



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3301

- Processos convencionais de usinagem -
- Revisão dos Fundamentos -

2020.1



Divisão dos processos de fabricação - DIN8580 -



Processos primários - alteram as matérias primas, transformando-as em geometrias e formas básicas. Ex. fundição, laminação, forjamento

Processos secundários - alteram as geometrias e formas básicas, através da adição ou remoção de material.. Ex. Usinagem, estampagem, soldagem

Processos terciários - alteram as propriedades da peças de acordo com os requisitos de projeto e desempenho. Ex. Tempera, nitretação, pintura, texturização, outros



Divisão dos processos de fabricação - DIN8580 -

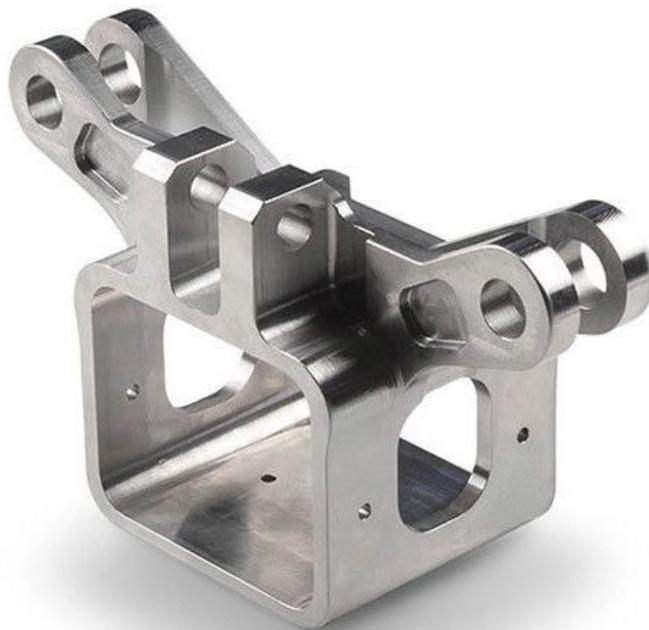


Definição da usinagem - segundo a norma DIN 8580, o termo usinagem aplica-se a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco.



Processos de usinagem

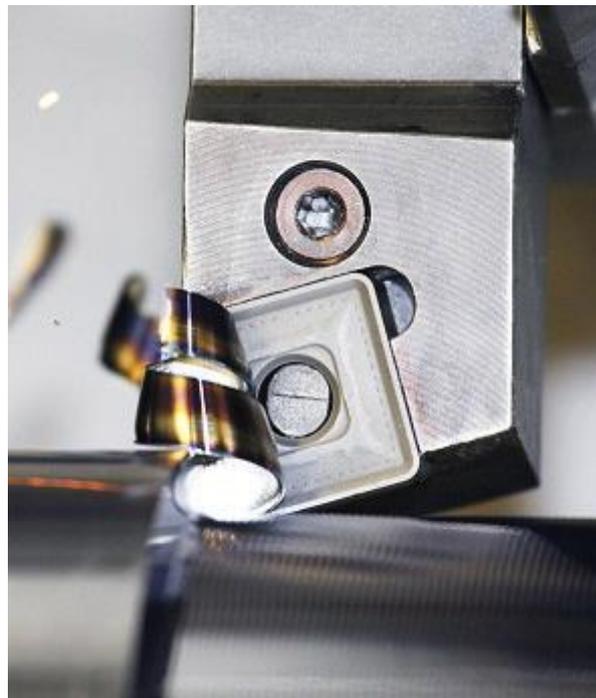
Usinagem - operação que confere à peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três, através da remoção de material sob a forma de cavaco.





Processos de usinagem

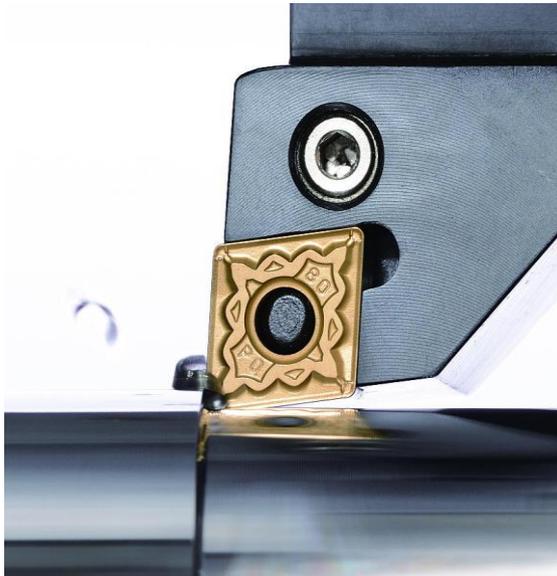
Princípio – com exceção dos processos não convencionais de usinagem, a remoção de material ocorre através da interferência entre ferramenta e peça. A ferramenta é constituída de um material de dureza e resistência muito superior ao material da peça





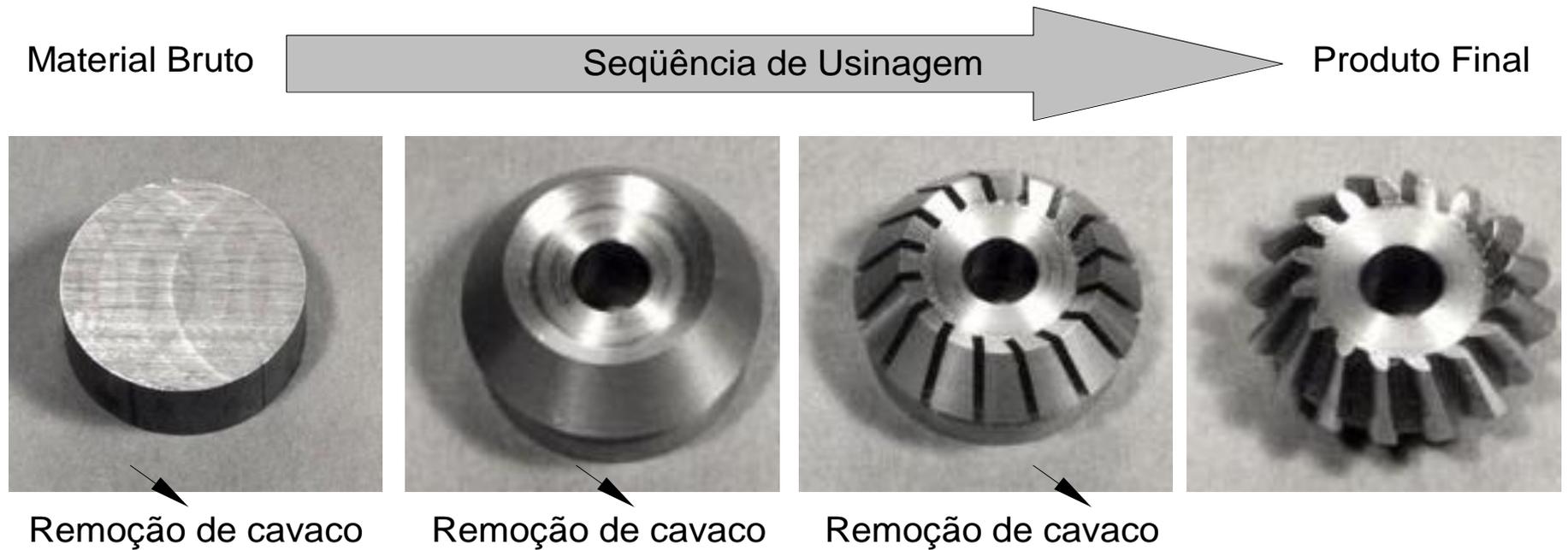
Processos de usinagem

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





Processos de usinagem

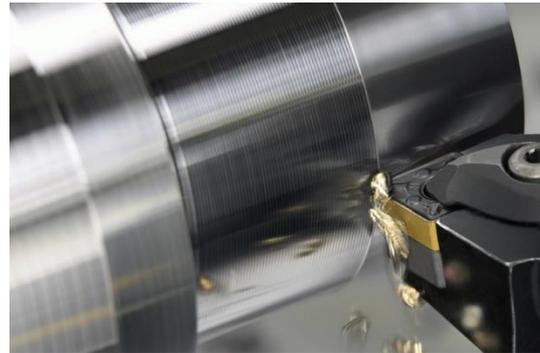




Limites dos processos de usinagem

Na peça

Segurança



Ecológicas



Ferramenta



Econômicas

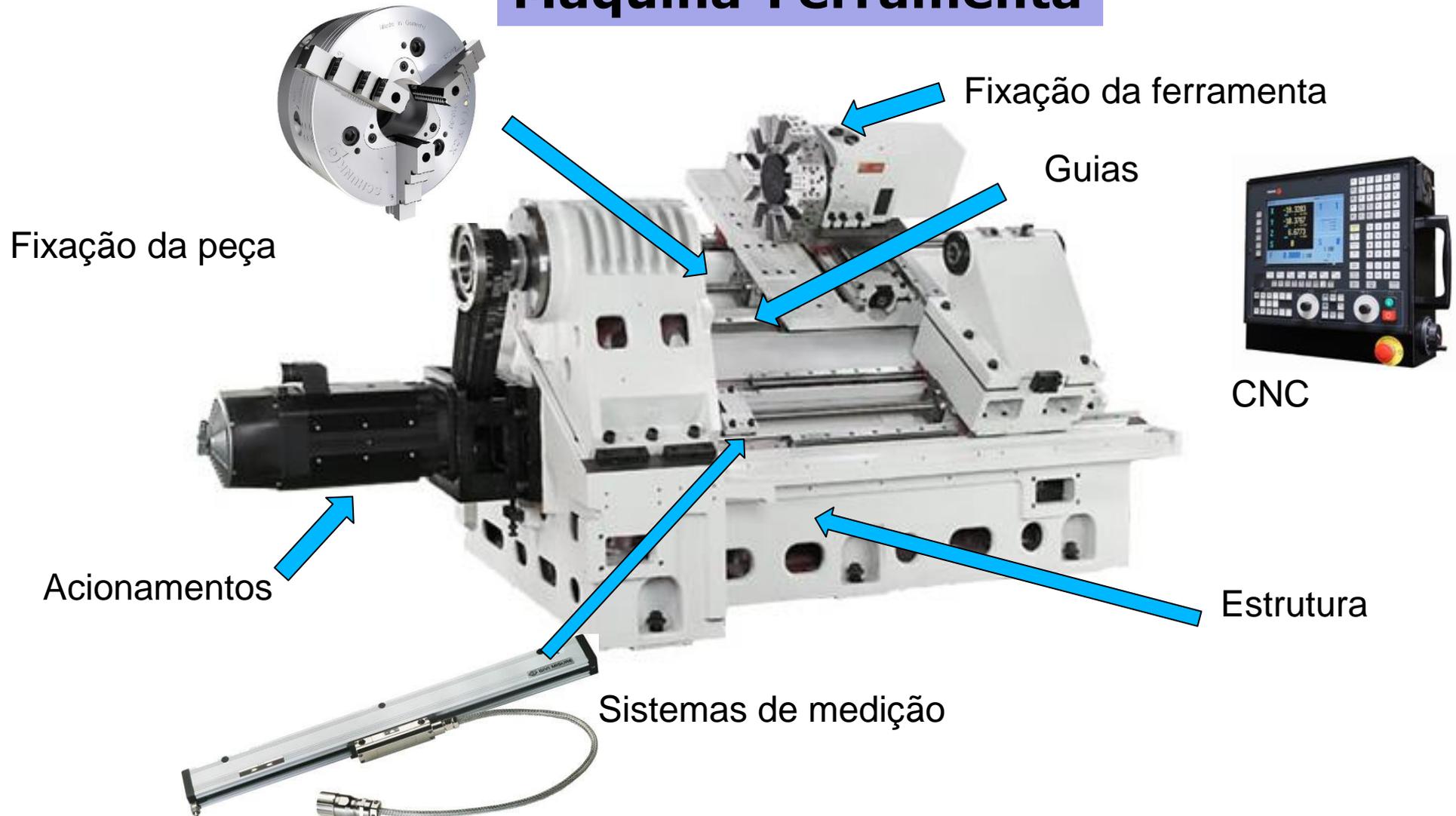


Peça



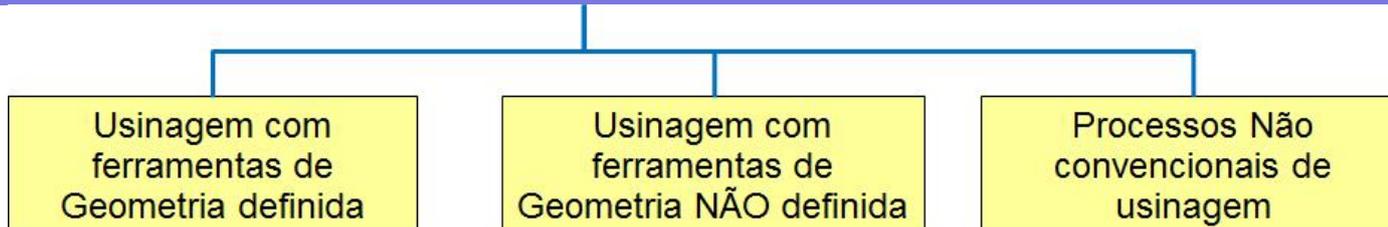
Limites dos processos de usinagem

Máquina-Ferramenta





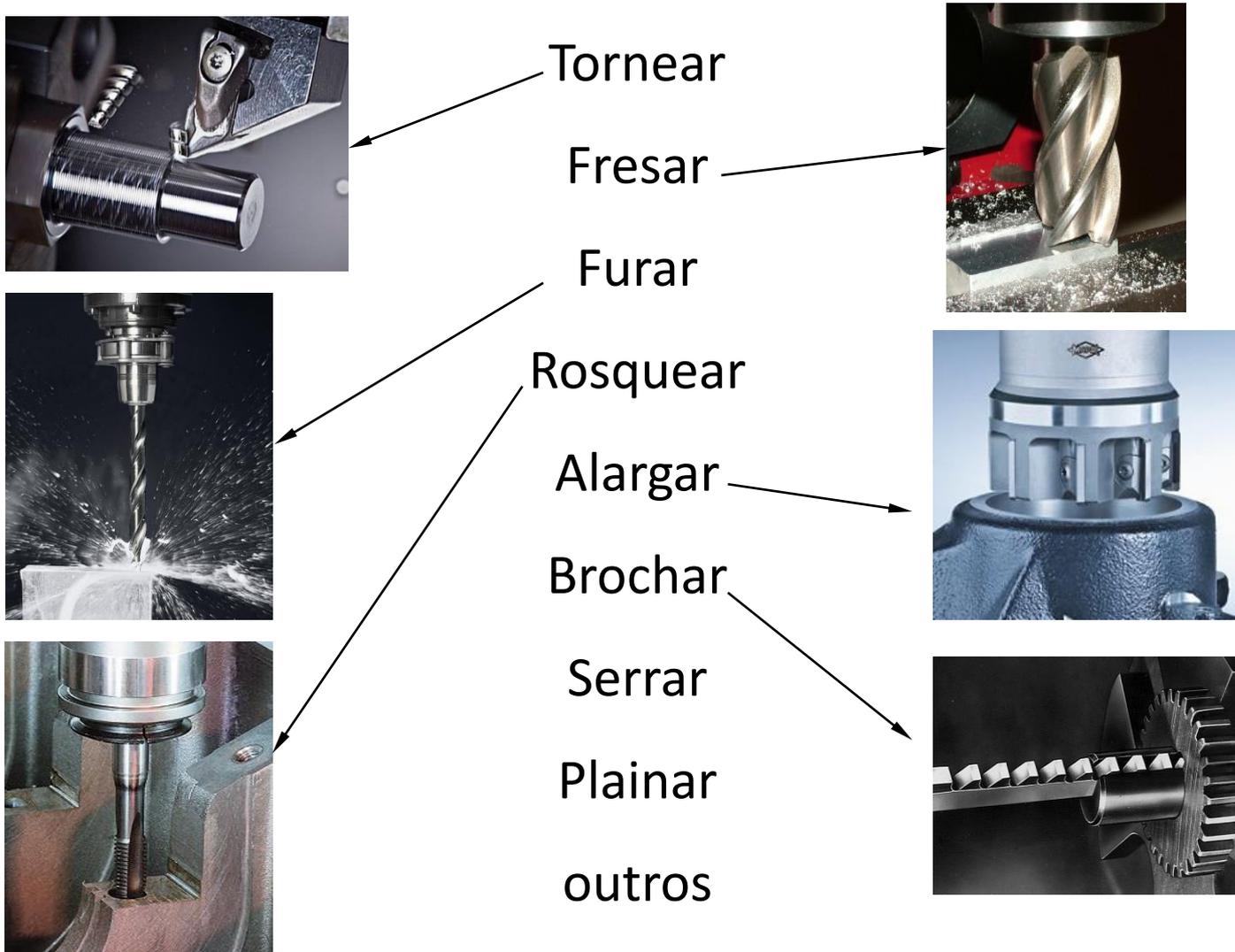
Divisão dos processos de fabricação





Divisão dos processos de fabricação

Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida





Divisão dos processos de fabricação

Usinagem com Ferramentas de Geometria não Definida



Retificar

Brunir

Lapidar

Lixar

Polir

Jatear

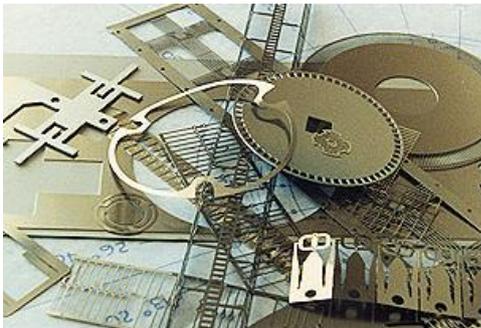
Tamborear, outros





Divisão dos processos de fabricação

Usinagem por Processos Não Convencionais



Remoção térmica

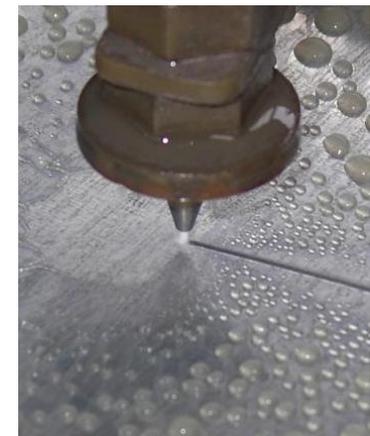
Remoção Química

Remoção Eletroquímica

Remoção por ultrassom

Remoção por jato d'água

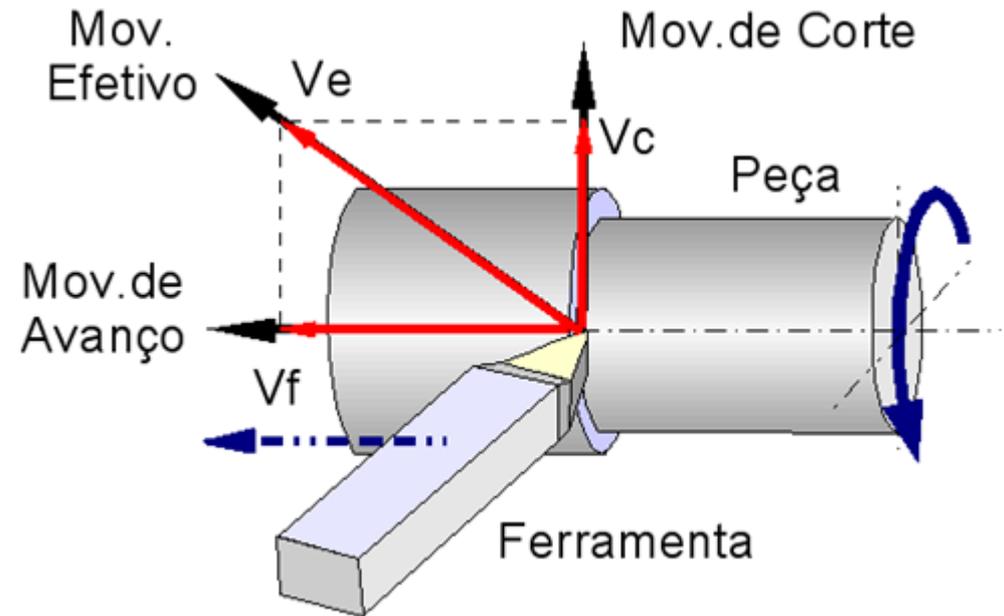
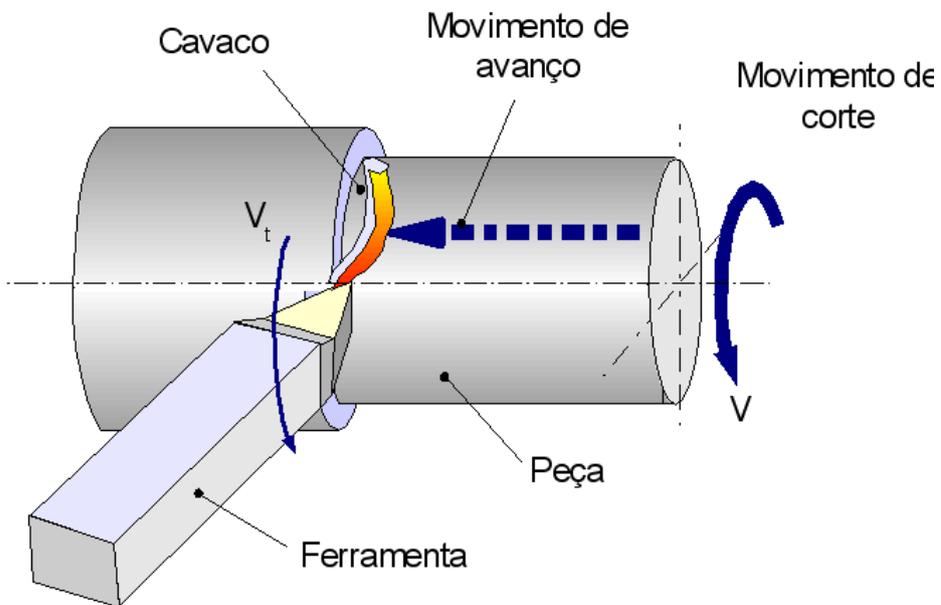
outros





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))

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

(Eq. 1)

→ Velocidade de Avanço (**V_f**)

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



Grandezas do processo de usinagem

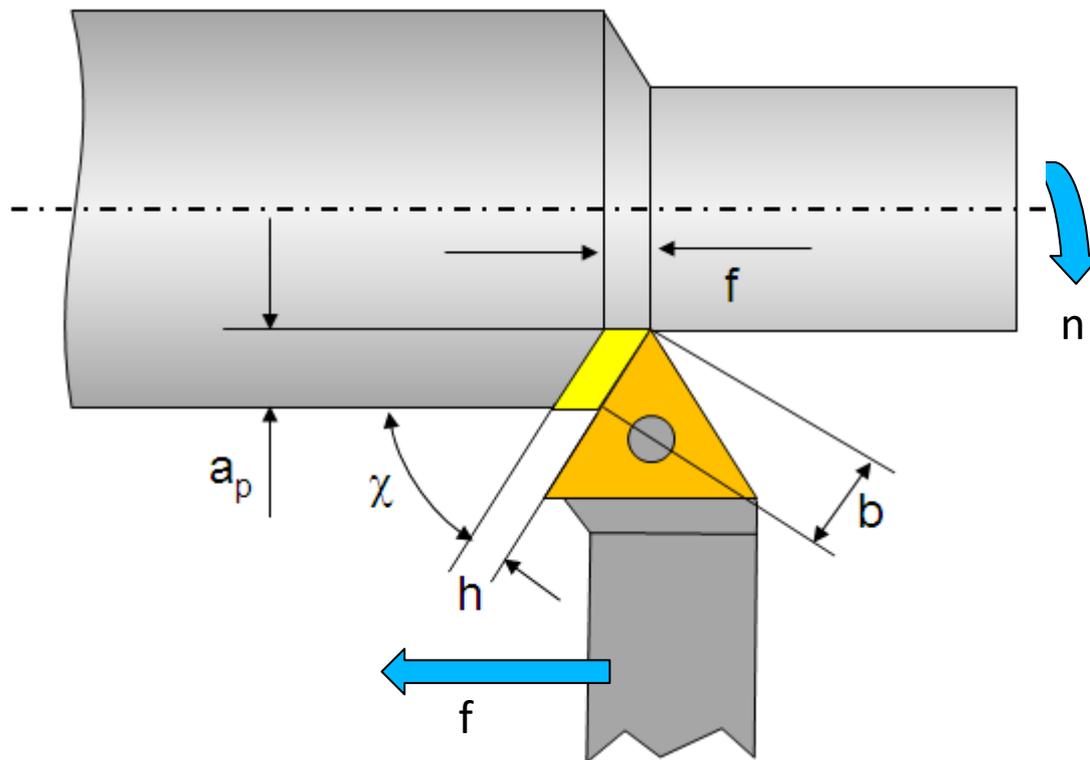
Velocidade de Corte (V_c)

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

- ⇒ V_c é um valor obtido experimentalmente
- ⇒ 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
- ⇒ V_c ainda depende da máquina-ferramenta, da geometria da peça, do tipo de dispositivo de fixação e da experiência do operador ou programador



Grandezas do processo de usinagem

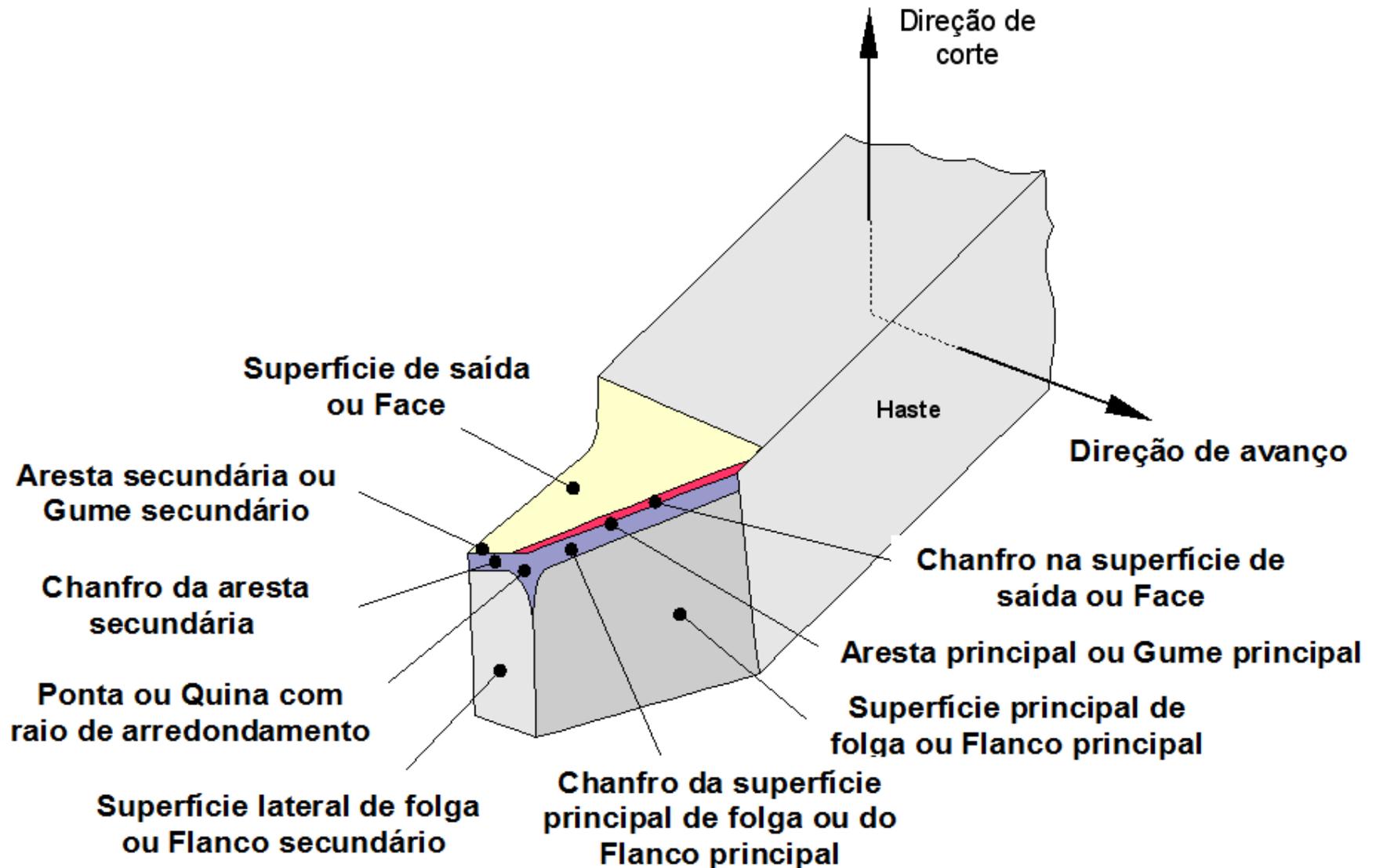


Onde:

- 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 $b * h$

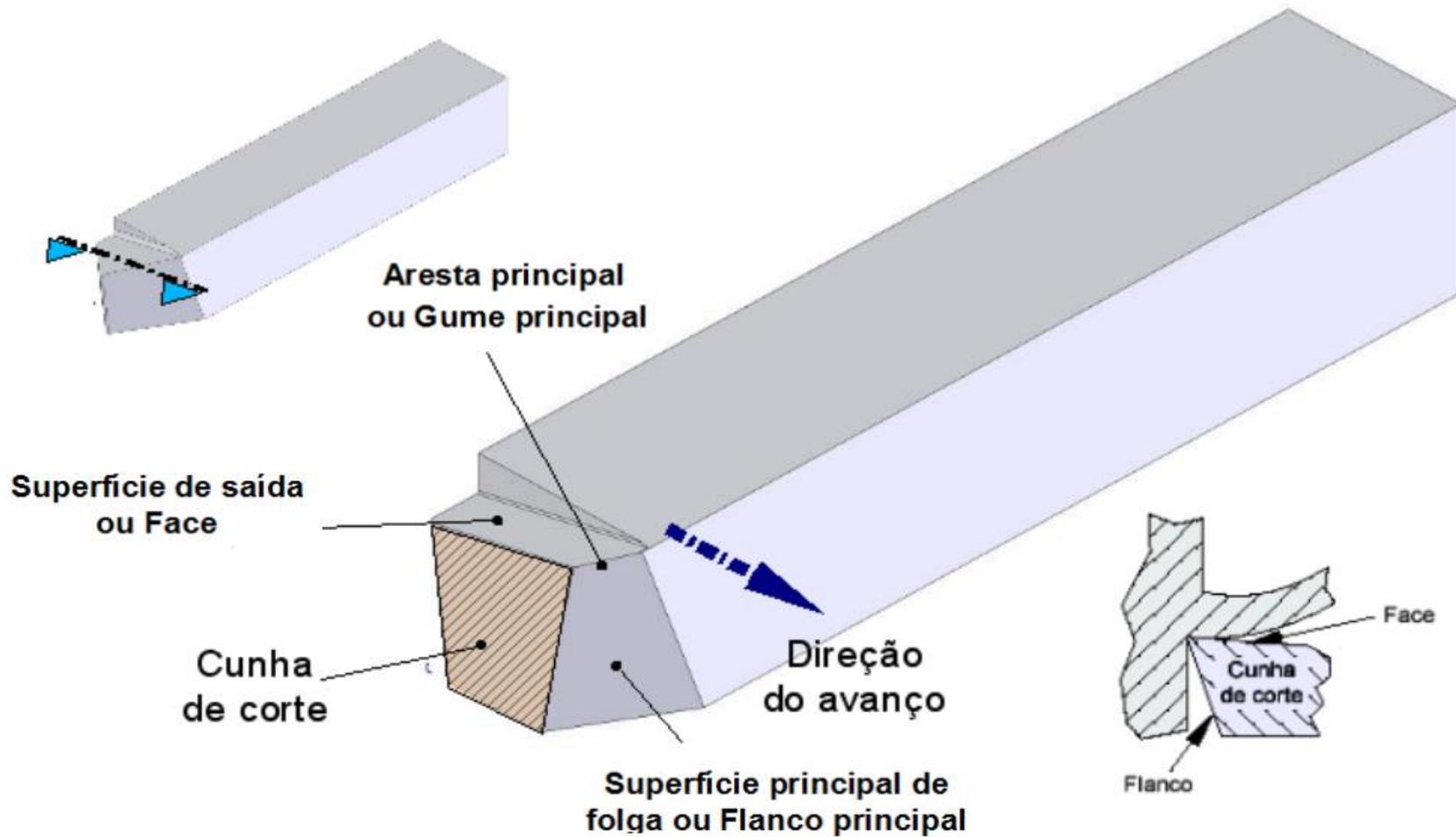


Denominações na ferramenta de corte





Cunha de corte





Geometria da Cunha de Corte

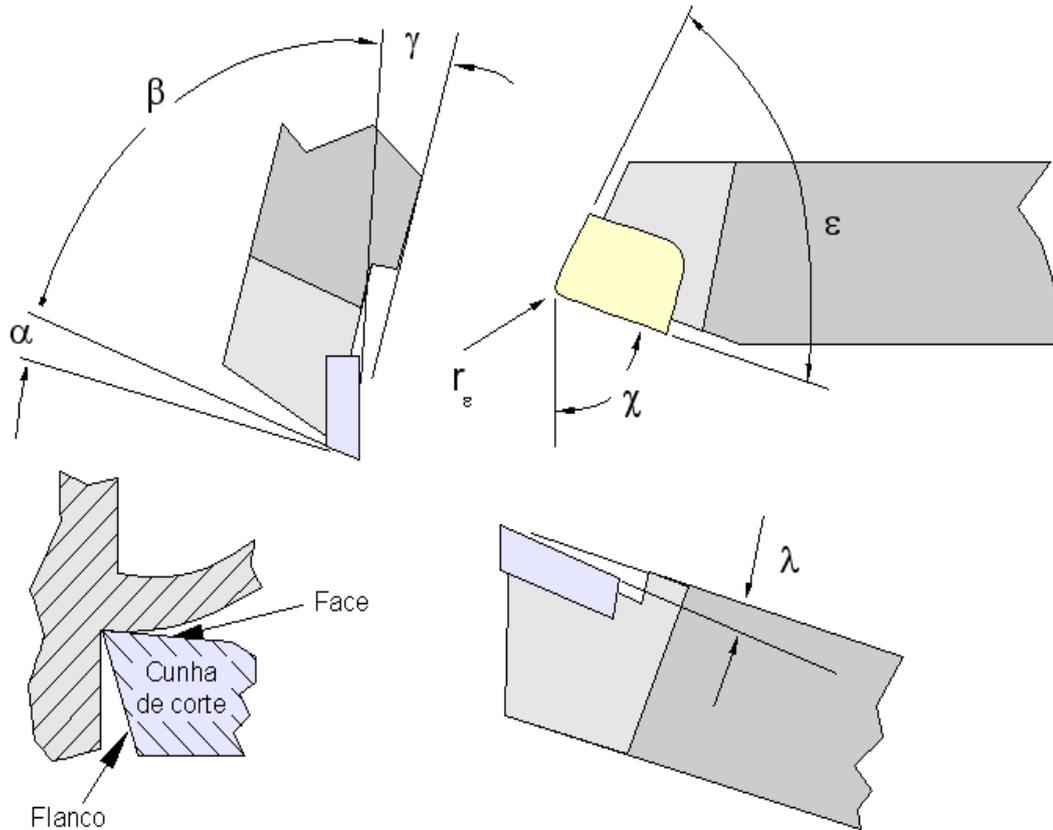
→ Para cada par material de ferramenta / material de peça têm uma geometria de corte apropriada ou ótima

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 torneiar



α = ângulo de folga ou incidência

β = ângulo de cunha

γ = ângulo de saída

ϵ = ângulo de ponta ou quina

χ = ângulo de direção

λ = ângulo de inclinação

r_ϵ = raio de ponta ou quina

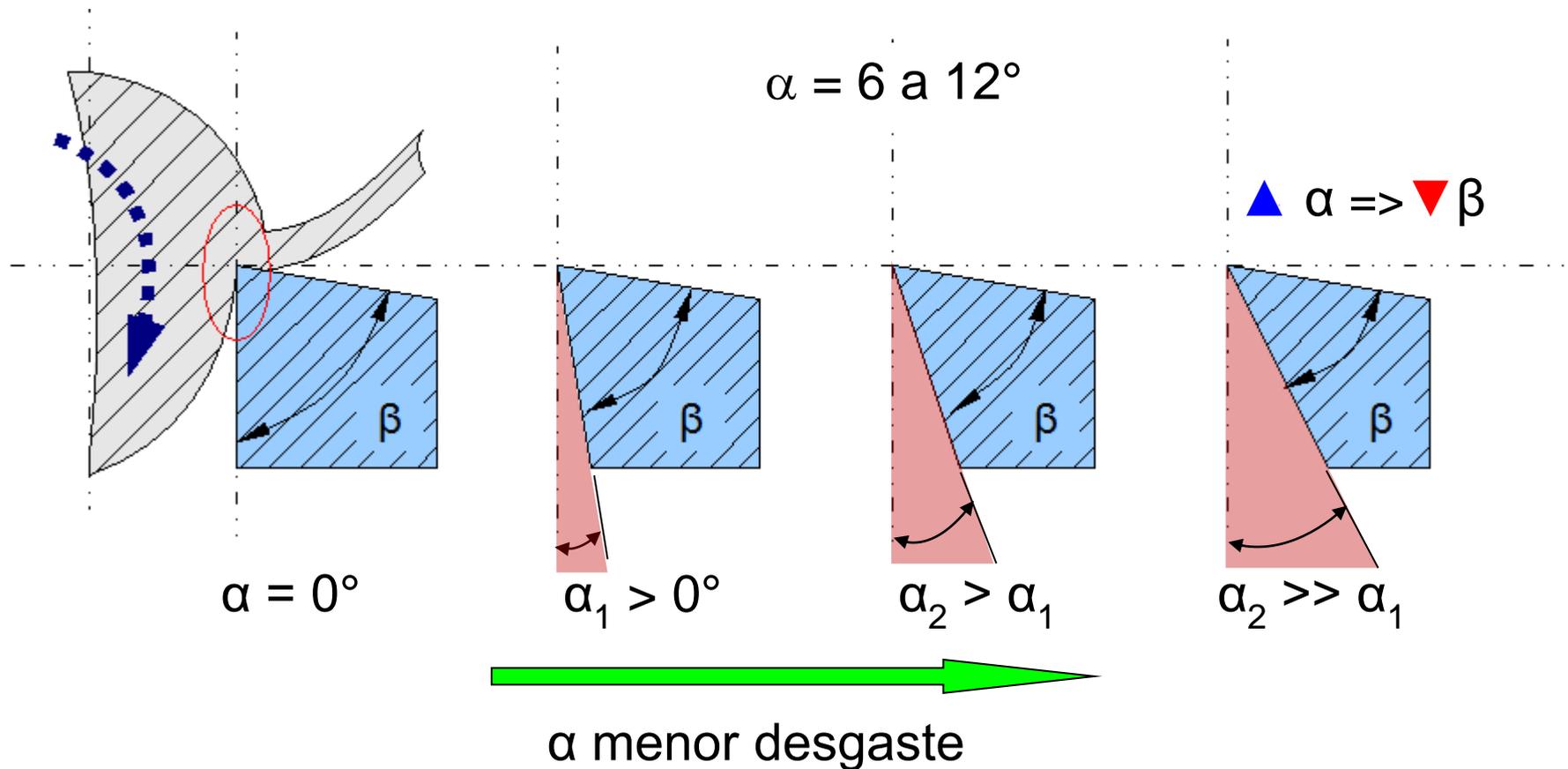
Escolha da geometria da ferramenta

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



Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

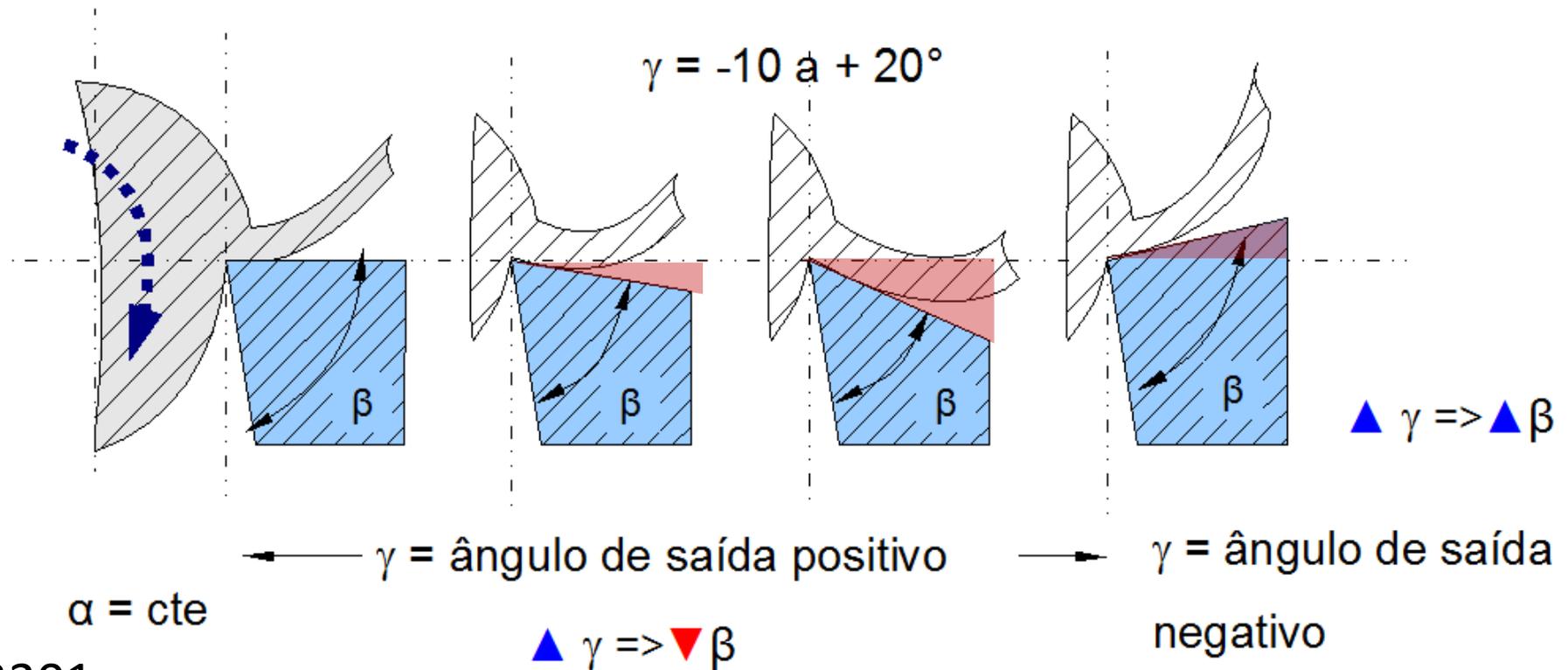
α = ângulo de folga ou incidência, reduz o atrito entre a superfície de folga e a peça e melhora a estabilidade da aresta de corte





Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

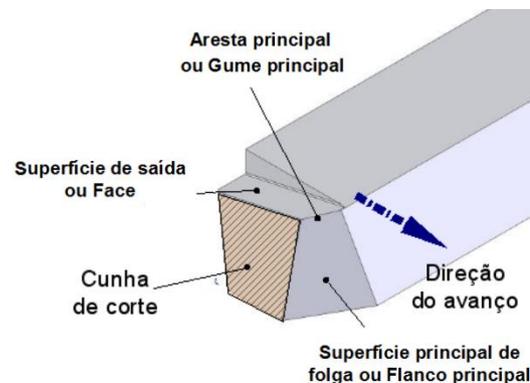
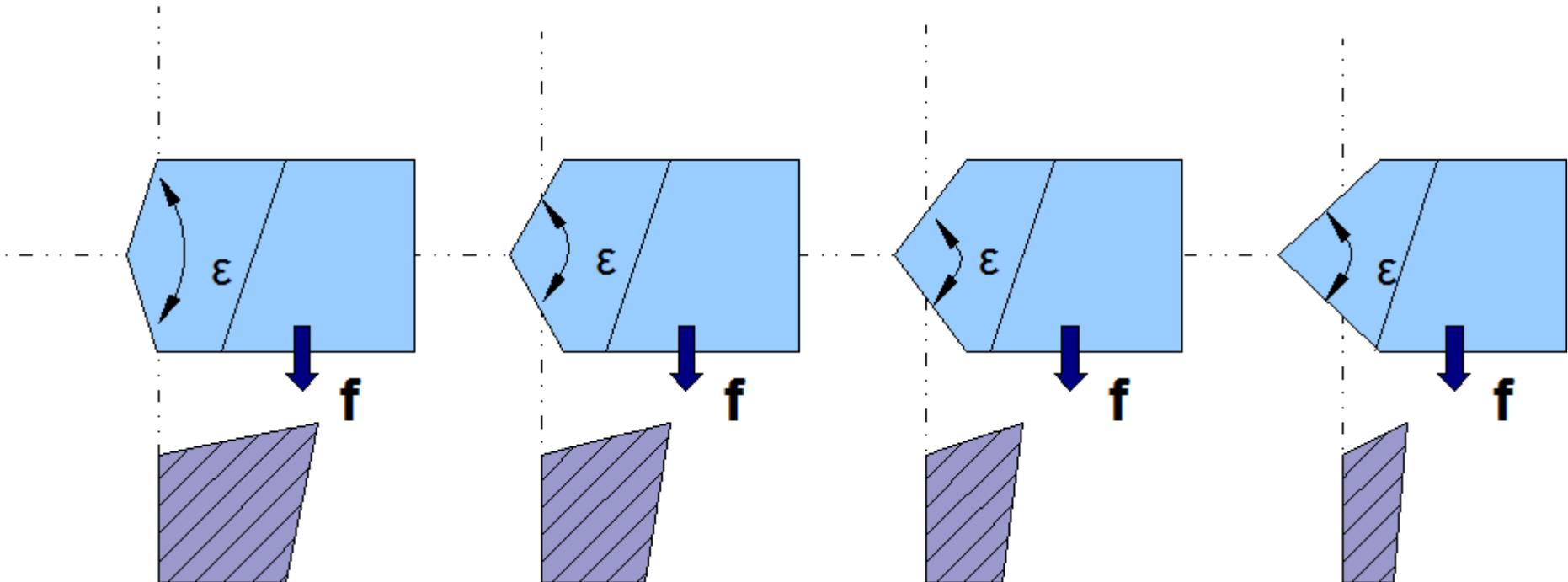
γ = ângulo de saída, melhora a formação do cavaco, melhora a superfície gerada na peça, reduz a força de corte (trabalho de dobramento do cavaco), facilita o escoamento do cavaco sobre a face





Influências da Geometria da ferramenta de tornear

ϵ = ângulo de ponta ou quina

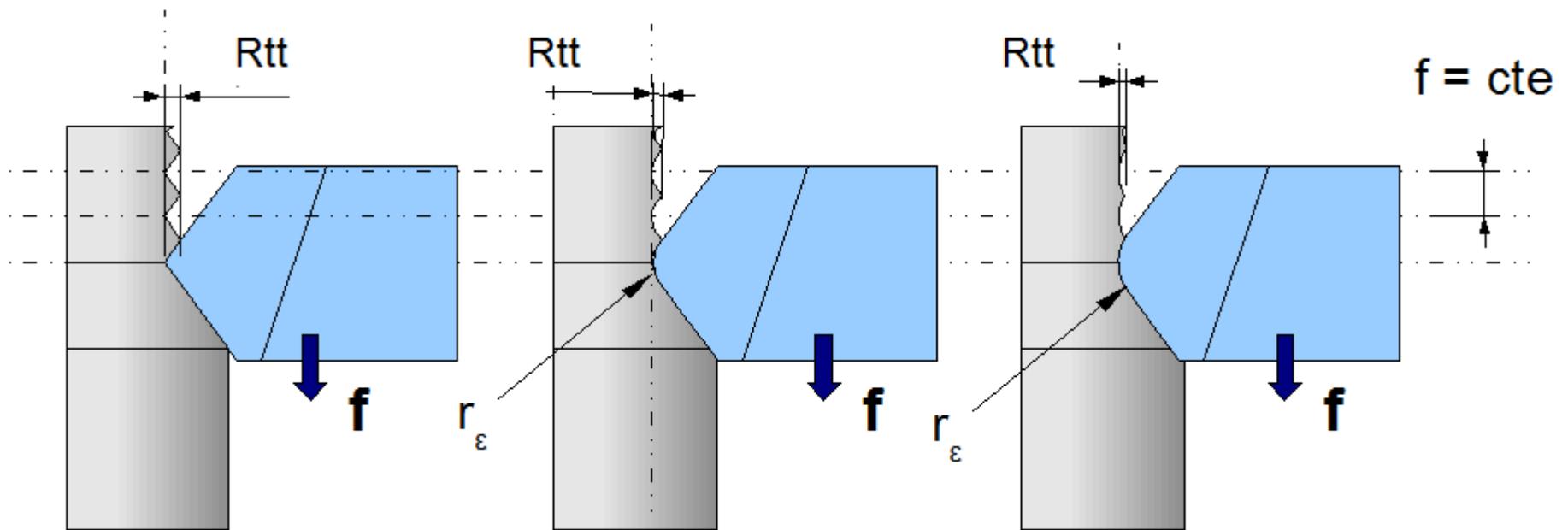


▲ ϵ => ▼ resistência da cunha



Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

r_ϵ = raio de ponta ou quina



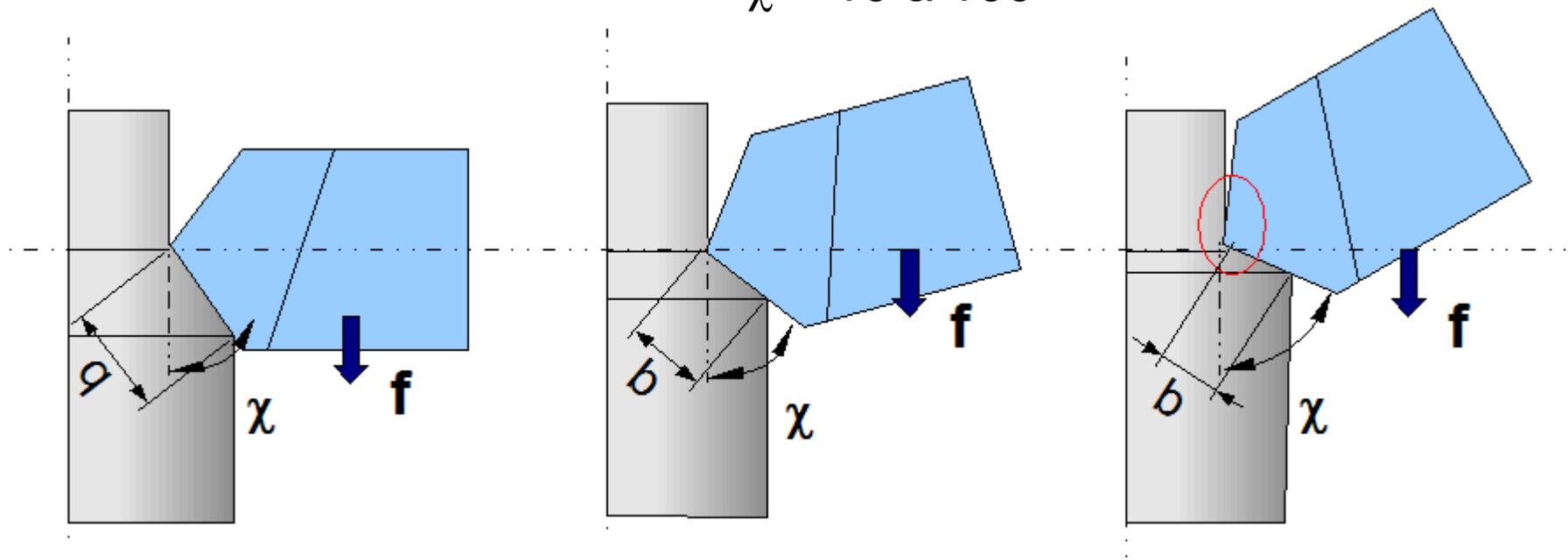
- ▲ r_ϵ = melhora na qualidade superficial
- ▲ r_ϵ = aumento do atrito
- ▲ r_ϵ = aumento das vibrações



Influências da Geometria da ferramenta de torneiar

χ = ângulo de direção

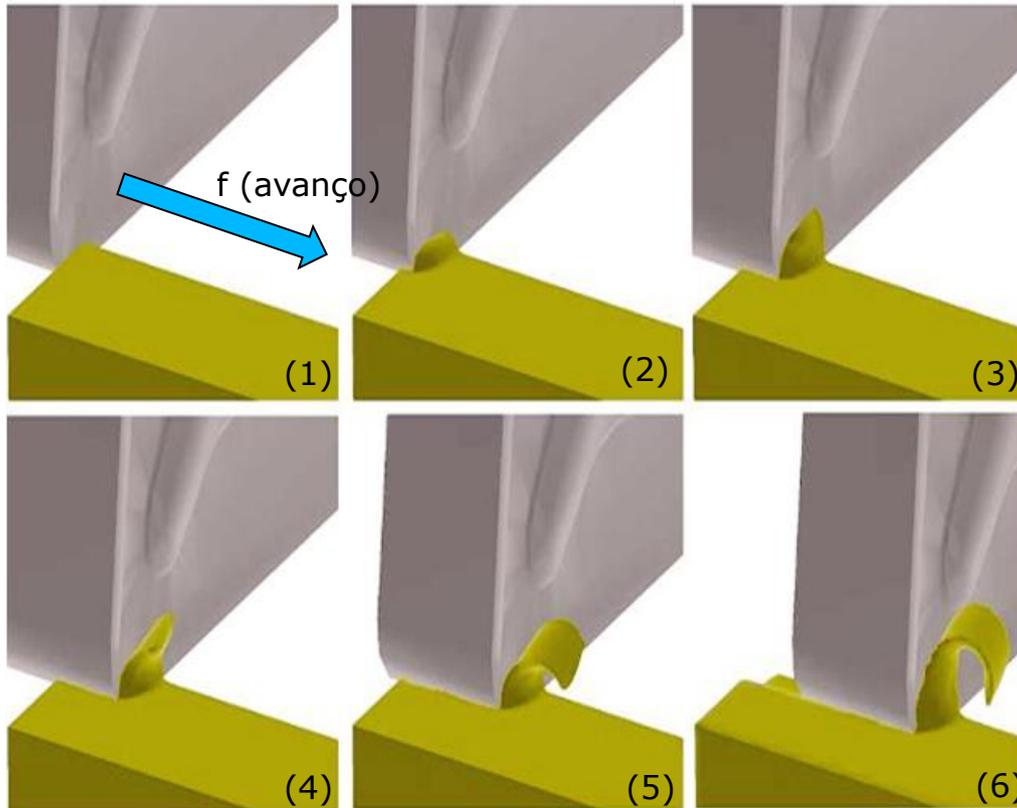
$\chi = 10$ a 100°



- ▲ $\chi \Rightarrow$ ▲ 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



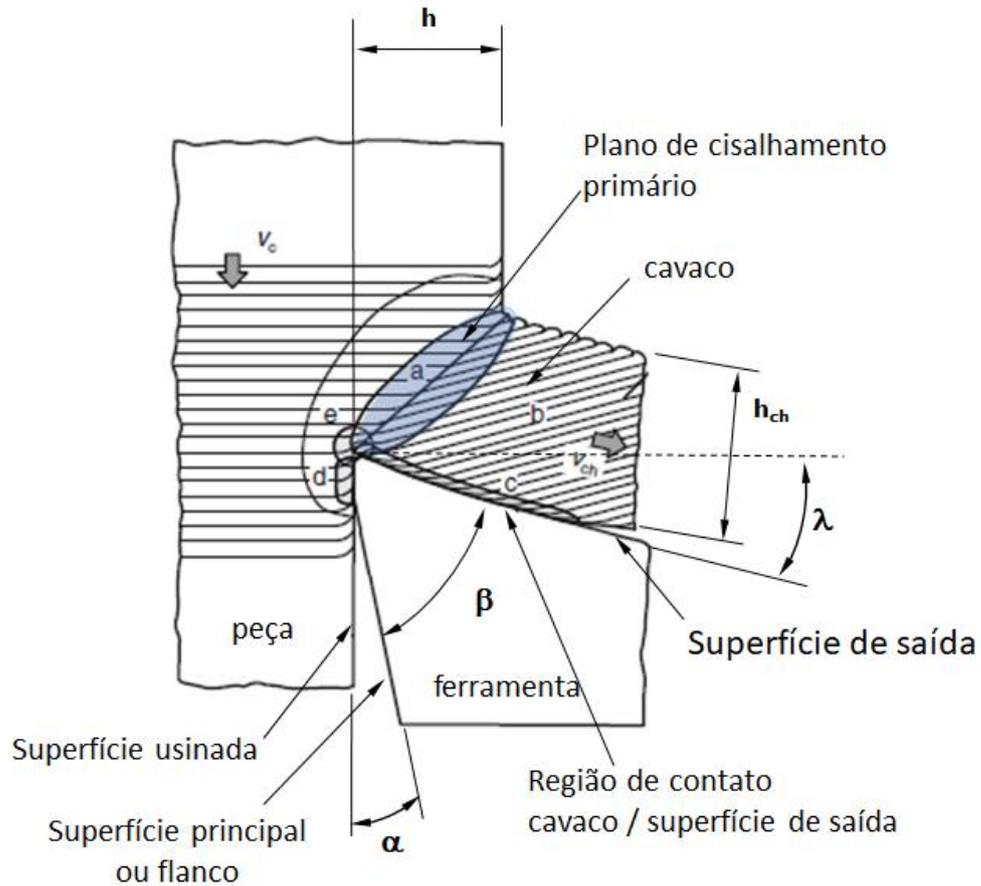
Formação do cavaco



- 1) Contato inicial ferramenta/peça
- 2) Deformação elástica e plástica
- 3) Deformação plástica além do limite de escoamento, início da ruptura
- 4) Formação de frente de cisalhamento
- 5) e 6) cavaco plenamente desenvolvido



Formação do cavaco



Onde:

α - ângulo de incidência

β - ângulo de cunha

γ - ângulo de saída

h - espessura de usinagem

h_{ch} - espessura do cavaco ou de corte

λ - índice de esbeltes do cavaco

V_c - velocidade de corte

V_{ch} - velocidade de saída do cavaco

a) Zona de cisalhamento primária

b) Estrutura do cavaco

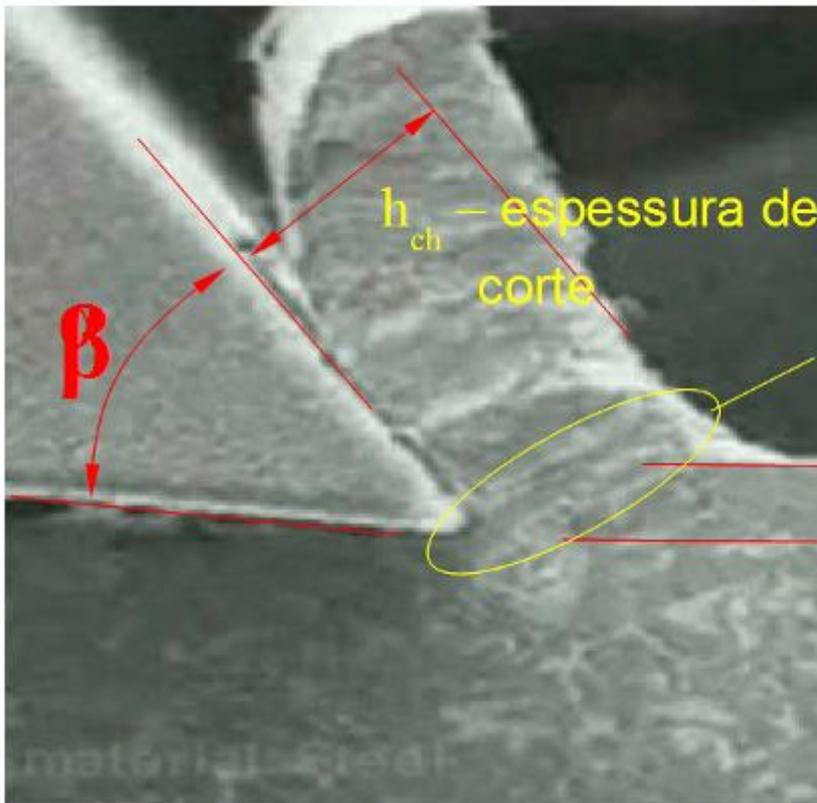
c) Separação cavaco/superfície de saída

d) Região de deformação na aresta de corte

e) região de cisalhamento na aresta de corte



Fator de recalque



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

$$\lambda > 1$$

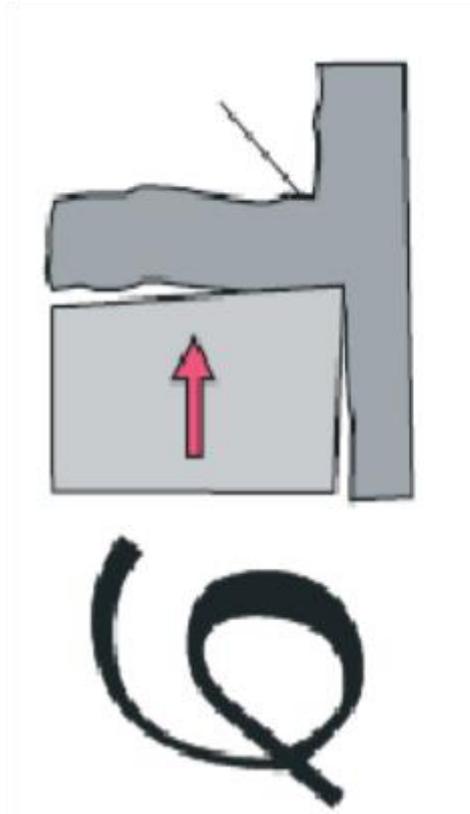
Plano de cisalhamento

h – espessura de usinagem

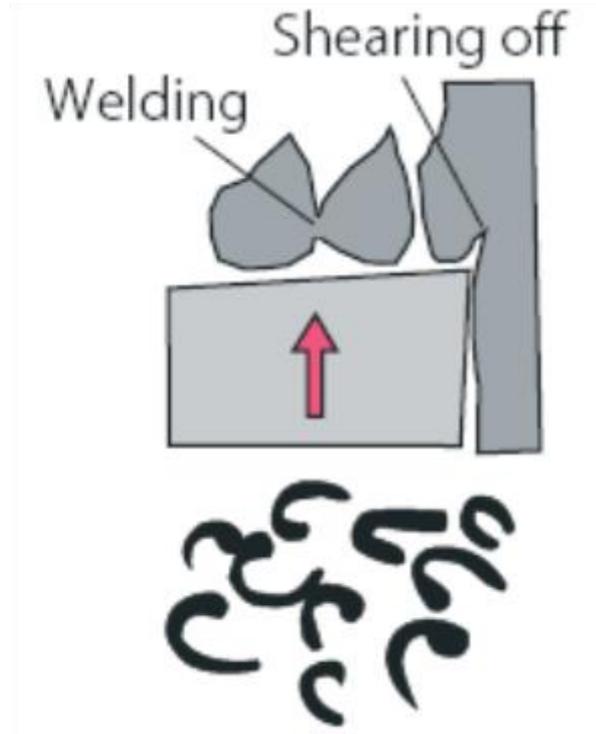


Tipos básicos de cavaco

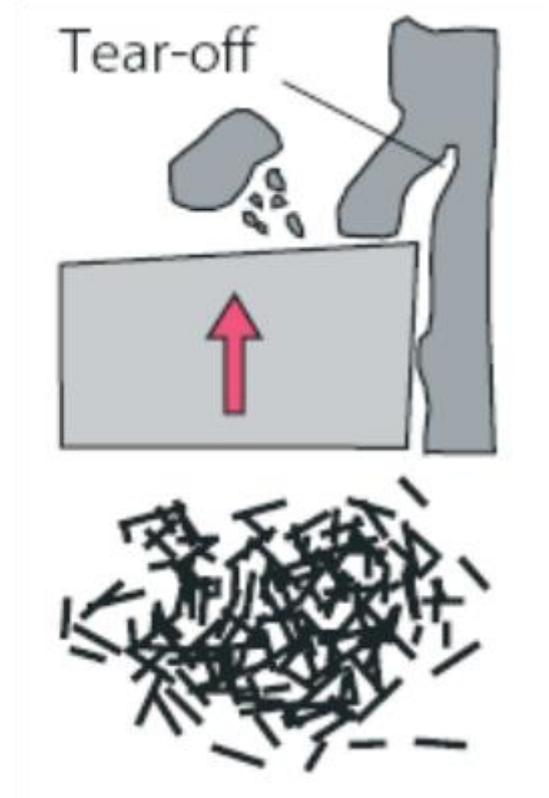
Contínuos



Lamelares

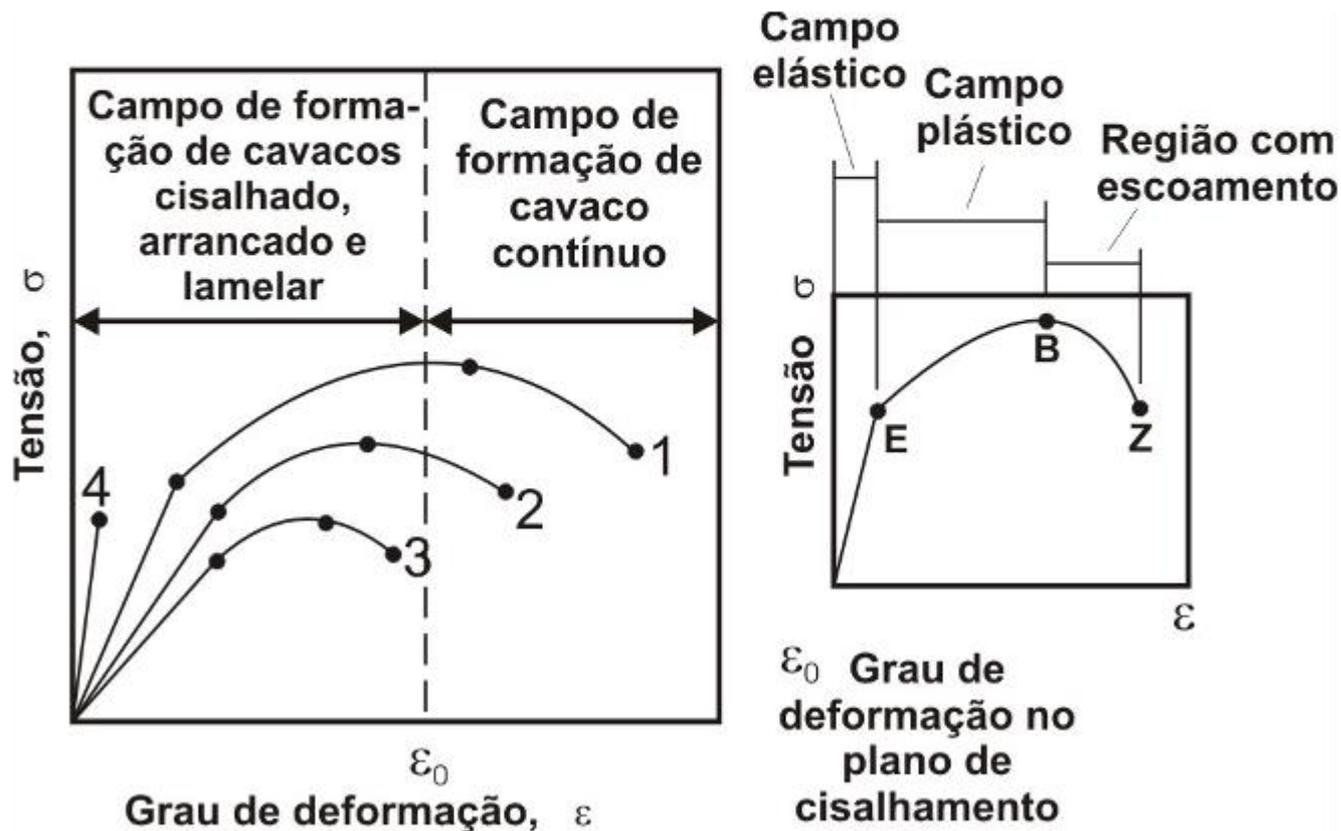
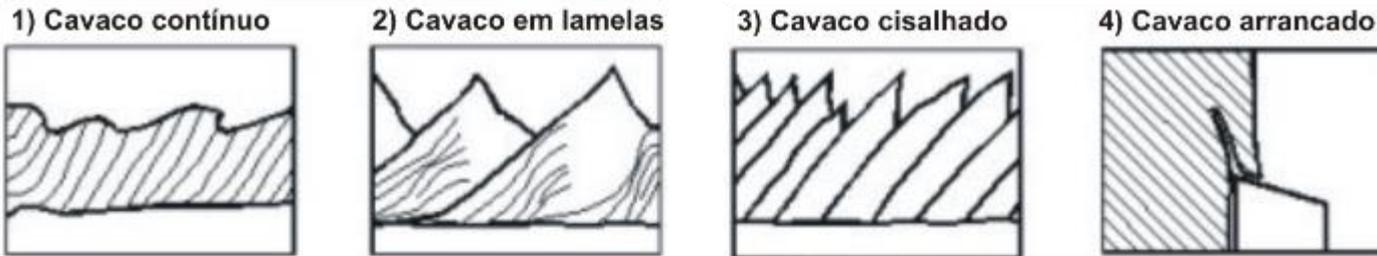


Arrancados
ou
cislhados



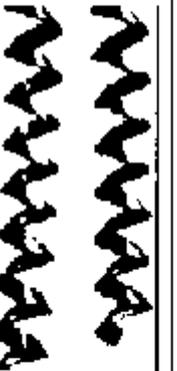
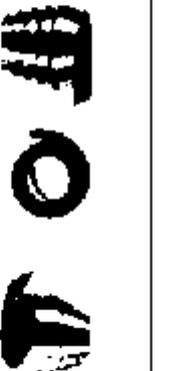
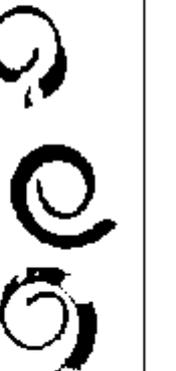


Relação ente propriedades dos materiais e cavaco





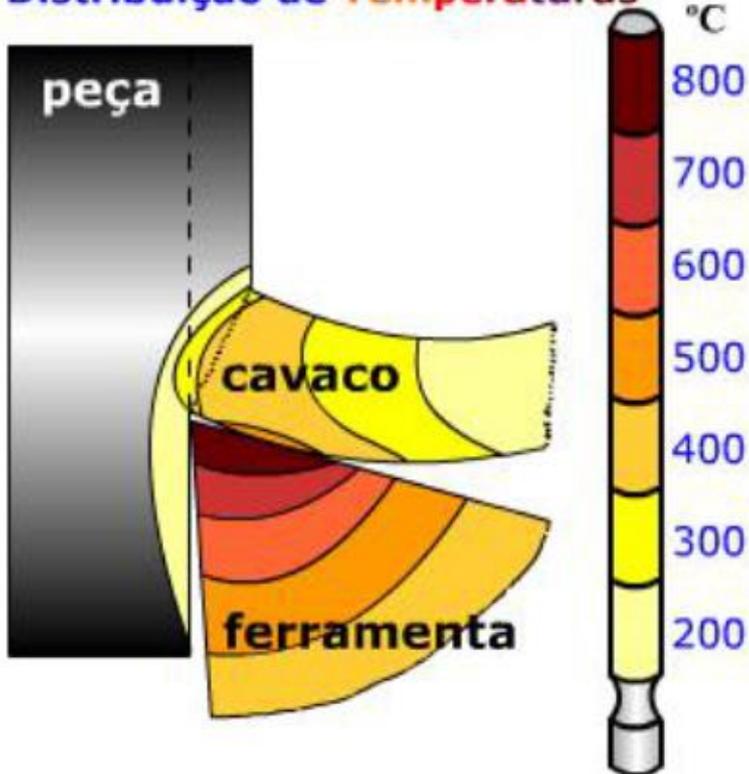
Classificação dos cavacos

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

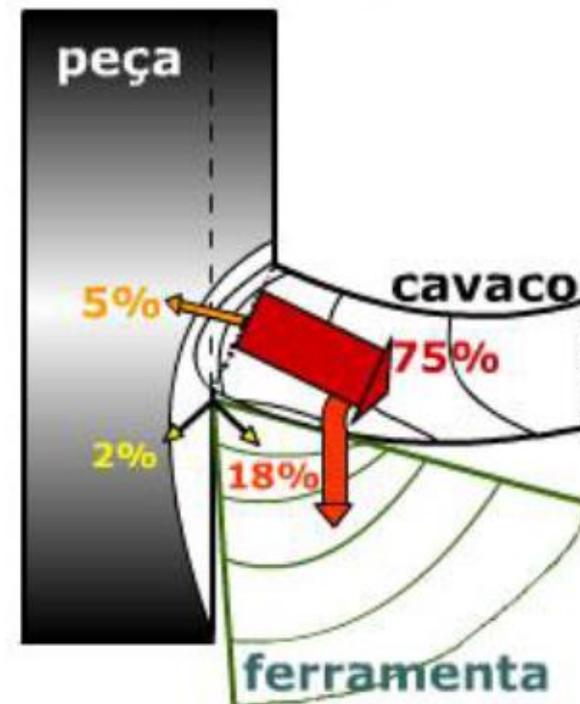


Distribuição de calor e temperatura no cavaco

Distribuição de **Temperaturas** °C



Distribuição do **CALOR** gerado





Materiais de ferramentas de corte





Requisitos para materiais de ferramentas

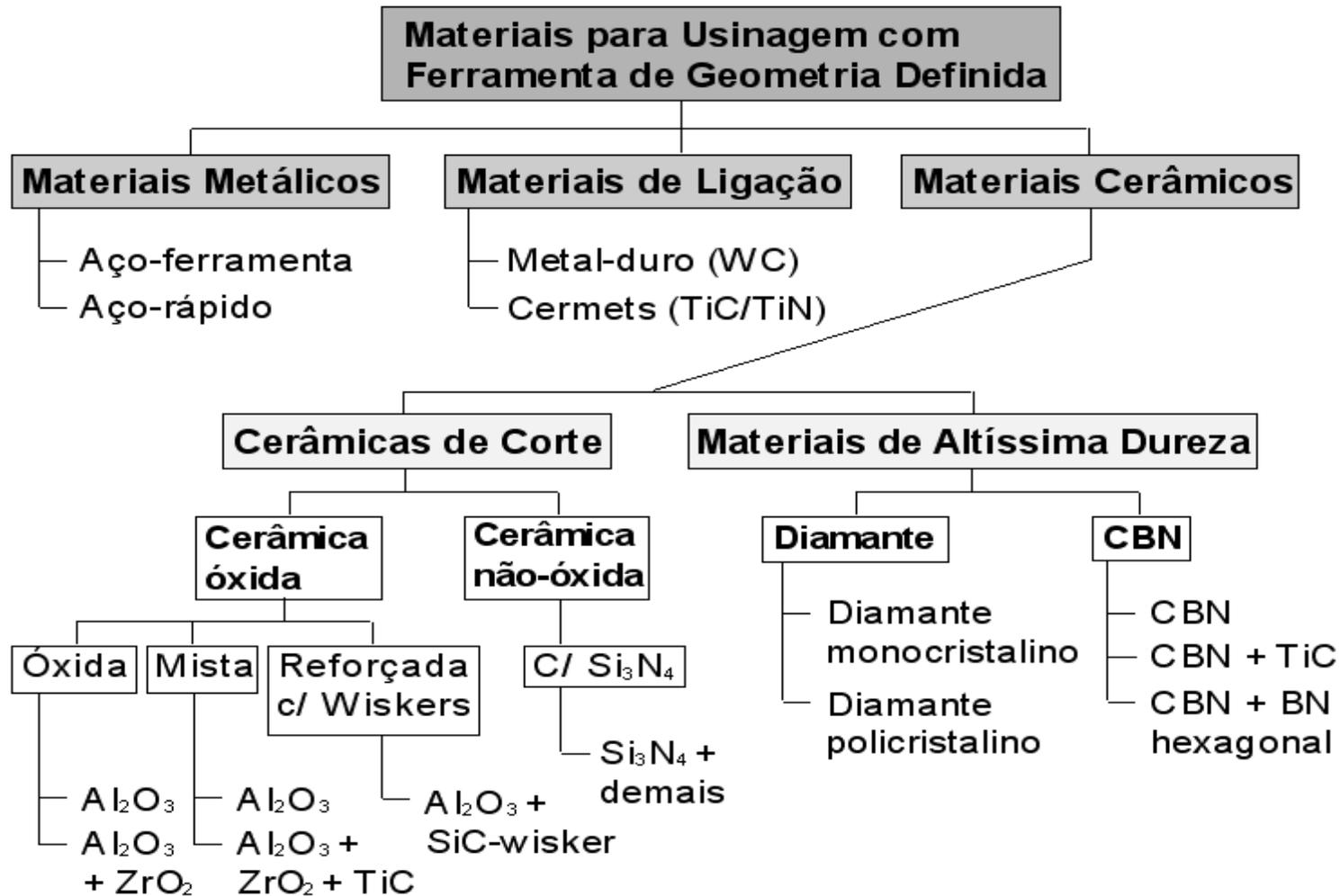
- ferramentas de corte
- Resistência à compressão
- Dureza
- Resistência à flexão e tenacidade
- Resistência do gume
- Resistência interna de ligação
- Resistência a quente
- Resistência à oxidação
- Pequena tendência à fusão e caldeamento
- Resistência à abrasão
- Condutibilidade térmica, calor específico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



Nenhum material de ferramenta possui todas estas características

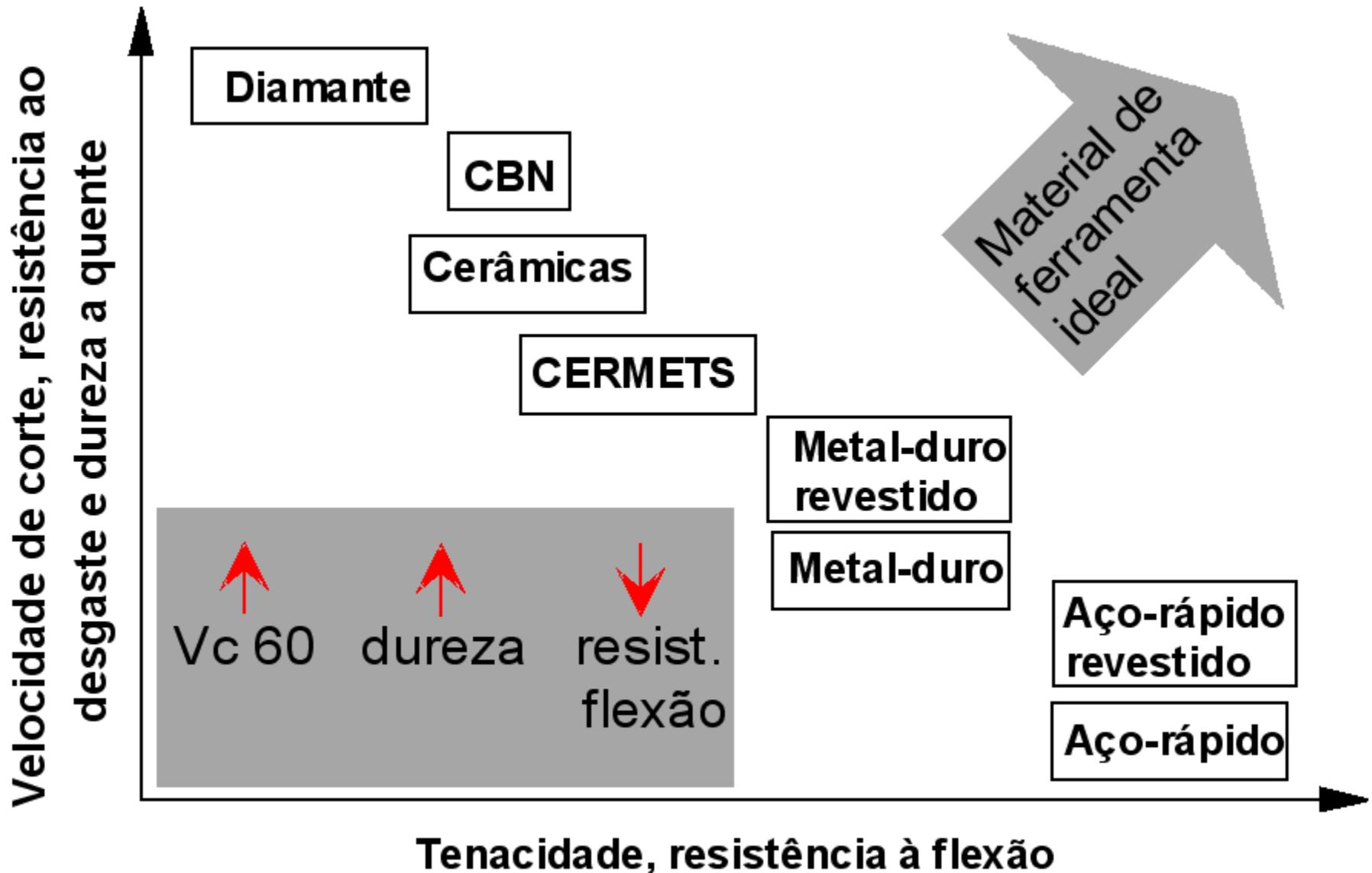


Classificação dos materiais de ferramentas de usinagem



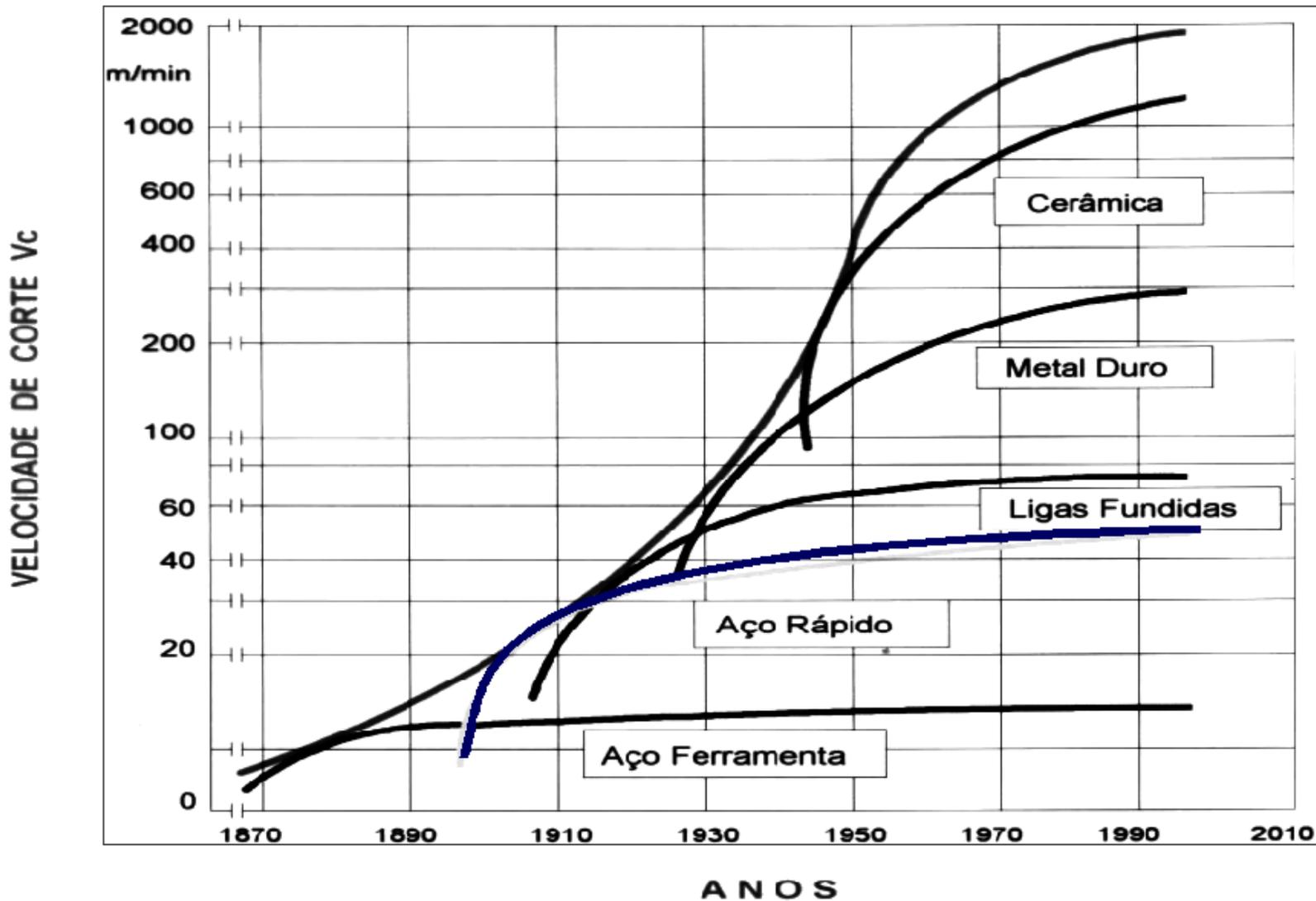


Propriedades dos materiais de ferramentas



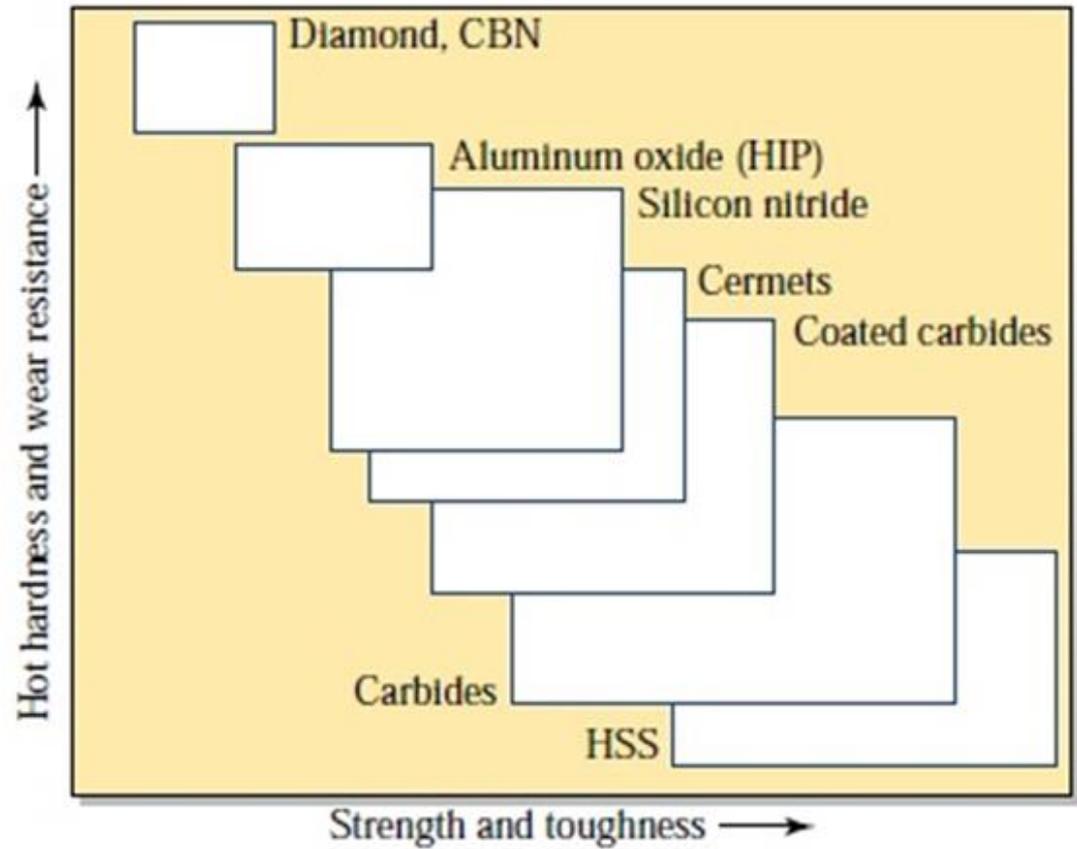
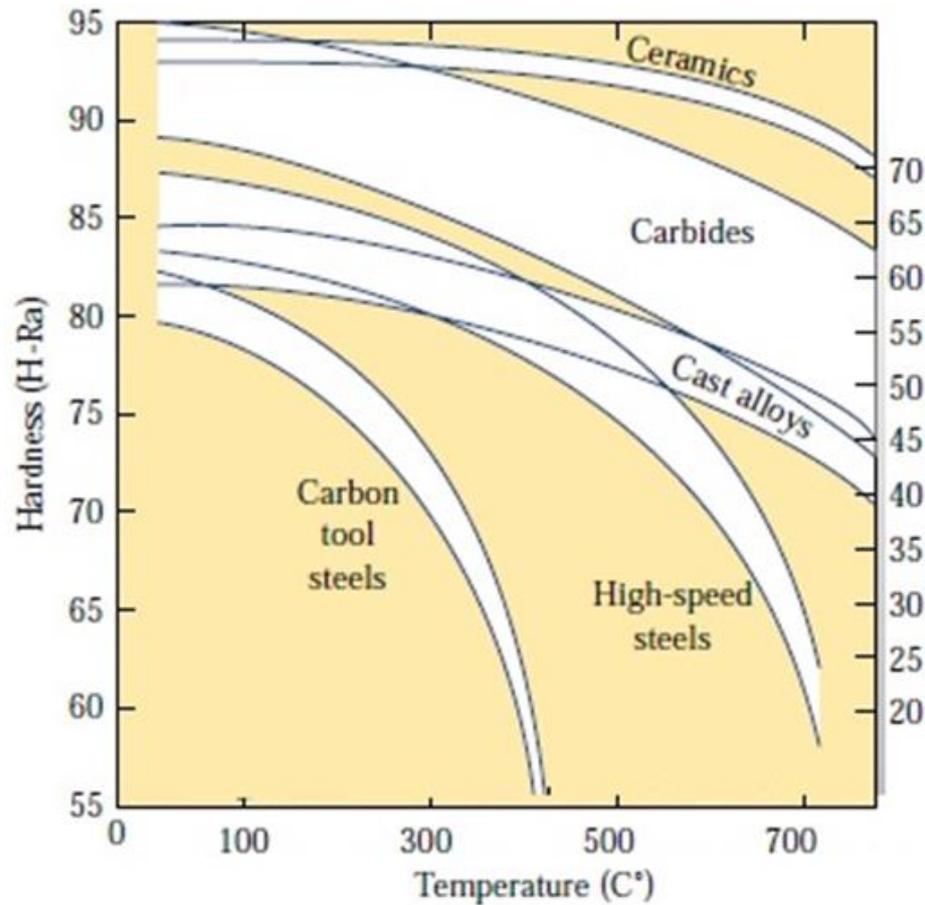


Propriedades dos materiais de ferramentas





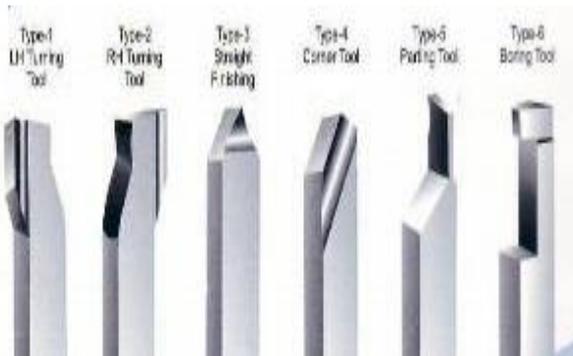
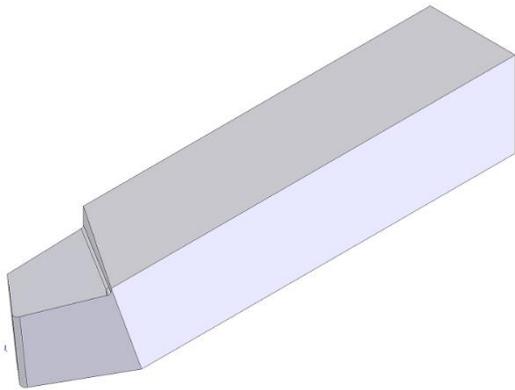
Resistência a quente dos principais materiais de ferramentas



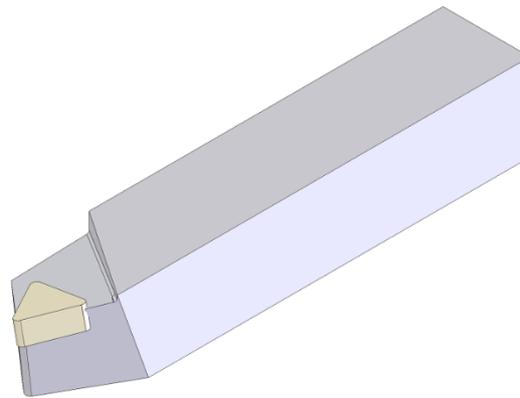


Formas usuais das ferramentas

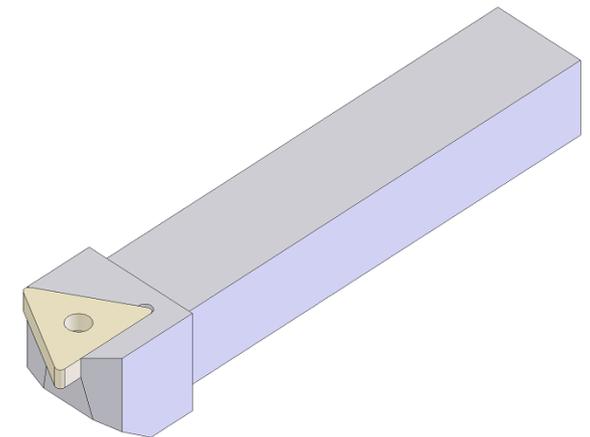
Integrais



Insertos brasados

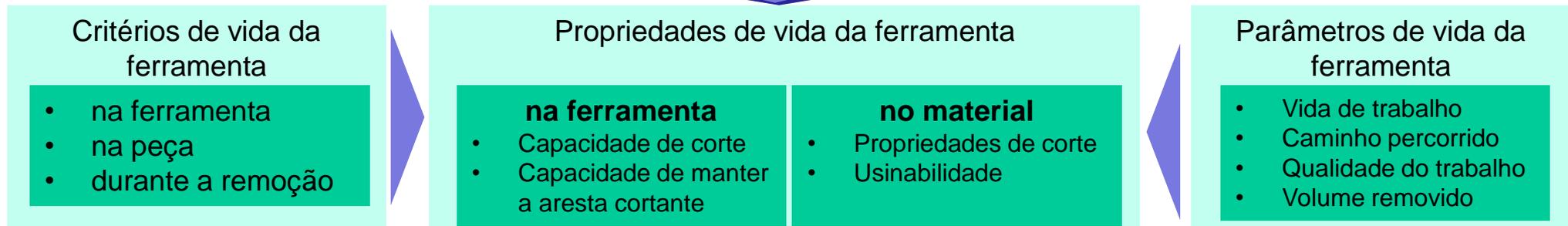
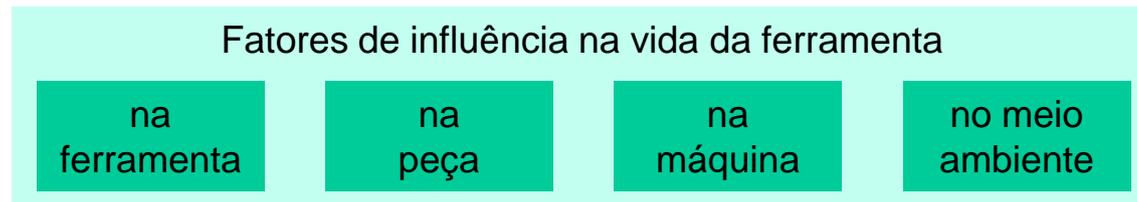


Insertos intercambiáveis





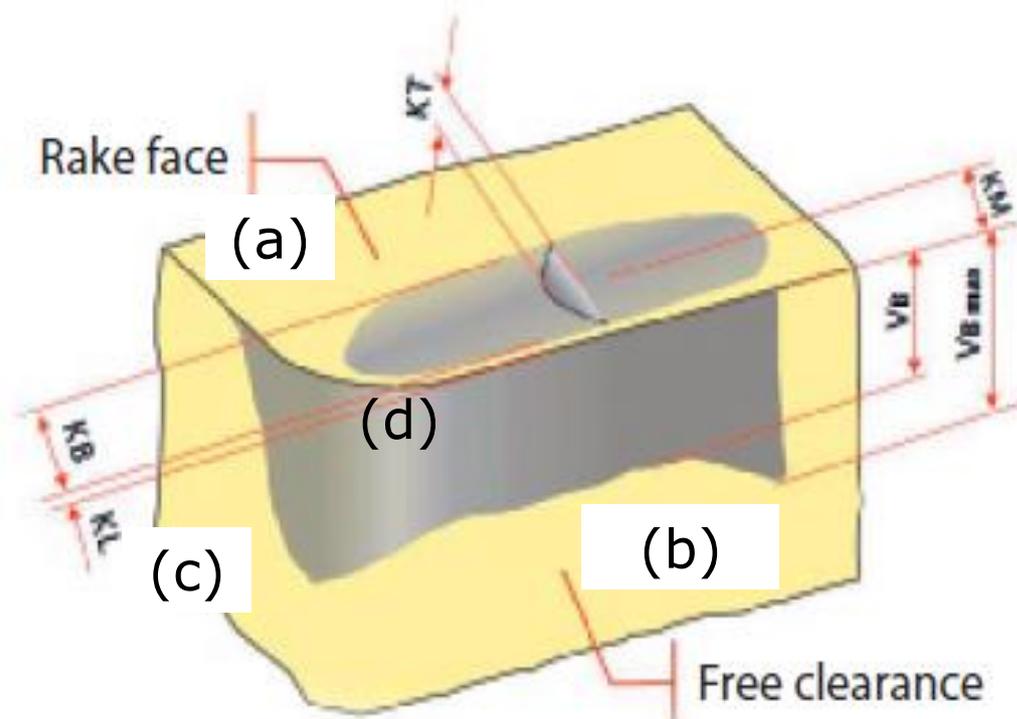
Desgaste em ferramentas de usinagem





Desgaste das ferramentas de corte

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





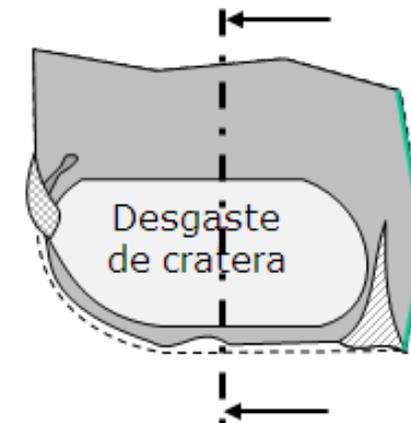
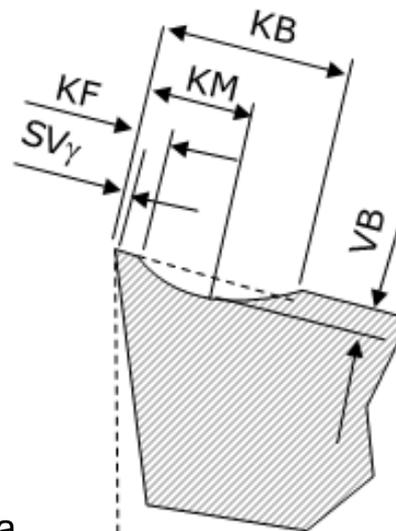
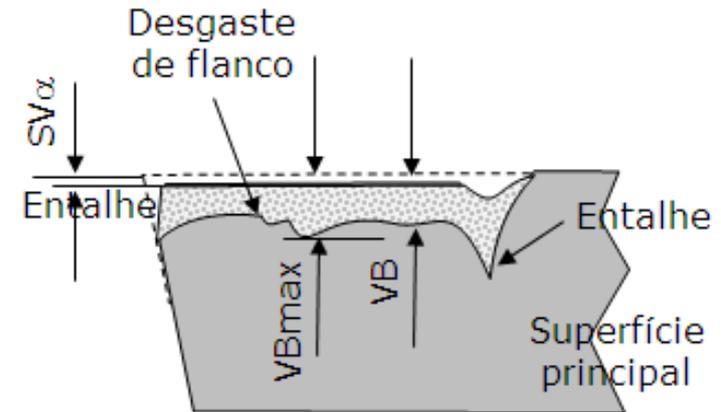
Desgaste em ferramentas de usinagem

VB - Largura média de desgaste de flanco.

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

SV_α - Deslocamento lateral da aresta na direção do flanco.

KB - Largura de cratera.



KF - Largura do lábio no desgaste de cratera.

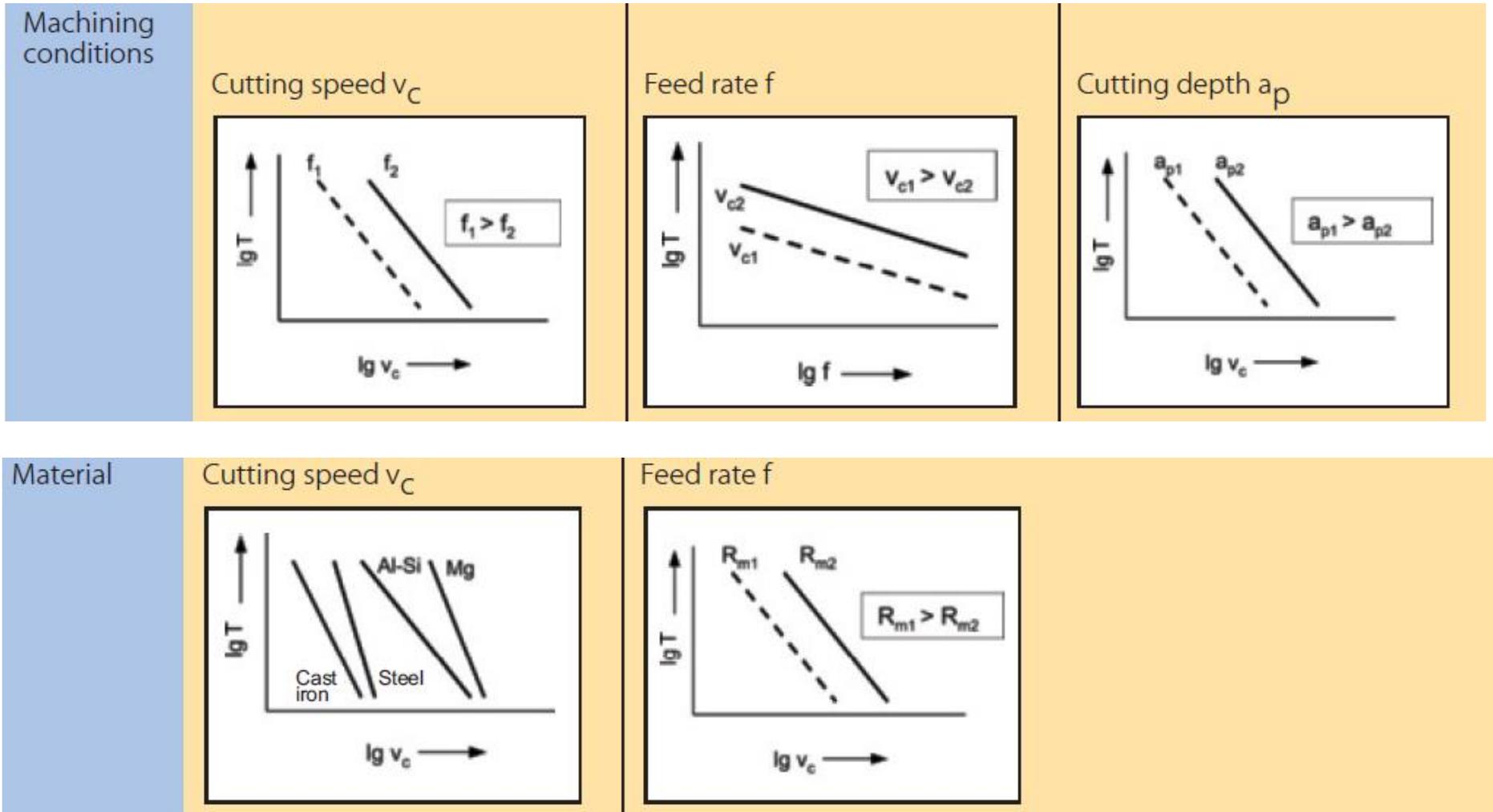
KM - Distância da borda da ferramenta ao centro da cratera.

KT - Profundidade de cratera.

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



Desgaste em ferramentas de usinagem



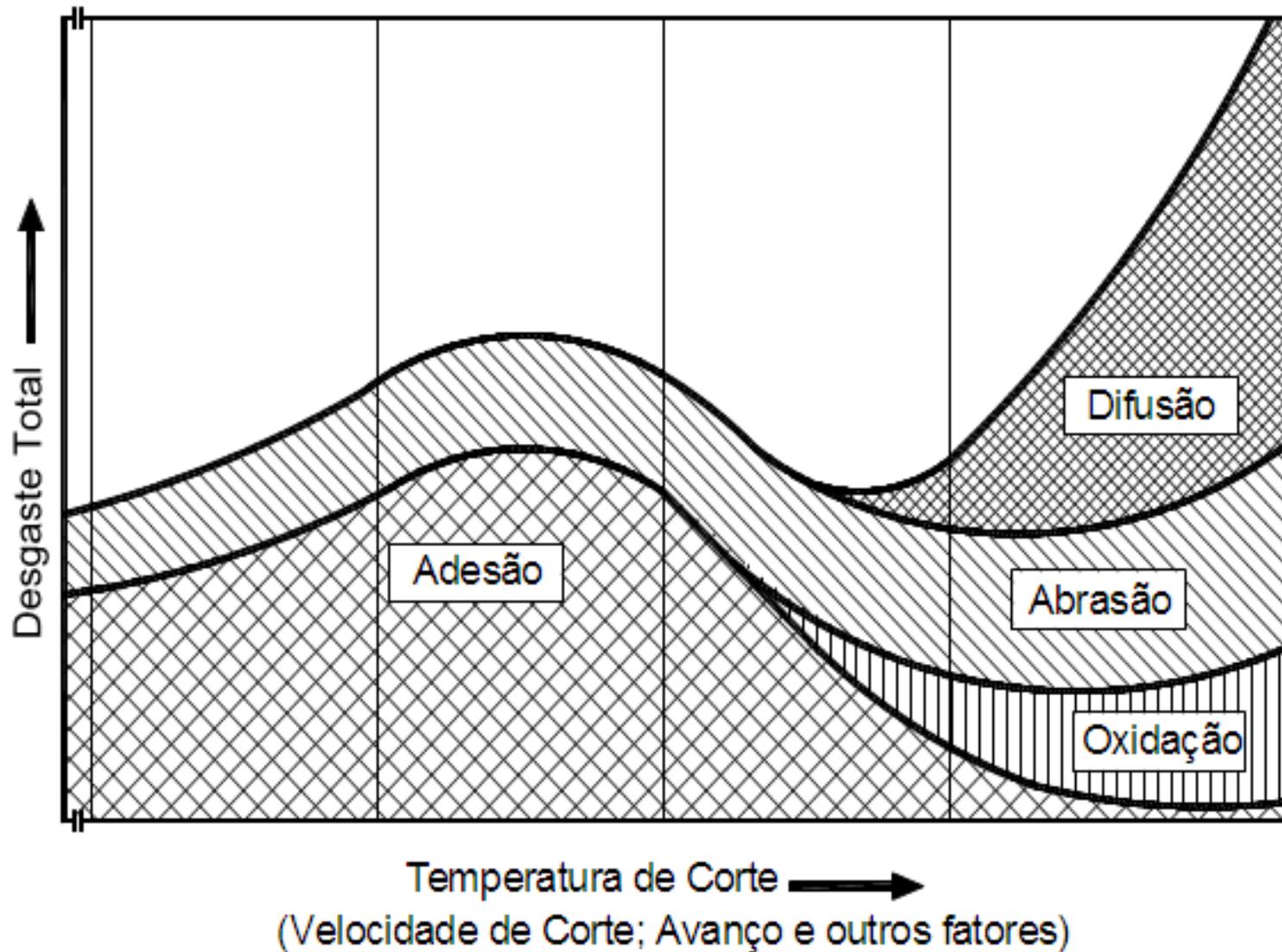


Desgaste em ferramentas de usinagem

Consumable	<p>Cutting speed v_c</p>	Tool material	<p>Cutting speed v_c</p>
Geometry of the cutter	<p>Rake angle γ_o</p>	<p>Flank angle α_o</p>	<p>Setting angle κ_r</p>



Mecanismos de desgaste de ferramentas





Crítérios de fim de vida

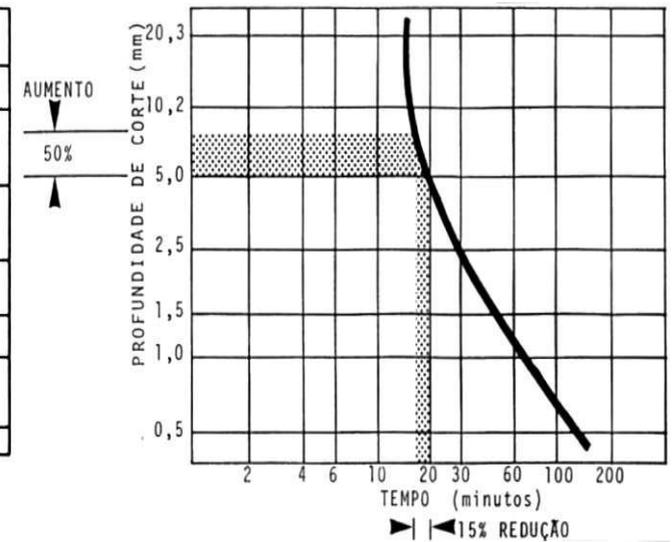
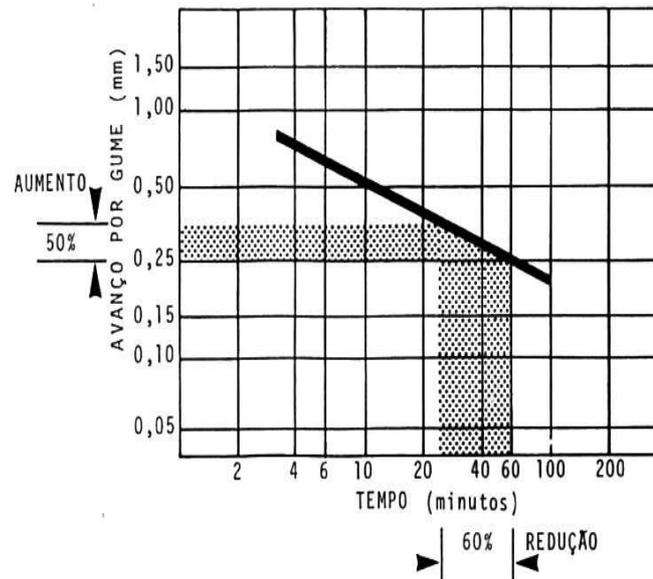
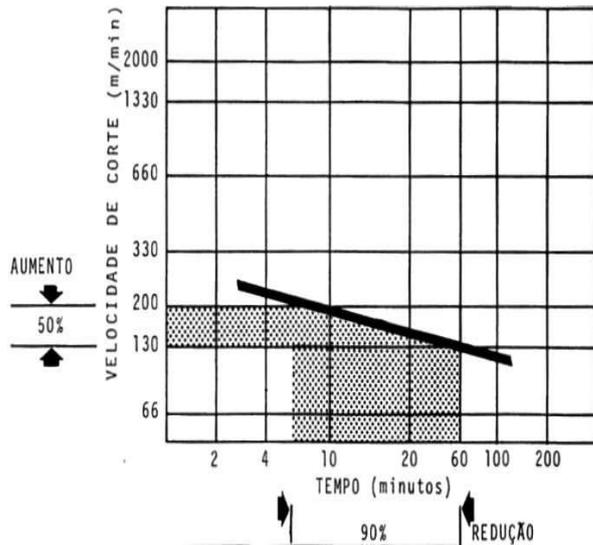
São critérios que são utilizados para determinar quando uma ferramenta deve ser substituída no processo.

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

- desvios nas tolerâncias dimensionais
- desvios nas tolerâncias geométricas
- perda de qualidade superficial da peça
- aumento no nível de vibrações no processo
- aumento no nível de esforços no processo
- aumento do custo de reafiação da ferramenta



Influência dos parâmetros de corte na Vida da Ferramenta





Usinabilidade

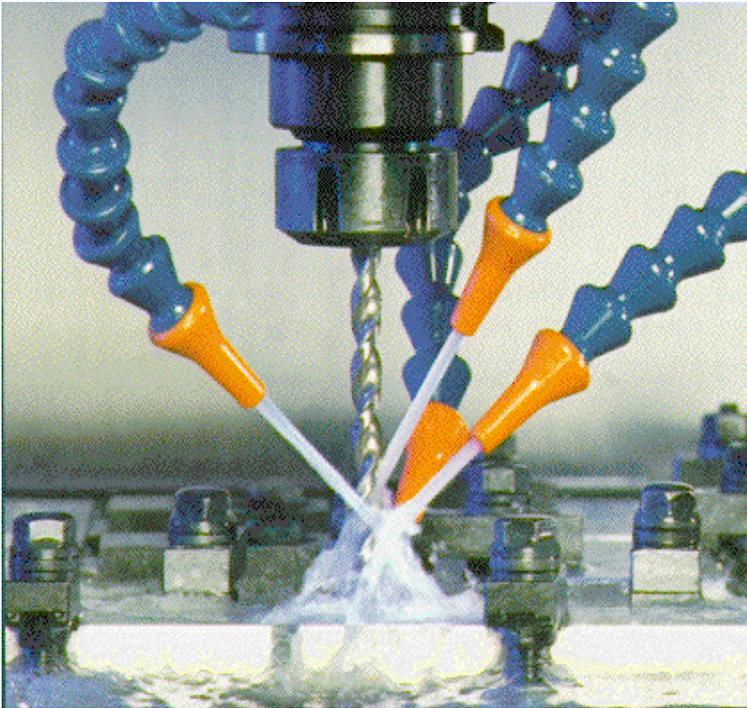
“Na usinagem com remoção de cavacos verifica-se que os diversos materiais se comportam de modo distinto, sendo que alguns podem ser trabalhados com grande facilidade, enquanto que outros oferecem uma série de problemas ao operador”

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

Descreve todas as dificuldades que um material apresenta na sua usinagem, compreendendo todas as propriedades do material que têm influência sobre o processo de usinagem.



Fluidos de Corte



Principais Fluidos de Corte

- Óleos de corte
- Emulsões: combinação de óleo em água, com cerca de 4 a 12% de concentração de óleo.



Fluidos de corte

Função dos fluidos de corte:

- Redução do atrito entre ferramenta e cavaco
- Expulsão dos cavacos gerados
- Refrigeração da ferramenta
- Refrigeração da peça
- Melhoria do acabamento da superfície usinada
- Refrigeração da máquina-ferramenta

Sob o ponto de vista econômico o uso de fluido de corte proporciona

- Redução do consumo de energia
- Redução dos custos de ferramenta
- Diminuição ou eliminação da corrosão na peça



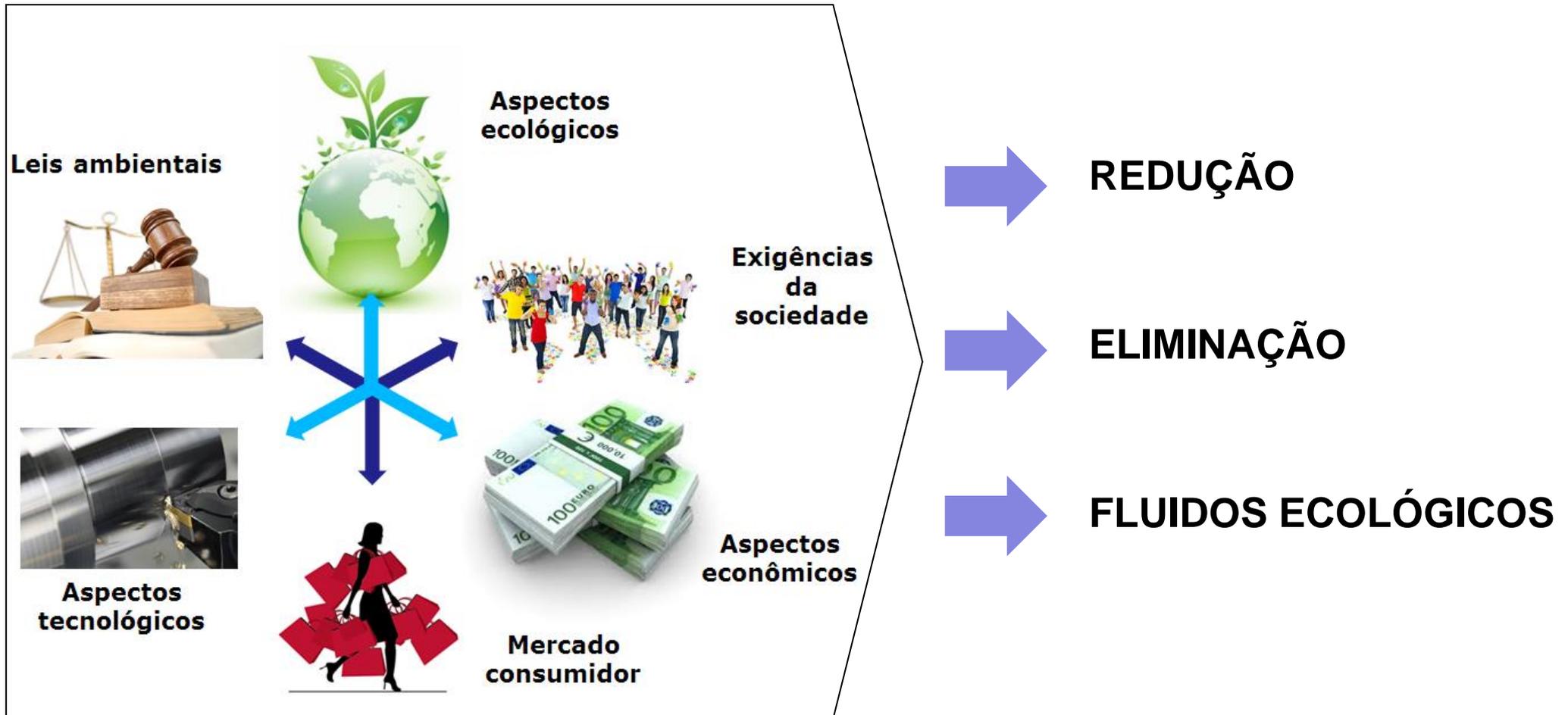
Critérios para seleção dos fluidos de corte

Fatores que 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;



Tendências no uso de Fluidos de Corte





Otimização das condições de corte

- **Definição:** Procedimento cujo objetivo é definir da melhor maneira possível, o valor mais adequado à operação em curso, em função de valores que podem ser pré-determinados ou conhecidos
- Otimização exige conhecimento de leis de desgaste da ferramenta, de métodos de otimização, de formação de custo e de estatística
- **Importância:** necessidade de ser competitivo em um mundo globalizado, ou seja, ter elevada produtividade, garantindo qualidade e assegurando baixos custos



Custos de fabricação

Composição dos custos de usinagem

→ Custos diretos

- ✓ Máquina-ferramenta
- ✓ Ferramentas
- ✓ Mão de obra

→ Custos indiretos

- ✓ Impostos
- ✓ Amortizações
- ✓ outros





Evolução das vidas ótimas de ferramentas

→ Causada pelo aumento nos custos de investimentos (máquinas-ferramentas mais caras) e pelo aumento dos custos de mão de obra

- 1940 – $T = 4$ a 8 horas
- 1960 – $T = 1$ h (aproximadamente)
- 1990 – $T = 10$ a 20 min



Conseqüências de maiores velocidades de corte

- Maiores vidas de ferramentas
- Menos trocas de ferramentas
- Menor custo de ferramentas
- Maior custo de salários
- Maior custo de máquinas-ferramentas
- Maior tempo de usinagem



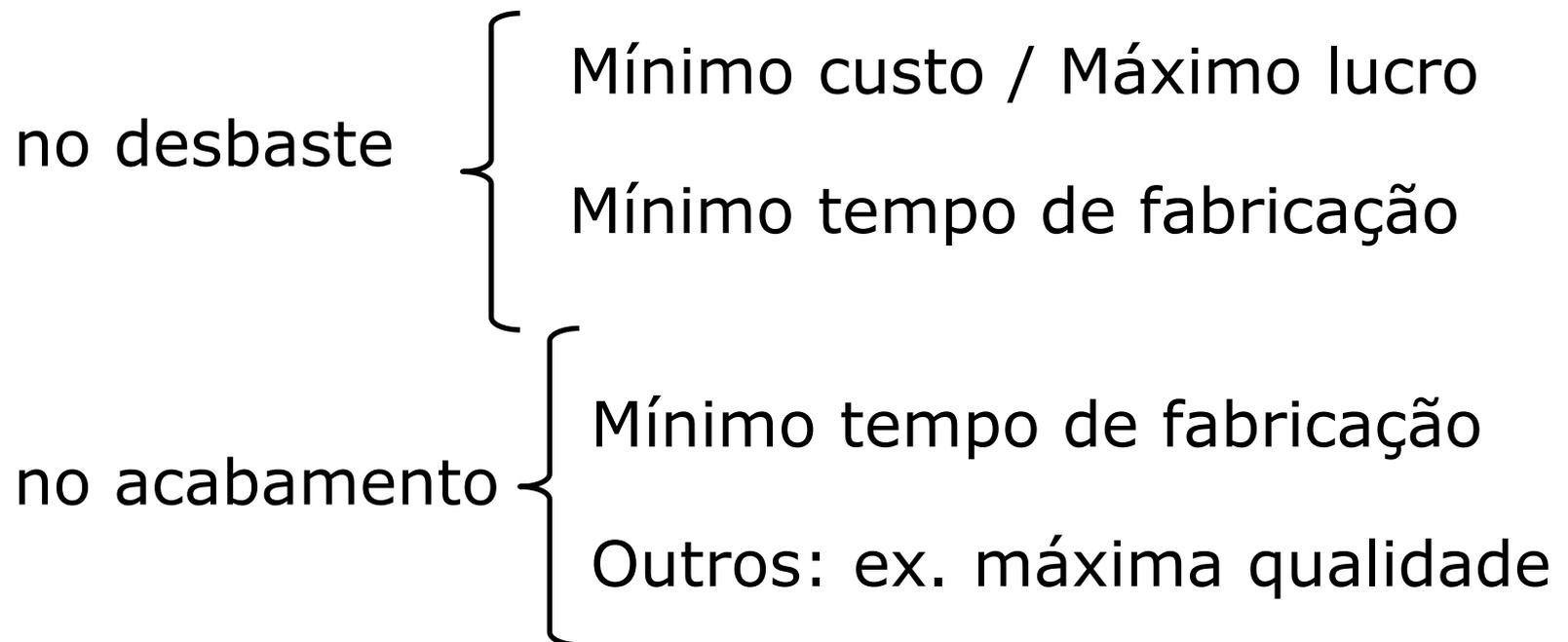
Consequências dos custos de salário / máquinas

- Atualmente o custo de salário e máquinas é maior que o custo com ferramentas e trocas de ferramentas
- A tendência de menores custos ocorre para maiores velocidades de corte e menores vidas das ferramentas



Critérios de otimização

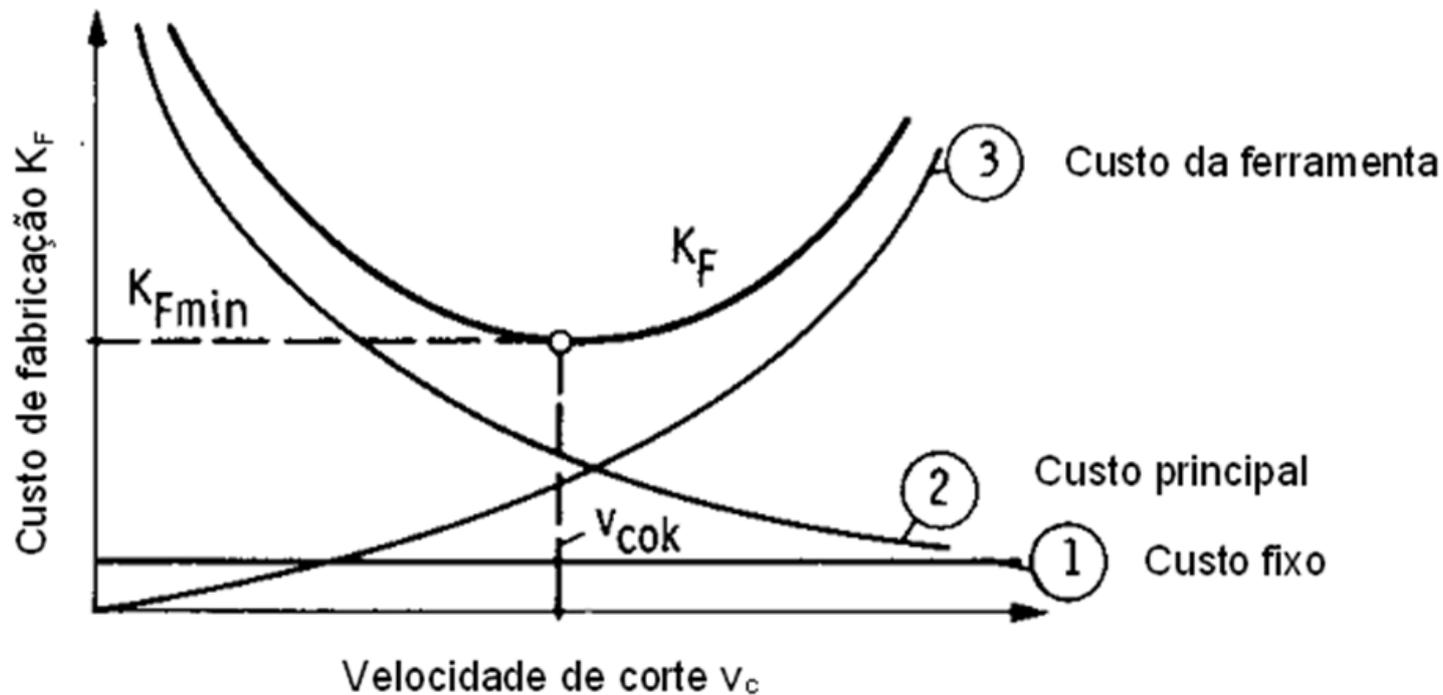
- Otimização da usinagem é feita conforme processo de fabricação, e pode ser realizada com relação a custo, tempos, lucro, qualidade,...





Custos de Fabricação

Custos de fabricação por peça (K_F) - [\$/peça]



- 1 - Custos de preparação e secundários (custo fixo);
- 2 - Custos de máquina e operador (principal);
- 3 - Custos de ferramenta



Otimização – Custos da Fabricação

$$K_F = \underbrace{K_{ML} \left(\frac{t_r}{m} + t_n \right)}_1 + \underbrace{K_{ML} \cdot t_h}_2 + \underbrace{\frac{t_h}{T} \cdot (K_{ML} \cdot t_W + K_{WT})}_3$$

- 1 Custos secundários (custos fixos);
- 2 Custos de máquina e operador (principal);
- 3 Custos de ferramenta



Otimização – Custos da Fabricação

$$K_F = \underbrace{K_{ML} \left(\frac{t_r}{m} + t_n \right)}_1 + \underbrace{K_{ML} \cdot t_h}_2 + \underbrace{\frac{t_h}{T} \cdot (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT})}_3$$

- ✓ K_F - custo de fabricação por peça [\$/peça]
- ✓ K_{ML} - custo de máquina e operador por hora [\$/min]
- ✓ K_{WT} - custo de ferramenta por vida [\$]
- ✓ t_n - tempos secundários [min]
- ✓ t_r - tempo de preparação [min]
- ✓ t_h - tempo principal [min]
- ✓ m - tamanho do lote
- ✓ t_w - tempo de troca da ferramenta [min]
- ✓ T - vida da ferramenta [min]



Otimização – Tempo de Fabricação por Peça

$$t_e = \underbrace{\frac{t_r}{m} + t_n}_{1} + \underbrace{t_h}_{2} + \underbrace{\frac{t_h}{T} \cdot t_w}_{3}$$

[min/peça]

✓ t_r - tempo de preparação [min]

✓ m - tamanho do lote

✓ t_n - tempos secundários [min]

✓ t_h - tempo principal [min]

✓ t_w - tempo de troca da ferramenta [min]

✓ T - vida da ferramenta [min]

1 - tempo de preparação e secundário

2 - tempo principal

3 - tempo de troca de ferramenta

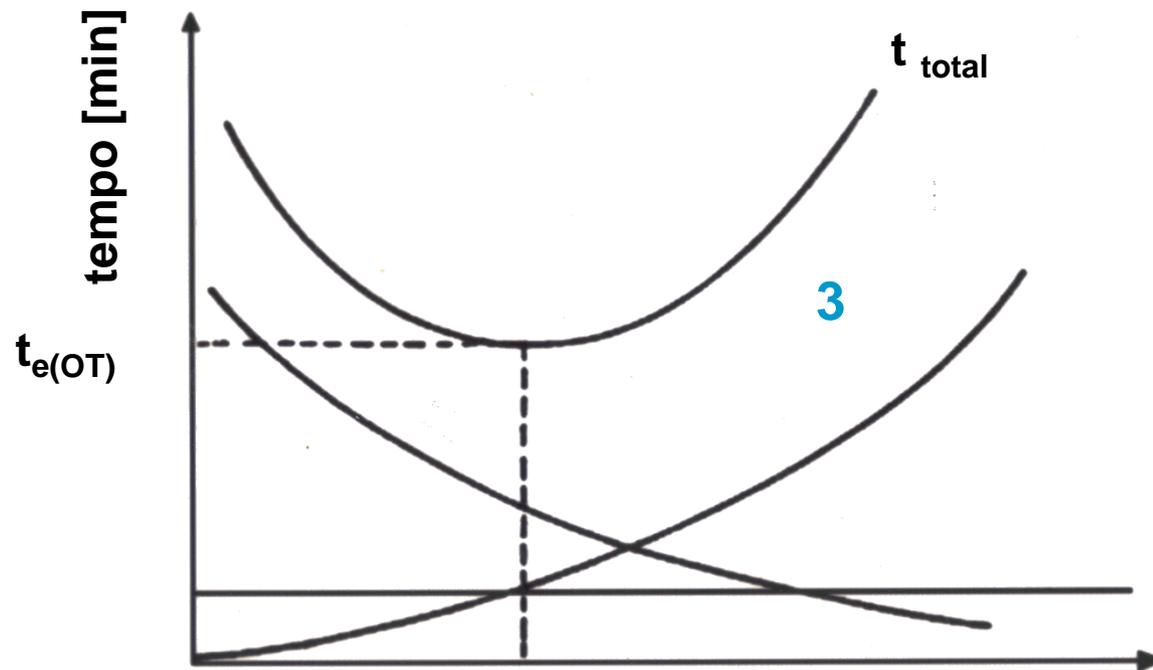
O tempo de fabricação tem um comportamento análogo aos dos custos de fabricação por peça, apresentando um valor ótimo (mínimo) para uma determinada condição de trabalho



Otimização - Tempo de fabricação

Tempo de fabricação por peça (t_e) - [min/peça]

- 1 - tempo de preparação e secundário
- 2 - tempo principal
- 3 - tempo de troca de ferramenta





Otimização – Custo de Fabricação por Peça

$$K_F = K_{ML} \left(\frac{t_r}{m} + t_n \right) + K_{ML} \cdot t_h + \frac{t_h}{T} \cdot (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT})$$

$$t_h = \frac{d \cdot \pi \cdot l_f}{f \cdot v_c} \quad [\text{min}] \qquad t_h = \frac{V_z}{a_p \cdot f \cdot v_c} \quad [\text{min}]$$

V_z = volume usinado por peça

➤ Equação do Custo de Fabricação por Peça:

$$K_F = K_{ML} \left(\frac{t_r}{m} + t_n \right) + \frac{K_{ML} \cdot V_z}{a_p \cdot f \cdot v_c} + \frac{V_z}{a_p \cdot f \cdot C_V \cdot v_c^{k+1}} \cdot (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT})$$

➤ Equação do Tempo de Fabricação por Peça:

$$t_e = \frac{t_r}{m} + t_n + \frac{V_z}{a_p \cdot f \cdot v_c} + \frac{V_z}{a_p \cdot f \cdot C_V \cdot v_c^{k+1}} \cdot t_w$$



Otimização – Custo de Fabricação por Peça

- Para determinar a velocidade de corte de mínimo custo:

$$\frac{dK_F}{dv_c} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{cok} = \sqrt[k]{-(k+1) \cdot \frac{\left(t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}}\right)}{C_V}}$$

- Para determinar a velocidade de corte de mínimo tempo:

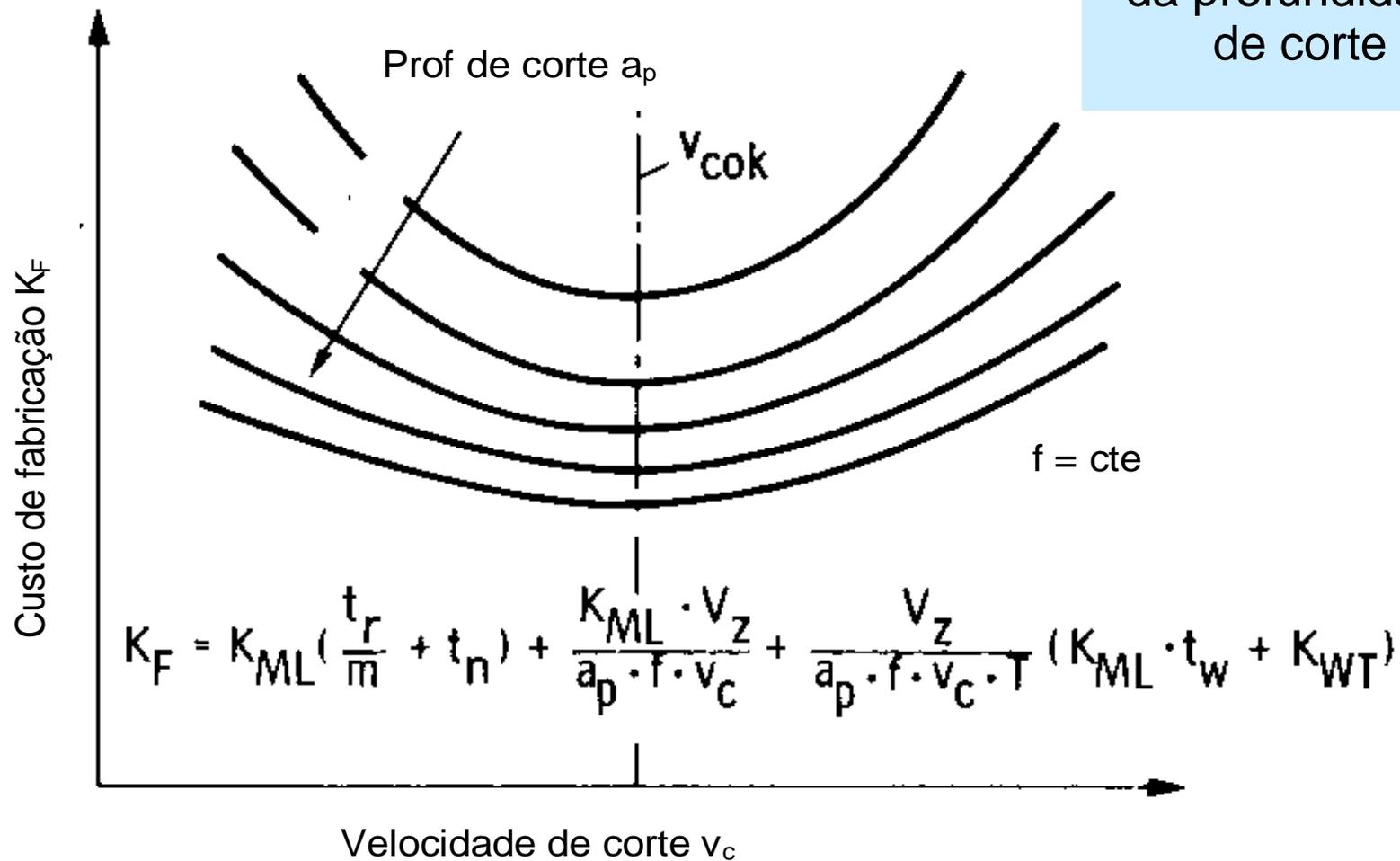
$$\frac{dt_e}{dv_c} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{coz} = \sqrt[k]{-(k+1) \cdot \frac{t_w}{C_V}}$$

OBS: O equacionamento da vida para ótimo custo e para ótimo tempo são idênticos



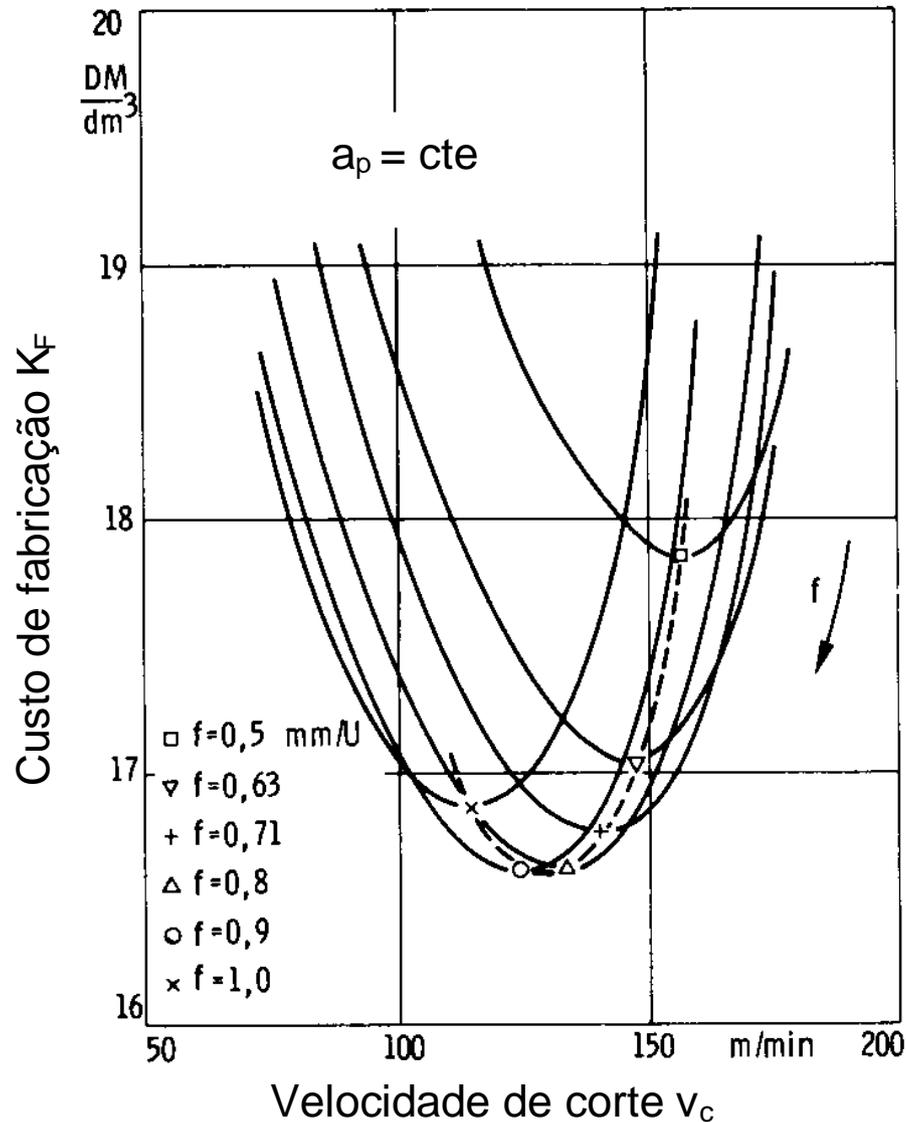
Otimização - Maximização da profundidade de corte

Maximização da profundidade de corte





Otimização - Maximização do avanço



Maximização do avanço



Otimização – Escolha dos parâmetros de usinagem

Na escolha dos parâmetros é indispensável

observar:

- Limites do conjunto ferramenta-peça-máquina;
 - Potência da máquina-ferramenta;
 - Tamanho do inserto (largura máxima de usinagem)
 - Forças de corte



- Fim da Aula -