

# **Fundamentos dos Processos de Usinagem**

## **Distribuição do tópico usinagem na disciplina PMR**

**2202 Aula 01** - Fundamentos da usinagem

**Aula 02** - Processos de Usinagem com Ferramentas de geometria definida

**Aula 03** - Processos de Usinagem com Ferramentas de geometria não definida

# Fundamento da usinagem

- Introdução
- Fundamentos
  - Cinemática do processo
  - Parâmetros de corte
  - Geometria de cunha de corte
  - Forças na usinagem
- Cavacos
- Desgaste nas ferramentas de corte
- Fluidos de corte

PMR-2202

## Introdução

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

**Usinagem** - operação que confere à peça: forma, dimensões ou acabamento superficial, ou ainda uma combinação destes, através da remoção de material sob a forma de cavaco.

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

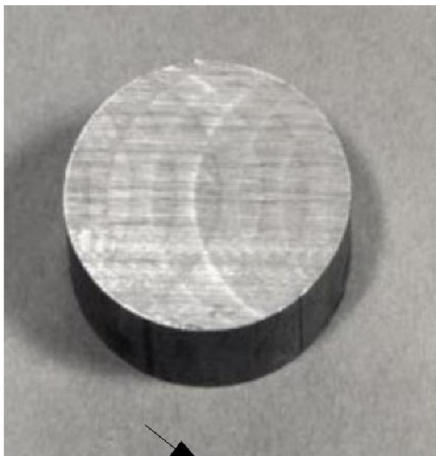
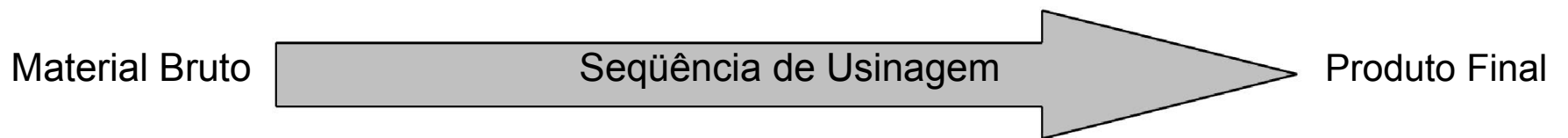
## Introdução

**Princípio** – a remoção de material ocorre através da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência muito superior a do material da peça.

**Usinagem** - O Estudo da usinagem é baseado na mecânica (cinemática, atrito e deformação), na termodinâmica (geração e propagação de calor) e nas propriedades dos materiais.

# Introdução

## Usinagem



Remoção de cavaco



Remoção de cavaco



Remoção de cavaco



## Importância da usinagem na indústria metal mecânica



A maior parte de todos os produtos industrializados em alguma de suas etapas de produção sofre algum processo de usinagem<sup>7</sup>

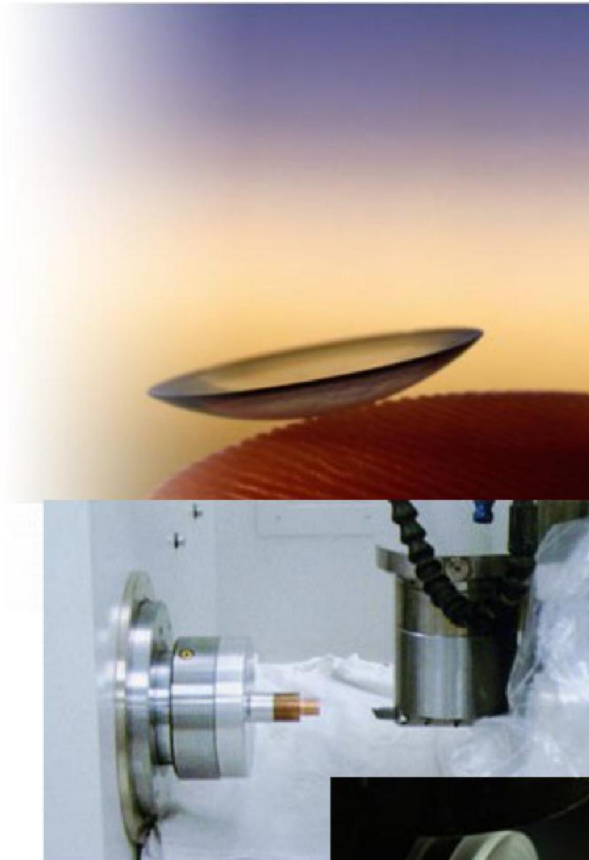


## Importância da usinagem na indústria metal mecânica



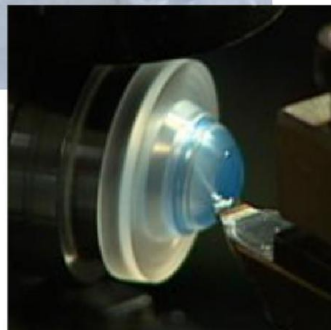
- 80% dos furos são realizados por usinagem
- 100% dos processos de melhoria da qualidade superficial são feitos por usinagem
- o comércio de máquinas-ferramentas representa uma das grandes fatias da riqueza mundial
- 70% das engrenagem para transmissão de potência
- 90% dos componentes da indústria aeroespacial
- 100% dos pinos médico-odontológicos

## Importância da usinagem na indústria metal mecânica



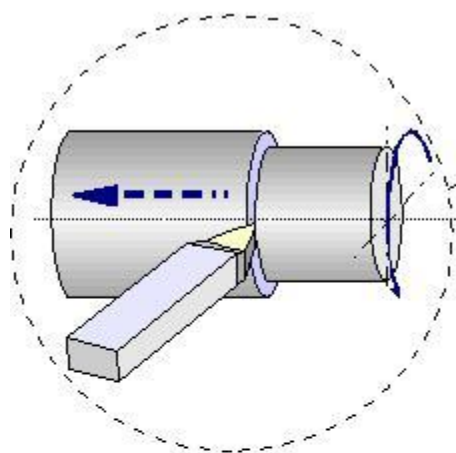
### Outros produtos usinados

- 70% das lentes de contatos extraoculares
- 100% das lentes de contatos intraoculares
- Lentes para CD player ou suas matrizes



# Classificação dos processos de usinagem

## Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida



Tornear

Fresar

Furar

Rosquar

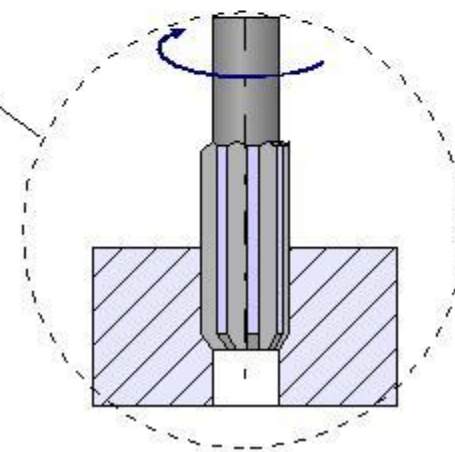
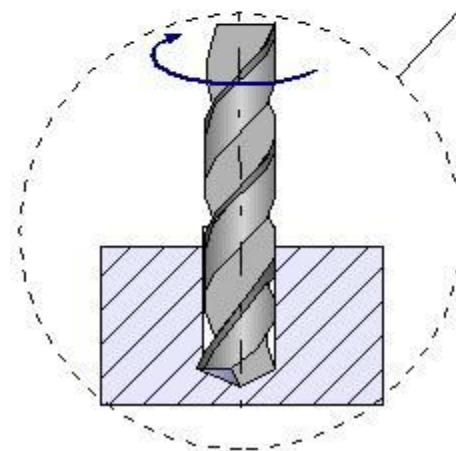
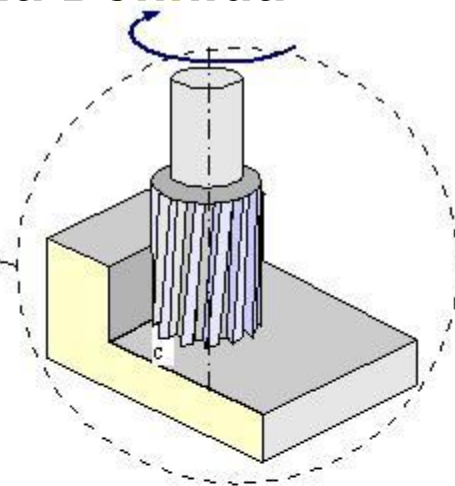
Alargar

Brochar

Serrar

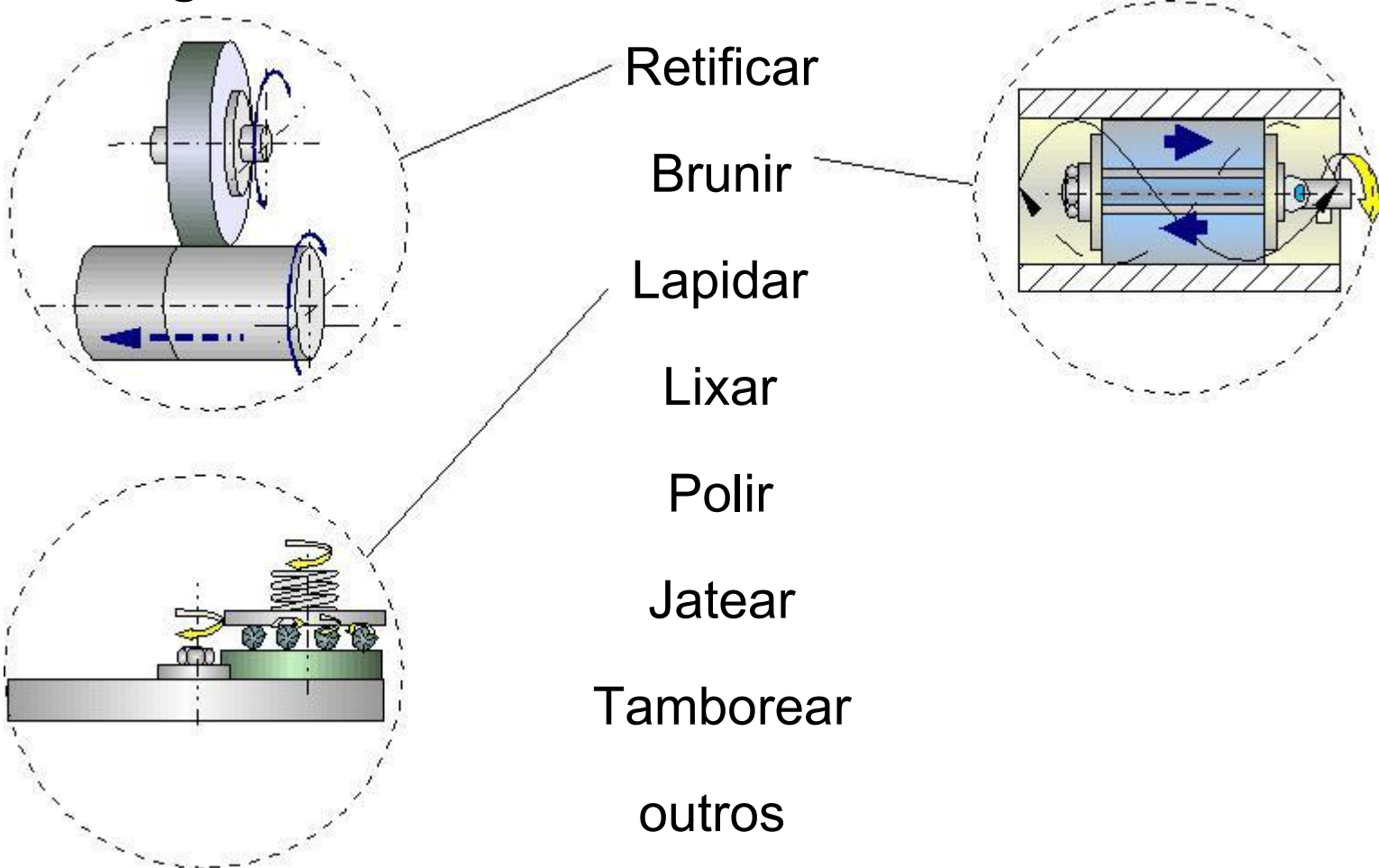
Plainar

outros



# Classificação dos processos de usinagem

## Usinagem com Ferramenta de Geometria Não Definida



# **Classificação dos processos de usinagem**

## **Usinagem Não convencional**

Remoção térmica

Remoção Química

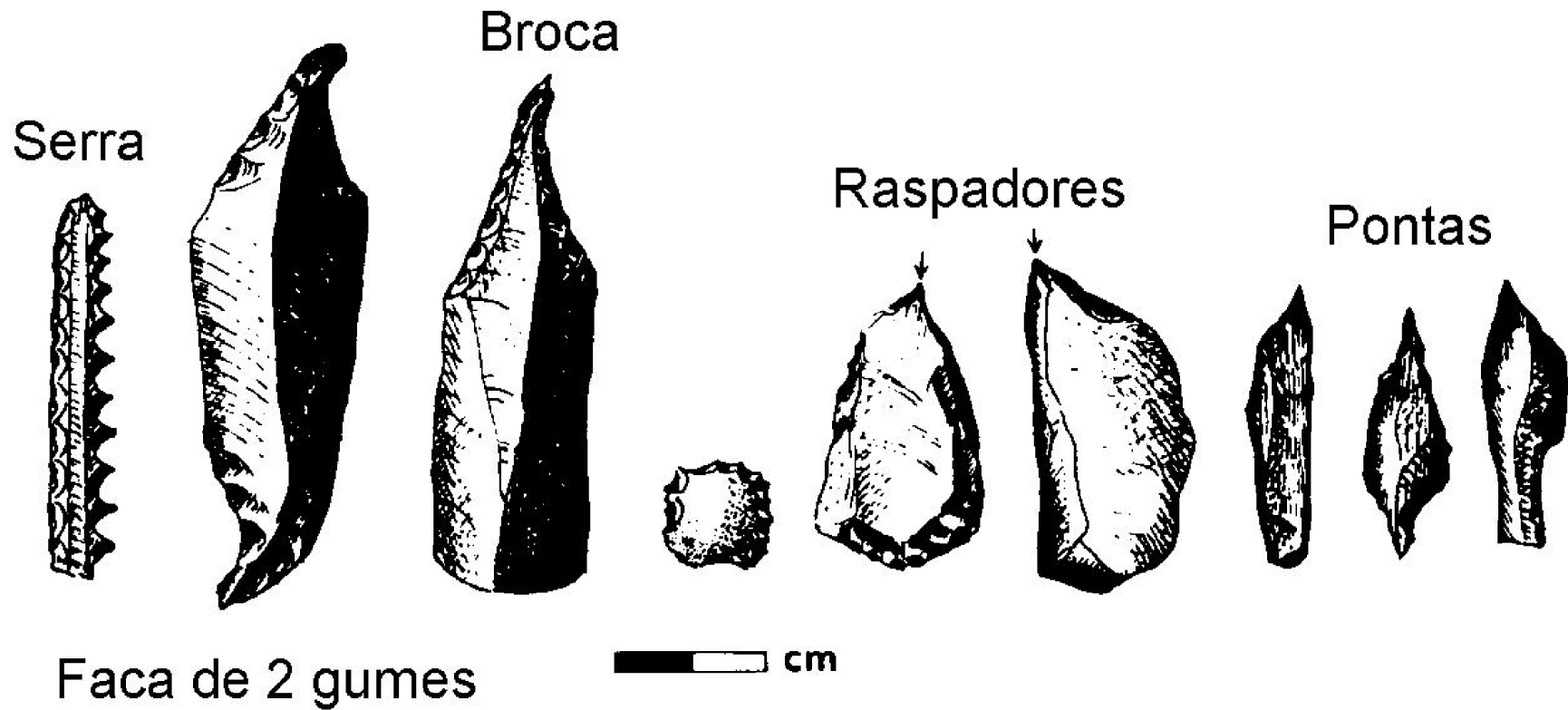
Remoção Eletroquímica

Remoção por ultra-som

Remoção por jato

d'água outros

## Evolução Histórica

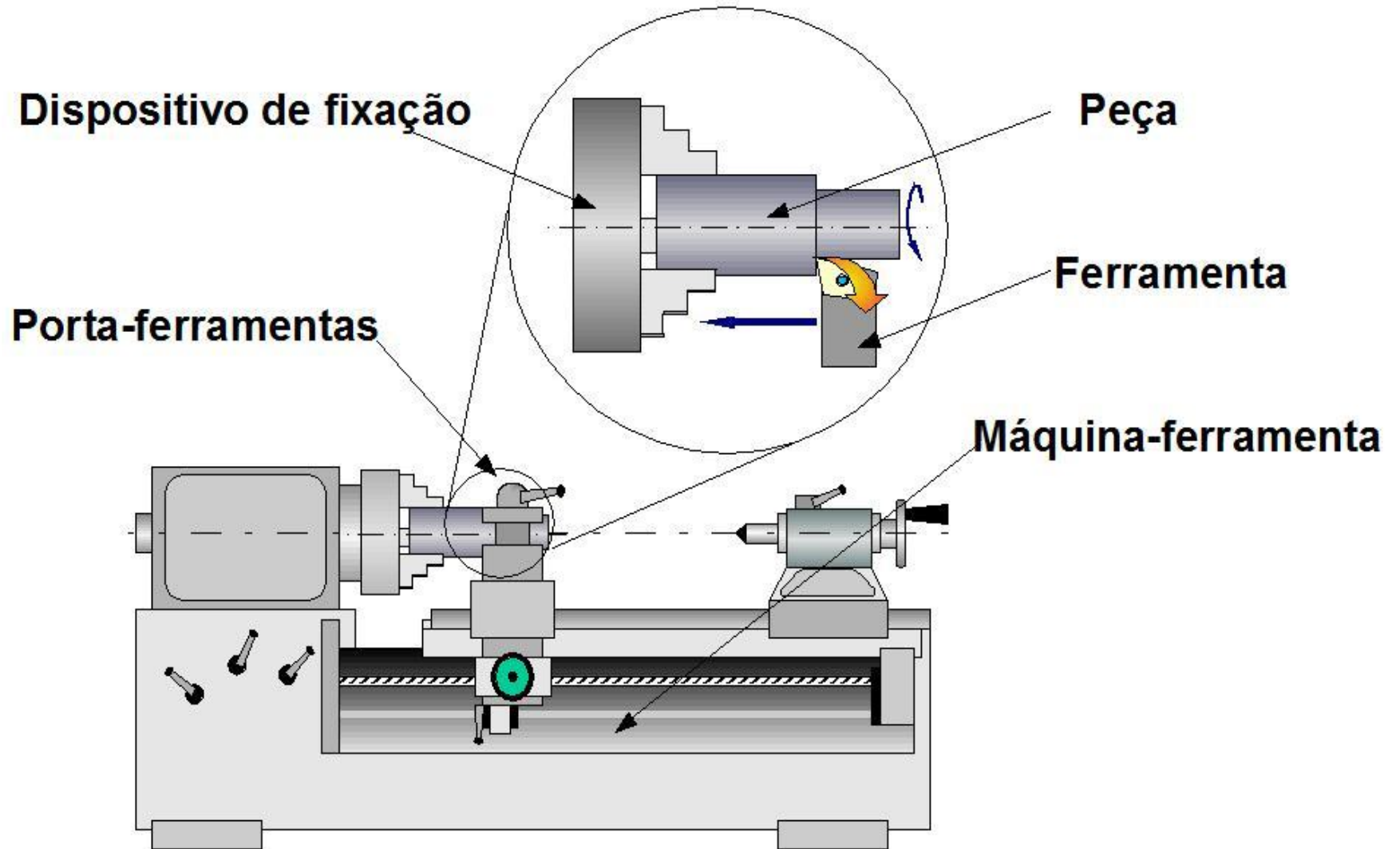


Ferramentas de pedras para remoção



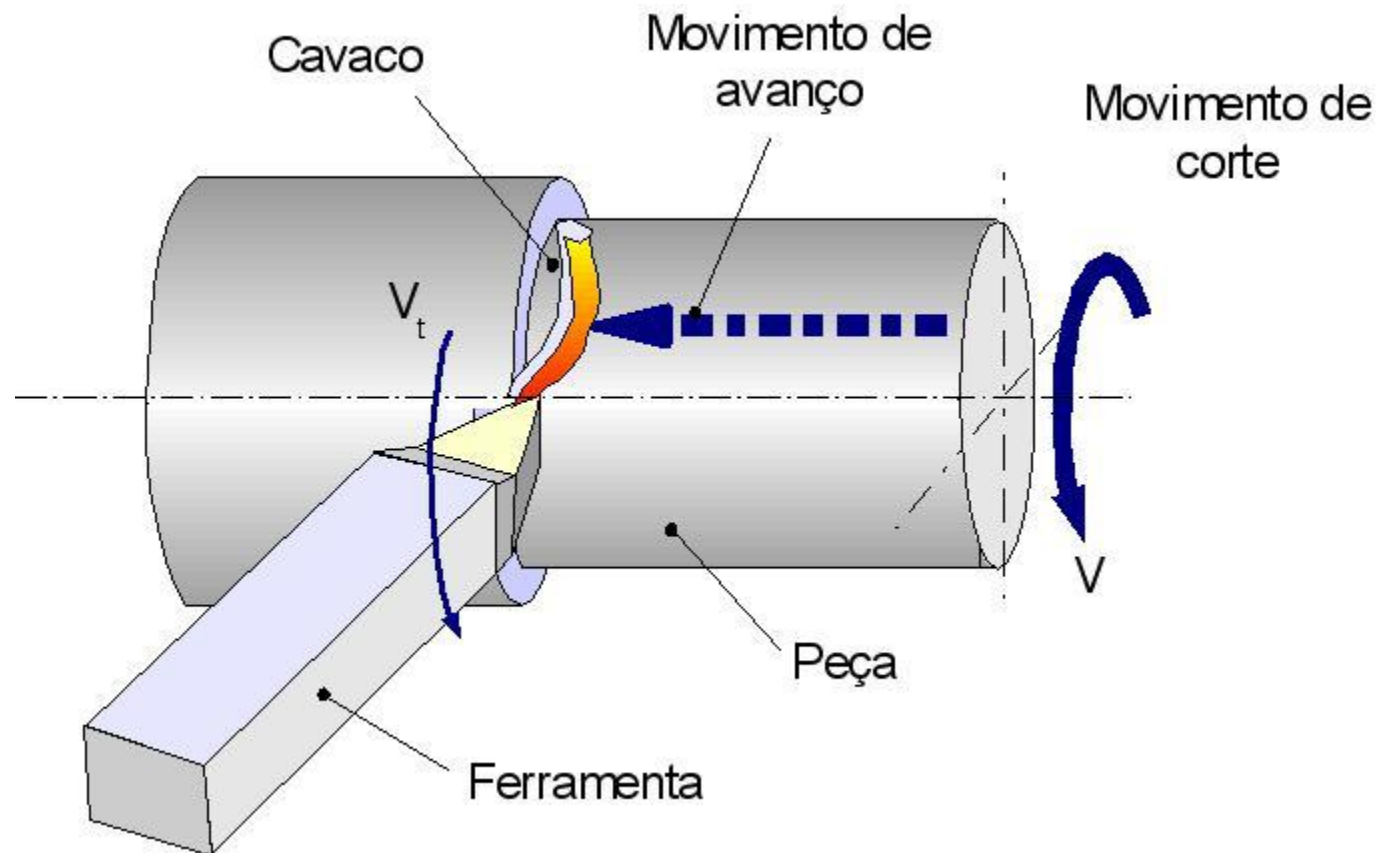
# Fundamentos da usinagem dos materiais

## Grandezas do Processo



## Cinemática Geral dos Processos de Usinagem

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





## 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))

$$V_c = \frac{*d*n}{1000} \quad (\text{Eq. 1})$$

### → Velocidade de Avanço ( $V_f$ )

### → Velocidade efetiva de corte ( $V_e$ )

## Velocidade de Corte (Vc)

$$V = \frac{c * d * n}{1000}$$

- Vc é um valor obtido experimentalmente
- Valor encontrado em tabelas
- Valores encontrados em tabelas também são função da vida da ferramenta.
- As tabelas apresentam faixas de valores e podem variar de acordo com a fonte
- Vc ainda depende da máquina-ferramenta, da geometria da peça, do tipo de dispositivo de fixação e da experiência do operador ou programador

# Exemplos de tabela de Velocidade de Corte (Vc)

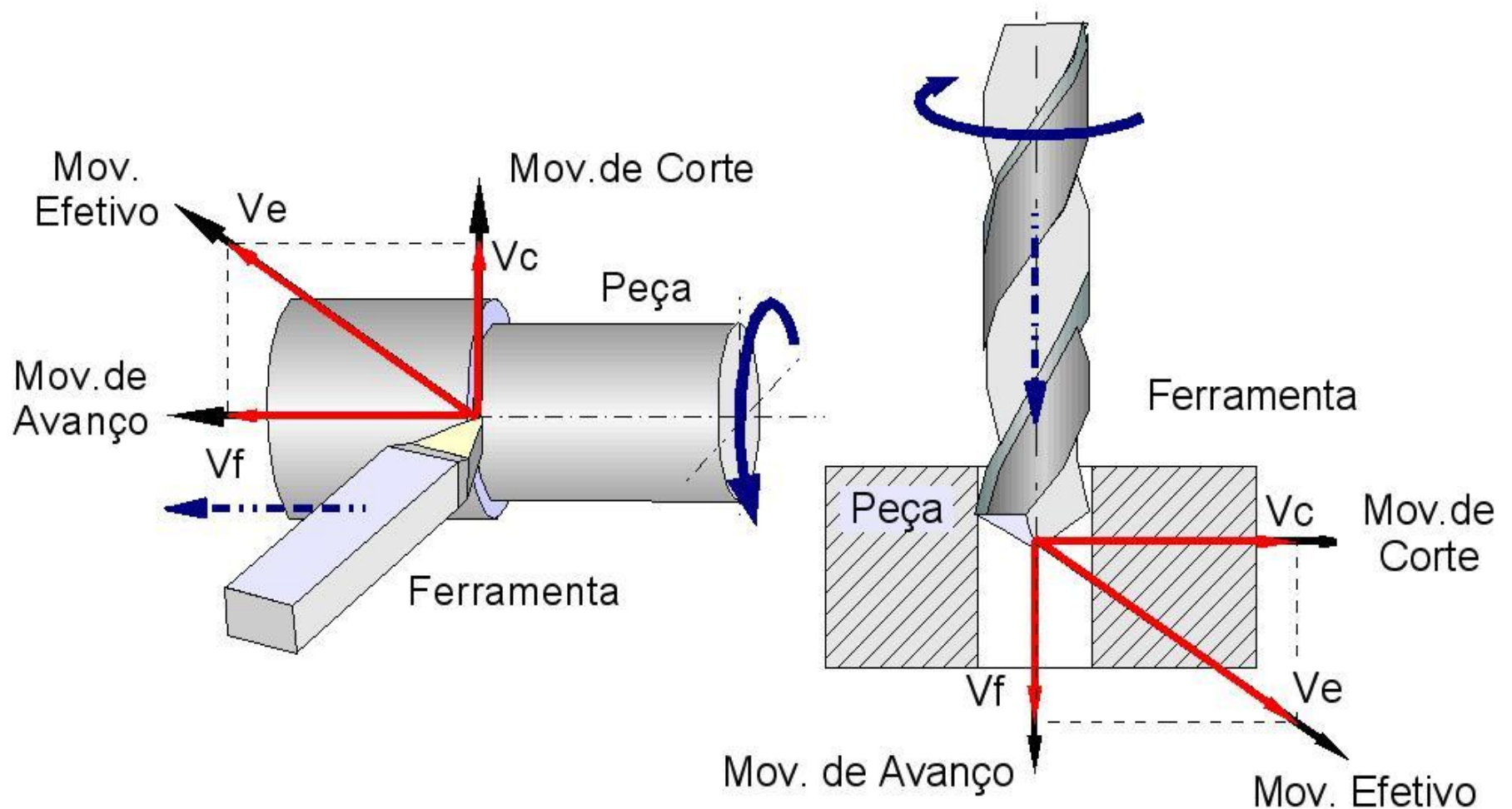
**Table 9.13 GARANT external turning 0° and 7° (finish-machining)**



Material group	Material designation	Strength	v <sub>c</sub> [m/min]			f [mm/rev.]			a <sub>p</sub> [mm]			Recommendation WSP				Cooling lubricant						
												0°		7°								
		[N/mm²]	Min.	Start	Max.	Min.	Start	Max.	Min.	Start	Max.	Type	Chip breaker	Type	Chip breaker							
13.0	Stainless steel, sulphured	< 700	180	–	220	–	260	0.10	–	0.20	–	0.30	1.50	–	2.20	–	3.00	HB 7120	VS			dry
			140	–	180	–	220	0.15	–	0.25	–	0.30	1.50	–	2.20	–	3.00	HB 7135	VS	HB 7135	VM	dry
13.1	Stainless steel, austenitic	< 700	180	–	220	–	260	0.10	–	0.20	–	0.30	1.50	–	2.20	–	3.00	HB 7120	VS			dry
			140	–	180	–	220	0.15	–	0.25	–	0.30	1.50	–	2.20	–	3.00	HB 7135	VS	HB 7135	VM	dry
13.2	Stainless steel, austenitic	< 850	140	–	180	–	220	0.10	–	0.20	–	0.30	1.20	–	1.80	–	3.00	HB 7120	VS			Emulsion
			120	–	150	–	200	0.15	–	0.25	–	0.30	1.50	–	2.20	–	3.00	HB 7135	VS	HB 7135	VM	Emulsion
13.3	Stainless steel, martensitic	< 1100	140	–	180	–	220	0.10	–	0.20	–	0.30	1.20	–	1.80	–	3.00	HB 7120	VS			Emulsion
			120	–	150	–	200	0.15	–	0.25	–	0.30	1.50	–	2.20	–	3.00	HB 7135	VS	HB 7135	VM	Emulsion
14.0	Special alloys	< 1200	30	–	50	–	80	0.10	–	0.20	–	0.30	0.70	–	1.50	–	2.00	HB 7120	VS	HB 7135	VM	Emulsion
			20	–	30	–	40	0.15	–	0.18	–	0.22	1.50	–	2.00	–	2.50			HU 70AL	ALX	Emulsion
15.0	Cast iron (GG)	< 180 HB	200	–	250	–	320	0.12	–	0.20	–	0.30	0.50	–	1.50	–	2.20	CU 7033	SS	CU 7033	SS	dry
			300	–	400	–	700	0.05	–	0.15	–	0.30	0.05	–	0.15	–	0.50	CBN 725	G			dry
15.1	Cast iron (GG)	> 180 HB	170	–	200	–	280	0.12	–	0.20	–	0.30	0.50	–	1.50	–	2.20	CU 7033	SS	CU 7033	SS	dry
			300	–	400	–	700	0.05	–	0.15	–	0.30	0.05	–	0.15	–	0.50	CBN 725	G			dry
15.2	Cast iron (GGG, GT)	> 180 HB	170	–	200	–	280	0.12	–	0.20	–	0.30	0.50	–	1.50	–	2.20	CU 7033	SS	CU 7033	SS	dry
			300	–	400	–	700	0.05	–	0.15	–	0.30	0.05	–	0.15	–	0.50	CBN 725	G			dry
15.3	Cast iron (GGG, GT)	> 260 HB	150	–	180	–	250	0.12	–	0.20	–	0.30	0.50	–	1.50	–	2.20	CU 7033	SS	CU 7033	SS	dry
			300	–	400	–	700	0.05	–	0.15	–	0.30	0.05	–	0.15	–	0.50	CBN 725	G			dry
16.0	Titanium, titanium alloys	< 850	30	–	50	–	80	0.10	–	0.20	–	0.30	0.70	–	1.50	–	2.00	HB 7120	VS	HB 7135	VM	Emulsion
			20	–	30	–	40	0.15	–	0.18	–	0.22	1.50	–	2.00	–	2.50			HU 70AL	ALX	Emulsion
16.1	Titanium, titanium alloys	850 – 1200	30	–	50	–	80	0.10	–	0.20	–	0.30	0.70	–	1.50	–	2.00	HB 7120	VS	HB 7135	VM	Emulsion
			20	–	30	–	40	0.15	–	0.18	–	0.22	1.50	–	2.00	–	2.50			HU 70AL	ALX	Emulsion

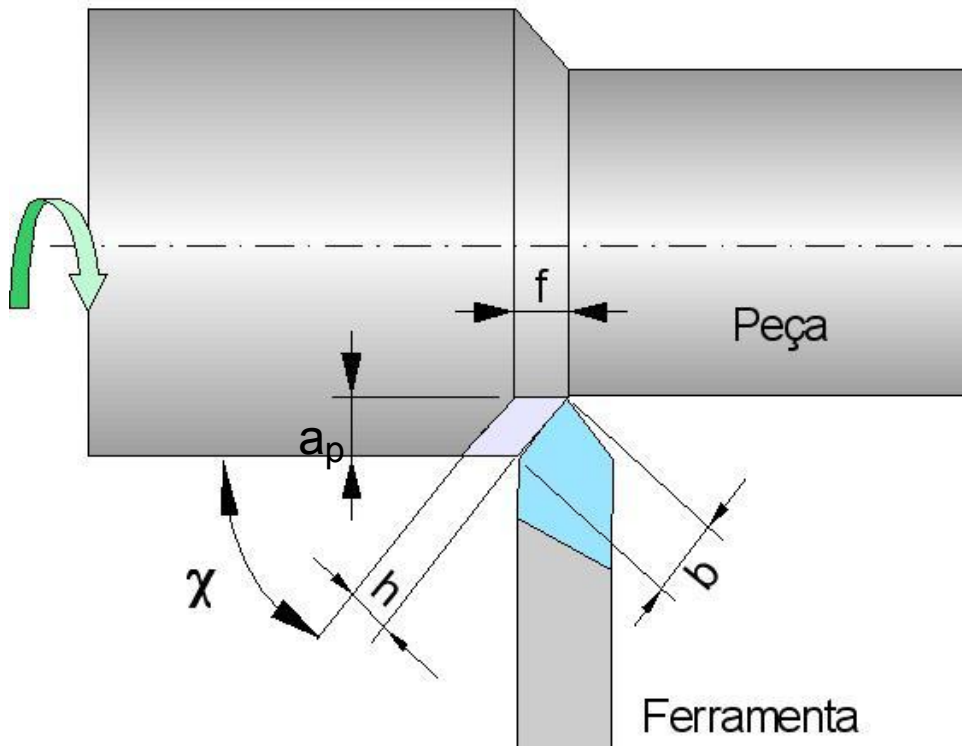
# Cinemática Geral dos Processos de Usinagem

## Movimentos nos processos de usinagem



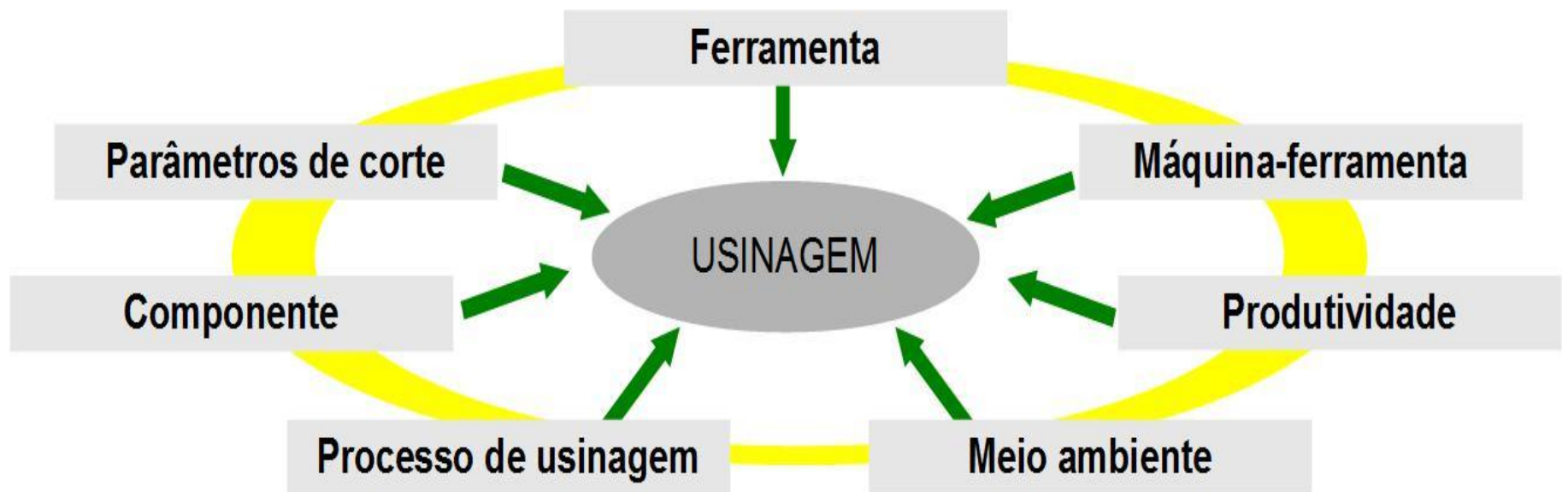
## Grandezas do processo de usinagem

Onde:



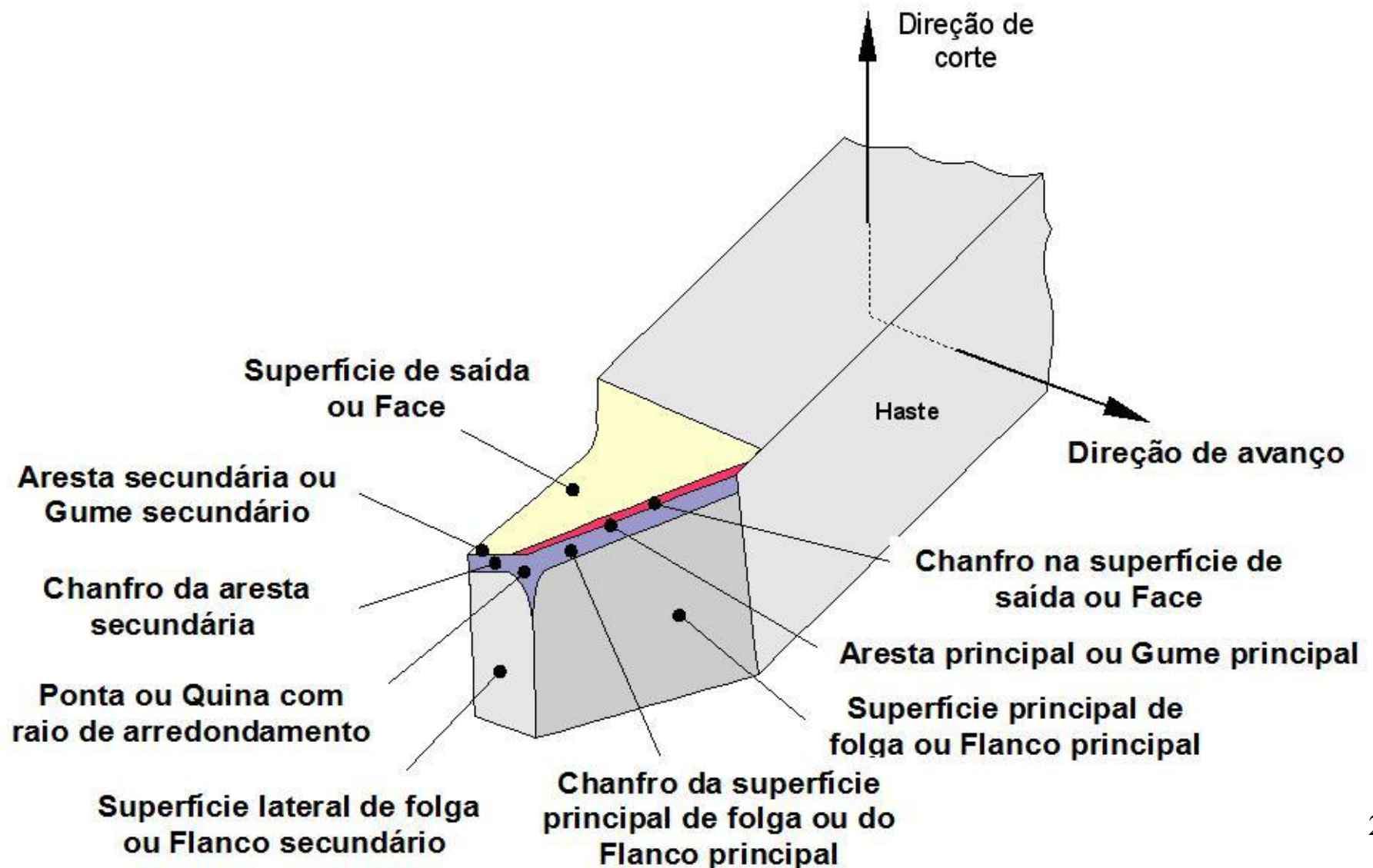
- $a_p$  – profundidade de corte
- $f$  – avanço por revolução
- $b$  – largura de usinagem
- $h$  – espessura de usinagem
- Seção de usinagem  $a_p * f$
- Seção de usinagem  $b * h$

## Relações que envolvem a usinagem

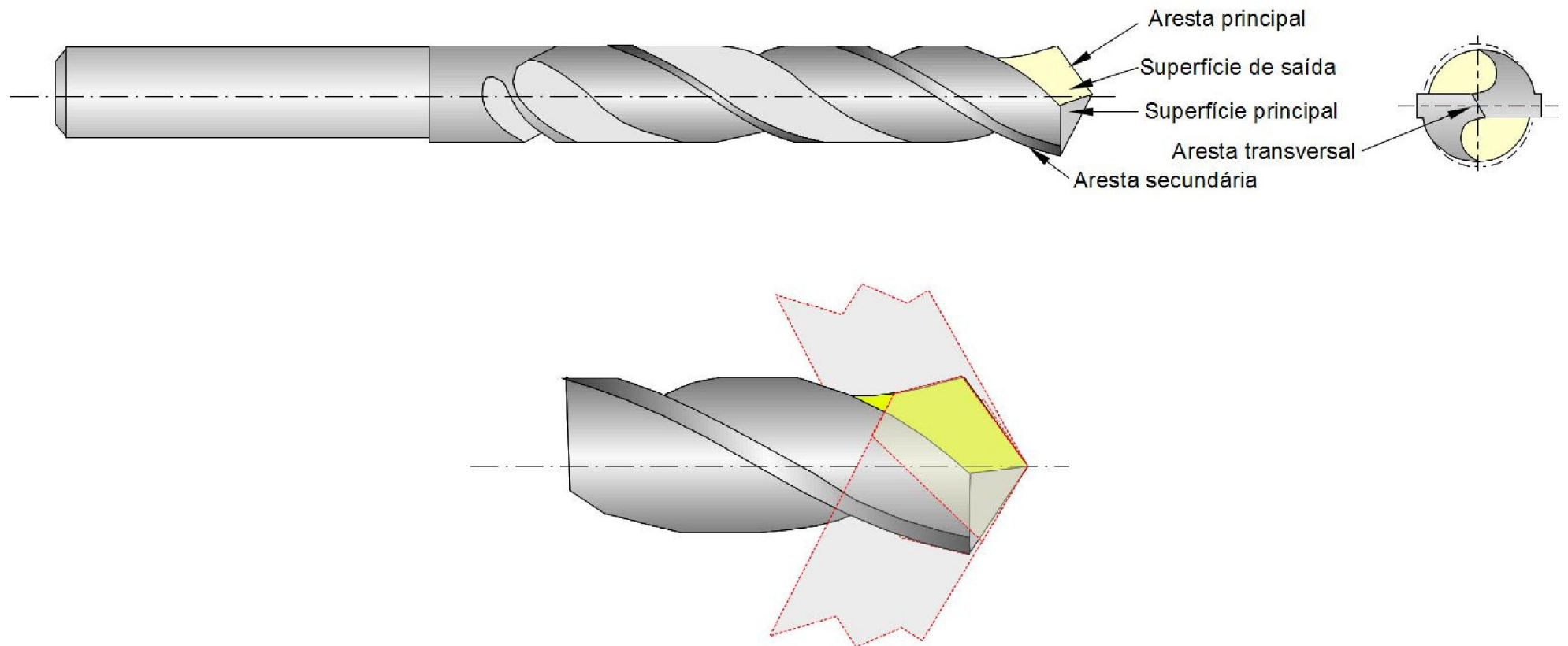




## Denominações da ferramenta de corte

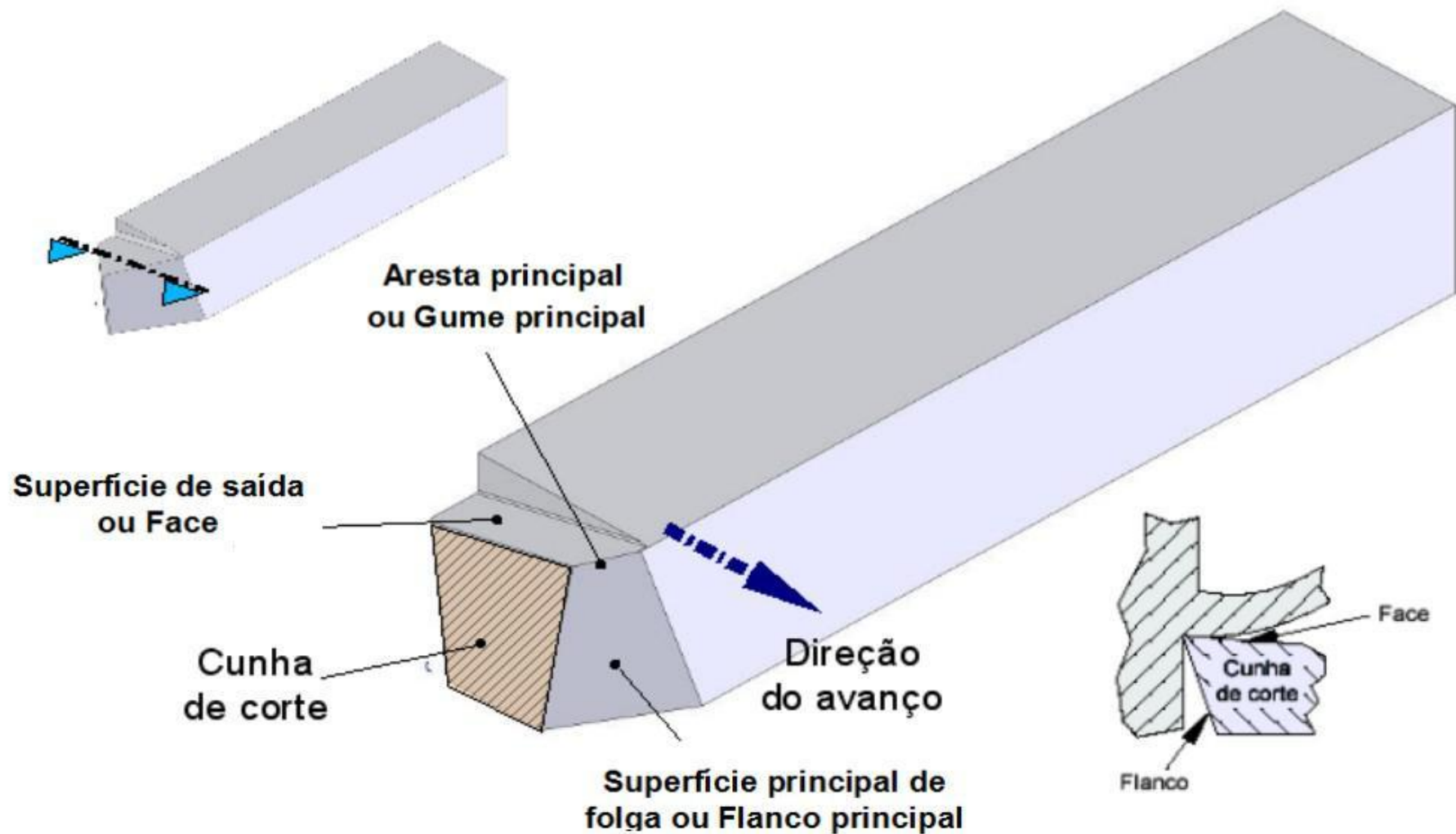


## Denominações da ferramenta de corte





## Cunha de corte



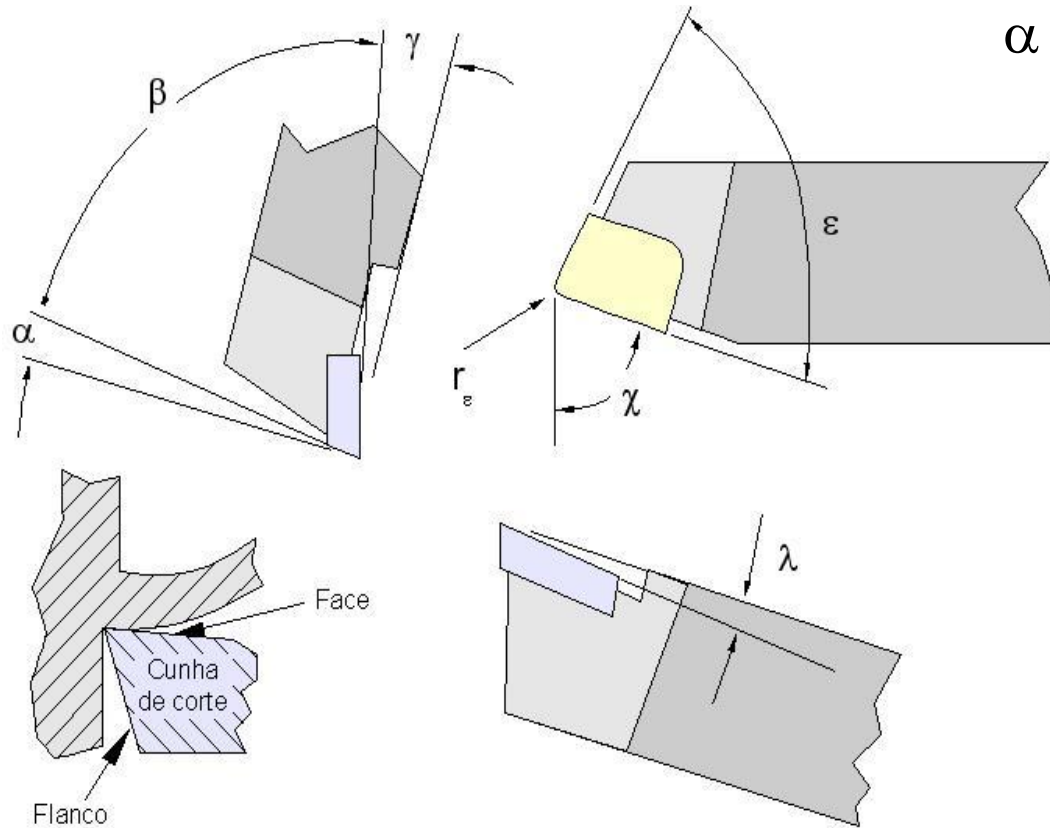
## **Geometria da Cunha de Corte**

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

A geometria da ferramenta influencia na:

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

## Geometria da ferramenta de tornear



$\alpha$  = ângulo de folga ou incidência

$\beta$  = ângulo de cunha

$\gamma$  = ângulo de saída

$\epsilon$  = ângulo de ponta ou quina

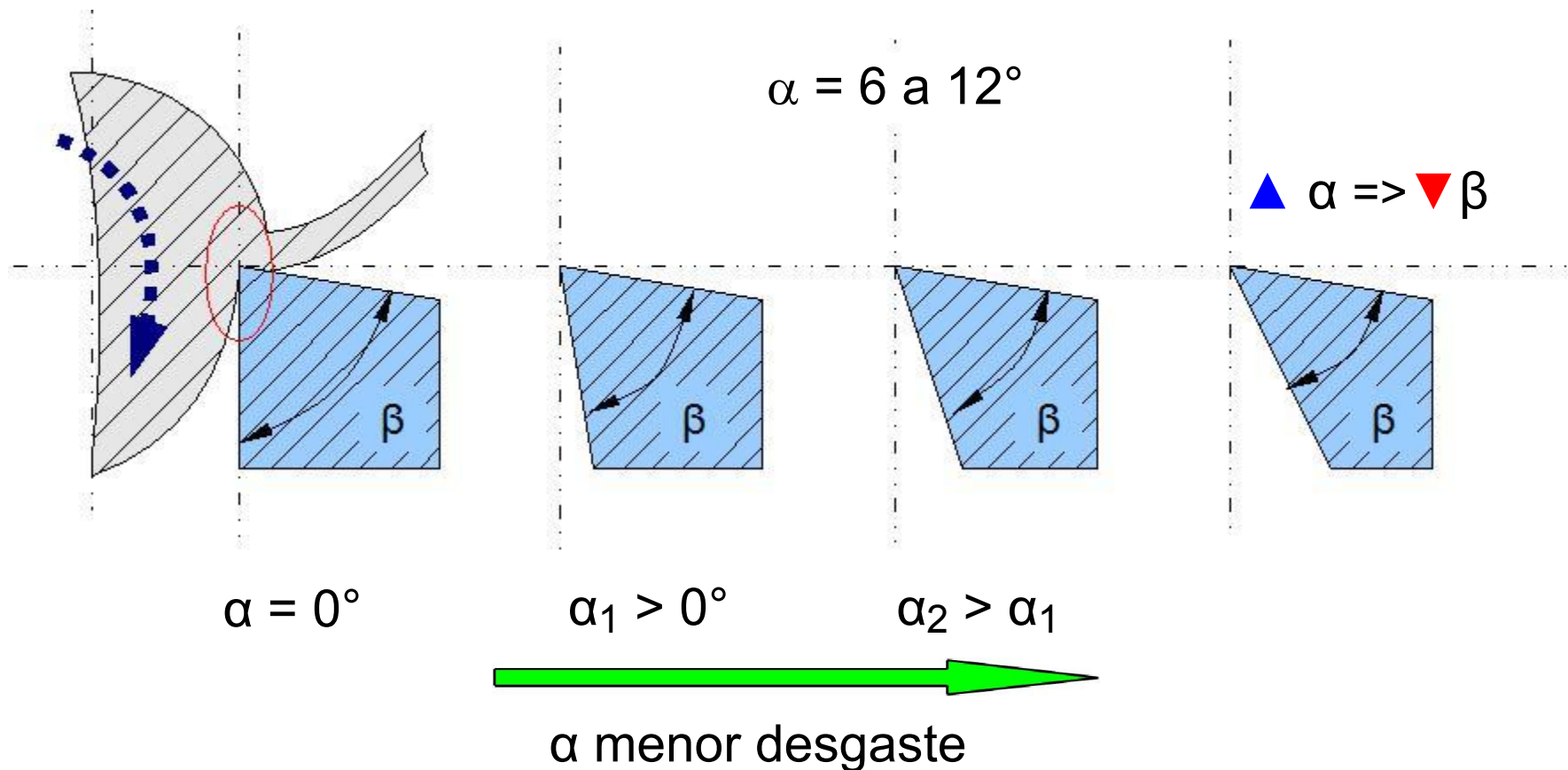
$\chi$  = ângulo de direção

$\lambda$  = ângulo de inclinação

$r_\epsilon$  = raio de ponta ou quina

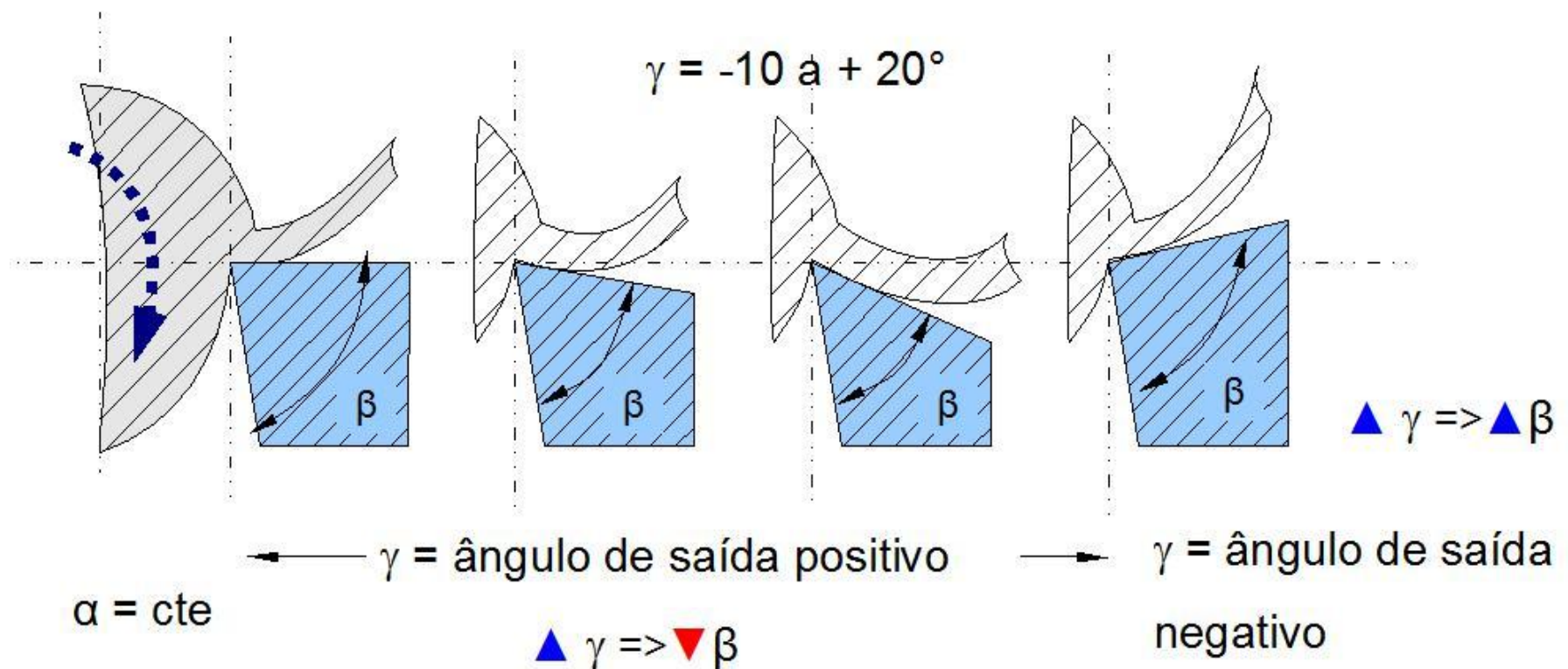
## Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

$\alpha$  = ângulo de folga ou incidência, reduz o atrito entre a superfície de folga e a peça e melhora a estabilidade da aresta de corte



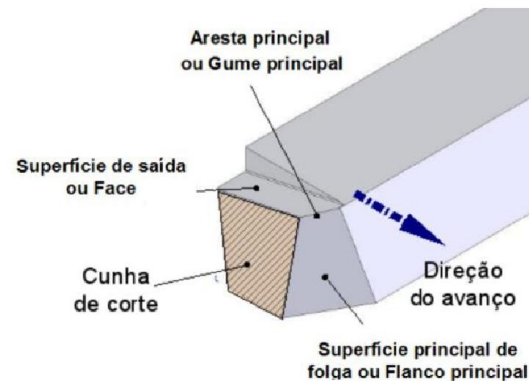
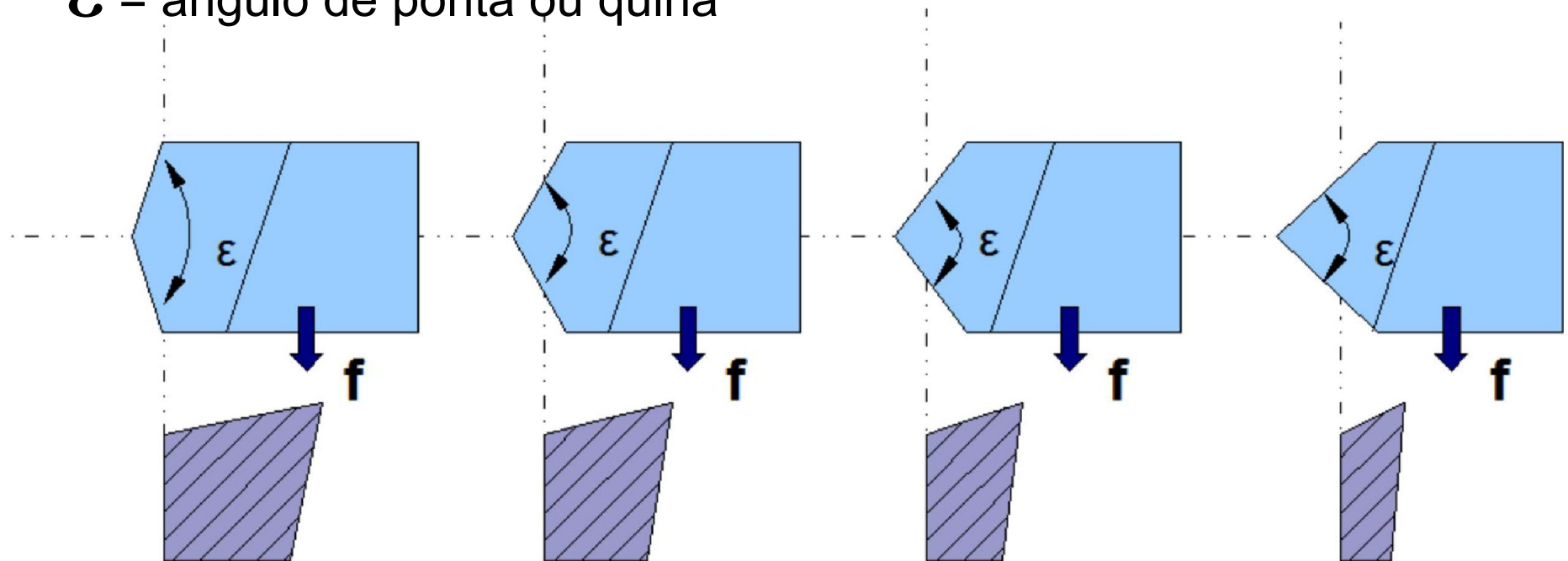
## Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

$\gamma$  = ângulo de saída, melhora a formação do cavaco, melhora a superfície gerada na peça, reduz a força de corte (trabalho de dobramento do cavaco), facilita o escoamento do cavaco sobre a face



## Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

$\epsilon$  = ângulo de ponta ou quina

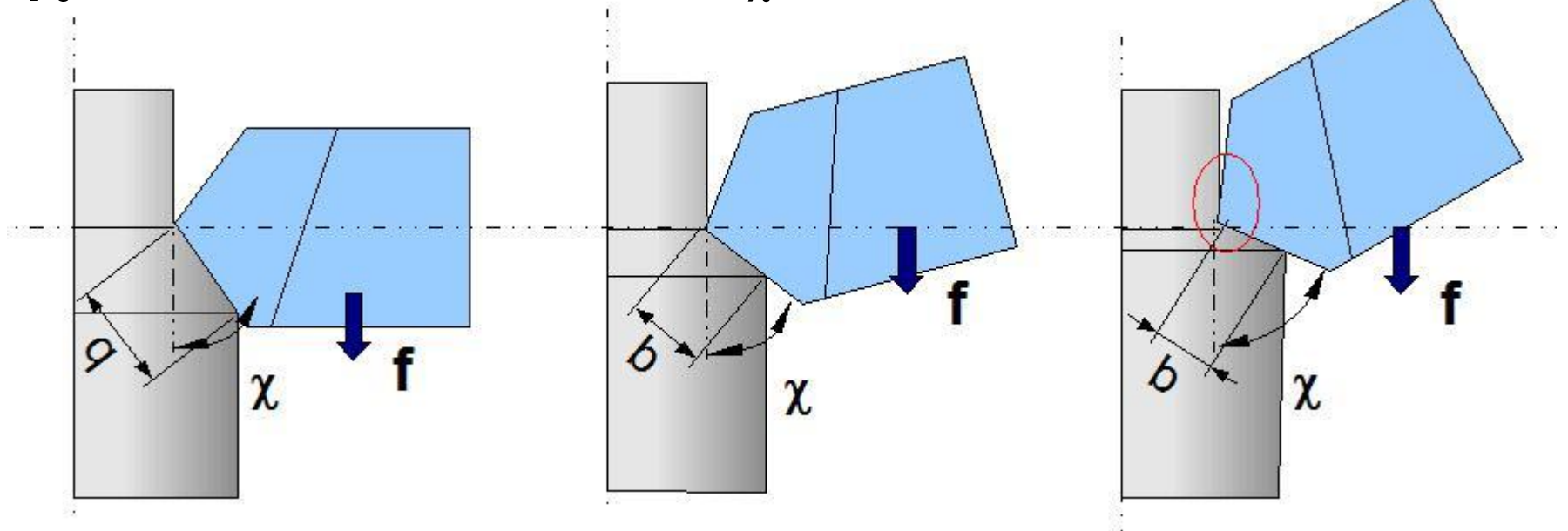


▲  $\epsilon$  => ▼ resistência da cunha

## Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

$\chi$  = ângulo de direção

$\chi = 10$  a  $100^\circ$

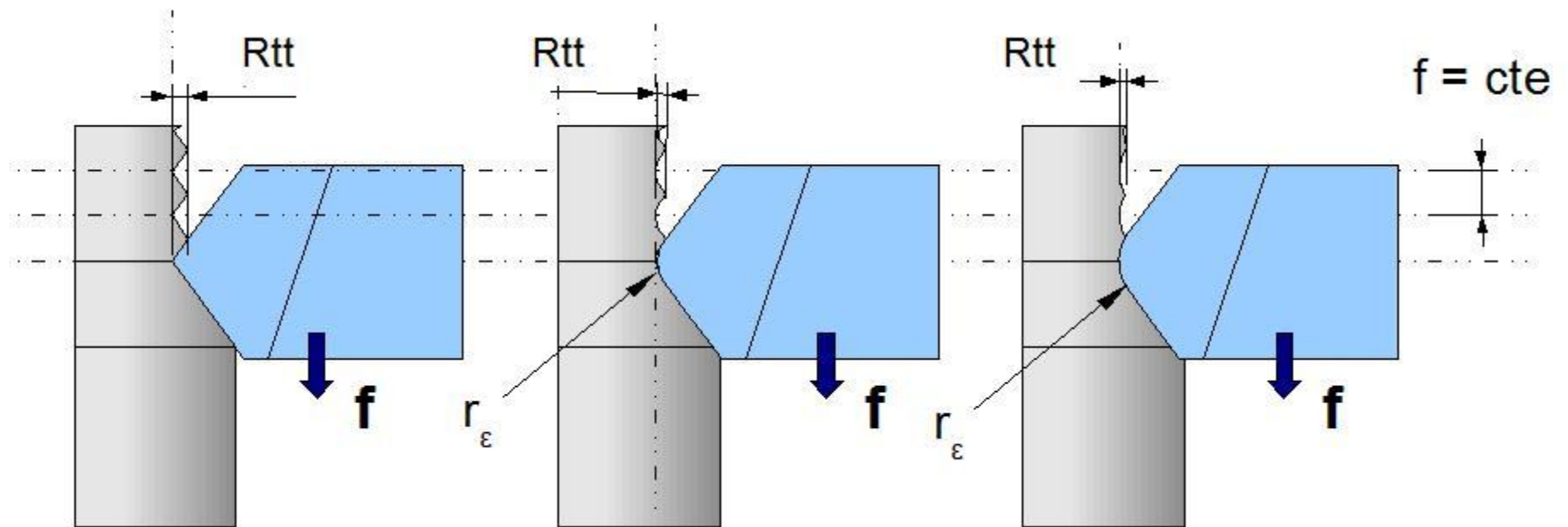


- ▲  $\chi \Rightarrow$  ▲ largura de usinagem – seção de usinagem
- ▲  $\chi \Rightarrow$  atrito do gume secundário contra a superfície gerada
- ▲  $\chi \Rightarrow$  redução de vibrações
- ▲  $\chi \Rightarrow$  redução de forças



## Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

$r_\epsilon$  = raio de ponta ou quina



▲  $r_\epsilon$  = melhora na qualidade superficial

▲  $r_\epsilon$  = aumento do atrito

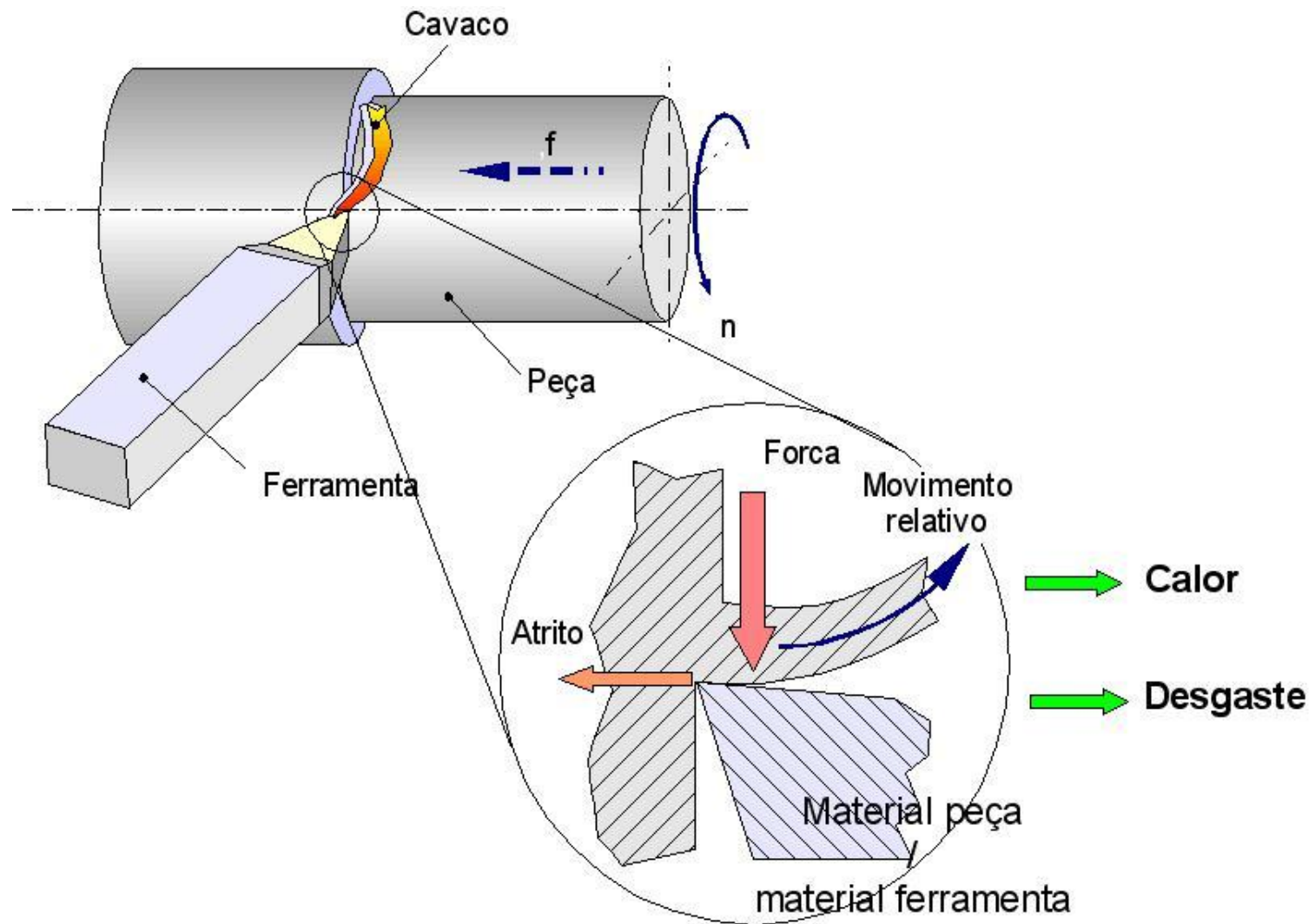
▲  $r_\epsilon$  = aumento das vibrações



## **Escolha da geometria da ferramenta**

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

## Solicitações na cunha de corte



## Forças de usinagem

Força de usinagem =  $f(\text{condições de corte } (f, V_C, a_p), \text{ geometria da ferramenta } (\alpha, \chi, \gamma, \lambda), \text{ desgaste da ferramenta})$

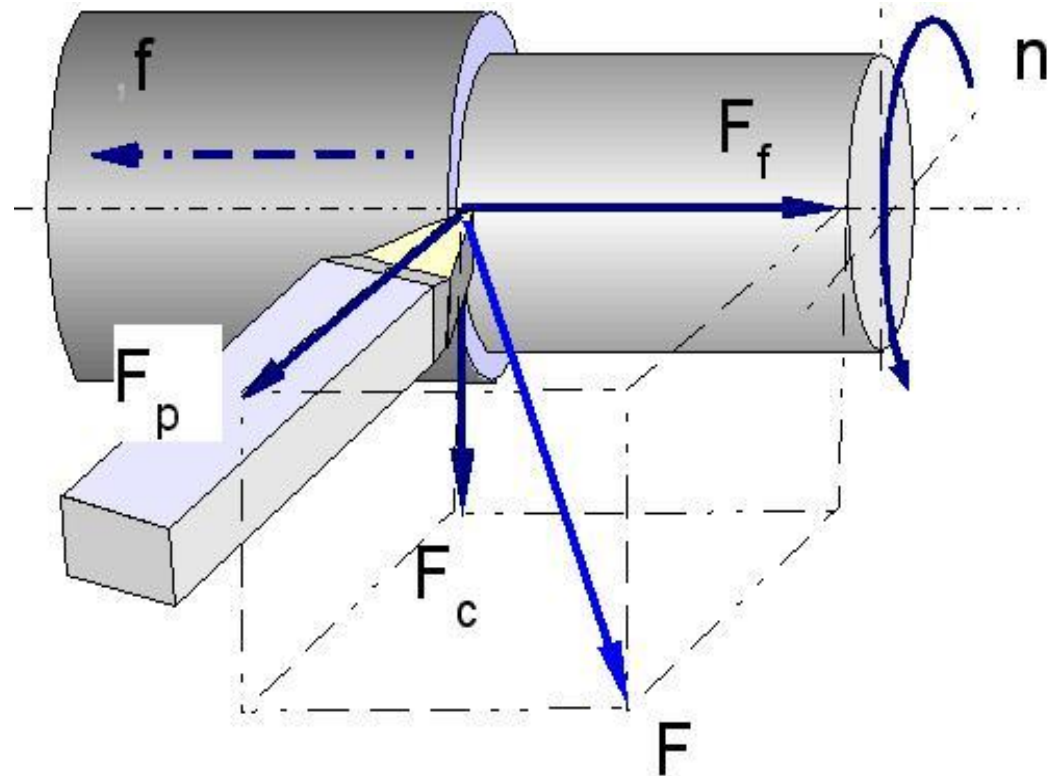
Onde:

$F$  = força de usinagem

$F_C$  = Força de corte

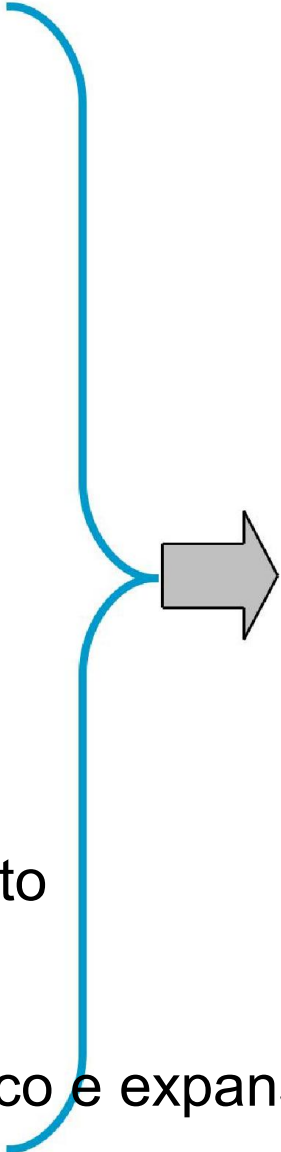
$F_f$  = Força de avanço

$F_p$  = Força passiva

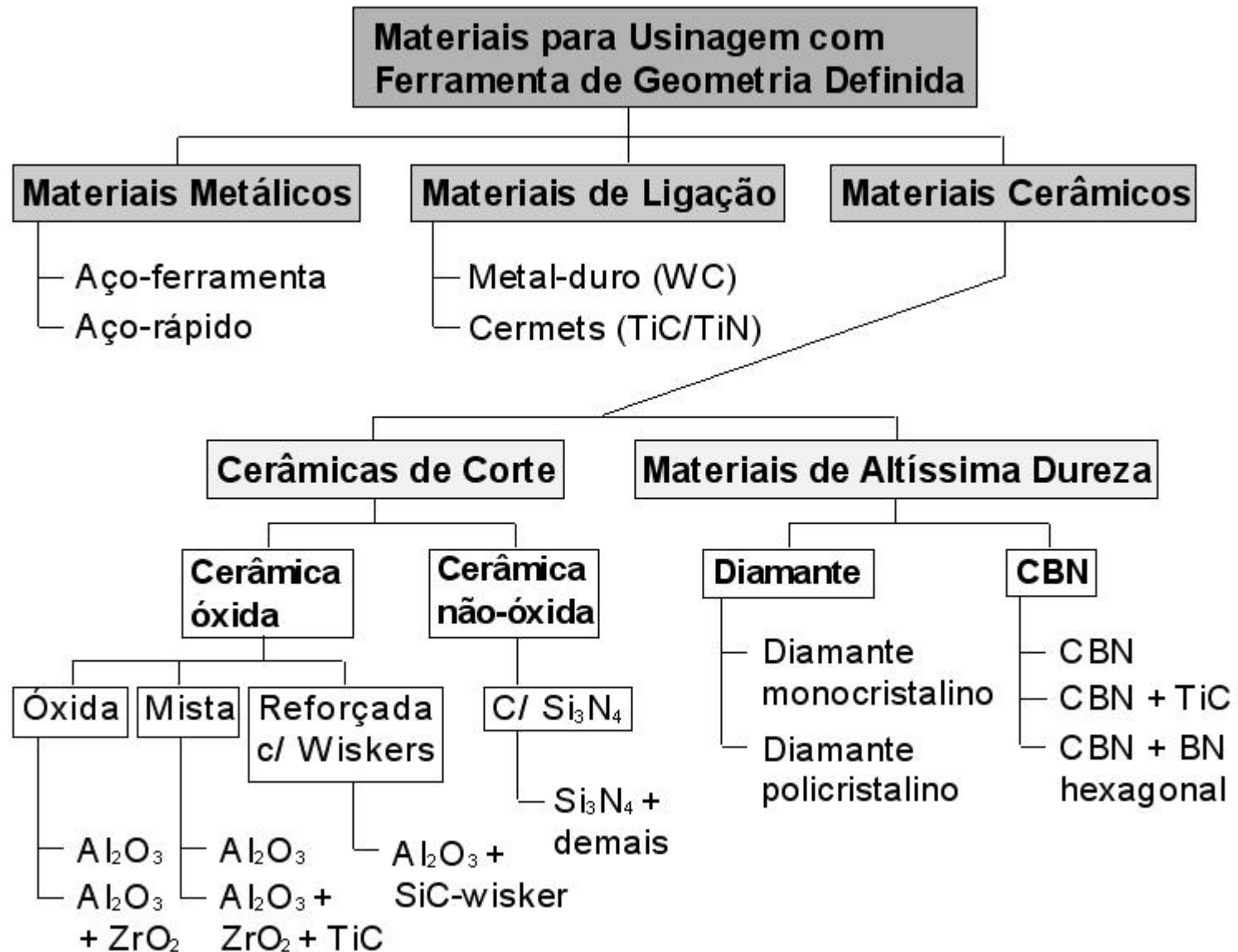


## Materiais de Ferramentas de Corte

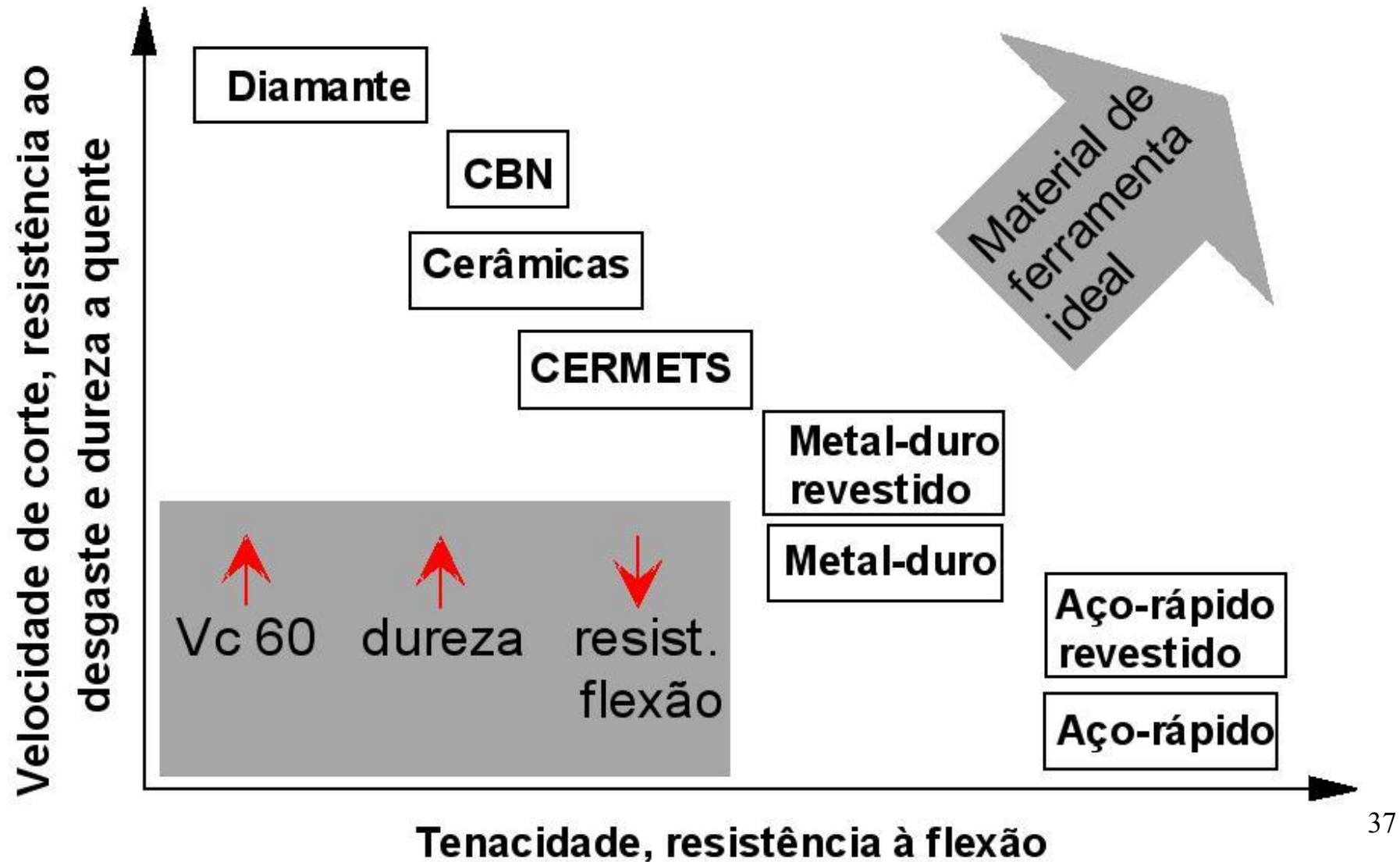
### Requisitos:

- Resistência à compressão
  - Dureza
  - Resistência à flexão e tenacidade → Resistência do gume
  - Resistência interna de ligação → Resistência a quente
  - Resistência à oxidação
  - Pequena tendência à fusão e caldeamento
  - Resistência à abrasão
    - Condutibilidade térmica, calor específico e expansão térmica<sup>35</sup>
- 
- Nenhum material de ferramenta possui todas estas características

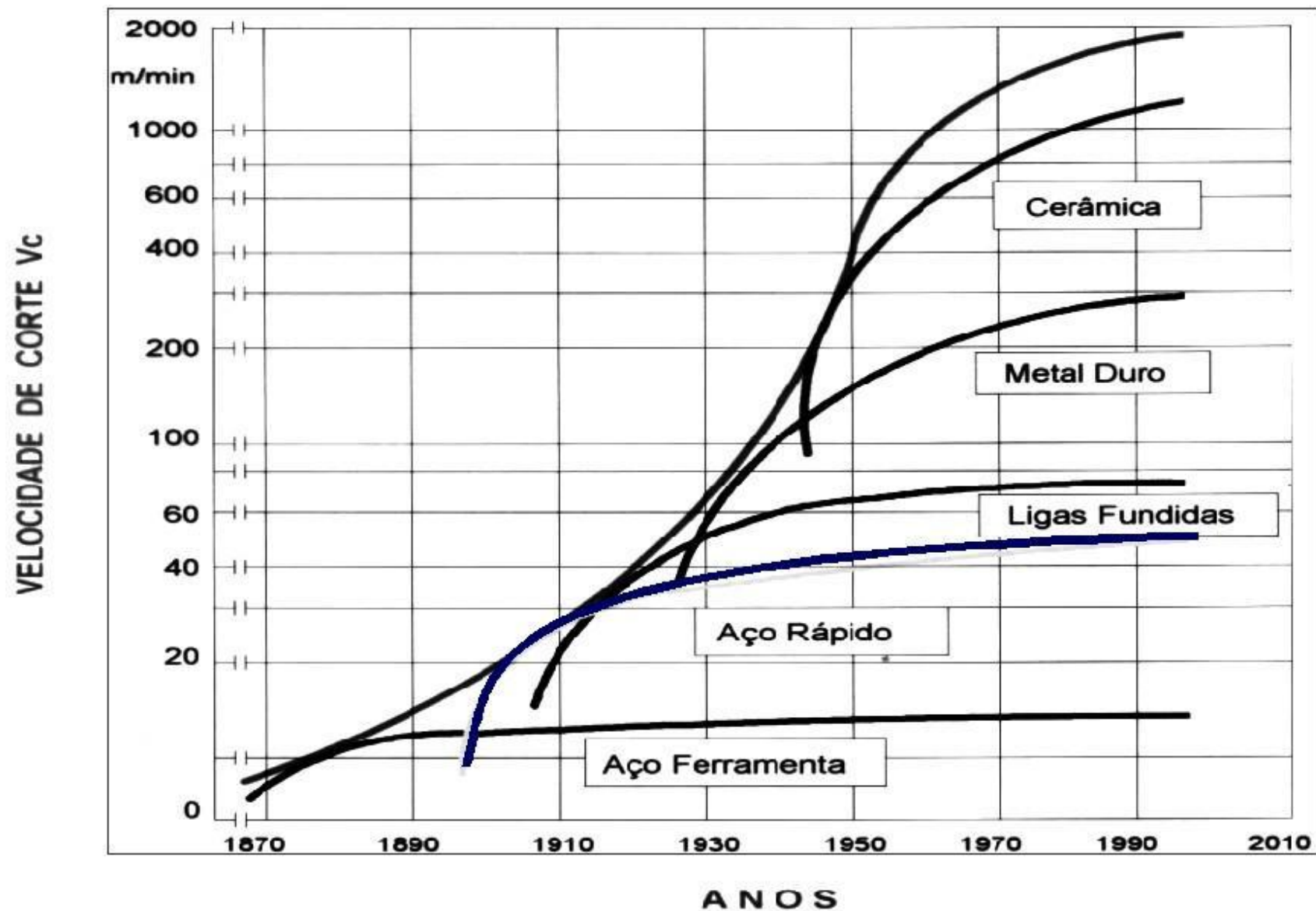
# Classificação dos materiais de ferramentas



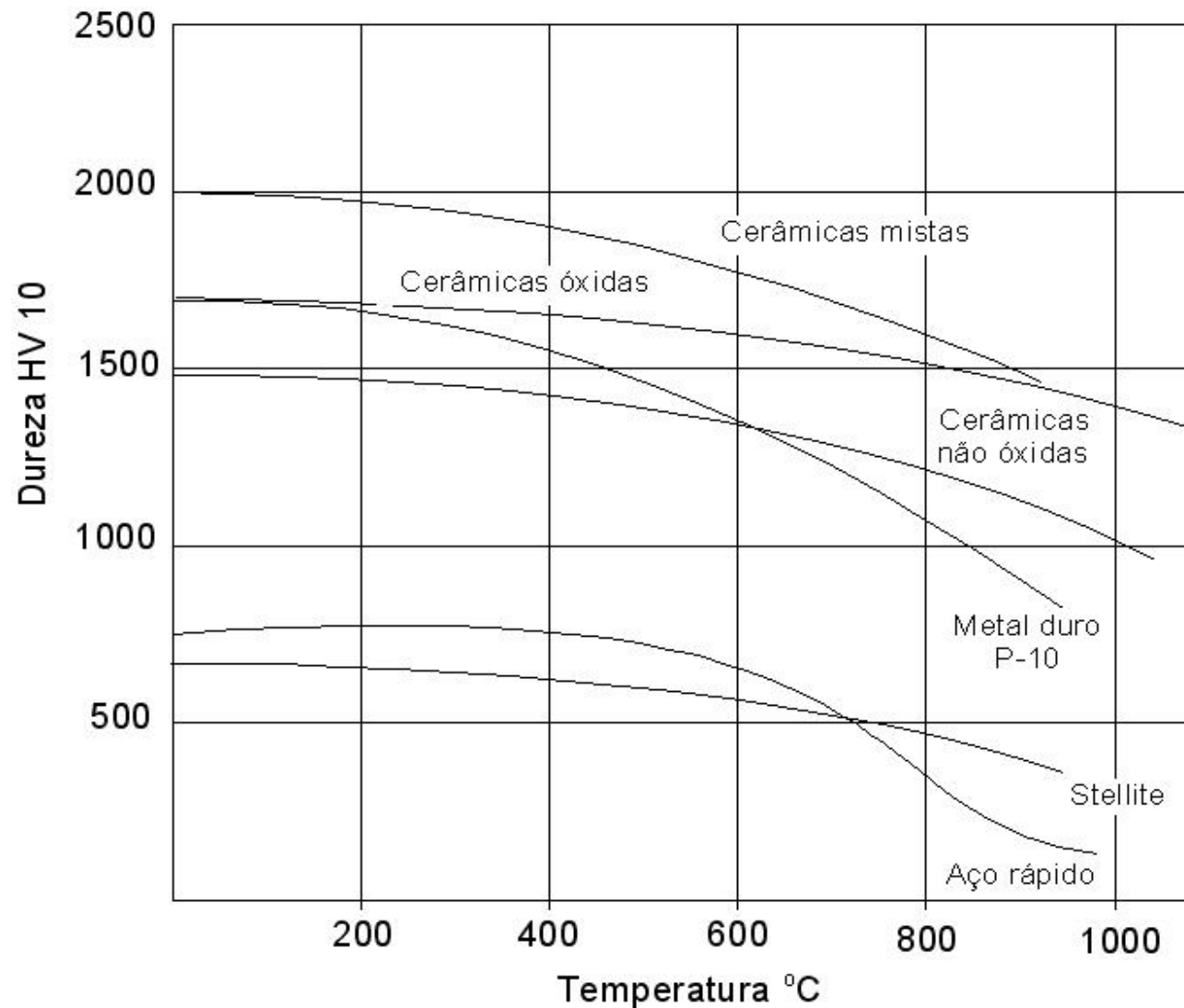
## Propriedades dos materiais de ferramentas



## Evolução dos materiais de ferramenta



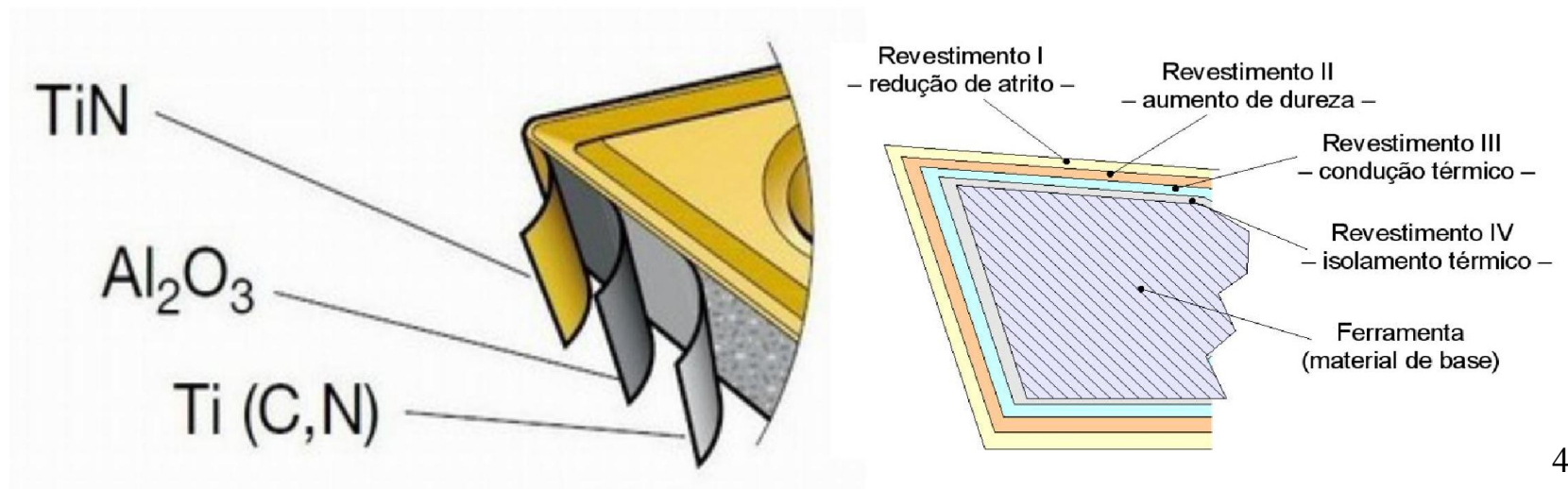
## Resistência a quente dos principais materiais de ferramentas





## Funções dos revestimentos

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





## Tipos de ferramentas de corte

### → Ferramentas integrais



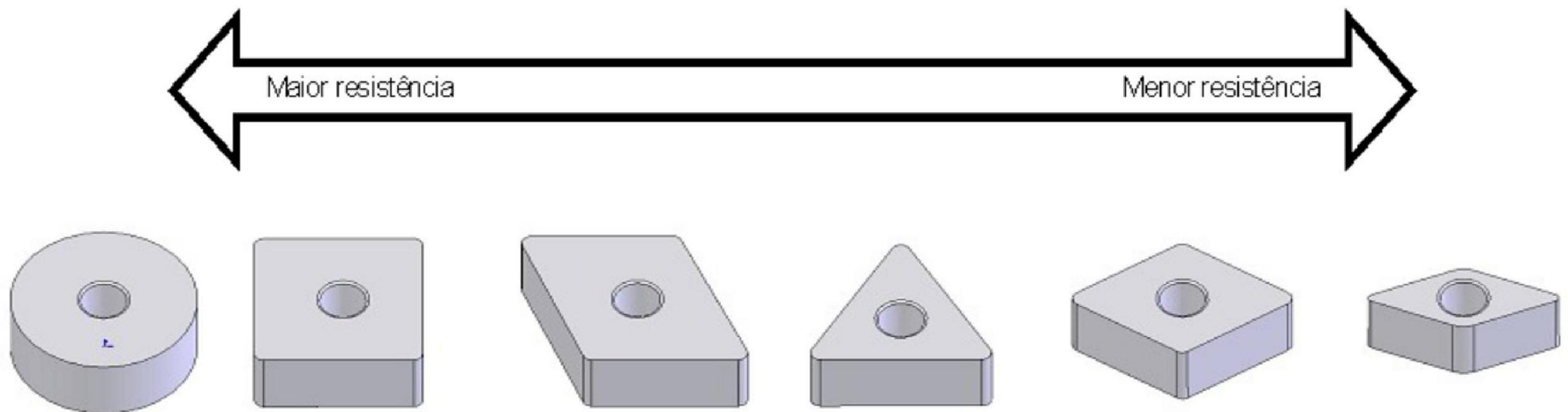
## Tipos de ferramentas de corte

- Ferramentas com insertos intercambiáveis



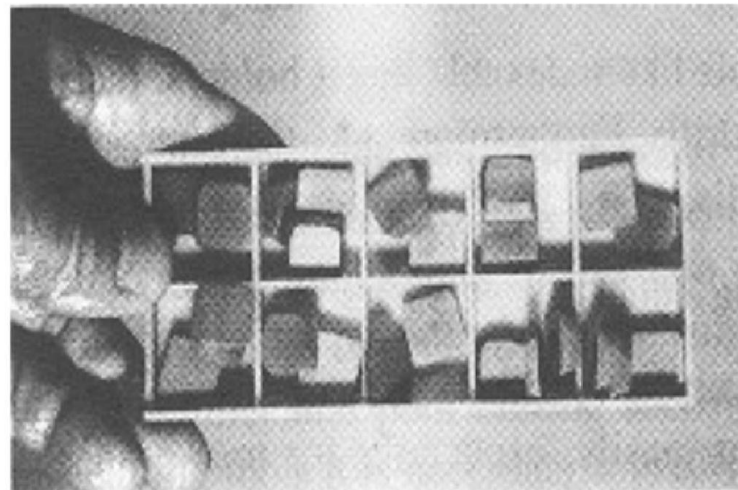
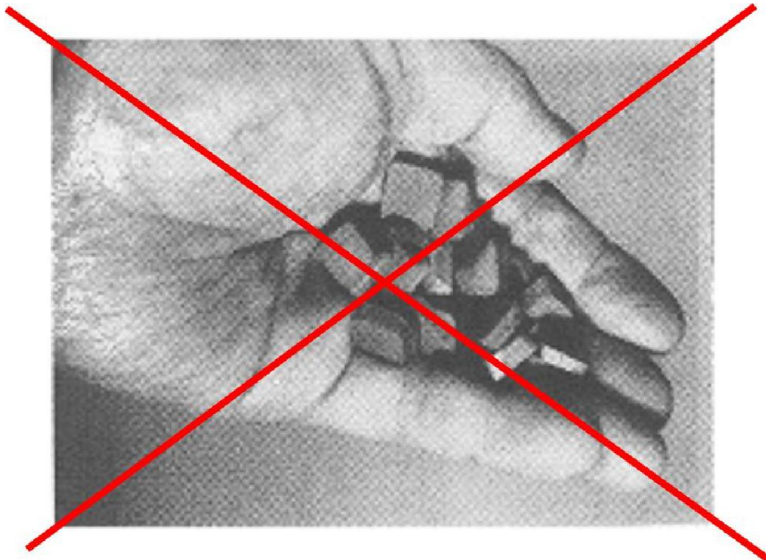
## Geometria dos insertos

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



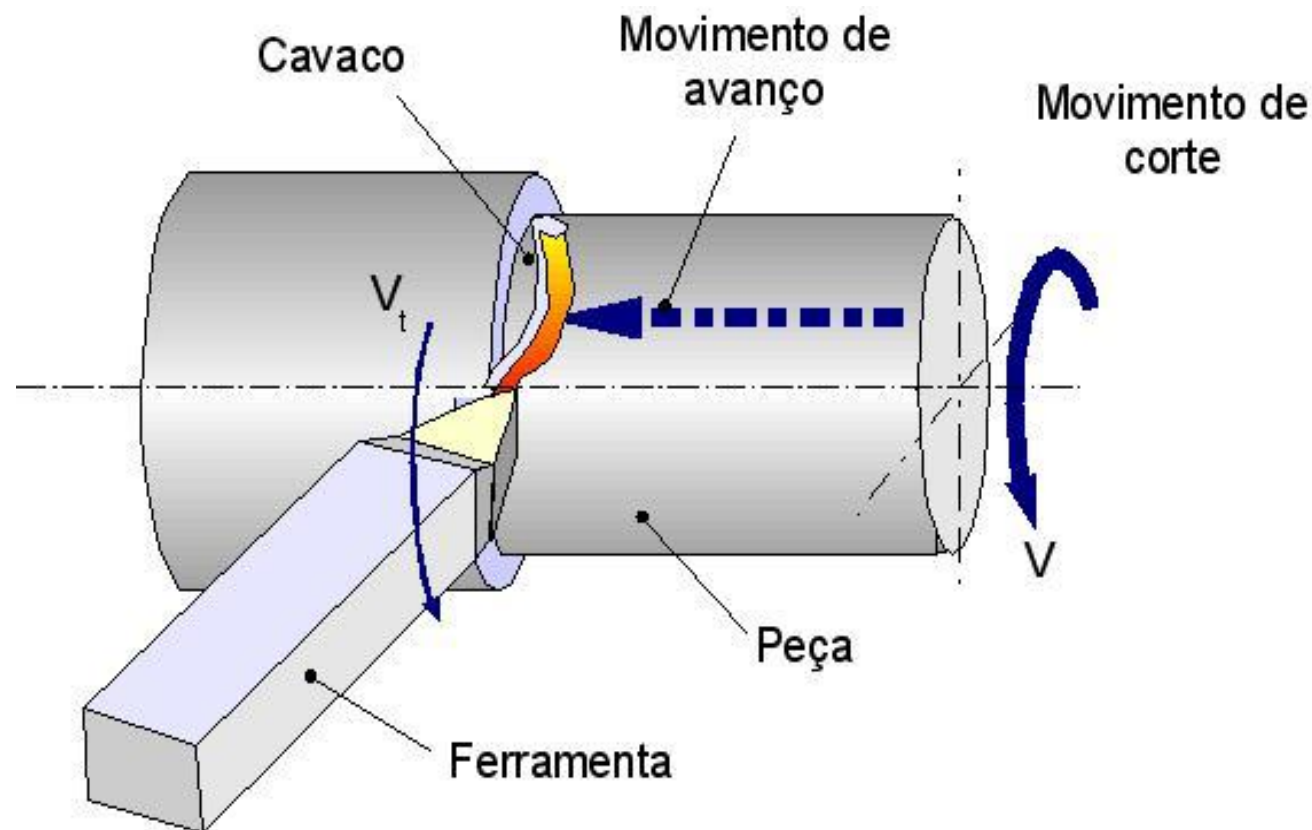
## Considerações gerais sobre Ferramentas de corte

- Manuseio e manutenção de ferramentas de corte
- Evitar o contato entre ferramentas
- Cuidados no armazenamento
- Danos no manuseio (quebras)

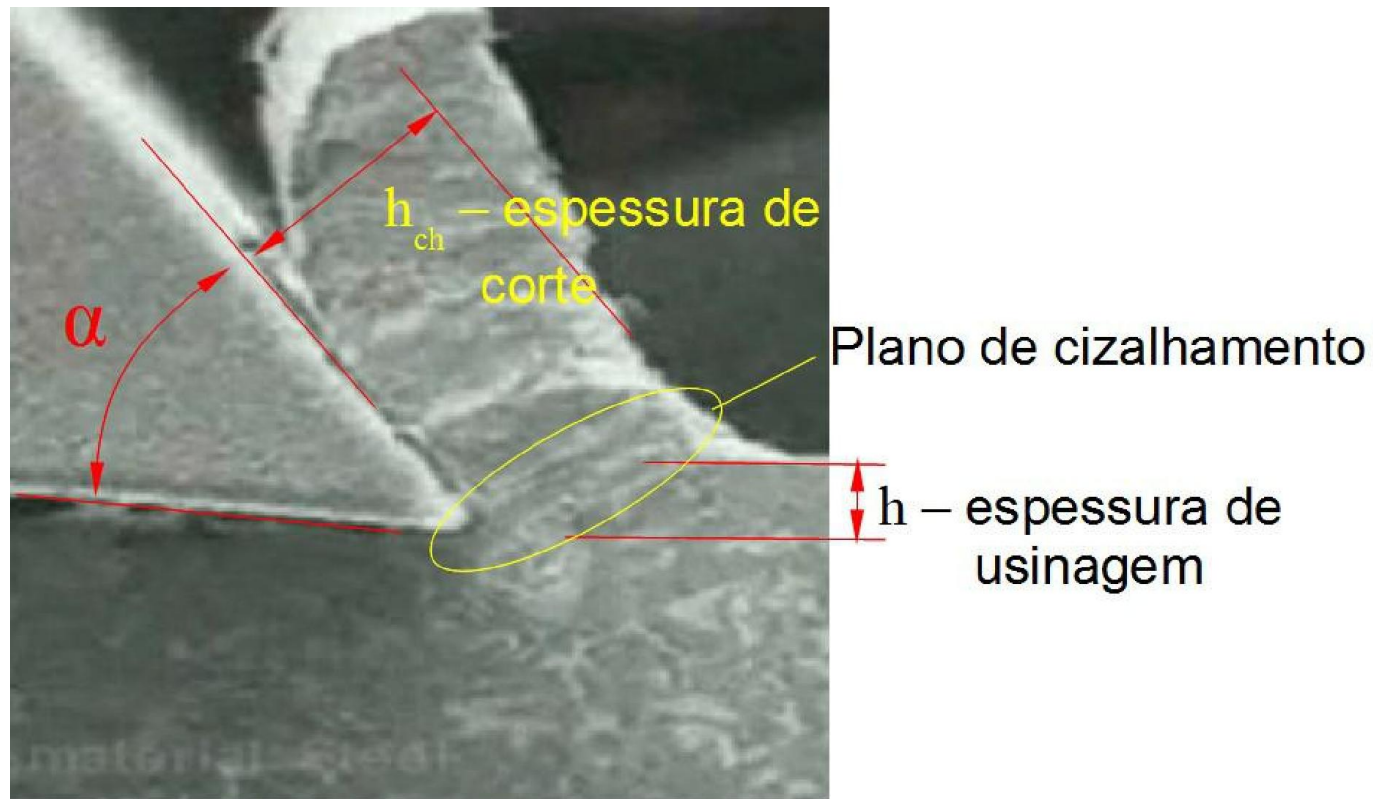


## Cavaco

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

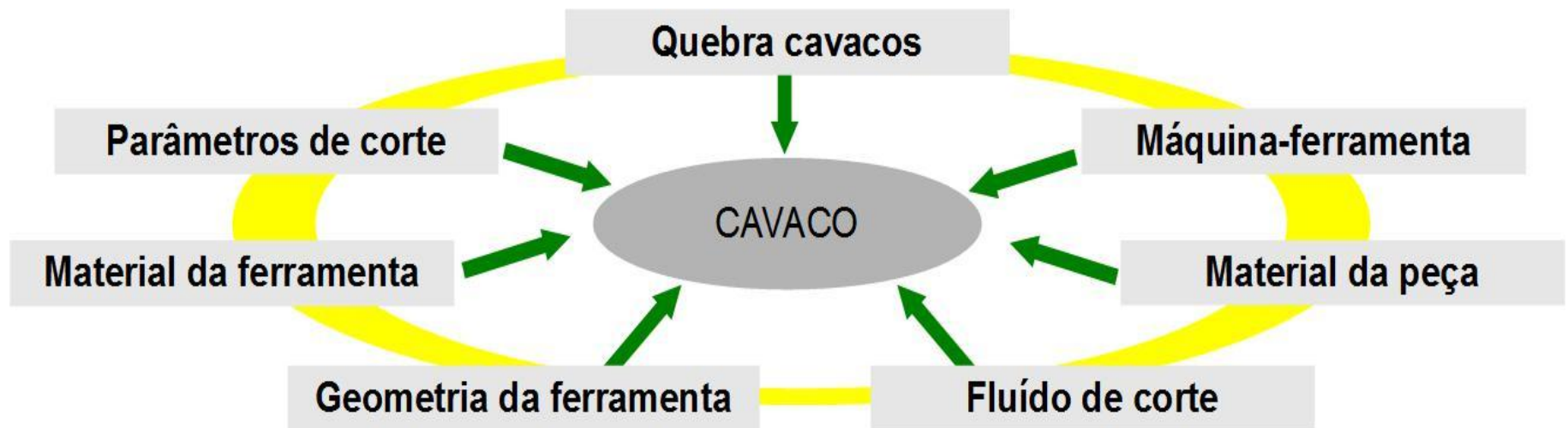


## Formação dos cavacos

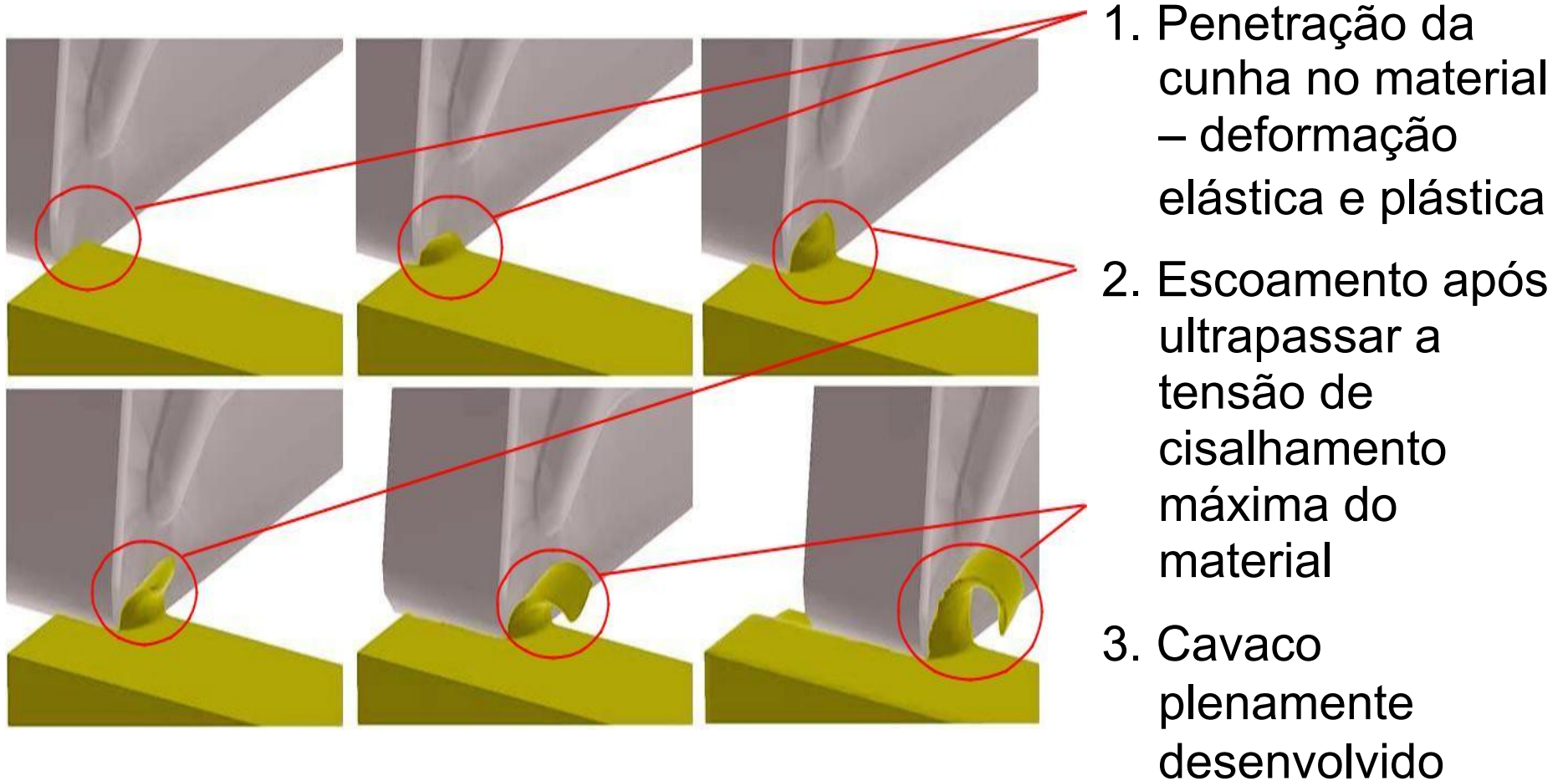




## Fatores de influência na formação dos cavacos

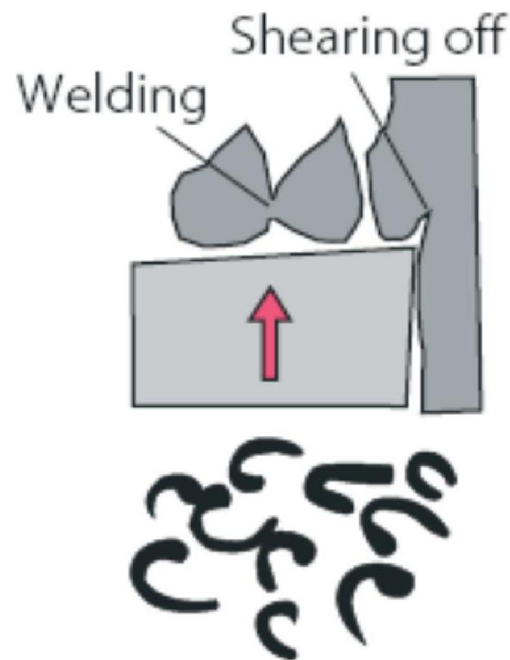
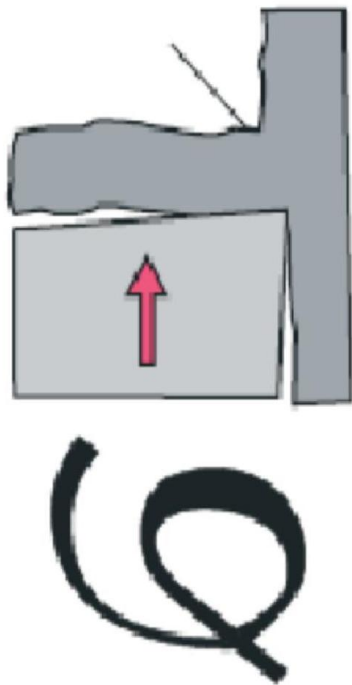


## Processo de corte

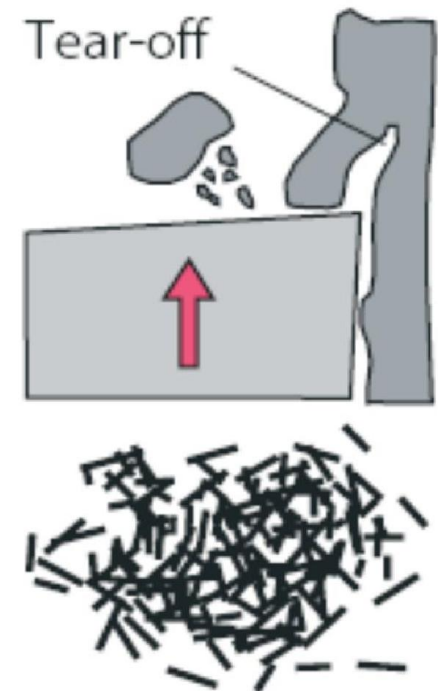


## Tipos básicos de cavacos

Contínuos Lamelares ou

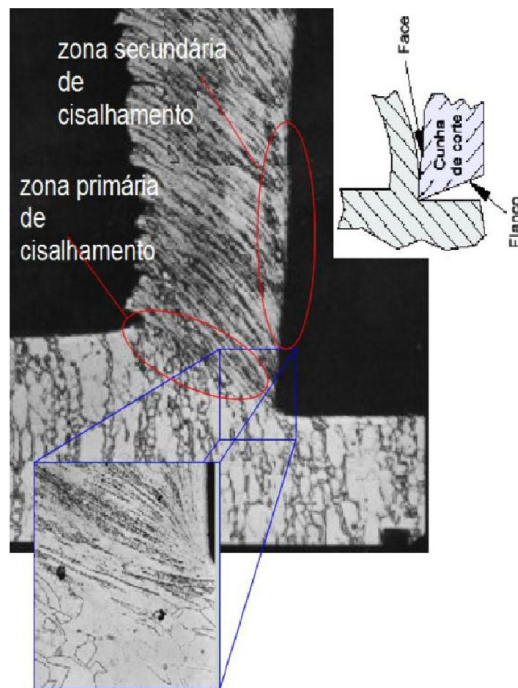


Arrancados  
cislhados

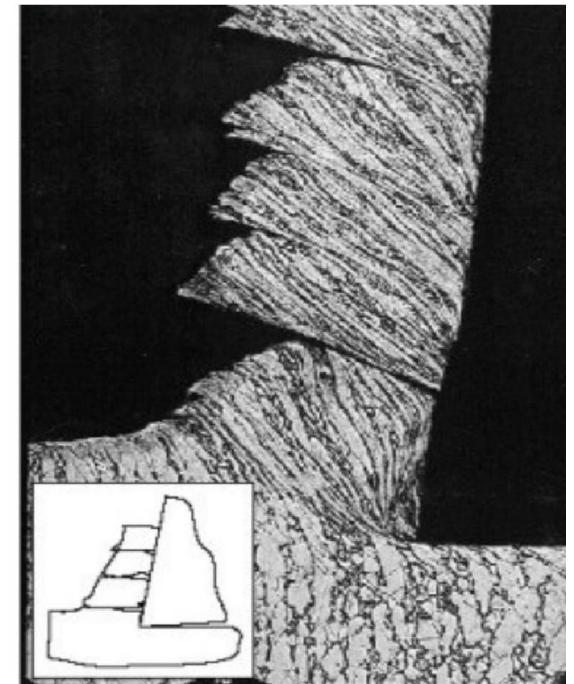


## Tipos básicos de cavacos

Contínuos Lamelares ou

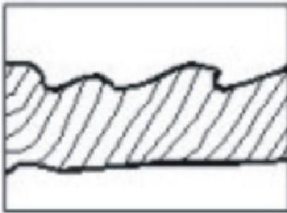


Arrancados  
cisalhados

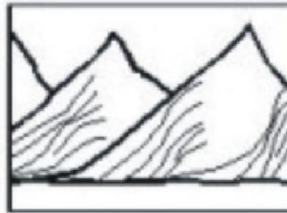


## Relação entre propriedades dos materiais e cavacos

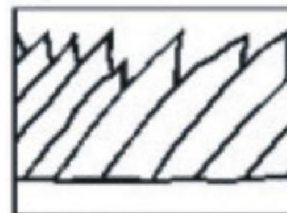
1) Cavaco contínuo



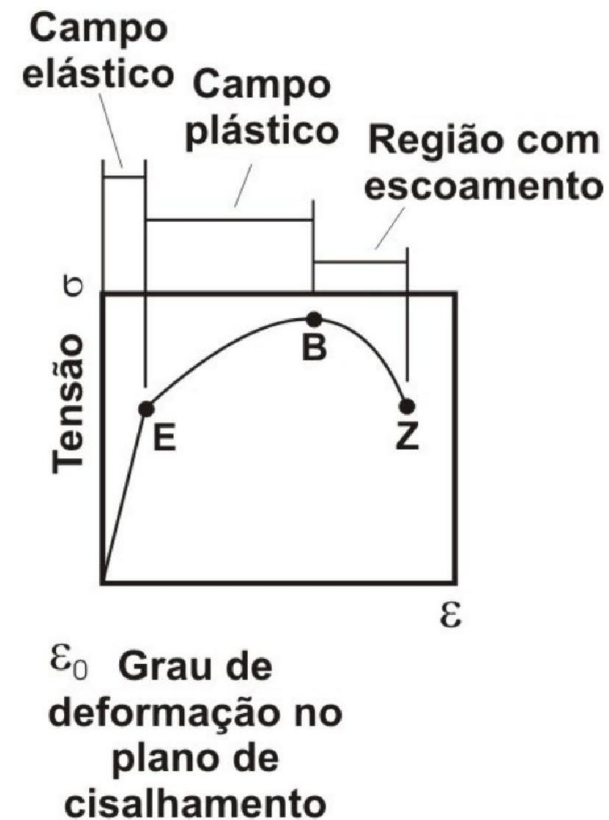
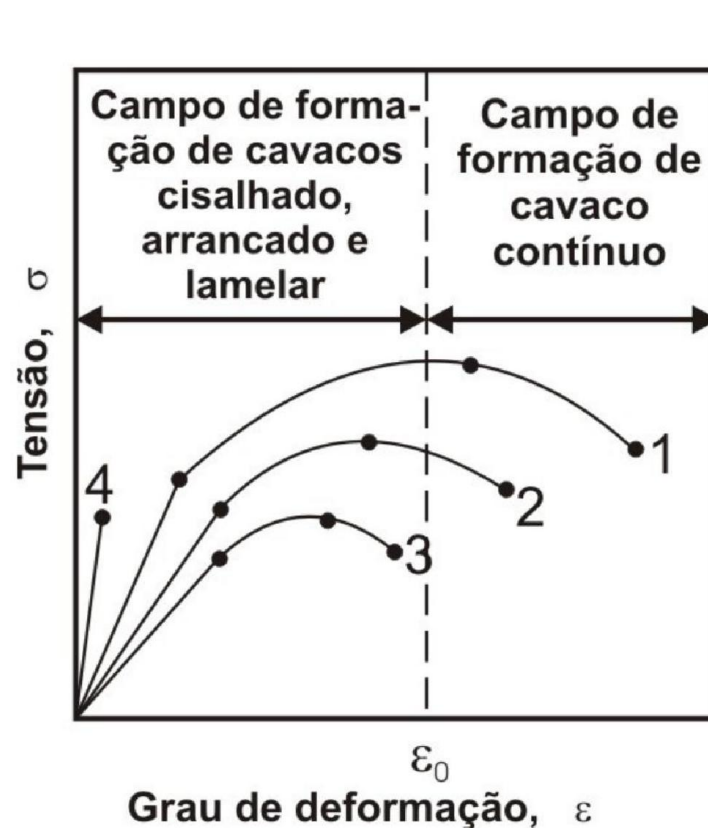
2) Cavaco em lamelas



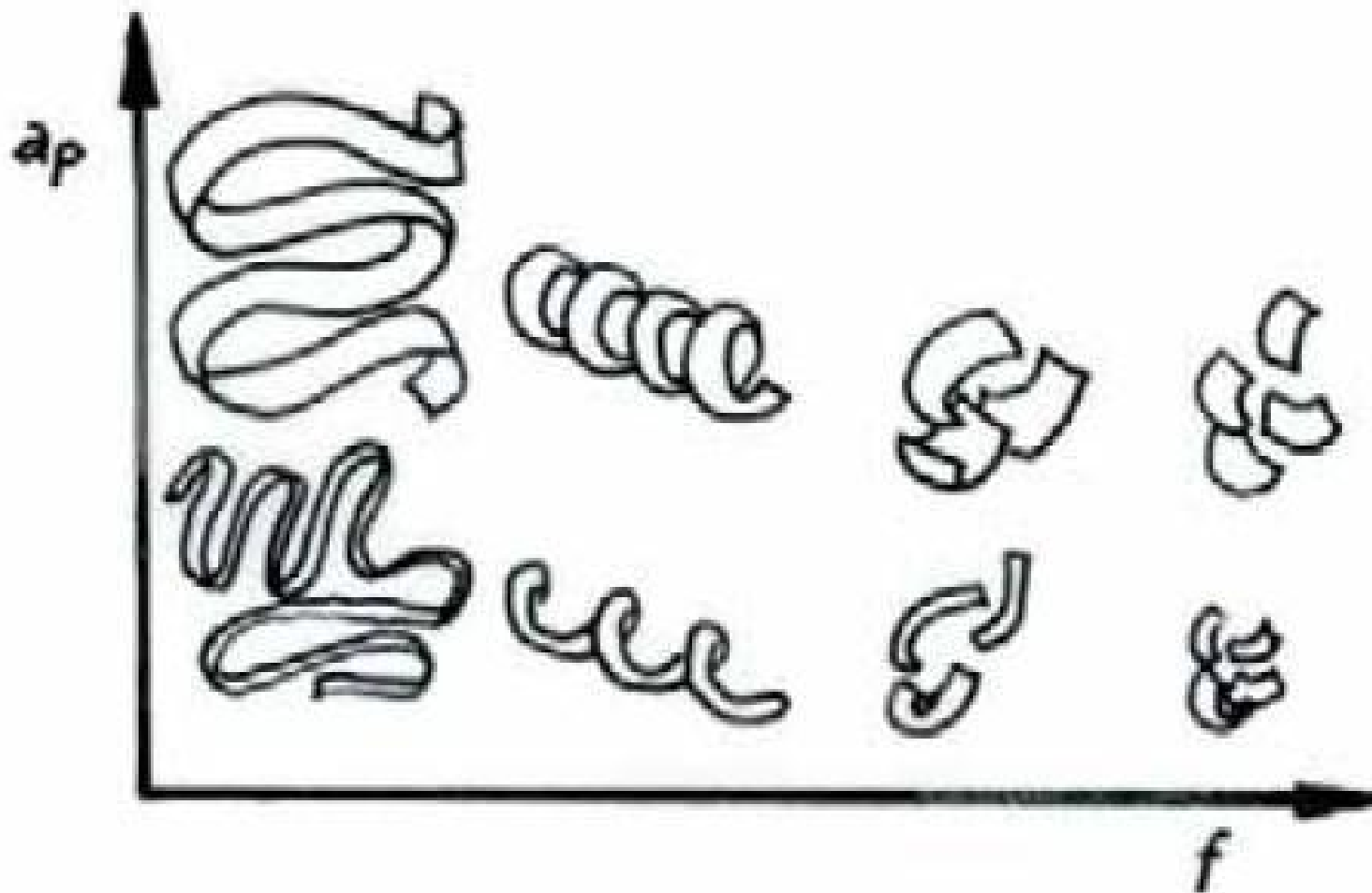
3) Cavaco cisalhado



4) Cavaco arrancado

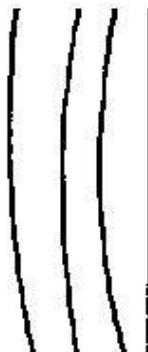











Influência do avanço e da profundidade de corte sobre a  
formação do cavaco



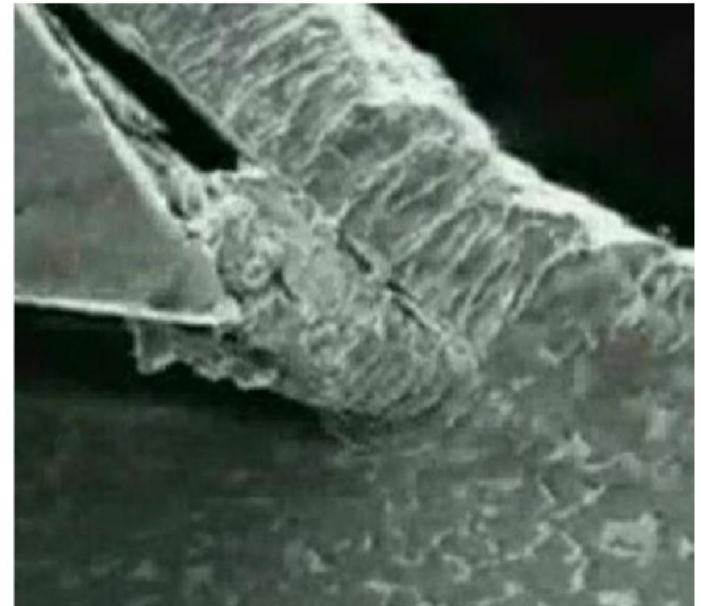
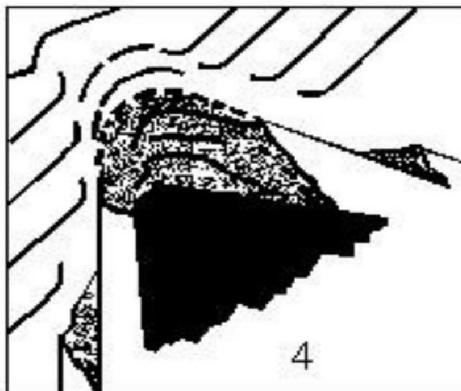
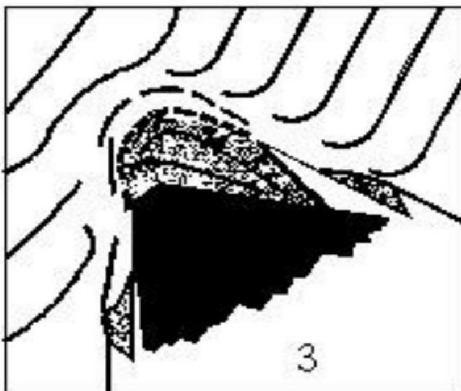
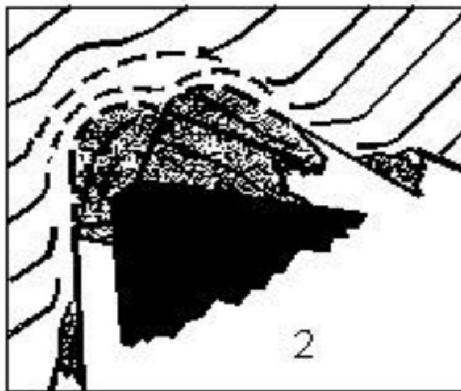
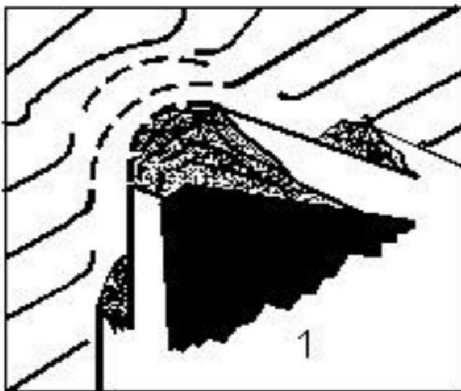


## Classificação dos cavacos

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		

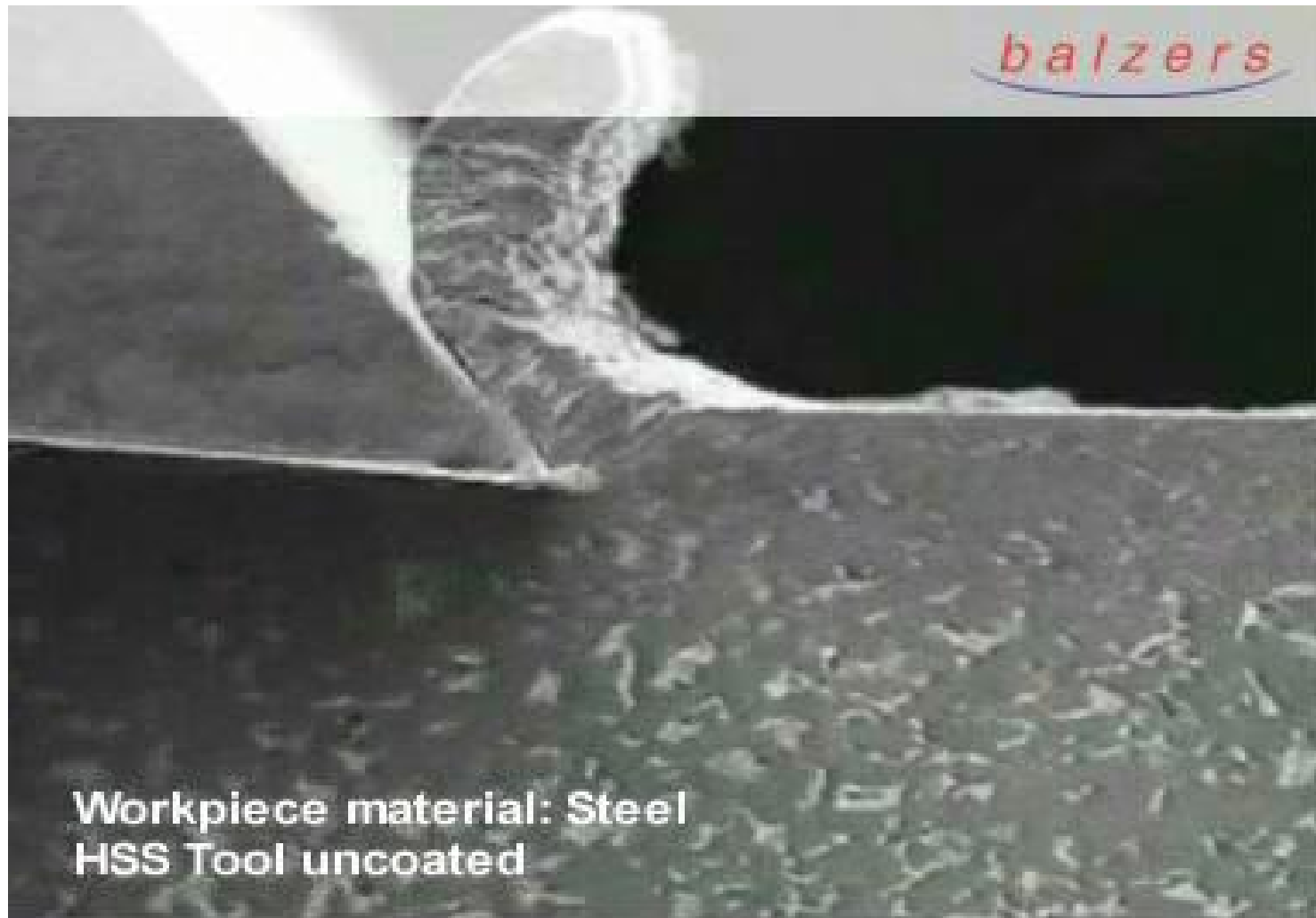
## Aresta postiça

- 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



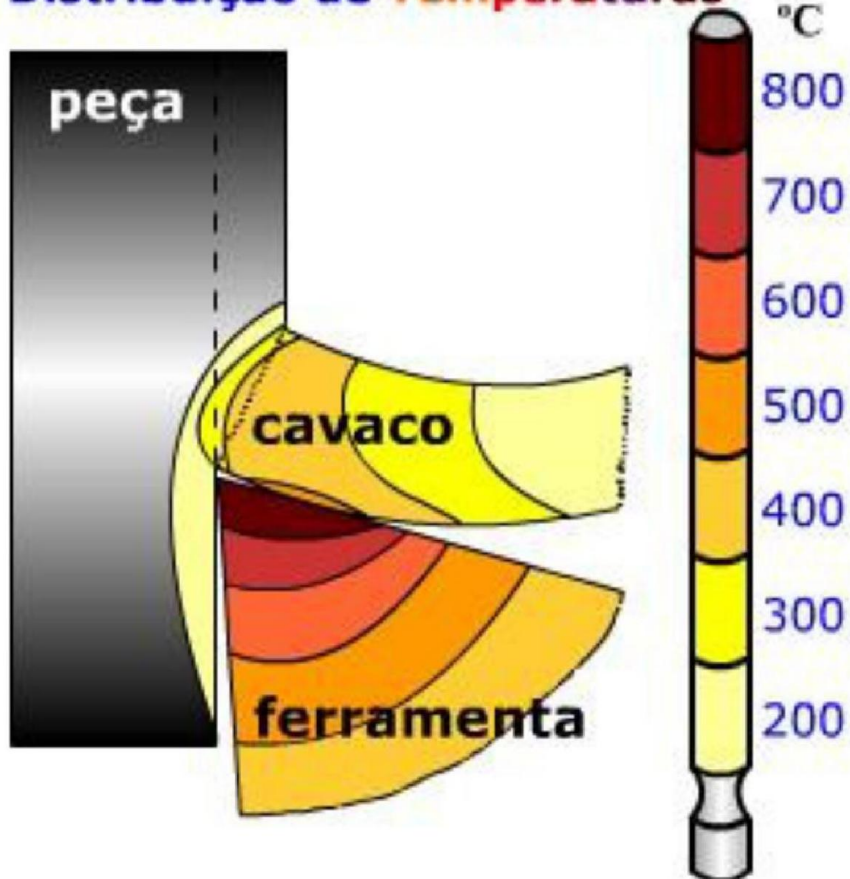


## Vídeo sobre formação de cavaco

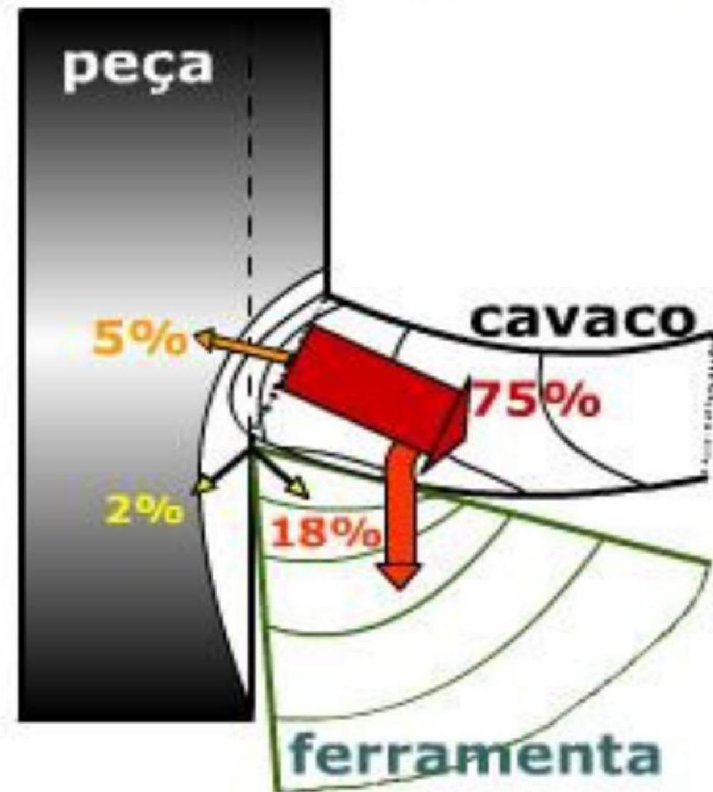


## Distribuição do calor na região do corte

Distribuição de Temperaturas



Distribuição do CALOR gerado

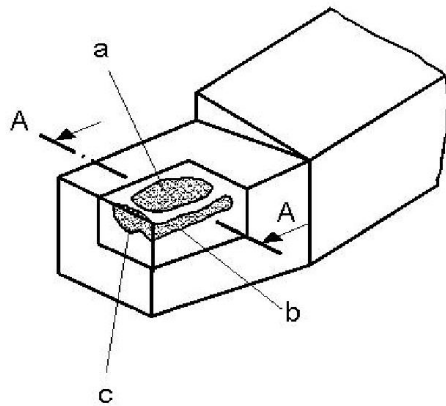




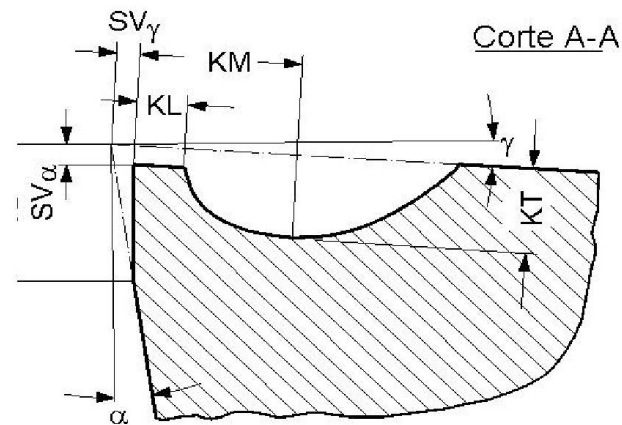
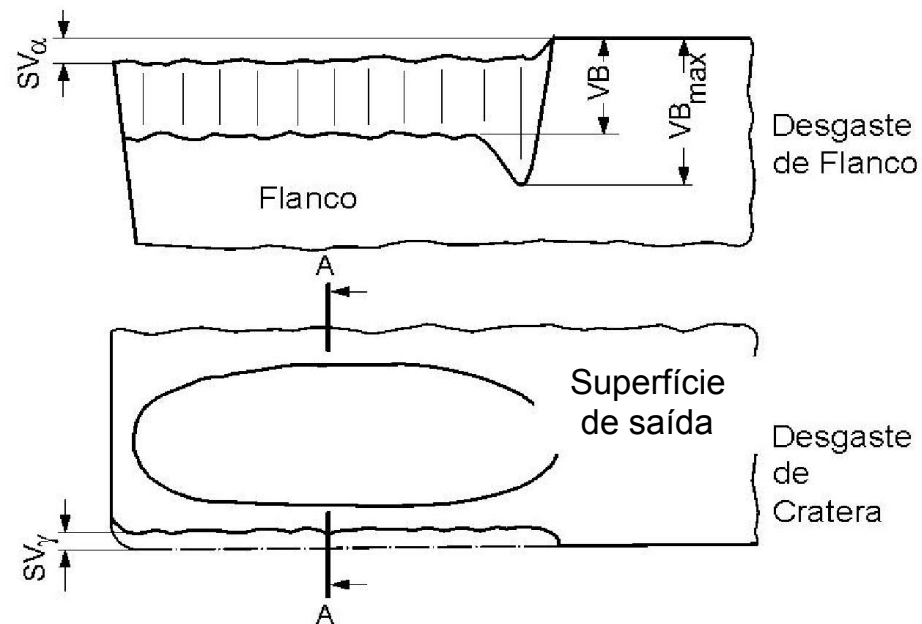
## **Desgaste em ferramentas de usinagem**

- O desgaste é uma consequência natural do processo de usinagem sobre as ferramentas de geometria definida e não definida.
- Movimento relativo entre cavaco e ferramenta, o atrito, as forças e a temperatura levam ao desgaste da ferramenta.
- O desgaste pode ser observado na superfície de saída, nas superfícies principal e secundária, na ponta e nas arestas de corte

## Desgaste em ferramentas de usinagem

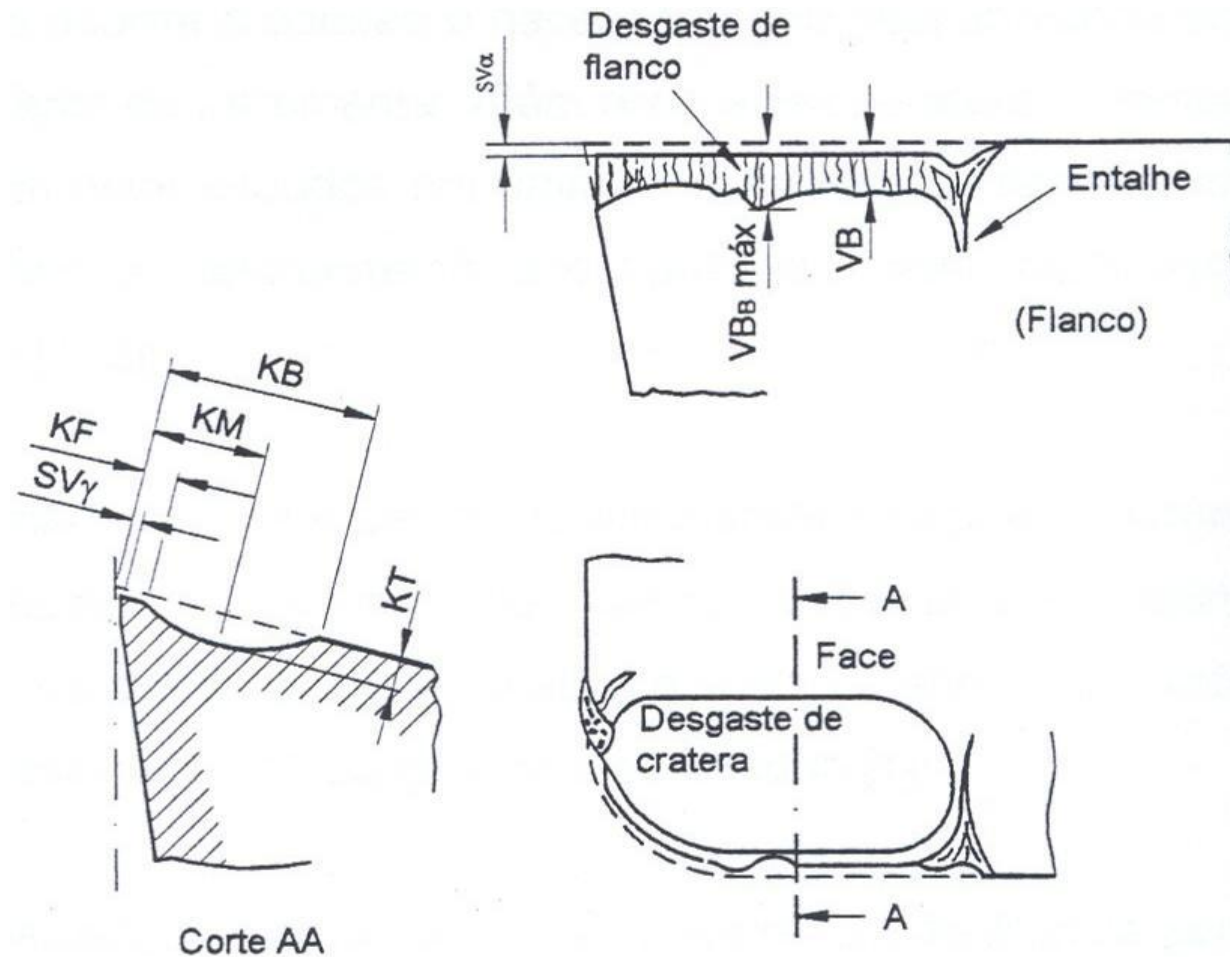


- a – desgaste de cratera
- b – desgaste da superfície principal na aresta de corte
- c – desgaste da superfície secundária na aresta secundária



- $\gamma$  Ângulo de Saída
- $\alpha$  Ângulo de Incidência
- $SV_\gamma$  Deslocamento do Gume no Sentido da Face
- $SV^\alpha$  Deslocamento do Gume no Sentido do Flanco
- VB Desgaste de Flanco
- KL Largura do Lábio da Cratera
- KT Profundidade da Cratera
- KM Afastamento Médio da Região mais Profunda da Cratera

## Desgaste em ferramentas de usinagem



**VB** - Largura média de desgaste de flanco.

**VB<sub>máx</sub>** - Largura máxima de desgaste de flanco.

**SV<sub>α</sub>** - Deslocamento lateral do gume na direção do flanco.

**KB** - Largura de cratera.

**KF** - Largura do lábio no desgaste de cratera.

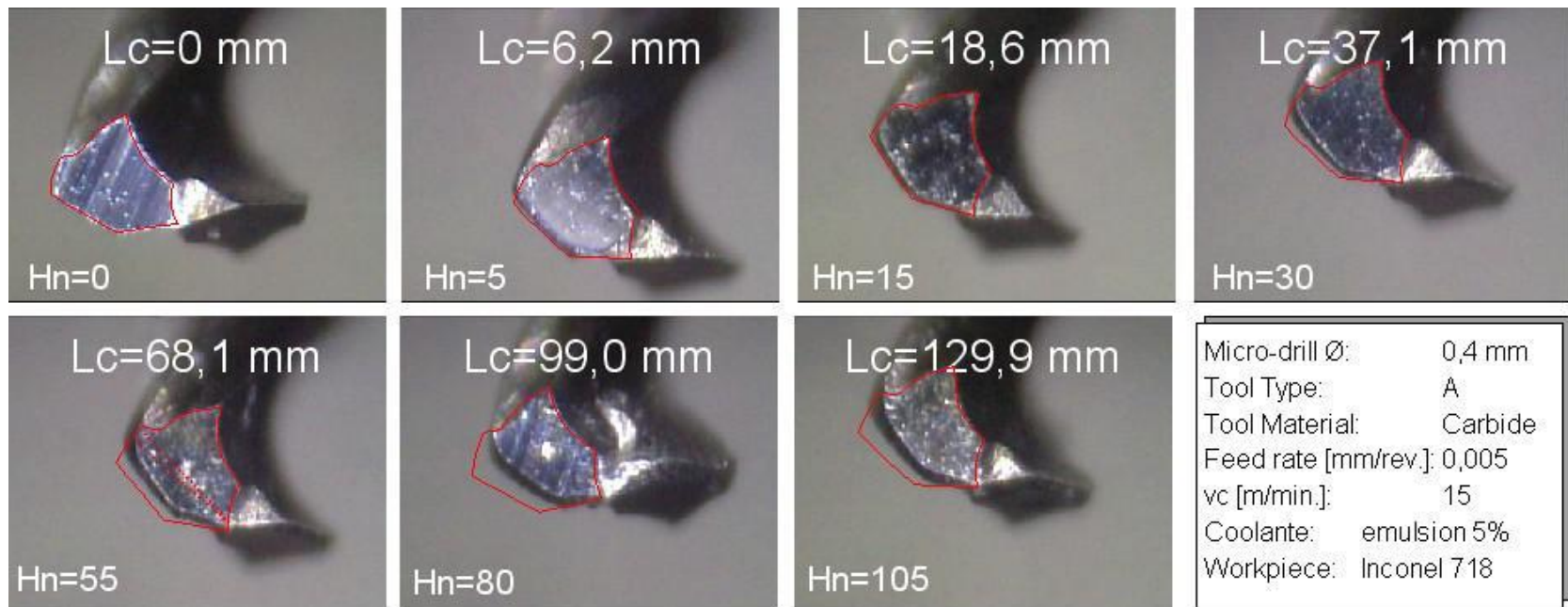
**KM** - Distância da borda da ferramenta ao centro da cratera.

**KT** - Profundidade de cratera.

**SV<sub>γ</sub>** - Deslocamento lateral do gume na direção da face.

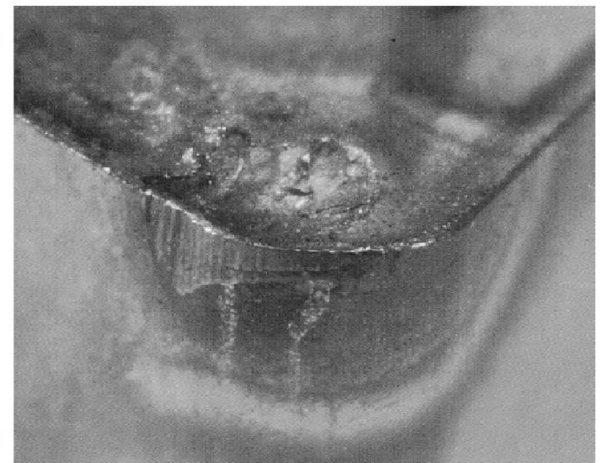
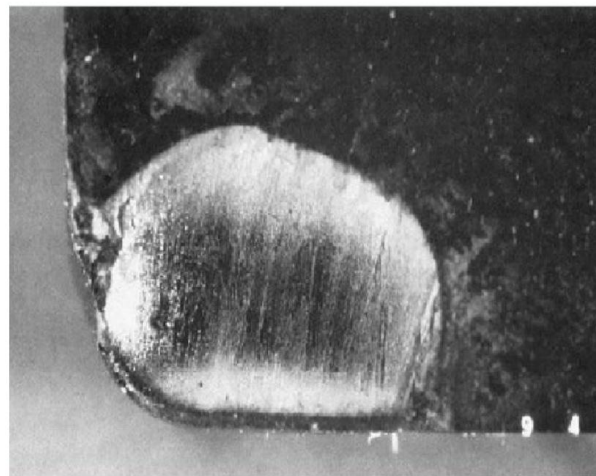
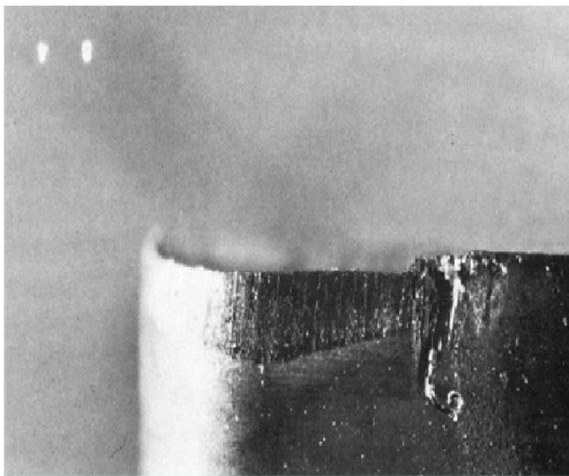
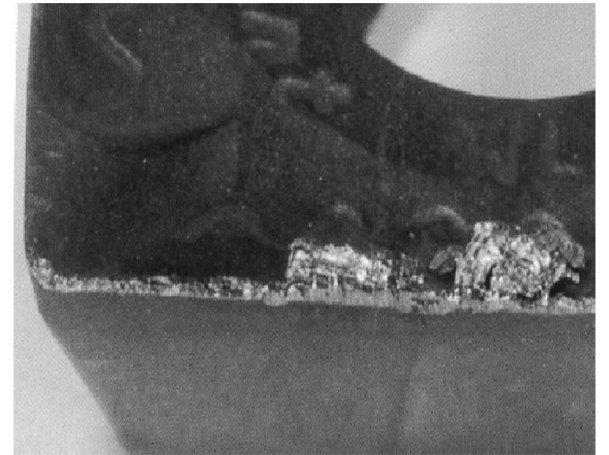
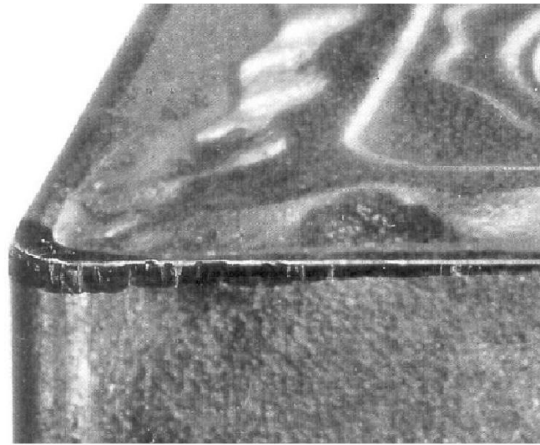
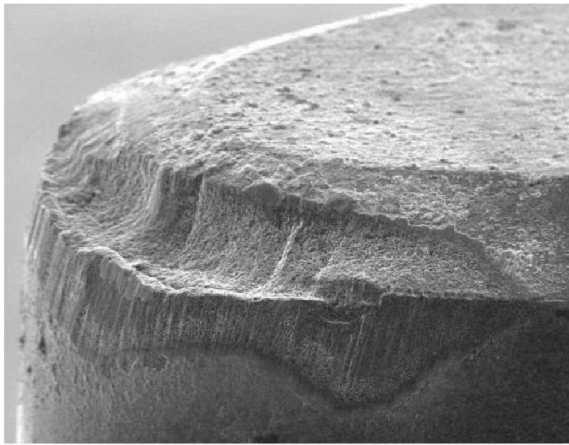
## Desgaste em ferramentas de usinagem

### Exemplo da evolução de desgaste em brocas helicoidais



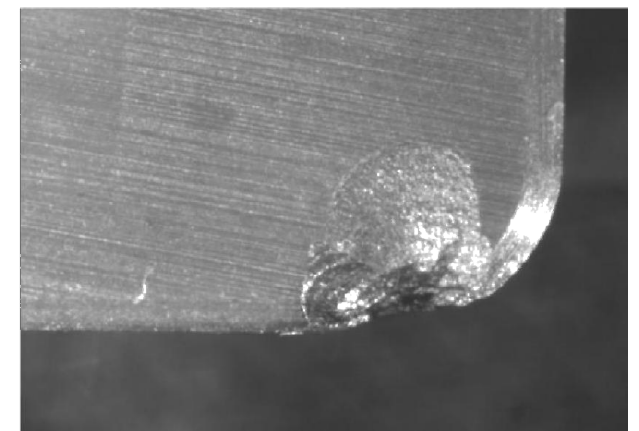
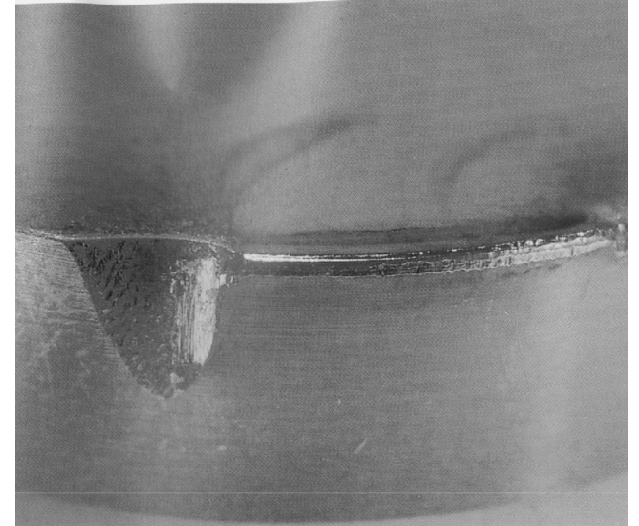
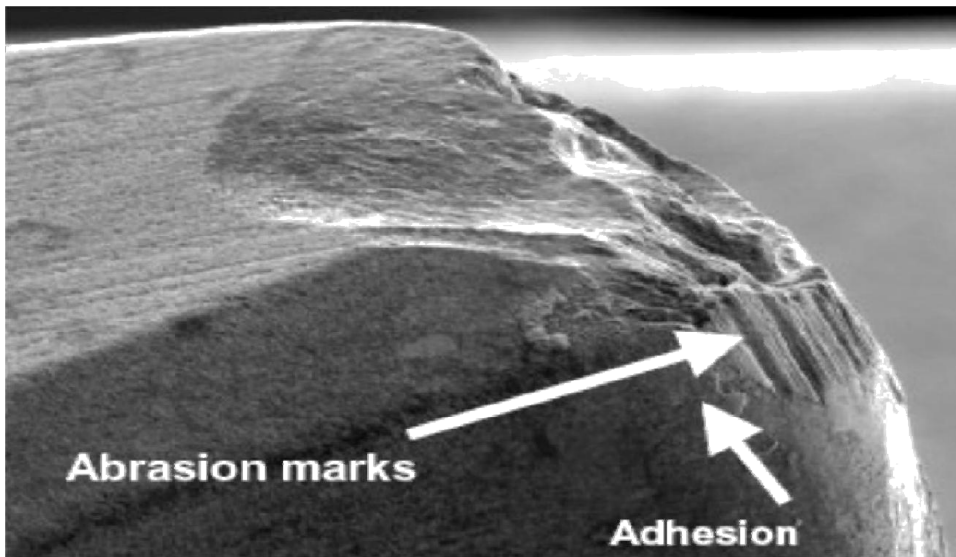


## Exemplos de desgaste em ferramentas de corte



## Lascamento de gume

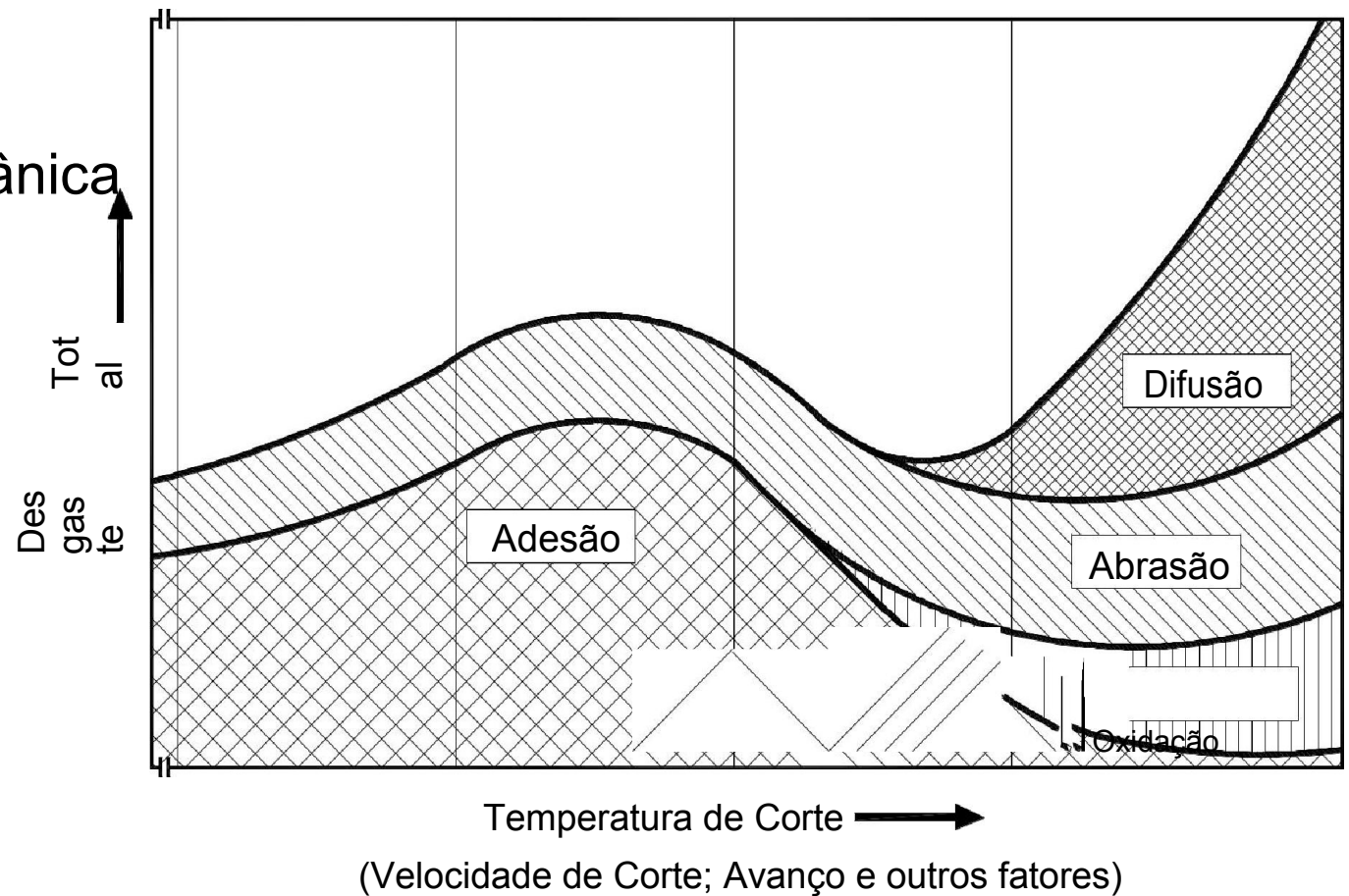
- Forças de corte excessivas;
- Corte interrompido;
- Material da peça com inclusões duras.





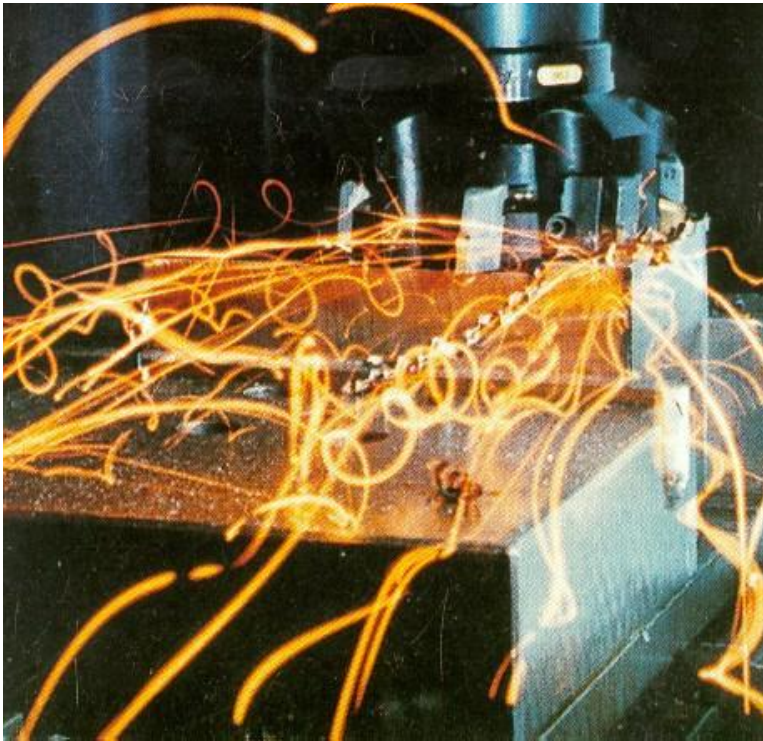
## Mecanismos de desgaste

- Adesão
- Abrasão mecânica
- Oxidação
- Difusão
- Outros



Mecanismos de desgaste

## Conceito de 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”

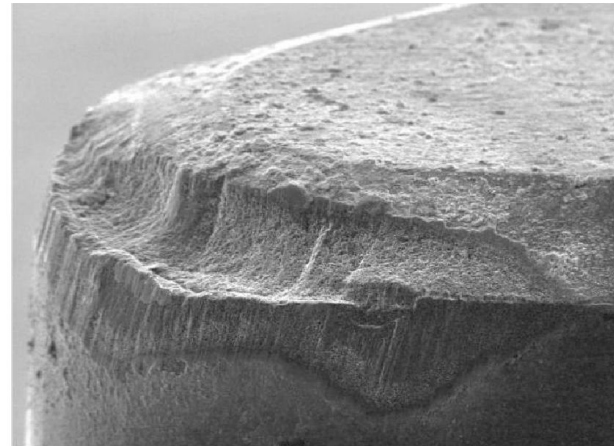
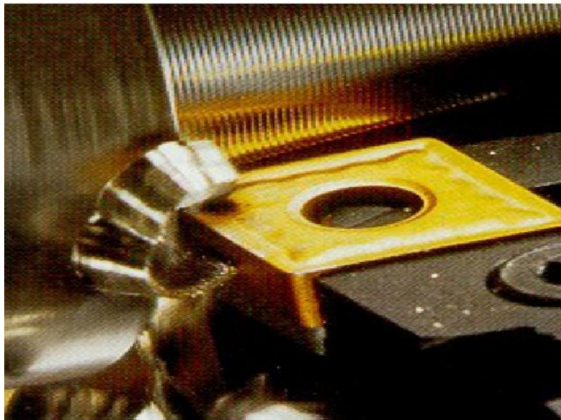
## Usinabilidade

- 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.

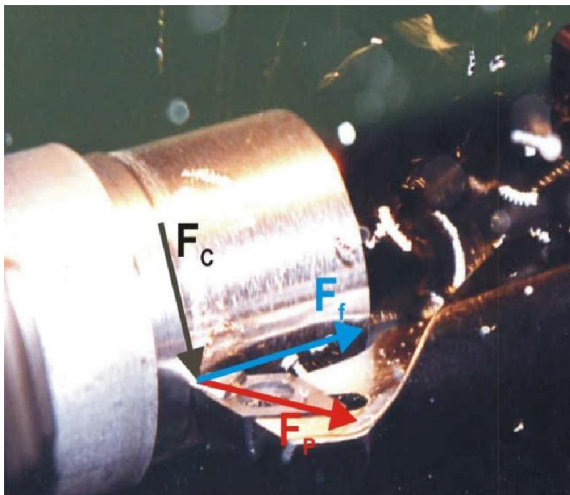
**Definição:** Usinabilidade pode ser definida como sendo a capacidade dos materiais de peça em se deixarem usinar

## Critérios de Usinabilidade

- Formação de cavaco
- Abrasividade



- Forças de usinagem
- Tipo de cavaco





## **Ações para minimizar os efeitos da má usinabilidade**

- na ferramenta
  - material
  - geometria da
  - ferramenta uso de
  - revestimento
- no processo
  - velocidade
  - avanço
  - profundidade de corte
- uso de meios lubri-refrigerantes
  - no material da peça
  - elementos de liga
  - controle no processo de obtenção/fabricação anterior
  - usinagem
  - alívio de tensões e tratamentos térmicos



## **Conceito de vida da ferramenta**

→ Período no qual uma ferramenta pode ser mantida usinando de forma econômica

O caráter econômico pode ser relacionado principalmente com:

- tolerâncias dimensionais
- tolerâncias geométricas
- qualidade superficial da peça
- nível de vibrações no processo
- nível de esforços no processo
- possibilidade de reafiação da ferramenta, entre outros

## **Crêterios de fim de vida**

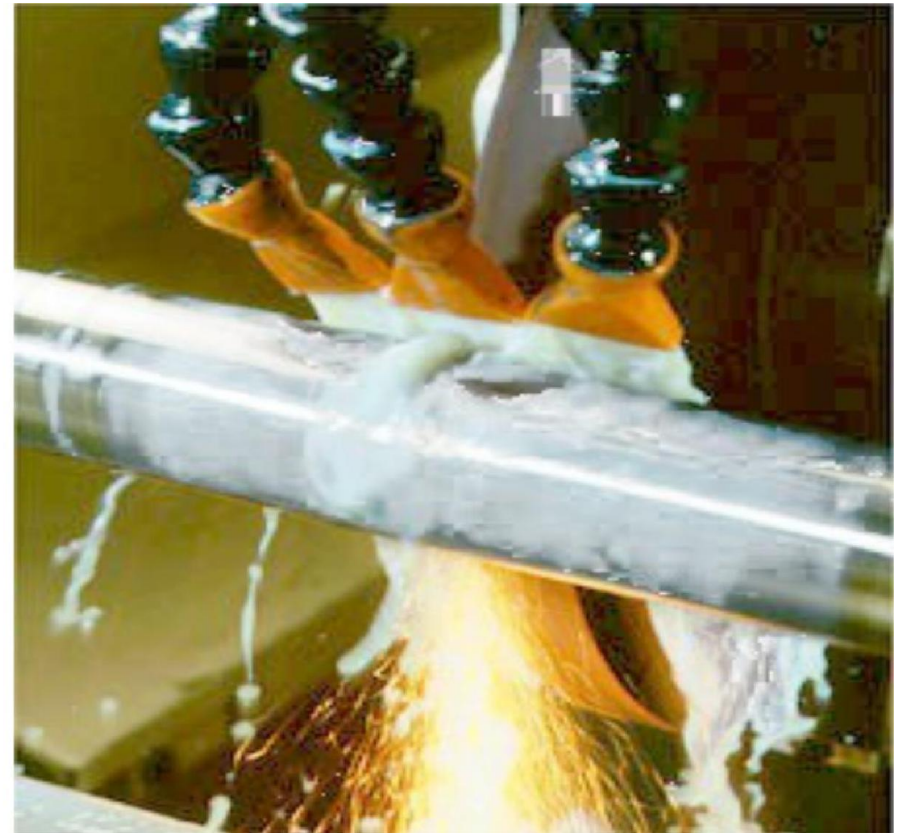
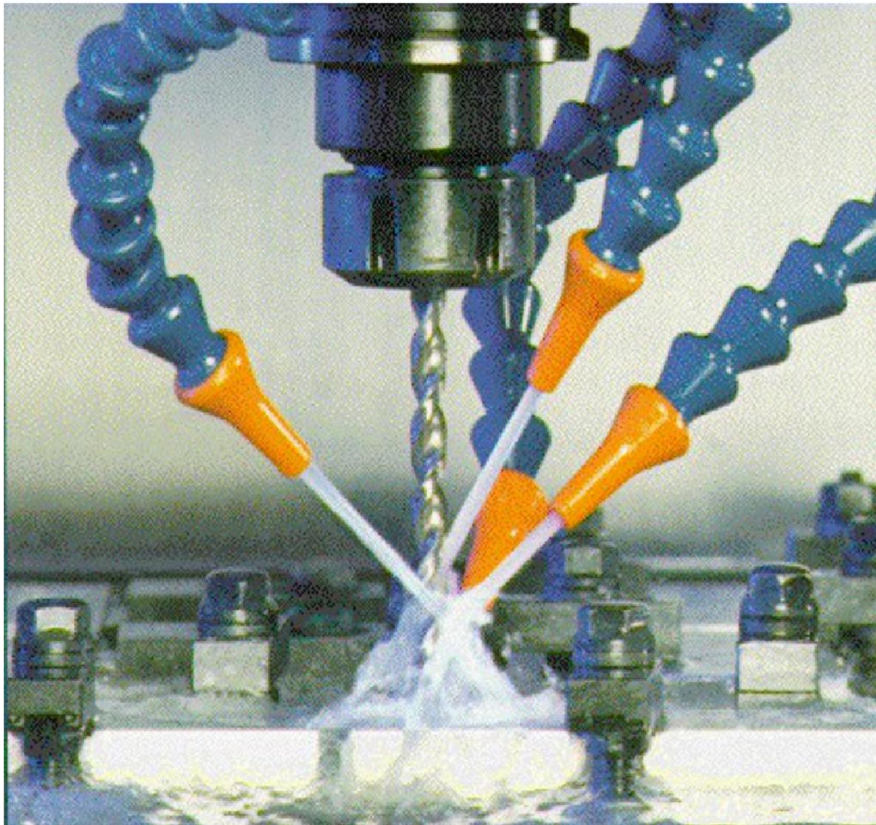
São cr terios que são utilizados para determinar quando uma ferramenta deve ser substituída no processo.

Esses cr terios   relacionado com:

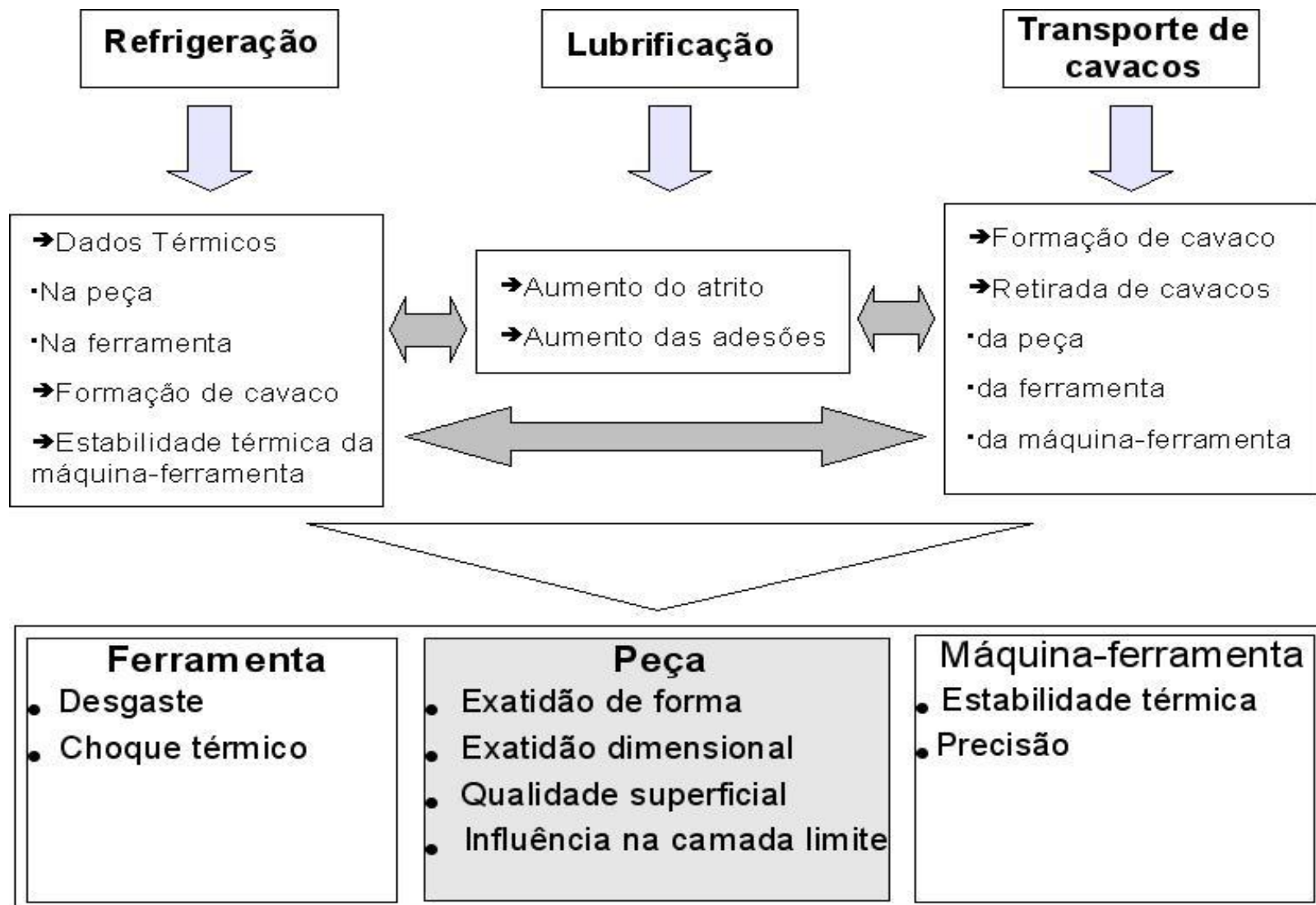
- desvios nas tolerâncias dimensionais
- desvios nas tolerâncias geométricas
- perda de qualidade superficial da peça
- aumento no nível de vibrações no processo
- aumento no nível de esforços no processo
- aumento do custo de reafia  o da ferramenta
- formação de rebarba
- aumento da temperatura de corte
- nível de desgaste na ferramenta



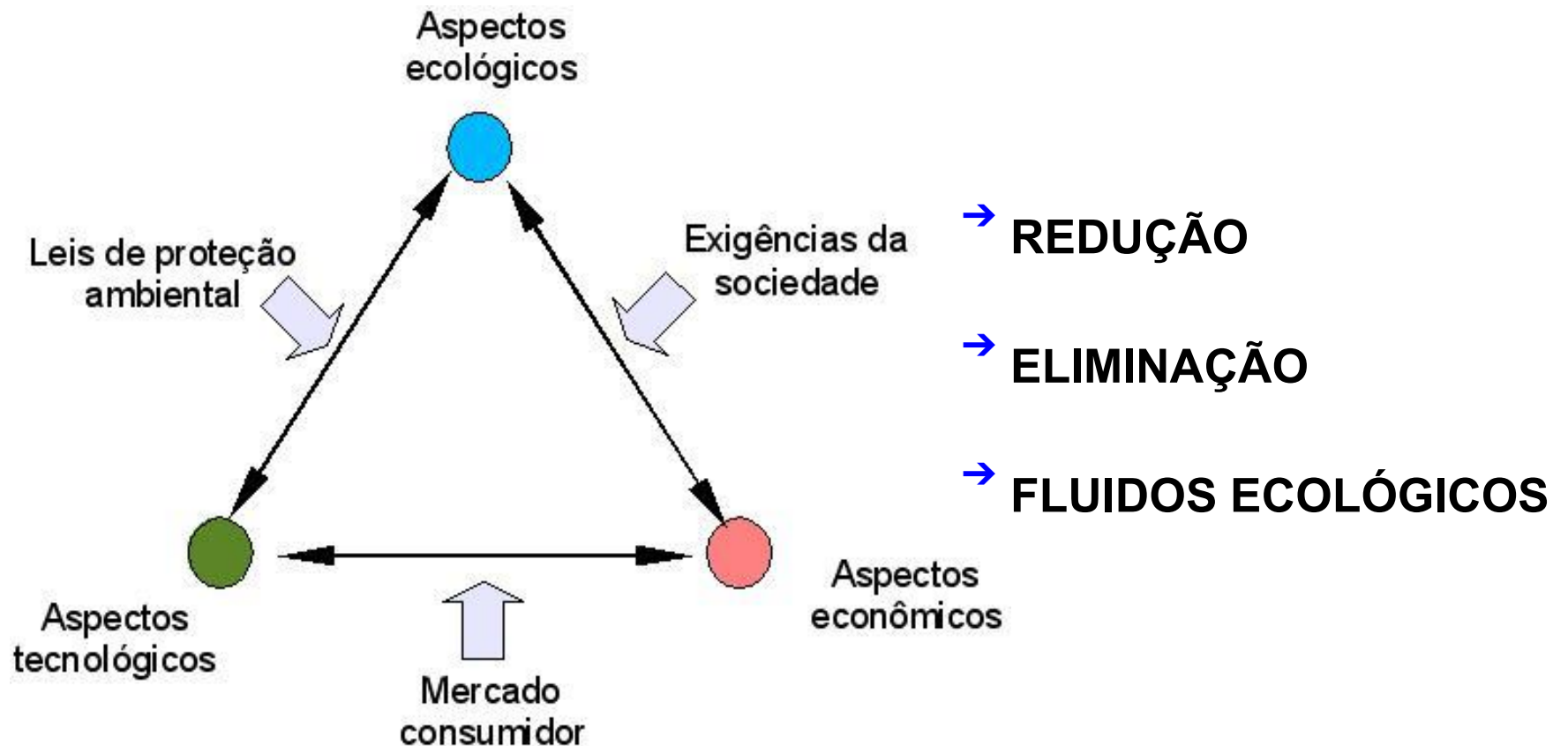
## Fluidos de Corte



## Função dos Fluidos de Corte



## Tendências no uso de Fluidos de Corte



## Fluidos de Corte

Classificação segundo a norma **DIN 51385**

- Não miscíveis em água ou óleos de corte
  - Óleos integrais ou minerais
  - Óleo solúve
  - Semi-sintéticos
  - Sintético
- Miscíveis em água ou emulsões

## **Critérios para seleção dos fluidos de corte**

Fatores influenciam na escolha:

- Material;
- Economia;
- Prazo;
- Baixa geração de espuma;
- Fácil descarte;
- Não agredir o meio ambiente;
- Não dissolver a pintura ou corroer partes da máquina;
- Não agredir a saúde e garantir a segurança do operador;

