

MICROUSINAGEM: AULA 7

MICROFRESAMENTO

Prof. Assoc. Renato Goulart Jasinovicus

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues

INTRODUÇÃO

Últimas duas décadas: aumento de microcomponentes (médica, aeroespacial, automotivo, eletrônica, telecomunicações, óptica etc)

Aplicações específicas: lab-on-chips, microcélulas de combustível, microrreatores químicos, microbocais para jatos a altas temperaturas, microfuros para fibra ótica, micromoldes e micromáscaras profundas para litrografia

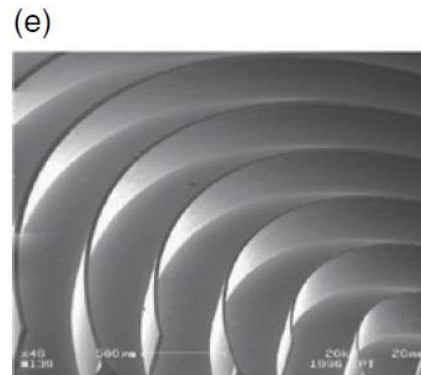
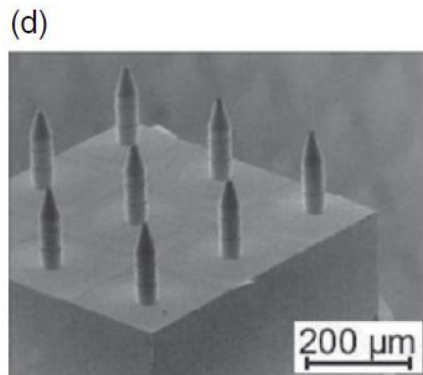
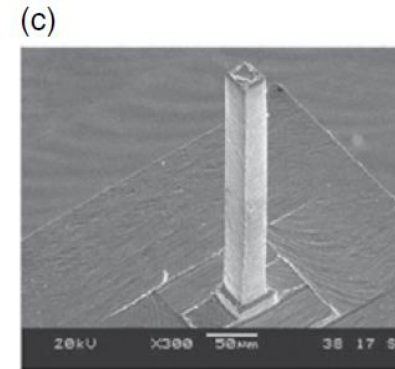
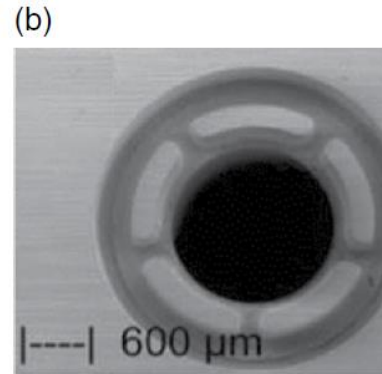
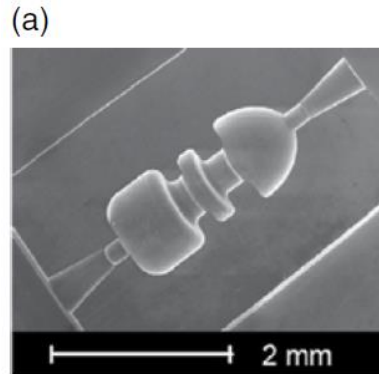
NEMS: US\$ 8 a 18 bi (2005 a 2010) e + US\$ 2,2 bi (mercados emergentes)

Freeform e 3D complex surfaces: carece de rapidez, confiabilidade e repetibilidade

Ataque químico e LIGA: materiais a base de silício e microcomponentes 2D

Microfresamento: metais, polímeros, cerâmicas, compósitos (alta razão de aspecto)

INTRODUÇÃO



INTRODUÇÃO

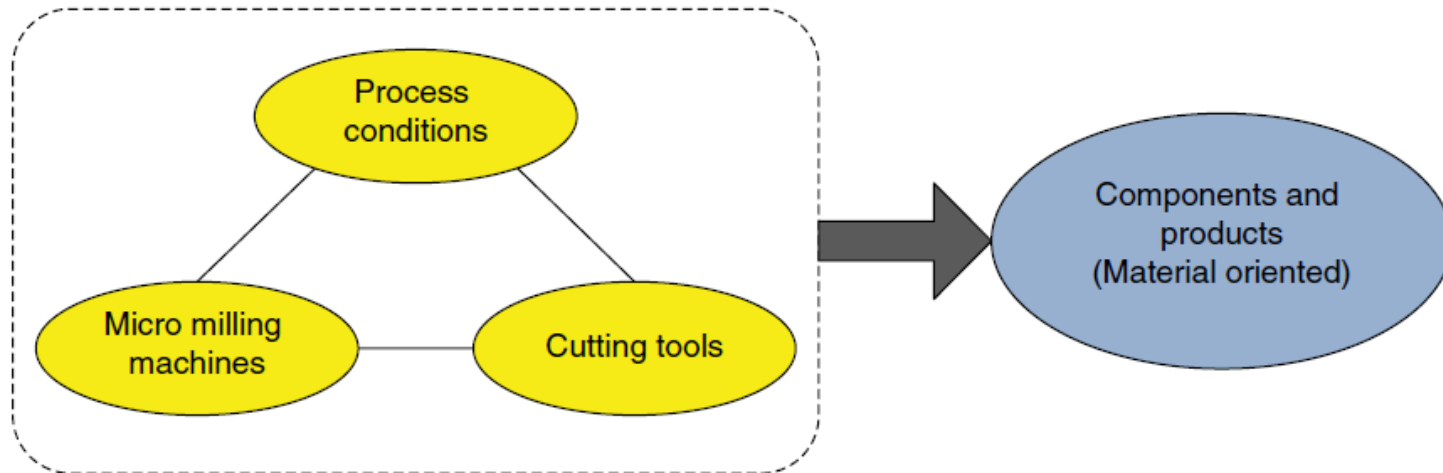
Semelhanças macro x microfresamento: cinemática, interação peça-ferramenta, cisalhamento e remoção de cavaco

Questões remanescentes: efeito de escala e falhas na microferramenta

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Semelhanças macro x microfresamento: cinemática, interação peça-ferramenta, cisalhamento e remoção de cavaco

Questões remanescentes: efeito de escala e falhas na microferramenta



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Máquinas para microfresamento:

Requisitos:

- Elevada rigidez estática e dinâmica
- Boa estabilidade térmica
- Baixos erros de movimentação
- Alto amortecimento
- Elevada rotação do eixo-árvore
- Baixo batimento radial

Objetivos:

- Alta precisão dimensional
- Adequados erros de forma
- Baixos níveis de rugosidade



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Máquinas para microfresamento:

Parceria Brunel University e UPM Ltda

- Baixo custo de produção
- Alta precisão
- Área de instalação de 1 m²
- Mancais aerostáticos
- Rotação de 200.000 rpm
- Rugosidade de 10 nm
- Retilidade de 0,1 $\mu\text{m}/50\text{ mm}$

Máquinas de bancada

- Baixa rigidez
- Pesquisa científica
- Usinagem instável



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

	KERN Micro [13]	FANUC ROBO NANO α -0iB [14]	Sodick AZ250L [15]	Kuglar Micromaster [16]	Moore Nanotech 350UPM [17]	Makino Hyper2J [18]	UPM/ Brunel UltraMill [12, 19]
Configurations	Three linear axes and two rotary axes	Three linear axes and two rotary axes	Three linear axes	Three axes (standard) or five axes (optional)	Three axes (standard) or four axes (optional)	Three linear axes	Three linear axes and two rotary axes
Base structure	Polymer concrete	Cast iron base with concrete	Box-shape structure without overhang	Solid granite	Cast epoxy-granite base with carbon fibre reinforcements	Granite base	Natural granite
Vibration isolation	N/A	Air and oil damper	Counter-balance tables	Passive air dampers	Self levelling air isolation system	N/A	Squeeze film damper
Controller	Heidenhain	Fanuc	Sodick	Multiprocessor path control	Delta Tau	Fanuc	Delta tau
Spindles	Vector-controlled spindle	Static air bearing, air turbine	pneumatic static bearing, air turbine	hydrostatic bearing	Liquid cooled air bearing	N/A	Aerostatic bearing
Speed range	Up to 160,000 rpm	Up to 50,000rpm	Up to 120,000 rpm	Up to 200,000 rpm	200~60,000 rpm	3000~40,000 rpm	Up to 200,000 rpm
Motion accuracy	<0.1 μ m	<0.2 μ m	N/A	\pm 0.5 μ m	<0.05 μ m	\pm 0.3 μ m	<1 μ m
Drive system	AC Servo	Linear motors and built-in servo motors	AC coreless linear motor	Linear motor	Brushless DC linear motor	N/A	Brushless drive motors
Drive system resolution	N/A	1nm	3nm	N/A	0.034nm	2nm	5nm
Work volume	250×220×200mm	280×150×40mm	250×150×100mm	300×300×200mm	350×350×150mm	200×150×150 mm	150×150×80mm

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Ferramentas de corte:

Materiais:

- Elevada dureza
- Boa tenacidade
- Estabilidade química em altas temperaturas

- Aço rápido
- Metal duro
 - Baixo custo, grãos ultrafinos, alta dureza e relative resistência ao desgaste (revestimento x fluido), baixa afinidade química
- Cerâmica
- CBN
- Diamante
 - Arestas afiadas, elevada dureza, baixo desgaste, alto custo, afinidade química com ferro

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

	Hot hardness	Toughness	Wear resistance	Thermal shock resistance	Cutting speed	Surface finish	Material costs
High speed steel	Low	High	Low	High	Low	Low	Low
Carbide	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Ceramics	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
CBN	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Diamond	High	Low	High	Low	High	High	High

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

	Soft non-ferrous	Cast iron	Carbon and low alloy steels	Hardened steels	Nickel-based alloys	Titanium alloys
High speed steel	√	×	O	×	×	×
Carbide	√	√	√	O	√	O
Ceramics	×	√	√	O	√	×
CBN	×	O	×	√	O	O
Diamond	√	×	×	×	×	√

(√: Good, O: Suitable, ×: to be avoided)

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Ferramentas de corte:

Revestimentos:

- Alta dureza
- Baixo atrito
- Baixa afinidade química
- Boa adesão ao substrato

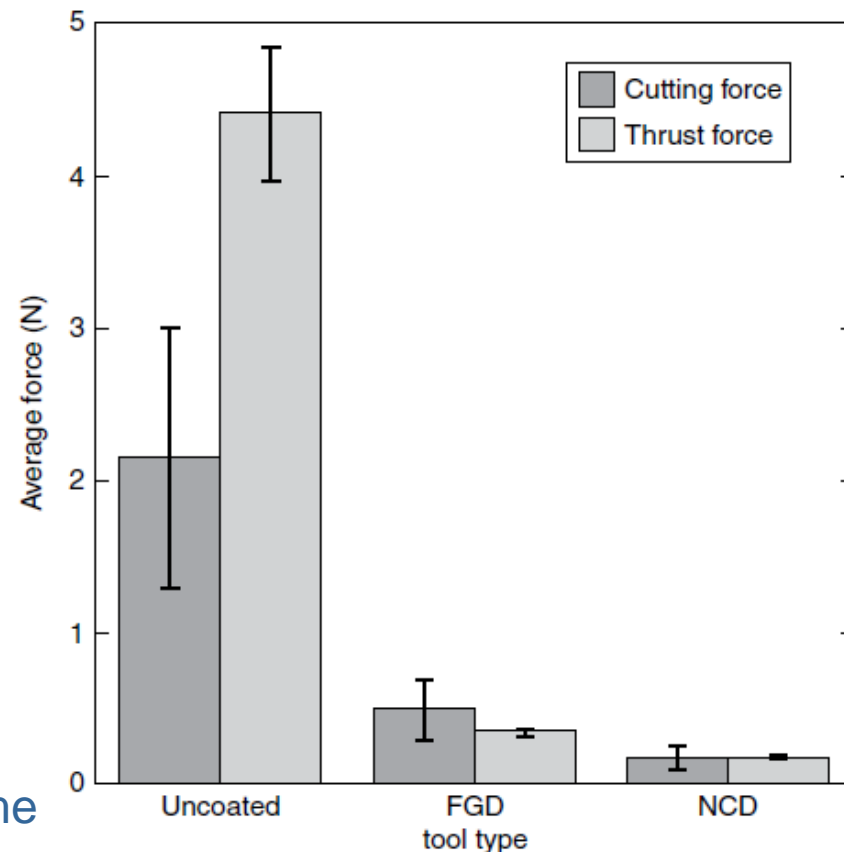
- TiN, TiCN, CrN, CrTiAlN
- TiAlN é o mais comum
- Processo PVD é o mais comum
- Diamante (menor atrito, força de corte, adesão e entupimento dos canais)

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Filmes finos de diamante
Grãos finos (FGD) ~ 0,5 a 1 μm
Nano-cristais (NCD) ~ 0,1 μm
Canais em alumínio
Corte a seco

Melhoria da integridade superficial
Baixo desgaste
Adesão de material da peça nula
Diminuição da força de corte

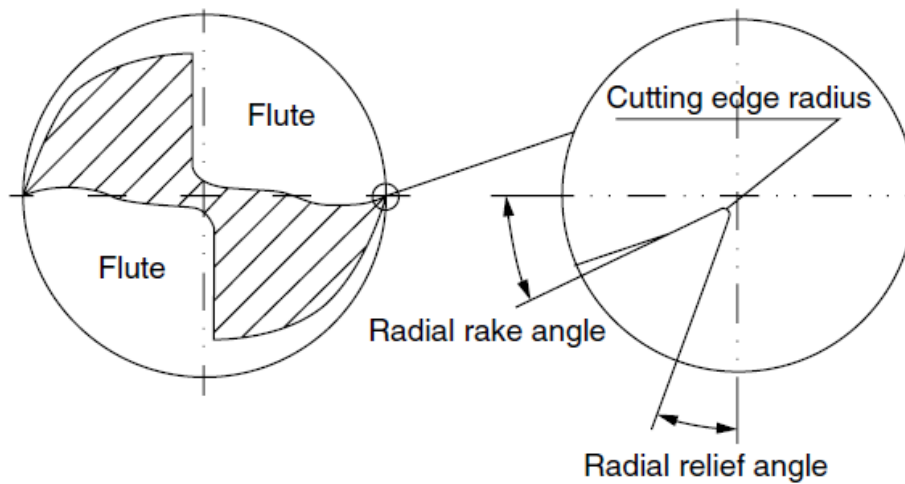
Adesão baixa: delaminação do filme



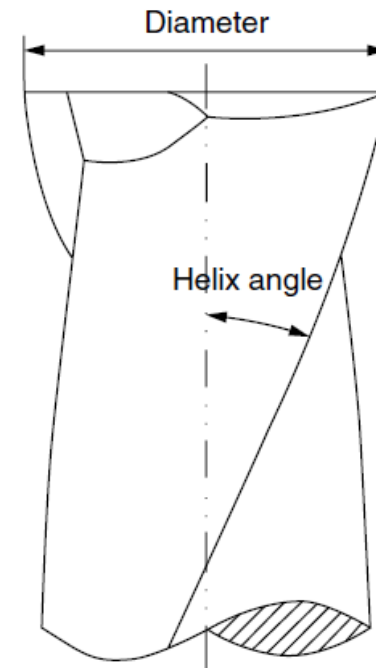
FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Geometria das microferramentas:

(a) Cross section of end mill and Zoom in on a cutting edge



(b) Side view of end mill



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Geometria/Dimensões:

Diâmetros de 5 a 25 μm

Menor diâmetro = menor rigidez, maior deflexão, falha prematura

Menor ângulo de cunha = maior fragilidade da aresta

Raios de aresta: 0,8 a 5 μm

Ângulo de hélice comum: 30°

Pesquisas escassas: geometria de microfresas

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Fabricação de microfresas:

Retificação é mais empregado

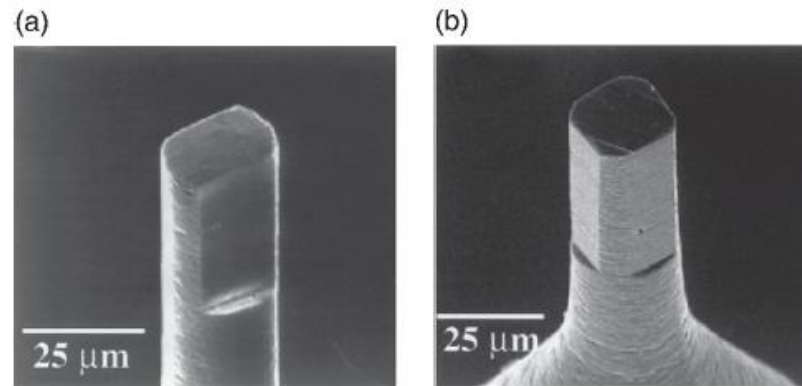
Qualidade do rebolo afeta a da microfresa (tamanho e raio do grão abrasivo)

Desafio para microfresas menores que 0,1 mm

Feixe de íons focado:

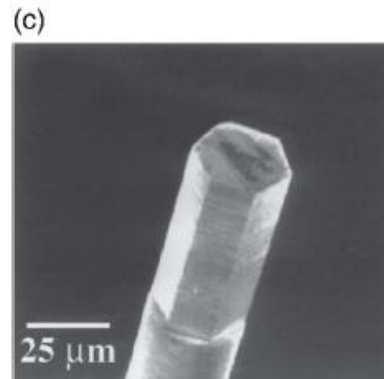
- Sem força de remoção
- Alta qualidade
- Sem escala industrial
- Raio de aresta menor que 0,1 μm
- Diâmetros de 20 a 100 μm
- Rugosidade de 80 nm Ra em PMMA

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO



Two cutting edges

Four cutting edges



Six cutting edges

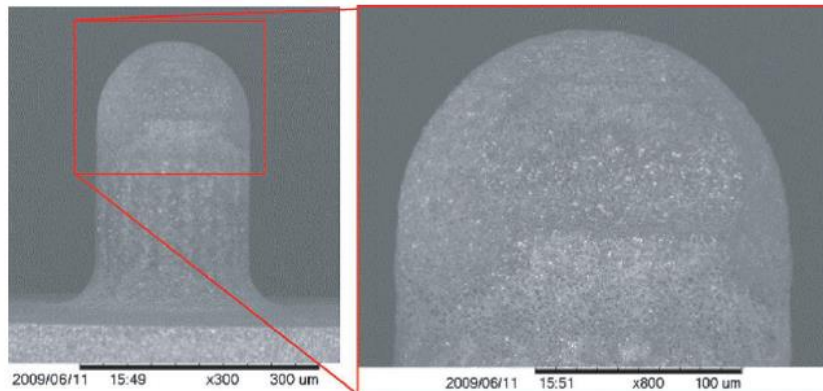
FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Fabricação de microfresas:

Eletroerosão (EDM):

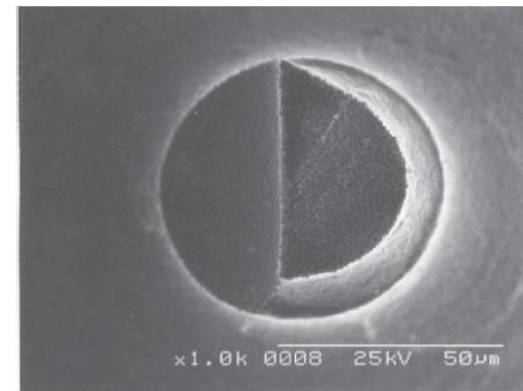
Microfresas de ponta esférica de 10, 50, 100, 300 μm

(a)



Polycrystalline diamond ball end mill

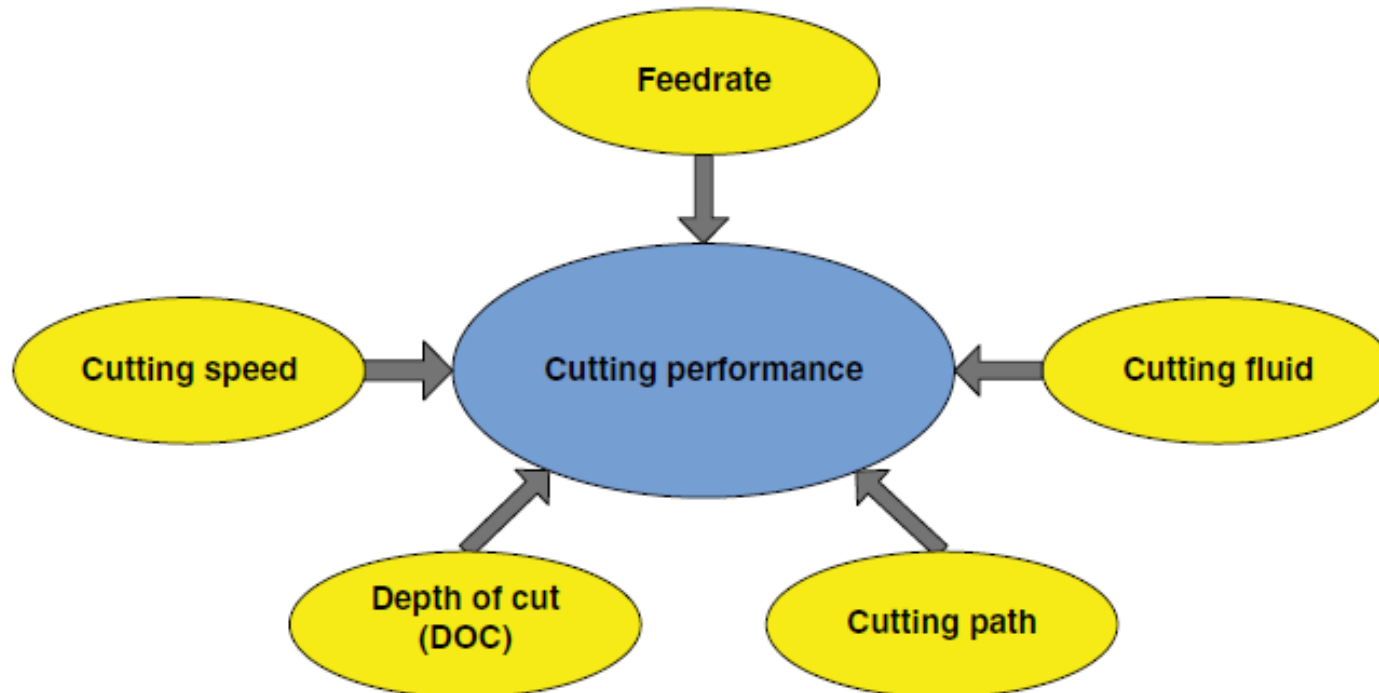
(b)



Tungsten carbide micro end mill

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Condições de corte:



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Condições de corte:

Maior produtividade: maior vc , ap e fz

Menor vc e maior ap e fz : pior performance de corte

Condição ótima de vc : limitada pela máquina-ferramenta

Formação de rebarba e acabamento: fz e vc

Acabamento: ap não significativo

Trajetória da ferramenta: banda de tolerância menor (mais pontos interpolados)

Fluido de corte: reduz o atrito, refrigera, reduz o desgaste da microfresa

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Materiais da peça:

Dependem da aplicação

Aços inoxidáveis e ligas de titânio: área médica

Ligas de alumínio: área aeronáutica

Aços-ferramenta: área de matrizaria

Silício: área eletrônica

Usinabilidade varia com os atributos físicos, térmicos e químicos do material da peça

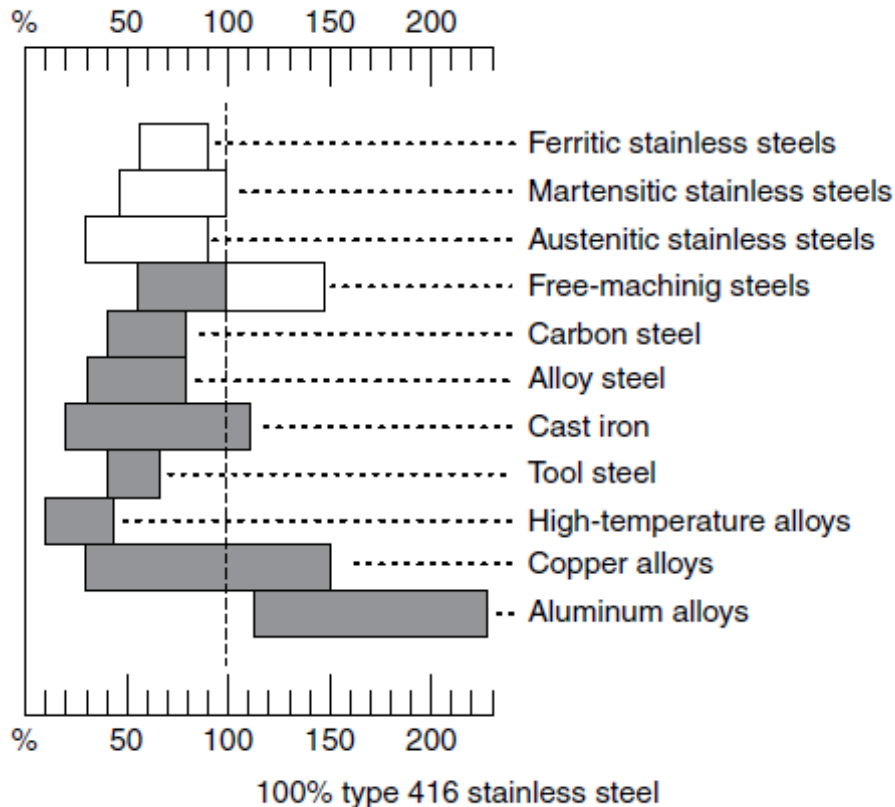
Usinabilidade depende da combinação: taxa de remoção, consume de potência, formação do cavaco, acabamento da peça e vida da ferramenta

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Materiais da peça:

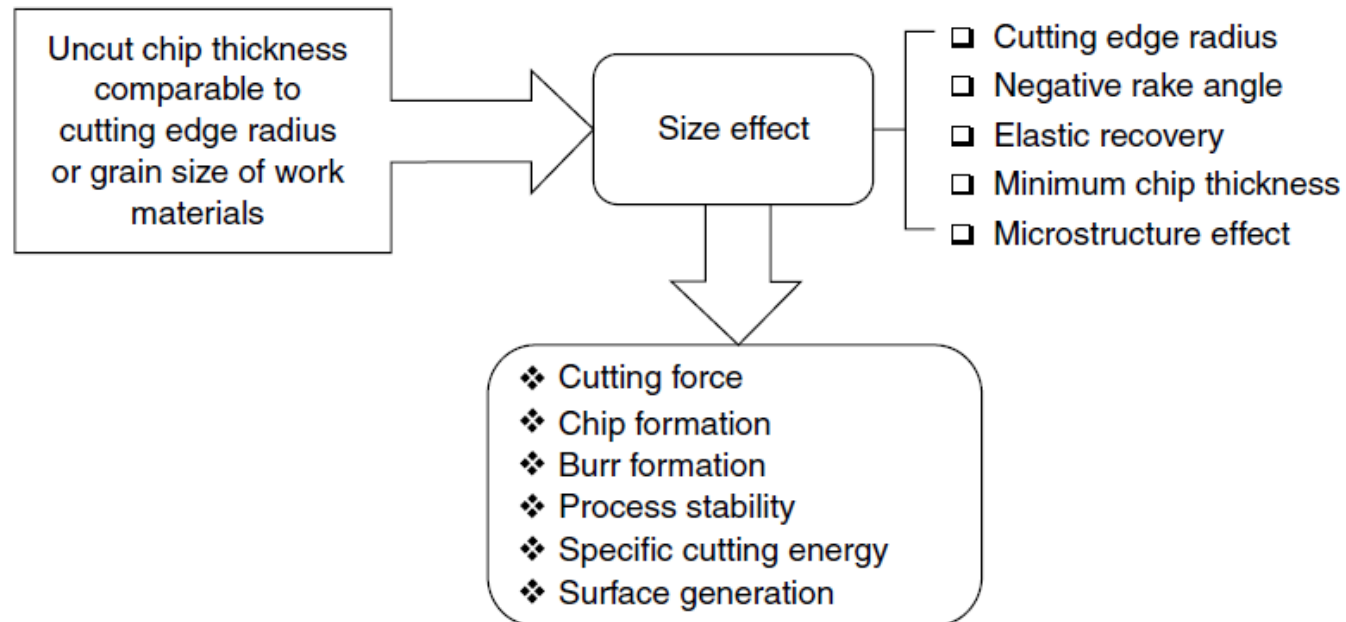
Usinabilidade ainda não definida em microescala (microestrutura, defeitos, TT etc)

Não-metals: pobres propriedades térmicas e alta fragilidade (difícil tolerância dimensional, geométrica, acabamento e vida da ferramenta)



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Efeito de escala no microfresamento:



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Efeito de escala no microfresamento:

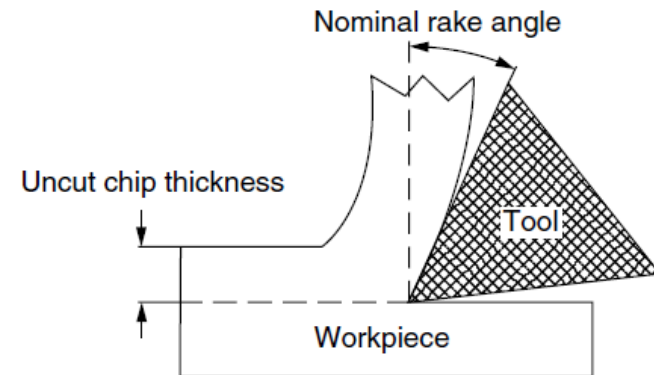
Macroescala ($h \gg re$): re desprezada

Microescala ($h \sim re$): re influente

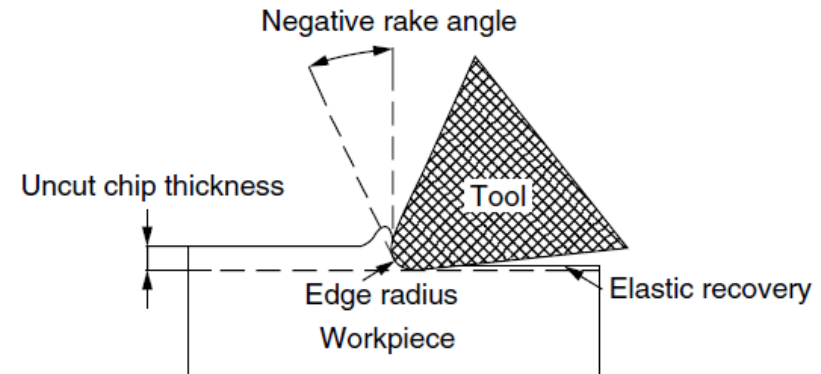
Se $h < h_{min}$: plowing/ploughing

Ploughing: maior F_c , maior u , pior integridade superficial

(a) Macro-scale cutting



(b) Micro-scale cutting

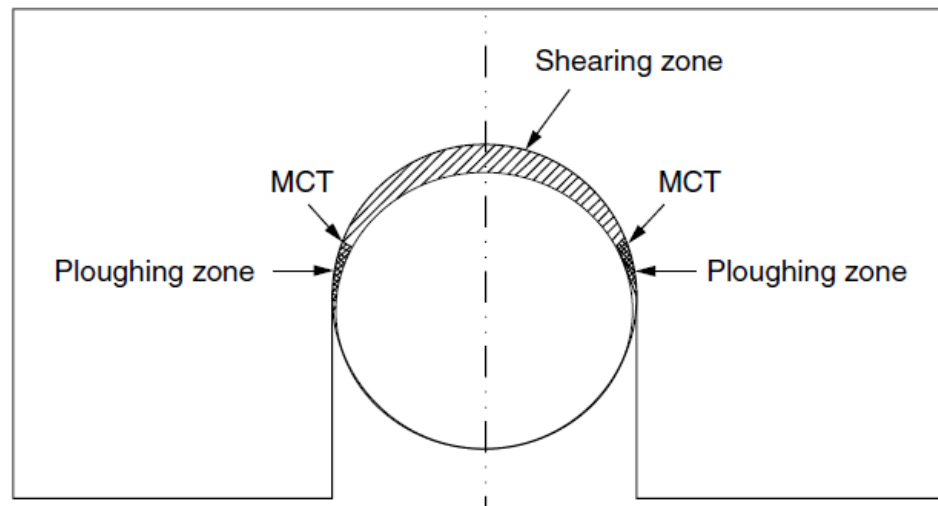


FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Efeito de escala no microfresamento:

Espessura mínima de corte ($h_{min} = MCT$): corte intermitente ($0 < h < h_{max}$)

Com $h < h_{min}$: sem formação de cavaco em várias rotações da microfresa

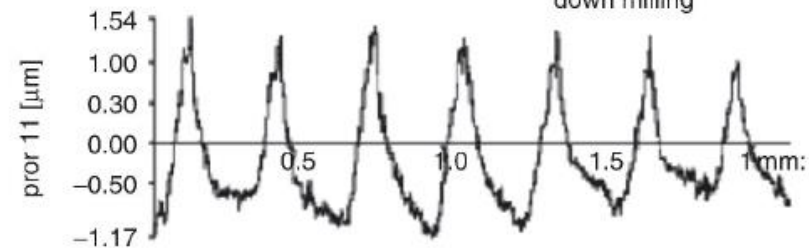


FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

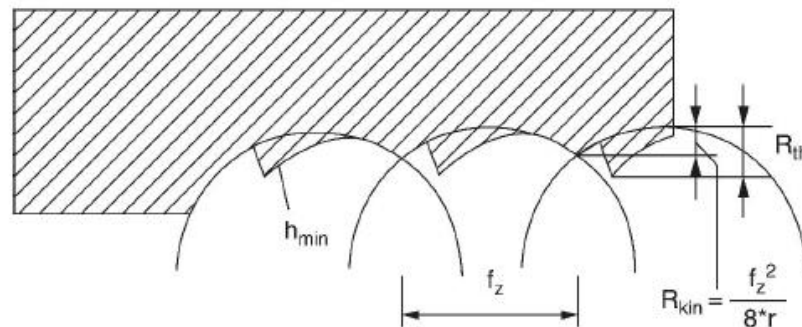
(a) Measured surface topography

RMS = 0.582 μm
RzDIN = 2.36 μm

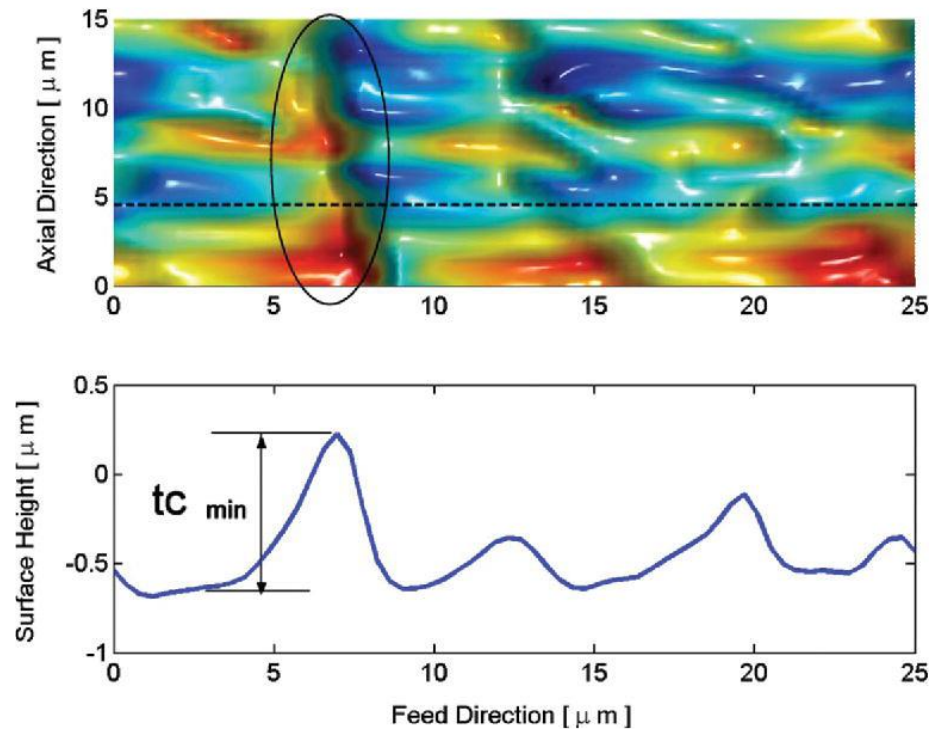
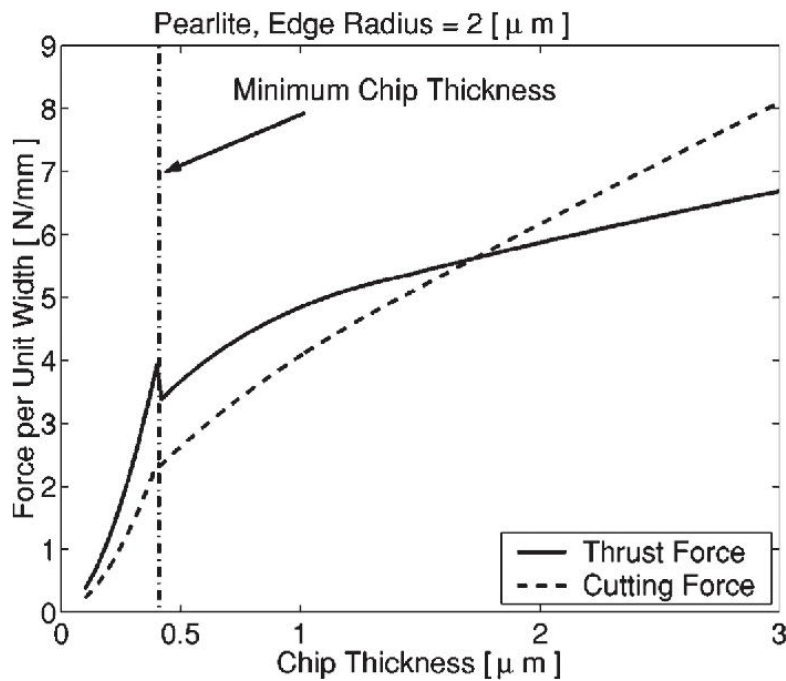
SAE 1045 T300
 $f_z = 0.3 \text{ mm}$
 $a_\theta = 0.3 \text{ mm}$
 $v_c = 180 \text{ m/min}$
 $r = 11.49 \text{ mm}$
 $\gamma = 8^\circ$
down milling



(b) Theoretical surface profile



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Importante determinar MCT: especificar corretamente os parâmetros de corte

MCT depende de r_e , TG, propriedades da peça

Estudos: $0,05r_e < MCT < 0,42r_e$

Oliveira et al. (2015): $h_{min} \sim (0,285 \pm 0,02)r_e = (1/4r_e < MCT < 1/3r_e)$

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Author	Year	Method	Analyzed Variable	Part material	h_{min}/r_e
Current	2014	Micromilling (experimental)	Specific cutting force, part roughness and chip SEM analysis	AISI 1045 steel	0.22–0.36
Vogler et al. [6]	2004	Finite elements (numerical)	Part roughness	Ferrite–pearlite steel	0.14–0.43
Liu et al. [8]	2006	Molecular-mechanical theory (numerical)	Cutting temperature, shear strain and strain rate	AISI 1040 steel	0.20–0.35
Liu et al. [8]	2006	Molecular-mechanical theory (numerical)	Cutting temperature, shear strain and strain rate	6082-T6 aluminium	0.35–0.40
Malekian et al. [9]	2012	Modeling (analytical)	Friction coefficient	6061 aluminium	0.23
Cuba Ramos et al. [10]	2012	Orthogonal turning (experimental)	Part roughness	AISI 1045 steel	0.29
Lai et al. [11]	2008	Finite elements (numerical)	Flow Stress	OFHC cooper	0.25
Kang et al. [12]	2011	Micromilling (experimental)	Cutting force	AISI 1045 steel	0.30
Woon et al. [23]	2008	Finite elements (numerical)	Shear Stress, effective rake angle	AISI 4340 steel	0.26
Son et al. [24]	2005	Modeling (analytical)	Friction coefficient	Aluminium, OFHC copper, brass	0.20–0.40
Kim et al. [25]	2004	Micromilling (experimental)	Cutting force	360 Brass	0.30
Yuan et al. [26]	1996	Precision turning (experimental)	Cutting force, friction coefficient	Cu–Mg–Mn aluminium alloy	0.25–0.33

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Microestrutura do material da peça:

Macroescala: material homogêneo e isotrópico (e contínuo)

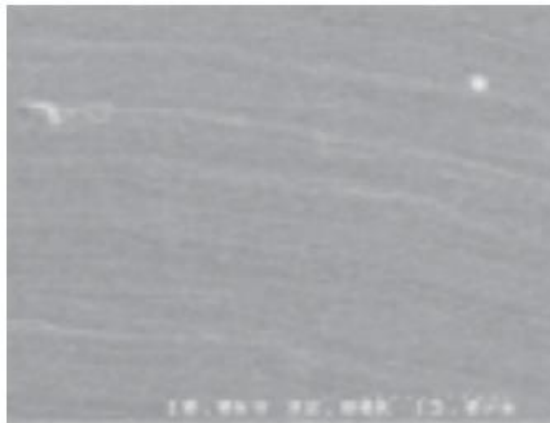
Microescala: $h \sim TG$ (corte de grãos individuais)

Corte não homogêneo e anisotrópico (descontínuo): impacto no mecanismo de corte

Diferentes materiais = diferentes respostas ante o microfresamento

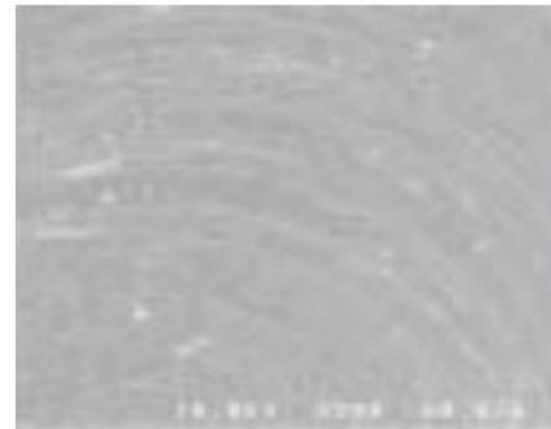
FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Ferrítico
Monofásico



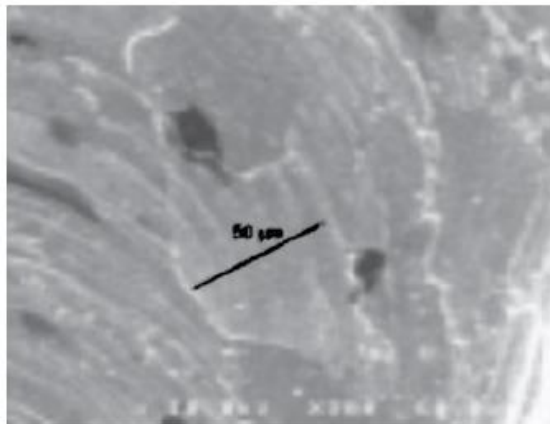
(a)

Perlítico
Monofásico



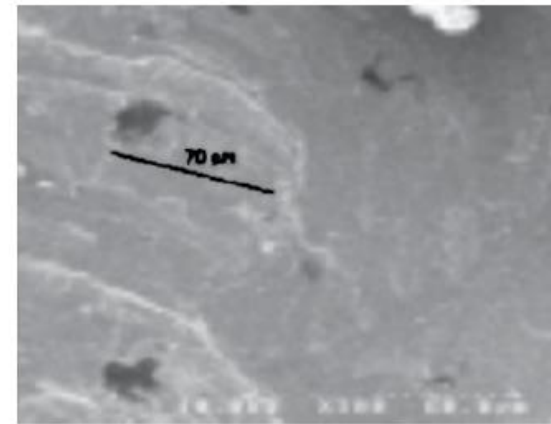
(b)

Ferrítico
Multifásico



(c)

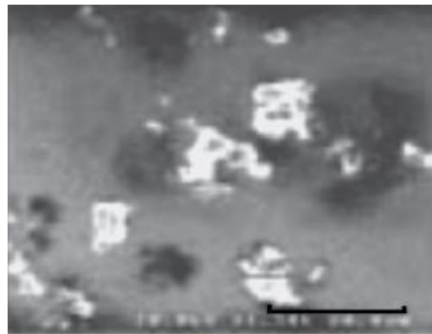
Perlítico
Multifásico



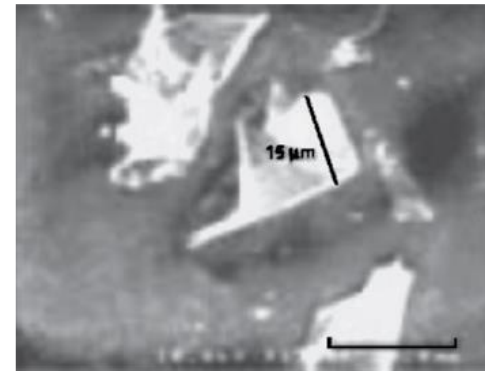
(d)

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Ferrítico
Monofásico



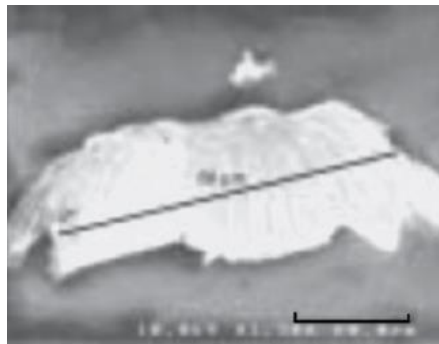
(c)



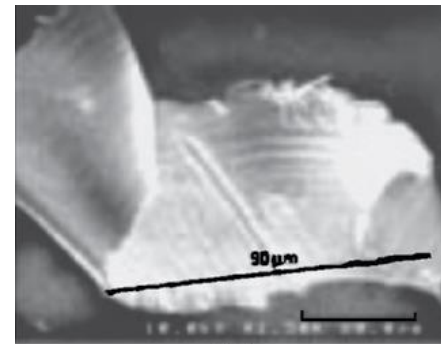
(d)

Perlítico
Monofásico

Ferrítico
Multifásico



(a)



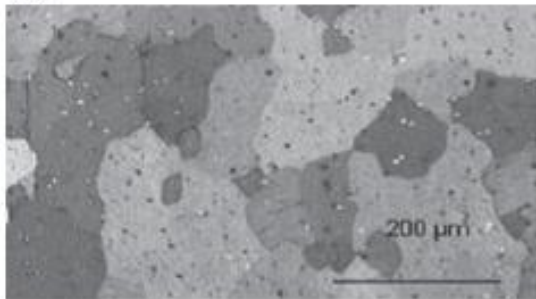
(b)

Perlítico
Multifásico

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Alumínio Al 5083 com refino de grão (ECAP)

(a)



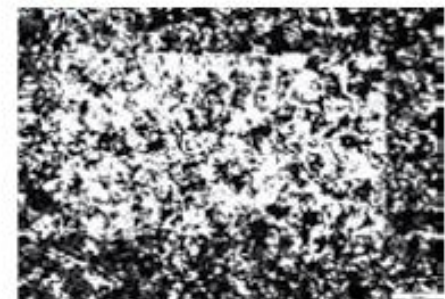
Como recebido

(b)



TT convencional

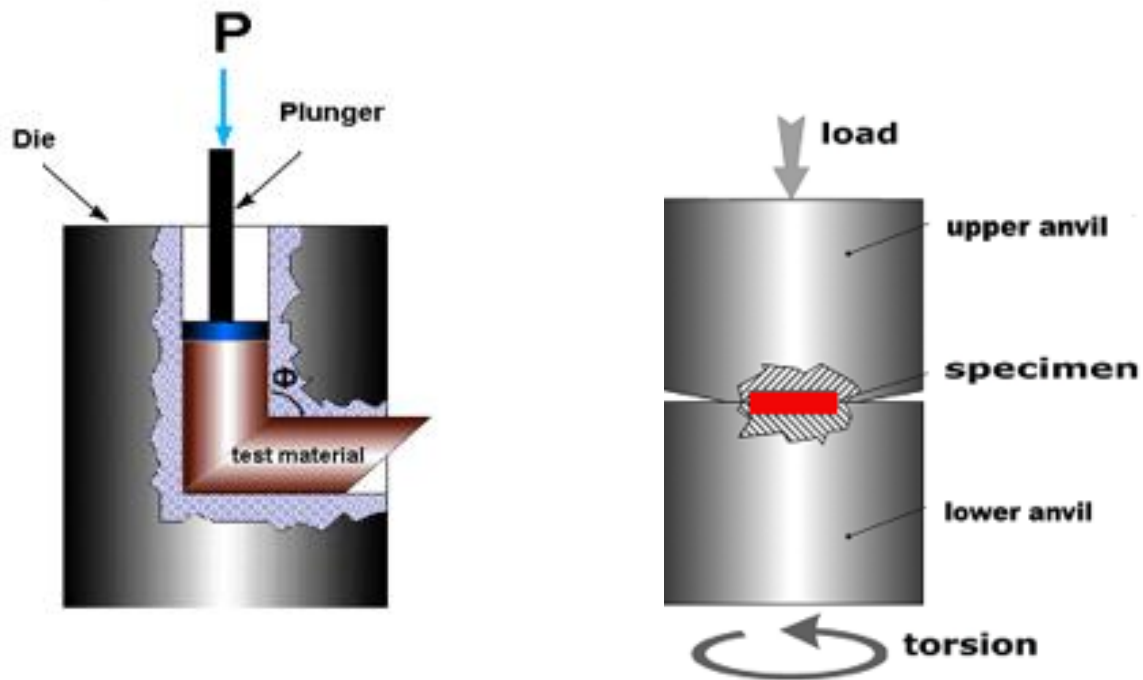
(c)



Grãos ultrafinos

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Processos de deformação plástica severa (ECAP)



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Metrologia e Instrumentação:

Caracterização da microferramenta e micropeça

Perfilômetros 3D:

- Inspeções off-line da textura superficial (rugosidade e erros de forma)

Microscópios MEV e MO:

- Inspeções off-line do cavaco, ferramenta e peça
- Topografia, composição química, estrutura cristalina e orientação cristalográfica
- MEV: Resolução de 0,8 nm e ampliações de 1 mi vezes

Sensores

- Monitoramento (vibração e força excessivas)
- Inspeções on-line para avaliar, controlar e melhorar o process
- Força, emissão acústica e vibração

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO



MEV ZEISS



MO μ -View Kern

Minidinamômetro Kistler



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

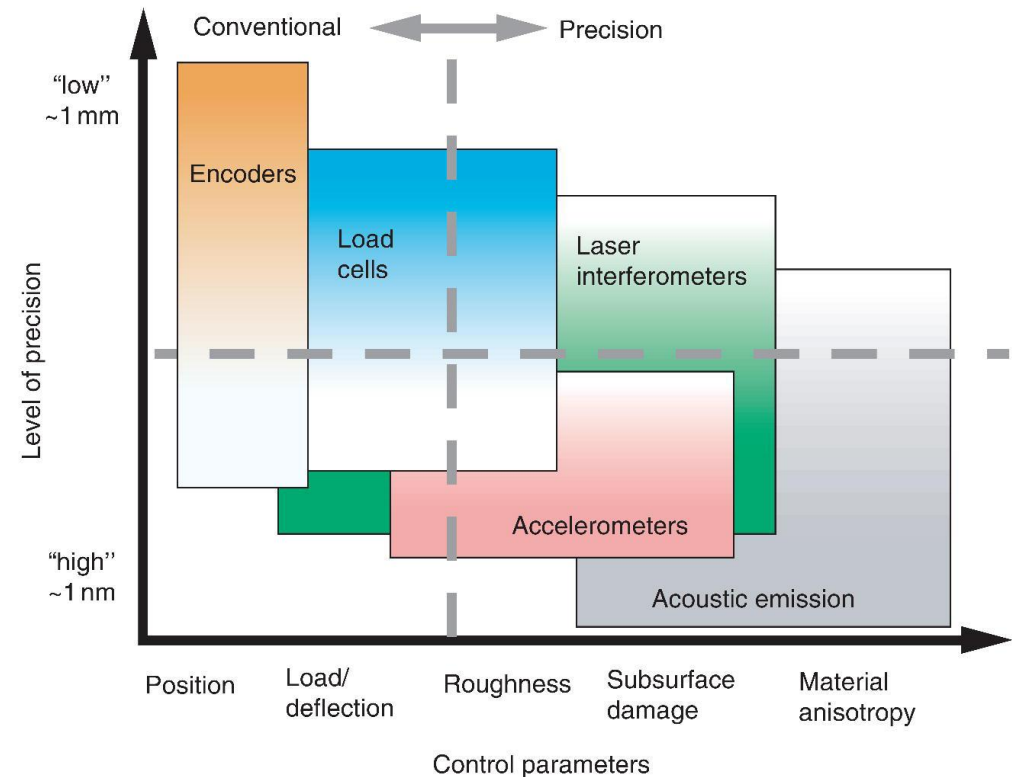
Dinamometria piezelétrica:

- Alta sensibilidade, rigidez, frequência natural, linearidade
- Baixo drift e threshold (2 mN)

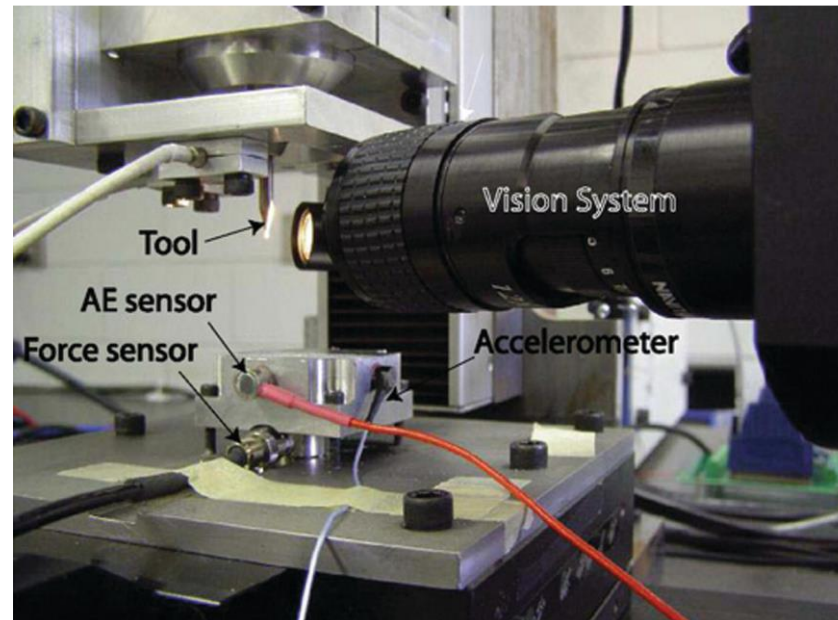
Limitação metrológicas:

- Caracterização em tempo real do estado da microfresa
- Sensibilidade e baixa razão sinal/ruído (S/N) (força e potência muito baixo)

Estratégia: integrar sistemas



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO



Sistema integrado de monitoramento em tempo real

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Desafios científicos e tecnológicos:

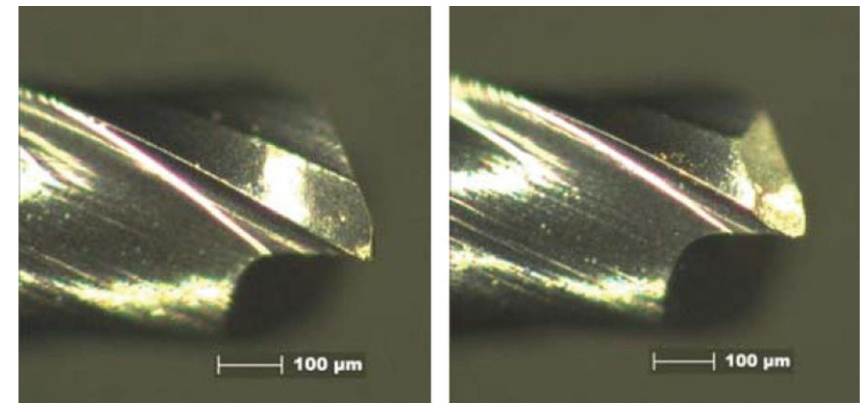
Microfresamento: processo promissor para produção em massa de micropeças

Principais limitações: runout, rebarba, vida da ferramenta e otimização do processo

Runout: desprezível em macrofresamento, mas causa variação de F_c e h em micro

Causas: assimetria, desalinhamento, desbalanceamento, desbalanceamento dos Mancais

Runout aceitável $< 1 \mu\text{m}$



(a) Wear on the 1st cutting edge

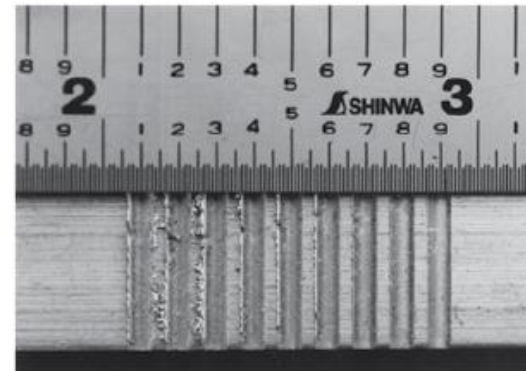
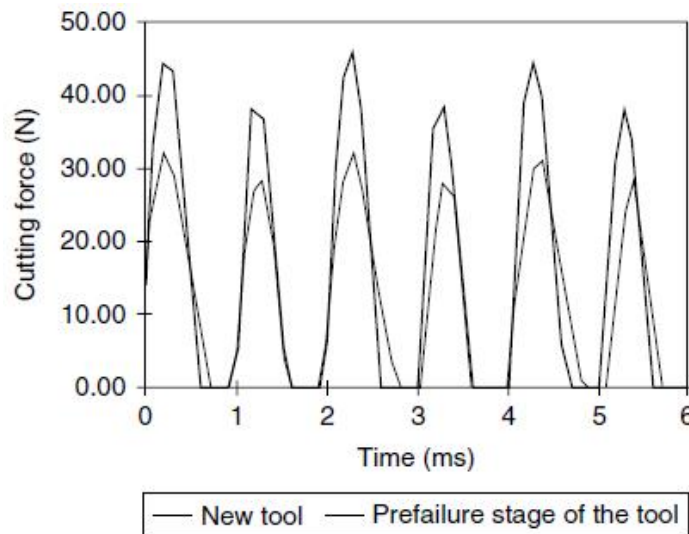
(b) Wear on the 2nd cutting edge

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Desgaste: baixa rigidez da ferramenta conduz à maior taxa de desgaste

Causa rebarbas, vibração e piora a qualidade da peça (quebra da ferramenta)

Desafios: previsão e quebras



FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Rebarba: inevitável no microcorte

Reduz qualidade e precisão da peça, prejudica a funcionalidade e montagem

Macro-corte: rebarbação é comum / Microcorte: massiva maioria impraticável

Rebarba deve ser minimizada durante o microcorte

Fatores que influenciam:

- Ferramenta: geometria, substrato, revestimento, tamanho, seleção para a peça
- Refrigeração: método de aplicação, localização, tipo
- Parâmetros de corte: f_z , a_p e v_c
- Estratégia de corte (concordante, discordante, cheio etc)
- Peça: material menos plástico

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Otimização das condições de processo:

Produção industrial: balanço entre desempenho x produtividade

Focos: vida da ferramenta, microusinabilidade, qualidade da máquina

Processo ainda conservador: fenômenos ainda em estudo

Desenvolvimento de sistemas CAM específicos

Instrumentação do processo

FUNDAMENTOS DO MICROFRESAMENTO

Perspectivas:

Médica: implantes, pontes, próteses, placas e parafusos, forcepes, tesouras, lab-on-chips, microbombas etc

Eletrônica: micromoldes, microssensores, microchips etc

Óptica: arranjos de microlentes, microdispositivos ópticos etc

Aeroespacial: microválvulas, microgiroscópios etc

Outros: bocais de injeção, componentes para sistemas de medição etc