



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3301

Complementos de Fabricação Mecânica

Profa. Izabel Machado

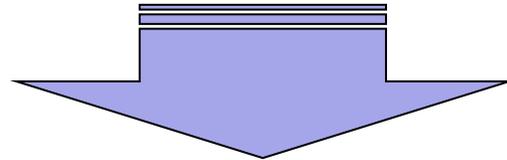
8º Período Eng. Mecânica

2017



Tópicos

- ▶ Fundamentos de usinagem;
- ▶ Parâmetros que influenciam a usinagem;
- ▶ Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem;
- ▶ Ferramentas;
- ▶ Desgaste das ferramentas;
- ▶ Usinabilidade;
- ▶ Torneamento;
- ▶ Fresamento;
- ▶ Furação;
- ▶ Avaliação econômica.



Definição - segundo a norma DIN 8580, o termo usinagem aplica-se a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco.



Processos de usinagem

Usinagem - operação que confere à peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três, através da remoção de material sob a forma de cavaco.



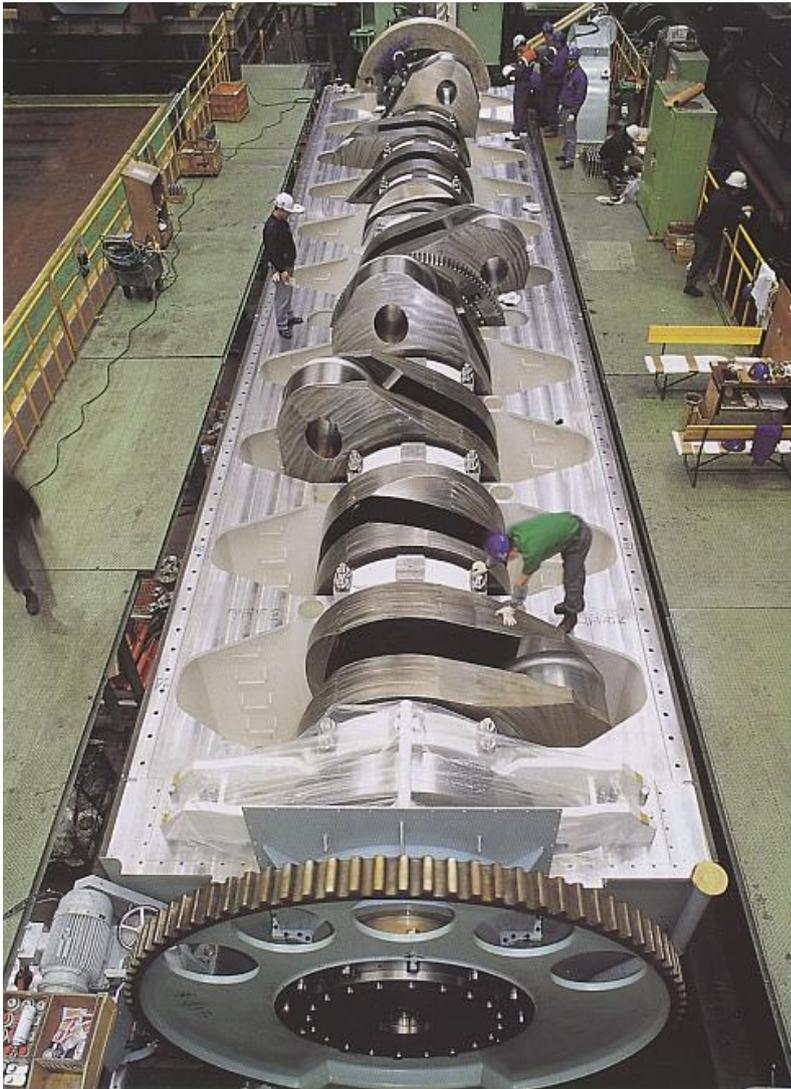
Processos de usinagem

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 propriedades dos materiais.



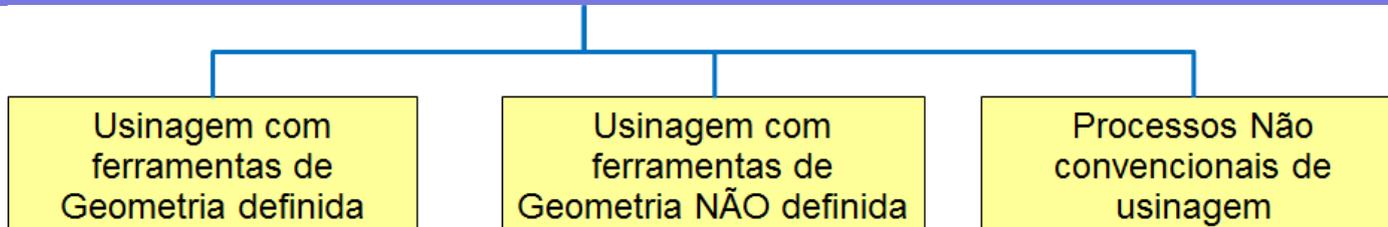
Importância da usinagem na indústria metal mecânica



- 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 indústria aeroespacial
- 100% dos pinos médico-odontológicos



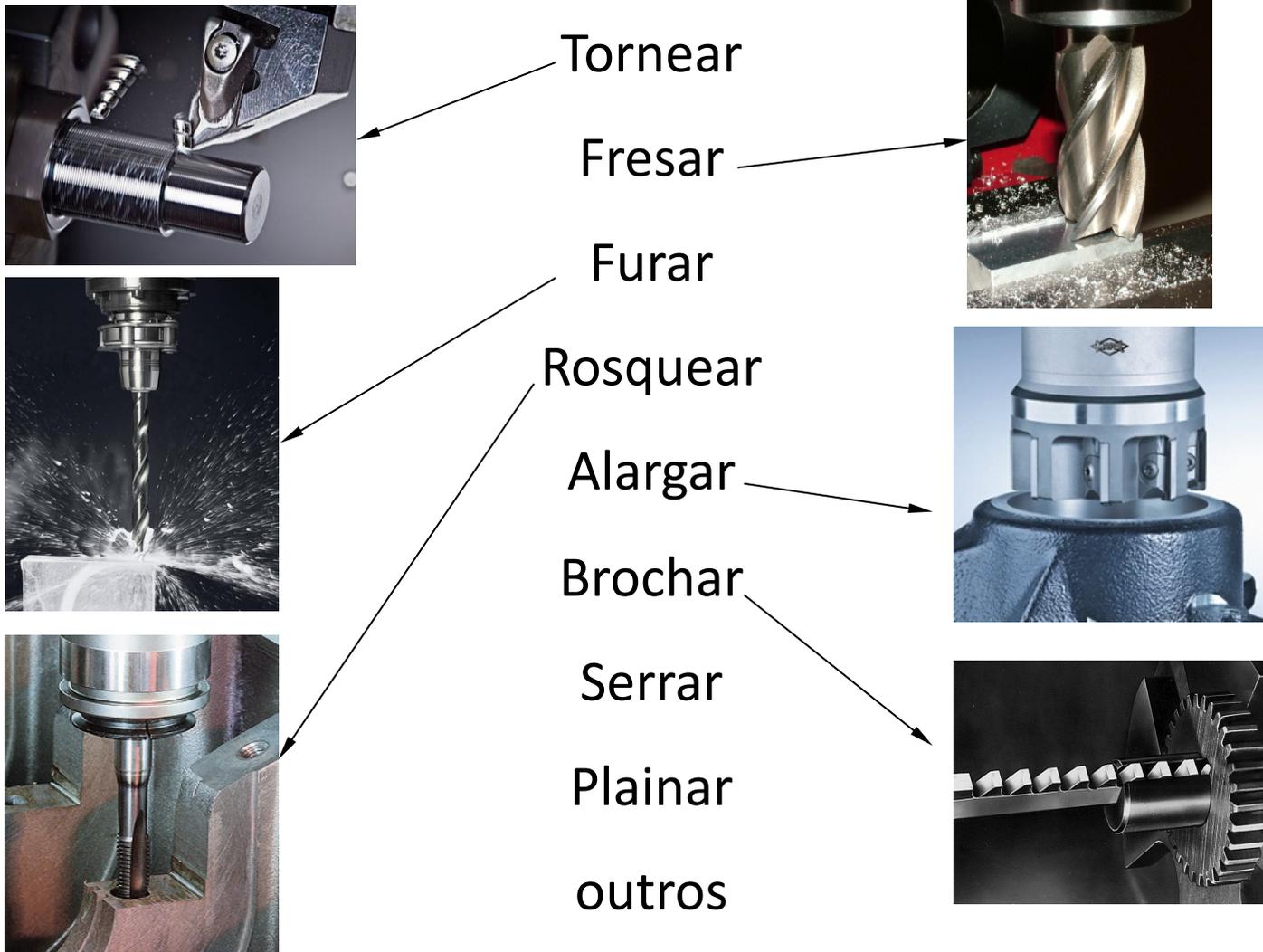
Divisão dos processos de fabricação





Divisão dos processos de fabricação

Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida





Divisão dos processos de fabricação

Usinagem com Ferramentas de Geometria não Definida



Retificar

Brunir

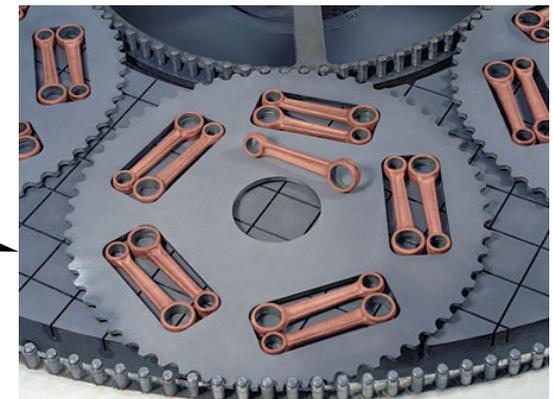
Lapidar

Lixar

Polir

Jatear

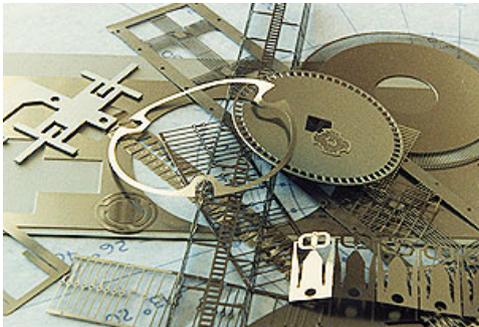
Tamborear, outros





Divisão dos processos de fabricação

Usinagem por Processos Não Convencionais



Remoção térmica

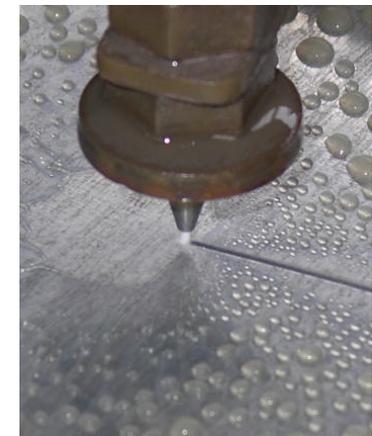
Remoção Química

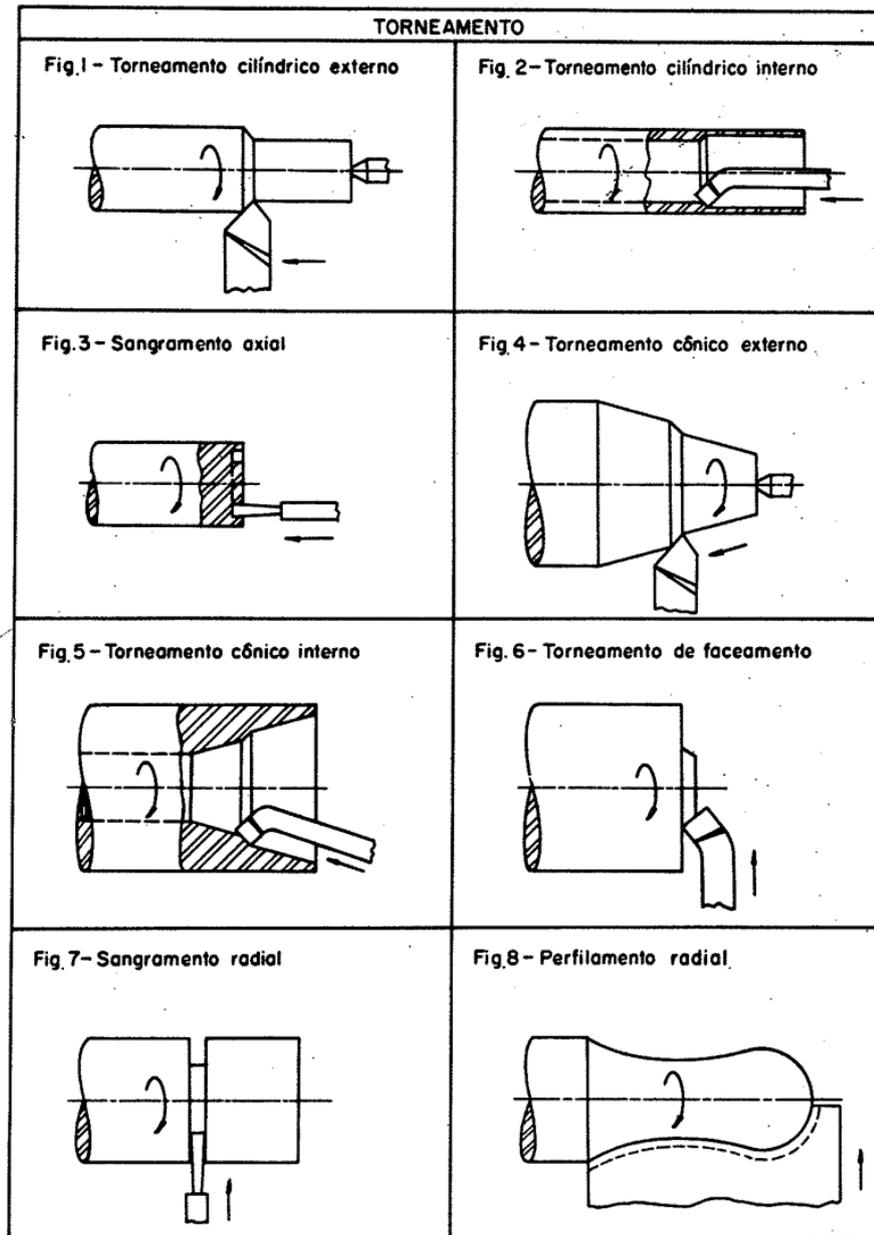
Remoção Eletroquímica

Remoção por ultrassom

Remoção por jato d'água

outros

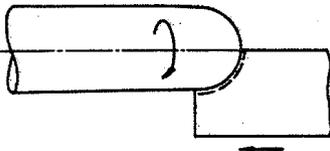
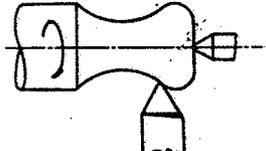
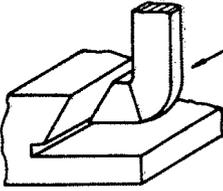
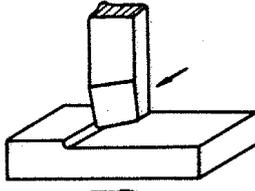
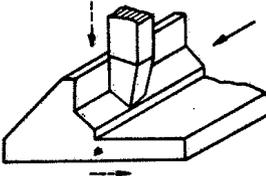
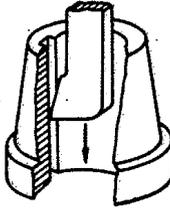
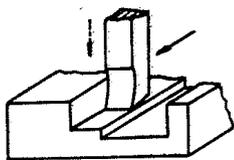
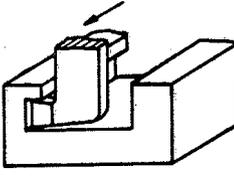


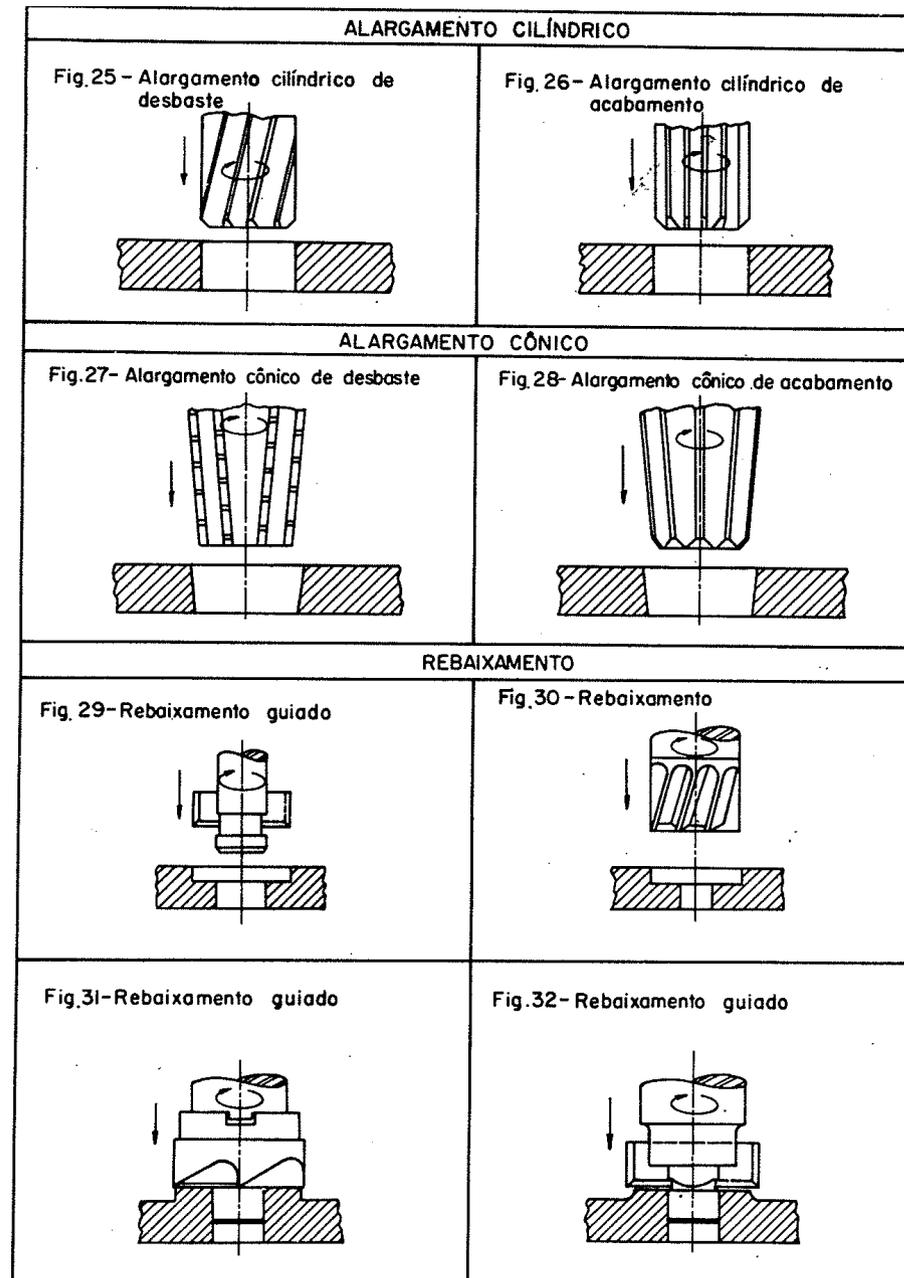


Processos de Usinagem*

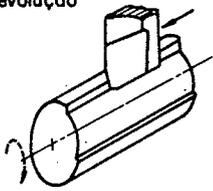
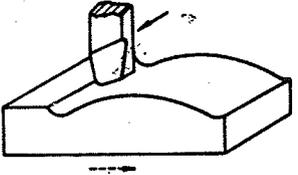
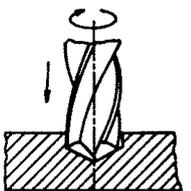
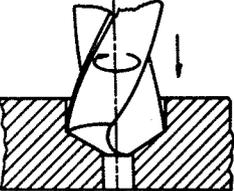
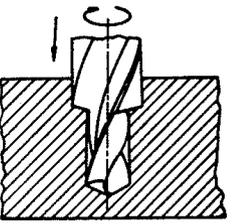
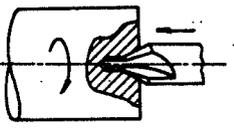
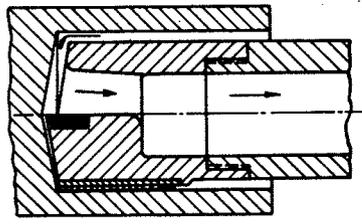
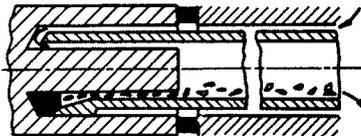
*Fundamentos da Usinagem dos Metais (Dino Ferraresi)



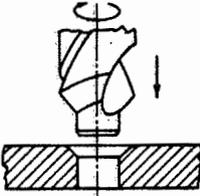
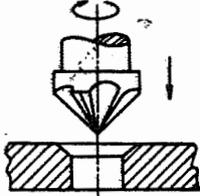
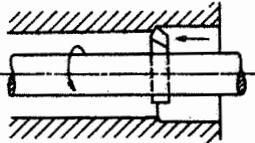
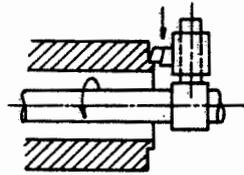
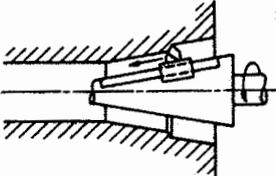
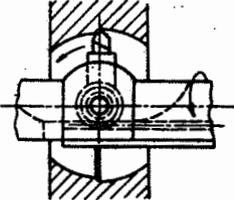
TORNEAMENTO	
<p>Fig.9 - Perfilamento axial</p> 	<p>Fig.10-Torneamento curvelíneo</p> 
APLAINAMENTO	
<p>Fig.11 - Aplainamento de guias</p> 	<p>Fig.12- Aplainamento de superfícies</p> 
<p>Fig.13 - Aplainamento de perfis</p> 	<p>Fig.14 - Aplainamento de rasgo de chave</p> 
<p>Fig.15 - Aplainamento de rasgos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

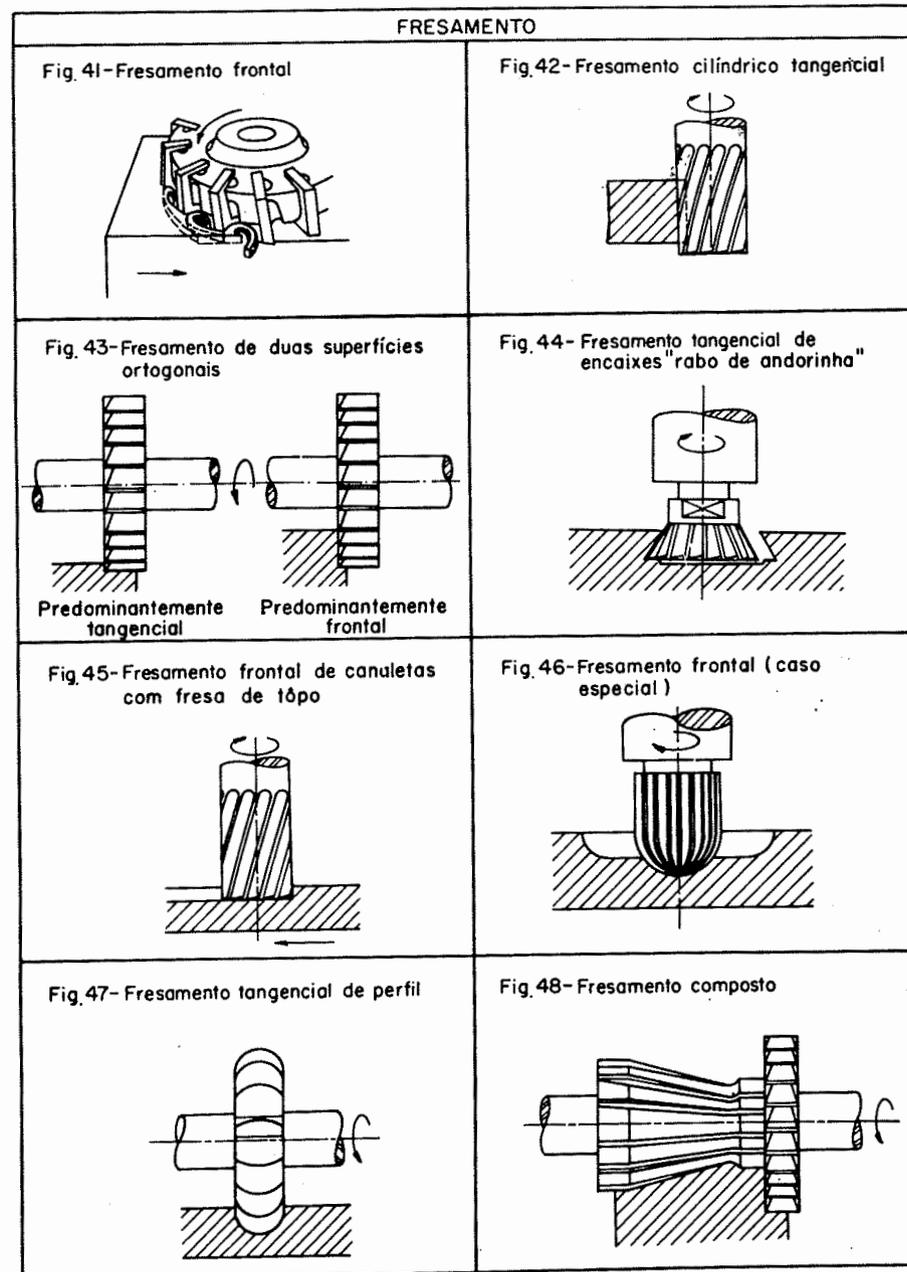




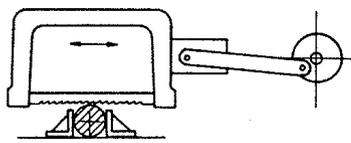
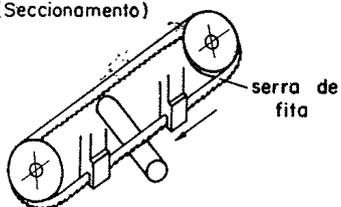
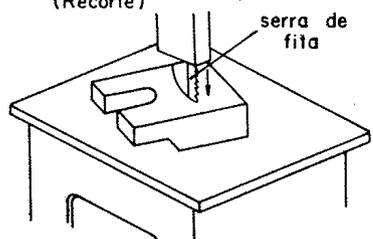
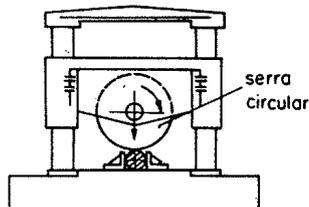
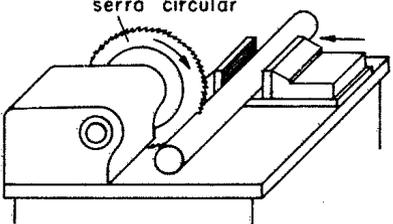
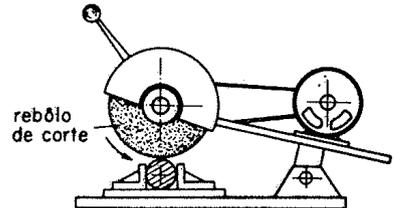
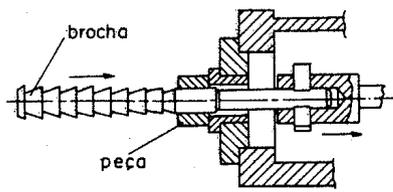
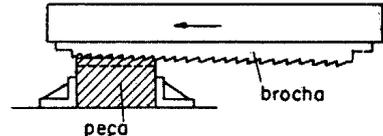
APLAINAMENTO	
<p>Fig.17- Aplainamento de sup. cilíndricas de revolução</p> 	<p>Fig.18- Aplainamento de sup. cilíndricas</p> 
FURAÇÃO	
<p>Fig.19 - Furação em cheio</p> 	<p>Fig.20- Furação com pré-furação</p> 
<p>Fig.21 - Furação escalonada</p> 	<p>Fig.22- Furação de centros</p> 
<p>Fig.23 - Furação profunda em cheio</p> 	<p>Fig.24 - Trepanação</p> 



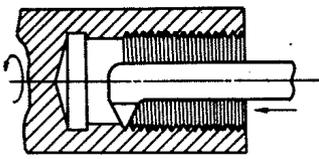
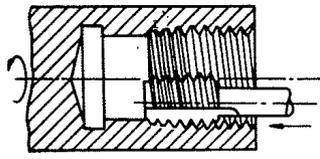
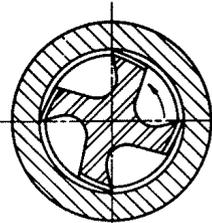
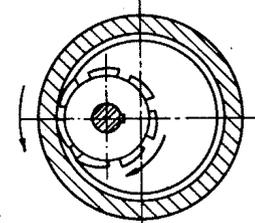
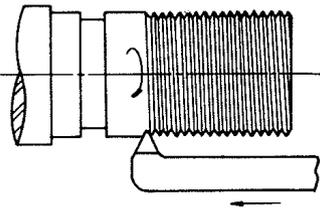
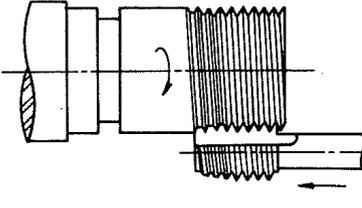
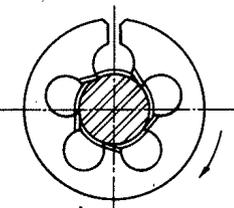
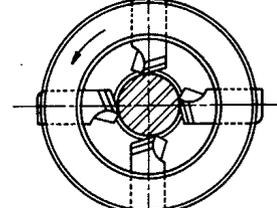
REBAIXAMENTO	
<p>Fig. 33- Rebaixamento guiado</p> 	<p>Fig. 34- Rebaixamento</p> 
MANDRILAMENTO	
<p>Fig. 35- Mandrilamento cilíndrico</p> 	<p>Fig. 36- Mandrilamento radial</p> 
<p>Fig. 37- Mandrilamento cônico</p> 	<p>Fig. 38- Mandrilamento esférico</p> 
FRESAMENTO	
<p>Fig. 39- Fresamento cilíndrico tangencial</p>  <p>Concordante</p>	<p>Fig. 40- Fresamento cilíndrico tangencial</p>  <p>Discordante</p>





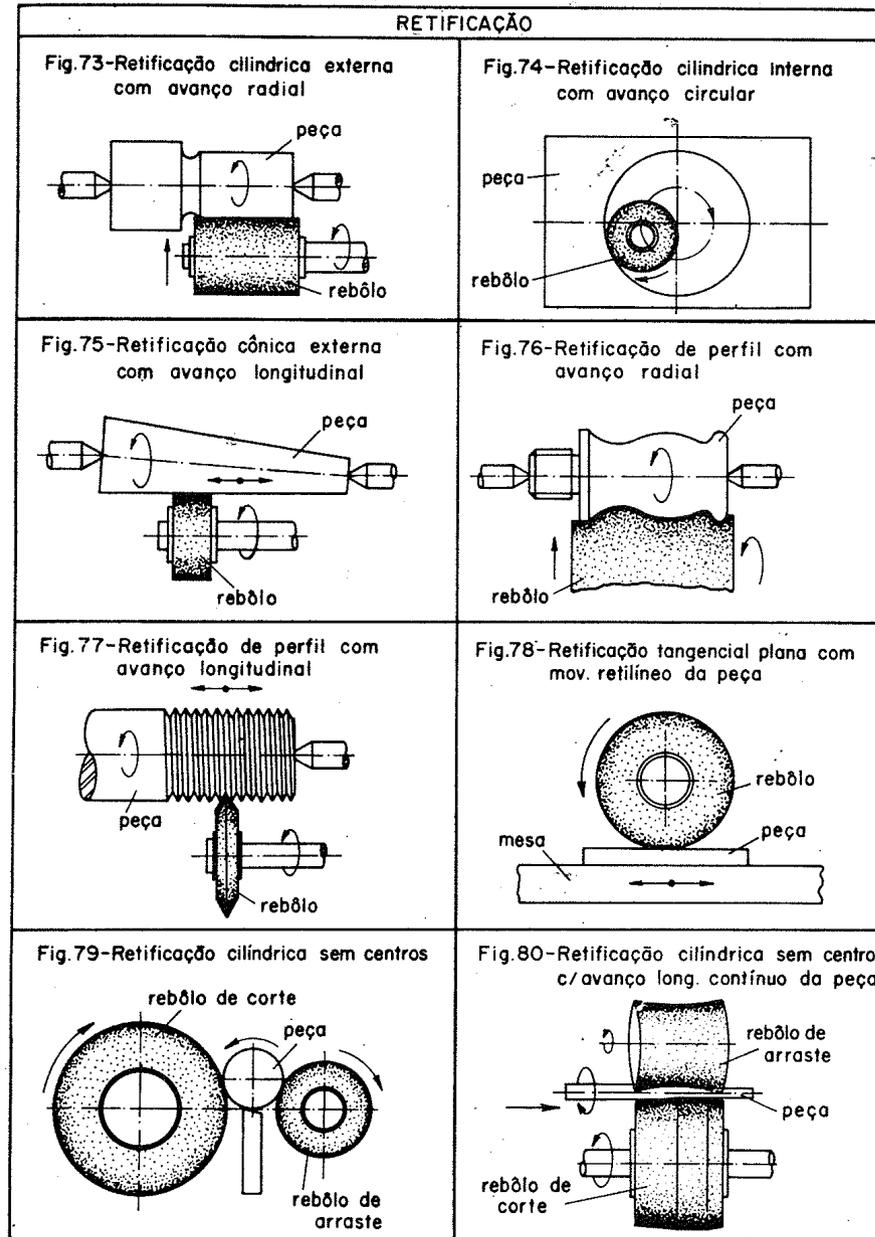
SERRAMENTO	
<p>Fig. 49- Serramento alternativo</p> 	<p>Fig.50- Serramento contínuo (Seccionamento)</p>  <p>serra de fita</p>
<p>Fig. 51- Serramento contínuo (Récorde)</p>  <p>serra de fita</p>	<p>Fig. 52- Serramento circular</p>  <p>serra circular</p>
<p>Fig. 53- Serramento circular</p>  <p>serra circular</p>	<p>Fig. 54- Serramento circular</p>  <p>rebôlo de corte</p>
BROCHAMENTO	
<p>Fig. 55- Brochamento interno</p>  <p>brocha</p> <p>peça</p>	<p>Fig. 56- Brochamento externo</p>  <p>brocha</p> <p>peça</p>

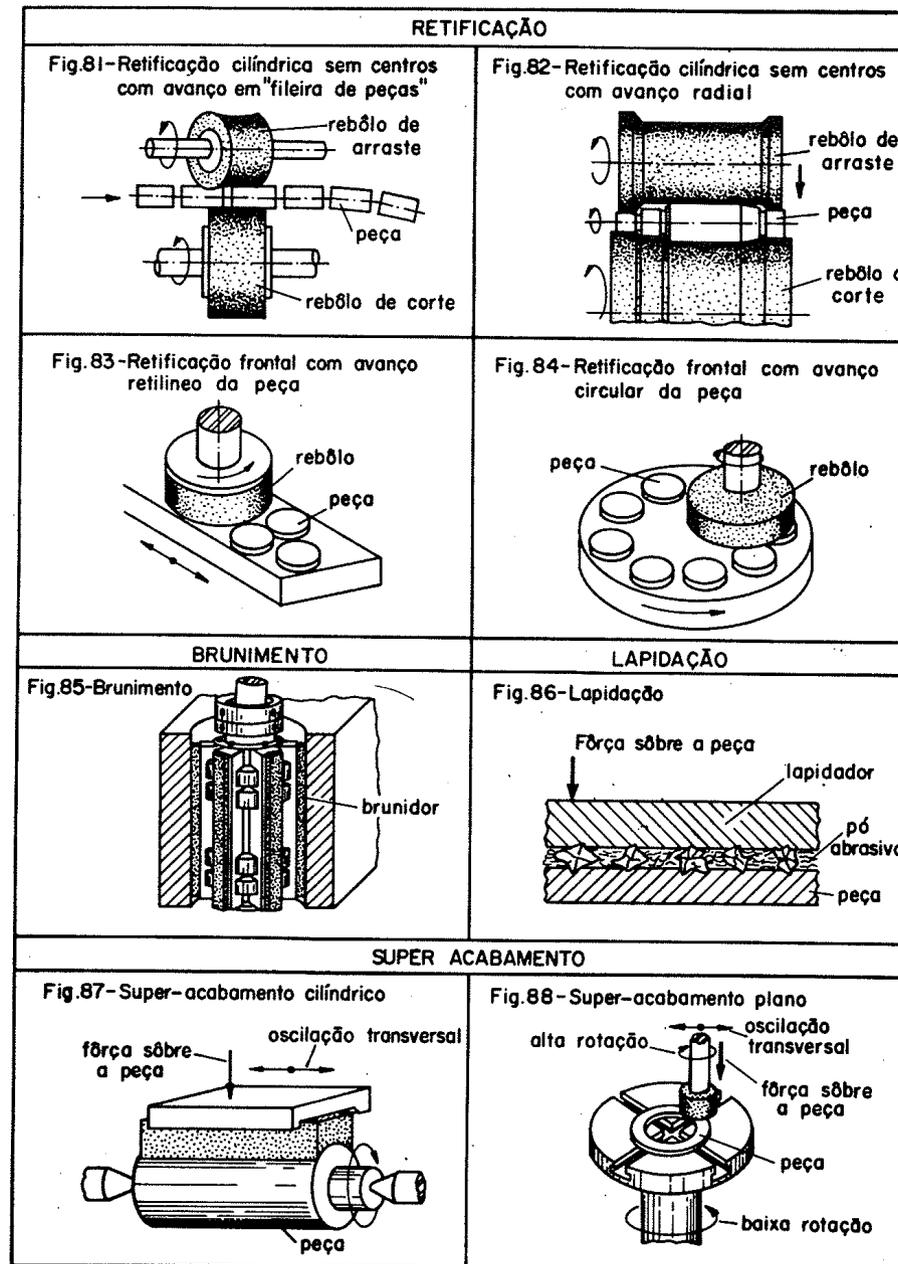


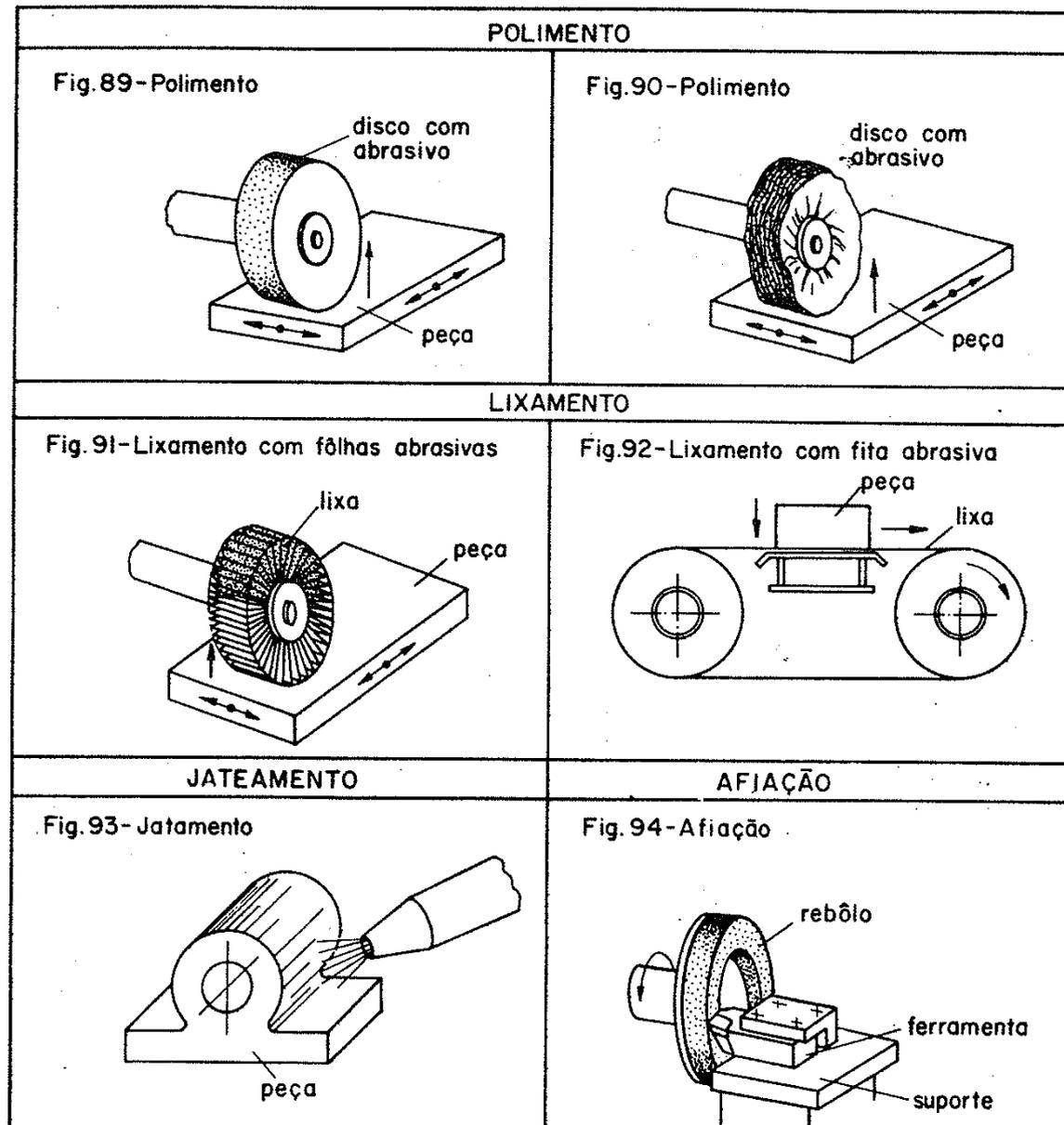
ROSCAMENTO	
<p>Fig. 57-Roscamento interno com ferramenta de perfil único</p> 	<p>Fig. 58-Roscamento interno com ferramenta de perfil múltiplo</p> 
<p>Fig. 59-Roscamento interno com macho</p> 	<p>Fig. 60-Roscamento interno com fresa</p> 
<p>Fig. 61-Roscamento externo com ferramenta de perfil único</p> 	<p>Fig. 62-Roscamento externo com ferramenta de perfil múltiplo</p> 
<p>Fig. 63-Roscamento externo com cossinete</p> 	<p>Fig. 64-Roscamento externo com jogo de pentes</p> 



ROSCAMENTO		
<p>Fig.65-Roscamento externo com fresa de perfil múltiplo</p>	<p>Fig.66-Roscamento externo com fresa de perfil único</p>	
LIMAGEM		
<p>Fig.67-Limagem contínua</p>	<p>Fig.68-Limagem contínua</p>	
RASQUTEAMENTO		
<p>Fig.69-Rasqueteamento</p>	TAMBORAMENTO	
	<p>Fig.70-Tamboramento</p>	
RETIFICAÇÃO		
<p>Fig.71-Retificação cilíndrica externa com avanço longitudinal</p>	<p>Fig.72-Retificação cilíndrica interna com avanço longitudinal</p>	



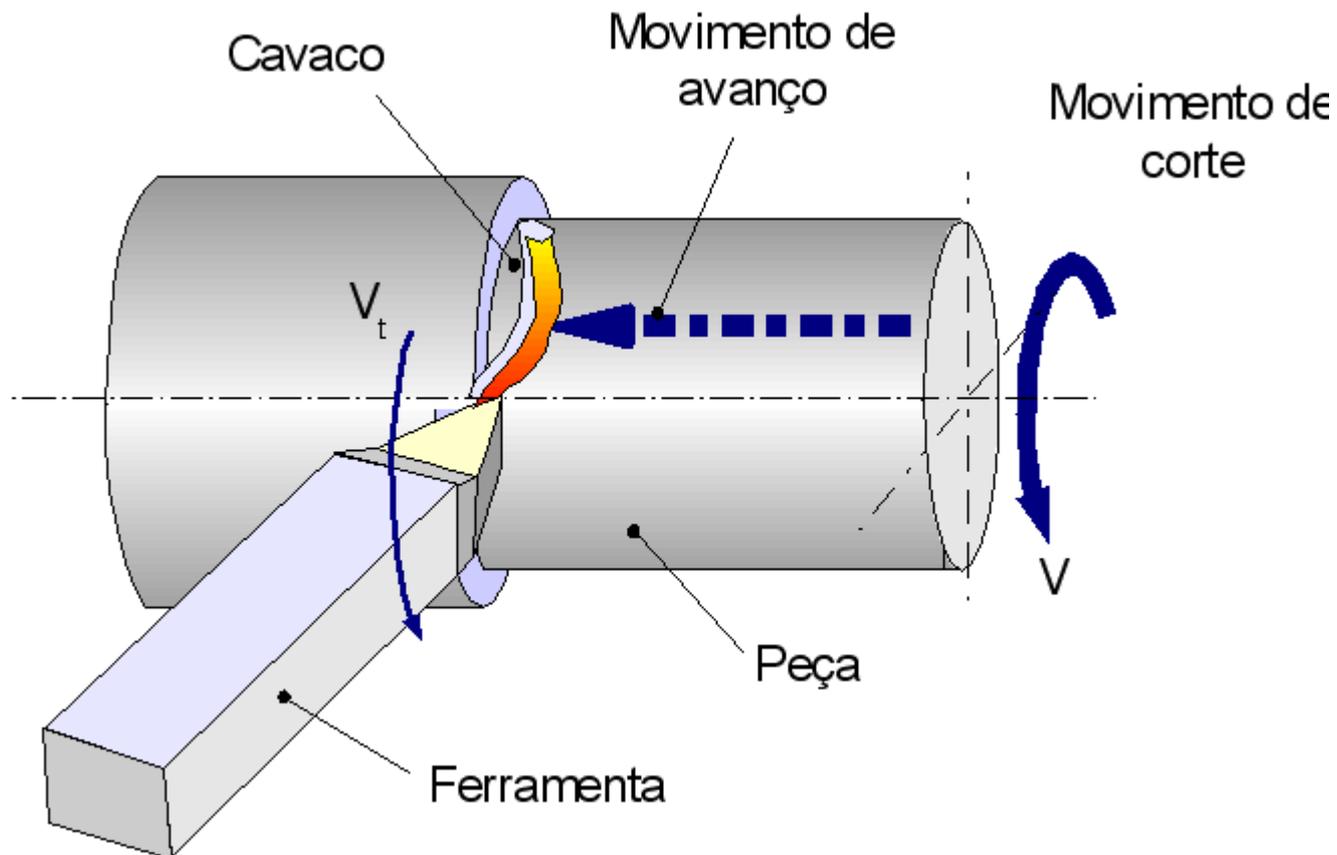






Cinemática Geral dos Processos de Usinagem

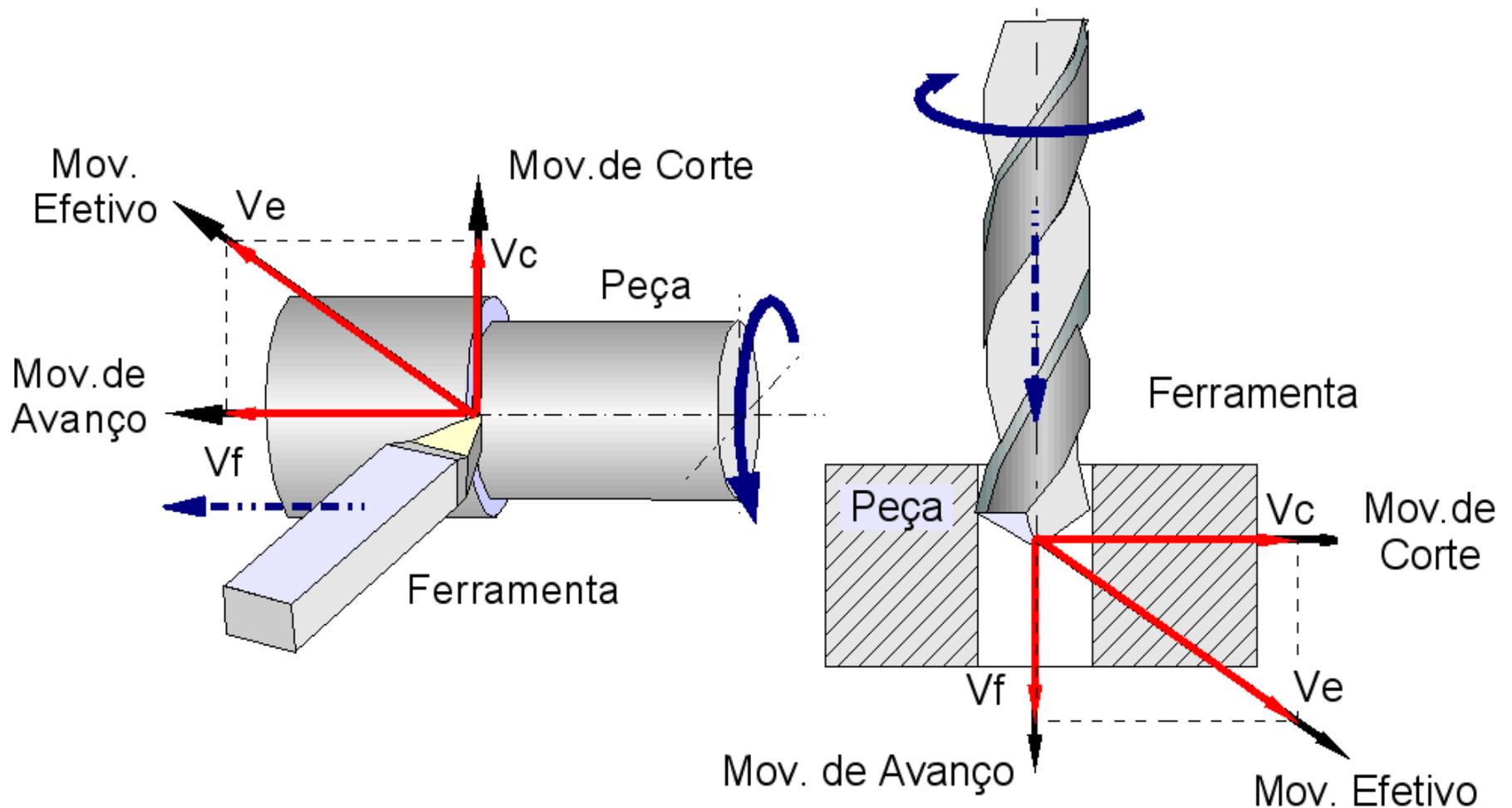
Os processos de usinagem necessitam de um movimento relativo entre peça e ferramenta.





Cinemática Geral dos Processos de Usinagem

Movimentos nos processos de usinagem





Grandezas do processo de usinagem

→ Velocidade de Corte (**V_c**)

$V_c = f$ (material peça, material ferramenta, do processo (torneamento, fresamento, retificação, etc.), da operação (desbaste ou acabamento))

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (\text{Eq. 1})$$

→ Velocidade de Avanço (**V_f**)

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



Grandezas do processo de usinagem

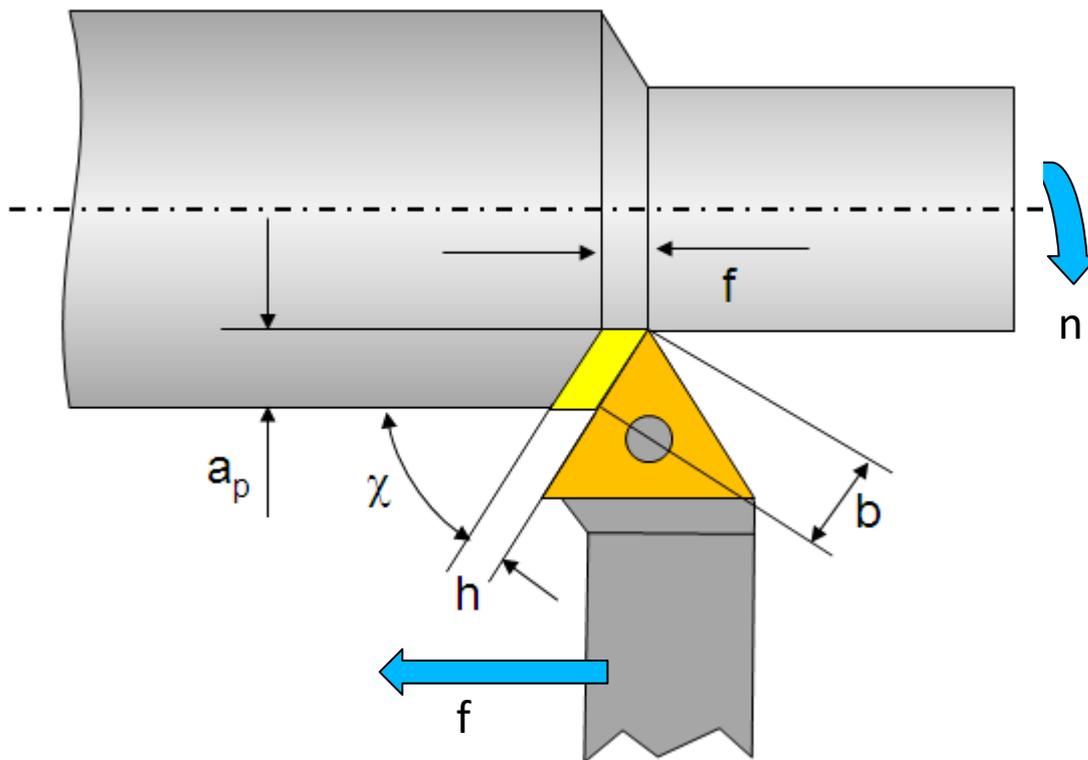
Velocidade de Corte (V_c)

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

- ⇒ V_c é um valor obtido experimentalmente
- ⇒ Na verdade, está relacionada com a taxa de deformação
- ⇒ Valores encontrados em tabelas também são função da vida da ferramenta.
- ⇒ V_c ainda depende da máquina-ferramenta, da geometria da peça, do tipo de dispositivo de fixação e da experiência do operador, ferramentas de corte utilizadas



Grandezas do processo de usinagem

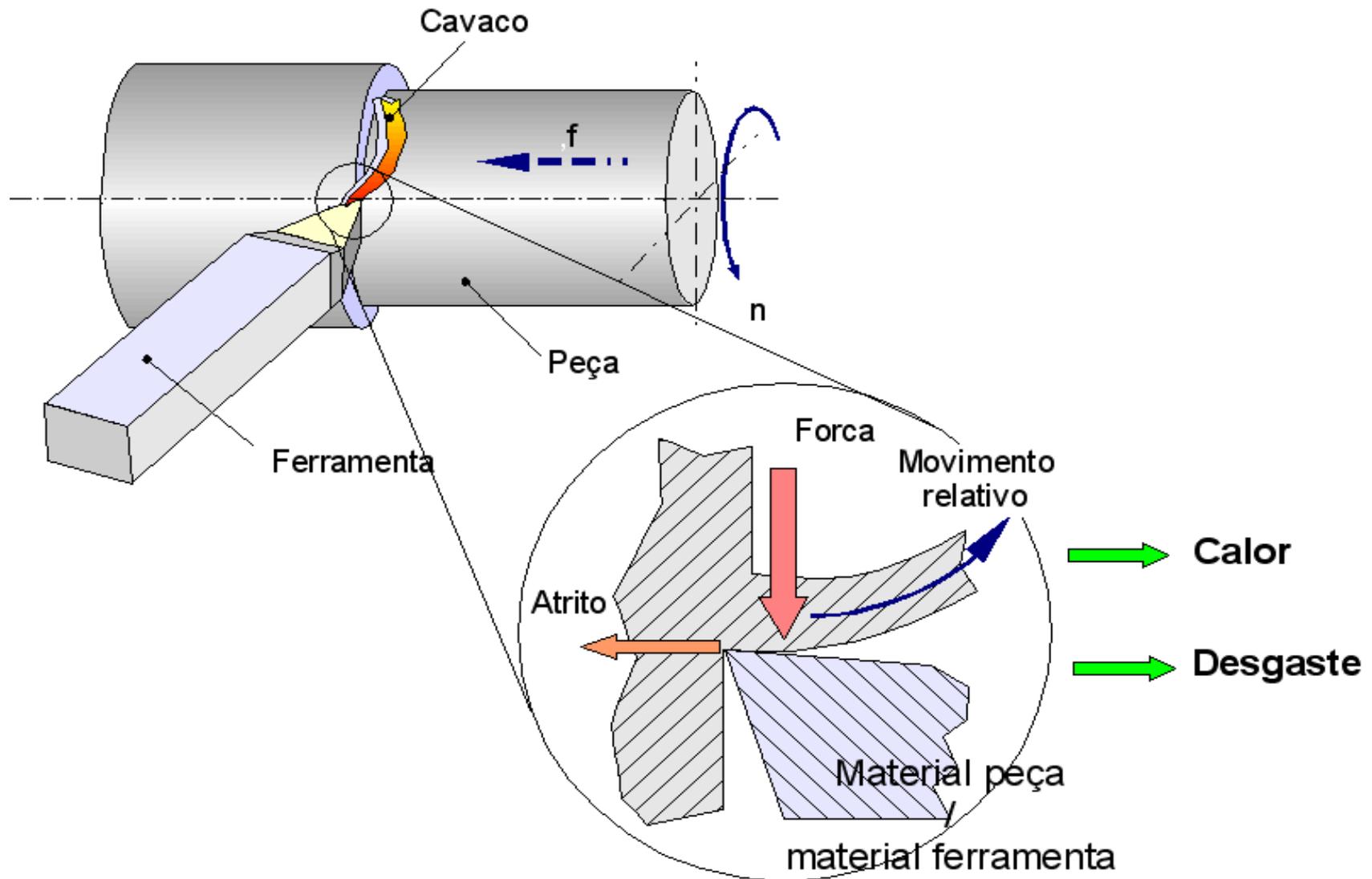


Onde:

- a_p – profundidade de corte
- f – avanço por revolução
- b – largura de usinagem
- h – espessura de usinagem
- Seção de usinagem $a_p * f$
- Seção de usinagem $b * h$

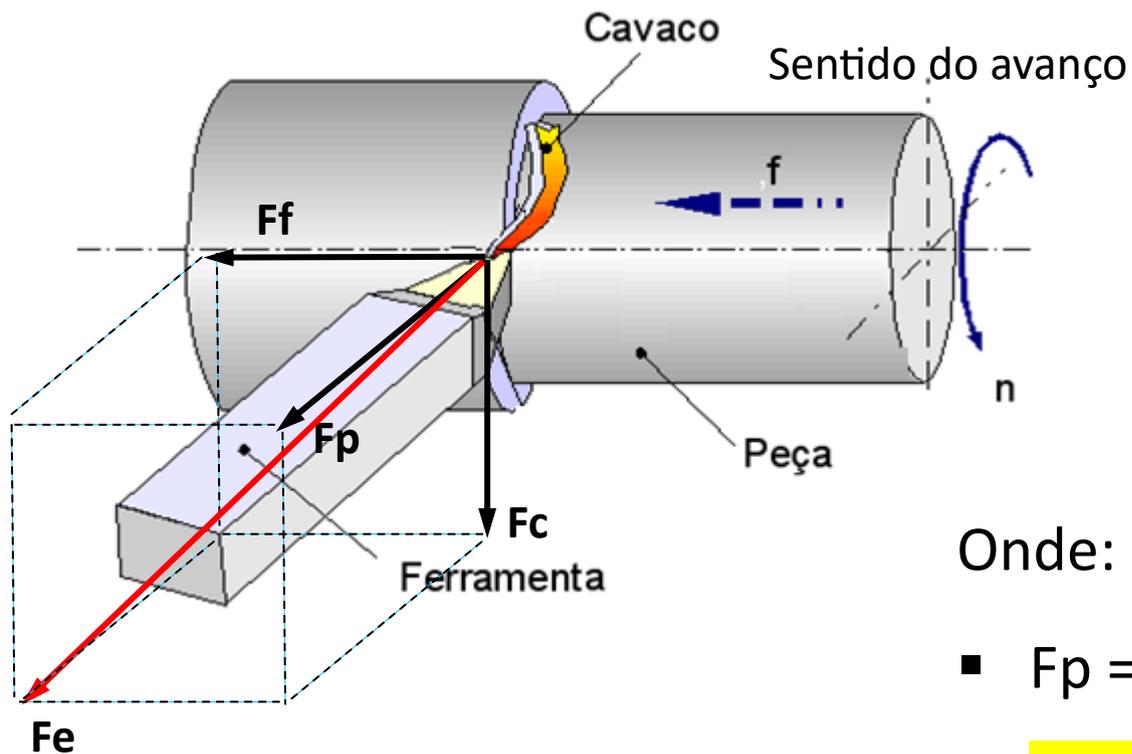


Esforços na Ferramenta





Forças de usinagem



Onde:

- F_p = Forças passiva
- F_c = Forças de corte
- F_f = Forças de avanço
- F_u = Força efetiva de usinagem



Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem

MEDIÇÃO DE ESFORÇOS DE USINAGEM

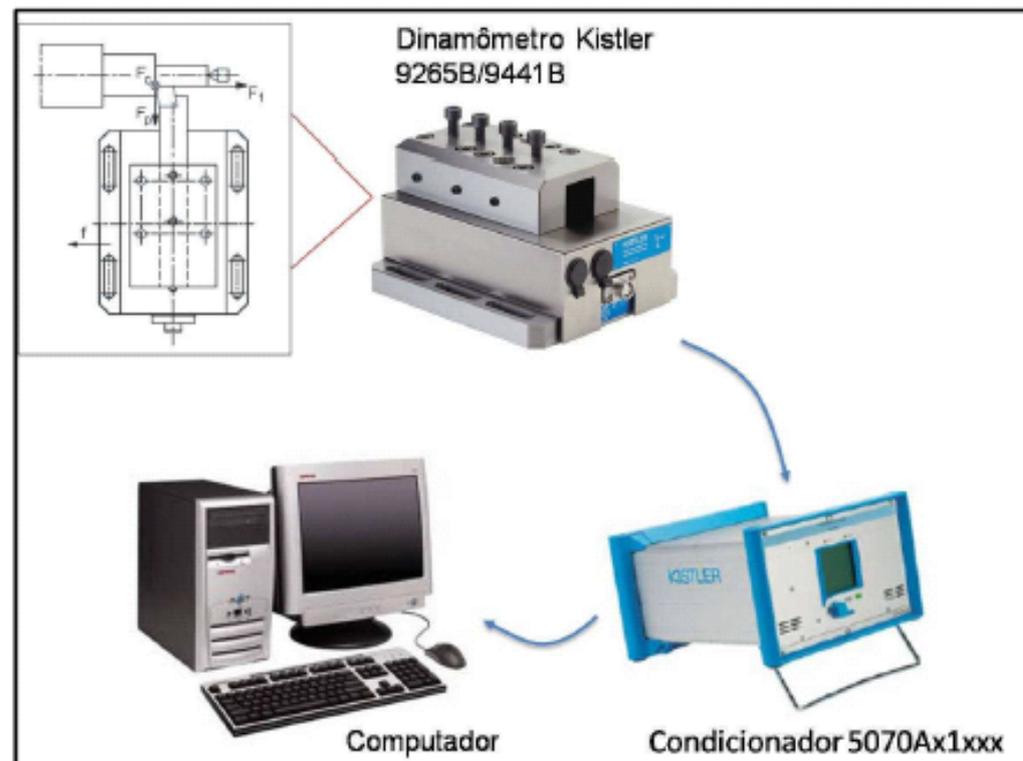


Figura 36 – Montagem do sistema de aquisição de força de usinagem.

Forças de Usinagem (força de corte, avanço e passiva).

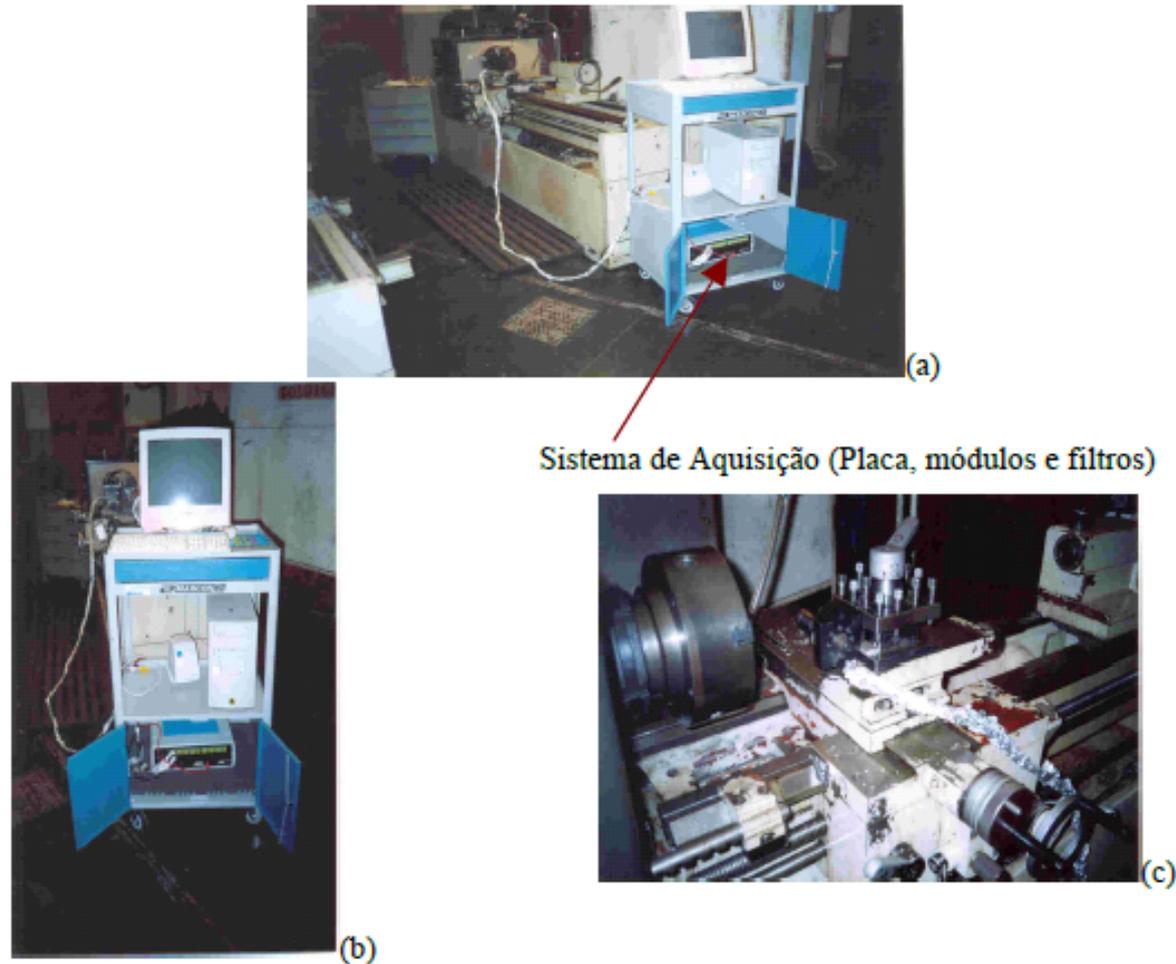


Figura 12. Conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte. (a) Dispositivo para medir força de corte (porta-ferramentas instrumentado), sistema de aquisição e microcomputador utilizado nos ensaios de usinagem. (b) Sistema de aquisição ligado a microcomputador no carrinho. (c) Porta-ferramentas instrumentado montado no torno mecânico.

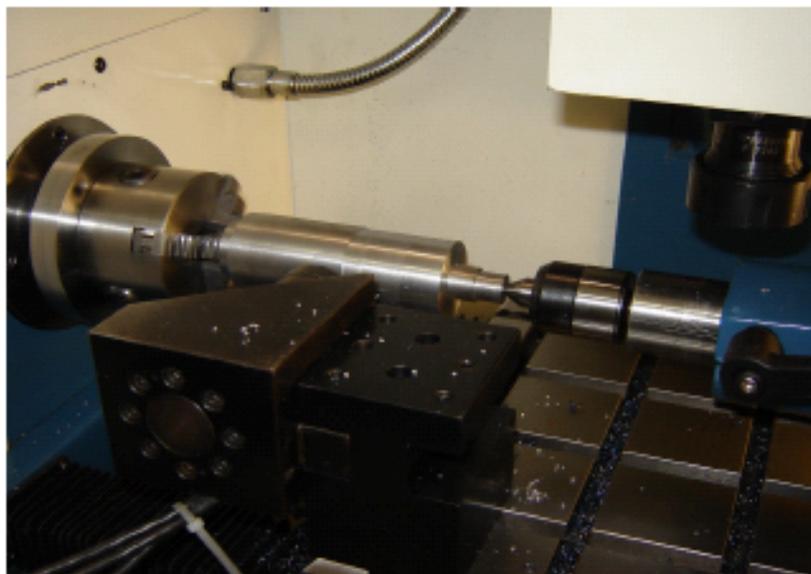
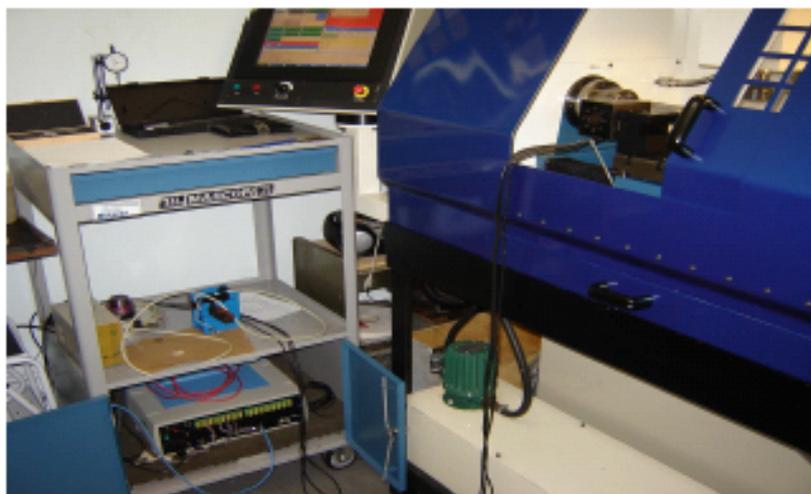
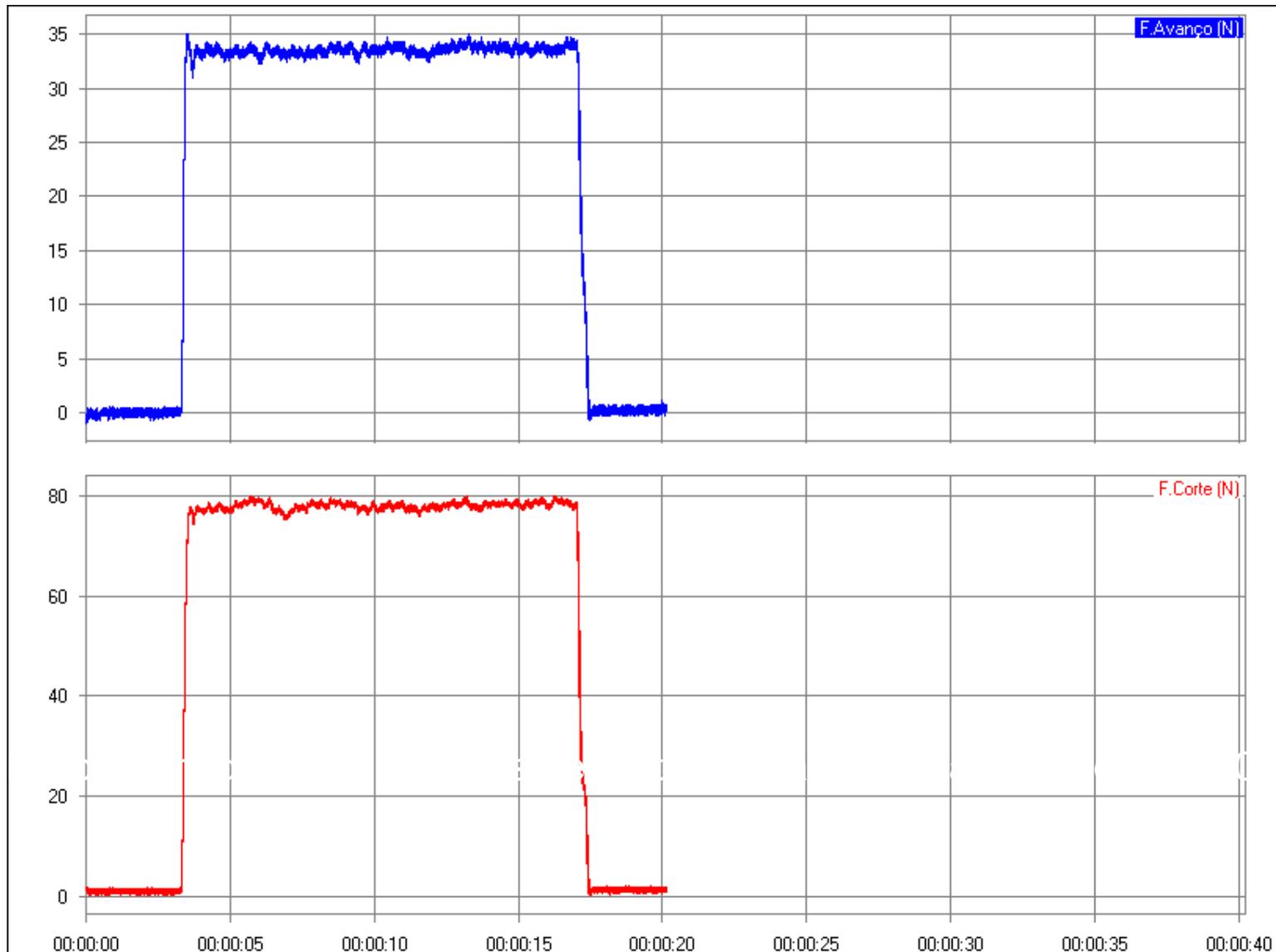


Figura 13. Conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte. (a) Sistema de aquisição ligado a microcomputador no carrinho. (b) Mini torno-fresadora.



Forças de Usinagem (força de corte e avanço)



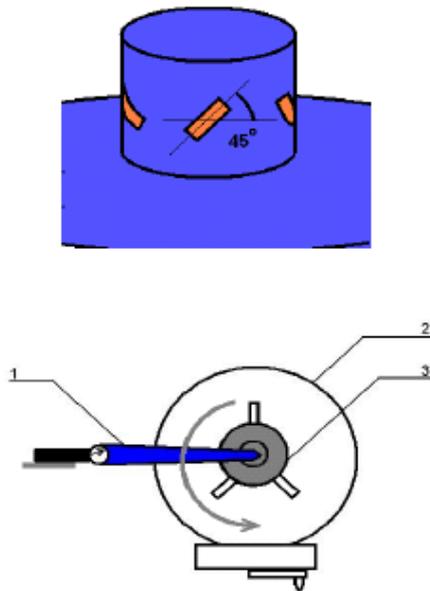


Figura 16. Sistema para calibração do dispositivo para medir esforços de τ é o torquímetro, (2) é a base do dispositivo presa em um divisor (utilizado fresamento) e (3) sistema para fixação dos corpos-de-prova.



Figura 17. Detalhe dos extensômetros no dispositivo de ensaio.

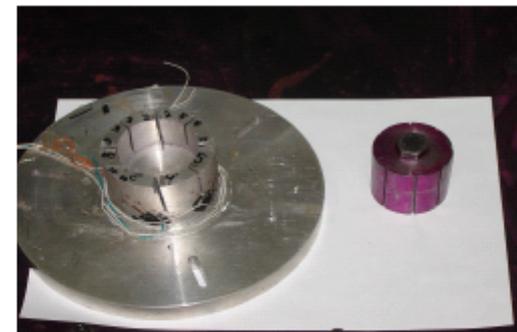


Figura 18. Dispositivo para medir momento torçor durante o processo de furação e corpo-de prova.



Parâmetros que influenciam na Força de Usinagem

Material da peça (propriedades e comportamento mecânico)

Geometria do corte (ortogonal ou oblíquo, seção de corte, geometria da ferramentas, ângulo de posição, ângulo de saída e de folga)

Estado de afiação da ferramenta (material da ferramenta: tenacidade; recobrimento: atrito, desgaste; transferência de calor)



Ks é a pressão específica de corte

$$K_s = F_c / a_p * f \text{ (no corte ortogonal)}$$

a_p = largura do corte (b) onde

$$b = a_p / \sin(\chi)$$

f está relacionado com a espessura de corte (h) onde

$$h = f \sin(\chi)$$



Ks é a pressão específica de corte

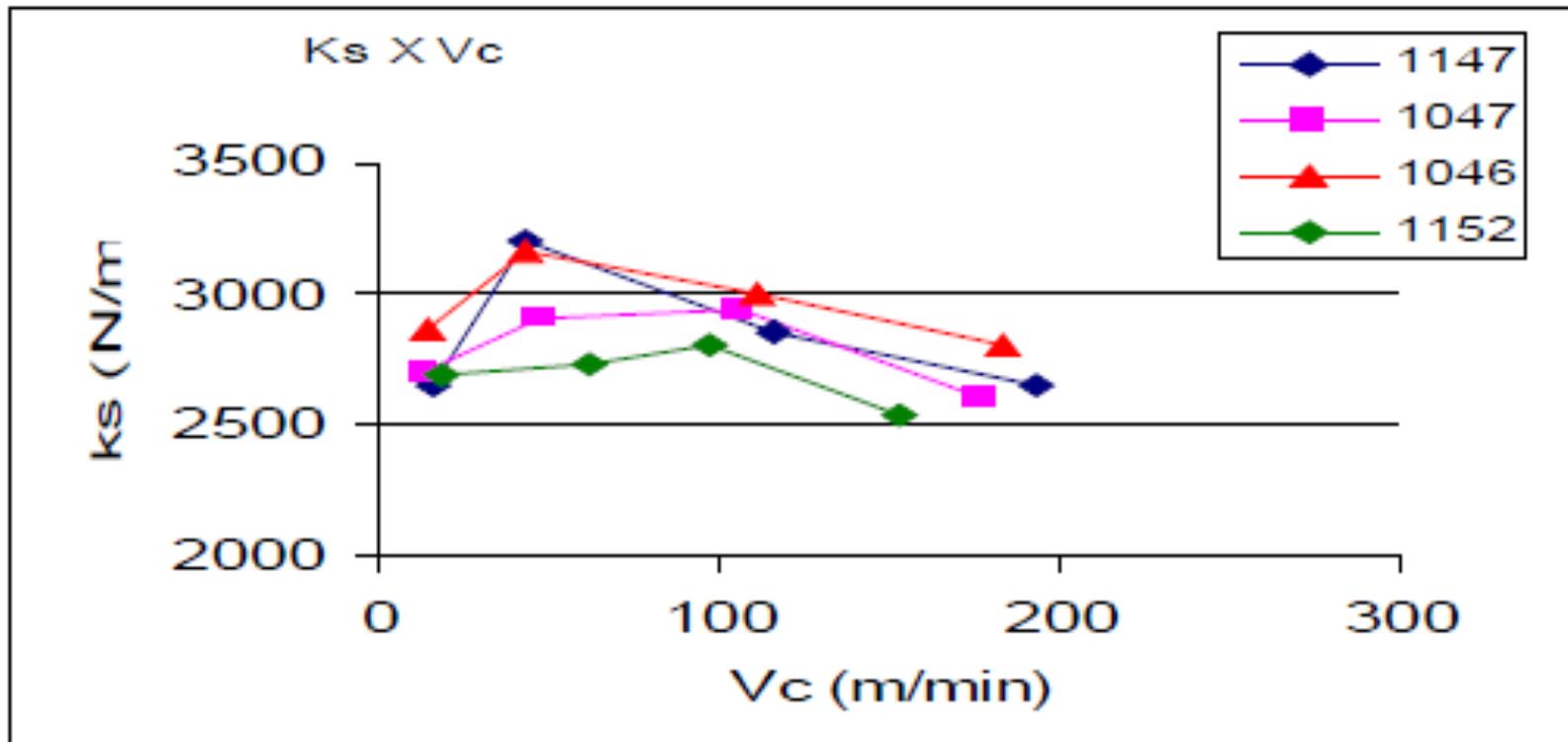


Figura 52. k_s , N/mm^2 , pressão específica de corte, em função da velocidade de corte (V_c , velocidade de corte em m/min).



Cálculo de k_s com base na literatura

Dino Ferraresi - Fundamentos da Usinagem dos Metais

ASME — *A American Society of Mechanical Engineers* apresenta no *Manual on Cutting of Metals* [12] várias tabelas da velocidade e da potência de corte (por unidade de volume de cavaco e por minuto) para diferentes materiais e diferentes ferramentas. Calculando-se o valor de k_s através destes dados, verifica-se que o mesmo obedece a fórmula geral:

$$k_s = \frac{C_a}{a^n}, \quad (5.24)$$

onde:

C_a = constante do material

a = avanço

n = 0,2 para aços

= 0,3 para ferro fundido.

Nesta fórmula figura somente o valor de a como variável, devido o fato de ser este o elemento que mais influi no valor de k_s .



Cálculo de ks com base na literatura

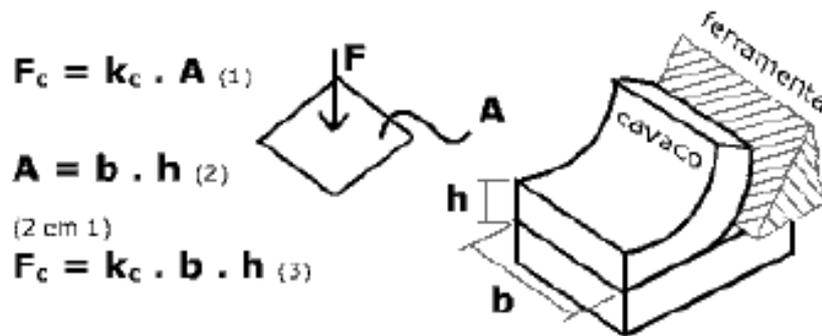
Material	Dureza Brinell	C _s ²	C _w ³
<i>Aços de construção</i>			
SAE 1020 e 1025 ou St 37.11 e 42.11	127	182	120
SAE X 1020 — EF ⁴	156	190	—
SAE 1035 ou St 50.11	174	201	140
SAE 1045 ou St 60.11	187	215	145
SAE 1050 — LQ	201	224	—
SAE 1060 ou St 70.11	217	245	150
SAE 1095 ou St 85	280	280	160
<i>Aços de corte fácil</i>			
SAE 1112 — LQ, B	130	104	—
SAE 1112 — EF, B	167	125	—
SAE X 1112 — EF	183	125	—
<i>Aços manganês</i>			
SAE X 1315 — LQ	120	108	—
SAE X 1315 — EF	161	105	—
SAE T 1340 — LQ	217	240	—
<i>Aços níquel</i>			
SAE 2315 — N	192	182	—
SAE 2330 — EF	223	202	—
SAE 2340 — N	223	202	—
SAE 2512 — N	—	182	—
<i>Aços cromo-níquel</i>			
SAE 3115 — N	128	132	—
SAE 3115 — EF	163	138	—
SAE 3130 — EF	210	197	—
SAE 3140 — T	285	228	—
SAE 3140 — R	207	178	—
SAE 3240 — R	170	145	—
<i>Aços molibdênio</i>			
SAE 4340 — T	400	310	—
SAE 4340 — R	302	233	—
SAE 4310	415	304	—
SAE 4615 — EF	212	182	—
SAE 4815 — N	187	175	—
SAE 4640 — N	248	197	—
<i>Aços cromo</i>			
SAE 5120 — N	149	155	—
SAE 5135 — R	207	172	—
SAE 52100 — R	187	185	—

Material	Dureza Brinell	C _s ²	C _w ³
<i>Aços cromo vanádio mang.</i>			
SAE 6115 — N	170	182	—
SAE 6140 — R	187	240	—
<i>Aços liga alemães</i>			
Aço Liga 70/85	—	—	160
Aço Liga 100/140 e inox.	—	—	180
Aço Liga 140/180	—	—	195
<i>Ferro fundido</i>			
Fofo mole	126	60	—
Fofo médio	181	122	—
Fofo duro	241	142	—
Ge 12.91 e 14.91	—	—	64
Ge 18.91 e 26.91	200-250	—	94
Fofo esferoidal	—	127	—
Fofo esferoidal (trat.)	—	114	—
Fofo acicular	263	142	—
Fofo ligado	250-400	—	110
<i>Aço fundido</i>			
Aço fundido mole	—	—	110
Aço fundido médio	—	—	120
<i>Não-ferrosos</i>			
Latão	—	—	54
Cobre	—	—	72
Alumínio puro	—	—	36
Liga magnésio	—	—	20
Liga AL c/ Si	5	—	46
Al fundido	5	—	46
<i>Plásticos</i>			
Borracha dura, Ebonite	—	—	15,5
Bakelite, Pertinax	—	—	16,2

ASME (pg 175 Ferraresi)



Cálculo de ks com base na literatura



F_c : força de corte [N]

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

A : seção de usinagem [mm^2]

b : comprimento do gume ativo [mm]

h : espessura do cavaco [mm]

KIENZLE propõe uma formulação semelhante. A constante $k_{c1.1}$ e o expoente (1-mc) são determinados experim

$k_c = k_{c1.1} \cdot h^{-mc}$ (4)

$F_c = k_c \cdot b \cdot h$ (3)

(4 em 3)

$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc}$ (5) Fonte: STEMMER, 1995 - Tabela VIII.3

Aço (ABNT)	σ_r [MPa]	$k_{c1.1}$	1-mc
1020	500	1800	0,83
1030/1035	520	1990	0,74
1040/1045	620	2110	0,83
1060	770	2130	0,82

$k_{c1.1}$: pressão específica de corte [N/mm^2] para um cavaco de seção 1 mm x 1 mm
(1-mc) : expoente de Kienzle



Equação de Kienzle

Função das características do material;

Função da seção de corte

$$F_c = b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{c1.1}$$

Onde:

F_c = força de corte [N];

b = largura de usinagem [mm];

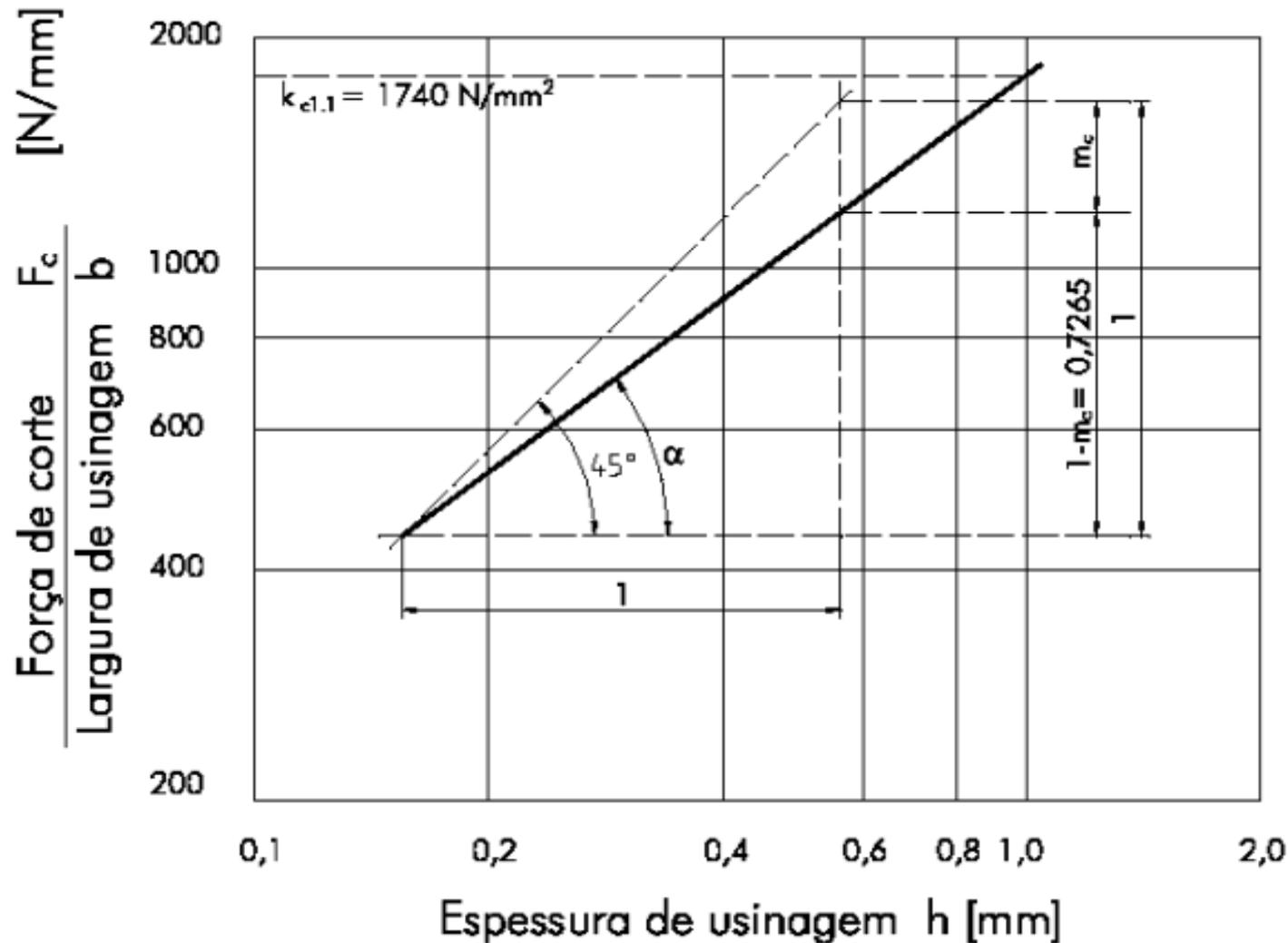
h = espessura de corte [mm];

$k_{c1.1}$ = pressão específica de corte para um cavaco de 1x1 mm² [N/mm²];

$(1-m_c)$ = coeficiente angular da reta



Critério de força – Equação de Kienzle



$$F_c = b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{c1.1}$$



Cálculo de K_s - Keinzle

K_c é também conhecido por K_s , m_c é conhecido por z e $K_{c1.1}$ é também chamado de K_{s1} .

As condições ensaiadas por Keinzle foram $V_c=90$ a 120 m/min e h variando de $0,1$ a $1,4$ mm.

Ferramenta de metal duro, sem fluido de corte.



Cálculo de K_s - Keinzle

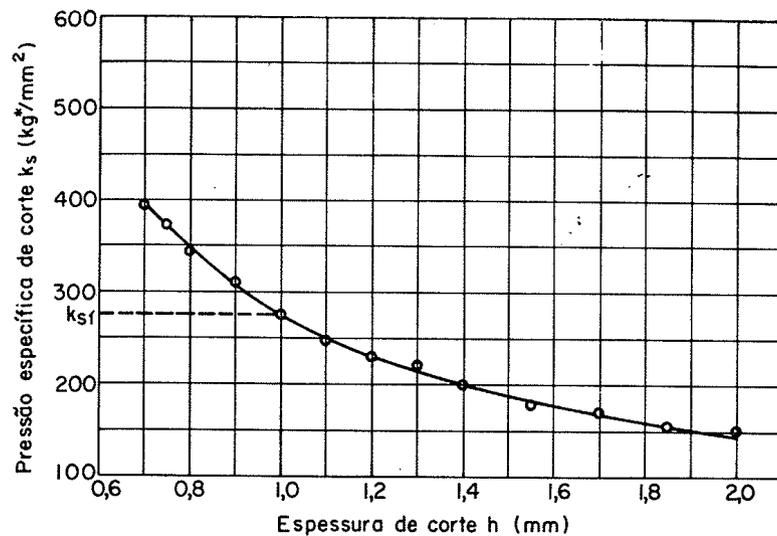


FIG. 5.32 — Variação da pressão específica de corte k_s em função da espessura de corte h .

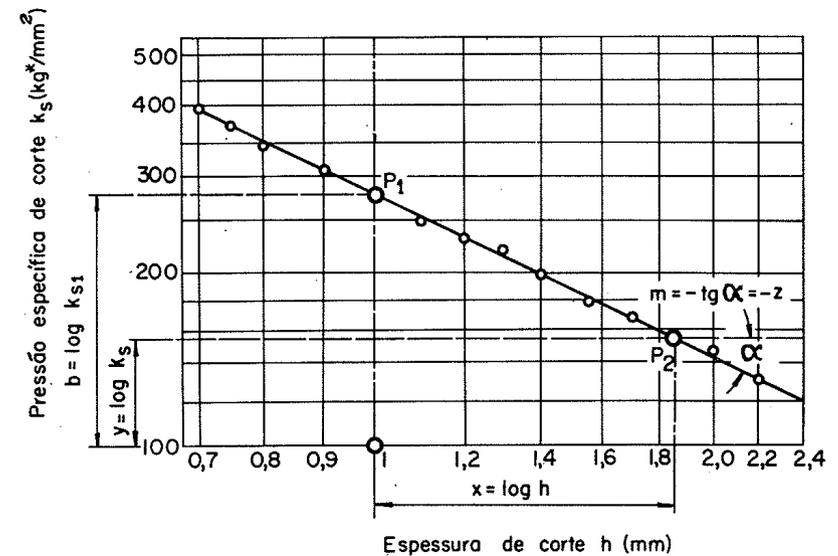


FIG. 5.33 — Representação em papel dilogarítmico da pressão específica de corte k_s em função de h .

$$\log k_s = \log k_{s1} - z \log h$$

onde z pode ser mc , conforme slide anterior



Cálculo de Ks - Keinzle

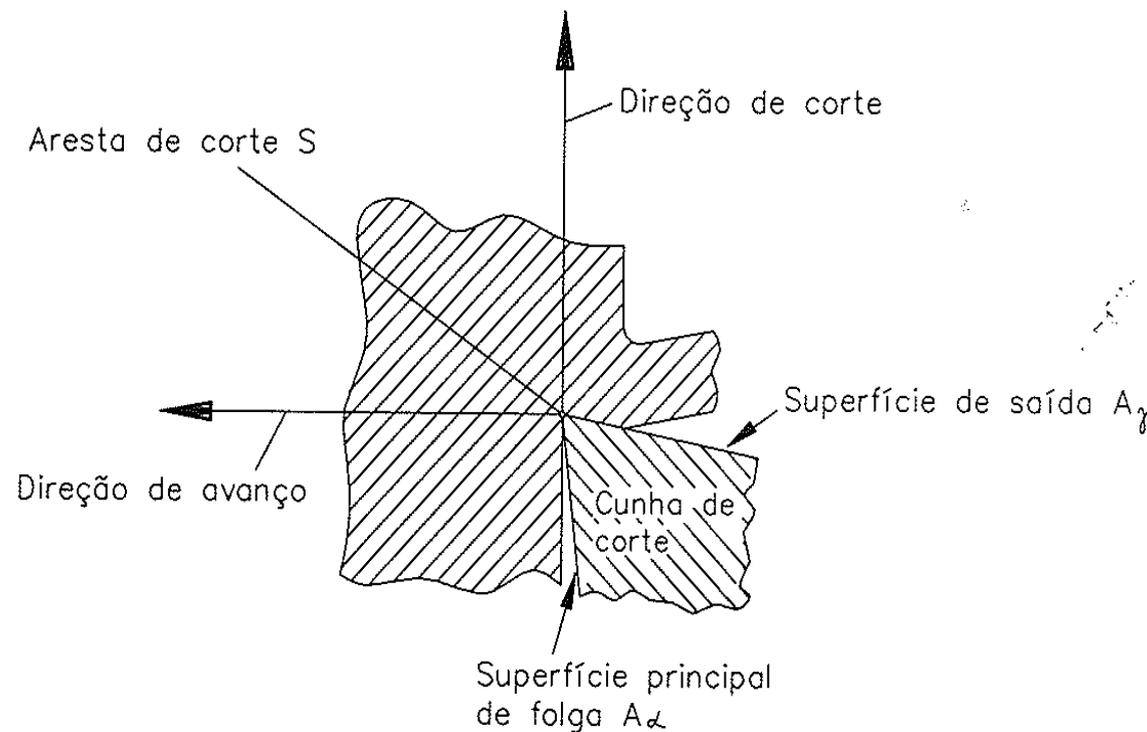
TABELA V.4

Constante específica de corte k_{s1} e coeficiente 1-z da fórmula de Keinzle para o torneamento de diferentes materiais [17]¹

Material ²	σ_t (kg/mm ²)	1-z	k_{s1}
St 50.11	52	0,74	199
St 60.11	62	0,83	211
St 70.11	72	0,70	226
Ck 45	67	0,86	222
Ck 60	77	0,82	213
16 MnCr 5	77	0,74	210
18 CrNi 6	63	0,70	226
42 CrMo 4	73	0,74	250
34 CrMo 4	60	0,79	224
50 Cr V4	60	0,74	222
55 NiCrMo V6 ⁴	94	0,76	174
55 NiCrMo V6 ⁵	HB = 352	0,76	192
EC Mo 80	59	0,83	229
Meehanite A	36	0,74	127
Ferro fundido duro	HR _c = 46	0,81	206
GG 26	HB = 200	0,74	116



Geometria

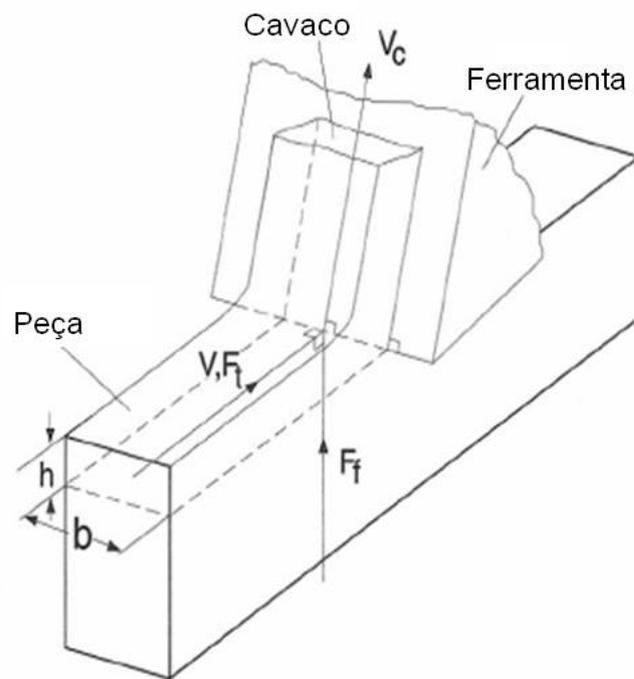


Plano da figura = Plano de trabalho

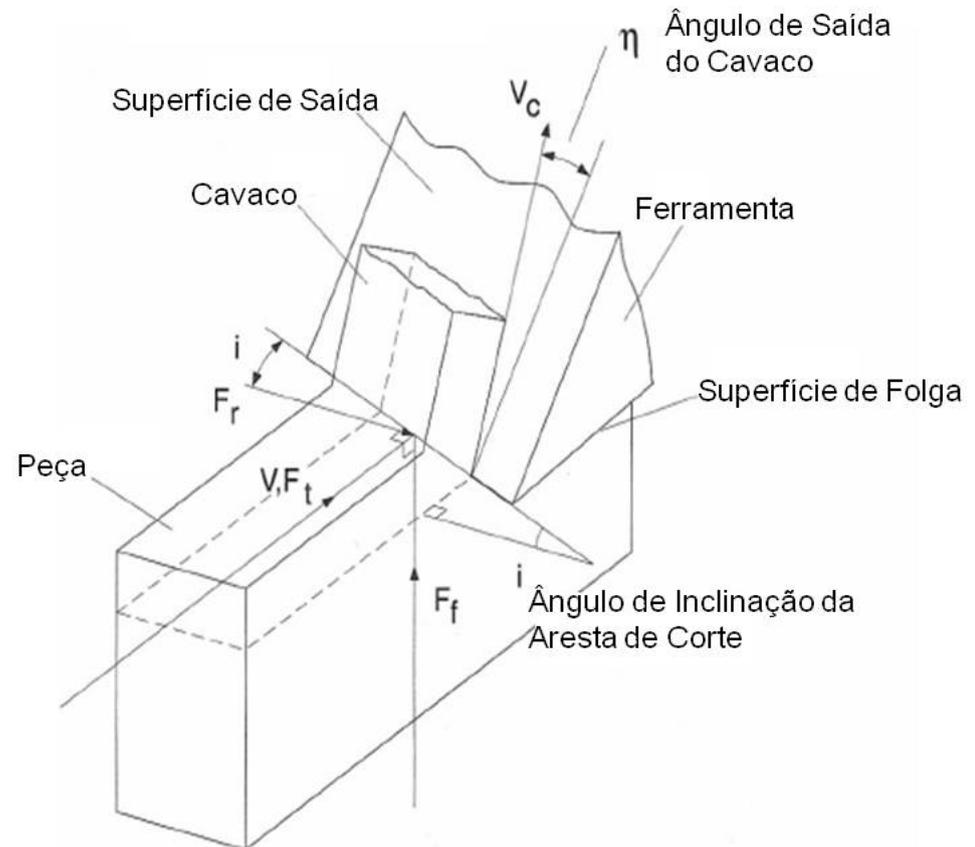
Cunha de Corte da Ferramenta.



Geometria do corte



a) Geometria de Corte Ortogonal



b) Geometria de Corte Oblíquo



Geometria e regiões de cisalhamento

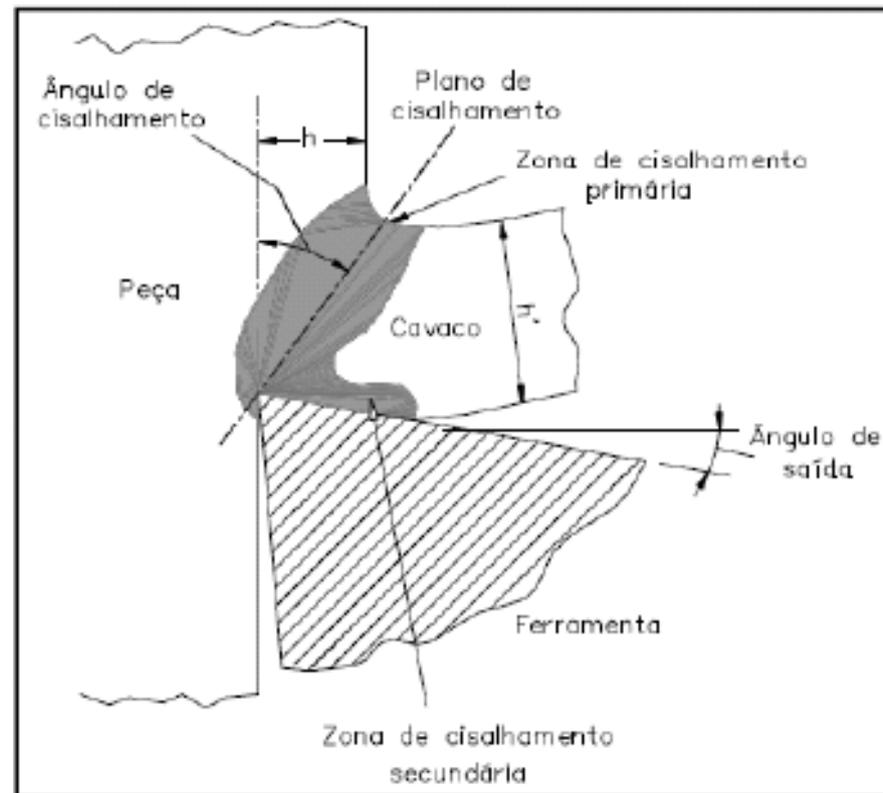
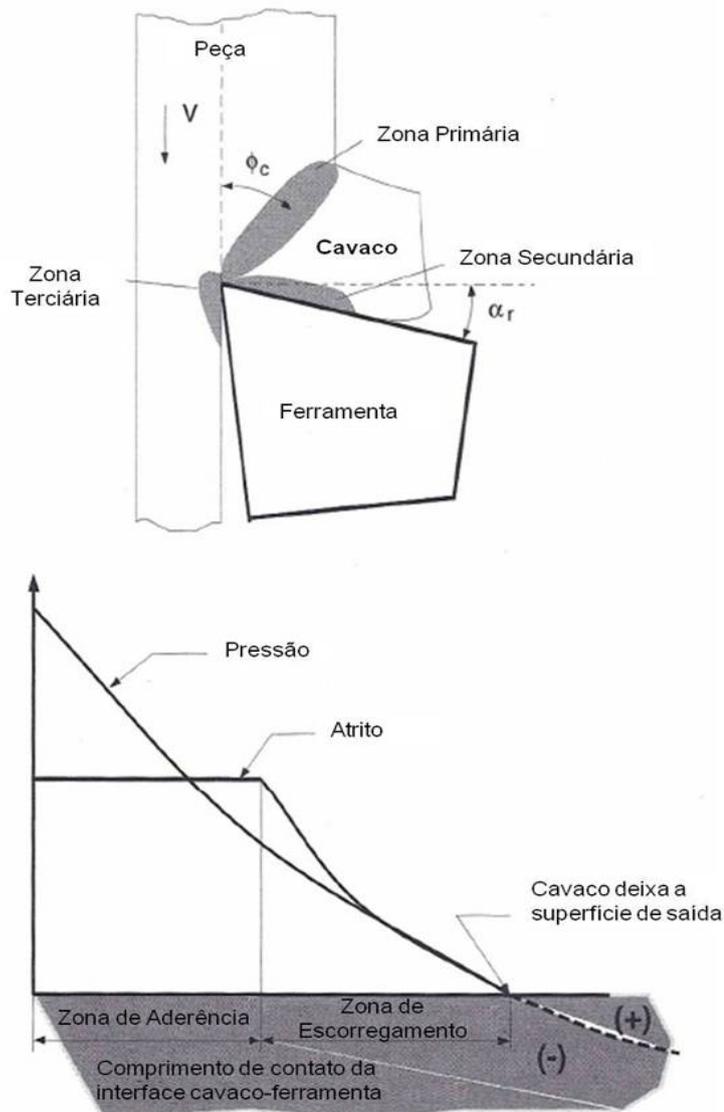


Figura 17 – Formação do cavaco e localização dos planos de cisalhamento primário e secundário (Machado et al., 2009).



Geometria e regiões de cisalhamento



(a) Esquema ferramenta e formação de cavaco no processo usinagem por torneamento. Principais áreas de interesse na usinagem 1- zona primária: está relacionada com o ângulo de cisalhamento, 2- zona secundária: com o ângulo de saída da ferramenta e 3- zona terciária: com o ângulo de folga.

(b) Distribuição de carga ao longo da superfície de saída. A ferramenta apresenta tensões compressivas na região de contato com o cavaco e trativas quando o cavaco deixa a ferramenta. (Adaptado de ALTINTAS, 2000).



Força de Usinagem

$$\epsilon = \frac{\Delta S}{\Delta y} = \frac{OA}{CD} = \frac{OD}{CD} + \frac{DA}{CD}$$

$$h = f \times \sin \chi_r$$

$$\tan \phi = \frac{\cos \gamma}{r_c - \sin \gamma}$$

$$\epsilon = \frac{\cos \gamma}{\sin \phi \cos (\phi - \gamma)}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta s}{\Delta y \Delta t} = \frac{V_s}{\Delta y} = \frac{\cos \gamma}{\cos (\phi - \gamma)} \times \frac{V_c}{\Delta y}$$

$$r_c = \frac{h'}{h}$$

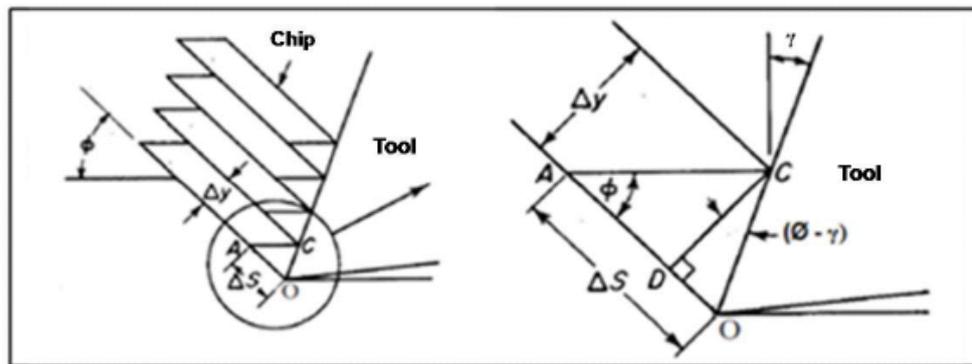


Fig. 2. "Piispanen deck cards" Strain Model [7].

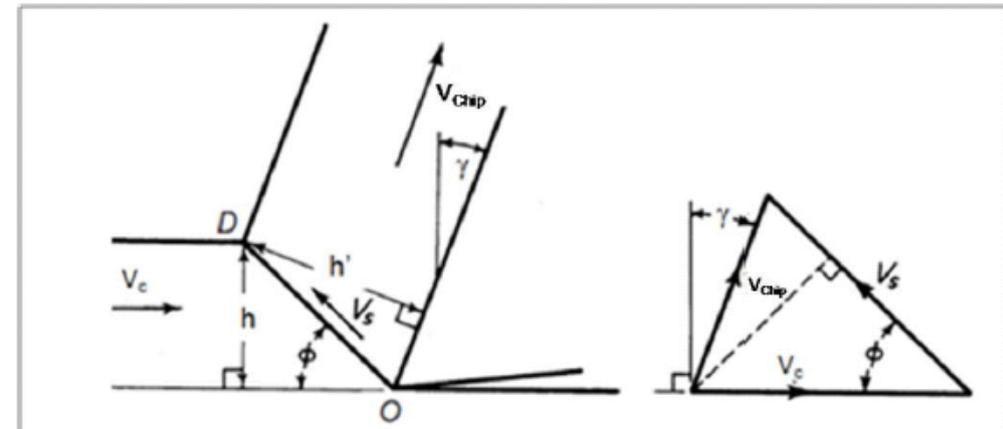
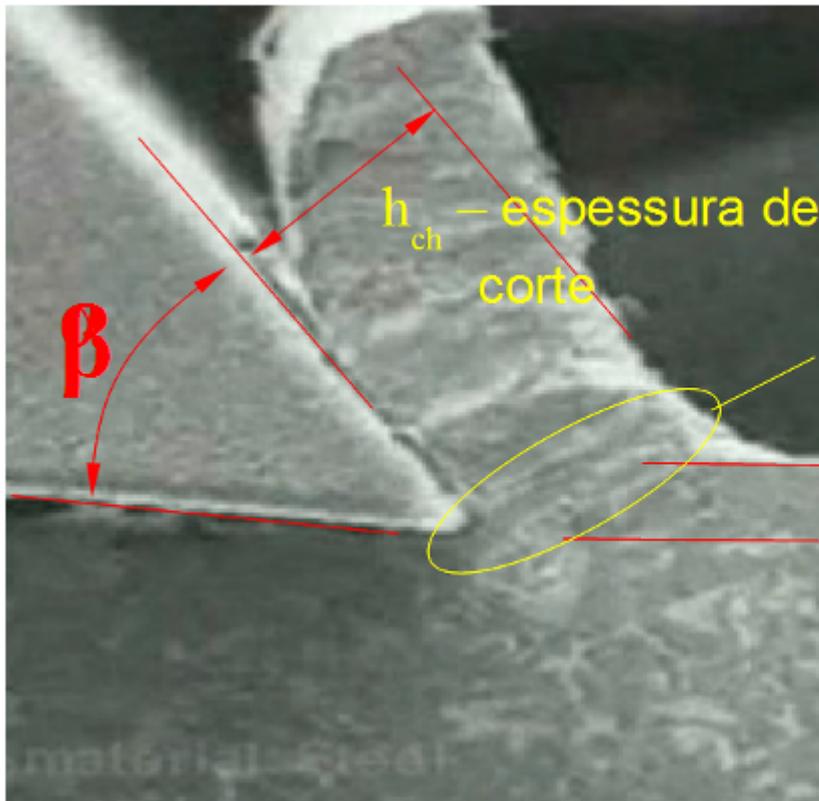


Fig. 3. Velocity relations [7].



Fator de recalque (deformação do cavaco)



$$\lambda = \frac{h_{ch}}{h} = \frac{l}{l'} \longrightarrow \lambda > 1$$

Plano de Cisalhamento

h – espessura de usinagem

Exemplos de valores para λ

COBRE $\Rightarrow \lambda = 7$ ($v_c = 69$ m/min; $f = 0,05$ mm; $a_p = 1,6$ mm; $\gamma = +0,5$)

AÇO (ABNT 1035) $\Rightarrow \lambda = 2,8$; Al $\Rightarrow \lambda = 2,5$; LATÃO $\Rightarrow \lambda = 1,8$



Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem

Tensão normal e no plano de cisalhamento

Velocidade de corte

Velocidade de cisalhamento

Potência de cisalhamento

Taxa de remoção de material

Adimensional térmico

Temperatura no plano de cisalhamento



Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem

Recalque ou relação de deformação do cavaco

Ângulo de cisalhamento

Ângulo de atrito

Coefficiente de atrito

Força de cisalhamento área do plano de cisalhamento

Tensão de cisalhamento

Força normal e no plano de cisalhamento



Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem

Força de atrito

Velocidade do cavaco

Potência de atrito

Comprimento de contato do cavaco

Pressão específica de corte

Relação entre forças de corte

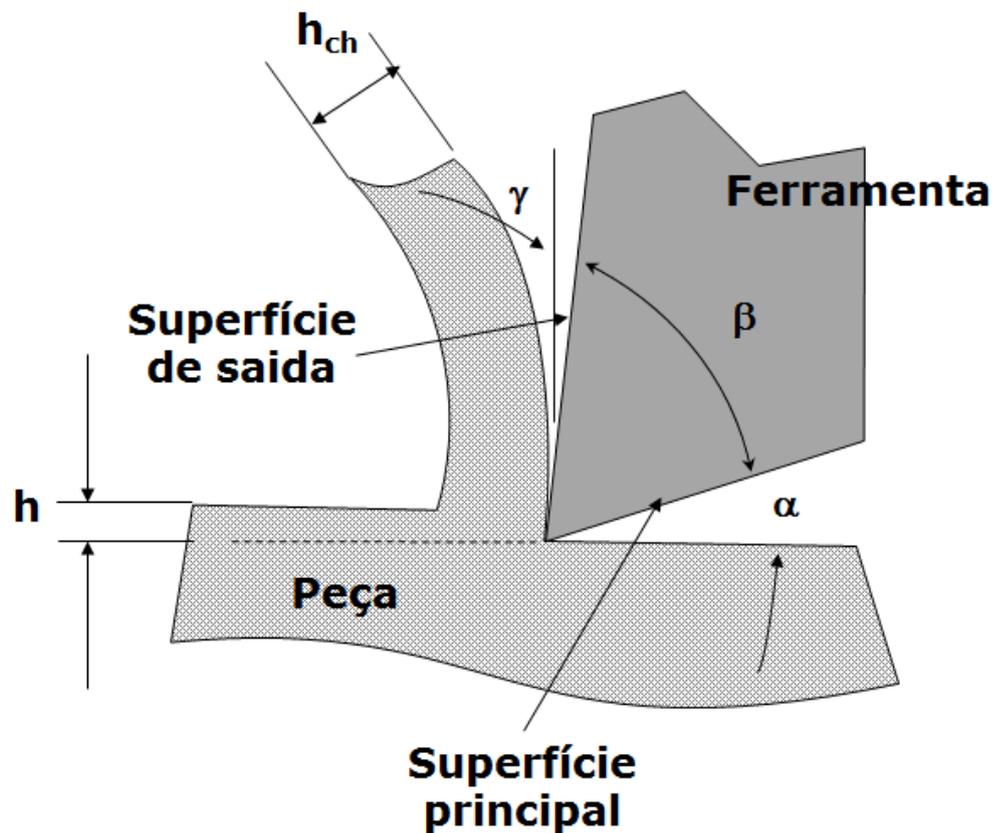


Example. The cutting conditions for turning an AISI-1045 steel workpiece are set as follows: depth of cut $b = 2.54$ mm; feed rate $c = 0.2$ mm/rev; spindle speed $n = 350$ rev/min; workpiece diameter = 100. mm; tool's rake angle $\alpha_r = +5^\circ$. Specific mass of the steel $\rho = 7,800$ kg/m³; specific heat coefficient of steel $c_s = 470$ Nm/kg°C; thermal conductivity $c_t = 28.74$ [W/m°C]. The following measurements are observed from the experiment: deformed chip thickness $h_c = 0.44$ mm, feed force $F_f = 600$ N, tangential force $F_t = 1,200$ N. Assuming that the turning is an orthogonal metal cutting process, the following values are evaluated:

Resultant cutting force	$F = \sqrt{F_t^2 + F_f^2} = 1342. \text{ N}$
Chip ratio	$r_c = \frac{h}{h_c} = 0.4545$
Shear angle	$\phi_c = \tan^{-1} \frac{r_c \cos \alpha_r}{1 - r_c \sin \alpha_r} = 25^\circ$
Friction angle	$\beta_a = \alpha_r + \tan^{-1} \frac{F_f}{F_t} = 31.6^\circ$
Friction coefficient	$\mu_a = \tan \beta_a = 0.6144$
Shearing force	$F_s = F \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) = 833.5 \text{ N}$
Shear plane area	$A_s = b \frac{h}{\sin \phi_c} = 1.2 \text{ mm}^2$
Shearing stress	$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = 693.4 \text{ MPa}$
Normal force on the shear plane	$F_n = F \sin(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) = 1051.7 \text{ N}$
Normal stress on the shear plane	$\sigma_s = \frac{F_n}{A_s} = 876.43 \text{ MPa}$
Cutting speed	$V = \pi Dn = 110 \text{ m/min}$
Shearing velocity	$V_s = V \frac{\cos \alpha_r}{\cos(\phi_c - \alpha_r)} = 116.6 \text{ m/min} = 1.9436 \text{ m/s}$
Shearing power	$P_s = F_s V_s = 1,620 \text{ W}$
Metal removal rate	$m_c = Q_c \rho = bhV\rho = 7.2644 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$
Nondimensional thermal number	$R_T = \frac{\rho c_s V h}{c_t} = 45.78, \quad R_T \tan \phi_c = 21.34 > 10$
Scale of heat conducted into work	$\lambda_s = 0.3 - 0.15 \log(R_T \tan \phi_c) = 0.1$
Shear plane temperature	$T_s = T_r + \lambda_h(1 - \lambda_s) \frac{P_s}{m_c c_s} = 20 + 299 = 319^\circ\text{C}$ ($\lambda_h \approx 0.7$)
Friction force	$F_u = F \sin \beta_a = 703.2 \text{ N}$
Normal force	$F_v = F \cos \beta_a = 1143 \text{ N}$
Chip velocity	$V_c = r_c V = 50 \text{ m/min} = 0.8333 \text{ m/s}$
Friction power	$P_u = F_u V_c = 586 \text{ W}$
Chip contact length	$l_t = \frac{h \sin(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)}{\sin \phi_c \cos \beta_a} = 0.435 \text{ mm}$
Total cutting power drawn	$P_t = P_u + P_s = 2,200 \text{ W}$
Specific cutting pressure	$K_t = \frac{F_t}{bh} = 2,362. \text{ N/mm}^2$
Cutting force ratio	$K_f = \frac{F_f}{F_t} = 0.5$



Formação do cavaco



Onde:

α = ângulo de incidência

β = ângulo de cunha

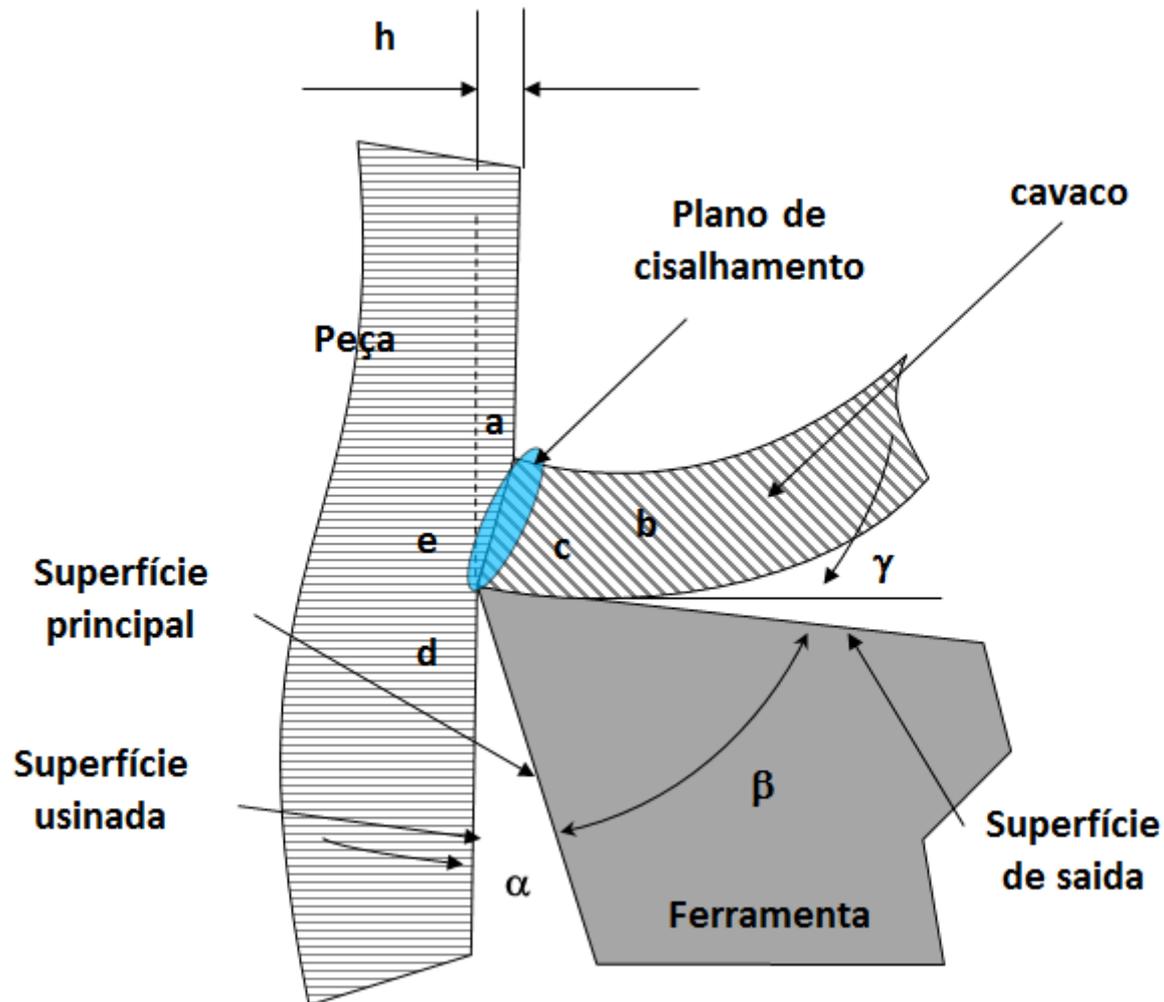
γ = ângulo de saída

h = espessura de usinagem
(antes da retirada do cavaco)

h_{ch} = espessura de corte
(depois da retirada do cavaco)



Regiões da formação do cavaco



Onde:

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

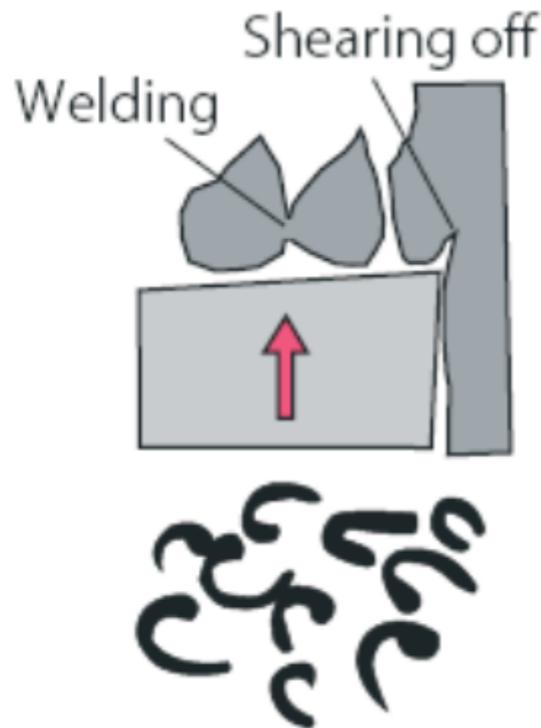


Tipos básicos de cavaco

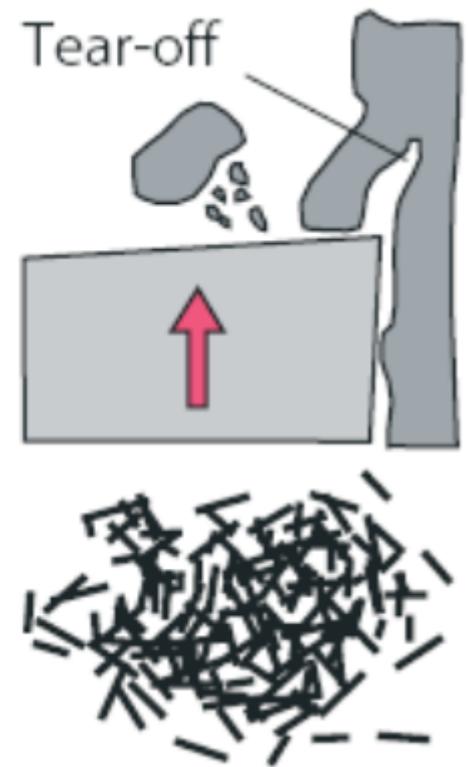
Contínuos



Lamelares

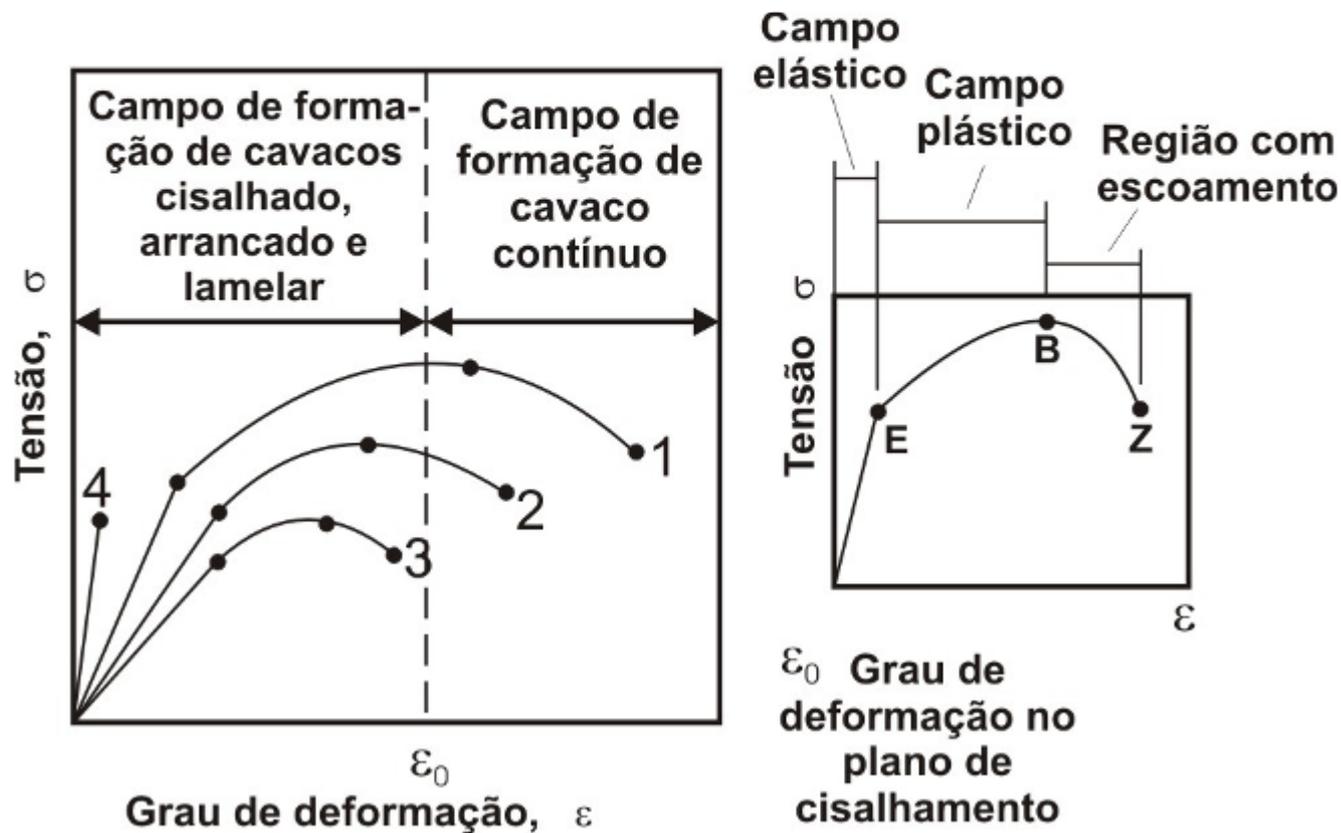
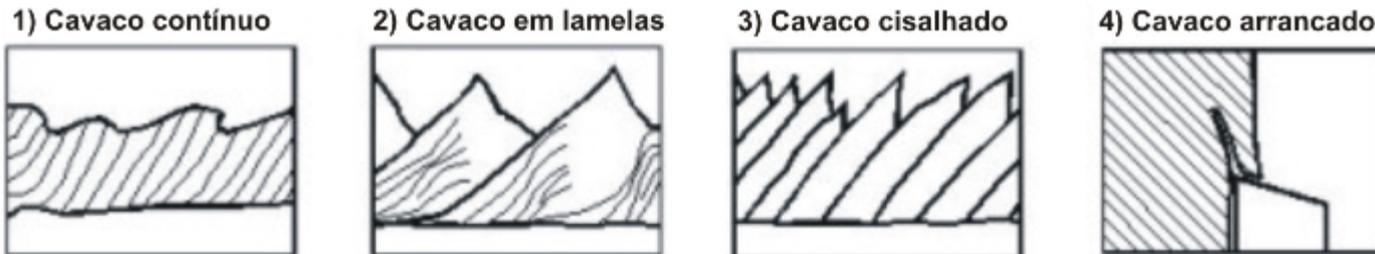


Arrancados
ou
cisalhados



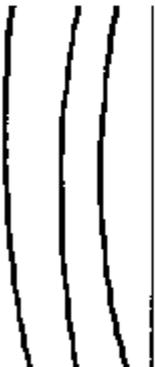


Relação ente propriedades dos materiais e cavaco





Classificação dos cavacos

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCADOS
									
desfavorável			médio		favorável			médio	



Formação de cavaco

4.5. FORMAS DE CAVACOS

Quanto à forma, os cavacos são classificados como:

- cavaco em fita.
- cavaco helicoidal.
- cavaco espiral.
- cavaco em lascas ou pedaços.

Entretanto, a norma ISO [17] faz uma classificação mais detalhada da forma dos cavacos, de acordo com a Figura 4.9.

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	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- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Figura 4.9. Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais [17].



Aumento de velocidade tende a levar a cavaco contínuo, mas o fator principal é o material da peça

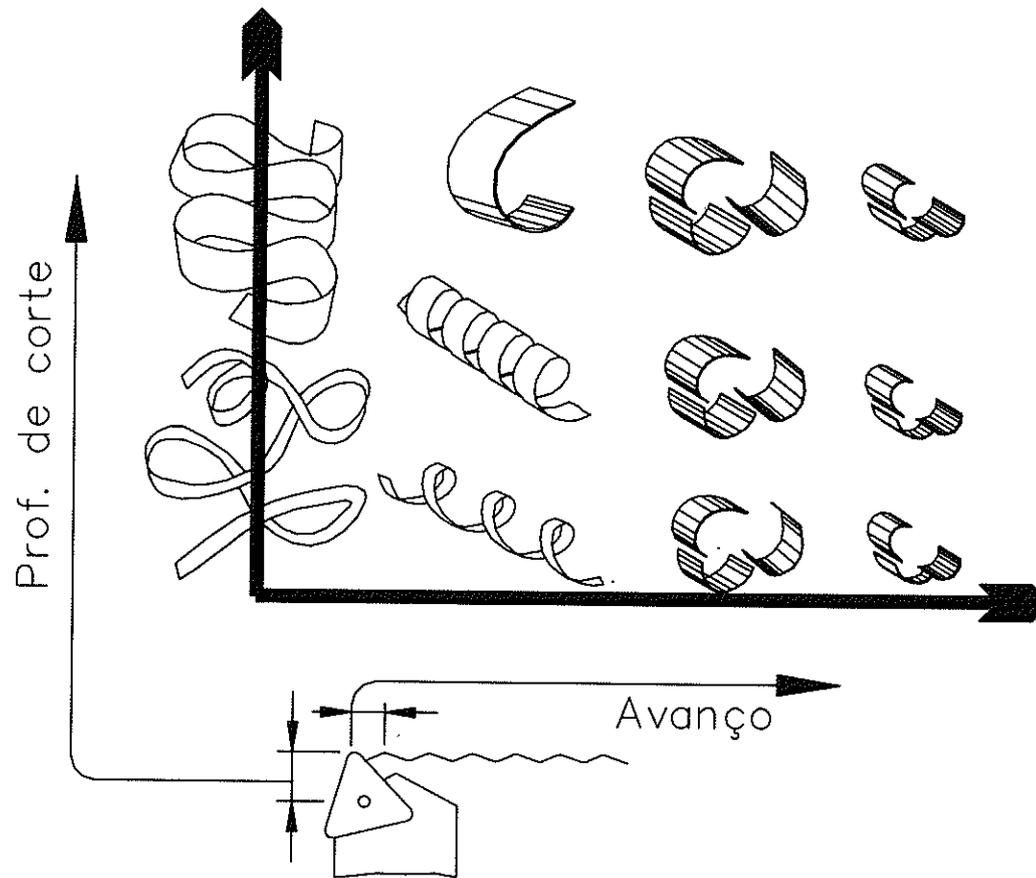


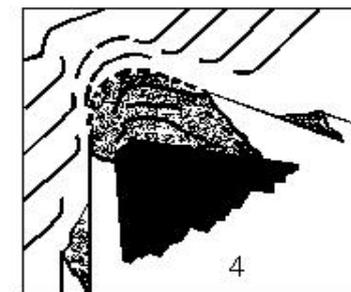
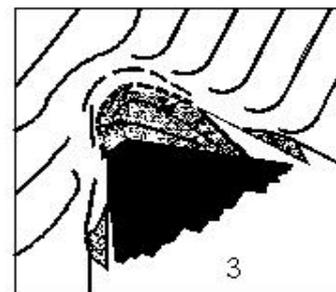
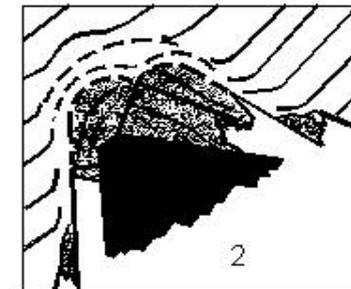
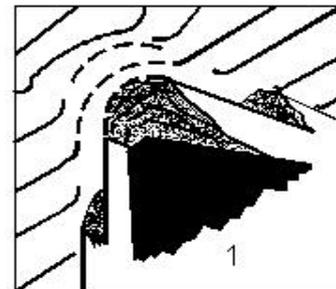
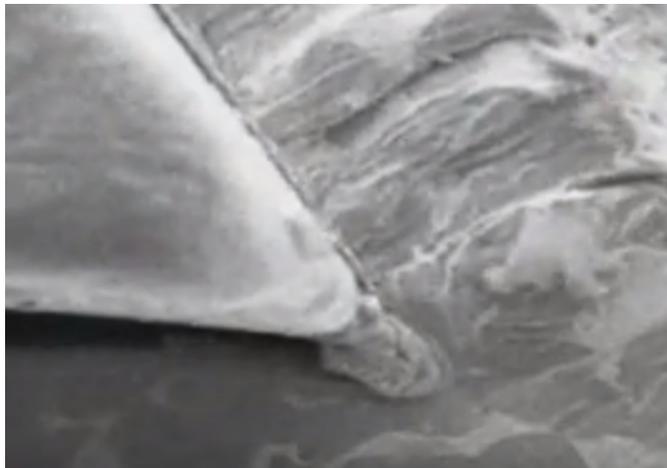
Figura 4.10. Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos [18].



Aresta postiça

Adesão de material sobre a face da ferramenta

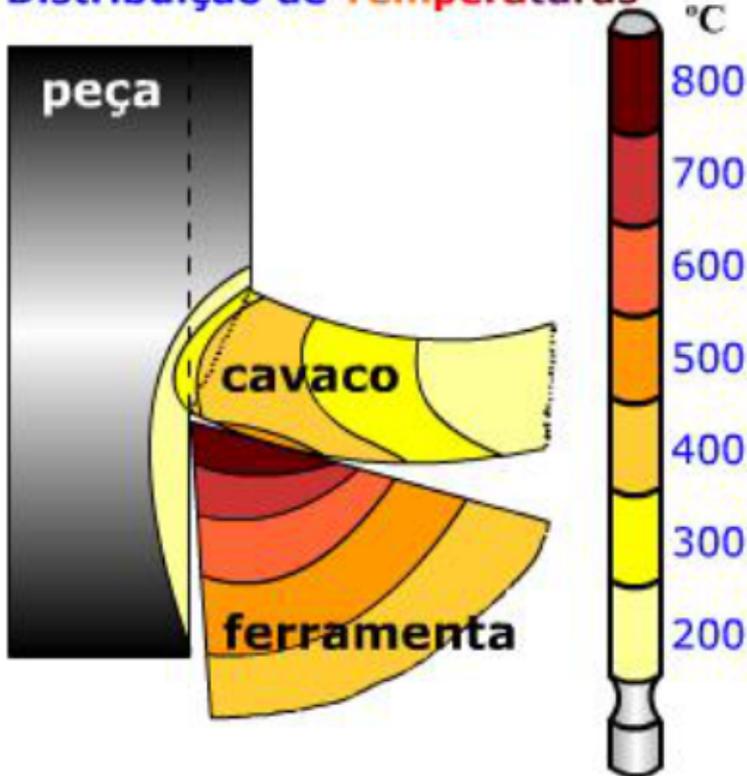
Material da peça altamente encruado que caldeia na face da ferramenta e assume a função de corte



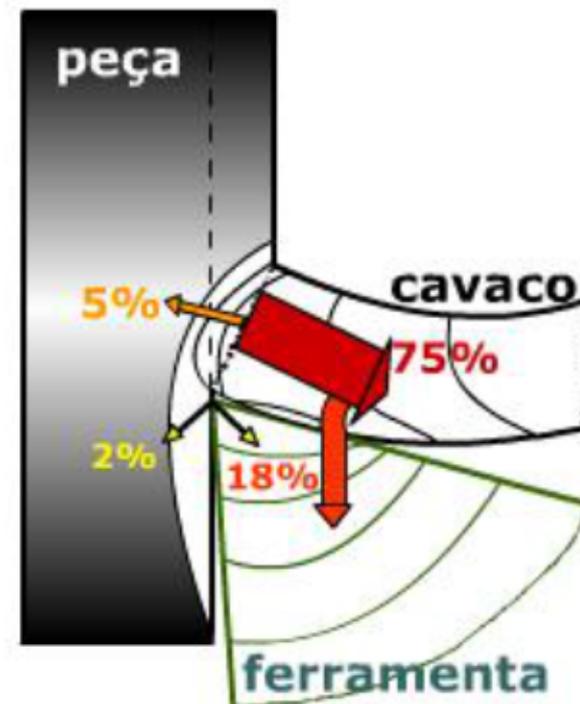


Distribuição de calor e temperatura no cavaco

Distribuição de **Temperaturas** °C



Distribuição do **CALOR** gerado





Escolha da geometria da ferramenta

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



Materiais de ferramentas de corte



<http://www.ls-carbide.com/Tungsten-Carbide-Tools.html>



Geometria e arestas de corte

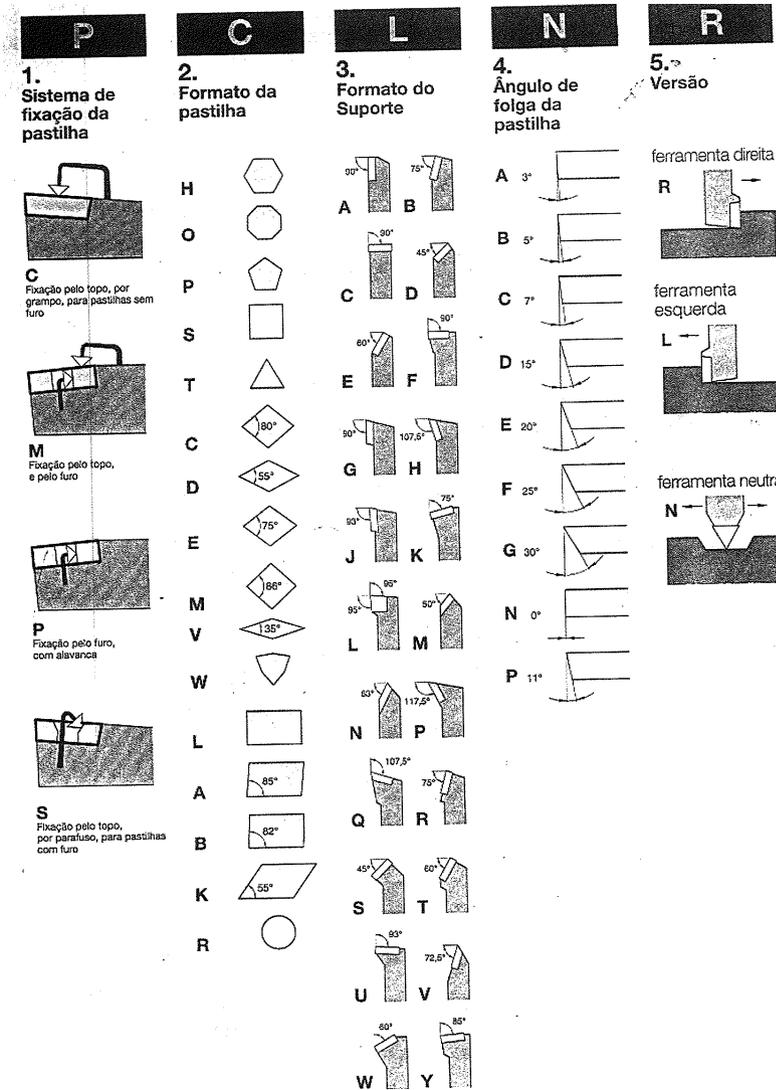


Figura 10.23 Designação ISO dos suportes de ferramentas de barras (Kennametal Hertel, 1998).



Geometria e arestas de corte

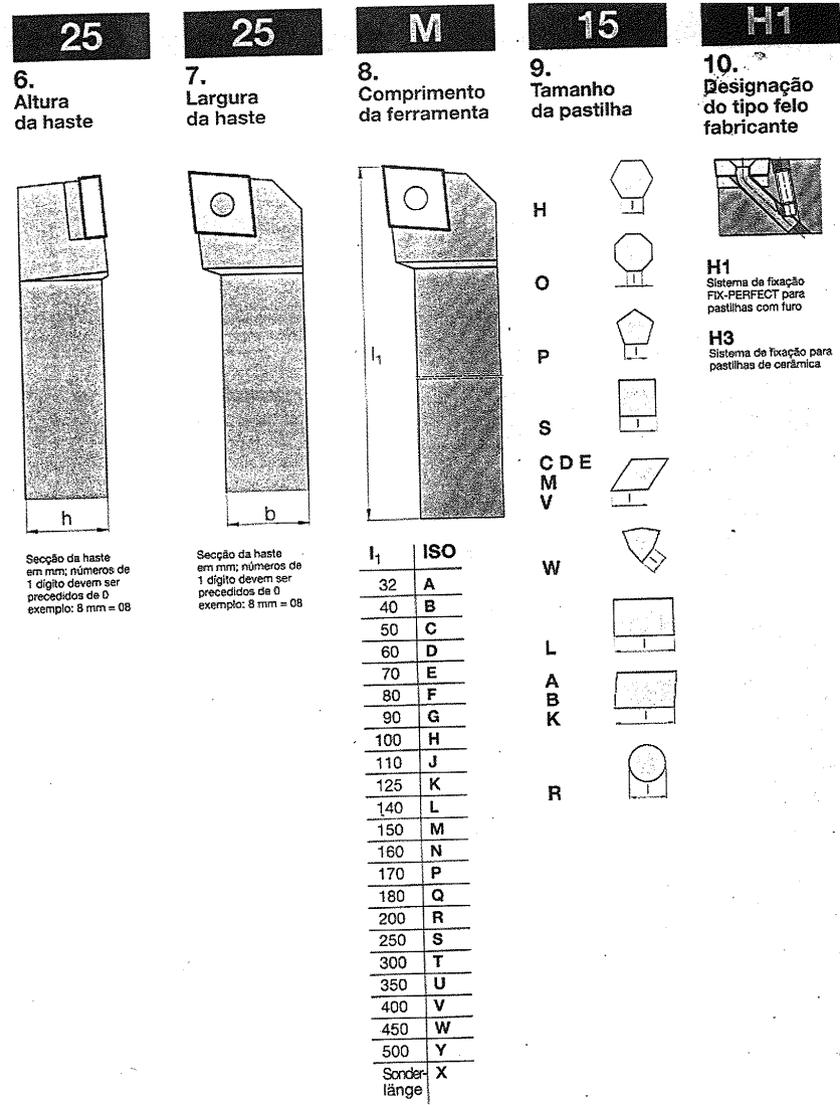
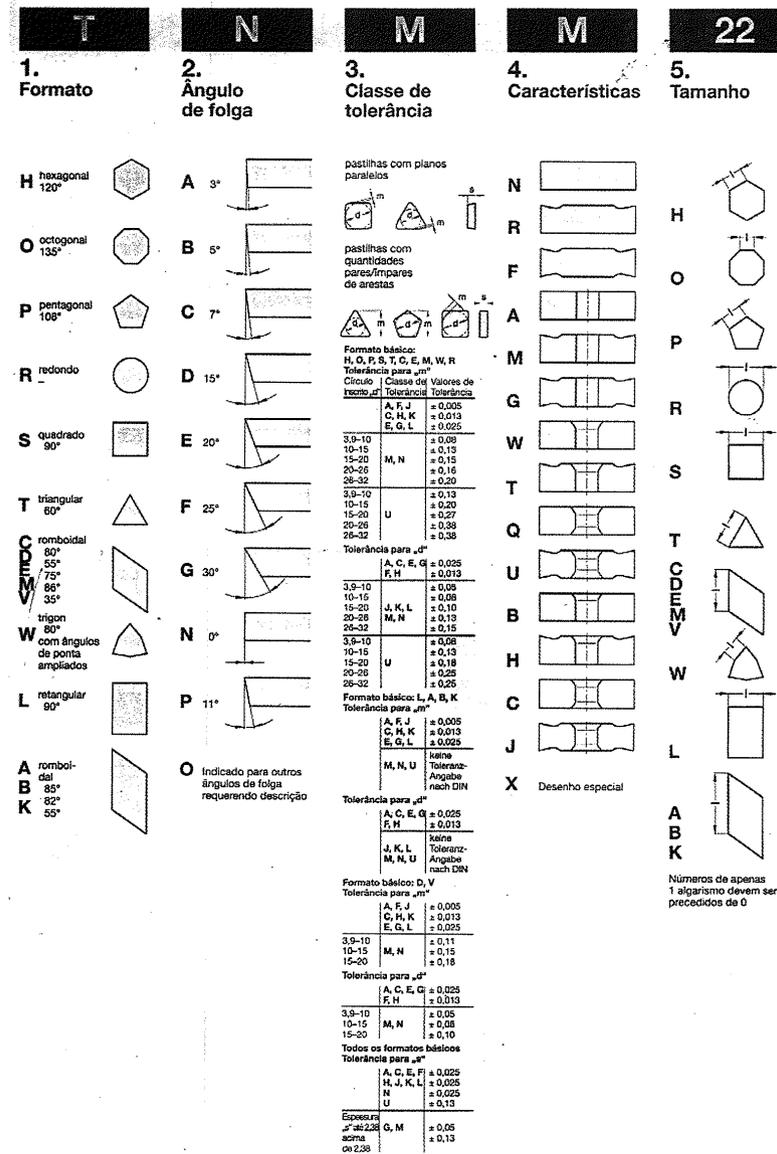


Figura 10.23 Designação ISO dos suportes de ferramentas de barras (Kennametal Hertel, 1998) (continuação).



Geometria e arestas de corte



Números de apenas 1 algarismo devem ser precedidos de 0

Figura 10.24 Designação ISO dos insertos intercambiáveis (Kennametal Hertel, 1998)



Geometria e arestas de corte

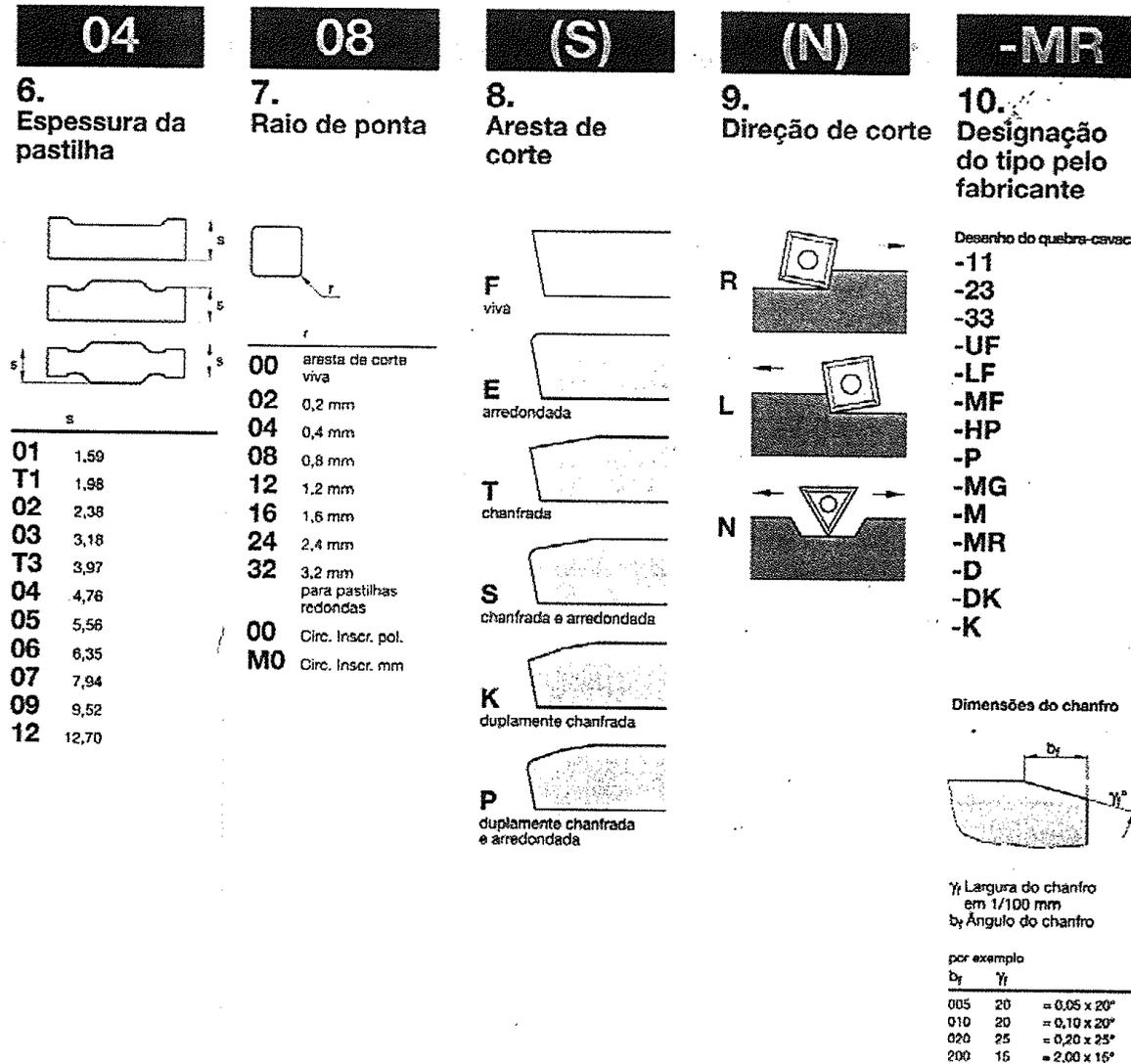
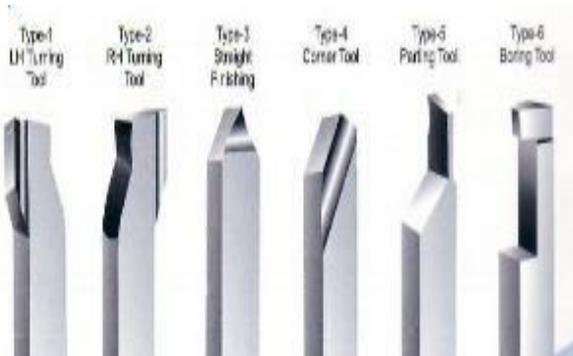
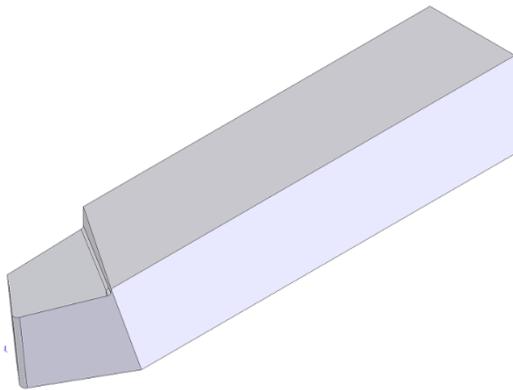


Figura 10.24 Designação ISO dos insertos intercambiáveis (Kennametal Hertel, 1998) (continuação).

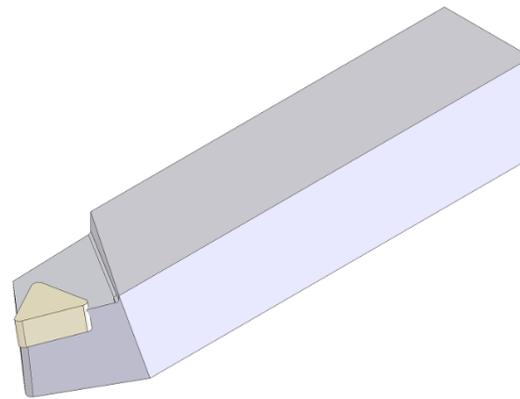


Formas usuais das ferramentas

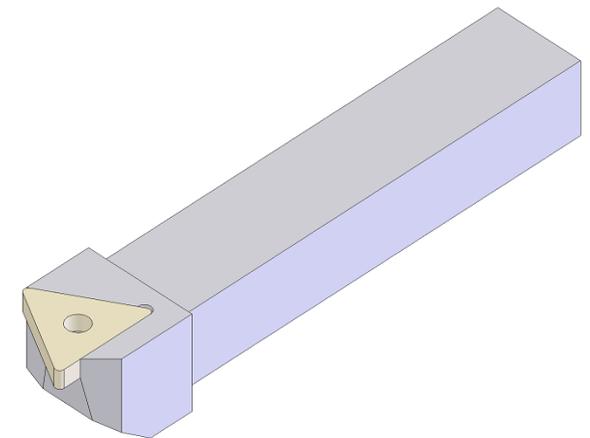
Integrais



Insertos brasados



Insertos intercambiáveis



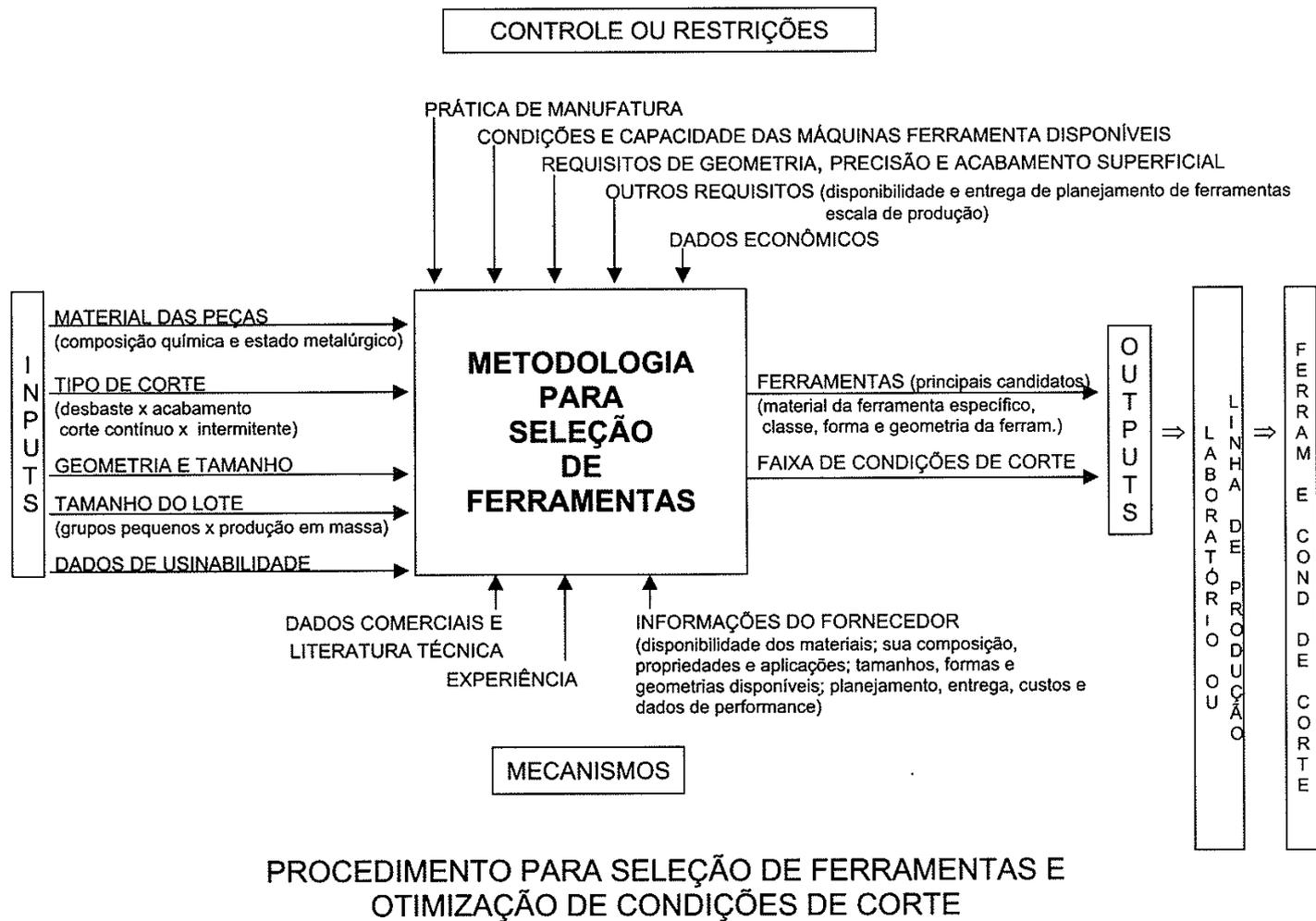


Figura 10.6. Metodologia para seleção da ferramenta de corte, sua geometria e condições de corte para uma dada aplicação.



Desgaste de ferramentas

Avaria

É um processo que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da mesma



Desgaste de ferramentas

Desgaste

Hutchings (1992) define desgaste como a destruição de uma ou de ambas superfícies que compõe um sistema tribológico, geralmente, envolvendo perda progressiva de material. Em usinagem, a norma ISO 3685:1993 define desgaste em ferramentas de corte como sendo a mudança de sua forma original durante o corte, resultado da perda gradual de material.



Desgaste de ferramentas

A Figura indica as três principais formas de desgaste que podem ser encontradas em uma ferramenta de corte:

Desgaste de cratera (área A);

Desgaste de flanco (área B);

Desgaste de entalhe (“*notch wear*”, áreas C e D).

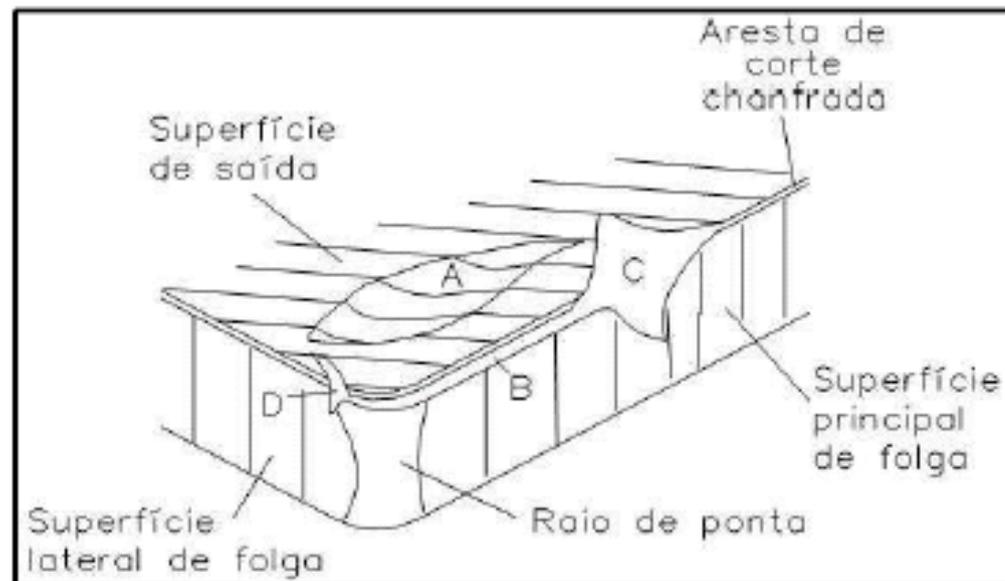
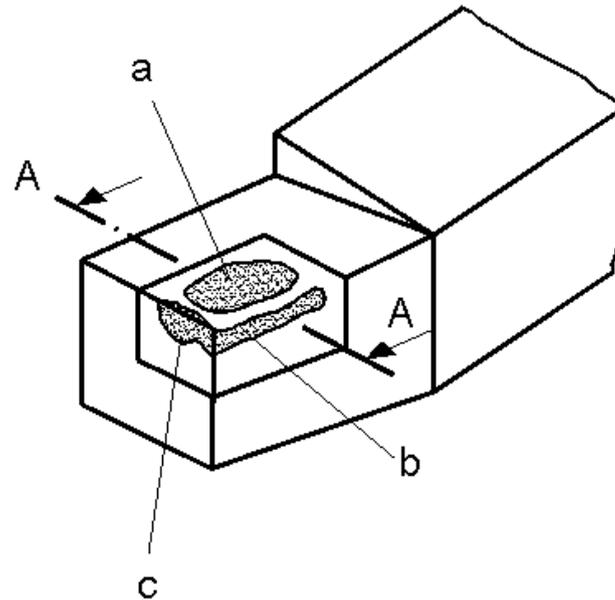


Figura 25 – Localização das três principais formas de desgaste em uma ferramenta de corte (adaptado de Dearnley e Trent, 1982).



Desgaste das ferramentas de corte

O desgaste pode ser observado na superfície de saída (a), nas superfícies principal (b) e secundária (c), na ponta e nas arestas de corte





Desgaste de ferramentas

Os parâmetros utilizados para medir estas formas de desgaste e os critérios de fim de vida comumente usados e sugeridos pela norma ISO 3685:1993 são apresentados a seguir e a representação dos mesmos na Fig. 26:

- VB_{Bmax} : Desgaste de flanco máximo de 0,6 mm medido na zona B;
- VB_B : Desgaste de flanco médio de 0,3 mm medido na zona B;
- VB_N e VC_N : Desgaste de entalhe medido na zona N e C, respectivamente. Deve ser avaliado quando se sobrepõe as demais formas de desgaste, no entanto, a norma não define valor de critério;
- KT : Profundidade da cratera, em mm. Definida por $KT = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço [mm/rev]. A Tabela 4 define valores de KT para avanços padronizados;

Tabela 5 – Definição de Valores de KT .

f [mm/rev]	0,25	0,4	0,63
KT [mm]	0,14	0,18	0,25

ISO 3685:1993

- KB : Largura da cratera a partir da aresta de core, seção A-A. Segundo a norma não devem ser usados como critério de fim de vida;
- KM : Distância do centro da cratera à aresta de corte, seção A-A. Segundo a norma não devem ser usados como critério de fim de vida.



Desgaste de ferramentas

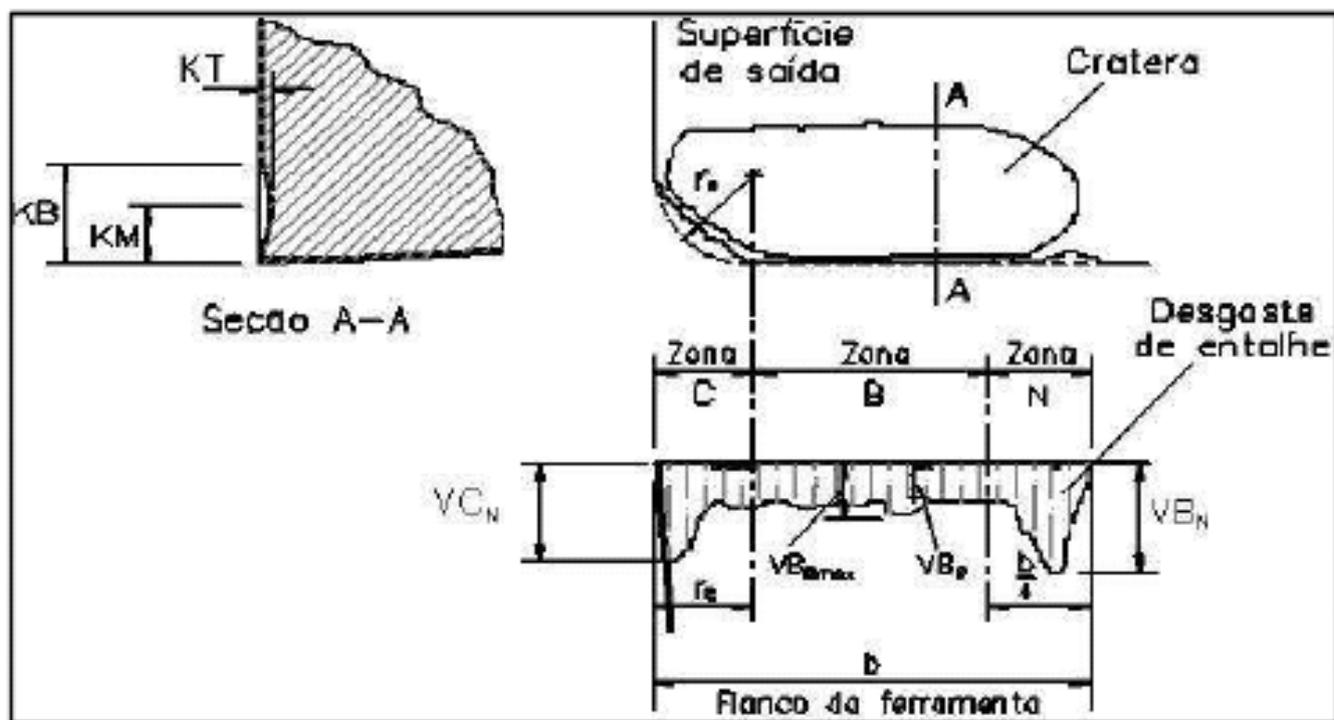


Figura 26 – Parâmetros utilizados para medir desgaste de ferramentas de corte (adaptado da ISO 3685:1993).



Desgaste de ferramentas

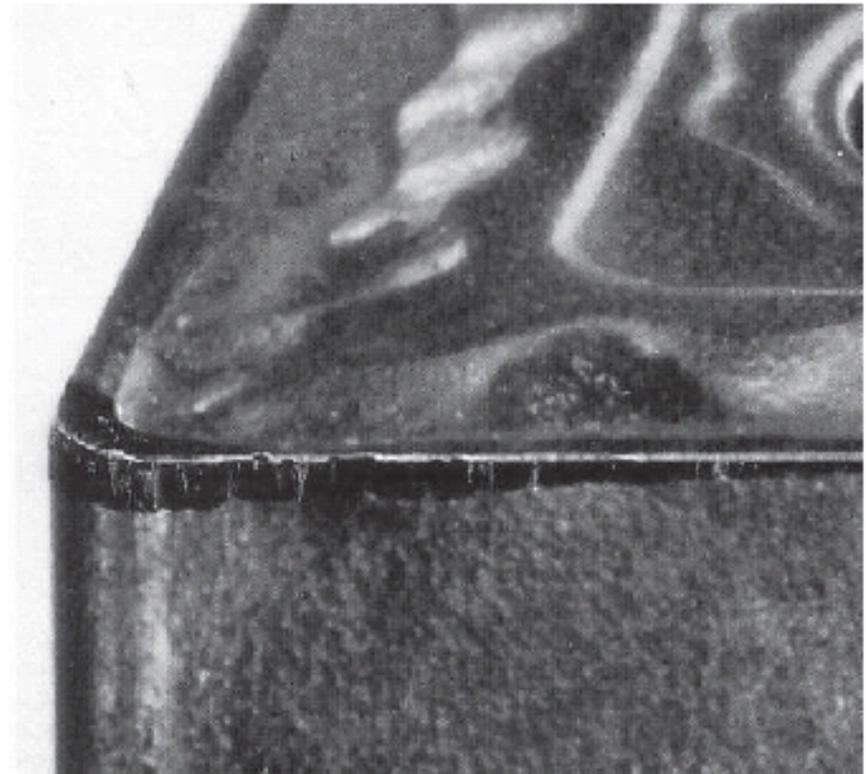
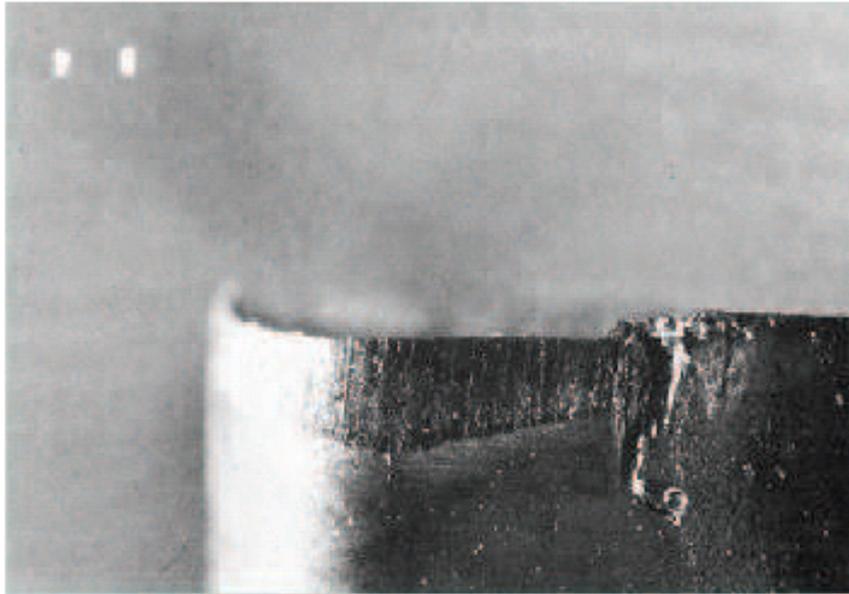
Deformação plástica

É a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos pode levar à total destruição da cunha cortante, podendo ocorrer inclusive perda de massa.



Desgaste de flanco

Prof. Rodrigo Stoeterau

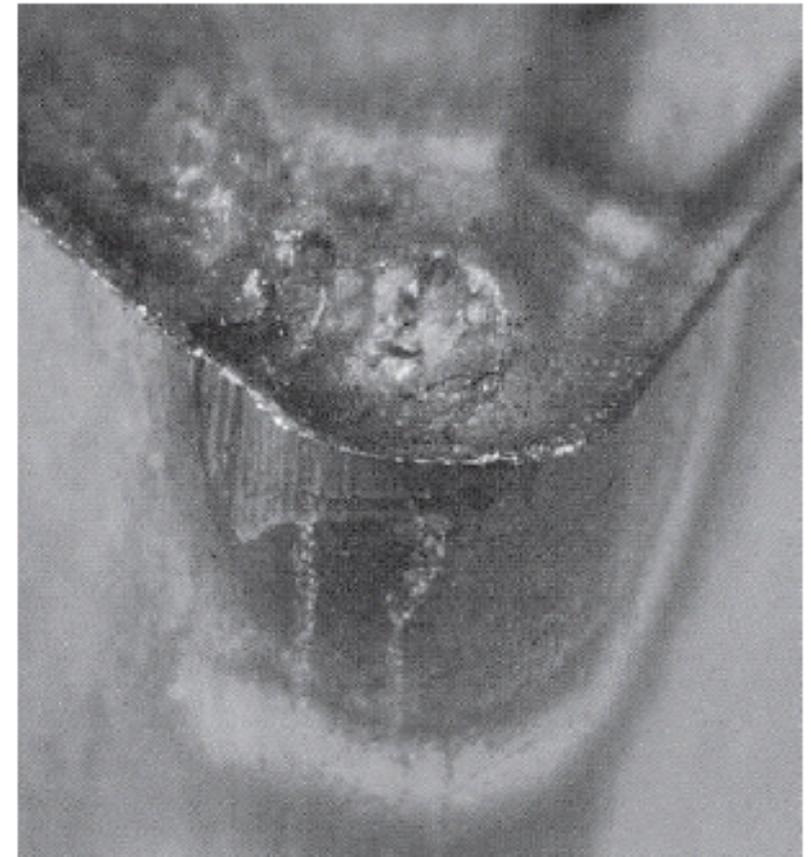
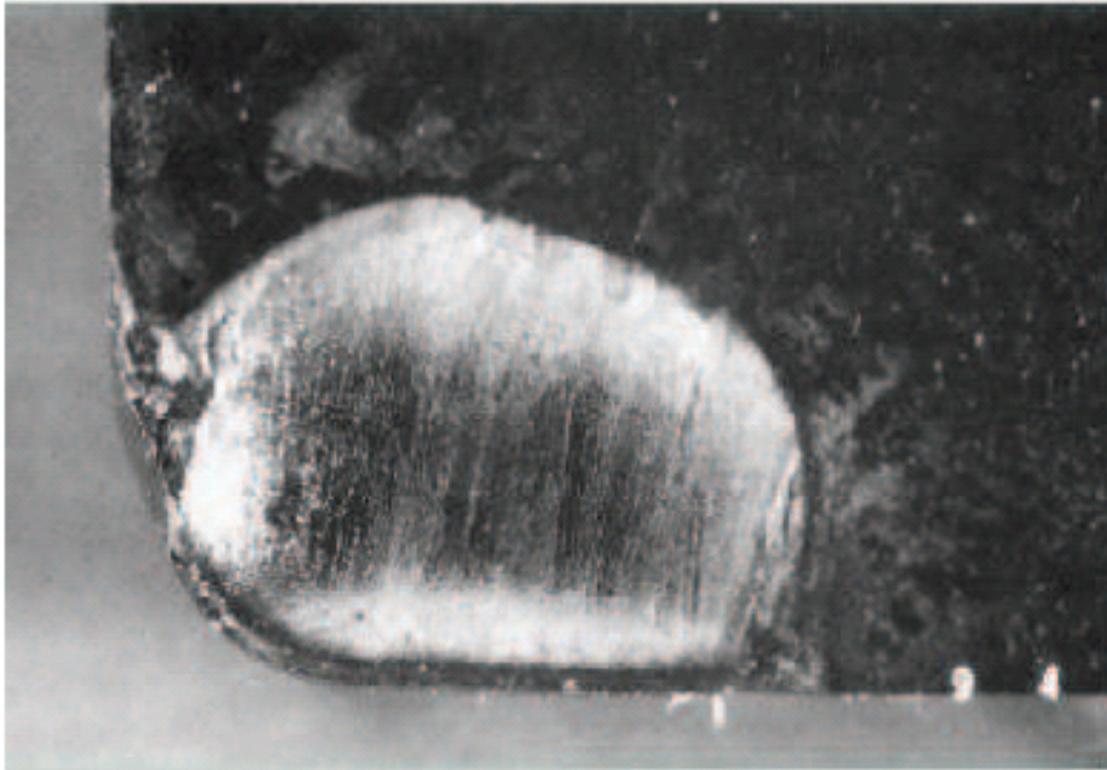


Exemplo de desgaste de flanco



Desgaste de cratera

Prof. Rodrigo Stoeterau



Exemplo de desgaste de cratera



Adesão

Prof. Rodrigo Stoeterau



Exemplo de desgaste por adesão



Desgaste de ferramentas

Em baixas temperaturas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes, sendo o primeiro mais intenso. A temperatura mais elevadas a adesão perde importância para a difusão e oxidação, observa-se que estes dois mecanismos vão crescendo em participação e que o primeiro cresce numa escala exponencial; enquanto a abrasão tem um efeito intermediário.

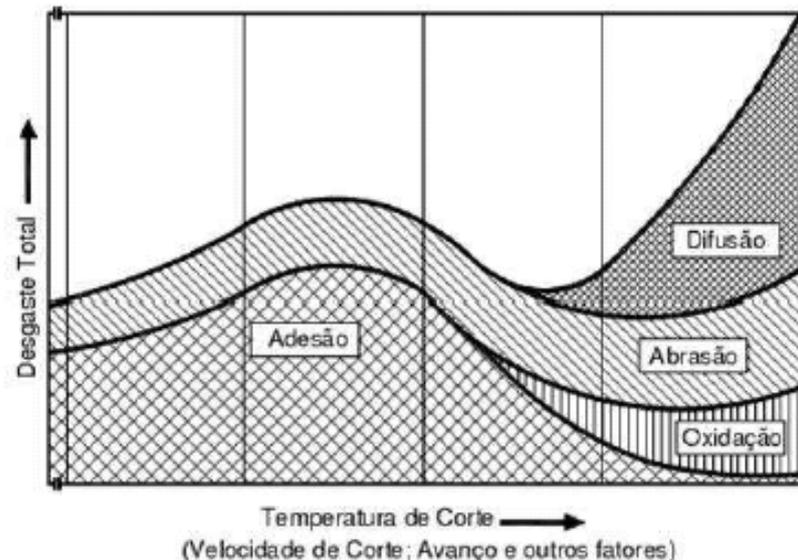


Figura 27 – Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte (Vierege, 1970, apud. König e Klocke, 1997).



Desgaste de ferramentas

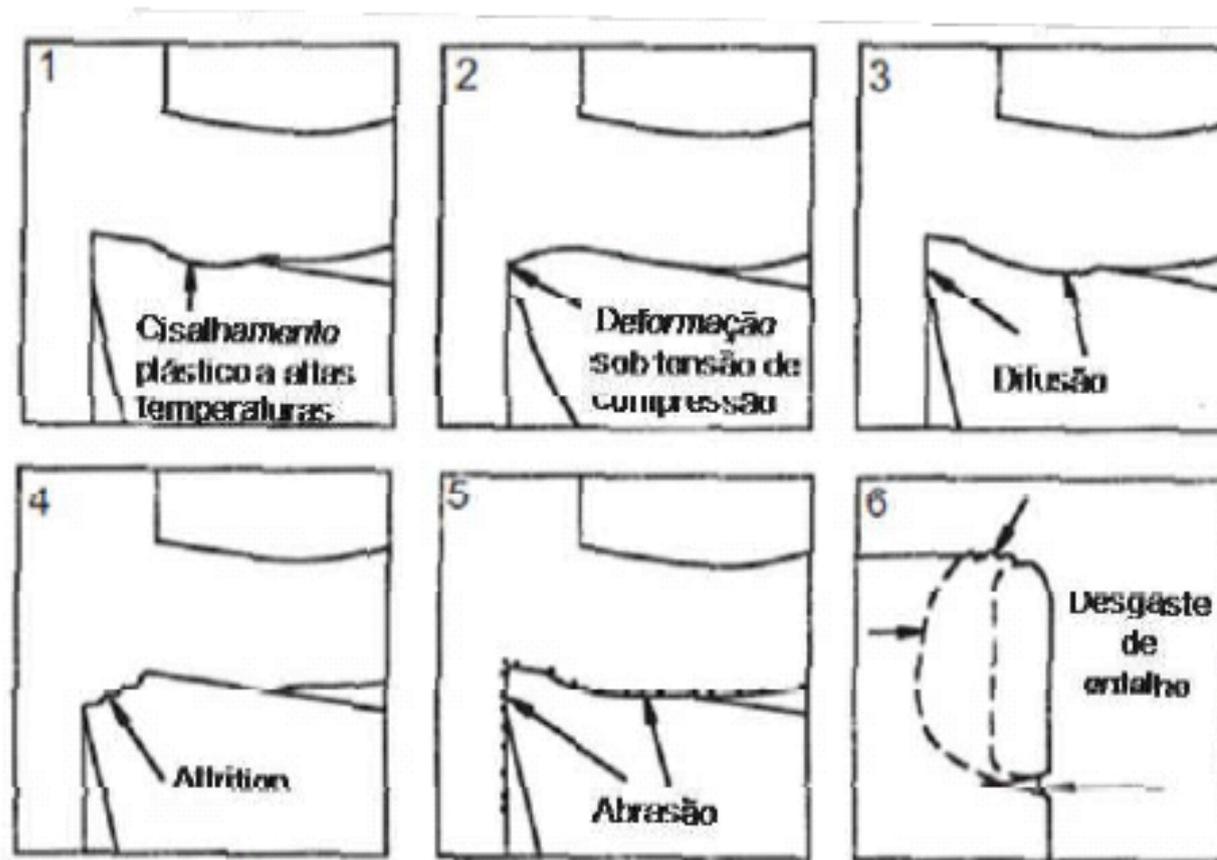


Figura 28 – Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte (adaptado de Trent e Wright, 2000)



Desgaste de ferramentas

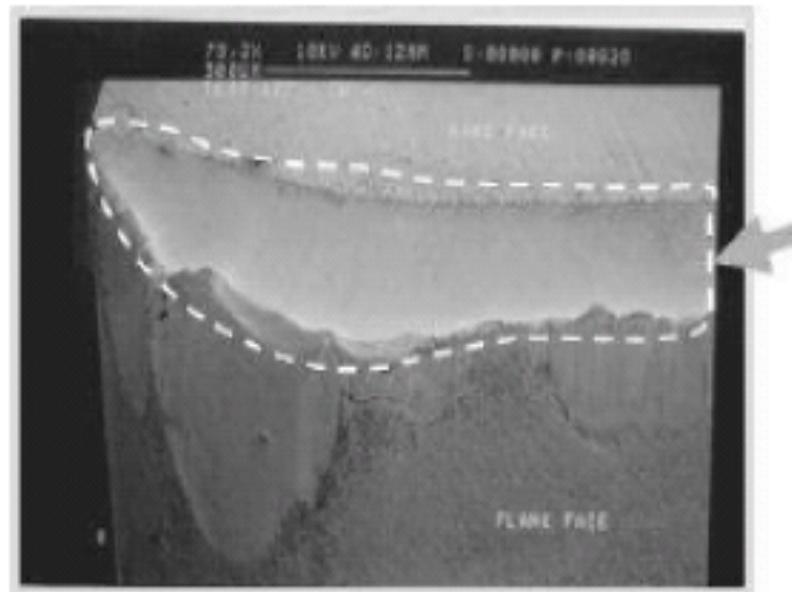


Figura 29 – Desgaste difusivo ferramenta K20 após usinar Ti6Al4V (Machado, 1990 apud. Melo et al., 2006).



Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem

Existem vários testes para avaliar a usinabilidade de um material. Esses ensaios são importantes para comparar materiais e também para otimizar os processos de usinagem. Os primeiros ensaios de usinabilidade foram realizados no século passado por Taylor [1, 5]. Nesse ensaio era determinada a velocidade de corte que causava a falha da ferramenta após 20 minutos (V_{20}). A partir desses ensaios ficou determinada a relação empírica:

$$T.V^n = C$$

Onde T é a vida da ferramenta em minutos.

V é a velocidade de corte (m/mim).

C e n são constantes empíricas obtidas experimentalmente.



Desgaste de ferramentas

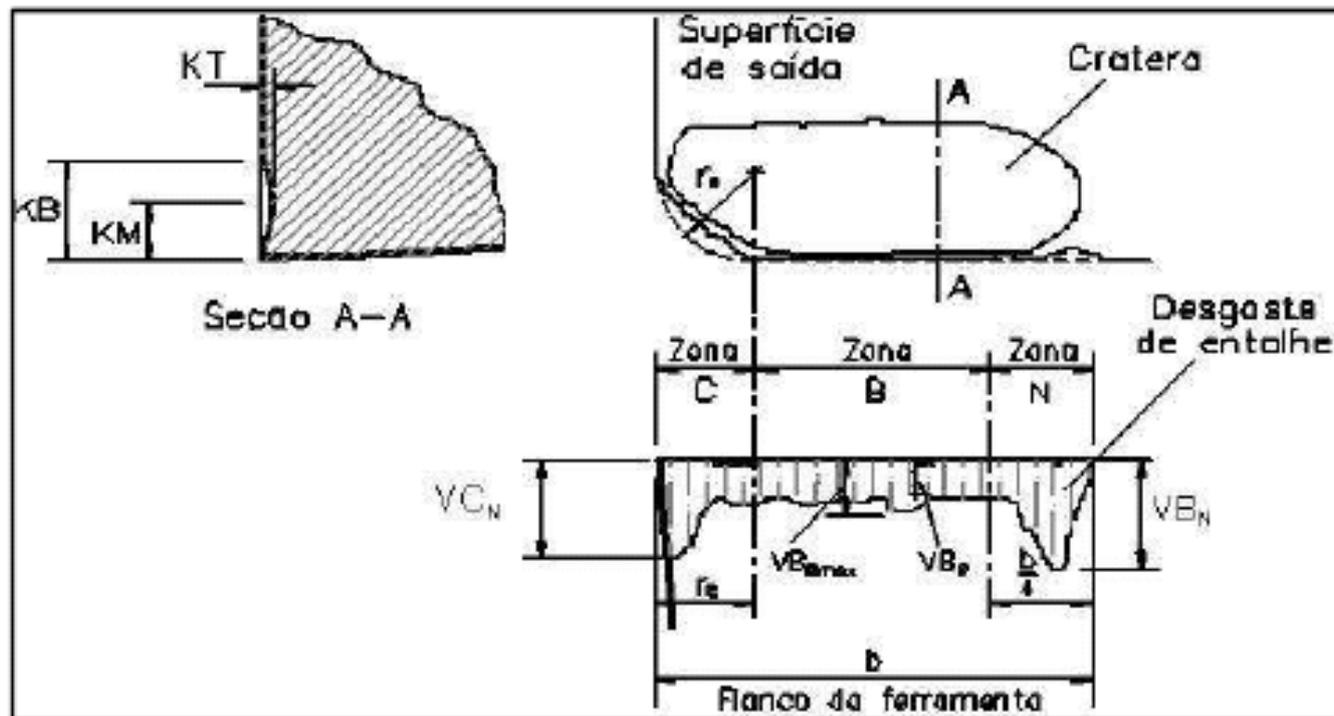
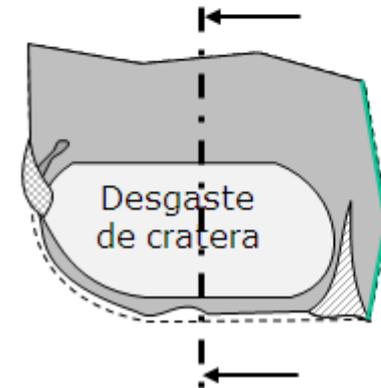
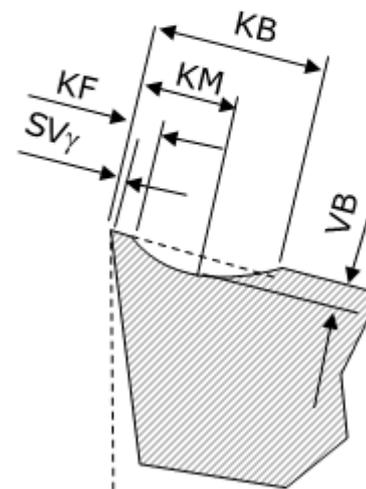
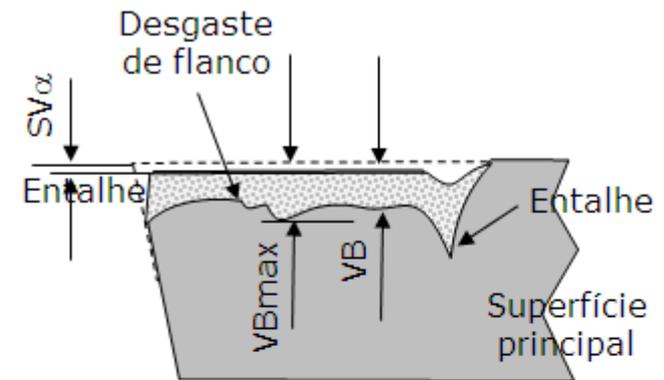
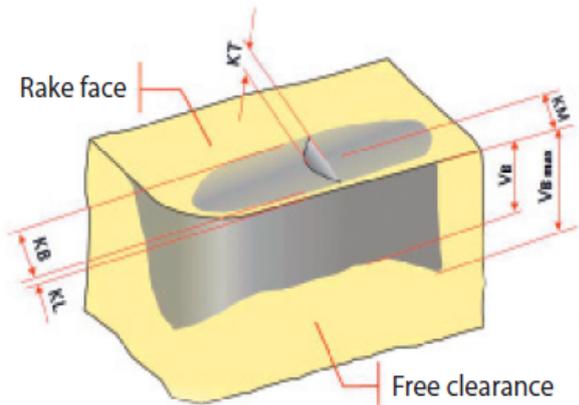


Figura 26 – Parâmetros utilizados para medir desgaste de ferramentas de corte (adaptado da ISO 3685:1993).



Desgaste das ferramentas de corte



VB - Largura média de desgaste de flanco.

VB_{máx} - Largura máxima de desgaste de flanco.

SV_α - Deslocamento lateral da aresta na direção do flanco.

KB - Largura de cratera.

KF - Largura do lábio no desgaste de cratera.

KM - Distância da borda da ferramenta ao centro da cratera.

KT - Profundidade de cratera.

SV_γ - Deslocamento lateral do gume na direção da superfície de saída.



Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem

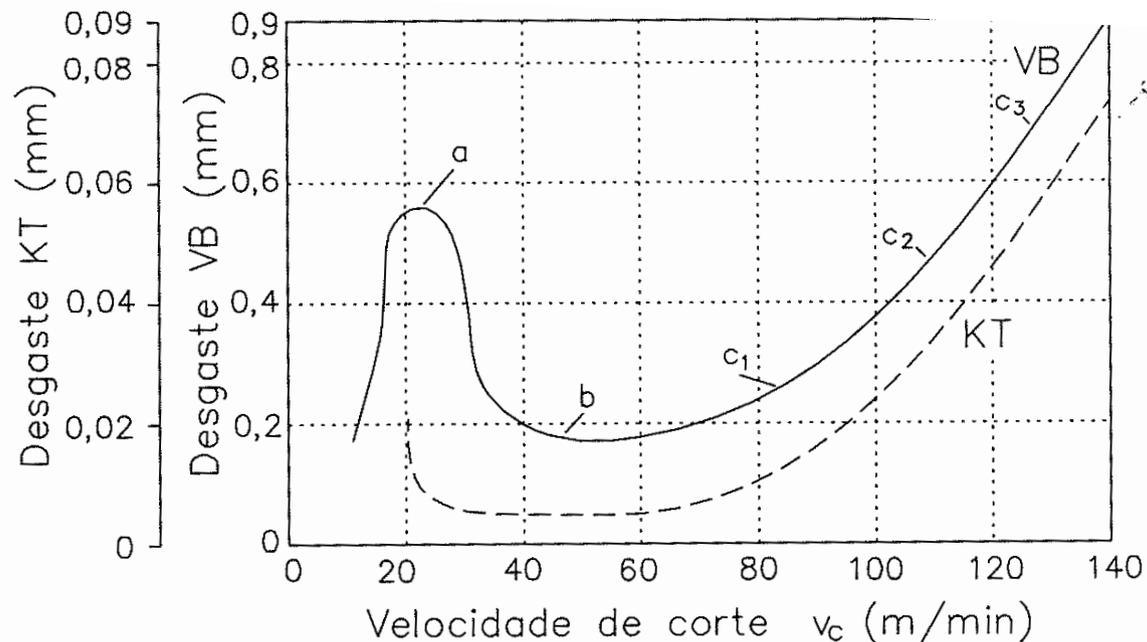


Figura 12.1. Desgaste VB e KT em função da velocidade de corte, para um determinado tempo de usinagem [1].



Conceitos relacionados com o Processo de Usinagem

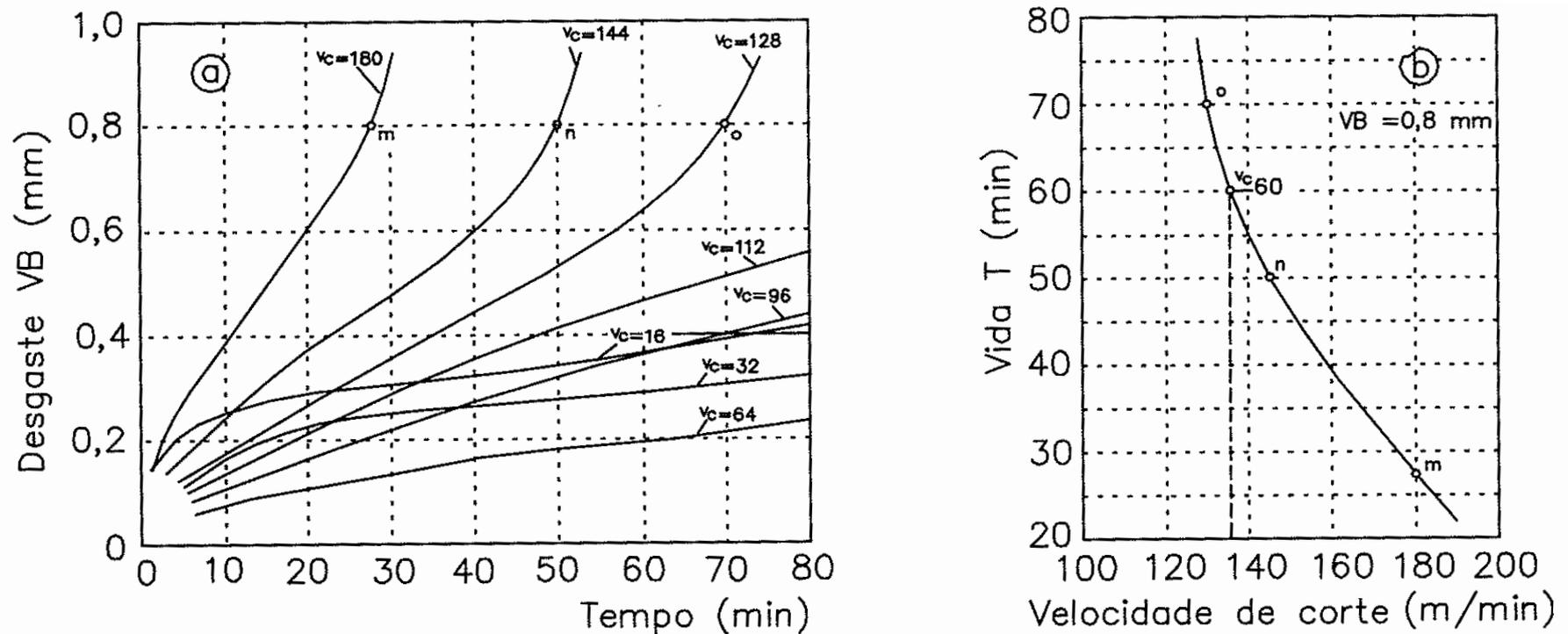


Figura 12.2. Determinação da curva de vida de uma ferramenta $T \times V_c$ [1].



Vida de ferramenta

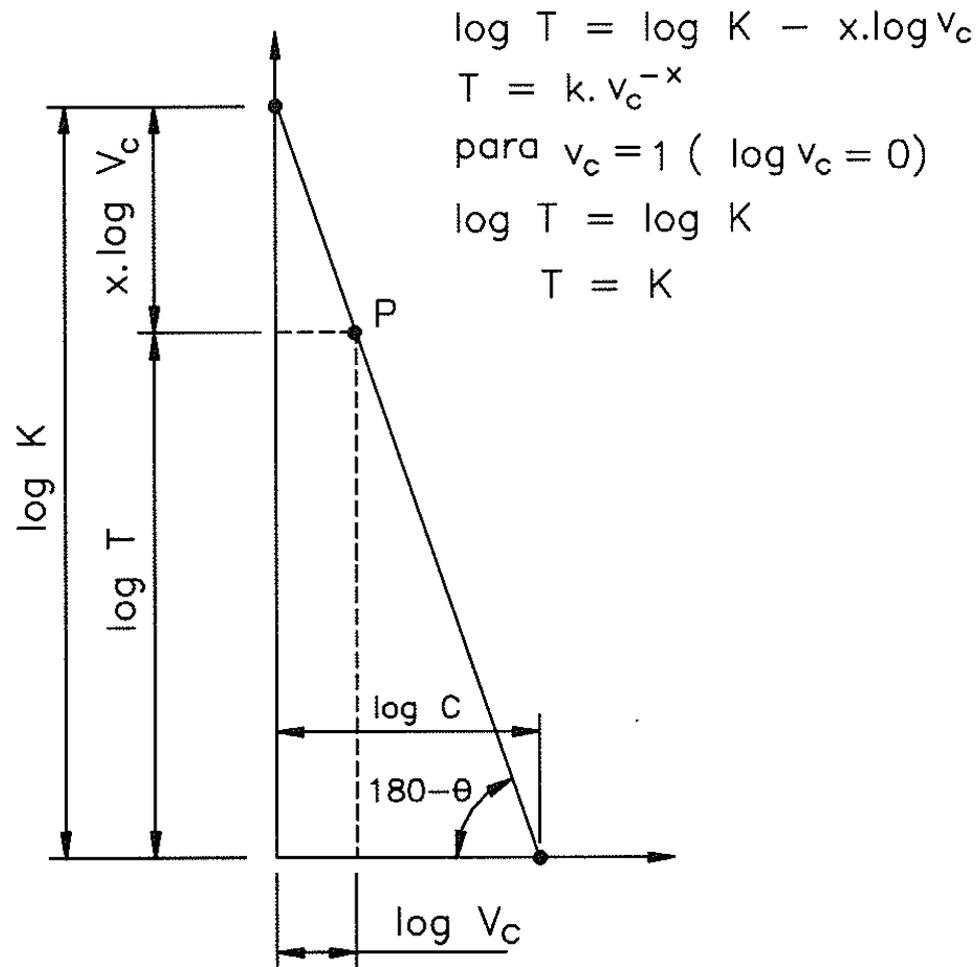


Figura 12.3. Representação em escalas logarítmicas da curva de vida da ferramenta [1].



Vida de ferramenta

$$\log T = \log K - x \cdot \log V_c \quad (12.1)$$

onde,

x = coeficiente angular da reta.

K = vida da ferramenta para uma velocidade de corte 1m/min.

A expressão (12.1) pode ser escrita da forma:

$$T = K * V_c^{-x} \quad (12.2)$$

que é a conhecida equação de Taylor [1-3] e representa o tempo de vida de uma ferramenta para determinada velocidade de corte.



Critérios de fim de vida

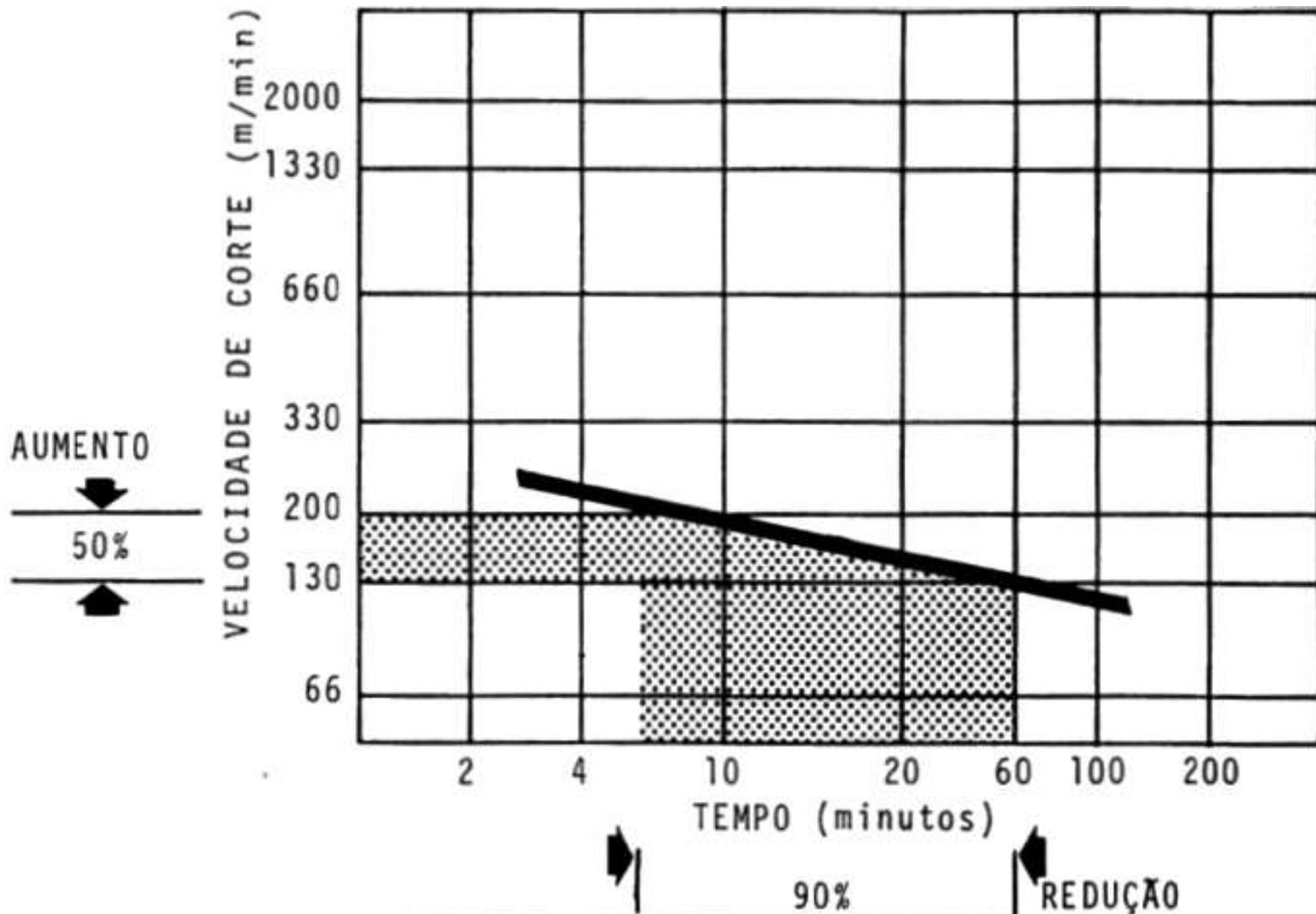
São critérios que são utilizados para determinar quando uma ferramenta deve ser substituída no processo.

Esses critérios é relacionado ao nível de desgaste na ferramenta, e suas consequências 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

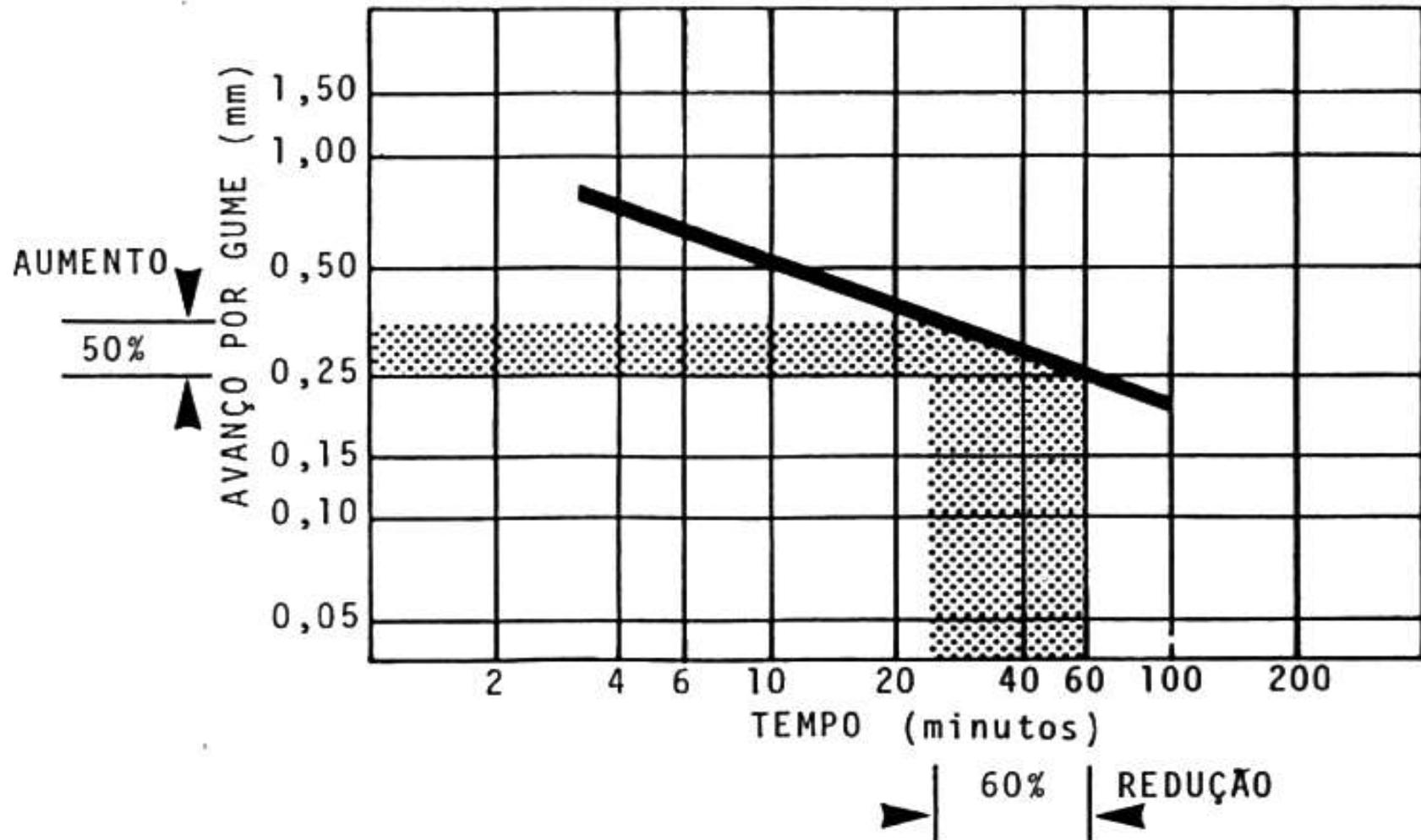


Influência da Velocidade de Corte na Vida da Ferramenta



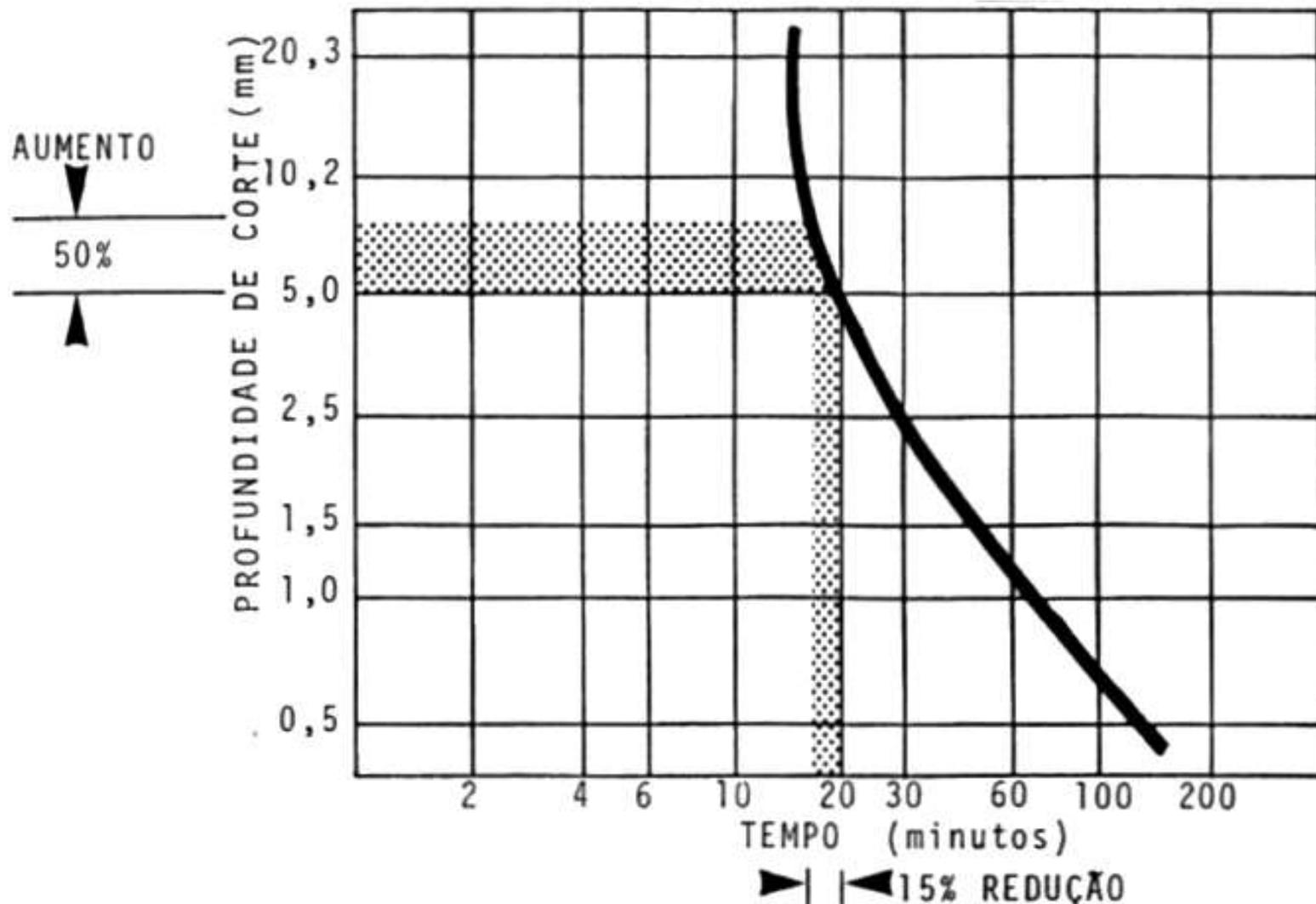


Influência do Avanço na Vida da Ferramenta





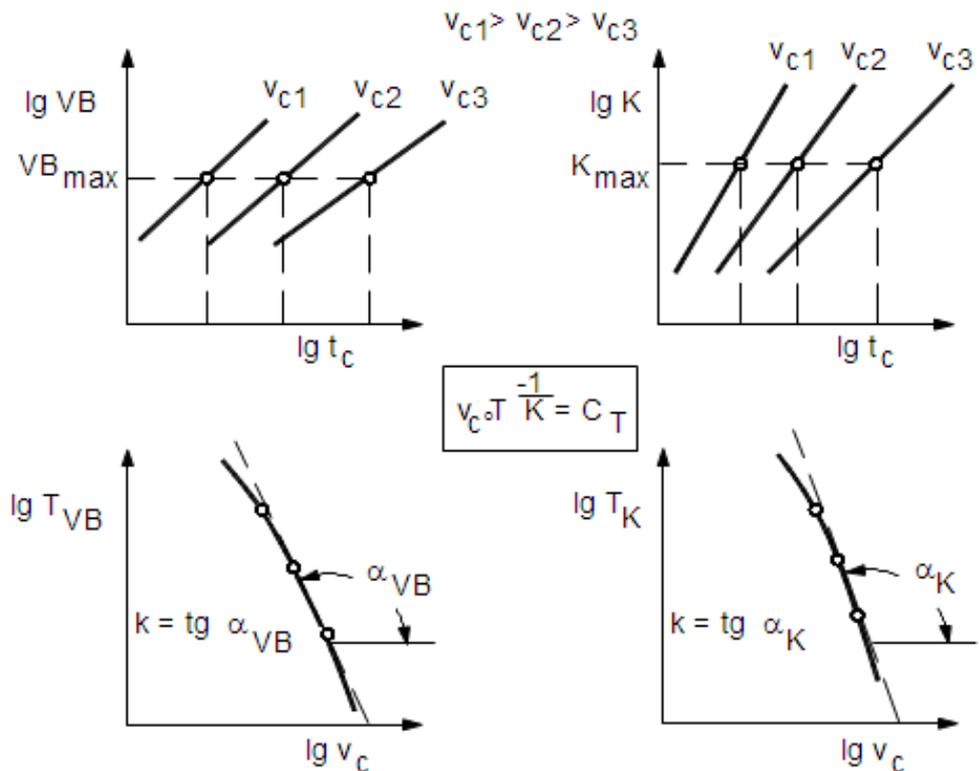
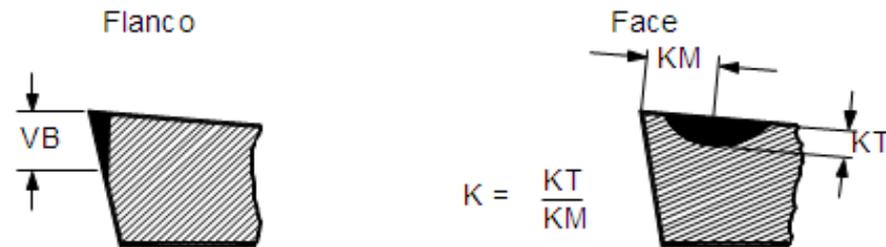
Influência da Profundidade de Corte na Vida da Ferramenta





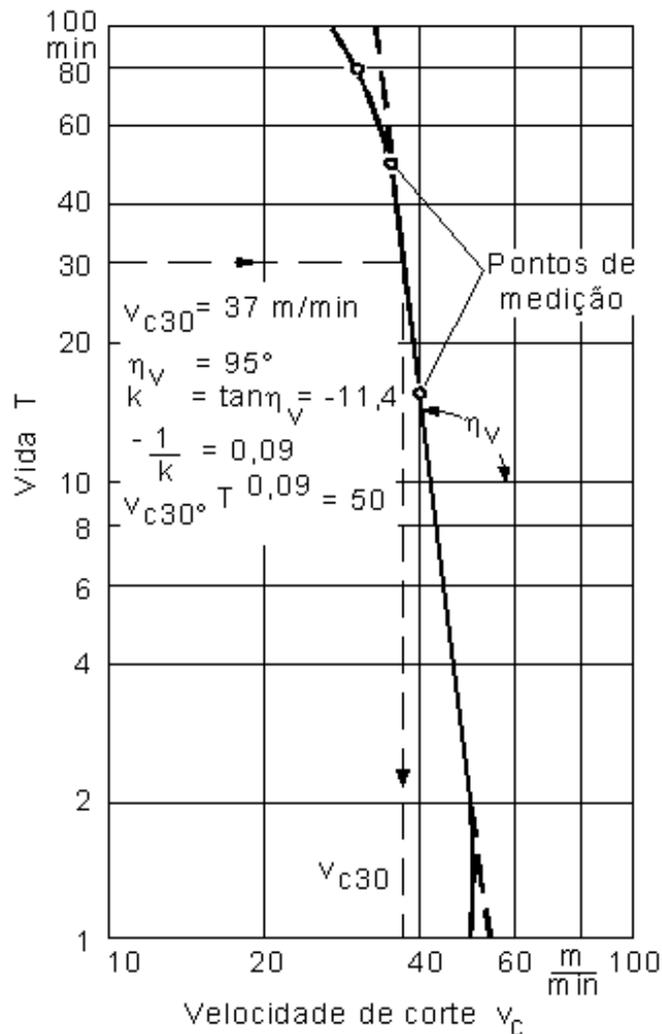
Curva de vida ou Curva de Taylor

$$T_{VB} = f(v_c) \text{ ou } TK = f(v_c)$$





Curva de vida ou Curva de Taylor



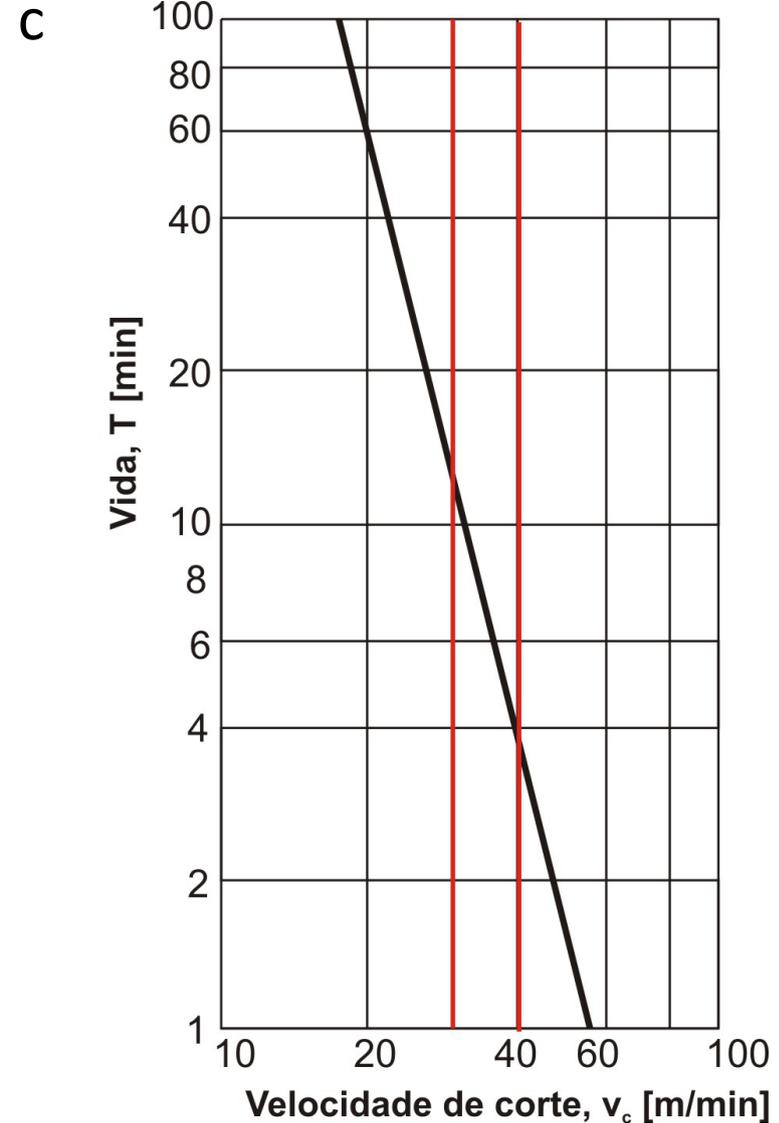
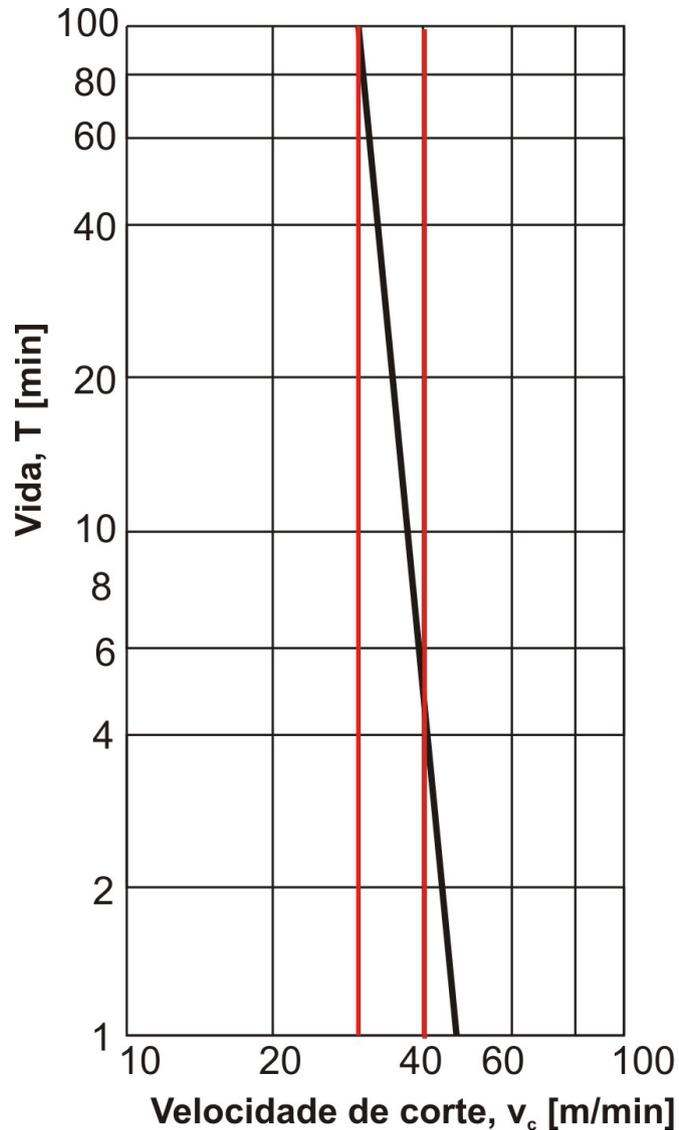
- Em um gráfico log-log são traçadas as curvas de $T = f(v_c)$
- A equação da melhor reta que representa o comportamento da curva da vida é a equação de Taylor:

$$T = v_c^k \cdot C_v$$

T Vida
 v_c Velocidade de corte
 η Inclinação da curva v_c
Material da peça Ck 45
Material da ferramenta S 10-4-3-10



Curva de vida ou Curva de Taylor





Acabamento Superficial

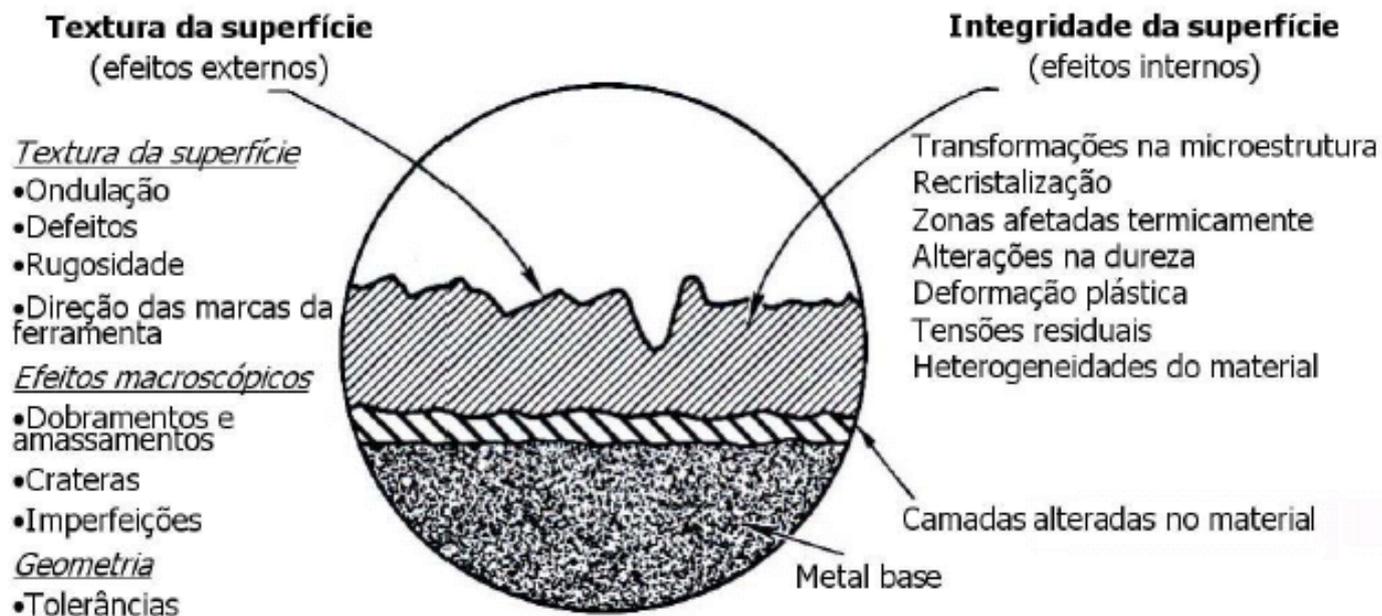


Figura 1.1 - Representação esquemática dos elementos superficiais e subsuperficiais que definem a tecnologia das superfícies, segundo o Machinability Data Center (1980)

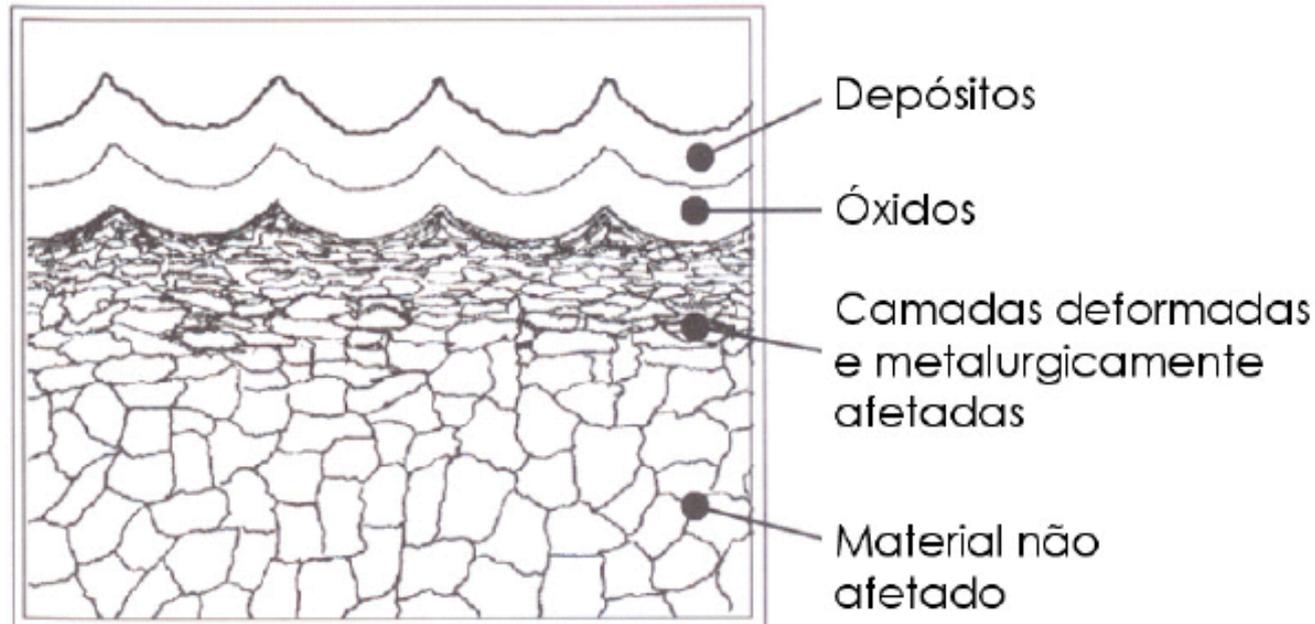


Figura 1.3 - Representação esquemática da seção transversal de uma peça usinada. Ilustram-se as camadas geradas como resultado do processo de usinagem (GRIFFITHS, 2001)

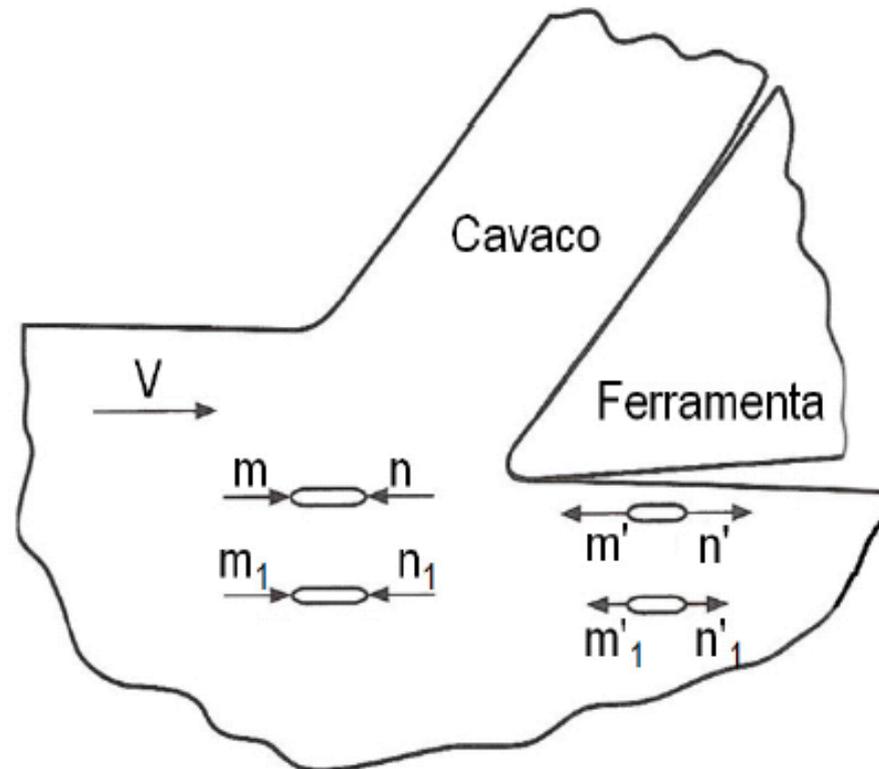


Figura 1.8 - Representação esquemática do mecanismo de geração de tensão residual trativa em matérias dúcteis (SHAW, 2005).

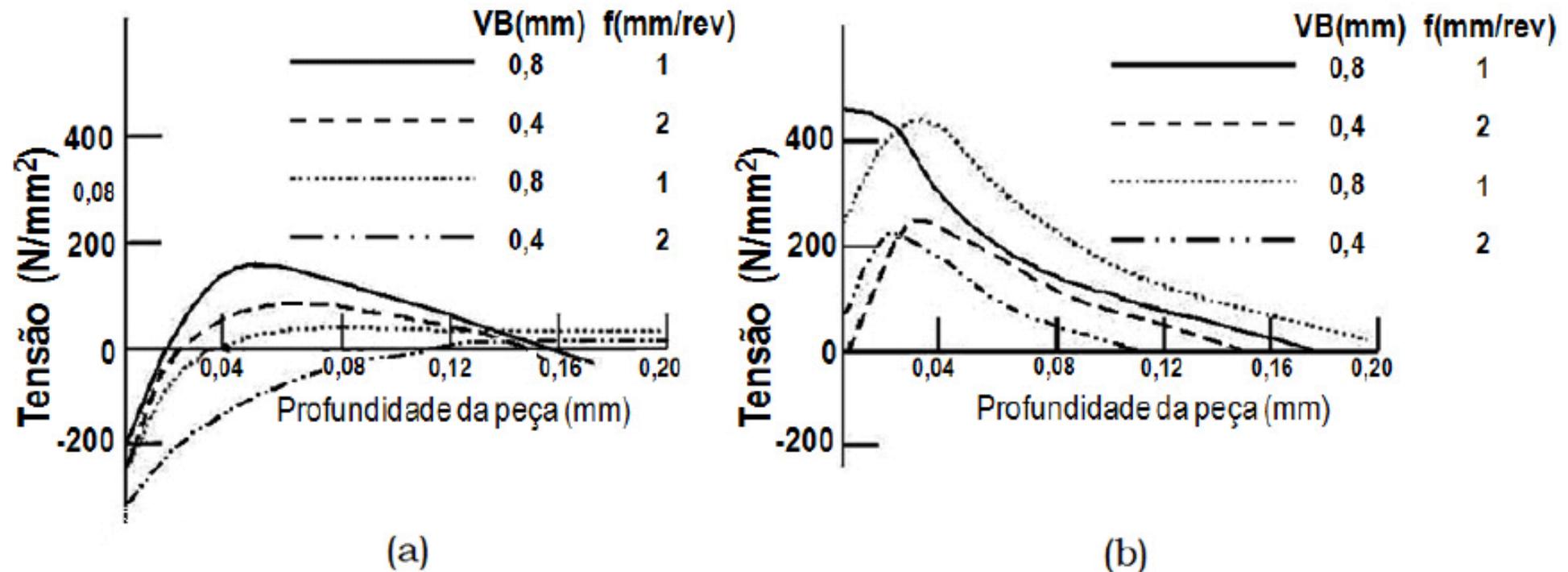


Figura 1.9 - Avaliação da tensão residual após o torneamento de um ferro fundido nodular, a dois níveis diferentes de intensidade após torneamento: a) $V=4$ m/min; b) 10 m/min. VB é o desgaste de flanco da ferramenta, f é o avanço, a tensão residual paralela à superfície é σ (N/mm^2). (LESKOVAR e KOVAC, 1988).

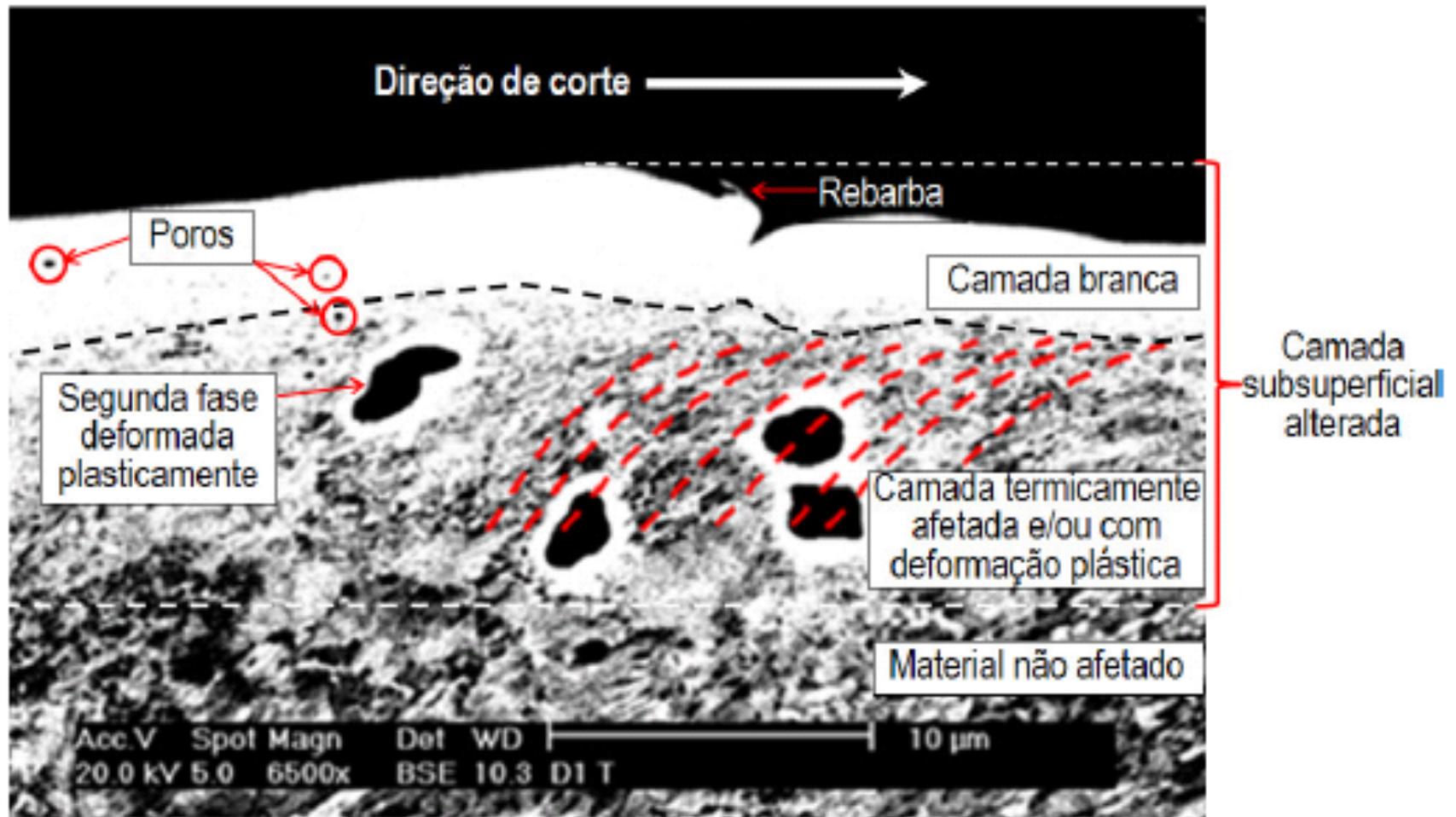


Figura 1.4 - Mudanças da camada superficial observadas na seção transversal de um ferro fundido mesclado após torneamento ($V_c = 60 \text{ m/min}$; $f = 0,1 \text{ mm/rot}$). Aumento de 6500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% (ALVAREZ, 2006)

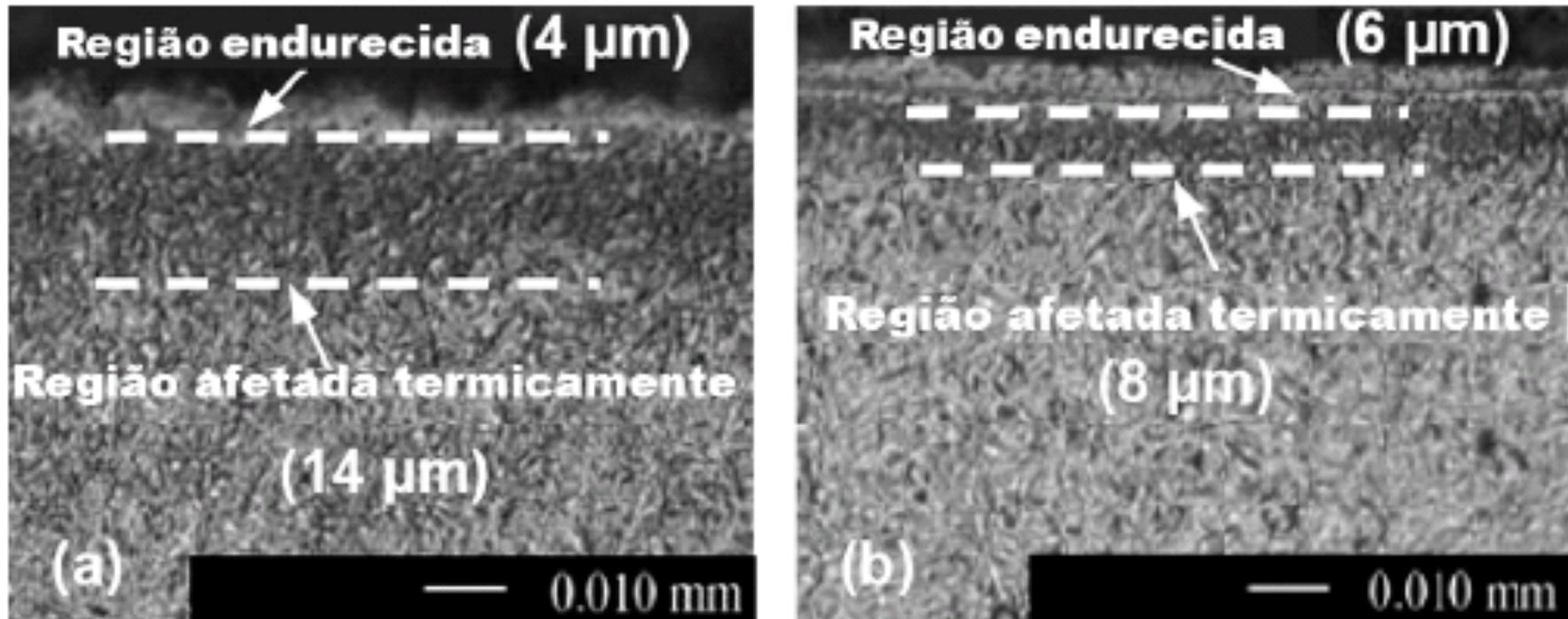
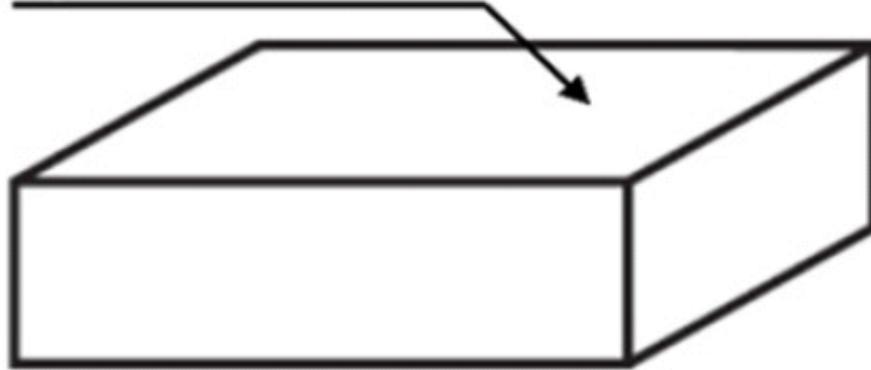


Figura 1.16 - Imagens da seção transversal da superfície do aço AISI 52100 a) retificado; b) torneado. Imagens obtidas com microscópio óptico e microestrutura revelada com nital ao 2% (HASHIMOTO et al., 2006)

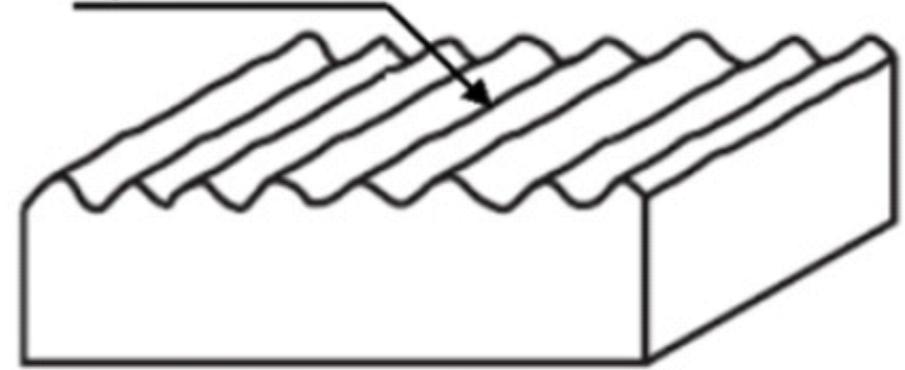


Superfície Geométrica



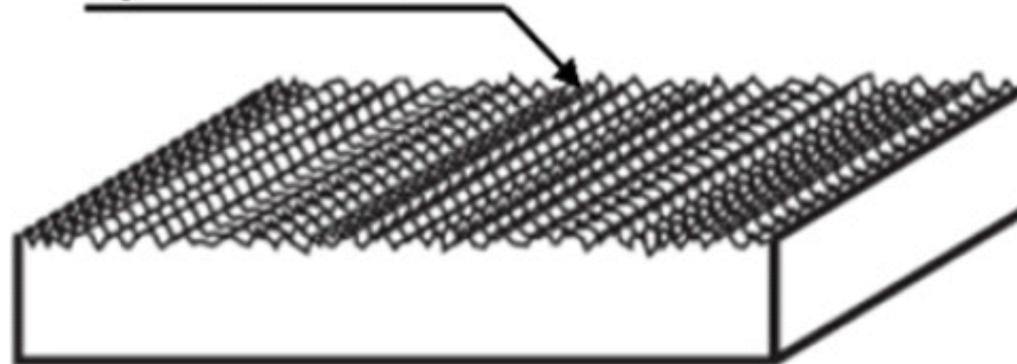
a)

Superfície real



b)

Superfície efetiva



c)

Figura 1.20 - Representação esquemática da: a) superfície geométrica; b) superfície real; c) superfície efetiva (ASME B46.1, 2002).

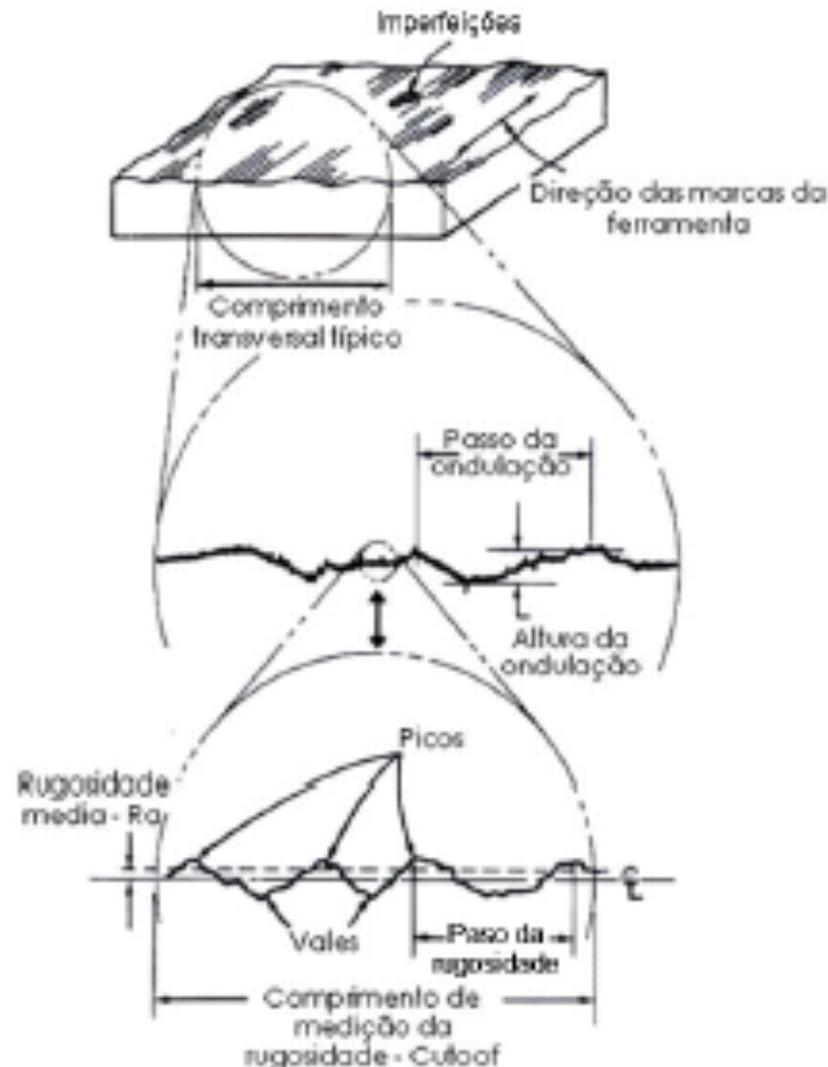


Figura 1.19 - Representação esquemática das características de uma superfície onde são ilustradas as diferentes ordens de grandeza ao se avaliar a topografia (ANSI Standard B46.1, 1978 apud MACHINABILITY DATA CENTER, 1980).

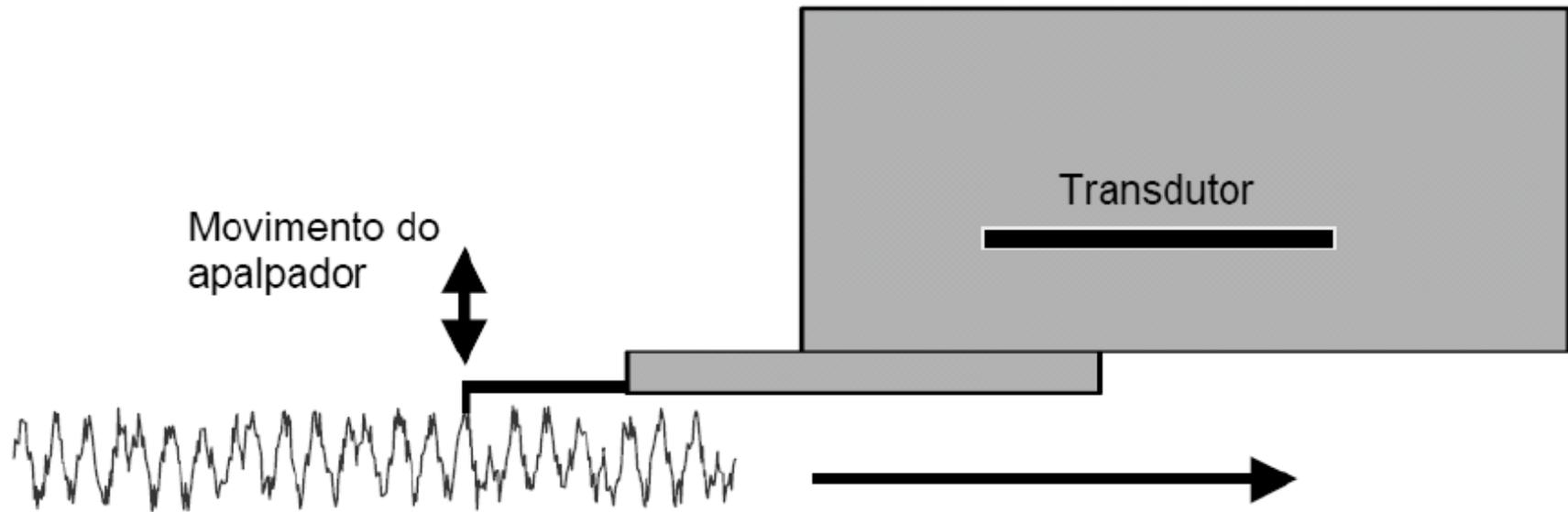


Figura 1.21 - Princípio de funcionamento do perfilômetro mecânico com apalpador

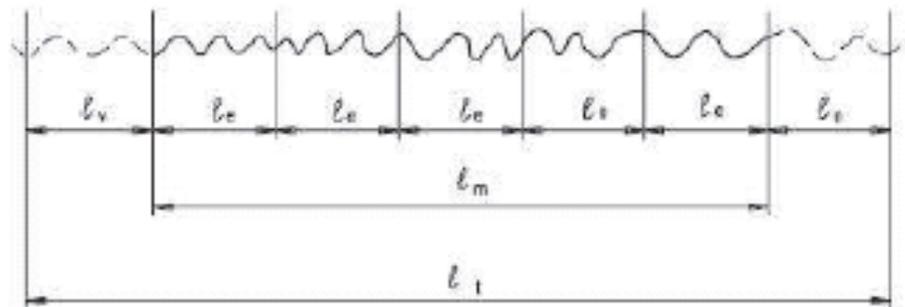


Rugosidade: avaliação imperfeições micrométricas

λ_c = cut off que é comprimento de amostragem

Comprimento de amostragem (*cut off*)

- l_m – comprimento de avaliação
- l_e – comprimento de amostragem
- l_t – distância percorrida pelo apalpador = $(5 \times l_e) + l_v + l_n$
- l_v – distância para atingir a velocidade de medição
- l_n – distância para parada do apalpador
- recomendação ISO: rugosímetros devem medir 5 comprimentos de amostragem e indicar valor médio

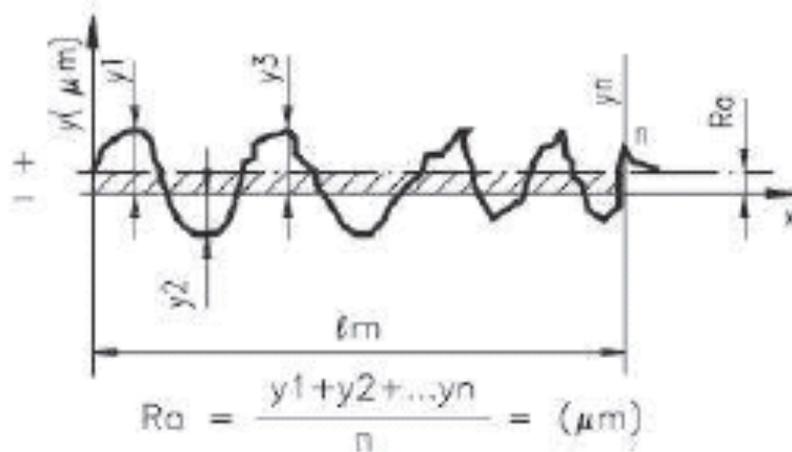


Comprimentos para avaliação de rugosidade.



Parâmetros de rugosidade

- Rugosidade média (Ra – Roughness average): média aritmética
- + mais utilizado
- média alterada por pico ou vale atípicos



Grupos de rugosidades	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽								
Rugosidade máxima valores em Ra(μm)	50	6,3	0,8	0,1								
Classes de rugosidade (GRADE)	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
Rugosidade máxima valores em Ra(μm)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025

Informações sobre os resultados de usinagem

Processo	Grupos de rugosidades
Serrar	Grupos 1-4
Limar	Grupos 2-4
Plainar	Grupos 3-4
Tornear	Grupos 3-4
Furar	Grupos 2-4
Rebarbear	Grupos 2-4
Alargar	Grupos 2-4
Fresar	Grupos 2-4
Brochar	Grupos 3-4
Raspar	Grupos 3-4
Retificar (frontal)	Grupos 3-4
Retificar (lateral)	Grupos 3-4
Alisar	Grupos 3-4
Superfinish	Grupos 3-4
Lapidar	Grupos 3-4
Polir	Grupos 3-4

□ Faixa para um desbaste superior
 ▨ Rugosidade realizável com usinagem comum
 ▩ Rugosidade realizável com cuidados e métodos especiais

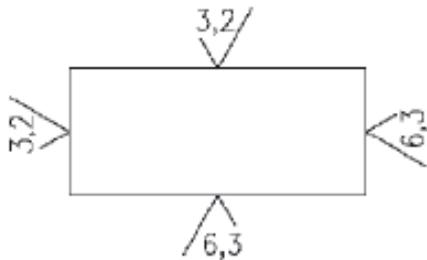


Representação no desenho técnico

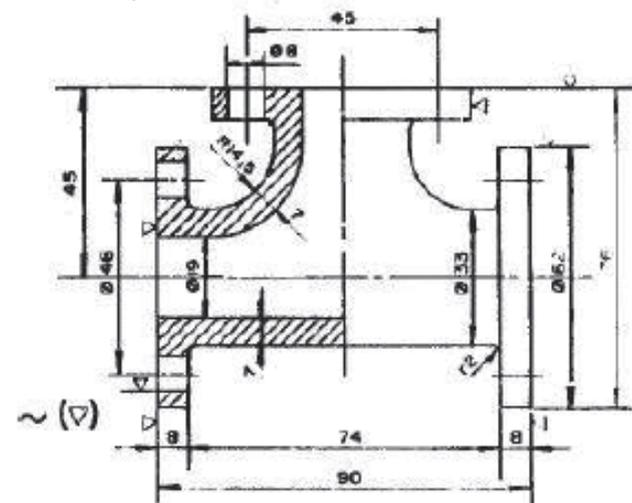
- Símbolos

SÍMBOLOS COM INDICAÇÃO DA CARACTERÍSTICA PRINCIPAL DA RUGOSIDADE, RA			
SÍMBOLO			SIGNIFICADO
A remoção do material é:			
facultativa	exigida	não permitida	
$\sqrt{3,2}$ ou $\sqrt{N8}$	$\nabla_{3,2}$ ou ∇_{N8}	$\nabla_{3,2}$ ou ∇_{N8}	Superfície com rugosidade de valor máximo Ra = 3,2mm.
$\sqrt{6,3}$ ou $\sqrt{N9}$ $\sqrt{1,6}$ ou $\sqrt{N7}$	$\nabla_{6,3}$ ou ∇_{N9} $\nabla_{1,6}$ ou ∇_{N7}	$\nabla_{6,3}$ ou ∇_{N9} $\nabla_{1,6}$ ou ∇_{N7}	Superfície com rugosidade de valor máximo Ra=6,3mm e mínimo Ra = 1,6mm.

- Regras de cotagem



- Exemplo



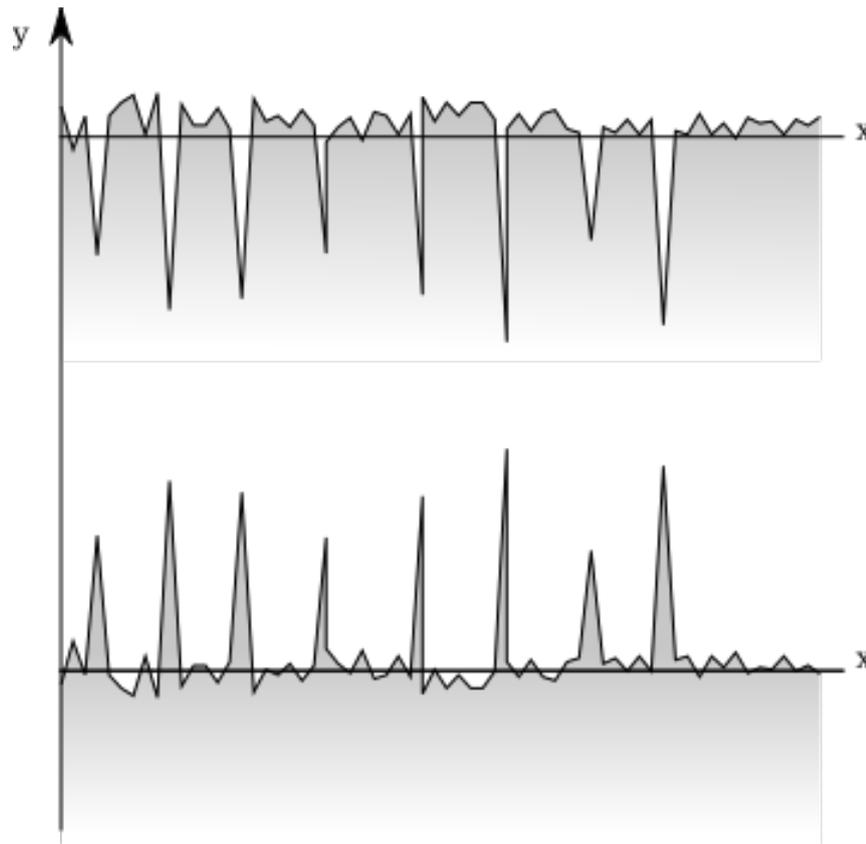


Símbolo Gráfico	Interpretação	Padrão de Orientação
=	Paralelo ao plano de vista no qual o símbolo é empregado.	
⊥	Perpendicular ao plano de vista no qual o símbolo é empregado.	
X	Cruzado em duas direções obliquas relativas ao plano no qual o símbolo é empregado.	
M	Múltiplas direções.	
C	Aproximadamente circular relativo ao centro da superfície onde o símbolo é empregado.	
R	Aproximadamente radial relativo ao centro da superfície onde o símbolo é empregado.	
P	Marcas com orientação particular, não direcionada ou em relevo.	

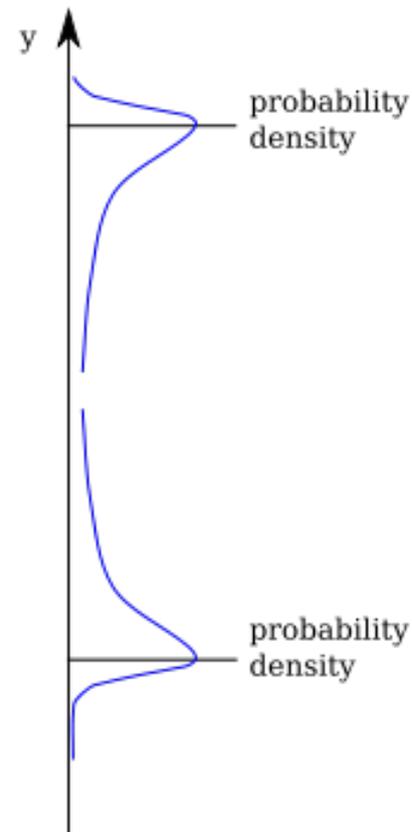
Figura 1.22 - Símbolos usados para representar as marcas da ferramenta na designação da textura da superfície segundo as normas ANSI Y14.36 de 1978 [ANSI, 1978], e ISO 1302 de 2001 [ISO, 2001]



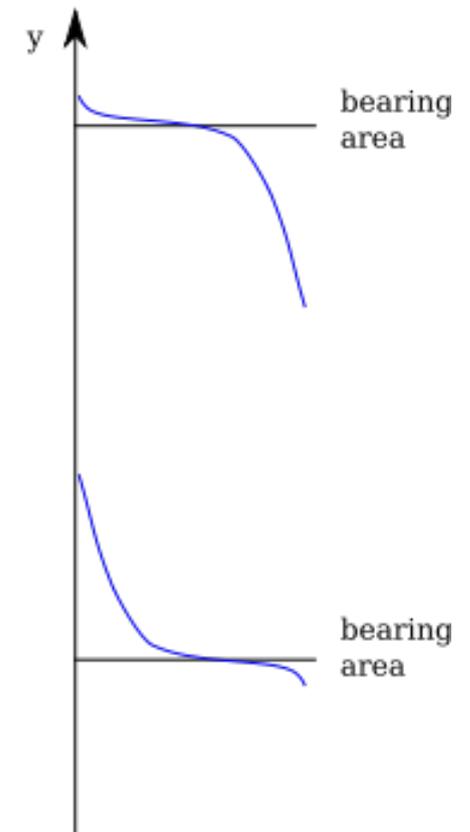
Abbott Firestone



roughness trace



amplitude
distribution



Abbott-Firestone
curve

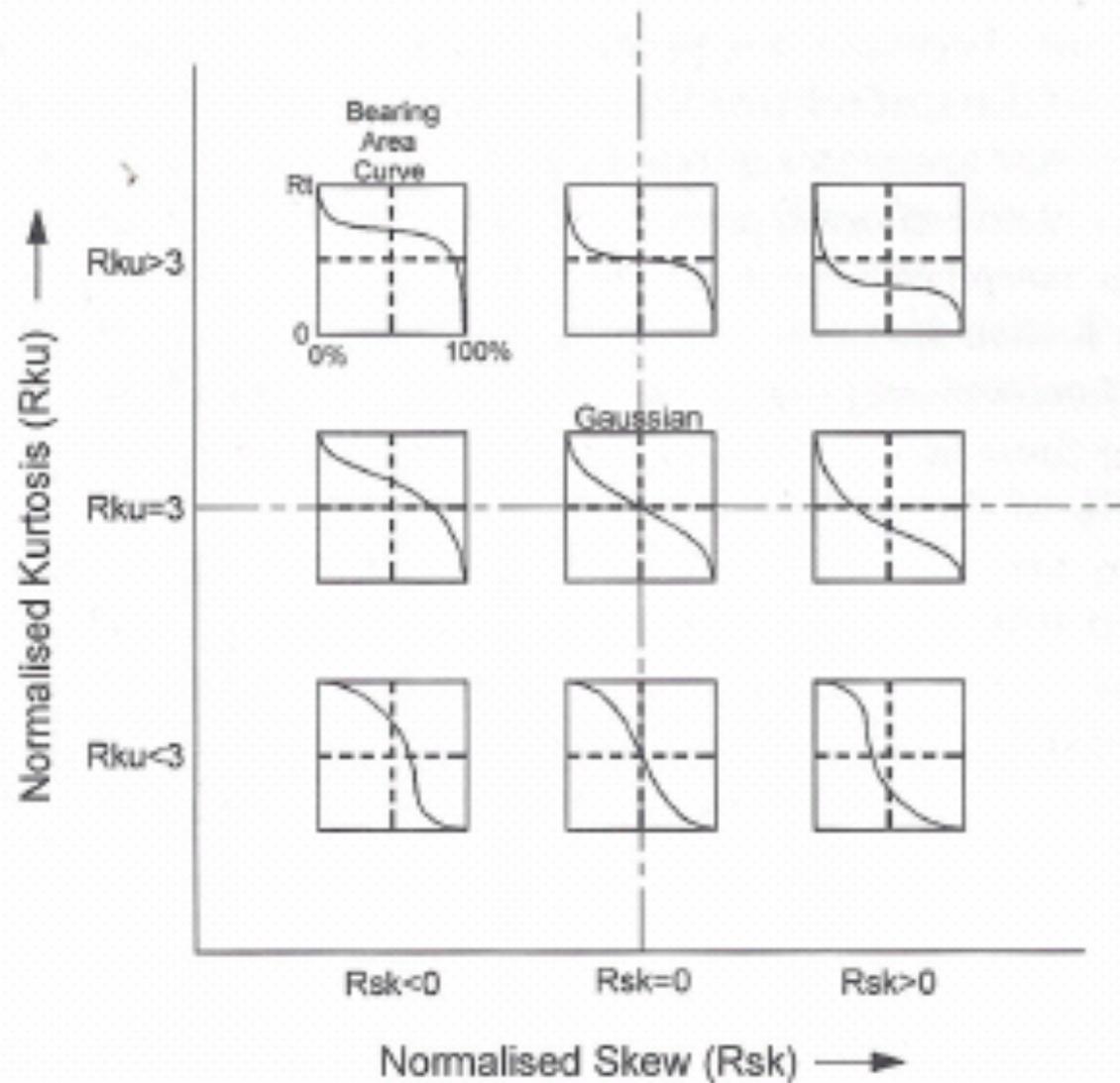


Figure 4.8 Bearing area curve shapes in skew/kurtosis space

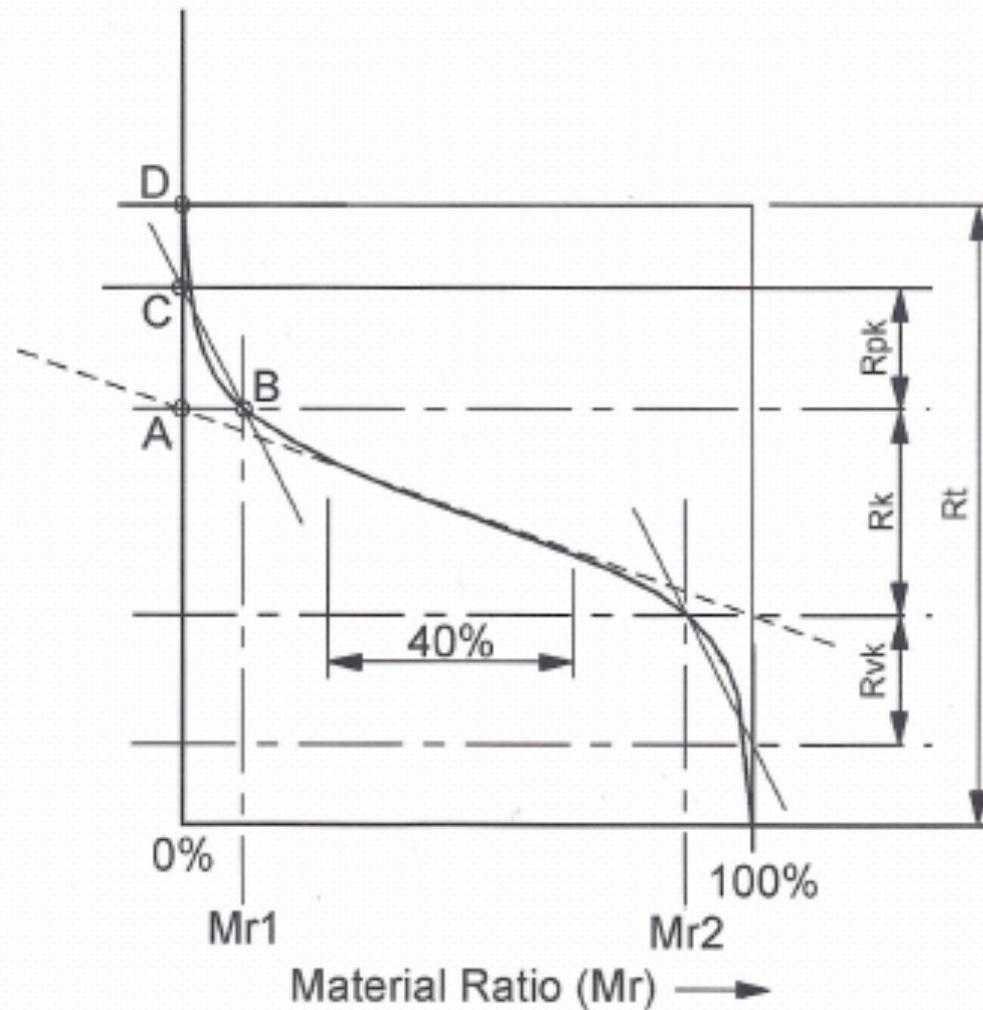


Figure 4.9 The bearing area parameters R_{pk} , R_k , R_{vk} , Mr_1 and Mr_2



Usinabilidade

“Na usinagem com remoção de cavacos verifica-se que os diversos materiais se comportam de modo distinto, sendo que alguns podem ser trabalhados com grande facilidade, enquanto que outros oferecem uma série de problemas ao operador”

Descreve todas as dificuldades que um material apresenta na sua usinagem.

Compreende todas as propriedades de um material que têm influência sobre o processo de usinagem.

Definição: Usinabilidade pode ser definida como sendo a capacidade dos materiais de peça em se deixarem usar



Usinabilidade

Usinabilidade pode ser definida como uma propriedade ou grandeza tecnológica que é expressa por um valor numérico comparativo.

A usinabilidade está relacionada com o grau de dificuldade em se usinar um determinado material



Usinabilidade

Na verdade, a usinabilidade descreve genericamente as características operacionais da ferramenta de corte.

A usinabilidade de um material metálico é influenciada por vários fatores tais como: composição química, microestrutura, resistência do material, avanço utilizado na usinagem, velocidade de corte, profundidade de corte e escolha do fluido de corte.



Usinabilidade

Existem três aspectos que caracterizam, por assim dizer, a usinabilidade, que são:

a vida da ferramenta,
o acabamento superficial e
a potência requerida para o corte.



Usinabilidade

A usinabilidade pode ser definida com auxílio de alguns critérios tais como:

- vida da ferramenta e desgaste da ferramenta,
- acabamento superficial da peça usinada,
- remoção de cavaco,
- velocidade de corte e produtividade



Ensaio de Usinabilidade

Ensaio de longa duração onde o material usinado é comparado com um material padrão até o fim de vida da ferramenta (V_B ou V_T) em diferentes velocidades de corte.

Normalmente se seleciona uma velocidade com base em vida de 20 ou 60 min.



O índice de usinabilidade (IU) é dado pela relação entre a vida do material ensaiado e do material padrão. O aço considerado como padrão é o AISI B1112

$$IU = V_{C20} \text{ (ou } V_{C60}) / V_{C20\text{padrão}} \text{ (ou } V_{C60\text{padrão}})$$

Obs. A maioria dos ensaios de usinabilidade foram feitos para torneamento.

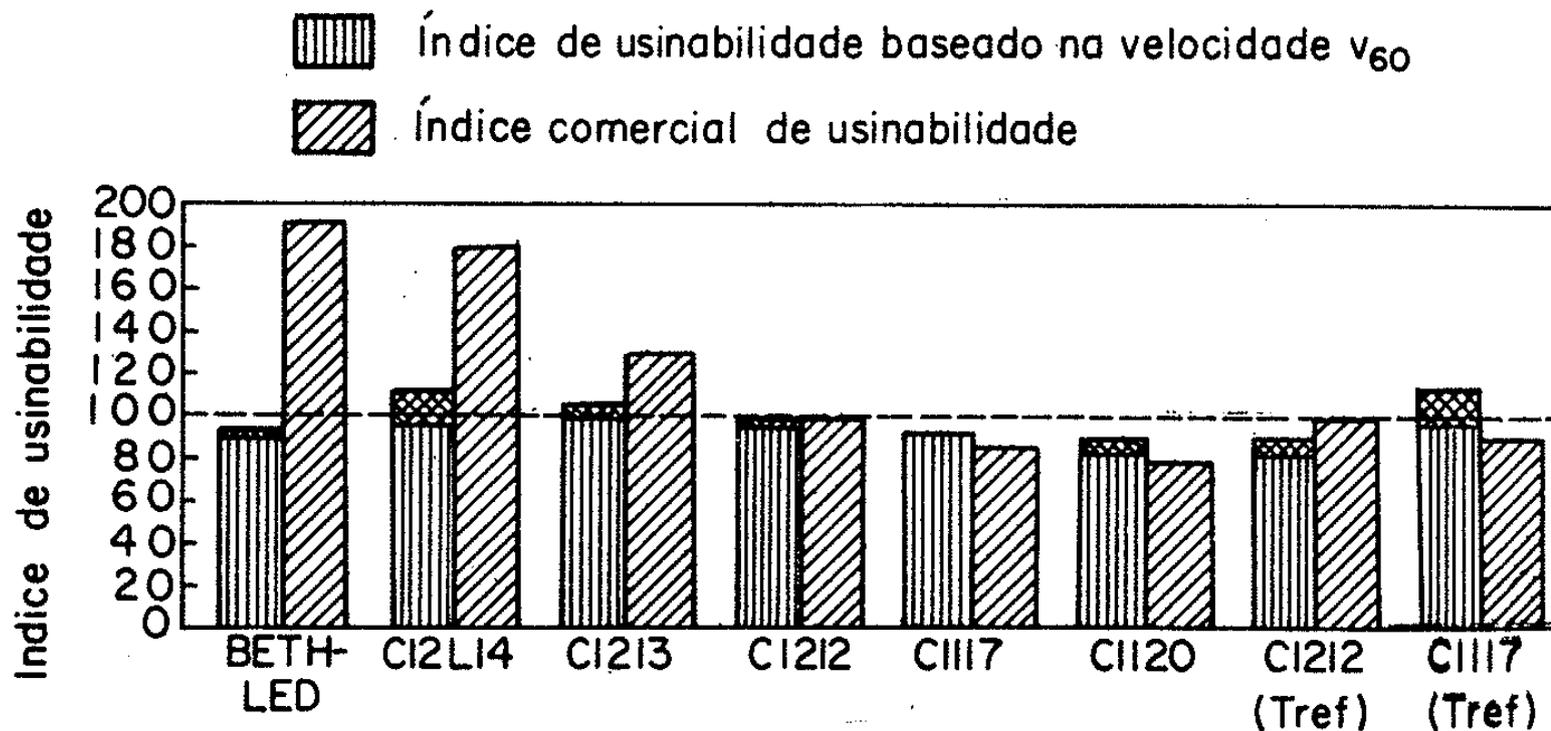


FIG. 12.6 — Comparação entre os índices comerciais de usinabilidade e a velocidade v_{60} [9].



Teste da taxa de desgaste de Taylor

Especificado pela ISO 3685 de 1977 (ISO 3685: Tool-Life Testing with Single-Point Turning Tools)

Objetivo que os testes sejam realizados em condições padrão para serem obtidos dados compatíveis de fontes diferentes.



Ensaio de usinabilidade

Ensaio de curta duração

Forças de Usinagem

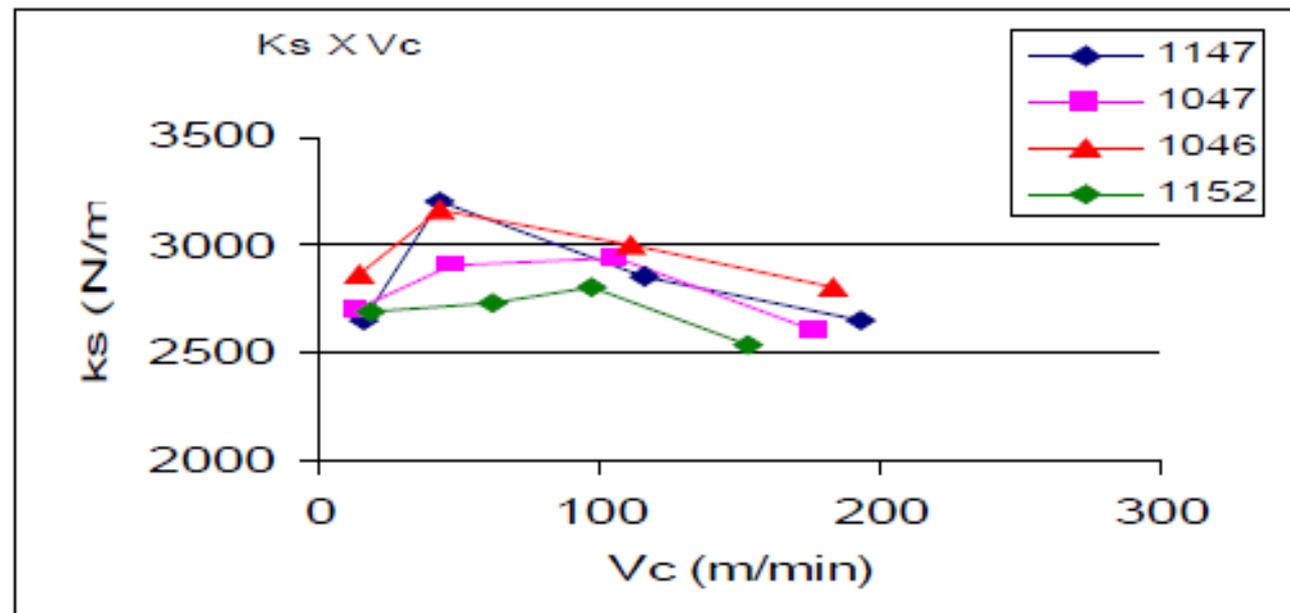


Figura 52. k_s , N/mm^2 , pressão específica de corte, em função da velocidade de corte (V_c , velocidade de corte em m/min).



Ensaio de usinabilidade

Ensaio de curta duração

Rugosidade

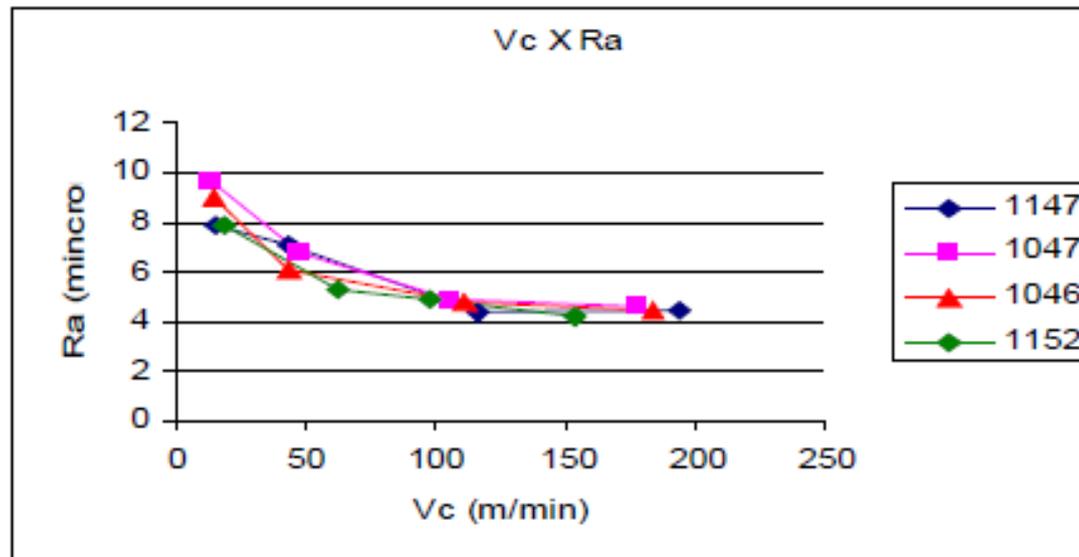


Figura 56. R_a , micrometros, rugosidade média, em função da velocidade de corte (V_c , m/min).



Observações

As condições de usinagem variam (equipamentos, operador...)

A comparação entre uma condição de usinagem, onde o material 1 apresentou melhor usinabilidade que o material 2, pode não se manter para outra condição de usinagem.



Usinabilidade e as propriedades dos materiais

Dureza (?) – Ensaio Estático

Resistência Mecânica

Ductilidade

Taxa de encruamento

Condutividade térmica

Expansão térmica



Testes que não requerem usinagem

Composição química:

$$V_{C60} = 161,5 - 141,4\%C - 42,4\%Si - 39,2\%Mn - 179,4\%P + 121,4\%S$$

(erro de 8%)

$$IU = 146 - 400\%C - 1500\%Si + 200\%S$$



Teste de microestrutura

Tabela 1. Microestruturas otimizadas para usinagem [1].

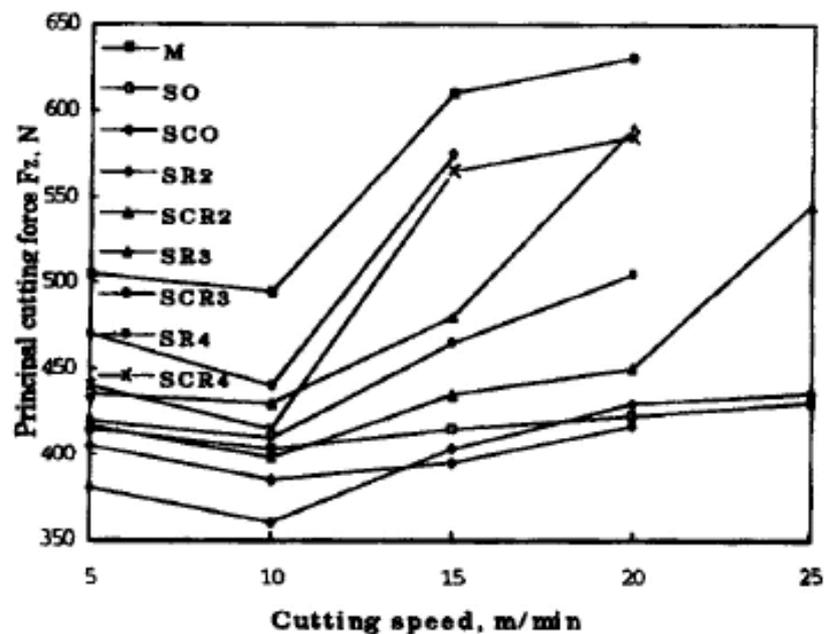
% Carbono	Microestrutura otimizada
0,06-0,20	Laminado (mais econômico)
0,20-0,30	Acima de 3 polegadas, normalizado; menores dimensões como laminado
0,30-0,40	Recozido (perlita grosseira, fração mínima de ferrita)
0,40-0,60	Perlita lamelar grosseira até esferoidizada.
0,60-1,00	100% de perlita esferoidizada, de grosseira à fina.



Tabela 15.1. Efeito da microestrutura na usinabilidade dos aços [6]

Tipo de microestrutura	Dureza Brinell	V_{c20} [m/min]
10% - perlita e 90% ferrita	100 – 120	290
20% - perlita e 80% ferrita	120 – 140	260
25% de perlita esferoidizada	160 – 180	180
50% - perlita e 50% ferrita	150 – 180	150*
75% - perlita e 25% ferrita	170 – 190	140
100% perlita	180 – 220	145
Martensita revenida	280 – 320	105
Martensita revenida	370 – 420	46

* Valor estimado



Chemical composition of the steels tested (wt.%)

Code	C	Cr	Ni	Mn	Mo	V	Si	Al	P	S	Ca	RE
M	0.58	1.13	1.03	1.05	0.48	0.20	0.36	0.033	0.021	0.022		
SO	0.54	1.07	1.04	1.02	0.47	0.19	0.23	0.115	0.020	0.135		
SCO	0.57	0.98	1.04	0.98	0.48	0.21	0.46	0.022	0.019	0.086	0.0064	
SR2	0.56	0.94	1.16	1.05	0.50	0.22	0.22	0.040	0.009	0.102		0.049
SR3	0.55	0.98	1.01	0.98	0.46	0.24	0.48	0.061	0.020	0.115		0.081
SR4	0.59	0.96	1.06	1.05	0.48	0.24	0.47	0.096	0.009	0.058		0.120
SCR2	0.56	0.96	1.16	0.98	0.46	0.21	0.52	0.068	0.009	0.129	0.0035	0.045
SCR3	0.54	1.07	1.03	0.98	0.48	0.21	0.66	0.073	0.024	0.119	0.0024	0.130
SCR4	0.57	1.11	1.11	0.98	0.47	0.24	0.46	0.045	0.020	0.079	0.0039	0.120

Figura 3. Efeito da composição química nas forças de corte de aços contendo diferentes teores de enxofre. (OBS. As velocidades de corte utilizadas neste trabalho foram muito baixas).



Usinabilidade do ponto de vista do material

Alterações na composição química/ microestrutura

USINAGEM x APLICAÇÃO

Efeitos no comportamento mecânico



Teste de propriedades físicas

$$V_{C60} \propto \frac{B}{L \cdot HB} \cdot \sqrt{1 - \frac{A_R}{100}}$$

onde,

B = Condutividade térmica do material

L = um comprimento característico

HB = Dureza Brinell do material

A_r = redução de área obtida em ensaio de tração convencional.

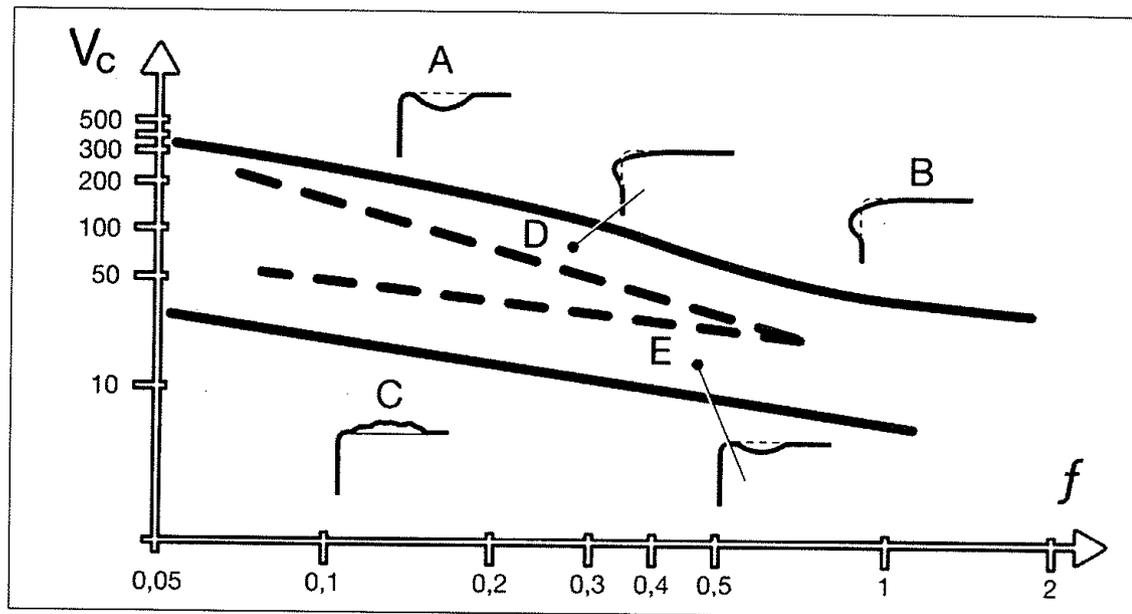
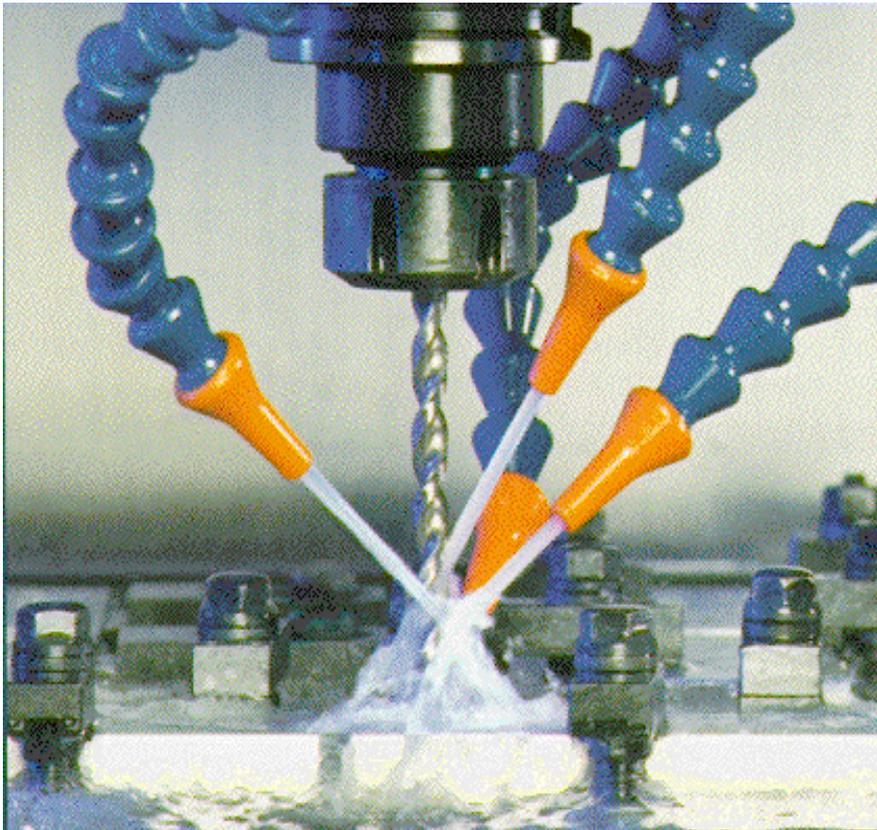


Figura 9.4 - Indicações Gerais sobre Condições de Usinagem para o Torneamento de Aços Inoxidáveis Austeníticos

A figura 9.4 mostra um diagrama com indicações gerais sobre as velocidades de corte e os avanços para o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos com insertos de metal duro. Na região A desta figura, uma alta taxa de desgaste de cratera deve acontecer, devido ao processo difusivo causado pela alta temperatura gerada (alta velocidade de corte). Na região B, a deformação plástica da ferramenta deve ser excessiva, pois as forças de corte (devido ao alto avanço) e as temperaturas (devido à combinação de alta velocidade de corte e avanço) são altas. Na área C, devido às baixas velocidades de corte e à tendência ao empastamento do cavaco deste tipo de aço, deve haver a formação de aresta postiça de corte. Ainda deve haver alguma deformação plástica da ferramenta na região D e algum desgaste de cratera na região E.



Fluidos de Corte





Avaliação econômica das condições de usinagem

Seleção de equipamentos e ferramentas

Desgaste de ferramenta

Avaliação da superfície (acabamento/ desempenho)

Uso ou não de fluido de corte

Custos (Tecnologia da Usinagem dos Materiais)



Planejamento do processo

Projeto do produto (características principais da peça ou componente)

Planejamento do processo (como será feita a peça ou componente com os equipamentos que estão à disposição com as características e tolerâncias requeridas)

Custo do processo (operários, máquinas, ferramentas, energia...)



Na fabricação da peça ou componente devem ser selecionados

Velocidades de corte

Avanços

Profundidade de corte

Material e geometria da ferramenta

Fluido de corte



Tempo e custo de fabricação

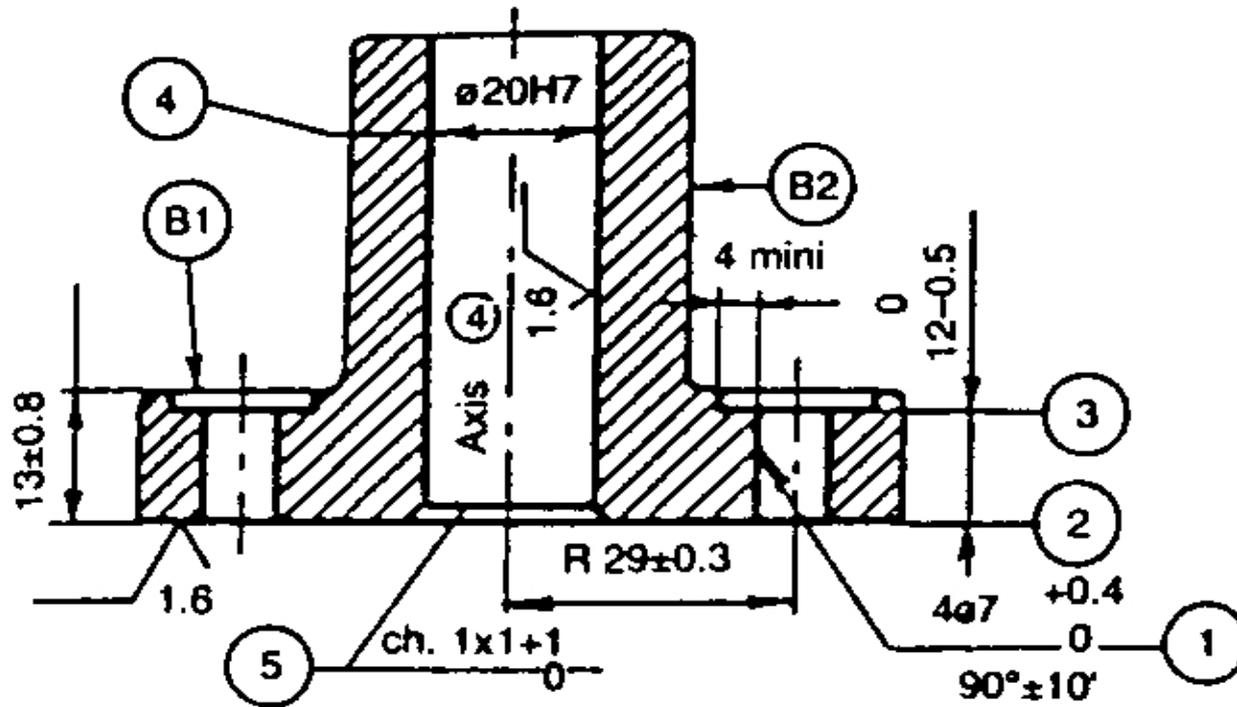
Tempo de operação e

Tempo improdutivo

Custo de usinagem por peça

Custo de tempo improdutivo por peça

Custo de ferramenta por peça



Material : cast iron ft 20 (sand)

4		ø2	B2
---	--	----	----

4		ø0.02	2
---	--	-------	---

2		0.02
---	--	------

12.5 Machined

25 Cast

Tolerance A
Quantity : 1200



O ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças, é constituído diretamente pelas seguintes fases:

1. Colocação e fixação da peça
2. Aproximação e posicionamento da ferramenta
3. Corte
4. Afastamento da ferramenta
5. Inspeção (se necessário) e retirada da peça

Além destas fases, tomam parte indiretamente no ciclo de usinagem (para um lote de Z peças)

6. Preparo da máquina
7. Remoção da ferramenta para sua substituição
8. Recolocação e ajustagem da nova ferramenta



t_t = tempo total de usinagem de uma peça

t_c = tempo de corte (fase 3)

t_s = tempo secundário (fases 1 e 5)

t_a = tempo de aproximação e afastamento (fases 2 e 4)

t_p = tempo de preparo da máquina (fase 6)

t_{ft} = tempo de troca da ferramenta (fases 7 e 8)

O tempo total de usinagem de uma peça, dentro de um lote de Z peças, será:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t}{Z} t_{ft} \quad (8.1)$$

N_t = número de trocas da ferramenta para usinagem do lote



onde: t_c = tempo de corte, que diminui com o aumento da velocidade

t_1 = tempo improdutivo, referente à colocação, inspeção e retirada da peça, avanço e afastamento da ferramenta, substituição da ferramenta e preparação para a usinagem de um lote, que é independente da velocidade

t_2 = tempo relacionado com a troca da ferramenta. Quanto maior a velocidade menor a vida da ferramenta e maior é o número de paradas da máquina para substituição da mesma. Portanto, maior também esta parcela.



Velocidade de corte de máxima produção

$$V_{CMXP}$$

$$l_f = v_f \cdot t_c = f \cdot n \cdot t_c$$

Onde, a rotação da peça n pode ser dada por: $n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d}$

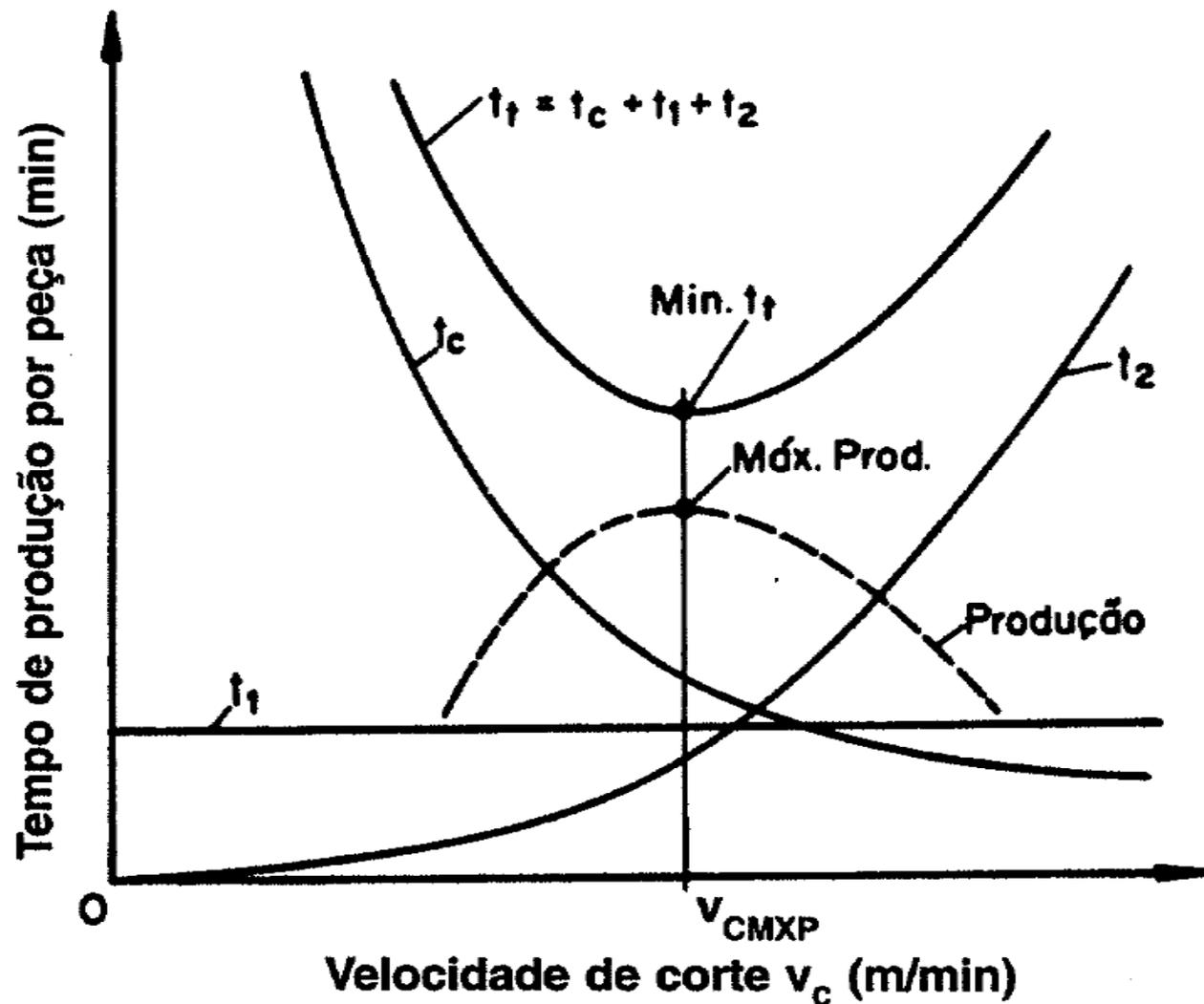
Assim, tem-se, no torneamento cilíndrico, que:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c}$$

onde: l_f = percurso de avanço em mm
 d = diâmetro da peça em mm
 f = avanço em mm/volta
 v_c = velocidade de corte em m/min

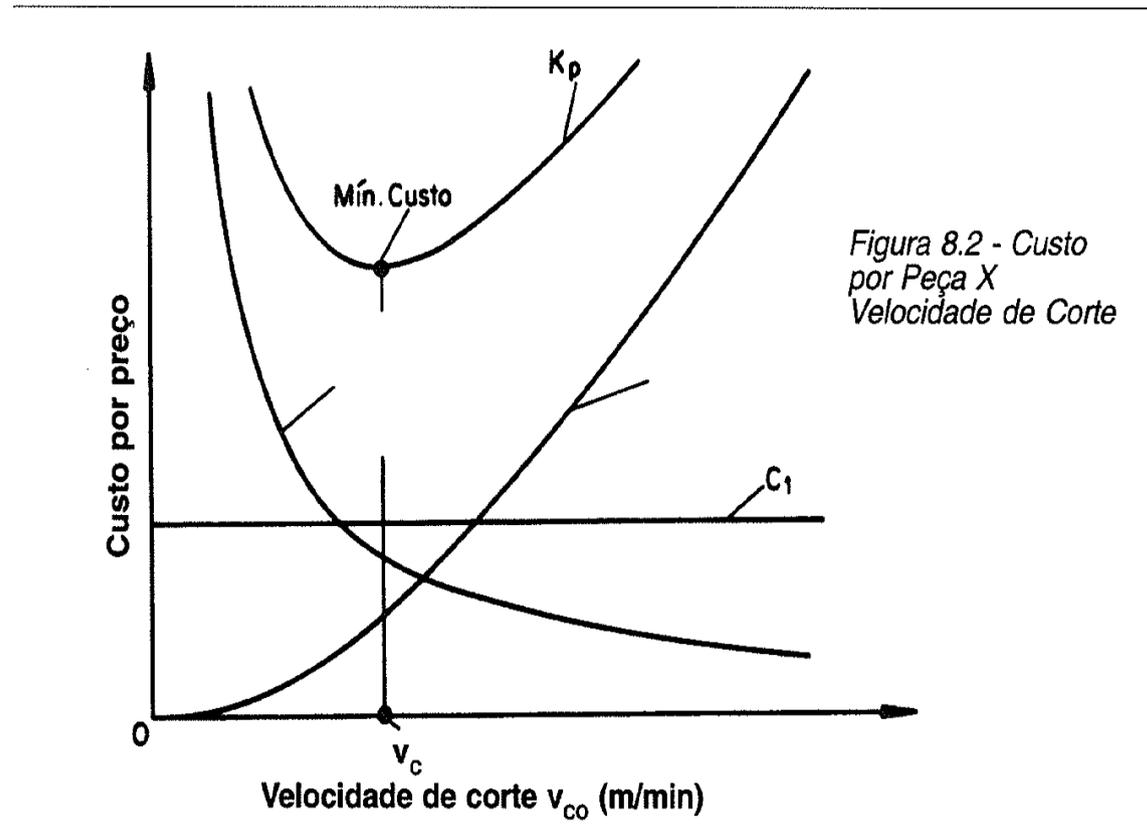


Velocidade de corte e taxa de produção





$$\frac{dK_p}{dv_c} = - \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot v_c^2} \cdot C_2 + \frac{(x-1) \cdot \pi \cdot d \cdot l_f \cdot v_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot C_3 = 0$$



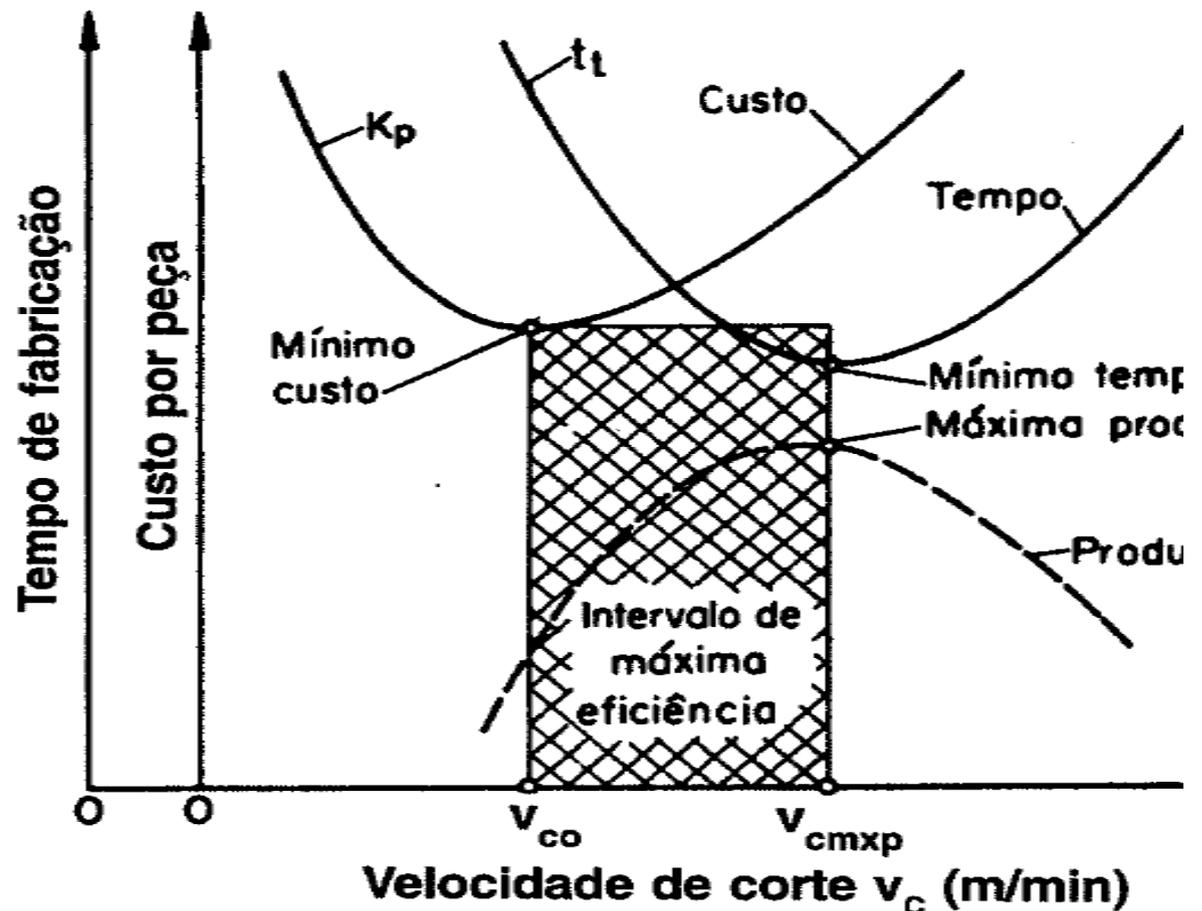
Logo, a velocidade de corte de mínimo custo será:

$$v_{co} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (8.22)$$



O intervalo de máxima eficiência está entre a velocidade de corte de mínimo (V_{co}) custo e máxima produção (V_{cmxp}).

Figura 8.3 - Intervalo de Máxima Eficiência





Referências

Tecnologia da usinagem dos materiais. Anselmo Eduardo Diniz, Francisco Carlos Marcondes e Nivaldo Lemo Copini .
Artliber

Teoria da usinagem dos materiais. A.R. Machado, A.M. Abrão, M.B. da Silva e R.T. Coelho. Editora Blucher.

Kalpakajian

Fundamentos da Usinagem dos Metais (Dino Ferraresi)

e Agradecimentos ao Prof. Dr. Rodrigo Stoeterau



1. O que é o processo de usinagem e quais as suas principais características?
2. O que é cavaco em processos de usinagem ?
3. Faça um desenho esquemático de um material sendo torneado (Cinemática geral dos processos de usinagem).
4. Quais são os aspectos geométricos (ângulos) mais importantes na geometria de uma ferramenta de corte (usar processo de torneamento) ? Descreva em detalhes a influência do ângulo de saída, de folga e de posição.
5. Qual a relação do raio de ponta da ferramenta com o processo de corte?
6. O que é um quebra cavaco?
7. Quais são os principais tipos de cavaco?
8. Quais são os principais materiais para ferramentas de corte em usinagem?
9. Descreva e desenhe esquematicamente os principais tipos de desgaste da ferramenta.
10. Qual a importância de se determinar o desgaste da ferramenta e o valor de VB, que é usualmente utilizado para isso.



11. Quais são as forças de usinagem?
12. Desenhe esquematicamente essas forças de usinagem durante um processo de torneamento.
13. Por que a determinação das forças de corte são importantes para determinar a usinabilidade?
14. O que é rugosidade e qual a sua importância em processos de usinagem?
15. Qual é a equação da velocidade de corte (V_c) ? Descreva os termos desta equação e porque ela é tão importante.
16. Além da equação, onde se determina V_c , quais são as formas de se determinar as melhores velocidades de corte?
17. Quais são as principais grandezas (esforços) em um processo de usinagem?
18. Como as características geométricas da ferramenta influenciam no processo de corte?
19. Quais são as principais diferenças entre um processo de torneamento, fresamento e de furação?



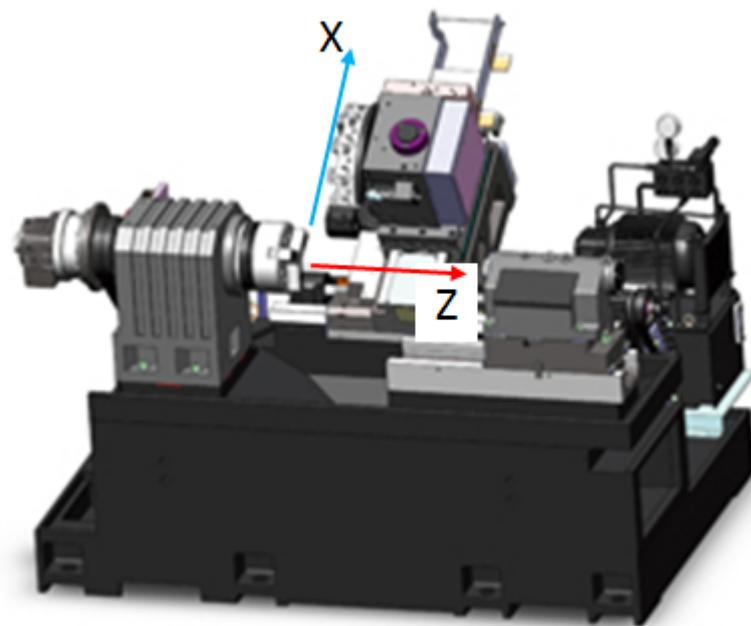
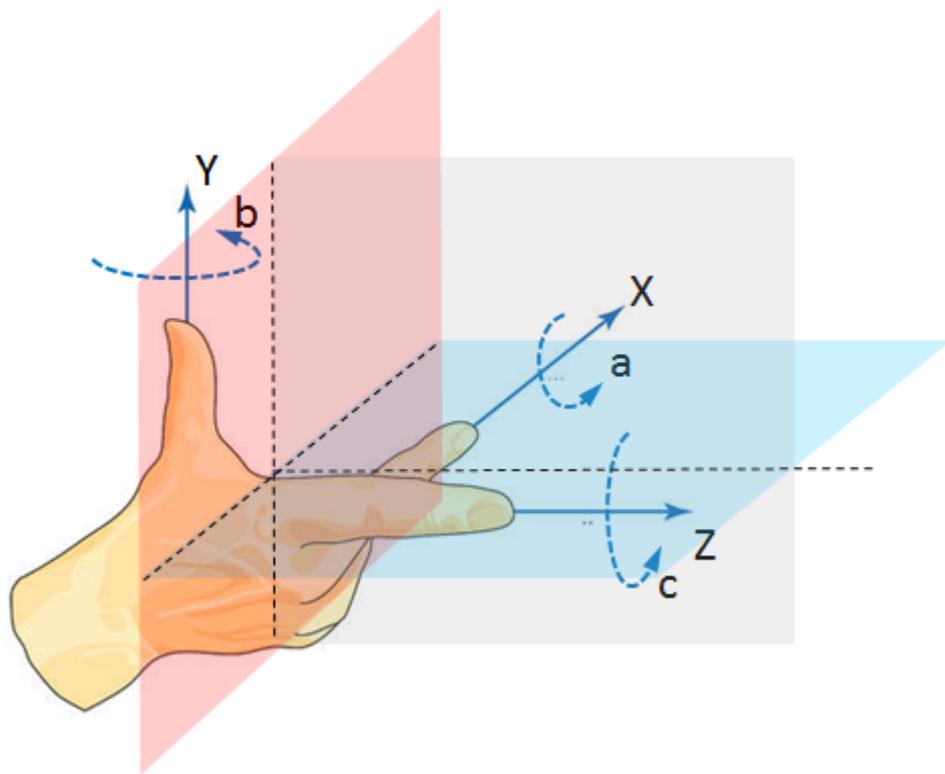
FIM



ANEXO 1

Eixos e sistemas de coordenadas

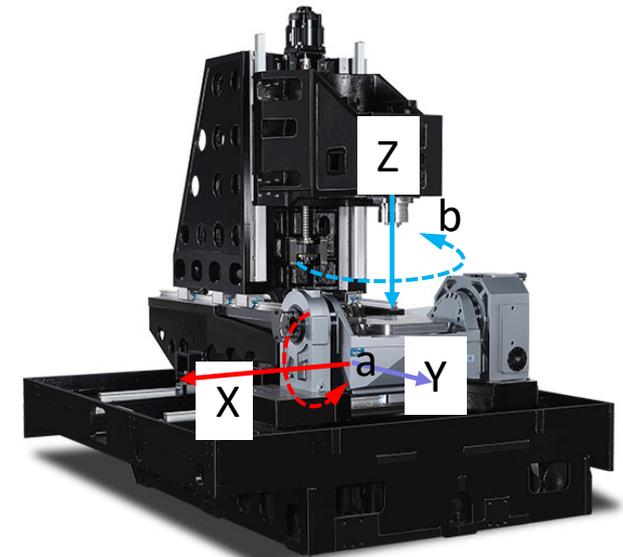
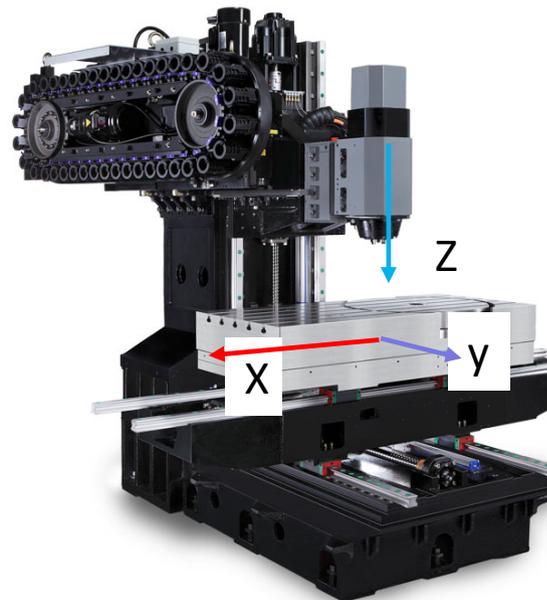
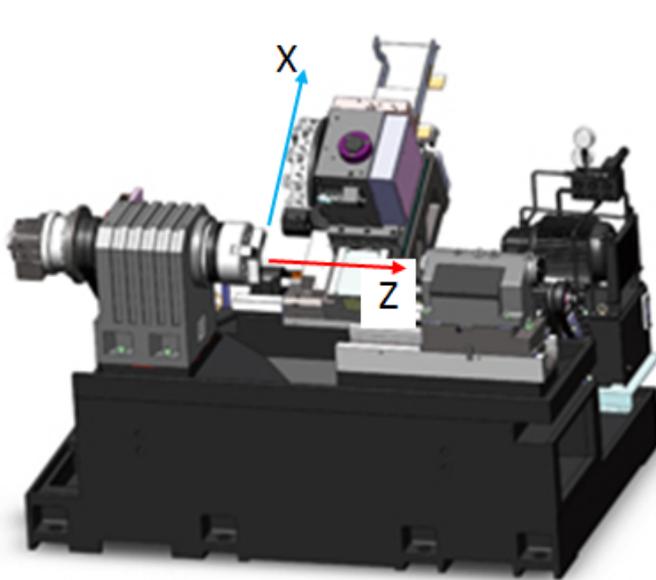
→ Regra da mão direita





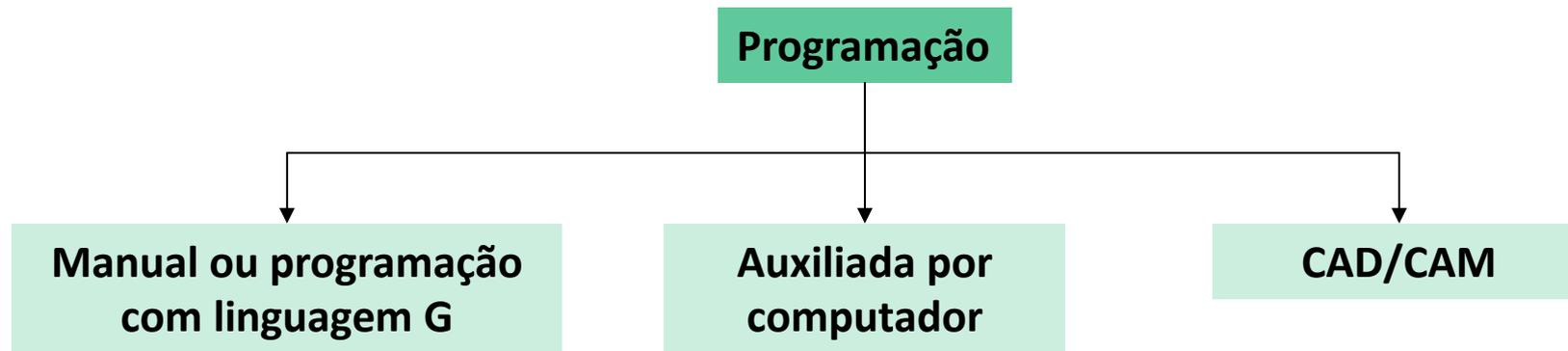
Eixos e sistemas de coordenadas

→ Regra da mão direita





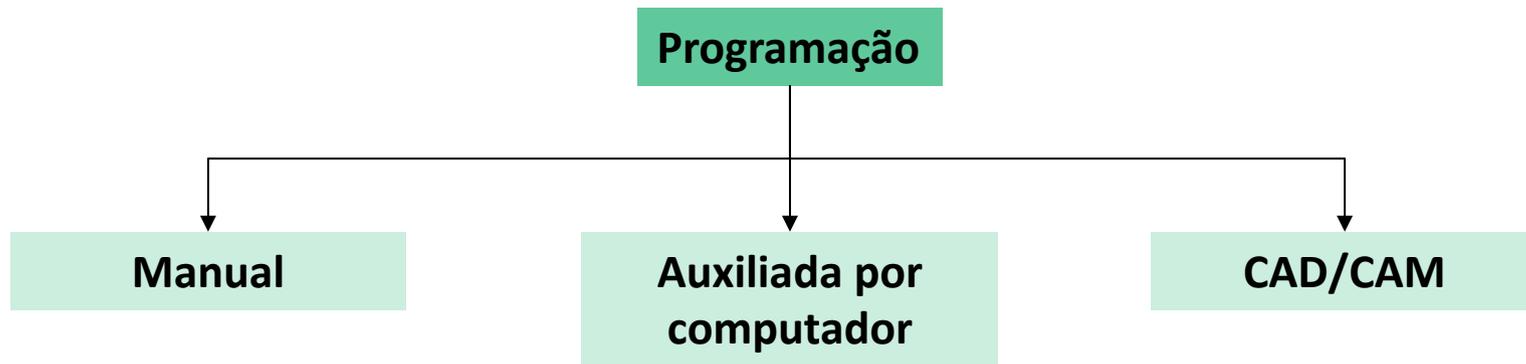
Fundamentos de metrologia



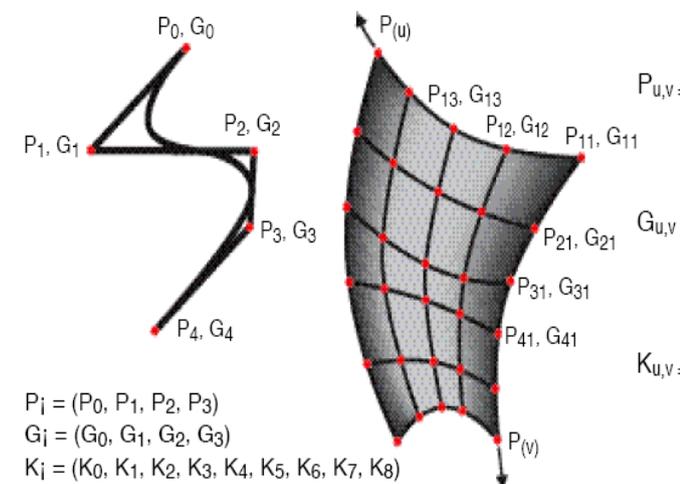
A programação manual com códigos G é a linguagem mais comum utilizada para gerar instruções de movimentação da ferramenta em máquinas de comando numérico.



Fundamentos de metrologia

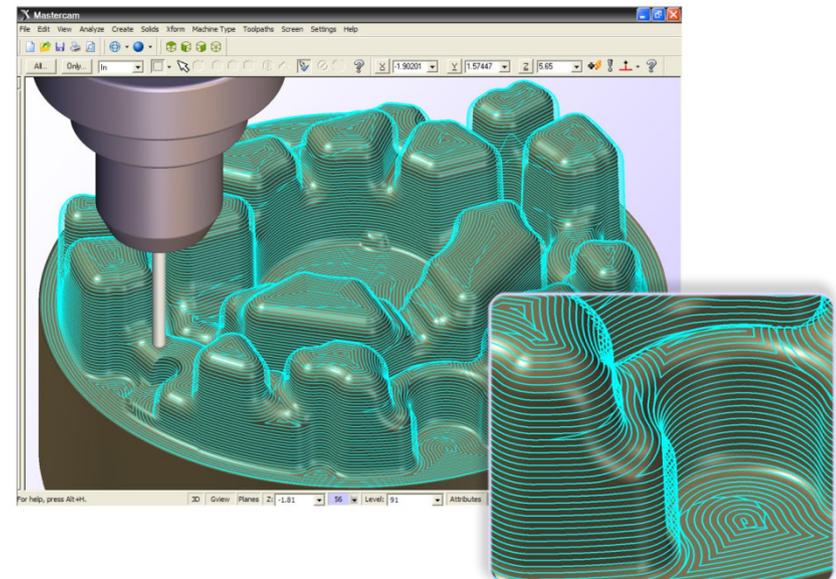
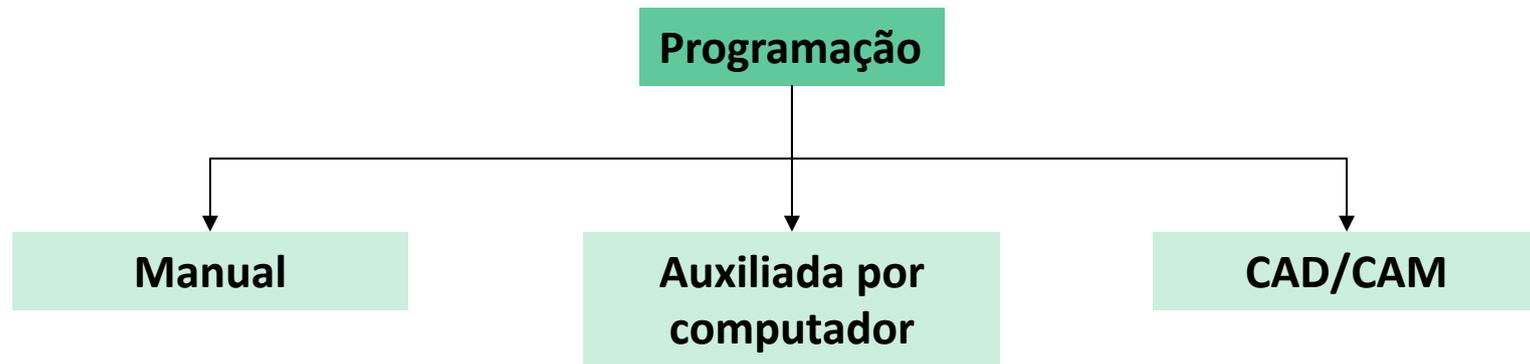


Programação CNC auxiliada por computador ou APT (*Automatically Programmed Tool*) é uma linguagem de programação e alto nível utilizada para gerar instruções para máquinas de comando numérico. É uma das primeiras linguagens de programação computacional de máquinas CNC, e é mais comumente utilizada na programação de peças complexas. Foi amplamente utilizada nos anos 70/80 do século passado e é considerada um padrão internacional. Atualmente foi superada pela programação integrada CAD/CAM





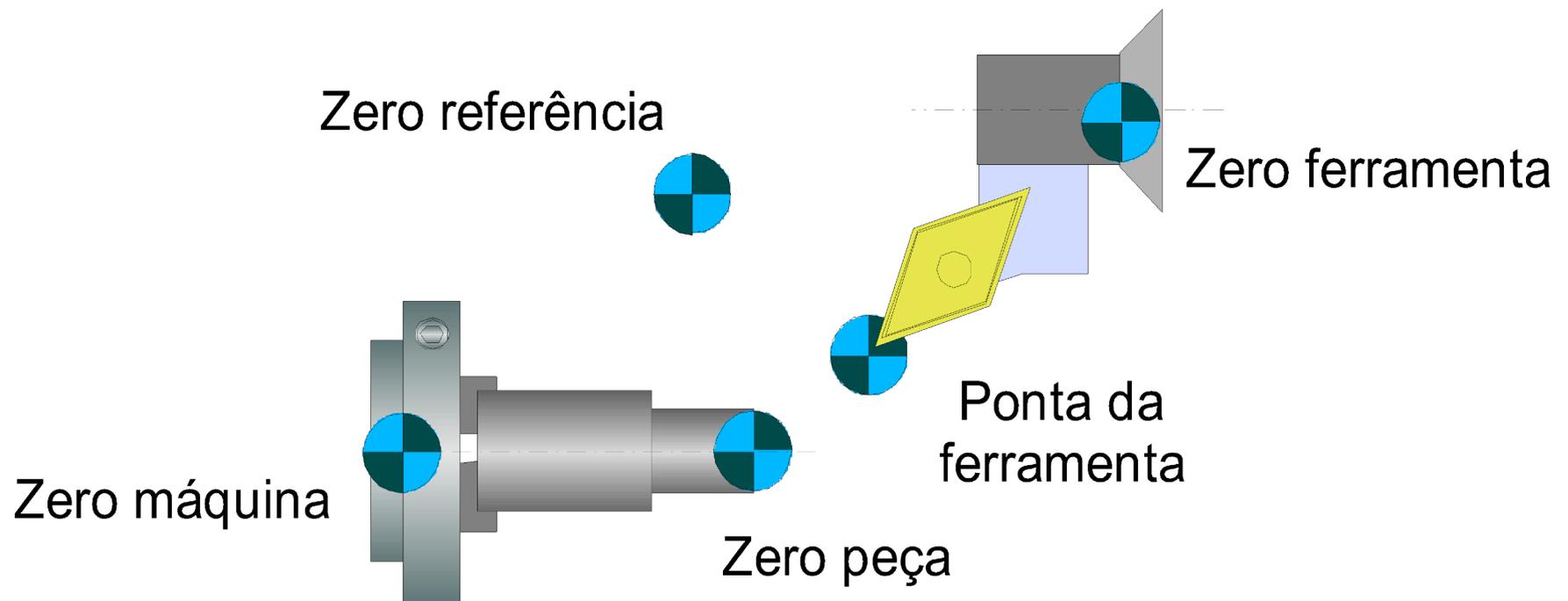
Fundamentos de metrologia





Zeros da programação

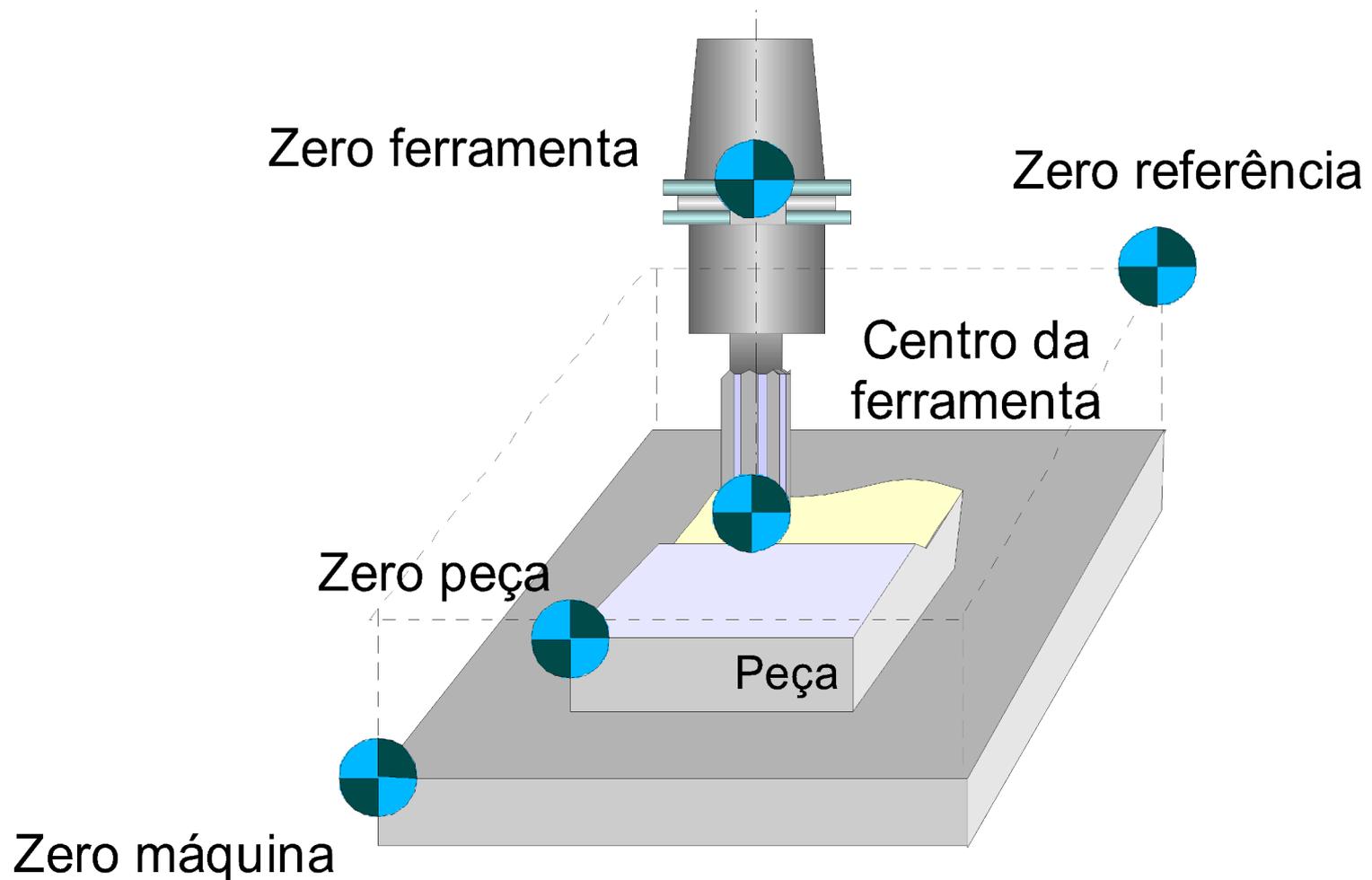
Torneamento





Zeros da programação

Fresamento





Programação manual – ISO, Códigos de programação

- % – início de programa
- () – comentários
- + – mais ou sentido positivo
- - – menos ou sentido negativo
- / – divisão
- : – parada
- . – ponto decimal
- , – virgula



Programação manual – ISO, Códigos de programação

- A,B,C – rotações em torno dos eixos coordenados X, Y e Z
- D – correção da ferramenta
- E – avanço secundário
- F – avanço da ferramenta
- G – código de movimentação
- H – comando livre
- I,J,K – parâmetros de interpolação circular
- L – comando livre
- M – funções miscelâneas
- N – linha de programação ou linha de comando

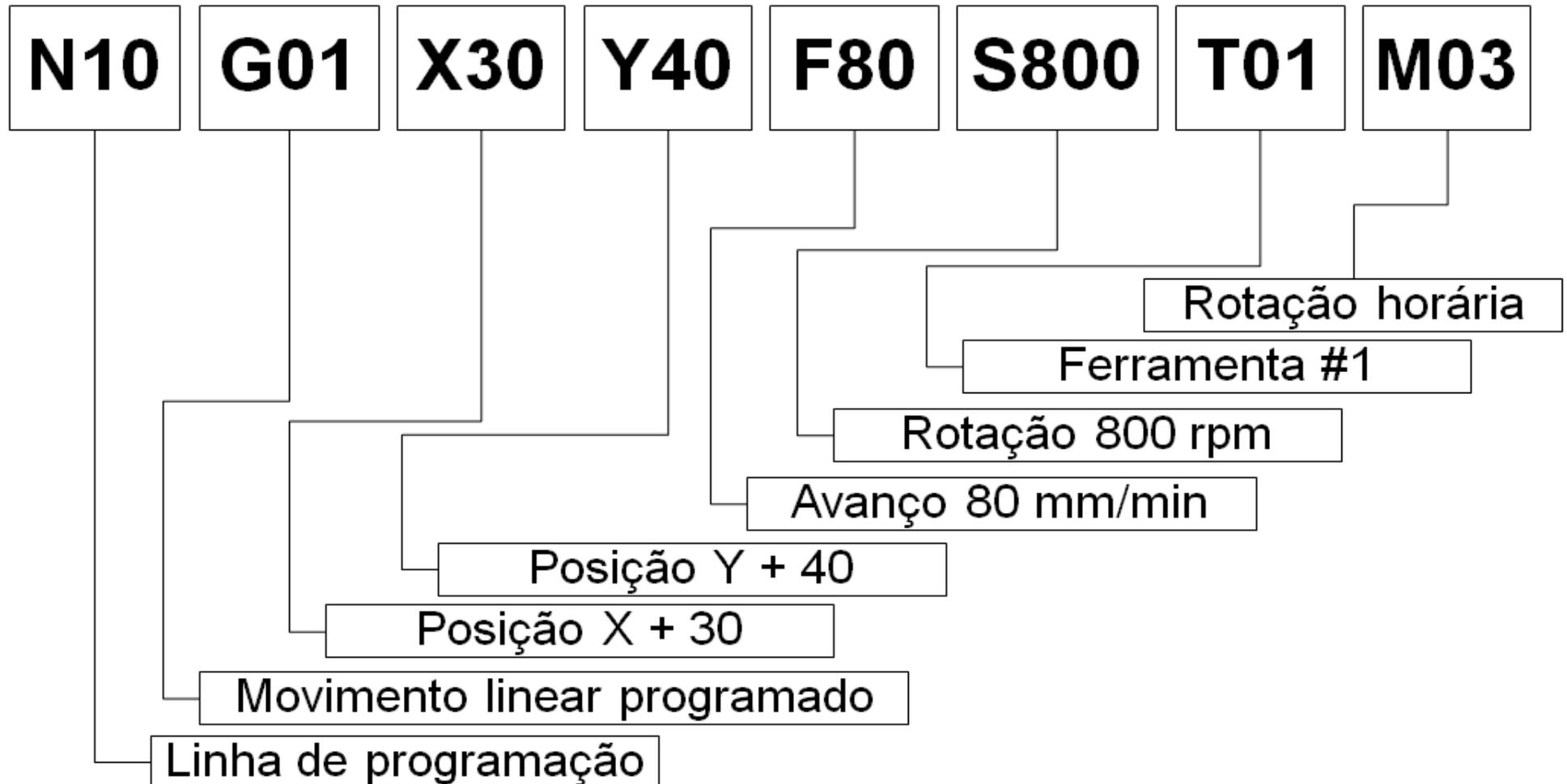


Programação manual – ISO, Códigos de programação

- O – comando livre
- S – rotação da árvore
- T – ferramenta
- U – eixo secundário X
- V – eixo secundário Y
- W – eixo secundário Z
- X,Y,Z – sentido de movimentação, eixos coordenados



Sintaxe da programação





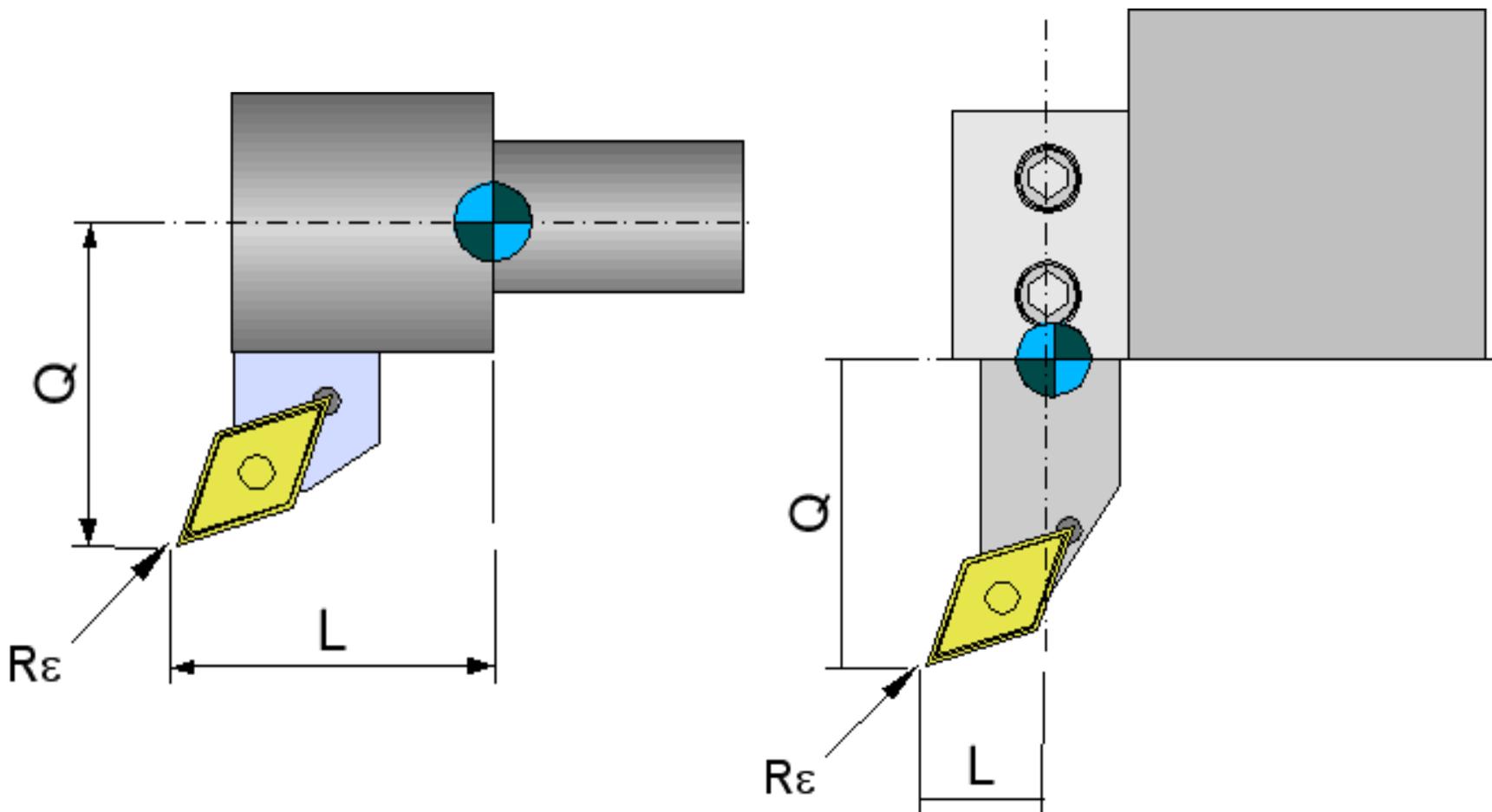
Estrutura da programação

- Declaração de ferramentas
- Início
- Declaração de sub-rotinas
- Movimentação
- Fim do programa



Dados da ferramenta

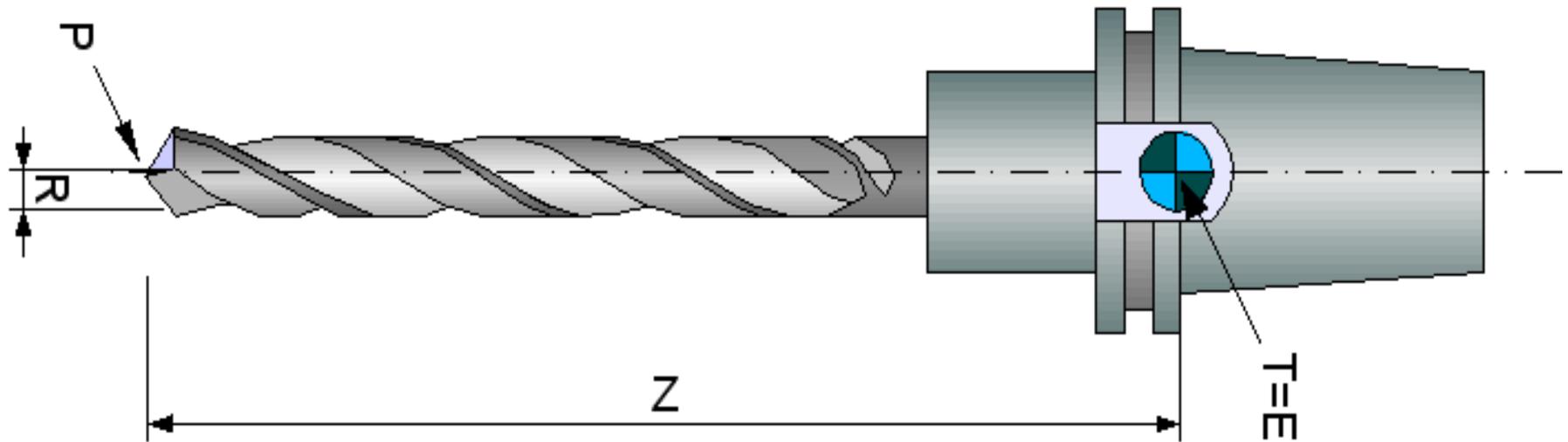
- Ferramentas de torneiar





Dados da ferramenta

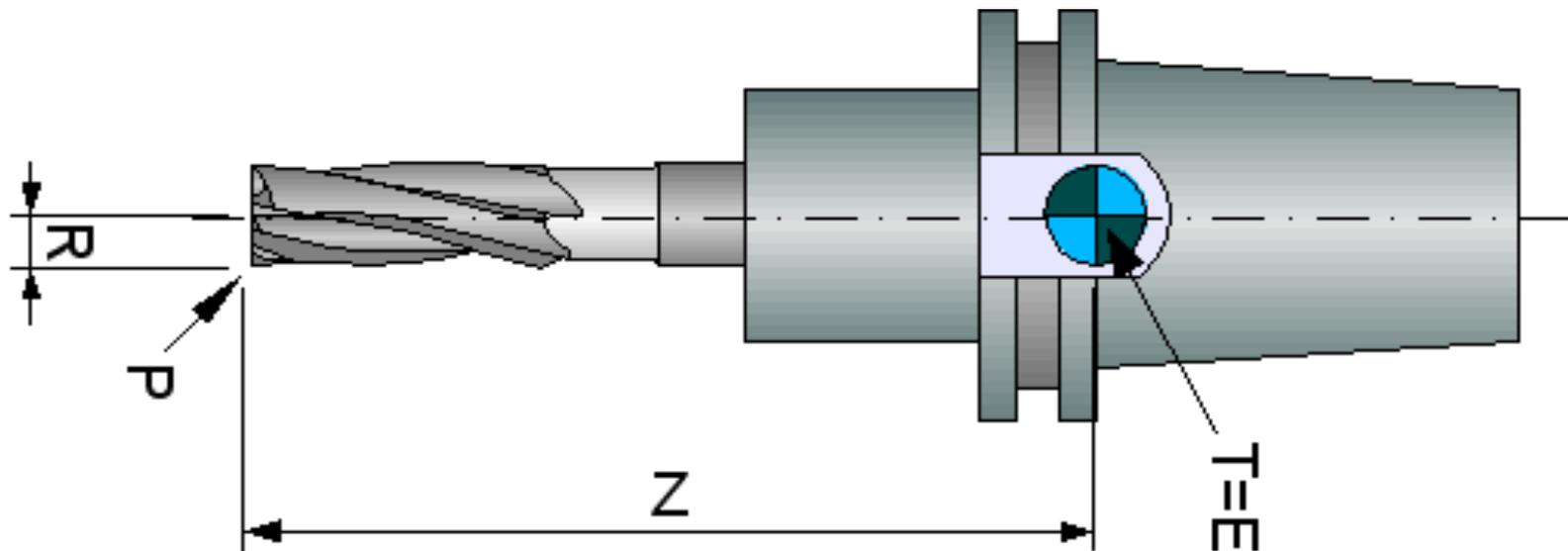
- Ferramentas de furar (Brocas)





Dados da ferramenta

- Ferramentas de fresar





Comandos ISO para torneamento

- G00 – movimento linear rápido
- G01 – movimento linear com avanço programado
- G02 – movimento circular horário com avanço programado
- G03 – movimento circular anti-horário com avanço programado
- G04 – cavidade
- G07 – eixo de interpolação imaginário - seno
- G09 – curva
- G10 – parada exata
- G11 – ativa sobre metal



Comandos ISO para torneamento

- G12 – desativa sobre metal
- G20 – dimensões em polegadas
- G21 – dimensões em milímetros
- G20 – dimensões em polegadas
- G21 – dimensões em milímetros
- G22 – limite de movimentos ligados (ON)
- G23 – limite de movimentos desligados (OFF)
- G27 – verificação do ponto de segurança
- G28 – retorno ao ponto de segurança
- G29 – retorno do ponto de segurança



Comandos ISO para torneamento

- G30 – retorno ao 2º, 3º e 4º ponto de referência
- G31 – desativa função G30
- G32 – execução de rosca
- G34 – execução de rosca de roscas com passo variável
- G35 – compensação de ferramenta em X
- G37 – compensação de ferramenta em Z



Comandos ISO para torneamento

- G40 – compensação do raio da ferramenta
- G41 – cancela G40
- G40 – compensação do raio da ferramenta
- G41 – cancela G41
- G42 – compensação do raio da ferramenta a esquerda
- G43 – compensação do raio da ferramenta a direita



Comandos ISO para torneamento

- G50 – programação do zero absoluto
- G52 – define sistema de coordenadas de trabalho
- G54, até G59 – sistemas de coordenadas predefinidos
- G65 – chamada de macro simples
- G66 – chamada de macro customizado
- G67 – cancela G66
- G68 – imagem espelhada para tornos de duas torres ligada (ON)
- G69 – imagem espelhada desligada (OFF)



Comandos ISO para torneamento

- G70 – ciclo de acabamento
- G71 – ciclo de desbaste
- G72 – ciclo de faceamento
- G73 – repetição de um padrão de movimentação
- G74 – furação no eixo Z
- G75 – cavidade no eixo X
- G76 – ciclo de usinagem de rosca



Comandos ISO para torneamento

- G90 – ciclo de corte A
- G91 – sistema de coordenadas incremental
- G92 – Define o sistema de coordenadas de trabalho
- G94 – Avanço em minutos
- G95 – Avanço em revoluções
- G96 – Liga velocidade superficial constante (torneamento)
- G97 – cancela G96
- G92 – ciclo de usinagem de rosca
- G94 – ciclo de corte B
- G98 – avanço em mm/min
- G99 – avanço em mm/rotação



Comandos ISO para torneamento

Comandos M (miscellaneous)

- M00 – parada do programa
- M01 – parada de programa opcional
- M02 – Fim de programa
- M03 – Liga a árvore no sentido horário
- M04 – Liga a árvore no sentido anti-horário
- M05 – Desliga a árvore
- M06 – Troca de ferramenta
- M08 – Liga o fluido de corte
- M09 – Desliga o fluido de corte



Comandos ISO para torneamento

Comandos M (miscellaneous)

- M10 – Ligar o freio do 4º eixo de fresamento (se esse existir)
- M11 – Desliga o freio do 4º eixo de fresamento (se esse existir)
- M19 – Orientação da árvore
- M30 – Reset, Fim de programa
- M31 – Liga a esteira removedora de cavaco
- M33 – Desliga a esteira removedora de cavaco
- M88 – Liga a refrigeração através da árvore
- M89 – Desliga a refrigeração através da árvore
- M97 – Chamada de sub-rotina
- M99 – Looping ou retorno de sub-rotina



Comandos ISO - Principais comandos

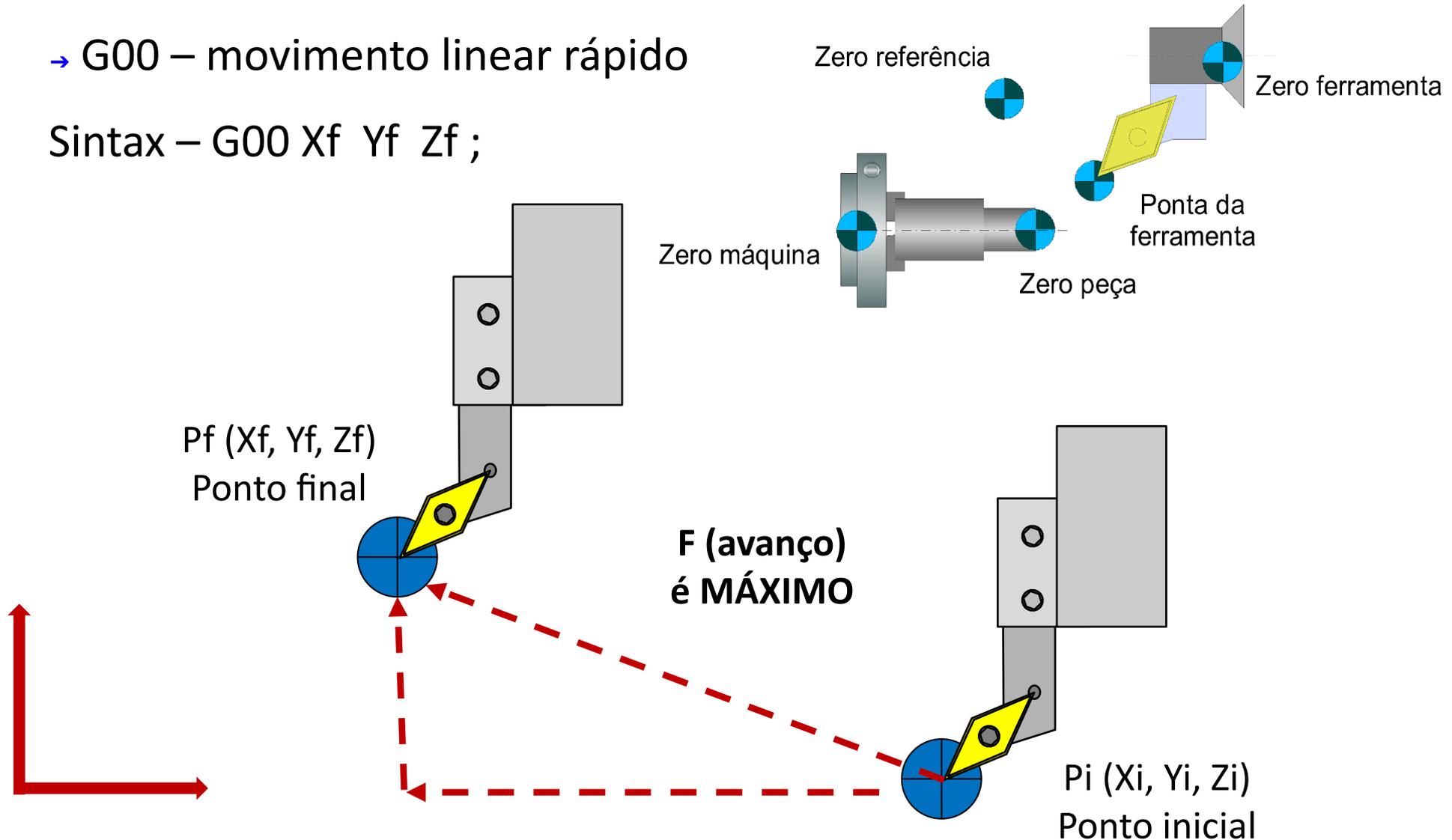
- G00 – movimento linear rápido
- G01 – movimento linear com avanço programado
- G02 – movimento circular horário com avanço programado
- G03 – movimento circular anti-horário com avanço programado
- G04 – cavidade
- G07 – eixo de interpolação imaginário - seno
- G09 – curva
- G10 – parada exata
- G11 – ativa sobre metal



Comando G00

→ G00 – movimento linear rápido

Syntax – G00 Xf Yf Zf ;



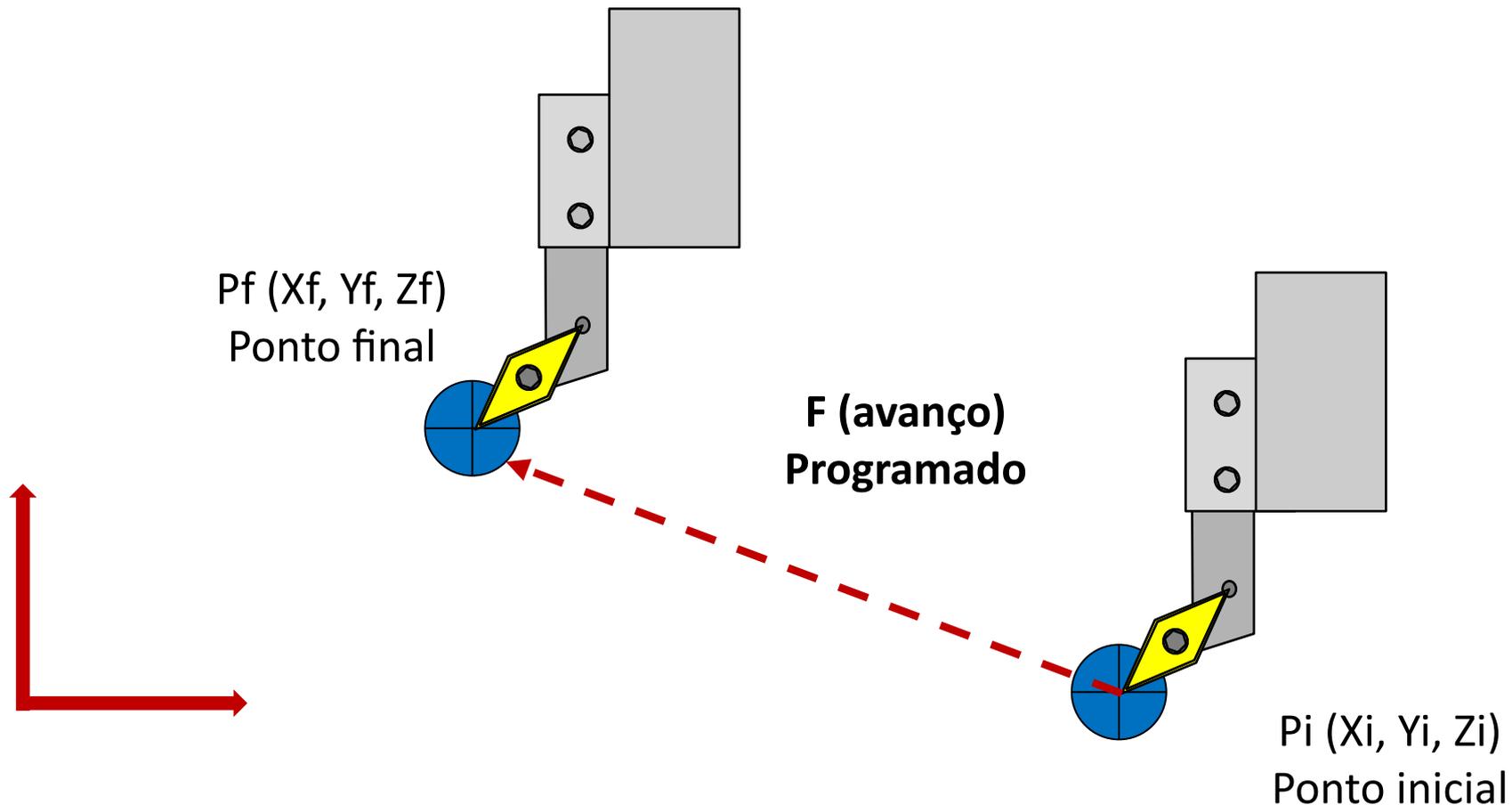
Obs: é bom saber onde a ferramenta está (Pi) antes de usar



Comando G01

→ G01 – movimento linear com avanço programado

Syntax – G01 Xf Yf Zf F;



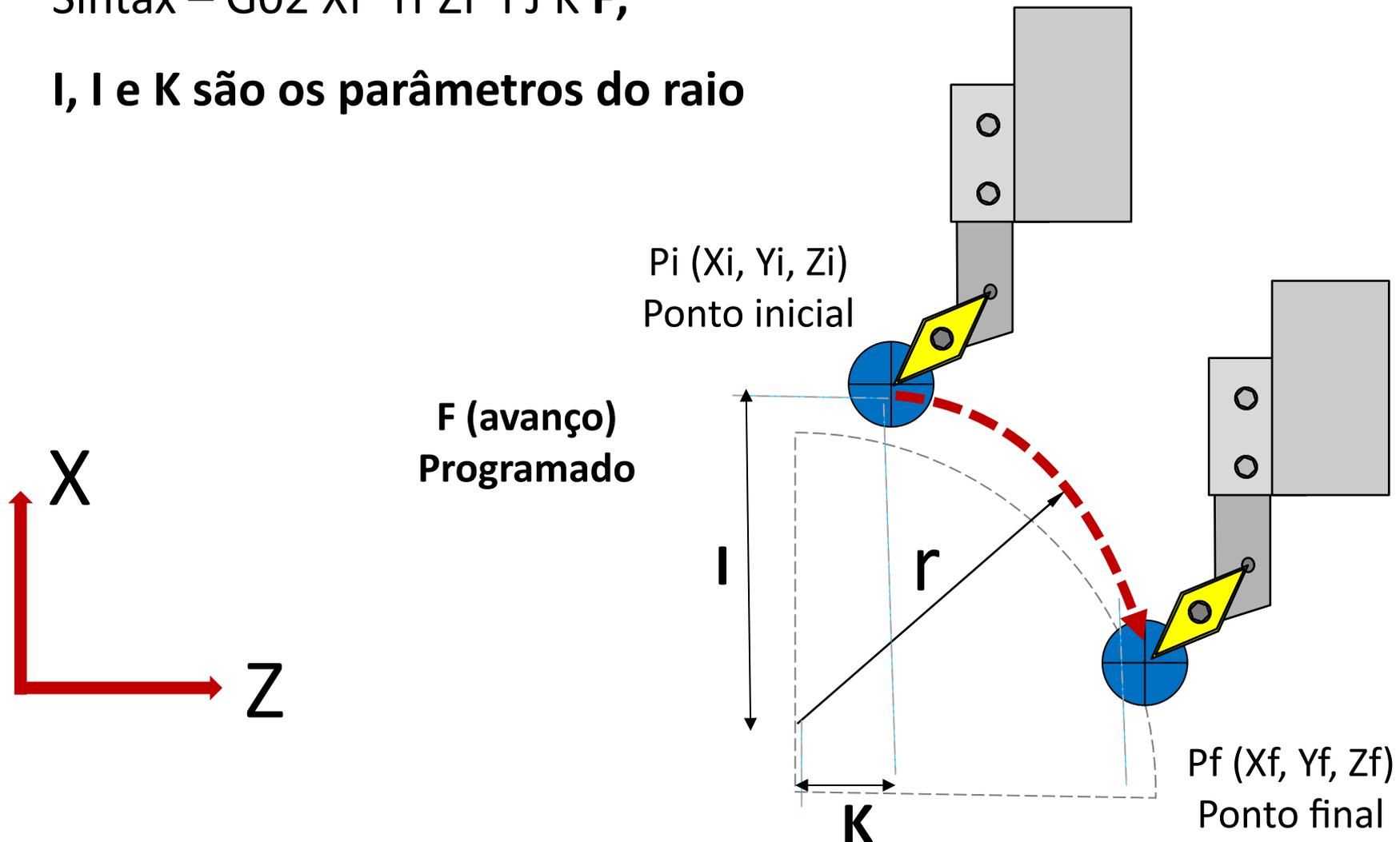


Comando G02

→ G02 – movimento circular horário com avanço programado

Syntax – G02 Xf Yf Zf I J K F;

I, J e K são os parâmetros do raio



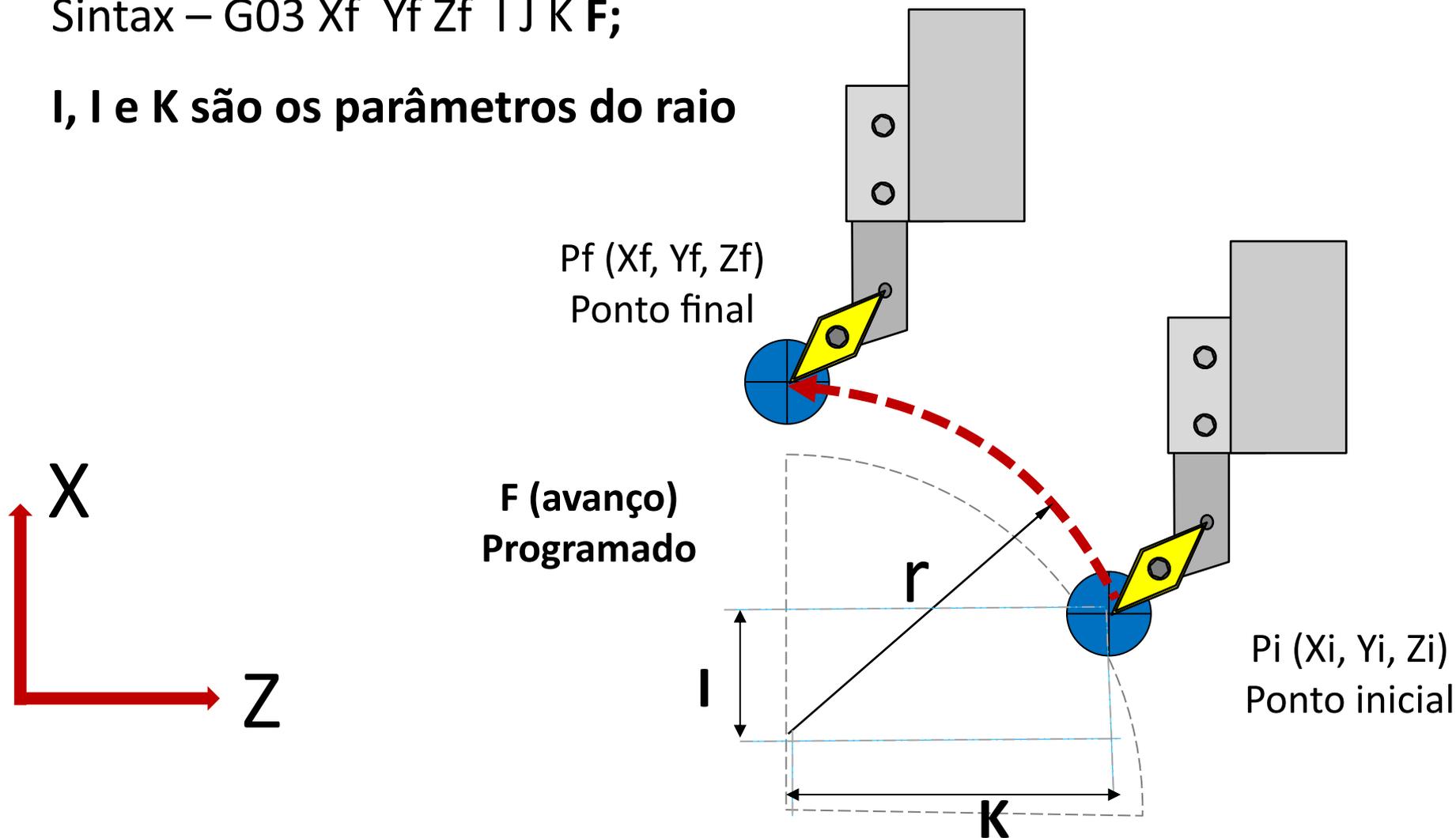


Comando G02

→ G03 – movimento circular anti-horário com avanço programado

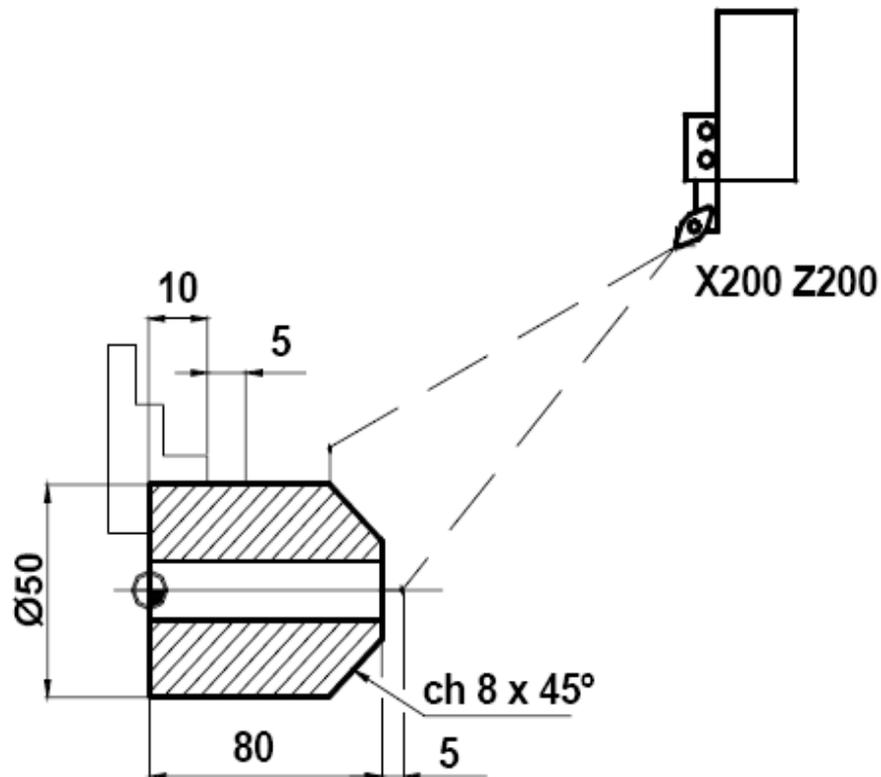
Syntax – G03 Xf Yf Zf I J K F;

I, J e K são os parâmetros do raio





Exemplo de programa



```
O0001 (Exercício 01);  
N10 G21 G40;  
N20 G00 X200 Z200 T00;  
N30 T0101 (acabamento);  
N40 G54;  
N50 G96 S220;  
N60 G92 S3500 M4;  
N70 G00 X0 Z85;  
N80 G01 Z80 F.5;  
N90 X34 F200;  
N100 X50 Z72;  
N110 X55;  
N120 G00 X200 Z200 T00;  
N130 M30;
```



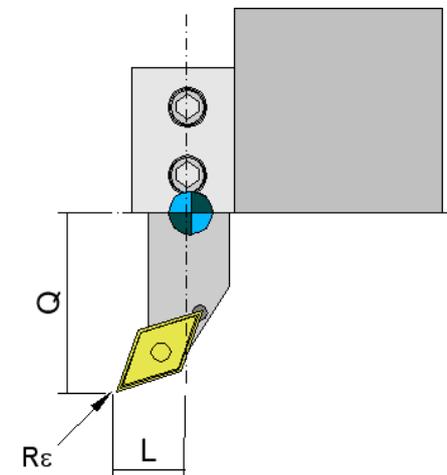
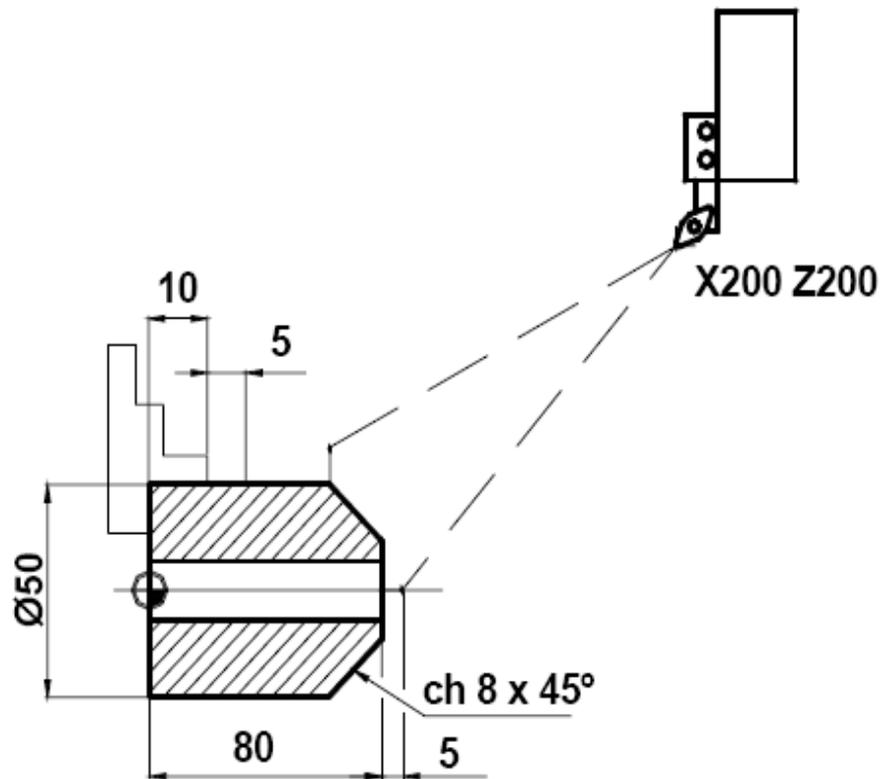
Exemplo de programa

O0001 (Exercício 01);

N10 G21 G40;

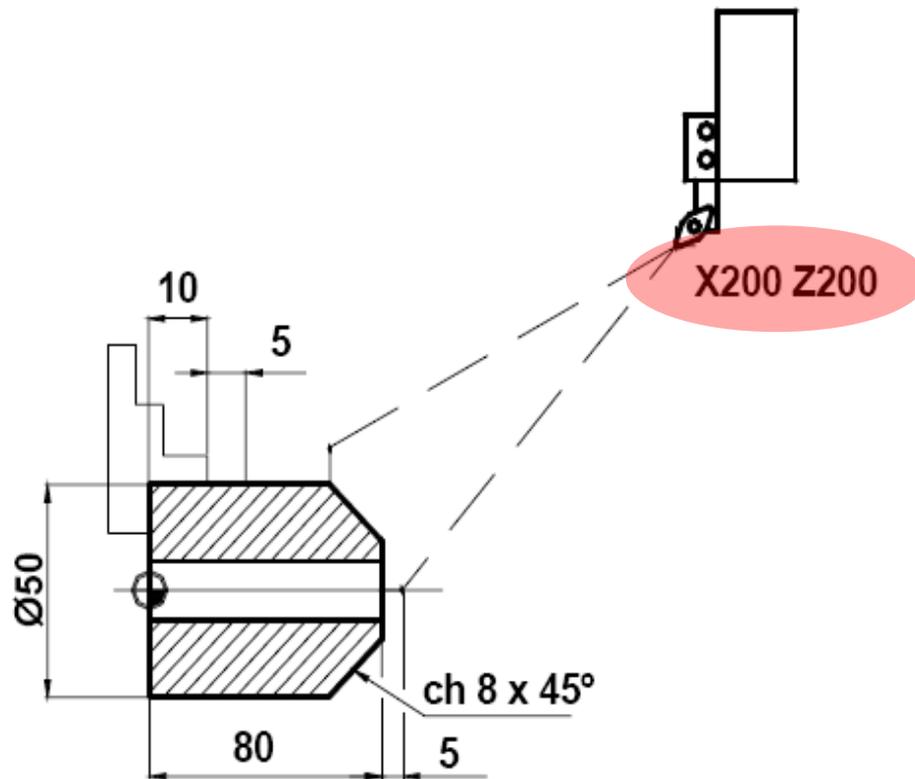
G21 – dimensões em milímetros

G40 – compensação do raio da ferramenta





Exemplo de programa



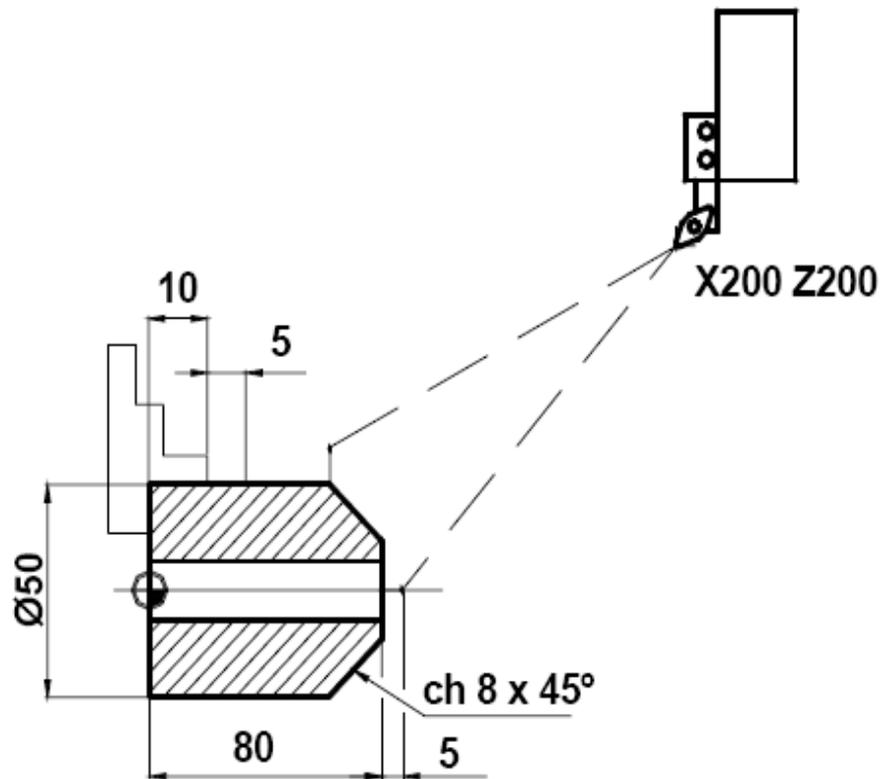
O0001 (**Exercício 01**);
N10 G21 G40;
N20 G00 X200 Z200 T00;

G00 – movimento linear rápido

T00 – ferramenta 0



Exemplo de programa



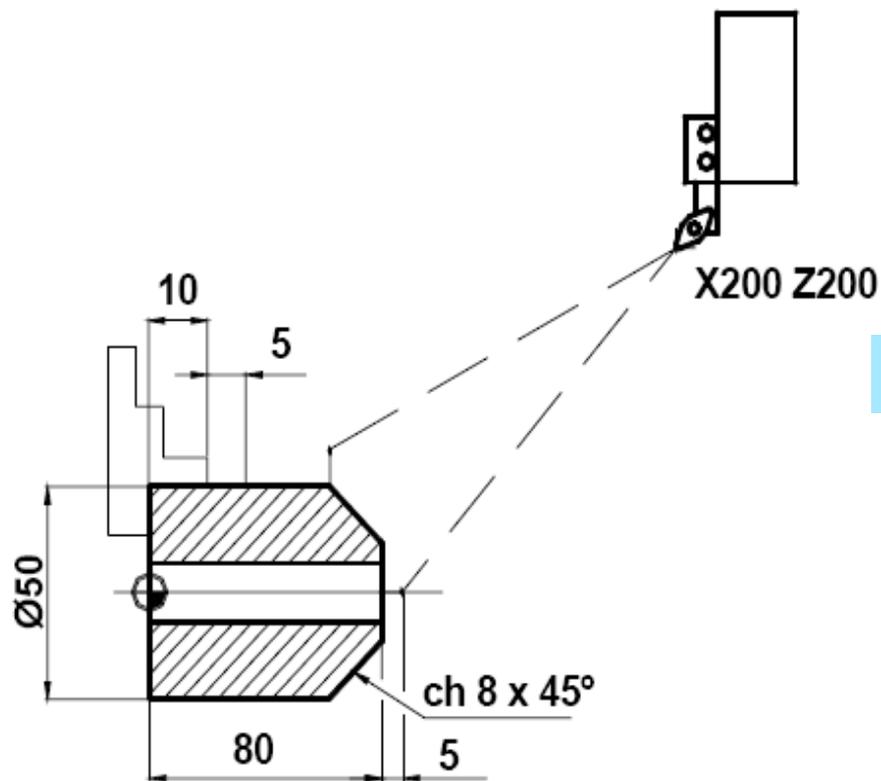
O0001 (**Exercício 01**);
N10 G21 G40;
N20 G00 X200 Z200 T00;
N30 T0101 (acabamento)

T0101 – ferramenta 01

T0101 – posição da ferramenta do
porta ferramentas - 01

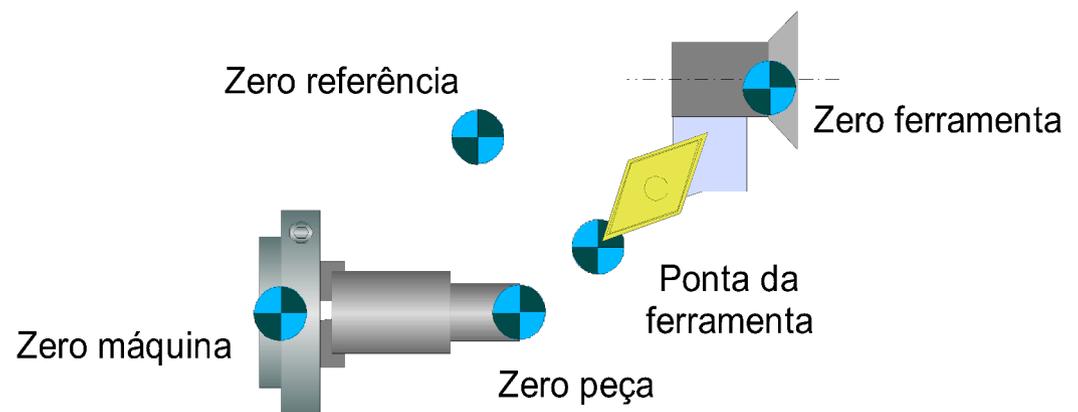


Exemplo de programa



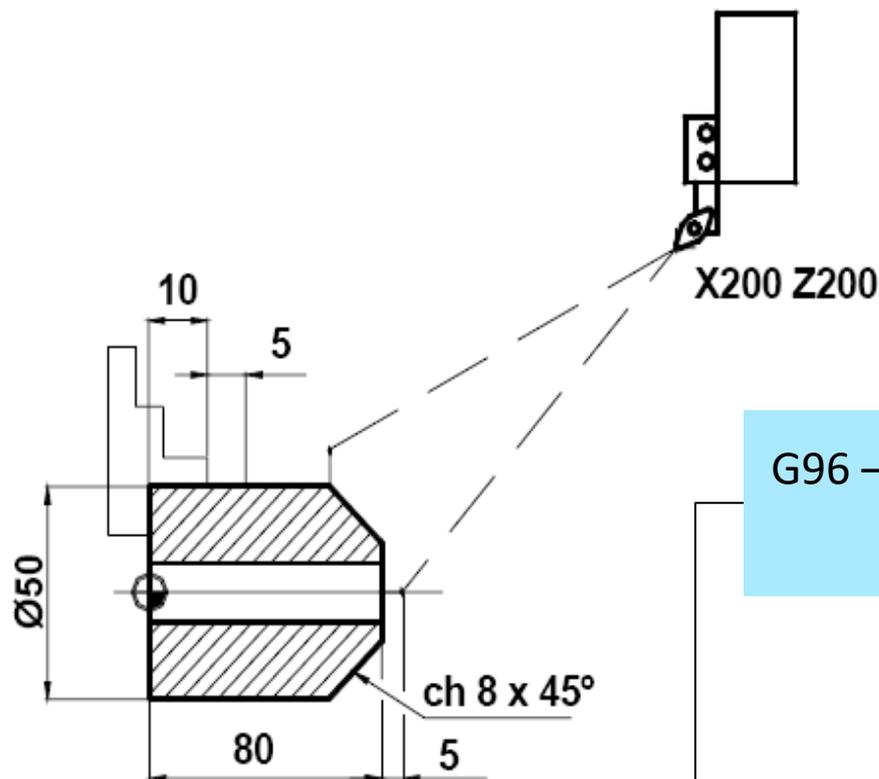
O0001 (**Exercício 01**);
N10 G21 G40;
N20 G00 X200 Z200 T00;
N30 T0101 (acabamento);
N40 G54;

G54 – sistemas de coordenadas predefinido





Exemplo de programa



O0001 (Exercício 01);
N10 G21 G40;
N20 G00 X200 Z200 T00;
N30 T0101 (acabamento);
N40 G54;
N50 G96 S220;

G96 – Liga velocidade superficial constante
(torneamento)

S220 – Velocidade de 220 rpm

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$



Exemplo de programa

X200 Z200

G92 – Define o sistema de coordenadas de trabalho

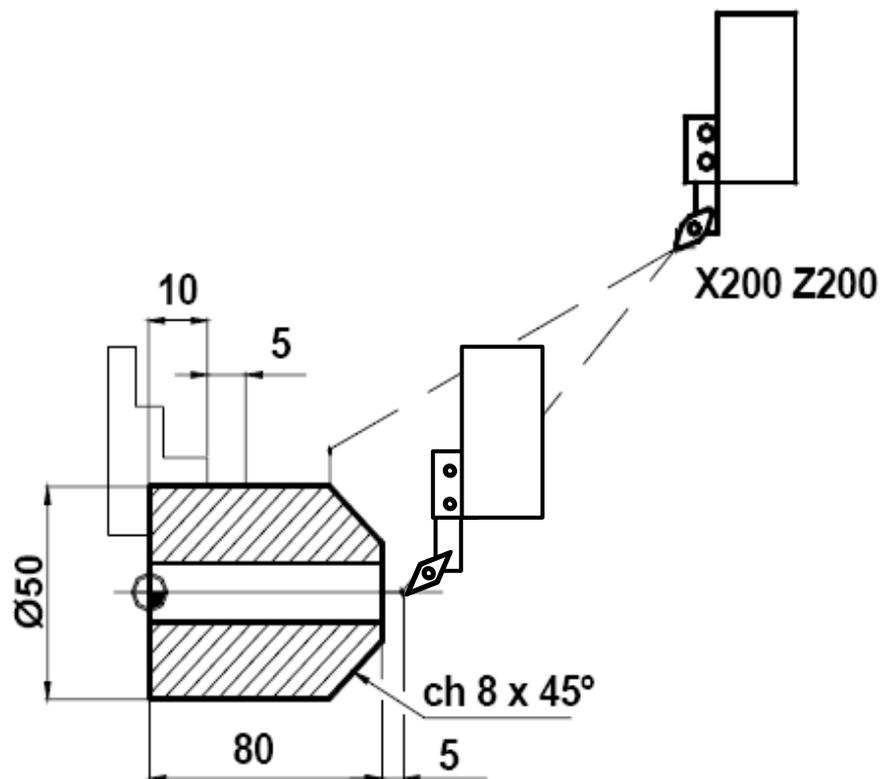
$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$

Tabelado

O0001 (Exercício 01);
N10 G21 G40;
N20 G00 X200 Z200 T00;
N30 T0101 (acabamento);
N40 G54;
N50 G96 S220;
N60 G92 S3500 M4



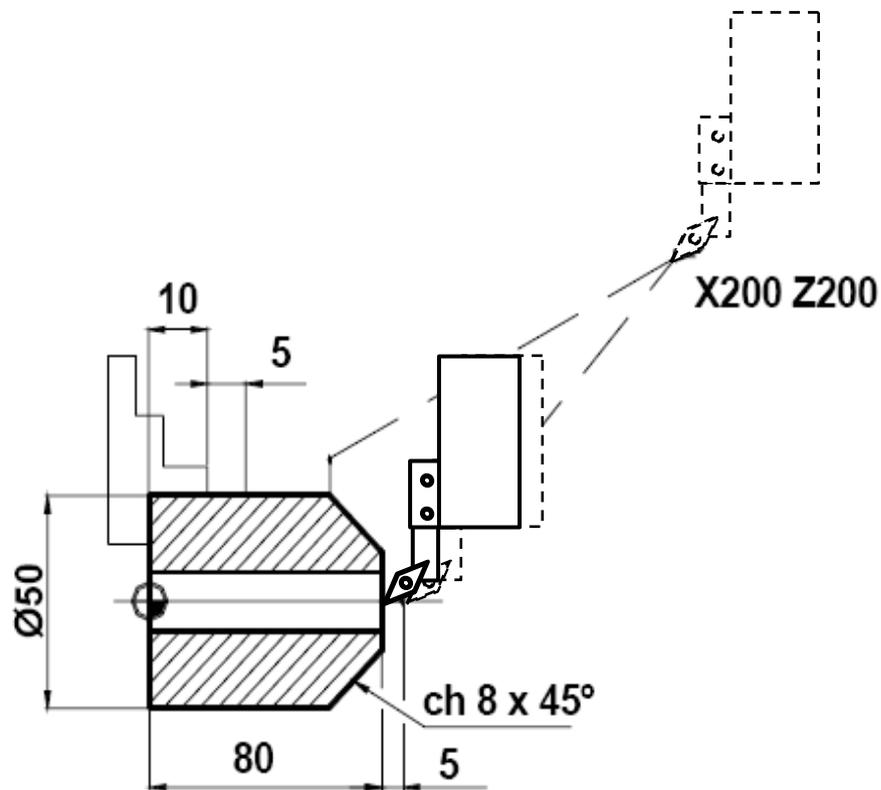
Exemplo de programa



```
O0001 (Exercício 01);  
N10 G21 G40;  
N20 G00 X200 Z200 T00;  
N30 T0101 (acabamento);  
N40 G54;  
N50 G96 S220;  
N60 G92 S3500 M4;  
N70 G00 X0 Z85;
```



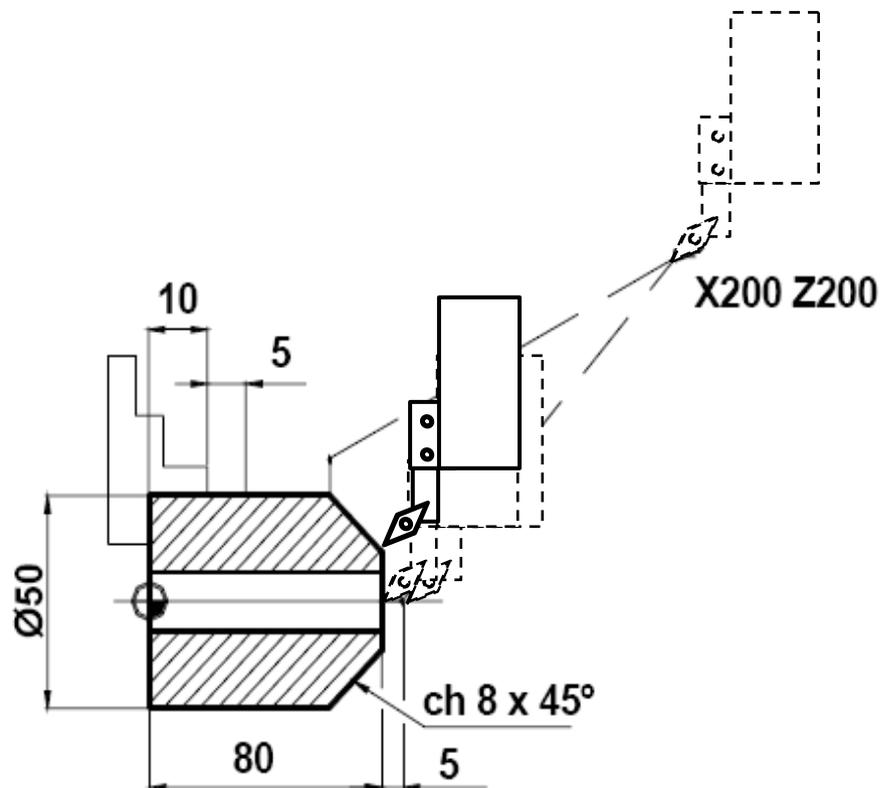
Exemplo de programa



```
O0001 (Exercício 01);  
N10 G21 G40;  
N20 G00 X200 Z200 T00;  
N30 T0101 (acabamento);  
N40 G54;  
N50 G96 S220;  
N60 G92 S3500 M4;  
N70 G00 X0 Z85;  
N80 G01 Z80 F.5
```



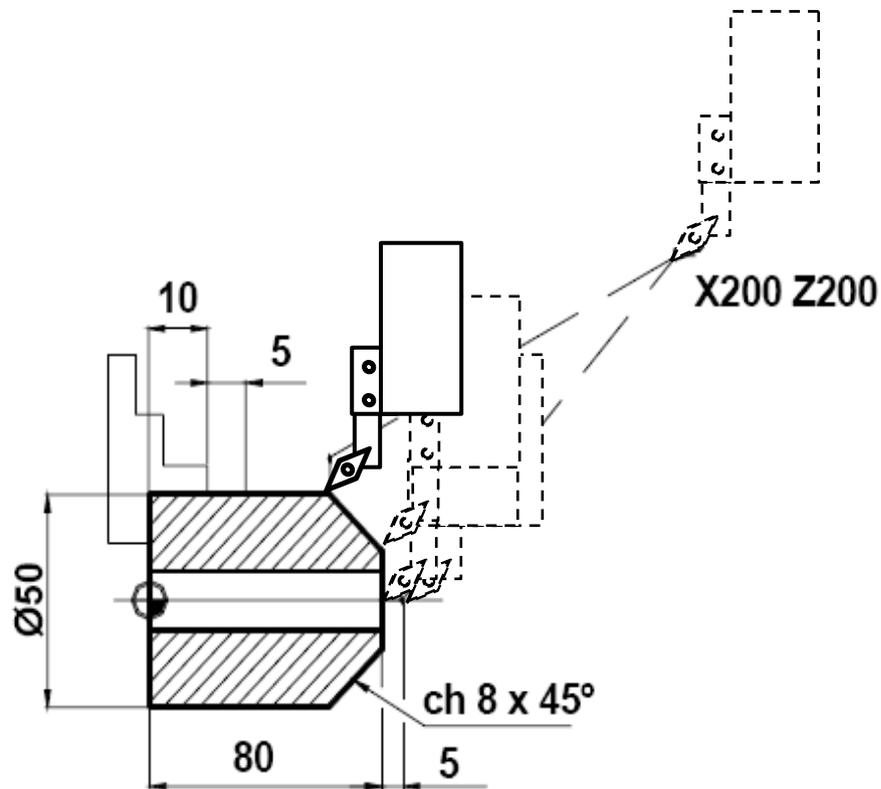
Exemplo de programa



O0001 (**Exercício 01**);
N10 G21 G40;
N20 G00 X200 Z200 T00;
N30 T0101 (acabamento);
N40 G54;
N50 G96 S220;
N60 G92 S3500 M4;
N70 G00 X0 Z85;
N80 G01 Z80 F.5;
N90 X34 F200



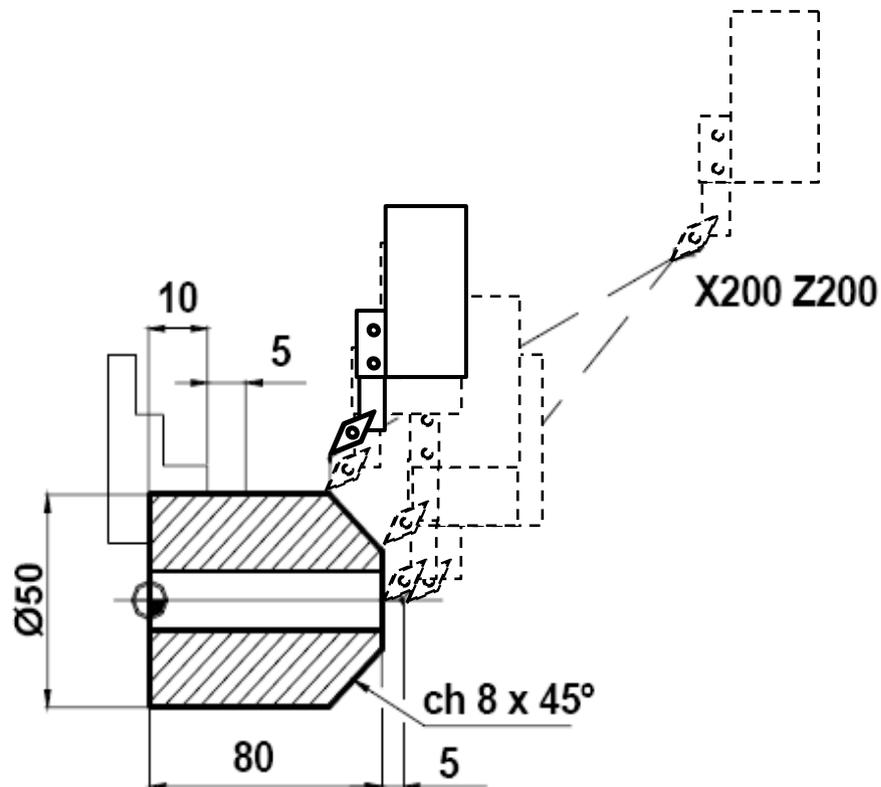
Exemplo de programa



O0001 (**Exercício 01**);
N10 G21 G40;
N20 G00 X200 Z200 T00;
N30 T0101 (acabamento);
N40 G54;
N50 G96 S220;
N60 G92 S3500 M4;
N70 G00 X0 Z85;
N80 G01 Z80 F.5;
N90 X34 F200;
N100 X50 Z72;



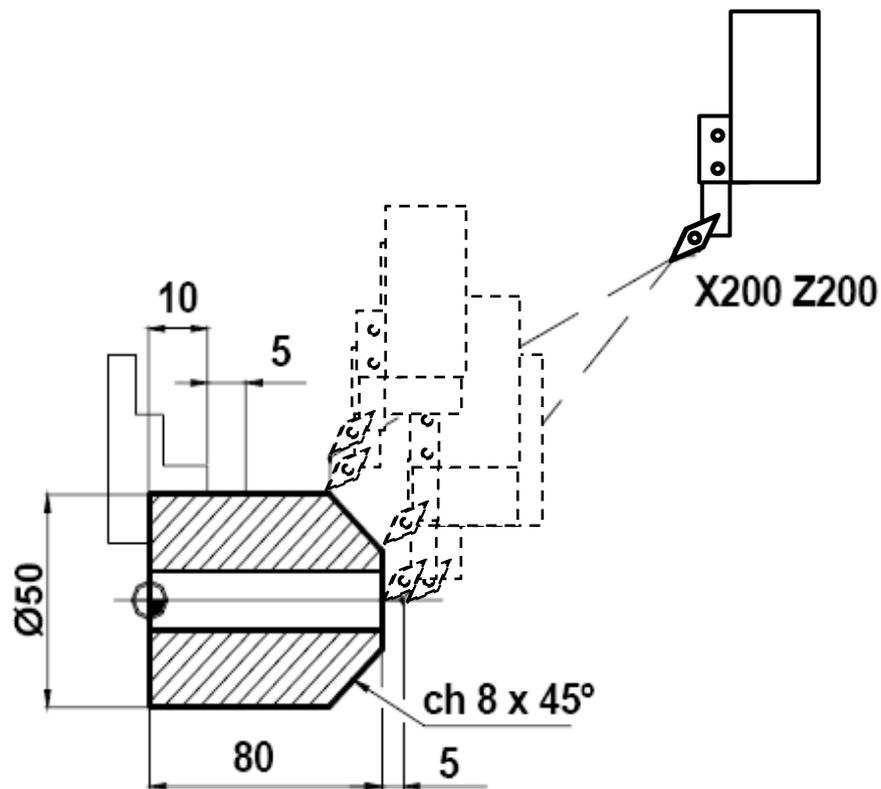
Exemplo de programa



```
O0001 (Exercício 01);  
N10 G21 G40;  
N20 G00 X200 Z200 T00;  
N30 T0101 (acabamento);  
N40 G54;  
N50 G96 S220;  
N60 G92 S3500 M4;  
N70 G00 X0 Z85;  
N80 G01 Z80 F.5;  
N90 X34 F200;  
N100 X50 Z72;  
N110 X55;
```



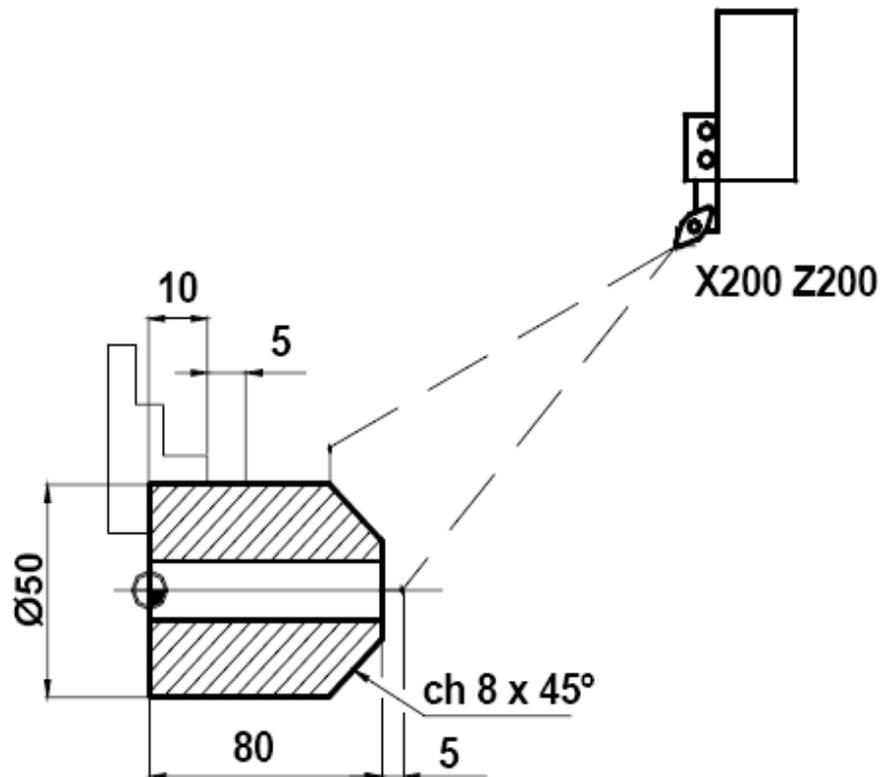
Exemplo de programa



```
O0001 (Exercício 01);  
N10 G21 G40;  
N20 G00 X200 Z200 T00;  
N30 T0101 (acabamento);  
N40 G54;  
N50 G96 S220;  
N60 G92 S3500 M4;  
N70 G00 X0 Z85;  
N80 G01 Z80 F.5;  
N90 X34 F200;  
N100 X50 Z72;  
N110 X55;  
N120 G00 X200 Z200 T00
```



Exemplo de programa



```
O0001 (Exercício 01);  
N10 G21 G40;  
N20 G00 X200 Z200 T00;  
N30 T0101 (acabamento);  
N40 G54;  
N50 G96 S220;  
N60 G92 S3500 M4;  
N70 G00 X0 Z85;  
N80 G01 Z80 F.5;  
N90 X34 F200;  
N100 X50 Z72;  
N110 X55;  
N120 G00 X200 Z200 T00;  
N130 M30;
```

M30 – Reset, Fim de programa



CNC – Simulator

Torno - <http://cnccsimulator.info/>

