

Capítulo 9

Fresamento



Na operação de fresamento é a ferramenta que gira para efetuar o corte. O fresamento surgiu após o ano de 1910, com a necessidade de usinar superfícies planas prismáticas. A fresadora, que executa a operação de fresar, é a máquina-ferramenta que permite usinar a peça em dois ou mais eixos (lineares ou giratórios). Permite a execução facilitada de peças prismáticas, enquanto o torno opera principalmente com peças rotacionais, de revolução.

A realização da operação de fresamento é feita por diversos tipos de empresas, como:

- ferramentarias em geral, sobretudo pelo segmento de moldes e matrizes;
- fabricantes de componentes aeroespaciais;
- empresas do setor de autopeças;
- montadoras de veículos automotores diversos, entre outras.

A operação de fresamento é também executada, hoje em dia, em centros de usinagem horizontal e vertical, em máquinas de usinagem cinco eixos, centros de torneamento e em máquinas multitarefas. O fresamento em cinco eixos é aplicado principalmente na produção de componentes complexos, como os componentes de turbinas, e na fabricação de protótipos e ferramentarias.

9.1 Definições em fresamento

Com a máquina fresadora, mais as ferramentas e dispositivos necessários, é possível usinar grande diversidade de produtos, pois ela permite trabalhar com ampla variedade de peças e superfícies.

Na operação de fresamento, a ferramenta de corte multicortante, chamada fresa, faz a retirada do sobremetal da superfície de uma peça, na forma de cavaco. O objetivo é formar superfícies planas, retilíneas ou prismáticas, simples ou complexas, com a forma, dimensão, tolerância e acabamento desejados.

O movimento de corte (figura 9.1) ocorre pela combinação de dois movimentos, realizados ao mesmo tempo. Um, é o de rotação da fresa, em geral no sentido horário, atendendo à condição do corte da ferramenta, de encontro ao material. O outro movimento é o de translação, também chamado velocidade de avanço de usinagem, feito de acordo com a característica de cada máquina. Muitas vezes o avanço é feito pela mesa da máquina onde é fixada a peça a ser usinada, e em outras ocasiões é executado pela própria ferramenta. Resumindo, a rotação da

fresa e o movimento de avanço entre a peça e a fresa tornam possíveis a operação de usinagem, realizando a forma e dimensão desejadas. A fresa remove o material pelo efeito cunha das arestas de corte.

Em programação CNC, considera-se que é sempre a ferramenta que se desloca linearmente ao elaborar o programa de usinagem, embora não seja dessa forma que acontece fisicamente na máquina.

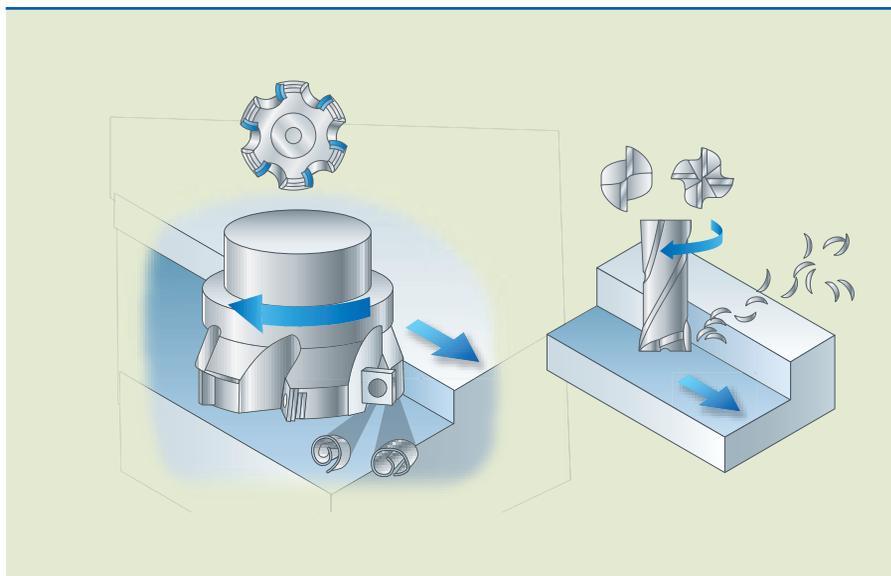


Figura 9.1

Operações de fresamento e detalhe frontal possível das fresas: aqui é demonstrada a rotação em sentido horário e movimento de avanço da peça.

A fresa é uma ferramenta multicortante, e as superfícies de corte estão, em geral, distribuídas simetricamente ao redor de um eixo. Os movimentos de rotação ao redor de seu eixo e o de translação (avanço) permitem que cada uma das arestas cortantes, chamadas dentes ou facas, retire a parte do material que lhe compete nessa combinação de rotação e translação.

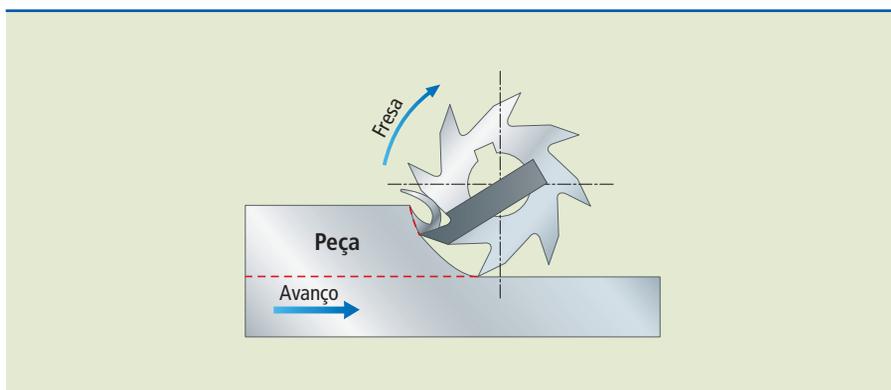


Figura 9.2

Comparativo do fresamento com o torneamento.

Na figura 9.2, a representação mais escura simboliza um comparativo com a ferramenta de torneamento. Nessa ilustração, seriam oito ferramentas de torneamento “girando” ao redor do eixo. Porém, em fresamento, são oito dentes ou facas executando a operação. Isso resulta em maior rapidez para gerar as diversas superfícies.

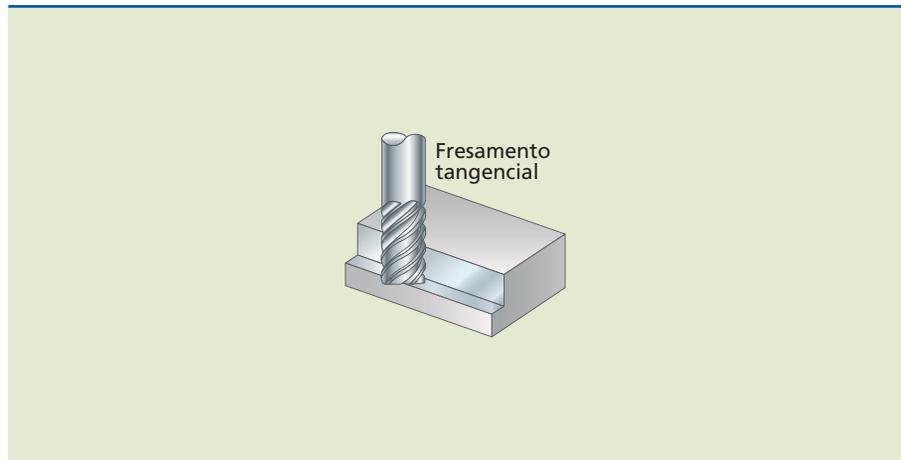
O fresamento é uma operação que consegue expressiva tolerância dimensional e geométrica e acabamento superficial na faixa de $Ra = 1,0$ a $6,3 \mu\text{m}$. A rugosidade é influenciada por vários motivos, entre eles o estado geral da fresa, da máquina e da fixação, a profundidade de corte, o avanço e a rotação aplicados e, ainda, o sentido de movimento de usinagem. Valores mais restritos de tolerâncias e de rugosidade superficial – até pouco menor do que $Ra 1,0 \mu\text{m}$ – são conseguidos com certas geometrias de fresas com pastilhas intercambiáveis alisadoras em aplicações de processos bem estáveis, com baixa profundidade de corte e com avanço e rotações adequados.

A operação pode ser classificada segundo a disposição dos dentes da fresa, como segue.

- **Fresamento tangencial** (figura 9.3) – é a operação em que os dentes da fresa estão na superfície cilíndrica da ferramenta; nesse caso, o eixo da fresa é paralelo à superfície gerada. As fresas são chamadas cilíndricas.

Figura 9.3

Fresas de topo inteiriças podem fresar tangencial e frontalmente pelo corte no topo: fresamento tangencial.

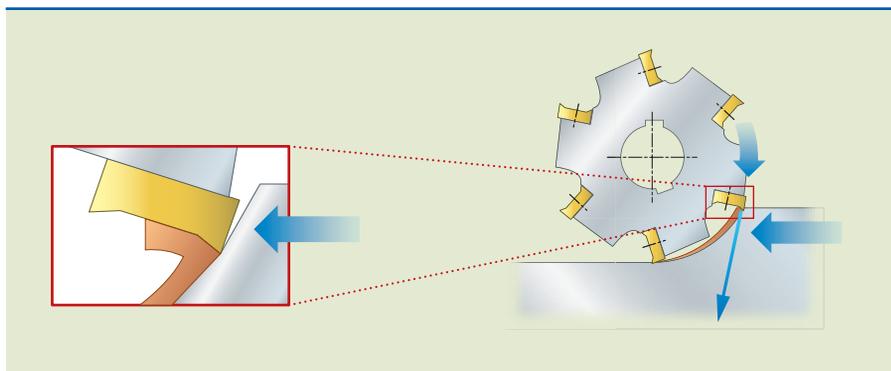


- **Fresamento frontal** – é a operação em que os dentes da fresa estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa está posicionado perpendicular à superfície gerada. Por isso, é comum chamar de fresa de topo ou frontal e, ainda, fresa de facear.

As fresas de topo em geral podem executar o corte tangencial e frontal, segundo a geometria lateral e frontal da fresa. Nas fresas com pastilhas intercambiáveis, é possível utilizar pastilhas tangenciais ou radiais, no caso das fresas cilíndricas.

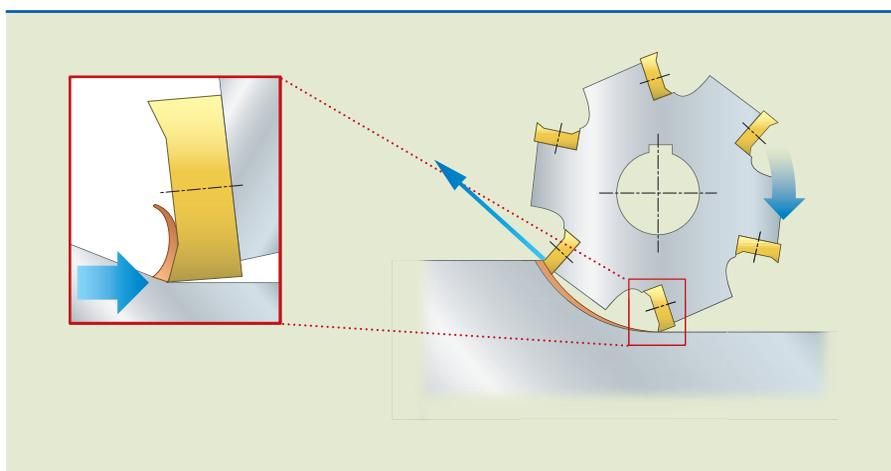
Levando em consideração o movimento de avanço e de rotação da ferramenta, distinguem-se dois tipos de movimento de usinagem: concordante e discordante entre peça e ferramenta. Eles diferenciam-se no grau de acabamento da superfície produzida, entre outros fatores.

- **Fresamento concordante** – é o fresamento em que o movimento de avanço da peça e de rotação da fresa estão no mesmo sentido. O cavaco gerado começa no máximo e vai-se reduzindo a zero (figura 9.4).

**Figura 9.4**

Fresamento concordante.

- **Fresamento discordante** – é o fresamento em que o movimento de avanço da peça é feito contra o movimento de rotação da fresa. O cavaco gerado começa em zero e vai aumentando ao máximo, segundo o valor de avanço (figura 9.5).

**Figura 9.5**

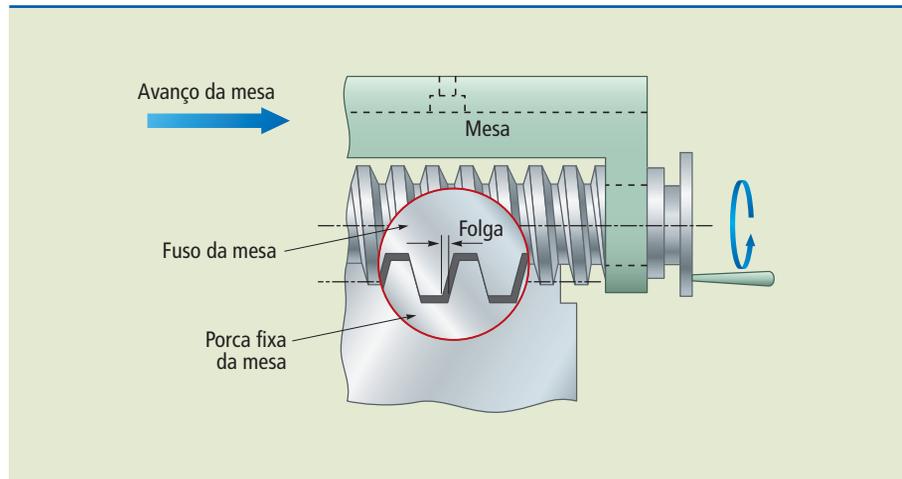
Fresamento discordante.

É preferível o fresamento concordante por oferecer maior vida útil à ferramenta de corte, sempre que a máquina fresadora, o dispositivo, o formato da peça e a operação permitirem. A restrição da fresadora em realizar movimento concordante é porque, na maioria das máquinas, o avanço da mesa baseia-se em uma porca e um parafuso, que com o tempo de uso se desgastam fazendo surgir uma folga entre eles (figura 9.6).

No fresamento concordante, a folga é empurrada pelo dente da fresa no mesmo sentido de deslocamento da mesa e ocorrem movimentos irregulares que prejudicam o acabamento da peça e podem danificar o dente da fresa. No fresamento discordante, a folga não influi no deslocamento da mesa, que tem movimento de avanço mais uniforme, fato que proporciona melhor acabamento da peça.

Nas fresadoras CNC e centros de usinagem praticamente não há problemas em utilizar o movimento concordante, adotado pela vantagem de maior vida da ferramenta. Em fresadoras convencionais, em geral aplica-se o movimento discordante.

Figura 9.6
Folga entre fuso e porca.



9.2 Ferramenta para fresar

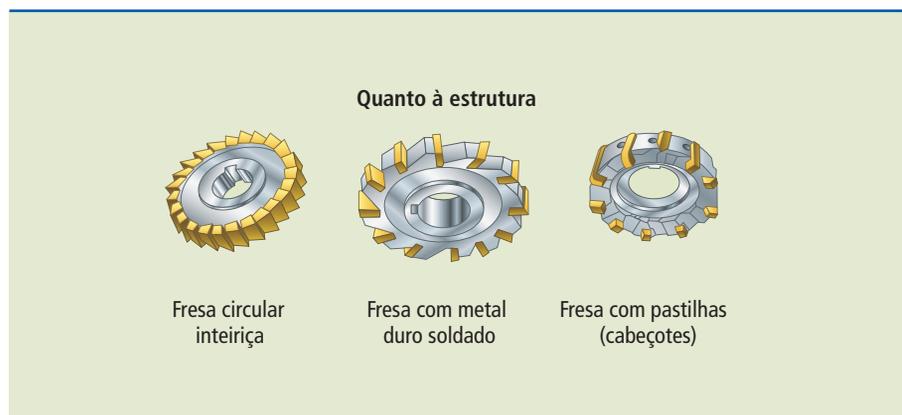
As fresas podem ser classificadas quanto à estrutura ou construção, quanto à forma e quanto à fixação.

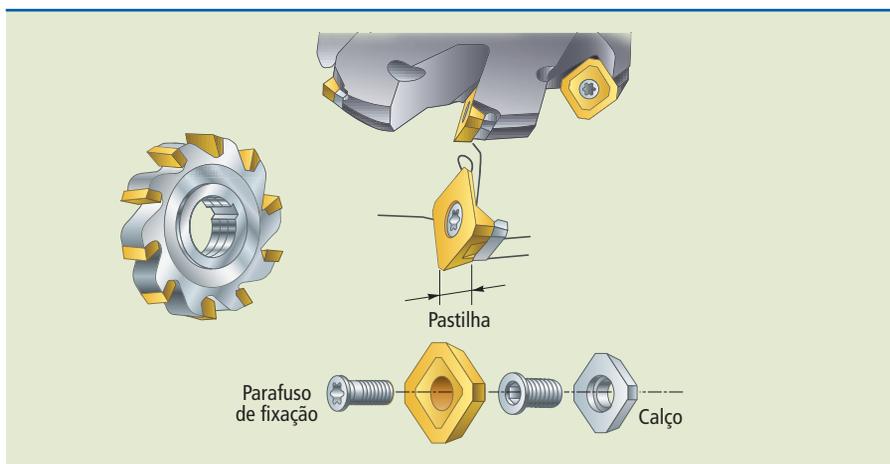
9.2.1 A estrutura das fresas

Quanto à estrutura ou construção, as fresas podem ser **inteiriças**, quando a ferramenta é toda construída de um mesmo material. Os materiais mais empregados são o aço rápido e o metal duro, nos formatos de fresa cilíndrica, de perfil e de topo. Há também a fresa com pontas soldadas, com o corpo da ferramenta construído de um material mais simples, e os gumes de corte soldados ao corpo, geralmente, de metal duro.

Existem também as fresas com **dentes postiços**, conhecidas como cabeçotes de fresamento, nas quais os dentes são pastilhas e insertos reversíveis de metal duro, CBN, diamante ou cerâmicos fixados por parafusos, pinos ou garras de fácil substituição em caso de quebra ou desgaste. A figura 9.7 mostra três tipos de fresas, e a figura 9.8 ilustra uma fresa com dentes postiços (pastilhas), comparada com metal duro soldado.

Figura 9.7
Tipos de fresas.



**Figura 9.8**

Fresa de dentes postigos e detalhe da fixação da pastilha.

9.2.2 Tipos de fresas

A escolha do material da pastilha basicamente depende do tipo, dureza e formato do material da peça, da operação a ser executada, das características da máquina e tipo de fixação, das exigências de tolerâncias e rugosidade e das exigências de produtividade.

Nas condições de trabalho atuais, em que são requeridas maiores velocidades, os dentes da fresa que não estão trabalhando após cada corte, quando a fresa rotaciona, estão sendo resfriados com o ar frio. O processo, então, gera alto calor no instante do corte, refrigera logo após, configurando choques térmicos, o que obriga os fabricantes das fresas a introduzir classes que suportem severas condições de trabalho e geometrias que maximizem o desempenho da ferramenta.

Os materiais empregados para o fresamento precisam resistir à severidade das operações quanto a resistências térmica e mecânica a esforços alternantes elevados. Os fabricantes desenvolvem alternativas de novos formatos e ângulos, objetivando principalmente o ângulo mais positivo, mas preocupando-se com a resistência da pastilha aos choques mecânicos e térmicos. Em resumo, os materiais para usinar em fresamento são mostrados na tabela 9.1.

Material da peça	Material da ferramenta
Aço	Aços rápidos e metal duro
Fofo, metais não ferrosos, plásticos e aços temperados	Metal duro
Aços HB < 300	Cermets
Desbaste de fofo	Cerâmicas de Si_3N_4
Fofo cinzento, fofo duro, aços para cementação, aços de beneficiamento, aços temperados	Cerâmicas óxidas mista
Aços para beneficiamento de alta resistência (HRC > 45)	CBN

Tabela 9.1

Materiais para usinar em fresamento.

9.2.3 A forma das fresas

Quanto à forma, as fresas são cilíndricas, cônicas ou perfiladas (figura 9.9). Os cilindros mais estreitos são chamados fresa de disco, os mais alongados, em geral, fresa de topo.

Figura 9.9

Tipos de fresas classificadas quanto à forma.

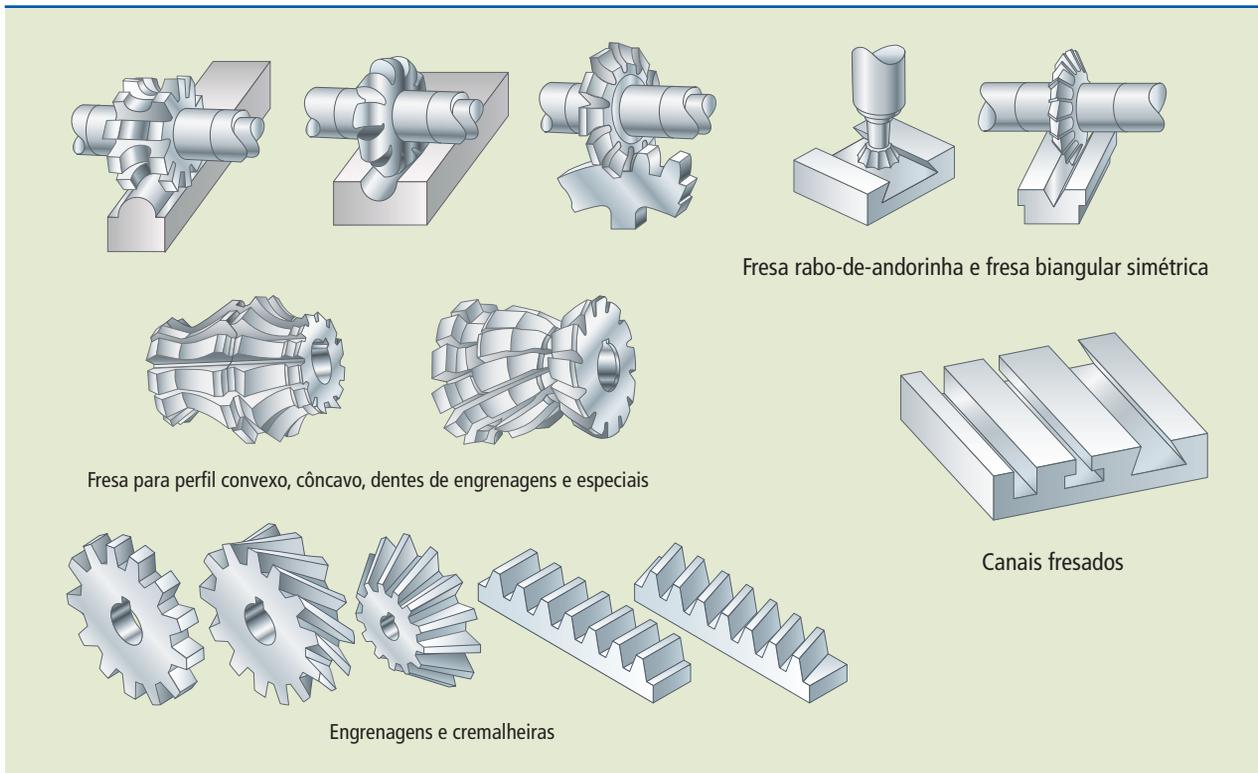


As fresas cônicas são empregadas, por exemplo, para fazer prismas chamados rabos-de-andorinha. Em geral as fresas para rabo-de-andorinha possuem haste incorporada.

As fresas de forma possuem o perfil de seus dentes preparados para gerar superfícies especiais, como dentes de engrenagens e cremalheira (fresa módulo), superfícies côncavas ou convexas e raios de concordância. São utilizadas também para abrir canais e usinar perfis em ângulo, tais como rasgos prismáticos e encaixes tipo rabo-de-andorinha, para fazer rasgos de chaveta, ranhura reta ou em perfil T para encaixe da porca de mesmo formato e outras formas específicas de cada caso. São denominadas fresas especiais e, em geral, encomendadas em empresas especializadas em ferramentas. O conjunto de desenhos mostrado na figura 9.10 ilustra várias dessas fresas.

Figura 9.10

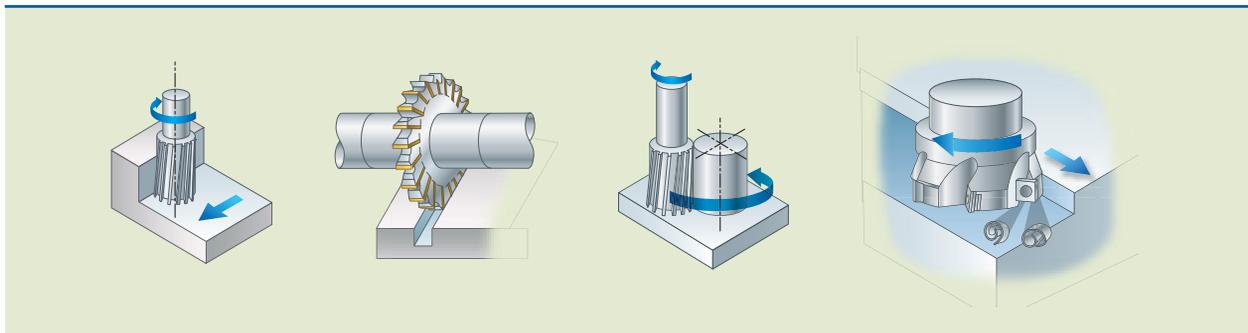
Diferentes tipos de fresas.



Fresas planas – empregadas para gerar superfícies planas, abrir rasgos e canais (figura 9.11).

Figura 9.11

Fresas planas.



Fresas para materiais mais macios – precisam ter ângulo de cunha menor (positivas) e canais polidos para facilitar a saída de cavacos. O aumento do ângulo de cunha deixa os dentes menos resistentes, colocando-se menos dentes na ferramenta. São utilizadas em ligas de alumínio e outros materiais não ferrosos, empregados na indústria aeroespacial, de autopeças e outros.

Fresas para usinar materiais duros – os dentes devem ser fabricados com ângulo tendendo a negativo, pois cada dente da fresa vai remover pouco desse material mais resistente. São muito utilizadas na usinagem de moldes e matrizes em tecnologia HSC (*high speed cutting*), removendo pouca profundidade de corte com maiores avanços em materiais endurecidos por tratamento térmico. São usadas nas fresadoras copiadoras, nas fresadoras e centros de usinagem com CNC realizando formatos complexos.

9.2.4 A fixação

Quanto à fixação, as fresas possuem haste cônica ou cilíndrica (com ou sem rasgo Weldon), e fresas para mandril com chaveta longitudinal ou transversal, como mostradas na figura 9.12.

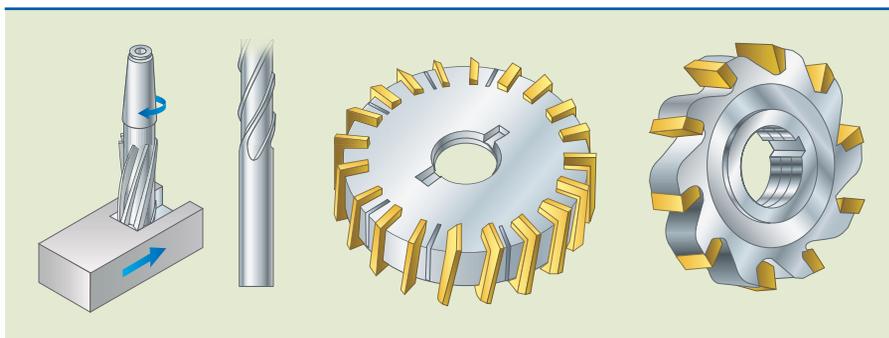


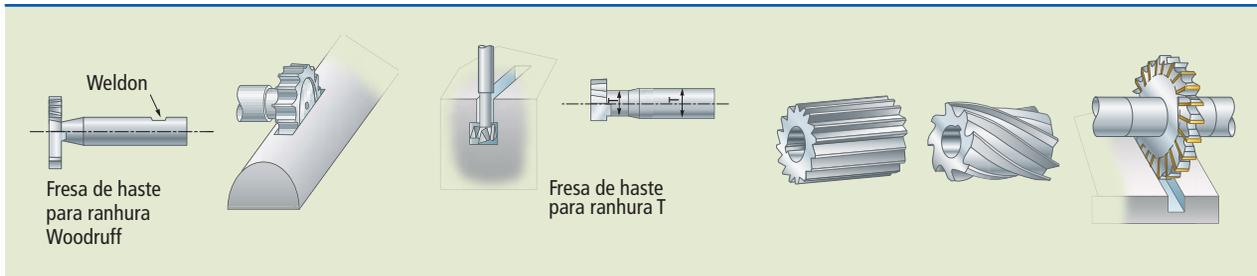
Figura 9.12

Detalhe de fixação das fresas.

Quanto ao **sentido de corte**, observado pelo lado do acionamento das máquinas (de cima para baixo), as fresas mais largamente utilizadas são de corte à direita (sentido horário).

Figura 9.13
Fresas tipo Weldon, de haste e bi-helicoidal.

Os **dentes** podem ser retos, helicoidais ou bi-helicoidais. Os dentes helicoidais causam menor vibração durante a usinagem, pois não atingem a peça de uma só vez, como acontece com os dentes retos, ficando o corte mais suave. Os dentes helicoidais geram uma força axial e, para compensar essa força, recorre-se a uma fresa bi-helicoidal, ou seja, uma ferramenta que possui um dente afiado em um sentido e o dente seguinte afiado no sentido inverso (figura 9.13).



9.3 Tipos e característica de fresadoras

As fresadoras recebem a classificação de acordo com a posição de seu eixo-árvore em relação à mesa de trabalho. A ferramenta é fixada no eixo-árvore e a peça, na mesa de trabalho. A fresadora pode ser horizontal, vertical e universal. É horizontal, por exemplo, quando seu eixo-árvore é paralelo à mesa da máquina.

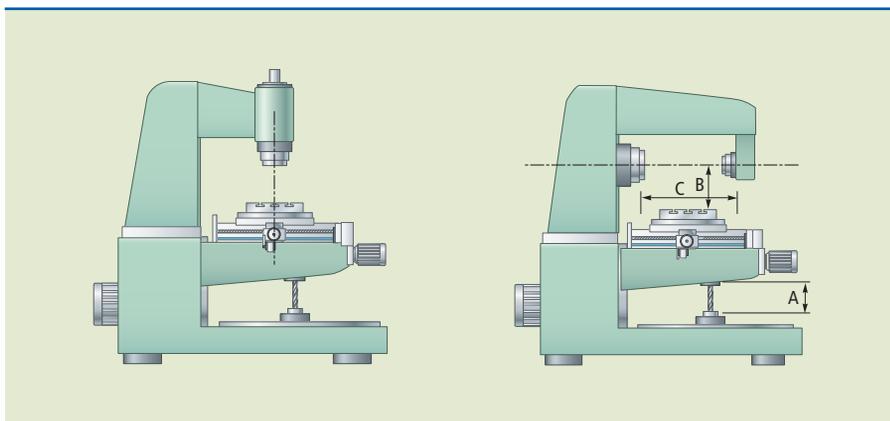
Uma das principais características da fresadora é usinar superfícies diversas situadas em planos paralelos, perpendiculares, ou formando ângulos diversos: construir ranhuras circulares, elípticas, realizar fresagem em formas esféricas, côncavas e convexas, com rapidez e precisão. Algumas outras características importantes da máquina fresadora:

- comprimento e largura da mesa, possibilidade de troca e giro da mesa;
- máximo deslocamento longitudinal e transversal da mesa, máximo deslocamento vertical do suporte da mesa, máxima altura da superfície da mesa em relação ao eixo principal (essas características definem o máximo tamanho de peça);
- maior e menor número de rpm (velocidade) do eixo principal e potência do motor;
- valor dos avanços da mesa em mm/min;
- peso que a máquina suporta sobre a mesa.

O conhecimento dessas características auxilia na hora de identificar a máquina nos catálogos comerciais, nos quais são explicadas com detalhes. A figura 9.14 mostra dois tipos de fresadoras, uma vertical e outra horizontal.

Fresadora horizontal

Nesse tipo de máquina, o eixo-árvore ocupa a posição horizontal, paralela à superfície da mesa. A peça é presa a um divisor ou a uma morsa e pode se deslocar em direção horizontal, longitudinal ou transversal. O deslocamento na altura pode ser feito pela mesa ou pelo cabeçote, dependendo da máquina.

**Figura 9.14**

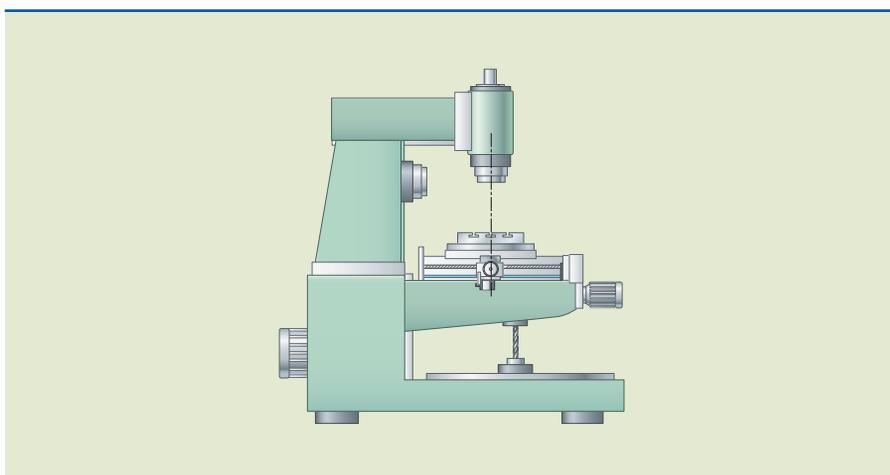
Fresadora vertical e fresadora horizontal.

Fresadora vertical

O eixo-árvoe ocupa posição vertical, perpendicular à superfície da mesa da máquina. A peça pode se deslocar em direção horizontal, longitudinal ou transversal. O deslocamento na altura é feito pela mesa. Sua fixação também pode ser por meio de um divisor ou de uma morsa.

Fresadora universal

Possui vários acessórios especiais: eixo porta-fresas, cabeçote universal, cabeçote divisor e contraponta, mesa circular e mesa inclinável. Os movimentos da peça podem ser: na direção dos três eixos, rotacionais nos dois sentidos ou simultâneos. Permite gerar diversos formatos na peça. É considerada uma máquina muito versátil e pode ser também vertical ou horizontal. A figura 9.15 mostra uma fresadora universal.

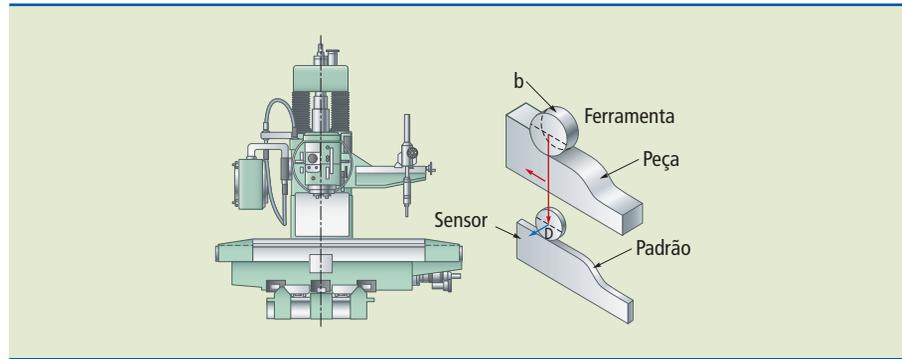
**Figura 9.15**

Fresadora universal.

Outras fresadoras

Há outros tipos de fresadoras, por exemplo, copiadora, cortadora de rodas dentadas e engrenagens, ferramenteira, pantográfica, portal etc. A figura 9.16 mostra uma fresadora copiadora.

Figura 9.16
Fresadora copiadora.



A **fresadora copiadora** realiza o fresamento, enquanto um dispositivo percorre um modelo para fresar copiando seu formato. A fresadora **pantográfica** também usina com base em um modelo, a diferença é que realiza detalhes que a copiadora não consegue.

9.3.1 Fresadora ferramenteira e fresadora portal

A fresadora ferramenteira (figura 9.17) destaca-se pela versatilidade, precisão e rendimento com auxílio de régua e indicador digital. Pode ser usada como fresadora vertical, com alguns recursos de movimento em seu cabeçote vertical girando no sentido dos eixos x , y e z . Em alguns momentos, pode ser operada como fresadora horizontal, montando-se nela um cabeçote especial que aciona o eixo horizontal. É possível montar em seu cabeçote: mandril porta-pinça, mandril universal ou de aperto rápido. A fresadora portal destaca-se por permitir fixar peças longas, por causa do maior comprimento da mesa, e altas, pela característica de fixação da ferramenta. Como exemplo de uso, são as usinagens de pequenas e médias séries, em ferramentarias de moldes de para-choque e outras matrizes de forjamento.

A fresadora CNC realiza os movimentos programados em três eixos: x , y e z . É muito utilizada na fabricação de moldes e necessita de programação com auxílio de computação CAM – computador no auxílio a manufatura.

Figura 9.17
Fresadora ferramenteira.



GARY CURTIS / ALAMY/OTHER IMAGES

Existem ainda os centros de usinagem horizontal, os centros de usinagem vertical e máquinas transfer, que realizam operações de fresamento.

A figura 9.18 mostra um centro de usinagem horizontal, com o operador atuando na carga e descarga de peças de um pallet, enquanto o outro pallet está em operação de usinagem.



DAVID WILLIAMS / ALAMY/OTHER IMAGES

Figura 9.18

Centro de usinagem horizontal.

9.4 Parâmetros de corte no fresamento – cálculos

Os principais parâmetros de corte no fresamento são:

V_C = velocidade de corte (m/min);

f_z = avanço por dente (mm/z) (figura 9.19);

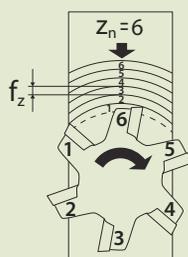


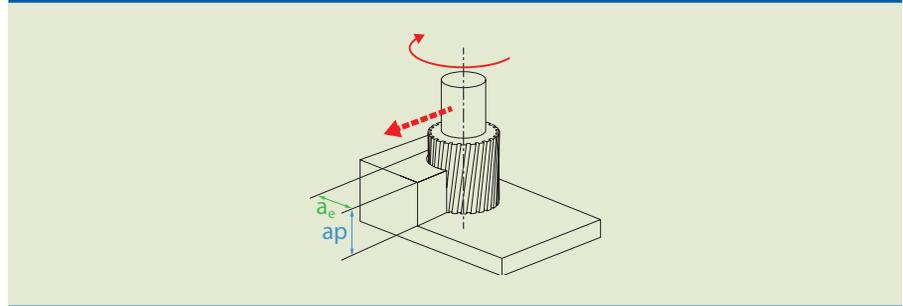
Figura 9.19

Avanço por dente (f_z).

V_f = avanço da mesa (mm/min);
 f_n = avanço por rotação (mm/rpm);
 a_e = profundidade de corte radial (mm) (figura 9.20);
 ap = profundidade de corte axial (mm) (figura 9.20);

Figura 9.20

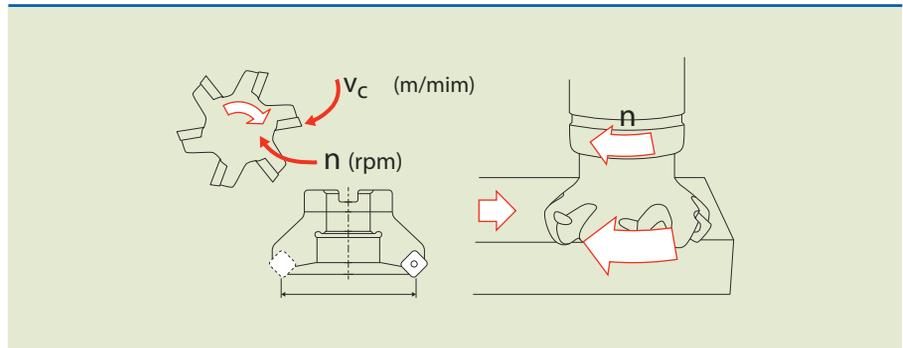
Profundidades de corte radial (a_e) e axial (ap).



D_C = diâmetro da fresa;
 n = rotação da ferramenta (rpm) (figura 9.21);
 Q = taxa da remoção de cavacos (cm^3/min).

Figura 9.21

Velocidade de corte (V_C [m/min]) e da ferramenta (n [rpm]).



Por exemplo, para os cálculos em fresamento:

Dados: $V_C = 225 \text{ m/min}$; $D_C = 125 \text{ mm}$.

Cálculo:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi \cdot D_C} = \frac{225 \cdot 1000}{3,14 \cdot 125}$$

$$n \approx 575 \text{ rpm}$$

Ainda, se $f_z = 0,21 \text{ mm}$; $Z_N = 5$; $ap = 4 \text{ mm}$; $a_e = 85 \text{ mm}$

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n$$

$V_f = 0,21 \cdot 5 \cdot 575 = 603 \rightarrow$ O valor de V_f é aproximadamente 600 mm/min.

Para o cálculo da remoção de cavaco, no exemplo, temos:

$$Q = \frac{ap \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$Q = \frac{4 \cdot 85 \cdot 600}{1000} = 204 \text{ cm}^3 / \text{min}$$

Para o cálculo da potência de corte (P_c), sabendo que o ângulo de posição da fresa é 45° , que o material da peça é aço de médio conteúdo de carbono (0,4% a 0,5% C) e o rendimento η aproximadamente 85%, temos:

$$P_c = \frac{a_e \cdot ap \cdot v_f \cdot K}{100\,000 \cdot \eta}$$

em que K é valor experimental obtido em laboratório. É a constante para o tipo de material a ser usinado, em função da relação a_e/D_C e do avanço da fresa f_z . Abaixo, parte da tabela 9.2 do catálogo da empresa Sandvik Coromant:

Tabela 9.2

Aço	$a_1 / D_1 = 0,8$			$a_2 / D_2 = 0,4$			$a_4 / D_4 = 0,2$		
	$f_1 = 0,1$	$f_2 = 0,2$	$f_4 = 0,4$	$f_1 = 0,1$	$f_2 = 0,2$	$f_4 = 0,4$	$f_1 = 0,1$	$f_2 = 0,2$	$f_4 = 0,4$
C = 0,10 - 0,25%	5,7	4,8	4,0	6,2	5,2	4,4	6,8	5,7	4,8
C = 0,25 - 0,55%	6,1	5,1	4,3	6,6	5,6	4,7	7,2	6,1	5,1
C = 0,55 - 0,80%	6,5	5,4	4,6	7,1	5,9	5,0	7,7	6,5	5,4
	6,9	5,8	4,8	7,7	6,3	5,3	8,2	6,9	5,8

Para $a_e = 85$ e $D_C = 125$ temos: $a_e/D_C \cong 0,7$.

Pode ser usada a coluna 0,8. O avanço f_z selecionado foi 0,21 inicialmente; pode ser usado, então, o valor de 0,2 na tabela 9.2. Para o material, seleciona-se entre 0,25 e 0,55% C, obtendo o valor $K = 5,14$.

O valor da potência consumida no fresamento com os dados considerados é dado por:

$$P_c = \frac{85 \cdot 4 \cdot 600 \cdot 5,1}{100\,000 \cdot 0,85}$$

$$P_C = 12,24 \text{ kW}$$

A potência do motor tem de ser maior do que 12,24 kW, com 575 rpm (avaliar a curva conjugado rpm · potência), para que a usinagem se realize.

Influência dos parâmetros

- A V_C é o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta por causa, principalmente, das altas temperaturas geradas. Um aumento da V_C tende a reduzir a vida da ferramenta.
- Em fresamento de topo reto, com Q constante, podemos aumentar a vida da ferramenta diminuindo a V_C e aumentando f_z .
- Para Q constante, a influência da redução de V_C na vida da ferramenta é maior do que a da redução de f_z .
- Os efeitos de a_p , a_e e da aplicação de fluido de corte sobre a qualidade superficial devem ser avaliados.

Origem de vibrações no fresamento

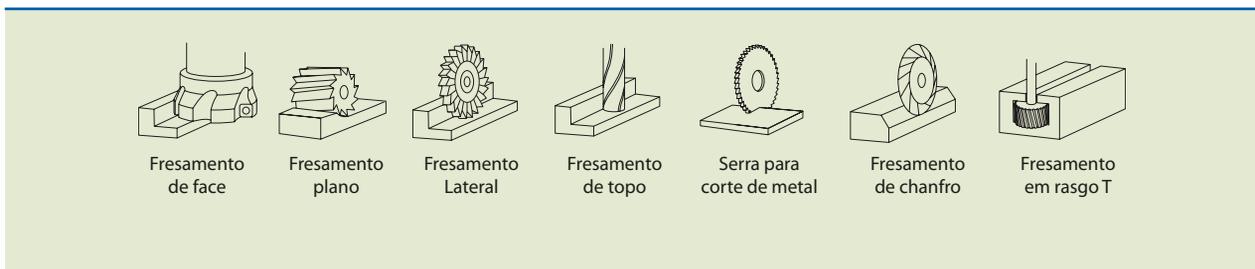
O quadro a seguir mostra as possíveis causas de vibrações no fresamento, assim como a solução proposta.

Possíveis causas	Soluções
Força surgida entre ferramenta e peça.	Colocar massas adicionais na máquina.
Frequência de contato do dente da fresa.	Alterar V_C , a_p ou n Deslocar o centro da fresa da posição frontal com a peça, em fresamento de face, se possível.
Ressonâncias surgidas no processo.	Mudar estratégia (concordante/discordante).
Folgas indevidas na fixação da peça.	Melhorar a fixação.

9.5 Tipos de fresamento e influências da operação

Figura 9.22
Tipos de fresamento.

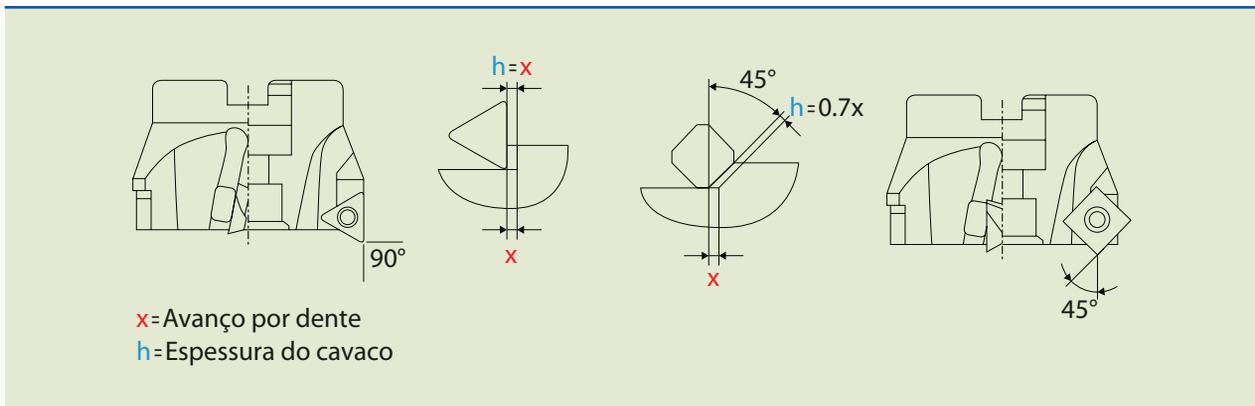
Basicamente, os tipos de fresamento são resumidos na figura 9.22, de acordo com a cinemática do processo.



A figura 9.23 mostra exemplo de fresamento de face.

Figura 9.23

Fresamento de face

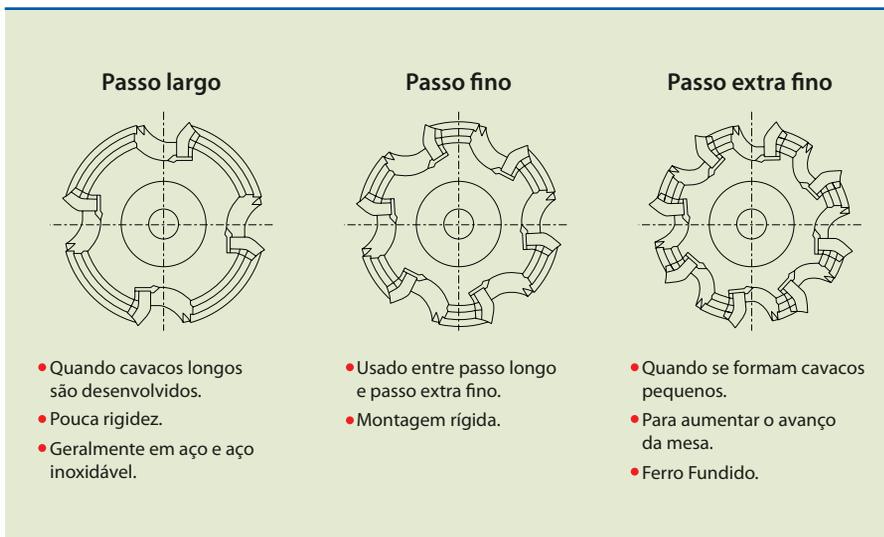


- Processo utilizado para usinagem de superfícies grandes e planas. Usar cabeçotes de fresar com insertos reversíveis com a_e consideravelmente maior que a_p .
- O ângulo de posição do gume tem grande influência sobre as forças ativas e passivas e, conseqüentemente, sobre a estabilidade do processo. Usam-se fresas com ângulo de posição de 90° apenas se forem exigidos cantos a 90° . Do contrário, utiliza-se ângulo de saída de faceamento, em geral a 45° .
- Selecionam-se tamanho e número de dentes do cabeçote de acordo com as dimensões da superfície e da potência de acionamento da máquina.

Alguns exemplos de passos são ilustrados na figura 9.24.

Figura 9.24

Escolha do tipo de passo.



- Para a usinagem de rasgos de chavetas e seções retangulares, usam-se fresas inteiriças ou com insertos reversíveis, adequando as características da ferramenta com os requisitos de produto.
- O fresamento de acabamento tem ganhado importância pela possibilidade crescente do trabalho completo em apenas uma máquina.

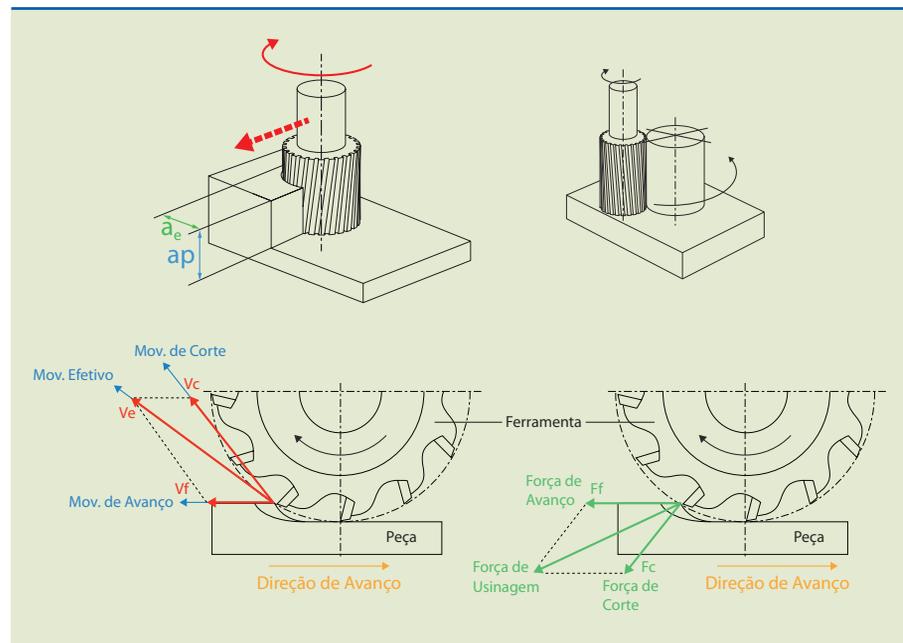
9.5.1 Ferramentas de acabamento

No fresamento com ferramentas de acabamento com grande número de insertos, usam-se ap e f_z de pequenos valores. Para evitar vibrações regenerativas do sistema, deve-se procurar utilizar cabeçotes providos de uma divisão não regular dos dentes (passo diferencial).

- **Fresamento tangencial** (figura 9.25)

Processo em que ap é bem maior do que a_e . Utiliza-se geralmente fresamento discordante. As ferramentas podem ser de aço rápido ou com insertos de metal duro. É preferível com dentes helicoidais, por existir menor solitação dinâmica. Ocorre força axial, que pode levar ao deslocamento da peça e/ou da ferramenta. Para obtenção de perfis com cantos vivos, selecionar a geometria da ferramenta.

Figura 9.25
Fresamento tangencial.



- **Fresamento de perfil**

As ferramentas para fresamento de perfil são adequadas à forma do perfil que deve ser executado, podendo ser maciças (fresas de forma em aço rápido) ou compostas. São utilizadas na usinagem de rasgos, raios, engrenagens e cremalheiras e em guias de máquinas-ferramenta.

- **Fresamento de topo**

É o processo de fresamento contínuo frontal e periférico, na usinagem de formas complexas, com o topo das fresas afiadas 90° ou com raio total no topo, por exemplo, em matrizes e moldes. Selecionam-se geometrias e ferramentas antivibratórias, em caso de grandes profundidades. Em situação normal, as vibrações

indicam desgaste acentuado, lascamentos do gume, erros de forma e dimensionais. A figura 9.26 mostra exemplos de fresas de topo.



Figura 9.26

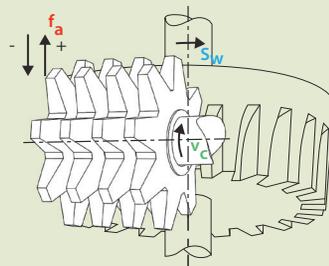
Exemplos de fresas de topo.

- **Fresamento de geração – altas séries de produção**

O fresamento de geração (figura 9.27) é comumente empregado por empresas especialistas em fabricação de engrenagens diversas. O perfil evolvente do dente é obtido pelo movimento entre a ferramenta e a peça. Os dentes da engrenagem podem ser cortados com uma fresa de forma, conforme o espaço entre os dentes. Em geral, usa-se a ferramenta chamada caracol (figura 9.28), e cada dente do caracol retira cavacos sempre com a mesma forma geométrica. Pode ser utilizado, ainda, o cortador (*shapping*). A seleção é feita em função da atividade a ser executada, que define também o tipo de máquina utilizada.

Cortador (*shapping*)

Cortador para gerar dentes de engrenagem em que há dificuldades ou não existe espaço suficiente para a movimentação da ferramenta no início e final do ciclo de fresamento dos dentes, se for usado outro processo. O movimento do cortador é alternado na vertical e, após uma rotação da peça, a engrenagem está pronta.



v_c Velocidade de corte
 f_a Avanço axial
 s_w Avanço da engrenagem

Figura 9.27

Geração por fresamento.

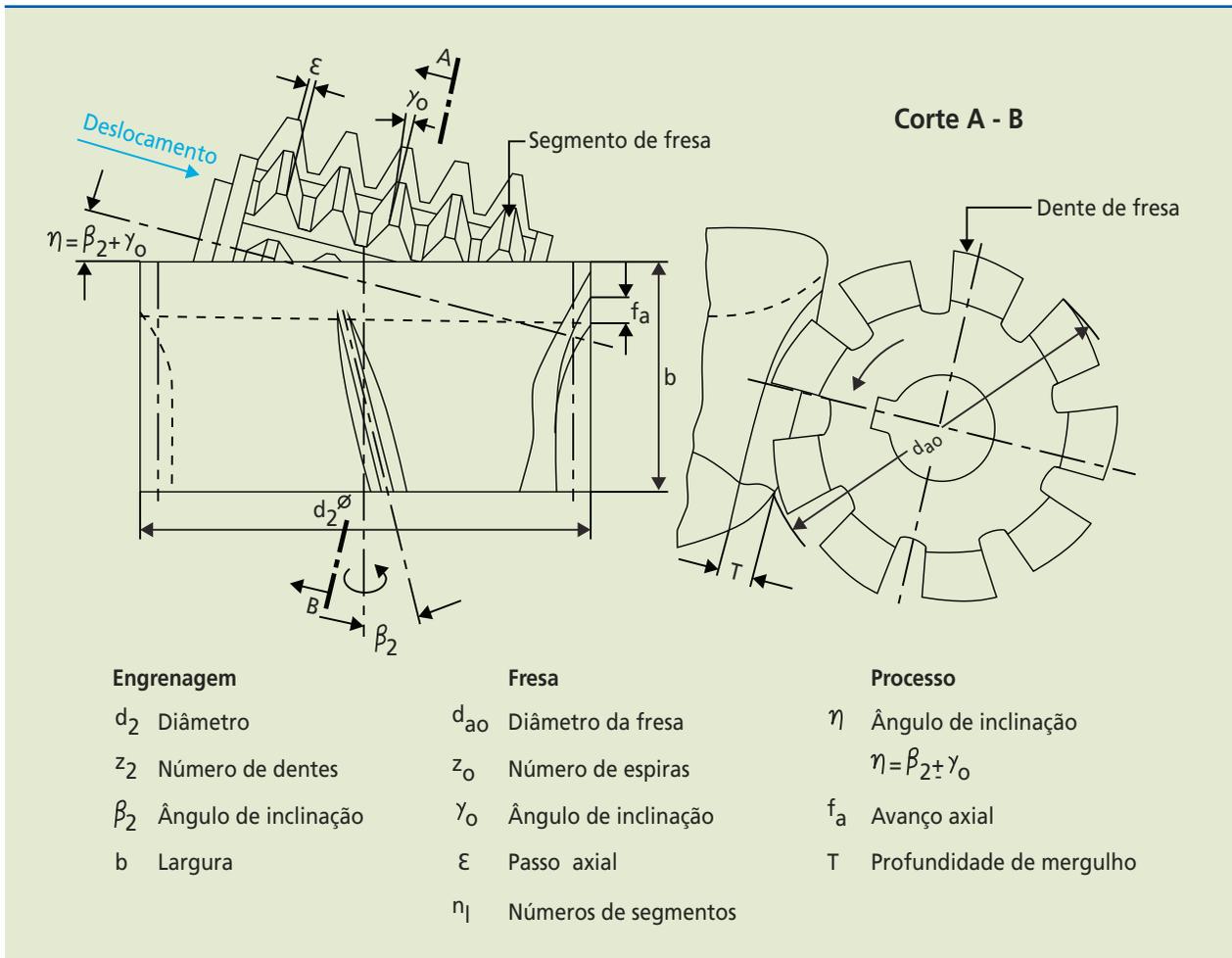


Figura 9.28

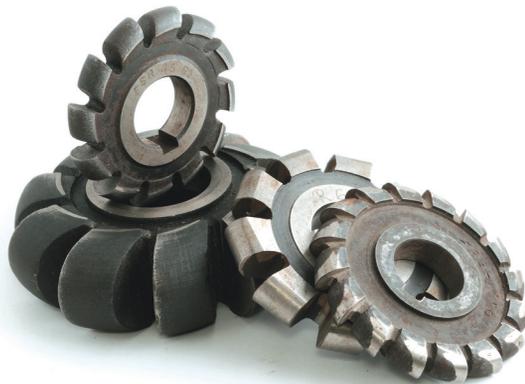
Fresa caracol.

Fresa caracol

Utiliza um cortador denominado fresa caracol, que tem dentes em uma hélice como um parafuso sem-fim. Possui perfil detalhado na parte posterior das arestas de corte.

Figura 9.29

Cortador (*shapping*).



MARIUS GRADINARU/SHUTTERSTOCK

Na figura 9.30 é possível observar uma foto da geração de uma engrenagem de grande porte.

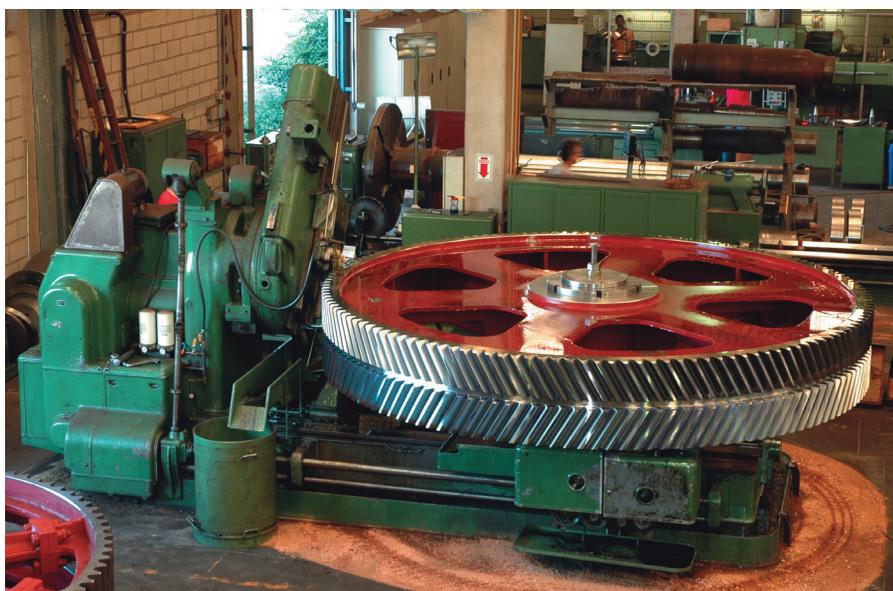


Figura 9.30

Exemplo de geração de engrenagem de grande porte.

Após o fresamento, é feito o acabamento dos dentes da engrenagem. As operações de acabamento são necessárias para engrenagens que funcionam com altas velocidades, têm grande capacidade de carga, alta durabilidade e baixo ruído no funcionamento. São aplicados quatro métodos de acabamento de dentes:

- rasqueteamento rotativo (*shaving*);
- acabamento por rolamento (*roll-finishing*);
- retificação;
- lapidação.

9.6 Usinagem de carcaças

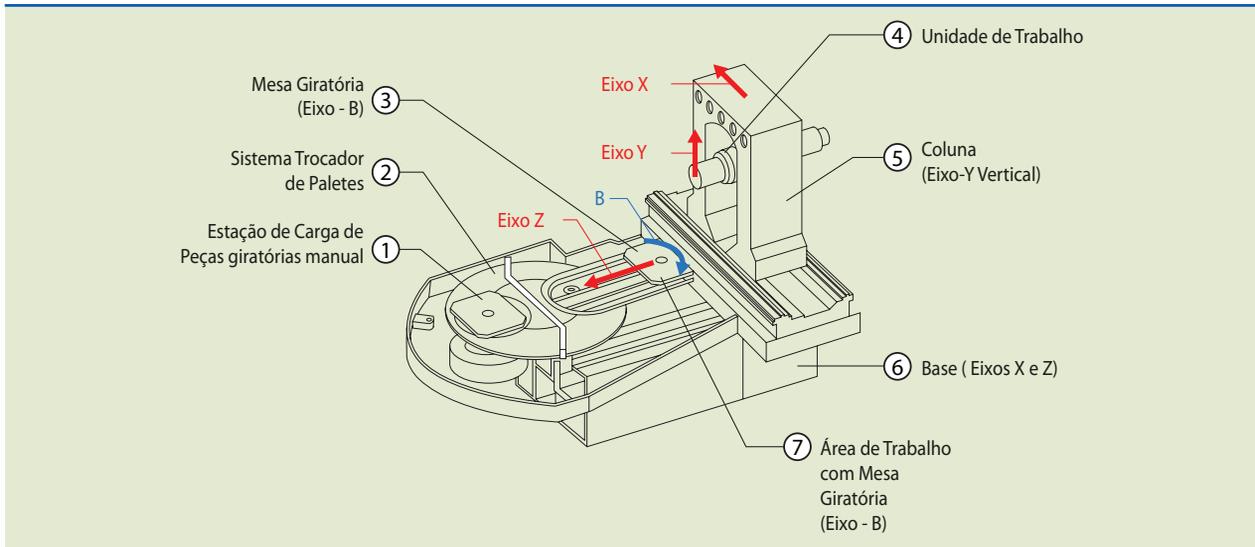
Na usinagem de carcaças, os desvios de forma e posição precisam ser previstos, dentro dos limites estabelecidos no projeto da peça. Dentre eles, citamos:

- paralelismo e perpendicularismo dos eixos de simetria dos furos de precisão, entre si e entre as superfícies planas, e desvios de forma dos furos;
- alinhamento de furos de assento de rolamentos e distâncias entre centros especificadas;
- perpendicularismo entre as faces de referência com as linhas de centro dos furos de precisão;
- planicidade das superfícies planas de contato, sem marcas de saliência comuns no encontro de passes de fresamento.

As operações de usinagem de carcaças mais comuns são: fresamento frontal ou faceamento, mandrilamento, furação, alargamento e roscamento.

Essas operações são cada vez mais executadas em máquinas-ferramenta chamadas centro de usinagem, principalmente horizontal. São máquinas de uso múltiplo, que substituem as fresadoras, furadeiras e outras máquinas. São utilizadas na usinagem de peças de porte em geral, como carcaças de transmissões, carcaças de válvulas, carcaças de motores automotivos (bloco e cabeçote). As informações técnicas das operações de usinagem são as mesmas quando são usados os centros de usinagem, com a facilidade de executar operações de forma mais versátil e adequada às necessidades da indústria. A figura 9.31 ilustra o arranjo típico de um centro de usinagem.

Figura 9.31
Arranjo típico do centro de usinagem horizontal.



A unidade de trabalho (eixo-árvore) fixa as ferramentas automaticamente, em ciclo, a partir de um magazine de ferramentas. A mesa giratória (eixo B) possibilita a usinagem em múltiplas faces. Enquanto a peça está sendo usinada na área de trabalho, o operador retira a peça que foi usinada anteriormente e coloca uma nova peça, com o uso de dispositivos de fixação manual ou hidráulico, podendo ser mais de uma peça. O sistema automático trocador de paletes realiza a inversão de posicionamento dos paletes ao final do ciclo de usinagem daquele que está na área de trabalho, reduzindo tempos de parada de máquina.

Em versões de máquinas de cinco eixos, a unidade de trabalho posiciona angularmente ou faz movimentos combinados típicos em três dimensões (3D).

Operações comuns na usinagem de carcaças

- **Faceamento** – em geral é a operação inicial, que visa realizar uma superfície de referência para todas as operações posteriores. As operações de fresamento de desbaste e de acabamento são executadas para garantir planicidade e acabamento superficial necessários.
- **Furação, alargamento e roscamento** – são as operações posteriores ao faceamento, mas a furação ocorre sempre preliminarmente ao alargamento e roscamento, ou para executar um furo simples sem operação posterior. Os roscamentos são feitos para fixar componentes na montagem do conjunto.

O alargamento é executado após a furação. É uma atividade de maior precisão dimensional e que merece cuidado extremo, em que serão montados pinos, rolamentos e outros componentes de precisão.

9.7 Principais acessórios

Os principais acessórios utilizados em operações de fresamento são necessários para a fixação da peça na mesa de trabalho e para a fixação das ferramentas.

9.7.1 Acessórios para a fixação da peça

Parafusos e grampos de fixação, calços e cantoneiras de ângulo fixo ou ajustável são acessórios comuns para fixação da peça (figura 9.32).

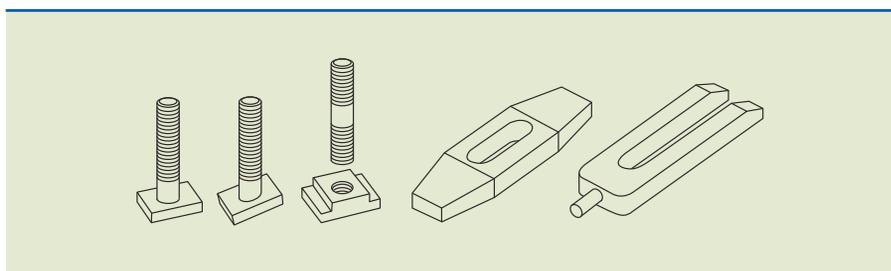


Figura 9.32

Elementos de fixação da peça.

A instalação de acessórios na mesa de trabalho da fresadora deve ser realizada com muita atenção, para evitar erros dimensionais na usinagem. Por exemplo, ao instalar a morsa, é preciso fazer seu alinhamento com auxílio de um relógio comparador, apalpando seu mordente fixo, que deverá ficar paralelo ao movimento da mesa.

Verificar se não há elementos entre a face da morsa e a mesa da máquina, como cavacos, que mantenham a morsa ligeiramente inclinada no plano paralelo da mesa. Verificar o curso dos eixos, o peso máximo admissível sobre a mesa, entre outros. Atentar para a segurança de operação. A figura 9.33 mostra um tipo de morsa manual.

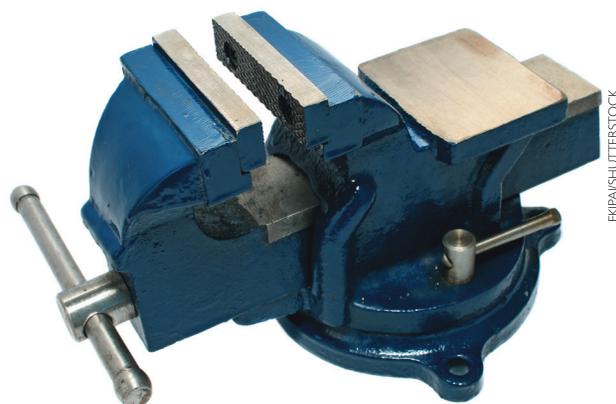


Figura 9.33

Morsa manual.

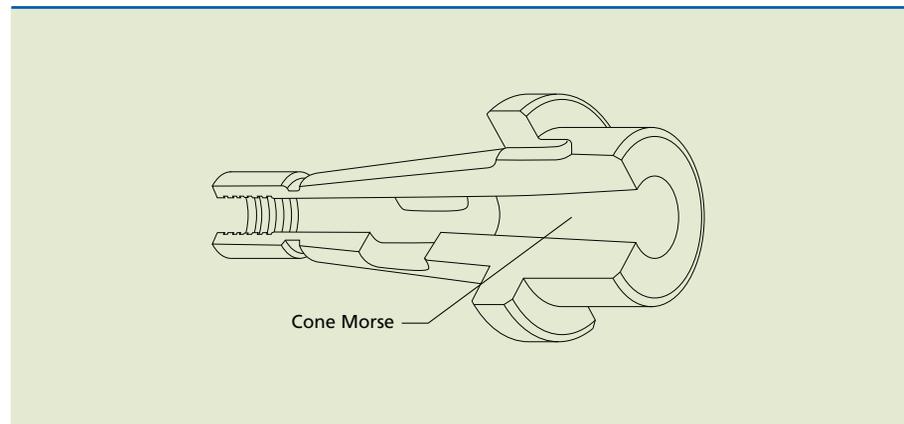
As mesas de seno são utilizadas para poder usinar faces em qualquer ângulo, necessitando ser ajustado o ângulo pelo operador.

9.7.2 Acessórios para a fixação das ferramentas

O eixo-árvore das fresadoras possui um cone interno e chavetas na face, para o alojamento dos acessórios de fixação de ferramentas. A chaveta faz a transmissão quando o eixo-árvore inicia a rotação. Para garantir a fixação, nas máquinas convencionais, é utilizada uma haste rosçada que atravessa a árvore e, em máquinas CNC, pelo recurso da troca automática, é utilizado um sistema hidráulico. Um mandril adaptador, como o mostrado na figura 9.34, tem uso frequente.

Figura 9.34

Mandril adaptador para ferramentas de haste cônica – na ponta do mandril, a rosca onde se fixa a haste rosçada.

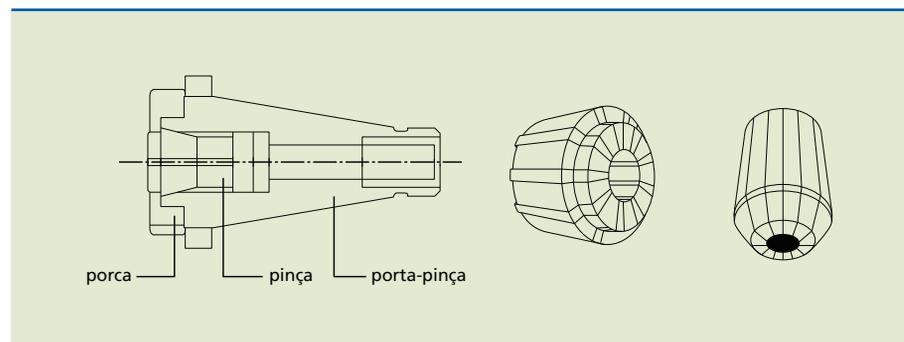


Podem ser usados três tipos de mandril: universal (Jacobs), porta-piça e porta-ferramenta. O mandril universal é empregado em fresadoras, com as restrições de fixar ferramentas de haste cilíndrica e com pressão de corte pequena, no sentido axial (uso de brocas, por exemplo).

Com o mandril porta-piça (figura 9.35), a ferramenta fica mais rígida pela maior força de fixação desse adaptador. A pinça possui cortes longitudinais que lhe dão flexibilidade de fechar o furo central e travar a haste da ferramenta ao rosquear uma porca externa. Com esse sistema, podem ser realizados pequenos a médios esforços radiais na usinagem, como fresamentos tangenciais com fresa topo.

Figura 9.35

Mandril porta-piça e dois modelos de pinças.



Na figura 9.36 são ilustrados mandris porta-ferramenta para fresamentos que requerem grandes esforços radiais: curto com chaveta longitudinal e com chaveta transversal para arraste.

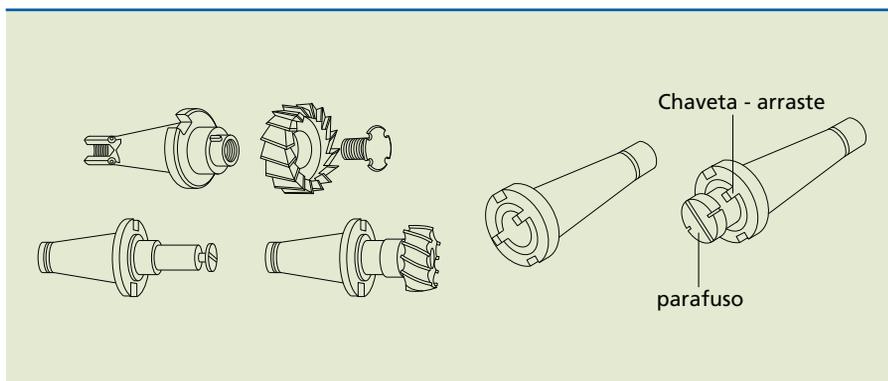


Figura 9.36

Mandris porta-ferramenta para fresamentos.

9.8 Fresamentos com aparelho divisor

O aparelho divisor é um acessório utilizado nas fresadoras para fazer posicionamentos angulares diversos da peça rotacionando-a. É possível usinar múltiplas faces e gerar polígonos diversos como sextavados e quadrados, fresar dentes de engrenagens e outros perfis. A peça é fixada na placa do cabeçote divisor. Se o comprimento da peça (L) for maior que uma vez e meia o diâmetro da peça (D), é necessário usar uma contraponta na outra extremidade, apoiada em um furo de centro, como mostrado na figura 9.37.

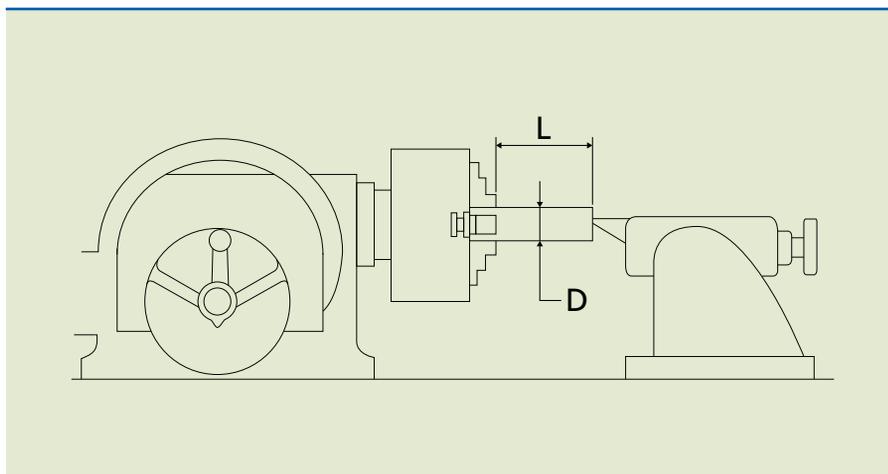


Figura 9.37

Emprego de contraponta.

9.8.1 Fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos

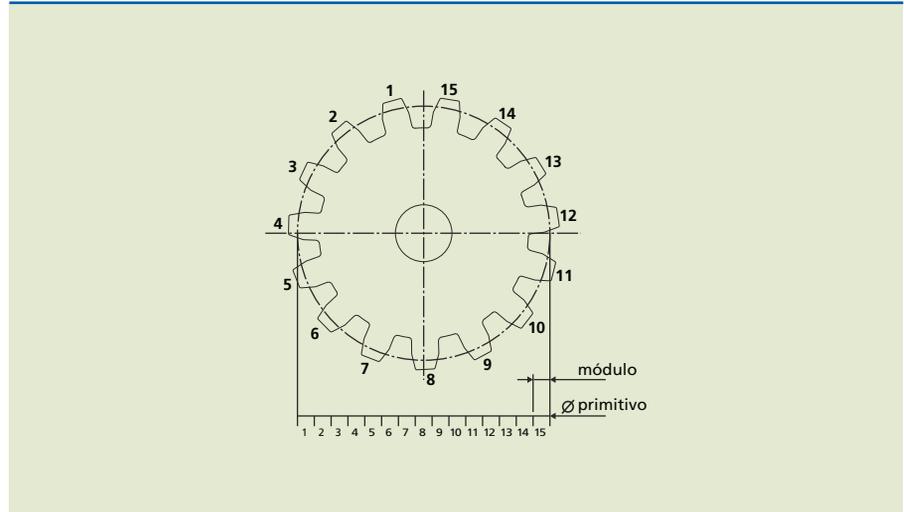
A geração de dentes de engrenagens pode ser feita alternativamente para lotes pequenos ou unitários, de peças sem grande exigência de tolerância dimensional, com fresas de perfil constante, chamadas fresas módulo. A peça é fixada no divisor e é usinada uma ranhura de cada vez, sendo posicionado entre elas o divisor na nova posição de fresamento, com grande dependência do operador.

Procedimento para fresar engrenagem de dentes retos

O módulo de uma engrenagem (m) é o quociente entre o diâmetro primitivo (d_p) e o número de dentes (Z), já que $d_p = m \cdot Z$. Na figura 9.38, na engrenagem, $m = 1$ mm; $d_p = 15$ mm e $Z = 15$ dentes.

Figura 9.38

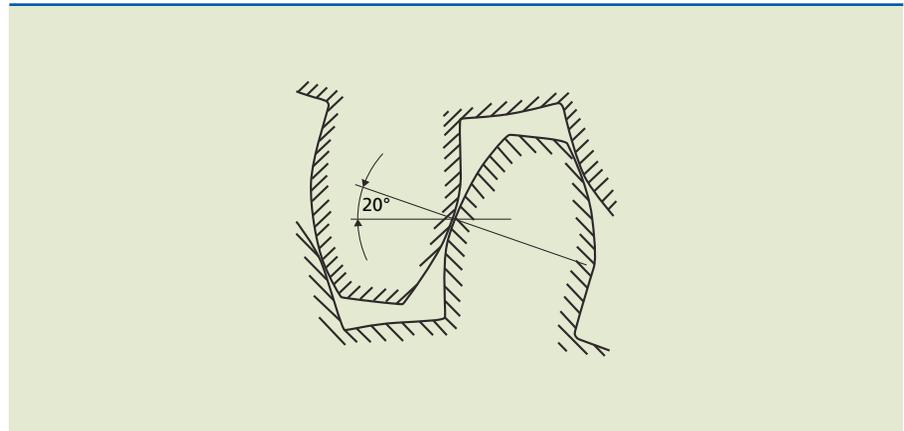
Engrenagem mostrando o módulo, diâmetro primitivo e número de dentes.



O módulo define as dimensões de uma engrenagem. No contato da transmissão do par de engrenagens, é definido o diâmetro primitivo das engrenagens. Nesse ponto localiza-se o chamado ângulo de pressão, que em geral é de 20° (ver figura 9.39).

Figura 9.39

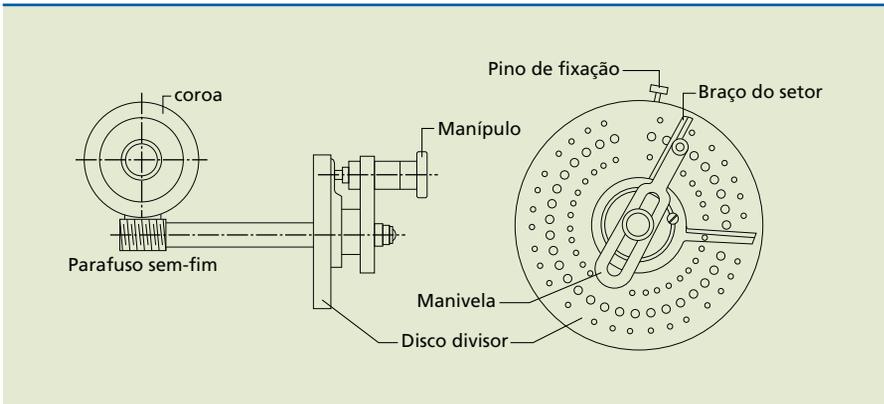
Ângulo de pressão da engrenagem.



O desenho de fabricação da peça informa o valor do módulo e o número de dentes da engrenagem. Nas engrenagens cilíndricas de dentes retos, os dentes são paralelos ao cubo da engrenagem. A figura 9.40 mostra um esquema de partes de um divisor. Os parâmetros para conferir se o diâmetro externo da peça usinada está correto são os seguintes:

$$d_p = m \cdot Z \quad d_p: \text{diâmetro primitivo}$$

$$d_E = d_p + 2 \cdot m \quad d_E: \text{diâmetro externo}$$

**Figura 9.40**

Esquema de partes de um divisor.

Calcula-se agora a movimentação a fazer no divisor, para posicionar e executar cada vão, formando os dentes. A equação a seguir determina a divisão indireta, verificando a possibilidade de maior número de divisões:

$$n = (R_D/Z);$$

R_D = relação do divisor;

Z = número de divisões a efetuar.

A relação do divisor é de 40 : 1 – 60 : 1 – 80 : 1 – 120 : 1. A mais utilizada é 40 : 1, $R_D = 40$, ou seja, a cada volta da coroa (e da peça) serão necessárias 40 voltas do parafuso sem-fim através da manivela. Como acessório, os divisores são fornecidos com discos furados. Em geral, um aparelho divisor é fornecido com discos contendo quantidades diferentes de furos, igualmente espaçados entre si. Um exemplo de fornecimento de discos é mostrado no quadro seguinte:

Discos	Furos								
Disco 1	15	18	20	23	27	31	37	41	47
Disco 2	16	17	19	21	29	33	39	43	49

Em um disco de 27 furos, executa-se o cálculo:

$$n = \frac{RD}{Z} \quad n = \frac{40}{27}$$

$$\begin{array}{r} 40 \overline{) 27} \\ \underline{13} \\ 1 \end{array}$$

discos
volta

furos

Como resultado, sabemos que é preciso girar uma volta e mais 13 furos em um disco de 27 furos para fresar cada vão de dente.

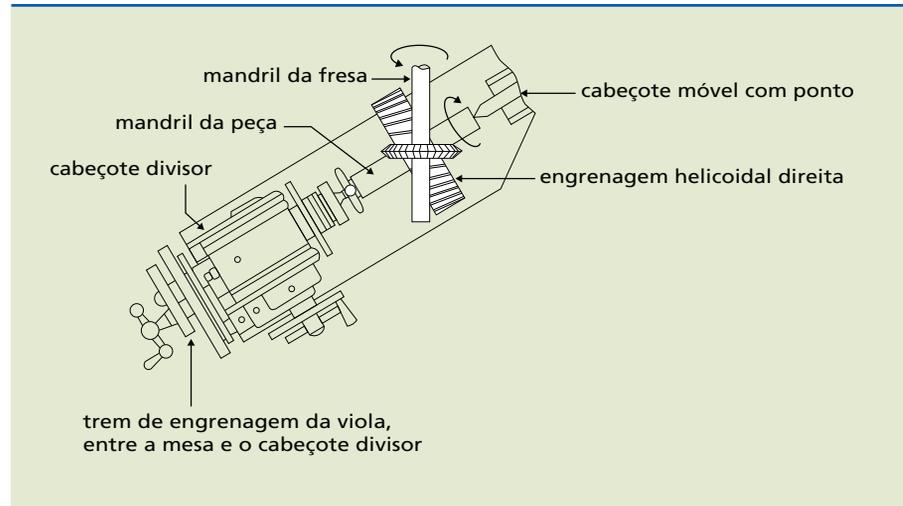
Para saber quanto a ferramenta deve penetrar, fazemos o cálculo:

h : altura do dente $\rightarrow h = 2,166 \cdot m$ (usado para Diametral Pich; para módulo em mm, usamos $2,2 \cdot m$ – conforme DIN 867 e 862).

9.8.2 Fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais

O fresamento de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais obedece às informações geométricas de uma hélice, montando-se a mesa para fabricação da hélice e o recâmbio.

Figura 9.41
Inclinação da mesa.



Ao operar fresadoras e centros de usinagem, é preciso conhecer todos os movimentos e formas de operar. É necessário utilizar os EPIs de forma adequada, não manusear cavacos, verificando sempre as condições de uso em geral, a fim de evitar acidentes.