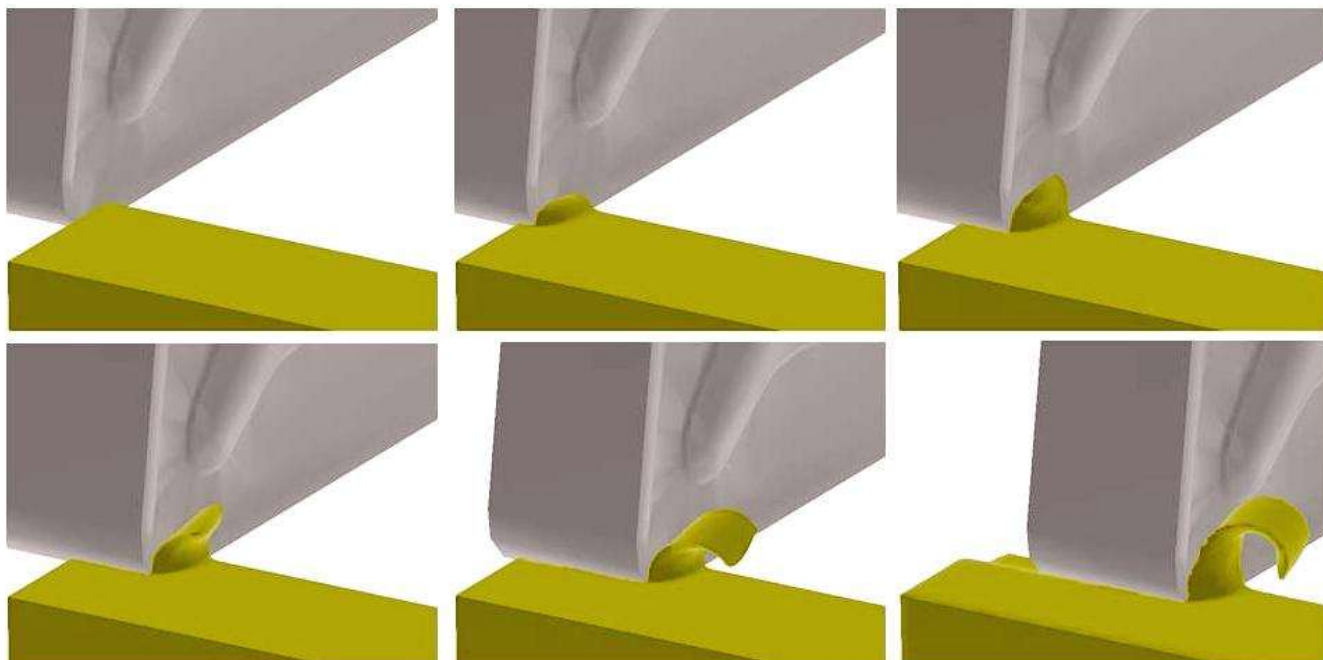


Processos de Usinagem

Fabricação por Remoção de Material



Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter (versão original)

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau (versão atual)

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

Sumário

- Introdução à disciplina
- Definição de usinagem
- Usinagem dentro dos processos de fabricação
- Evolução histórica
- Importância da usinagem na indústria metal mecânica
- Limites dos processos de fabricação
- Classificação dos processos de usinagem
- Cinemática geral dos processos
- Grandezas do processo
- Geometria da cunha de corte
- Cavacos: mecanismo de formação, tipos, relação entre propriedades mecânicas dos materiais e formação do cavaco, etc.
- Solicitações na cunha de corte: mecânicas e térmicas
- Influências da Geometria da Ferramenta
- Materias de ferramentas: requisitos, evolução, tipos, características, emprego, custos, etc.
- Revestimento de Ferramentas
- Desgaste em ferramentas de usinagem: mecanismos de desgaste, formas, medição, desgaste como critério de fim de vida, conseqüências do desgaste, etc.
- Conceito de vida da ferramenta
- Equação de Kisley
- Conceito de usinabilidade : definições, critérios de usinabilidade
- Qualidade Superficial: conceito, formação da superfície, formas de avaliação
- Fluidos de corte: função, requisitos, emprego, cuidados, etc.
- Aspectos econômicos na usinagem
- Fundamentos da usinagem com ferramentas de geometria definida
- Classificação dos processos
- Torneamento: Generalidades do processo, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Fresamento: Generalidades do processo, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Mandrilamento: Generalidades e limitantes do processo, máquinas, etc.
- Plainamento: Generalidades do processo, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.

- Furação: Generalidades do processo, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Alargamento: Generalidades do processo, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Rosqueamento: Generalidades do processo, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Fundamentos da usinagem com ferramentas de geometria não definida
- Classificação dos processos
- Retificação: Generalidades dos processos, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Brunimento: Generalidades dos processos, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Lapidação: Generalidades dos processos, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Polimento: Generalidades dos processos, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
- Outros de usinagem de geometria não definida
- Fundamentos dos processos de usinagem não Convencionais
- Classificação dos processos
- Generalidades do processo, onde e quando usar, máquinas, limitantes, etc.
 - Remoção térmica
 - Remoção química
 - Remoção eletroquímica
 - Outros processos não convencionais: jato d'água, outros
- Planejamento do processo de fabricação por usinagem
- Introdução ao Comando Numérico
- Integração CAD/CAM
- Noções gerais de projeto para usinagem

Bibliografia:

Stemmer, C. E. Ferramentas de corte I. Ed. da UFSC, 1998

Stemmer, C. E. Ferramentas de corte II. Ed. da UFSC, 1998

Ferraresi, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. Edgar Blucher, 1977

Koenig, W. Tornear, Fresar e Furar, VDI – Verlag 2000

Koenig, W. Processos de usinagem com ferramenta de geometria não definida,

Koenig, W. Processos de usinagem não convencionais

Weck, M. Handbook of machine tools, vol.2

Weck, M. Handbook of machine tools, vol.5

Definição de usinagem

- A **DEFINIÇÃO** de usinagem, segundo a DIN 8580, aplica-se a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco.

- **CAVACO** – porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma irregular.

- O estudo da usinagem é baseado na mecânica (Atrito, Deformação), na Termodinâmica (Calor) e nas Caracatrísticas dos materiais.

Usinagem dentro dos processos de fabricação

Relação entre processo de fabricação e qualidade superficial

PROCESSO	VALORES DE RUGOSIDADE (\square m R_a)												
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125
OXICORTE													
<i>SNAGGING</i>													
SERRA													
PLAINAMENTO, <i>SHAPING</i>													
FURAÇÃO													
USINAGEM QUÍMICA													
ELETROEROSÃO													
FRESAMENTO													
BROCHAMENTO													
<i>REAMING</i>													
FEIXE DE ELETRONS													
LASER													
ELETROQUÍMICA													
TORNEMANENTO,													
<i>BARREL FINISHING</i>													
RETIFICAÇÃO ELETROLÍTICA													
ROLETAMENTO													
RETIFICAÇÃO													
BRUNIMENTO													
POLIMENTO ELETROLÍTICO													
POLIMENTO													
LAPIDAÇÃO													
<i>SUPPERFINISHING</i>													
FUNDIÇÃO EM AREIA													
LAMINAÇÃO A QUENTE													
FORJAMENTO													
FUNDIÇÃO EM MOLDE PERMANENTE													
<i>INVESTMENT CASTING</i>													
ESTRUSÃO													
LAMINAÇÃO A FRIO													
FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO													
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,0125

Divisão da usinagem segundo a precisão atingível

USINAGEM	PRECISÃO ATINGÍVEL	
	ANO	
	1.980	2000
NORMAL	5 um	1 um
DE PRECISÃO	0,5 um	0,1 um
DE ULTRAPRECISÃO	0,05 um	0,01 um

Relação entre precisão e mecanismo de usinagem

PRECISÃO	MECANISMO DE USINAGEM
10 um	ELETROEROSÃO POR FAÍSCA USINAGEM QUÍMICA CORTE COM FIOS ABRASIVOS
1 um	ELETROEROSÃO DE PRECISÃO POLIMENTO ELETROLÍTICO USINAGEM FINA OU RETIFICAÇÃO FOTOLITOGRAFIA (LUZ VISÍVEL)
0,1 um	RETIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIES ESPELHADAS LAPIDAÇÃO DE PRECISÃO FOTOLITOGRAFIA (LUZ ULTRAVIOLETA) USINAGEM COM FERRAMENTA DE GUME ÚNICO
0,01 um	USINAGEM POR ULTRA-SOM LAPIDAÇÃO MECÂNICO-QUÍMICA LAPIDAÇÃO REATIVA USINAGEM A LASER EXPOSIÇÃO A FEIXE DE ELÉTRONS EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO
0,001 um (1 nm)	LAPIDAÇÃO SEM CONTATO USINAGEM IÔNICA USINAGEM QUÍMICA
SUBNANÔMETRO (> 1 nm)	FEIXES ATÔMICOS OU MOLECULARES

Importância da usinagem na industria metal mecânica



Figura 1 – Exemplo de peças usinadas

A maior parte de todos os produtos industrializados em alguma de suas etapas de produção, direta ou indiretamente sofre algum processo de usinagem

Exemplos da importância da usinagem:

- 80% dos furos são realizados por usinagem
- ~100% dos processos de melhoria da qualidade superficial são feitos por usinagem
- o comércio de máquinas-ferramentas representa uma das grandes fatias da riqueza mundial
- ~70% das engrenagem para transmissão de potência
- ~90% dos componentes da industria aeroespacial
- ~100% dos pinos médico-odontológicos
- ~70% das lentes de contatos
- Lentes para CD player ou suas matrizes

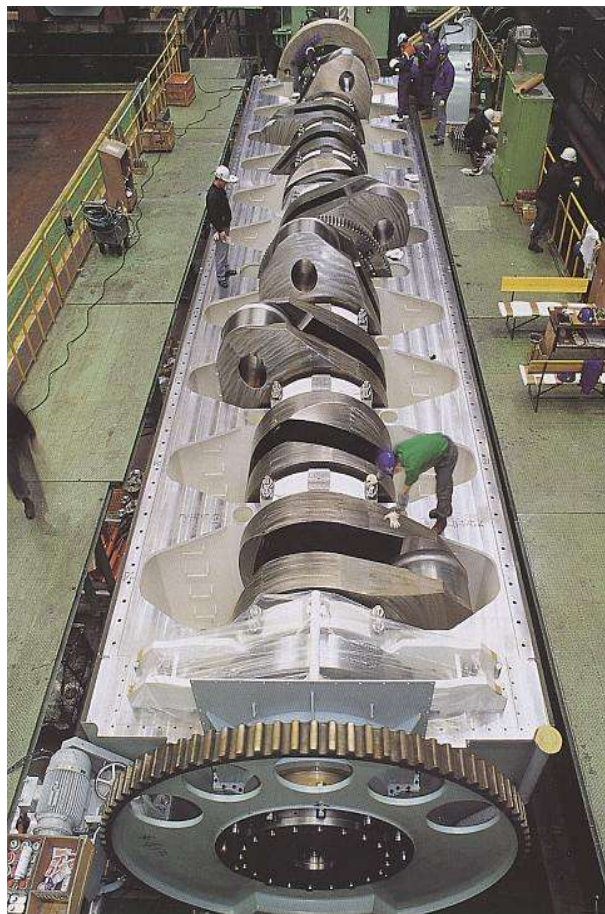


Figura 2 – Exemplo de componentes de grande porte usinados

Limites dos processos de fabricação

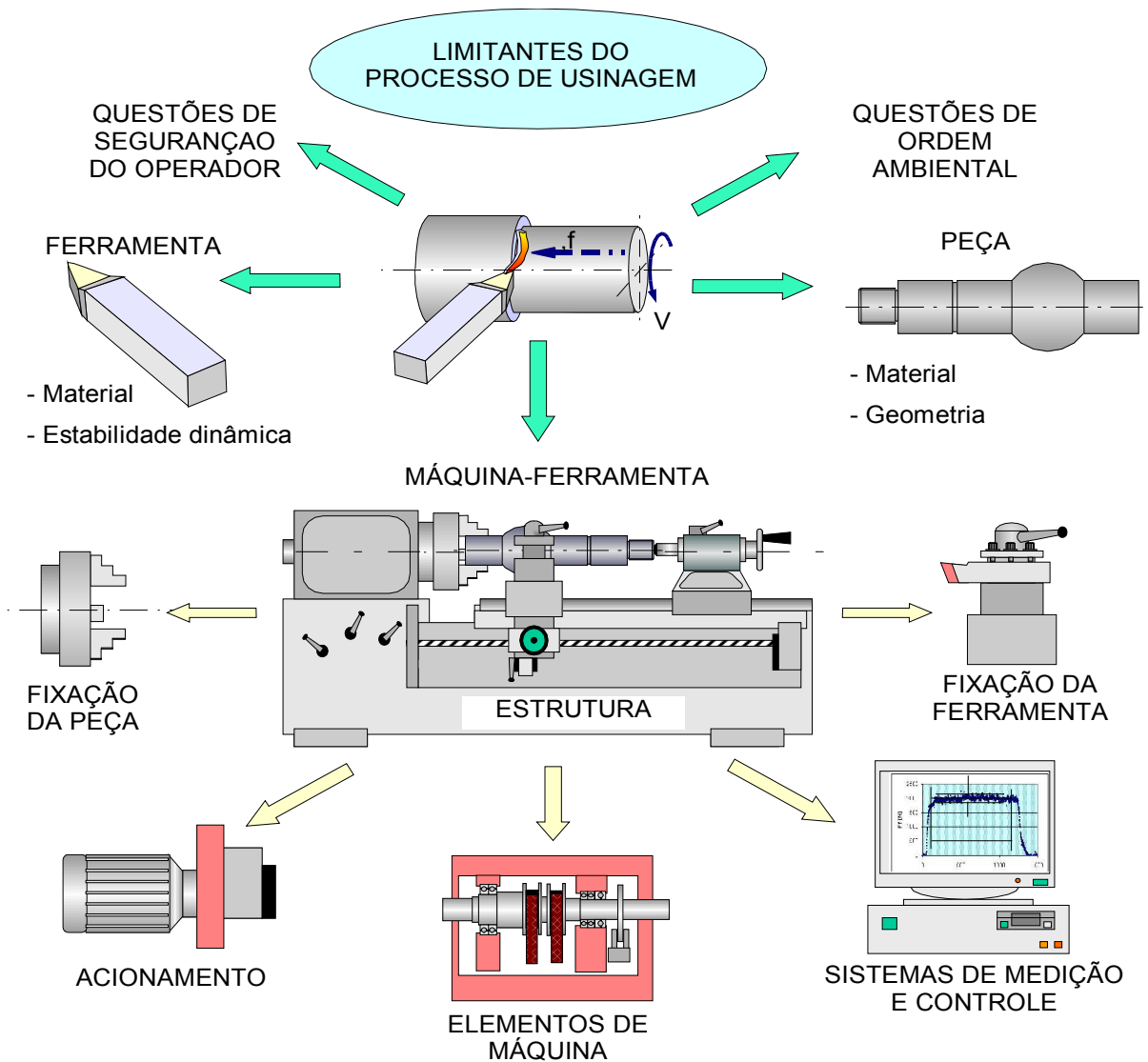


Figura 3 – Principais limitantes dos processos de usinagem

Classificação dos processos de usinagem

→ Os processos de usinagem são **classificados** da seguinte forma:

- Usinagem com **Ferramenta de Geometria Definida**

- Tornear
- Fresar
- Furar
- Rosquar
- Alargar
- Brochar
- Serrar
- Plainar, outros

- Usinagem com **Ferramentas de Geometria não Definida**

- Retificar
- Brunir
- Lapidar
- Lixar
- Polir
- Jatear
- Tamborear, outros

- Usinagem por **Processos Não Convencionais**

- Remoção térmica
- Remoção Química
- Remoção Eletroquímica
- Remoção por ultra-som
- Remoção por jato d'água, outros

A evolução histórica dos processos de usinagem

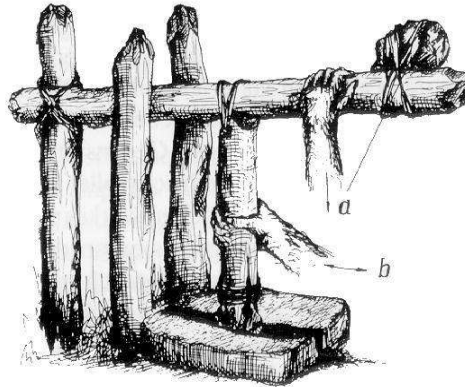


Figura 4 – Plana Neolítica de 6000 A.C. (Spur, 1997)

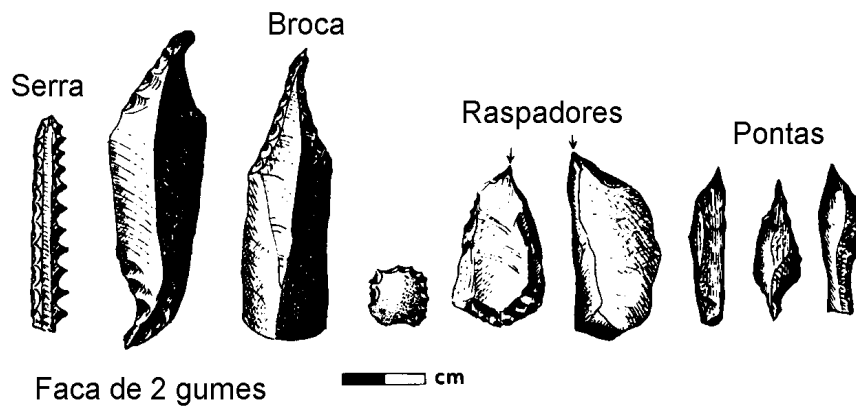


Figura 5 – Ferramentas de pedras (Spur, 1997)



Figura 6 – Furadeira a arco egípcia – 1500 A. C

1.000 A.C. - Surgem os primeiros tornos

Idade do Bronze – metais predominantes Cu, Zn, Sn

700 A.C. - processamento do ferro

SÉC. XIV - Desenvolvimento das primeiras armas de fogo na Europa

SÉC. XVI - Torneamento ornamental - Jacques Benson

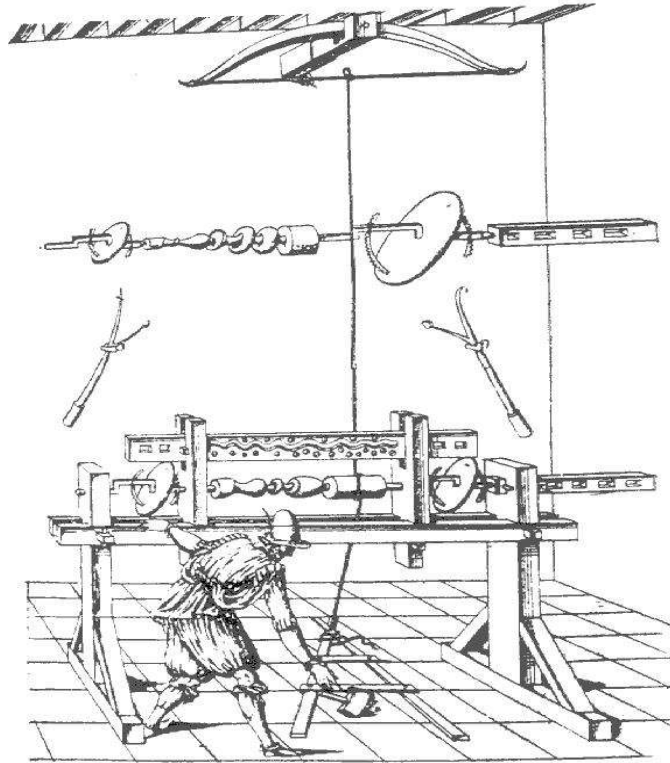


Figura 7 – Torno a arco – 1565 (Spur, 1997)

→ **SÉC. XVII** – Melhoria nos processos de fabricação de ferro e aço

→ **SÉC. XVIII** - Primeiras obras conhecidas sobre torneamento – Jacques Plumier - *L'ART DE TORNEURS*.

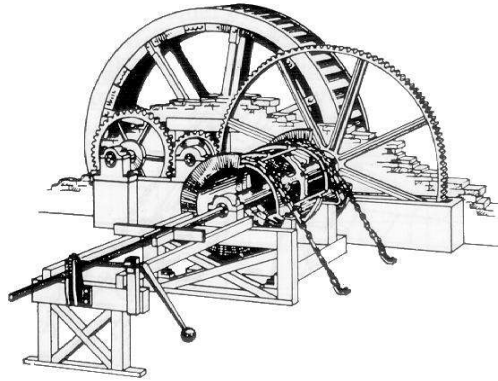


Figura 8 – Furadeira de Wilkinson – Acionada a roda d'água

→ **SÉC. XIX** – Revolução industrial

- Desenvolvimento da máquina a vapor – James Watts
- Primeiras Máquinas-Ferramentas projetadas segundo princípios modernos
- ➔ Fabricação em série
- ➔ Aço ferramenta é o principal material de ferramentas de usinagem

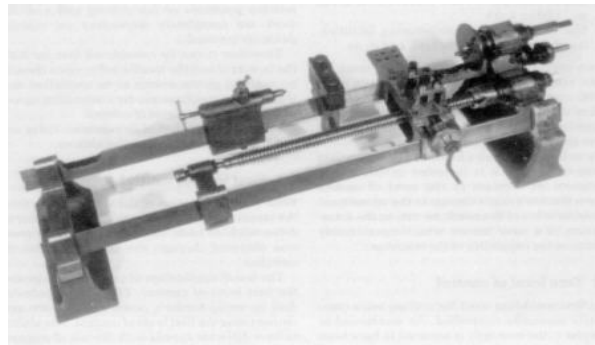


Figura 9 – Torno de Maudslay – 1848

→ **SÉC. XX** – Século da tecnologia

- **1900** – Taylor apresenta o Aço Rápido
- **1930** – Vanner Bush inventa o primeiro computador analógico
- **1935** – é desenvolvido o Metal Duro
- **1946** – é desenvolvido o primeiro computador eletrônico digital – o ENIAC
- **1947** – é desenvolvido o primeiro transistor nos Laboratórios Bell
- **1950** – Primeira máquina-ferramenta numericament controlada, utilizando um computador eletrônico EDSAC nos MIT-EUA
- **1960** - Primeira LASER foi construído por Theodore Maiman, Laboratórios Hugues

- **1968** Borroughs produz os primeiros computadores utilizando circuitos integrados
- **'70** - BRIAN – Primeiras Pesquisas sobre usinagem de ultraprecisão
- **'70** – Primeiras ferramentas Cermets – Japão
- **'80** – Primeiras pesquisas sobre usinagem de alta-velocidade
- **'90** – Ferramentas cerâmicas
- **'90** – Ferramentas CBN, Diamante

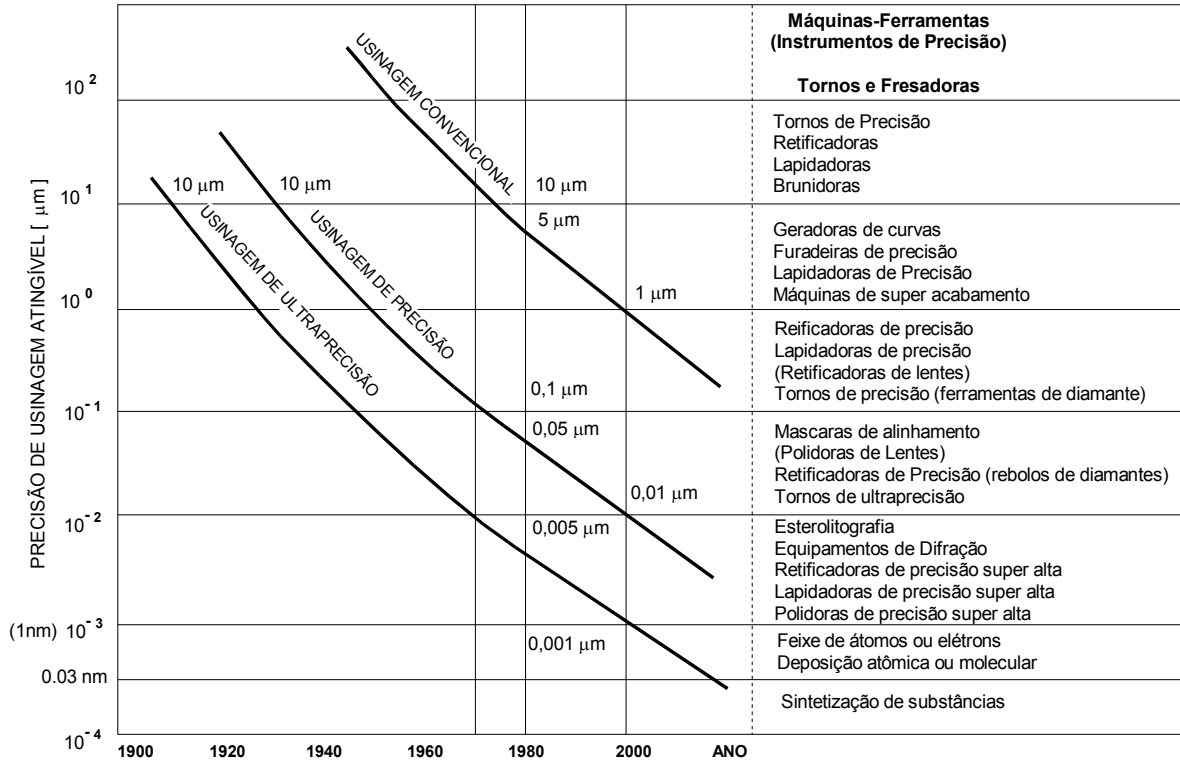


Figura 10 – Evolução da precisão na usinagem no século XX

➔ **SÉC. XXI** – Tendências para este século

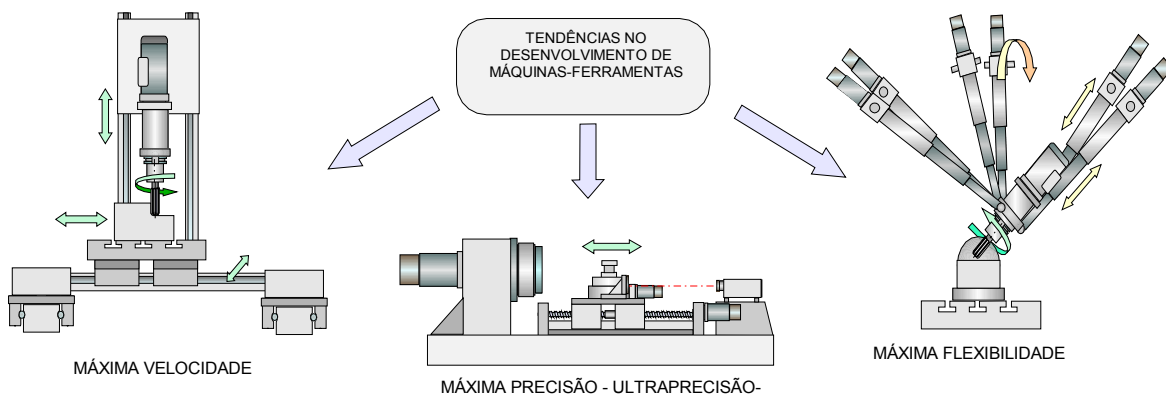


Figura 11 – Tendências para a usinagem no século XXI

Cinemática geral dos processos de usinagem

Os processos de usinagem com ferramentas de geometria definida e não definida, necessitam de um movimento relativo entre peça e ferramenta.

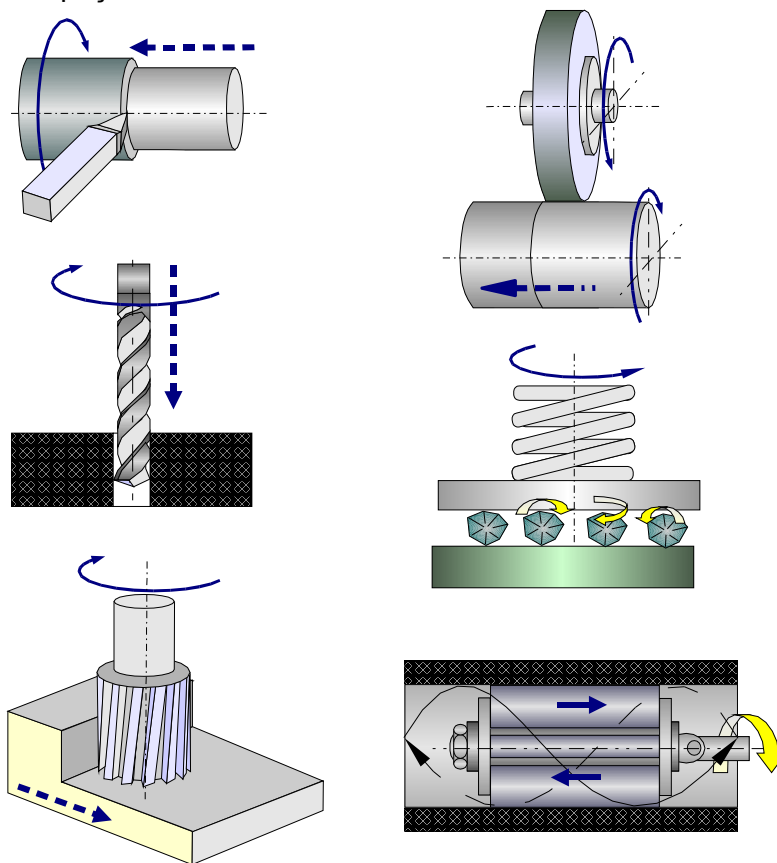


Figura 12 – Visão Geral da cinemática dos processos

→ Nos processos não convencionais a cinemática não visa a iteração entre peça e ferramenta, necessária a formação do cavaco, mas sim gerar um movimento de guiagem da ferramenta.

Grandezas do processo

- **Peça** – Tudo aquilo que irá sofrer uma operação de usinagem
- **Dispositivo de fixação** – local onde será fixada a peça
- **Ferramenta** – tudo o que realiza uma operação de usinagem
- **Porta-ferramenta** - dispositivo destinado a fixar a ferramenta
- **Máquina-ferramenta** – elemento que proporcionará os movimentos, velocidade, avanço e a força necessária ao processo de usinagem

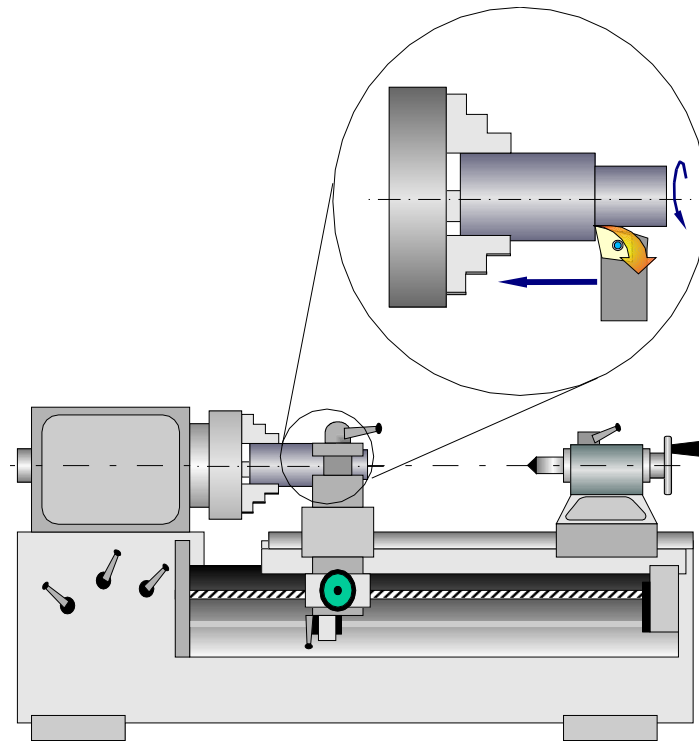


Figura 13 – Grandezas do processo

→ Movimentos que **causam** diretamente a remoção de cavaco:

- de corte
- de avanço
- efetivo de corte

→ Movimentos que **não causam** diretamente a remoção de cavaco:

- de aproximação e afastamento
- de ajuste
- de correção

Velocidades do processo de usinagem

- **Velocidade de Corte (V_c)**

$V_c = f$ (material peça/material ferramenta)

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \tag{Eq. 1}$$

- **Velocidade de Avanço (V_f)**

- **Velocidade efetiva de corte (V_e)**

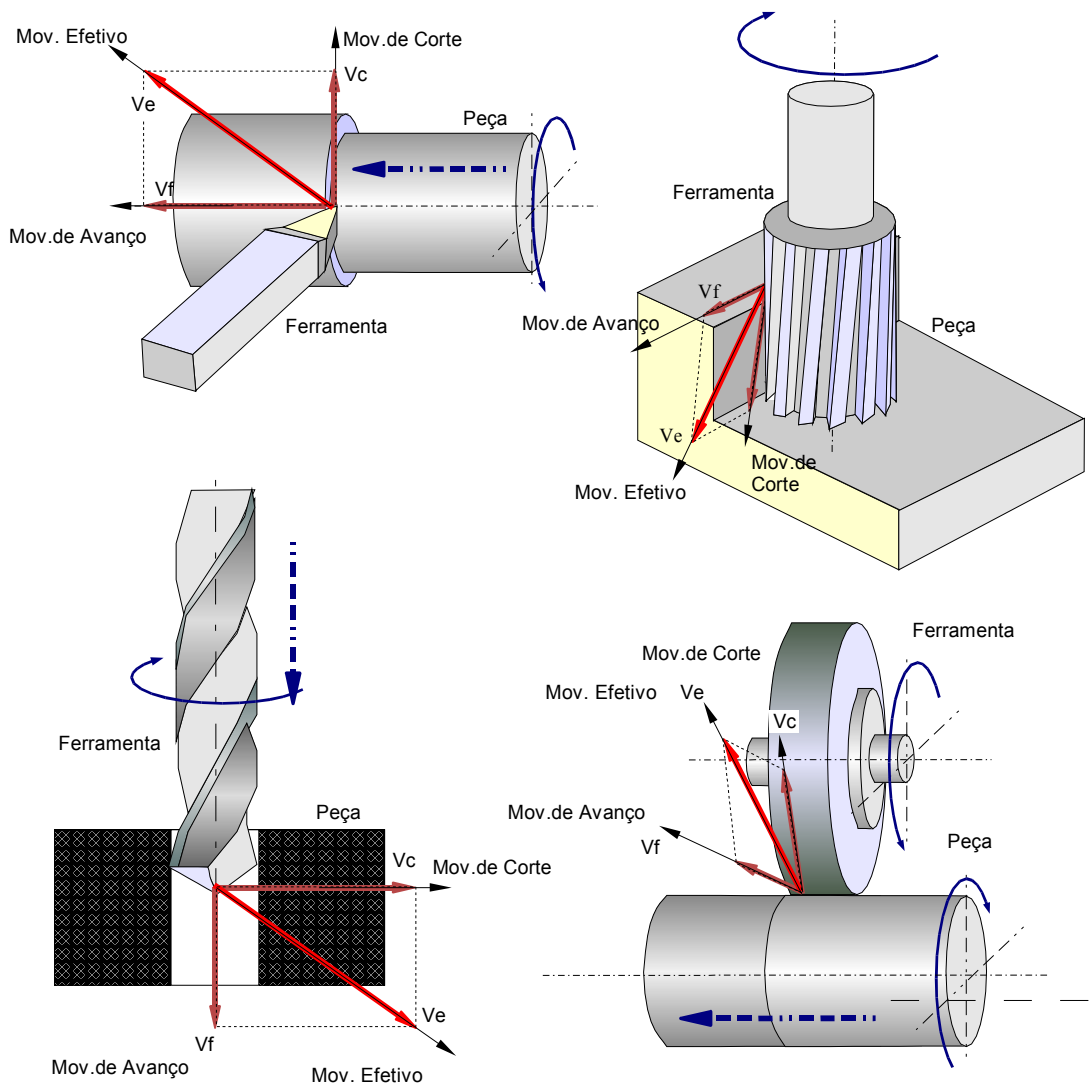


Figura 14 – Movimentos nos processos de usinagem

Grandezas de corte

- avanço (f)
- profundidade de corte (a_p)
- largura de corte (b)
- espessura de corte (h)
- ângulo de direção do gume (c)

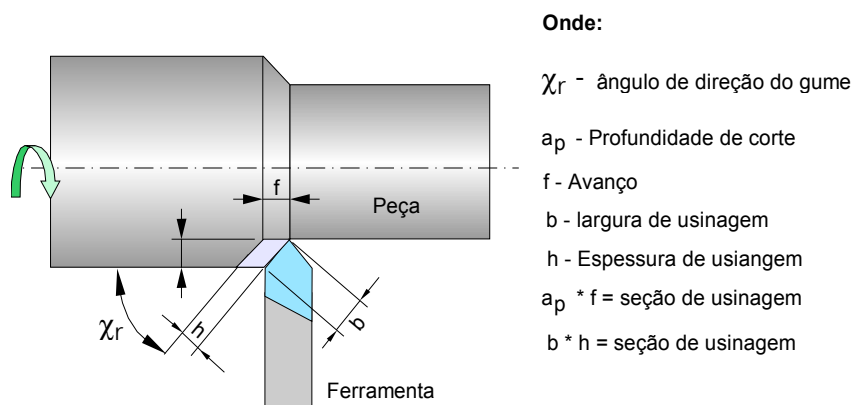


Figura 15 – Grandezas do processo de usinagem

Relações que envolvem a qualidade de uma peça usinada

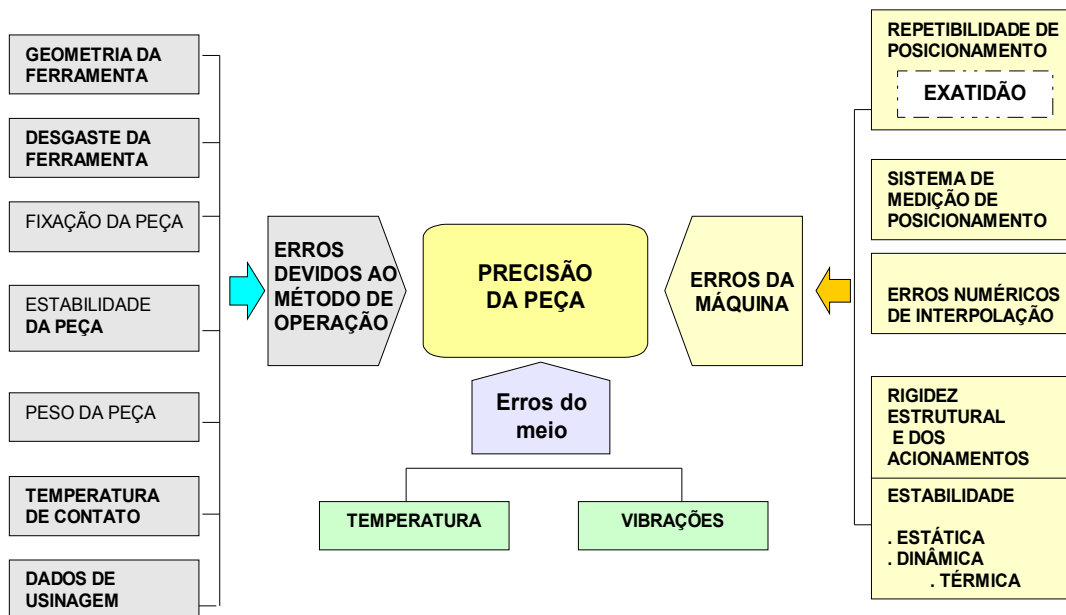


Figura 16 – Relações que envolvem a qualidade de uma peça usinada

Geometria da Cunha de Corte

→ Cada par material de ferramenta / material de peça têm uma geometria de corte apropriada ou ótima

A geometria da ferramenta influencia na:

- Formação do cavaco
- Saída do cavaco
- Forças de corte
- Desgaste da ferramenta
- Qualidade final do trabalho

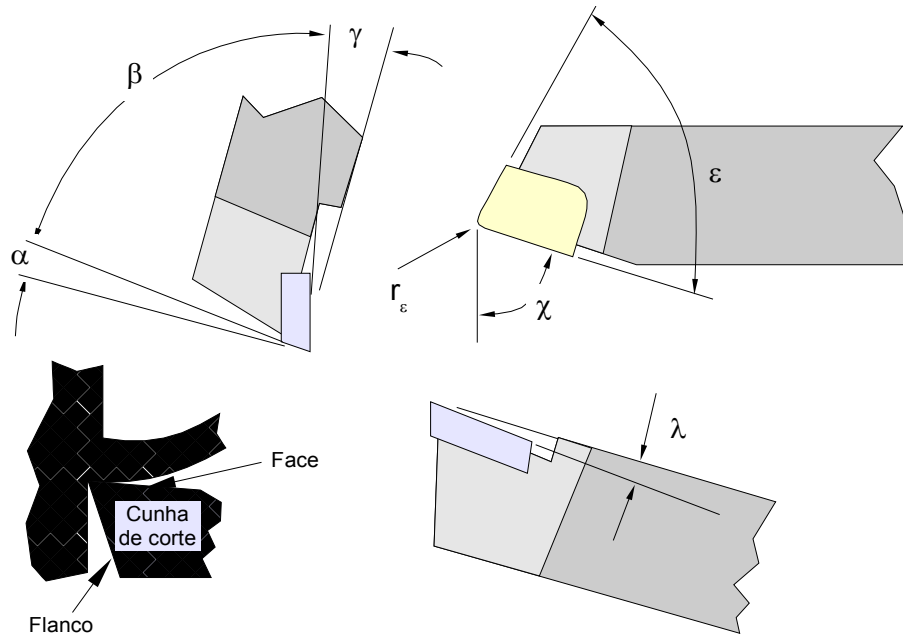


Figura 17 – Denominações para as ferramentas de tornear

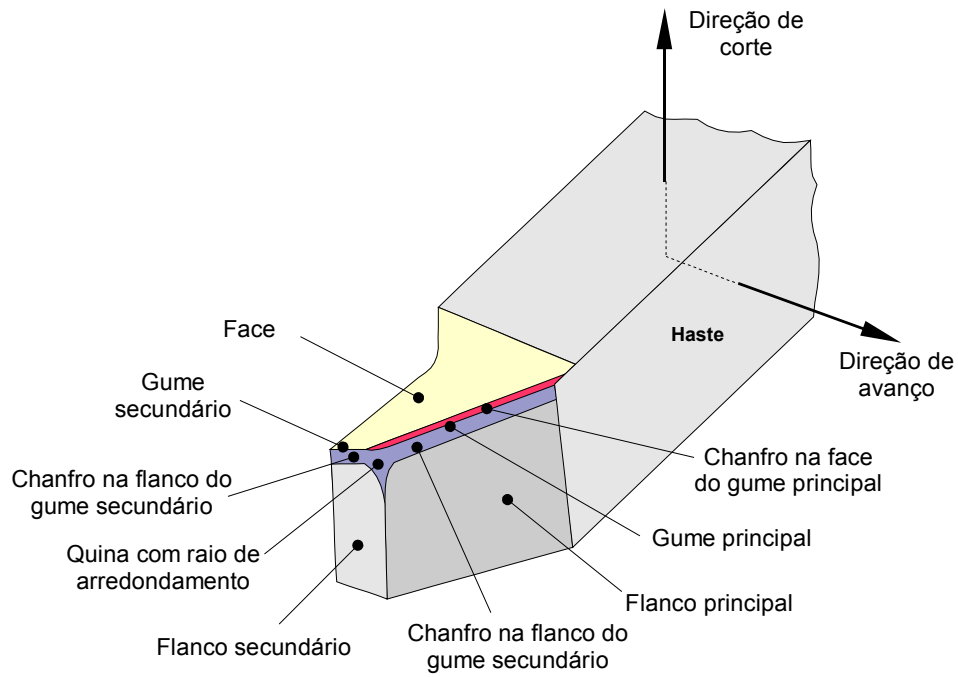


Figura 18 – Geometria da ferramenta de tornear

Onde:

α = ângulo de incidência

β = ângulo de cunha

γ = ângulo de saída

ε = ângulo de quina

χ = ângulo de direção

λ = ângulo de inclinação

r_e = raio de quina

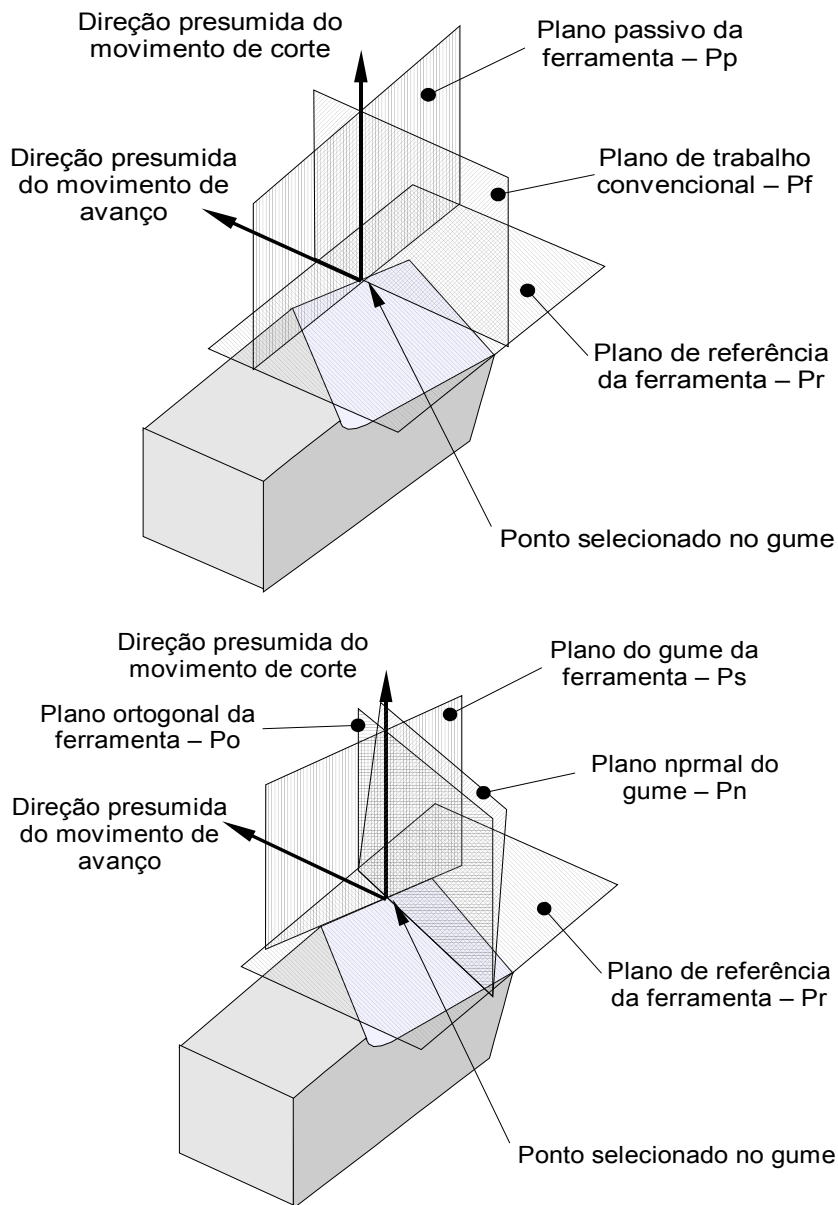


Figura 19 – Planos no sistema da ferramenta na mão – Ferramentas de tornear

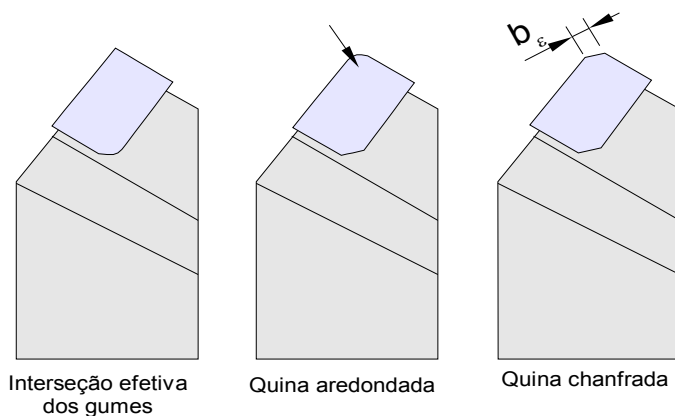


Figura 20 – Tipos de quinas

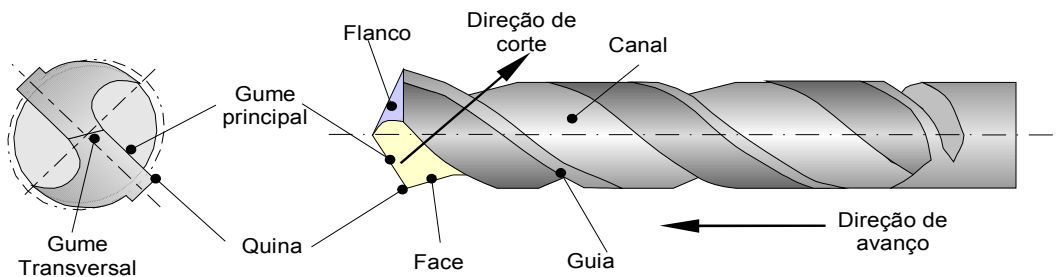


Figura 21 – Denominações para as ferramenta de furar

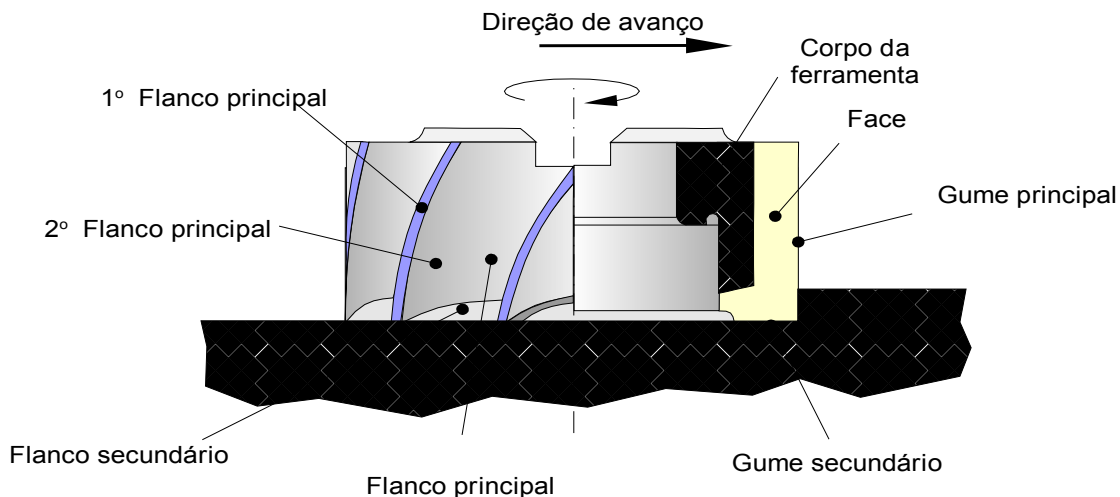


Figura 22 – Denominações para as ferramentas de fresar

→ **Fatores a serem considerados na escolha da geometria da ferramenta:**

- Material da ferramenta
- Material da peça
- Condições de corte
- Tipo de operação
- Geometria da peça

Influências da Geometria da Ferramenta

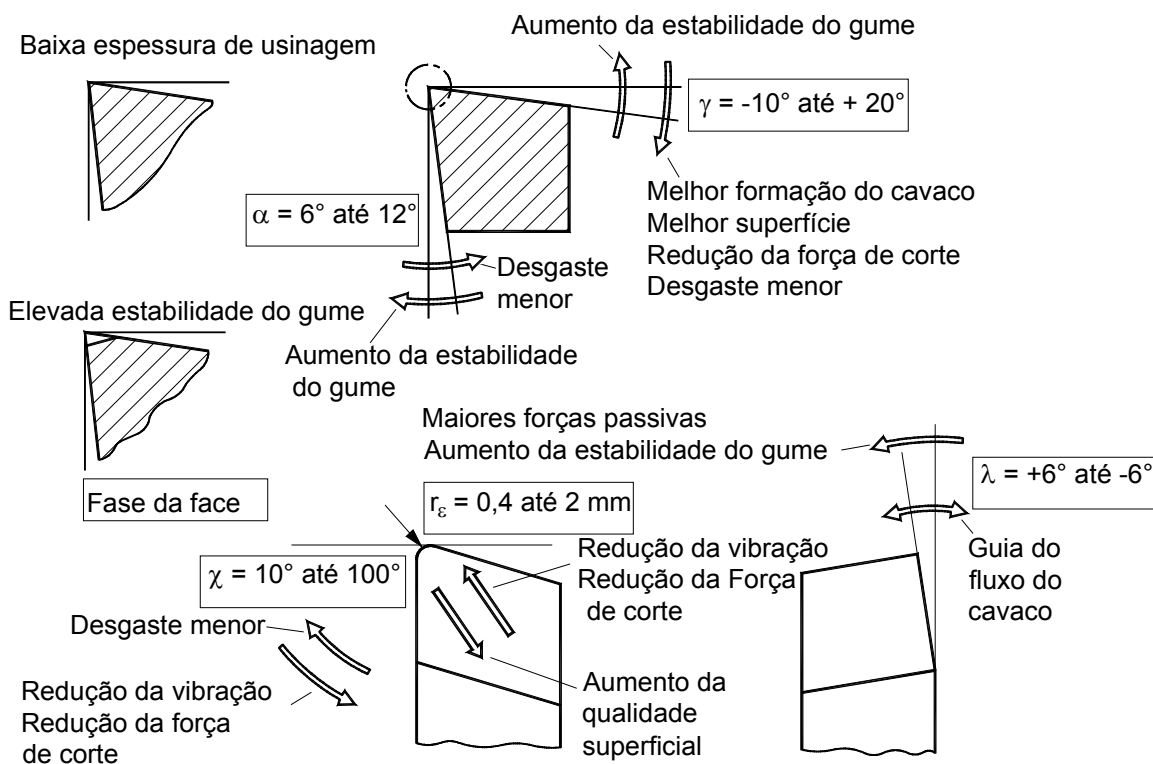
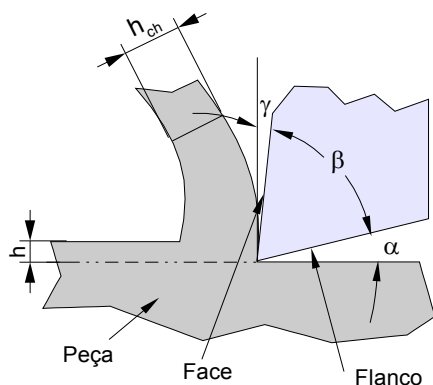


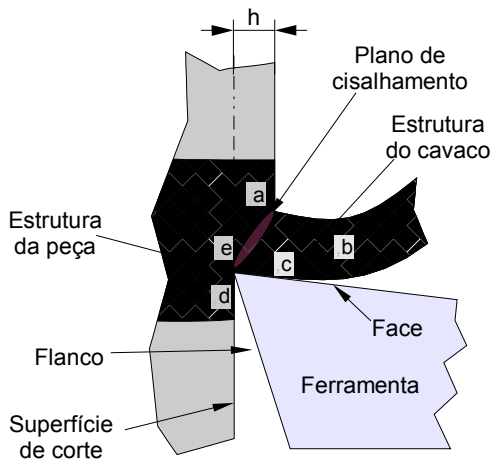
Figura 23 - Influência da geometria da cunha

Cavacos



Onde:
 α = ângulo de incidência
 β = ângulo de cunha
 γ = ângulo de saída
 h = espessura de usinagem (antes da retirada do cavaco)
 h_{ch} = espessura de corte (depois da retirada do cavaco)

Figura 24 – Denominações para a formação dos cavacos



Onde:
a) zona de cisalhamento
b) região de separação do material para materiais frágeis
c) superfície do cavaco - deformações devidas a esforços
d) superfície de corte - deformações devidas a esforços
e) região de separação para materiais dúcteis

Figura 25 – Regiões da formação do cavaco

Tipos de cavacos

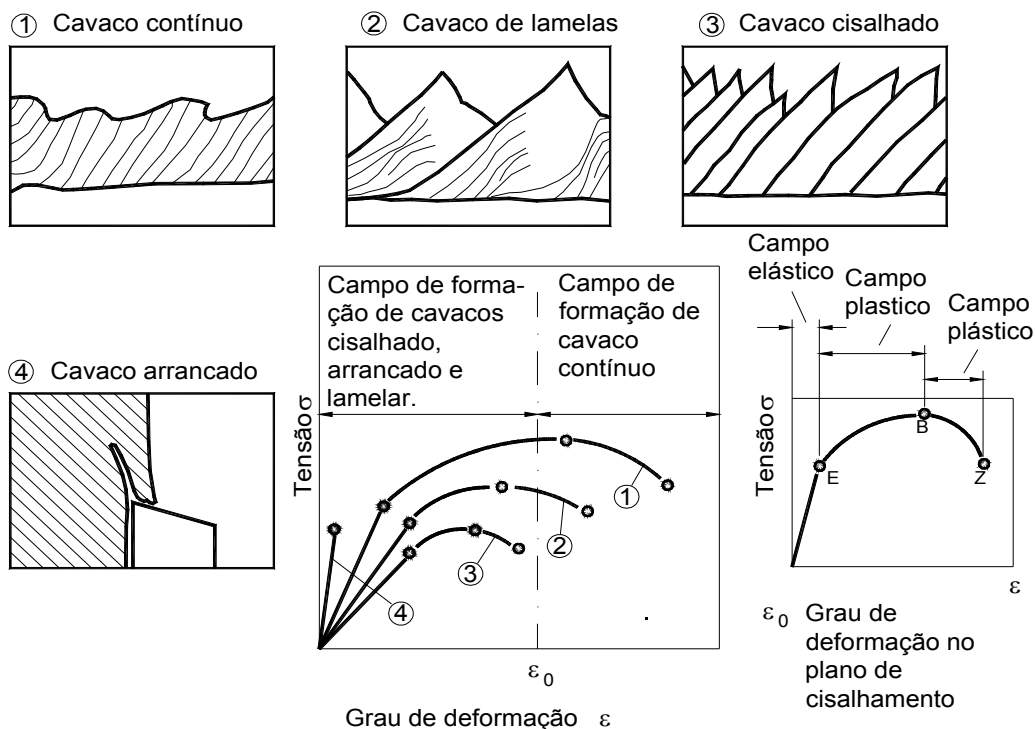


Figura 26 – Tipos de cavacos em função do material

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônica	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônica	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Figura 27 – Classificação dos cavacos

Solicitações na cunha de corte

Forças na usinagem

Força de usinagem = f (condições de corte (f , v_c , a_p), geometria da ferramenta (α , β , γ), desgaste da ferramenta)

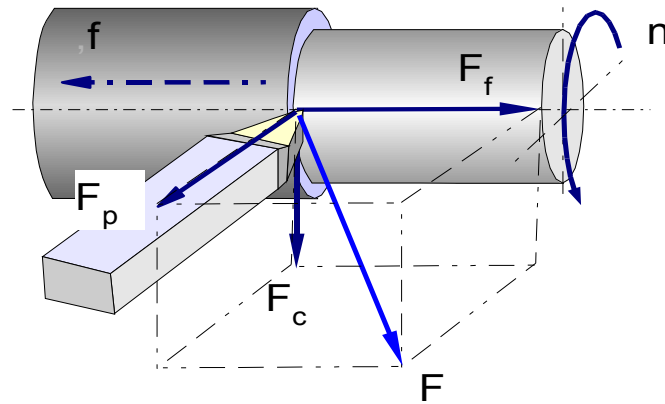


Figura 28 – Esforços no processo de torneamento

Onde:

F_c = Força de corte

F_f = Força de avanço

F_p = Força de avanço

F_c e $F_f \sim 250$ a 400 N/mm² - aços de construção mecânica

F_c e $F_f \sim 1100$ N/mm² - materiais de difícil usinabilidade

Subdivisão do trabalho efetivo na usinagem

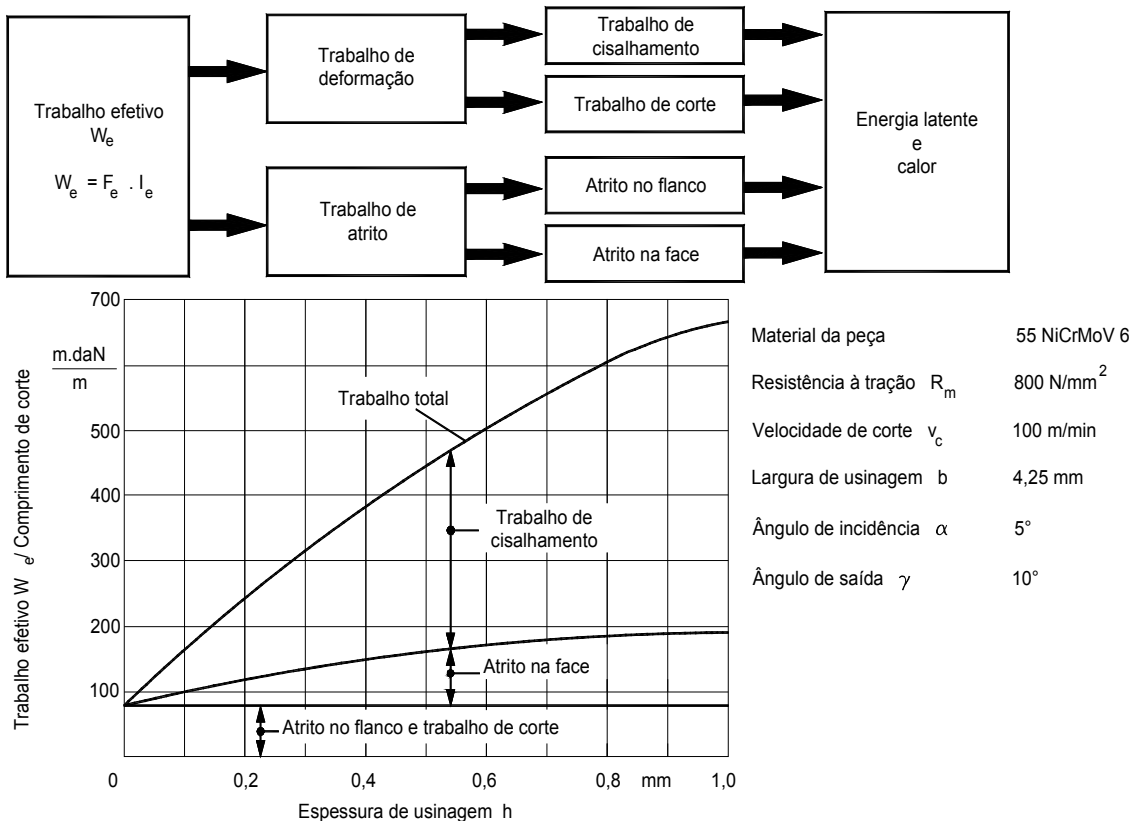


Figura 29 – Subdivisão do trabalho efetivo

Solicitações térmicas

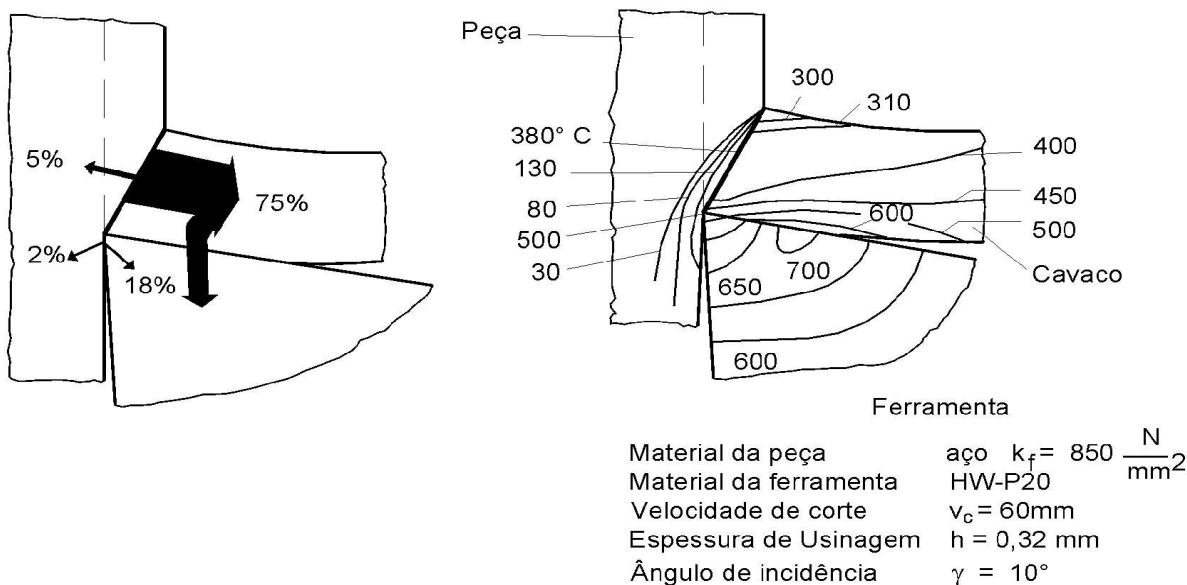


Figura 30 – Solicitações térmicas na cunha de corte

Materias de ferramentas

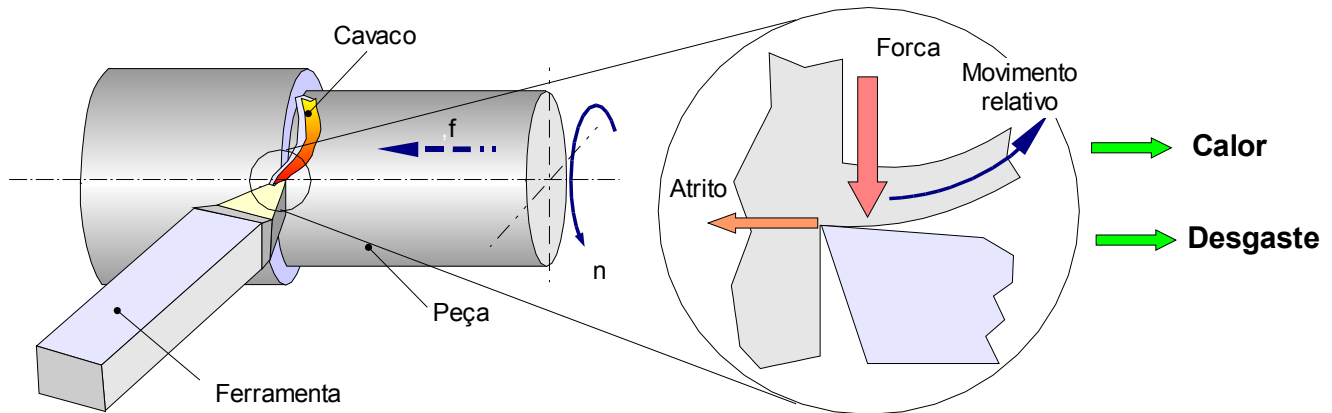


Figura 31 – Forças, atrito e movimento na formação do cavaco

→ Requisitos desejados em uma ferramentas de corte

- Resistência à compressão
- Dureza
- Resistência à flexão e tenacidade
- Resistência do gume
- Resistência interna de ligação
- Resistência a quente
- Resistência à oxidação
- Pequena tendência à fusão e caldeamento
- Resistência à abrasão
- Condutibilidade térmica, calor específico e expansão térmica adequados

Evolução dos materiais de ferramenta

- Aço ferramenta (1868)
- Aço rápido (1900)
- Stellite (1910)
- Metal duro (1926)
- Cerâmicas (1938)
- Nitreto de boro cúbico (década de 50)
- Diamante mono e policristalino (década de 70)

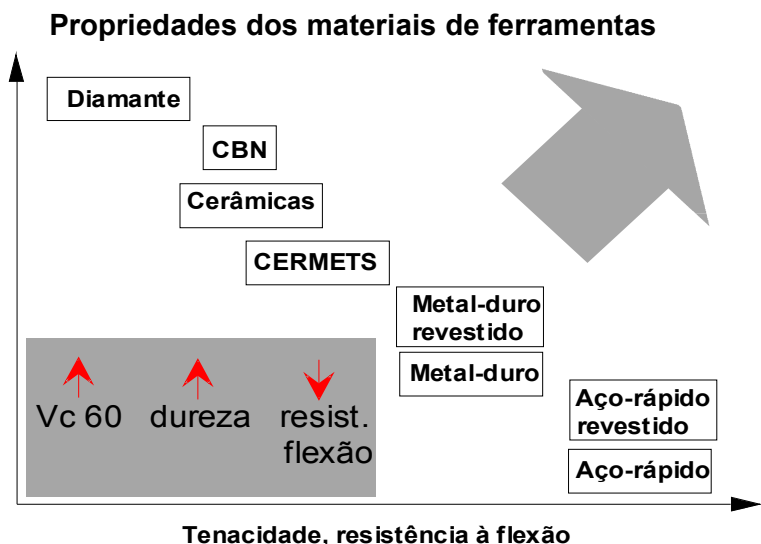


Figura 32 – Características de resistência dos materiais de ferramentas

Classificação dos materiais de ferramentas

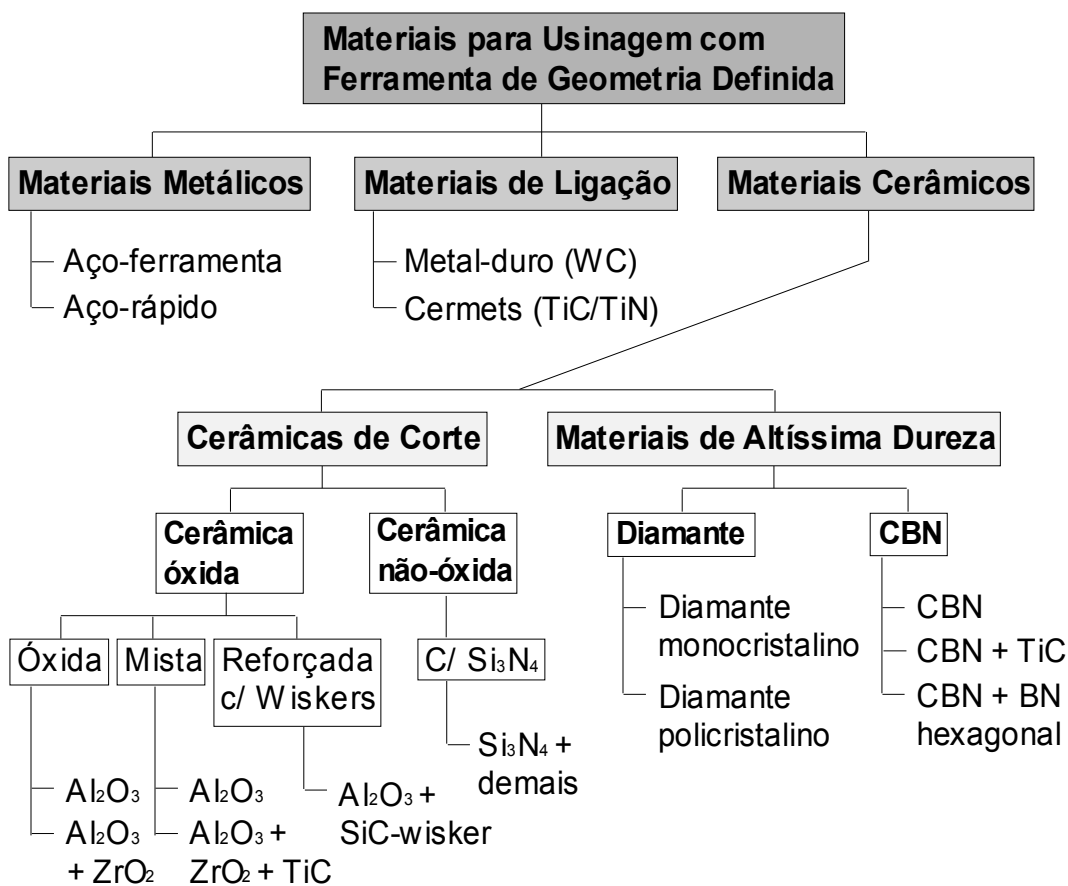


Figura 33 – Classificação dos materiais de ferramentas

Resistência a quente dos principais materiais de ferramentas

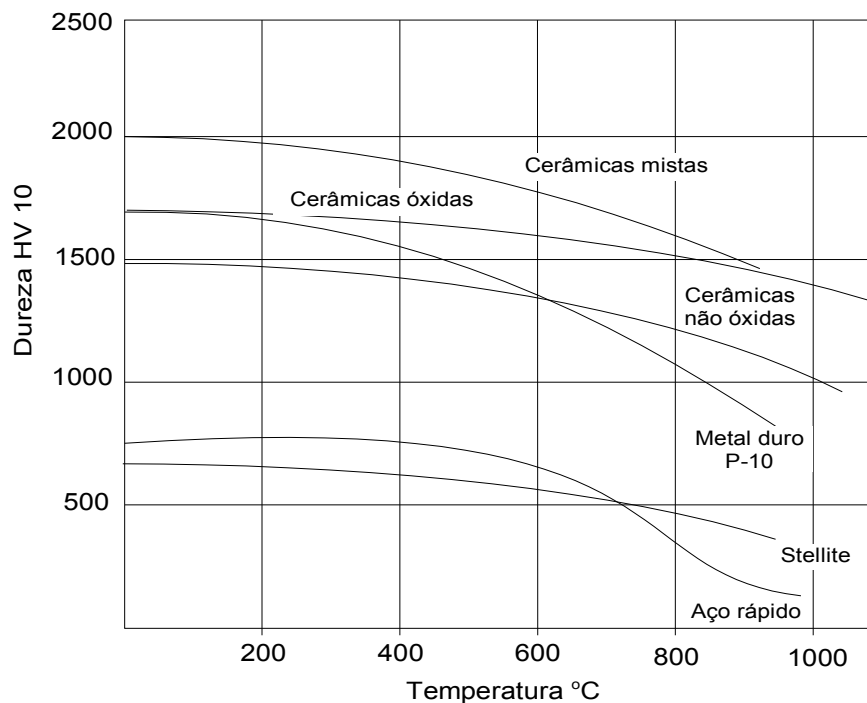


Figura 34 – Resistência a quente dos materiais de ferramentas

Dureza de alguns materiais de corte

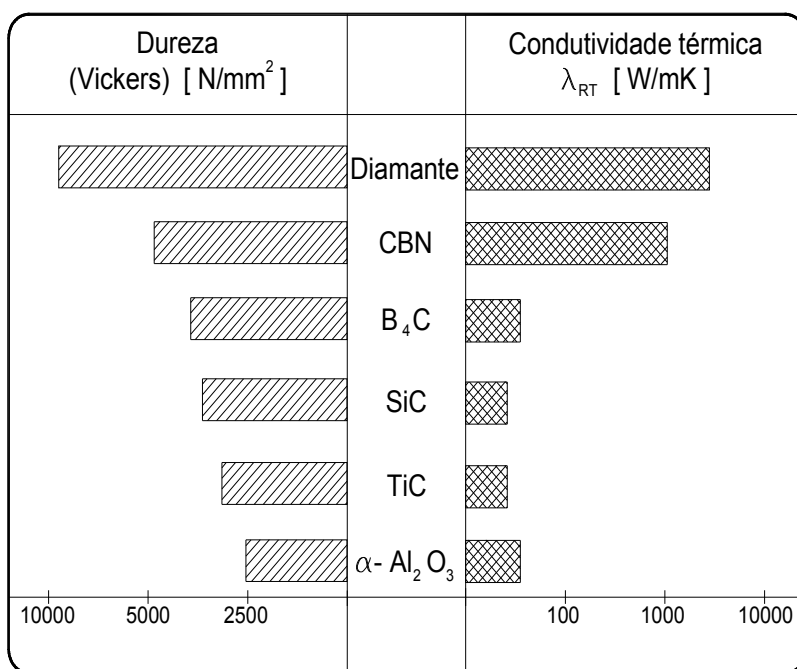


Figura 35 – Dureza dos principais materiais de ferramentas

Características e emprego

➤ Aços ferramenta

- **Características**

- Aços carbono (0,8 a 1,5 % de C), sem ou com mínimos teores de elementos de liga
- Principal material utilizado até 1900
- Baixo custo
- Facilidade de afiação – obtenção de gumes vivos
- Tratamento térmico relativamente simples □ elevada dureza e resistência ao desgaste
- Resistem a temperatura de até aproximadamente 250°C

- **Áreas de aplicação dos aços-ferramentas**

- Usinagem de aços doces com $V_c < 25\text{m/min}$
- Brocas para uso doméstico – *hobby*
- Ferramentas para carpintaria

➤ Aços rápidos

- **Características**

- Principais elementos constituintes (W, Mo, Co, V)
- Dureza de 60 a 67 HRC
- Resistem a temperatura de até aproximadamente 520 a 600°C
- Clássico 18 (%W) - 4 (%Cr) – 1 (%V)
- Aço super rápido adição de Co
- Tratamento térmico complexo
- preço elevado

- **Áreas de aplicação dos aços-rápidos**

- Ferramentas para todas as operações de usinagem
- Ferramentas para desbaste e acabamento
- Machos e cossinetes de roscas
- Brocas helicoidais
- Alargadores
- Fresas de todos os tipos

- Ferramentas de plainar
- Escareadores
- Ferramentas para trabalho a frio
- Ferramentas para trabalho em madeira
- outras.

➤ **Ligas Fundidas – Stellite, Tantung, Rexalloy e Chromalloy**

• **Características**

- Composição típica: 3% Fe, 17% W, 33% Cr e 44% Co
- Resistem a temperatura de até aproximadamente 700 a 800°C
- W □ Mn, Mo, V, Ti e Ta
- Tratamento térmico complexo
- Preço elevado

• **Áreas de aplicação dos aços-rápidos**

- Raro em ferramentas para usinagem de geometria definida
- Material para abrasivos
- Isoladores térmicos, isoladores elétricos
- Fundição de materiais cerâmicos
- outros

➤ **Metal Duro - WIDIA**

• **Características**

- Desenvolvimento 1927 - Leipzig
- Composição típica: 81% W, 6% C e 13% Co – (WC-Co)
- Resistem a temperatura de até aproximadamente 1000°C (mesma dureza que o aço rápido à temperatura ambiente)
- Maiores v_c com relação as ligas fundidas, aços rápidos e aços ferramenta
- Aumento na vida útil das ferramentas na ordem de 200 a 400%
- Boa distribuição da estrutura
- Boa resistência à compressão
- Boa resistência ao desgaste a quente

- Possibilidade de se obter propriedades específicas com variações da composição de carbonetos
- A princípio utilizado para a usinagem de materiais fundidos
- Anos 70 (seculo XX)- surgimento de metais duros revestidos
- Surgimento dos primeiros Cermets ® (metais duros à base de TiC)- maiores v_c 's -1973 - Japão

- **Estrutura do Metal Duro**

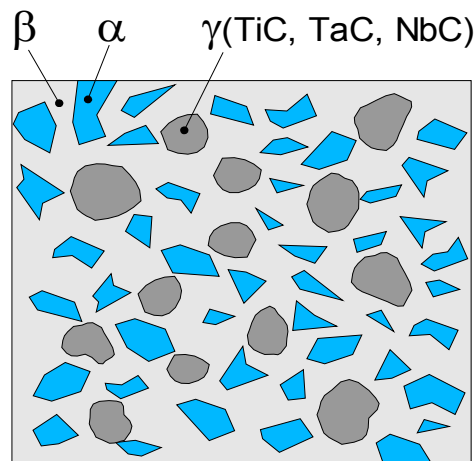


Figura 36 – Distribuição dos componentes do metal-duro

onde:

- α = carbonetos de tungstênio
- β = cobalto
- γ = carbonetos de titânio, tântalo e nióbio

- **Propriedades dos componentes do Metal Duro**

Carboneto de tungstênio (WC)

- Solúvel em Co => alta resistência de ligação interna e de gume
- Boa resistência ao desgaste abrasivo (melhor que TiC e TaC)
- Limitações de v_c 's devido à tendência à difusão em temperaturas elevadas

Carboneto de Titânio (TiC)

- Baixa tendência à difusão
- Boa resistência à quente
- Pequena resistência de ligação interna □ baixa resistência de gume
- Os metais duros com alto teor de TiC são frágeis

Carboneto de Tântalo (TaC)

- Em pequenas quantidades □ refino do grão □ proporciona um aumento de tenacidade e de resistência do gume
- A resistência interna do metal duro cai menos do que quando é utilizado TiC

Carboneto de Nióbio (NbC)

- Em pequenas quantidades □ refino do grão □ proporciona um aumento de tenacidade e de resistência do gume
- A resistência interna do metal duro cai menos do que quando é utilizado TiC

Nitreto de titânio (TiN)

- Componente de maior influência nas propriedades dos Cermets
- Menor solubilidade no aço
- maior resistência à difusão que o TiC
- Alta resistência ao desgaste
- Estrutura de grãos finos

Cobalto (Co)

- Melhor metal de ligação para metais duros com base em WC
- Boa solubilidade do WC
- Bom ancoramento dos cristais de WC

Grandezas de influência sobre a resistência ao desgaste e a tenacidade

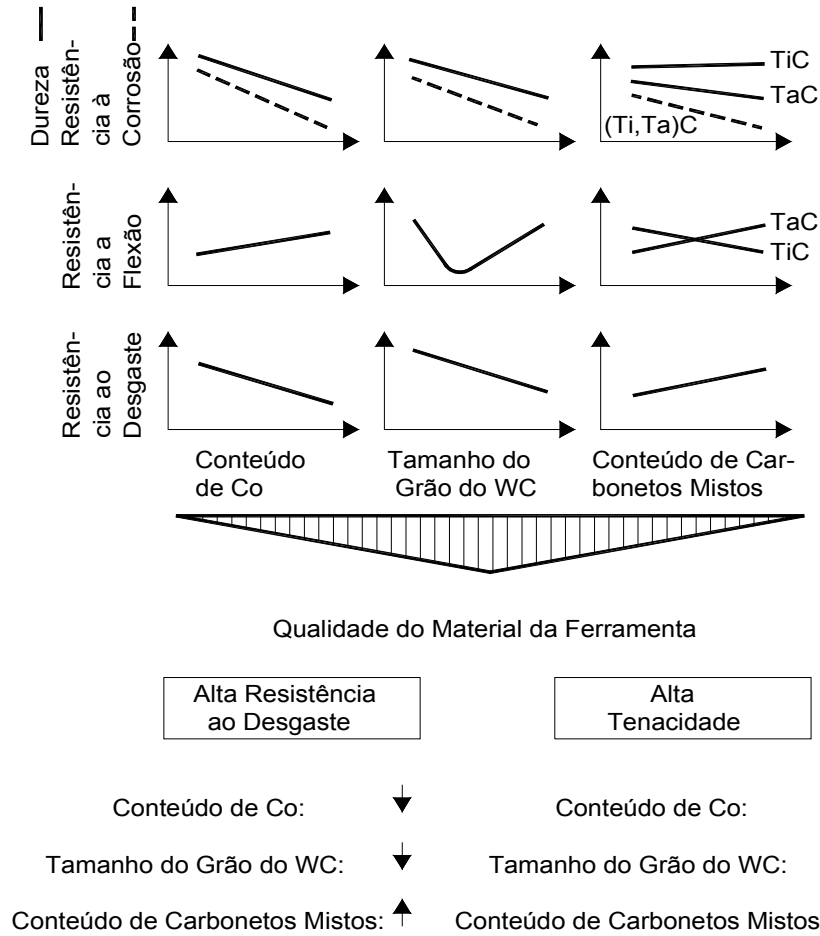


Figura 40 – Influência dos constituintes do metal-duro nas suas características

Classificação dos Metais Duros

➤ **Metais duros à base de WC-Co**

- ➔ Alta resistência à compressão
- ➔ Aconselháveis para a usinagem de aço mole, materiais de cavaco curto, fundidos, não ferrosos, materiais resistentes ao calor e não metálicos como pedra e madeira

➤ **Metais duro à base de WC- (Ti, Ta, Nb)C-Co**

- ➔ Comparados aos metais duros WC-Co possuem melhores propriedades sob altas temperaturas
- ➔ Aconselháveis para usinagem de aços de cavacos longos

➤ **Metais duro à base de TiC-TiN-Co, Ni (Cermets)**

- ➔ Grande dureza, baixa tendência à difusão e à adesão, boa resistência a quente
- ➔ Apropriados para o acabamento de aços (torneamento e fresamento)

Classes de metal duro

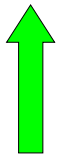
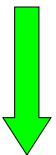
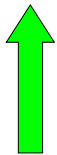
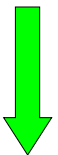
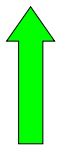
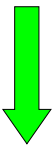
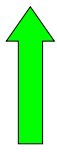
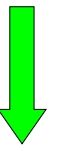
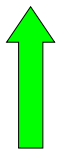
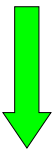
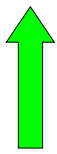
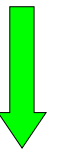
Cor	Classe	Velocidade	Avão	Resistência	Tenacidade
Azul	P-01				
	P-10				
	P-20				
	P-30				
	P-40				
	P-50				
Amarelo	M-01				
	M-10				
	M-20				
	M-30				
	M-40				
Vermelho	K-01				
	K-10				
	K-20				
	K-30				
	K-40				

Figura 41 – Classes de metal-duro

• **Áreas de aplicação dos Metais Duros**

- Ferramentas para quase todas as operações de usinagem (sob a forma de insertos)
- Ferramentas para desbaste e acabamento
- Brocas helicoidais
- Brocas para furação profunda
- Fresas de topo
- Alargadores, outras.

Metal Duro – Fabricação

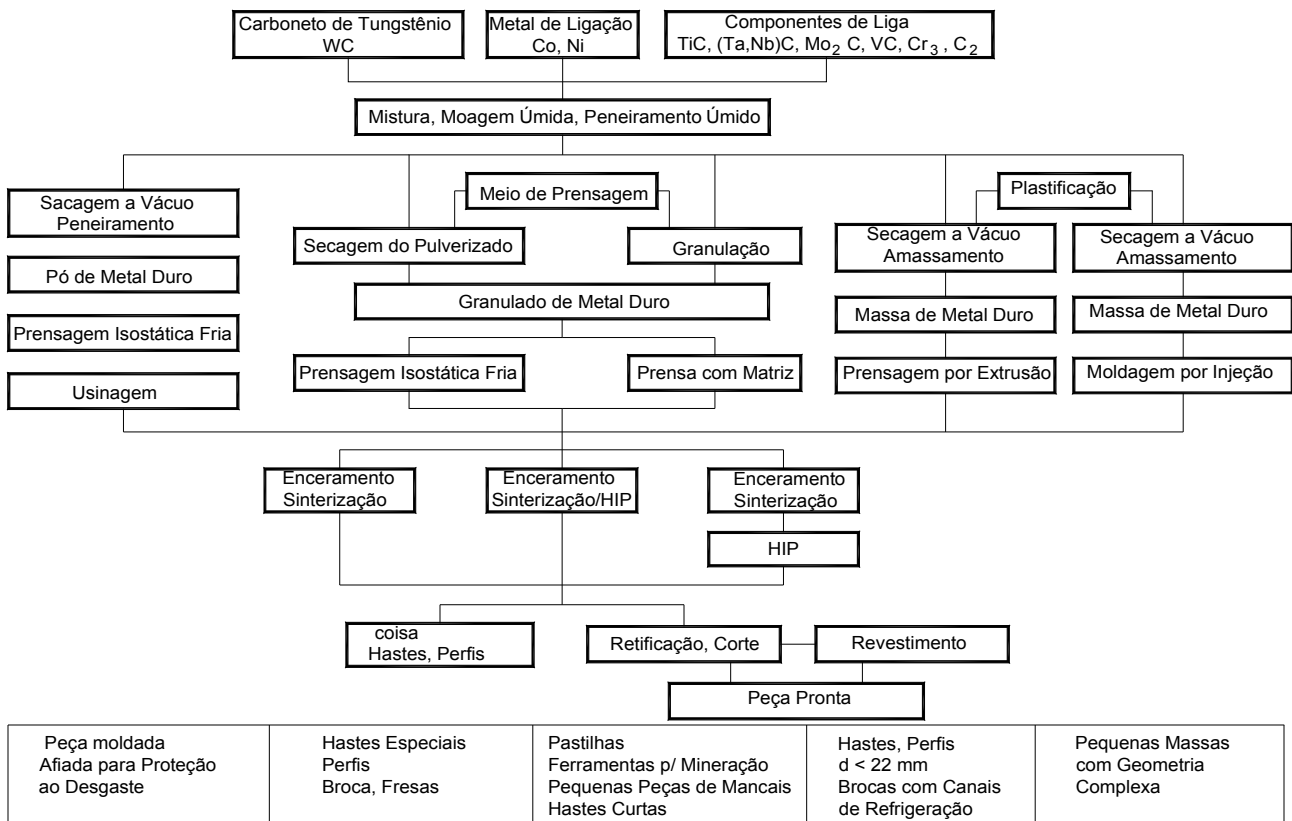


Figura 42 – Etapas da fabricação de metal-duro

Materiais de corte cerâmicos

- **Classificação das cerâmicas de corte**

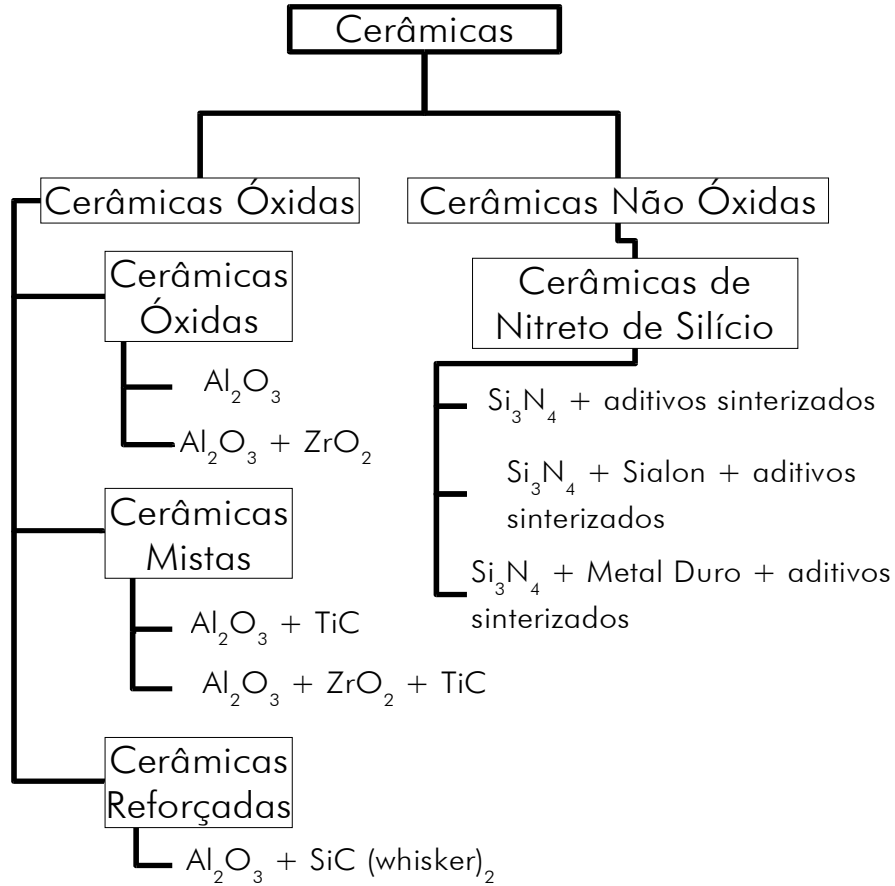


Figura 43 – Classificação dos materiais cerâmicos

==> **Whiskers** - cristais unitários em formas de agulhas com alta resistência mecânica

- **Características gerais:**

- Alta resistência à compressão

- Alta estabilidade química

- Limitações na aplicação devido ao comportamento frágil e à dispersão das propriedades de resistência mecânica

- Aplicação indispensável em áreas como fabricação de discos de freio

Classificação das Cerâmicas óxidas

→ Cerâmicas à base de Al_2O_3

- Tradicional - cerâmica óxido branca
- Al_2O_3 + óxido de zircônio finamente distribuído
- Torneamento de desbaste e acabamento de FoFo cinzento, aços cementados, aços temperados e extrudados

→ Cerâmicas reforçadas por *whiskers*

- Base de Al_2O_3 + 20 a 40 % de *whiskers* de SiC
- *Whiskers* - cristais unitários em formas de agulhas com alta resistência mecânica
- Melhora a tenacidade (60 % maior que cerâmicas mistas)
- Boa resistência a choques térmicos - corte com fluidos

→ Cerâmicas mistas (pretas)

- Base de Al_2O_3 + 5 a 40% de componentes não óxidos (TiC ou TiN)
- Grãos finos ® melhor tenacidade, resistência ao desgaste e resistência de quina
- Maior dureza que as óxidas, maior resistência a choques térmicos
- Torneamento e fresamento leves de FoFo cinzento
- Usinagem de aços cementados e temperados

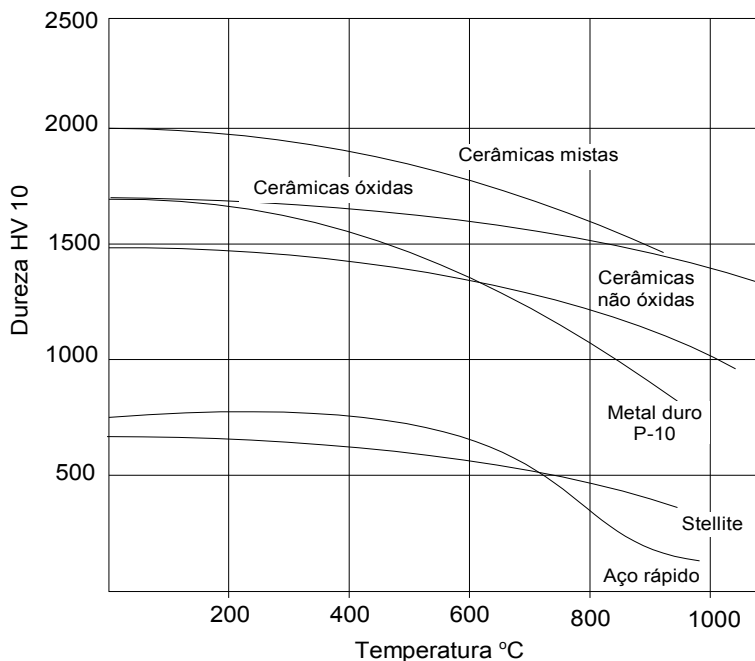


Figura 44 – Dureza a Quente de Diversos Materiais de Ferramentas

→ **Cerâmicas não Óxidas**

São cerâmicas a base de: Carbonetos, nitretos, boretos, silicatos, etc. Principalmente materiais à base de Si_3N_4

Divisão em relação à composição química

- I: Nitreto de silício + materiais de sinterização;
- II: Nitreto de Silício + fases cristalinas + materiais de sinterização;
 - Sialone - o Si_3N_4 pode conter até 60 % de Al_2O_3 na mistura sólida
- III: Nitreto de silício + materiais duros + materiais de sinterização.
 - Si_3N_4 com propriedades influenciadas por materiais como TiN, TiC, óxido de zircônio e *whisker* - SiC

Campos de aplicação

- Usinagem de FoFo (grupo I), torneamento de discos de freio e desbaste de ligas à base de níquel (grupos II e III)

➤ **Materiais de corte superduros não-metálicos**

- ◆ Nitreto de Boro Cúbico – CBN
- ◆ Diamante

➔ **Nitrero de Boro**

• **Características**

- Forma mole - hexagonal (mesma estrutura cristalina do grafite)
- Forma dura - cúbica (mesma estrutura do diamante)
- *Wurtzita* - simetria hexagonal (arranjo atômico diferente do grafite)
- Fabricação de Nitreto de boro hexagonal através de reação de halogêneos de boro com amoníaco
- Transformação em nitreto de boro cúbico através de altas pressões (50 a 90 kbar) e temperaturas 1800 a 2200 K

• **Classificação e aplicações**

➔ **I CBN + fase ligante**

- Ferramentas convencionais de PCBN
- Alto teor de CBN - pouco ligante - grãos grandes
- Desbaste de materiais ferrosos

➔ **II CBN + carbonetos (TiC + fase ligante)**

- Fase ligante composta principalmente de TiC ou nitreto de alumínio e TiN
- Menor teor de CBN e maior de ligantes desenvolvidos especialmente para usinagem de precisão

→ **III CBN + nitreto de boro hexagonal com estrutura de *wurtzita*** (HBN) + fase ligante
(+materiais duros)

- Cristais finos ==> alta tenacidade
- Desbaste e acabamento de aços fundidos e temperados

→ **Diamantes**

• **Classificação**

◆ **quanto a origem:**

→ **Naturais**

- Normalmente na forma monocristalina
- Anisotropia das propriedades mecânicas
- Clivagem em quatro orientações preferenciais

→ **Sintéticos**

- Fabricação sob temperatura e pressão elevadas
- Produção de partículas de diamante monocristalino (transformado em policristalino por compressão a quente)

◆ **quanto a composição do inserto:**

- Monocristalino
- Policristalino – diversos cristais aglutinados por galvanização

• **Áreas de aplicação de CBN**

- Monocristalino - usinagem de metais leves, pesados e nobres, borracha mole e dura, vidro, plásticos e pedra; usinagem de precisão

- Policristalino - metais leves, pesados, nobres, plásticos, carvão, grafite, metal duro pré-sinterizado, usinagem de precisão e desbaste, alumínio com alto teor de Si

Distribuição dos materiais de ferramenta na indústria

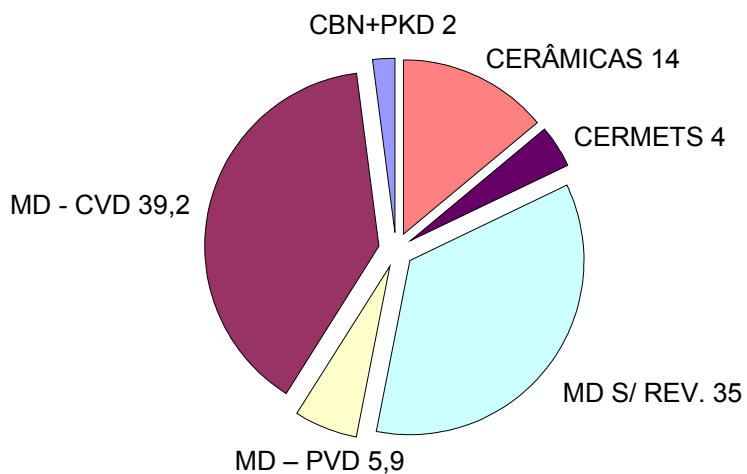


Figura 45 – % de Ferramentas na industria automobilística alemã 1995

Tópicos

- Revestimento de Ferramentas
- Considerações Gerais sobre Ferramentas de corte
- Conceito de vida da ferramenta
- Desgaste em ferramentas de usinagem
- Conceito de usinabilidade

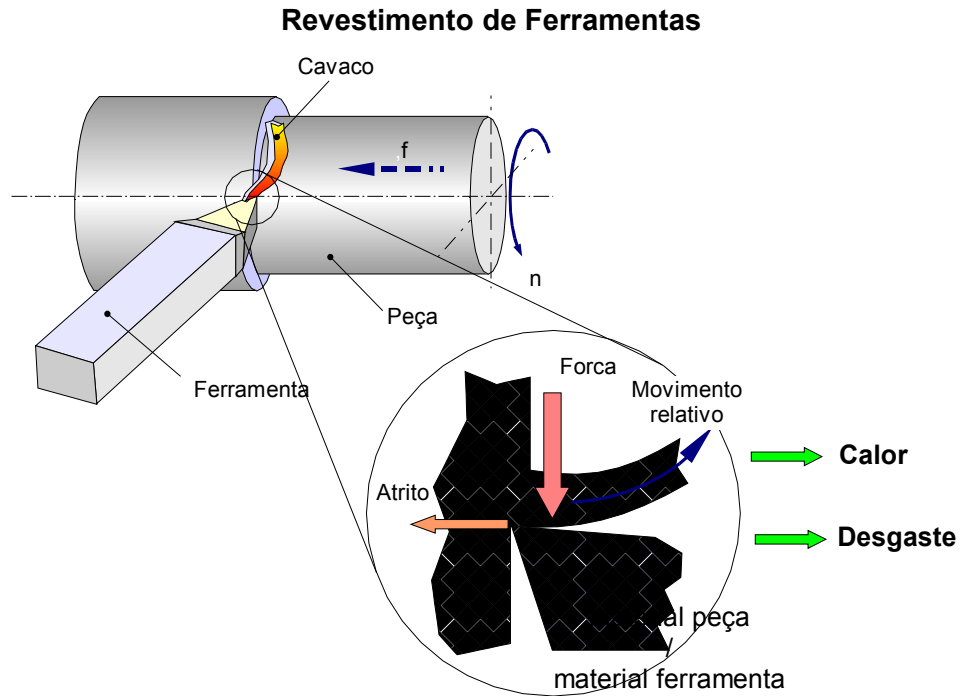


Figura 46 – Ações de forças, atrito e movimentos no torneamento

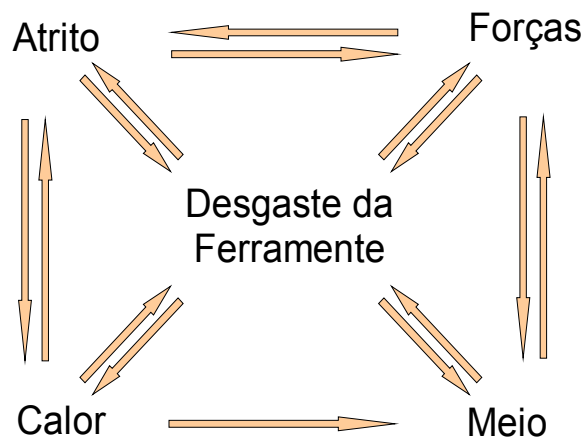


Figura 47 – Conseqüências do processo sobre a ferramenta

• **Funções dos revestimentos**

- Proteção do material de base da ferramenta
- Redução de atrito na interface cavaco/ferramenta
- Aumento da dureza na interface cavaco/ferramenta
- Condução rápida de calor para longe da região de corte
- Isolamento térmico do material de base da ferramenta

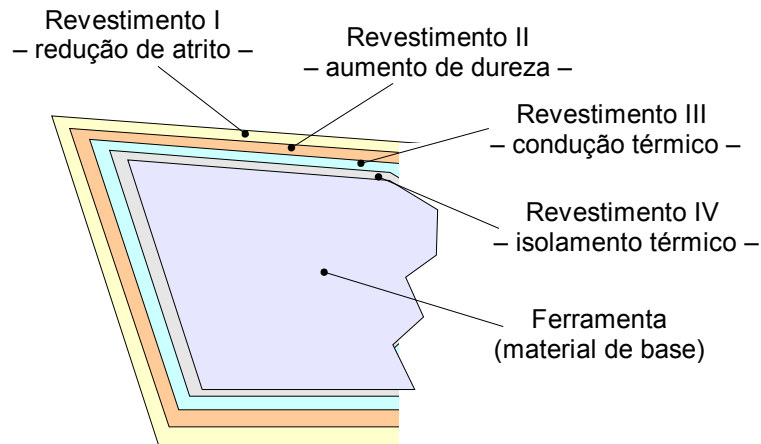


Figura 48 – Camadas multiplas de revestimentos e suas funções

- **Principais propriedades das camadas de revestimento**

Carboneto de titânio (TiC)

- alta dureza
- proteção contra o desgaste na superfície de saída
- tendência à difusão relativamente baixa

Nitreto de titânio (TiN)

- estabilidade termodinâmica
- baixa tendência à difusão

Carbonitreto de titânio (Ti(C,N))

- alta dureza
- comportamento frágil
- estabilidade térmica

Nitreto de Alumínio-titânio ((Ti, Al)N)

- boa resistência à oxidação
- boa dureza à quente

Óxido de alumínio (Al₂O₃)

- boa resistência à abrasão
- boa resistência à oxidação

Processos de revestimentos de ferramentas

- **Dois processos básicos**

- Processo CVD – Deposição Química de Vapor
- Processo PVD – Deposição Física de Vapor

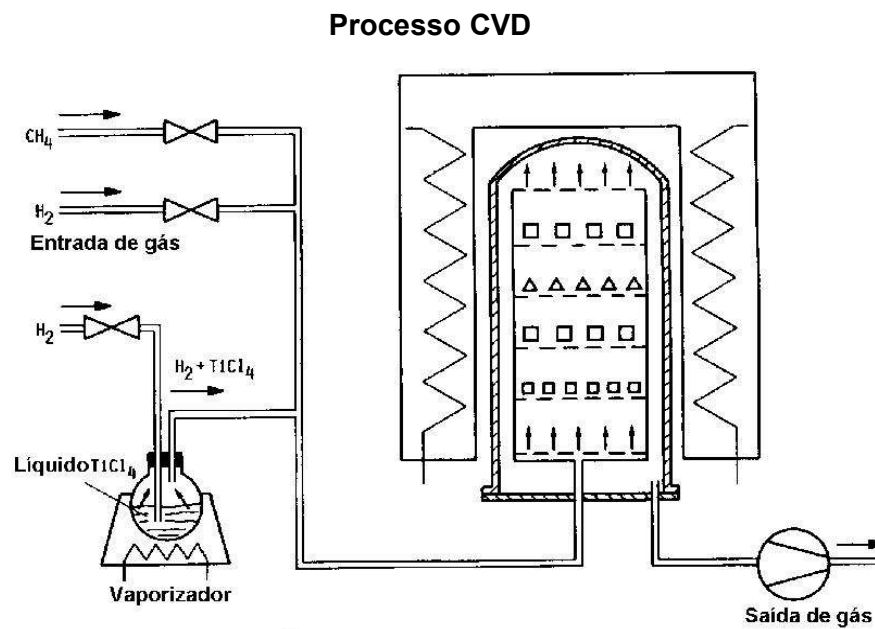


Figura 49 – Processo CVD

Processo CVD Características Gerais

- Reações químicas na fase gasosa em alto vácuo (0,01 até 1bar)
- Os produtos da reação molham o substrato
- Deposição de materiais como TiC , TiN , $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_y)\text{HfN}$, Al_2O_3 , AlON separadamente ou em camadas
- Revestimento de peças de geometria complexa

HT - CVD (Alta temperatura - 900 - 1100 °C)

- Revestimento da maioria das ferramentas de metal duro
- Alta força de aderência ao substrato
- Confere à ferramenta alta resistência ao desgaste
- Diminui a tenacidade do substrato
- Risco de formação de fases frágeis na interface

MT - CVD (Média temperatura - 700 - 900 °C)

- Aplicação de Ti(C,N) de várias formas
- Vantagens em relação ao HT - CVD:
 - - Menor solitação térmica para os mesmos modos de agregação
 - - Diminui o risco de descarbonetação - formação de fases frágeis do substrato
 - - Ocorrem menos trincas nas ferramentas e a velocidade de formação de rasgos é menor

P - CVD (Plasma CVD - 450 - 650 °C)

- A temperatura não é suficiente para que ocorram reações químicas na fase líquida
- Adição de plasma pulsante para se obter energia adicional
- Camadas de TiN, TiC, Ti(C,N), Al₂O₃
- Propriedades do substrato inalteradas

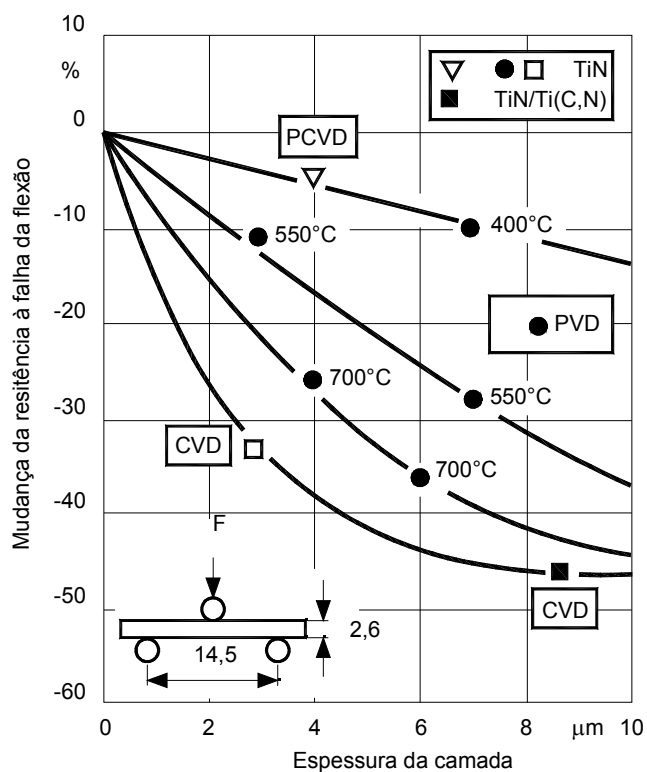


Figura 50 - Modificação da constituição da camada

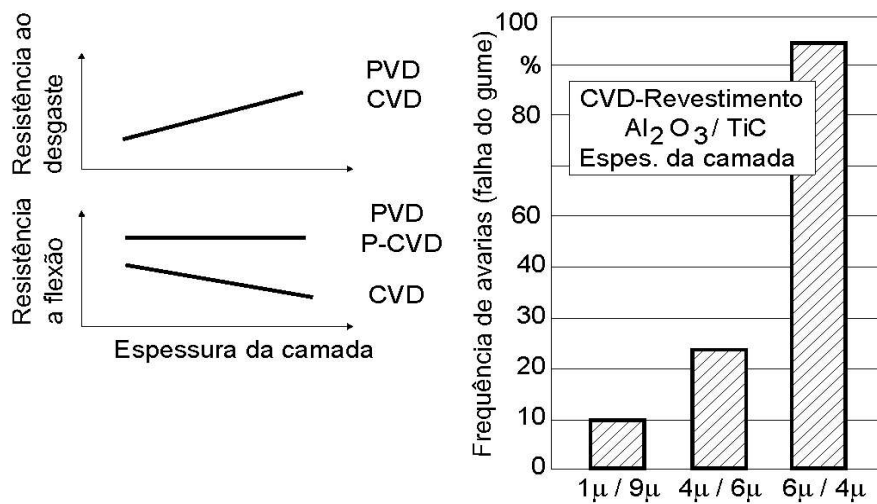


Figura 51 – Efeito da espessura do revestimento na resistência

- Espessura da camada total fixa (normalmente 5 a 12 μm)
- Revestimentos podem ter até 10 ou mais camadas
- Aumento da espessura de Al_2O_3 ® aumento da fragilidade

Processo PVD

→ 3 processos:

- Vaporização a vácuo
- Sputtering (pulverização catódica)
- Ionplating

Características gerais

- Revestimento de ferramentas de aços rápidos de formas complexas, metais duros e cermets
- Temperatura de 200 a 600 °C
- Espessura da camada depositada entre 3 e 5 mm
- Exige tratamento superficial
- Não afeta a resistência à flexão do substrato

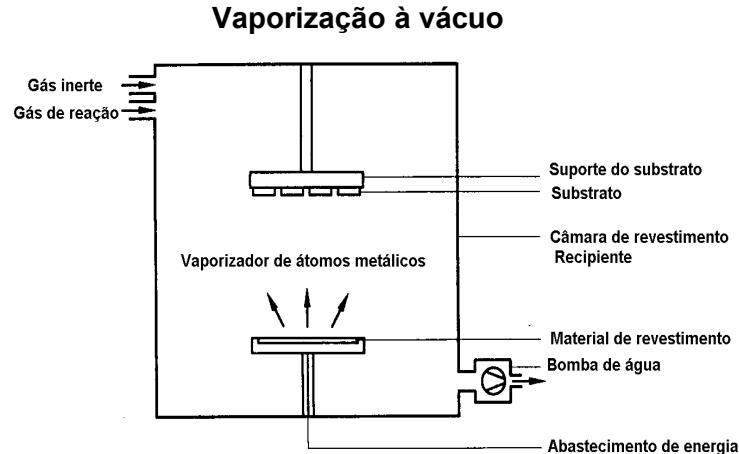


Figura 52 - Processo PVD

- Material de revestimento vaporizado em um conversor
- Processo a alto vácuo ($0,001 \times 10^{-5}$ bar)
- Ajuda de gases reativos (N_2 , C_2 , ...)
- Resistência à aderência na vaporização é baixa

Sputtering

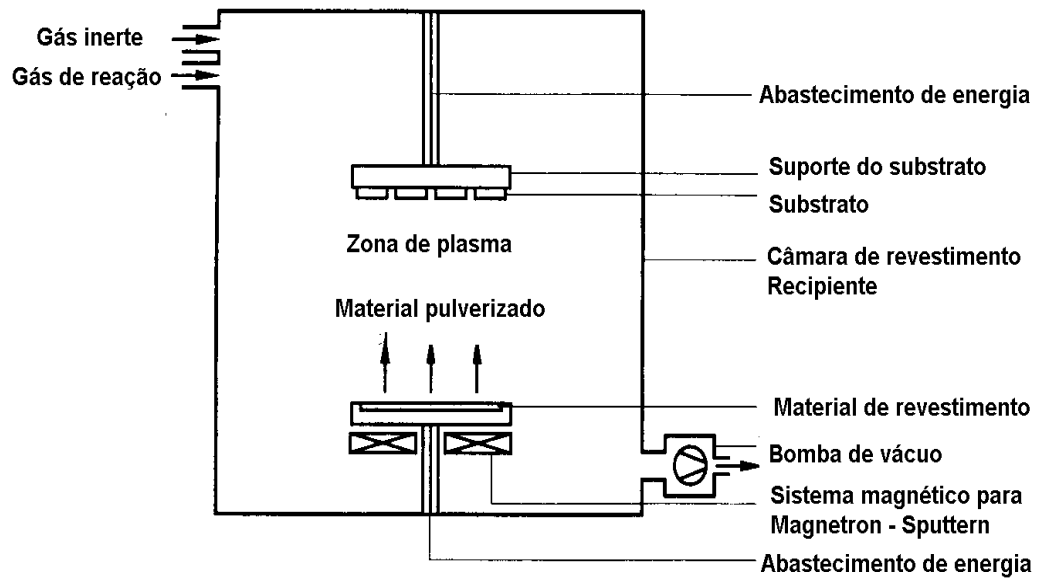


Figura 53 – Processo PVD - Sputering

- Pressão de 0,1 a 10×10^{-5} bar
- Tensão alvo (catodo) - substrato (anodo) - 500 a 5000 V
- Íons com alta energia cinética situam se na placa de material a ser vaporizado
- Impulsos elétricos projetam os íons para os átomos responsáveis pelo revestimento
- Forma-se uma “nuvem de poeira” de átomos que se depositam no substrato

Ionplating

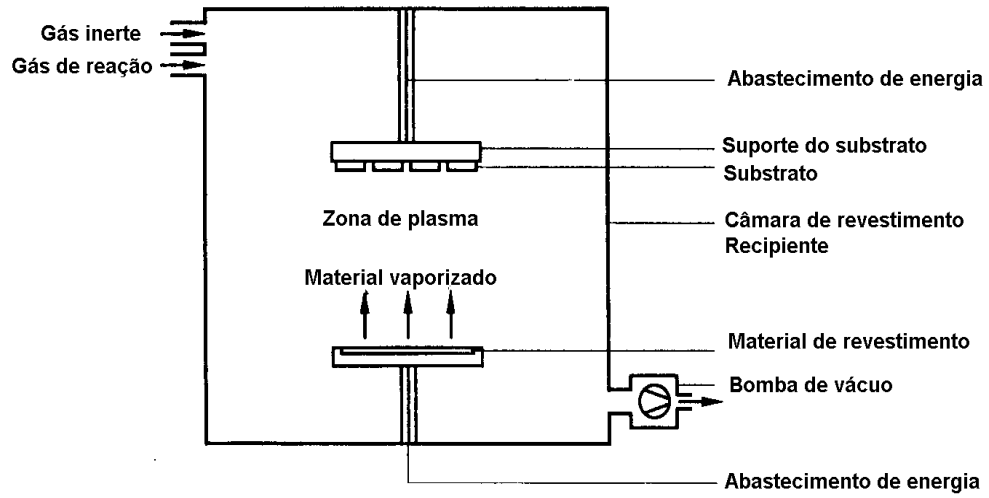


Figura 45 - Processo PVD – Ionplating

- Vaporização do material de revestimento por arco voltaico, resistor ou feixe de eletrodos
- Tensão negativa no substrato (tensão Bias)
- Íons vaporizados são lançados ao substrato
- Para obtenção de carbonetos, nitretos ou óxidos - injeção de gás reativo na câmara

Considerações gerais sobre Ferramentas de corte

Ferramentas inteiriças

- São produzidas por fundição, forjamento, barras laminadas, ou por metalurgia do pó
- Seus materiais incluem aços carbono e baixas ligas, aços rápidos, ligas de cobalto fundidas e metais duros
- Ferramentas de ponta arredondada permitem a aplicação de grandes avanços, em peças de grande diâmetro

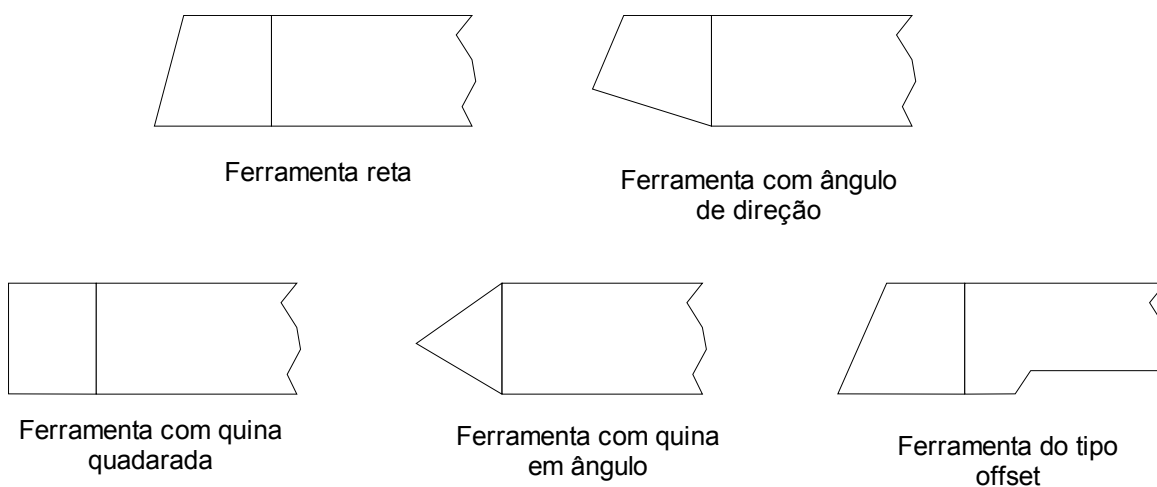


Figura 54 – Ferramentas inteiriças

Ferramentas com insertos soldados

- Ferramentas de gume único
- Corpo de material de baixo custo
- Parte cortante com material de corte de melhor qualidade soldado ou montado sobre a base
- Materiais cortantes usados: aços rápidos, ligas fundidas à base de cobalto, metal-duro, cerâmica, diamante mono e policristalino e nitreto de boro cúbico

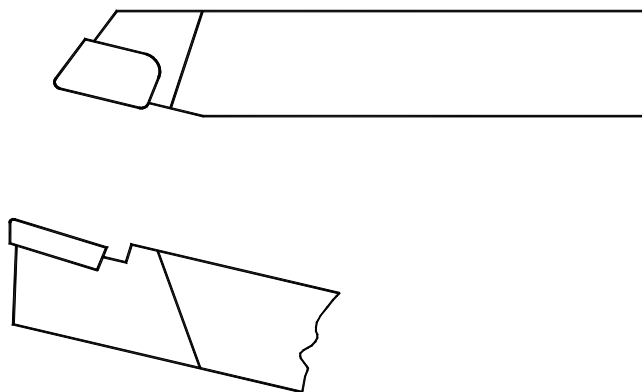


Figura 55 – Exemplo de ferramentas com insertos brasados

Ferramentas com insertos intercambiáveis

- Ferramentas mais largamente utilizadas em operações de torneamento
- Insertos de metal-duro predominam, mas insertos de aços rápidos, cerâmicas, diamante e CBN são também usados para muitas aplicações
- Sistema de identificação normalizado, com base nas características mecânicas e geométricas dos insertos

Forma dos insertos

- A geometria da peça, suas tolerâncias, seu material e qualidade superficial definem o formato do inserto
- Há seis formas comuns, com benefícios e limitações, em relação à resistência a tensão

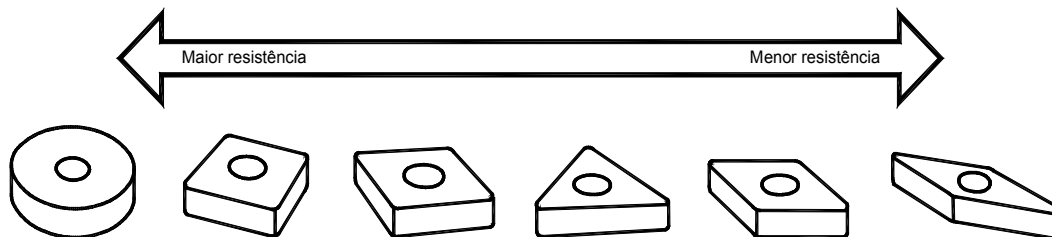


Figura 56 – Sistema de codificação de insertos intercambiáveis

Geometria dos insertos

→ Insertos com ângulo de saída negativo:

- dobro de superfície de corte e maior resistência,
- avanço e profundidade de corte maiores
- gera um aumento nas forças de corte
- exigem maior potência e rigidez do torno

→ Insertos com ângulo de saída positivo:

- bons para trabalho em material mais dúctil, como aços de baixo carbono, ligas de alta temperatura e materiais que endurecem durante a usinagem

→ Insertos positivo-negativos:

- combinam a ação de corte dos positivos com a resistência dos negativos
- possuem gumes realçados ou sulcos na face
- em insertos revestidos, são capazes de remover material a altas velocidades e avanços, com aumento do volume de cavacos.
- há diversos modelos, de diferentes fabricantes, com diferentes formas de sulcos

Tamanho dos insertos

- Na maioria das formas padrão de insertos, o tamanho é especificado pelo diâmetro do maior círculo que pode ser inscrito no perímetro do inserto (chamado IC)
- Por razões econômicas, deve ser selecionado o menor inserto possível, com o qual possa ser empregada a profundidade de corte requerida na operação
- De modo geral o comprimento do gume deve ser no mínimo o dobro da profundidade de corte

Espessura dos insertos

- Depende basicamente da profundidade de corte e do avanço utilizados
- Com base nestes fatores, a espessura do inserto é selecionada em tabelas de fabricantes, ou através de dados da literatura

Raio de quina dos insertos

- Determinado pela configuração da peça e pelos requisitos de qualidade superficial
- Raios de quina muito pequenos
 - quinas fracas, quebra ou lascamento
 - melhor controle dos cavacos e menos ruídos
- Raios de quina muito grandes:
 - ruídos ou vibrações (pequena espessura dos cavacos e aumento da força passiva)
 - máquina-ferramenta e dispositivos devem ter rigidez suficiente
- Raio de quina apropriado é um dos mais importantes fatores relacionados ao acabamento superficial
- De modo geral raios de quina maiores produzem melhores superfícies usinadas

Tolerância dos insertos

- Define a precisão de acoplamento
- Insertos padrão estão disponíveis em 3 classes de tolerância:
 - usual: $\pm 0,1$ a $0,3$ mm
 - precisão: $\pm 0,03$ a $0,05$ mm
 - alta precisão: $\pm 0,013$ mm

Material dos insertos

- Depende do material de peça, operação, requisitos de produção, rigidez do equipamento e custo por peça
- Há insertos de diferentes materiais e revestimentos
- Cada aplicação irá requerer um tipo de material diferente

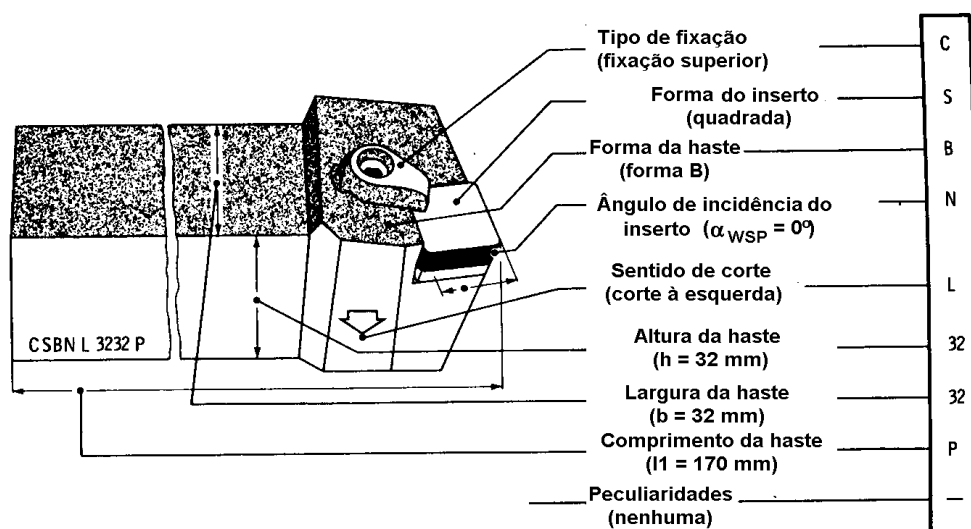


Figura 57 – Ferramenta de torneamento com inserto intercambiável

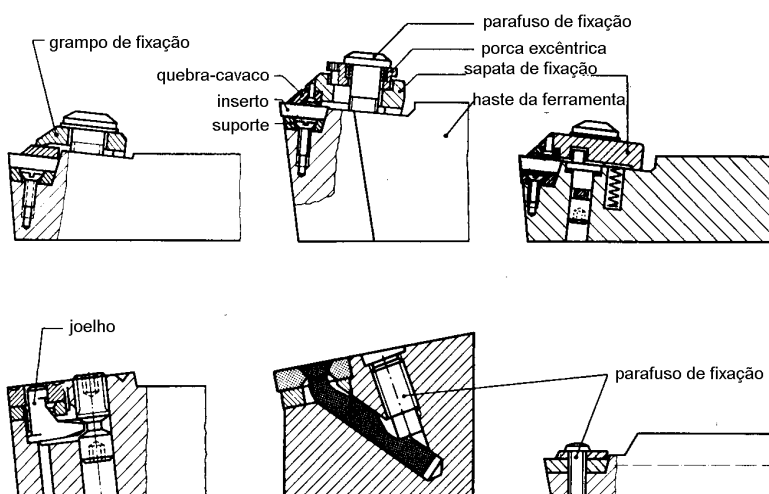


Figura 58 – Sistema de fixação para insertos intercambiáveis

Escolha da geometria da ferramenta

- Material da ferramenta
- Material da peça
- Condições de corte
- Geometria da peça

Geometrias usuais de ferramentas de corte

Geometria da Ferramenta Material da Ferramenta	Ângulo de saída γ	Ângulo de Incidência α	Ângulo de Inclinação λ	Ângulo de Posição χ	Ângulo de Quina ϵ	Raio da Quina r_ϵ
Aço Rápido (HSS)	-6° até + 20°	6° até 8°	-6° até	10° até	60° até	0,4 até
Metal Duro	-6° até + 15°	6° até 12°	+6°	100°	120°	2mm

Cuidados com ferramentas de corte

Manuseio e manutenção de ferramentas de corte

- Evitar o contato entre ferramentas
- Cuidados no armazenamento
- Danificações no manuseio (quebras)

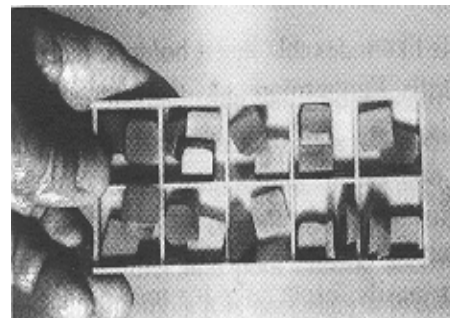
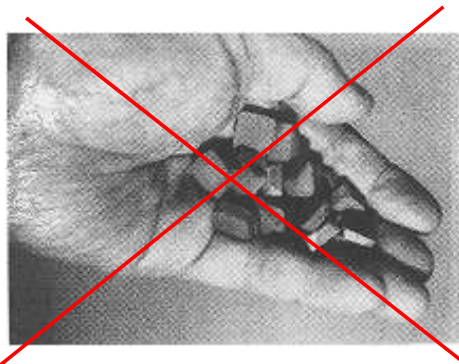


Figura 59 – Forma incorreta e correta de se manusear inserts

→ Manutenção e gerenciamento das ferramentas de corte

- Limpeza
- Prevenção contra oxidação

→ Aplicação de tecnologia e manutenção de ferramentas de corte

- Ferramentas adequadas aos processos
- Cuidados no preparo e instalação
- Condições de corte adequadas

Conceito de vida da ferramenta

- Período no qual uma ferramenta pode ser mantida usinando de forma econômica
- O critério econômico pode ser relacionado com:
 - tolerâncias dimensionais
 - tolerâncias geométricas
 - qualidade superficial da peça
 - nível de vibrações no processo
 - nível de esforços no processo
 - possibilidade de reafiação da ferramenta
 - outros

Critérios de fim de vida

- São critérios que são utilizados para determinar quando uma ferramenta deve ser substituída no processo.
- Esses critérios é relacionado ao nível de desgaste na ferramenta, e suas conseqüências diretas :
- desvios nas tolerâncias dimensionais
 - desvios nas tolerâncias geométricas
 - perda de qualidade superficial da peça
 - aumento no nível de vibrações no processo
 - aumento no nível de esforços no processo
 - aumento do custo de reafiação da ferramenta

Principais critérios de fim de vida

- Falha completa da ferramnetta
- Falha preliminar da ferramenta
- Desgaste de flanco (VB) ou de cratera (KT)
- Vibrações (monitoramento)
- Acabamento superficial ruim
- Rebarbas
- Alterações nos cavacos
- Alterações nas dimensões de corte
- Alterações nas forças de usinagem (monitoramento)
- Aumento nas temperaturas

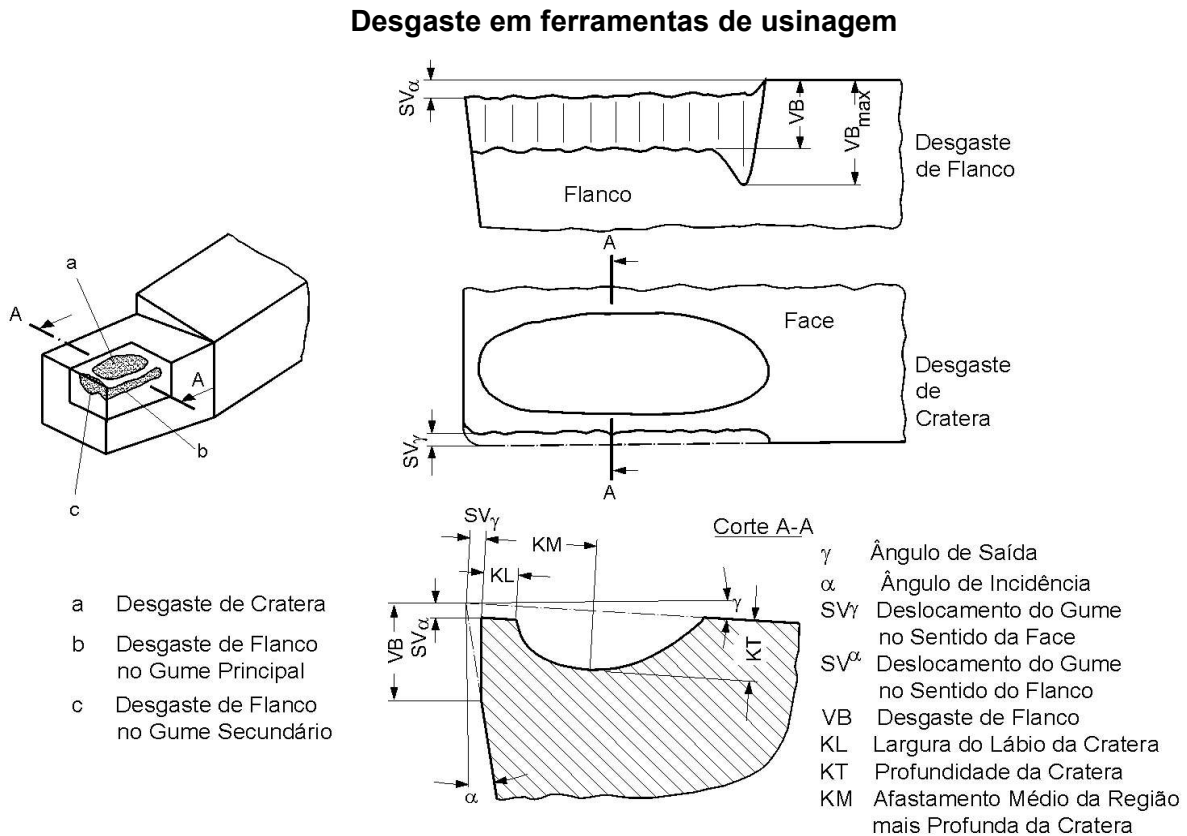


Figura 60 – Principais desgastes em ferramentas de tornear

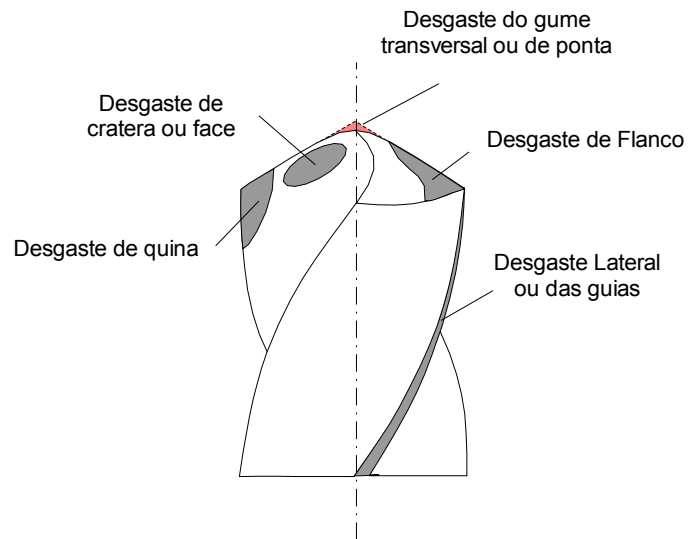


Figura 60 – Principais desgastes em ferramentas de furar

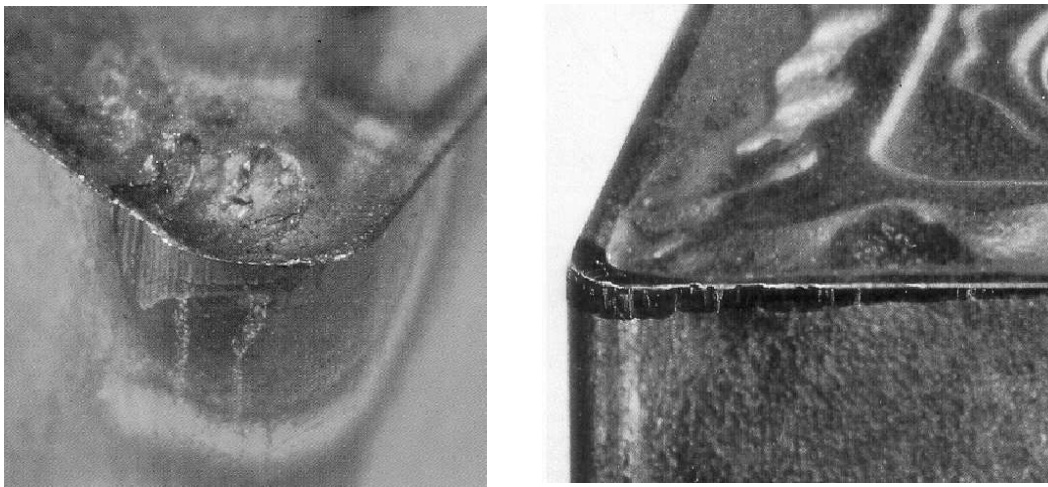


Figura 61 – Exemplo de desgaste de cratera e desgaste de flanco

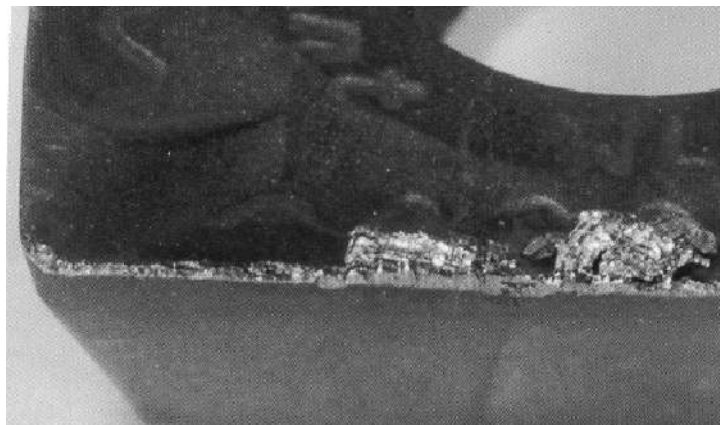


Figura 62 – Exemplo de desgaste por adesão

Causas e mecanismos de desgaste

- Danificação do gume devido a solicitações
 - Adesão
 - Abrasão mecânica
 - Oxidação
 - Difusão
 - outros

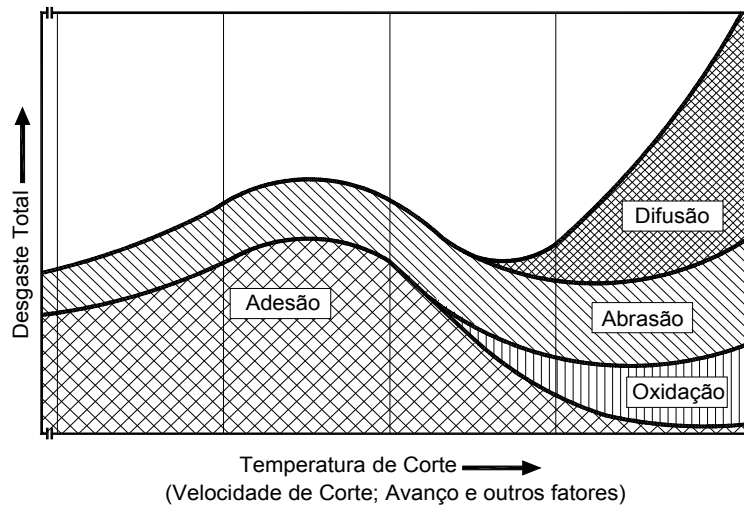


Figura 63 – Mecanismos de desgaste

Formas de avaliação do desgaste

- Medição direta
 - inspeção visual com comparação de padrões (lupas)
 - mecânica (paquímetros, micrômetros, outros)
 - óptica (microscópios de ferramentaria)
 - óptica/eletrônica (cameras CCD)

- Medição indireta
 - aumento das vibrações
 - aumento do ruído
 - piora da qualidade
 - rejeição dimensional
 - aumentos das forças
 - outros

Fluidos de corte

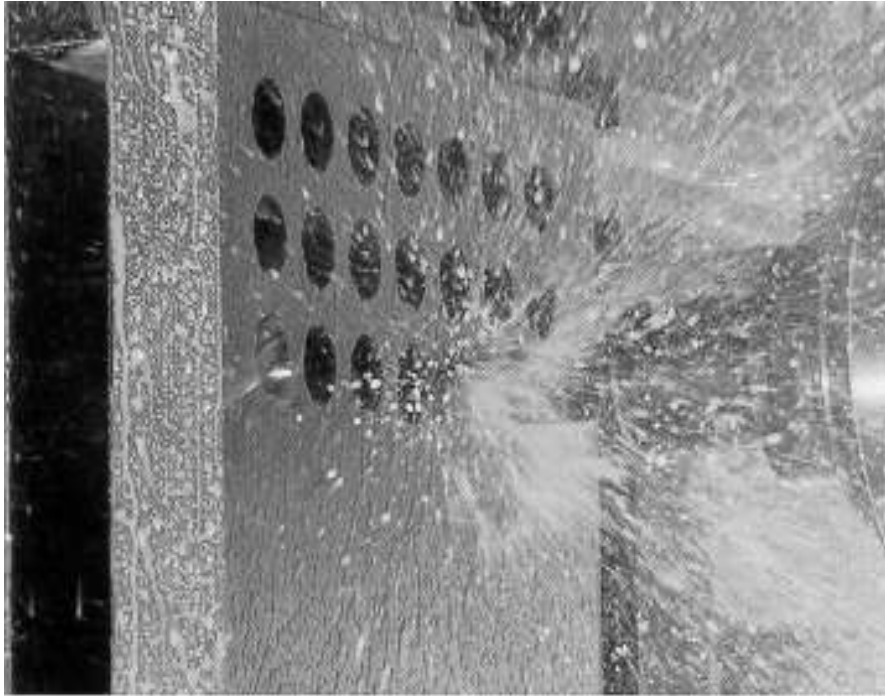


Figura 64 – Exemplo do uso de fluido de corte

Generalidades

- 1868 - W.H.Northcott - "A Treatise on Lathes and Turning" - primeira publicação a respeito do aumento de produtividade em usinagem devida ao uso de fluidos de corte
- 1894 - F.W.Taylor - pesquisa - jorro de água na região de corte - aumento v_c 30 – 40%

Funções dos fluidos de corte

- Redução do atrito entre ferramenta e cavaco
- Refrigeração da ferramenta
- Refrigeração da peça
- Expulsão dos cavacos gerados
- Melhoria no acabamento superficial
- Refrigeração da máquina-ferramenta
- Melhorias de caráter econômico

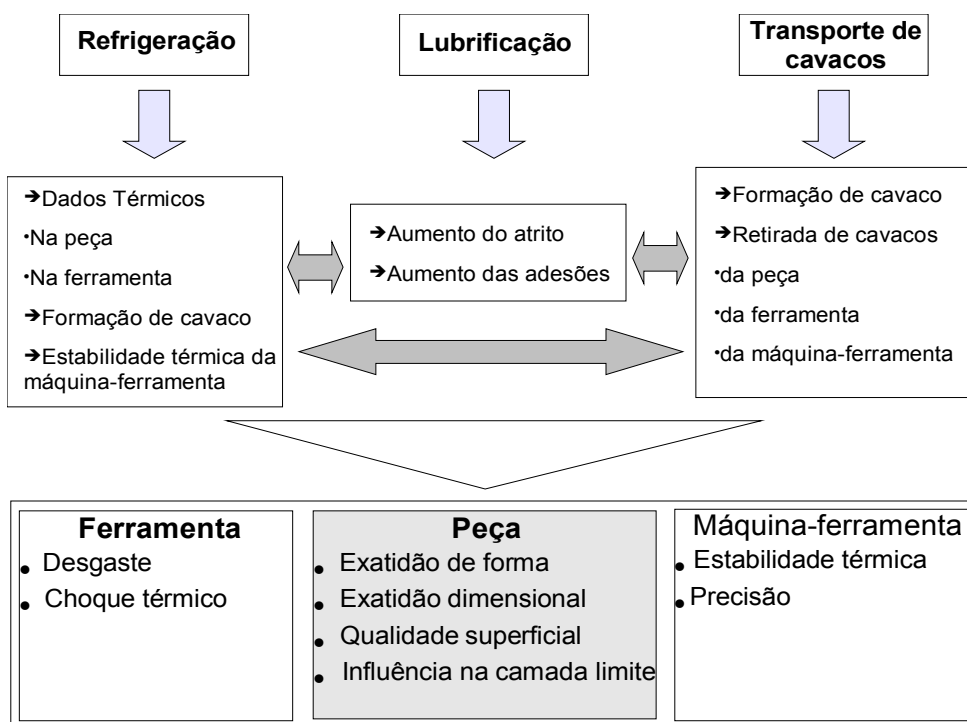


Figura 65 – Funções do fluido de corte

Redução do atrito entre ferramenta e cavaco

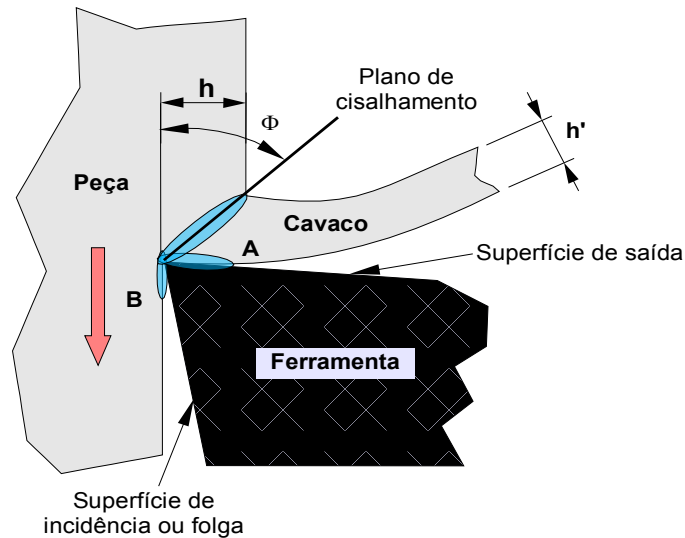


Figura 66 – regiões de ação do fluido de corte

Zona A - diminuição do atrito na interface ferramenta-cavaco (diminuição do calor gerado)

Zona B - diminuição do atrito na interface peça-ferramenta (diminuição do calor gerado)

Zona C - diminuição do atrito entre a ferramenta e o cavaco (aumento do ângulo de cisalhamento ϕ e, diminuição de na taxa de deformação e_0)

Refrigeração da peça

- Redução de deformações devidas às tensões oriundas de grandes aquecimentos locais ou mesmo totais
- Eliminação de cores de revenido na superfície usinada (usinagem por abrasão (retirada de material por atrito), operações de retificação - acabamento da peça
- Manutenção das medidas da peça em trabalho em operações com tolerâncias estreitas
- Facilidade para o manuseio da peça usinada

Expulsão dos cavacos gerados

- Muito importante principalmente em processos como furação, furação profunda e alguns tipos de fresamento

Melhoria do acabamento superficial

- Diminuição de danos térmicos
- Diminuição do atrito ferramenta / peça

Refrigeração da máquina-ferramenta

- Manutenção da precisão da máquina - dimensões e posições de guias e dispositivos

Melhorias de caráter econômico

- Redução do consumo de energia - diminuição do grau de recalque e conseqüentemente da força de usinagem
- Redução dos custos de ferramenta - redução do desgaste □ aumento da vida
- Diminuição ou eliminação da corrosão na peça - proteção do filme de fluido da umidade, vapores, etc

Principais Fluidos de Corte

- Água - redução da temperatura
- Óleos graxos - redução do atrito
 - Óleos minerais - inicialmente na usinagem de latão, ligas não-ferrosas e operações leves com aço
 - Óleos minerais com óleos de tocinho - operações mais severas
 - Surgimento de novos materiais de ferramentas, possibilitando maiores v_c 's - desenvolvimento dos fluidos
 - Combinações de óleos minerais , óleos graxos e aditivos (enxofre , cloro , fósforo, etc)
 - Minimização do uso de fluidos - saúde e meio ambiente

Óleos de corte

- Óleos minerais com ou sem aditivos
 - Óleos Minerais ativos
 - Óleos de extrema pressão (EP) e antisoldante (Usinagens mais severas)
- Óleos Minerais inativos
 - Óleos minerais com aditivos químicos inativos (óleos minerais puros, óleos graxos, compostos de óleo mineral e óleos graxos puros , sulfurados e sulfurados-clorados)

Óleos emulsionáveis

- Óleos solúveis (Água , agentes emulsificantes e aditivos)
 - Vantagens: - grande redução de calor
 - remoção de cavacos
 - mais econômico
 - melhor aceitação pelo operador
 - menos agressivo à saúde e mais benefícios a segurança

Fluidos Sintéticos

- Não contém óleos de petróleo
- Característica de fluido refrigerante
- Vantagens: - alta capacidade de refrigeração
 - vida útil do fluido bastante grande
 - filmes residuais pequenos e de fácil remoção
 - fáceis de misturar
 - relativa facilidade no controle da concentração desejada

Fluidos Gasosos

- Ar comprimido - retirada de calor e expulsão dos cavacos da zona de corte.
- Menor viscosidade - melhor penetrabilidade na zona ativa da ferramenta
- Argônio , Hélio , Nitrogênio e Dióxido de Carbono garantem proteção contra oxidação e refrigeração mas proporcionam altos custos

Efeitos do uso de fluidos de corte

- Desgaste de adesão - efeito de lubrificação - eliminação de pequenos gumes postiços dentro de uma certa faixa de v_c
- É desejável a formação de graxas resistentes à alta pressão e com baixa resistência ao cisalhamento (aditivos EP)
- A ação de alguns componentes (enxofre, cloro e fósforo) começa somente a partir de uma certa temperatura
- Com o aumento de v_c as condições para a formação do filme de fluido tornam-se desfavoráveis
- Diminuição do tempo para a reação entre os aditivos e a superfície metálica

- Aumento de temperatura - deformação da ferramenta e difusão - é necessária a refrigeração na zona de corte
- A partir de uma certa v_c a vida da ferramenta é muito mais influenciada pela capacidade de refrigeração do que de lubrificação de um fluido

Efeitos do uso de fluidos de corte

- Curvas desgaste e velocidade de corte para o corte a seco e para a aplicação de diversos fluidos de corte

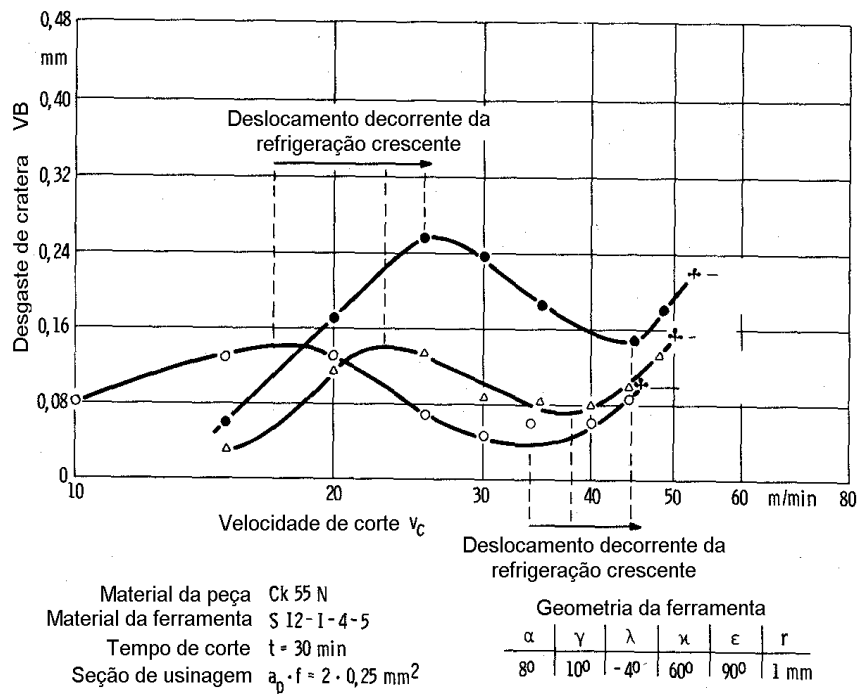


Figura 67 – Influencia do uso de fluido de corte

- A emulsão leva a um resfriamento, e conseqüentemente a um aumento da resistência do material
- Desgaste reduzido - $v_{c \text{ máx}} \propto 1/VB_{\text{máx}}$ (percurso total maior)
- aumentar a vida com diminuição da temperatura de trabalho (ter condições de temperatura de usinagem no gume próxima à temperatura de amolecimento)

Tendências no uso de Fluidos de Corte

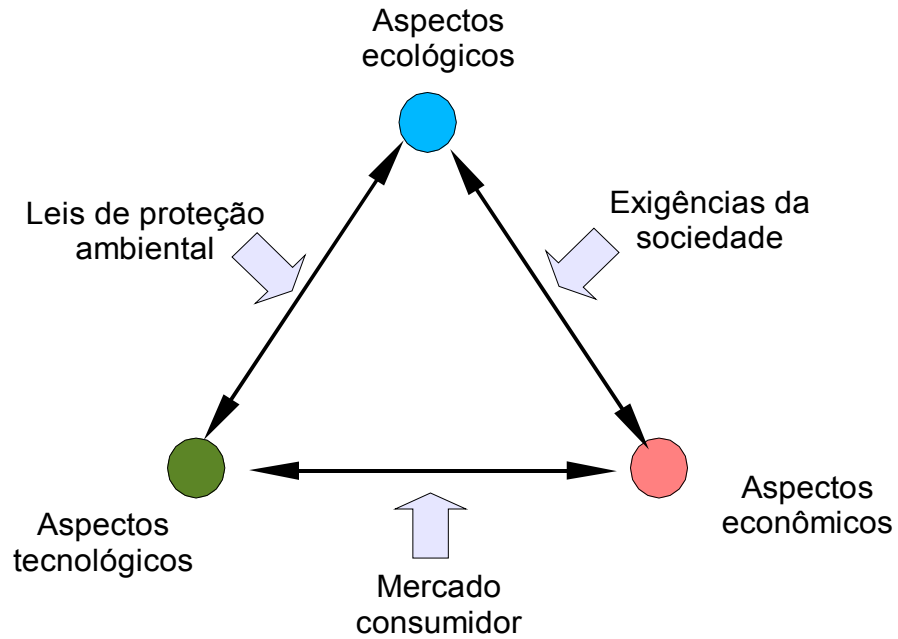


Figura 68 – Limitantes do uso de fluido de corte

- Até há poucos anos - minimização de custos e aumento de produção
- Atualmente - custos, produção e preocupação com aspectos ambientais
- No futuro - leis ambientais rígidas

Conceito de usinabilidade

Definição: Capacidade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte

- Materiais diferentes tem comportamento diferente
- Ligas de mesmo material também podem ter comportamento diferentes

Principais problemas decorrentes da má usinabilidade de um material

- desgaste rápido
- super aquecimento da ferramenta
- empastamento da ferramenta
- lascamentos no gume de corte
- comprometimento da qualidade superficial
- necessidade de grande potência de usinagem
- grandes esforços de usinagem

Principais grupos que influenciam a usinabilidade

I – Variáveis dependentes da máquina-ferramenta

- rigidez estática da máquina e seus constituintes
- características dinâmicas da máquina
- potência e força disponíveis na ponta da ferramenta
- gama de velocidades de corte e avanços

II – Variáveis dependentes da ferramenta

- geometria da ferramenta
- material da ferramenta

III – Variáveis dependentes da peça

- formas e dimensões
- rigidez estática da peça
- rigidez dinâmica da peça
- propriedades físicas, químicas e mecânicas do material peça
- Temperatura da peça

IV – Variáveis dependentes do fluido de corte

- propriedades refrigerantes
- propriedades lubrificantes
- temperatura do fluido
- forma e intensidade de aplicação
- nível de contaminação do fluido

V – Variáveis dependentes do processo

- Velocidade de corte
- parâmetros do processo (a_p , f , etc.)
- forma de atuação da ferramenta na peça (ex.: corte interrompido, corte contínuo, forma de entrada e saída da ferramenta, etc.)

Critérios de avaliação da usinabilidade

- vida da ferramenta entre duas reafiações sucessivas
- grandeza das forças que atuam sobre a ferramentaria e potência consumida
- qualidade do acabamento superficial obtida
- facilidade de formação e remoção do cavaco

Somente os três primeiros são passíveis de serem quantificados por meio de ensaios de usinagem

Torneamento

Importância do torneamento

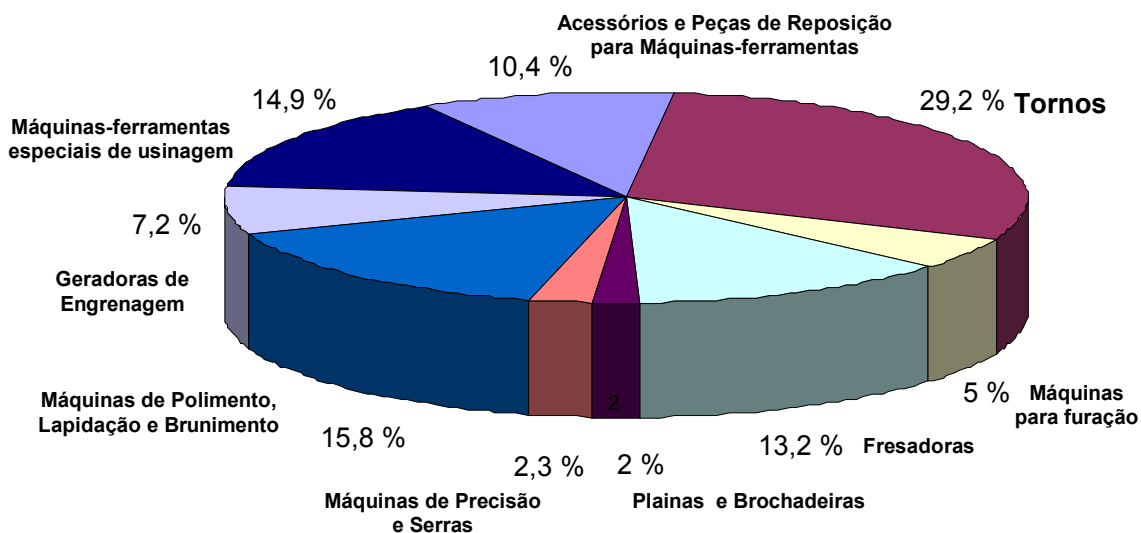


Figura 69 – Distribuição do comércio de máquinas-ferramentas 1975

Classificação Quanto à Exatidão Atingível

Ano	Normal	Precisão	Ultraprecisão
1980	5 um	0,5 um	0,05 um
2000	1 um	0,1 um	0,01 um

Generalidades

Evolução das Máquinas-Ferramentas

→ 400 A.C. surgem os primeiros tornos

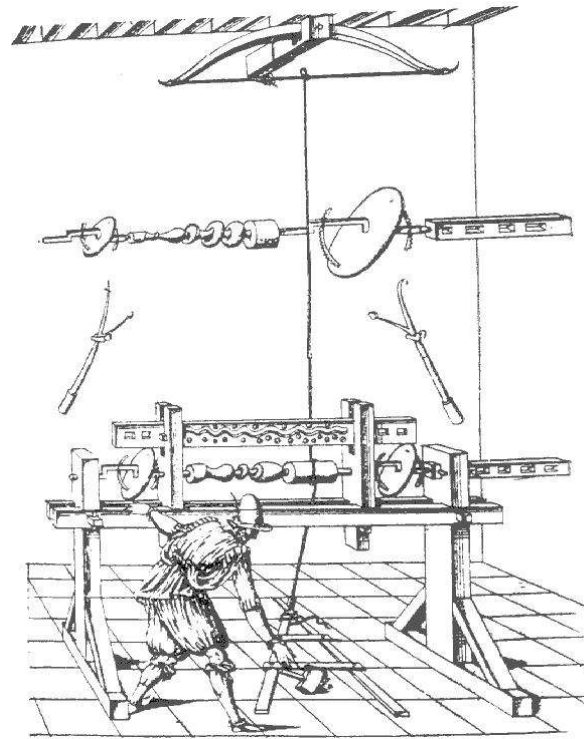


Figura 70 – Torno a pedal -1498 (Spur, 1997)

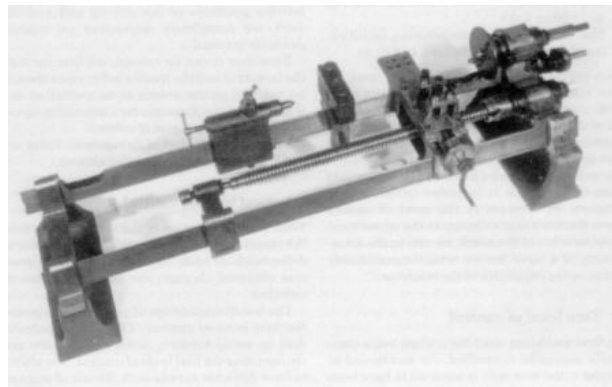


Figura 71 – Torno de Maudslay - cerca de 1800 (Spur, 1997)

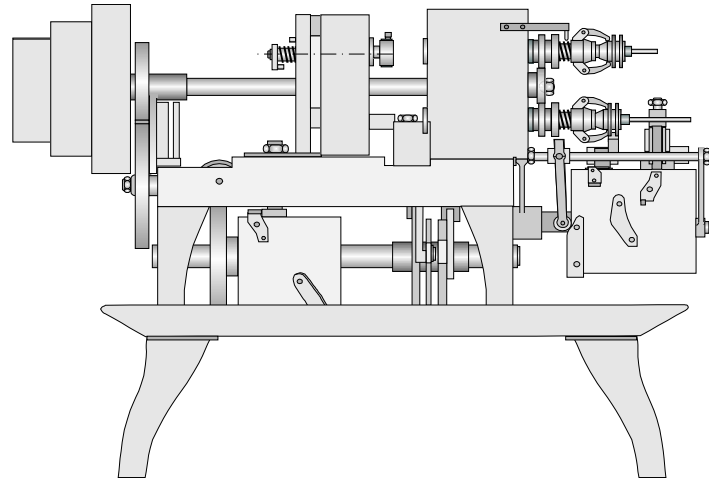


Figura 72 – Torno automático multi-fusos (1894)

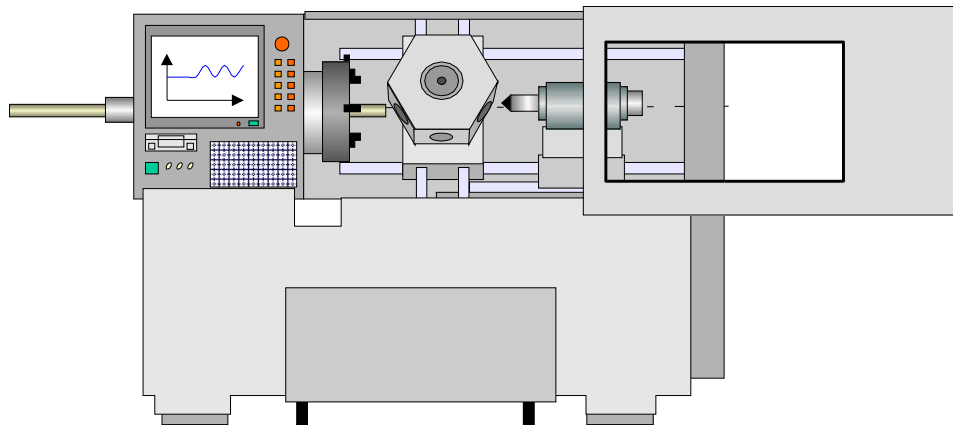
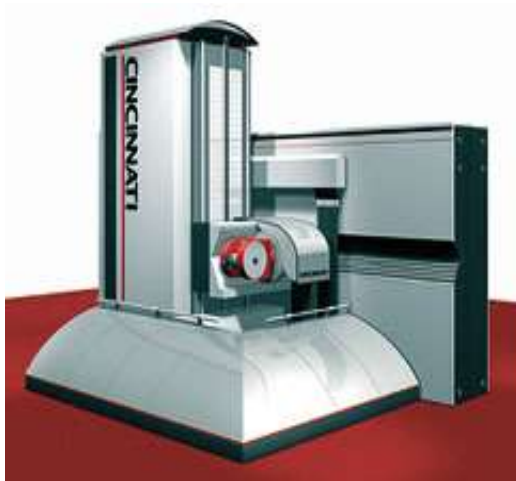


Figura 73 – Torno de comando numérico (1981)



(a) M-F alta velocidade



(b) M-F hexapode

Figura 74 – Tendências das Máquinas-Ferramentas

Cinemática do processo de torneamento

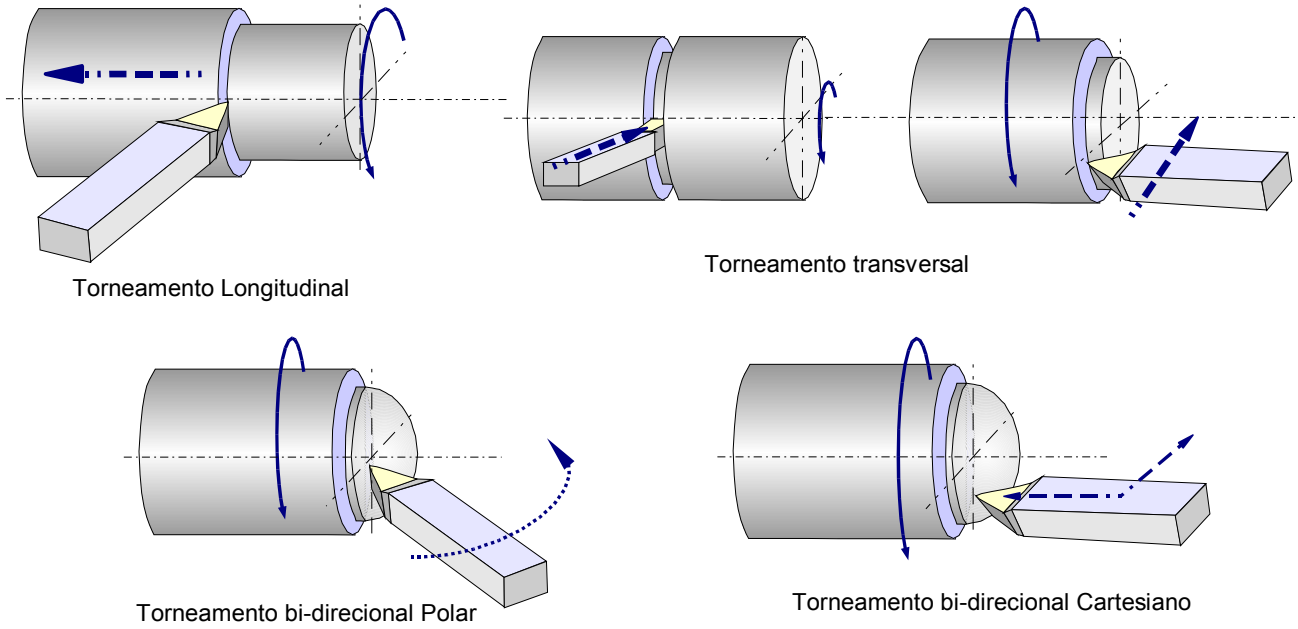
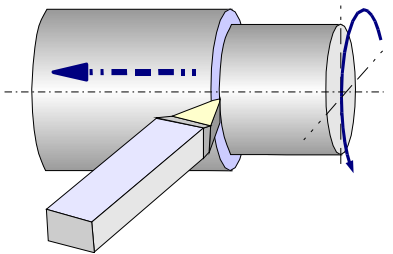
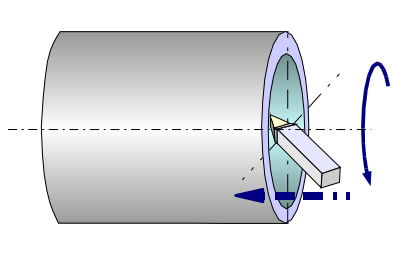
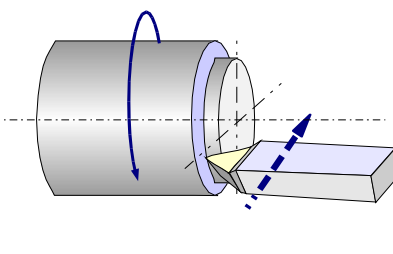
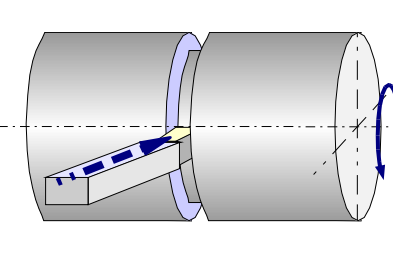
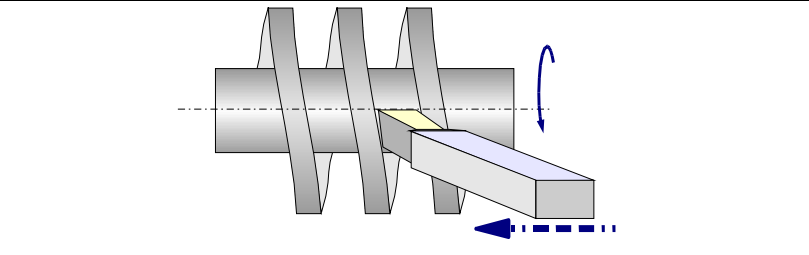
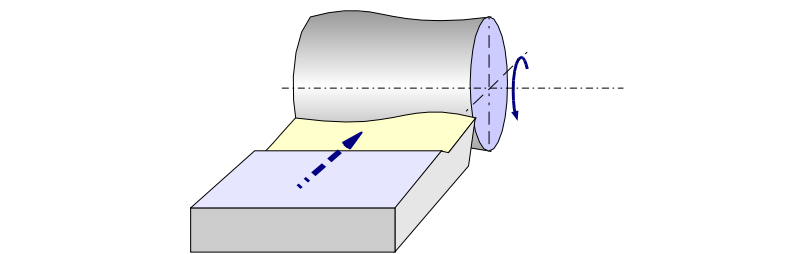
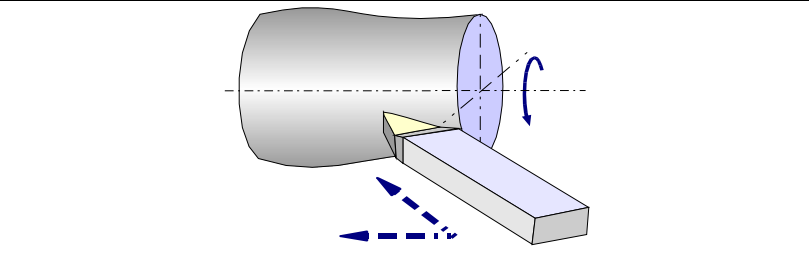


Figura 75 – Cinemática do processo de torneamento

Principais operações no torneamento - DIN 8589

Principais operações no torneamento - DIN 8589		
Operação de torneamento	Externo	Interno
Longitudinal		
	Faceamento	Sangramento
Plano ou transversal		
Helicoidal		
de forma		
de perfil		
de geração		

Cinemática do processo de torneamento

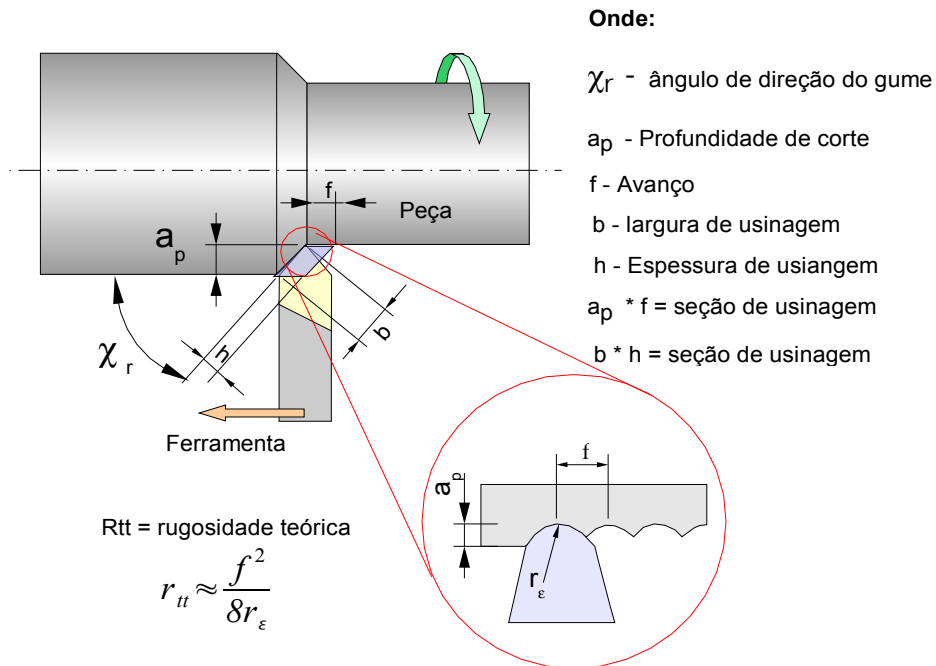


Figura 76 – Formação da superfície no torneamento

Ferramentas de corte para torneamento

- A maioria dos processos de torneamento fazem uso de ferramentas simples;
- Todas as ferramentas de torneamento tem basicamente forma semelhante;
- São compostas de uma parte cortante e de uma haste para fixação
- Ferramentas podem ser integrais, ou com insertos;
- Os insertos podem ser fixados à haste mecanicamente ou por brasagem ;
- Insertos intercambiáveis têm hoje a mais ampla aplicação no torneamento.

Formas de ferramentas

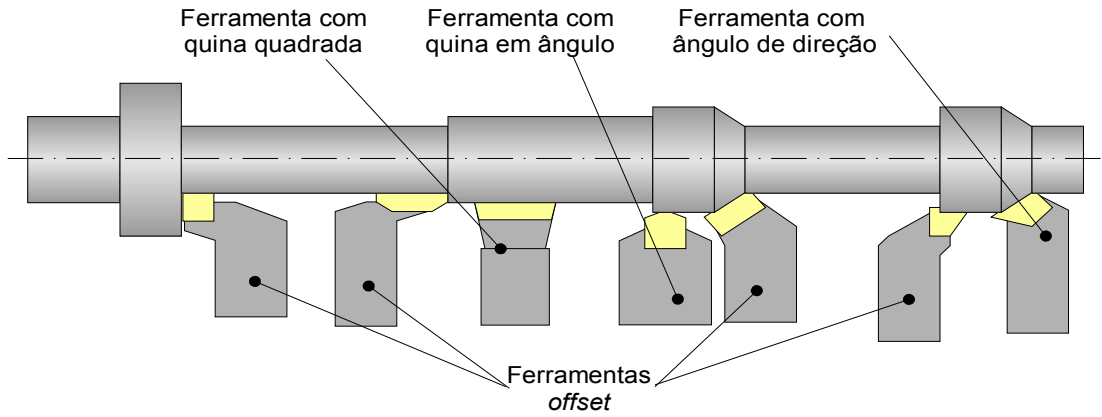


Figura 77 – Dormas das ferramentas de torneamento

Torneamento cilíndrico externo

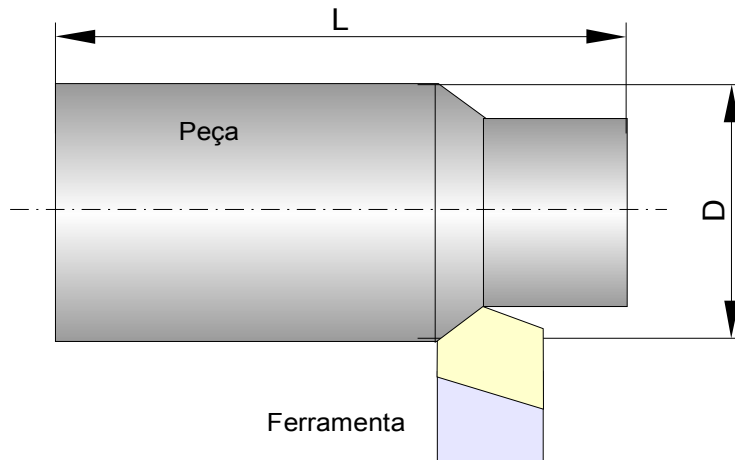


Figura 78 – Relação para L/D no torneamento

- $L/D > 1,5$ fixação em balanço
- $L/D < 1,5$ fixação com contra-pontas

Torneamento cilíndrico interno

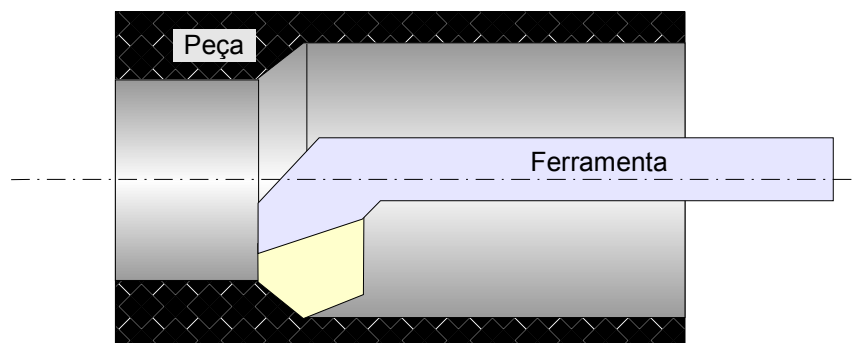


Figura 79 – Problemas no torneamento interno

→ Problemas de refrigeração, saída de cavacos e vibrações

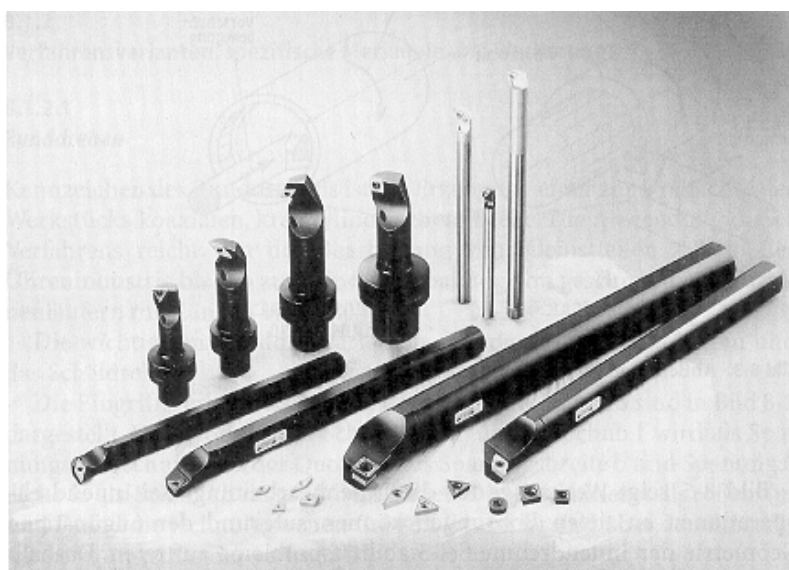


Figura 80 – Exemplo de ferramentas par torneamento interno

Relações que definem a escolha de um torno

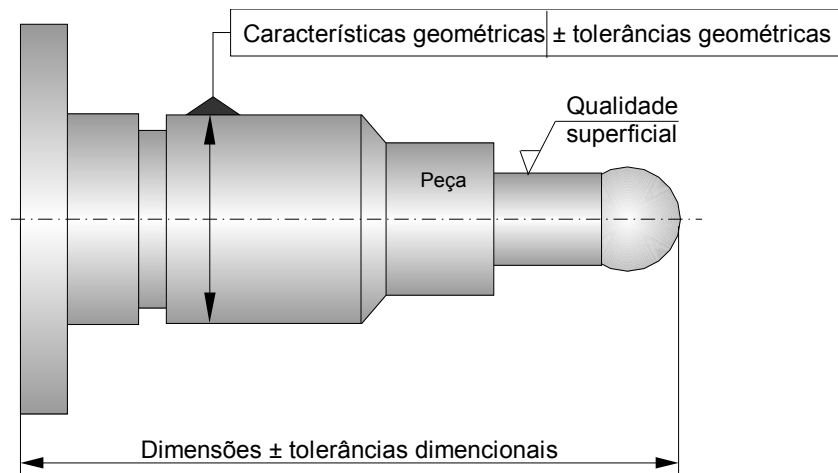


Figura 81 – Relações que definem ferramenta e máquina no torneamento

Relações que definem ferramenta e máquina no torneamento:

- Geometria
- Material da peça
- Tamanho do lote
- Prazo do lote
- Relação L/D
- Grau de complexidade
- Grau de desbalanceamento
- Quantidade de operações
- Quantidade de ferramentas necessárias
- Dispositivos e acessórios disponíveis

Máquinas-ferramentas para o torneamento

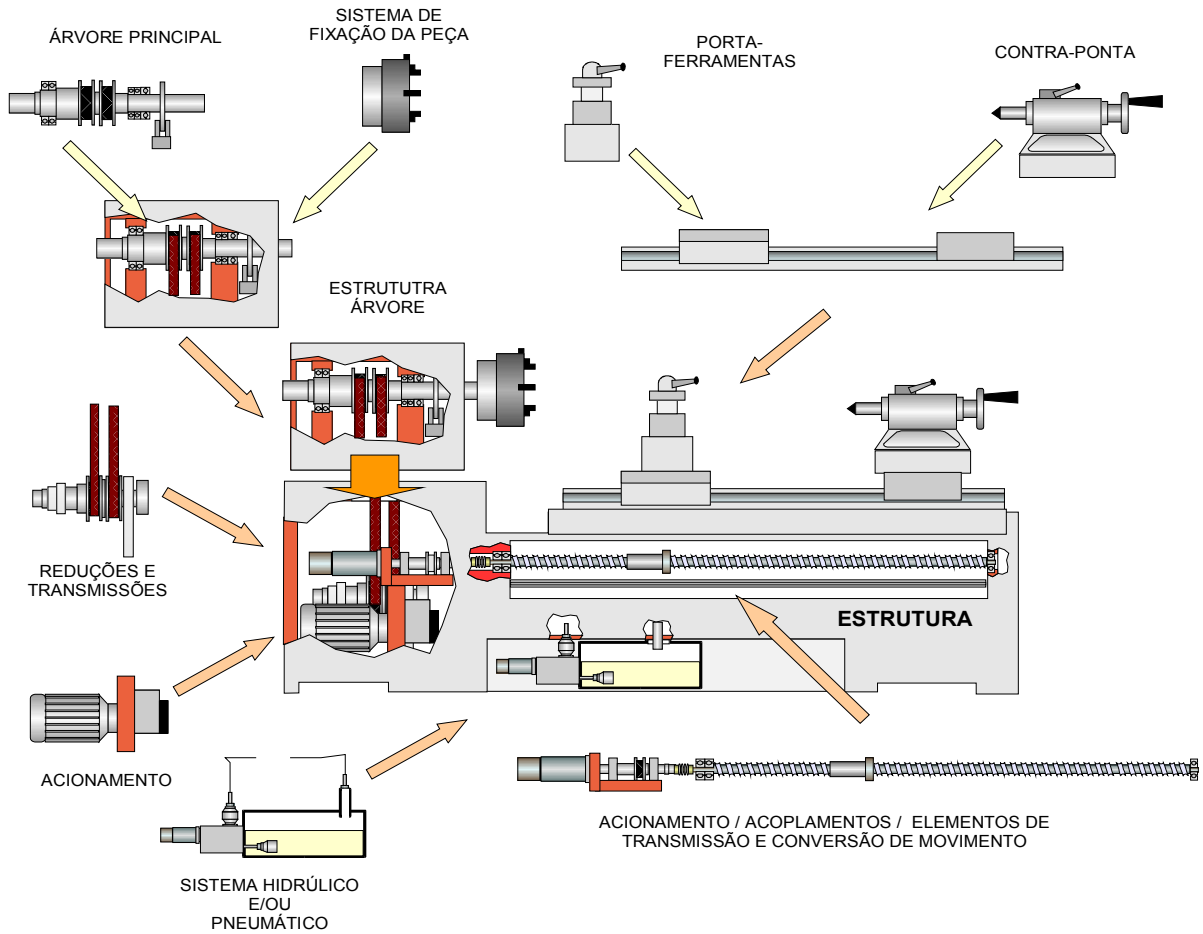


Figura 82 – Constituintes de um torno universal

Tornos Universais

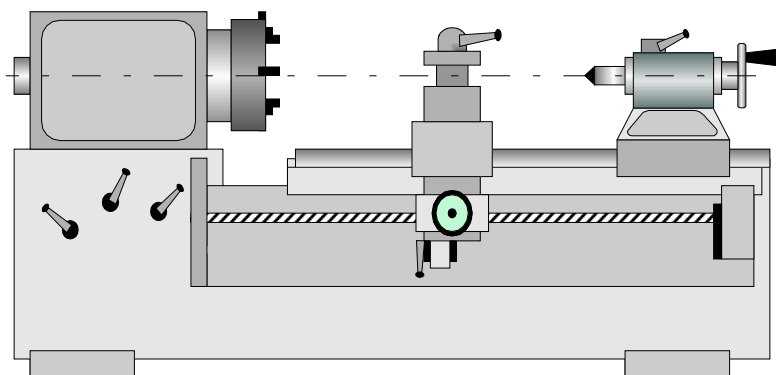


Figura 83 – Torno universal ou convencional

Características:

- baixo grau de automação
- fabricação pequenos lotes
- uso em oficinas e ferramentarias
- grande dependência do operador
- baixas velocidades e avanços

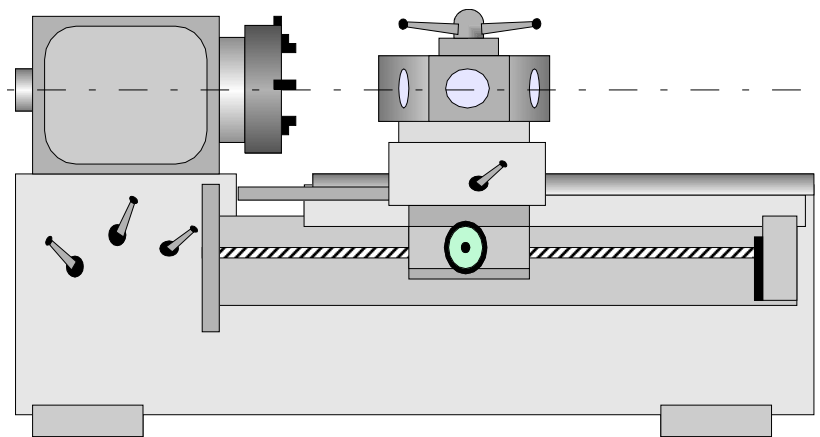
Tornos Revolver

Figura 84 – Torno revolver

Características:

- ➔ grau de automação médio - principalmente mecânica
- ➔ fabricação pequenos e médios lotes
- ➔ uso em produção
- ➔ grande dependência do operador
- ➔ baixas velocidades e avanços

Observações: Os modernos tornos revolvers apresentam baixa dependência do operador, devido principalmente pela substituição da automatização mecânica por eletrônica, controlada por computador ou microprocessadores. Os mesmos também apresentam velocidades e avanços bem maiores do que os encontrados nos tornos revolvers clássicos, sendo esses parâmetros comparáveis aos das modernas máquinas de comando numérico.

Tornos Copiadores

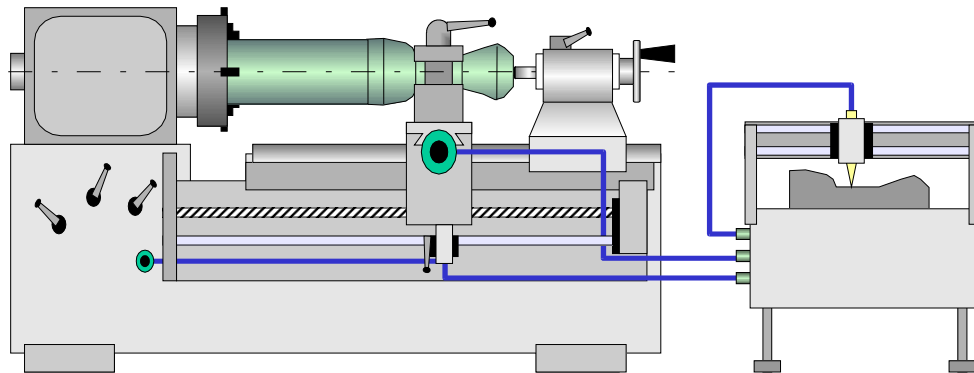


Figura 85 – Exemplo de torno copiador

Características:

- alto grau de automação mecânica / eletrônica
- fabricação pequenos e médios lotes
- uso em produção
- grande dependência do operador
- baixas velocidades e avanços

Observações: Os tornos copiadores perderam sentido na indústria com a dissiminação dos tornos de comando numérico e com as modernas técnicas de modelamento em CAD/CAM .

Tornos automáticos

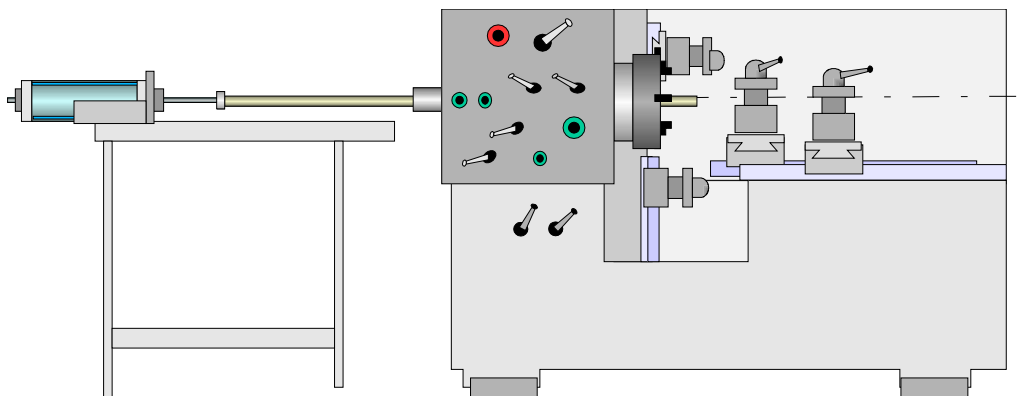


Figura 86 – Exemplo de torno automático

Características:

- alto grau de automação mecânica / eletrônica
- fabricação grandes lotes
- uso em produção
- pouca dependência do operador
- médias velocidades e avanços

Observações: Os modernos tornos automáticos rcontam com alto grau de automatização eletrônica, controlada por computador, microprocessadores e CLPs. Os mesmos também apresentam velocidades e avanços bem maiores do que os encontrados nos tornos automáticos clássicos, sendo esses parâmetros comparáveis aos das modernas máquinas de comando numérico.

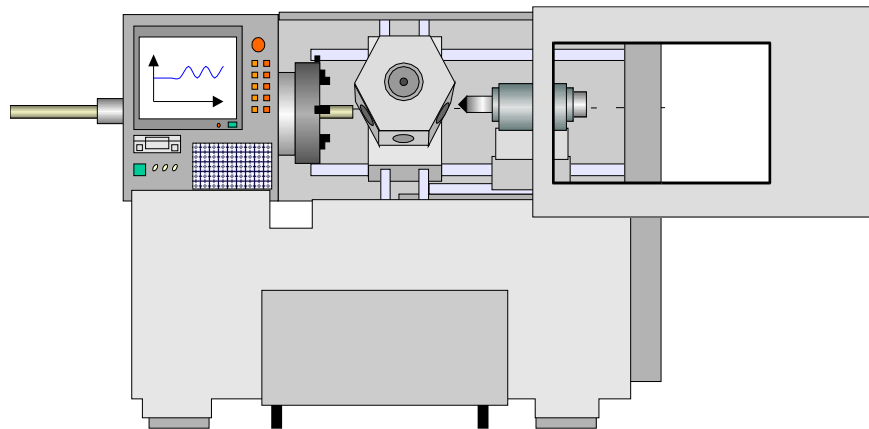
Tornos de comando numérico

Figura 87 – Exemplo de torno de comando numérico

Características:

- alto grau de automação eletrônica
- fabricação pequenos e médios lotes
- uso em produção
- baixa dependência do operador
- altas velocidades e avanços

Tornos de ultraprecisão

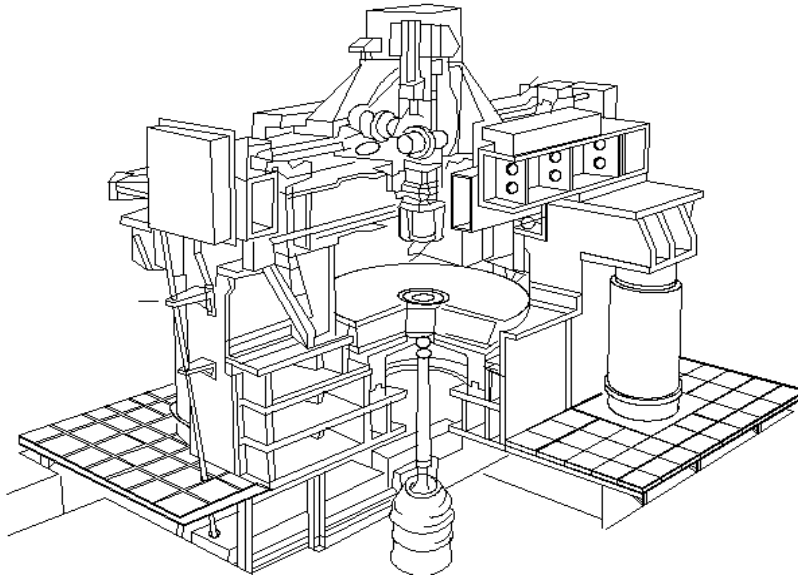


Figura 88 – LODTM torno de ultraprecisão por comando numérico

Características:

- alto grau de automação
- fabricação pequenos e médios lotes
- fabricação de peças especiais, ou peças únicas
- uso especial
- baixa dependência do operador
- velocidades e avanços muito baixas

Tornos Especiais

Características:

- automação é uma
- fabricação pequenos, médios e grandes lotes
- uso especial - linhas transfer, peças de grande dimensões, etc.
- alta dependência do operador
- velocidades e avanços são função do tipo de peça a que se destina.

Fixação de peças no torneamento

Características dos sistemas de fixação

- A fixação deve ser segura, rápida e precisa
- Potência requerida para o corte deve ser integralmente transmitida à peça
- Força necessária para uma fixação segura depende da geometria e material da peça, ferramenta e parâmetros de corte, sem deixar marcas ou distorcer a peça
- Velocidade segura depende do tamanho e da geometria da peça, forma e acabamento desejado, rigidez do *setup* e tipo de fixação, tipo de operação e ferramentas
- Sistemas comuns de fixação são:
 - placas de castanhas
 - discos,
 - pinças
 - mandris,
 - placas magnéticas,
 - placas de vácuo, ou
 - colagem e resfriamento.

Tipos de Fixação de peças no torneamento

Placa de Castanhas

- Placas podem ser de três ou quatro castanhas
- Podem ser autocentrantes ou com castanhas independentes
- Podem ter fechamento manual ou automático (pneumático)
- Podem ter castanhas integrais ou castanhas intercambiáveis
- Castanhas podem ser moles ou duras (temperadas)
- Castanhas podem ser internas ou externas

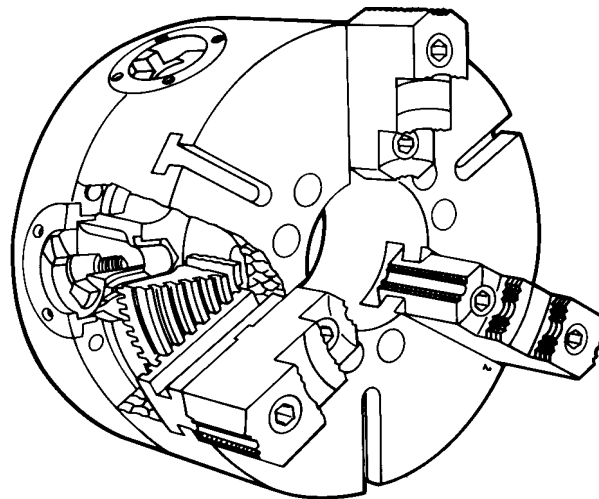


Figura 89 – Placa de três castanhas autocentrantes

Entre pontas

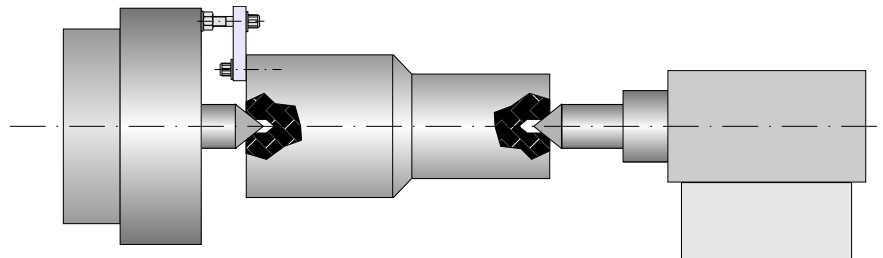


Figura 90 – Exemplo da fixação entre pontas

- Serve para o torneamento de peças longas
- São necessários furos de centro nas extremidades das peças
- Movimento de rotação transmitido à peça por meio de ressaltos na contra-ponta ou por grampo

Pinças

- Serve para o torneamento de peças pequenas
- Torneamento de peças de precisão
- Elevada precisão de rotação e baixas deformações induzidas a peça

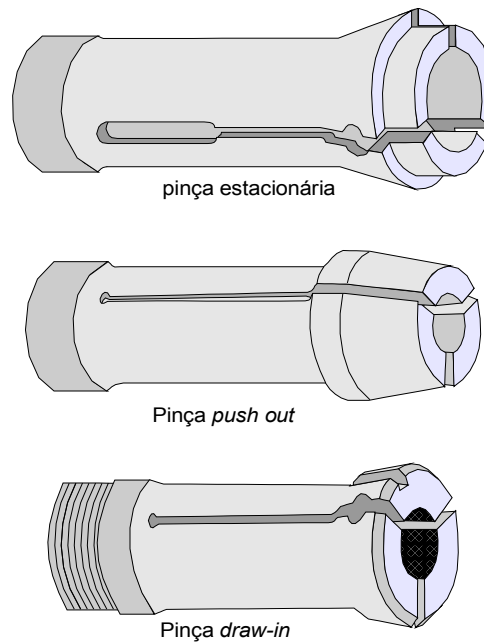


Figura 91 – Exemplo de pinça para tornos

Outras formas de fixação

- Placas magnéticas
- Placas de vácuo
- Colagem
- Dispositivos especiais.

Escolha do sistema de fixação

- A peça, o torno e as ferramentas determinam o sistema de fixação a ser utilizado
- A seleção criteriosa do sistema de fixação garante a obtenção de melhores resultados
- A peça deve ser presa pelo seu maior diâmetro prático, para suportar o torque durante o corte mais facilmente

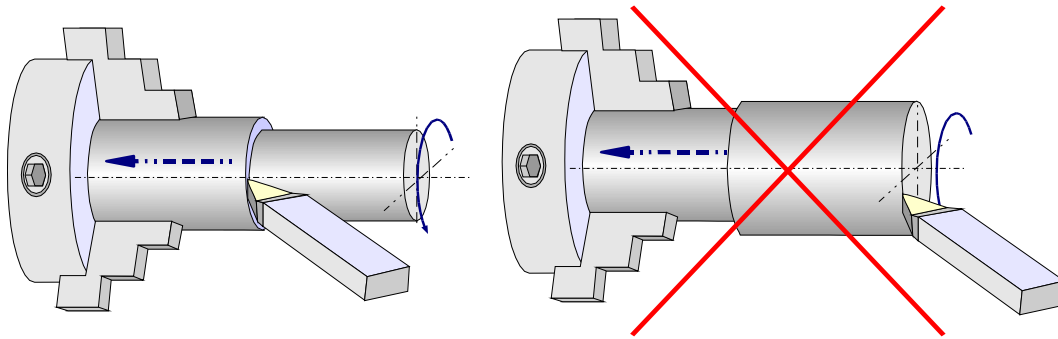


Figura 92 – Fomas correta e errada de fixação de peças no torneamento

- As peças devem ser fixadas o mais perto das faces das placas possível

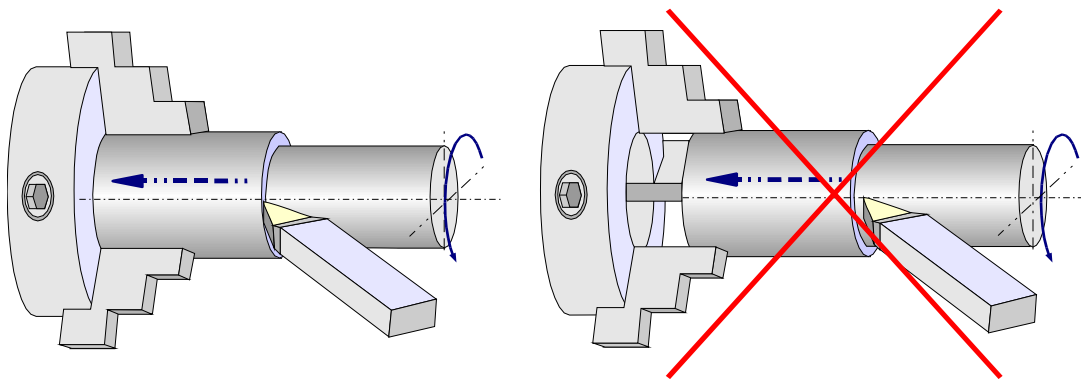


Figura 93 – Fomas correta e errada de fixação de peças no torneamento

Ajustagem da ferramenta no torneamento

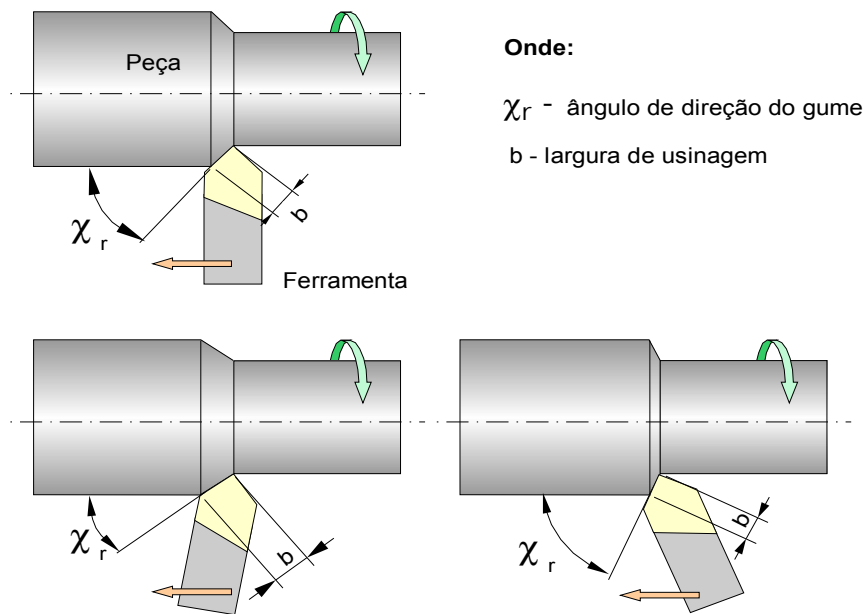


Figura 64 – Ajustagem do ângulo de posição

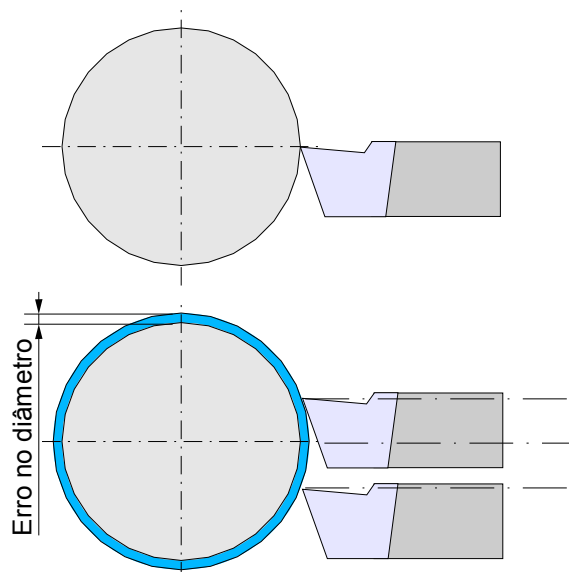


Figura 95 – Ajustagem do centro da ferramenta – torneamento logitudinal

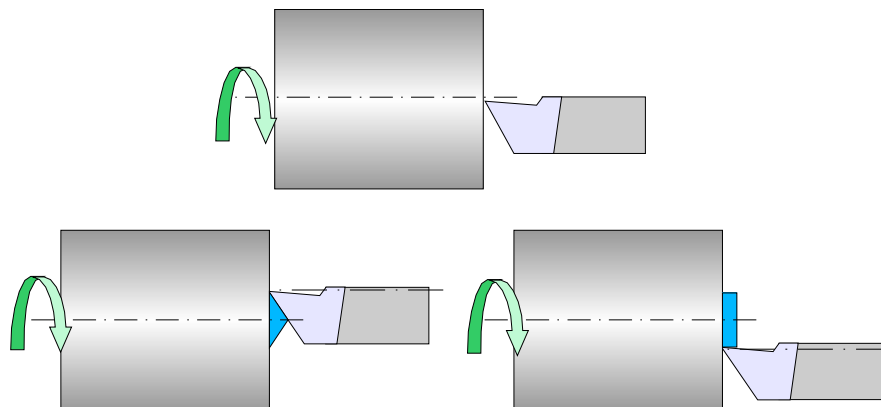


Figura 96 – Ajustagem do centro da ferramenta – torneamento transversal

Parâmetros de corte e variáveis de trabalho no torneamento

Requisitos de potência para o torneamento

Potência necessária para usinar um material específico: $P = U_p \left(\frac{V_c}{60} \right) C f a_p$

Onde : U_p = unidade de potência

C = fator de correção de avanço

v_c = velocidade de corte [m/min]

f = avanço [mm]

a_p =profundidade de corte [mm]

Potência necessária para remover material a uma taxa de $1 \frac{cm^3}{s}$

$$U_p = \frac{F_c}{f a_p}$$

Onde: U_p =unidade de potência

F_c =força de corte [N], medida em experimento

f = avanço [mm]

a_p =profundidade de corte [mm]

Valores representativos de U_p para diversos materiais são encontrados na literatura

Considerações sobre velocidade, avanço e profundidade de corte

- Parâmetros que afetam a taxa de material removido e a vida da ferramenta
- Um aumento destes parâmetros aumenta a taxa de remoção de material, mas diminui a vida da ferramenta
- Afetam igualmente a taxa de remoção, mas têm efeitos isolados diferentes sobre a vida da ferramenta

Profundidade de corte (a_p)

- Parâmetro que menos afeta a vida da ferramenta
- Pequeno efeito sobre a vida da ferramenta, para profundidades de corte 10 vezes menores que o avanço
- Aumentos de 50% na a_p reduz em apenas 15% a vida da ferramenta
- Aumentar a a_p é o melhor método para aumentar a taxa de remoção de material

Limitantes da a_p :

- quantidade de material a ser removido
 - potência disponível na máquina
 - rigidez do sistema máquina-peça-ferramenta
 - capacidade da ferramenta
 - acabamento superficial e precisão requeridos
 - forma da peça
-
- Recomenda-se 50 a 75% de engajamento do gume na peça

Avanço

- Tem grande efeito sobre a vida da ferramenta
- 50% de aumento na taxa de avanço provoca redução de » 60% na vida da ferramenta
- Utilizar o maior avanço possível, para maiores taxas de remoção e menores potências aplicadas
- Aumentos no avanço são limitados máquina ferramenta, peça, requisitos de qualidade superficial e *set-up* para suportar as forças de corte

Acabamento superficial

- Avanço tem o maior impacto sobre qualidade superficial
- Aumento no raio de quina ou redução no avanço melhoram a qualidade da superfície
- Primeiro selecionar o avanço (produtividade/vida), depois o raio de quina (acabamento)

Velocidade de corte (v_c)

- Maior efeito sobre a vida da ferramenta que o avanço e a profundidade de corte, sendo de crítica seleção
- No geral, 50% de aumento na velocidade de corte resulta em 90% de perda na vida da ferramenta
- Um aumento na v_c é o meio menos desejável para se aumentar a produtividade
- Materiais de corte como metais duros revestidos, cerâmicas, diamante policristalino e CBN têm boas propriedades a altas velocidades de corte
- Uma alta v_c pode gerar problemas de vibração, vida de componentes da máquina, produção e segurança
- Criteriosas considerações devem ser feitas a respeito de aumentos na produção e custos / peça

Fresamento

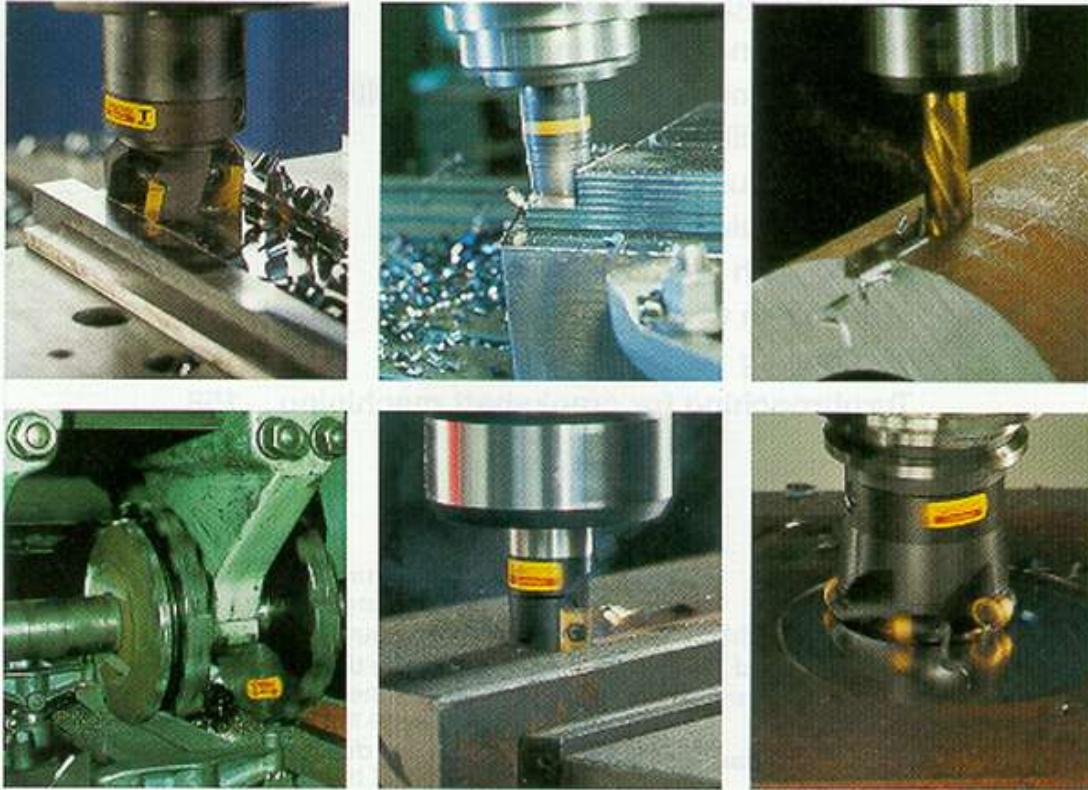


Figura 97 – Exemplos de operações de fresamento

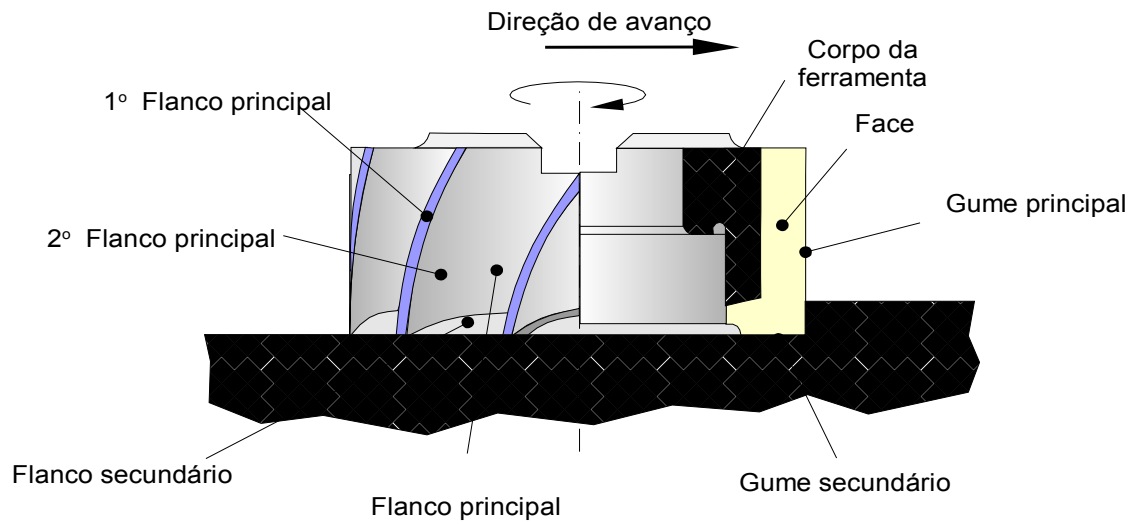


Figura 98 – Características da fresa

Generalidades do processo de fresamento

- Processo de remoção de cavaco com movimento de corte circular da ferramenta
- Ferramenta com um ou vários gumes atuando simultaneamente para a geração de superfícies
- Processo utilizado na geração de superfícies que não são de revolução, como as produzidas no torneamento
- O movimento de corte transcorre de forma normal ou oblíqua à direção de rotação da ferramenta.

Divisão do processo de fresamento - norma DIN 8589

- Fresamento plano
- Fresamento circular
- Fresamento de forma
- Fresamento de geração (engrenagens)
- Fresamento de perfil

Divisão de acordo com a cinemática do processo

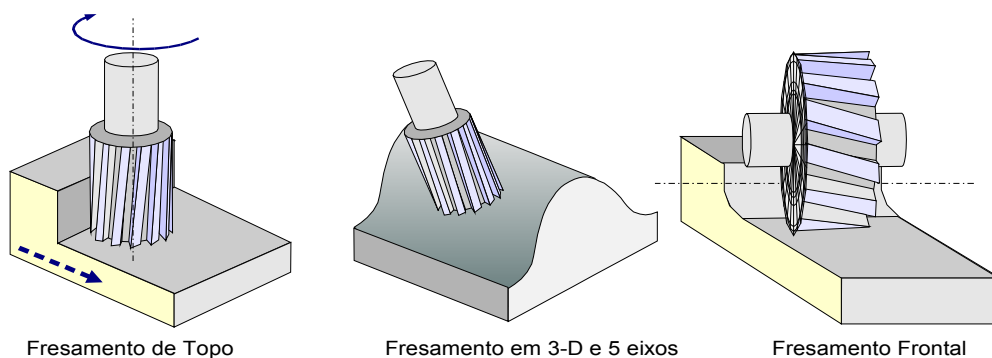


Figura 99 – Divisão de acordo com a cinemática

Fresamento frontal / Fresamento periférico

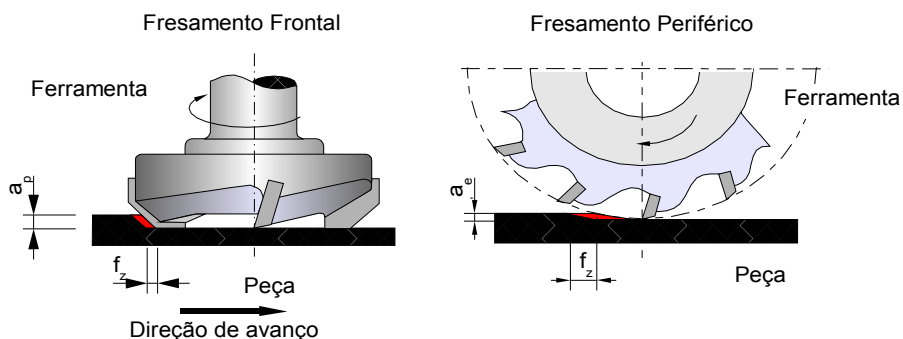


Figura 100 – Fresamento frontal e fresamento periférico

Fresamento concordante / Fresamento discordante

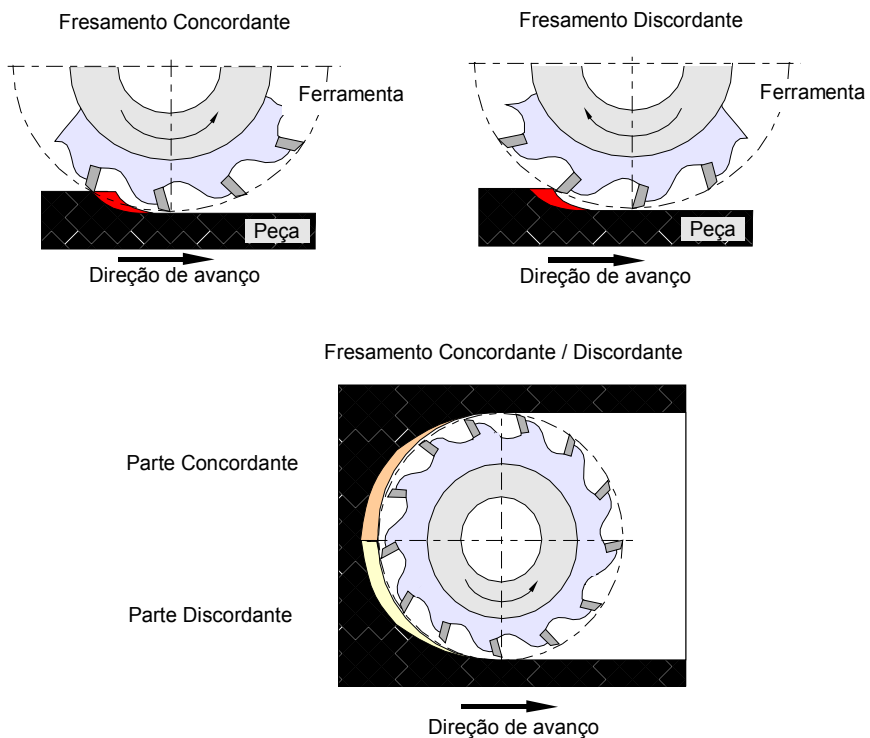


Figura 101 – Fresamento concordante e discordante

Descrição das condições de usinagem no fresamento

- Informações gerais (v_c , f , a_p , etc)
- Fresamento concordante / discordante
- Diâmetro da fresa
- Número de dentes (Z)
- Ângulo de engajamento (definido por j_E e j_A)
- Penetração de trabalho (a_e)
- Avanço por dente (f_z)

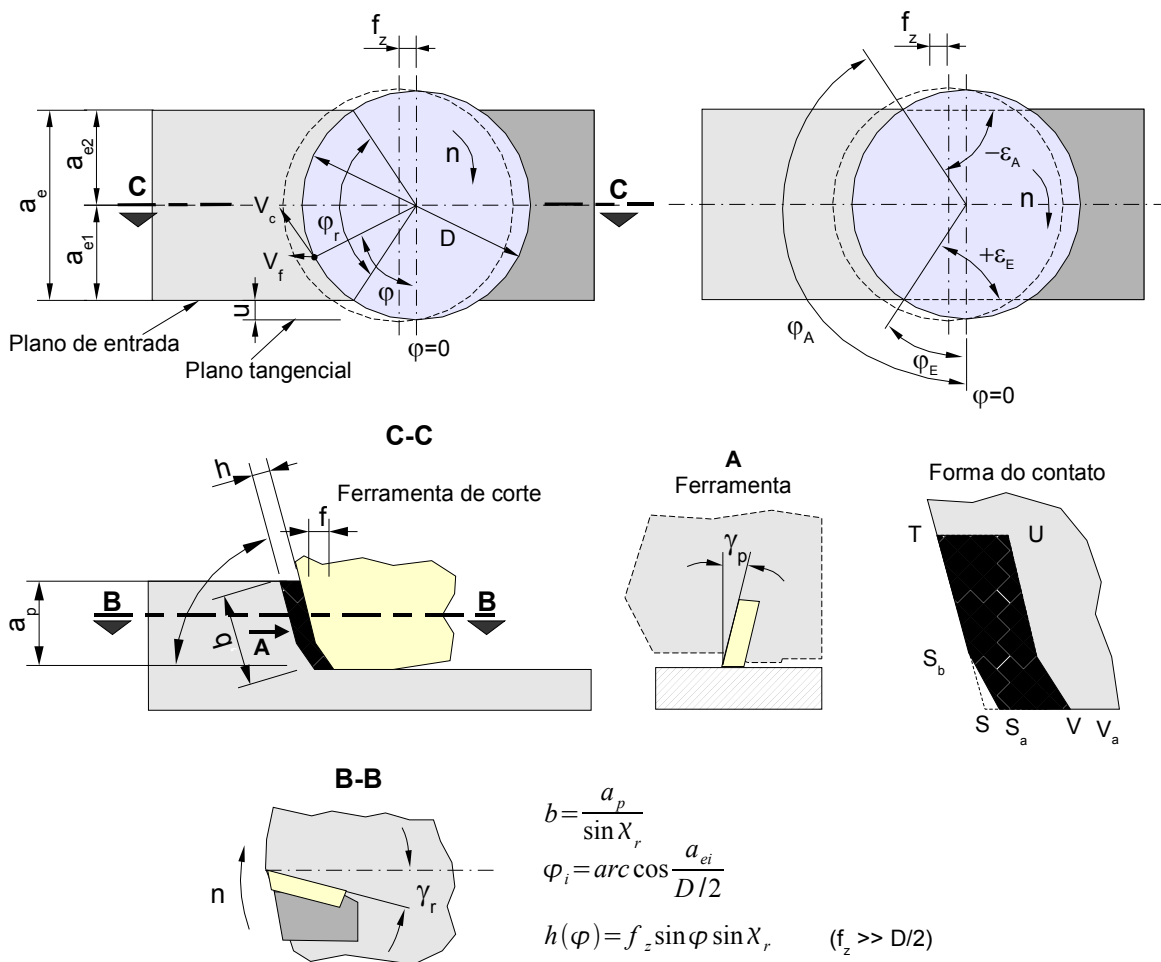


Figura 102 – Descrição das condições de usinagem em fresamento

Geometria positiva (γ_f e $\gamma_p > 0$)

Geometria negativa (γ_f e $\gamma_p < 0$)

Materiais de ferramenta comumente utilizados em fresamento

- Os materiais empregados para o fresamento não podem ser comparados diretamente com os empregadas no torneamento
- Foram desenvolvidos especificamente para apresentam resistências térmica e mecânica a esforços alternantes elevados

<i>Material da peça</i>	<i>Material da ferramenta</i>
Aço	Aços rápidos e metais duro P15 a P40
Fofo, metais não ferrosos, plásticos e aços temperados	metais duro K10 a K30
Aços HB<300	Cermets
Desbaste de fofo	Cerâmicas de Si ₃ N 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

Variações do processo e características específicas

Fresamento frontal

- É usual inclinar-se o eixo da fresa de 0,5 a 1° para evitar o contato da parte não ativa do cabeçote de fresar
- O ângulo de direção do gume tem uma grande influência sobre as forças ativas e passivas e conseqüentemente sobre a estabilidade do processo
- O fresamento de acabamento tem ganhado importância devido à possibilidade crescente do trabalho completo em apenas uma máquina
- Processo utilizado para usinagem de grandes superfícies
- a_e consideravelmente maior que a_p
- Superfície da peça gerada pelo gume secundário, $c = 90^\circ$ - fresamento de canto - superfície gerada pelos gumes principal e secundário
- Usinagem de rasgos de chavetas, seções retangulares e furos longos - fresas maciças de aço rápido, ferramentas com insertos reversíveis ou brasados
- Usinagem de superfícies grandes e planas - cabeçotes de fresar com insertos reversíveis

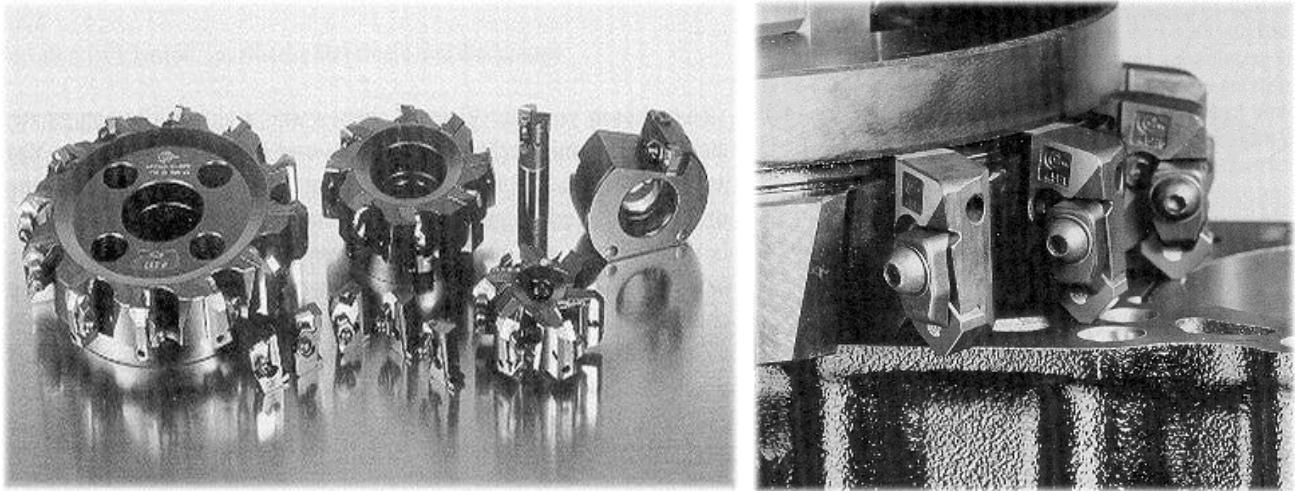


Figura 103 – Exemplos de fresas frontais

- Tamanho e número de dentes do cabeçote de acordo com dimensões da superfície e da potência de acionamento da máquina
- Para evitar vibrações regenerativas do sistema, os cabeçotes são providos de uma divisão não regular dos dentes
- Cabeçotes de fresar grandes são subdivididos em duas partes para facilitar a troca da ferramenta - troca do anel externo com os insertos
- Flexibilidade no uso dos cabeçotes - uso de cassetes - insertos de diferentes tamanhos e formas

Ferramentas de acabamento

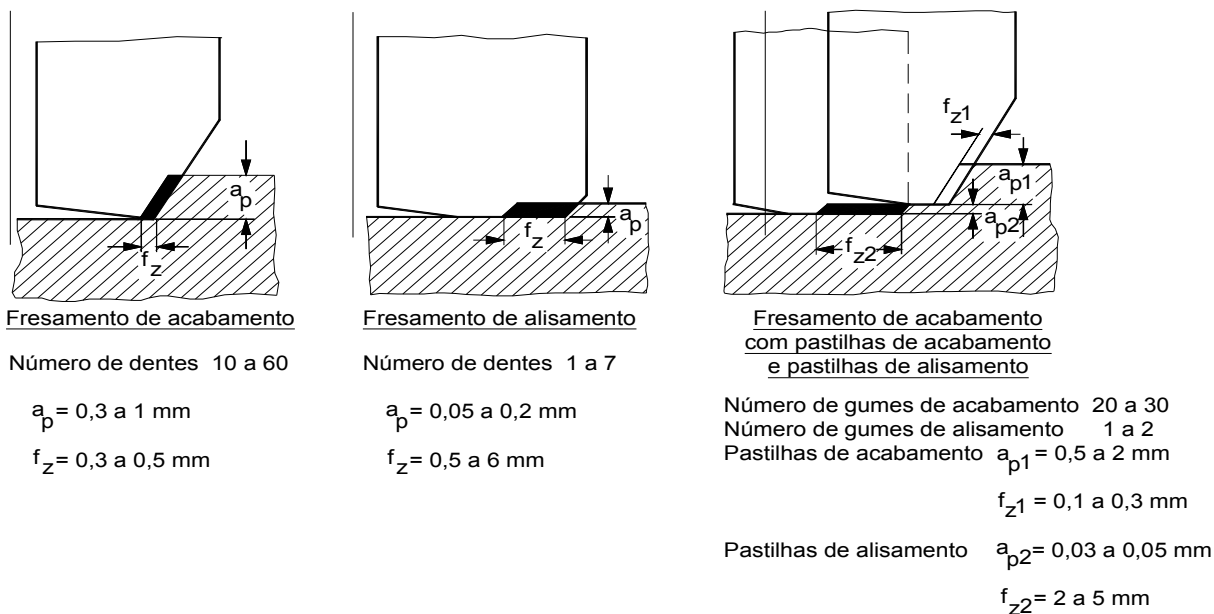


Figura 104 – Fresamento de acabamento

- Fresamento com ferramentas de acabamento com grande número de insertos (a_p e f_z pequenos)
- Fresamento com ferramentas de acabamento com pequeno número de insertos (a_p pequena e f_z grande)
- Fresamento combinado - gumes de desgaste de acabamento

Fresamento tangencial

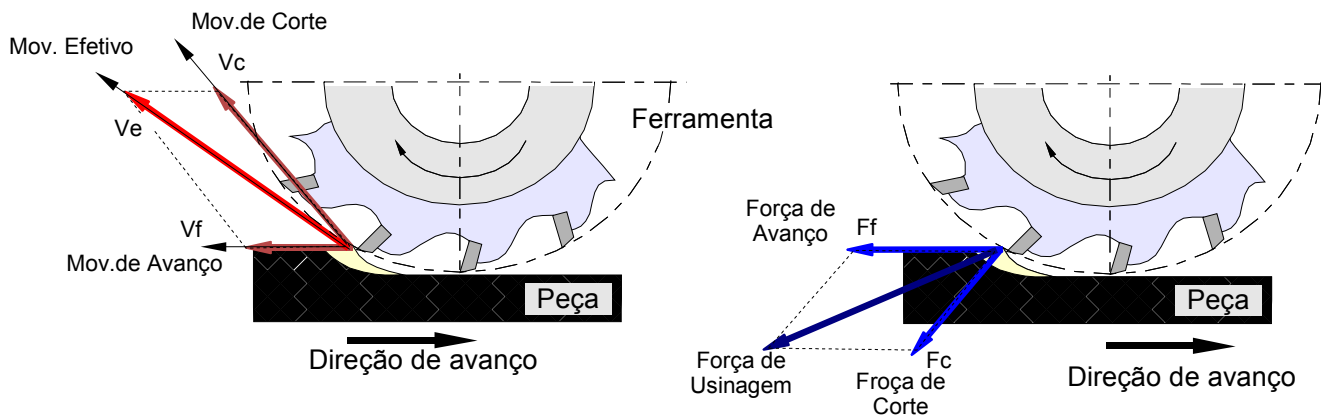


Figura 105 – Fresamento tangencial

Considerações sobre o fresamento de acabamento:

- a_p consideravelmente maior que a_e
- Superfície da peça gerada pelo gume principal
- Em geral é empregado fresamento tangencial discordante
- Ferramentas podem ser de aço rápido ou com insertos de metal-duro
- Dentes retos - alta solitação dinâmica
- Dentes helicoidais
 - Menor solitação dinâmica
 - Força axial que pode levar ao deslocamento da peça e / ou da ferramenta
- Fresa espinha de peixe - eliminação das solitações axiais

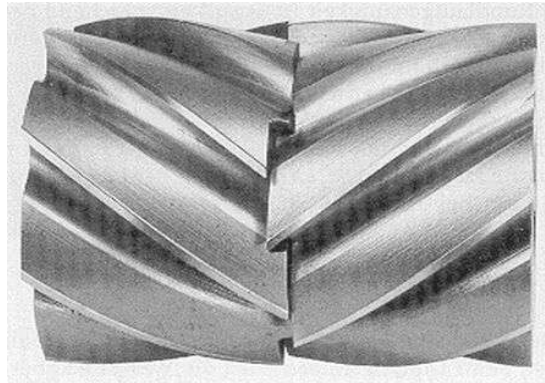


Figura 106– Exemplo de fresa espinha de peixe

- Obtenção de perfis com cantos vivos - fresas combinadas

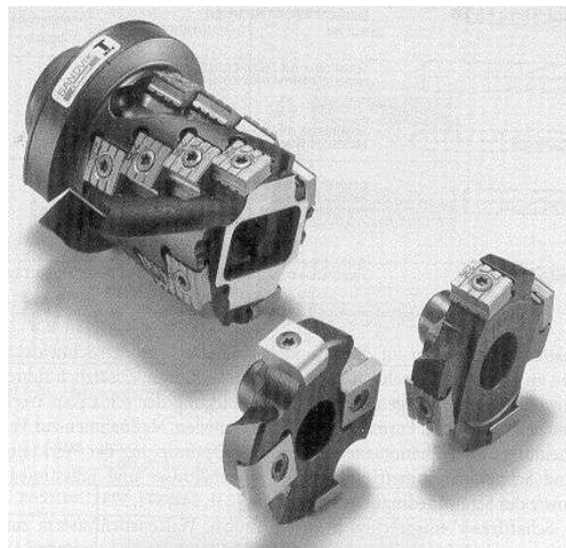


Figura 107 – Fresa combinada – topo+tangencial

Fresamento de perfil

- As ferramentas para fresamento de perfil são adequadas à forma do perfil que deve ser executado
- Ferramentas maciças (fresa de forma) ou compostas
- Ferramentas maciças - construídas em aço rápido
- Usinagem de rasgos, raios, rodas dentadas e cremalheiras, guias de máquinas-ferramentas.

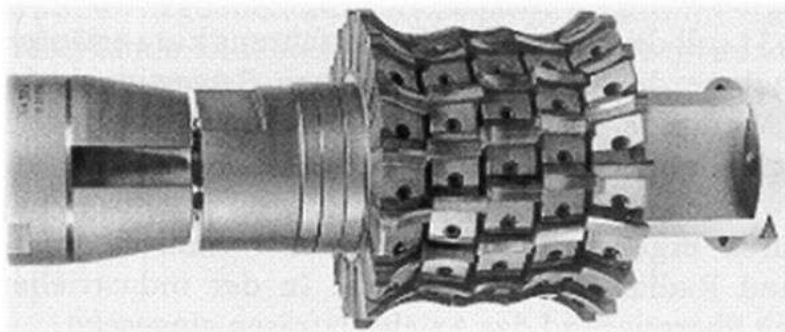


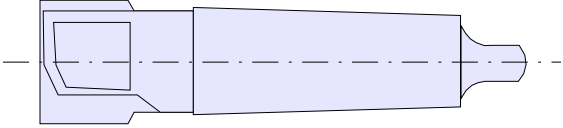
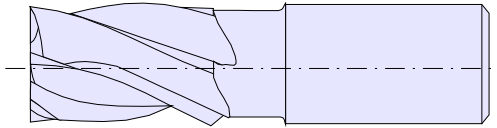
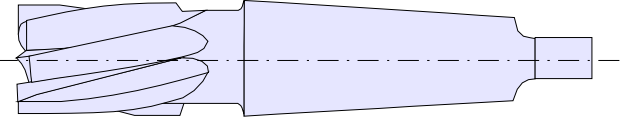
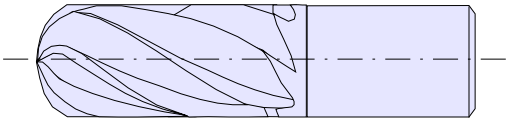
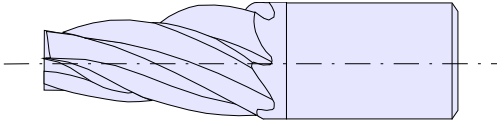
Figura 108 – Exemplo de fresa de perfil

Fresamento de topo

- Processo de fresamento contínuo frontal e periférico
- Usinagem de formas complexas – ex. matrizes, rasgos etc.
- Dependendo da aplicação, as ferramentas tem índice de esbeltez elevado ($l/D = 5$ a 10) - problema de vibrações
- Vibrações implicam desgaste acentuado, lascamentos do gume, erros de forma e dimensionais
- Ferramentas de aço rápido revestido e com insertos

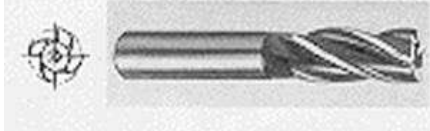
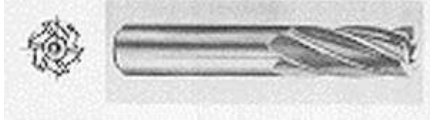

Fresamento de topo

Considerações para escolha da ferramenta de fresamento de topo

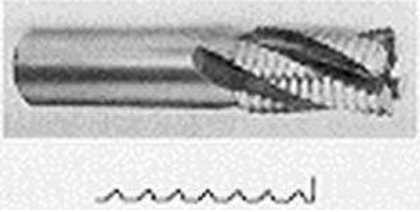
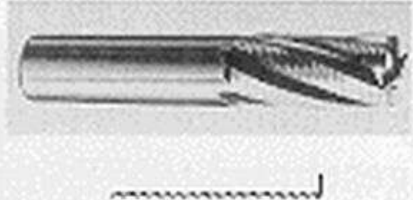
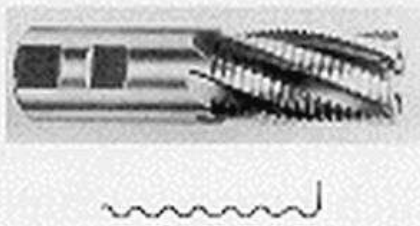
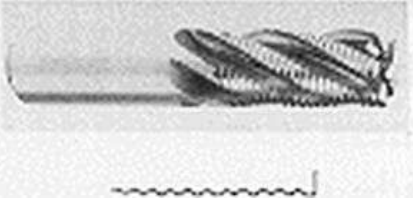
Tipo de Fresa	Aplicação
	<p>Fresa para ranhuras com cone morse</p>
	<p>Fresa de topo com haste cilíndrica Corte à direita com hélice direita</p>
	<p>Fresa de topo com cone morse Corte à direita com hélice esquerda</p>
	<p>Fresa de topo semi-esférico com haste cilíndrica Corte à direita com hélice direita</p>
	<p>Fresa de topo cônica para matrizaria Corte à direita com hélice direita</p>

Fresamento de topo

Classificação em grupos segundo o material a usinar

Tipo da Hélice	Campo de aplicação	Ferramenta
N	Usinagem de materiais com resistência e dureza normais	
H	Usinagem de materiais duros, tenazes duros e/ou cavacos curtos	
W	Usinagem de materiais moles, tenazes e/ou de cavacos longos	

Perfilamento do gume principal em fresas de desbaste

<i>Fresas de desbaste com perfil da parte cortante</i>		
Quebra cavaco	Grupo N	Grupo H
Perfil plano (F)		
Perfil ondulado (R)		

Fresamento de geração

- Simulação interação entre um caracol (ferramenta) e uma roda dentada
- Superposição de movimentos de translação da ferramenta (axial e transversal) e da roda dentada (radial)
- Mais comumente empregado - geração axial
- Fresamento concordante no desbaste e discordante no acabamento

Cinemática na geração por fresamento

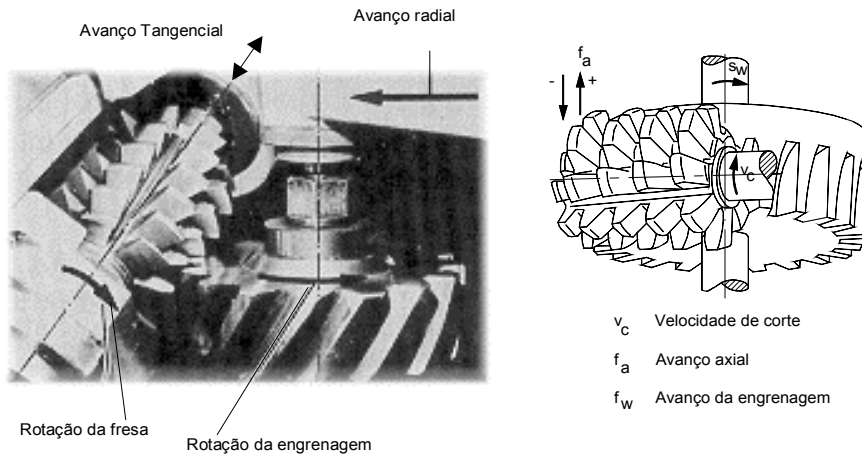


Figura 109 – Exemplo de fresamento de geração

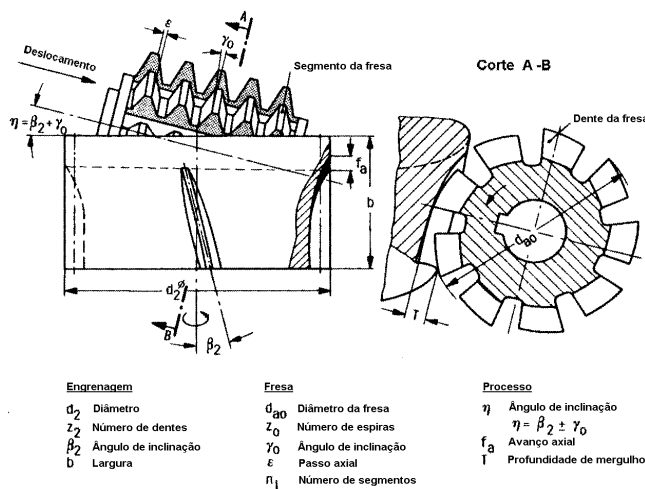


Figura 110 – Cinemática do fresamento de geração

- O número de entradas da hélice ao longo do cili
- ndro determina o número característico da fresa
- Os dentes são detalonados - ângulos de saída nos flancos
- O ângulo de inclinação da fresa é dado pelo ângulo de inclinação da hélice da engrenagem e o de hélice do caracol

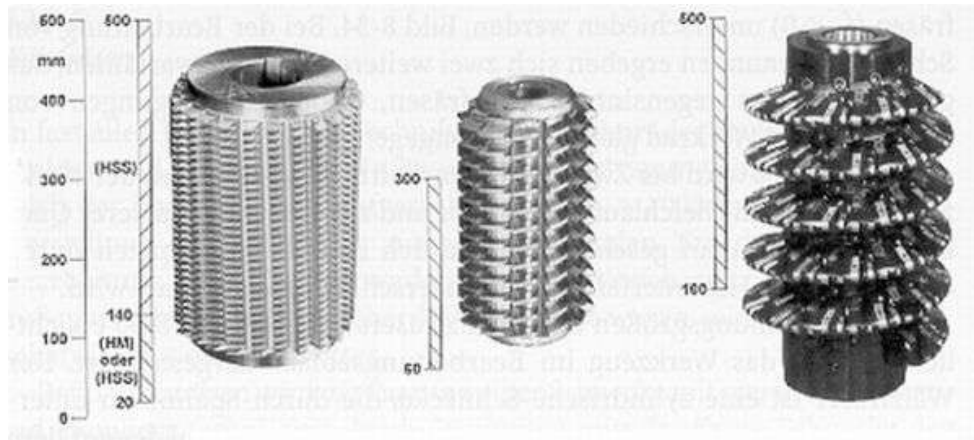


Figura 111 – Exemplo de fresas de geração

- A ferramenta é utilizada sem revestimento nas faces
- O desgaste de cratera substitui o desgaste de flanco na determinação da vida da ferramenta
- Aumento de até 500% no volume de cavacos usinados, em comparação com ferramentas não-revestidas

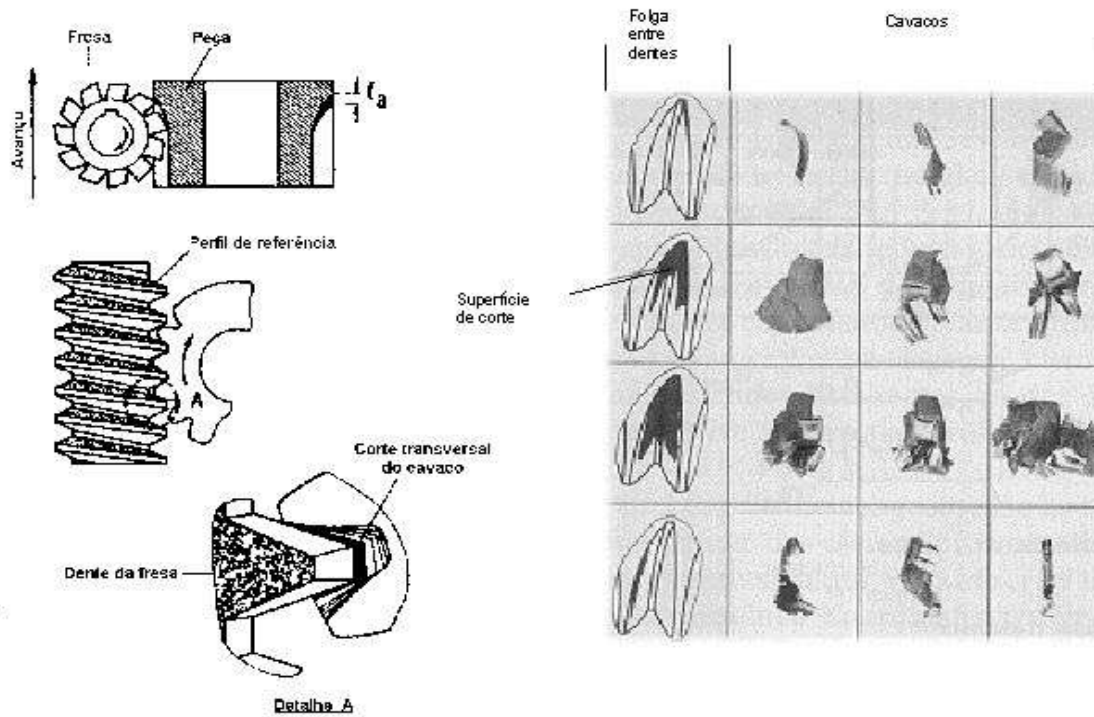


Figura 112 – Formação do cavaco no fresamento de geração

- Uma alternativa para aumentar a vida da fresa geradora é o aumento do número de dentes
- O volume usinado se distribui por um maior número de dentes
- Interferência variáveis entre ferramenta e peça - formação de cavacos de espessuras e formas distintas
- O perfil evolvente do dente é obtido devido ao movimento entre a ferramenta e a peça nos cortes sucessivos
- Cada dente do caracol retira cavacos sempre com a mesma forma geométrica

Geometrias obtidas no fresamento

→ superfícies planas

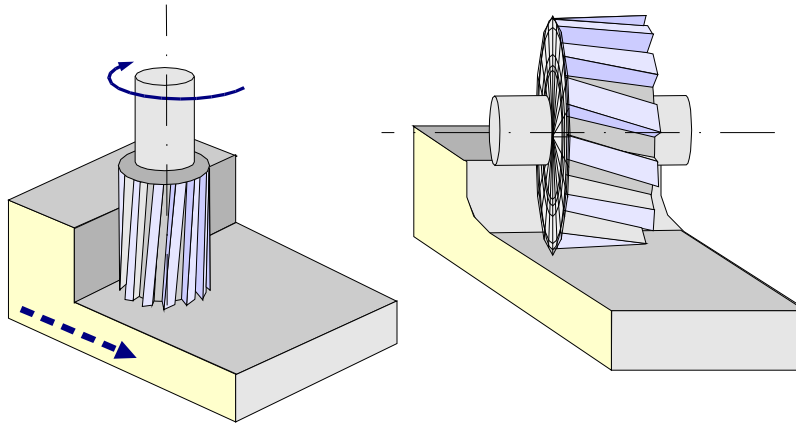


Figura 113 – Obtenção de superfícies planas no fresamento

superfícies circulares e cilíndricas

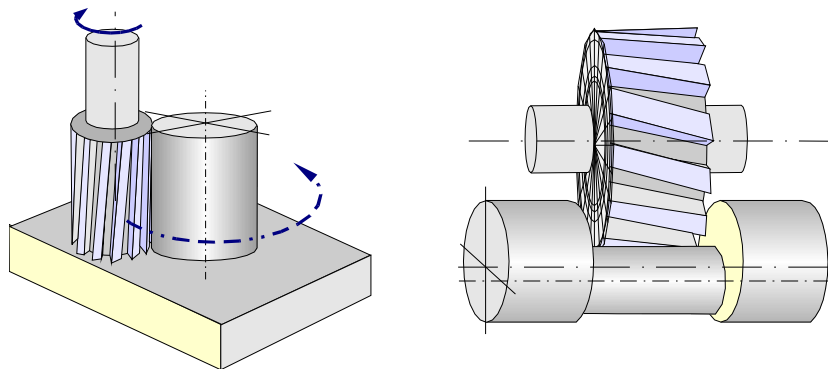


Figura 114 – Obtenção de superfícies circulares no fresamento

→ Obtenção de roscas

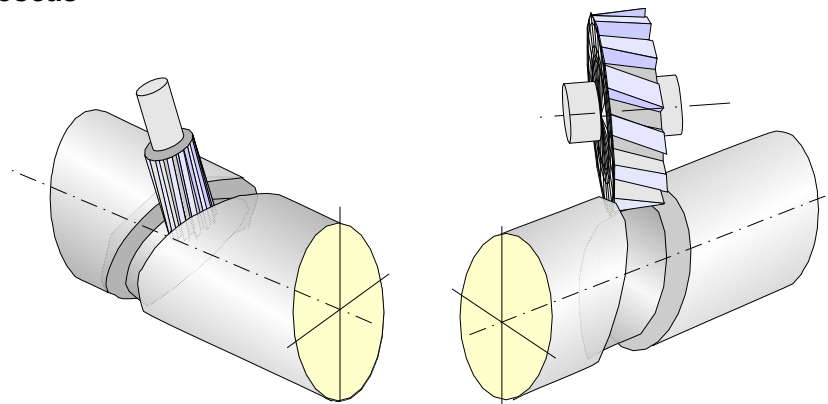


Figura 115 – Obtenção de roscas no fresamento

superfícies perfiladas

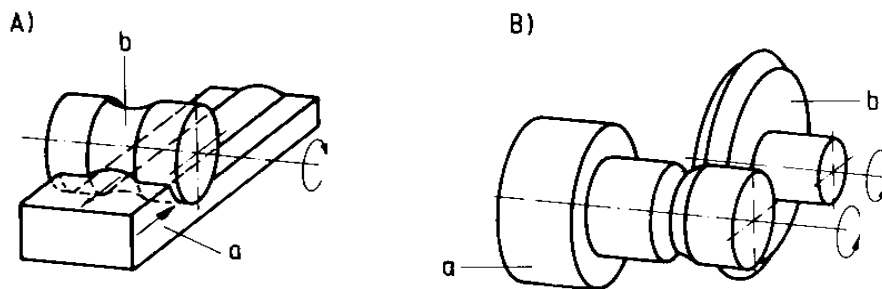


Figura 116 – Obtenção de superfícies perfiladas no fresamento

Cópia de superfícies

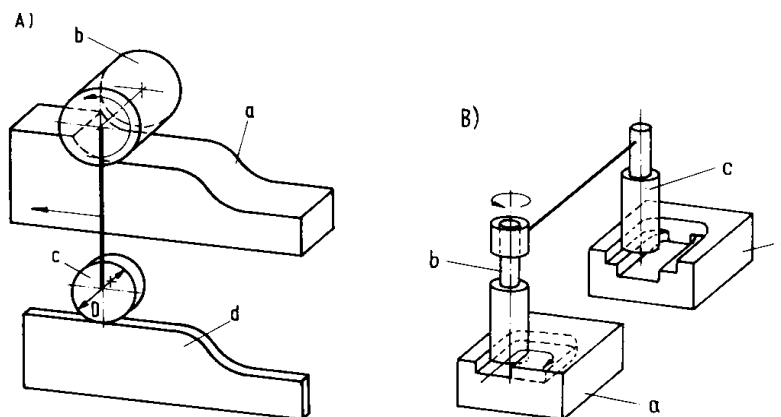


Figura 117 – Cópia de superfícies por fresamento

Fontes de vibração no fresamento

Causas

- Força surgida entre ferramenta e peça
- Freqüência de contato do dente da fresa (geralmente entre 200 e 400 Hz)
- Ressonâncias surgidas no processo
- Folgas indevidas na fixação da peça
- Formação inadequada do cavaco

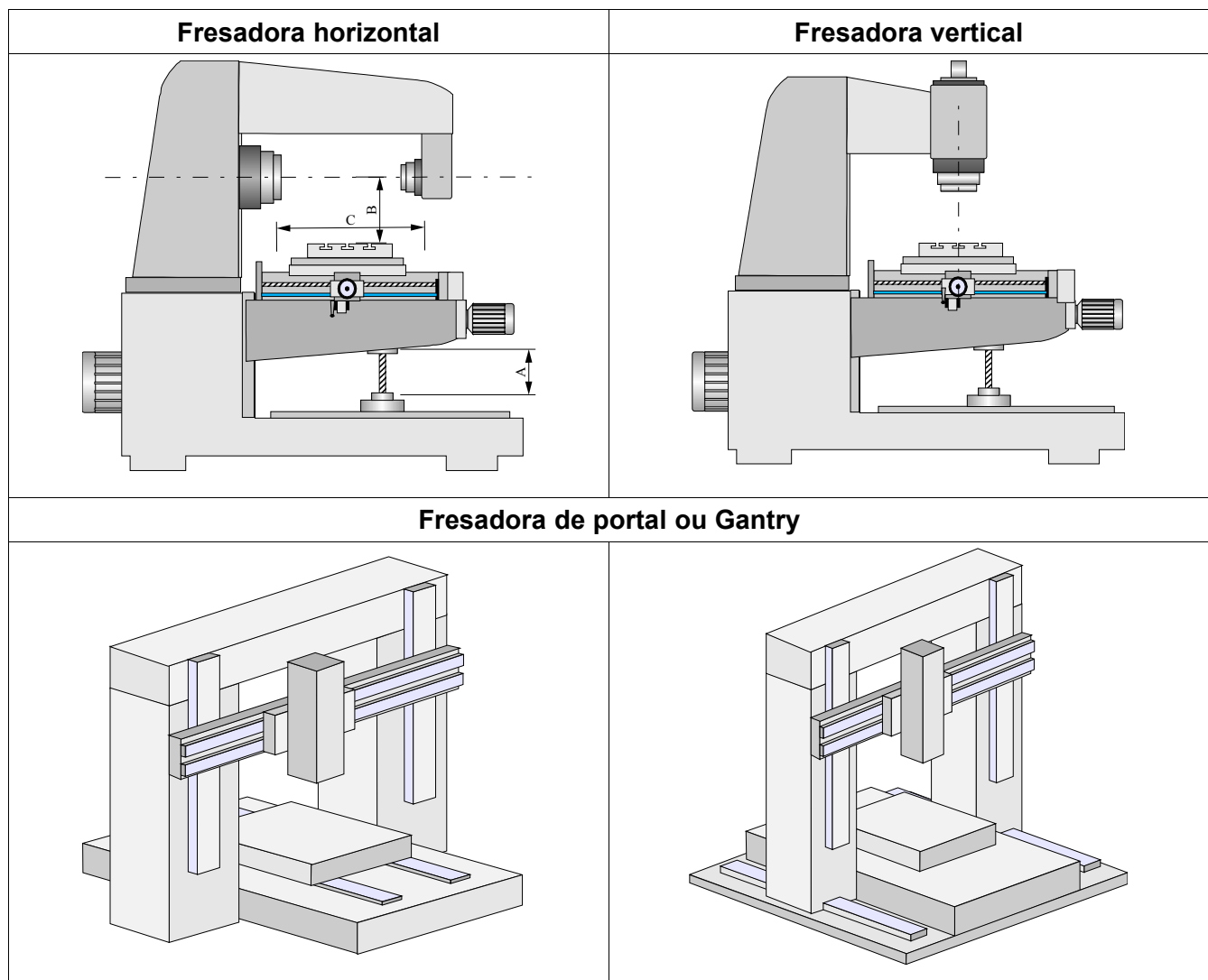
Soluções

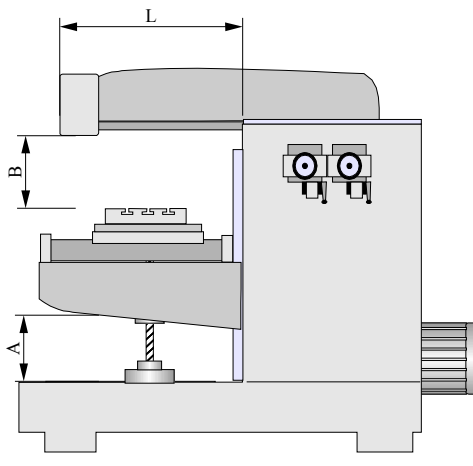
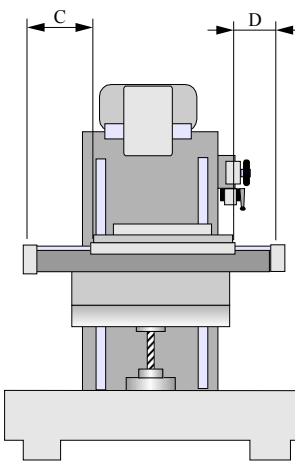
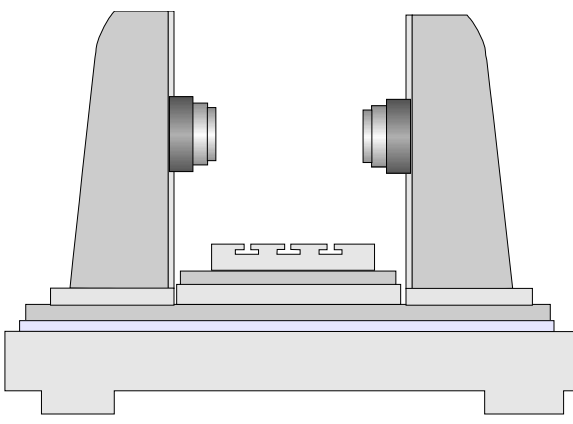
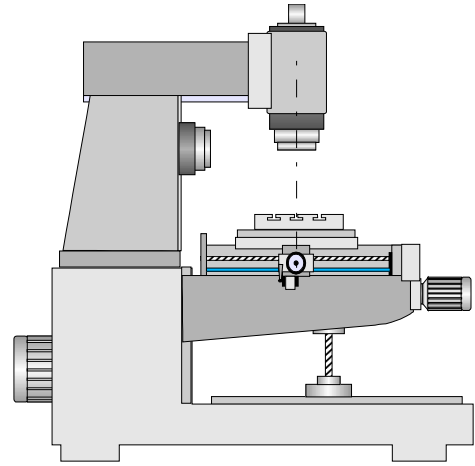
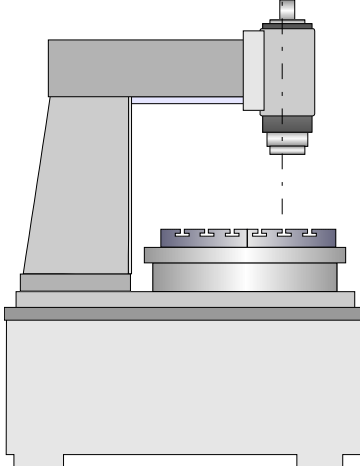
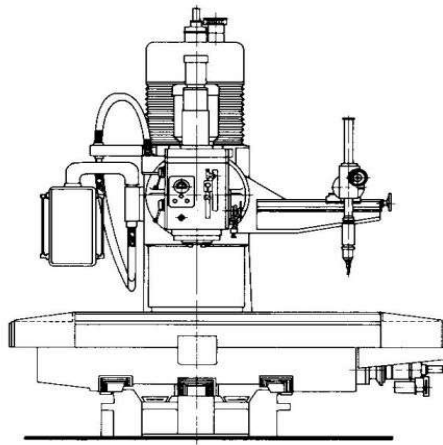
- Massas adicionais na máquina
- Alteração de v_c , a_p ou n
- Mudança de estratégia (concordante/discordante)
- Melhora na fixação

Formas construtivas de fresadoras

Requisitos gerais de fresadoras

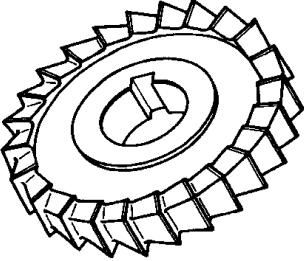
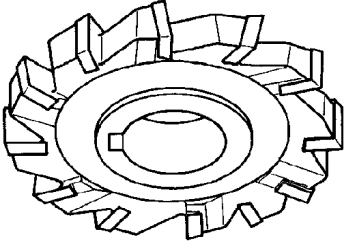
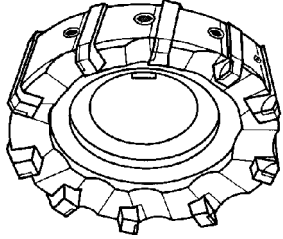
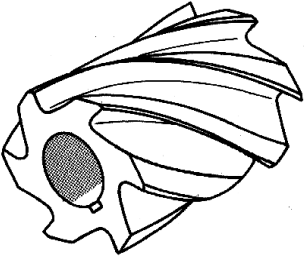
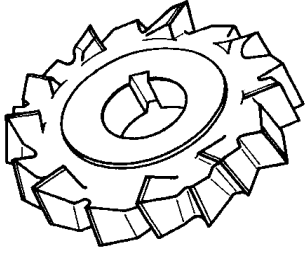
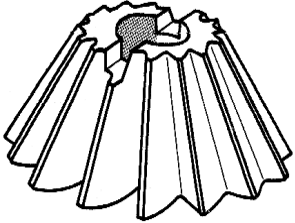
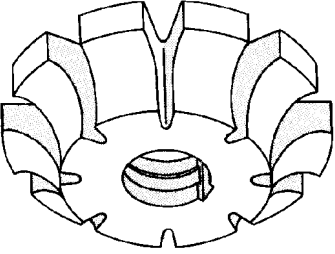
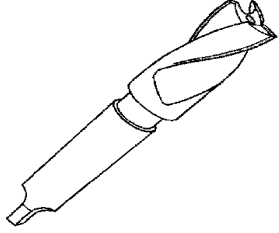
- As máquinas devem ser projetadas para altas solicitações estáticas e dinâmicas
- O posicionamento da árvore deve ser radial ou axial sem folgas
- O acionamento da árvore deve ser contínuo e sem folgas para evitar vibrações e permitir altas vidas das ferramentas
- Fresamento sincronizado necessita de cuidados no acionamento e no avanço da mesa e dos carros
- Facilidade na operação - visor eletrônico de posicionamento, aplicação de comando numérico



Fresadora	
 <p>Technical drawing of a standard milling machine. It shows a side view with dimensions L (total length), B (height of the table), and A (height of the spindle assembly). The table has a width of 25 units.</p>	 <p>Technical drawing of a standard milling machine showing dimensions C (height of the spindle assembly) and D (height of the table).</p>
Fresadoras paralelas	Fresadora universal
 <p>Technical drawing of a parallel shaper, showing two vertical cutting tools mounted on a horizontal table.</p>	 <p>Technical drawing of a universal milling machine, showing a vertical spindle and a table that can rotate around a vertical axis.</p>
Fresadora de mesa circular	Fresadora copiadora
 <p>Technical drawing of a circular table milling machine, showing a vertical spindle and a table that rotates around a horizontal axis.</p>	 <p>Technical drawing of a copying mill, showing a vertical spindle and a table with a copying mechanism.</p>

Tipos de fresas

Quanto à estrutura

Classificação das fresas		
Quanto a estrutura		
		
Fresas inteiriças	Fresas com insertos	Fresas com dentes posiçõs
Quanto à forma geométrica		
Fresa cilíndrica	Fresa de disco	Fresa angular
		
Fresa detalonada		Fresa de topo
		

Influências dos principais parâmetros de corte no fresamento

- Influência da velocidade de corte no desgaste da fresa

- v_c é o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta devido principalmente às altas temperaturas geradas

- Em fresamento de topo reto, com Q cte pode-se aumentar a vida da ferramenta diminuindo-se v_c e aumentando-se f_z

- Para Q cte a influência da redução de v_c na vida da ferramenta é maior que a devida à 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

Furação

Definição

→ Processo de usinagem onde movimento de corte é principal rotativo, e o movimento de avanço está na mesma direção

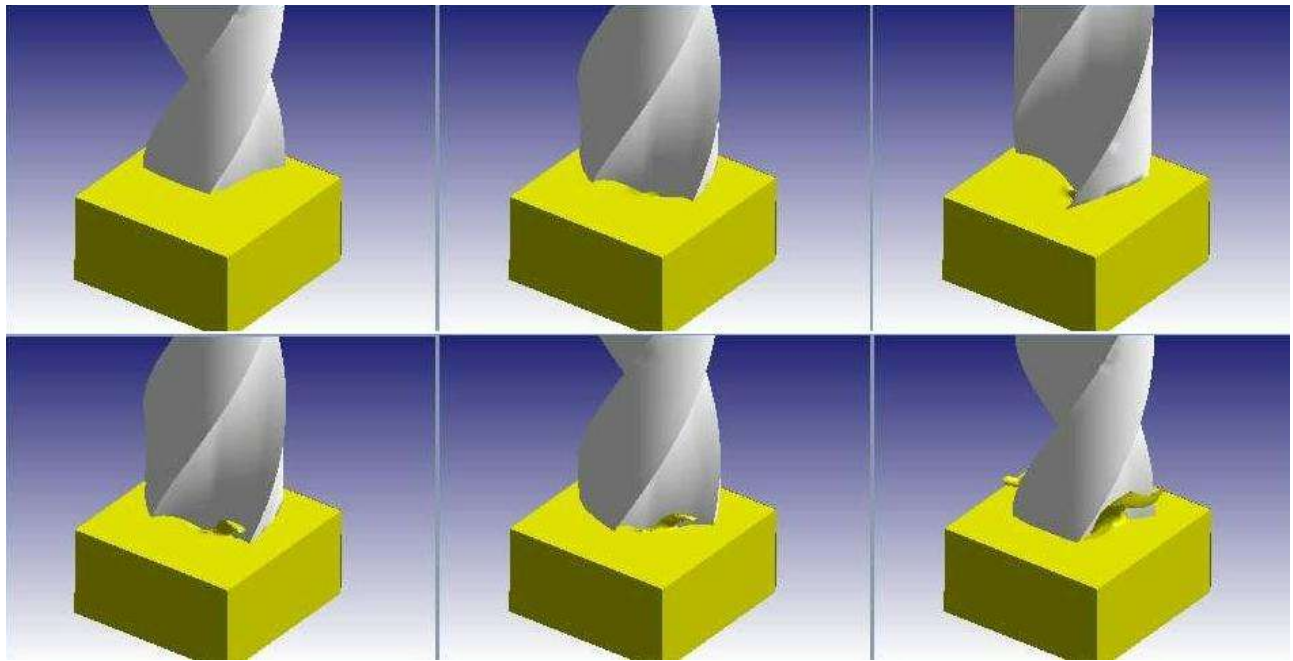


Figura 118 – Seqüência do início do processo de furação



Figura 119 – furadeira a arco egípcia de 1.000 A.C.

Generalidades

- 1800 - primeiras publicações sobre furação de metais
- 1884 - Morse - Twist Drill and Machine Company
- 1891 - Primeiros testes de furação

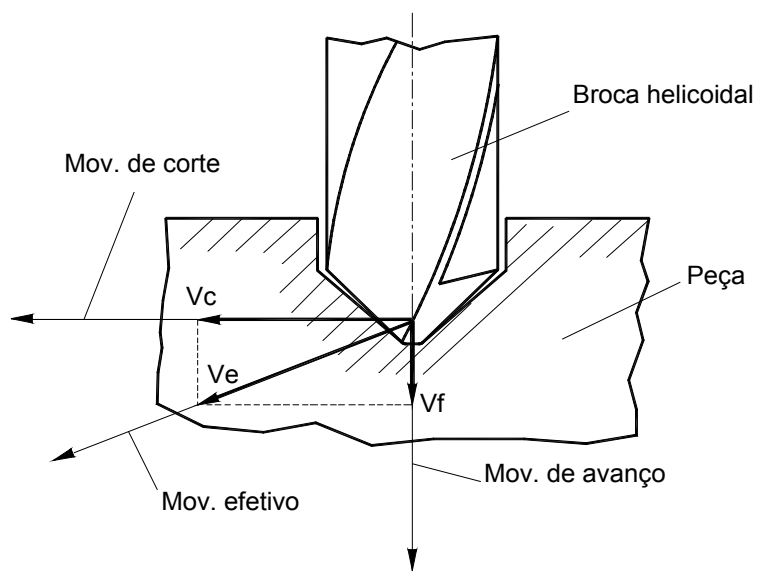


Figura 120 – Cinemática do processo

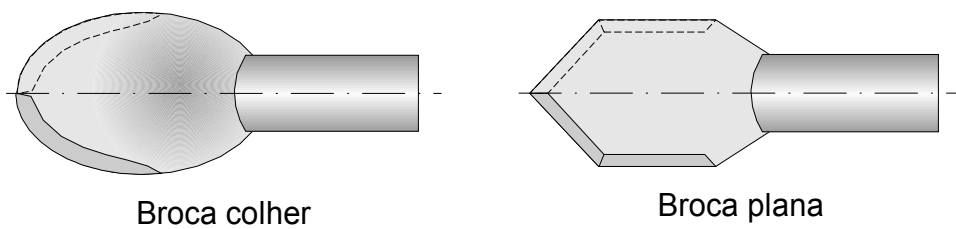
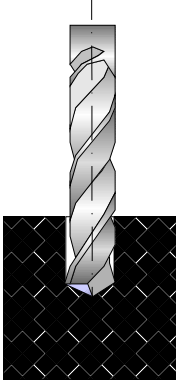
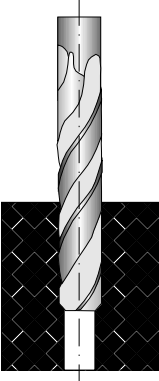
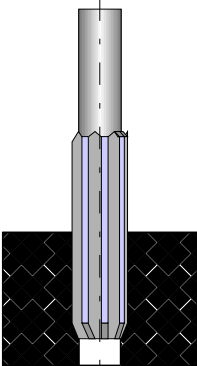
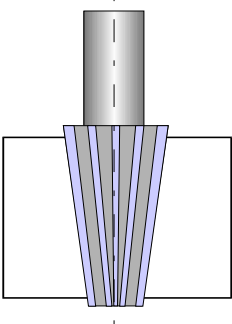
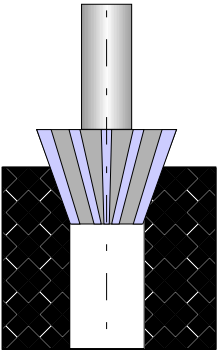


Figura 121 – brocas primitivas

Variações do processo de furação

<p style="text-align: center;">Furação em cheio</p> 	<p style="text-align: center;">Furação com pré-furo</p> 	<p style="text-align: center;">Trepanação</p>
<p style="text-align: center;">Alargamento cilíndrico</p> 	<p style="text-align: center;">Alargamento de perfil</p> 	<p style="text-align: center;">Furação descentrada</p>
<p style="text-align: center;">Furação de perfil em cheio</p>	<p style="text-align: center;">Rebaixo de perfil</p> 	

Particularidades do processo

→ A velocidade de corte vai de um valor máximo na periferia da broca até o valor zero no seu centro

$$V_c = \frac{\pi(2r)}{1000} \quad r \rightarrow 0 \Rightarrow v_c \rightarrow 0; \quad r \rightarrow \rho \Rightarrow v_c \rightarrow v_c \text{ max}$$

→ Dificuldade no transporte dos cavacos para fora da região do corte

→ Distribuição não adequada de calor na região do corte

→ Desgaste acentuado nas quinas com canto vivo

→ Atrito das guias nas paredes do furo

Furação com brocas helicoidais

→ Processo de maior importância - 20 a 25% do total de aplicação dos processos de usinagem

→ A broca helicoidal é a ferramenta mais fabricada e mais difundida para usinagem

→ Existem aproximadamente 150 formas de afiações e uma série de perfis específicos

→ Utilização em furos curtos ou profundos

→ Cheios ou com pré-furo.

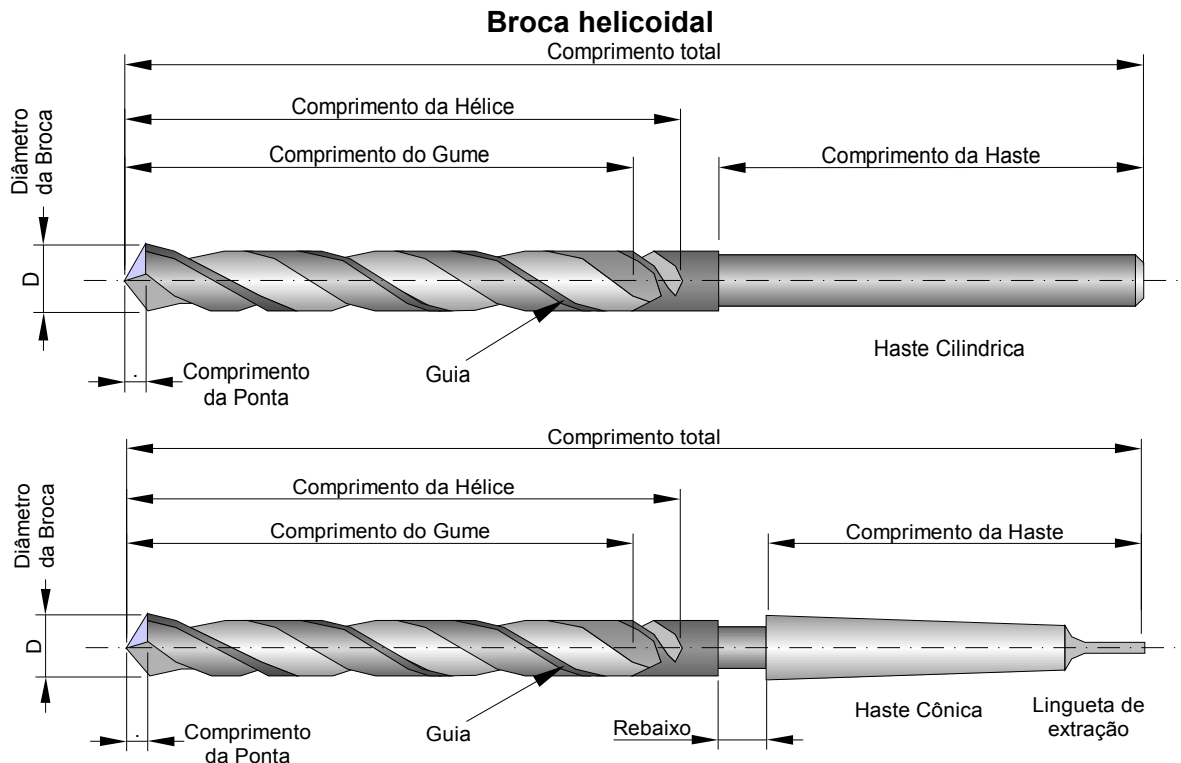


Figura 122 – Exemplos de brocas helicoidais

Geometria da cunha de uma broca helicoidal

- α = ângulo de incidência
- β = ângulo de cunha
- γ = ângulo de saída
- σ = ângulo de ponta
- Ψ = ângulo do gume transversal
- ε = ângulo de quina
- r_ε = raio de quina

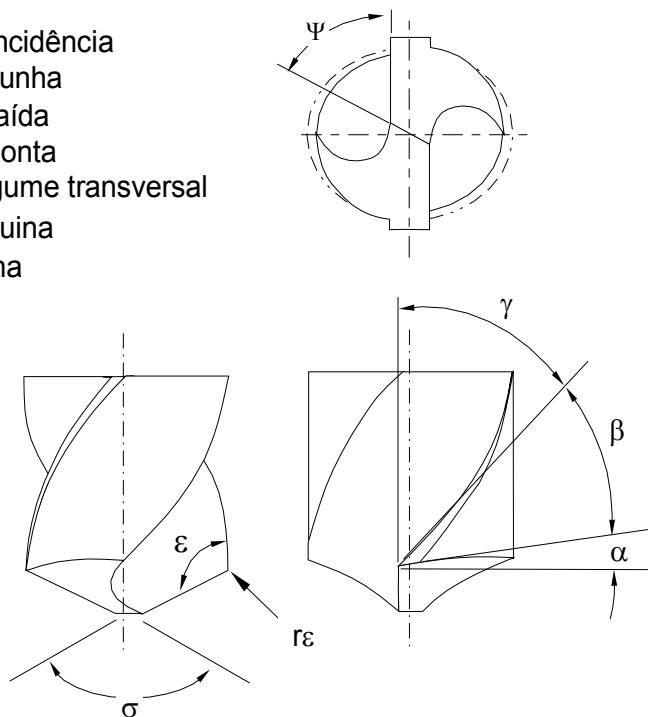
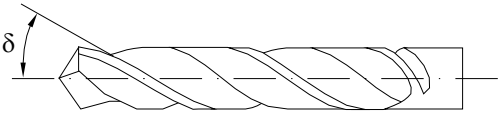
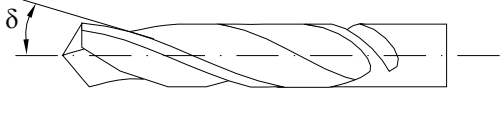
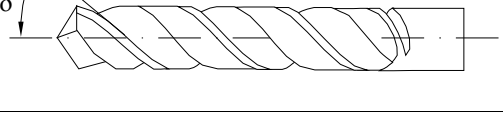


Figura 123 – Geometria da cunha de corte

- O gume transversal é parte integrante do gume principal, e tem como função estrudar material na direção do gume principal
- Gume principal é o gume cortante e aponta no sentido de corte
- A forma e o ângulo de hélice da broca definem o ângulo de saída γ , que não é constante ao longo do gume principal
- γ tem valor máximo na quina da broca e diminui no sentido de centro da broca, tornando-se negativo na passagem para o gume transversal.
- γ (e conseqüentemente δ) são variam de acordo com as características do material a ser usinado
- Guia reduz atrito com as paredes e direciona a broca
- Haste: fixação na máquina
- Canal: retirada de cavaco
- Canal interno: alimentação do fluido lubri-refrigerante

Grupos principais de brocas helicoidais

<i>Tipo</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Representação</i>
N	Materiais de peça normais Ex. aços δ entre 18 e 30°	
H	Materiais de peça duros Ex. Aços liga, ferro-fundido δ entre 18 e 30°	
W	Materiais de peça duros Ex. Alumínio, bronze δ entre 18 e 30°	

Distribuição entre rotação e avanço

Rotação	Avanço
Peça	Ferramenta
Ferramenta	Peça
Peça e Ferramenta	

Afiações especiais de brocas helicoidais

Objetivo: Reduzir ou eliminar a ação do gume transversal, de forma a reduzir os esforços de usinagem e/ou melhorar a qualidade de forma e precisão de posicionamento do furo.

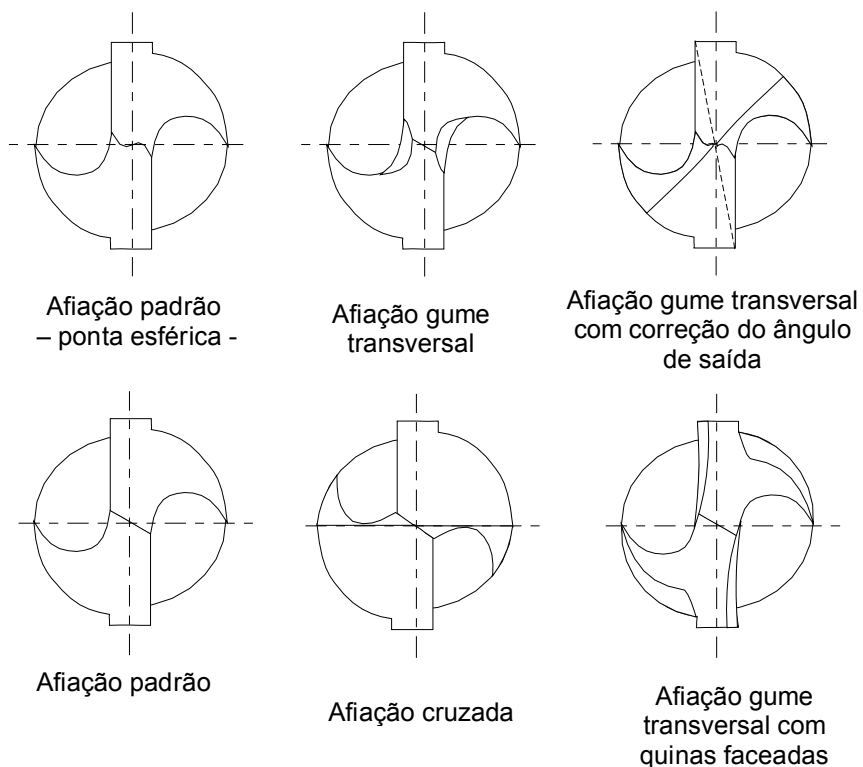


Figura 124 – Formas de afiação especiais em brocas helicoidais

- A: duplo tronco de cone com redução do gume transversal melhora a capacidade de centragem da broca, reduz a força de avanço (redução do gume transversal)
- B: duplo tronco de cone com redução do gume transversal e ângulo de saída corrigido - possibilidade de adaptar o ângulo de saída para aplicações específicas
- C: duplo tronco de cone com afiação em cruz sobre o gume transversal eliminando completamente o gume transversal - interessante particularmente para furações profundas
- D: duplo tronco de cone com redução de cone transversale quina chanfrada - usinagem de ferro fundido cinzento
- E: ângulo de ponta de 180° com ponta de centragem - furação centrada, furos circulares sem rebarbas, furação de chapas.
- F: Afiação com quatro faces: apesar não ser normalizada, é muito utilizada para brocas com diâmetro inferior a 1,5 mm ou em brocas de metal duro, uma vez que aqui a afiação com duplo tronco de cone é bastante difícil

Materiais para brocas

Requisitos para materiais de brocas

- Tenacidade
- Resistência a compressão
- Resistência a abrasão
- Resistência térmica
- Resistência ao choque e a fadiga

→ Aço ferramenta

- Muito pouco empregado em aplicações industriais
- Brocas para *hobby*
- Brocas de baixo custo para aplicações simples
- Brocas para materiais de fácil usinagem, tais como alumínio, plásticos e madeira

→ Aço-rápido

- Largamente empregado na fabricação de brocas (fácil reprocessamento e bons requisitos técnicos)
- As ferramentas são temperadas, sofrem tratamento superficial (nitretação) e freqüentemente são revestidas
- Ferramentas não integrais

Metal duro

- Homogeneidade, elevadas dureza, resistência à compressão e ao desgaste à quente
- As velocidades de corte podem ser até 3 vezes maiores que as utilizadas com ferramentas de aço rápido
- Qualidade do furo - 3 classes IT melhores que os obtidos na usinagem com aço rápido
- Aplicação de ferramentas de metal duro exige máquinas com características de velocidade, potência, refrigeração e rigidez adequadas
- Brocas podem ser maciças (maior aceitação) ou com insertos intercambiáveis – com ou sem revestimento

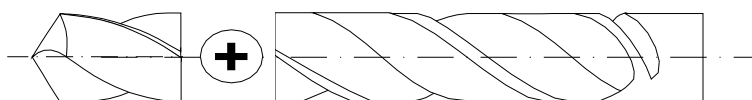


Figura 125 – Divisão da broca em material de ferramenta e corpo



Figura 126 – Broca integral

Desgaste em Broca Helicoidais

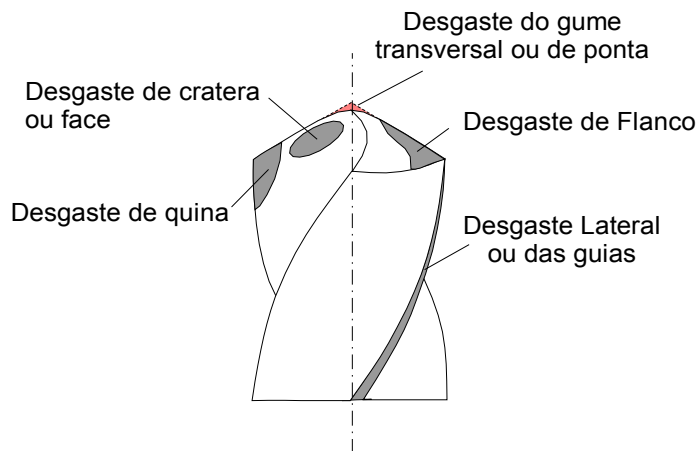


Figura 126 – Desgaste em brocas helicoidais

- Desgaste de flanco (V_b) - baixa qualidade, imprecisões e aumento do atrito
- Desgaste nas guias - não gera aumento no momento
- Desgaste do gume transversal - arredondamento e possível lascamento das zonas de transição
- Desgaste de cratera - remoção de material por abrasão e difusão
- Gume postiço - adesão do material da peça encruado na ferramenta
- Fratura - fim catastrófico.

Forças em brocas helicoidais

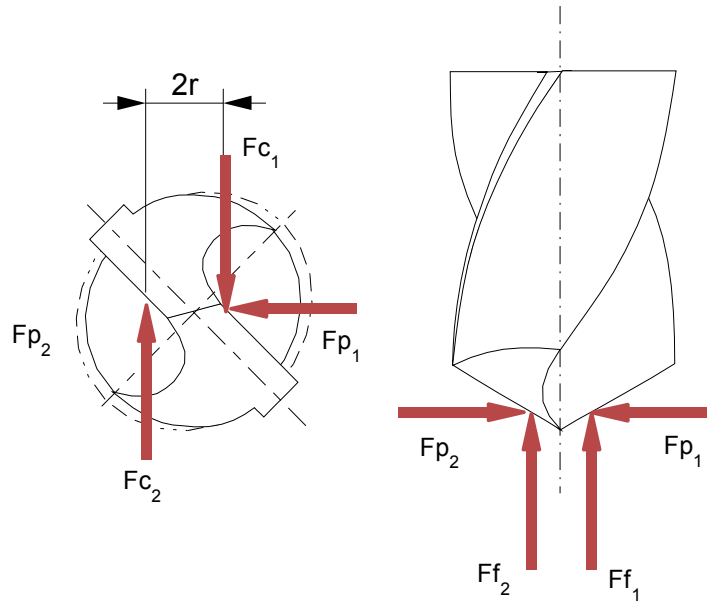


Figura 127 – forças no processo de usinagem

- As forças podem também ser determinadas através de equações empíricas
- Essas dependem basicamente do diâmetro da broca, do avanço e do material da peça.
- Também contribuem as características do tipo de broca ou condições externas que exercem influência secundária sob a determinação destas constantes, como o ângulo de ponta, o ângulo de hélice, a qualidade da afiação da ferramenta e o fluido de corte empregado
- **Força de corte (F_c)** - essa corresponde à parcela da força de corte (F_{ci}) que atua em cada um dos gumes cortantes e é decorrente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torçor que atua na furação

$$\text{Força de corte por gume} \Rightarrow F_c = K_c \frac{f d}{4}$$

onde: F_c = Força de corte [N]

k_c = Força específica de corte [N/mm²]

f = Avanço [mm]

d = Diâmetro da broca [mm]

→ **Força de avanço (F_f)** - é a resultante da soma das parcelas das reações ao avanço do gume de corte e do gume transversal. Como o gume transversal atua no sentido de extrudar material para os gumes principais, a parcela da respectiva força de avanço pode ser igual ou até mesmo maior que a força de avanço dos gumes principais de corte. É importante conhecê-la para se ter certeza que o eixo da máquina é capaz de suportar a operação

$$F_f = k_f \frac{f d \operatorname{sen} \frac{\sigma}{2}}{2}$$

onde: F_c = Força de avanço [N]

k_f = Força específica de avanço [N/mm^2]

f = Avanço [mm]

d = Diâmetro da broca [mm]

σ = Ângulo de ponta da ferramenta [graus]

→ **Força passiva (F_p)** - atua em uma parcela do gume principal. As forças passivas atuantes nos gumes tendem a se anular mutuamente. É desprezível quando comparada com as forças de corte e de avanço. Contudo, para afiações assimétricas dos gumes ou mesmo em brocas não simétricas, tais como brocas canhão, BTA e *Ejektor*, essas são importantes.

→ **Momento torçor (M_t)** - resultado das forças atuantes nos gumes principais da ferramenta são responsáveis pelo momento torçor, contribuindo entre 70 e 90% do valor do mesmo

$$M_t = K_f \frac{f d^2}{8.000}$$

Onde: M_t = Momento torçor [N.mm];

F_c = Força de corte [N];

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

f = Avanço [mm]

d = Diâmetro da broca [mm]

Potência de corte (P_c) - é resultante do produto entre o momento torçor e a velocidade angular da ferramenta

$$P_c = \frac{M_t n}{9,549}$$

onde: P_c = Potência de corte [kW]

M_t = Momento Torçor [Nm]

n = Rotação da ferramenta [rpm]

D = diâmetro da broca

r = distância do ponto de atuação

$$r = 0,38 \frac{D}{2} \quad \text{para fução de acabamento}$$

$$r = 0,51 \frac{D}{2} \quad \text{para furação com furo guia (pré-furo)}$$

$$r = \frac{(D+d)}{4} \quad \text{para furação em cheio}$$

A força de corte também pode ser estimada com base no M_t por:

$$F_c = \frac{2000 M_t}{d}$$

Furação profunda

Histórico

→ Aplicações iniciais ==> Equipamentos bélicos

→ Aplicações atuais

- Indústria de autopeças
- Aplicações nucleares
- Indústria de motores
- Setor agrícola
- Equipamentos médicos

Relações profundidade/diâmetro (L/D)

→ Relações $L/D > 20$ até 150: com frequência $L/D < 20$ já é considerado furação profunda

→ $3 < L/D < 5$: uso de brocas helicoidais convencionais com furação contínua

→ $L/D > 5$: uso de brocas helicoidais convencionais, com furação em ciclos

→ $L/D \gg 5$: processos específicos, empregando brocas de canais retos, brocas canhão, brocas de gume único, brocas BTA e *Ejektor*.

Generalidades do processo de furação profunda

→ Com brocas helicoidais especiais - interrupção freqüente do processo para retirada de cavacos

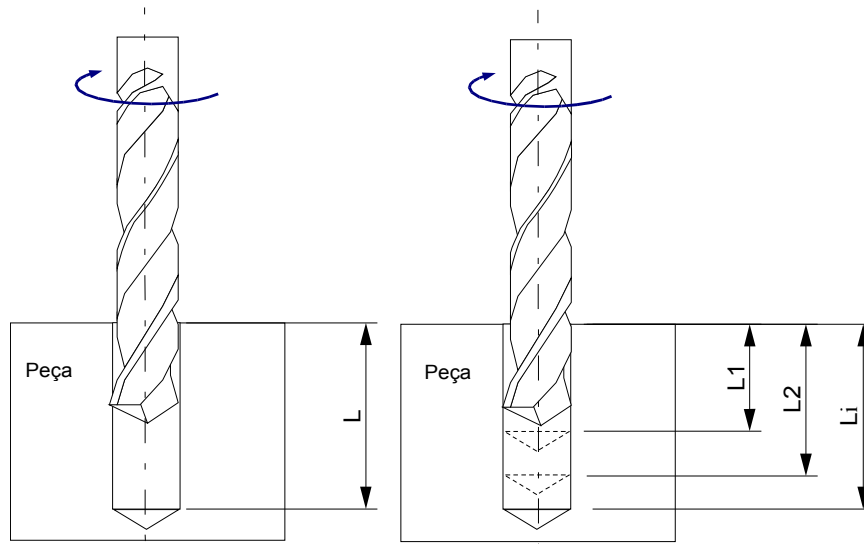


Figura 128 – Ciclo de furação

- Ferramentas especiais - assimetria na posição dos gumes
- Fluido de corte - alimentação interna - transporte de cavacos
- Cunha em metal duro - altas velocidades de corte
- A furação profunda é aplicada com vantagem nas seguintes operações:
 - Usinagem de materiais com alta porcentagem de elementos de liga
 - Usinagem de materiais com resistência à tração acima de 1200 N/mm²
 - Remoção de elevado volume de material na unidade de tempo
 - Exigências elevadas de tolerância de qualidade superficial e geométrica do furo.

Requisitos para a furação profunda

- Máquinas-ferramentas:
 - maior rigidez e estabilidade dinâmica
 - dispositivos de fixação que permitem maior rigidez na ferramenta
- Fluido:
 - alta pressão para extração de cavaco e refrigeração do gume
- Brocas:
 - brocas específicas para grandes relações L/D.

Processos de furação profunda

- Furação com brocas helicoidais
- Furação com brocas de canal reto
- Furação com broca canhão ou de gume único
- Furação pelo processo BTA
- Furação pelo processo Ejektor.

Ferramentas utilizadas na furação profunda

- Broca helicoidal
- Broca de canal reto
- Broca canhão ou de gume único
- Broca BTA
- Broca Ejektor

Brocas para furação profunda

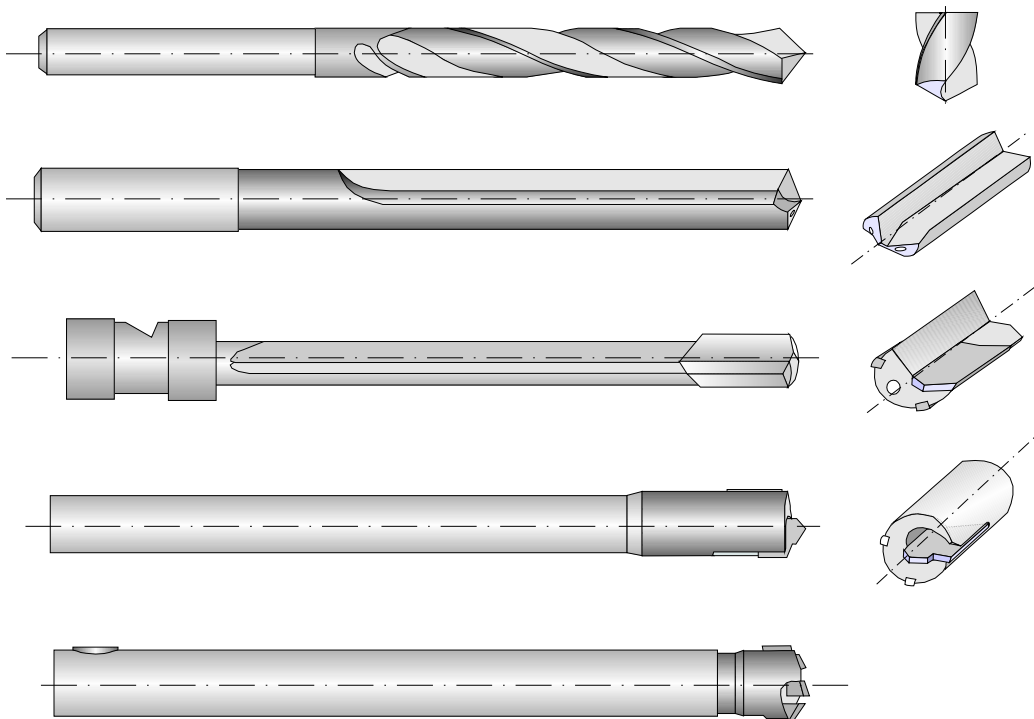


Figura 129 – brocas para furação profunda

Fatores limitantes nos processos de furação profunda

- Usinabilidade do material da peça
- Estabilidade da ferramenta e da máquina
- Precisão da máquina-ferramenta
- Composição do fluido de corte
- Material da ferramenta

Broca de canais retos

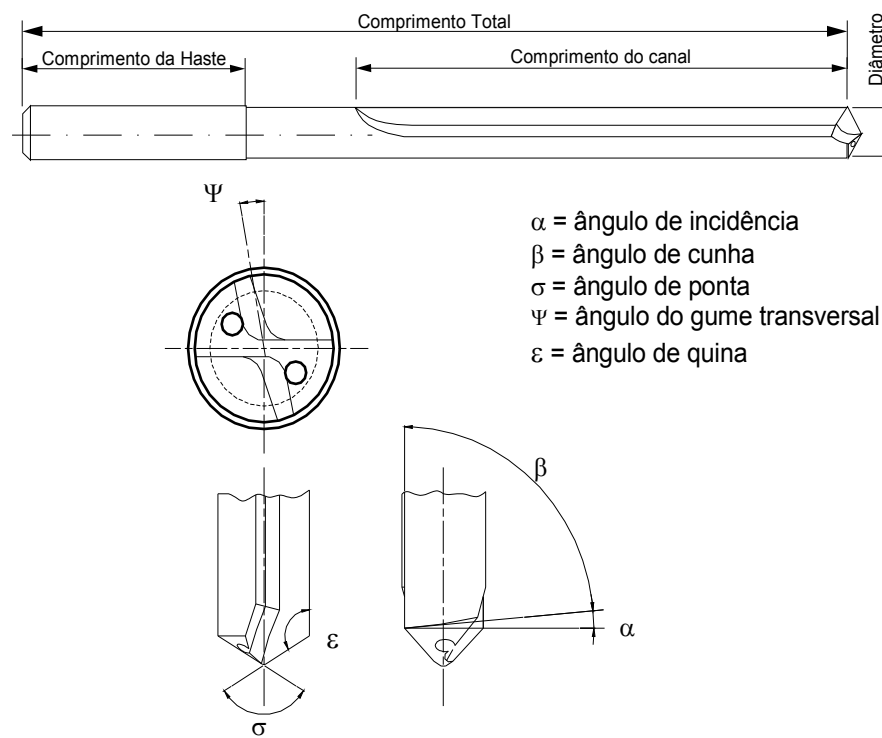


Figura 130 – Geometria da brocas de canais retos

Características

- Alta resistência a torção
- Furos com relação $L/D > 7$
- Furação profunda de AISi, GG e GGG

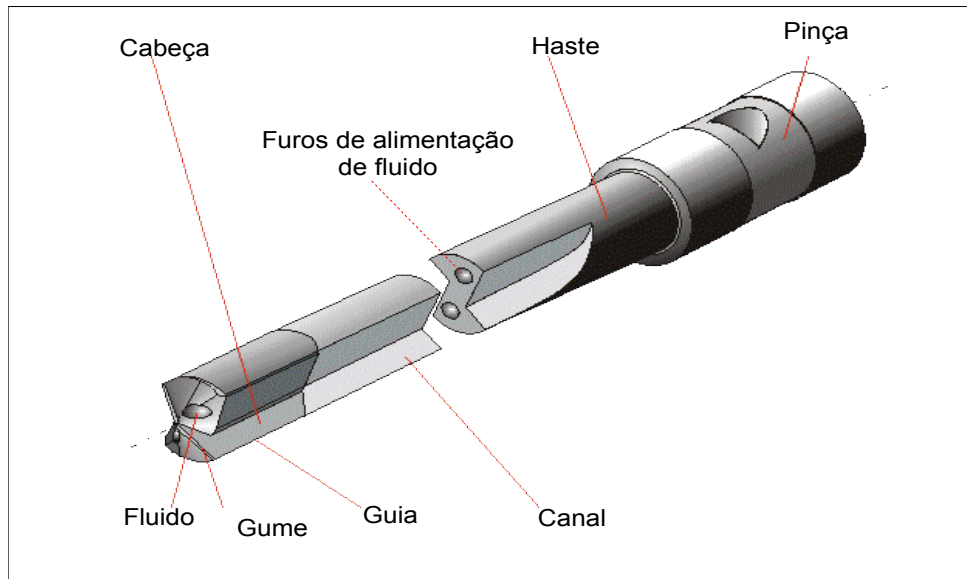


Figura 131 – Constituintes das brocas de canais retos

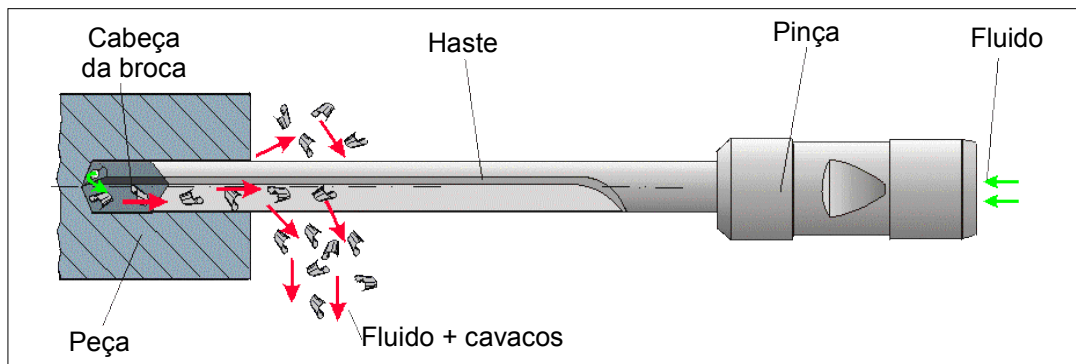


Figura 132 – Princípio de funcionamento da furação com brocas de canais retos

Broca canhão (gume único)

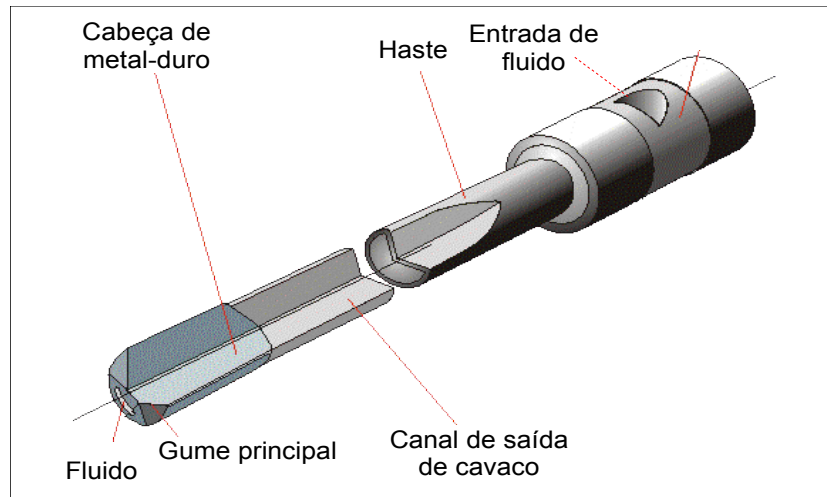


Figura 135 – Constituintes das brocas canhão

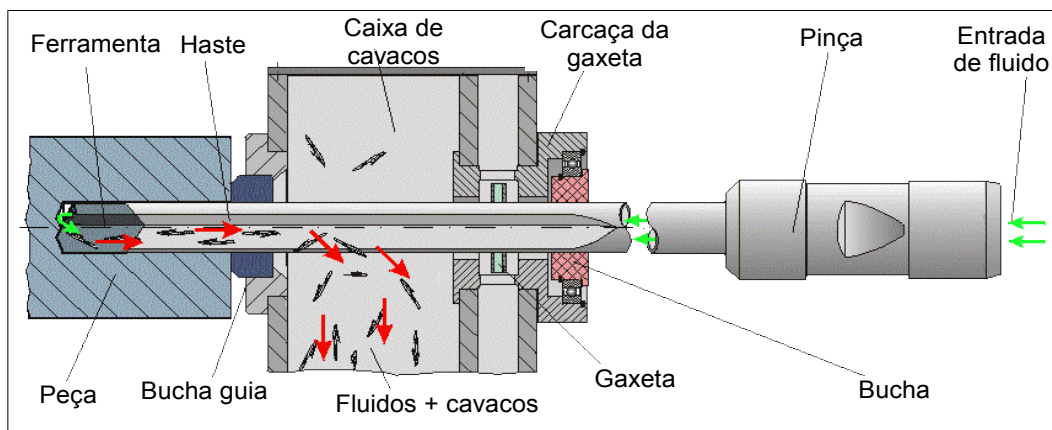


Figura 136 – Princípio de funcionamento das brocas canhão

Características

- Auto-guiada
- Alimentação de fluido a alta pressão pela haste
- Transporte de cavaco pela ranhura V
- Necessidade de bucha guia

Aplicações da broca canhão

- Furação em cheio
- Furação escalonada
- Trepanação
- Alargamento
- Furação profunda de materiais com dureza até 50 HRC

Broca BTA

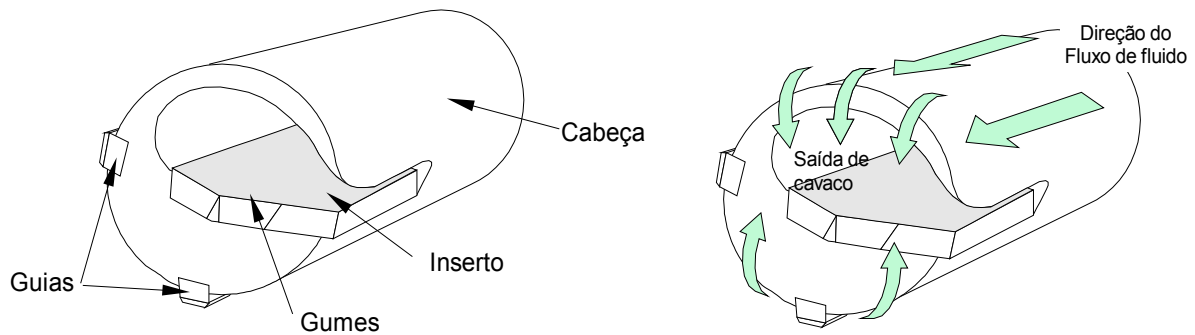


Figura 137 – Constituintes das brocas BTA

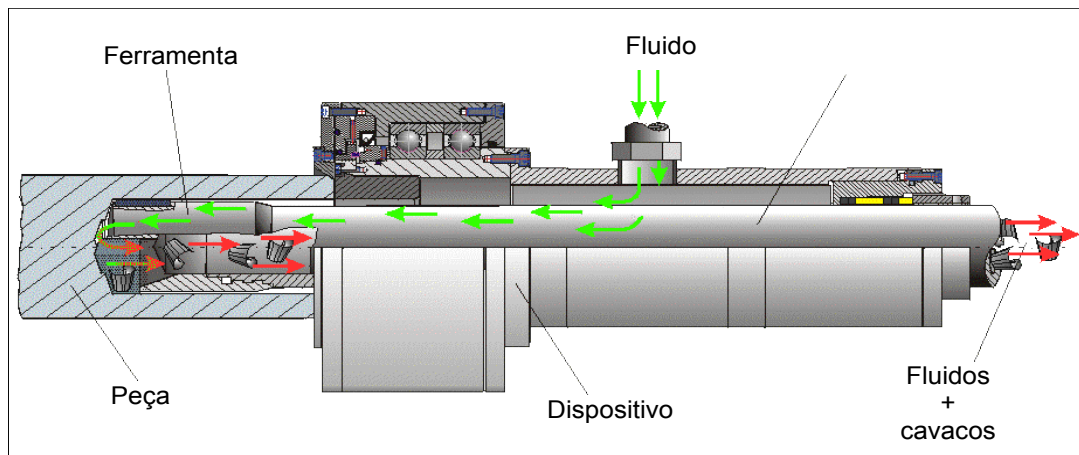


Figura 138 – Princípio de funcionamento do processo BTA

Características

- Alternativa para brocas convencionais, melhorando qualidade superficial e reduzindo esforços
- Requer dispositivo complexo para alimentação do fluido
- Princípio de funcionamento da broca BTA
- Inversão das características da broca de gume único:
 - Fluido de corte alimentado pela área anelar
 - Fluido e cavaco retornam pelo orifício na broca

Broca ejektor

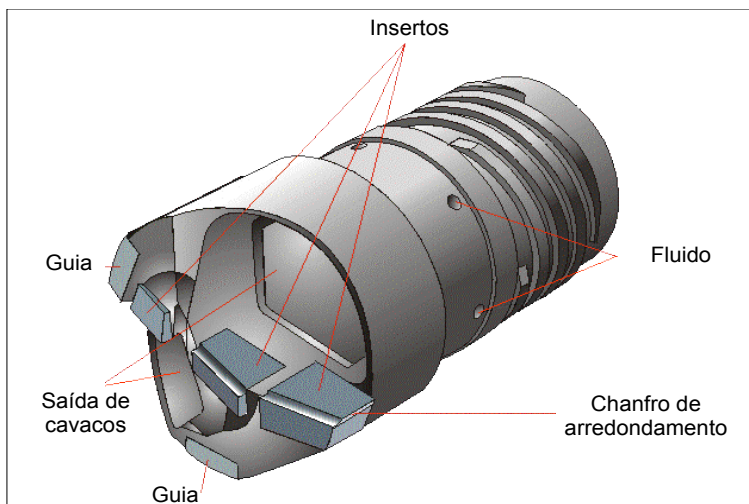


Figura 139 – Constituintes das brocas ejektor

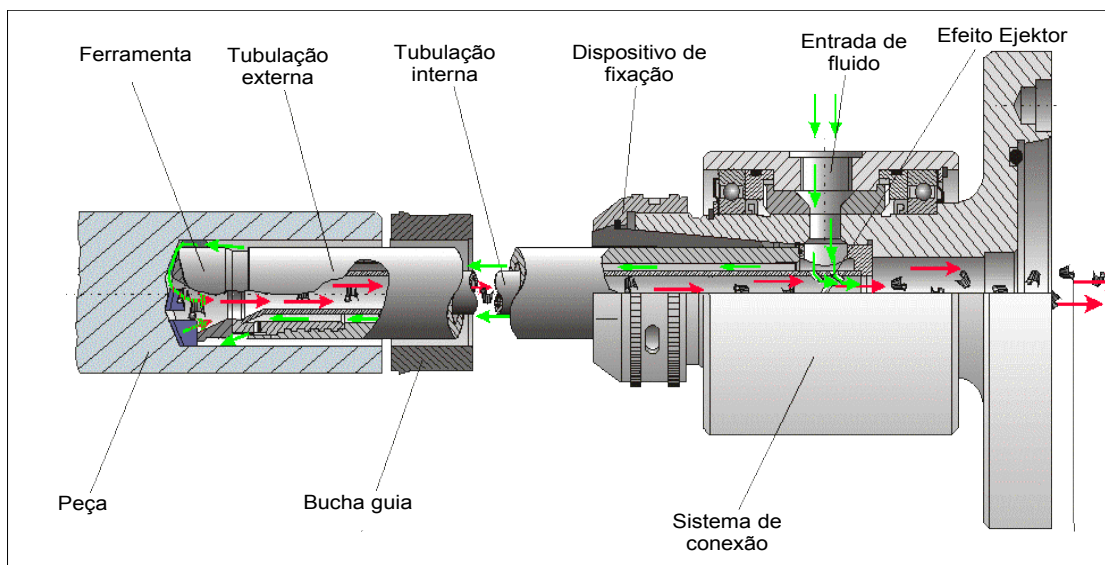


Figura 140 – Princípio de funcionamento da broca Ejektor

Características

- Furação profunda em máquinas-ferramentas simples
- Alimentação de fluido por haste tubular duplo concêntrica
- Peculiaridades do processo ejektor
- Tuberias especiais: depressão para expulsão de fluido e sucção de cavaco
- Divisão do gume: redução do atrito, dos esforços laterais, do calor desenvolvido e do desgaste das guias.

Critério de fim de vida na furação

Definição

→ perda do controle sobre os cavacos ou iminência de uma quebra rápida.

Fatores considerados

- Textura superficial
- Exatidão dimensional e geométrica
- Estado da ferramenta
- Formação do cavaco
- Vida restante da ferramenta.

Critérios de fim de vida utilizados na prática

- Tempo de máquina
- Tempo efetivo de corte
- Volume de metal removido
- Número de peças usinadas
- Velocidade de corte equivalente
- Comprimento usinado equivalente
- Velocidade de corte relativa.

Fatores que influenciam a qualidade e precisão do furo

- Erros geométricos
- Erros dimensionais
- Posicionamento
- Circularidade
- Forma
- Presença de rebarbas
- Precisão:
- Processo
- Peça
- Ferramenta
- Máquina
- Parâmetros
- Rigidez

- Máquinas onde são utilizadas buchas - precisão da broca em relação ao diâmetro e circularidade, não é tão crítica
- Máquinas de comando numérico / máquinas de precisão - a precisão da broca é crítica.
- Brocas padrão podem necessitar de uma nova retificação para operações de precisão
- Retificação inadequada, desbalanceamento das forças, deflexão na broca, erros nos furos

Precisão média de furos produzidos com brocas helicoidais

Erros comuns na geometria do furo

<i>Diâmetro do furo</i>		3 - 6		6 - 19		19 - 38	
<i>condição</i>	<i>Erro [mm]</i>	tamanho	posição	tamanho	posição	tamanho	posição
Sem furo de centro e sem bucha		0,08	0,18	0,15	0,20	0,20	0,23
Com furo de centro e sem bucha		0,08	0,10	0,08	0,10	0,10	0,13
Com bucha		0,05	0,05	0,08	0,05	0,10	0,08

Erros comuns na geometria do furo

- Erros de forma: diâmetro não uniforme
- Rebarba: rebarba na entrada ou saída do furo
- Erros de posicionamento: deslocamento do centro do furo
- Erros de circularidade: seção circular distorcida
- Erros de dimensão: diâmetro resultante diferente da broca.

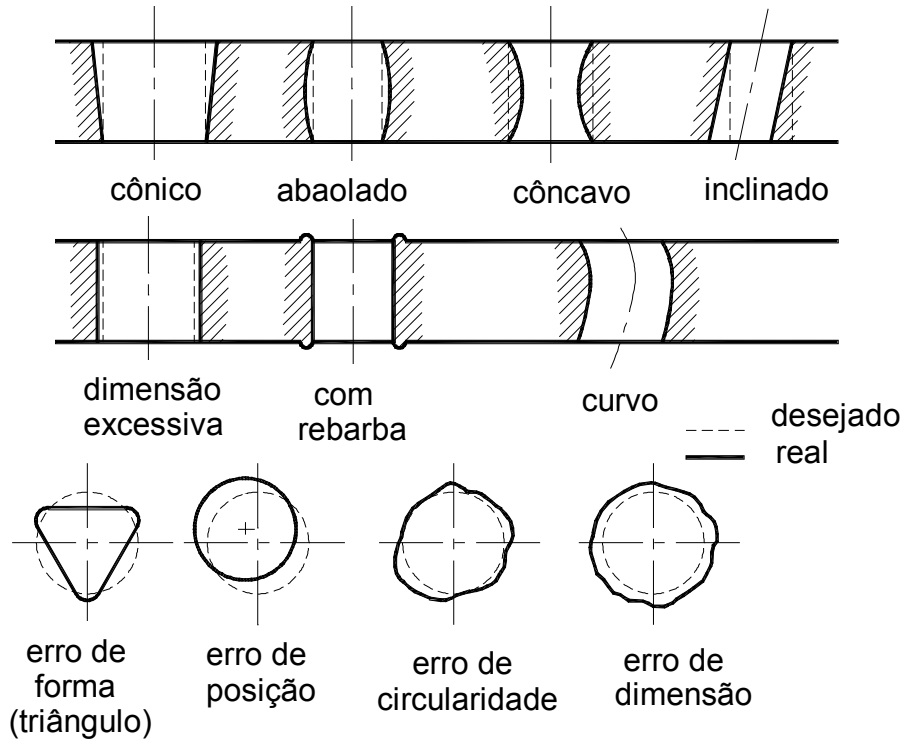


Figura 141 – Erros mais comuns resultantes do processo de furação

Variações no processo de furação

Rebaixamento

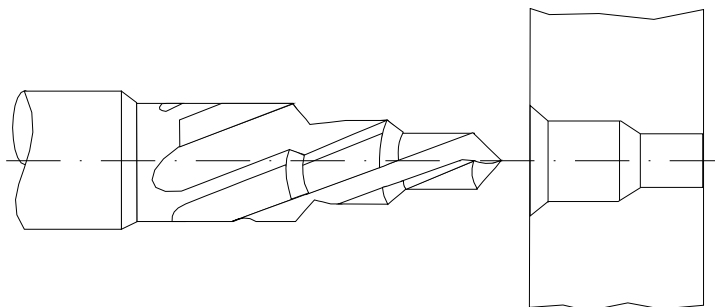


Figura 142 – Furação em rebaixamento escalonado

- A usinagem não é feita em material maciço
- Rebaixamento de alargamento de um furo cilíndrico
- Rebaixamento plano, de uma superfície cônica ou de uma superfície perfilada
- Rebaixamento combinado de uma superfície cilíndrica e uma superfície de topo

Ferramentas de rebaixamento

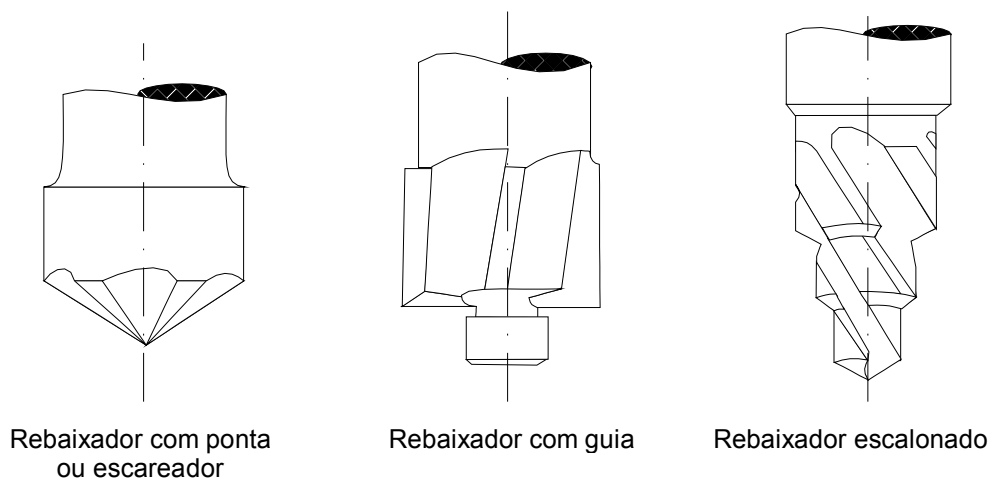


Figura 143 – Ferramenta para processos de rebaixamento

- Automação - uso de ferramentas com função específica
- Rebarbação e produção de chanfros - rebaixadores com ângulos de ponta
- Rebaixamento lateral e de topo - rebaixadores com guias
- Rebaixamento de alargamento - rebaixador de três gumes helicoidal

Máquinas-ferramentas para furação

- Furadeiras -

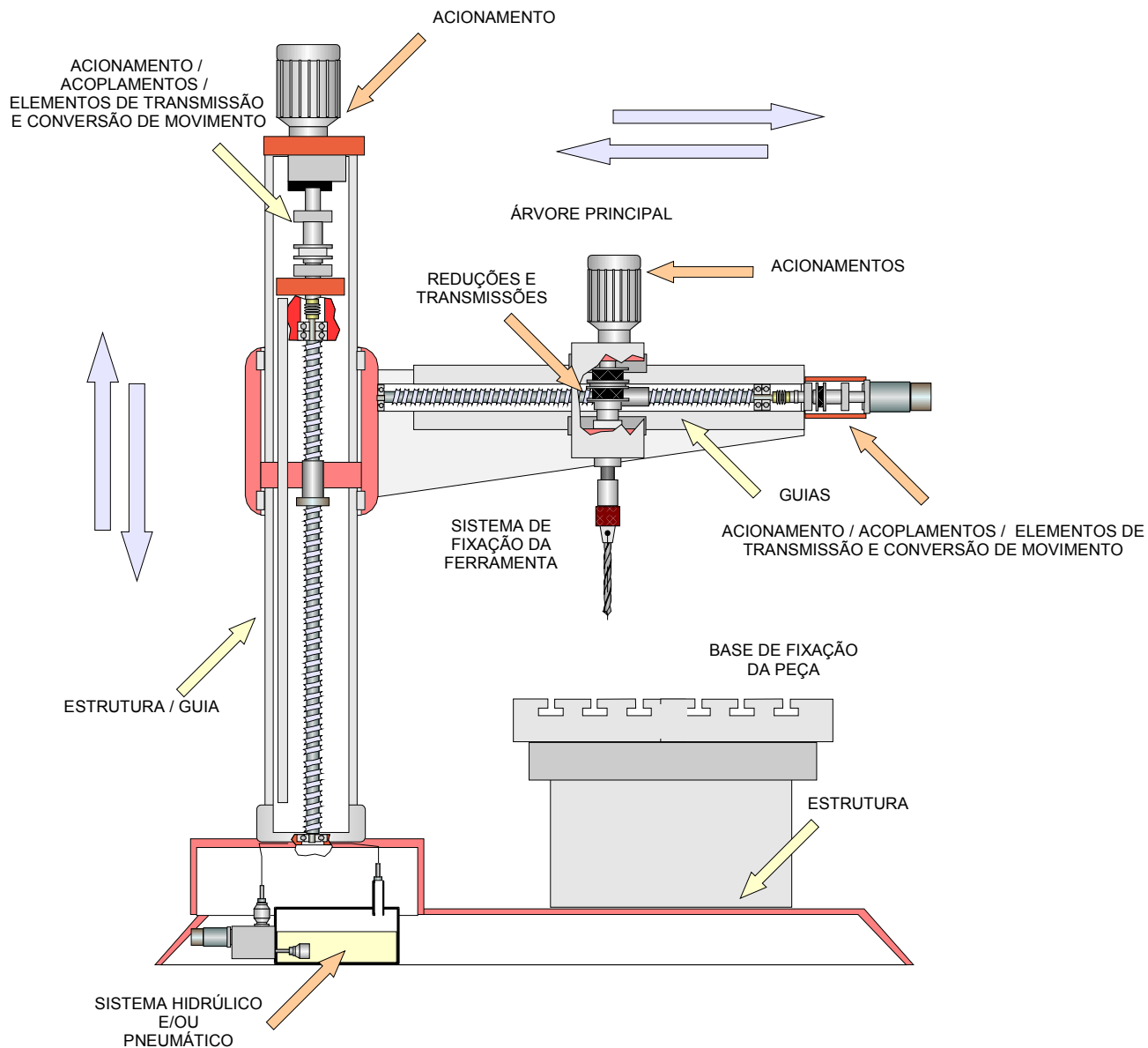
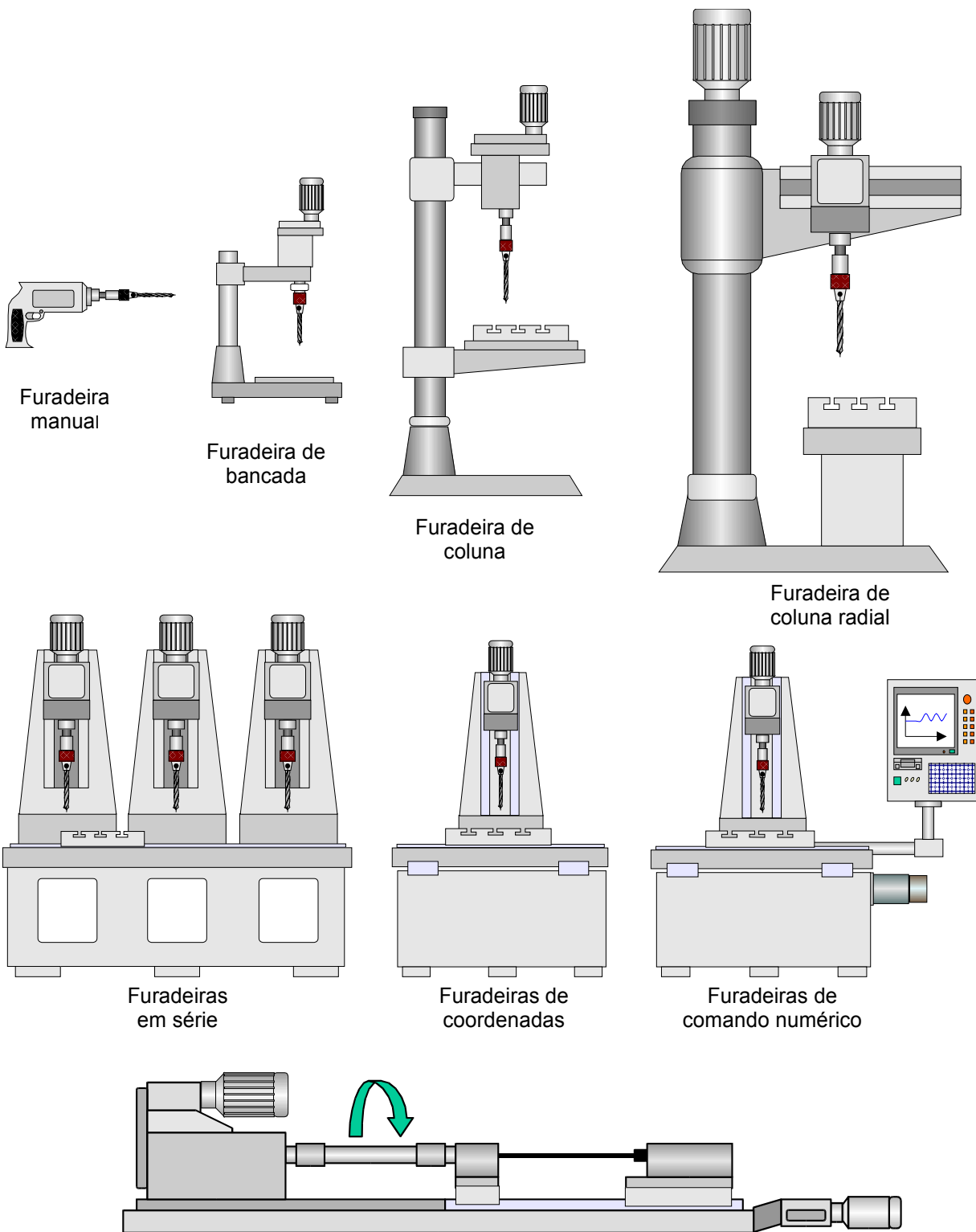


Figura 144 – Constituintes de uma furadeira

Tipos de Furadeira



Furadeiras para furação profunda
Figura 145 – Principais tipos de furadeira

Fixação de ferramentas na furação

→ Brocas com haste cônica

- Diretamente no eixo da máquina (D haste = D eixo, cone morse são iguais)
- Luvas ou soquetes adaptadores (D haste \neq D eixo, cones morses diferentes)
- Retirada da ferramenta - introdução de barras em ranhuras especiais (efeito de alavanca)

→ Brocas com haste cilíndricas

- Mandril
 - Os de três castanhas são os mais utilizados
 - Aperto manual ou com chave

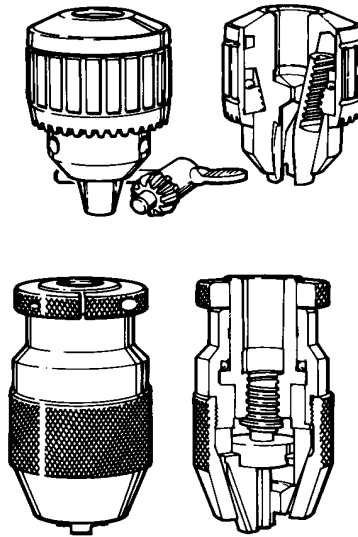


Figura 146 – Exemplos de mandril para fixação de brocas

→ Pinças

- Podem fixar a ferramenta na haste ou na parte cortante
- Adaptabilidade do comprimento da ferramenta à cada operação
- Possibilidade do uso de ferramentas quebradas

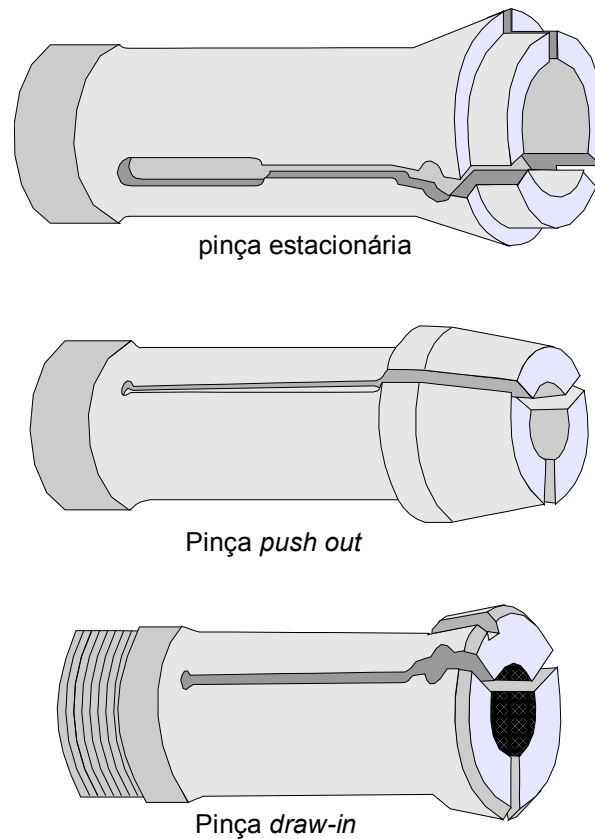


Figura 147 – Exemplo de pinças para fixação de brocas

Brocas com variações na haste retas

➤ Tipos de variações

- ferramentas com haste aplainada (chanfrada),
- em meia-cana,
- quadrada,
- roscas,
- entalhes

➔ Luvas e buchas

➔ Chanfros ou planos na haste da ferramenta e ranhuras nas luvas para guiar a ferramenta

➔ Uma luva diferente é necessária para cada tamanho de ferramenta

➔ Luvas retas são empregadas para fixar ferramentas de grandes diâmetros em tornos revólver

Alargamento

Definição: Processo de usinagem em geral utilizado para produzir furos com alta definição geométrica, dimensional e qualidade superficial.

Generalidades

- Alargamento com ferramentas de múltiplos gumes e com ferramentas de gume único
- Para evitar o aparecimento de vibrações se trabalha com divisão não regular dos gumes (número ímpar de dentes)
- Qualidades obtidas em alargamento - IT 7 ou melhores

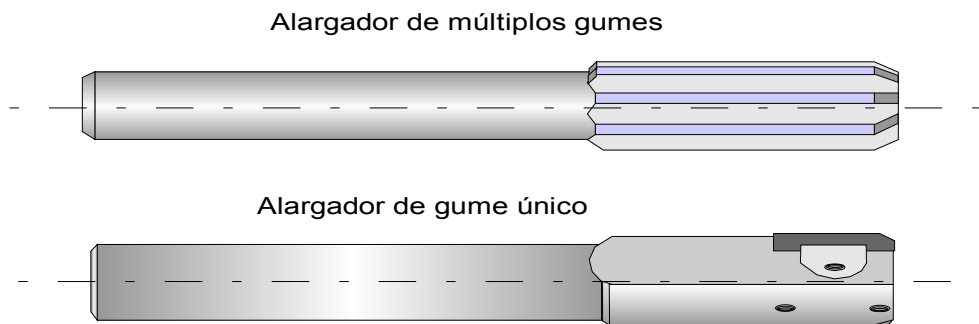


Figura 148 – Tipos de alargadores

Classificação dos alargadores

Quanto ao tipo de operação

- De desbaste
 - Usados para aumentar diâmetros de furos em bruto
- De acabamento
 - Usados para a obtenção de furos calibrados, com exigências quanto ao acabamento e precisão

Quanto ao tipo de dentes

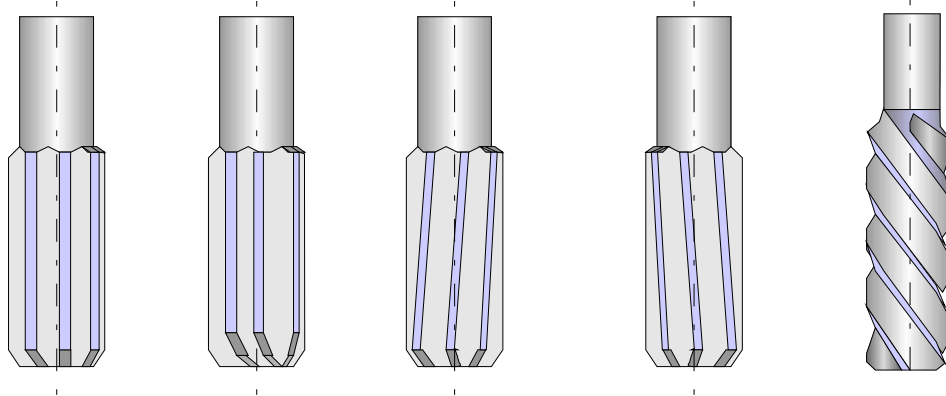
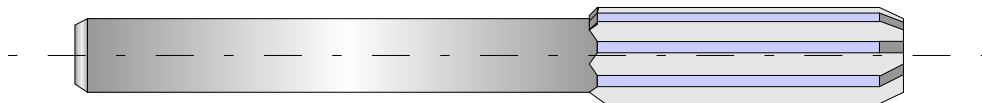


Figura 149 – Classificação quanto ao tipo de dentes

Quanto à fixação

Haste cilíndrica



Haste cônica

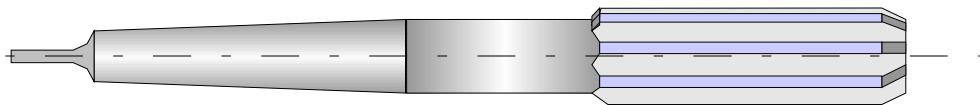
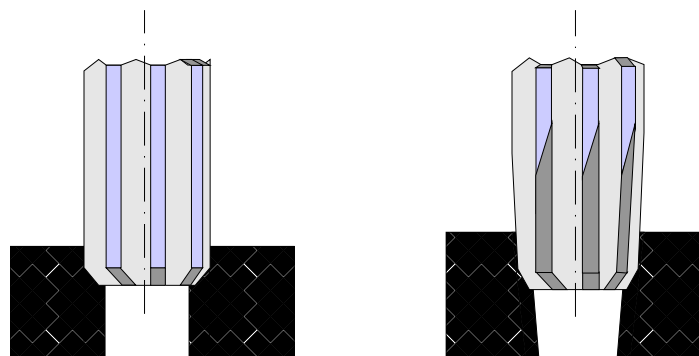


Figura 150 – Classificação quanto ao tipo de haste

Quanto ao uso

→ Alargadores manuais ==> os manuais tem chanfro na entrada maior e de menor inclinação

→ Alargadores máquina



Alargador máquina

Alargador manual

Figura 151 – Classificação quanto ao uso

Quanto ao sentido de corte

- Corte à direita (à direita são mais usualmente empregados)
- Corte à esquerda

Quanto à regulagem

- Alargadores fixos
- Alargadores ajustáveis, ou expansíveis ==> nos ajustáveis, o diâmetro pode ser variado mediante regulagem
- Alargadores de gume único regulável

Quanto à geometria do furo

- Alargadores cônicos
- Alargadores paralelos

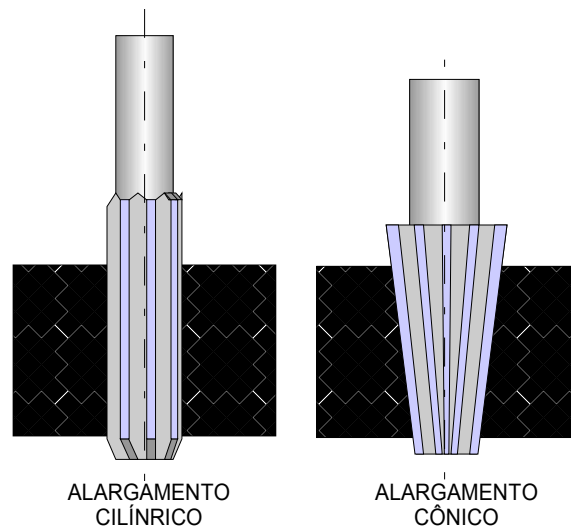


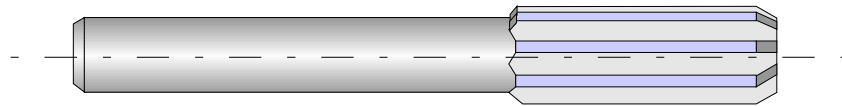
Figura 152 – Classificação quanto a geometria do furo

Quanto ao número de dentes

→ cortes múltiplos

→ gume único

Alargador de múltiplos gumes



Alargador de gume único

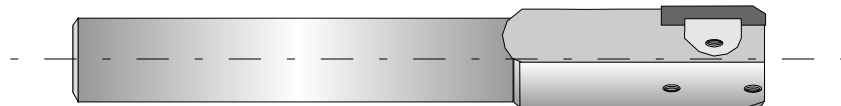


Figura 153 – Classificação quanto ao número de dentes

Quanto à forma de entrada

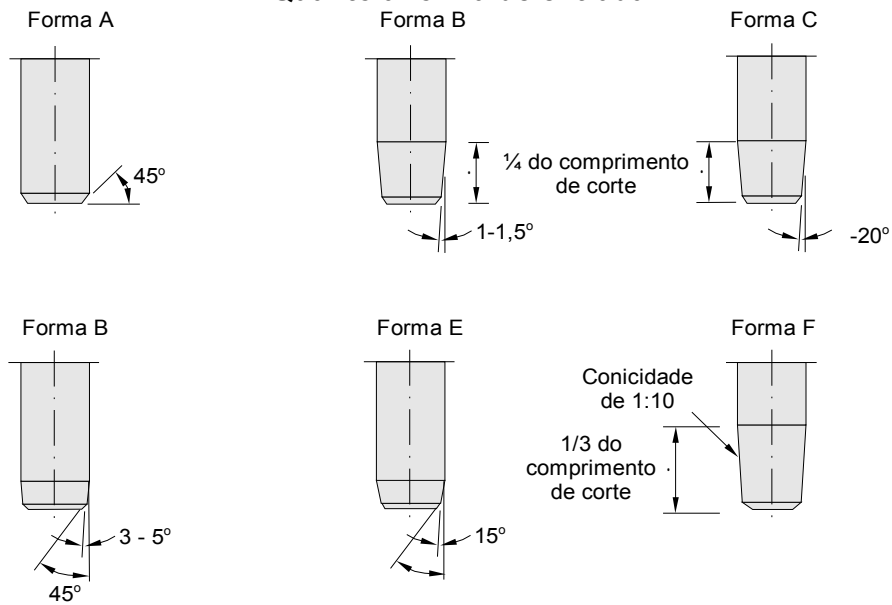


Figura 154 – Classificação quanto à forma de entrada

Geometria dos alargadores

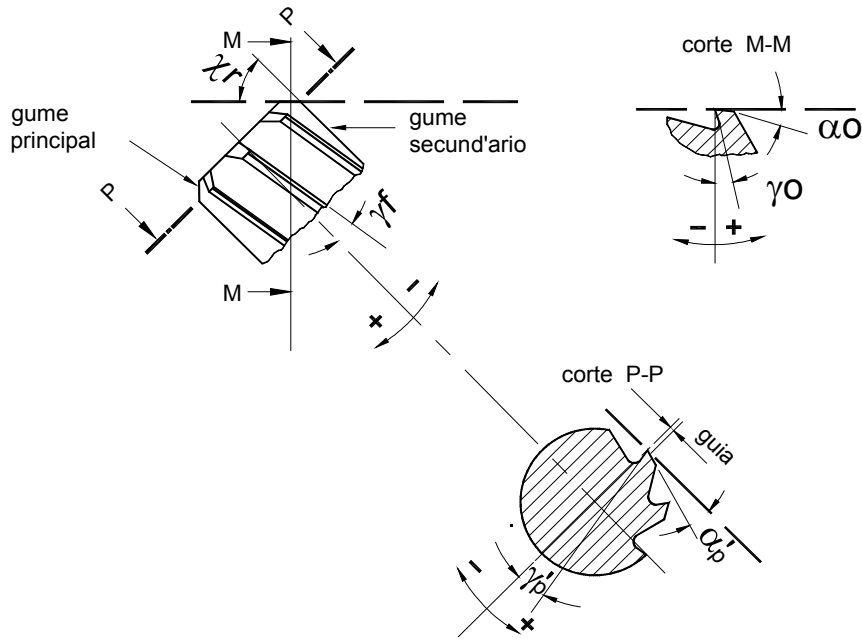


Figura 155 – Geometria dos alargadores

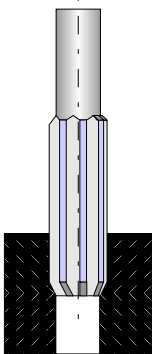
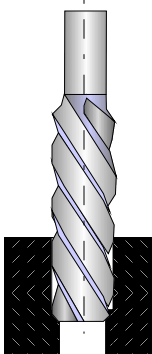
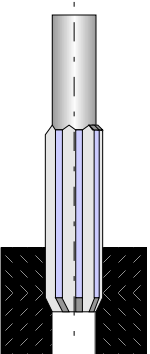
onde: γ_0 - Ângulo de saída ortogonal χ_r - Ângulo de direção do gume
 γ'_p - Ângulo de saída passivo do gume secund'ario γ_f - Ângulo de saída lateral (â hélice)
 α_0 - Ângulo de incidência ortogonal α'_p - Ângulo de incidência passivo do gume secund'ario

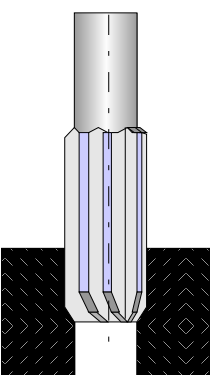
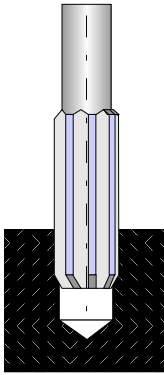
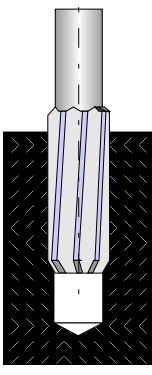
Escolha do tipo de alargador

Fatores de influência

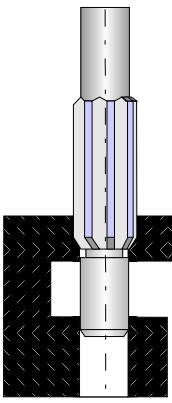
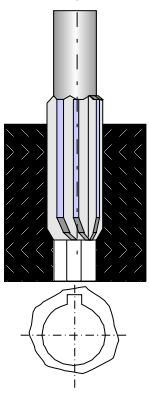
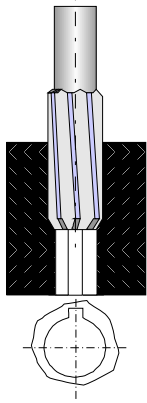
- Aplicação manual ou mecânica;
- Características do furo como profundidade, furo passante ou cego, interrompido, estado do pré-furo, espessura da parede da peça, dimensões e grau de acabamento ou precisão,
- Resistência e usinabilidade do material
- Quantidade de sobre-metal a ser removido

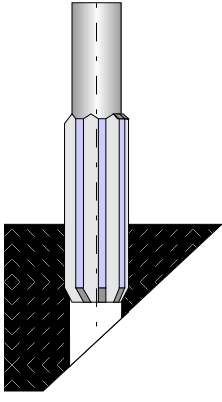
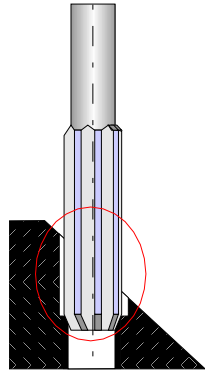
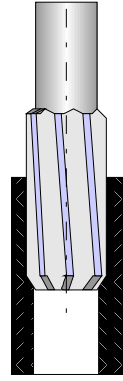
Recomendações para aplicação

Operação		
Furos passantes (l/D ≤ 1)	Furos passantes (l/D > 1)	Furos passantes (l/D > 1) - materiais de cavaco curto
 <p>Alargador de máquina / Forma de entrada A</p>	 <p>Canais helicoidais à esquerda / Forma de entrada C</p>	 <p>Canais retos / Forma de entrada A ou D</p>

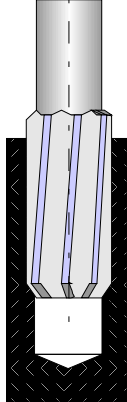
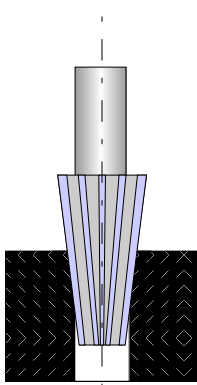
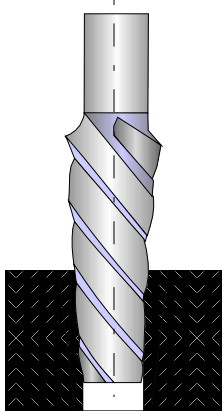
Operação		
Furos passantes - materiais de difícil usinagem	Furos cegos (l/D ≤ 3)	Furos cegos e profundos
 <p>Canais retos / Entrada helicoidal à esquerda</p>	 <p>Canais retos Forma de entrada A</p>	 <p>Canais helicoidais à direita/ Forma A</p>

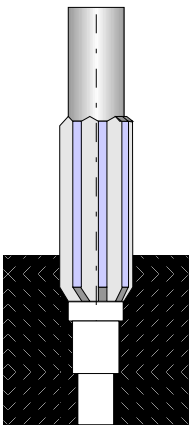
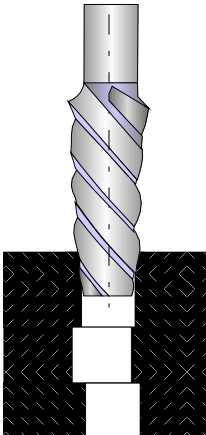
Recomendações para aplicação – cont.

Operação		
Furos consecutivos alinhados	Furos interrompidos no sentido longitudinal	Furos interrompidos no sentido long. (cav. curtos e longos)
 <p>Canais helicoidais à direita Forma de entrada A</p>	 <p>Canais helicoidais à esquerda Forma C</p>	 <p>Canais helicoidais à esquerda Forma A</p>

Operação		
Furos com saída inclinada	Furos com entrada inclinada	Furos passantes em peças de paredes finas
 <p>Forma de entrada A</p>	 <p>Evitar superfícies de entrada inclinadas - preparar</p>	 <p>Canais retos / Entrada helicoidal à esquerda</p>

Recomendações para aplicação – cont.

Operação		
Furos cegos em peças de paredes finas	Furos cônicos com alargador cônico de canais retos	Furos cônicos com alargador cônico de canais helicoidais
 <p>Canais helicoidais à direita / Forma A</p>		

Operação		
Furos para cone morse	Alargamento em montagens	
		

Alargamento com ferramentas de gume único regulável

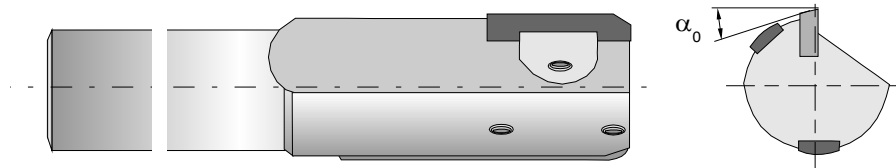


Figura 156 – Alargadores de gume único regulável

Generalidades

- Geometria de corte otimizada
- Melhoram a qualidade dos furos
- Redução substancial nos tempos de fabricação (altas v_c 's vidas longas das ferramentas, eliminação operações posteriores)
- O processo pode ser executado em centros de usinagem (não necessita de máquinas especiais)
- O corte é realizado por um inserto intercambiável onde o gume é concebido para uma usinagem ótima e possui um ângulo de incidência (α_0) positivo
- As réguas-guias conduzem rigidamente a ferramenta e absorvem as componentes da força de usinagem
- Os alargadores de gume único permitem v_c 's maiores que as utilizadas nos processos convencionais
- Não utilizam nenhum dispositivo para entrar no furo e, o que não possibilitam a correção de erros de posição anteriores

Princípio de funcionamento

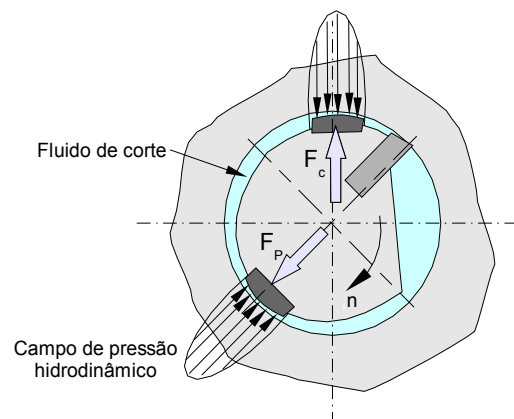


Figura 157 – Princípio de funcionamento dos alargadores de gume único

Dados de corte para alargadores de gume único

Peça	Aço < 750 N/mm ²	Aço < 750 N/mm ²	Aço inoxidável	Liga de alumínio AlSi5
Avanço f [mm]	0,1 a 0,4	0,1 a 0,4	0,1 a 0,3	0,1 a 0,3
Velocidade de corte v _c [m/min]	12 a 90	12 a 70	5 a 30	12 a 50

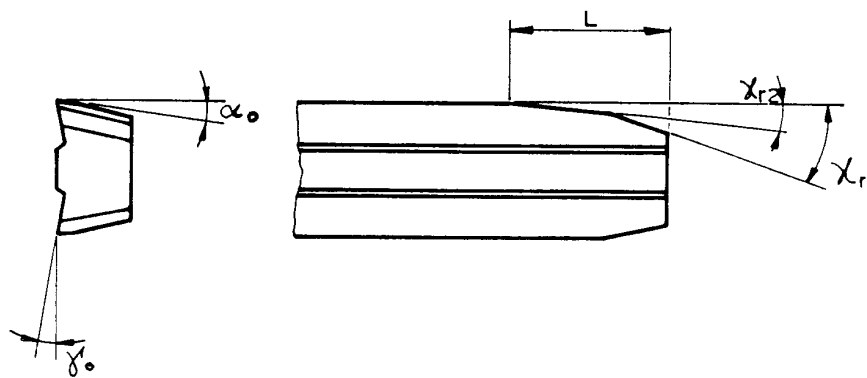
Geometria de corte

Figura 158 – Geometria de alargadores de gume único

onde:

- γ_0 - ângulo de saída
- χ_{r1}, χ_{r2} - ângulos de direção
- α_0 - ângulo de incidência
- L - comprimento do chanfro de entrada

Os insertos intercambiáveis possuem dois gumes principais

- Gume principal formado pelo ângulo de direção χ_{r1} □ remoção do excesso de material das paredes do furo
- Gume principal formado pelo ângulo de direção χ_{r2} ⇒ corte de acabamento - melhora da qualidade do furo
- Ângulos de direção pequenos - boa qualidade superficial

Tipos de chanfros

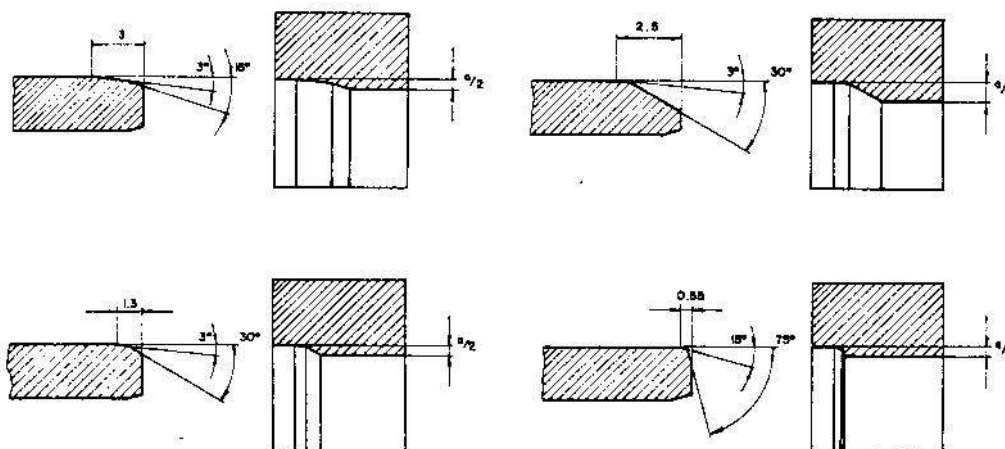


Figura 159 – Tipos de chanfro de alargadores de gume único

Características da ferramentas

- Possuem poucos elementos mecânicos - elevada rigidez
- Os insertos intercambiáveis são fixados com elementos comuns, como garras de fixação, encaixes, parafusos
- A precisão obtida com essas ferramentas é devida ao ajuste da posição do gume feito por parafusos
- O campo de ajuste de diâmetro é de cerca de 0,04 mm
- As réguas-guias são retificadas de acordo com a geometria do inserto

Parâmetros para operações de alargamento Velocidade de corte

- v_c alargamento ~ 65 a 75 % da v_c usada para furação
- Depende do tipo de alargador empregado, quantidade de material a remover e acabamento desejado
- Baixas velocidades diminuem a produtividade e sem aumento significativo na vida da ferramenta
- Velocidades muito altas - quebra dos gumes, desgaste e rugosidade altos
- v_c 's consideravelmente maiores em alargamento de gume único
- O uso de alimentação interna de fluido permite maiores v_c 's

Avanço

- Depende do tipo de alargador empregado, quantidade de material a remover e acabamento desejado
- Quanto maior a sobremedida de usinagem menor deve ser o avanço
- Avanços na faixa de duas a três vezes maiores que os utilizados em furação para um mesmo material
- Pequenos avanços \Rightarrow desgaste excessivo da ferramenta, bom acabamento
- Avanços muito pequenos - corte prejudicado - desgaste
- Alargamento de gume único - 0,1 a 0,5 mm/rot
- Aplicação interna de fluido - menores avanços (maior v_c)

Fluido de corte

- A seleção do fluido é feita principalmente em função do acabamento desejado e não das propriedades refrigerantes
- A aplicação em forma de névoa é geralmente preferida
- Para a formação da névoa é utilizado ar comprimido a pressões de 0,7 a 5,5 bar
- No alargamento de gume único a utilização de fluidos de corte é fundamental para a lubrificação das réguas-guias
- Usinagem de alumínio - emulsões de óleo em água (3 a 5%) querosene e óleo
- Usinagem de aço - emulsões de óleo em água (10% ou mais)
- Usinagem de FoFo - Emulsões sintéticas

Rosqueamento

Definição: processo de usinagem cujo a função é produzir rocas internas e externas

- É um dos processos mais complexos de usinagem

Problemas da fabricação de roscas

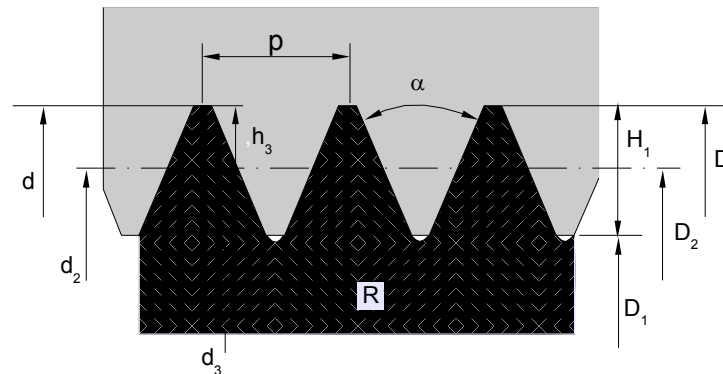


Figura 160 – Variáveis de projeto de roscas

- Existem diversas classes de ajuste e precisão
- Pelo menos cinco medidas que devem ajustar entre si:
 - diâmetros maior,
 - menor e efetivo,
 - passo ou ângulo de avanço,
 - e ângulo de rosca
- **Existem vários de roscas**
 - Rosca métrica – normal (DIN 13-1), fina (DIN 13-2...10)
 - Rosca métrica cônica (DIN 158-1)
 - Rosca Whitworth (não recomendada)
 - Rosca GAS (DIN ISO 228-1)
 - Rosca ISO trapezoidal (DIN 103-1)
 - Rosca de dente de serra (DIN 513)
 - Roscas UNF (EUA+Inglaterra)
 - Roscas Edson
 - Roscas especiais
- Exige critério na seleção dos processos e de ferramentas e dos métodos de inspeção.

Formas de Fabricação

→ Usinagem

- Torneamento com ferramenta simples ou múltipla
- Cabeçotes automáticos com pentes, tangenciais radiais ou circulares
- Turbilhonamento
- Com machos e cossinetes
- Fresagem com fresas simples e múltiplas
- Retificação com rebolos de perfil simples ou múltiplo

→ Conformação

- Laminação entre rolos ou entre placas planas

Tipos de rosqueamento

Torneamento com ferramenta simples ou múltipla de filetar

- O perfil da rosca é executado com apenas um gume em várias passadas
- São utilizadas ferramentas de aço rápido e de metal duro
- O uso de insertos indexáveis exige altas v_c 's
- Altas v_c 's @ altos avanços □ recuos rápidos
- Processo crítico na execução de roscas próximas a ressaltos e colares
- Máquinas de comando manual - ferramentas de HSS e peças com rebaixos longos para a saída da ferramenta
- Ferramentas de metal duro e cerâmicas exigem sistemas automáticos - tornos CNC (altas v_c 's e retornos rápidos)

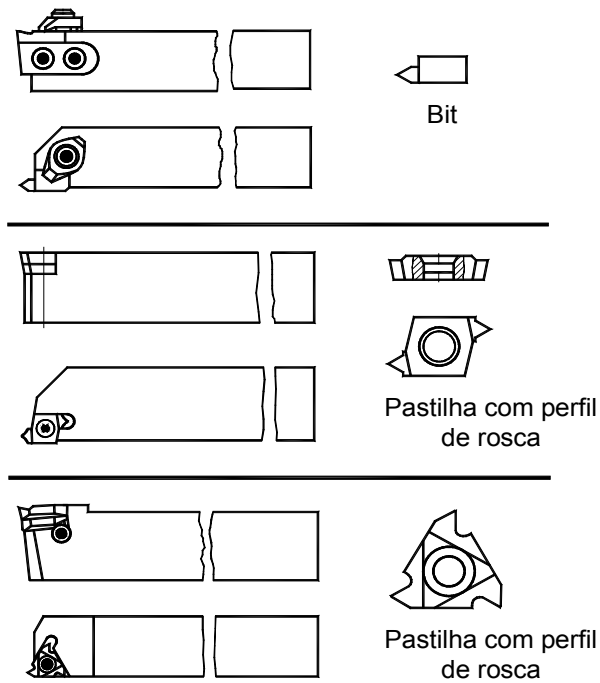


Figura 161 - Ferramentas de rosca com insertos de metal duro

Recomendações para rosqueamento de aços e FoFo

→ Número de passes em função do passo

Passo da rosca - mm	Nº de passes - mm	Passo da rosca - mm	Nº de passes - mm
1,7 – 2,4	7	6	14
1,5 – 1,6	6	4 - 5	12
1,2 – 1,4	5	3,4 – 3,8	10
0,9 – 1,1	4	3,0 – 3,3	9
< 0,9	3	2,5 – 2,9	8

→ Geometria

- ângulo de incidência (α) - 5 a 10°
- ângulo efetivo de incidência (α_{ef}) - 3 a 5°
- ângulo de saída (γ) - 0° (para evitar a deformação do perfil)

→ **Recomendações para rosqueamento de aços e FoFo**

- Velocidade de corte
- Em tornos paralelos com ferramentas de aço rápido - $v_c < 1/2 v_c$ de torneamento
- Ferramentas de materiais cerâmicos - $v_c \sim 1500$ m/min
- Ferramentas de metal duro

<i>Material da peça</i>	<i>Velocidade de corte [m/min]</i>
Aço ABNT 1140	65
Aço ABNT 1040	60
Aço ABNT 4120	55
Aços Inoxidáveis	25 - 30
Ferro-fundido	50 - 70
Bronze	80 - 120
Alumínio	90 - 180

Torneamento de rosca com pentes

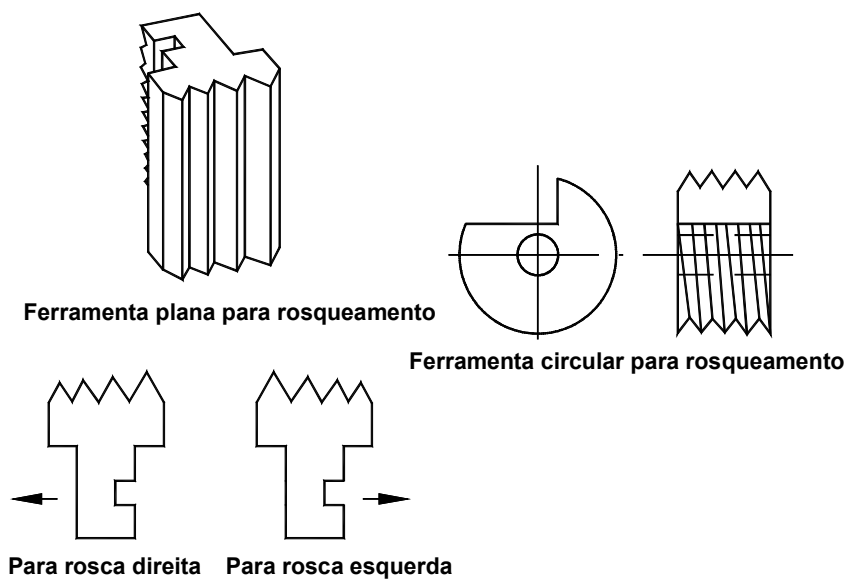
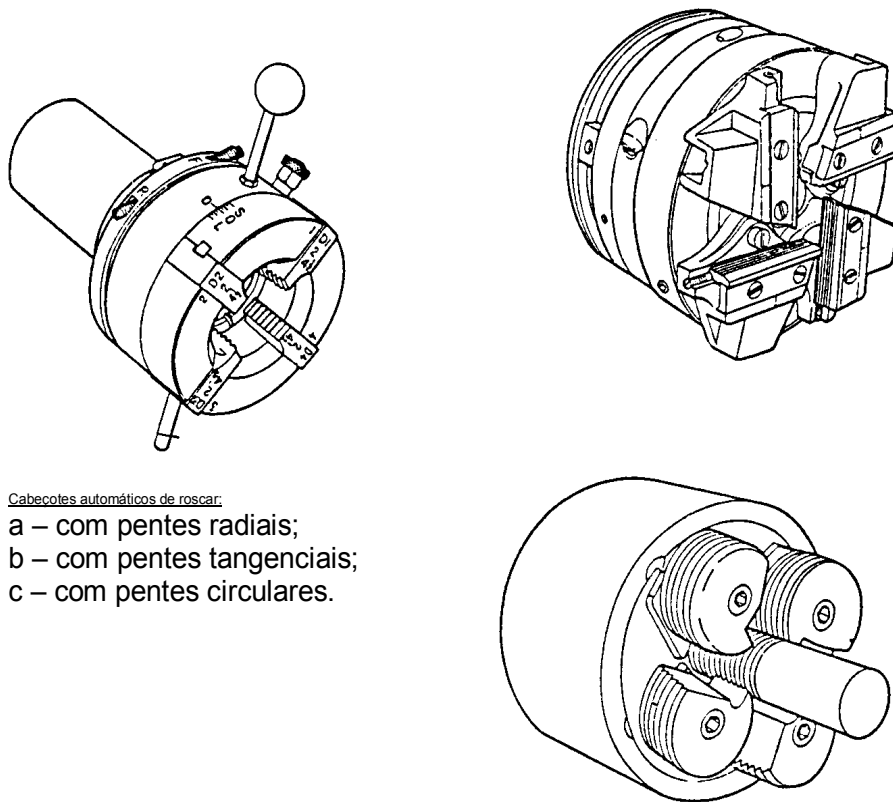


Figura 162 – Pentes de rosqueamento

Generalidades

- Vários gumes em ação simultaneamente
- Cada gume realiza um corte mais profundo que o anterior - a rosca é executada em uma passada
- Os pentes podem ser radiais, tangenciais ou circulares (fabricados em aço rápido)
- Para rosca externa direita - pente de rosca esquerda e vice versa
- Para roscas internas - pentes circulares

Rosqueamento com cabeçotes automáticos



Cabeçotes automáticos de rosca:

- a – com pentes radiais;
- b – com pentes tangenciais;
- c – com pentes circulares.

Figura 163 – Exemplos de cabeçotes de rosqueamento

Generalidades

→ Tipos de cabeçotes

- Estacionários / Giratórios

→ Tipos de pentes acoplados aos cabeçotes

- Radiais / Tangenciais / Circulares

→ Atingindo-se o comprimento da rosca os pentes abrem e a ferramenta retorna

→ Menor desgaste da ferramenta, menor tempo gasto e melhor acabamento

→ Os pentes são ajustáveis - tolerância dimensional das roscas

- facilidade para a reafiação

Velocidades de corte recomendadas

Material	Passo da rosca [mm]				Fluido de corte
	< 1	1 – 1,5	1,6 – 3,5	> 3,5	
FoFo Cinzento	24	15	12	7,5	Seco ou óleo solúvel
FoFo maleável	15	12	9	6	Óleo solúvel
Aço de corte livre	18	12	7,5	4,5	Óleo solúvel ou de corte
Aço de baixo carbono (C < 0,3%)	12	9	6	3,6	Óleos sulfurados ou óleos graxos
Aço médio carbono (0,3% < C < 0,65%)	6	4,5	3	2,4	Idem
Aço inoxidável	6	4,5	3	2,4	Idem
Alumínio	75	54	33	15	Querosene
Latão	75	54	33	15	Óleo parafínico
Bronze (Al, Ni ou P)	18	12	7,5	4,5	Idem
Cobre	186	12	7,5	4,5	Idem

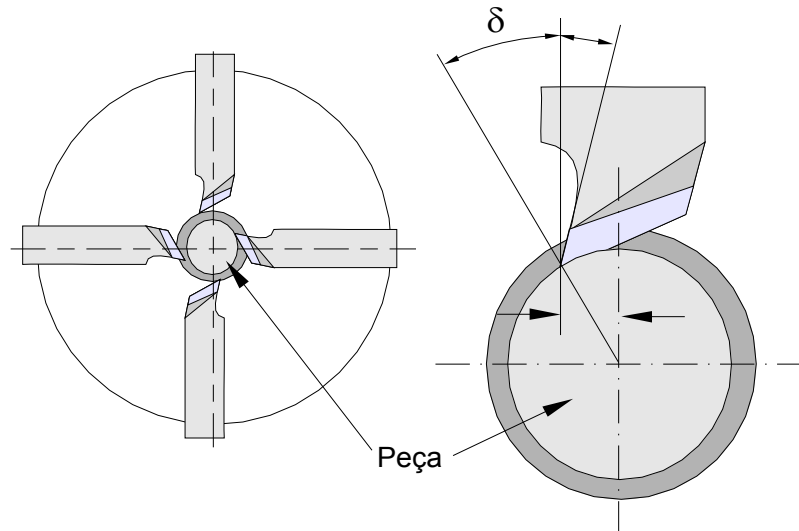
Cabeçotes automáticos de pentes radiais

Figura 164 – Exemplo de pente de roscar

onde:

$$H = \frac{d}{2} \sin \delta$$

Características

- Os dentes cortantes em cada pente são defasados de acordo com o ângulo de hélice da rosca
- Pentes largos podem ser usados, permitindo chanfros compridos;
- Podem ser adaptados para desbaste e acabamento;
- Servem para execução de roscas direitas, esquerdas, finas e grossas;
- Vida relativamente curta dos pentes;
- Difícil reafiação;
- A quebra ou o lascamento de um dente leva usualmente à perda total do jogo de pentes.

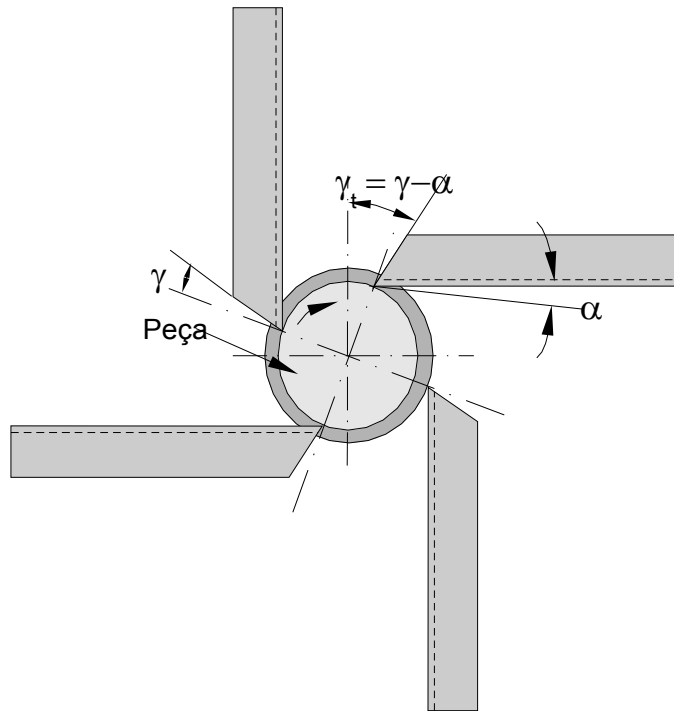
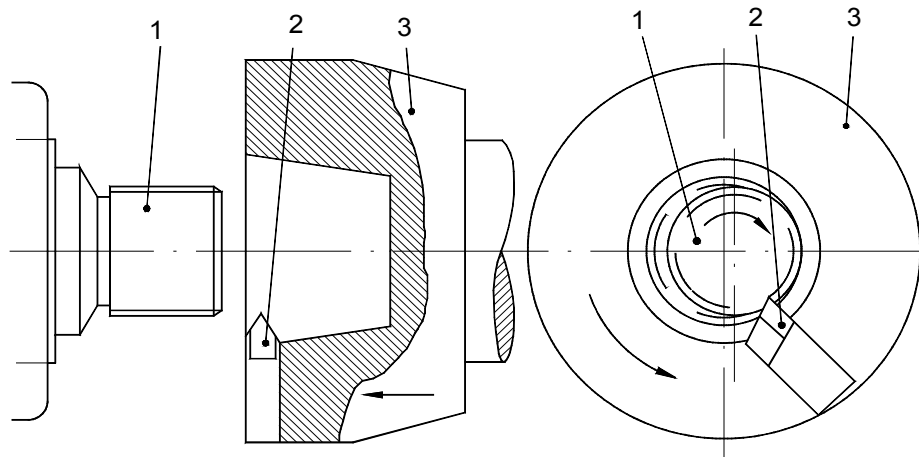
Cabeçotes automáticos de pentes tangenciais

Figura 165 - Cabeçotes automáticos de pentes tangenciais

- Os pentes tangenciais são placas planas com perfil de rosca de um lado
- São montados no cabeçote de modo que contactem a peça tangencialmente
- Filetes retos (círculos concêntricos) ou em hélice
- Roscas esquerdas - pentes esquerdos

Turbilhamento de roscas (tornofresamento)



- 1 Peça
- 2 Ferramenta
- 3 Suporte de fixação da ferramenta

Figura 166 – Processo de turbilhamento de roscas

Generalidades

- Processo de torneamento com corte interrompido
- A profundidade total da rosca é obtida por um ou vários gumes - parte interna de uma ferramenta rotativa circular
- Uma passada, elevada velocidade de corte
- Ferramenta montada de forma excêntrica em relação à peça que apresenta um movimento rotativo lento no sentido contrário ao movimento rotativo da ferramenta
- Roscas externas - a ferramenta é configurada na forma de um cabeçote de fresamento com gumes para dentro
- Processo executado em máquinas especiais
- Alto potencial de corte e elevada qualidade superficial
- Em geral são montadas no cabeçote 4 ferramentas de metal duro defasadas de 90°
- Duas atuam no fundo da rosca, uma nos flancos e uma na remoção de rebarbas
- Mínimo aquecimento da peça e da ferramenta
- Operação realizada em geral a seco

Distribuição das ferramentas no turbilhoador



Figura 167 - Distribuição das ferramentas no turbilhoador

Rosqueamento com machos e cossinetes

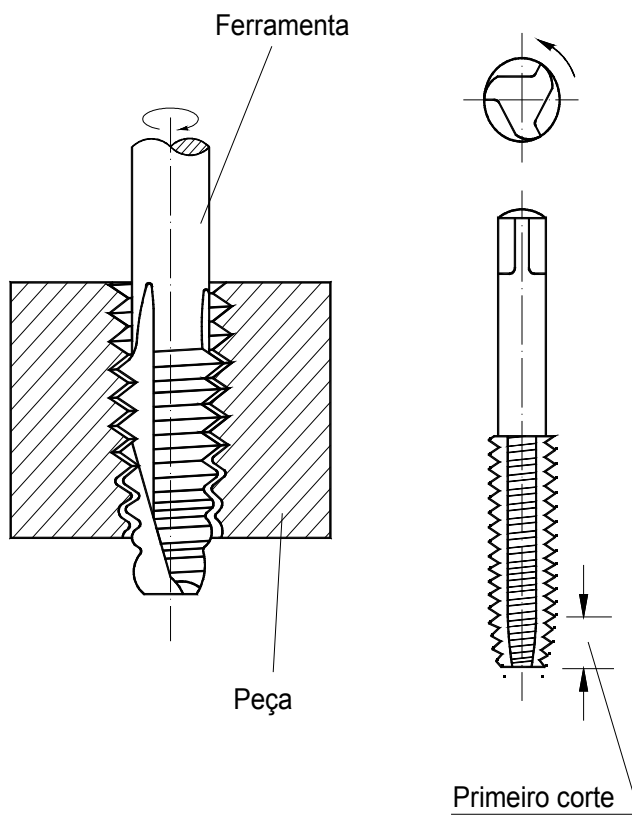


Figura 168 – Exemplo de macho de roscar

- Processo especial de furação e alargamento
- Machos para furos passantes têm entrada cônica
- Parte rosqueada é dividida em pentes e rebaxos
- Rebaxos - condução de cavacos e fluido

Machos

- Ferramentas manuais - fornecidas em jogos (pré-corte e acabamento, eventualmente corte intermediário)
- Material - quase que exclusivamente aço-rápido
- Em furos cegos a velocidade é limitada pela profundidade do furo e pela rapidez de inversão da rotação da máquina
- Velocidades excessivas ==> maior desgaste, acabamento ruim, rebarbas, fora da dimensão, alta F_c ==> quebra
- Roscas curtas - velocidades grandes são utilizáveis
- Roscas profundas - baixas velocidades
- Diâmetros pequenos - elevados torques ==> quebra

Cossinetes

- Ferramentas multicortantes utilizadas no corte de roscas externas
- Trabalhos de manutenção, reparos, máquinas de roscar com exigências limitadas de precisão e acabamento
- Inversão da rotação para a retirada da peça (pode causar danos nos filetes da rosca e desgastar a ferramenta)
- Pequeno diâmetro - uso em máquinas com espaço limitado
- Metais de resistência média - roscas de até 24 mm
- Metais leves - roscas de até 30mm
- O sobrematerial para acabamento não deve ser pequeno demais - desgaste excessivo, trancamento e quebra

Condições para rosqueamento com cossinetes

→ Diâmetro da haste levemente menor que o diâmetro maior da rosca □ assegurar corte fácil, precisão e acabamento

Como orientação pode-se adotar:

$$d_h = d - \frac{P}{10}$$

Onde: P = passo da rosca

d_h = diâmetro da haste

d = diâmetro nominal da rosca

→ Chanfro da haste de 45° - facilitar o início do corte e eliminar bordos vivos cortantes na entrada da rosca. O diâmetro de entrada deve ser o diâmetro menor da rosca

→ Uso de lubrificação adequada

→ Uso de velocidades de corte reduzidas (menores que as recomendadas para usinagem com machos)

→ Ângulos adequados de entrada, incidência, saída e ponta espiral, de acordo com o tipo de material da peça a ser rosqueada

Fresamento de roscas

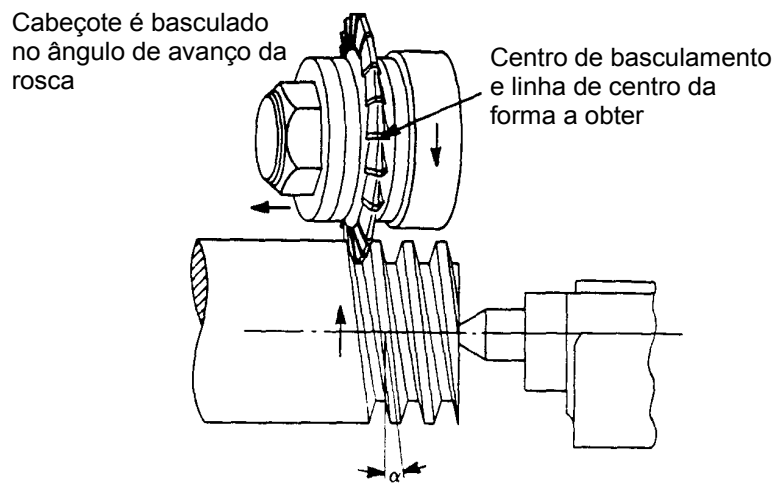


Figura 169 – Exemplo de fresamento de roscas

- É um processo usado na execução de roscas longas de movimento e de roscas em geral de passo grande
- A peça gira lentamente produzindo a velocidade de avanço
- O cabeçote porta-fresa se desloca paralelamente ao eixo da peça de um passo para cada volta da peça
- Roscas de passo grande ou de várias entradas - o cabeçote porta-fresa deve ter um suporte externo - maior rigidez
- As fresas simples de forma podem ser convencionais ou, mais freqüentemente, detalonadas

Fresamento de roscas com fresas múltiplas e de forma

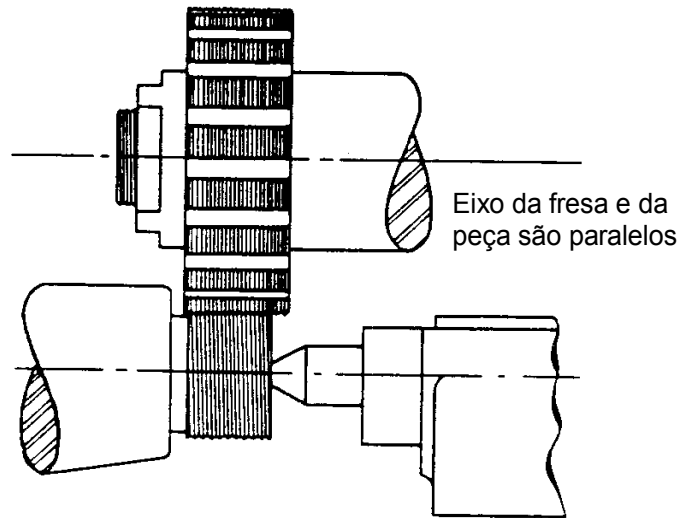


Figura 171 – Exemplo de fresamento de socas com fresas múltiplas

- É o processo mais rápido e econômico de fresar roscas curtas
- A fresa é formada por de uma série de filetes anelares concêntricos com a forma da rosca
- A fresa tem os dentes detalonados e um comprimento igual ao da rosca a executar mais dois passos
- Fresas com canais retos ou helicoidais
- Canais helicoidais asseguram corte mais seguro - reduzem a possibilidade de vibrações
- Fresas com canais retos são mais econômicas para roscas externas, finas e de pequeno comprimento

Brochamento

Definição: Brochamento, brochaemento ou brochagem: processo de usinagem onde a remoção de material da superfície de uma peça, ocorre de forma progressiva, pela ação ordenada de gumes de corte, dispostos em série, cada qual disposto em uma profundidade de corte escalonada em ferramentas multicortantes.

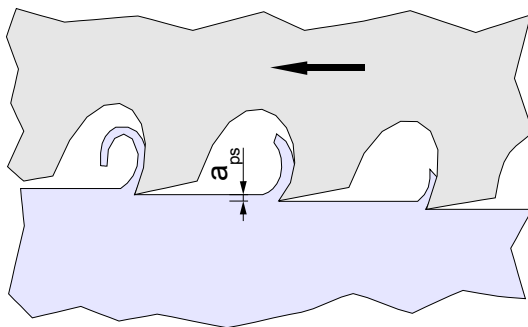


Figura 172 – Exemplo de brochamento

Generalidades

- A transformação de um perfil é feita de forma gradativa, na seqüência de ação de cada um dos elementos de corte da brocha
- Cada elemento cortante promovem um incremento na profundidade de corte (a_{ps}) ao longo de seu comprimento da brocha
- As brochas podem realizar uma operação completa de usinagem, desde o desbaste grosseiro até o acabamento
- O brochamento permite obter bom acabamento nas peças trabalhadas, geralmente dispensando, operações de usinagem posteriores
- A profundidade de corte (a_{ps}) podem variar na ordem de 0,06 a 0,15 mm de modo que a necessidade de se remover grandes quantidades de material resultam em um número elevado de dentes, o que leva a necessidade de máquinas com um curso longo
- Brochamento abrir cavidades para chavetas em furos cilíndricos ou o de transformar perfis de furos cilíndricos em perfis acanelados, estriados, quadrados, hexagonais etc.

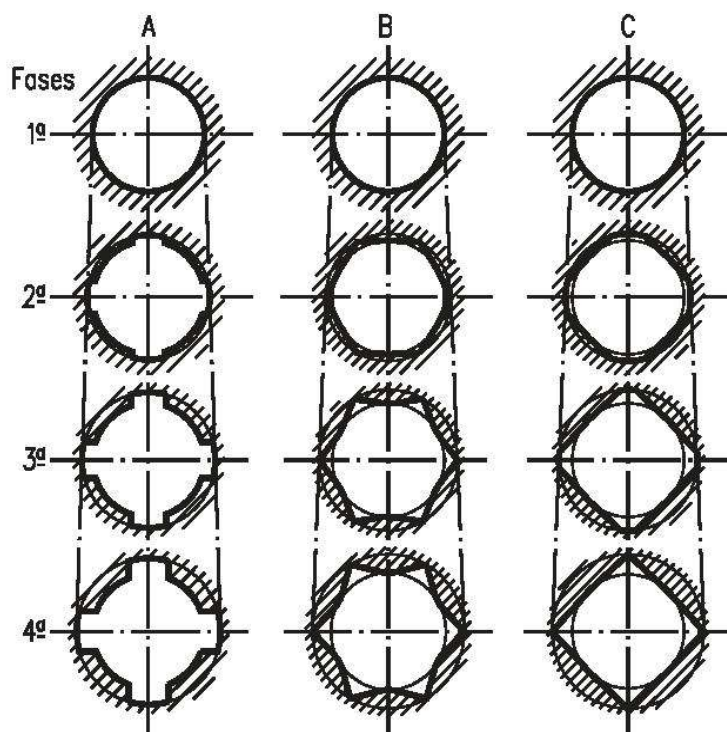


Figura 173 -

da transformação

Exemplos de fases

Tipos de brochamento

- **Brochamento externo:** quando a operação é feita sobre a superfície externa da peça, dando acabamento ou semi-acabamento a seus perfis

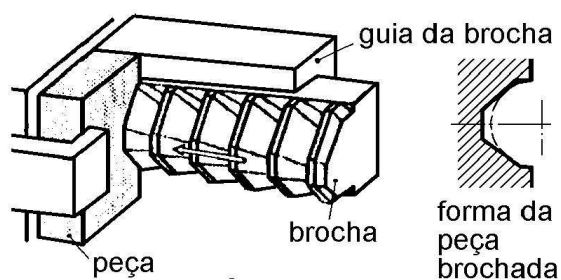


Figura 174 – Exemplo de brochamento externo

- **Brochamento interno:** quando a operação é feita internamente a peça, permitindo modificar a geometria de um furo vazado

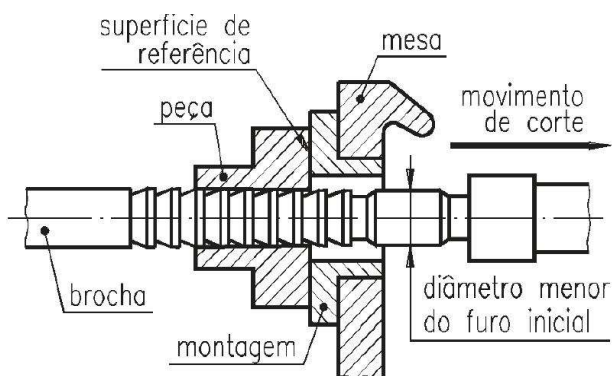


Figura 175 – Exemplo de brochamento interno

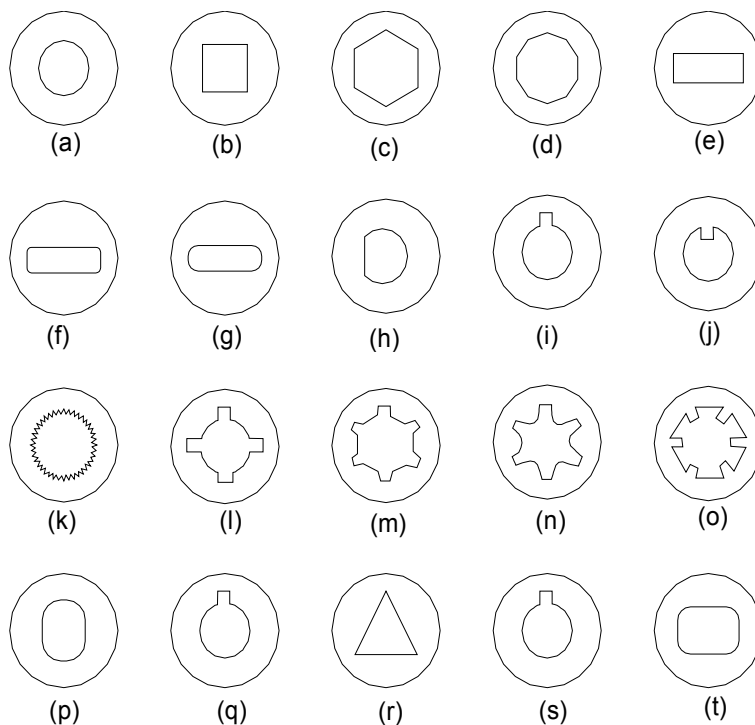


Figura 176 – Exemplos de geometrias geradas pelo brochamento interno

- Onde: a) furos redondos b) furos quadrados c) furos hexagonais
 d) furos octogonais e) furos retangulares f) furos retangulares com lados arredondados
 g) oblongos h) furos em D i) rasgos de chavetas
 j) rasgos invertidos k) entalhados l) ranhuras múltiplas retas
 m) ranhuras múltiplas anguladas n) ranhuras múltiplas com envolvente
 o – t) perfiz especiais

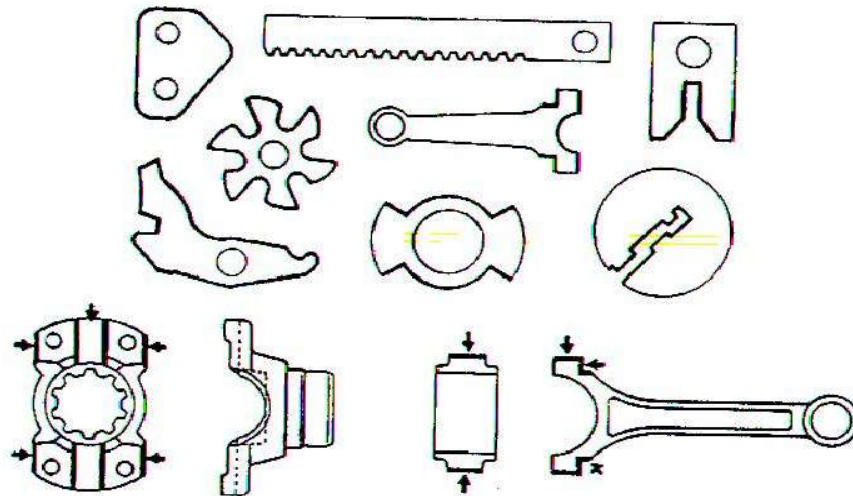


Figura 177 – Exemplo de peças usinadas por brochamento externo

Vantagens do brochamento

- Tolerâncias estreitas de usinagem
- Bom acabamento superficial
- Capacidade de produzir formas variadas e complexas externas e internas
- Vida longa da ferramenta, a produção pode atingir 2.000 a 10.000 peças entre afiações.
- Produção econômica, o custo da ferramenta é alto porém o custo por peça é baixo.
- Alta produtividade. a remoção do cavaco é bem rápida pois varios dentes atuam ao mesmo tempo em sequencia continua
- Operações podem ser realizadas em uma só passada realizando desbaste e acabamento

Desvantagens do brochamento

- Custo da ferramenta
- Necessidade de máquinas específicas
- Reafiação da complexa da ferramenta
- Perda de um elemento cortante pode levar a perda de toda a ferramenta

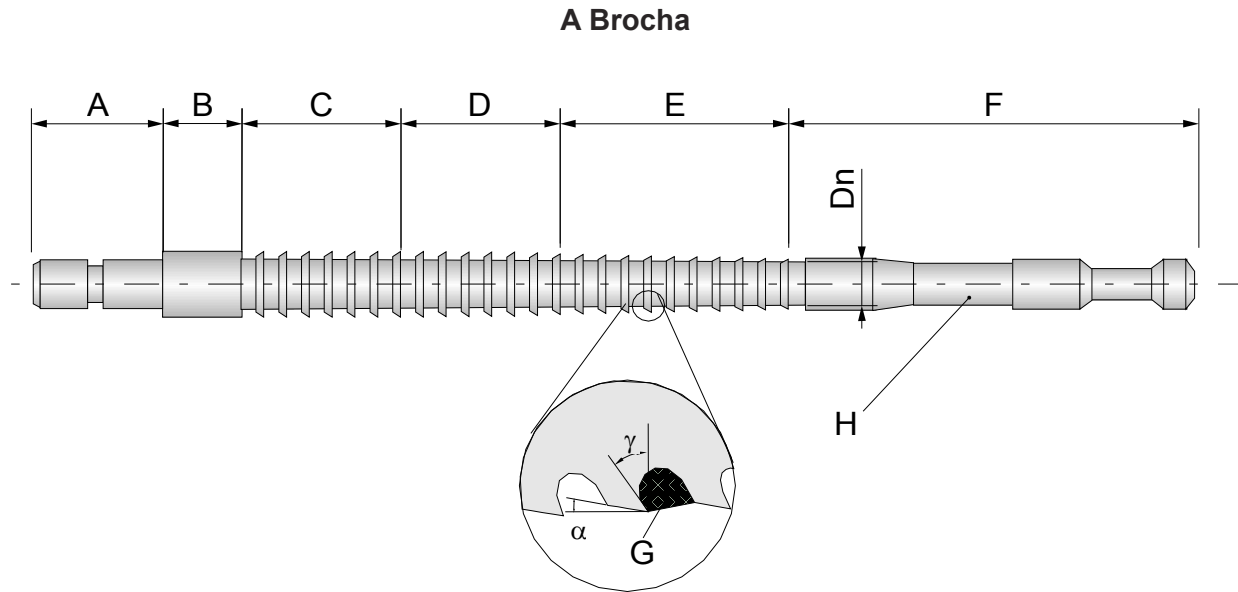


Figura 178 – Constituintes de uma brocha

Onde:

- A – Suporte
- B – Guia
- C – Dentes de calibração – comprimento cilíndrico
- D – Dentes de acabamento – comprimento cônico
- E – Dentes de desbaste – comprimento cônico
- F – Cabo
- G – Área de absorção de cavaco ou bolsa de cavacos
- H – Tirante de fixação
- D_n – Diâmetro do núcleo

Classificação das Brochas

→ Brochas de Compressão:

- São forçadas através do furo, manualmente ou por prensa. São ferramentas curtas para evitar flambagem comprimento max. Igual a 25 diâmetros. São utilizadas também para brochamento de furos cegos

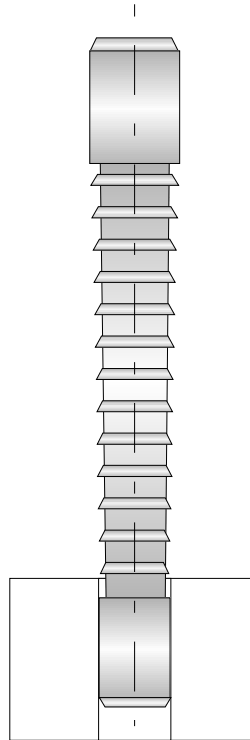


Figura 179 – Exemplo de brocha de compressão

Classificação das Brochas

→ Brochas de Tração

- São puxadas através do furo permitindo um maior comprimento, tendo assim a possibilidade de realizar operações completas de desbaste e acabamento

→ Brochas Giratórias

- Utilizadas na produção de formas helicoidais (ex: ranhuras de armas)

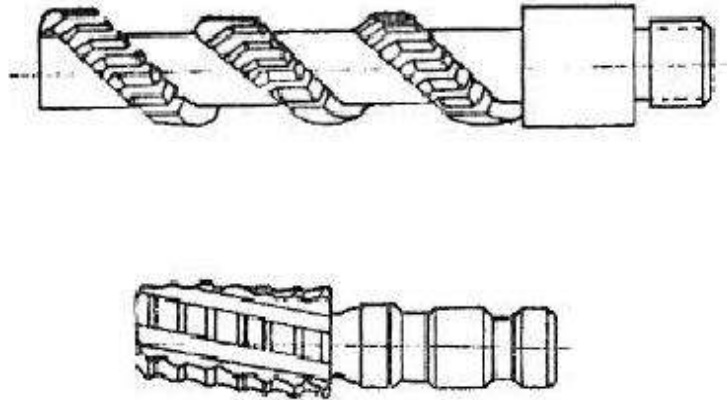


Figura 179 – Exemplos de brochas giratórias

Classificação das Brochas

→ Brocha de Sólida

- Fabricada em uma só peça em geral de aço rápido incluindo os dentes, são a maioria das brochas internas.

→ Brochas tipo Pote

- É uma brocha de superfície, envolve toda a peça. (ex: eixos ranhurados, engrenagens)

Materiais de brochas

→ Aço ferramenta

→ Aço rápido com 5%, 8% e 12 de Co

→ Metal duro

Geometria dos dentes das brochas

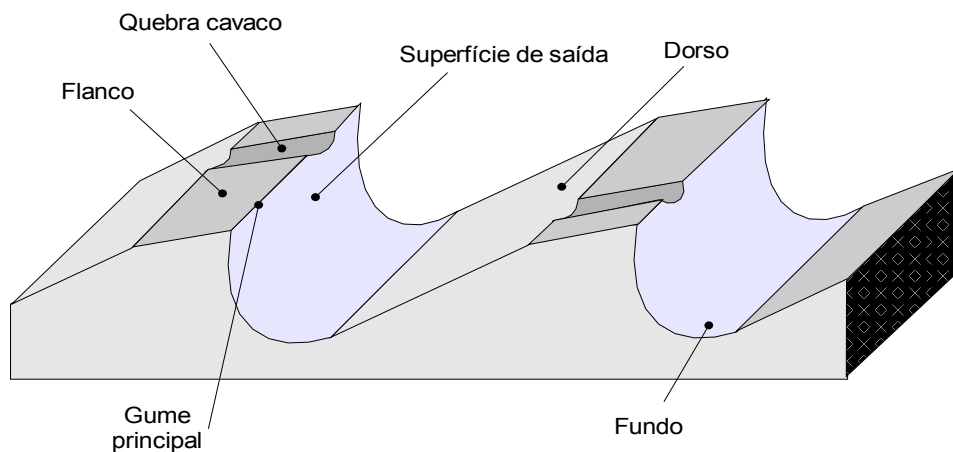


Figura 180 – Constituintes dos dentes de uma brocha

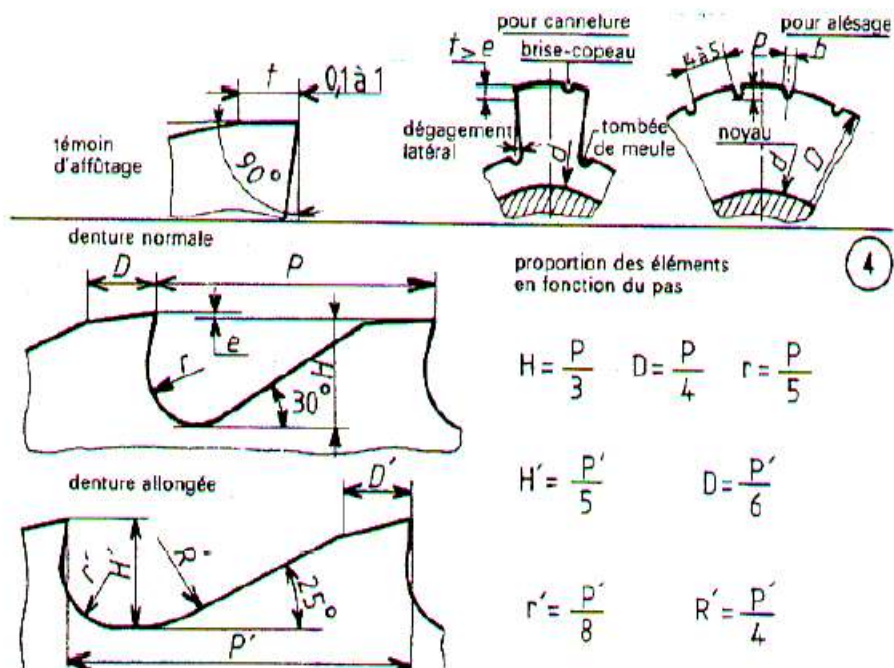


Figura 181 – Relações geométricas dos dentes de uma brocha

Geometria dos dentes das brochas

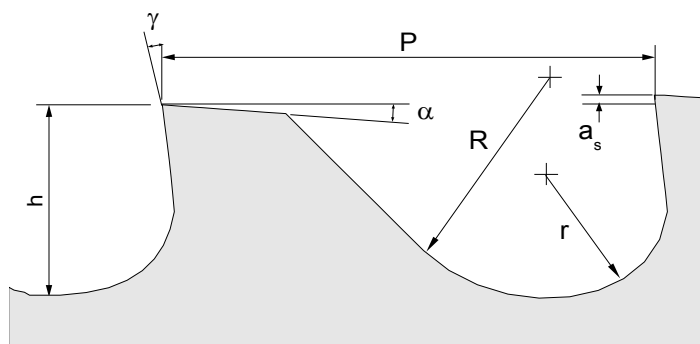


Figura 182 – Geometria dos dentes de desbaste de uma brocha

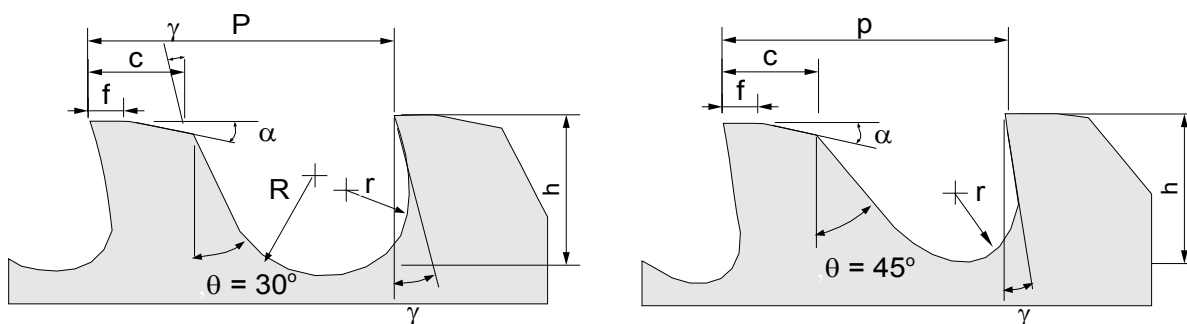


Figura 183 – Geometria dos dentes de acabamento de uma brocha

Tabela 1 – Recomendações de ângulos de incidência α

Recomendações de ângulos de incidência α		
Material	Dentes de desbaste	Dentes de acabamento
Aço	1,5° : 3°	0,5° : 1°
Ferro-Fundido	2° : 4°	0,5° : 1°
Bronze e Latão	1° : 2°	0,25° : 0,5°
Alumínio	2° : 3°	1° : 2°

Tabela 2 – Recomendações de ângulos de saída γ

Recomendações de ângulos de saída γ		
Material	Brochamento interno	Brochamento externo
Aço duro	10° a 12°	8° a 12°
Aço de média resistência	14° a 18°	15° a 20°
Aço fundido	10°	10°
Ferro Fundido maleável	7°	7°
Ferro Fundido cinza macio	10°	8°
Ferro Fundido cinza duro	5° a 7°	6°
Latão duro	5°	0° a 5°
Latão macio	10°	12°
Zinco fundido sob pressão	12°	12°
Bronze fundido	8°	0° a 8°
Alumínio fundido sob pressão	20°	20°
Alumínio de laminação (com Cu)	15°	18°
Alumínio de fundição (com Si)	12°	15°
Magnésio fundido sob pressão	20°	20°

Parâmetros para brochamento

Velocidade de corte

→ A velocidade de corte no brochamento é função do perfil do par material da peça e material da ferramenta, da forma do gume principal, dos ângulos de incidência e saída, da profundidade de corte etc.

Tabela 3 - Velocidades de corte para brochas de aço rápido

MATERIAL	VELOCIDADE DE CORTE
Aço de 500 a 700N/mm ²	5 – 8 m/min
Aço de 700 a 800N/mm ²	3 – 6 m/min
Aço de 800 a 900N/mm ²	1 – 3 m/min
Ferro maleável	5 – 9 m/min
Ferro fundido	6 – 9 m/min
Latão, bronze	8 – 12 m/min
Alumínio	10 – 14 m/min
Zinco (fundido sob pressão)	20 – 30 m/min
Magnésio	20 – 30 m/min

Tabela 4 – Fatores de correção para demais materiais de ferramentas

Material da ferramenta	Dureza Brinell do material da peça		
	Até 160	160 - 220	220 - 360
Aço ao carbono	0,5	0,5	0,5
Aço rápido	1,9	1,0	1,0
Aço rápido - 5% de cobalto	1,1	1,15	1,2
Aço rápido - 8% de cobalto	1,15	1,25	1,3
Aço rápido - 8% de cobalto	1,25	1,4	2,0
Stellite	1,6	1,8	2,0
Metal Duro	2,0 – 2,5	2,5 – 3,0	3,5 – 4,0

Observações:

- Utilizar os fatores maiores quando usar aço, e os menores para os demais materiais
- Esses valores podem ser considerados conservadores, podendo, na prática, ser ultrapassados
- Iniciar preferivelmente com velocidades moderadas

Fluidos de corte para brochamento

Função dos fluidos no brochamento:

- refrigeração
- lubrificação das cavidades dos dentes da brocha
- reduzindo o atrito entre cavaco e a ferramenta
- diminuindo o desgaste
- remover os cavacos que ficam impregnados nos dentes da brocha
- aumento da vida

Máquinas para o Brochamento Brochadeiras

→ As brochadeiras podem ser verticais ou horizontais

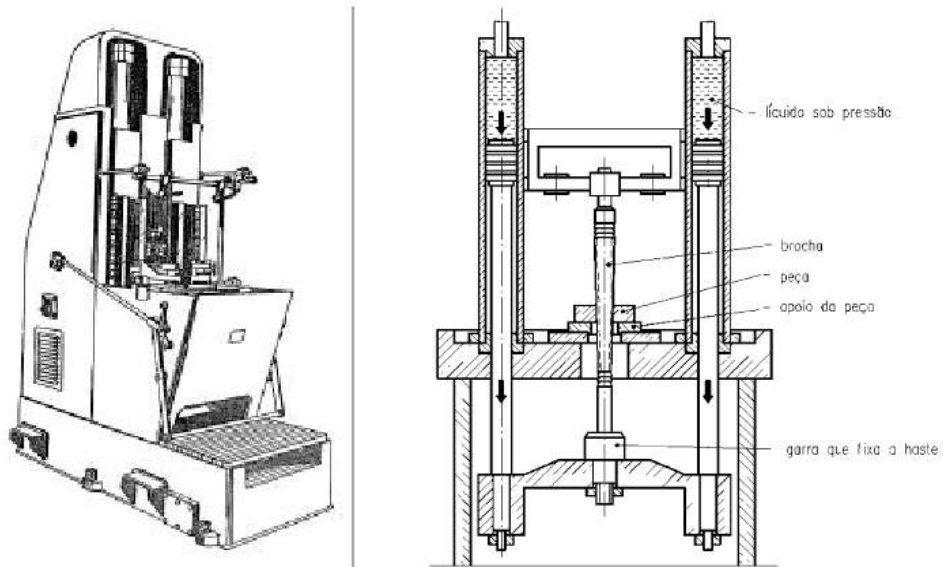


Figura 183 – Brochadeiras verticais

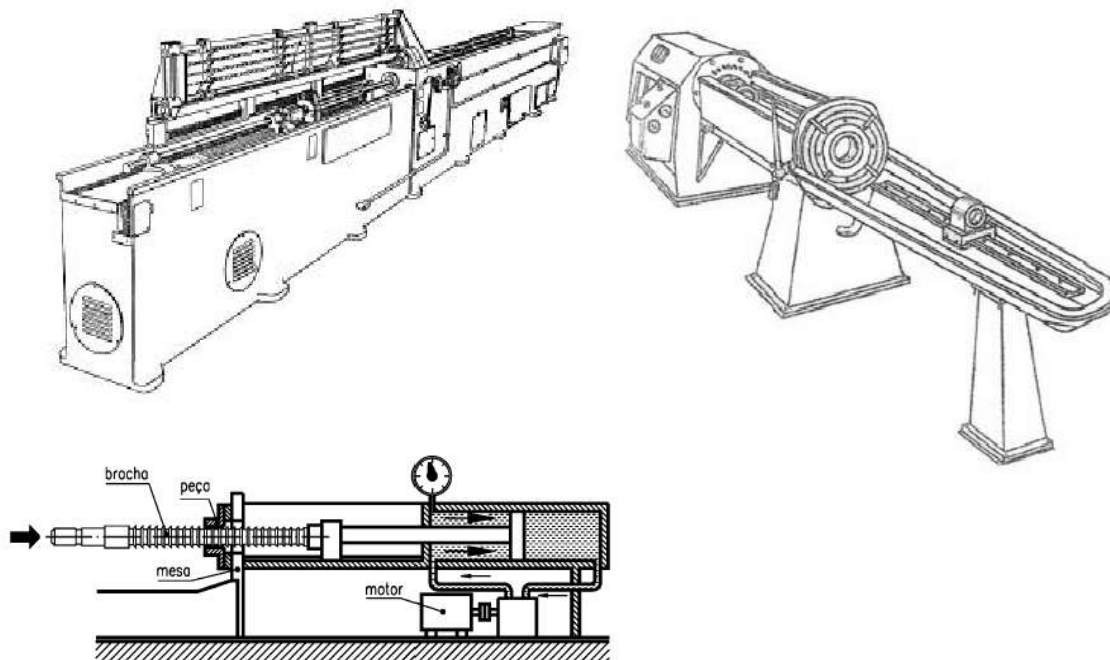


Figura 184 – Brochadeiras horizontais

Processos Não Convencionais de Usinagem

- Remoção – processo de fabricação com retirada de partículas de material de um corpo sólido de forma não mecânica.
- Formas de remoção:
 - Térmica;
 - Química;
 - Eletroquímica;
 - outras (Ex. Ultrasom, Jato d'água, etc.);

Remoção Térmica

Definição: processo de remoção de material onde a separação de partículas ocorre no estado sólido, líquido ou gasoso através de processos térmicos.

◆ Formas de remoção térmica

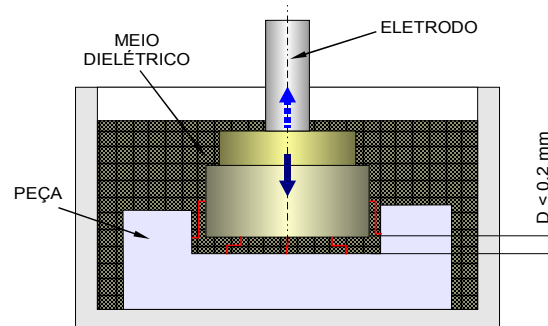
- por corpo sólido
- por líquido
- por gás
- por descarga elétrica (faísca, arco elétrico, plasma);
- por irradiação (raio de luz, LASER, feixe de eletrons, feixe de íons)

◆ Exemplos de remoção térmica

- eletroerosão por faísca
- corte por plasma
- corte por laser
- outras

Eletroerosão por faísca

Generalidades do processo

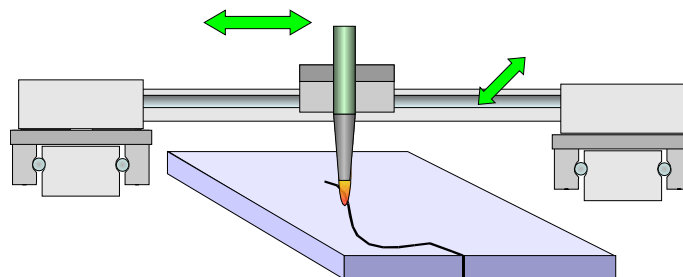


- Possível em materiais condutores de eletricidade;
- Muito usado em materiais de difícil usinagem;
- Desgaste ocorre na peça e no eletrodo;
- Distância entre eletrodo e peça é pequena ($<0,2\text{mm}$)
- Processo ocorre em meio dielétrico
- Para evitar a formação de arco voltagem usam-se pulsos de descarga

Corte por plasma

Generalidades do processo

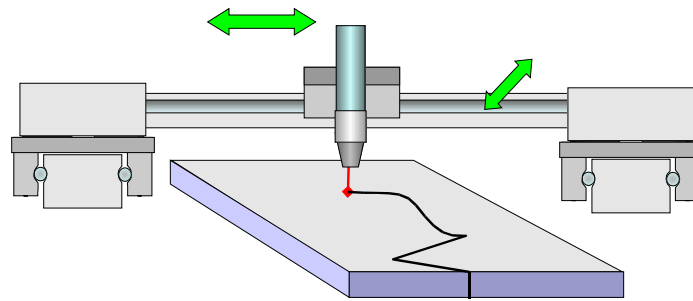
- Ocorre formação de arco voltagem (100 a 200 V) e ionização de gás
- Fluxo de gás ocorre através de bico injetor
- Temperaturas no processo atingem 25.000 K
- Remoção ocorre por fusão do material aliada a energia cinética dos gases injetados



LASER

Generalidades do processo

- Usado na furação, corte, soldagem, tratamento térmico superficial;
- Apresenta diversas vantagens, como remoção de pequenas espessuras de material, pouca influência térmica e ruído.



Remoção química