

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE
TORNEAMENTO-FRESAMENTO-FURAÇÃO

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO
Prof. Dr. JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA
Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Abril 2018

ÍNDICE

1 - TORNEAMENTO.....	3
1.1 – A MÁQUINA.....	3
1.2 – FIXAÇÃO DAS PEÇAS	9
1.3 – OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO.....	15
1.4 – FERRAMENTAS	15
2 – FRESAMENTO.....	18
2.1 – A MÁQUINA.....	19
2.2 – FIXAÇÃO DAS PEÇAS	22
2.3 – OPERAÇÕES DE FRESAMENTO.....	23
2.4 – FERRAMENTAS DE FRESAMENTO.....	24
2.5 – CABEÇOTE DIVISOR.....	27
3.- FURAÇÃO.....	28
3.1 – A MÁQUINA.....	29
3.2 – AS OPERAÇÕES DE FURAÇÃO.....	30
3.5 – FERRAMENTAS DE FURAÇÃO.....	31

As máquinas apresentadas nesta prática, torno, fresadora e furadeira, são as mais básicas e antigas utilizadas para a fabricação mecânica, especificamente para a remoção de material por meio da usinagem. Fundamentalmente o torno é usado para produzir superfícies de revolução sobre um eixo da peça. A fresadora, por sua vez, produz superfícies planas e pode ser usada também para furação, embora a máquina mais adequada seja a furadeira.

1 - TORNEAMENTO

1.1 – A máquina

O torno é uma máquina-ferramenta muito versátil utilizada, comumente, na fabricação de eixos, polias, pinos, qualquer tipo possível e imaginável de roscas, peças cilíndricas internas e externas, além de cones, esferas e diversas outras peças mecânicas para indústrias das mais variadas naturezas. A Figura 1.1 mostra alguns exemplos de peças fabricadas exclusivamente por torneamento.



Figura 1.1 – Exemplo de peças fabricadas por torneamento.

O torno é uma das máquinas mais antigas e, portanto, mais desenvolvidas. Basicamente esta máquina-ferramenta, no modelo universal, é composta de algumas partes comuns a todos os modelos: cabeçote fixo, placa de fixação da peça (placa de 3 castanhas fechamento simultâneo), barramento, cabeçote móvel, carro principal, carro transversal, carro superior e torre para fixação das ferramentas. A Figura 1.2 mostra essas partes em um torno do tipo universal.

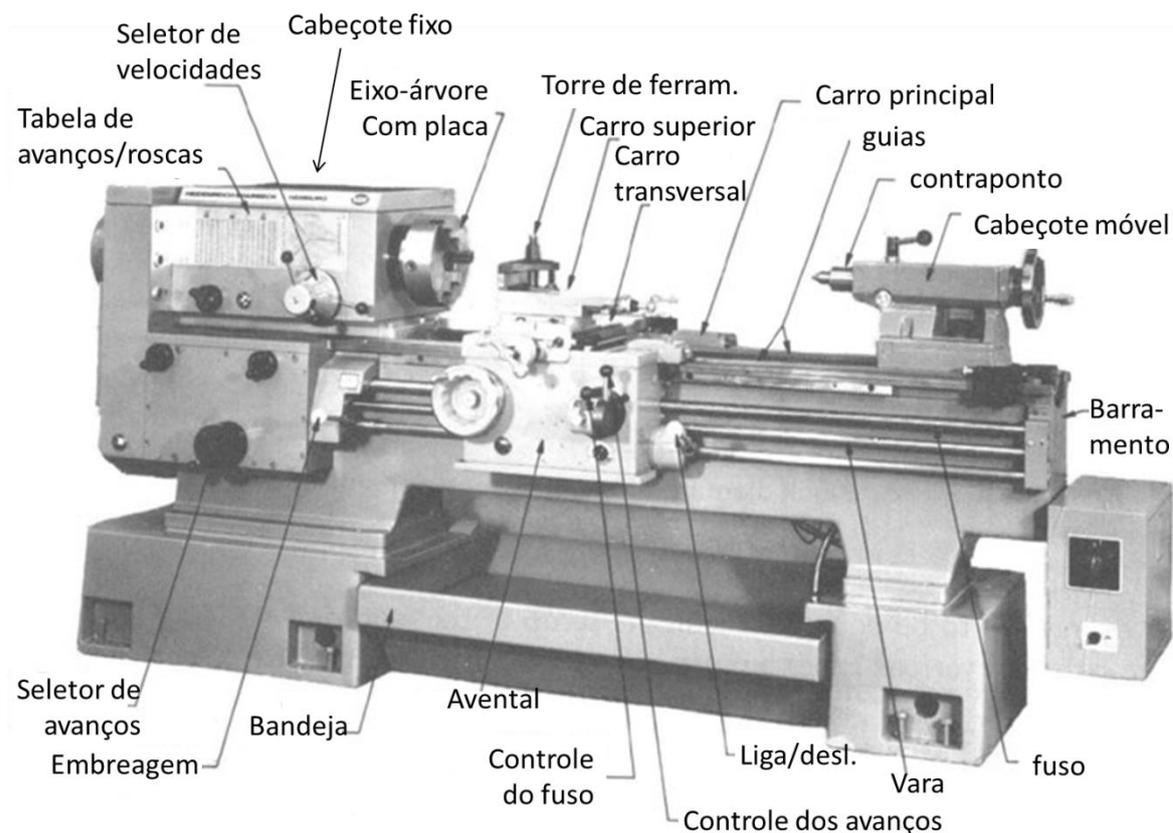


Figura 1.2 – Torno universal com algumas das suas partes básicas.

A maioria dos tornos possui eixo de rotação horizontal, como o universal mostrado na Figura 1.1. No entanto outro modelo de torno, menos conhecido, mas também bastante útil para peças de grande volume e peso é o torno vertical, no qual o eixo de rotação é vertical. A Figura 1.2 mostra um exemplo desse modelo.

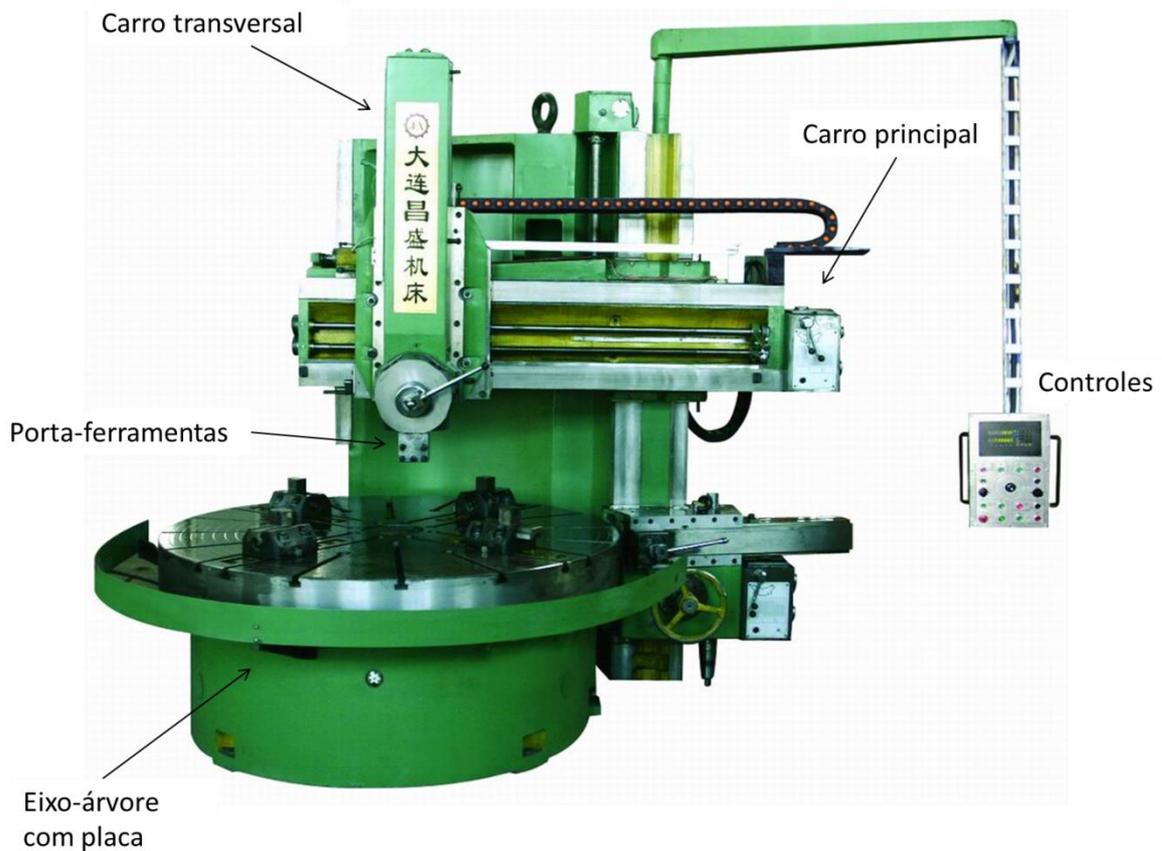
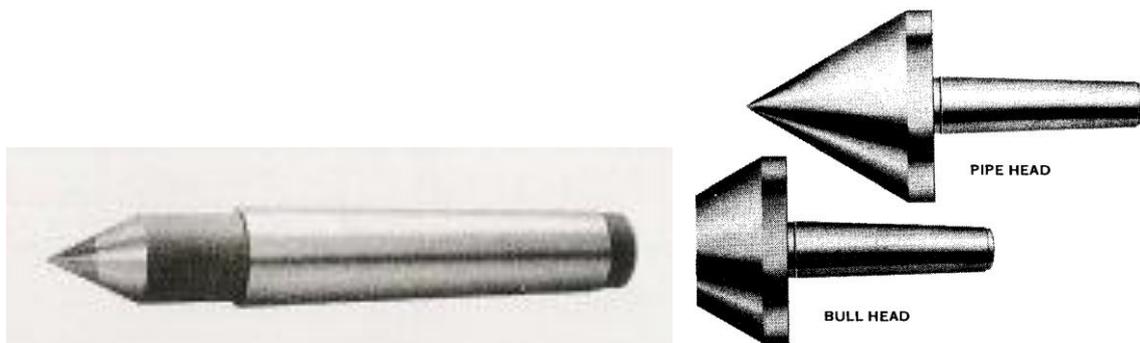
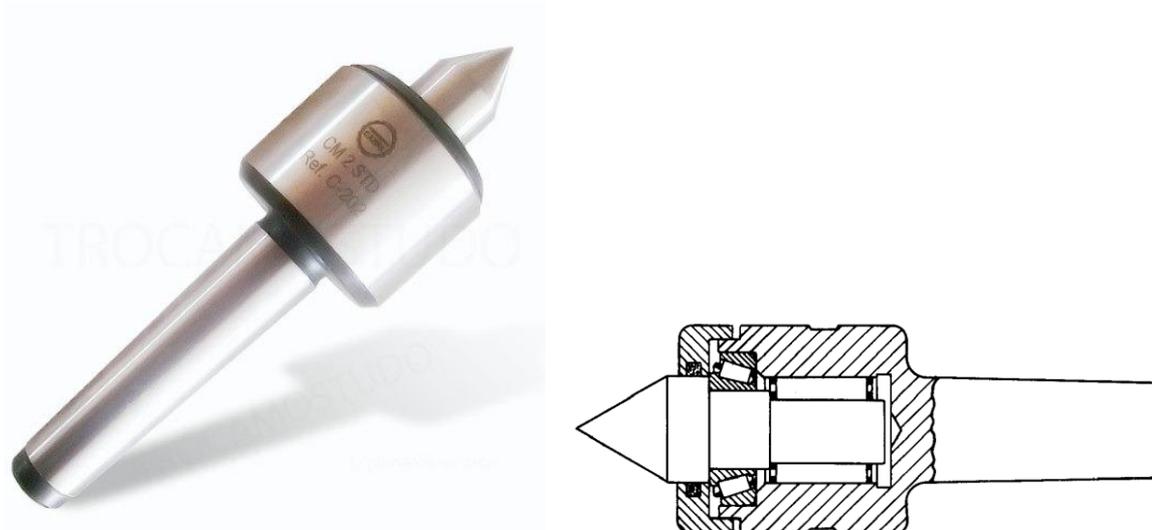


Figura 1.2 – Exemplo de torno vertical

O cabeçote fixo abriga o eixo-árvore, o principal eixo do torno, no qual se fixa a peça a ser torneada, usando um dos sistemas de fixação descritos a seguir. O eixo-árvore contém, na maioria dos tornos, rolamentos de alta precisão e rigidez, o que deve garantir a circularidade das peças torneadas. Em geral o cabeçote fixo se assenta sobre o barramento, o qual possui as guias de deslocamento dos carros e onde se assenta o cabeçote móvel. Este, por sua vez contém o contraponto, necessário como apoio para o torneamento de peças longas. Contrapontos podem ser fixos ou rotativos, conforme mostrados na Figura 1.3.



(a) Contrapontos fixos



(b) Contrapontos rotativos

Figura 1.3 – Exemplos de contrapontos fixos e rotativos.

Os contrapontos fixos são utilizados nas placas de centro, do lado do cabeçote fixo, ou no cabeçote móvel, quando se deseja mais rigidez na fixação da peça. Como há o perigo de excessivo aquecimento com o contraponto fixo, pode-se utilizar o contraponto rotativo para aliviar esse aspecto.

O barramento do torno possui as guias de deslizamento do carro principal e se constitui na estrutura de sustentação e dá a rigidez necessária ao torno para suportar os esforços de corte, com o mínimo de distorção e de vibração, sendo um dos principais responsáveis pela qualidade das peças produzidas pela máquina.

O carro principal desliza sobre o barramento, sendo este um dos responsáveis pela linearidade que compõe a circularidade das peças torneadas. O barramento pode ser de guias prismáticas, retangulares, ou de esferas, sendo estas últimas as mais usadas em tornos CNC e as primeiras em máquinas mais antigas e convencionais. A Figura 1.4 mostra em maiores detalhes os carros de um torno universal.

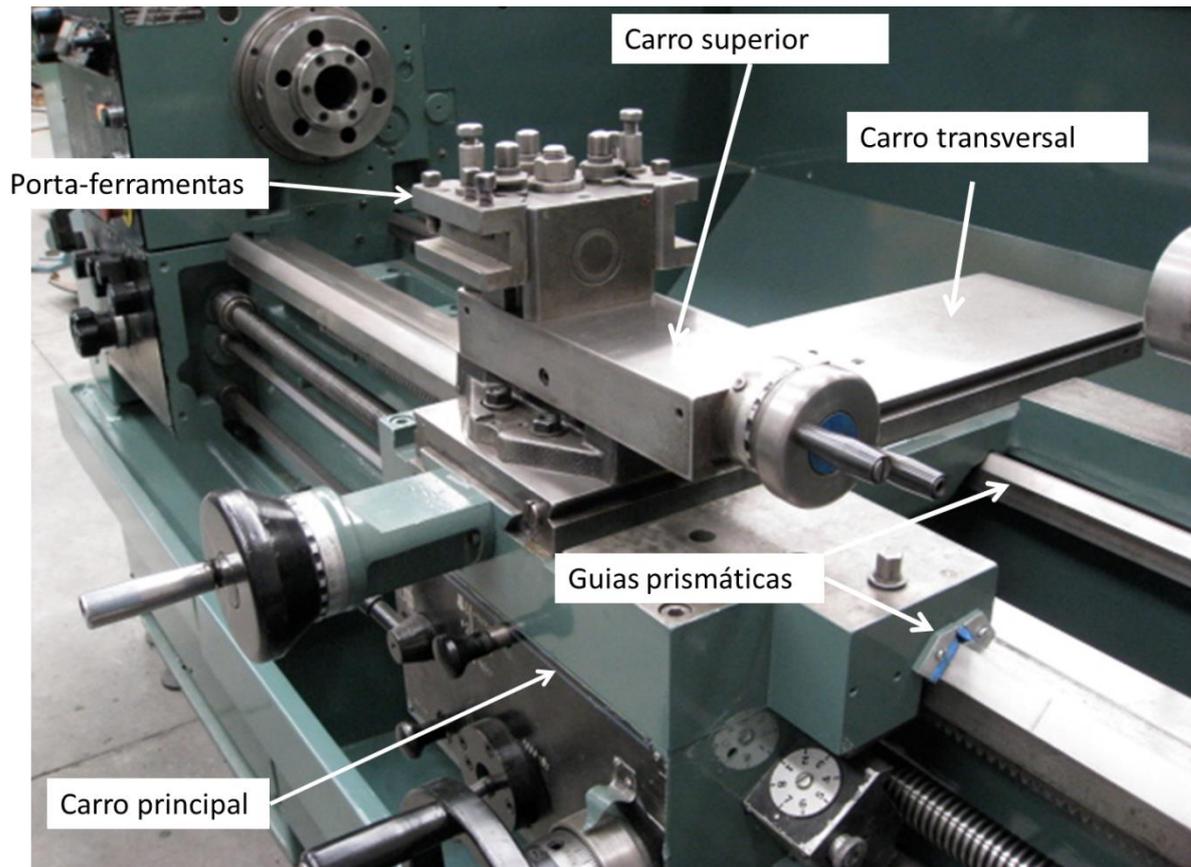


Figura 1.4 – Detalhes dos carros de um torno universal

O carro transversal assenta-se sobre o principal e corre perpendicular ao eixo de giro do torno. É o principal responsável pela precisão dimensional no diâmetro das peças torneadas. O carro superior assenta-se sobre o transversal e corre paralelo ao eixo de giro do torno, sendo esta a mesma direção do carro principal. É mais usado quando se deseja um deslocamento mais sensível do que aquele conseguido com o carro principal. É também usado quando se deseja tornear um cone, conforme mostrado na Figura 1.5.

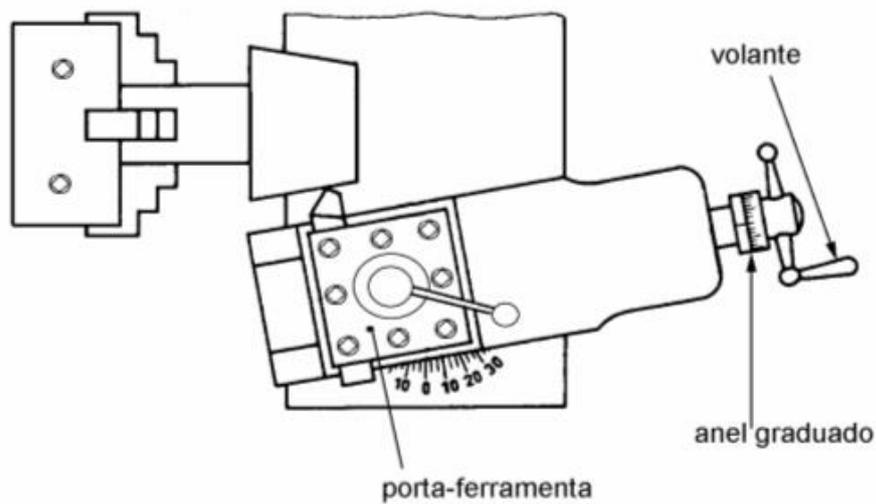


Figura 1.5 – Exemplo de como toronar um cone usando o carro superior.

O carro porta-ferramentas, ou torre porta-ferramentas é usado para fixar as ferramentas de corte a serem usadas no torneamento. Nos modelos universais, normalmente, tem espaço para 4 ferramentas e pode ser indexado para que cada ferramenta atue separadamente. A Figura 1.6 mostra uma ferramenta fixada no porta-ferramentas de um torno universal.

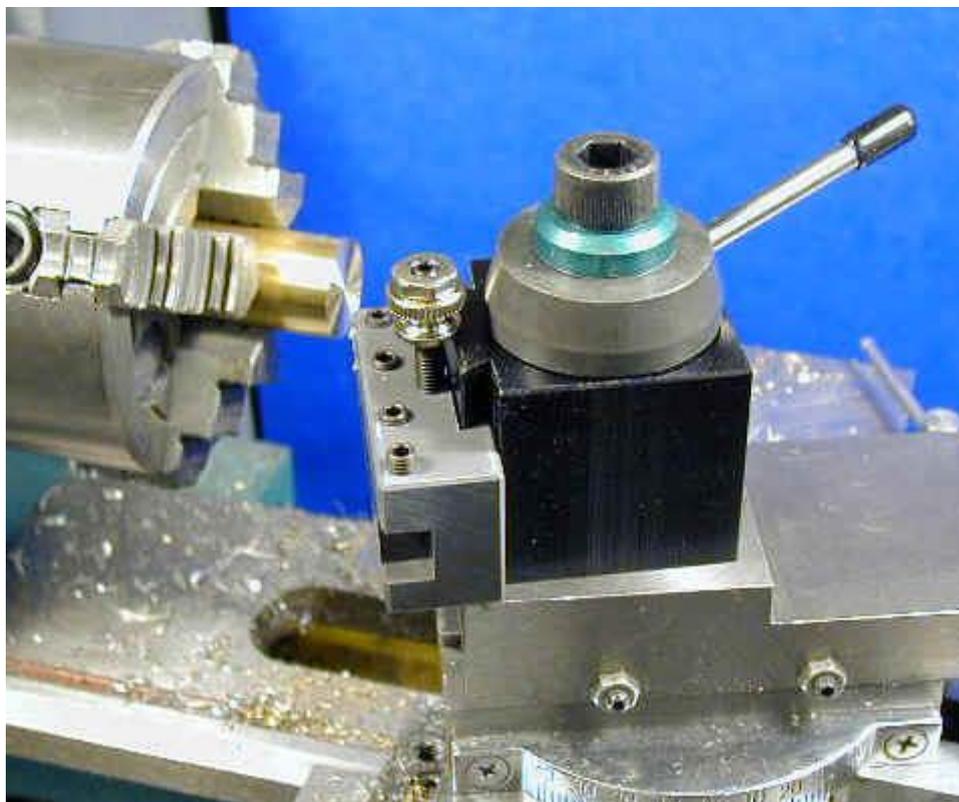


Figura 1.6 - Exemplo de ferramenta fixada no porta-ferramentas de um torno universal.

Nos tornos CNC, pode-se fixar um número maior de ferramentas e em certos casos um magazine também pode estar presente. A Figura 1.7 mostra um exemplo do carro de ferramentas para um torno CNC.



Figura 1.7 – Exemplo de carro porta-ferramentas de um torno CNC.

1.2 – Fixação das peças

A fixação das peças para as operações de torneamento, pode ser feita de 3 maneiras: placa de 3 castanhas simultâneas, placa de 4 castanhas independentes e placa com ponto de centro. A placa de 3 castanhas simultâneas permite a fixação de peças centradas, desde que a forma inicial cilíndrica seja de boa qualidade, ou seja poligonal com número de lados múltiplo de 3 e com boa simetria em relação ao centro. A Figura 1.8 mostra exemplos de placas de 3 castanhas e seu mecanismo interno.

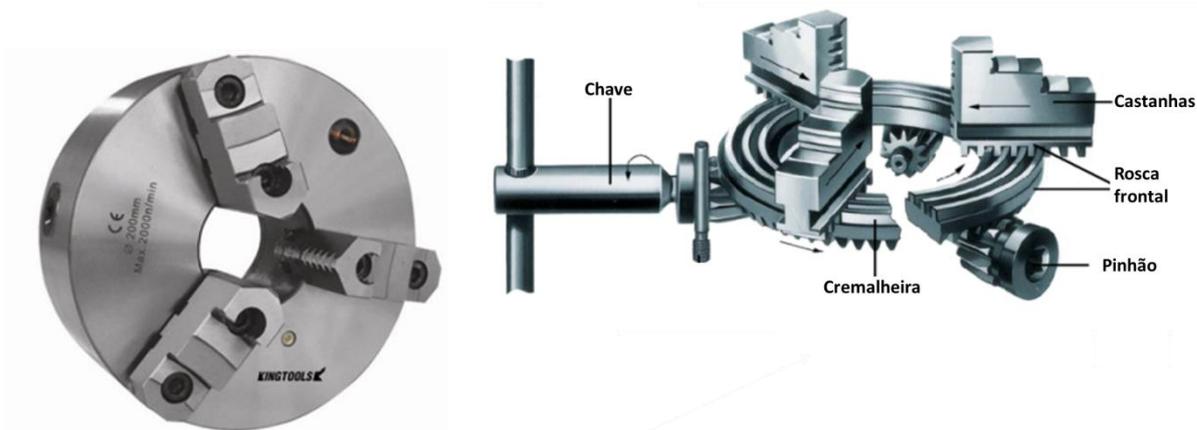
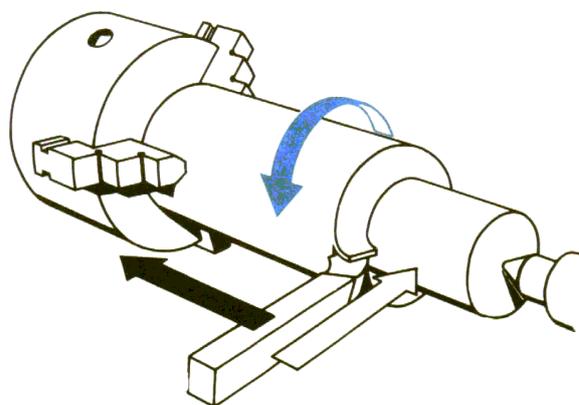


Figura 1.8 – Placa de 3 castanhas com fechamento simultâneo

Este tipo de placa é principalmente usado em casos onde em operações onde a peça fica fora da placa a uma distância menor do que 3 vezes o diâmetro. Distâncias maiores que 3 vezes o diâmetro, a fixação preferida deve ser placa e contraponto, conforme a Figura 1.9.



(a) placa de 3 castanhas



(b) Placa de 3 castanhas e contraponto

Figura 1.9 – Fixação de peças empregando a placa de 3 castanhas simultâneas.

Quando a peça deve ser removida do torno para operações em pontas opostas a fixação entre pontas deve ser preferida para garantir a concentricidade. Este tipo de fixação é mostrado na Figura 1.10.

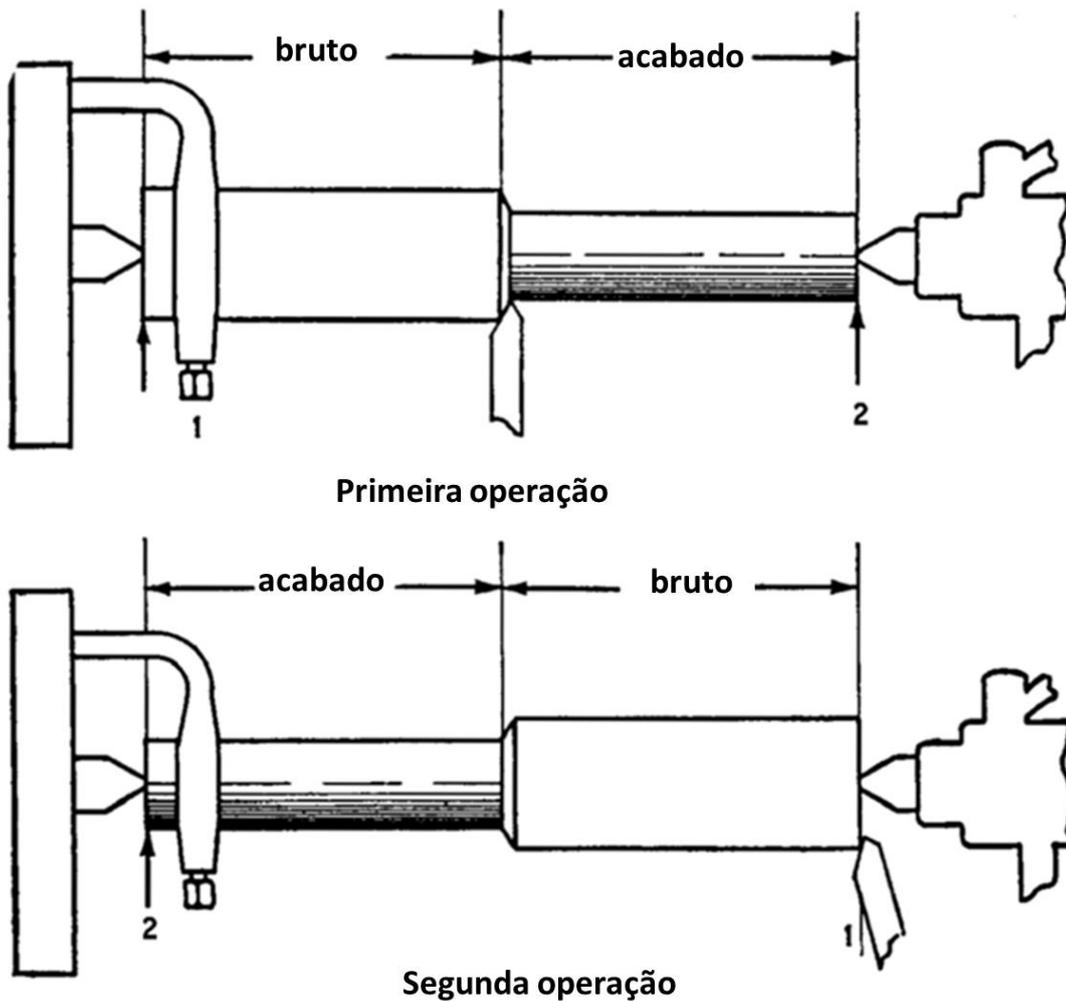


Figura 1.10 – Fixação entre pontas para torneamento nas duas extremidades da peça.

Para que a peça possa ser fixada entre pontas o furo de centro deve antes ser feito, conforme mostrado na Figura 1.11.

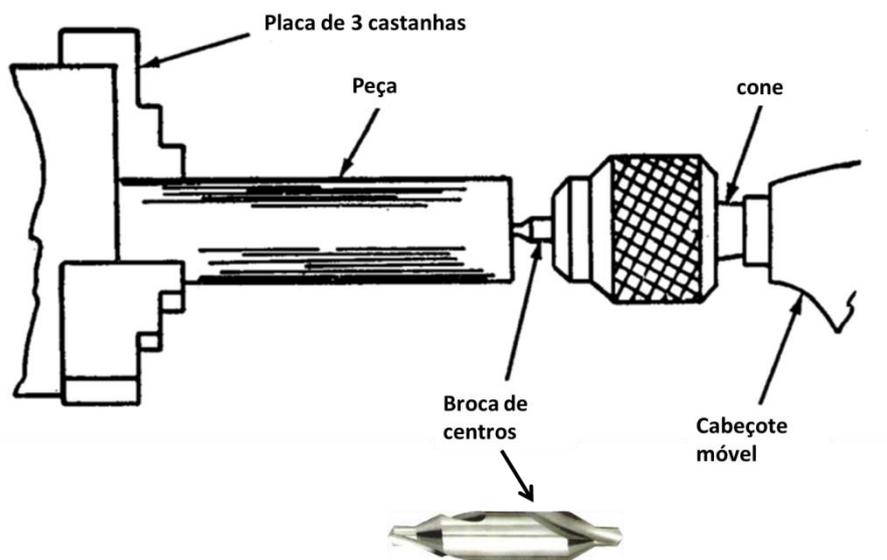


Figura 1.11 – Operação de furação de centros para torneamento entre pontas.

Para peças muito longas e de pequeno diâmetro existe o recurso de se usar a luneta, a qual serve de apoio rotativo para a extremidade da peça. A Figura 1.12 mostra esse tipo de fixação.

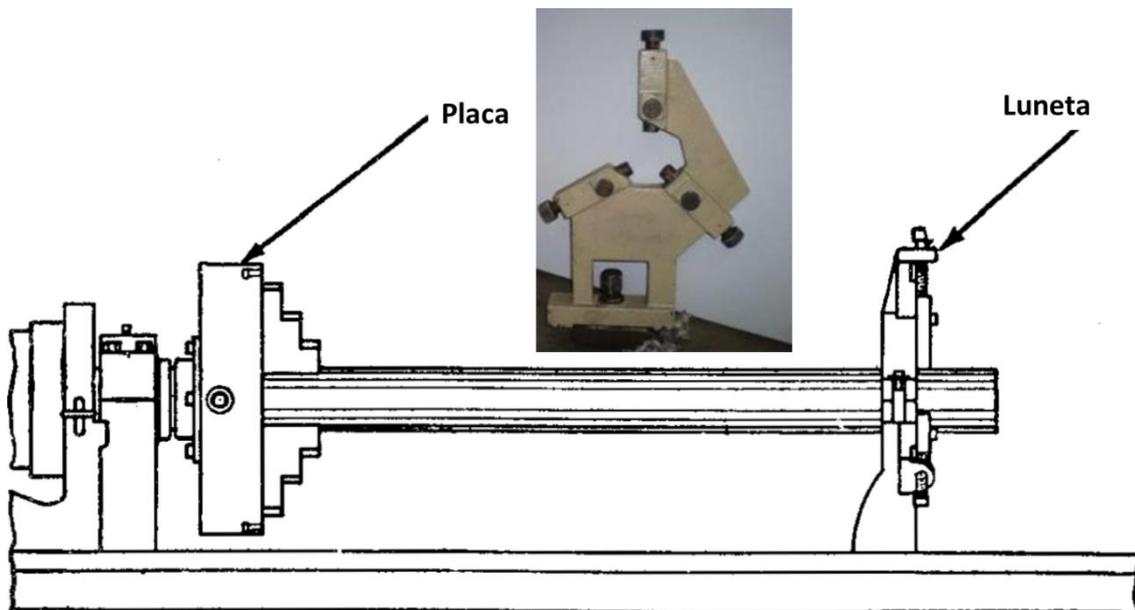


Figura 1.12 – Exemplo de fixação com luneta

Para operações em peças não cilíndricas, em formas que não se ajustam á placa de 3 castanhas simultâneas, furos fora do centro, ou de formas muito irregulares a placa de 4 castanhas independentes pode ser a solução de fixação, conforme mostrado na Figura 1.13.

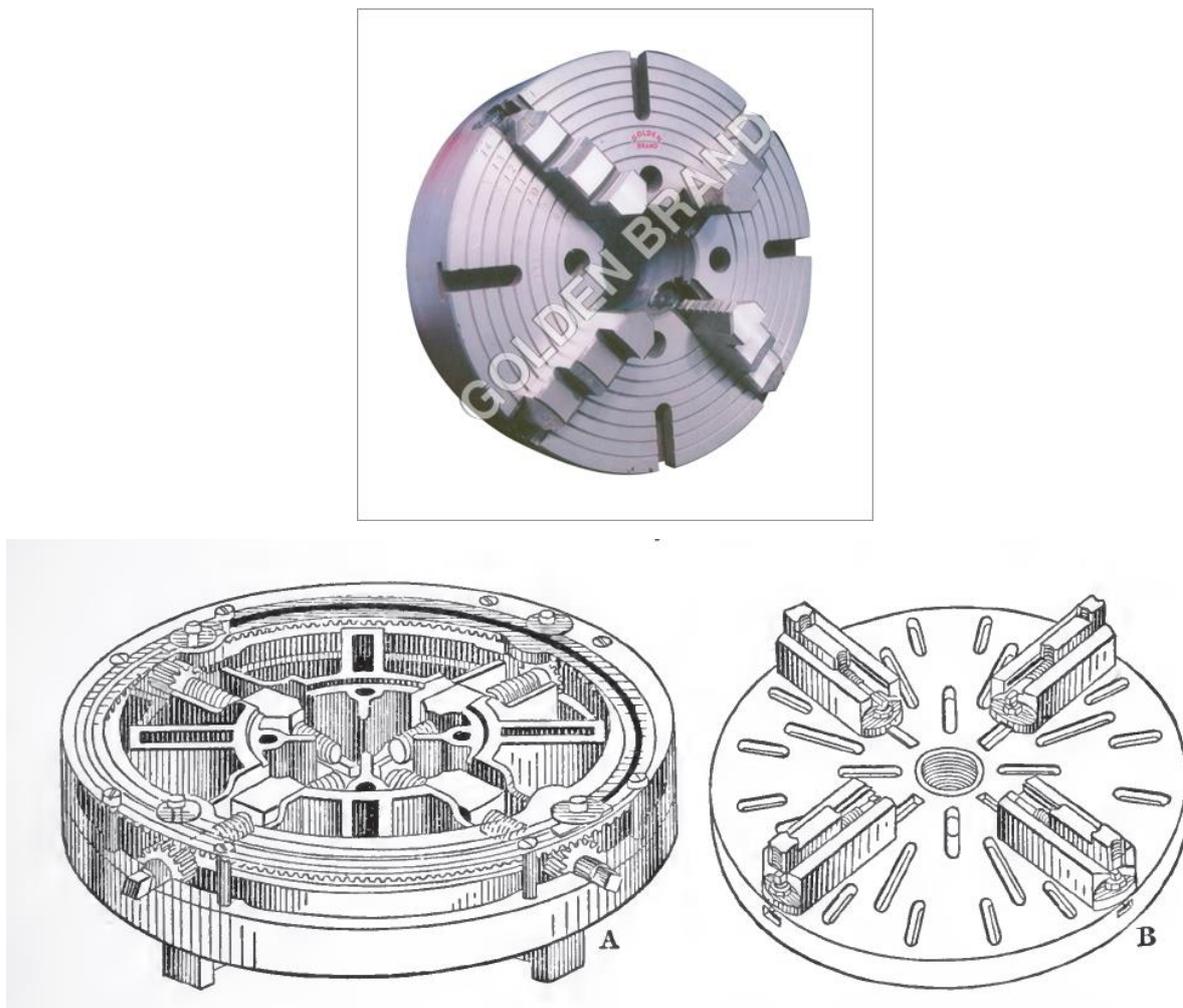


Figura 1.13 – Exemplo de placas de 4 castanhas independentes.

Quando a fixação de uma peça cilíndrica para o torneamento deve ser com giro precisamente centrado, sem batimento, o sistema de pinças é, normalmente a solução. As pinças são fabricadas em aço com efeito de mola. São fabricadas com um diâmetro ligeiramente maior que aquele no qual a peça deve ser fixada e um cone na parte externa. A parte cônica externa da pinça é montada dentro de um cone interno de forma que um deslocamento axial faz com que o diâmetro interno se contraia. Desta forma, a pinça é puxada contra um cone interno até que o seu diâmetro interno fixe a peça contraindo-se. Tal procedimento garante que a peça seja precisamente centrada, para uma operação de acabamento, ou em barras com excelente acabamento superficial e cilindricidade. A Figura 1.14 mostra um exemplo desse tipo de fixação.

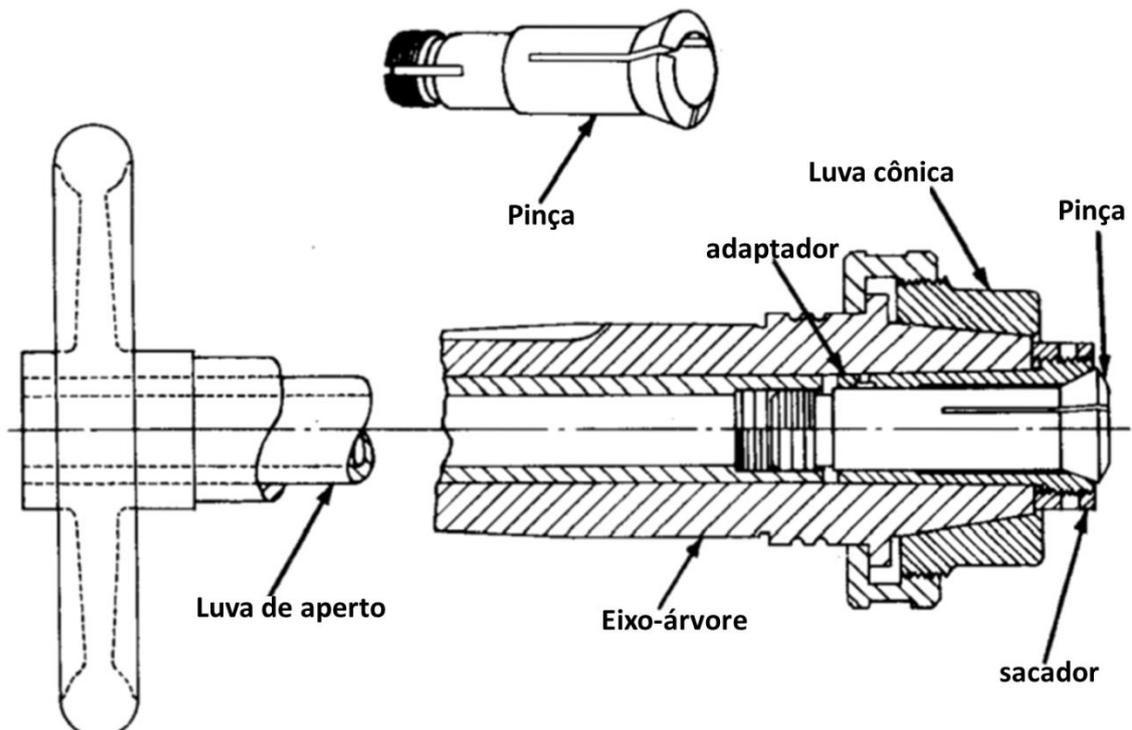


Figura 1.14 – Exemplo de fixação por meio de pinças.

O torno pode também ser usado para operações de furação, no entanto, a peça deve ser a parte rotativa, o que restringe o universo de peças que podem ser furadas. A Figura 1.15 mostra essa operação.

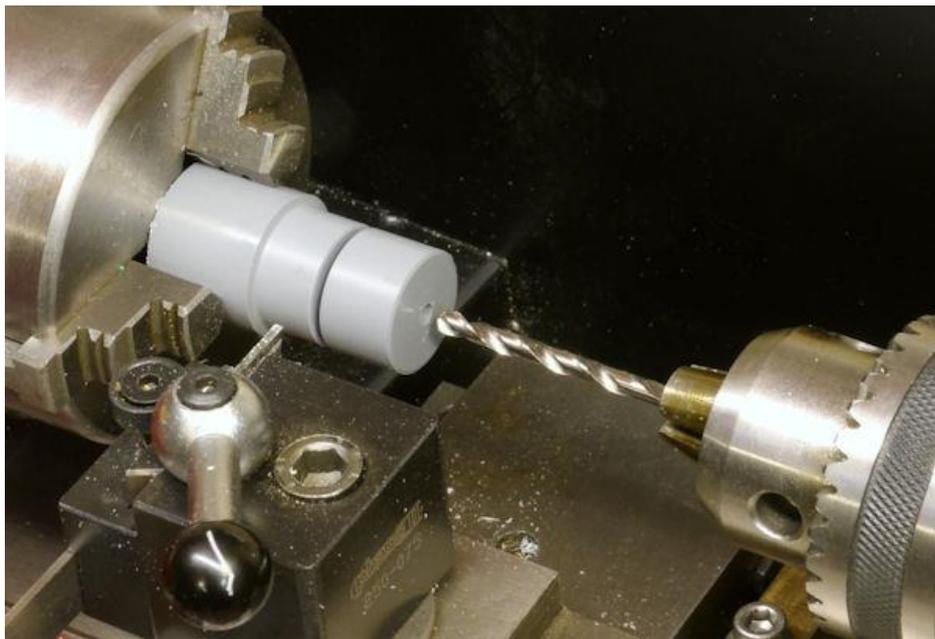


Figura 1.15 – Exemplo de furação usando o torno.

1.3 – Operações de torneamento

Inicialmente, a fabricação por torneamento de qualquer peça deve ser dividida em uma sequência em operações simples, dentre aquelas que o torno é capaz de realizar, como mostrado na Figura 1.16.

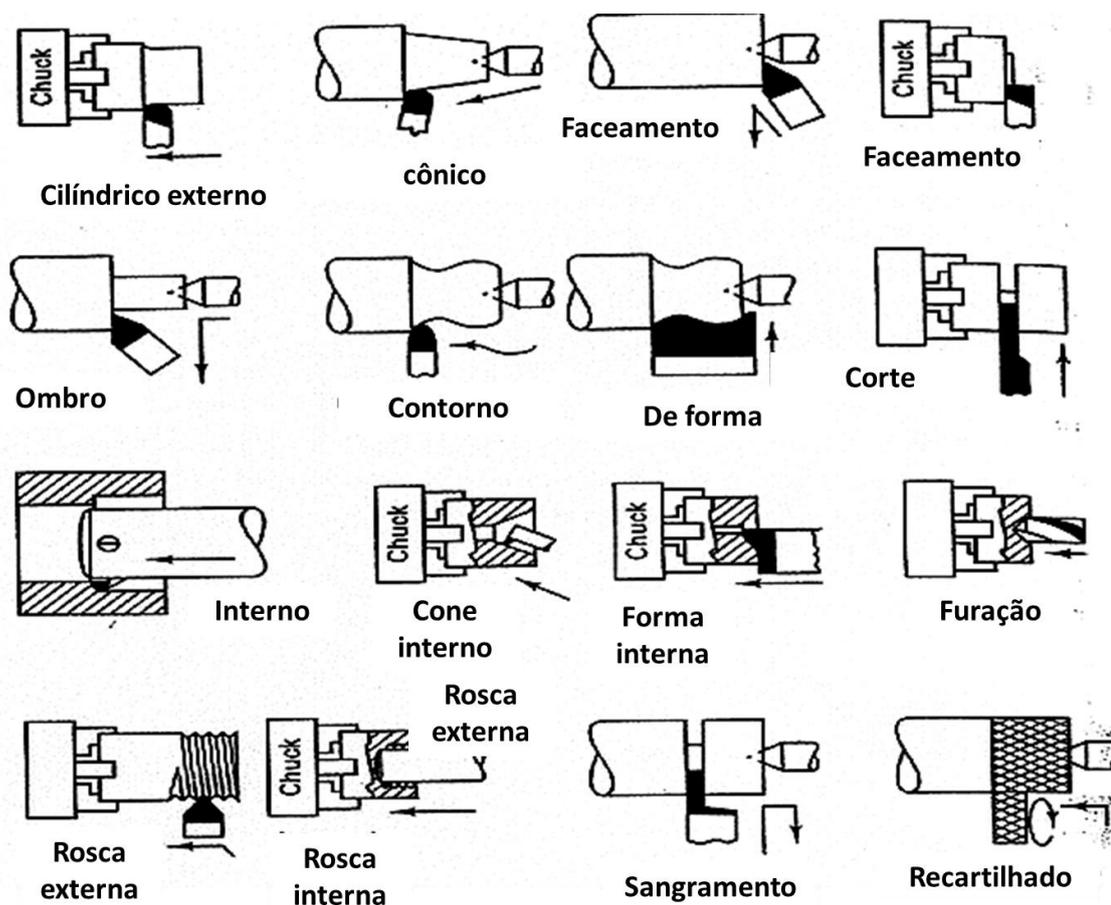


Figura 1.16 – Operações possíveis de se realizar em torneamento.

1.4 – Ferramentas

As operações de torneamento são executadas por ferramentas de torneamento, em geral, compostas de um suporte de aço no qual é fixado um inserto intercambiável de metal duro, responsável pela remoção de material por usinagem. Tanto o suporte como o inserto possuem determinadas características geométricas que são mais adequadas a cada operação de torneamento. Para cada operação de torneamento, deve-se selecionar o suporte adequado, assim como a geometria do inserto, para que se obtenham os melhores resultados possíveis, em termos

de qualidade e produtividade. Suportes para ferramentas de torneamento possuem, basicamente, três sistemas de fixar o inserto: grampo superior, interno e inserto soldado. A Figura 1.17 mostra exemplos de diversas geometrias de insertos e alguns tipos de fixação dos insertos.

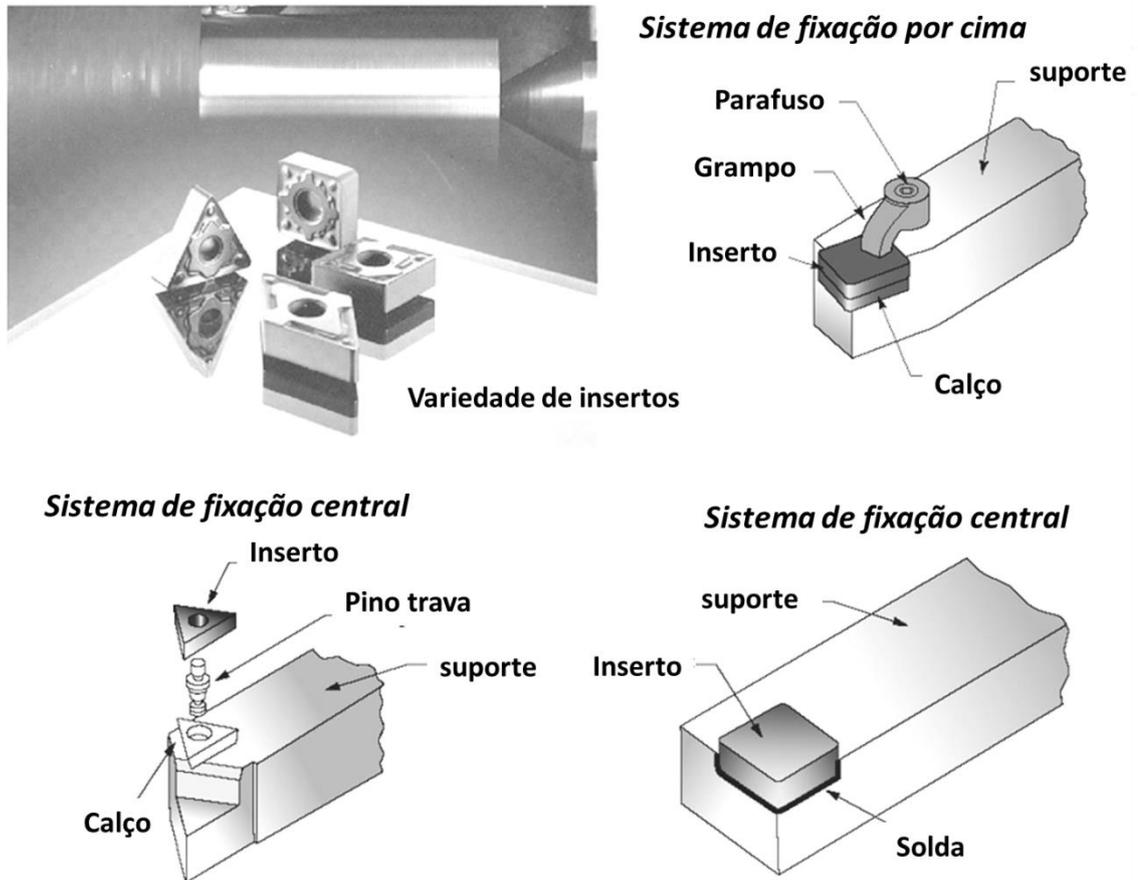


Figura 1.17 – Exemplos de insertos de diversas geometrias e alguns tipos de fixação no suporte para torneamento.

Assim, por exemplo, para uma operação de torneamento interno em um furo cego deve-se usar o suporte na forma de barra como um inserto que permita o torneamento da face ao fundo do furo, conforme mostrado na Figura 1.18.



Figura 1.18 – Exemplo de uma ferramenta especial para torneamento interno.

Diversas são as ferramentas de torneamento feitas de aço cobalto (10% Co) comumente chamadas de “bits”, as quais podem ser afiadas manualmente para trabalhos simples em torno, conforme mostrado na Figura 1.19.

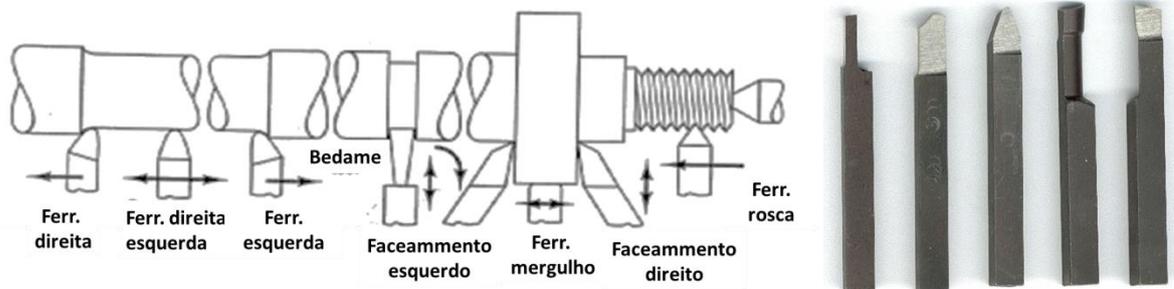


Figura 1.19 – Operação de torneamento interno em furo cego.

Na Figura 1.2 têm-se diversos exemplos de suportes para insertos de torneamento e suas aplicações típicas. Tais suportes comportam uma determinada gama de insertos compatíveis com as aplicações.

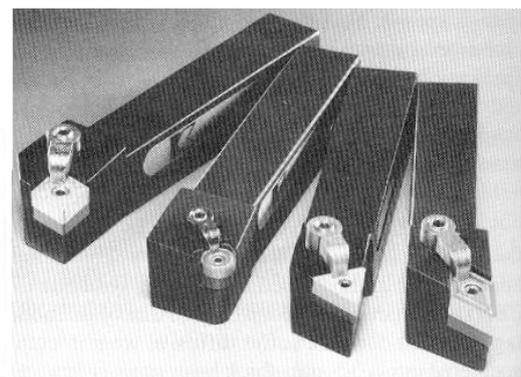
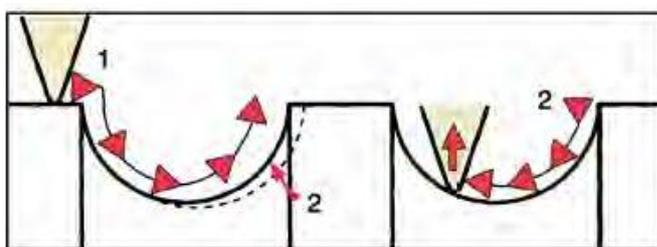
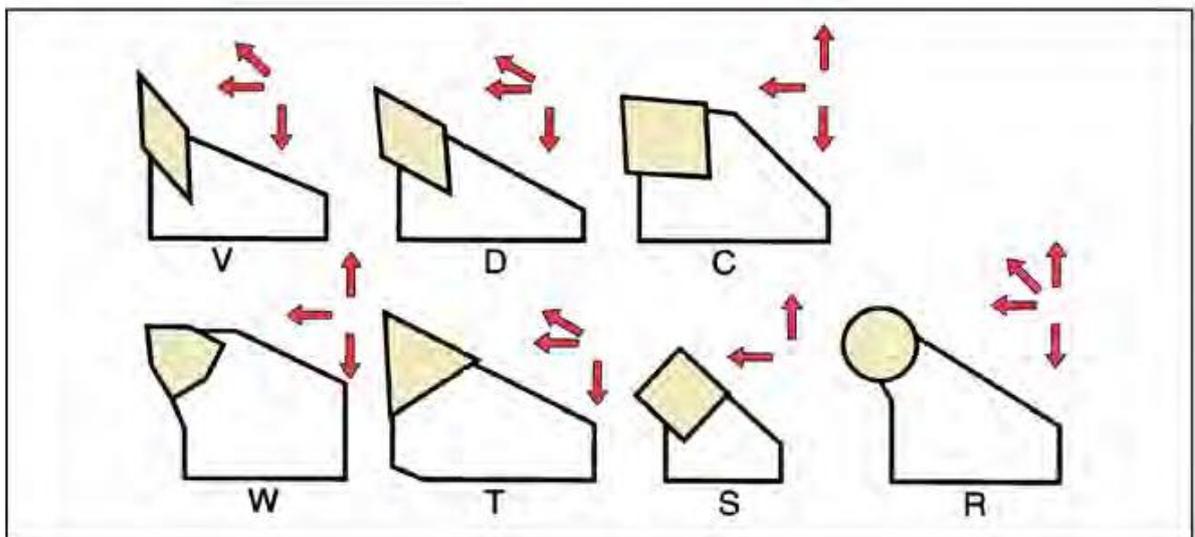


Figura 1.20 – Exemplos de geometrias de suportes e de insertos indexáveis para torneamento.

Salienta-se que a seleção da geometria do inserto é também fundamental para o sucesso da fabricação por torneamento, conforme mostra a Figura 1.21.

Factors affecting choice of insert shape	R	90	80	80	60	55	35
							
Roughing (strength)	●	●	●	○	○		
Light roughing/Semi-finishing (No. of edges)		○	●	●	●	●	
Finishing (No. of edges)			○	○	●	●	●
Turning and Facing (feed directions)			●	○	○	●	●
Profiling (Accessibility)			○	○	○	●	●
Operational versatility	○		●	○	○	●	○
Limited machine power			○	○	●	●	●
Vibration tendencies (reduction)				○	●	●	●
Hard material	●	●					
Intermittent Machining	●	●	○	○	○		
Large entering angle			●	●	●	●	●
Small entering angle	●	●		●	●		

Most suitable
 Suitable

Figura 1.21 – Exemplos de geometria de inserto e suas aplicações típicas.

Em seguida à seleção da ferramenta para o torneamento, deve-se determinar melhor sequencia de operações, visando a qualidade e a produtividade. Operações de desbaste, por exemplo, devem ser usadas antes do acabamento, quando as condições dimensionais e de acabamento superficial exigirem. Caso o acabamento superficial seja muito exigido, em termos de rugosidade, uma operação de polimento, pode ainda ser necessária, após a de acabamento.

2 – FRESAMENTO

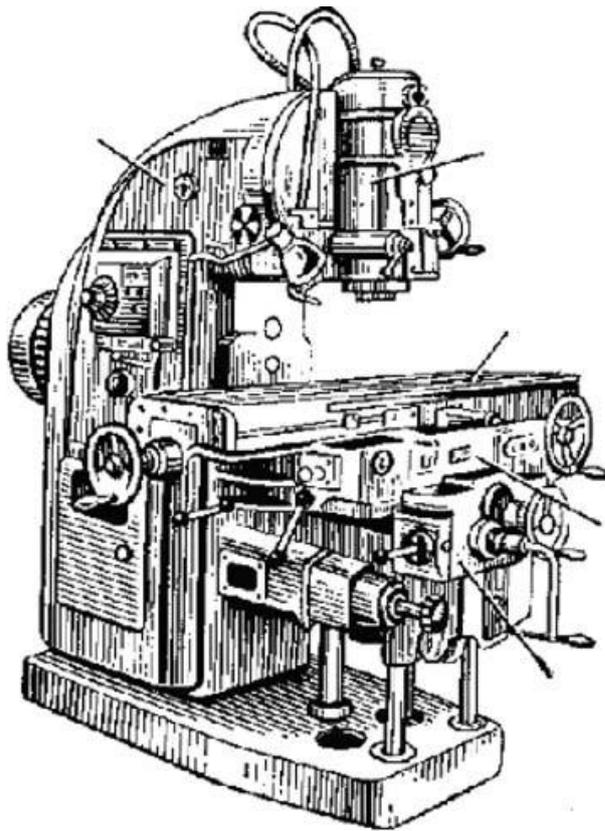
O processo de fresamento é aplicado principalmente para a usinagem de peças prismáticas, superfícies planas ou esculpidas, mais recentemente, por meio do uso de máquinas comandadas por computador (máquinas CNC). A Figura 2.1 mostra exemplos de peças tipicamente obtidas por fresamento.



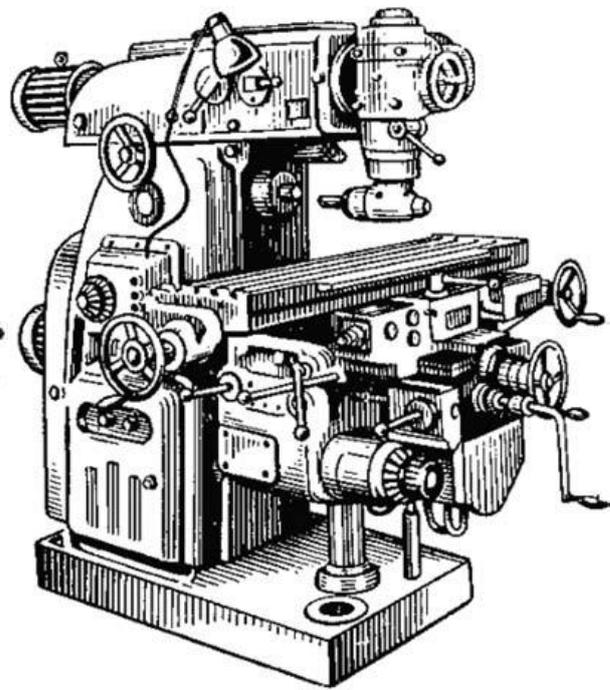
Figura 2.1 – Exemplos de peças tipicamente obtidas por fresamento.

2.1 – A máquina

A fresadora é uma máquina-ferramenta com movimentos nas 3 direções perpendiculares (X, Y e Z), os quais podem ser manuais, automáticos ou ainda controlados por computador. A máquina possui uma estrutura rígida, contém uma mesa, na qual se fixa a peça, que pode se mover nas direções X e Y. Em alguns modelos a mesa se assenta sobre uma estrutura que se move na direção Z, ou pode ser fixa com o cabeçote do eixo-árvore se movendo na direção Z. A Figura 2.2 mostra exemplos de fresadoras simples.



(a) Eixo-árvore vertical



(b) Eixo-árvore horizontal

Figura 2.2 – Exemplos de fresadoras universais simples

Mais usual, atualmente, são as fresadoras ferramenteiras, as quais são mais simples e flexíveis em termos de posicionamento para o trabalho. A Figura 2.3 mostra exemplos desses tipos de máquinas.

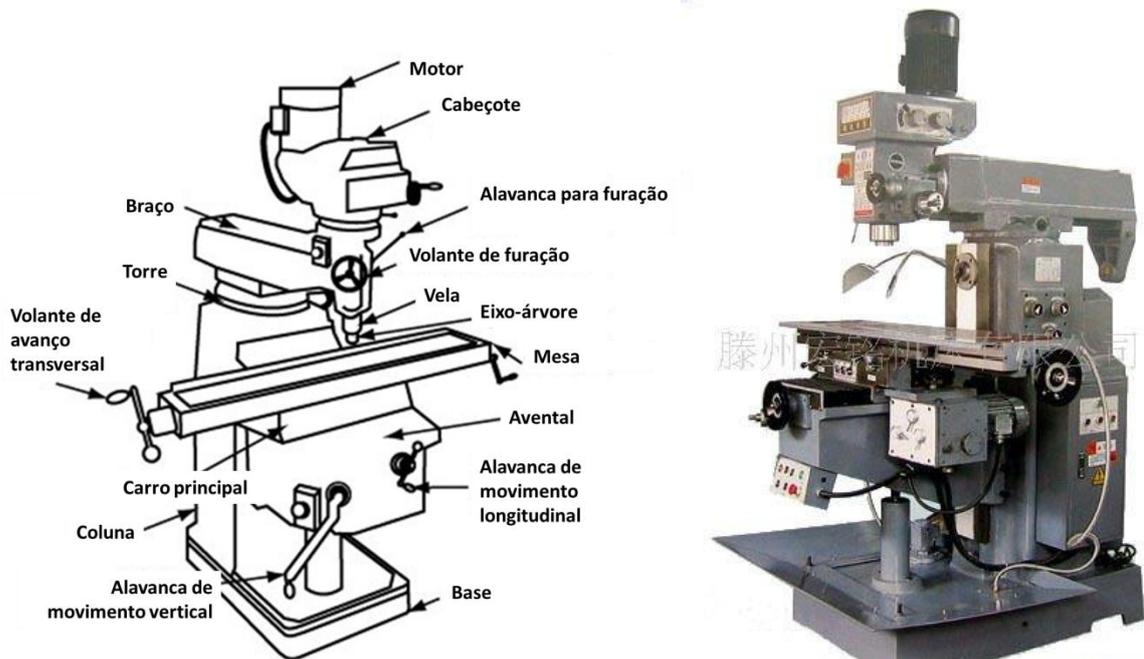


Figura 2.3 – Fresadora ferramenteira

Fresadoras universais mais completas também podem ser ainda encontradas, embora sejam modelos mais antigos, como mostrada na Figura 2.4.

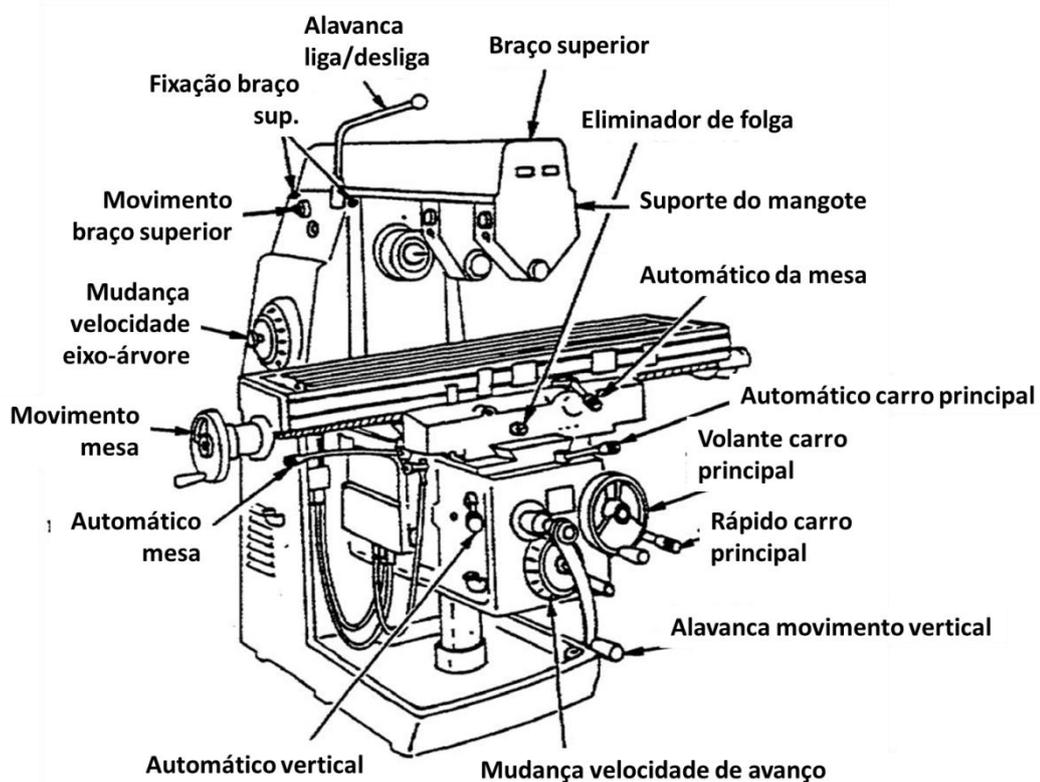
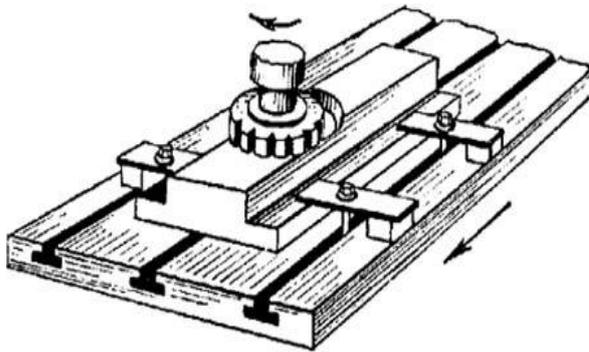


Figura 2.4 – Fresadora universal tradicional.

2.2 – Fixação das peças

As peças podem ser fixadas diretamente na mesa da fresadora, ou por meio de morsas, para as operações de fresamento, conforme mostrado na Figura 2.6.



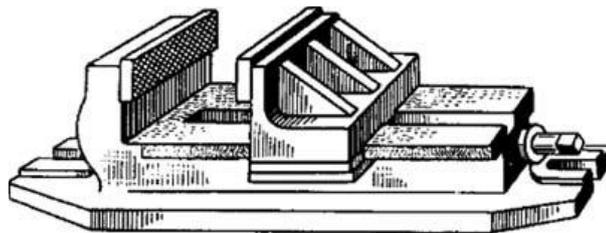
(a) Fixação sobre a mesa



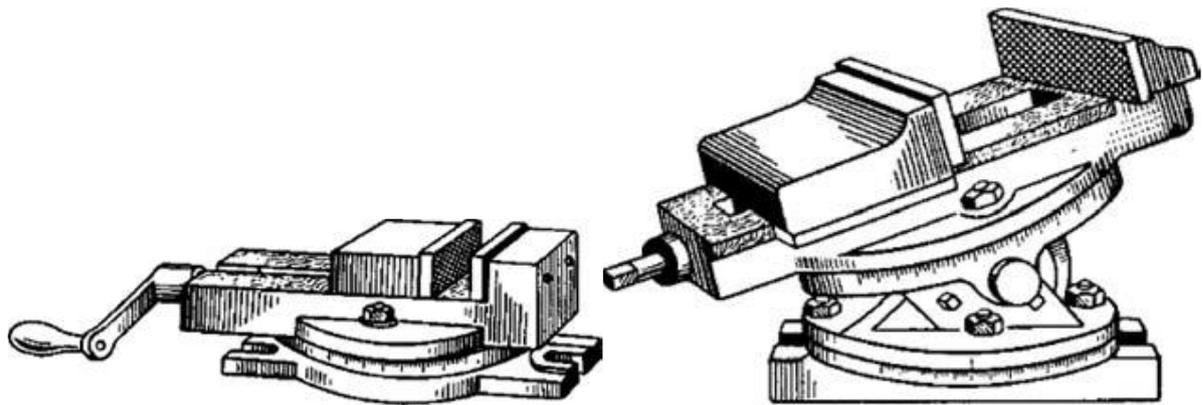
(b) Fixação por meio de morsa

Figura 2.6 – Exemplo de fresamento de peça presa sobre a mesa da máquina, ou por meio de morsa.

As morsas, por sua vez, podem ser fixas, ou com posicionamentos rotativos no plano da mesa, ou ainda com possibilidade de movimentos em 2 eixos rotativos, conforme mostrado na Figura 2.7.



(a) Morsa fixa



(a) Morsa giratória plana

(c) Morsa giratória 2 eixos

Figura 2.7 – Exemplo de 3 tipos diferentes de morsa para fresamento

2.3 – Operações de fresamento

A fresadora pode executar uma série imensa de operações, em geral produzindo superfícies planas em peças prismáticas. As principais operações possíveis em um fresadora estão mostradas na Figura 2.5.



(a) Fresamento frontal e lateral



(b) Fresamento de perfis com cortadores e com fresas de topo maciças.

Figura 2.5 – Algumas das principais operações executadas por fresamento

2.4 – Ferramentas de fresamento

As ferramentas para o fresamento podem ser fabricadas de forma maciça, em geral de aço rápido, o que limita sua aplicação ao corte de materiais não endurecidos e de baixa dureza. Devido aos altos custos, o diâmetro dessas ferramentas não passa de aproximadamente 200-250 mm. Outra opção são os cortadores fabricados com aço que contêm insertos intercambiáveis de metal duro. Neste caso, o limite para o diâmetro máximo depende da capacidade da fresadora em comportar tais ferramentas. Por outro lado, há limitações quanto ao diâmetro mínimo possível de se conseguir fixar insertos, que atualmente está em torno de 10 mm. Para diâmetros menores, usam-se ferramentas maciças de aço rápido ou de metal duro, como é o caso das fresas de topo. A Figura 2.8 mostra exemplos dessas ferramentas.



(a) Fresas aço rápido

(b) Fresas Metal duro

(c) Fresas metal duro maciço

Figura 2.8 – Exemplos de ferramentas para fresamento.

As ferramentas de fresamento de pequeno diâmetro, em geral abaixo de 25 mm, são presas a suportes, os quais se fixam ao eixo-árvore. A fixação das ferramentas pode ser feita por diversos meios, entre eles a pinça é o mais comum. Há vários modelos de pinças, segundo diversas normas, dependendo de cada país. A Figura 2.9 mostra um exemplo de fixação por meio de pinça.



Figura 2.9 – Exemplo de fixação da fresa por meio de pinça.

Além do sistema de fixação das ferramentas por pinça, há outros sistemas mais sofisticados usados, em geral, para usinagem de altas velocidades, que garantem menores desvios de batimento, são eles a fixação hidráulica e por contração térmica, mostrados na Figura 2.10.

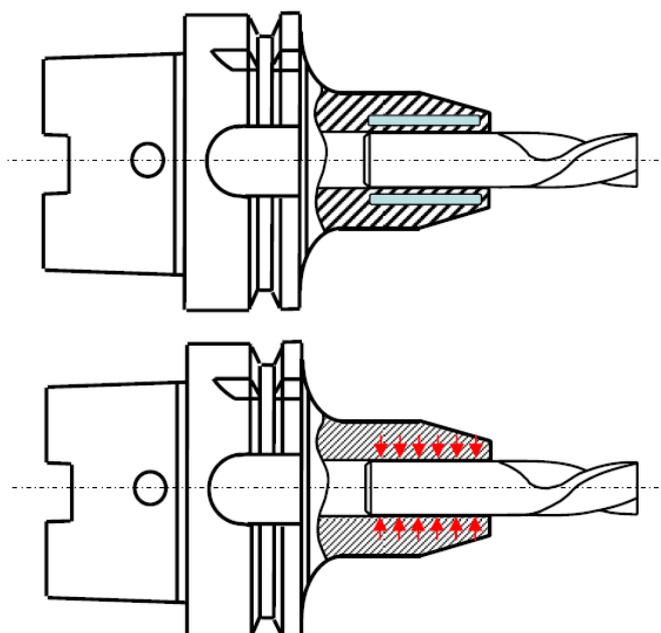


Figura 2.10 – Exemplos de fixação de ferramentas para fresamento usando força hidráulica (acima) e contração térmica (abaixo).

Quando as ferramentas devem ser de diâmetros maiores, acima de 25 mm, em geral, usa-se fixar o cortador a um suporte, contendo o cone de fixação no eixo-árvore, conforme exemplos mostrados na Figura 2.11.

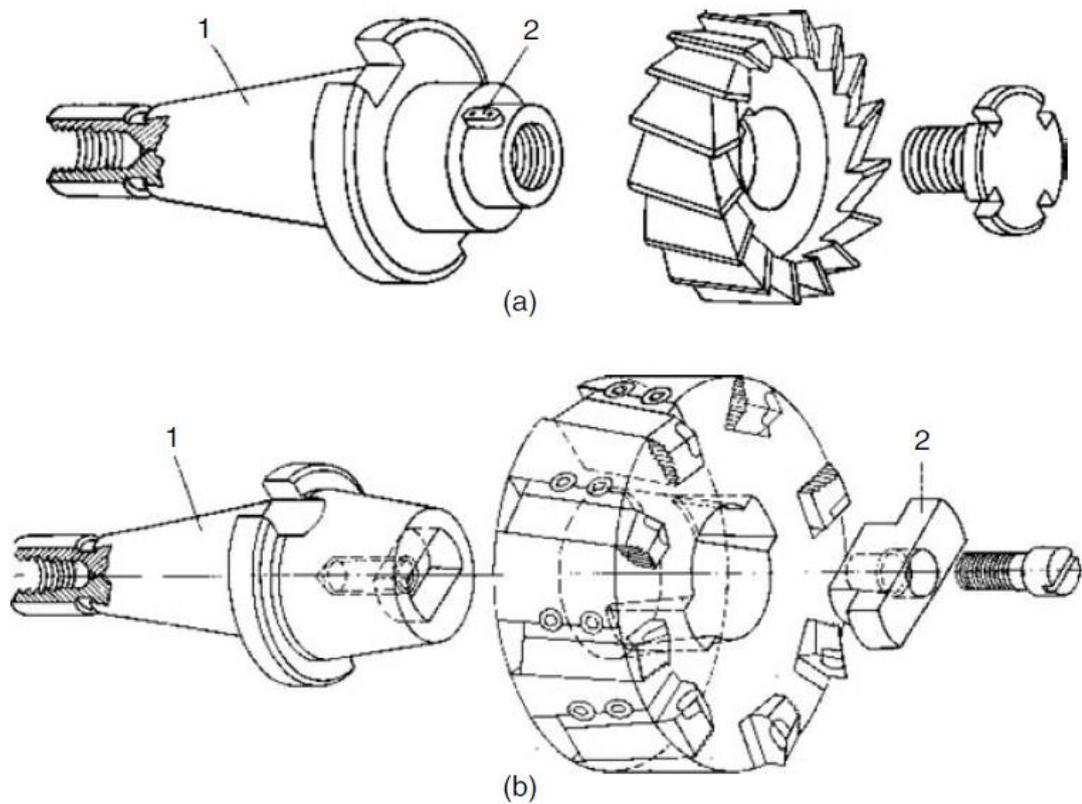


Figura 2.11 – Exemplo de fixação das ferramentas em um suporte, o qual se fixa ao eixo-árvore.

Os suportes contêm cones para centralização e minimização de desvios de batimento. Há vários tipos de cones como os tipos BT, CAT, ISSO e HSK, conforme ilustrados na Figura 2.12.



Figura 2.12 – Exemplos de cones BT e HSK para fixação no eixo-árvore.

2.5 – Cabeçote divisor

A fresadora também pode ser usada para produção de formas prismáticas regulares, como um sextavado, usando-se um cabeçote divisor. Este acessório é montado sobre a mesa da fresadora, prendendo a peça, em geral, entre pontos. O cabeçote divisor permite o posicionamento angular de um eixo sob a ação da fresa, conforme mostrado na Figura 2.13.

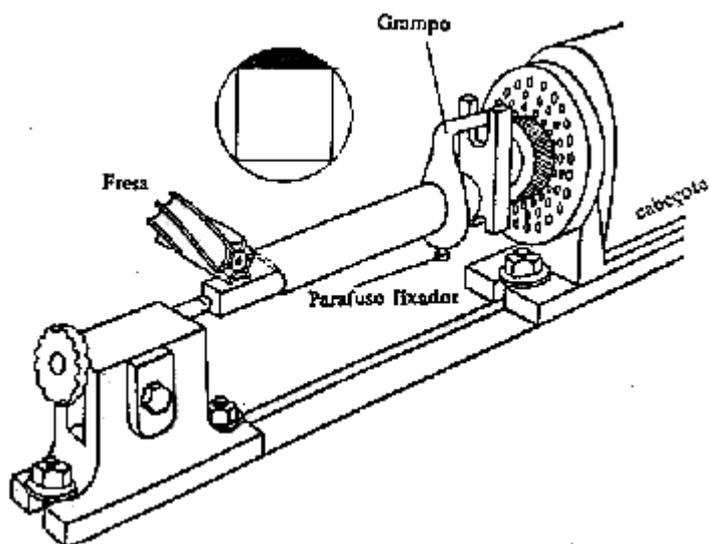


Figura 2.13 – exemplo de fresamento de peças prismáticas regulares usando o cabeçote divisor.

O cabeçote divisor pode também ter eixo vertical e neste caso permite que a peça gire no eixo vertical sob a ação da fresa. A Figura 2.14 mostra um desse cabeçotes.

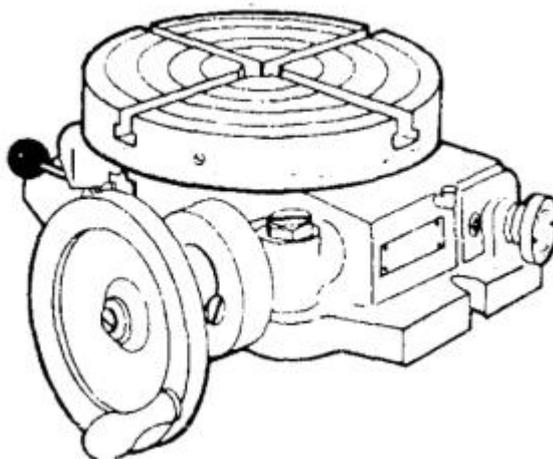
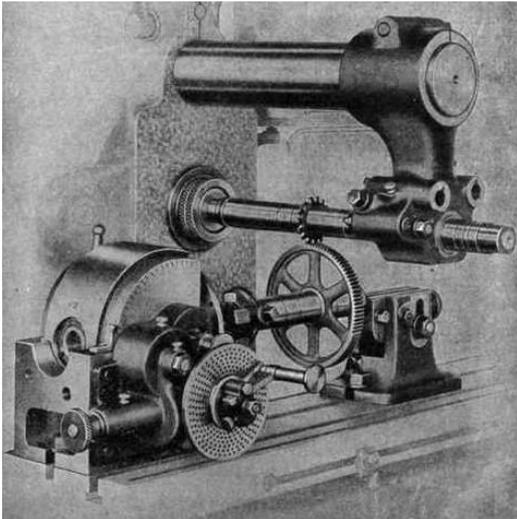


Figura 2.14 – Exemplo de um cabeçote divisor com eixo vertical.

Com o uso de um cabeçote divisor é possível fabricar engrenagens usando-se uma fresadora, conforme mostrado na Figura 2.15.



(a) Engrenagem dentes retos



(b) Engrenagem cônica

Figura 2.15 – Fresamento de uma engrenagem de dentes retos e de uma cônica.

Se o cabeçote divisor for ligado, por meio de outras engrenagens, ao fuso de comando da mesa, pode-se fresar uma rosca sobre um eixo, conforme mostrado na Figura 2.16.

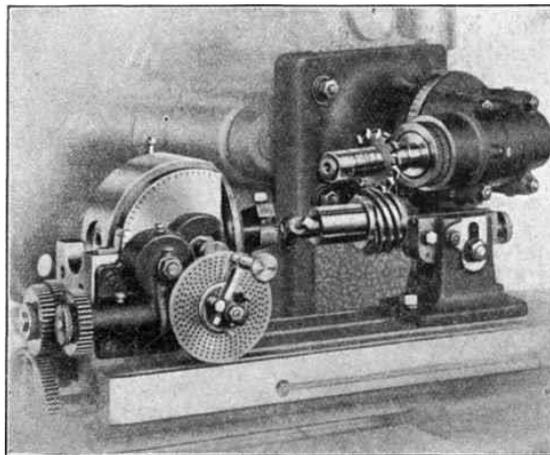


Figura 2.16 – Exemplo do fresamento de uma rosca sobre um eixo.

3.- FURAÇÃO

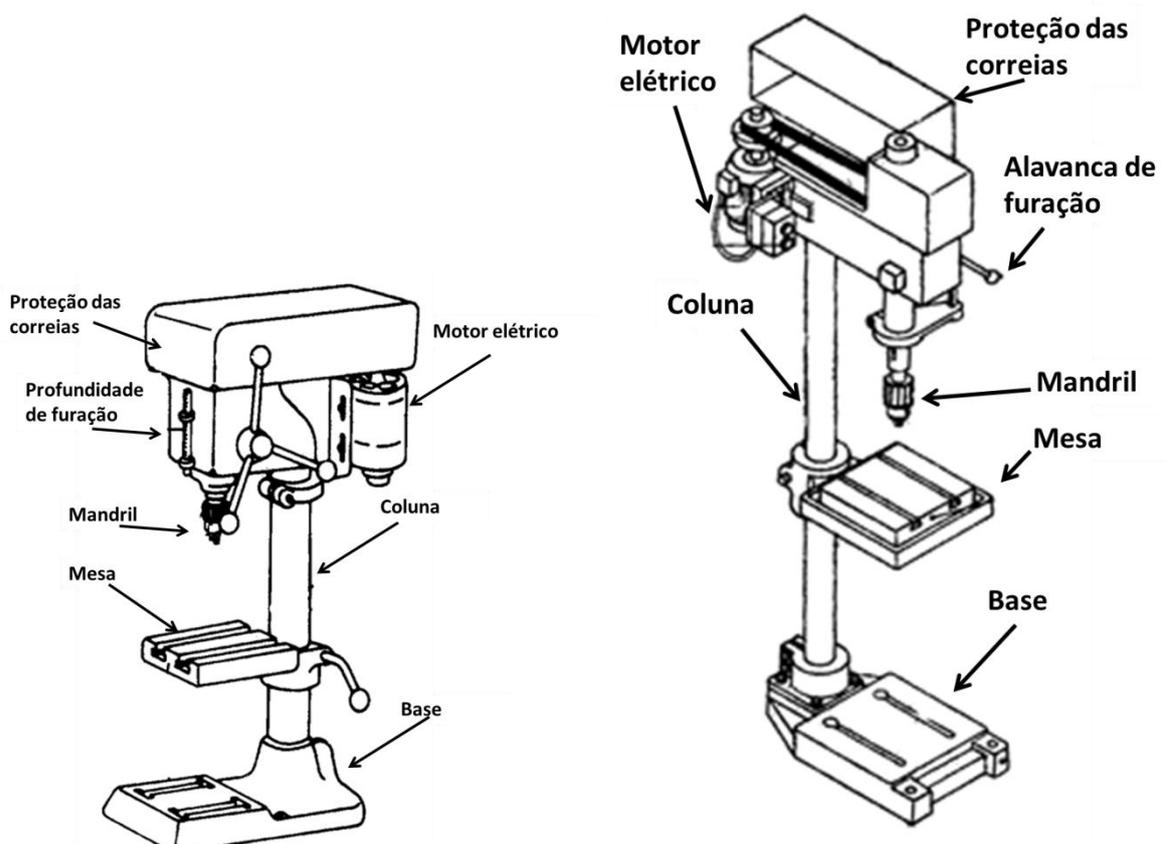
A Furação é dos mais conhecidos e antigos dentre os processos de fabricação. Consiste em usar uma ferramenta rotativa, por exemplo, uma broca, para produzir furos, sendo, em geral, um processo amplamente utilizado atualmente. A Figura 3.1 mostra alguns exemplos de peças que passaram por operações de furação.



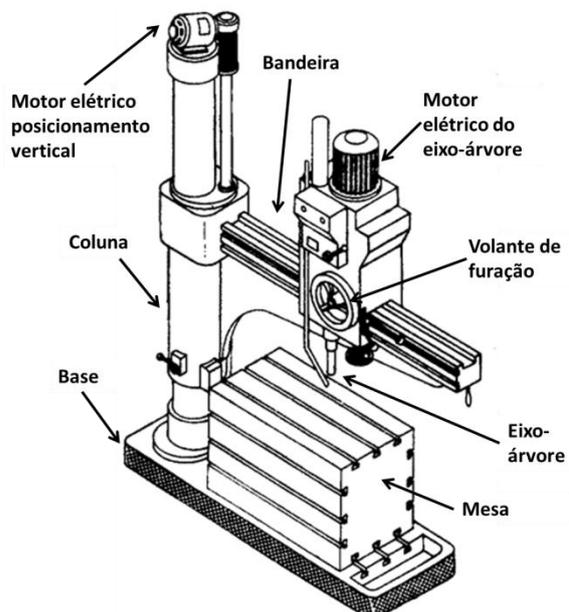
Figura 3.1 Exemplo de peças que passaram por operações de furação.

3.1 – A máquina

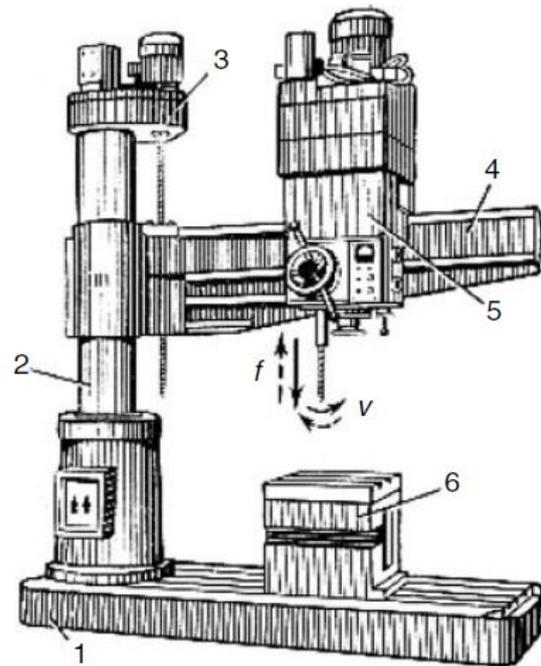
Para executar a furação, podem ser utilizadas fresadoras, ou mesmo o torno, conforme já mostrado acima neste texto, mas a máquina mais apropriada é a furadeira. As furadeiras podem ser pequenas, apoiadas sobre bancadas, maiores como as furadeiras de coluna ou ainda grandes como as furadeiras radiais. A Figura 3.3 mostra algumas dessas máquinas, com seus principais componentes.



(a) Furadeira de bancada



(b) Furadeira de coluna



(c) Furadeira radial

Figura 3.3 – Exemplos de furadeiras de diversos modelos.

3.2 – As operações de furação

. A Figura 3.4 mostra algumas das operações mais comuns executadas pelo processo de furação.

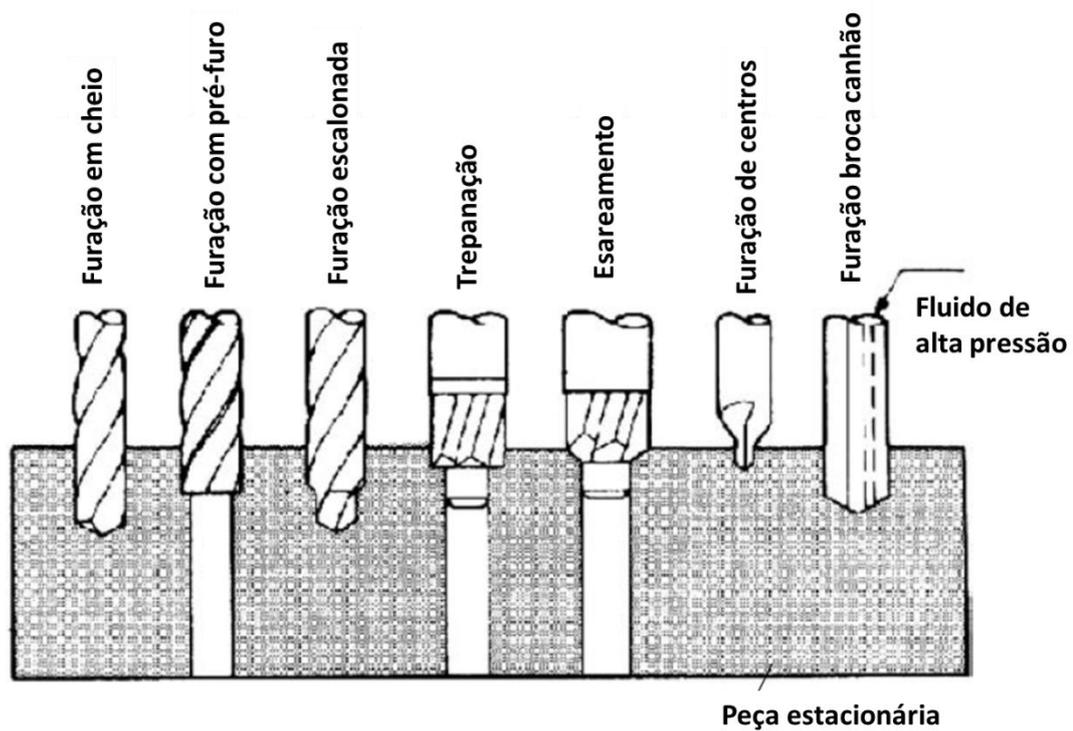


Figura 3.4 – Exemplos de operações de furação.

3.5 – Ferramentas de furação

As brocas podem ser de vários modelos, sendo a mais a helicoidal de haste paralela, usada para aplicações gerais, com diâmetros abaixo de 25 mm. Brocas helicoidais com diâmetros maiores possuem a haste cônica, com cone do tipo Morse, para facilitar a fixação no eixo-árvore das furadeiras. A Figura 3.5 mostra exemplos desses tipos de brocas com as principais denominações das suas partes.

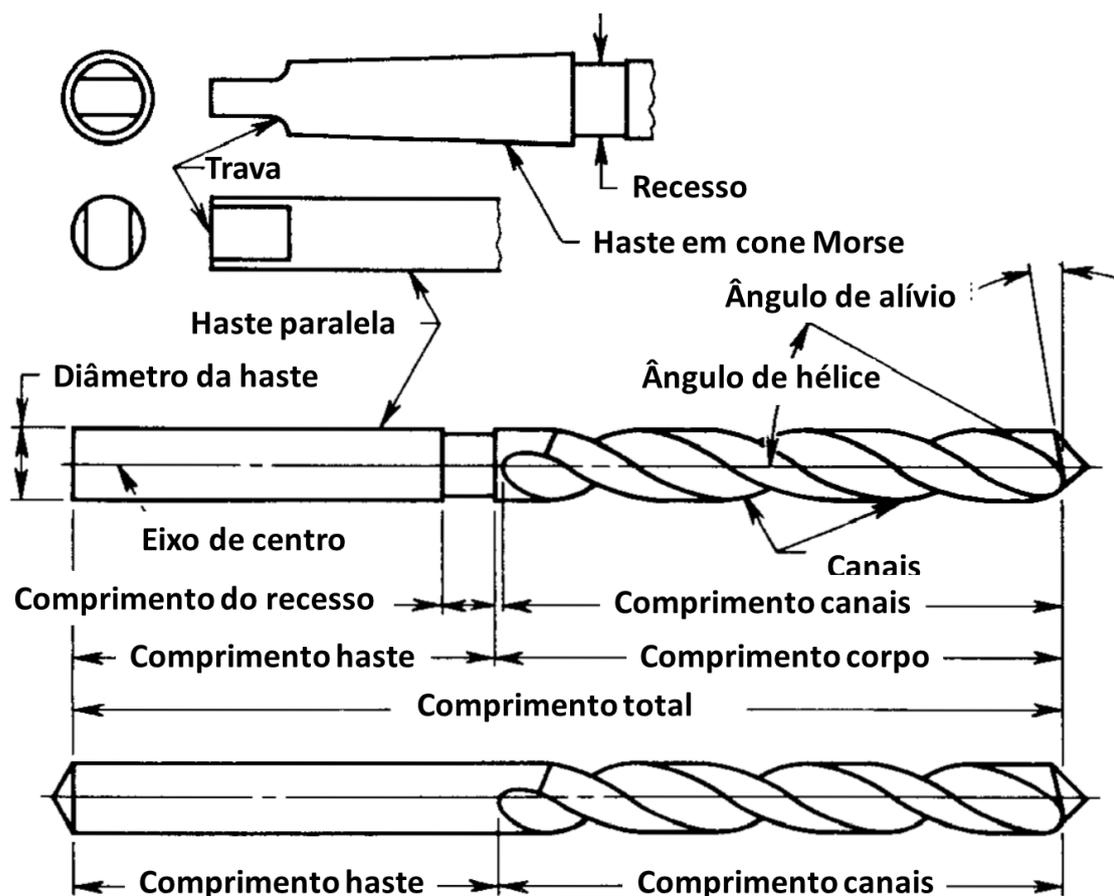


Figura 3.5 – Borcas helicoidais de haste paralela com nomenclatura.

A ponta das borcas helicoidais são a parte principal, responsáveis pelo processo de corte e remoção do material. Sua geometria é, normalmente, complexa evoluída ao longo de anos para aumento de produtividade e eficiência. A Figura 3.6 mostra um exemplo de geometria da ponta de uma broca helicoidal.

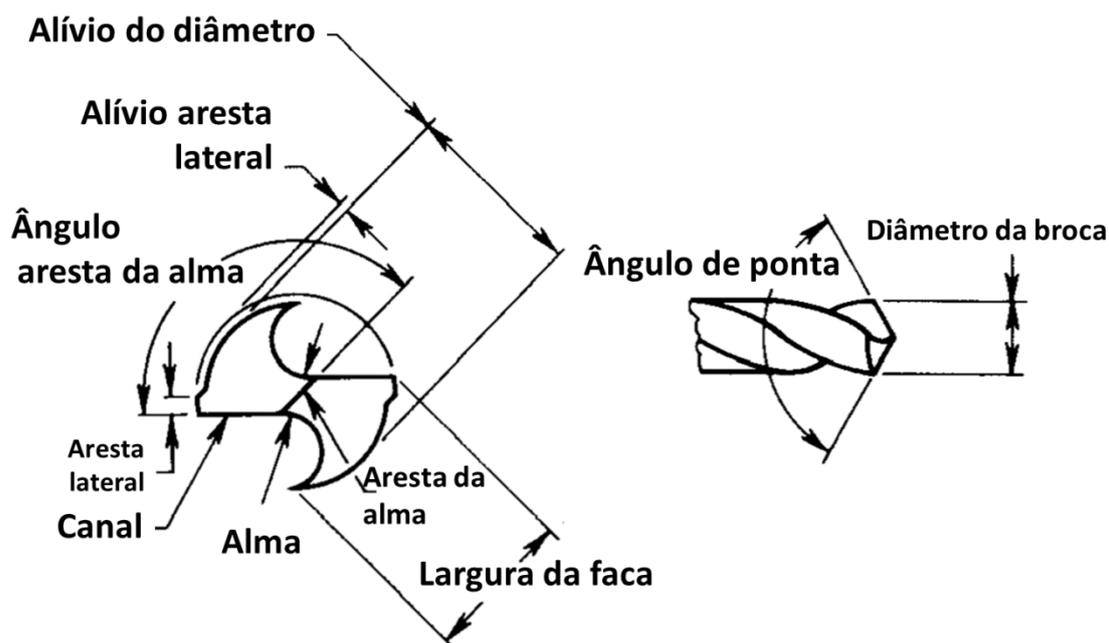


Figura 3.6 – Geometria típica da ponta de uma broca helicoidal.

Outro aspecto importante das brocas helicoidais é o ângulo de hélice, o qual é responsável pela retirada dos cavacos da área de corte, por meio dos canais. Tipicamente a broca helicoidal tem um ângulo de ponta de 118° com ângulo de hélice de 30° empregada para furação de aços em geral. Brocas com ângulo de hélice de 20° e ponta de 118° são normalmente empregadas para furação de $\epsilon 40^\circ$, os quais servem para latão e de bronze. Com ângulo de ponta mais agudo de 90° normalmente são empregadas em plásticos. Ângulos de hélice de 40° combinados com ângulo de ponta de 100° são usados para ligas leves como as de alumínio. Tais brocas estão exemplificadas na Figura 3.7.

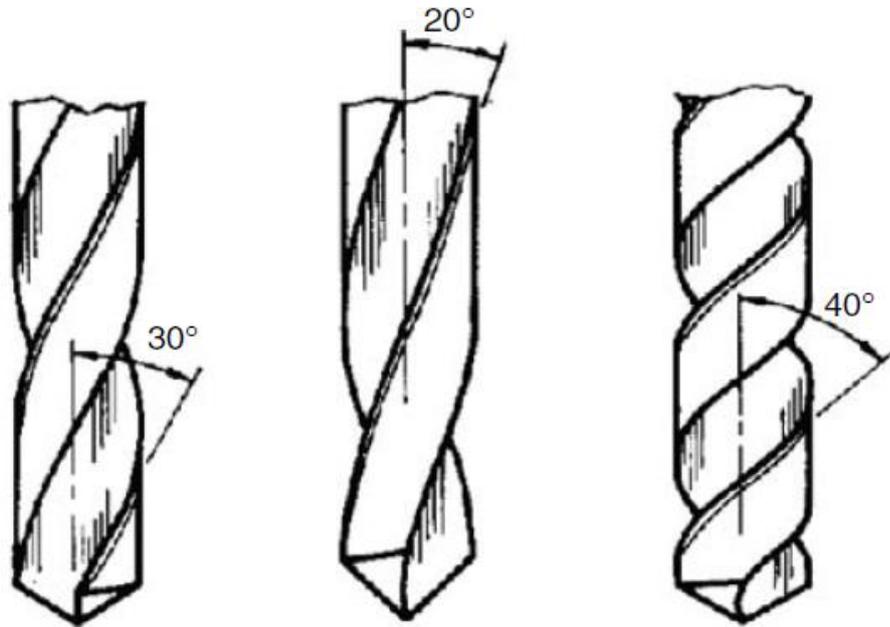


Figura 3.7 – Exemplos de brocas com diferentes geometrias para diversos materiais com características distintas.

A Figura 3.8 mostra ainda alguns outros tipos especiais de brocas helicoidais.

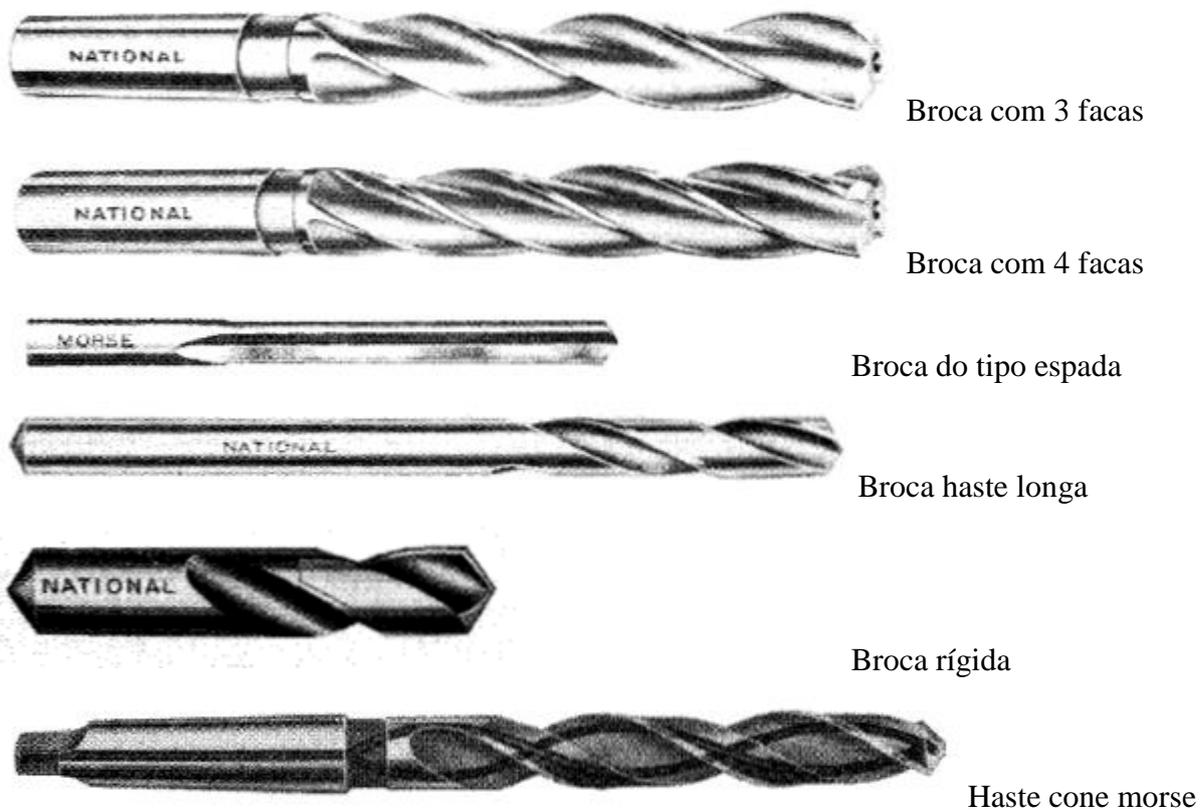


Figura 3.8 – Exemplo de diversos tipos de brocas.

A fixação das brocas para a realização dos furos é feita por meio dos mandrils, que são similares a uma placa de 3 castanhas com fechamento simultâneo. O mandril é, normalmente, fixado ao eixo-árvore por meio de um cone Morse. A Figura 3.9 mostra como é um mandril por dentro.

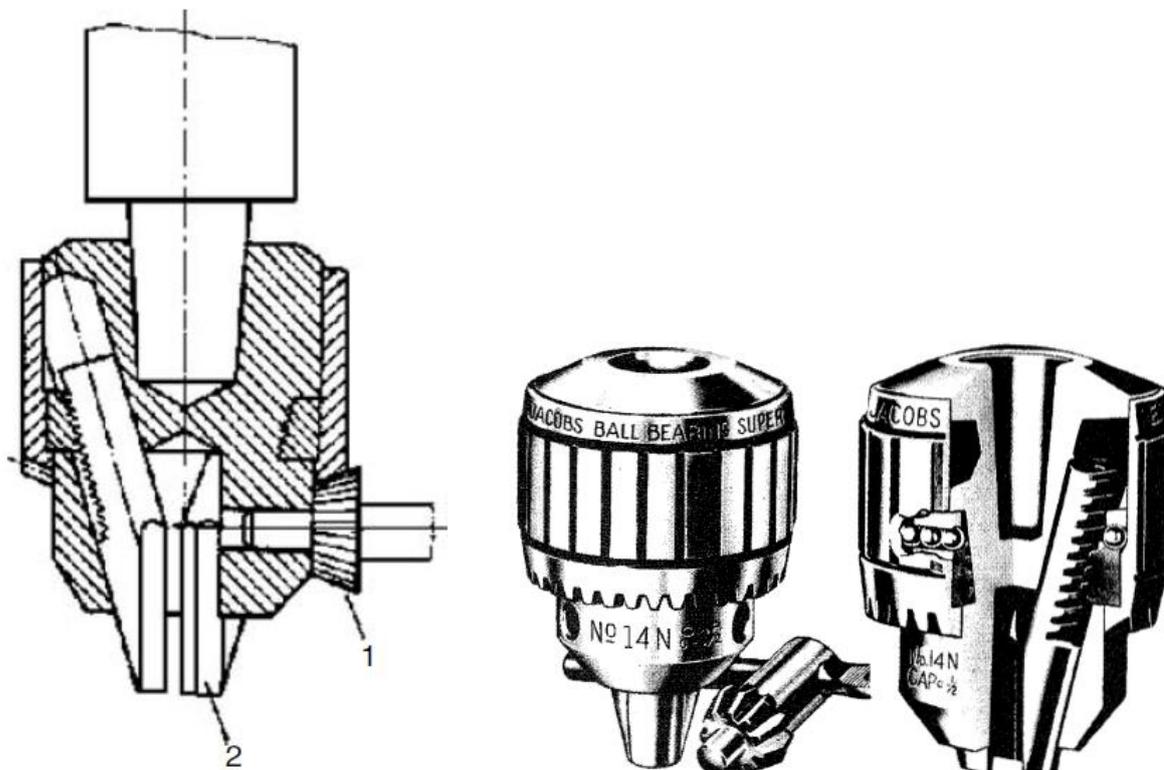


Figura 3.9 – Mandril para fixação das brocas.

Para a abertura de furos de grande diâmetro, em geral acima de 25 mm, as brocas helicoidais se tornam inviáveis, devido ao seu alto custo e alto risco de ruptura em trabalho. Furos de grandes diâmetros são realizados iniciando-se com brocas de menor diâmetro, seguida de aumento progressivo até os limites das brocas helicoidais. Acima de, em geral 30 mm, usam-se brocas com insertos indexáveis, como aquelas mostradas na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Exemplo de broca com insertos intercambiáveis.

Para furos ainda maiores, onde mesmo as brocas com insertos se tornam economicamente inviáveis, a solução pode ser o mandrilamento com cabeçotes expansivos, como mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Exemplos de cabeçotes expansivos para mandrilar.

O mandrilamento, normalmente, é uma operação de acabamento e se usado para aumentar diâmetros de furos pode resultar em longos tempos de operação, devido á vibração que ocorre quando se tenta profundidade de usinagem de desbaste, aumentando os custos. Se uma máquina CNC com interpolação simultânea em 3 eixos é disponível, pode-se abrir furos de grandes diâmetros, e forma diferentes da cilíndrica, usando-se a interpolação helicoidal em uma fresa de topo, como esquematizado na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Exemplo de abertura de furos por interpolação helicoidal.