

MICROUSINAGEM: AULA 2

MECÂNICA DO MICROCORTE

Prof. Assoc. Alessandro Roger Rodrigues

INTRODUÇÃO

Cinemática do Microcorte

Redução simples de escala

Quando $h \sim r_e$ ou TG:

$\gamma < 0$, contato peça-folga, $h_{\min}$, microestrutura da peça etc

Problemas identificados pela força e energia específica de corte

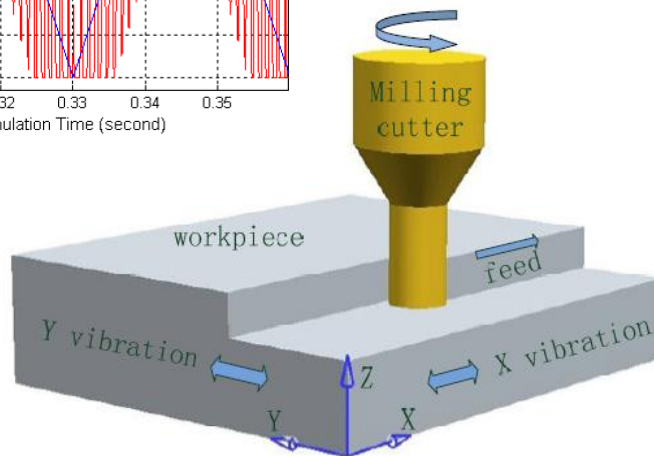
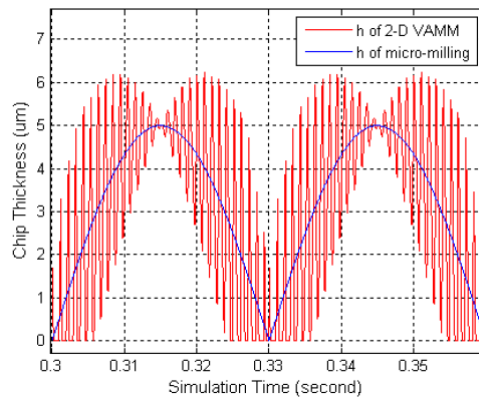
Depende de máquinas-ferramentas, ferramentas e sistemas de medição

Questões críticas:

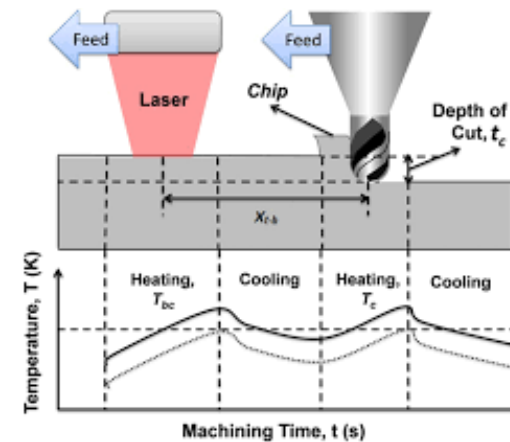
Desgaste, rigidez da ferramenta, materiais de difícil usinabilidade

Inovações: vibração e laser em fresamento

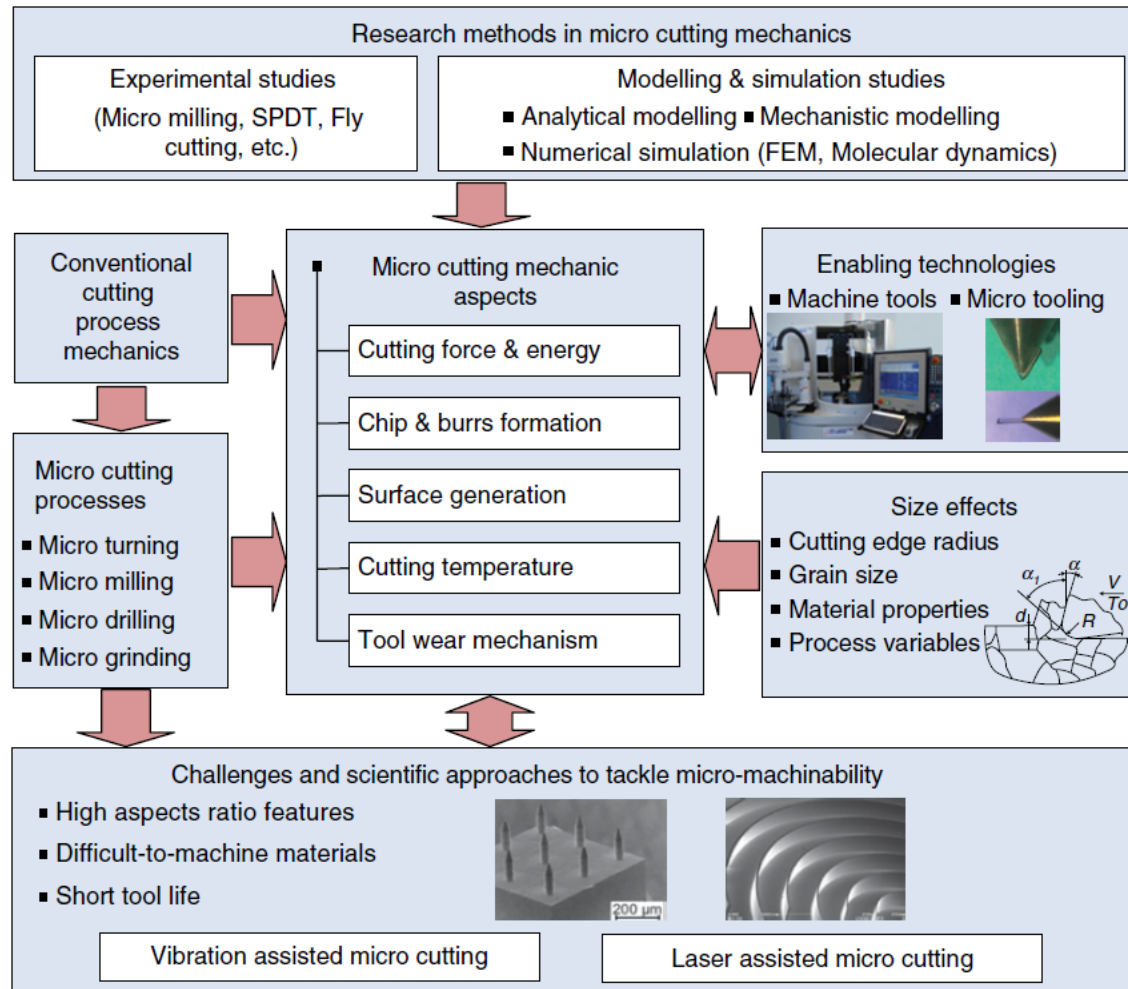
INTRODUÇÃO



Vibration-assisted micromilling



Laser-assisted micromilling



CARACTERIZAÇÃO DO MICROCORTE

Microusinagem mecânica

Microtorneamento, fresamento, furação, retificação

Máquinas CNC 3D

Dimensões funcionais de micrometros a poucos milímetros

Definição baseia-se em h

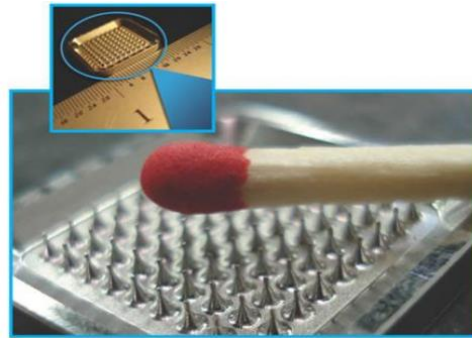
Células de combustível, labs-on-chips, lentes, bocais, fibra ótica

Inox, Ti, Latão, Al, plásticos, cerâmicas e compósitos

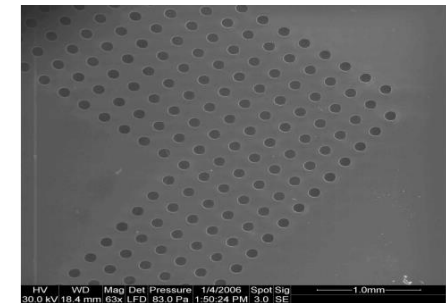
CARACTERIZAÇÃO DO MICROCORTE



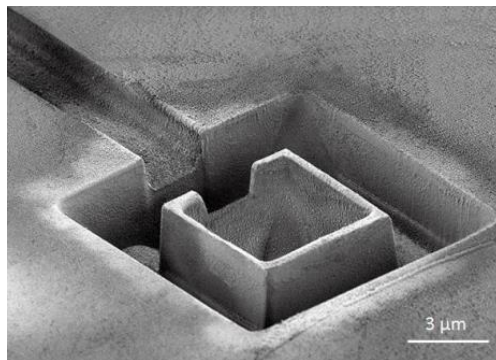
Biomedicina: bocal furo 0,07 mm



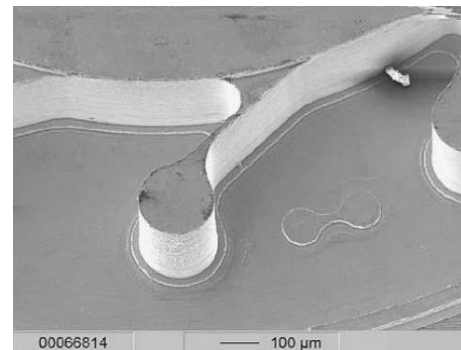
Inox 440: matriz cones 0,2 x 0,5 x 1,5 mm



Microfuro laser poliamida

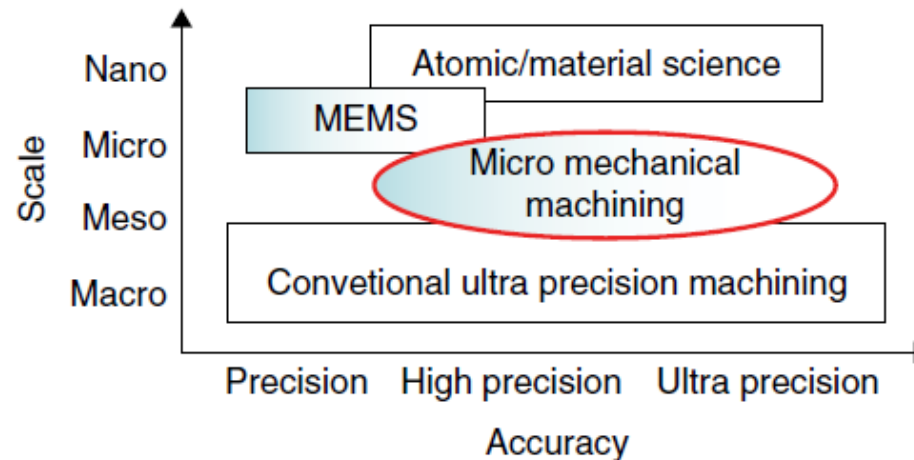


Lab-on-chip alumina laser



Entrada mini turbina latão

CARACTERIZAÇÃO DO MICROCORTE



Futuro dos processos de ataque químico e litrografia

Material x precisão x acabamento

MICROCORTE X ULTRAPRECISÃO

Semelhanças: $h_{\min}$, a_p , formação de cavaco, energia específica

Distinções: processos, tamanhos de peças, ferramental, aplicações

	Micro cutting	Ultra-precision machining
Processes	Micro turning, milling, drilling, grinding, etc.	Single point diamond turning, fly cutting, etc.
Tooling	Various tooling materials: (coated) tungsten carbide, CVD, CBN, diamond tools	Natural diamond tools
Component size	1–1000 μm	1 mm above, Can be very large
Shape	3D shape with high aspect ratios and geometric complexity	Rotational parts, both spherical and aspheric surface, normally low aspect ratios.
Accuracy	Absolute: <10 μm Relative: 10^{-2} – 10^{-5}	Absolute: <1 μm Relative: 10^{-5} – 10^{-6}
Surface finish	<100 nm Ra	Typically <20 nm Ra
Machines	Precision machining centres, precision micro machines, ultra-precision turning machines	Ultra-precision turning machines
Applications	Various applications requiring micro components	Electro-optics
Depth of cut (uncut chip thickness)	1–10 μm	0.1 μm – 10 μm

TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Máquinas-Ferramentas

Torno e centros de usinagem

Comerciais ou montadas em laboratório

Erros de forma < 100 nm

Rugosidades Ra 10 a 100 nm

Rigidezes, distorção térmica, erros de movimentação e amortecimento

Categorias: torno de ultra precisão e centros de retificação/fresamento

Tamanho menor: temperatura, pressão, humidade, força de inércia, energia, precisão e custo

TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE



Figure 2.3 Industrial precision machine tools with micro cutting capability: (Reproduced from [2]) (a) Kern micro. Copyright KERN Microtechnik GmbH; (b) Sodick AZ150. Image courtesy of Sodick, Inc.; (c) Fraunhofer IPT Minimill. Reproduced from [6]; (d) Makino Hyper2J. Image courtesy of Makino; (e) Kuglar MicroMaster MM2. Image courtesy of Kugler GmbH; (f) Fanuc ROBOnano. Images courtesy of FANUC; (g) Precitech freeform 700 Ultra. Image courtesy of Ametek Precitech; (h) Moore Nanotech 350FG. Copyright Moore Nanotech

TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

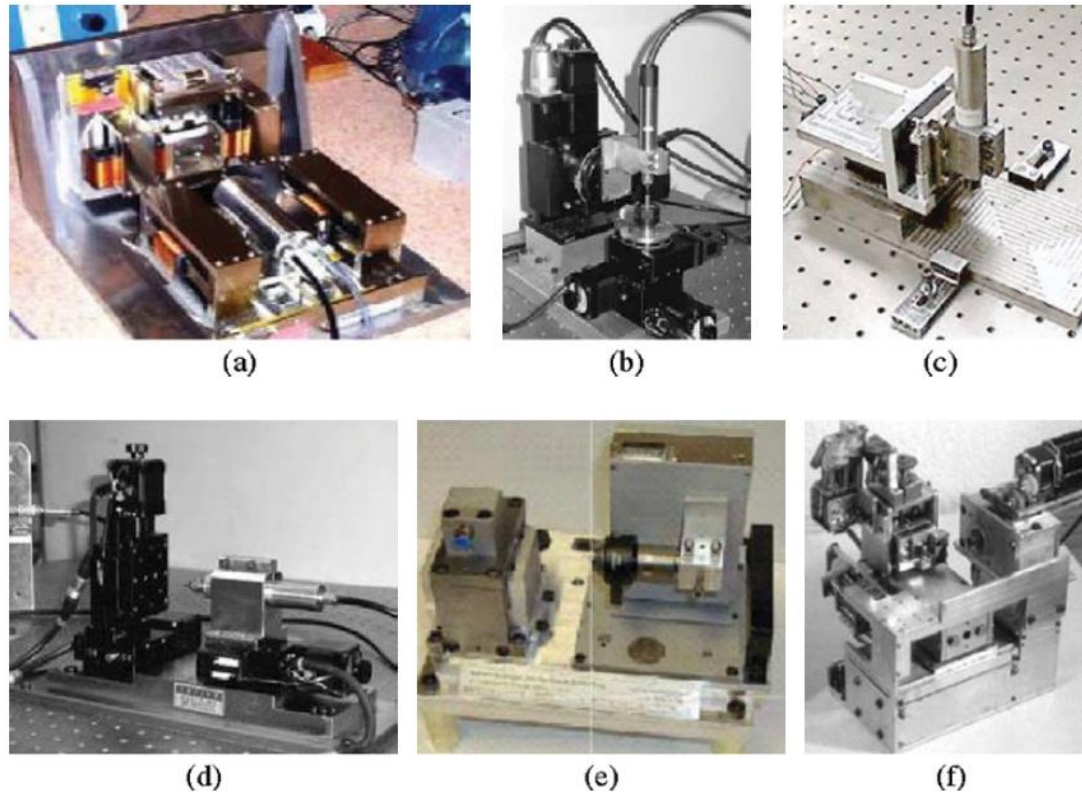


Figure 2.4 Examples of miniature machine tools and micro factories. (Reproduced from [2])
(a) Reproduced with permission from [10]; (b) Reproduced from [11]. Copyright 2005 Spriger;
(c) Reproduced from [12]. Copyright 2006 ASME; (d) Reproduced from [13]. Copyright 2008 Springer;
(e) Reproduced with permission from [10]; (f) Reproduced with permission from [8]. Copyright 2002 IOP Publishing

TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Ferramentas

Geometria do microcorte

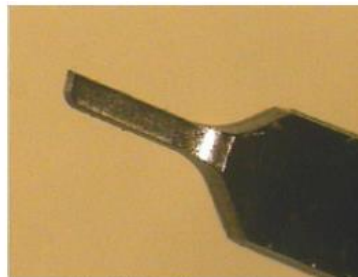
Desgaste, formação do cavaco, geração da superfície, calor.

Altas tensões térmicas e mecânicas

Diamante (afinidade) x metal duro (TG e revestimento)



(a) Tungsten carbide



(b) CVD diamond



(c) Single crystal diamond

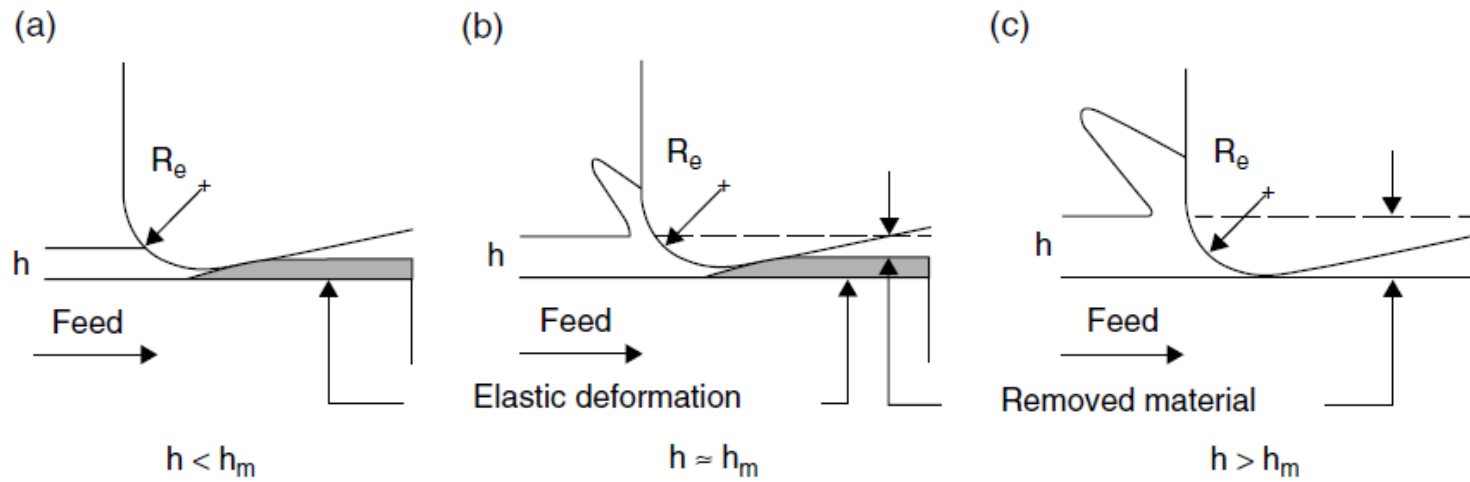
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Mecânica do Microcorte

Aresta da ferramenta afiada + material da peça homogêneo

Redução de escala (scaling down) do macrocorte

Efeito de escala da ferramenta (**SET**): plowing + cutting + sliding



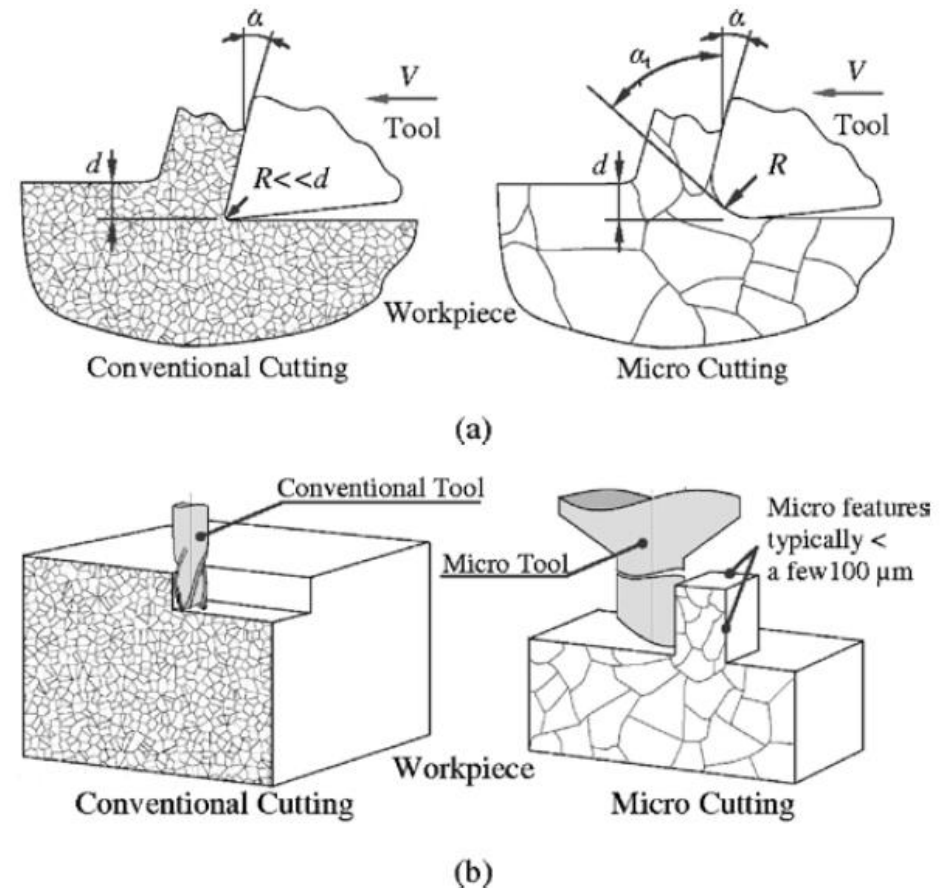
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Mecânica do Microcorte

Efeito de escala do material da peça:

(SEM): Microestrutura (grãos)

(SEP): Feature size/grain size ~ 1 ou
surface/volume aumenta



TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Mecânica do Microcorte

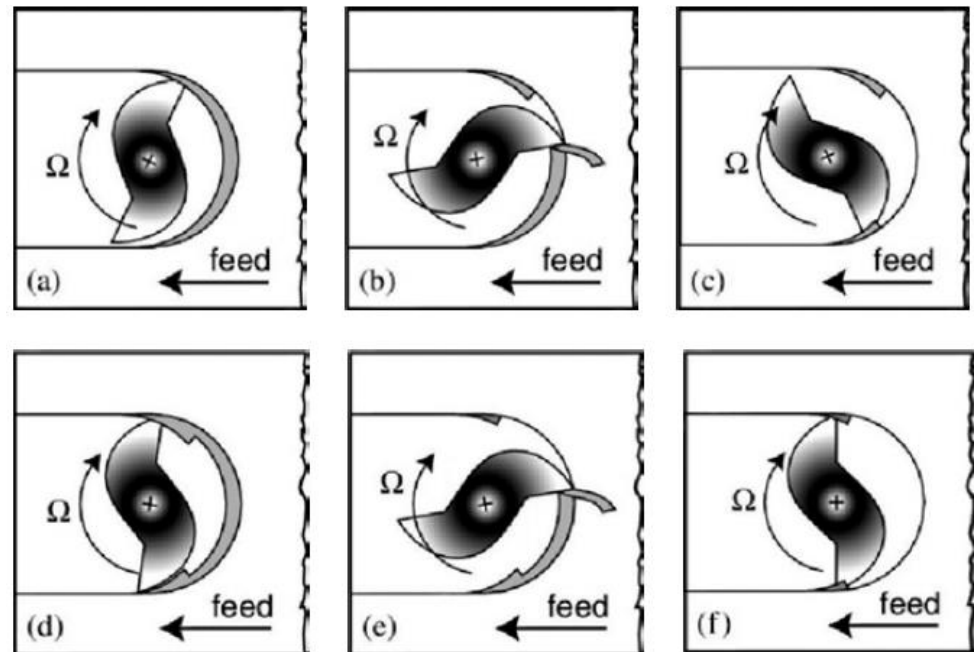
Espesura mínima de corte (h_{min})

Usinagem de ultra precisão

Rubbering => plowing => shearing

Razões h_{min}/r_e :

- ~1/20 (MD)
- ~1/10 (UPT-Cu)
- ~1/3 (fresamento metais)



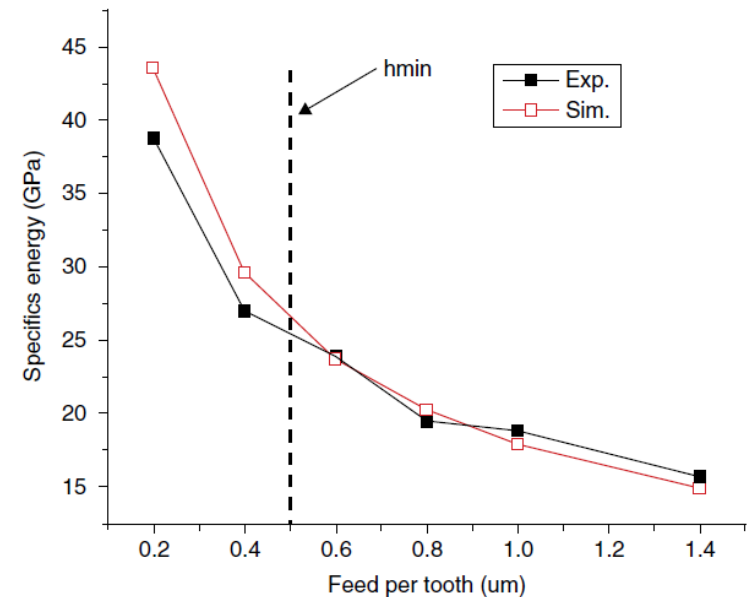
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Energia Específica de Corte

$$E = \frac{P}{MRR} = \frac{F_c v}{v b d} = \frac{F_c}{b d} \left(\text{in J/mm}^3, \text{N/mm}^2 \text{ or MPa} \right)$$

b constante => menor d, menor F. Menor E?

- Resistência do material da peça: falta de defeitos
- Raio de aresta da ferramenta: ângulo de saída < 0



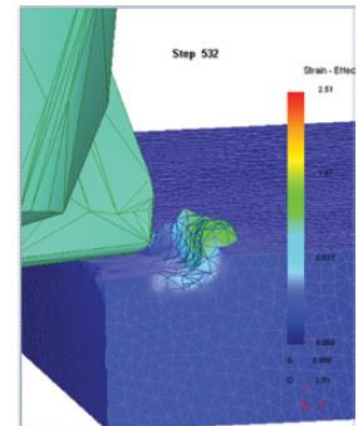
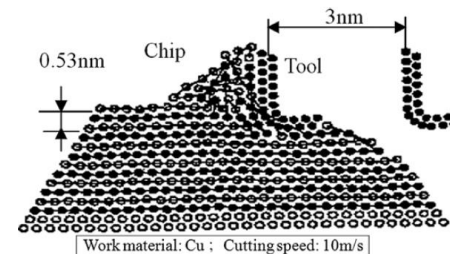
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Estimação das Forças de Corte

Analítica: espessura de corte instantânea / modelo campo linhas escorregamento

$$F = k_m bh$$

Numérica: dinâmica molecular / elementos finitos



Experimental: dinamometria



TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Estimação das Forças de Corte

Análítica: raio de aresta (plano de cisalhamento e ângulo de saída)

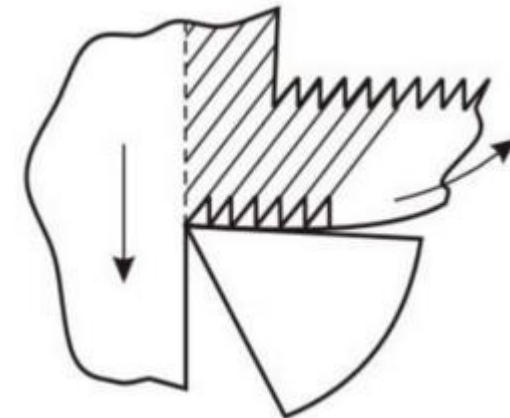
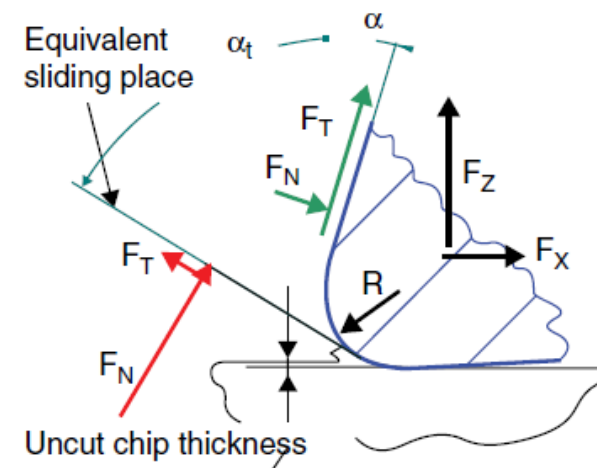
$$\alpha_t = \arcsin\left(\frac{h}{r_\epsilon} - 1\right) \quad \text{for } h < h_{\text{lim}}$$

$$L_f = \frac{S}{\sin \theta_f} = \frac{K_1 r_\epsilon H}{E \sin \theta_f}$$

$$F_{fc} = \frac{CY}{\sqrt{3}} L_f b$$

$$\alpha_t = \alpha \quad \text{for } h > h_{\text{lim}}$$

$$F_{ft} = CY L_f b$$



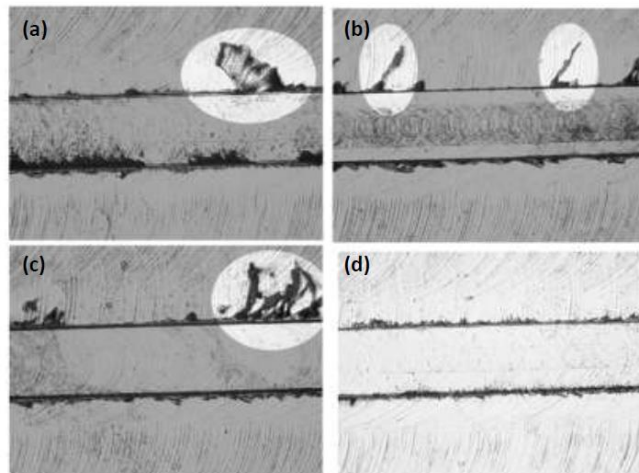
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Geração de Superfície

Rebarba: micro maior que macro escala para burr size/feed

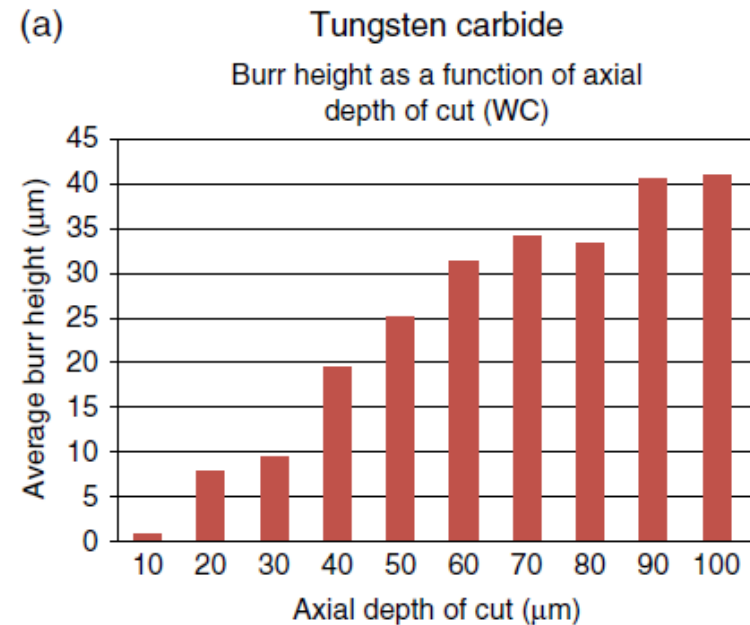
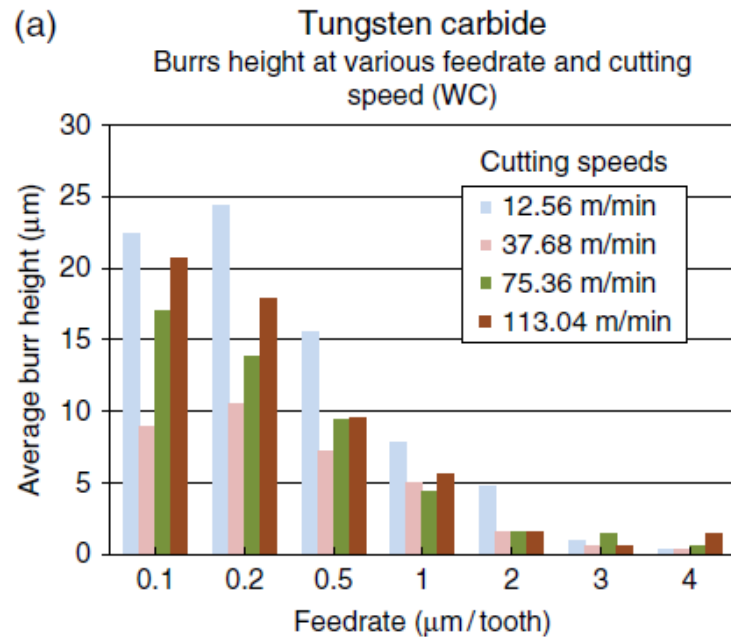
Remoção difícil em micropeças

Classificação: entrada, saída, topo e superfície usinada



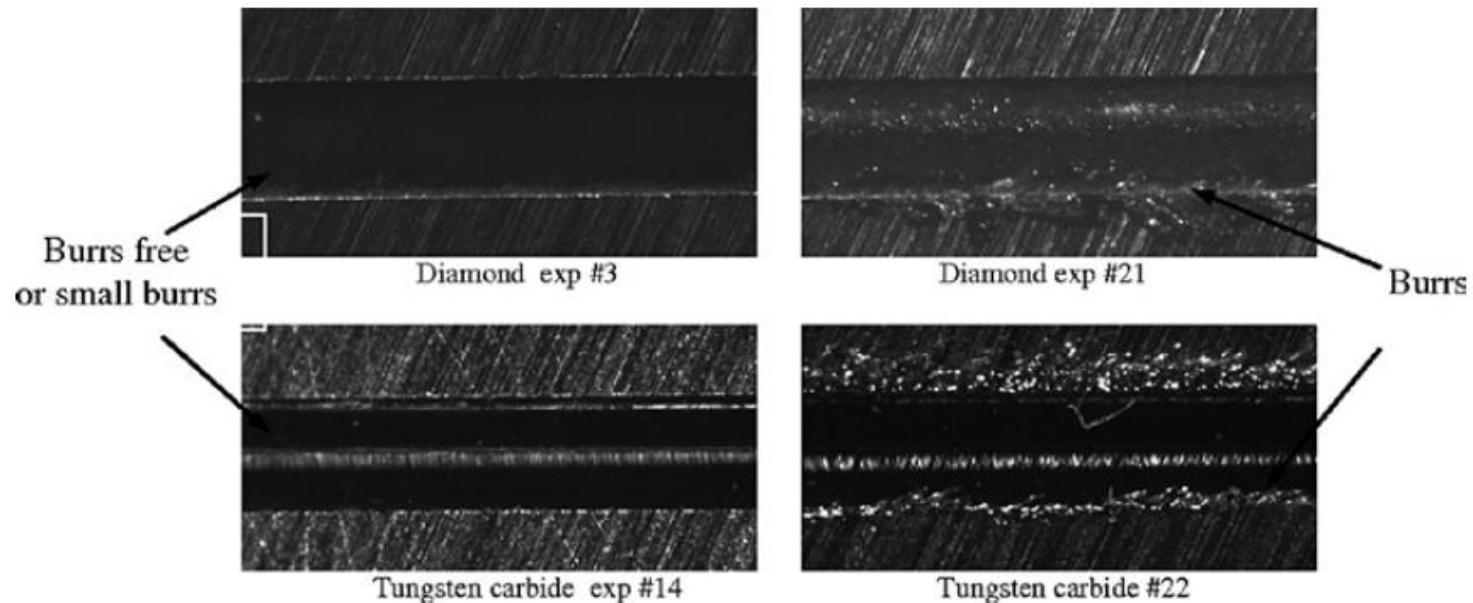
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Formação de Rebarba (OFHC)



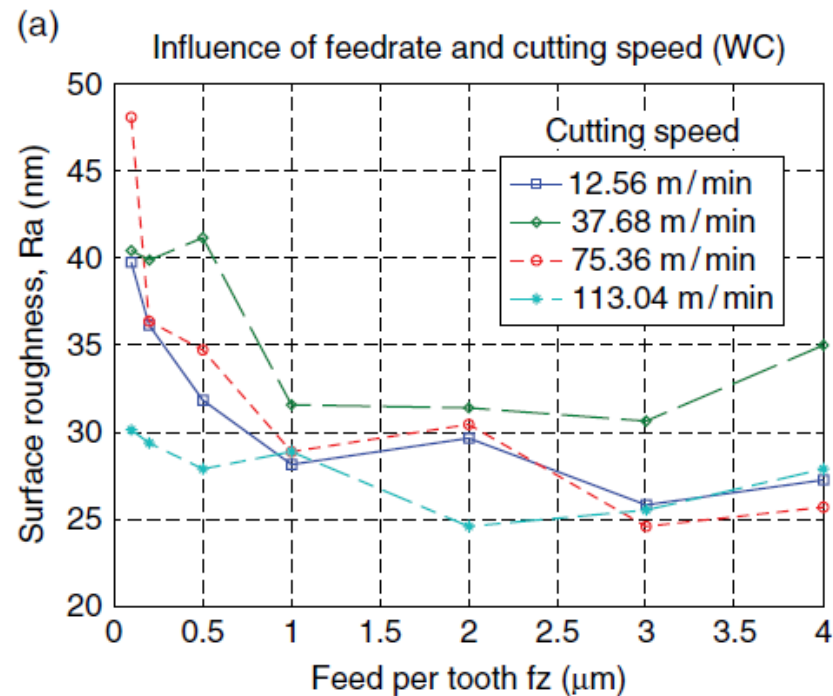
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Formação de Rebarba (OFHC)



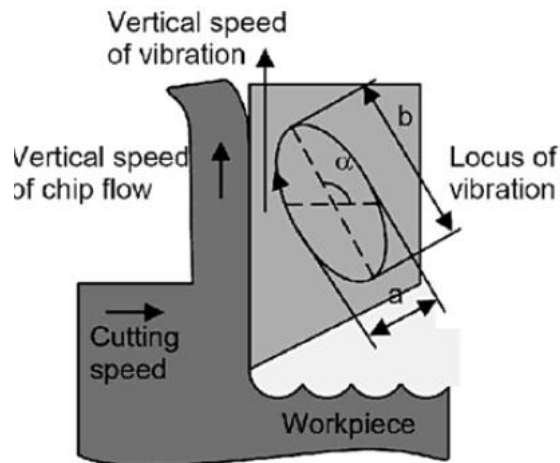
TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

Rugosidade (OFHC)



TECNOLOGIAS PARA MICROCORTE

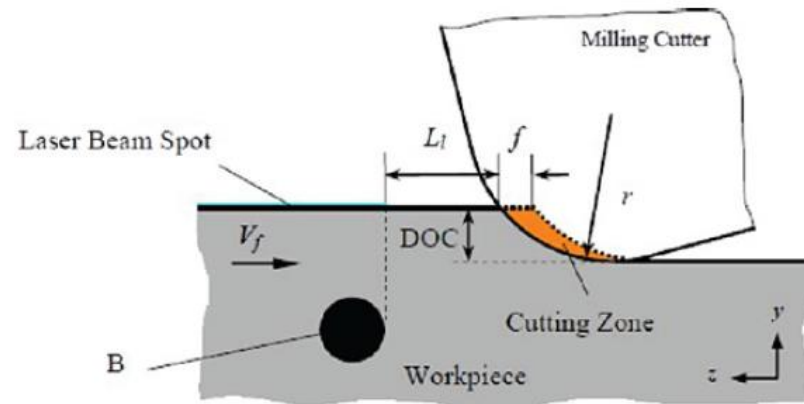
Microusinagem Assistida



Vibration-Assisted Micromilling

Ultrassom (> 20 kHz)
Baixa frequência (< 500 Hz)

Modo dúctil em materiais frágeis
Torneamento com diamante
Reduz força de corte
Melhora acabamento



Laser-Assisted Micromilling

Materiais cerâmicos
Reduz potência
Aumenta taxa de remoção
Melhora precisão e acabamento
Reduz danos na superfície
Aumenta vida da ferramenta