

## **Aula 05**

# **- Materiais de Ferramenta Monocortante - (Parte 2)**

## Metal Duro – WIDIA

### Características

- Desenvolvimento 1926 - Leipzig
  - Material de ferramenta mais utilizado na indústria
  - Indústria automobilística consome cerca de 70% das ferramentas de metal duro produzidas no mundo
  - Resistem a temperatura de até aproximadamente 1000°C (mesma dureza que o aço rápido à temperatura ambiente)
  - Maiores Vc com relação as ligas fundidas, aços rápidos e aços ferramenta
  - Aumento na vida útil das ferramentas na ordem de 200 a 400%
-

## **Duro – WIDIA**

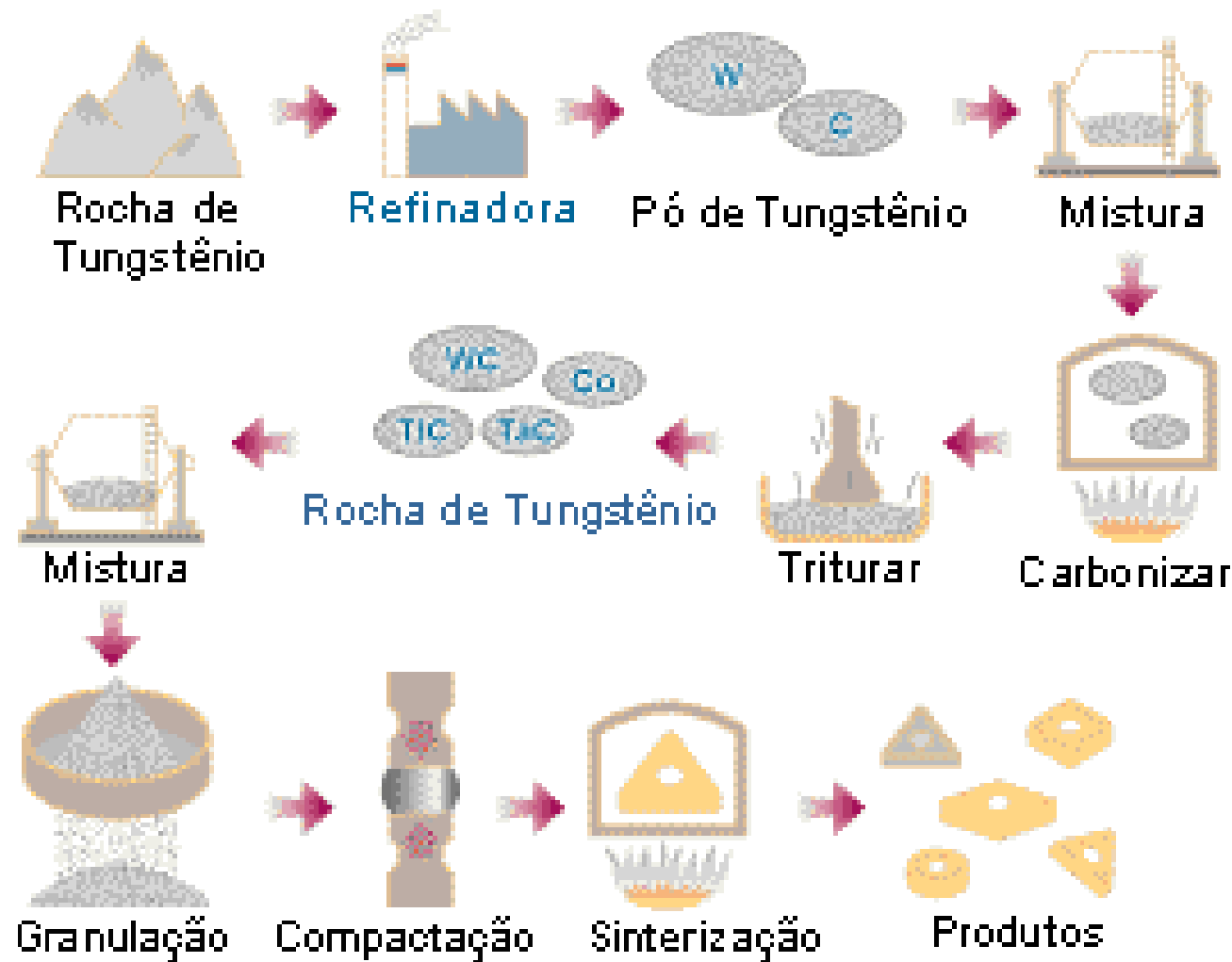
- Composição típica: 81% W, 6% C e 13% Co – (WC-Co)
  - Algumas razões do sucesso deste material:
    - Grande variedade de tipos de metal duro (adição de elementos de liga);
    - Propriedades adequadas às solicitações em diferentes condições
    - Possibilidade de utilização de insertos intercambiáveis
    - Estrutura homogênea (processo de fabricação)
    - Dureza elevada;
    - Resistência à compressão;
    - Resistência ao desgaste a quente.
-

## **Metal Duro – WIDIA**

### **Características**

- Boa distribuição da estrutura
  - Boa resistência à compressão
  - Boa resistência ao desgaste a quente
  - Possibilidade de se obter propriedades específicas
  - A princípio utilizado para a usinagem de materiais fundidos
  - Anos 70 (seculo XX)- surgimento de metais duros revestidos
  - Primeiros Cermets ® (metais duros à base de TiC)-  $\uparrow v_c$ 's -1973 - Japão
-

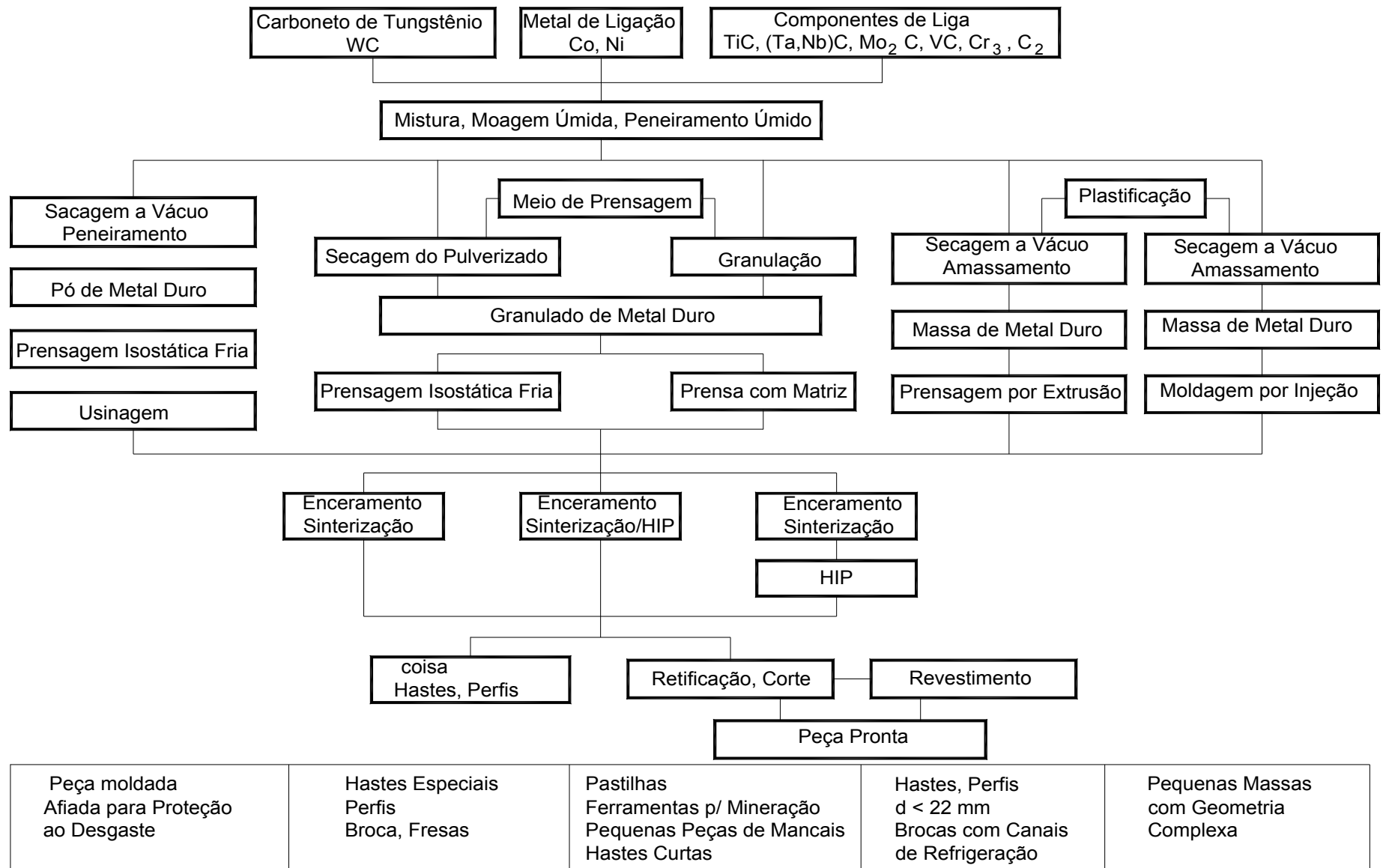
# Fabricação do Metal Duro



## Fabricação do Metal Duro



# Metal Duro – Fabricação

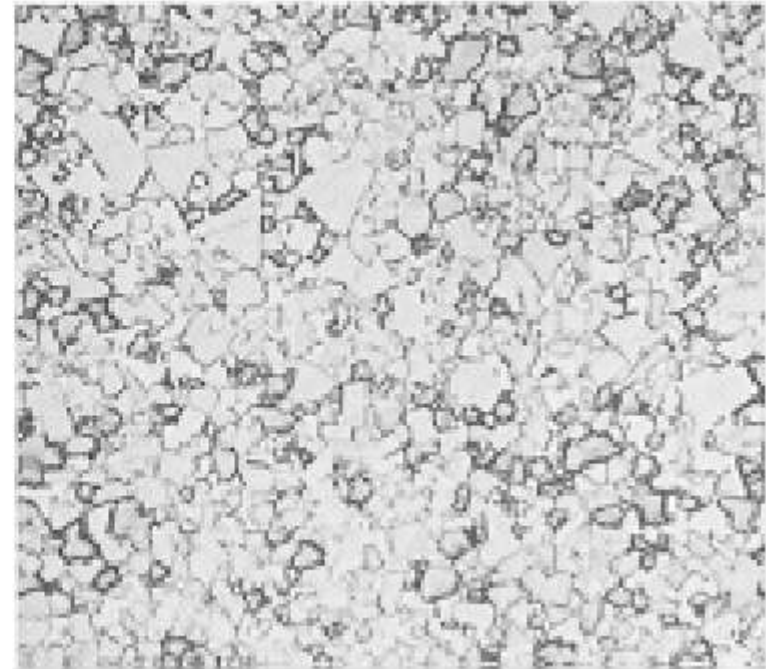
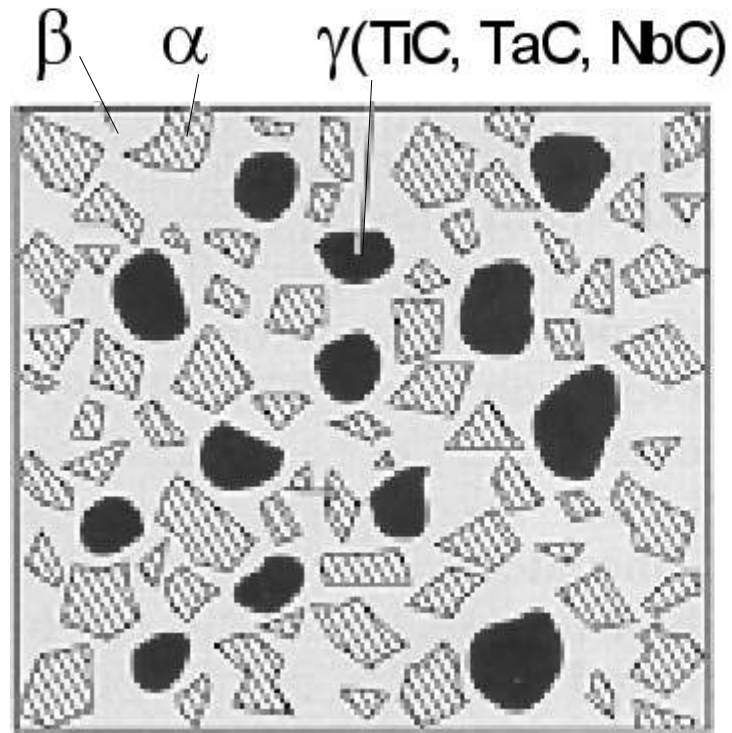


## Estrutura do Metal Duro

- **Carbonetos:**
    - fornecem dureza a quente e resistência ao desgaste (WC, TiC, TaC, NbC, ...)
  - **Ligante metálico:**
    - Atua na ligação dos carbonetos frágeis (Co ou Ni);
  - Obtido por sinterização (ligante + carbonetos)
-



## Estrutura do Metal Duro



onde:

$\alpha$  = carbonetos de tungstênio

$\beta$  = cobalto

$\gamma$  = carbonetos de titânio, tântalo e nióbio

## **Propriedades dos componentes do Metal Duro**

### **Carboneto de tungstênio (WC)**

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

### **Carboneto de Titânio (TiC)**

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

## **Propriedades dos componentes do Metal Duro**

### **Carboneto de Nióbio (NbC)**

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

### **Carboneto de Tântalo (TaC)**

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

## **Propriedades dos componentes do Metal Duro**

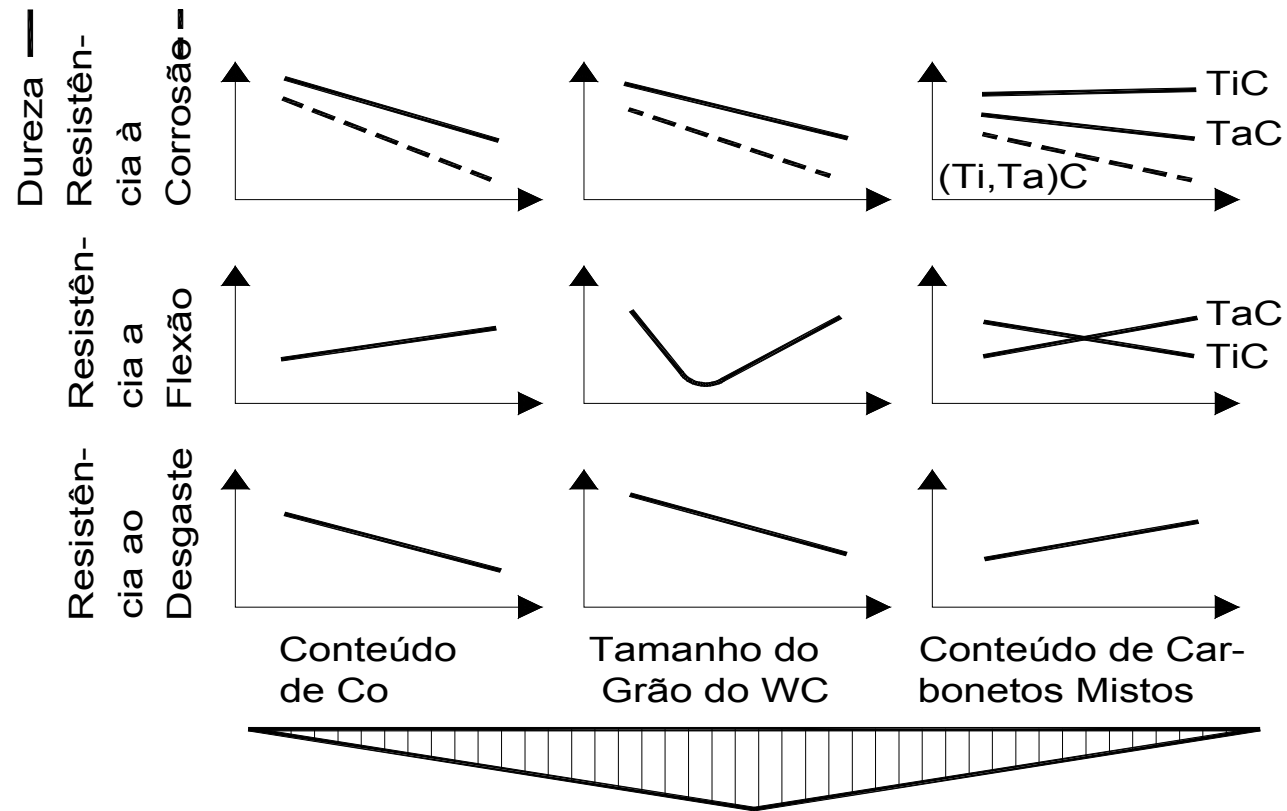
### **Nitreto de titânio (TiN)**

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

### **Cobalto (Co)**

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

# Metal Duro - Grandezas de influência sobre a resistência



Qualidade do Material da Ferramenta

Alta Resistência  
ao Desgaste

Alta  
Tenacidade

Conteúdo de Co:



Conteúdo de Co:



Tamanho do Grão do WC:



Tamanho do Grão do WC:



Conteúdo de Carbonetos Mistos:

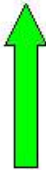



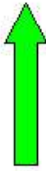



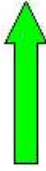





Conteúdo de Carbonetos Mistos:



## Classificação dos Metais Duros

- Divididos em três grupos (P,K e M) e classificados de acordo com à tenacidade e resistência ao desgaste, de acordo com uma numeração (p. ex. P01, P10,..., K10, ...)

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

## Classificação dos Metais Duros

### – Grupo P

- Alta resistência a quente
- Pequeno desgaste abrasivo
- Empregado para usinagem de aços com cavacos longos

### – Grupo M

- Média resistência a quente
- Média resistência à abrasão
- Para aços resistentes a altas temperaturas, aço inoxidável, aços resistentes à corrosão, Fºº...

### – Grupo K

- Pouca resistência a quente
  - Alta resistência ao desgaste
  - Usinagem de materiais com cavacos curtos, Fºº, metais não ferrosos, materiais não metálicos (pedra, madeira, ...) materiais com boa resistência a quente, ...
  - Compostos praticamente somente por WC e Co (pequenas quantidades de TiC, TaC e NbC)
-

## **Classificação dos Metais Duros**

### **– Metal Duro Polivalente**

- Melhores características (material com maior pureza e maior controle na sinterização)
  - Redução da quantidade de insertos diferentes
  - Mais homogêneos, com melhor distribuição dos carbonetos e tamanho dos carbonetos mais uniforme
-



## **Classificação dos Metais Duros**

### **Metais duros à base de WC-Co**

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

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

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

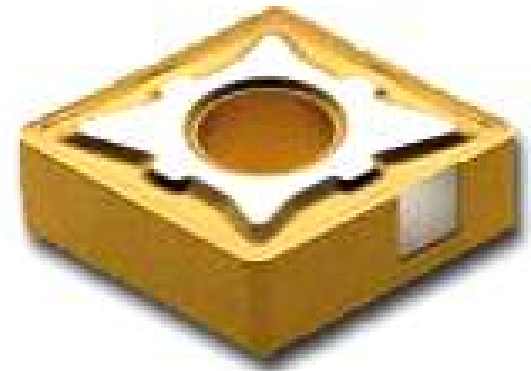
## **Classificação dos Metais Duros**

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

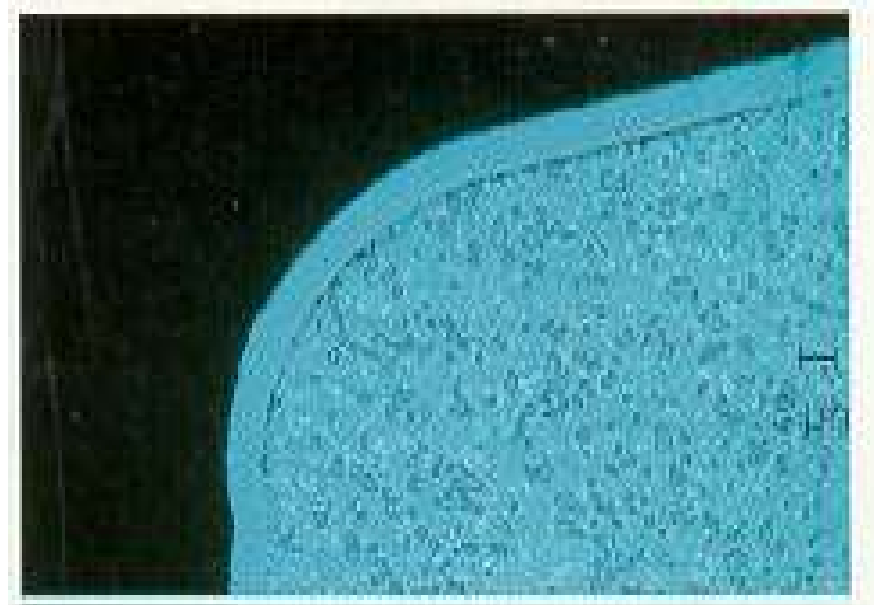
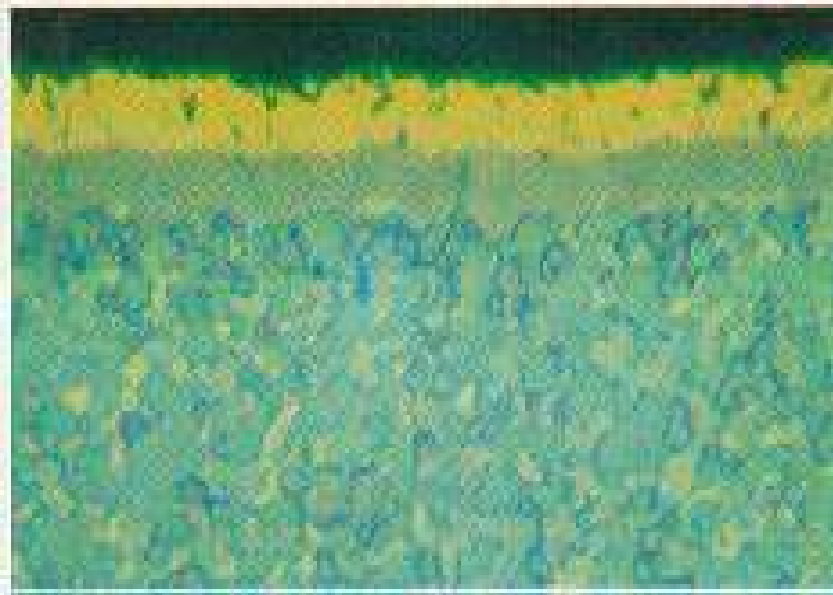
- Grande dureza, baixa tendência à difusão e à adesão, boa resistência a quente
  - Apropriados para o acabamento de aços (torneamento e fresamento)
-

## Metais Duros Revestidos

- Substrato tenaz com revestimento duro (TiC, TiN, Ti(C,N),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ...), combinando-se assim uma alta resistência a choques com alta resistência a desgaste (maior vida de ferramenta).
- É freqüente a deposição de várias camadas
- Processos de revestimento
  - CVD (chemical vapour deposition)
  - PVD (physical vapour deposition)
- Exigências aos revestimentos
  - Espessura regular da camada sobre a face e flancos
  - Composição química definida
  - Possibilidade de fabricação em grandes lotes



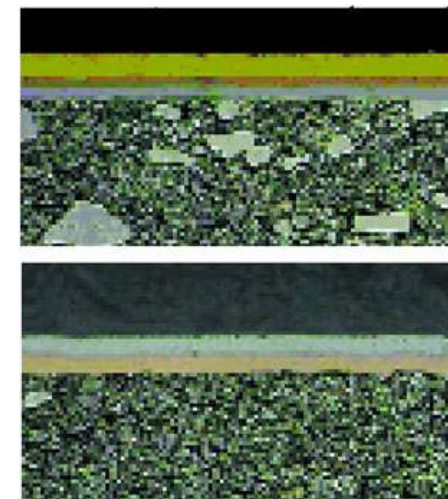
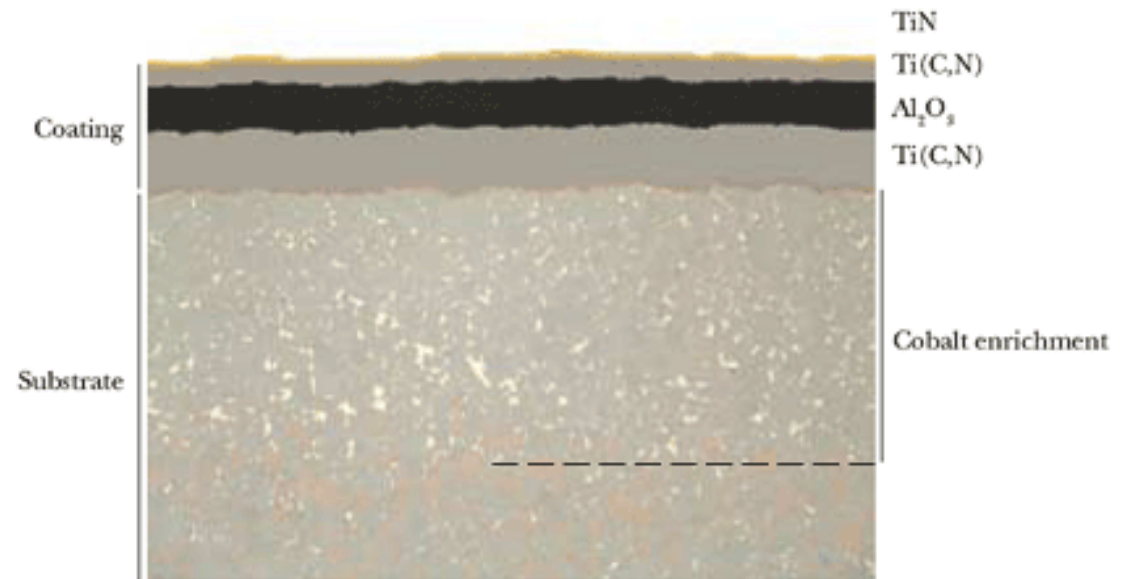
## Metais Duros Revestidos



## Metais Duros Revestidos

### → Principais revestimentos

- Carboneto de Titânio (TiC)
- Nitreto de titânio (TiN)
- Carbonitreto de titânio (Ti(C,N))
- Nitreto de alumínio-titânio ((Ti, Al)N)
- Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Camadas de diamante

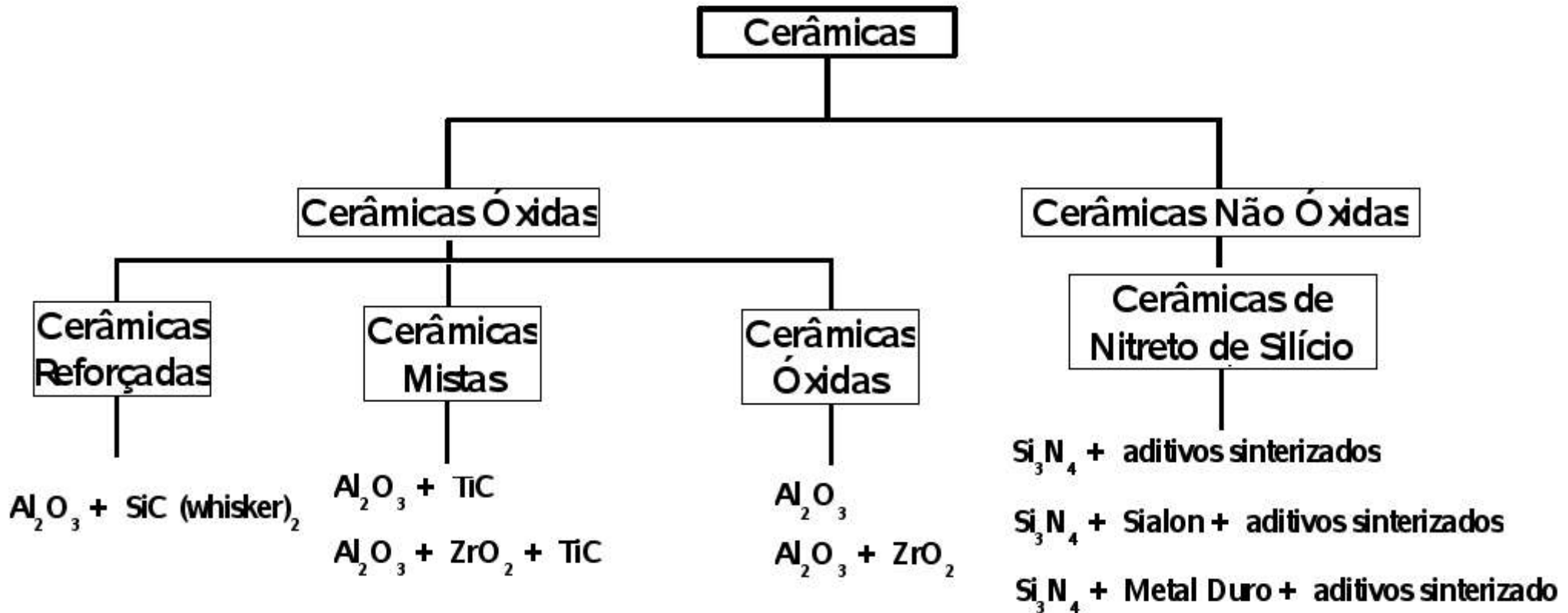


## **Áreas de aplicação dos Metais Duros**

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

# Cerâmicas de Corte

## Classificação das cerâmicas de corte



## **Cerâmicas de Corte**

### **Generalidades**

- Materiais de importância crescente
  - Alta resistência à compressão
  - Alta estabilidade química
  - Limitações na aplicação devido ao comportamento frágil e à dispersão das propriedades de resistência mecânica
  - Indispensável em áreas como fabricação de discos de freio
  - Melhoria constante na qualidade
  - Empregada na usinagem de aços e ferros fundidos
  - Altas velocidades de corte, altas potências de acionamento
  - Exigem máquinas rígidas e proteção ao operador
-



## **Cerâmicas de Corte**

### **→ Propriedades e características de cerâmicas**

- Resistentes à corrosão e às altas temperaturas
  - Elevada estabilidade química (boa resistência ao desgaste)
  - Resistência à compressão
  - Materiais não-metálicos e inorgânicos
  - Ligação química de metais com não metais
  - Podem ser óxidas ou não óxidas
-

## Cerâmicas óxidas

→ Cerâmicas à base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$



## Cerâmicas óxidas

### → Cerâmicas à base de $\text{Al}_2\text{O}_3$

- Surgiram a partir do final dos anos 30
  - Tradicional – cerâmica branca
  - Percentual de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  maior que 90% (cor branca)
  - $\text{Al}_2\text{O}_3$  + óxido de zircônio finamente distribuído
  - Torneamento de desbaste e acabamento de FoFo cinzento, aços cementados, aços temperados e extrudados
  - Apresentam alta dureza a quente
  - Têm pouca resistência à flexão
  - Extremamente sensíveis a choques térmicos (usinagem a seco)
  - Empregadas em ferros fundidos e aços de alta resistência
-

## Cerâmicas óxidas

### → Cerâmicas mistas

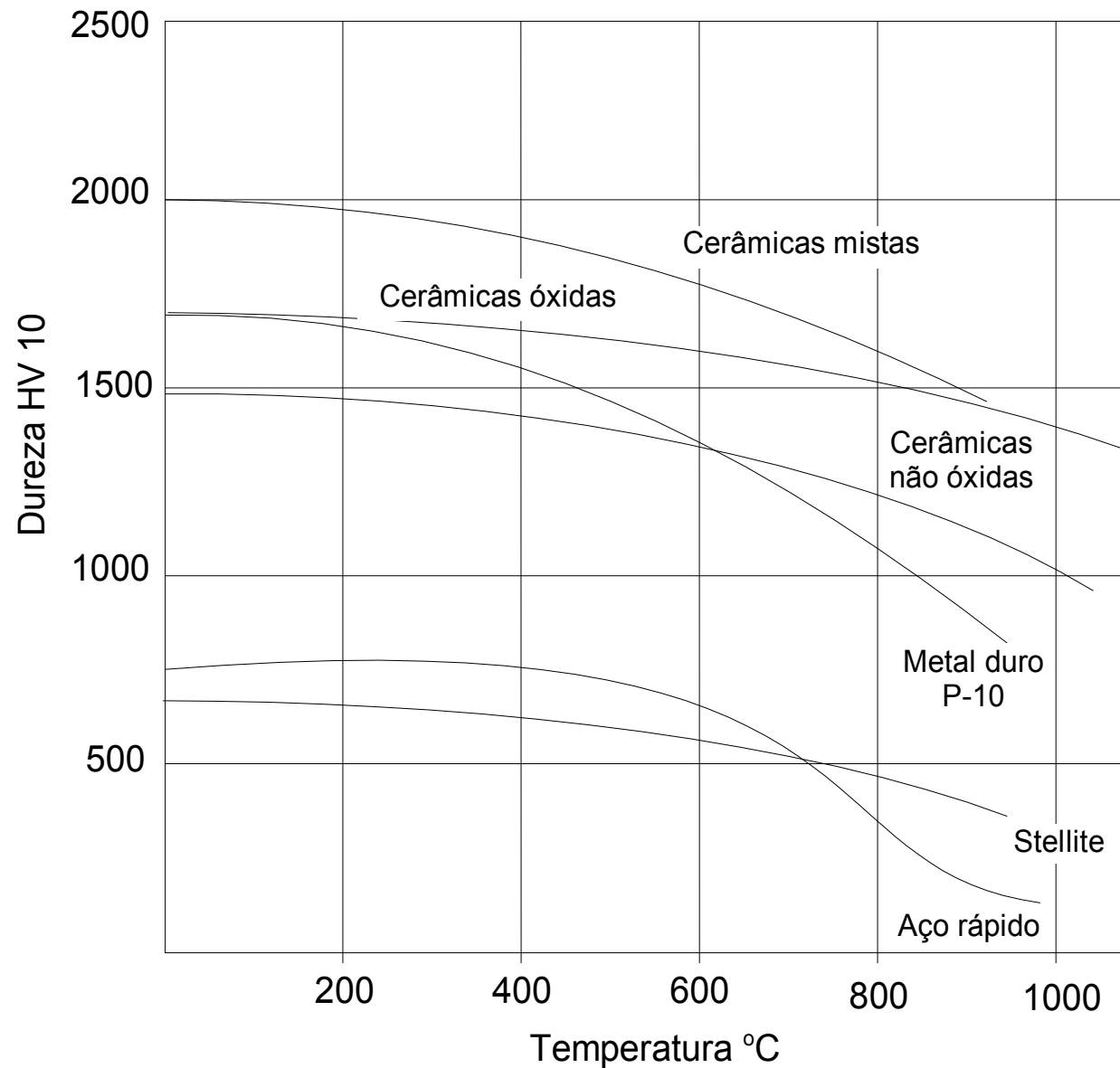
- Teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  menor que 90% (cor escura)
  - Contém de 5 a 40% de TiC e/ou TiN
  - Mais tenaz que cerâmica óxida e com maior resistência de canto e gume
  - Mais dura e mais resistente à abrasão que cerâmica óxida
  - Mais resiste a variações de temperatura que cerâmica óxida
  - Grãos finos => melhor tenacidade, resistência ao desgaste e resistência de quina
  - Maior dureza que as óxidas, maior resistência a choques térmicos
  - Torneamento e fresamento leves de FoFo cinzento
  - Usinagem de aços cementados e temperados
-

## **Cerâmicas óxidas**

### **→ Cerâmicas de corte reforçadas com whiskers**

- Whiskers – cristais unitários em forma de agulhas com baixo grau de imperfeição no retículo cristalino
  - A base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com aproximadamente 20 até 40% de whiskers de carboneto de silício (SiC)
  - Objetivo de melhorar as propriedades de tenacidade (aumento de 60%).
  - Boa resistência a choques térmicos - corte com fluidos
-

# Dureza a Quente de Diversos Materiais de Ferramentas



## Cerâmicas não Óxidas

**Definição:** São cerâmicas a base de carbonetos, nitretos, boretos, silicatos, etc.

- Principalmente a base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$
  - Maior tenacidade e resistência a choques térmicos quando comparadas às cerâmicas óxidas;
  - Elevada dureza a quente e resistência ao calor
-

## **Cerâmicas não Óxidas**

### **→ Campos de aplicação de cerâmicas de corte não-óxidas**

- usinagem do Ferro Fundido Cinzento
  - torneamento de discos de freio
  - desbaste de ligas à base de níquel (grupos II e III)
  - Possuem alta afinidade com ferro e oxigênio (desgastam-se rapidamente na usinagem de aço - sem aplicações);
    - Desgaste na superfície de saída;
    - Gume de corte com tendência ao arredondamento
-



## Cerâmicas de Corte Não Óxidas

### → Divisão em relação à composição química

I: Nitreto de silício + materiais de sinterização;

II: Nitreto de Silício + fases cristalinas + materiais de sinterização;

- Sialone - o  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pode conter até 60 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na mistura sólida

III: Nitreto de silício + materiais duros + materiais de sinterização.

-  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com propriedades influenciadas por materiais como TiN,

TiC, óxido de zircônio e *whisker* - SiC

---

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

- Nitreto de Boro Cúbico – CBN
- Diamante
- Nitruro de Boro

## Nitrero de Boro - CBN



## Nitrero de Boro - CBN

### → Características

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

## **Nitrero de Boro - CBN**

### **→ Características**

- Segundo material de maior dureza conhecido
  - Obtido sinteticamente (primeira síntese em 1957), com transformação de estrutura hexagonal para cúbica (pressão + temperatura)
  - Quimicamente mais estável que o diamante (até 2000 graus)
  - Grupos de ferramentas:
    - CBN + fase ligante (PCBN com alto teor de CBN);
    - CBN + carbonetos (TiC + fase ligante);
    - CBN + HBN + fase ligante (maior tenacidade).
-

## **Nitrero de Boro - CBN**

### **→ Campo de aplicações**

- Aços temperados com dureza  $> 45$  HRC:
    - Torneamento, fresamento, furação;
  - Aço-rápido (ferramentas de corte);
  - Aços resistentes a altas temperaturas;
  - Ligas duras (Ni, Co, ...);
  - Emprego em operações severas (corte interrompido), tanto quanto em operações de desbaste e acabamento.
  - Usinagem com ferramentas de geometria não-definida:
    - Possibilidade de usinagem de aços e ferros fundidos, que não são usinados com diamante em função da afinidade química.
-

# Diamante

## → Características

- Material de maior dureza encontrado na natureza
- Pode ser natural ou sintético
- Monocristalino (anisotrópico) ou policristalino (isotrópico)

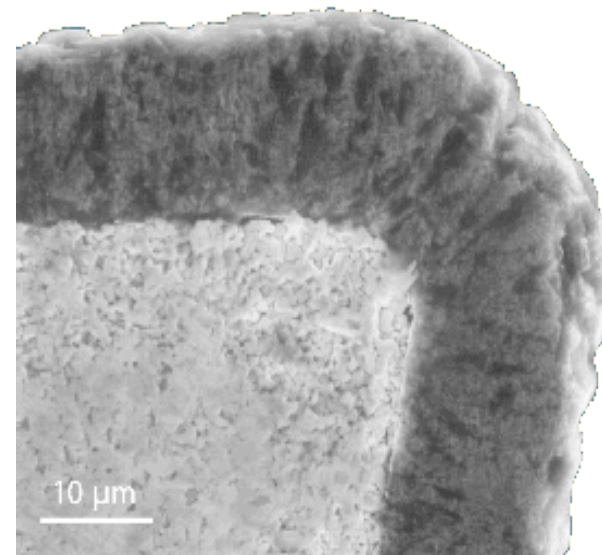
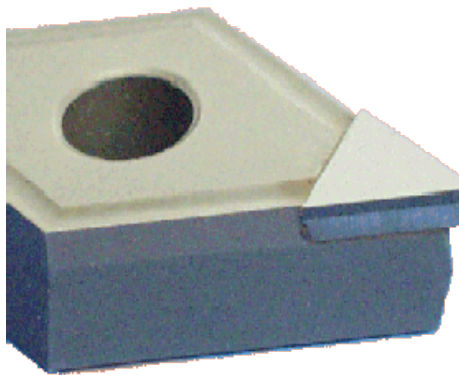
## – Diamante policristalino

- Primeira síntese em 1954 (GE)
  - Síntese sob 60 a 70 kbar, 1400 a 2000 graus C
  - Cobalto é usado como ligante
  - Substitui metal-duro e diamante monocristalino, em alguns casos
-

# Diamante

## → Formas de utilização

- policristalino PKD - aglomerado de diamantes
- monocristalino
- revestimento





## **Diamante**

### **→ Campo de aplicação**

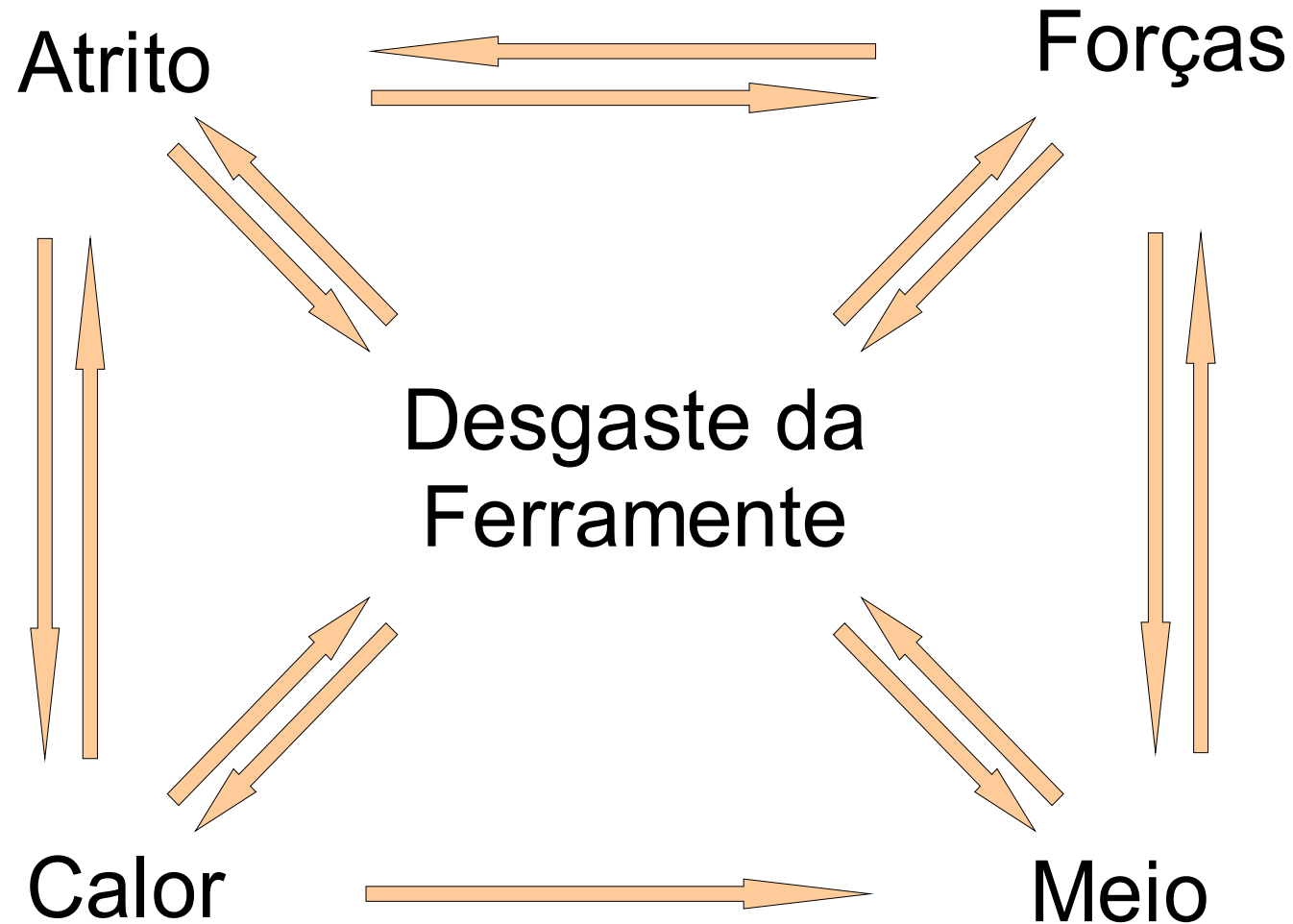
- Usinagem de ferro e aço não é possível (afinidade Fe-C);
  - Usinagem de metais não ferrosos, plásticos, madeira, pedra, borracha, etc.
  - Usinagem de precisão e ultraprecisão
  - Pequenas  $a_p$  e  $f$ , tolerâncias estreitas (baixa resistência a flexão das ferramentas)
  - Emprego de altas velocidades de corte;
  - Tempos de vida de até 80 vezes maior que os das ferramentas de metal duro;
-

# **Revestimentos de Ferramenta Monocortante**

---

## Revestimento de Ferramentas

### Conseqüências do processo sobre a ferramenta

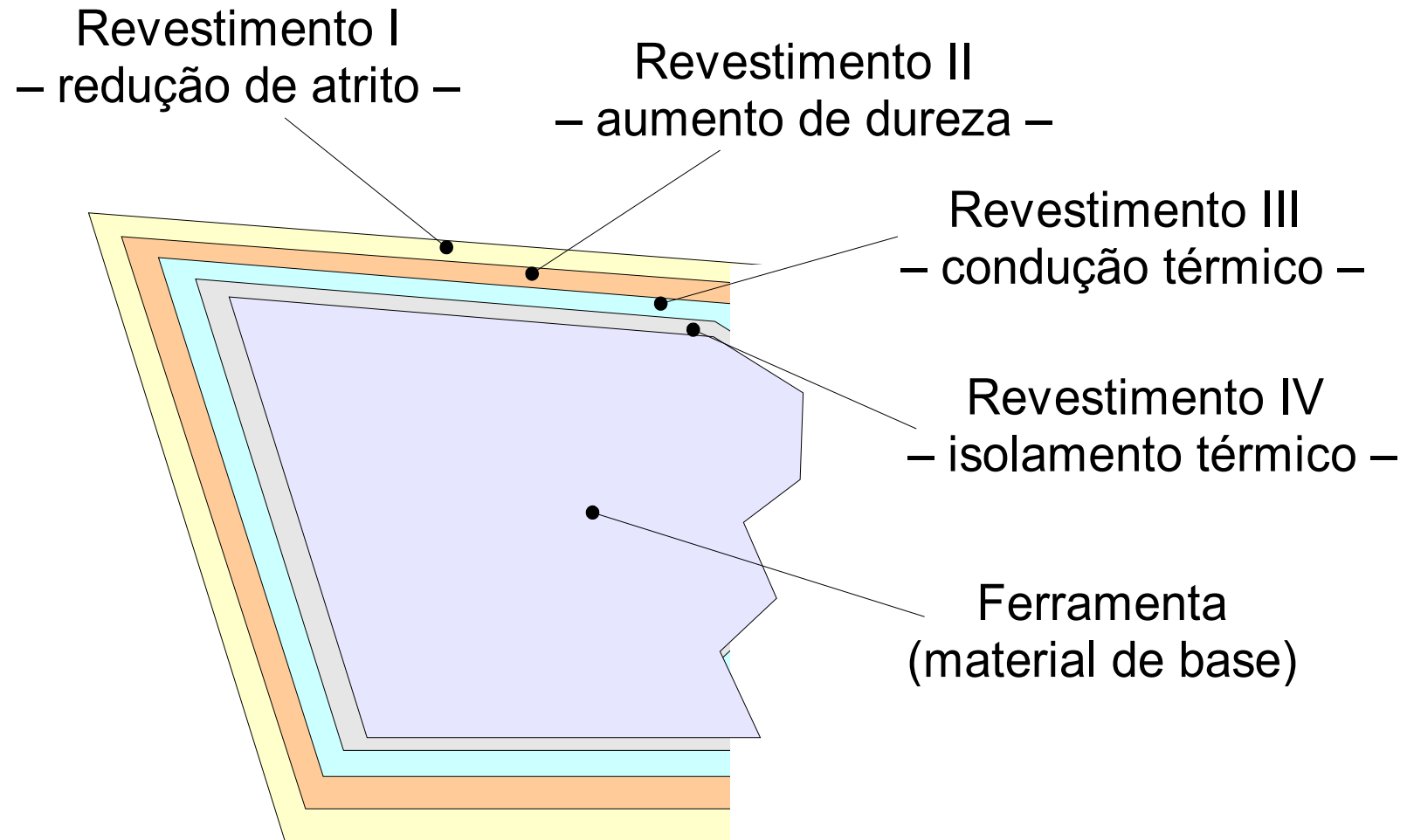


## **Revestimento de Ferramentas**

### **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
-

## Revestimento de Ferramentas



## **Revestimento de Ferramentas**

### **→ Principais propriedades das camadas de revestimento**

#### **Carboneto de titânio (TiC)**

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

#### **Nitreto de titânio (TiN)**

- estabilidade termodinâmica
  - baixa tendência à difusão
-

## **Revestimento de Ferramentas**

### **→ Principais propriedades das camadas de revestimento**

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

- boa resistência à oxidação
- boa dureza à quente

#### **Óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )**

- boa resistência à abrasão
  - boa resistência à oxidação
-

## **Revestimento de Ferramentas**

### **→ Processos de revestimentos de ferramentas**

Dois processos básicos

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



## **Revestimento de Ferramentas**

### **→ Processo CVD**

#### **- Características Gerais**

- Reações químicas na fase gasosa em alto vácuo (0,01 até 1bar)
  - Os produtos da reação molham o substrato
  - Deposição de materiais como TiC, TiN,  $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_y)\text{HfN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , AlON separadamente ou em camadas
  - Revestimento de peças de geometria complexa
-

## **Revestimento de Ferramentas**

### **→ Processo CVD Variações do processo**

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

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

## **Revestimento de Ferramentas**

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

Aplicação de Ti(C,N) de várias formas

### **Vantagens em relação ao HT - CVD:**

- Menor solicitação térmica para os mesmos modos de agregação
  - Diminui o risco de descarbonetação - formação de fases frágeis do substrato
  - Ocorrem menos trincas nas ferramentas e a velocidade de formação de rasgos é menor
-

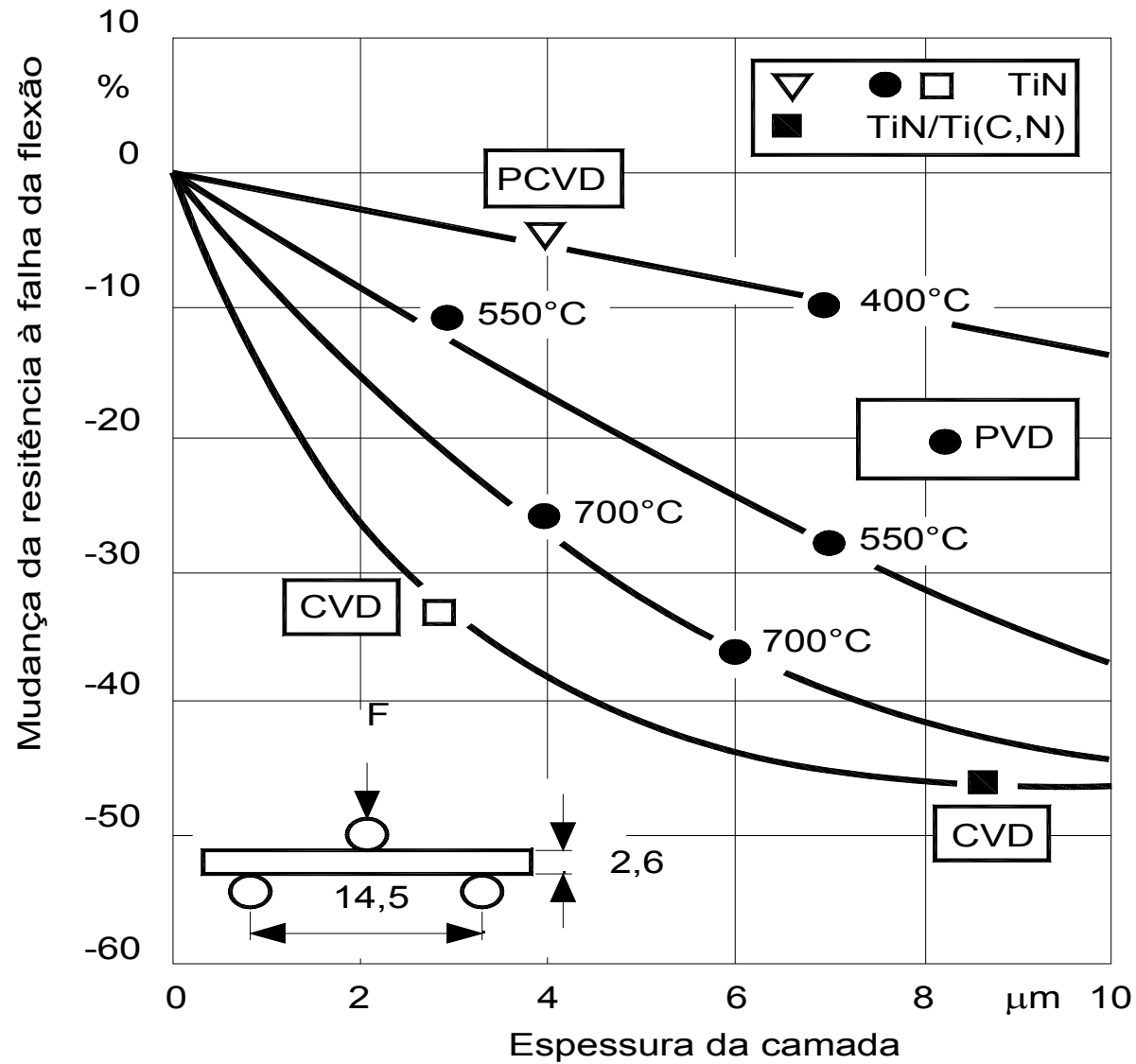
## **Revestimento de Ferramentas**

### **→ Processo CVD Variações do processo**

#### **P - CVD (Plasma CVD - 450 - 650 °C)**

- A temperatura não é suficiente para que ocorram reações químicas na fase líquida
  - Adição de plasma pulsante para se obter energia adicional
  - Camadas de TiN, TiC, Ti(C,N), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
  - Propriedades do substrato inalteradas
-

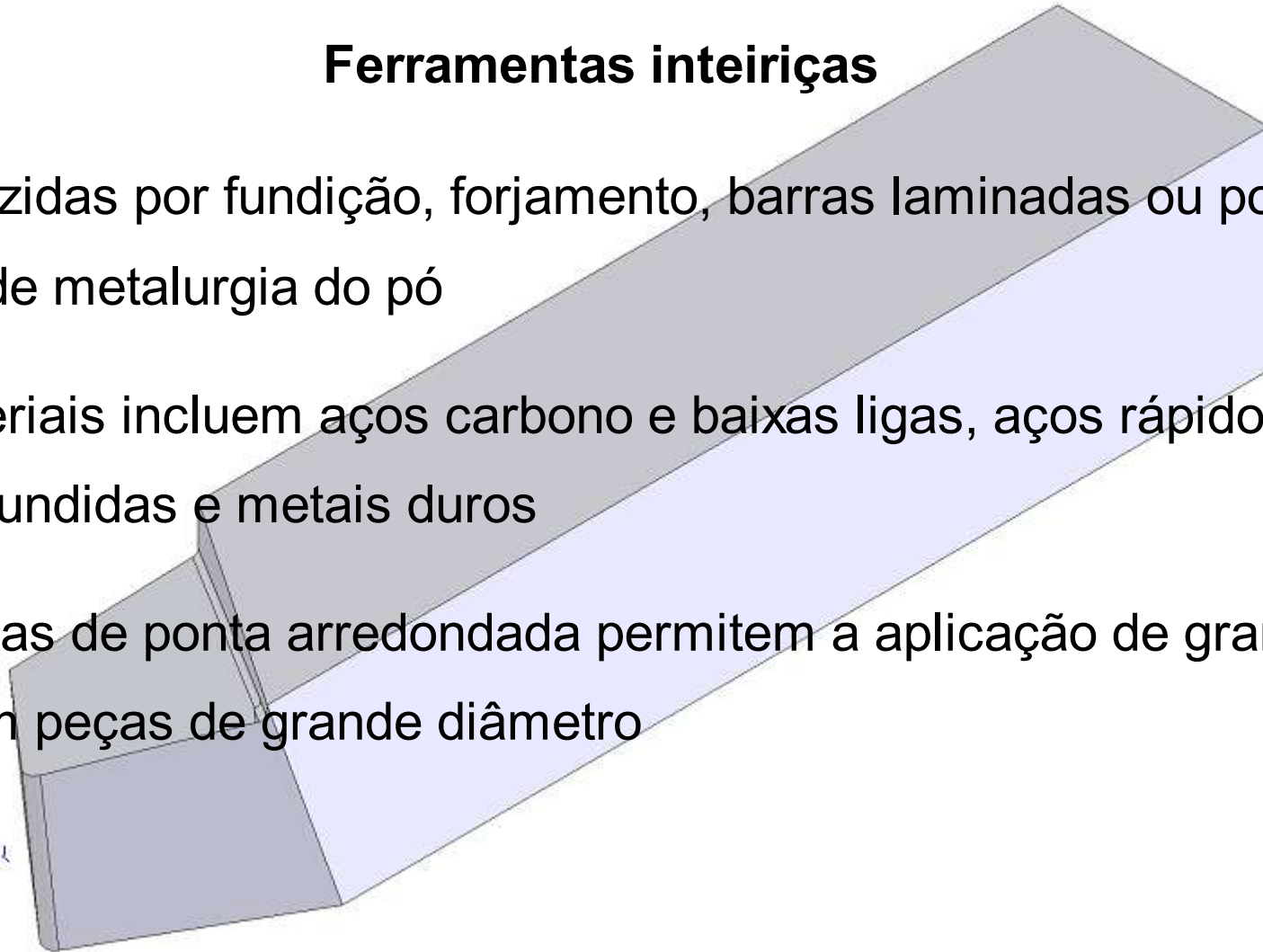
## Modificação da constituição da camada



## Considerações gerais sobre Ferramentas de corte

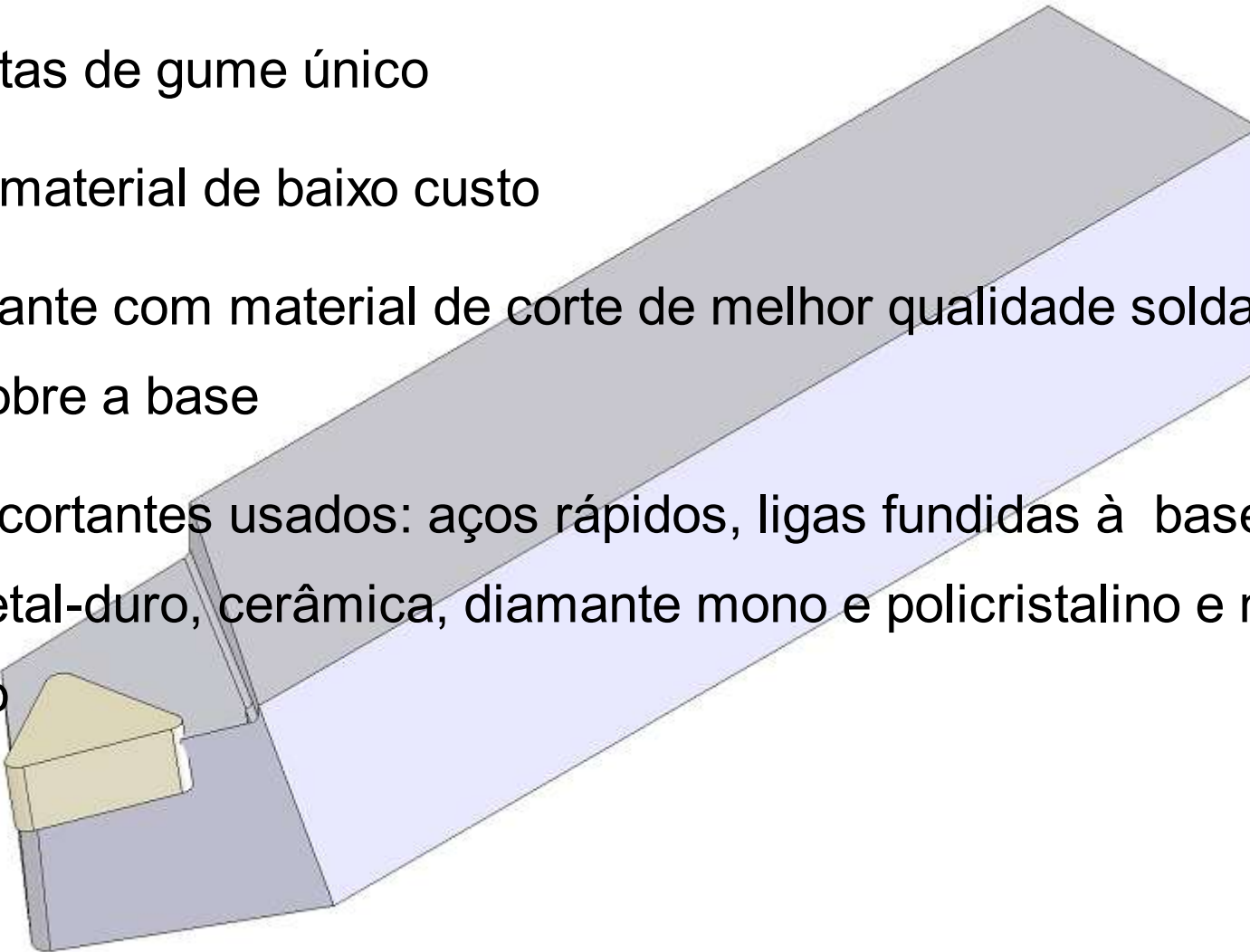
### Ferramentas inteiriças

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

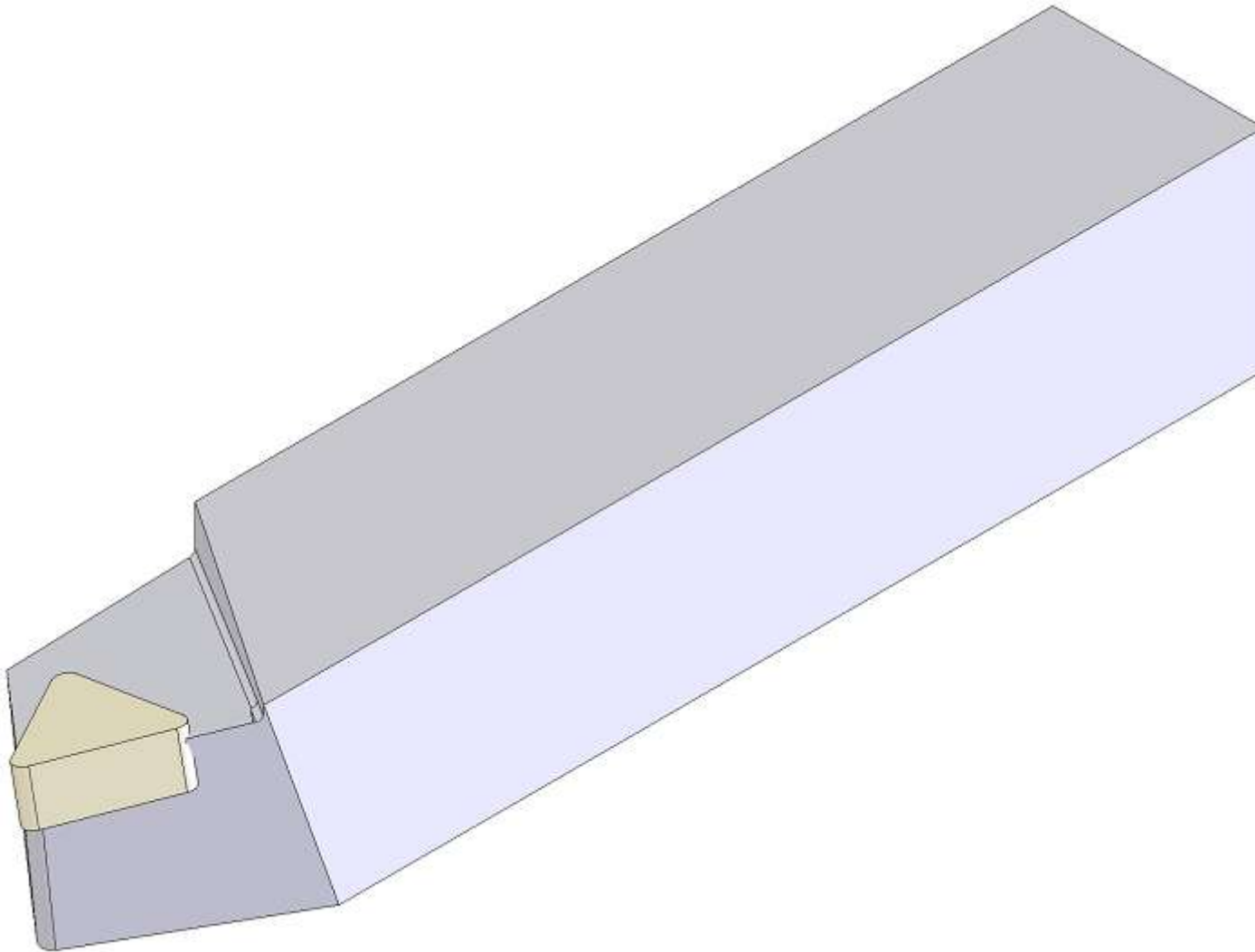


## **Ferramentas com insertos soldados**

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



## Ferramentas com insertos soldados

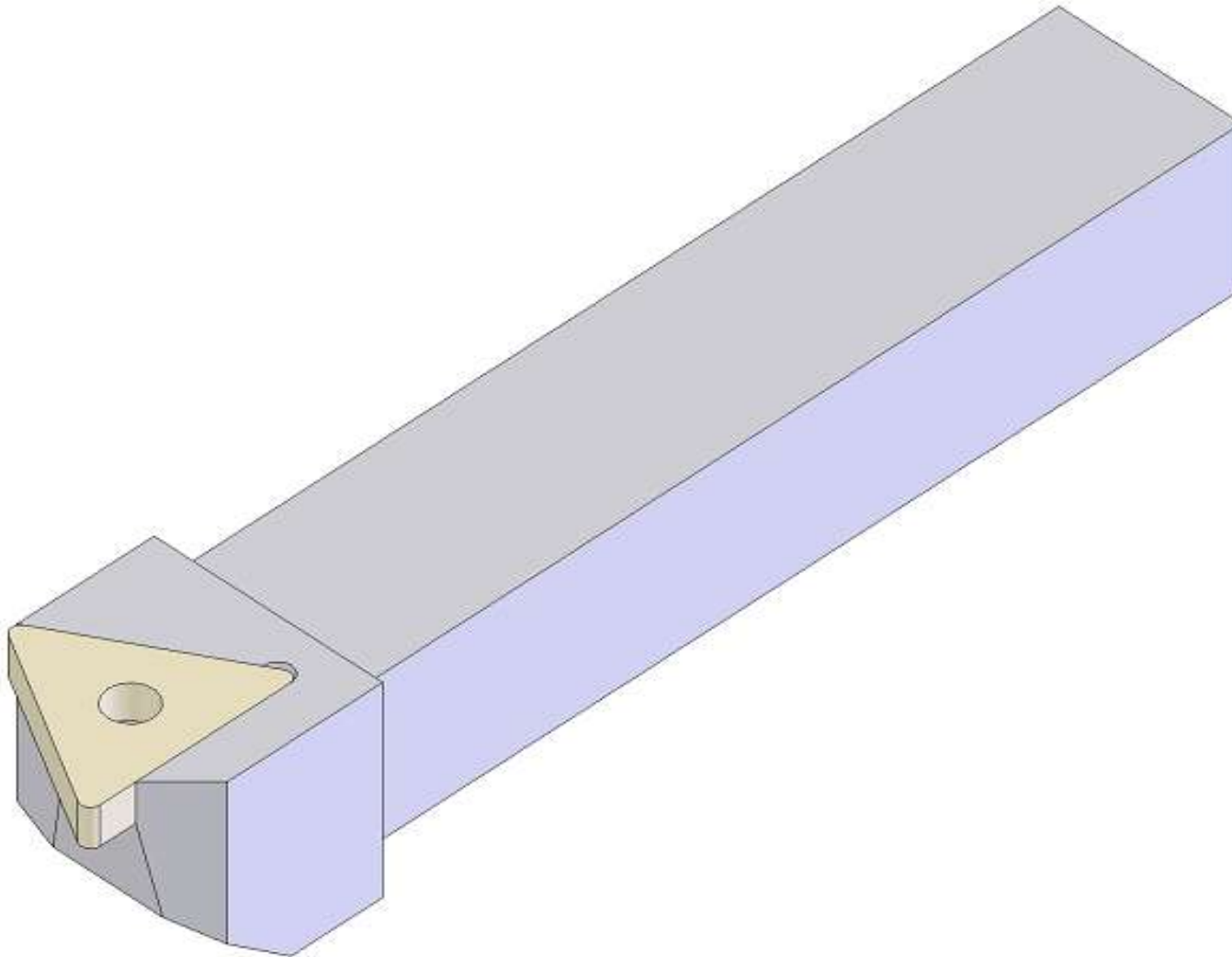




## **Ferramentas com insertos intercambiáveis**

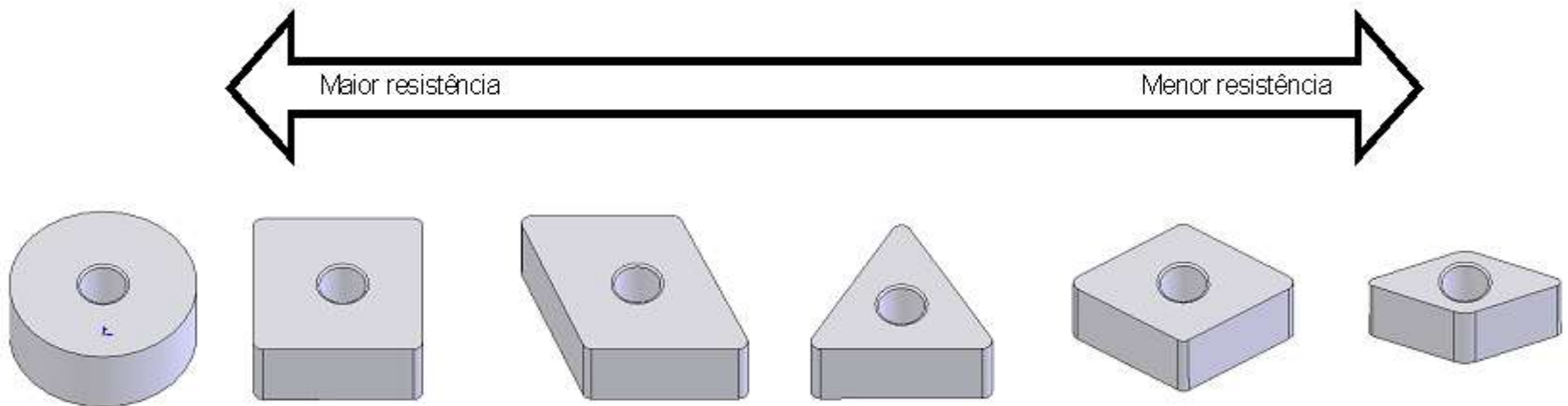
- Ferramentas mais largamente utilizadas em operações de torneamento
  - Insertos de metal-duro predominam, mas insertos de aços rápidos, cerâmicas, diamante e CBN são também usados para muitas aplicações
  - Sistema de identificação normalizado, com base nas características mecânicas e geométricas dos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

## **Ferramentas com insertos intercambiáveis**



## Forma dos insertos

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



## **Geometria dos insertos**

### **Insertos com ângulo de saída negativo:**

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

### **Insertos com ângulo de saída positivo:**

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

## **Geometria dos insertos**

### **Insertos positivo-negativos:**

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

## **Tamanho dos insertos**

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

## **Espessura dos insertos**

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

## **Raio de quina dos insertos**

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



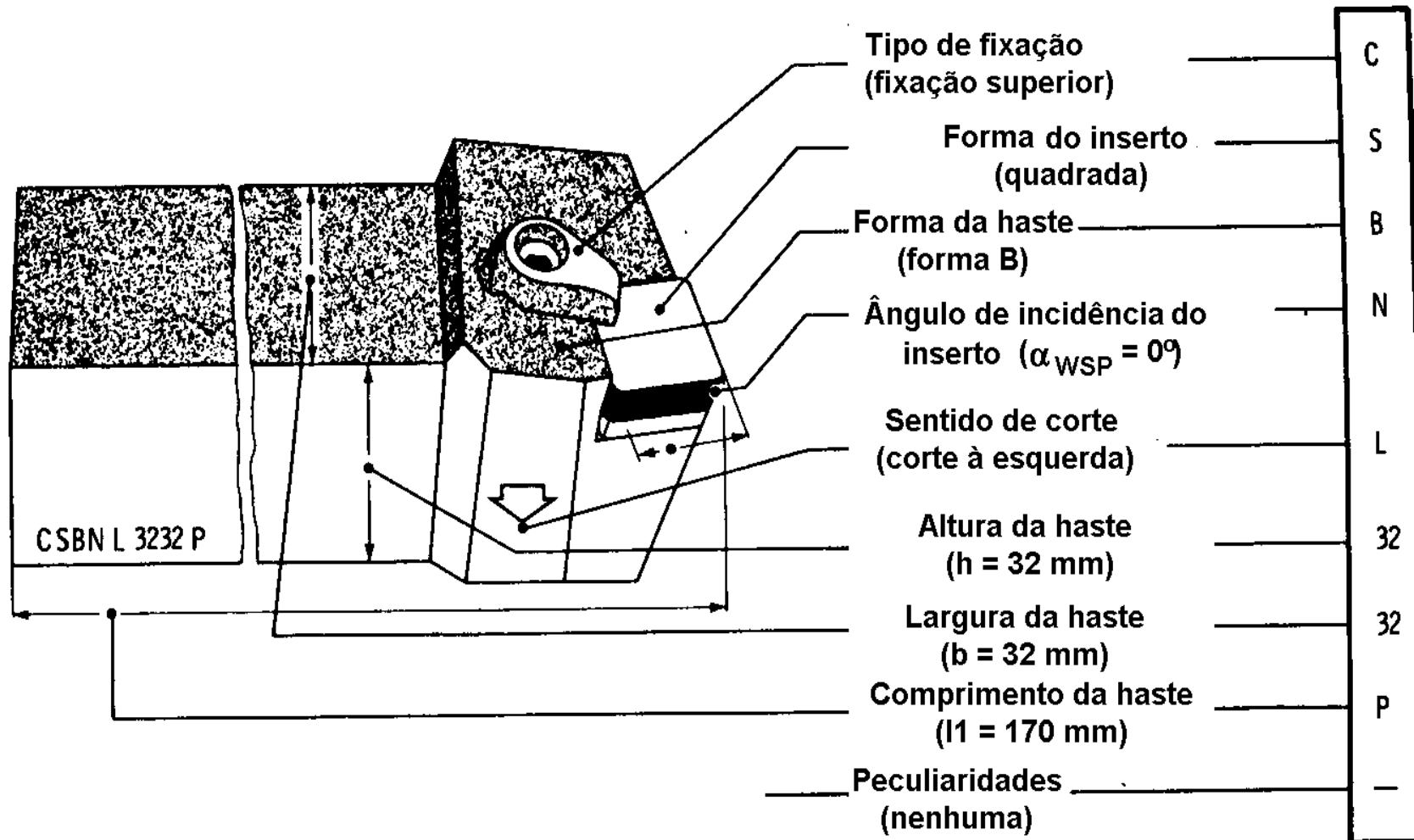
## **Tolerância dos insertos**

Define a precisão de acoplamento

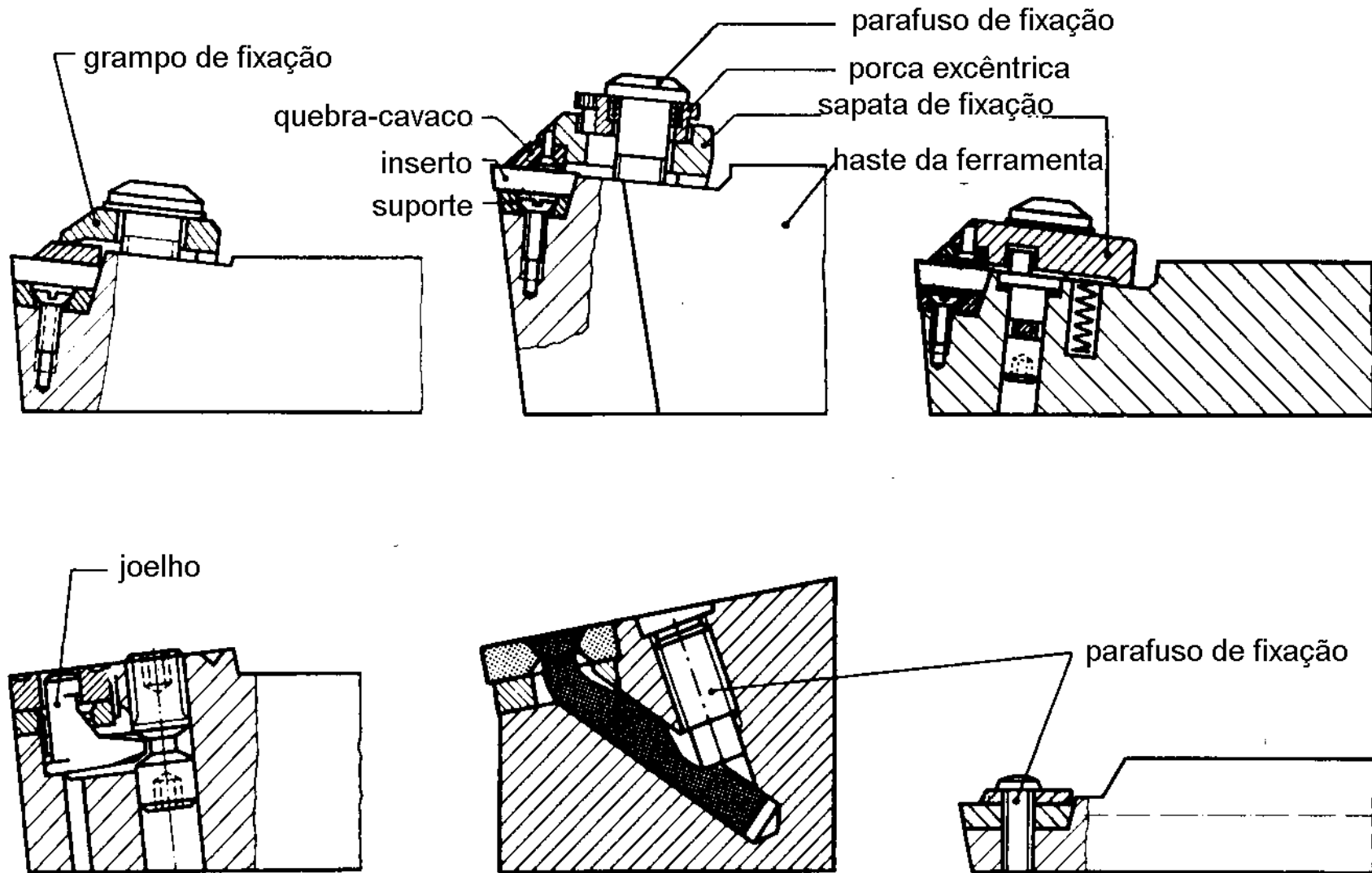
Insertos padrão estão disponíveis em 3 classes de tolerância:

- usual:  $\pm 0,1$  a  $0,3$  mm
  - precisão:  $\pm 0,03$  a  $0,05$ mm
  - alta precisão:  $\pm 0,013$  mm
-

# Ferramenta de torneamento com inserto intercambiável



## Sistema de fixação para insertos intercambiáveis



## Escolha da geometria da ferramenta

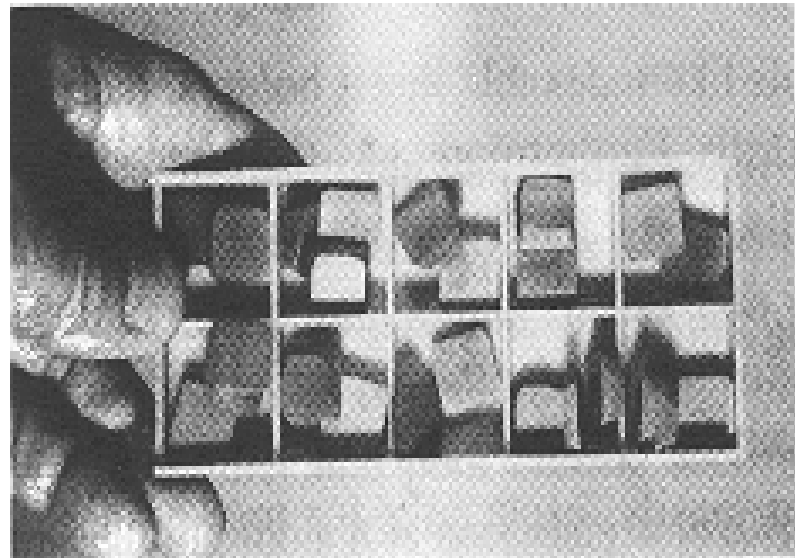
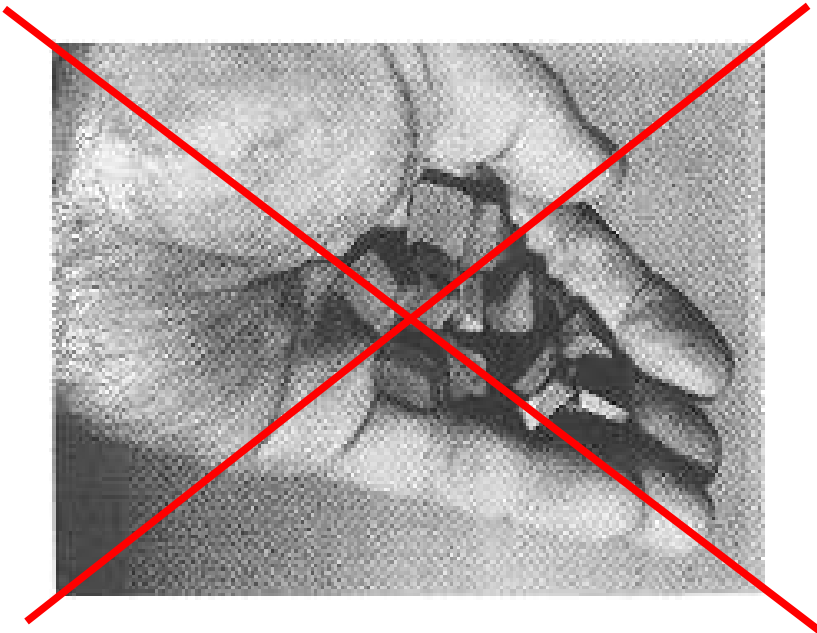
- Material da ferramenta
- Material da peça
- Condições de corte
- Geometria da peça

## Geometrias usuais de ferramentas de corte

Geometria da Ferramenta Material da Ferramenta	Ângulo de saída $\gamma$	Ângulo de Incidência $\alpha$	Ângulo de Inclinação $\lambda$	Ângulo de Posição $\chi$	Ângulo de Quina $\varepsilon$	Raio da Quina $r_\varepsilon$
Aço Rápido (HSS)	-6° até + 20°	6° até 8°	-6° até +6°	10° até 100°	60° até 120°	0,4 até 2mm
Metal Duro	-6° até + 15°	6° até 12°				

## **Cuidados com ferramentas de corte**

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



## **Manutenção e gerenciamento das ferramentas de corte**

- Limpeza
- Prevenção contra oxidação

## **Aplicação de tecnologia de grupo e manutenção de ferramentas de corte**

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