15:1) O-1	S (20:1) O-a
Alargar	S (15:1) O-4, O-2	S (10:1), O-2, O-4, O-7	S (10:1), O-3, O-4, O-5, O-7	S (15:1) O-1	S (20:1) O-a
Furação profunda	O-2 O-4	O-2 O-4	O-3 O-5	S (15:1) O-1	S (15:1) O-a
Rosquear	O-4	O-3 O-5, O-7	O-3 O-5, O-7	S (10:1) O-1	S (10:1) O-a
Brochar (desbaste)	S (15:1) O-4	S (15:1) O-4	S (10:1) O-5, O-7	S (15:1) O-1	S (15:1) O-a
Brochar (acabamento)	O-2, O-4 S (EP) (10:1)	O-3 O-5, O-7	O-3 O-5, O-7	S (15:1) O-1	S (15:1) O-a
Brochar (serviço pesado)	O-6 O-7	O-6 O-7	O-6 O-7	S (15:1) O-1	S (10:1) O-a
Máquinas automáticas	O-1	O-4	O-4	O-1	O-a
Abreviações: S = emulsões (proporções indicadas) ou soluções; S (EP) = emulsões com aditivos de extrema pressão; O = óleo de corte: 1) mineral puro; 2) com misturas de até 10% de óleos graxos animais; 3) idem, até 40%; 4) com adição de enxofre (menos de 1%); 5) idem até 2%; 6) idem, mais de 2% de enxofre; 7) óleo sulfurado, com adição de óleos graxos; a) óleo mineral puro, transparente e inodoro, próprio para alumínio, querosene; querosene com 30% de óleo mineral puro. Observação: com magnésio, nunca usar fluidos a base de água.					

Tabela 3 - Seleção do fluido de corte para a usinagem.

Na **retificação** ocorrem fortes aquecimentos que produzem marcas de superaquecimento, endurecimento de certos pontos, camadas macias por recristalização, trincas, etc. Para evitar estes danos térmicos é preciso reduzir a temperatura na zona de retificação, o que se pode obter por refrigeração ou redução do atrito. Em operações leves de retificação (por ex. retificação cilíndrica, retificação sem centros, retificação plana) emprega-se preponderantemente meios miscíveis em água. Os aditivos usados protegem contra a corrosão, reduzem o atrito e o desgaste do rebolo e mantém o mesmo livre de partículas metálicas (evita o empastamento do rebolo). Na retificação com rebolos perfilados (para ranhuras, roscas, engrenagens, etc.), gera-se, especialmente nos ressaltos normal ao eixo muito calor de atrito. Além disto, há grandes exigências quanto à precisão de formas e de medidas e de qualidade do acabamento superficial. Por isto, usa-se nestes casos, preferencialmente, óleos com aditivos redutores do atrito.

No **superacabamento**, para se obter mínima rugosidade superficial, o meio lubri-refrigerante deve reduzir o atrito e o desgaste, além de arrastar cavacos e detritos da pedra abrasiva. Utilizam-se óleos de viscosidade muito baixa com aditivos de alta pressão e melhoradores das qualidades lubrificantes.

- **Seleção do fluido lubri-refrigerante em função do material da peça**

Ligas de magnésio

Quase todas as ligas de magnésio são de corte fácil e permitem altas velocidades de corte, com bom acabamento. O magnésio oxida facilmente, decompondo a água e gerando calor e hidrogênio. Isto leva facilmente à auto-ignição. Por isto o magnésio só pode ser usinado a seco ou com óleos de baixa viscosidade. **Nunca** se deve usar água, emulsões ou soluções aquosas.

Ferro fundido

O ferro fundido cinza e o maleável de cavaco curto são usinados geralmente a seco. O grafite dos cavacos de ferro fundido, na presença de óleos de corte e de emulsões, induz a formação de massas que entopem os filtros e podem emperrar as

ferramentas (p.ex. brocas). No alargamento manual de furos o emprego de grafite misturado com sebo, dá excelentes resultados. Com ferro fundido esferoidal empregam-se emulsões com sucesso.

Ligas de alumínio

São em geral de fácil usinagem, permitindo o emprego de altas velocidades de corte. O calor gerado, em virtude da boa condutibilidade térmica do alumínio, escoa rapidamente. No caso de alumínio puro ou com percentagens muito baixas de liga, ocorre forte tendência à formação de gumes postiços. Altas percentagens de silício provocam forte desgaste abrasivo das ferramentas. Frequentemente se usina alumínio a seco. No corte refrigerado usam-se de preferência emulsões e, algumas vezes, óleos de baixa viscosidade. Para operações difíceis usa-se óleos com aditivos EP, os quais devem ter uma formulação que impeça a formação de manchas negras nas peças. Em ligas de alumínio com alto teor de zinco não se deve usar soluções aquosas, pois estas reagem com o zinco formando hidrogênio e amoníaco, com sério risco de incêndios e explosões.

Ligas de cobre

Têm usinabilidade muito variável. O cobre puro, por exemplo, forma cavacos longos, com elevado fator de recalque e péssimo acabamento. Latão, bronze e metais de maior dureza são fáceis de usinar, em geral a seco ou usando emulsões. Para ligas de cavaco longo usam-se óleos de baixa viscosidade com aditivos que melhoram o efeito lubrificante. Cobre puro exige óleos mais viscosos. Aditivos EP com enxofre livre produzem manchas nas peças.

Aços

Para aços de usinabilidade normal (aços de cementação, de beneficiamento e de construção) recomenda-se o uso de emulsões e soluções. Para aços de usinabilidade difícil (aços de cementação e beneficiamento de alta liga, aços Cr de alta liga, aços CrNi, Inox, aço fundido) recomenda-se emulsões EP e óleos altamente aditivados. Para aços de difícilíssima usinagem (aço manganês, MnSi, CrMo, aços silício) é necessário a emprego de óleos EP.

- **Seleção do fluido lubri-refrigerante em função do material da ferramenta.**

Aço rápido

Permite o uso de qualquer meio lubri-refrigerante.

Metal duro

Também não oferece problema para a maioria dos meios lubri-refrigerantes bem formulados, o problema é a sensibilidade aos choques térmicos. Para minimiza-los recomenda-se:

- Ligar o fluxo refrigerante antes de iniciar a operação de corte;
- Manter o fluxo refrigerante durante um pequeno espaço de tempo depois de concluído o corte;
- Usar óleos de baixas propriedades de transferência de calor quando não há garantia de fluxo constante de refrigerante.

Cerâmica

É usualmente empregada a seco.

Diamante

É refrigerado usualmente por soluções aquosas.

- **Seleção do meio lubri-refrigerante em função do tipo de máquina**

Muitas máquinas para processos de usinagem específicos, usando ferramentas caras e com exigências de alto grau de acabamento das peças, necessitam meios lubri-refrigerantes especiais, em geral óleos com aditivos EP. Inclui-se nesta lista brochadeiras, rosqueadeiras, geradores de engrenagens, superacabadoras, etc.

Centros de usinagem, que realizam uma grande variedade de processos de usinagem, usando ferramentas de diversos tipos e materiais, com distintas velocidades e dimensões de corte, exigem meios lubri-refrigerantes de ampla gama de aplicações.

Critérios de pré-seleção

a- Refrigerado ou a seco?		
Seco		Refrigerado
- Materiais de fácil usinagem (ex, ferro fundido cinzento, metais leves, metais a base de cobre), em processos com pequena solicitação da ferramenta		- Aços e outros materiais de usinagem normal até difícil
- Em parte na usinagem de metal duro		- Processos de usinagem que solicitam muito a ferramenta
- Na maioria dos empregos das cerâmicas de corte		- Máquinas automáticas
		- Todos os processos de retificação
		- Séries grandes
b- Meio miscível ou não na água?		
Característica	Meio não-miscível	Meio miscível
- Usinagem	- Leve a pesada. - Superacabado, retificação de perfis e roscas	- Leve a média. - Retificação em geral
- Velocidade de corte	- Baixa a média	- Alta
- Vida da ferramenta	- Em geral mais alta	- Em geral menor
- Acabamento	- Em geral melhor	- Em geral pior
- Compatibilidade com o material da peça	- Manchas em ligas de cobre por óleos EP	- Não compatível com magnésio
- Compatibilidade com a ferramenta	- Todas	- Limitada com metal duro - Impróprio para cerâmica
- Compatibilidade com a máquina	- Boa	- As vezes problemática
- Compatibilidade com o óleo de vazamento	- Boa	- Menos boa
- Compatibilidade com o pessoal	- Em geral boa com a pele - Formação de névoas	- Mais limpo no uso - Problemas: odor, ataque por bactérias

- Compatibilidade com o meio ambiente	- Pisos e pavilhões recobertos com películas de óleo	- Boa
- Gama de aplicações	- Ampla. Óleos universais usáveis também para lubrificação e sistemas hidráulicos	- Não cobre todos os processos e materiais
- Vida	- Mais longa	- Menor
- Efeito de arraste	- Pior	- Melhor
- Resistência a bactérias	- Boa	- Menos boa
- Proteção contra corrosão	- Boa	- Menos boa
- Consumo	- Maior	- Menor
- Inflamabilidade	- Sim	- Não
- Custo	- Alto	- Menor
- Custos adicionais (manipulação, preparação, controle, descarte)	- Baixos	- Altos

C – Emulsões ou soluções?

Vantagens das soluções	Vantagens das emulsões
-Rebolos mais agressivos	- Mais eficientes com solicitações pesadas de corte
- Menos riscos de danos térmicos na peça (p. ex. trincas, pontos duros, camada macia, marcas de super aquecimento)	- Melhor proteção contra corrosão
- Manutenção mais simples	- Melhor compatibilidade com tintas e vernizes
- Vida mais longa em uso	- Menos agressivos à pele dos operadores
- Melhor separação de óleos de vazamentos	- Menos tendência de “lavar” o filme de lubrificante de guias, mancais e outras partes móveis da máquina
- Melhor resistência a bactérias	
- Menor consumo de concentrado	

- Transparência permite melhor observação do processo de usinagem	
- Melhor estabilidade de mistura	
- Preparação mais fácil	
- Biodegradação mais fácil do descarte	

21. Forma de aplicação dos meios lubri-refrigerantes

Os principais aspectos a serem considerados para uma eficiente utilização de meios lubri-refrigerantes dizem respeito a sua forma de aplicação, quais sejam:

- volume;
- pressão;
- velocidade dos jatos;
- ângulo de impacto;
- forma e número de bocais.

Em geral basta uma adução abundante, sob mínima pressão, dirigida adequadamente para a região de corte. É importante que o meio lubri-refrigerante seja aplicado antes e não depois do início do processo de usinagem. Não deve haver, também, uma interrupção na adução, por qualquer que seja o motivo.

Na retificação

A vazão recomendada em máquinas modernas é de 3 a 4,5 l/min por milímetro de largura do rebolo. As pressões aumentam com a potência da máquina, indo de 0,15 MPa a 0,6 MPa.

No torneamento

O volume de refrigerante deve ser o mais amplo possível, aplicando-se por cima do gume, sem pressão, para evitar que os cavacos mudem a direção do jato e se inunde o local de trabalho. O volume mínimo recomendável é da ordem de 5 l/min por kW de potência de corte.

O diâmetro do tubo de saída do fluido deve ter ao menos $\frac{3}{4}$ da largura da ferramenta, devendo sua boca ser dirigida diretamente sobre o gume e estar situada tão próxima quanto possível do mesmo.

Em cortes pesados, além do jato por cima, convém aplicar outro jato, neste caso com alguma pressão, por baixo do gume.

No fresamento

Aplicar dois jatos laterais dirigidos para a zona de corte.

Na furação e alargamento

Adução interna pelo corpo da ferramenta e/ou externa por tubos e bocais. No caso da adução interna se usa pressão de até 20 MPa, para ajudar na remoção de cavacos. Jatos de alta velocidade são eficientes, porém exigem bombas de alta pressão e provocam o espalhamento do fluido e névoas, que poluem o meio ambiente.

No brochamento

Usam-se distribuidores de anel com vários bocais que permitem jatos orientados para os gumes.