ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

# Fundamentos dos Processos de Usinagem

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau

**Destribuição do tópico usinagem na disciplina PMR 2202**

**Aula 01 -** Fundamentos da usinagem

**Aula 02 - P**rocessos 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

# 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, atravéz 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

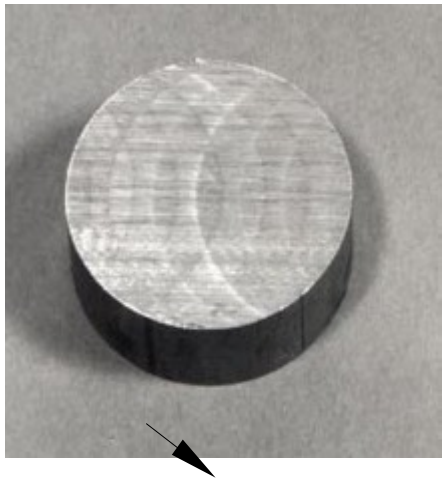
**Princípio –** a remoção de material ocorre atrvés da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituida de um materrial de dureza e resistência muito superior a do material da peça.

**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.

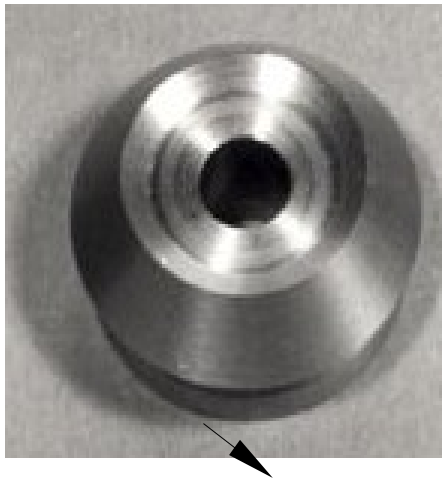
# Introdução

## Usinagem

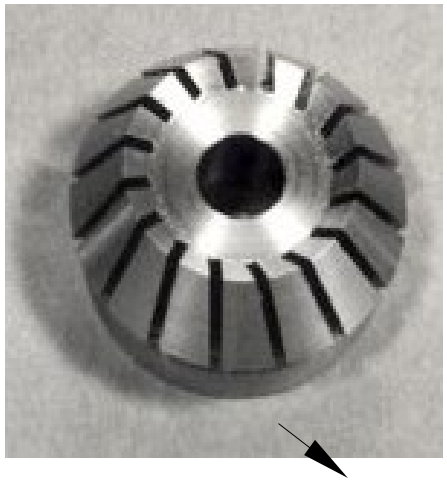
Material Bruto → Seqüência de Usinagem → Produto Final



Remoção de cavaco



Remoção de cavaco

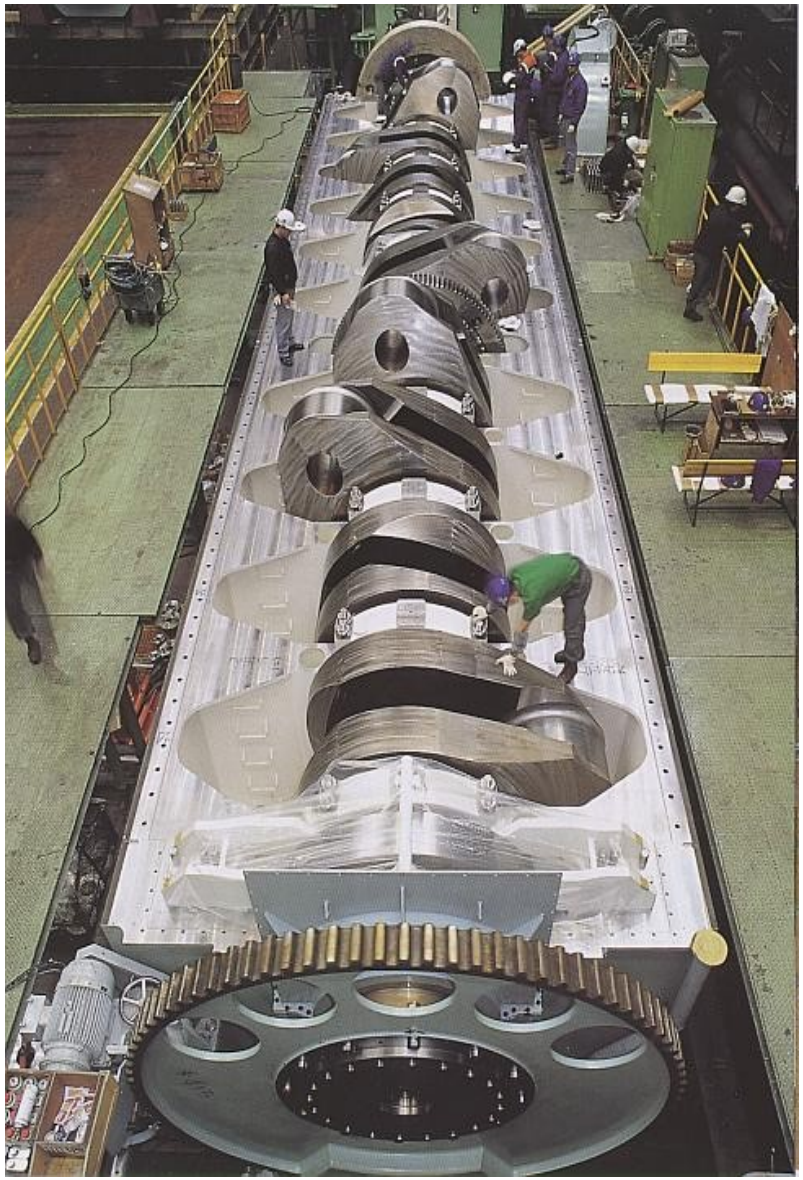


Remoção de cavaco

## Importância da usinagem na industria metal mecânica

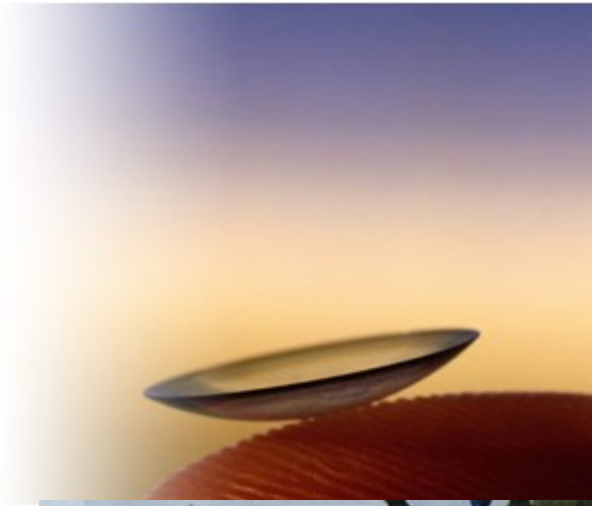
A maior parte de todos os produtos industrializados em alguma de suas etapas de produção sofre algum processo de usinagem

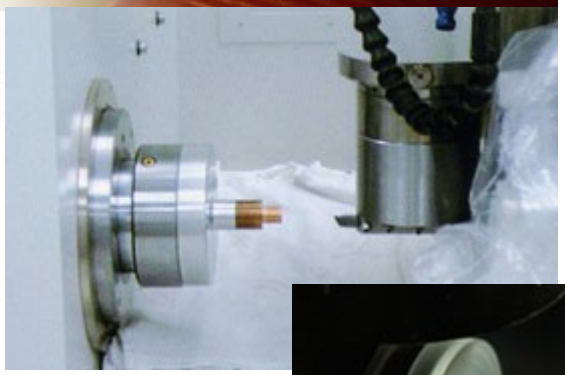
# Importância da usinagem na industria metal mecânica

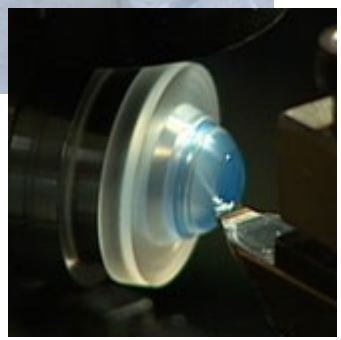


- 80% dos furos são realizados por usinagem
- 100% dos processos de melhoria da qualidade superficial são feitos por usinagem
- o comércio de máquinas-ferramentas representa uma das grandes fatias da riqueza mundial
- 70% das engrenagem para transmissão de portência
- 90% dos componentes da industria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

# Importância da usinagem na industria metal mecânica





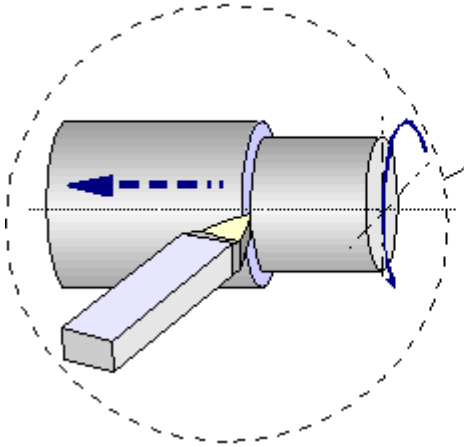


## Outros produtos usinados

- ➔ 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

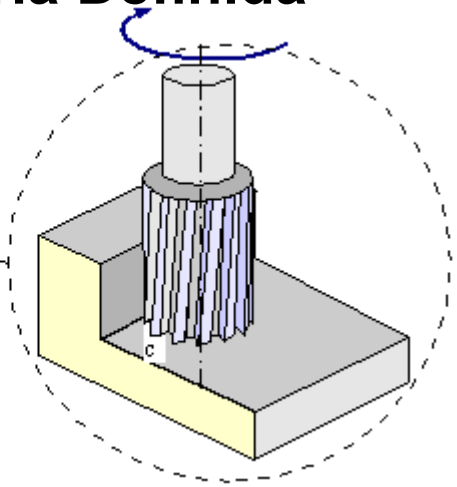
Alargar

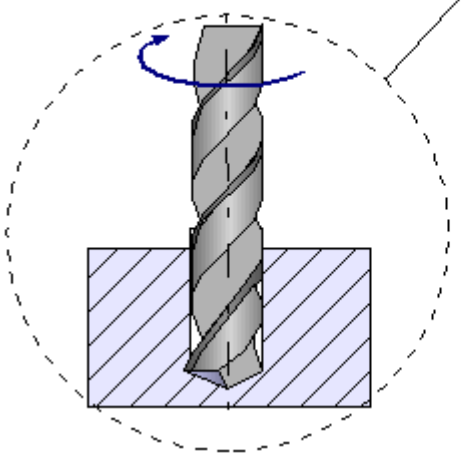
Brochar

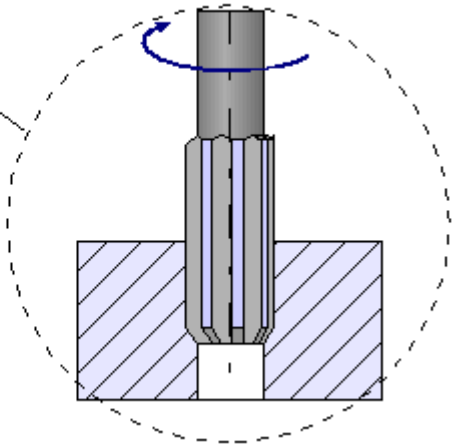
Serrar

Plainar

outros

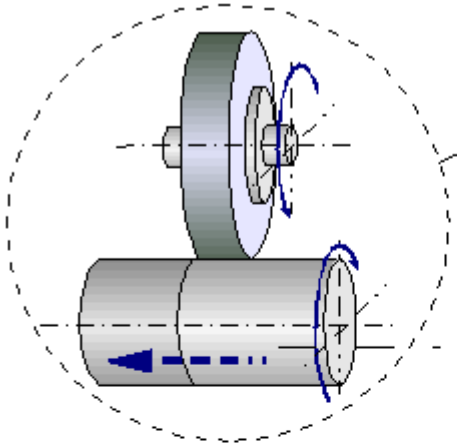






# Classificação dos processos de usinagem

## Usinagem com Ferramenta de Geometria Não Definida



Retificar

Brunir

Lapidar

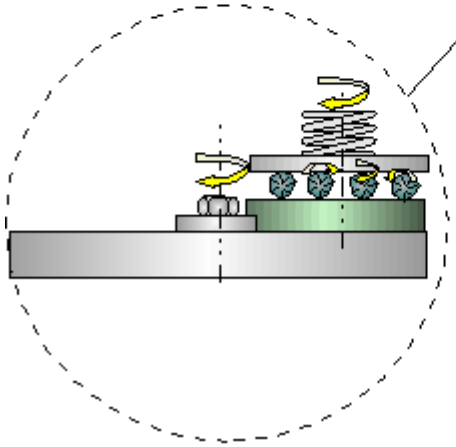
Lixar

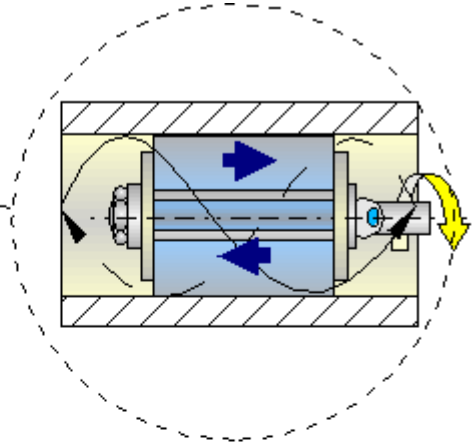
Polir

Jatear

Tamborear

outros





# Classificação dos processos de usinagem

## Usinagem Não convencional

Remoção térmica

Remoção Química

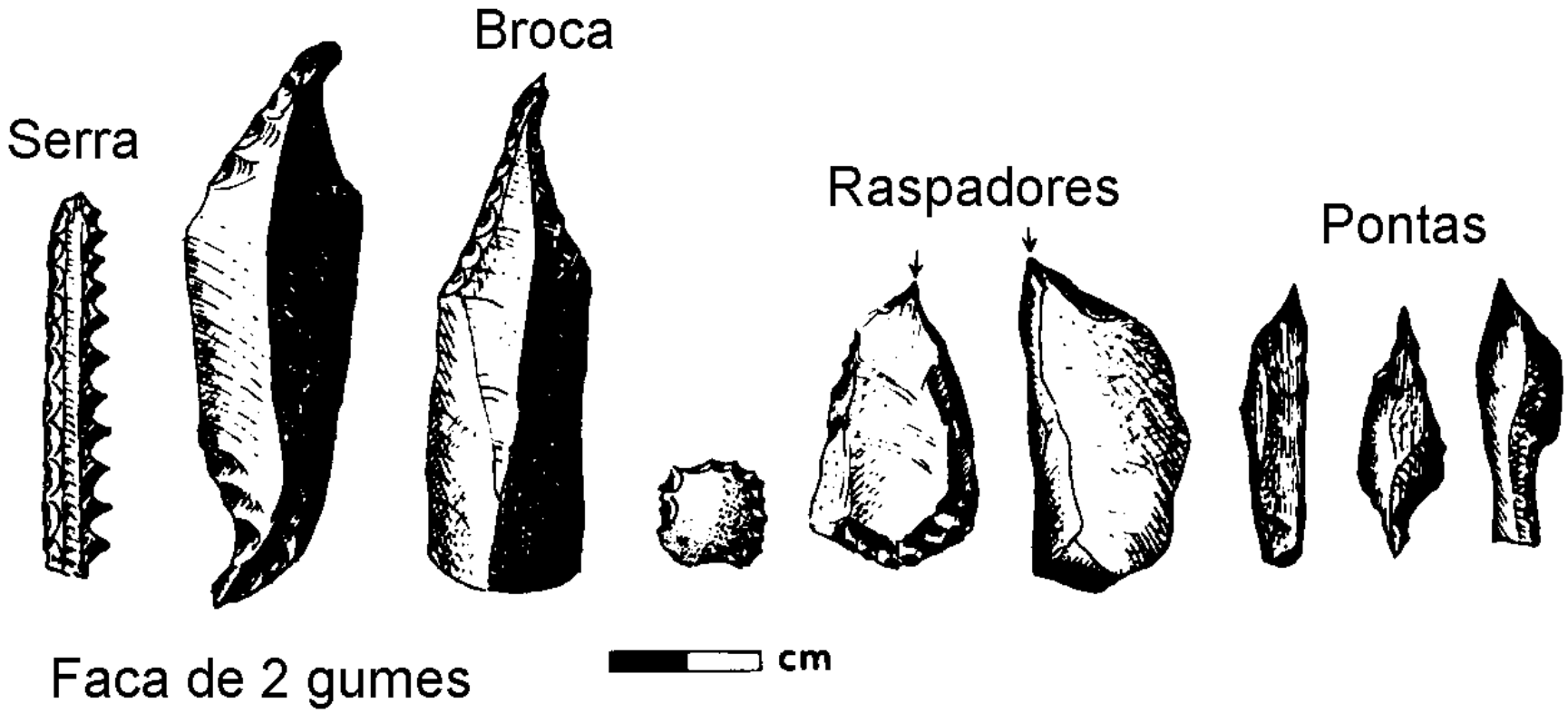
Remoção Eletroquímica

Remoção por ultra-som

Remoção por jato d'água

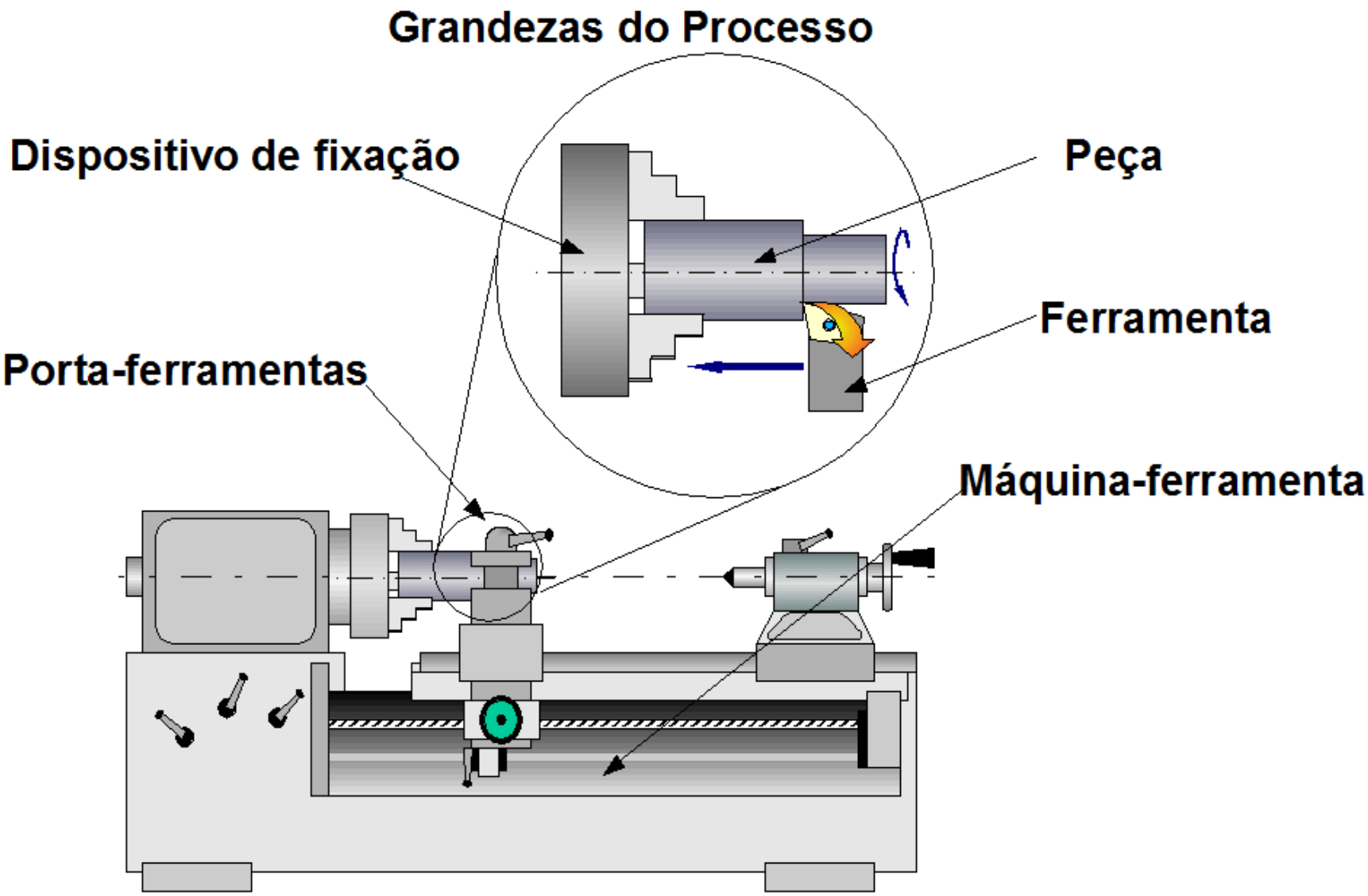
outros

# Evolução Histórica



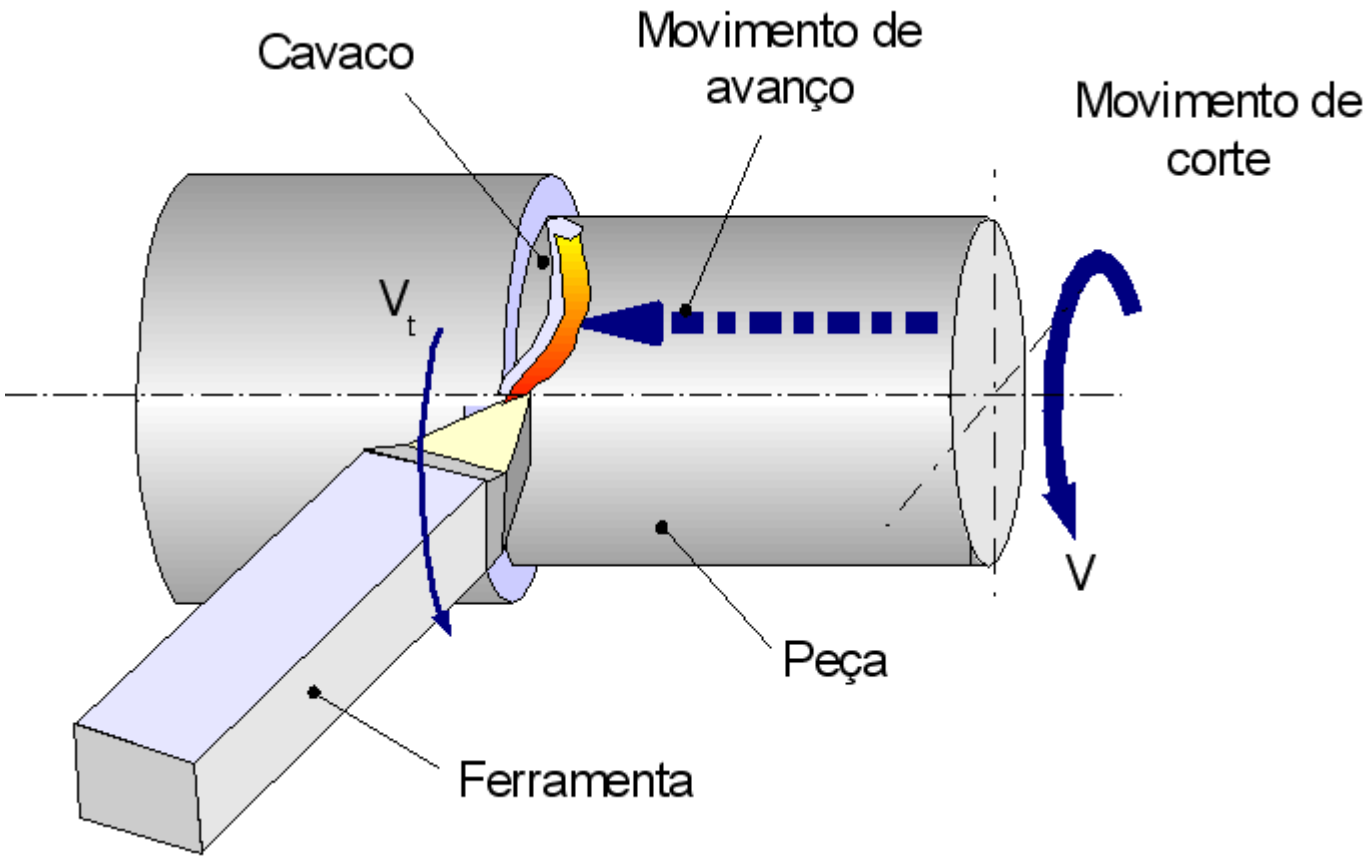

Ferramentas de pedras para remoção

# Fundamentos da usinagem dos materiais



## 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 (Vc)**

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

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

- **Velocidade de Avanço (Vf)**
- **Velocidade efetiva de corte (Ve)**

## Velocidade de Corte (Vc)

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000}$$

- ⇒ 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

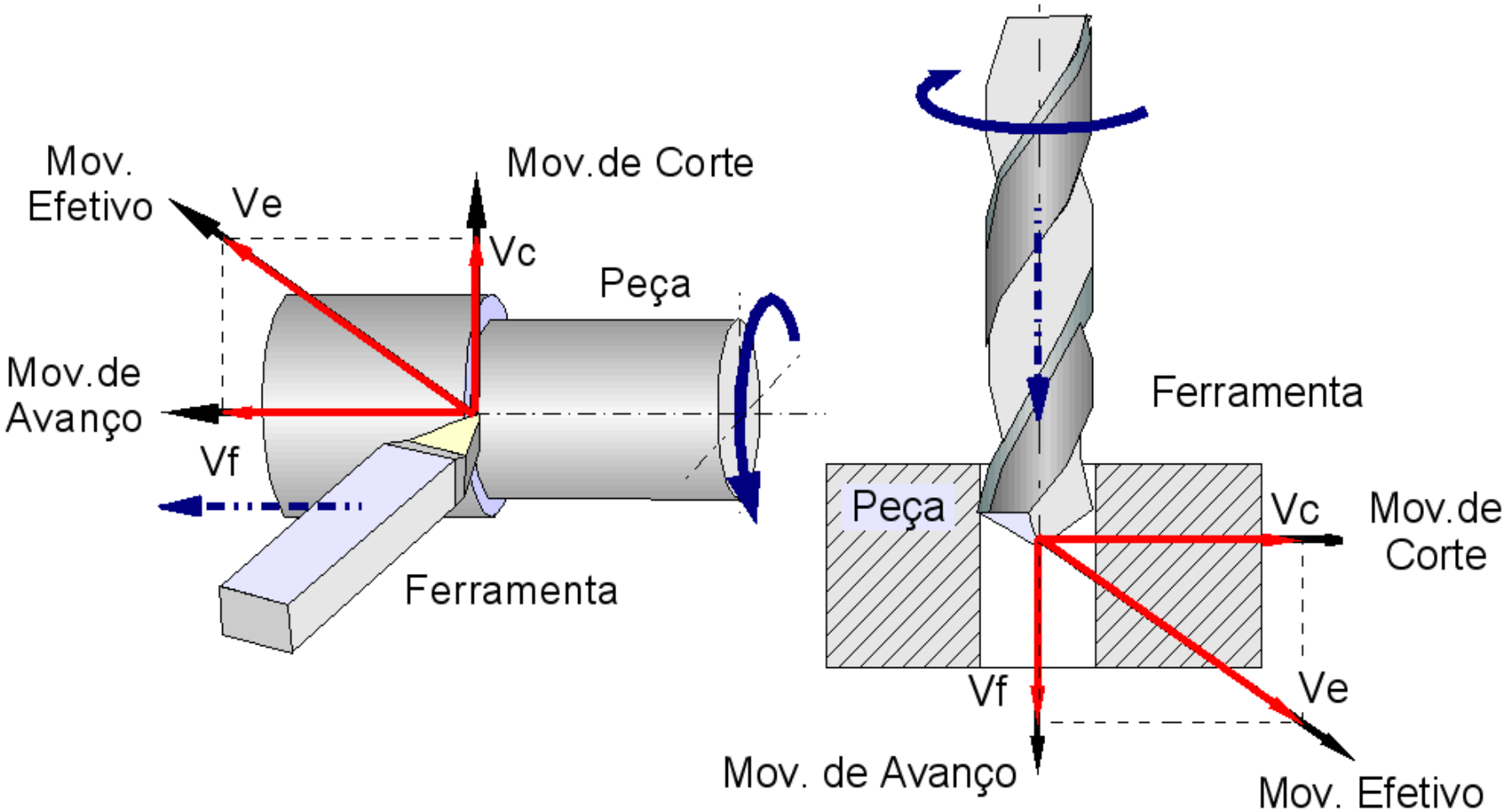
# Exemplos de tabela de Velocidade de Corte (Vc)

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

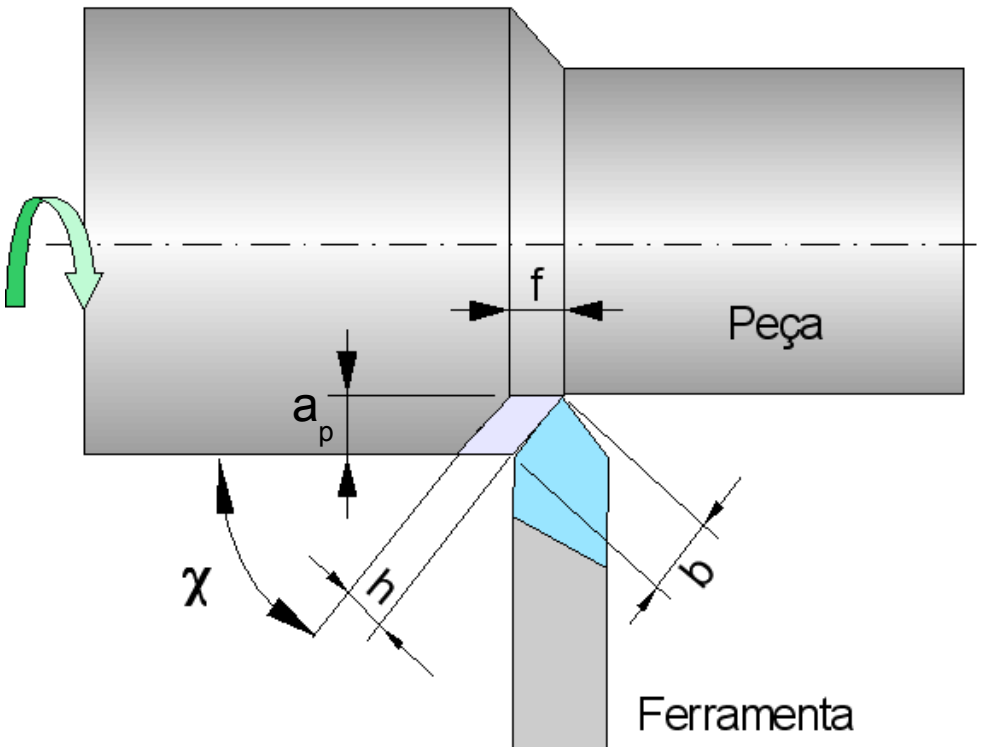
| Material group | Material designation | Strength [N/mm²] | $v_c$ [m/min] Min. | Start | Max. | f [mm/rev.] Min. | Start | Max. | $a_p$ [mm] Min. | Start | Max. | Recommendation WSP 0° Type | 0° Chip breaker | 7° Type | 7° Chip breaker | Cooling lubricant |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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



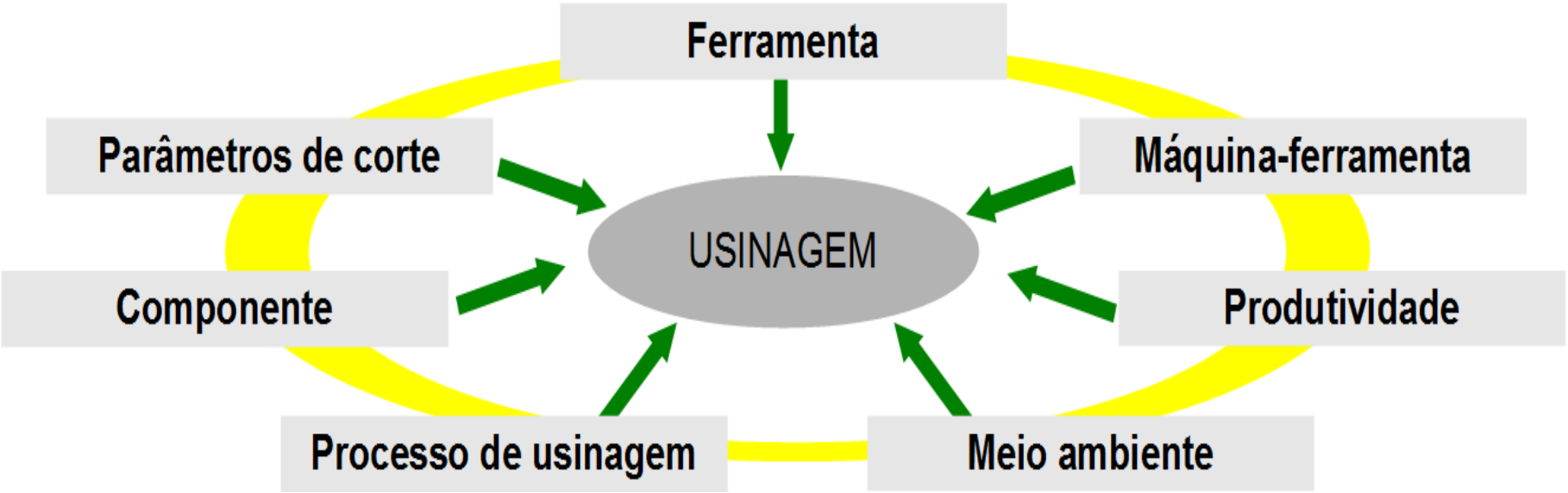
## Grandezas do processo de usinagem



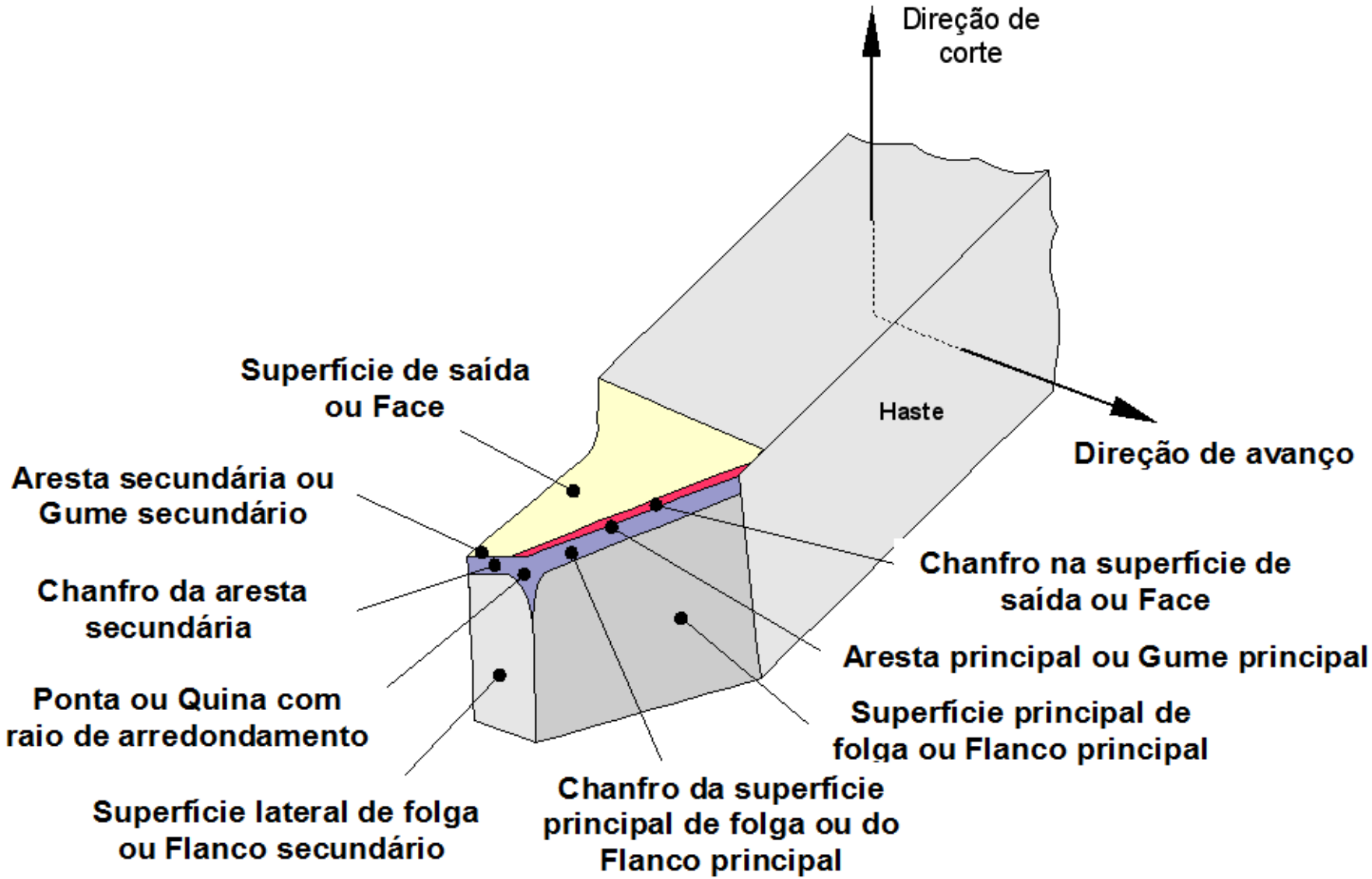

Onde:

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

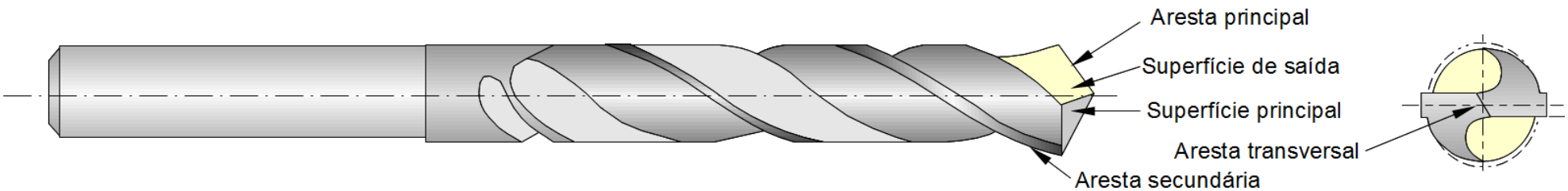
# Relações que envolvem a usinagem

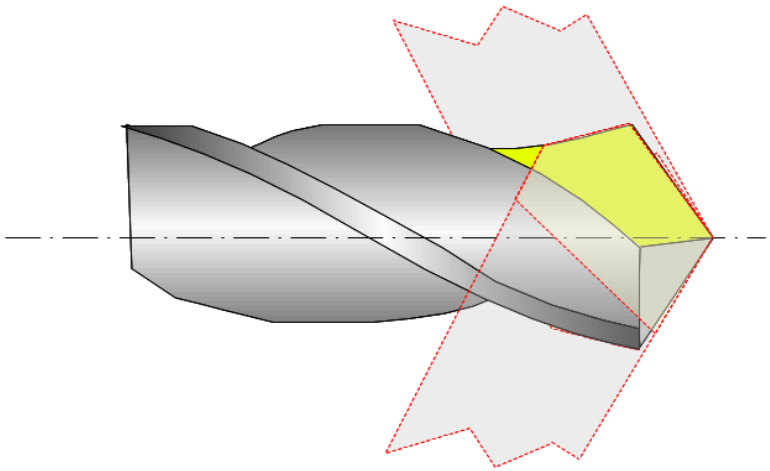


# Denominações da ferramenta de corte

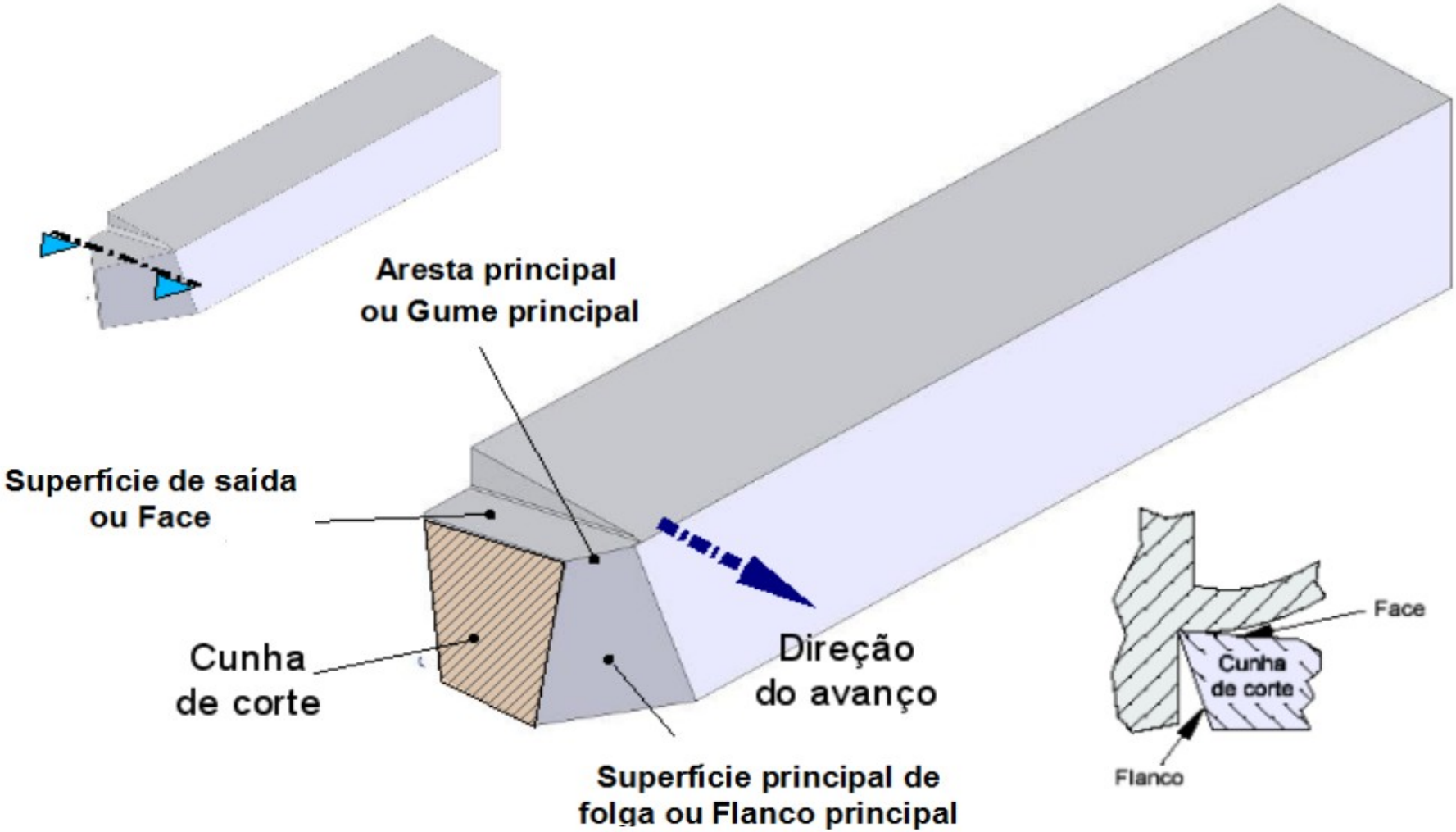


# Denominações da ferramenta de corte



# Cunha de corte



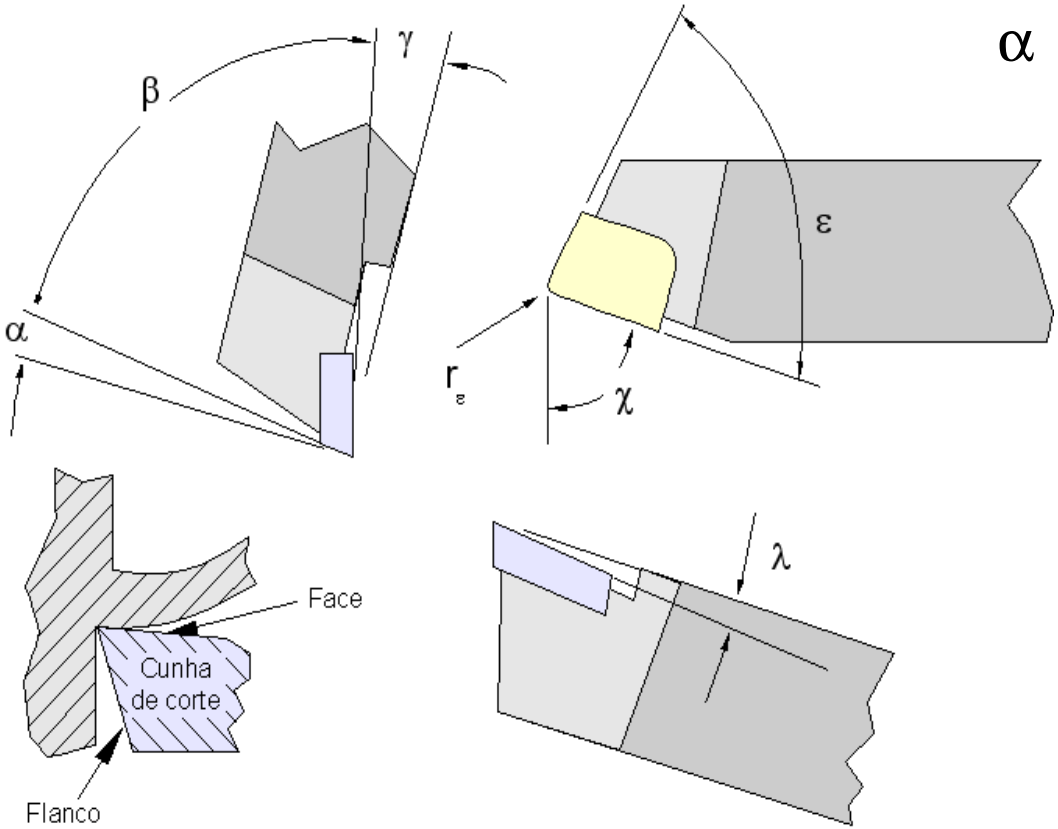
## Geometria da Cunha de Corte

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

A geometria da ferramenta influência 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

$\varepsilon$ = ângulo de ponta ou quina

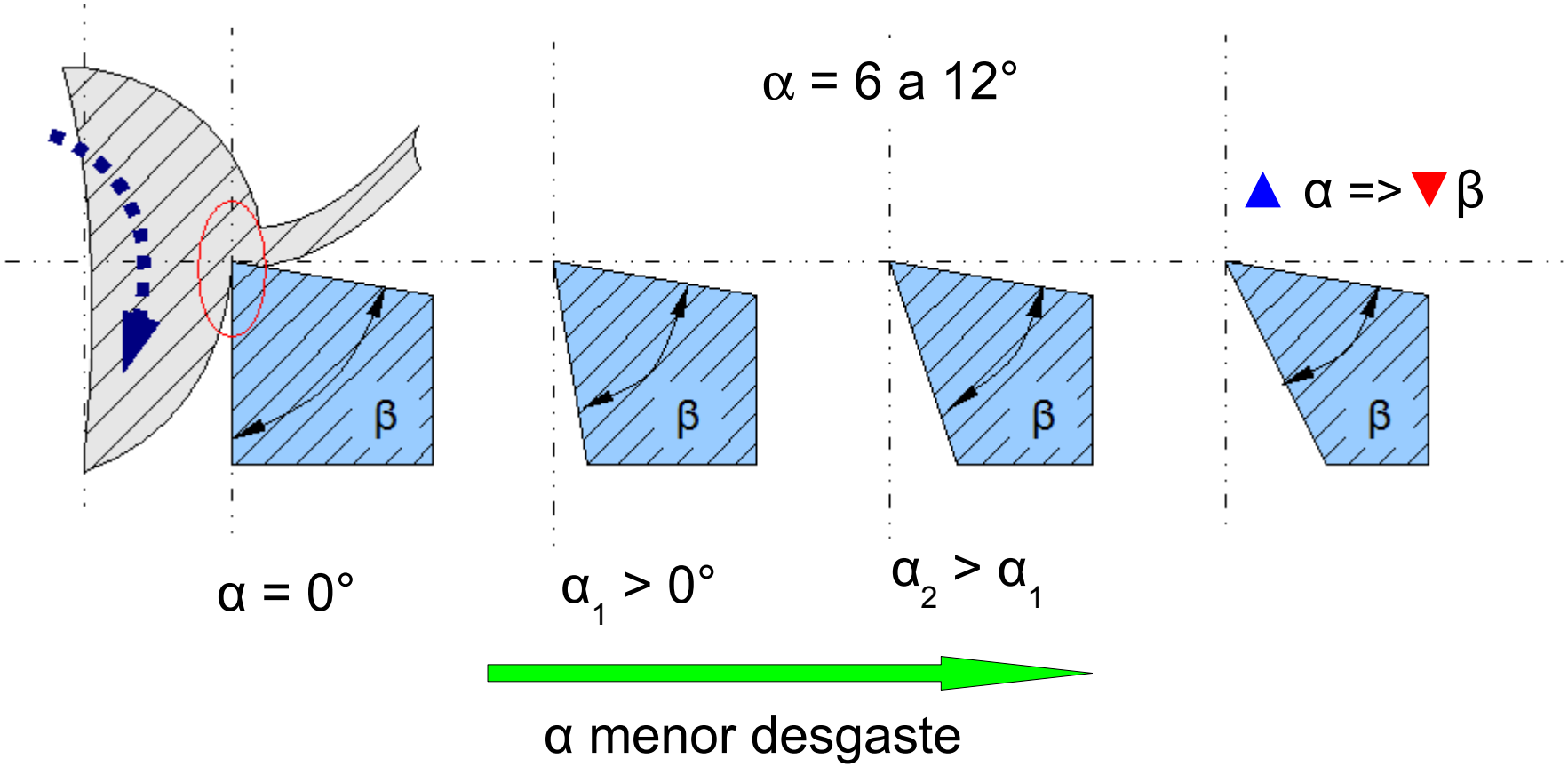
$\chi$ = ângulo de direção

$\lambda$ = ângulo de inclinação

$r_\varepsilon$ = raio de ponta ou quina

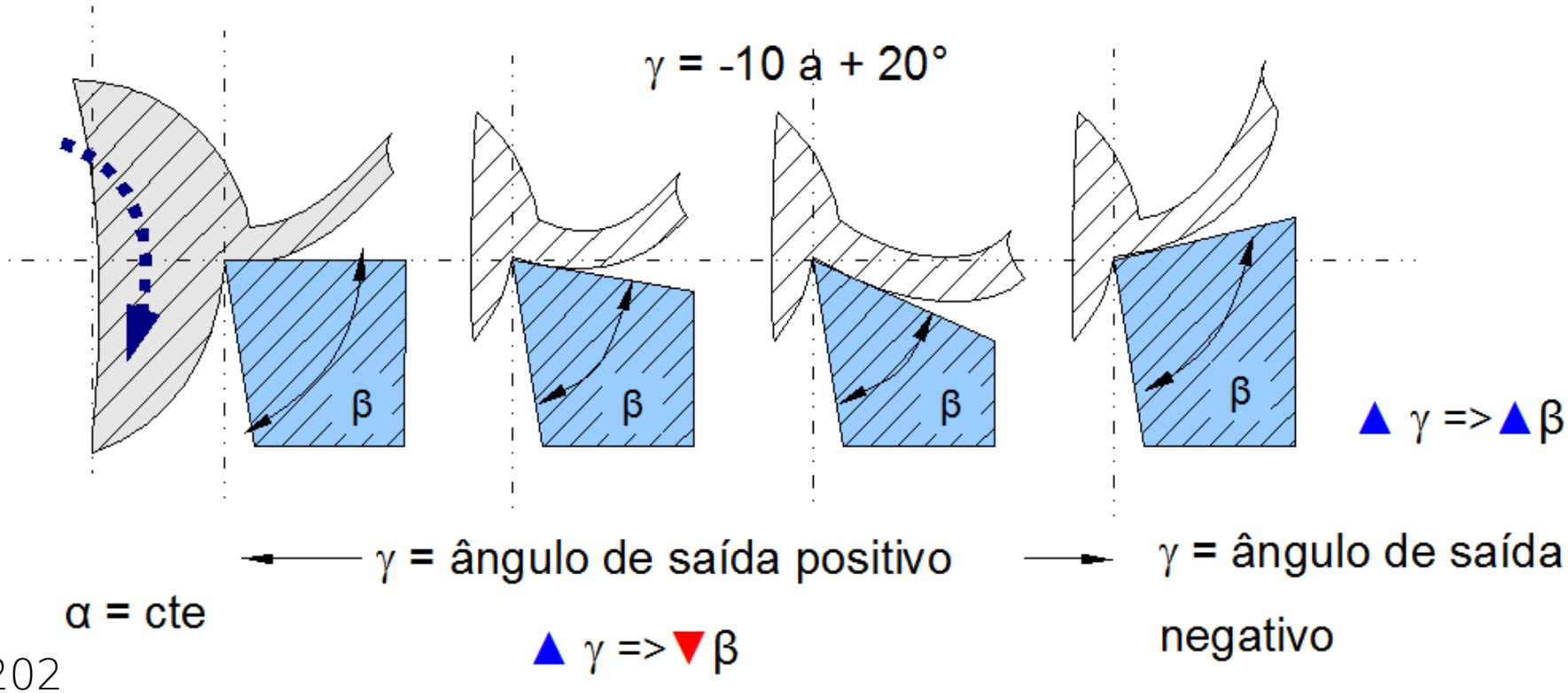
## Influências da Geometria da ferramenta de tornear

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



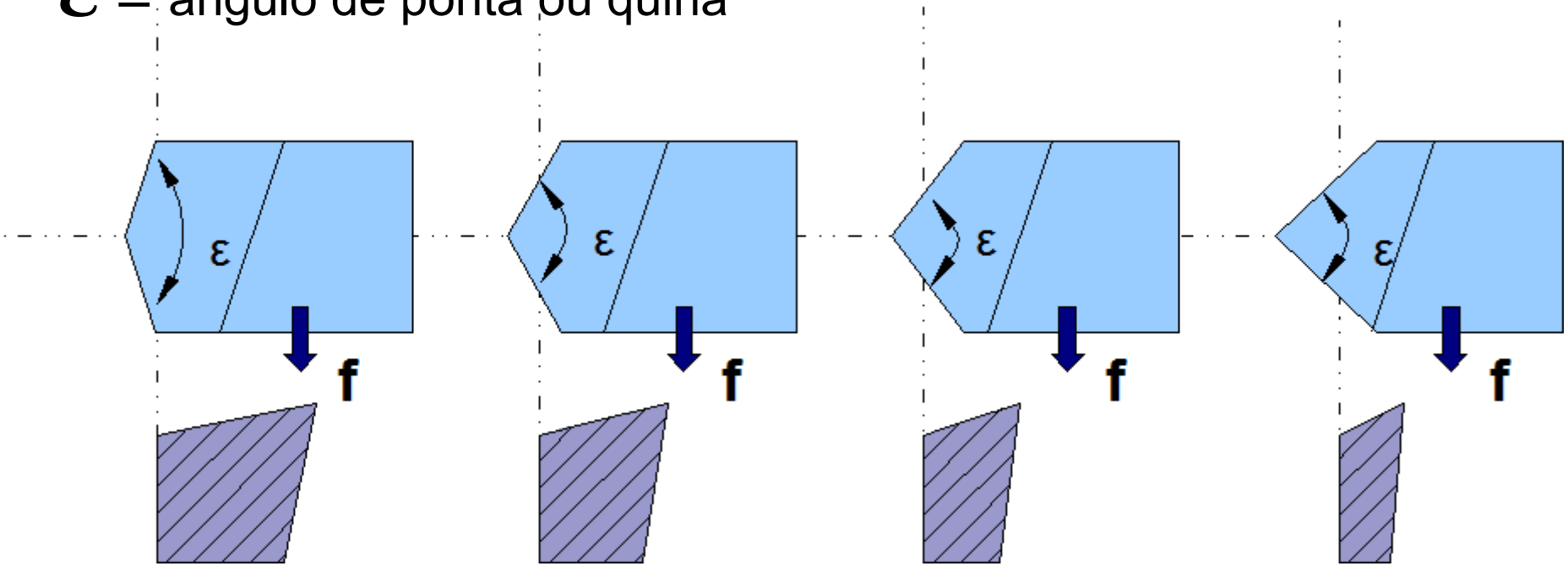
## Influências da Geometria da ferramenta de tornear

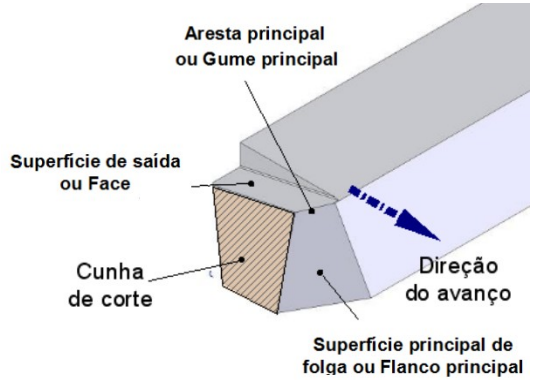
$\gamma$ = ângulo de saída, melhora a formação do cavaco, melhora a superfície gerada na peça, reduz a força de corte (trabalho de dobramento do cavaco), facilita o escoamento do cavaco sobre a face



# Influências da Geometria da ferramenta de tornear

ε = ângulo de ponta ou quina



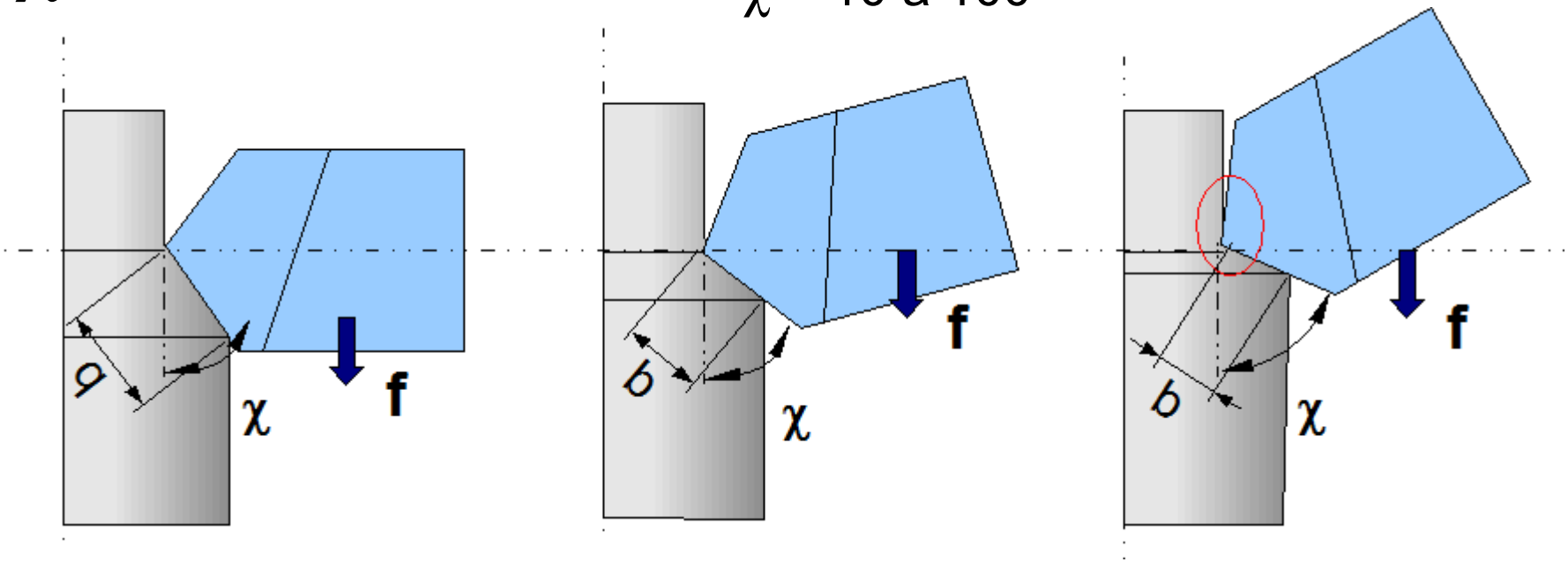




▲ ε => ▼resistência da cunha

## Influências da Geometria da ferramenta de tornear

$\chi$ = ângulo de direção

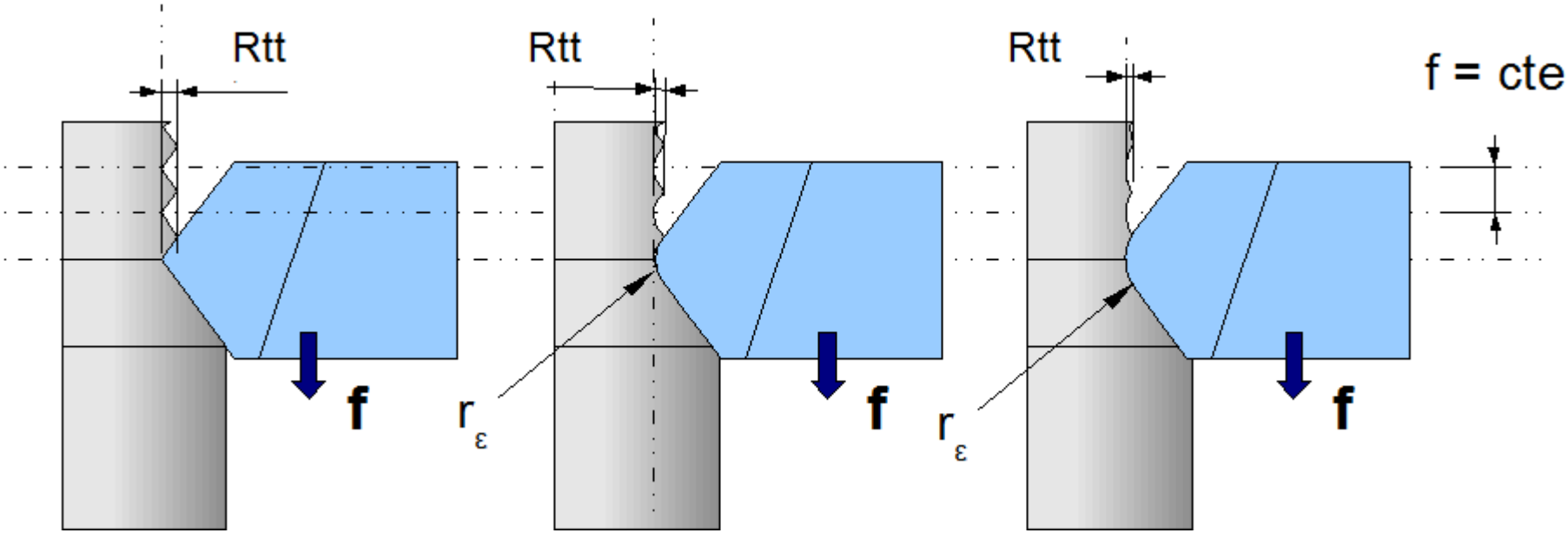
$\chi$ = 10 a 100°




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

## Influências da Geometria da ferramenta de tornear

$r_\varepsilon$ = raio de ponta ou quina

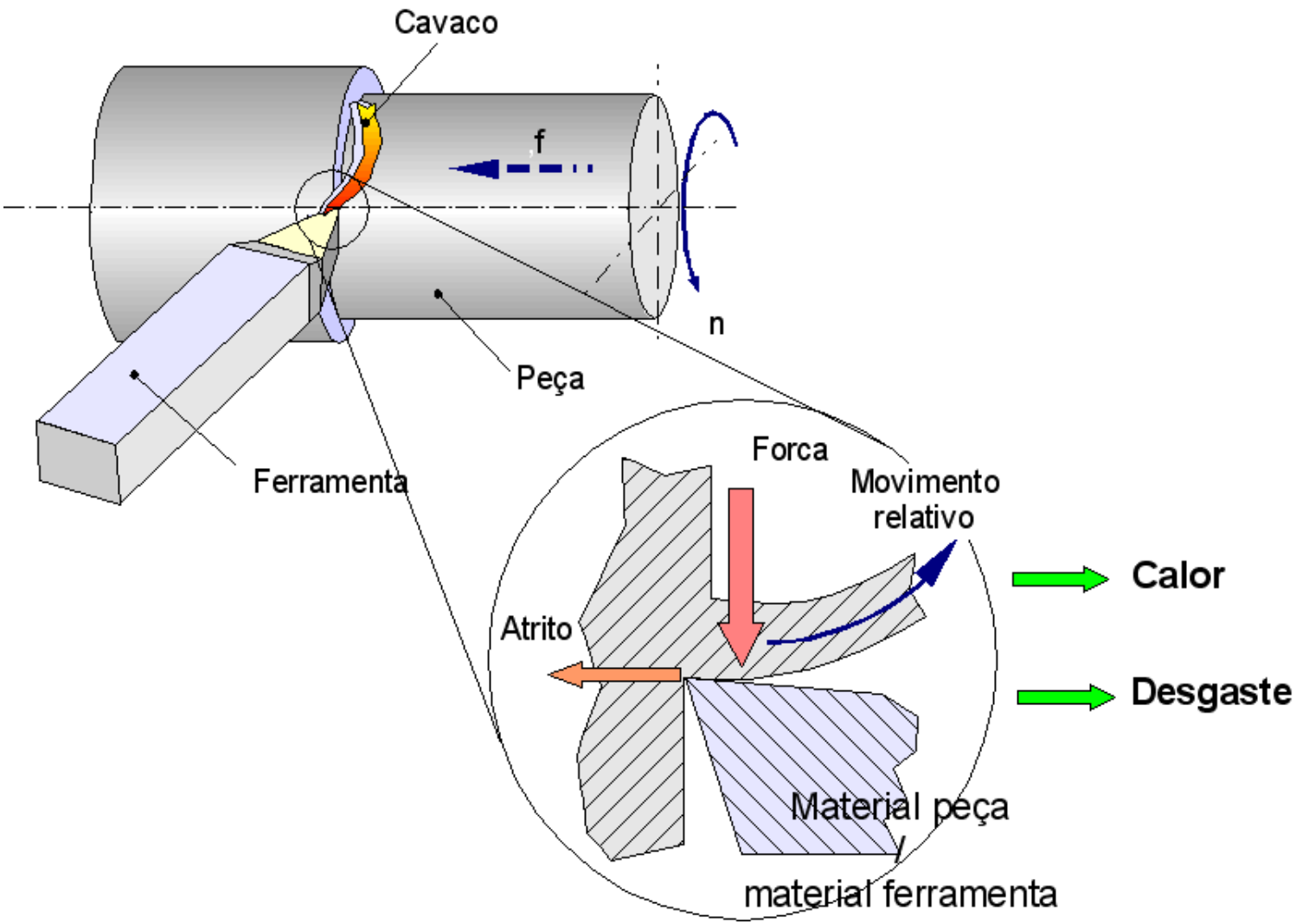



- ▲ $r_\varepsilon$ =melhora na qualidade superficial
- ▲ $r_\varepsilon$ = aumento do atrito
- ▲ $r_\varepsilon$ = aumento das vibrações

## 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 = $f$(condições de corte (f, $V_c$, $a_p$), geometria da ferramenta ($\alpha$,$\chi$, $\gamma$, $\lambda$), desgaste da ferramenta)

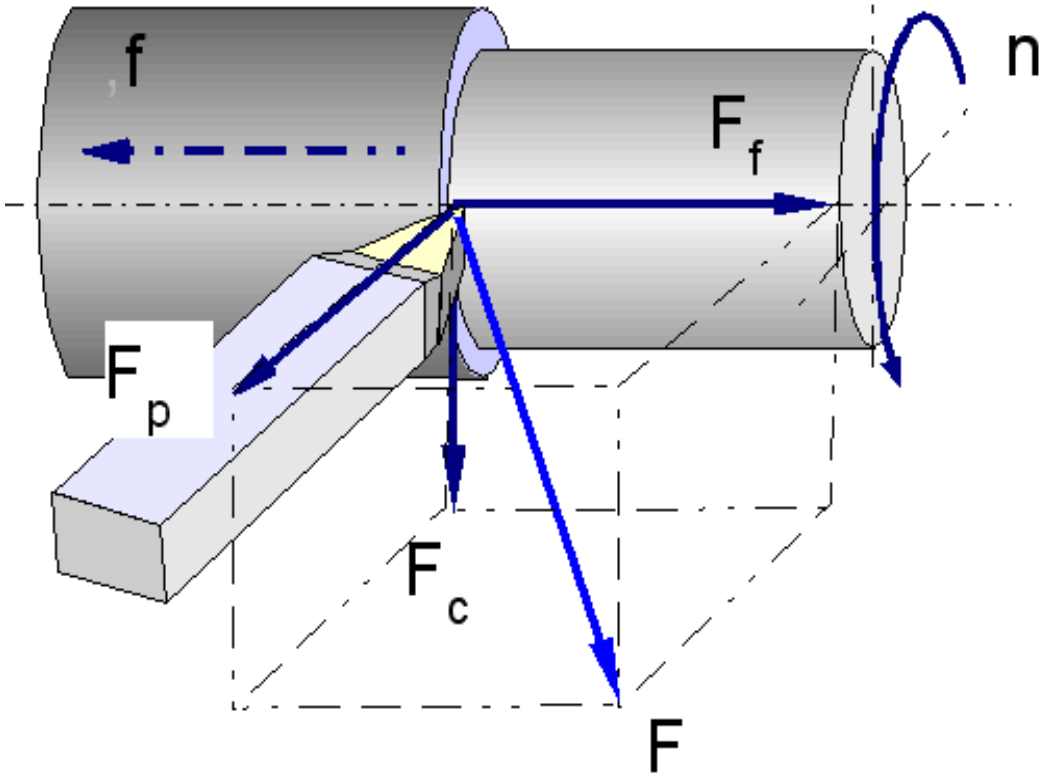
Onde:

F = força de usinagem

$F_c$ = Força de corte

$F_f$ = Força de avanço

$F_p$ = Força passiva



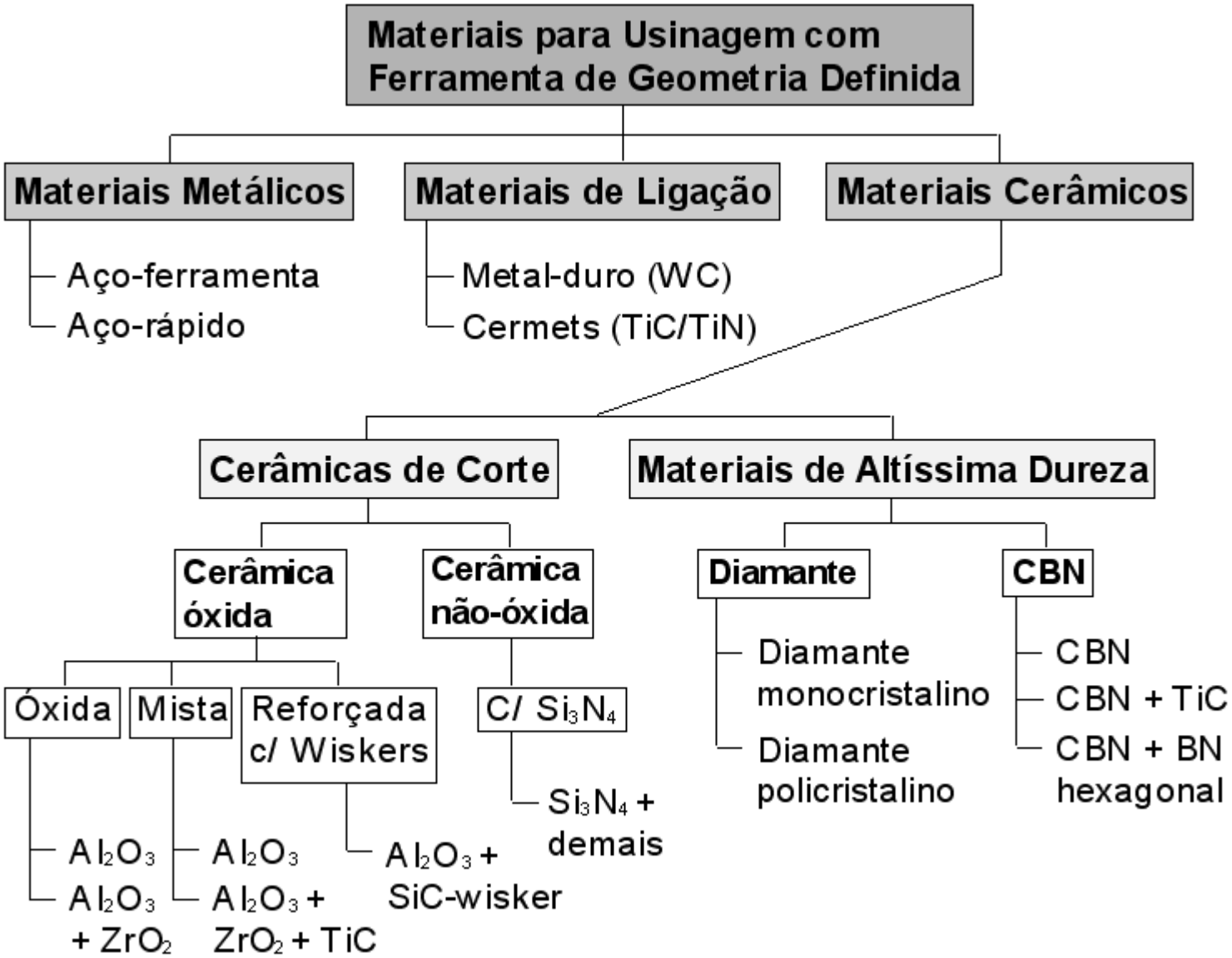
## Materiais de Ferramentas de Corte

**Requisitos:**

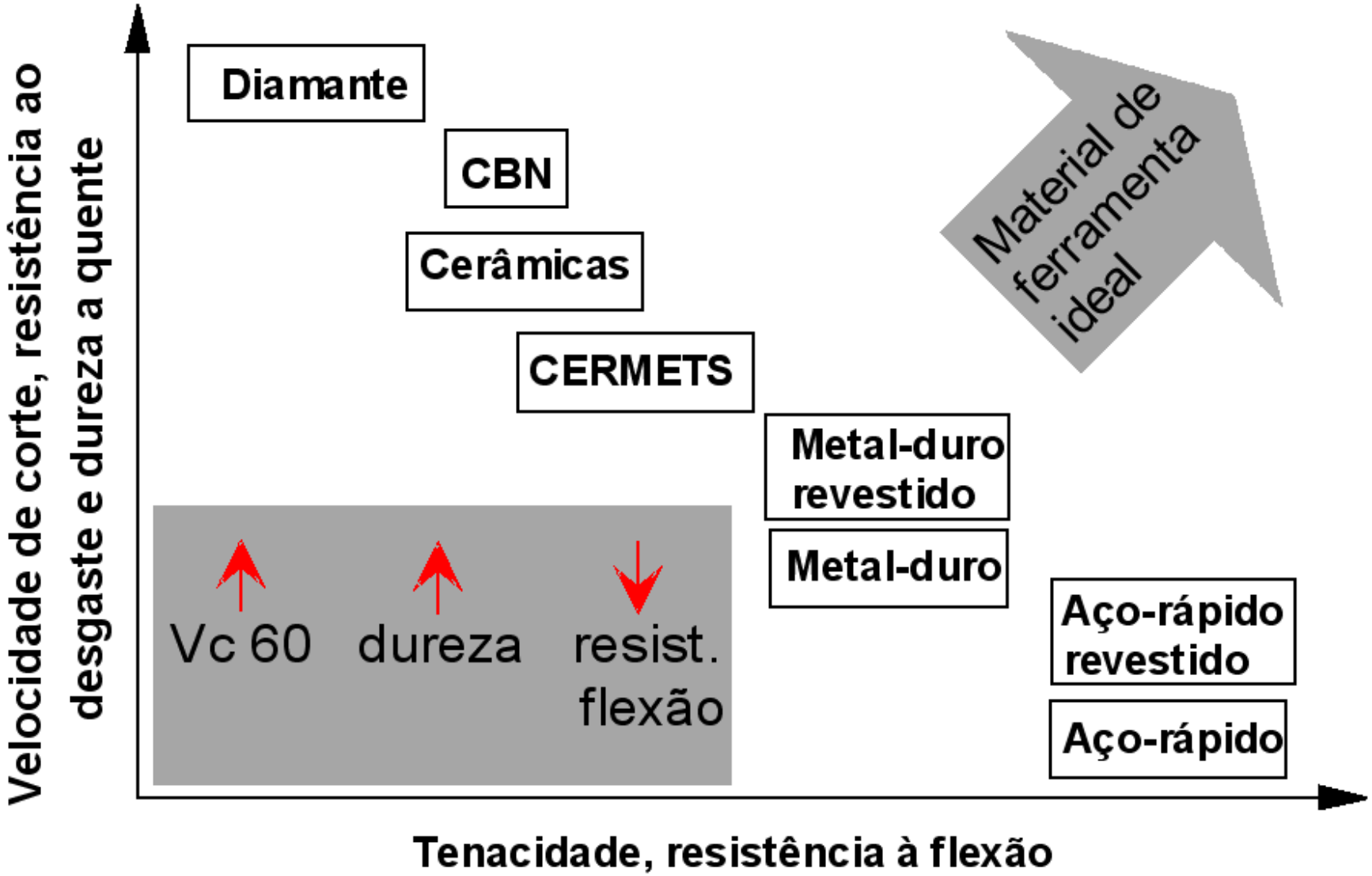
- Resistência à compressão
- Dureza
- Resistência à flexão e tenacidade
- Resistência do gume
- Resistência interna de ligação
- Resistência a quente
- Resistência à oxidação
- Pequena tendência à fusão e caldeamento
- Resistência à abrasão
- Condutibilidade térmica, calor específico e expansão térmica

→ Nenhum material de ferramenta possui todas estas características

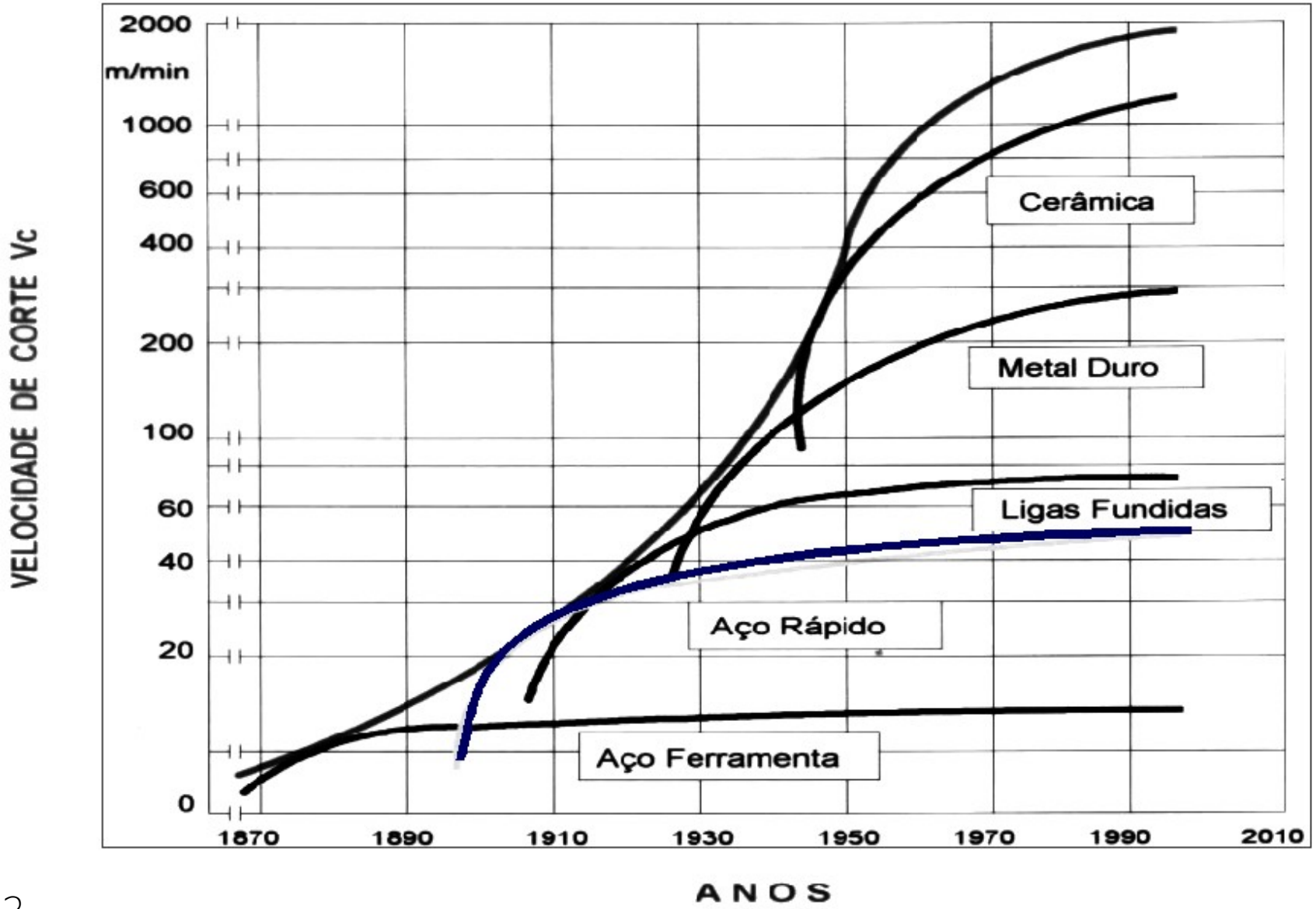
# Classificação dos materiais de ferramentas



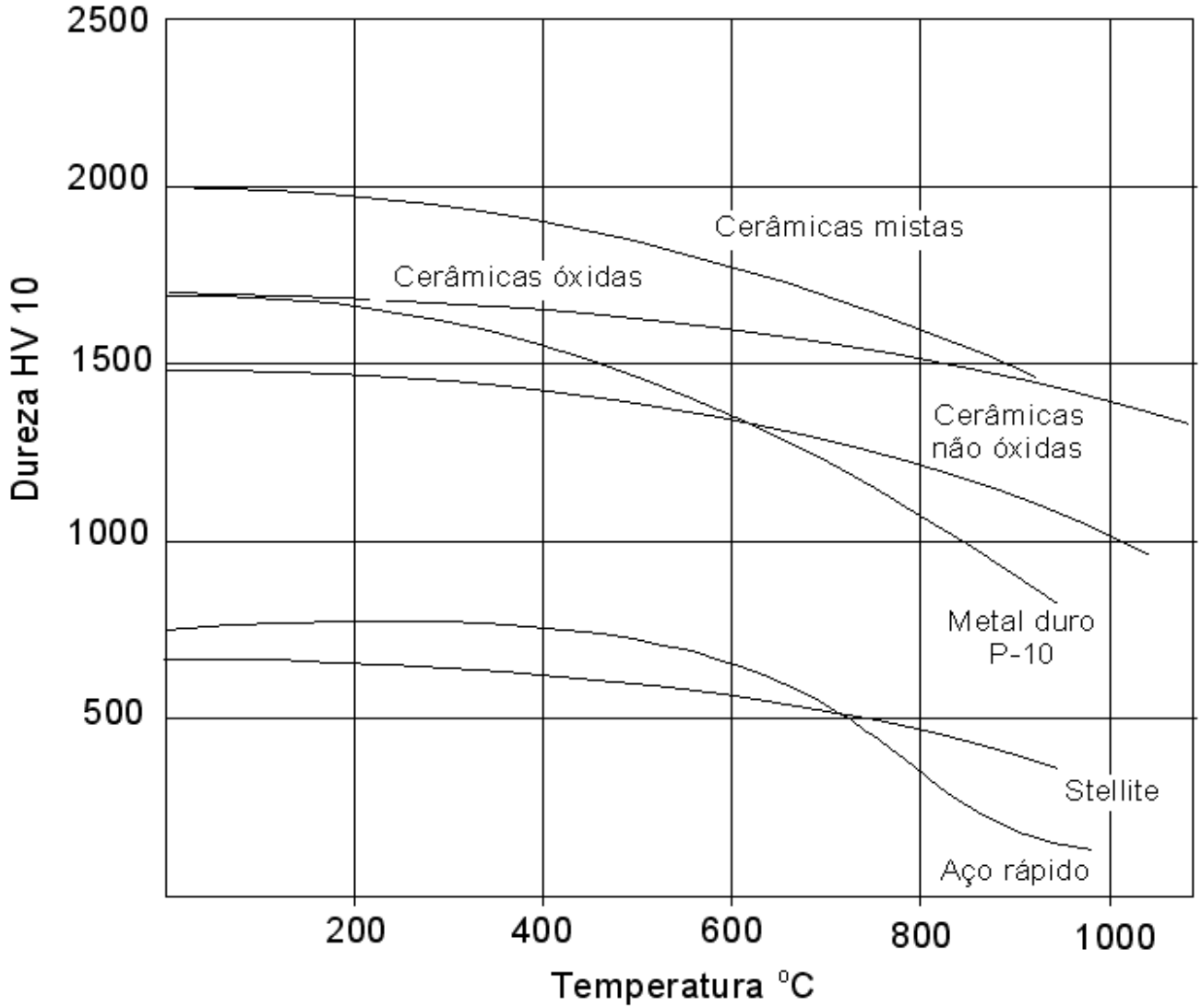
# Propriedades dos materiais de ferramentas



# Evolução dos materiais de ferramenta

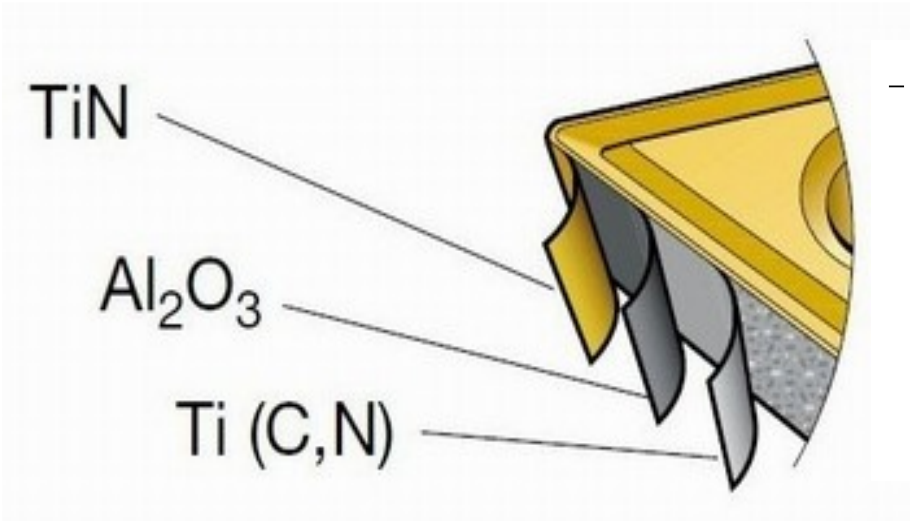


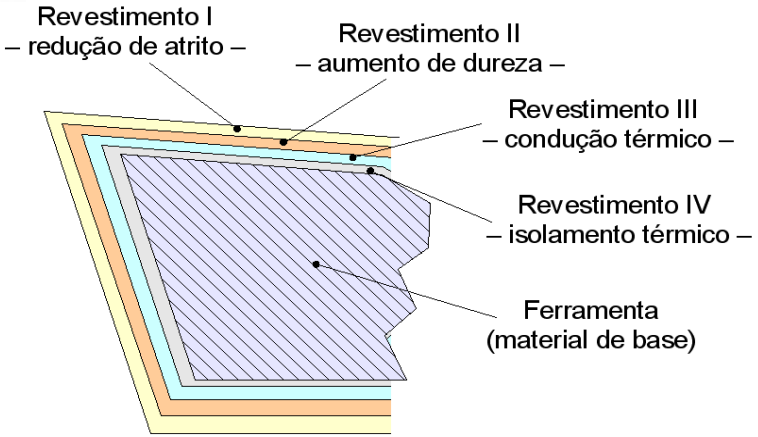
# Resistência a quente dos principais materiais de ferramentas



## 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

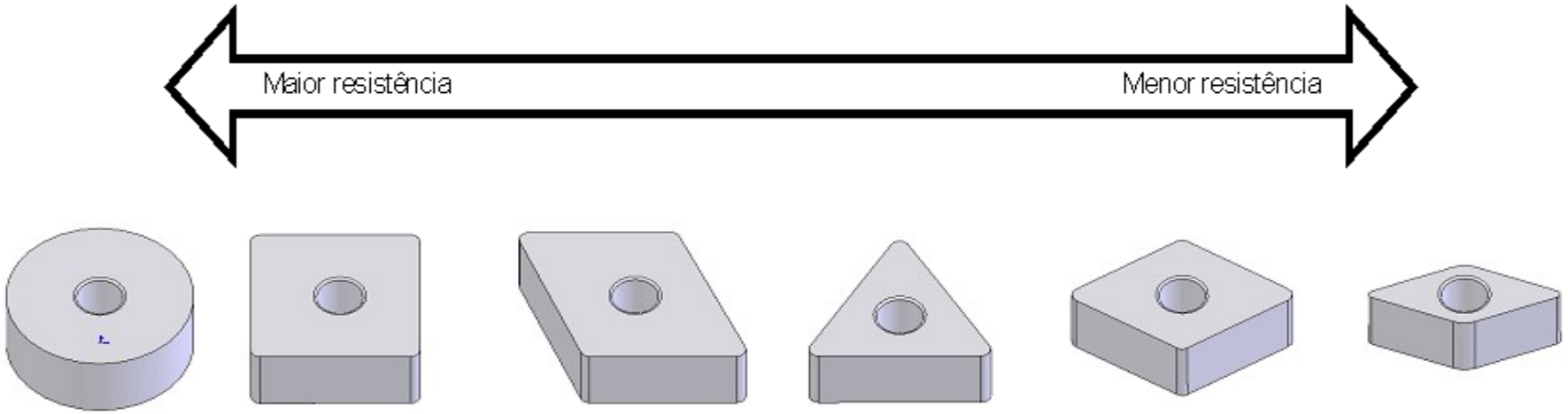
- Ferramentas integrais

## Tipos de ferramentas de corte

- Ferramentas com insertos intercambiáveis

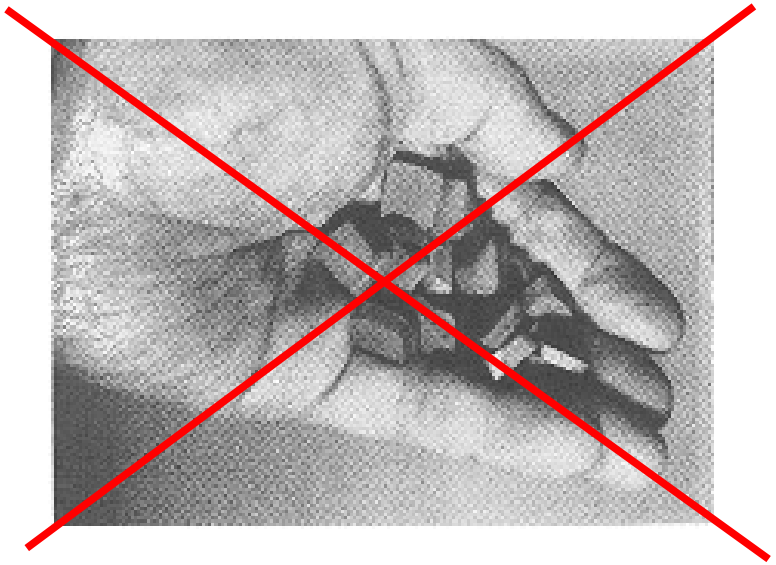
## Geometria dos insertos

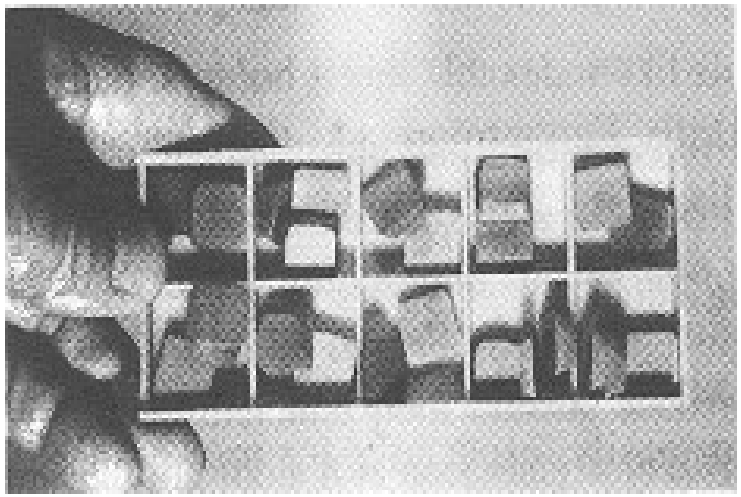
- A geometria da peça, suas tolerâncias, seu material e qualidade superficial definem o formato do inserto
- Há seis formas comuns, com benefícios e limitações, em relação à resistência a tensão



## Considerações gerais sobre Ferramentas de corte

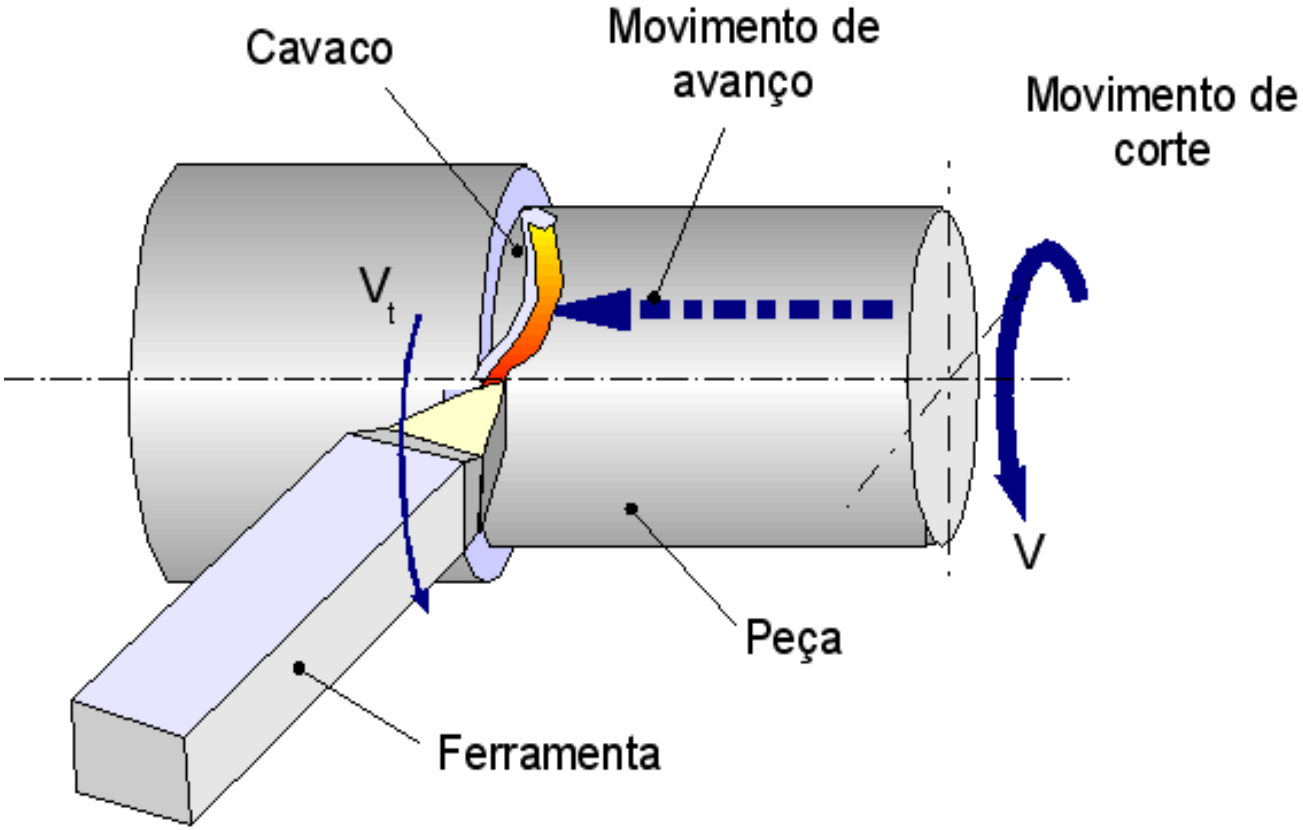
- Manuseio e manutenção de ferramentas de corte
- Evitar o contato entre ferramentas
- Cuidados no armazenamento
- Danos no manuseio (quebras)



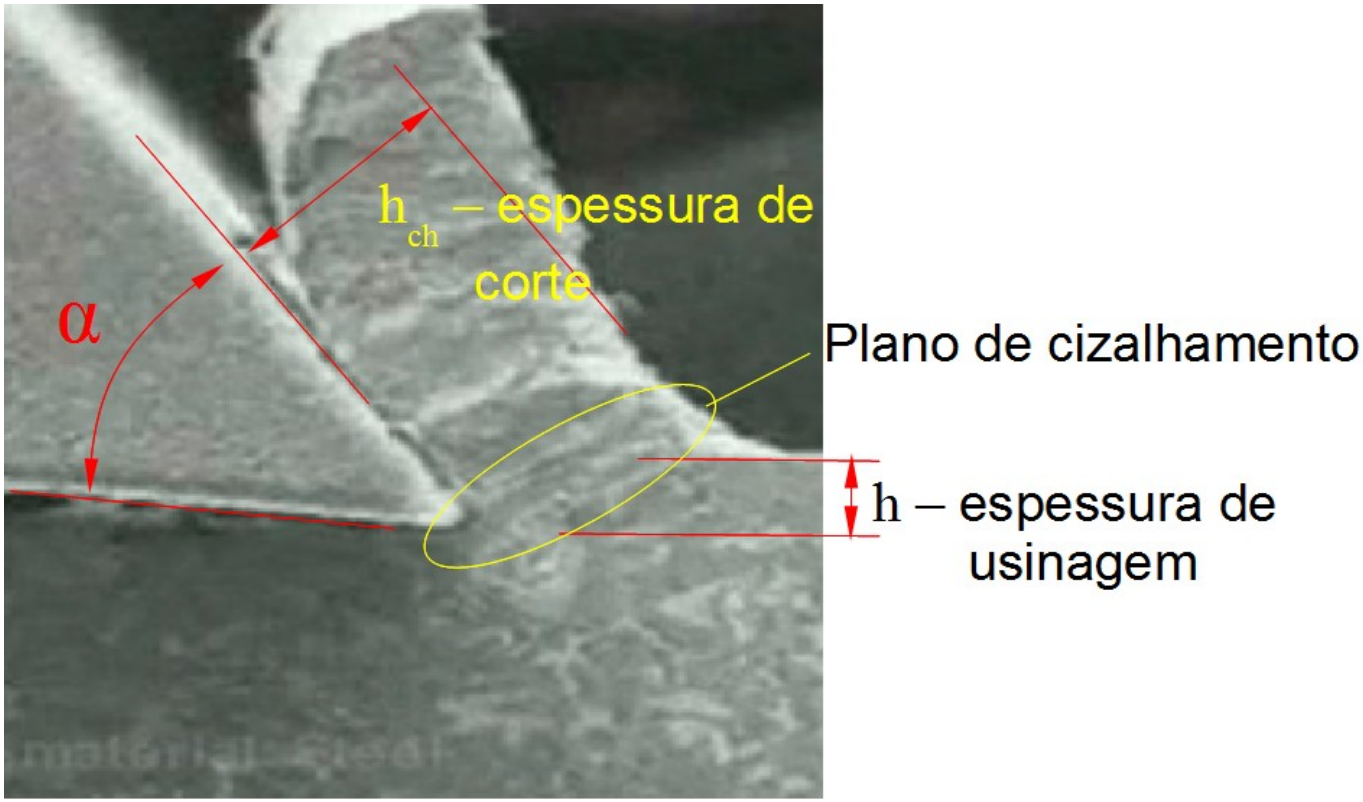


# Cavaco

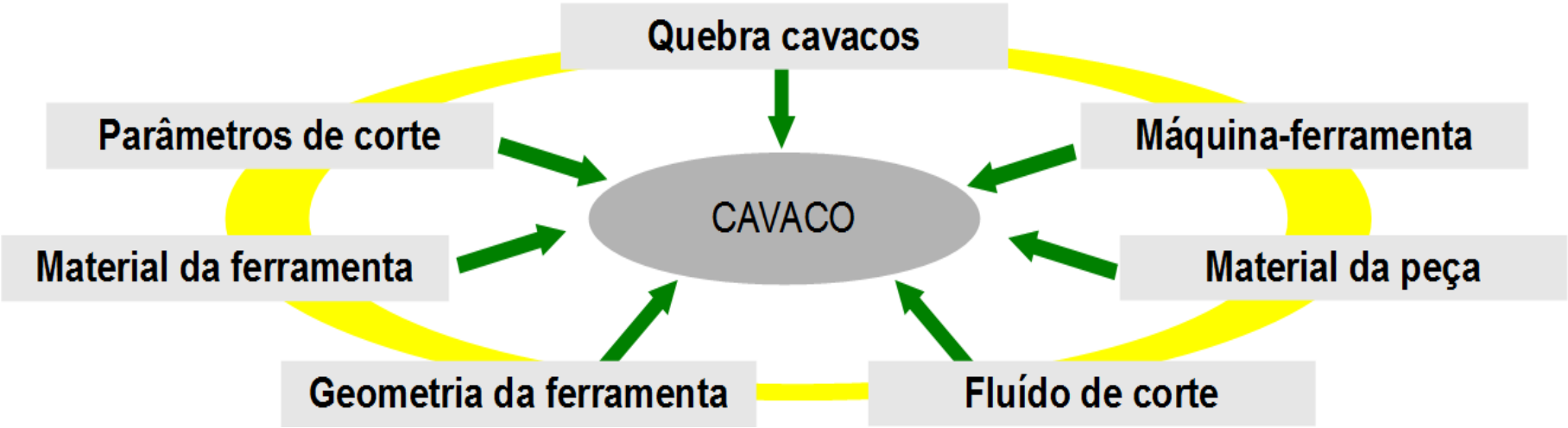
**Definição -** porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma irregular.



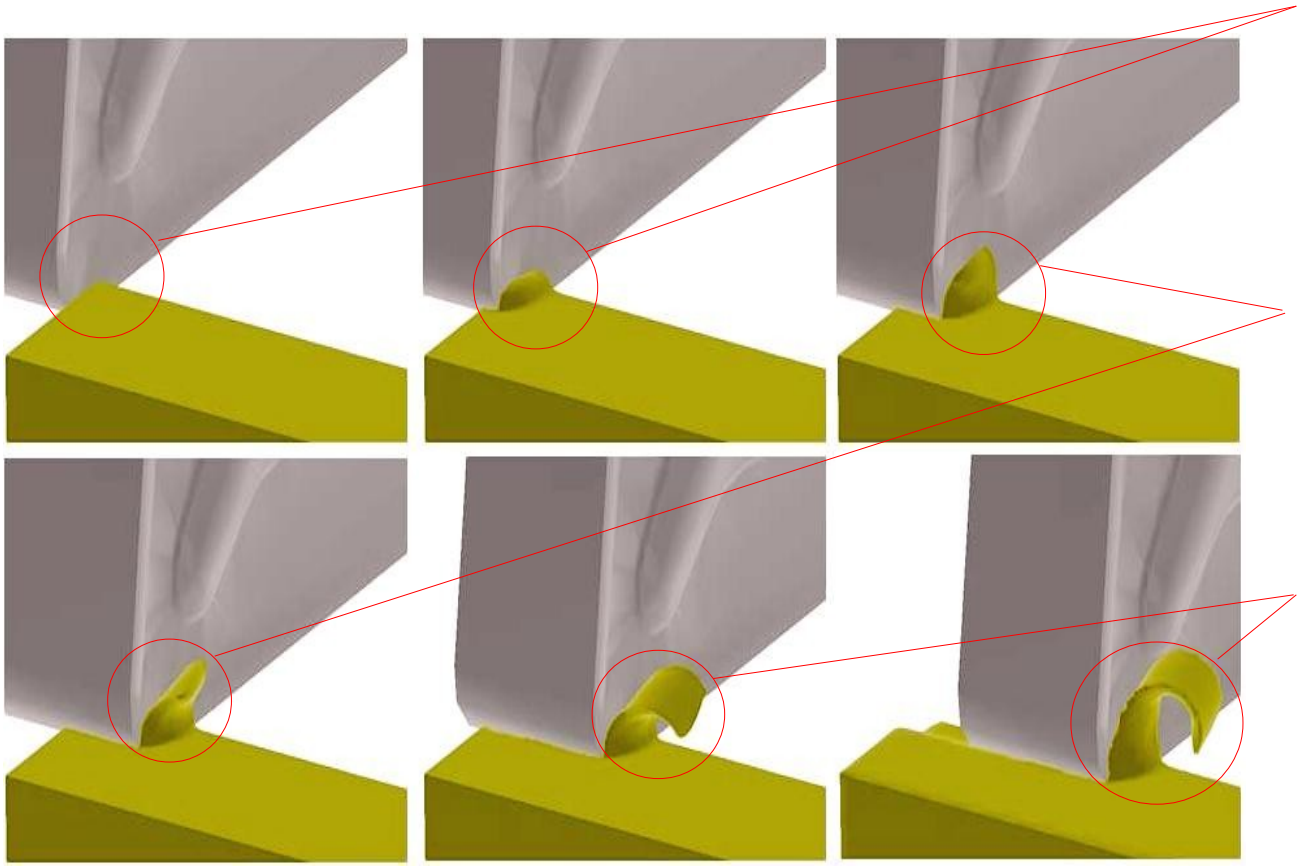
# Formação dos cavacos



# Fatores de influência na formação dos cavacos



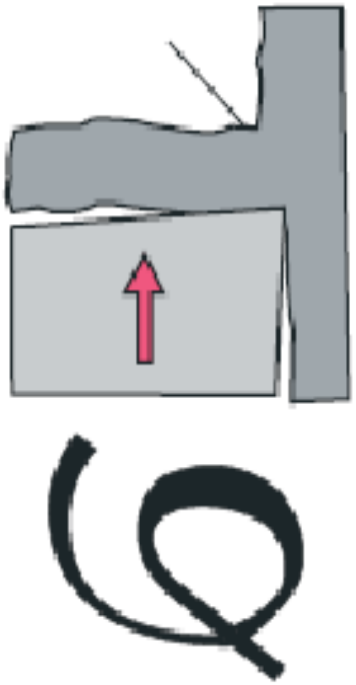
# Processo de corte



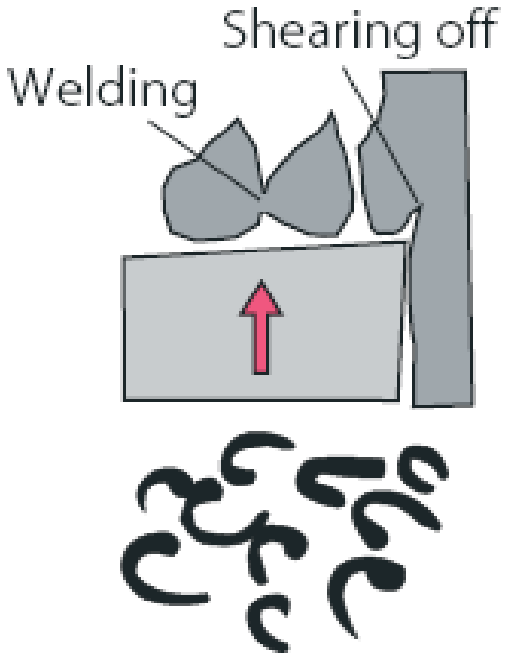
1. Penetração da cunha no material – deformação elástica e plástica
2. Escoamento após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material
3. Cavaco plenamente desenvolvido

# Tipos básicos de cavacos

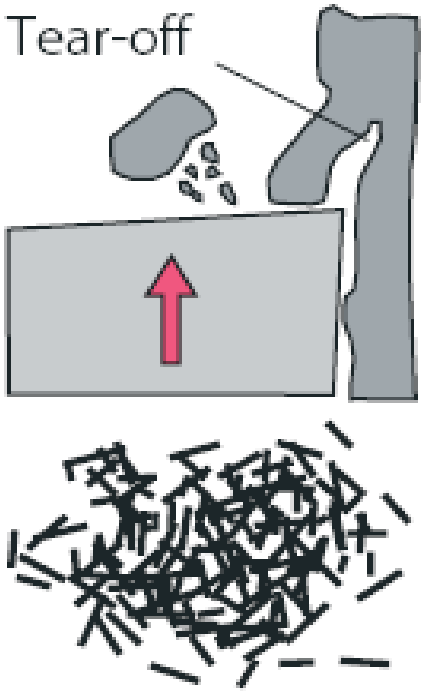
Contínuos



Lamelares

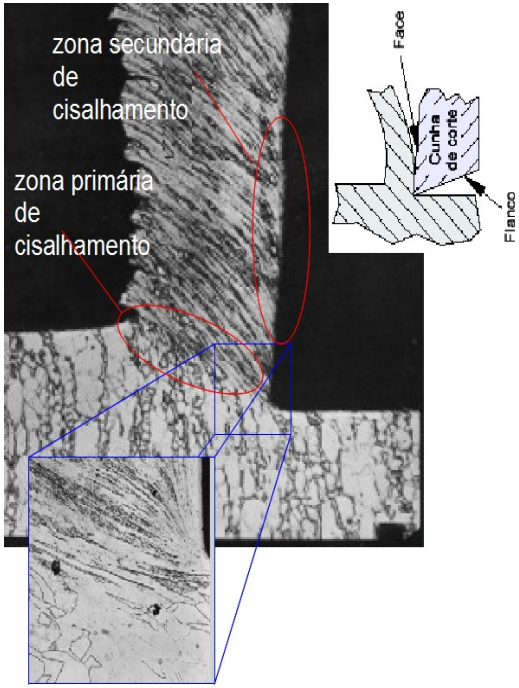



Arrancados ou cisalhados

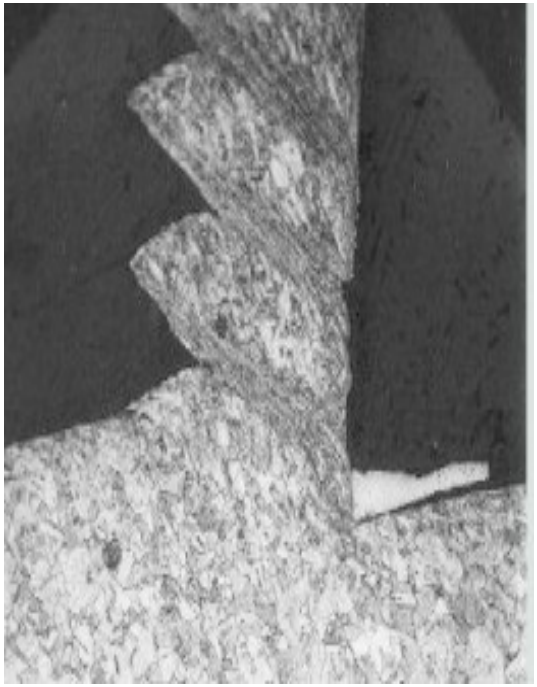


# Tipos básicos de cavacos

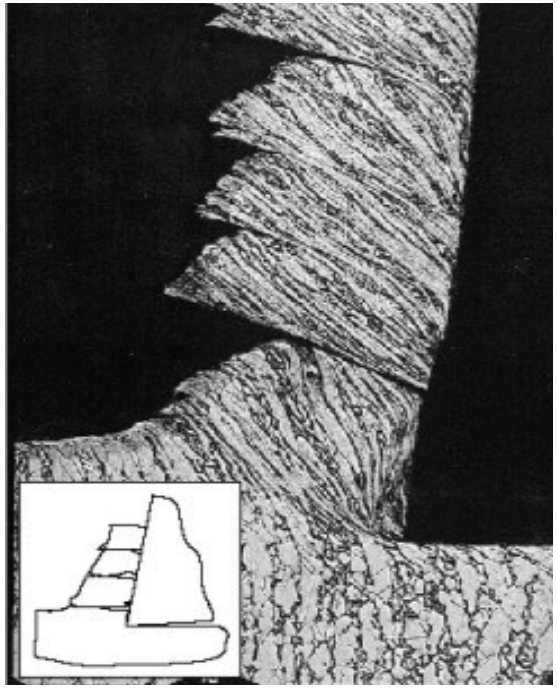
Contínuos



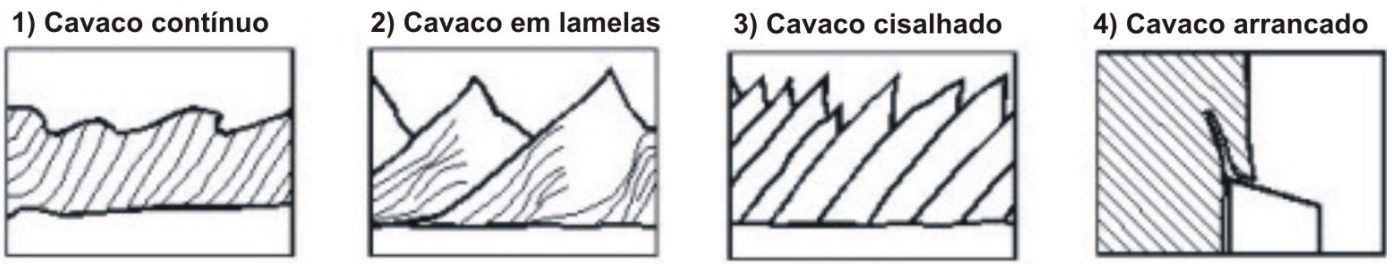

Lamelares

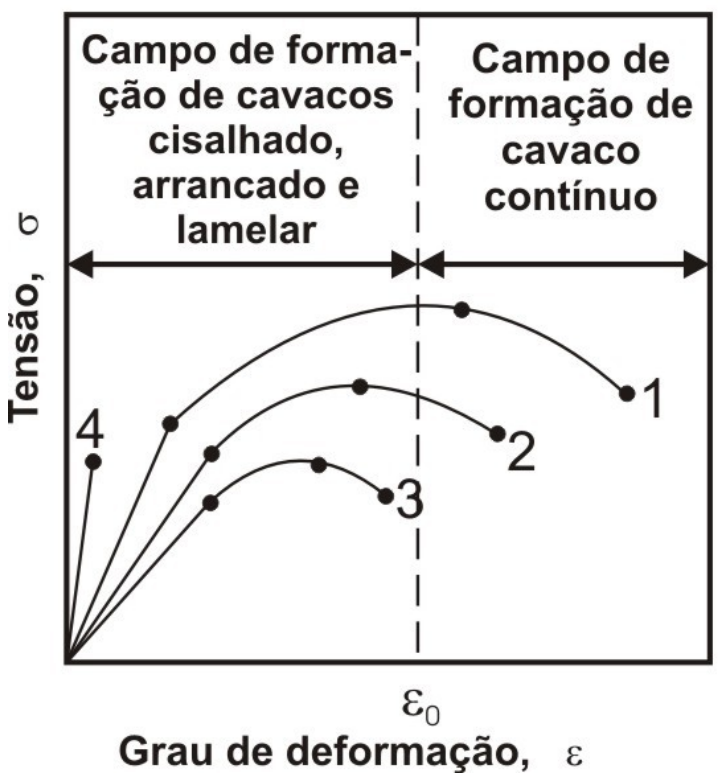


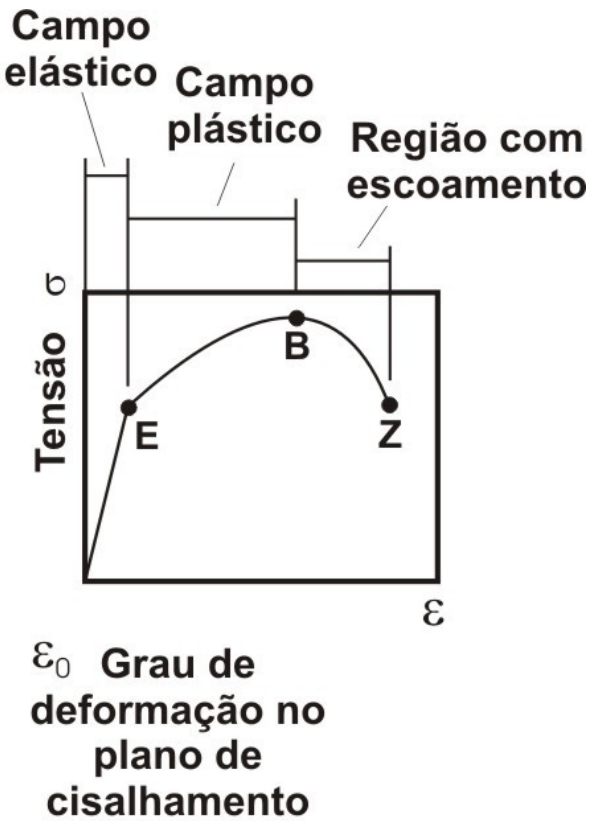
Arrancados
ou
cisalhados



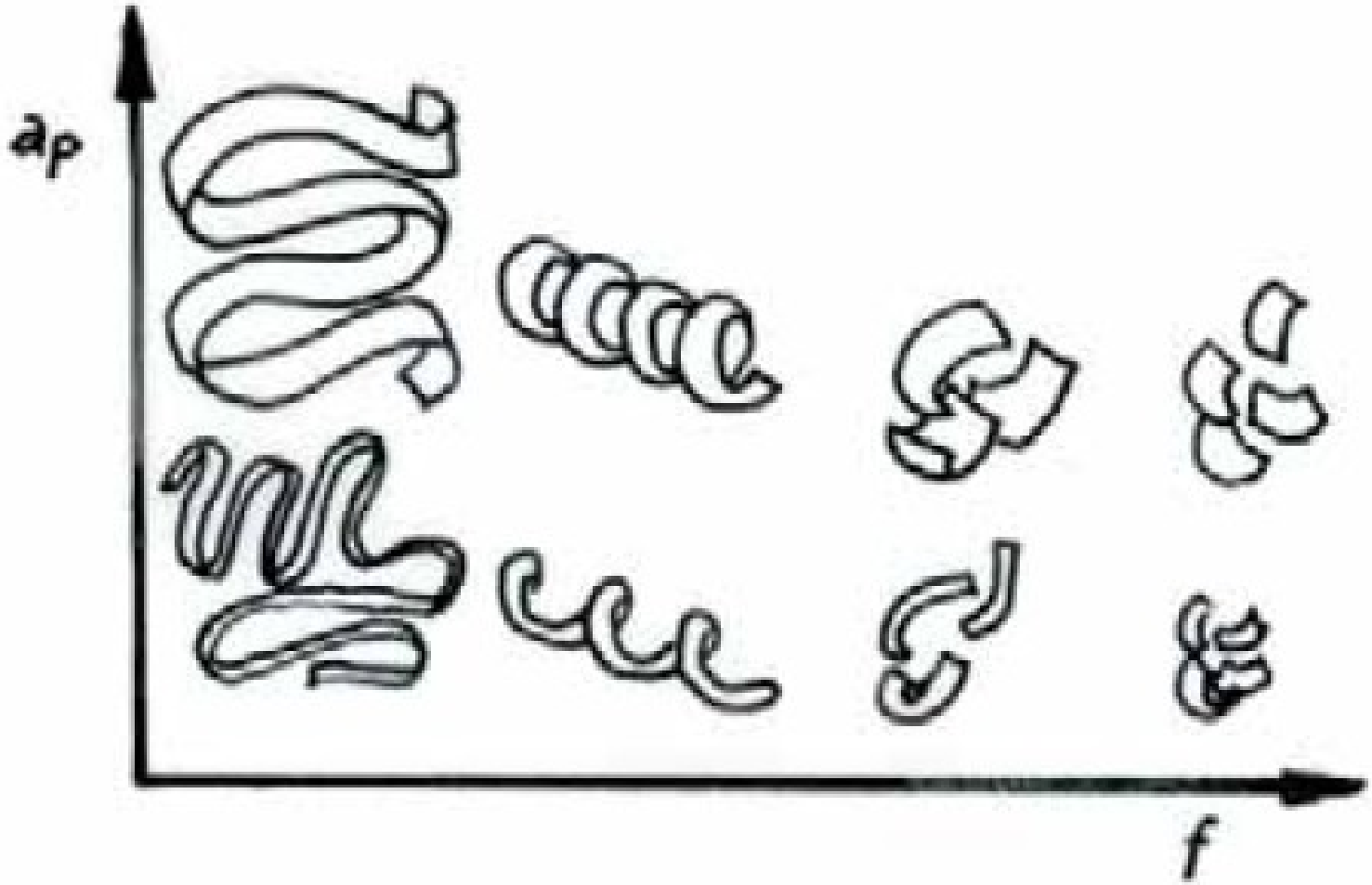
# Relação entre propriedades dos materiais e cavacos



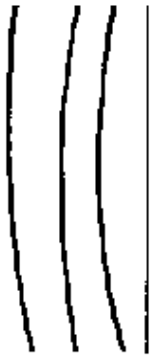
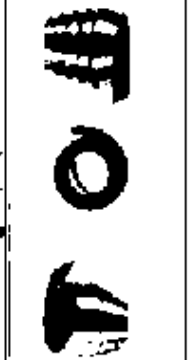
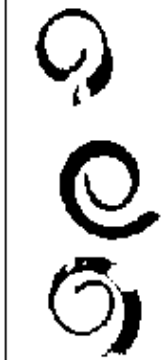



Influência do avanço e da profundidade de corte sobre a formação do cavaco

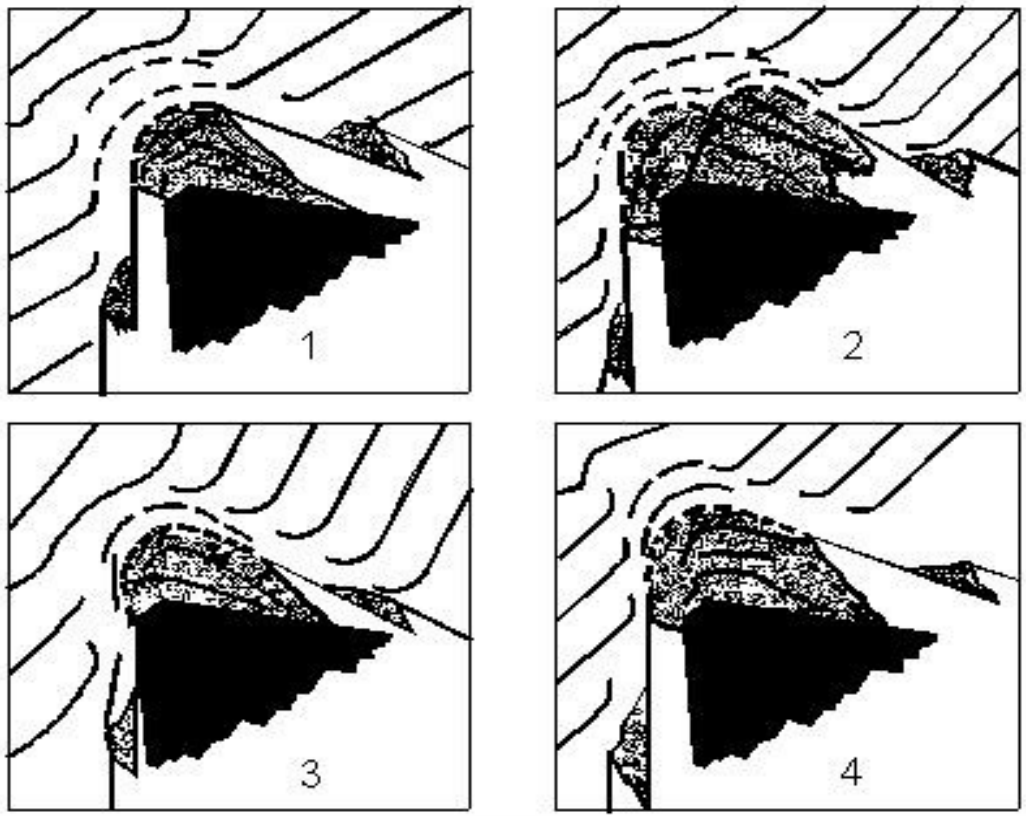


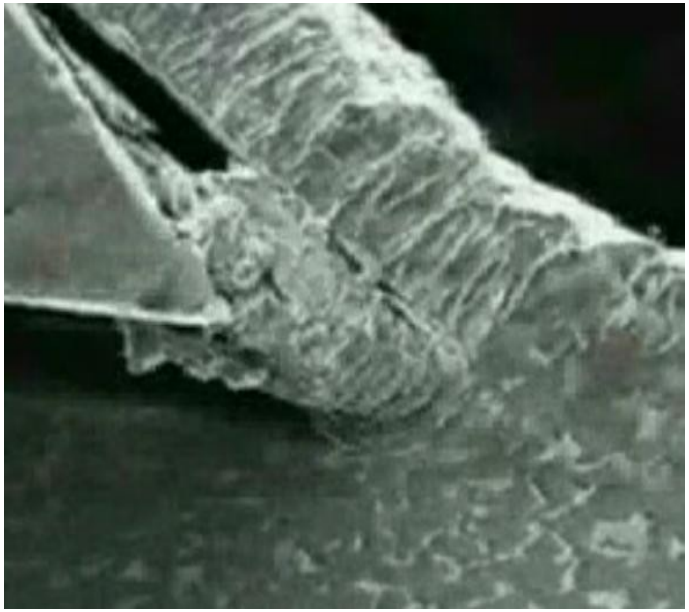
# Classificação dos cavacos

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FITA | | HÉLICE | | | | | OUTROS | | |
| FITA | EMARA-NHADO | HÉLICE PLANA | HÉLICE OBLÍQUA | HÉLICE LONGA | HÉLICE CURTA | HÉLICE ESPIRAL | ESPIRAL | VÍRGULA | ARRANCA DOS |
|  | | | | | |  |  | | |
| desfavorável | | | médio | | favorável | | | médio | |

## Aresta postiça

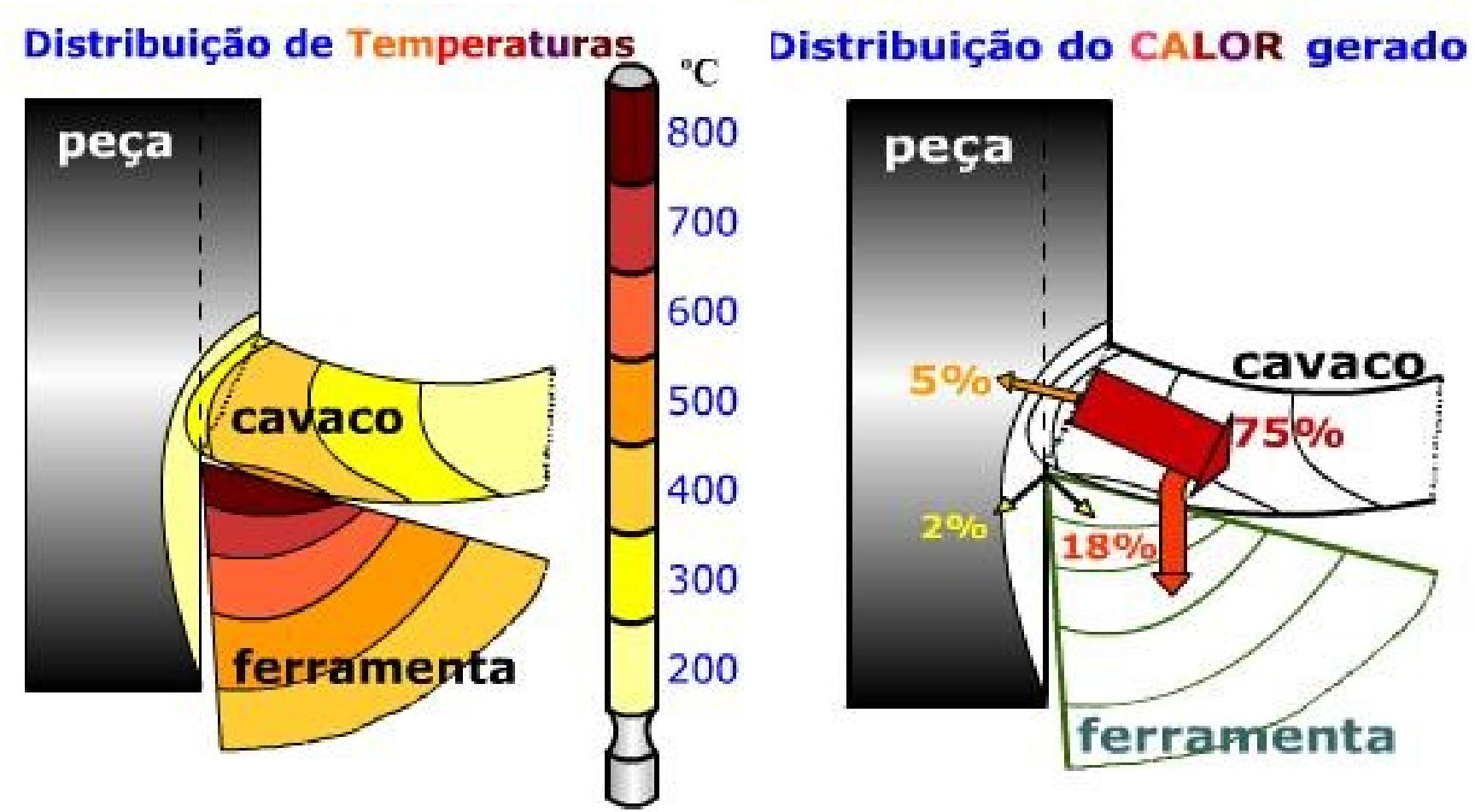
- Adesão de material sobre a face da ferramenta
- Material da peça altamente encruado que caldeia na face da ferramenta e assume a função de corte



# Vídeo sobre formação de cavaco

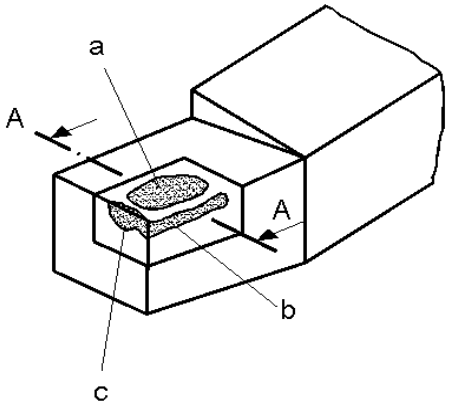
# Distribuição do calor na região do corte



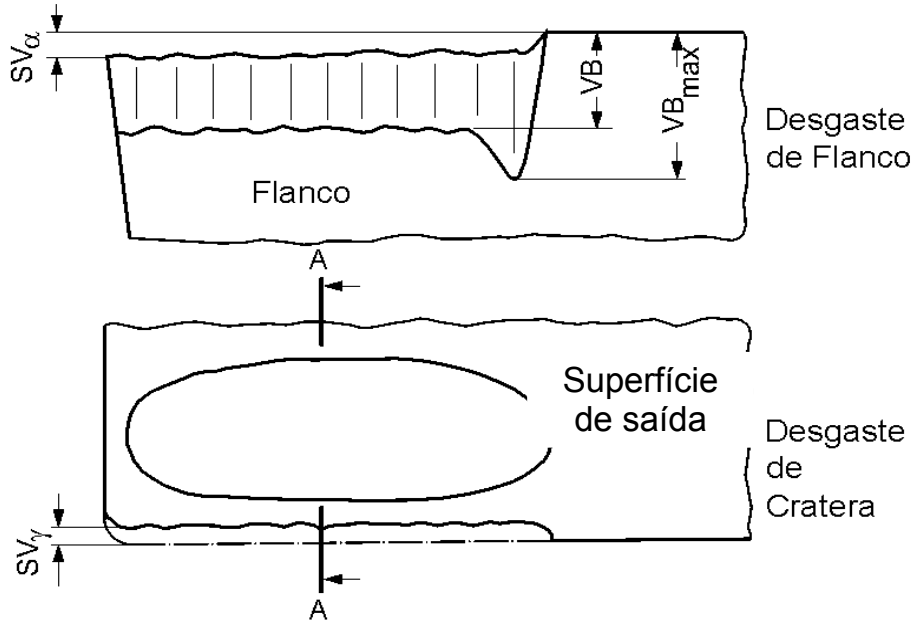
## Desgaste em ferramentas de usinagem

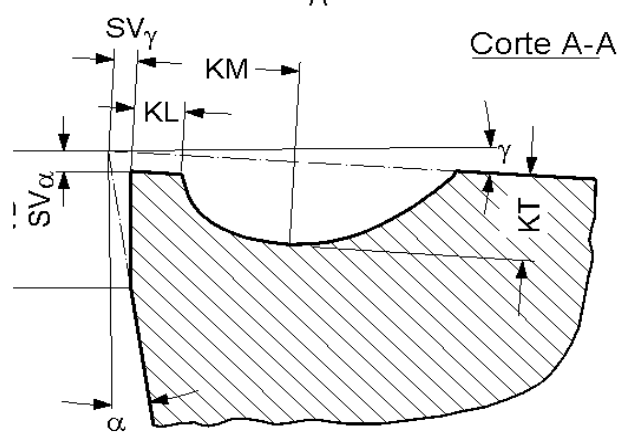
- O desgaste é uma conseqüência natural do processo de usinagem sobre as ferramentas de geometria definida e não definida.
- Movimento relativo entre cavaco e ferramenta, o atrito, as forças e a temperatura levam ao desgaste da ferramenta.
- 0 desgaste pode ser observado na superfície de saída, nas superfícies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

# Desgaste em ferramentas de usinagem



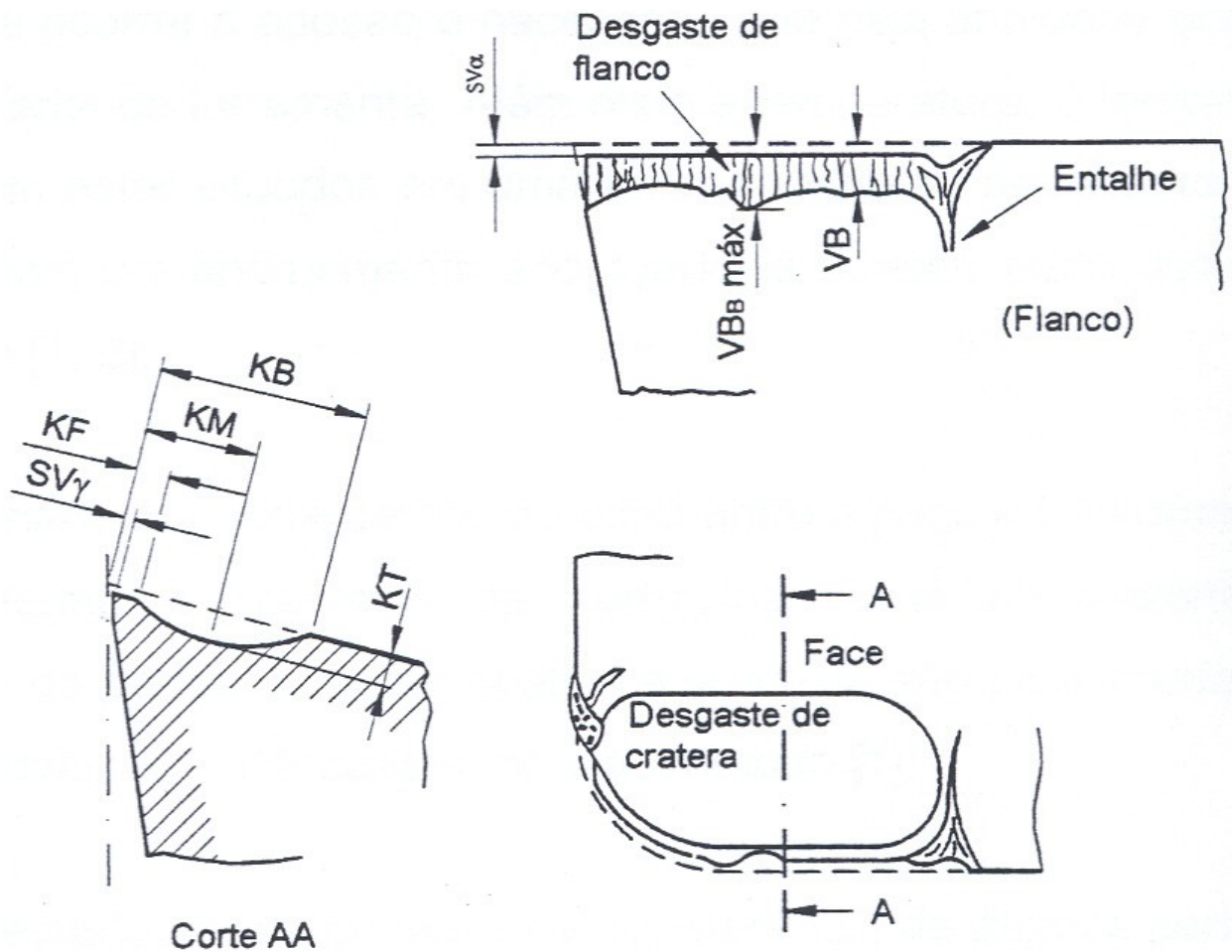

a – desgaste de cratera
b – desgaste da superfície principal na aresta de corte
c - desgaste da superfície secundária na aresta secundária




γ Ângulo de Saída
α Ângulo de Incidência
SVγ Deslocamento do Gume no Sentido da Face
SVα 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.

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

**SVα** - Deslocamento lateral do gume na direção do flanco.

**KB** - Largura de cratera.

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

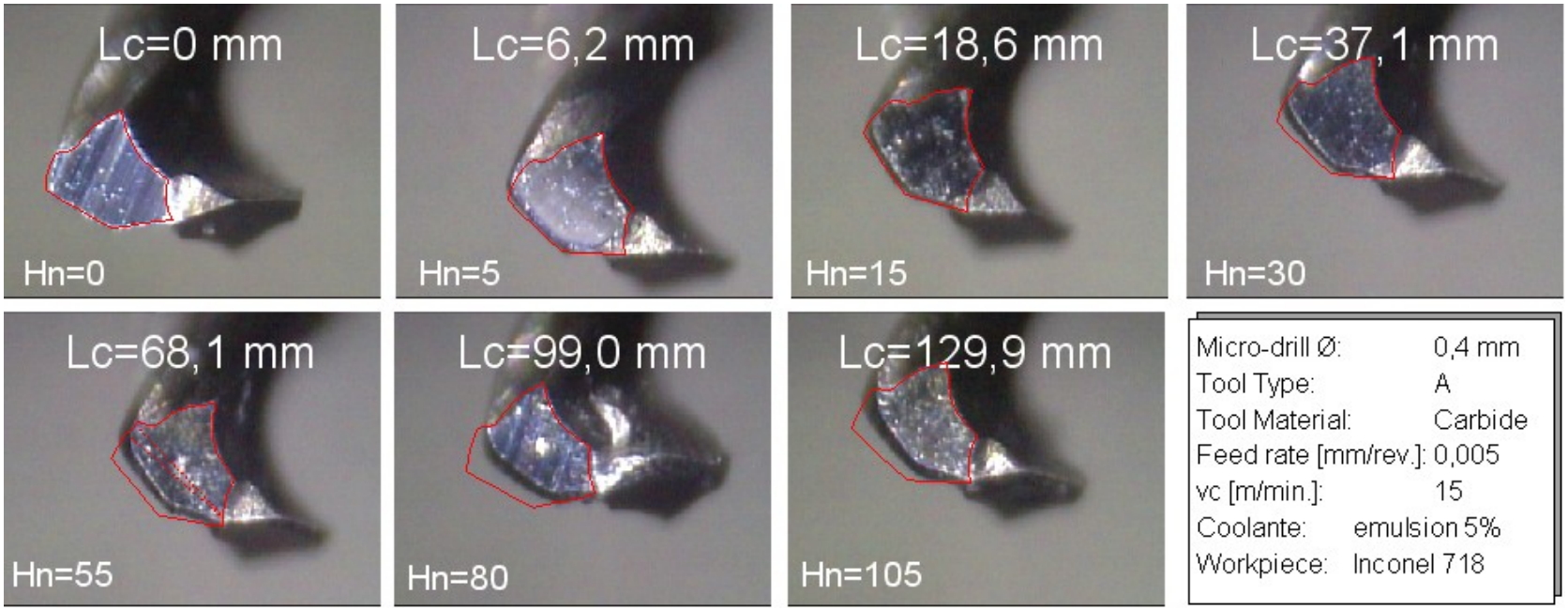
**KM** - Distância da borda da ferramenta ao centro da cratera.

**KT** - Profundidade de cratera.

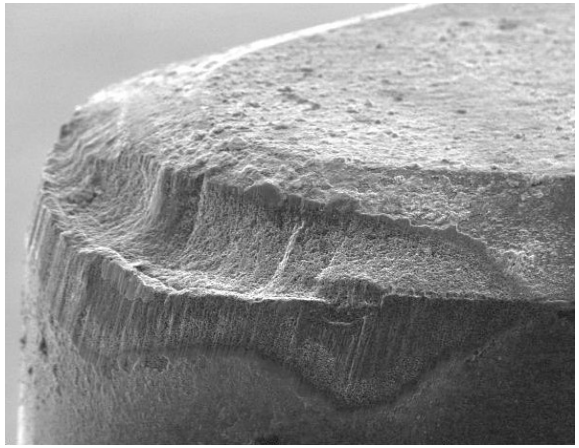
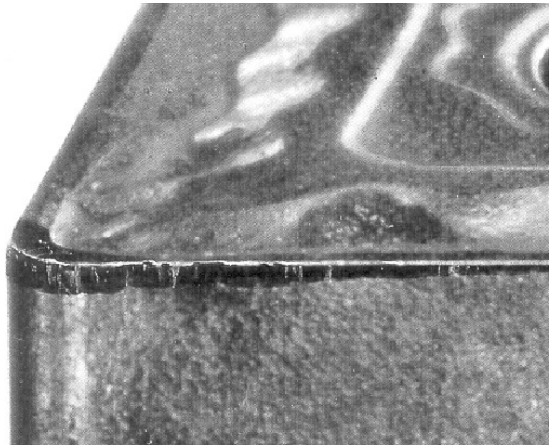
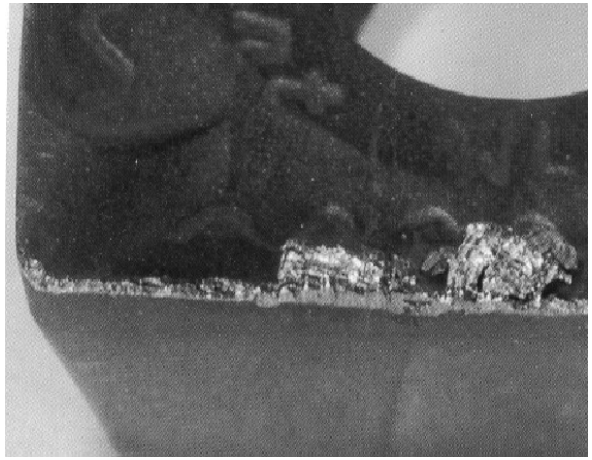
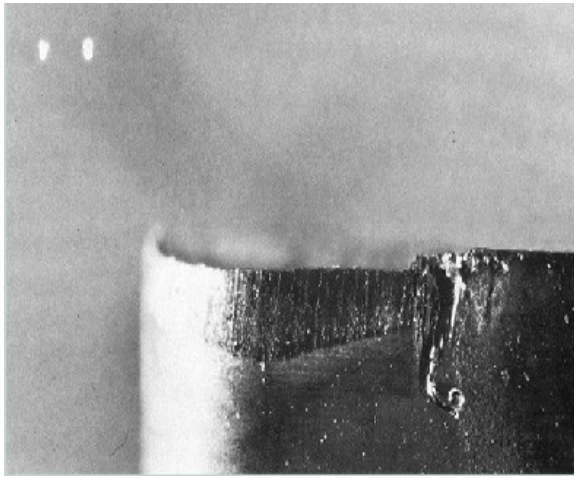
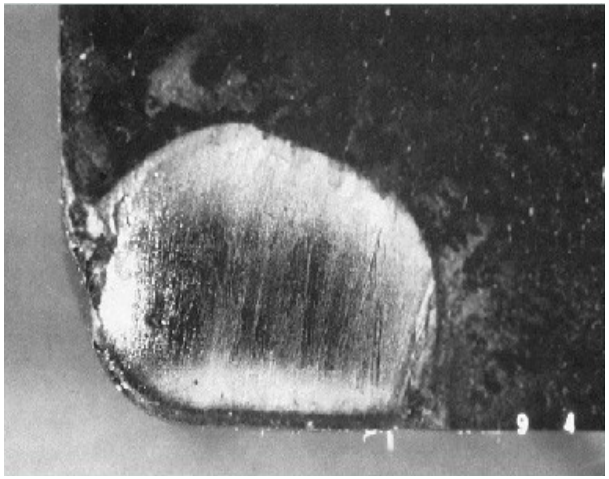
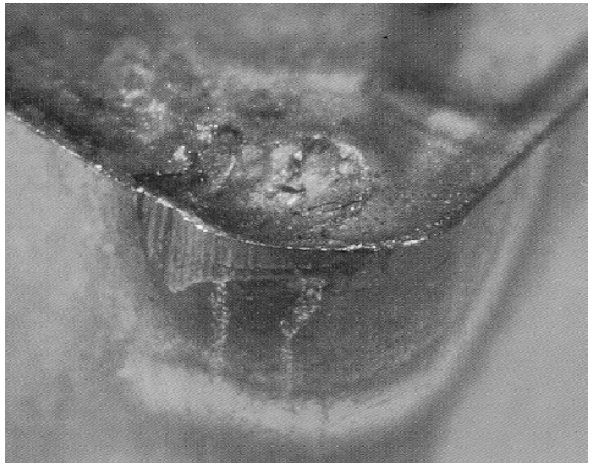
**SVγ** - Deslocamento lateral do gume na direção da face.

## Desgaste em ferramentas de usinagem

Exemplo da volução de desgaste em brocas helicoidais

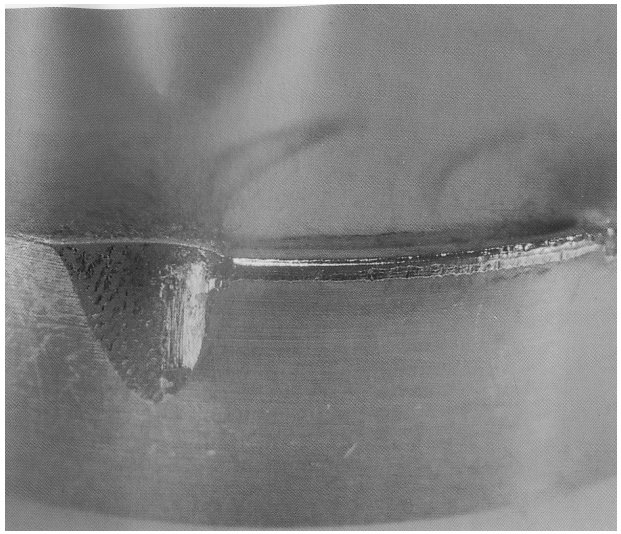


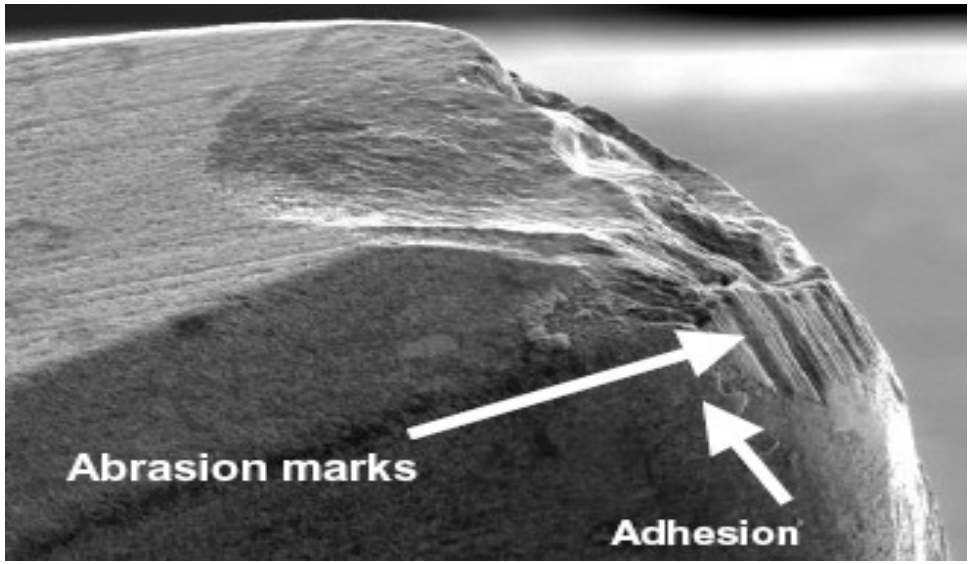
# Exemplos de desgaste em ferramentas de corte

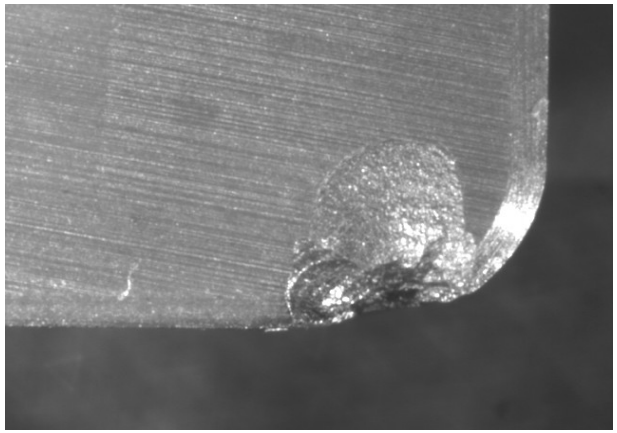







## Lascamento de gume

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

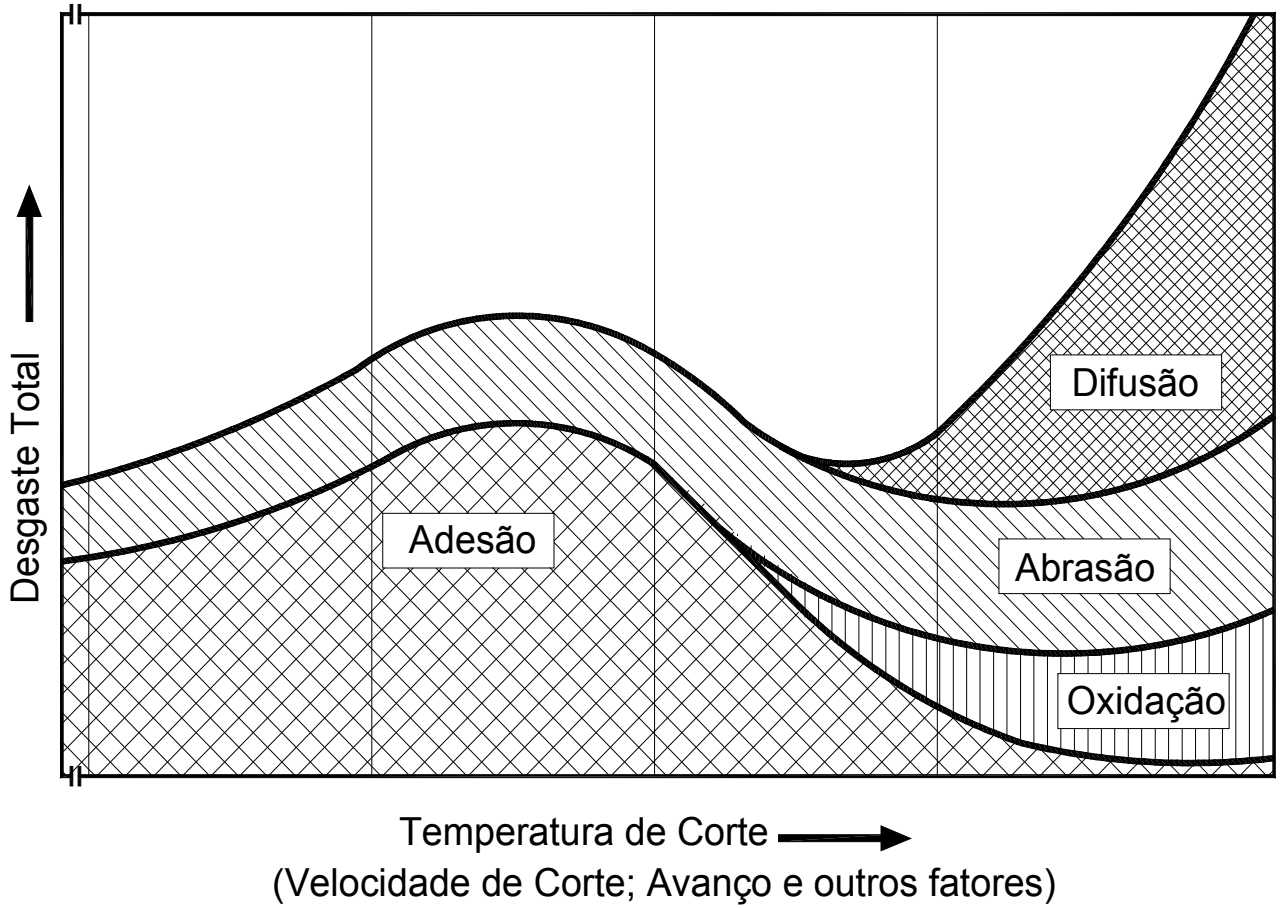




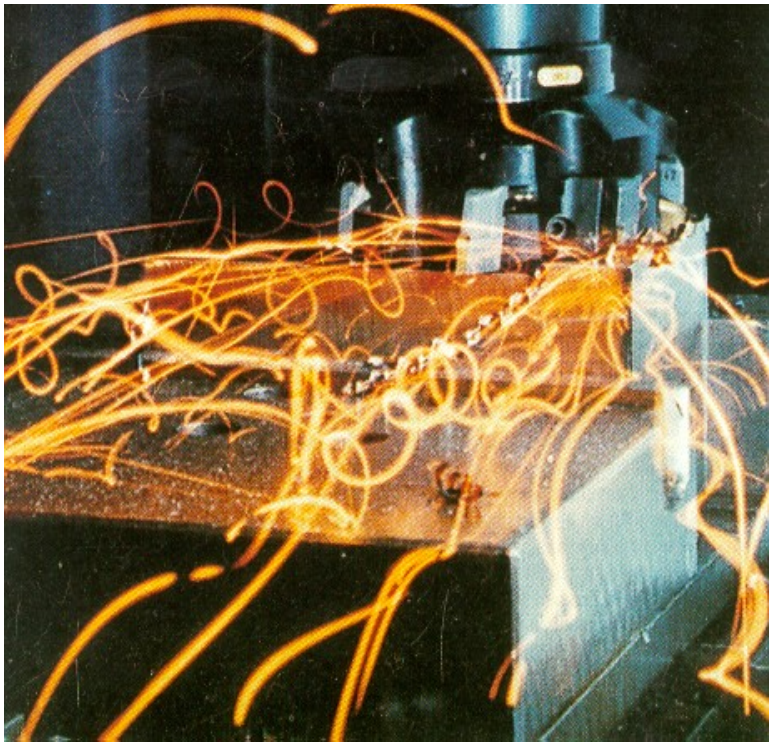
# Mecanismos de desgaste

- Adesão
- Abrasão mecânic
- 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"

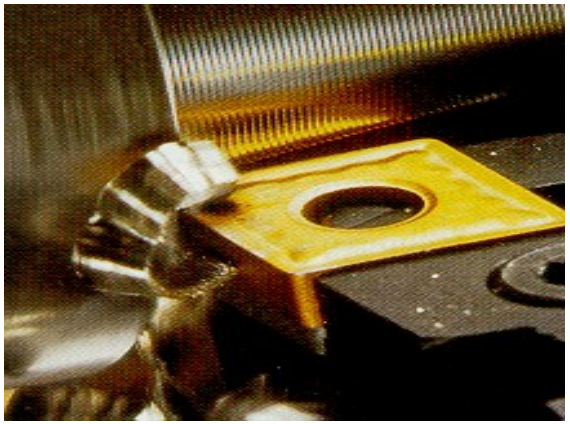
## Usinabilidade

- 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.

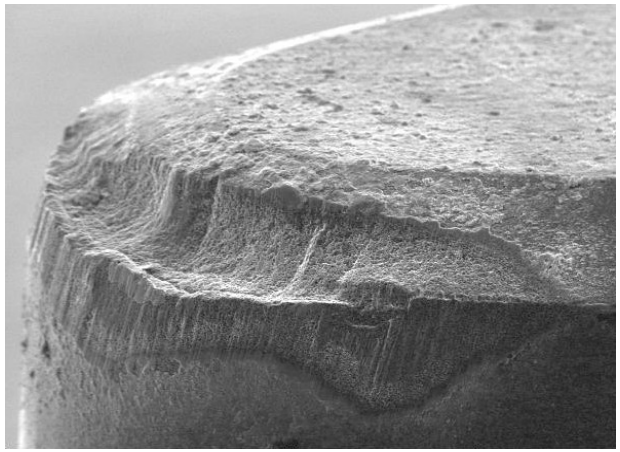
**Definição:** Usinabilidade pode ser definida como sendo a capacidade dos materais de peça em se deixarem usinar

# Critérios de Usinabilidade

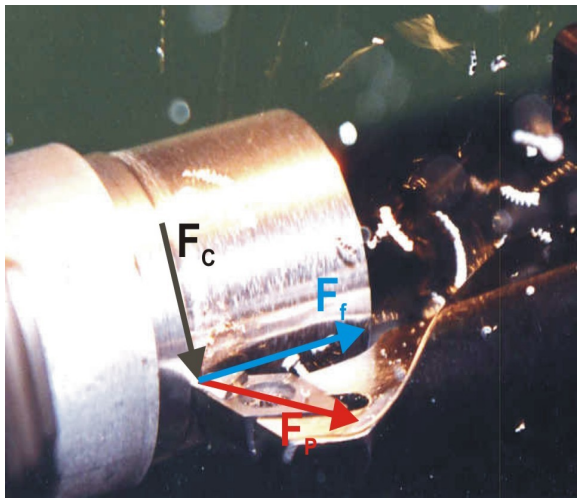
- Formação de cavaco



- 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 anteriror 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 carater 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

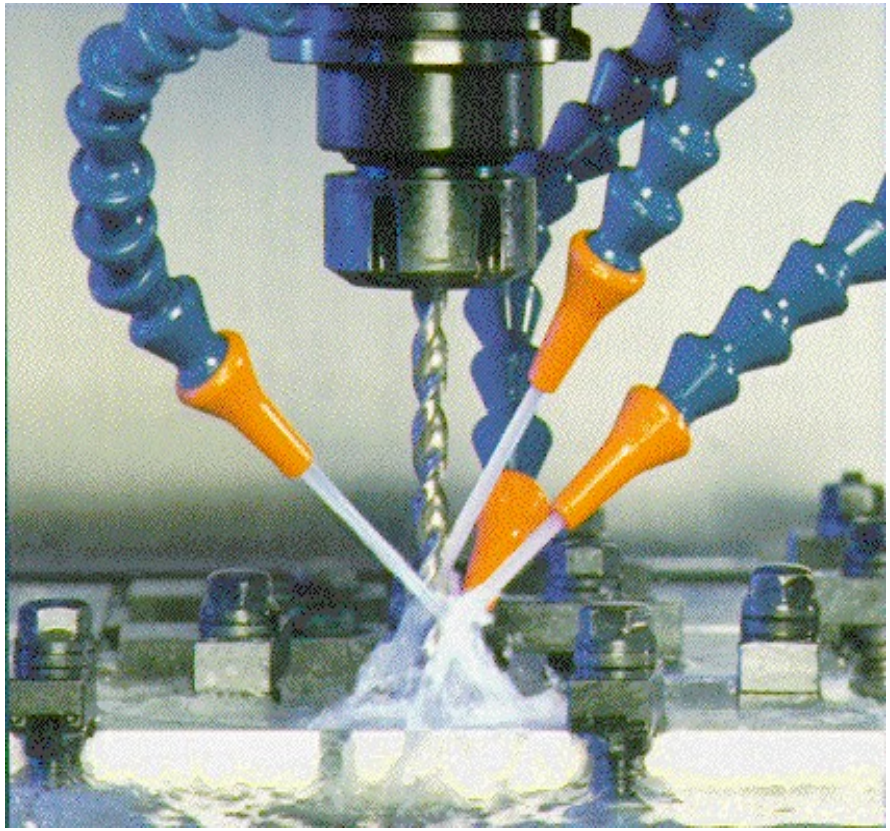
# Critérios de fim de vida

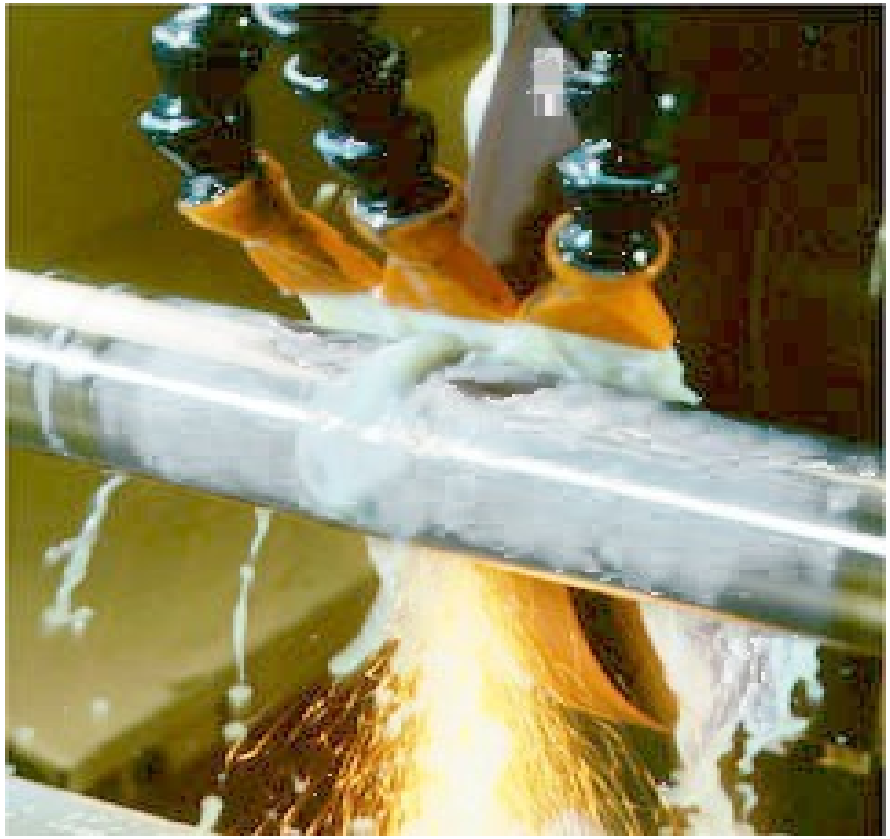
São critérios que são utilizados para determinar quando uma ferramenta deve ser substituída no processo.

Esses critérios é 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 reafiação da ferramenta
- formação de rebarba
- aumento da temperatura de corte
- nível de desgaste na ferramenta

# Fluidos de Corte





# Função dos Fluidos de Corte

**Refrigeração**

- ➔Dados Térmicos
  - ▪Na peça
  - ▪Na ferramenta
- ➔Formação de cavaco
- ➔Estabilidade térmica da máquina-ferramenta

**Lubrificação**

- ➔Aumento do atrito
- ➔Aumento das adesões

**Transporte de cavacos**

- ➔Formação de cavaco
- ➔Retirada de cavacos
  - ▪da peça
  - ▪da ferramenta
  - ▪da máquina-ferramenta

**Ferramenta**

- Desgaste
- Choque térmico

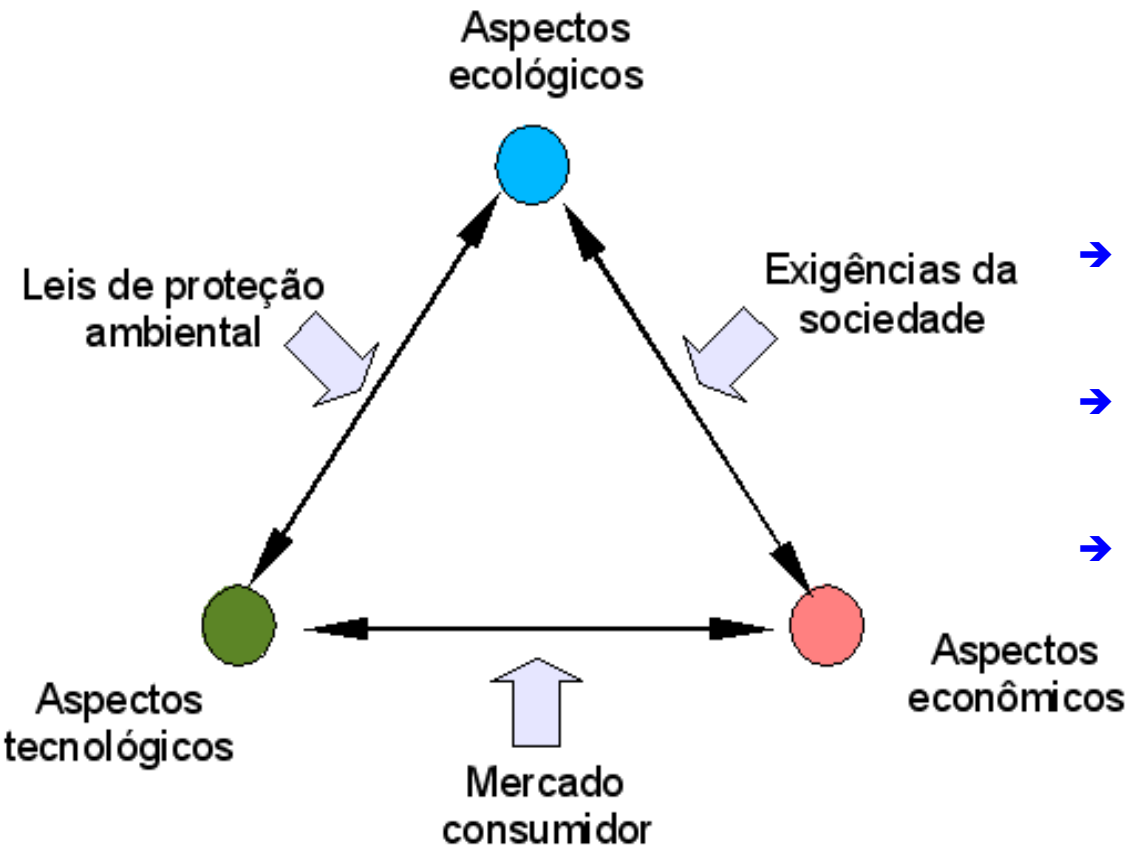
**Peça**

- Exatidão de forma
- Exatidão dimensional
- Qualidade superficial
- Influência na camada limite

**Máquina-ferramenta**

- Estabilidade térmica
- Precisão

# Tendências no uso de Fluidos de Corte




- **REDUÇÃO**
- **ELIMINAÇÃO**
- **FLUIDOS ECOLÓGICOS**

# 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;

# Fim da Aula - 01\03