

# MICROUSINAGEM: AULA 5

## MATERIAIS DE ENGENHARIA PARA MICROCORTE

**Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinevicius**

**Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues**

## INTRODUÇÃO

Materiais de engenharia continuamente desenvolvido (macro e microcorte)

Materiais dúcteis (ligas de alumínio e cobre)

Materiais frágeis (grafite, silício e germânio)

Desafios do microcorte: rebarba, acabamento, desgaste, precisão, integridade superficial e manufatura econômica

Rebarbas = tamanhos característicos de micropeças

Desgastes = mais sensíveis dados os níveis envolvidos

Tensão residual = alterar dimensões

Entender? Estudar as respostas na microescala a tensões e deformações

## EFEITO DE ESCALA

Microcorte: maiores deformações e tensões à frente da ferramenta

Deformação induzida: pequena área da ferramenta sobre pequeno volume da peça

Expectativa: força de corte e energia consumida menores na microescala

Efeito de escala: energia específica aumenta com a diminuição do volume removido

Por que remover volumes menores?

1. Acabamentos mais finos
2. Peças ou características menores
3. Pesquisa sobre o comportamento de menores remoção de material

## EFEITO DE ESCALA

$F_c$  não diminui proporcionalmente com  $t_0$  abaixo de uma espessura crítica

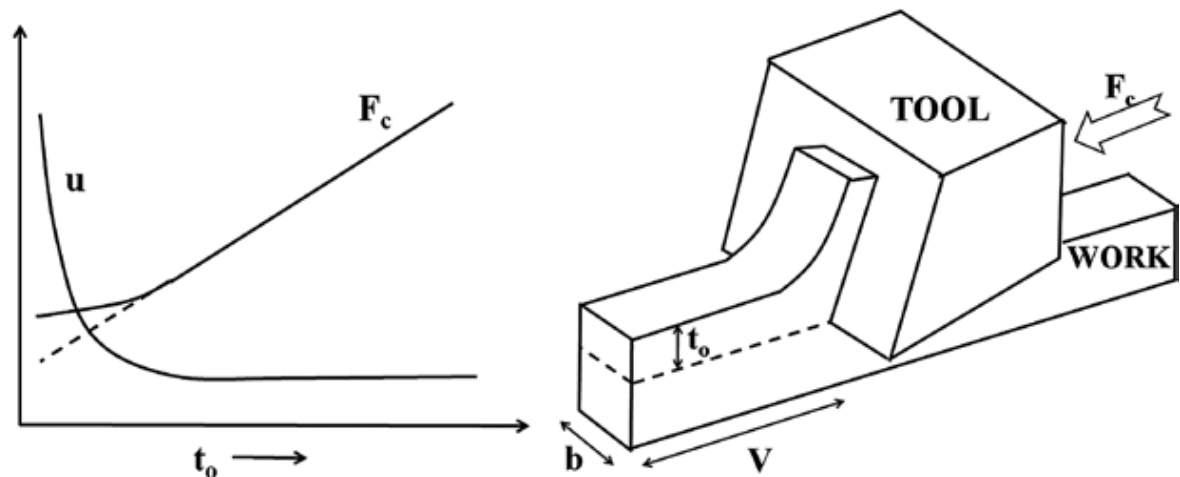
Materiais da peça: cobre, latão, alumínio, aços, polímeros, cerâmicas etc

Condições de corte:  $V = 0,1$  a  $200$  m/min,  $t_0 = 10$  nm a  $0,3$  mm

Processos: retificação, torneamento, fresamento etc

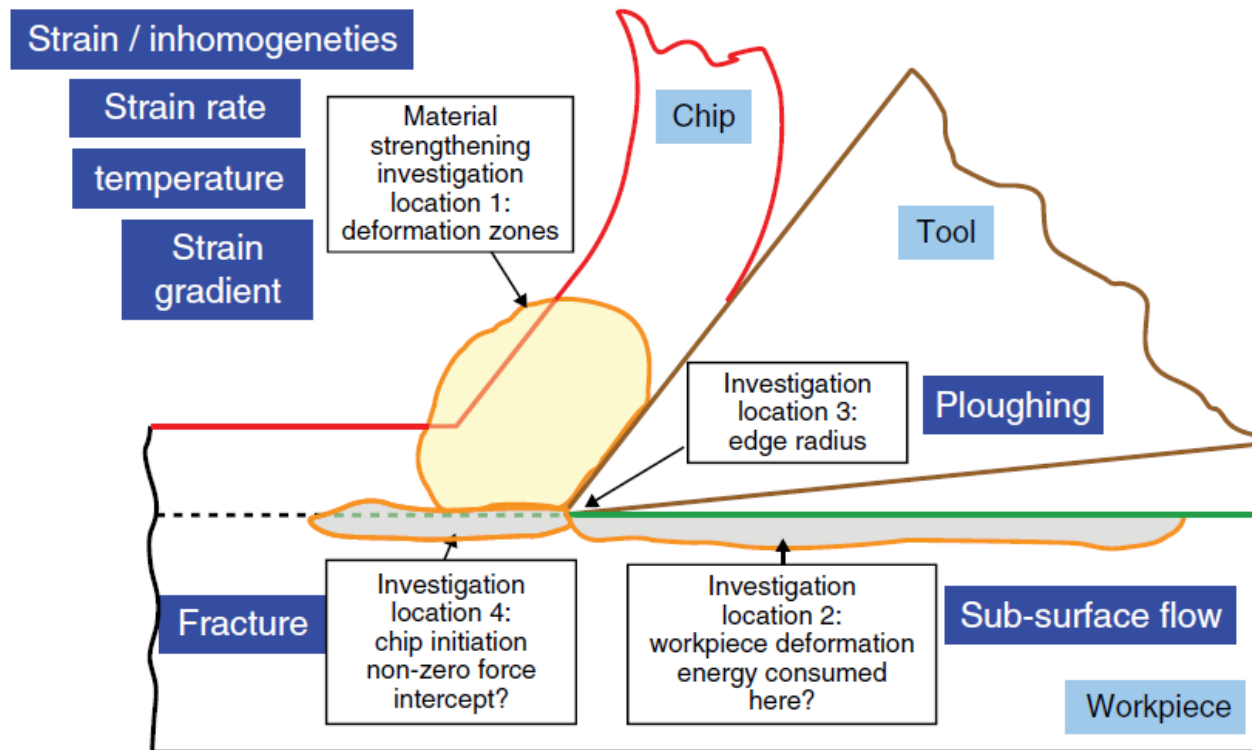
Ferramentas: quaisquer  $r_e$

$$u = \frac{F_c V}{b t_0 V} = \frac{F_c}{b t_0}$$



## EFEITO DE ESCALA

Efeito de escala: propriedades do material da peça x geometria da ferramenta

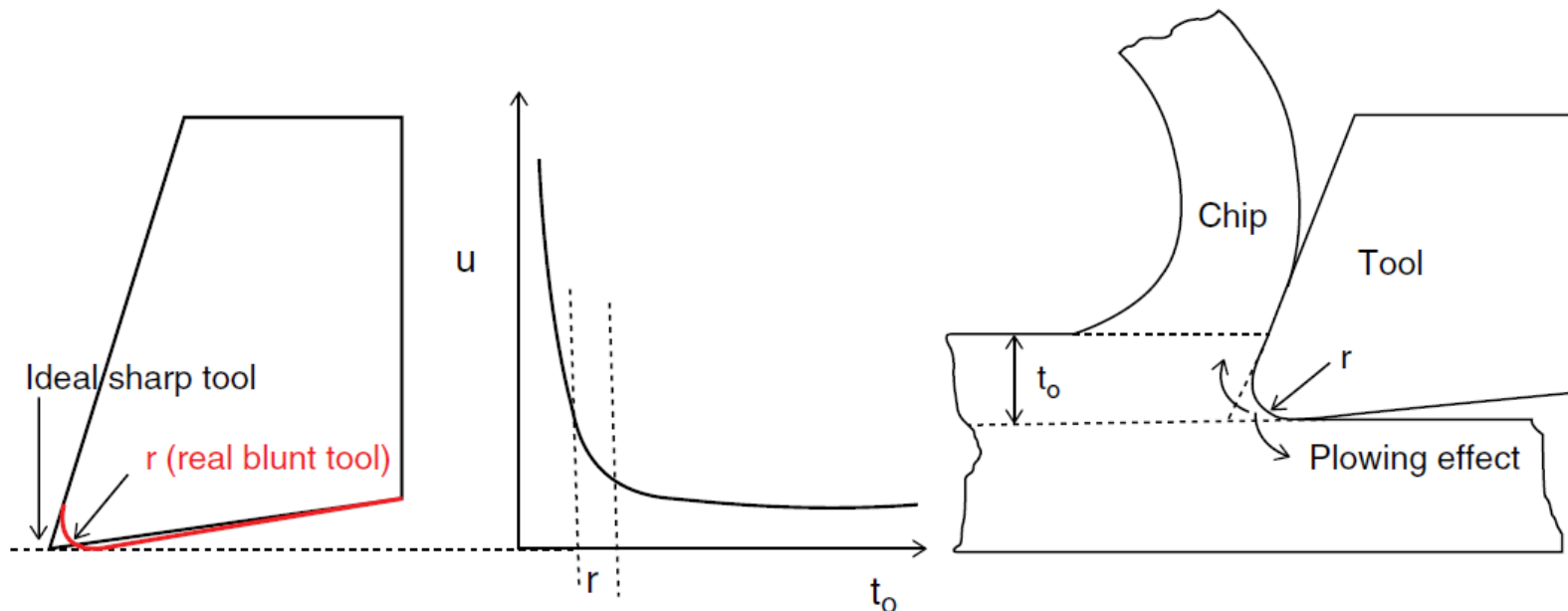


## EFEITO DE ESCALA

Geometria da ferramenta: raio de aresta e atrito

Raio de aresta:  $t_0 \sim r_e = \gamma$  efetivo negativo = recalque (por baixo e laterais)

Atrito: quando  $t_0$  diminui, calor diminui, resistência aumenta, maior atrito



## TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA USINAGEM

Propriedades do material da peça: tensões e deformações em AB e AC.

Deformações: 1-5 mm/mm; Taxas de deformação:  $10^2$ - $10^6$  s<sup>-1</sup>

Métodos analíticos e numéricos são aplicados

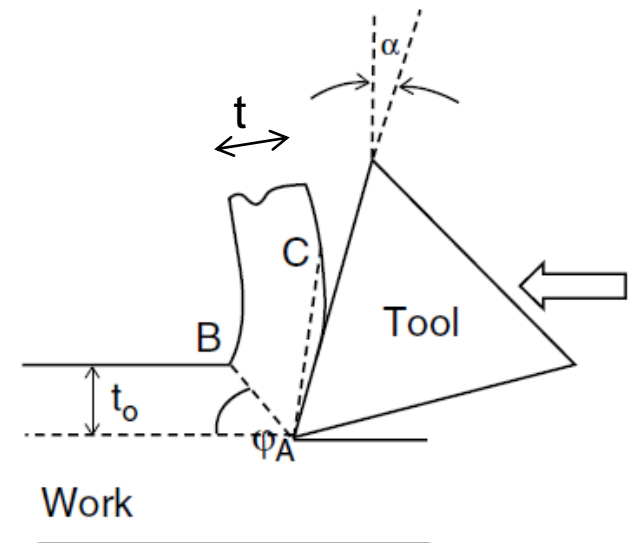
Modelos analíticos: medição experimental de  $F_c$ ,  $F_T$  e  $t$ .

$$\tau = \frac{(F_c \cos \phi - F_T \sin \phi) \sin \phi}{bt_o}$$

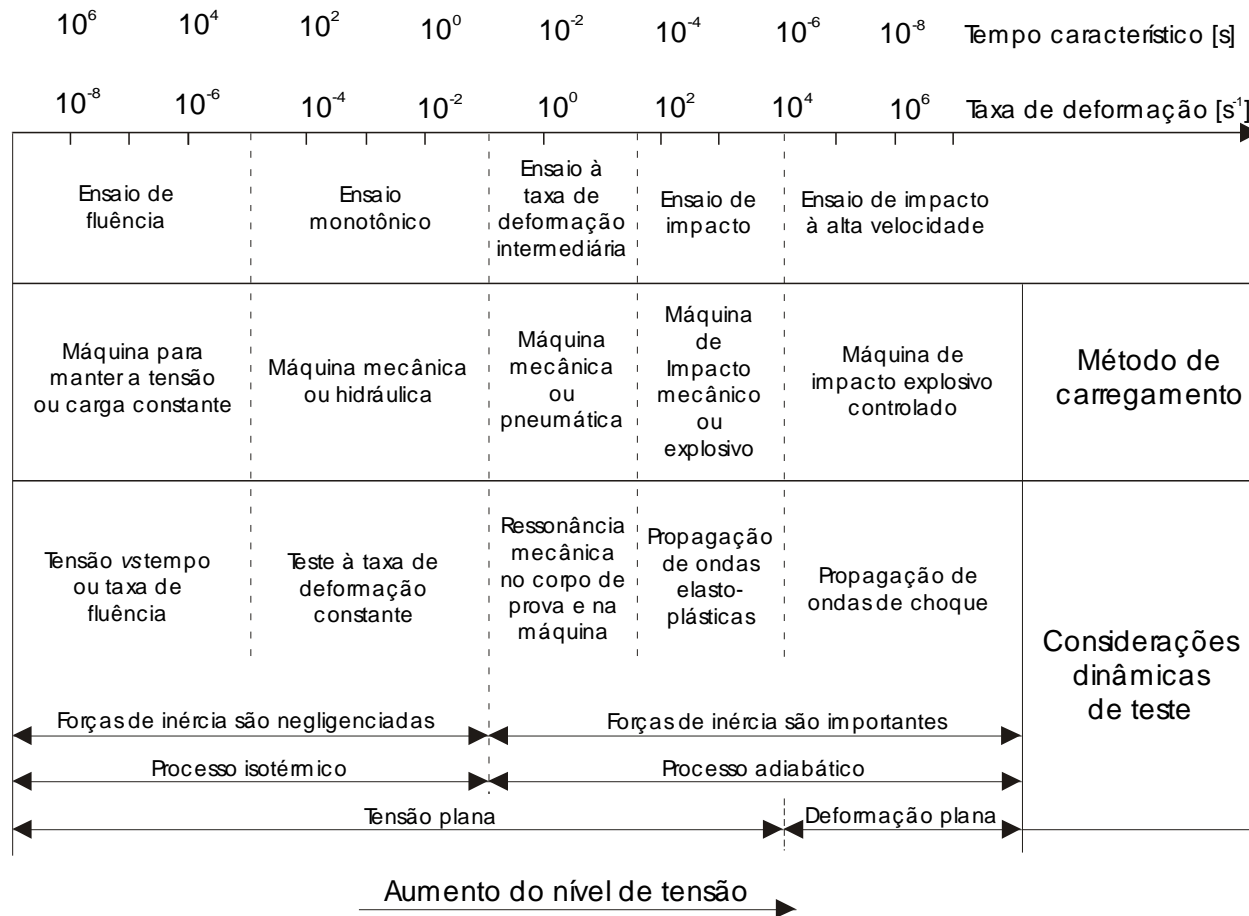
$$\sigma = \frac{(F_c \sin \phi - F_T \cos \phi) \sin \phi}{bt_o}$$

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

$$\dot{\gamma} = \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} \frac{V}{\Delta s}$$



## TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA USINAGEM





## TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA USINAGEM

Ângulo de Cisalhamento: Merchant e Piispanen  $\phi = \frac{C_1 - \beta + \alpha}{2}$

$C_1$  constante do par peça-ferramenta e  $\beta$  ângulo de atrito

Hipóteses: (a) relação linear  $C_1 = \cot^{-1}(K)$ ; K relaciona  $\sigma$  e  $\tau$   
(b) mínimo gasto de energia

Valores de  $C_1$ : aço-HSS/MD: 70-79°, Al-HSS/MD: 83-84°, Cu-HSS/MD: 47-49°  
Para ferramentas de diamante:  $C_1$  maior 10-30%

Predizendo  $\phi$ , tem-se a  $\gamma$ . Próximo passo: relacionar tensão e deformação

$\sigma = K \varepsilon^n$  (válida para pequeno  $\varepsilon \sim 1$ );  $\sigma = A + B \varepsilon$  (válida para grande  $\varepsilon > 1$ )\*

\* Tração/compressão em deformação plana uniaxial (monotônico)

## TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA USINAGEM

Porém, quando  $\tau$  e  $\sigma$  são combinados e baixos,  $\tau$  diminui com  $\gamma$  (trincas)\*

\* Ocorrências na ZPC (aplicação em usinagem)

Microcorte: altas  $\gamma$ ,  $\dot{\gamma}$  e  $T_c$  (acoplamento termomecânico)

Métodos analíticos são mais difíceis de serem desenvolvidos

Métodos numéricos dependem de relações constitutivas (Modelo JC)

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m})$$

A, B, C<sub>2</sub>, m e n são constantes experimentais (torção, tração em distintas taxas)

$\gamma \sim 2$  mm/mm e  $\dot{\gamma} \sim 10^5$  s<sup>-1</sup> (microcorte)

## TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA USINAGEM

Constantes de JC para alguns materiais de engenharia

	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$n$	$C_2$	$m$
OFHC Copper	90	292	0.31	0.025	1.09
C2600 Brass	112	505	0.42	0.009	1.68
1006 Steel	350	275	0.36	0.022	1.00
4340 Steel	792	510	0.26	0.014	1.03
S-7 tool steel	1539	477	0.18	0.012	1.00
Al-2024	265	426	0.34	0.015	1.00
Al-7039	337	343	0.41	0.010	1.00
Pure Ni (Nickel 200)	163	648	0.33	0.006	1.44

## ELASTOPLASTICIDADE NO MICROCORTE

Grande deformação do material em um volume muito pequeno da peça

O efeito de escala (SE) afeta o comportamento do material da peça

Resposta plástica do material da peça em diferentes níveis de escala  
Ocorre quando a peça ou o volume deformado é muito pequeno

SE é notado sob duas condições:

- 1) Parâmetros de tamanho comparáveis a comprimentos característicos (intrínseco)
- 2) Restrições dimensionais devido a dimensões reduzidas (extrínseco)

O material da peça resiste fortemente à deformação plástica (aumento da resistência mecânica)

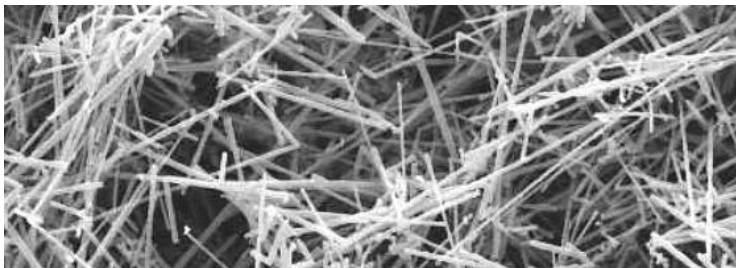
## ELASTOPLASTICIDADE NO MICROCORTE

Exemplos de SC extrínscico:

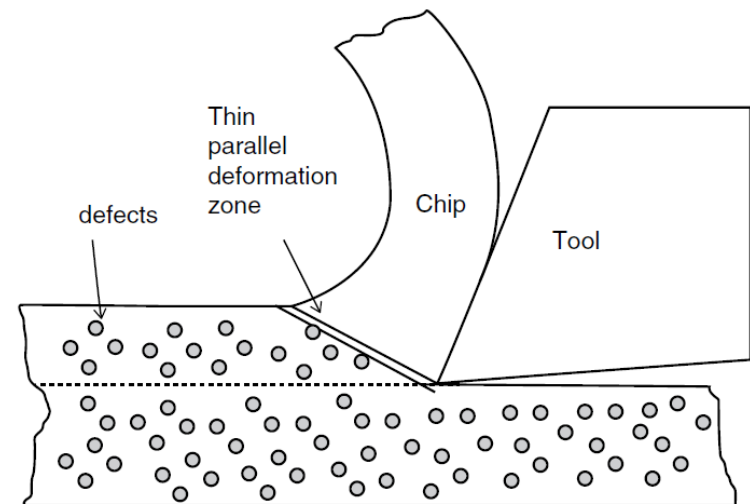
1D: tração de whiskers (monocristais) ou corte de filmes finos

2D: torção de filamentos de cobre ou flexão de folhas metálicas

3D: dureza x carga

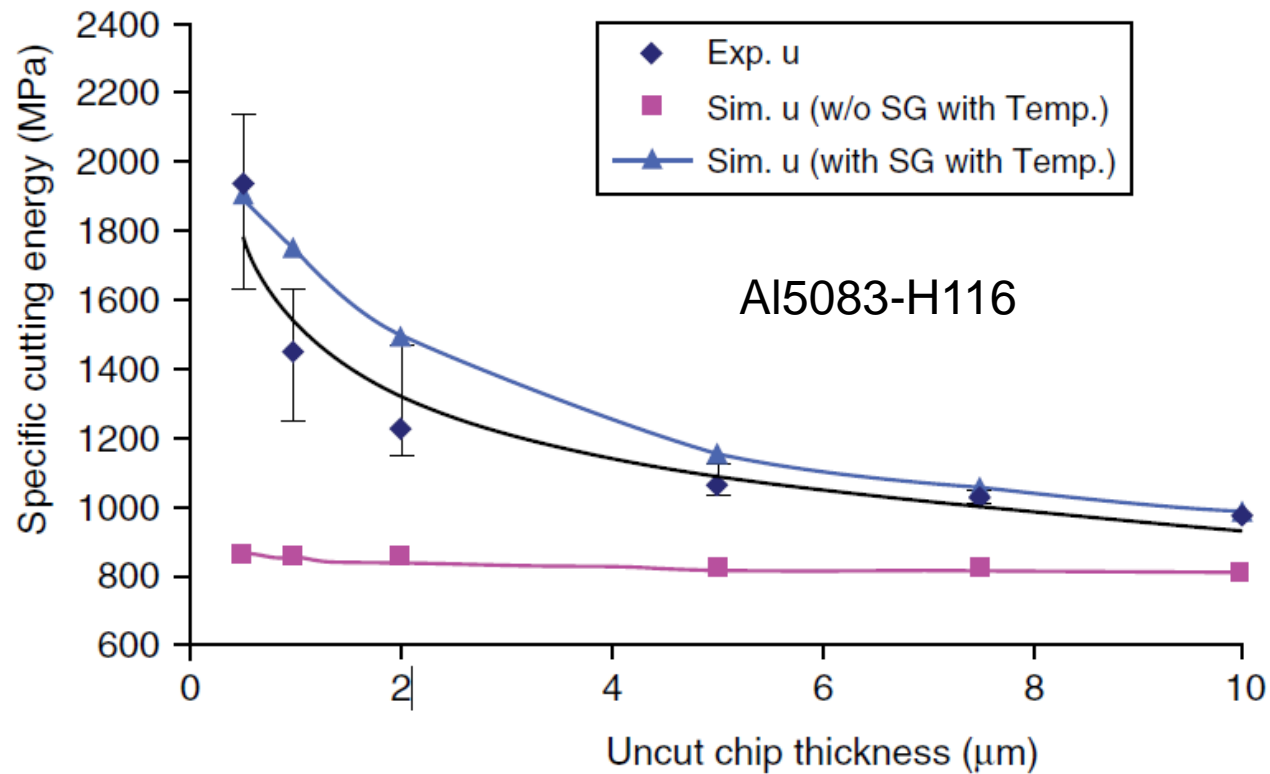


Whiskers de Si ( $\varnothing$  micrométrico e L milimétrico)



Zona de cisalhamento primária

## ELASTOPLASTICIDADE NO MICROCORTE



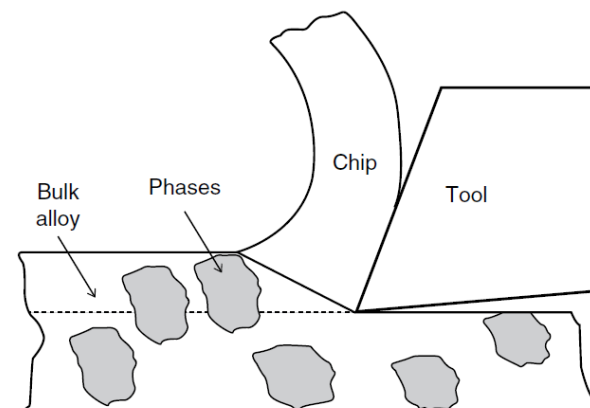
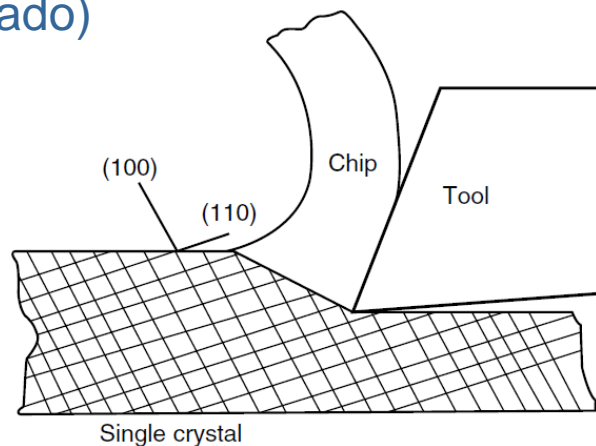
## ELASTOPLASTICIDADE NO MICROCORTE

Exemplos de SC intrínsecos: Relação de Hall-Petch.

“Experiments have not been reported on materials with different grain sizes to show that higher force and hence higher energies are needed to cut fine grained materials.”

$$\dot{\gamma} = C_4 \frac{V_s}{t_o} \quad \text{Modelo de Larsen et al. (1973)}$$

Orientação cristalográfica/fases/inclusões: anisotropia (número de grãos x volume deformado)

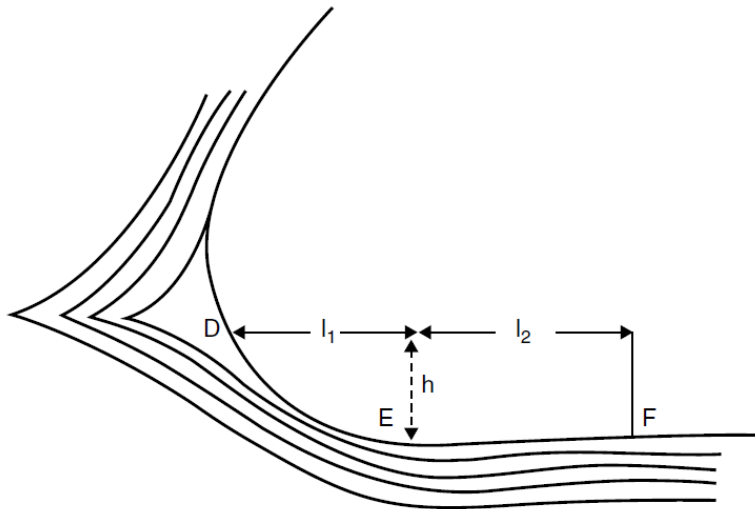




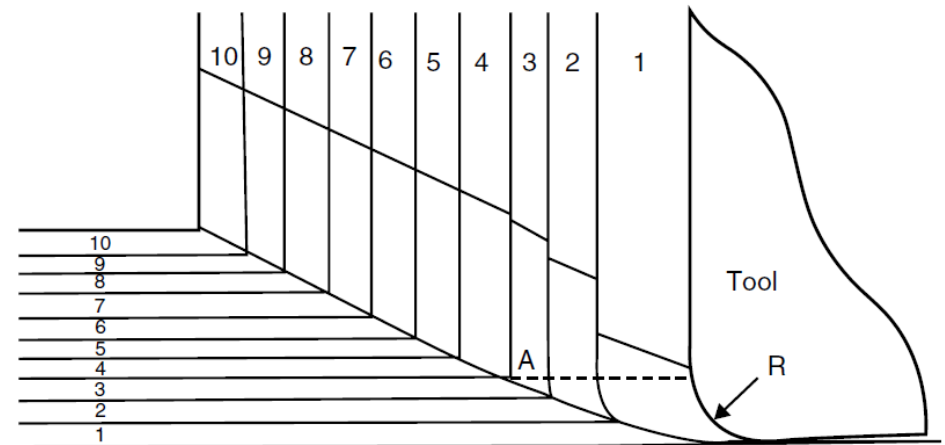


## EFEITO DA FRATURA DA PEÇA NO MICROCORTE

Modelos que levam em conta o processo de fratura na formação do cavaco



Modelo de Connolly e Rubenstein



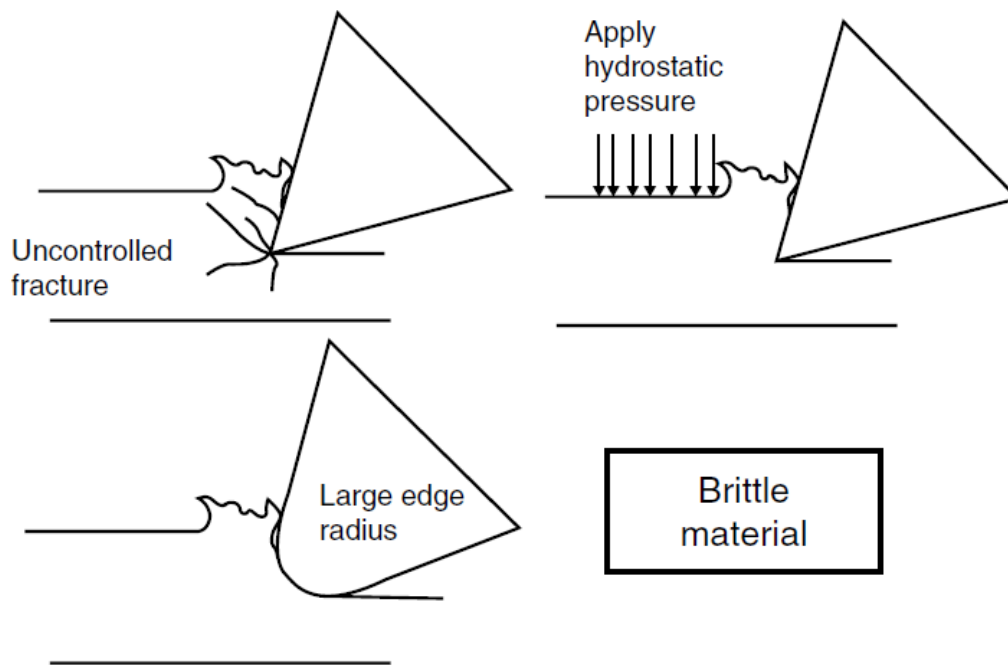
Modelo de Cook, Finnie e Shaw

Modelo de Merchant: energia de superfície ( $10^{-3}$  N/mm) e trabalho plástico negligenciáveis

## EFEITO DA FRATURA DA PEÇA NO MICROCORTE

Desafio: fraturas em microcorte de materiais frágeis

Escoamento plástico = f(volume) x fratura = f(superfície)

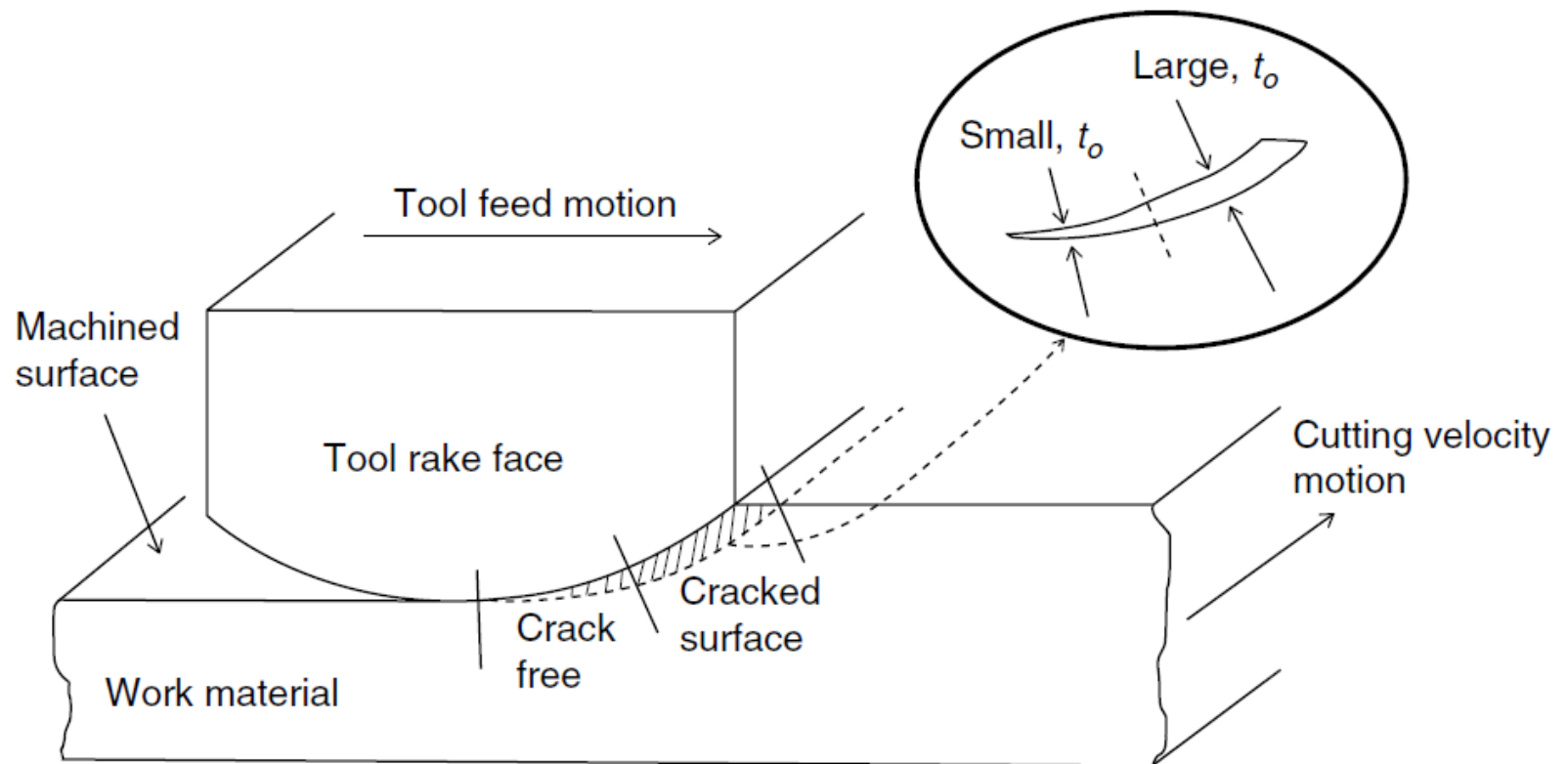


$$P = \frac{\Omega K_c^4}{H^3}$$

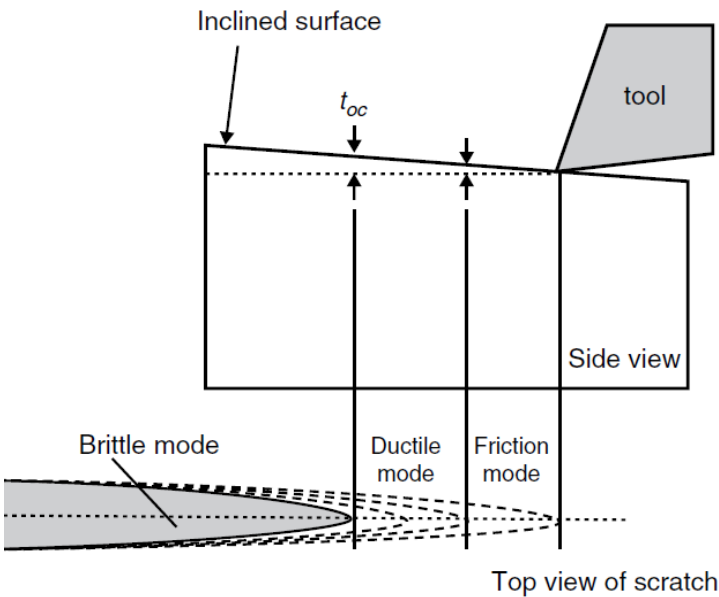
$$h_c = \psi \left( \frac{E}{H} \right) \frac{K_c^2}{H^2}$$

## EFEITO DA FRATURA DA PEÇA NO MICROCORTE

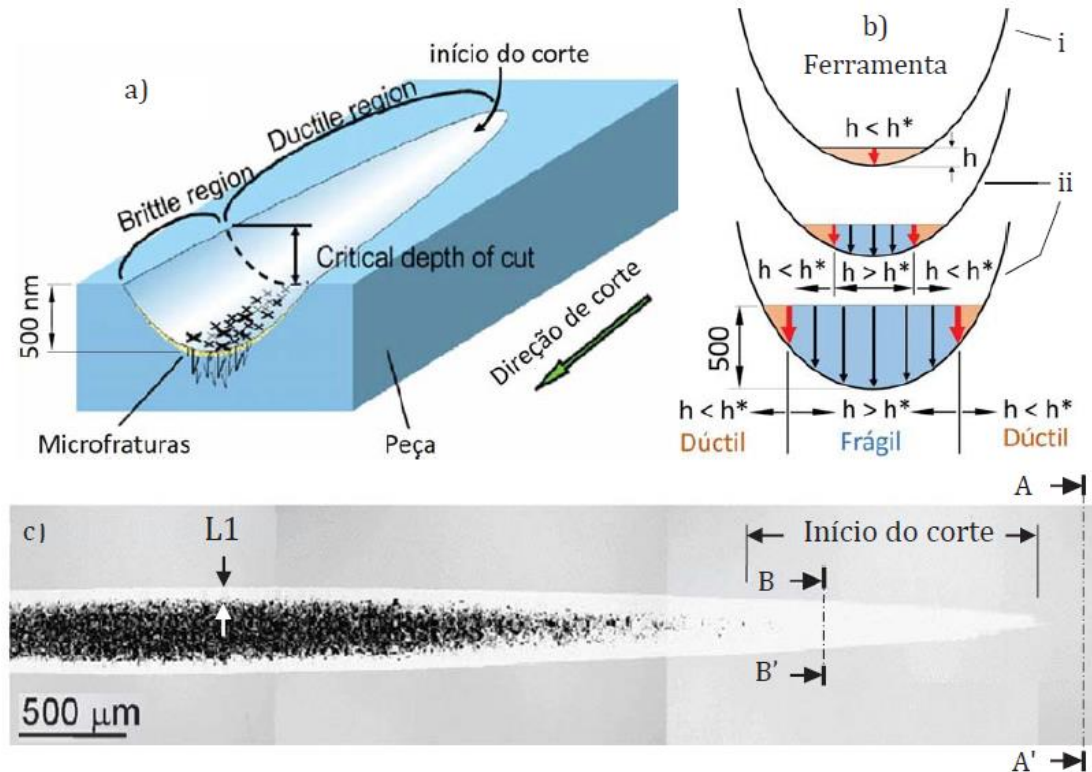
Torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis



## EFEITO DA FRATURA DA PEÇA NO MICROCORTE



Brinksmeier et al. (1995)



## MATERIAIS PROCESSADOS NO MICROCORTE

### Materiais puros:

		Melting Point	Structure				
In	Indium	157	tetragonal	Ti	Titanium	1660	hcp
Sn	Tin	232	fcc	Rh	Rhodium	1966	fcc
Pb	Lead	373	fcc	Co	Cobalt	1495	hcp
Zn	Zinc	420	hcp	V	Vanadium	1890	bcc
Pu	Plutonium	640	monoclinic	Ru	Ruthenium	2310	hcp
Mg	Magnesium	649	hcp	Ta	Tantalum	2996	bcc
Al	Aluminum	660	fcc	Fe	Iron	1535	bcc
Ge	Germanium	937	diamond	Nb	Niobium	2468	bcc
Ag	Silver	962	fcc	W	Tungsten	3410	bcc
Au	Gold	1064	fcc	Mn	Manganese	1244	bcc
Cu	Copper	1083	fcc	Cr	Chromium	1857	bcc
Be	Beryllium	1277	hcp	Mo	Molybdenum	2617	bcc
Si	Silicon	1410	diamond	Re	Rhenium	3180	hcp

## MATERIAIS PROCESSADOS NO MICROCORTE

### Materiais dúcteis:

- Cavaco contínuo
- Bom acabamento
- Isento de trincas
- Boa integridade superficial
- **Maior rebarba**
- **Aresta postiça de corte**

Alumínio (espelhos metálicos)

Ligas Al-Mg (discos magnéticos)

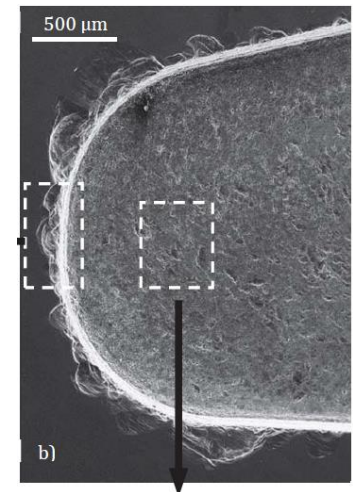
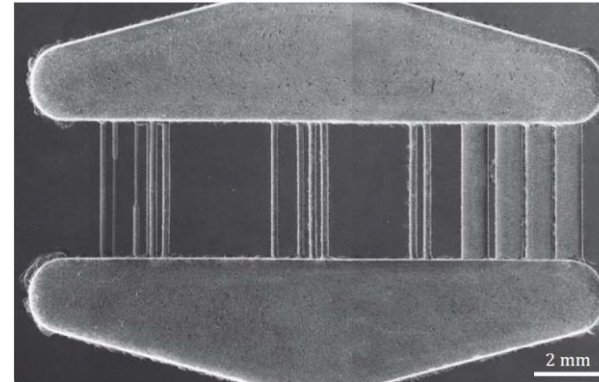


## MATERIAIS PROCESSADOS NO MICROCORTE

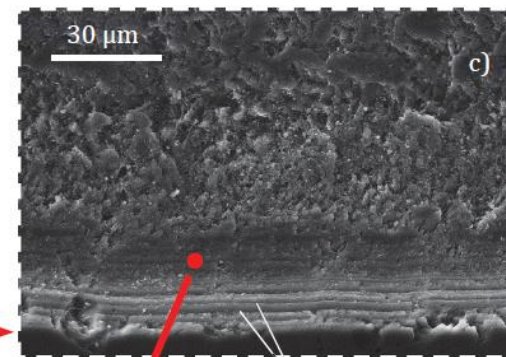
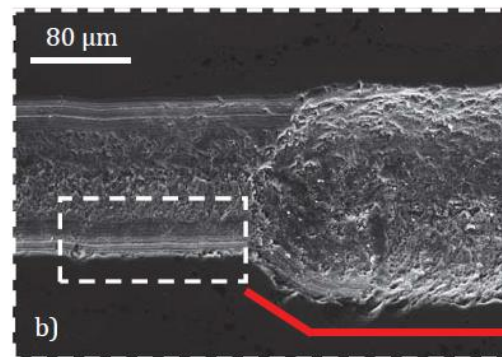
### Materiais frágeis:

- Cavaco descontínuo/contínuo
- Regimes de corte dúctil/frágil
- **Danos superficiais (pits)**

Vidro, Silício, Germânio,  
Tungstênio, WC



Dib (2016)

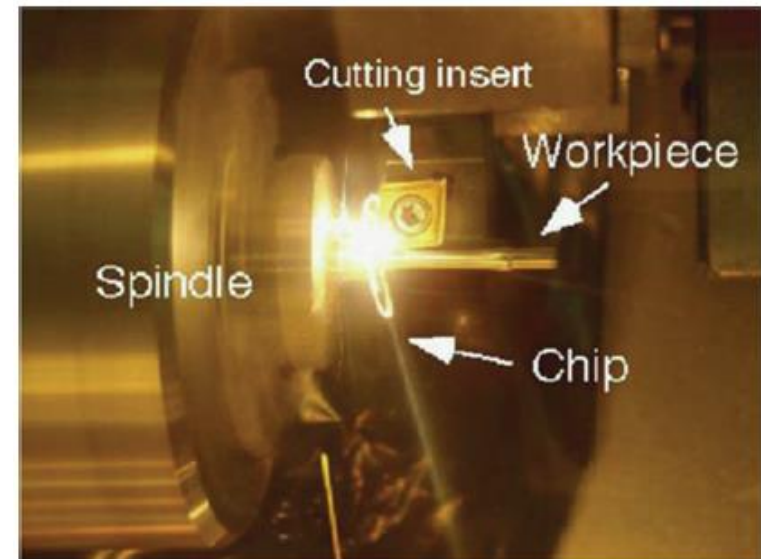


Marcas dúcteis dos  
grãos da aresta

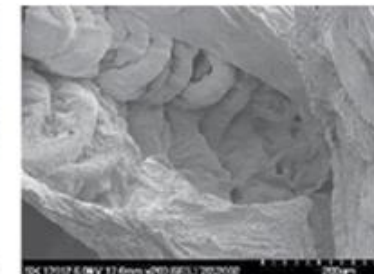
## MATERIAIS PROCESSADOS NO MICROCORTE

### Outros materiais:

- Grafeno
- Ligas amorfas
- Polímeros dopados



200x



200x

Vidro metálico