

MICROUSINAGEM: AULA 3

PROJETO E FABRICAÇÃO DE MICROFERRAMENTAS PARA MICROCORTE

Prof. Assoc. Alessandro Roger Rodrigues

TAMANHO DA FERRAMENTA

Dimensão da ferramenta => escala de usinagem

Características e detalhes das peças = $f(\varnothing$ e r_e da ferramenta)

Microfresas: 25 a 1000 μm (r_e = poucos micrômetros e haste de \varnothing 3 mm)

Espessura mínima de corte < raio de aresta ($h_{\min} < r_e$)

$h < h_{\min}$ não forma cavaco e ângulo de saída efetivo $\gamma_e < 0$

Microcorte mais preciso (~nanocorte) = $f(\text{ferramentas de diamante } r_e \sim < 100 \text{ nm})$

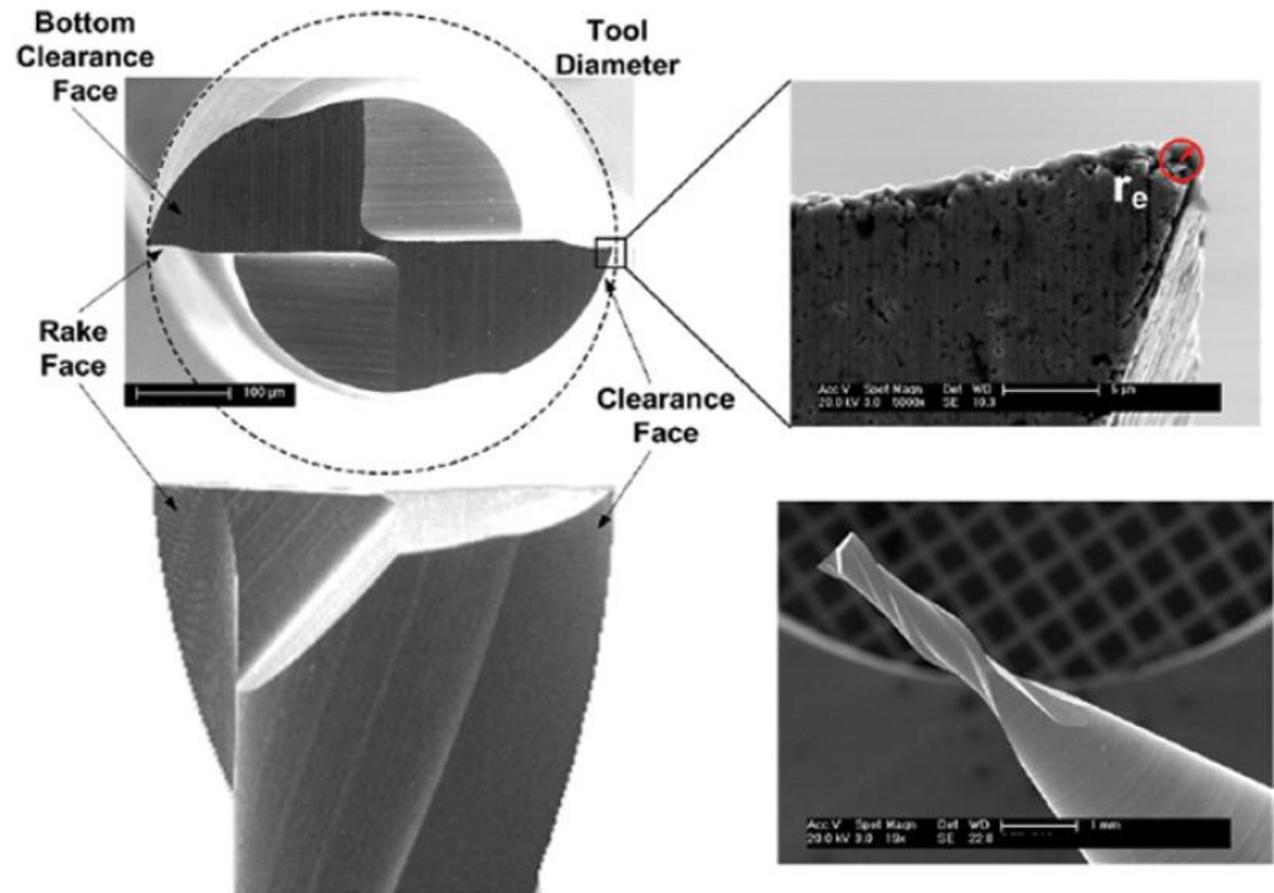
Limitação: material usinado e custo (US\$ 55,00 x US\$ 1100,00)

Metal duro: tenaz, baixo custo, vários materiais da peça (\neq custo CBN e cerâmicas)

TAMANHO DA FERRAMENTA



Microfresa



Microfresa \varnothing 500 μ m

MICROFERRAMENTAS COM HASTE

Ferramentas de metal duro: retificação de WC com grãos ultrafinos (300 a 900 nm)

Diâmetros muito pequenos:

- Retificação não tem precisão suficiente
- Força elevada de corte
- Concentração de calor

Quebra de 50% na fabricação de microfresas para $\varnothing < 120 \mu\text{m}$ (eleva o custo)

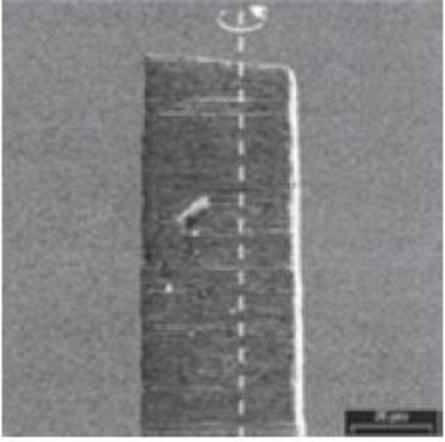
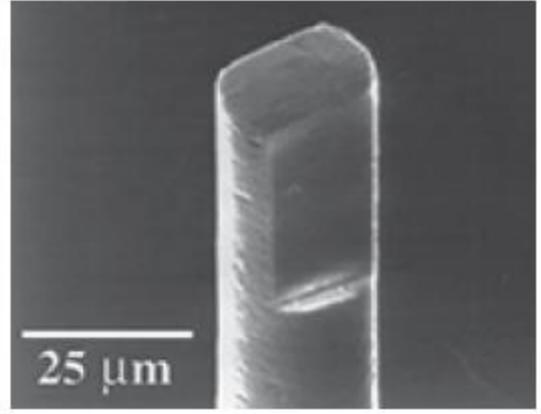
μ -EDM: microbrocas de $\varnothing 6\text{-}20 \mu\text{m}$ e $r_e 0,5 \mu\text{m}$ (wafer de silício)

WEDG: microfresas $\varnothing 31\text{-}100 \mu\text{m}$ (alumínio 6061)

FIB: microfresas $\varnothing 25 \mu\text{m}$ e $r_e 0,1 \mu\text{m}$ (PMMA, Al6061, aço 4340)

- caro, baixa taxa, força negligenciável, 200 nm Ra

MICROFERRAMENTAS COM HASTE

		
<p>Mechanically ground single cutting edge WC micro end mill</p>	<p>2 flute, 110 μm diameter, tungsten carbide tool made by WEDG</p>	<p>2 flute tungsten carbide micro end mill made by FIB</p>

REVESTIMENTOS DE MICROFERRAMENTAS

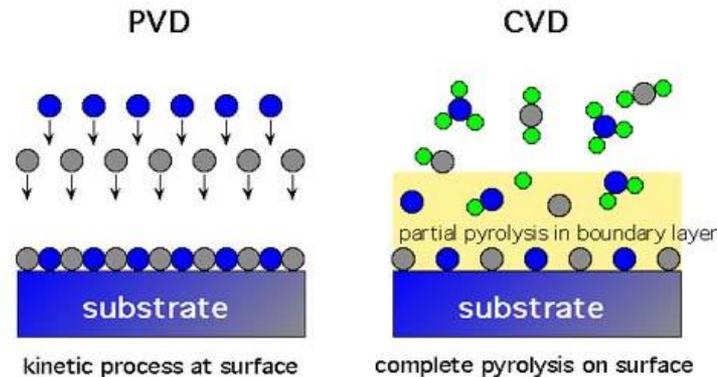
Revestimento => propriedades de superfície do substrato

Propriedades: atrito, corrosão, barreira térmica, desgaste, molhabilidade, adesão

Aplicações: corte a seco, alta v_c , materiais de alta resistência

Deposição CVD ou PVD: vaporização e condensação dos elementos da cobertura

Adesão = $f(\text{limpeza}^*, \text{energia, interface})$ *dezenas de espessura de moléculas



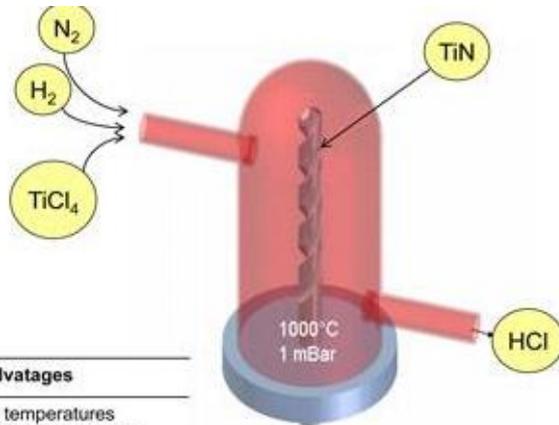
REVESTIMENTOS DE MICROFERRAMENTAS

Coating methods

CVD methods

In a reactor, the substrates are heated up and exposed to a gas stream.

The gases break down on the hot substrate surface, where they form a layer.



Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> - optimum layer adhesion - consistent layer distribution 	<ul style="list-style-type: none"> - high temperatures - few suitable materials - long cycle times

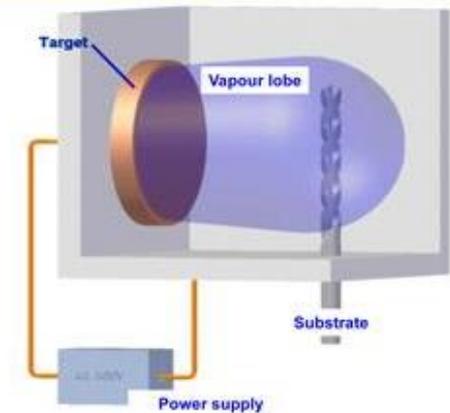
Example: Titanium tetrachloride + hydrogen + nitrogen = Titanium nitride + hydrogen chloride

Coating methods

PVD methods

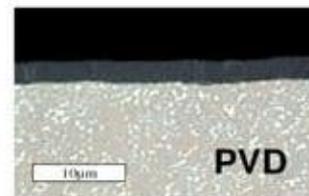
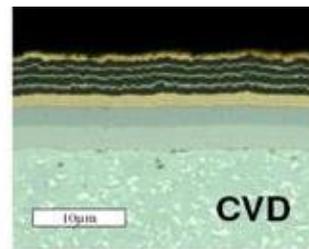
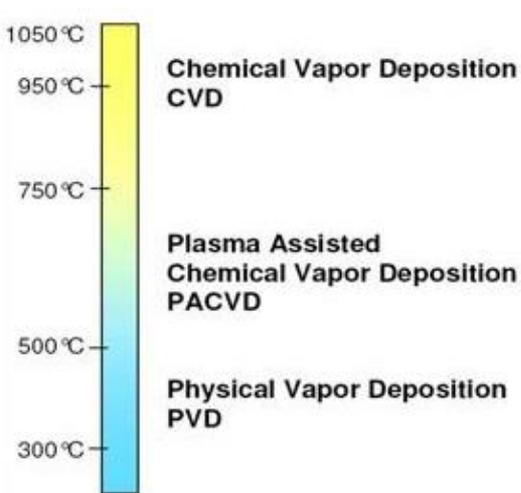
With all PVD methods, the laminate material is transported in a vacuum from a source via a transport space to the substrate.

On the source sides, thermal and/or electrical energy is used to vapourise the material.



Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> - many suitable materials - low temperatures - sharp edges possible 	<ul style="list-style-type: none"> - internal coating difficult - high surface requirements

REVESTIMENTOS DE MICROFERRAMENTAS



Physical Vapor Deposited (PVD)

PVD covers processes, such as:

- Sputtering
- Magnetron sputtering
- Evaporation
- Ion plating
- Cathodic arc deposition
- Arc vaporisation
- Vapor ionisation (plasma)

Chemical Vapor Deposited (CVD)

CVD covers processes, such as:

- Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition (APCVD)
- Low Pressure Chemical Vapour Deposition (LPCVD)
- Metal-Organic Chemical Vapour Deposition (MOCVD)
- Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition (PACVD)
- Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)
- Laser Chemical Vapour Deposition (LCVD)

REVESTIMENTOS DE MICROFERRAMENTAS

	Chemical Vapour Deposition (CVD)	Physical Vapour Deposition (PVD)	Desirable effects
Substrate temperature during deposition	850 to 1000 °C	200 to 500 °C	Low deposition temperature preserves tool substrate edge toughness. This is more critical for micro tools because of their size.
Micro structure and residual stress	Coarse grain /Tensile	Finer grain / Compressive	Compressive residual stress inhibits crack propagation
Coated tool hardness	good	higher	Higher hardness increases with decrease in grain size.
Typical coating thickness	Typically up to 20µm	Typically less than 5µm	The ability to deposit thin layers at lower deposition periods makes PVD competitive for micro tools. There is a need to keep the tool edge radius as low as possible.
Comments on adhesion capability	better	good	CVD provides better adhesion due to the higher deposition temperature which promotes diffusion
Geometry capability	Best deposited on honed edge	Can be deposited on sharp cutting edge	Sharp edge deposition capability is very important for micro tools
Typical Process duration	8 to 24 hours	3 to 4 hours	CVD enables higher volumetric deposition rate

REVESTIMENTOS DE MICROFERRAMENTAS

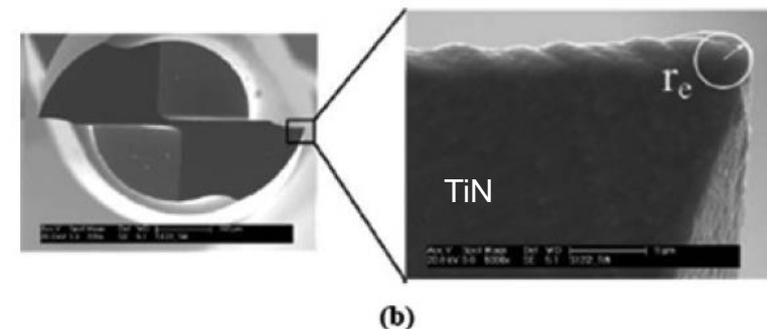
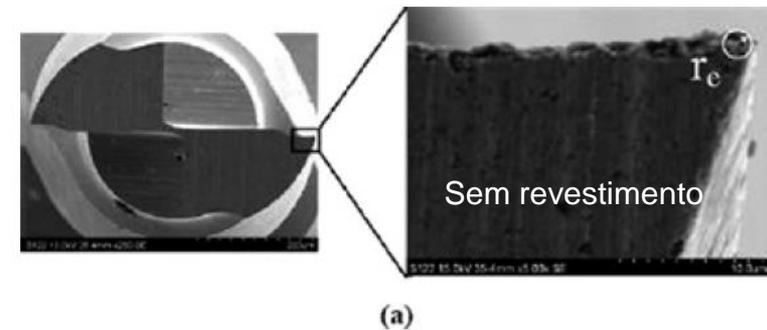
Multicamada: melhor resistência ao desgaste

Camada em nanoescala: + resistência, adesão, tenacidade e dureza

Camada única: propagação de trinca

Multicamada fina: freamento de trinca

Multicamada: camada de adesão



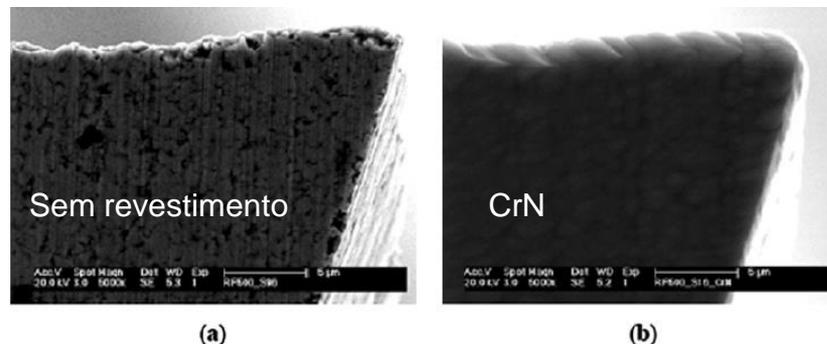
REVESTIMENTOS DE MICROFERRAMENTAS

Dureza e tenacidade do revestimento = $f(\text{período de revestimento})$

Período de revestimento: espessura de um depósito uniforme antes do fim de um ciclo de deposição

Cobertura PVD: centenas de camadas em nanoescala (espessura final 2-5 μm)

Espessura do revestimento afeta r_e no microcorte



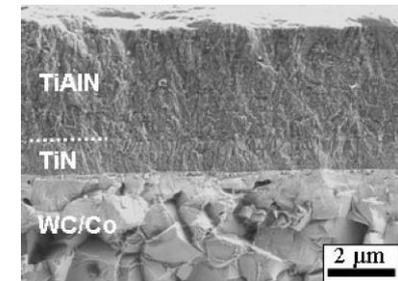
REVESTIMENTOS DE MICROFERRAMENTAS

TiN:

Aplicado em WC (1985)

Maior resistência ao desgaste e dureza do que WC

Boa adesão ao substrato



TiAlN:

TiN + Al

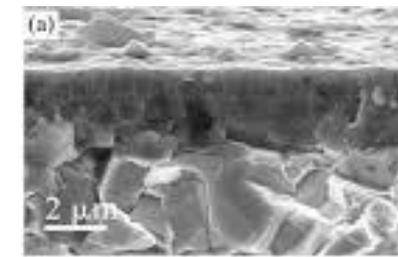
Maior temperatura de operação (900 °C)

Maior dureza, tenacidade, resist. ao desgaste, à oxidação, à corrosão do que TiN

A 750 °C gera alumina (camada lubrificante protetora)

CrTiAlN:

Elevada dureza, tenacidade, adesão e estabilidade térmica



Observação: microcorte => baixa v_c + efeito de escala \neq comportamento do revestimento em macroescala

IMPORTÂNCIA DE MICROFERRAMENTAS REVESTIDAS

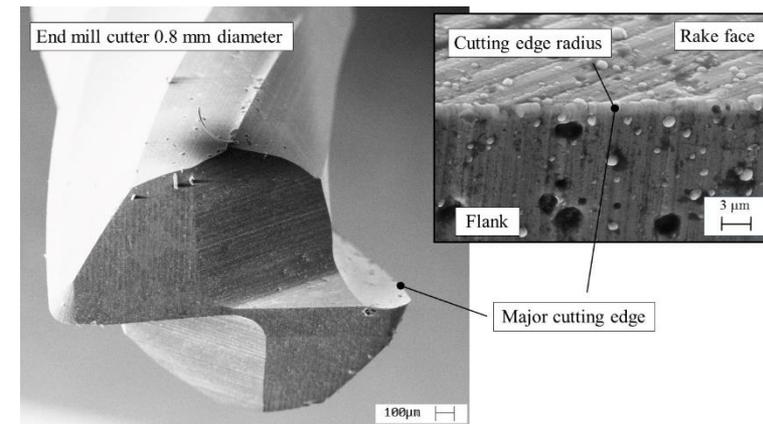
Tenacidade: substrato com grãos ultrafinos

PVD: maior v_c em microcorte a seco ou com MQL

Macro \neq microescala \Rightarrow temperatura na interface, força e campo de deformação

Revestimento para macro: alta dureza, tenacidade, resistência ao desgaste abrasivo e químico

Revestimento para micro: acima + densidade + microestrutura fina + superfície uniforme



MICROFERRAMENTAS DE DIAMANTE

Microtorneamento e *fly-cutting*: elevada dureza e pequeno r_e

Alta dureza: maior resistência ao desgaste e usinagem de cerâmicas

Muito pequeno r_e : menor h_{\min} e maior precisão

Processos: microtorneamento, microfresamento, microfuração e microrretificação

Ferramentas: diamante sintético monocristalino (peças de precisão e ópticas)

Raio de aresta < 20 nm aplicado em micropeças convexas

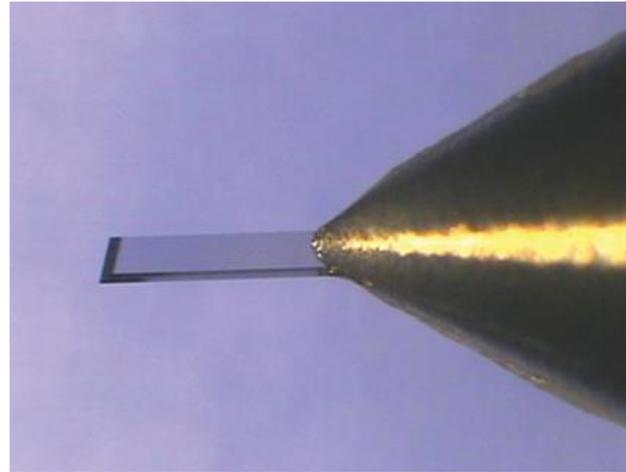
Ângulo de folga limita aplicações em cavidades côncavas

Microfresas de diamante \Leftrightarrow torneamento de ultraprecisão

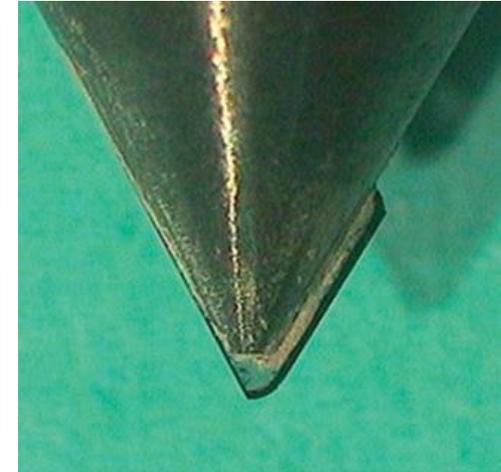
MICROFERRAMENTAS DE DIAMANTE



Arranjo de microlentes produzidas por microfresas de diamante



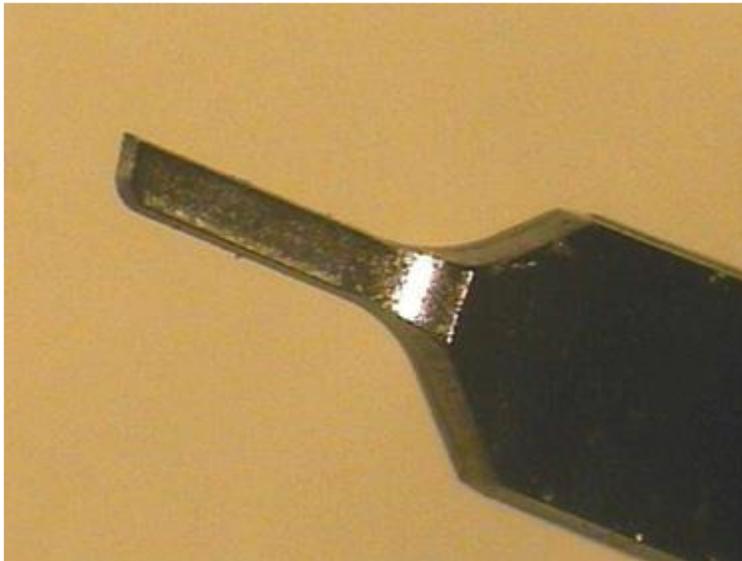
Microferramenta de diamante natural (diâmetro 0,3 mm)



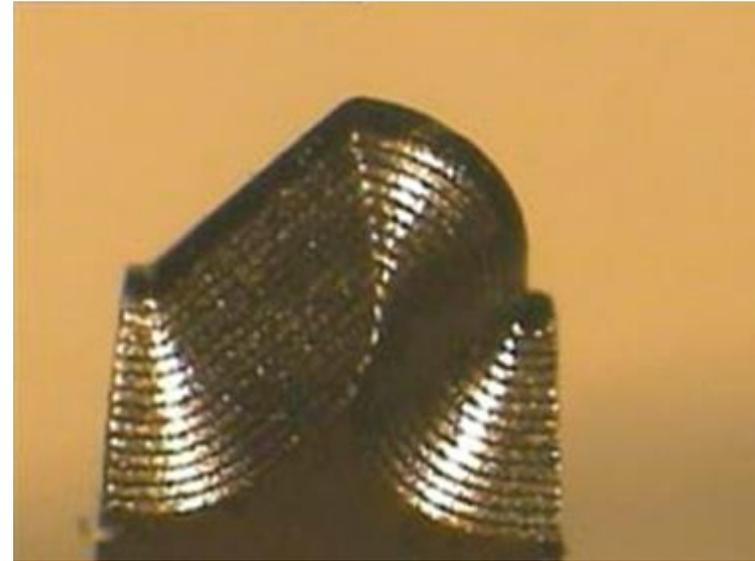
Microfresa *ball-nose* de diamante natural (raio de ponta de 0,5 mm)

MICROFERRAMENTAS DE DIAMANTE

Revestimentos de diamante CVD: usinagem de materiais ferrosos



Microfresa parabólica revestida com diamante via processo CVD



Microfresa *ball-nose* revestida com diamante via processo CVD

DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

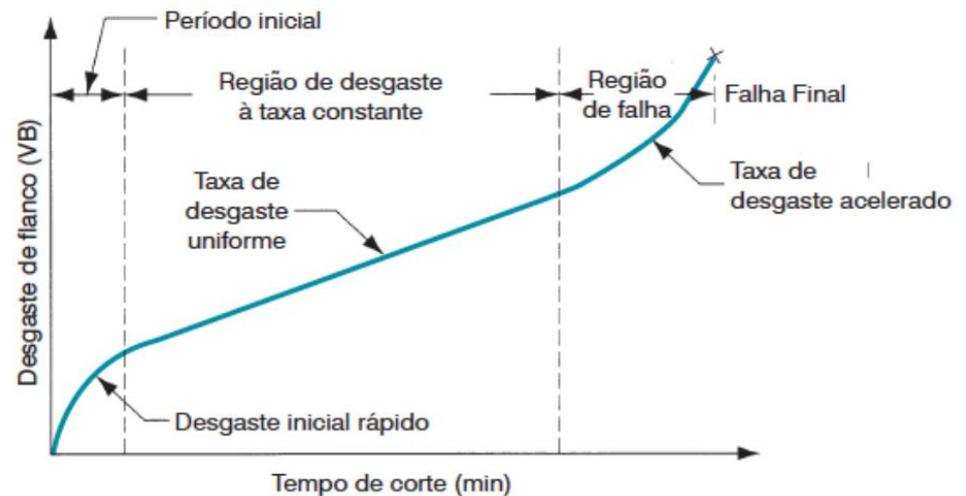
Microcorte: quebras e desgastes elevados

Desgaste = f(efeito de escala, recuperação elástica, ângulo de saída efetivo negativo, não homogeneidade do material da peça e L/D elevado)

Material da peça x desgaste: maior dureza + fase única

Períodos de desgaste = macroescala

- primário
- secundário
- terciário (pode não ocorrer em microescala)



DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

Pequenos \varnothing s + canais perfilados = + frágil, tensões, deflexões, *runout* => desgaste

Pequenos a_p + h = + atrito = + desgaste

Desgaste => rebarba, acabamento, precisão, erros de forma, tempo, custo

Macrofresamento: desgaste de flanco e cratera

Microfresamento: podem ser diferentes (efeito de escala ou parâmetros de corte super dimensionados x robustez da aresta de corte)

Indicadores de desgaste: maior r_e , desgaste de flanco, lascamento, quebra e $\downarrow \varnothing$

Norma ISO 8688-2 (1989): teste de vida em macrofresamento

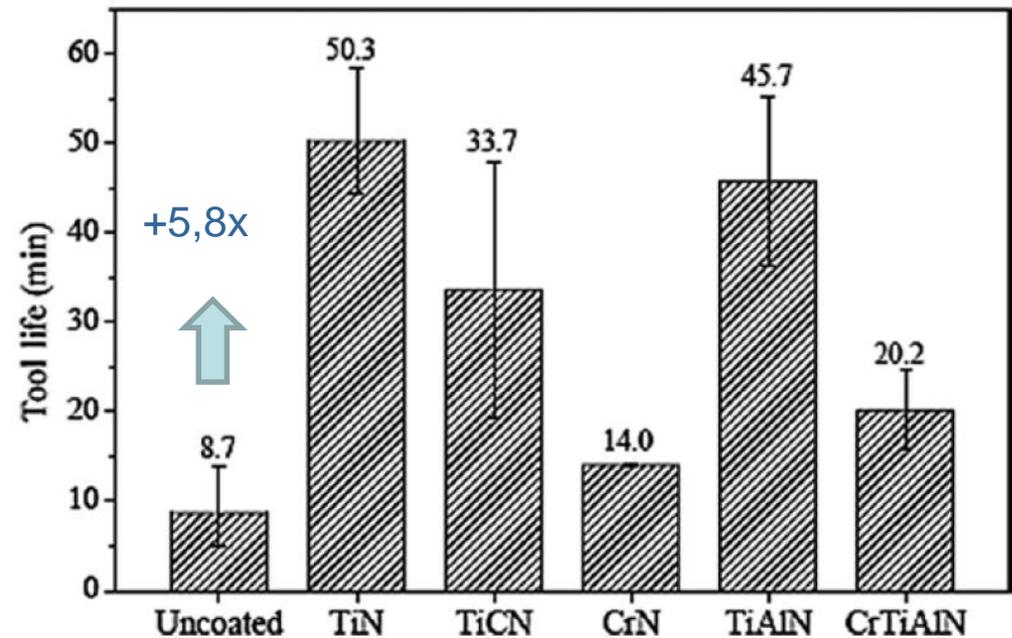
Norma de teste de vida para microfresamento?

DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

Desgastes medidos: $r_e = 20\text{-}25\ \mu\text{m}$
para materiais endurecidos
(quebra)

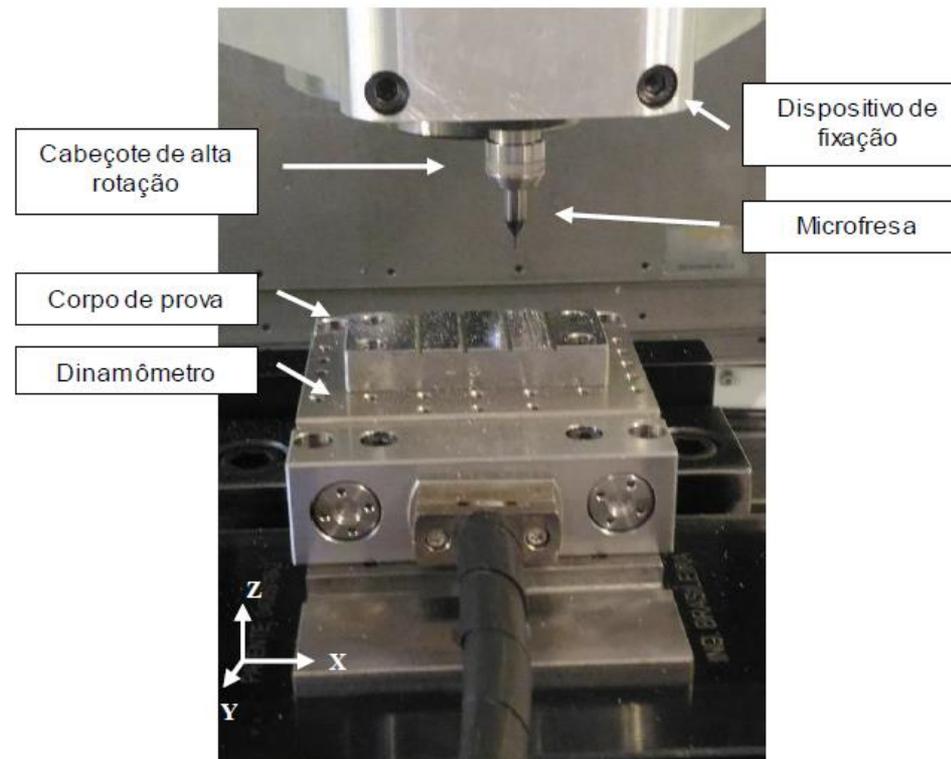
Monitoramento:

- parada: via imagens de alta resolução e ampliação (difícil na prática)
- *in-process*: aumento ou oscilação da força de corte, EA ou rebarba



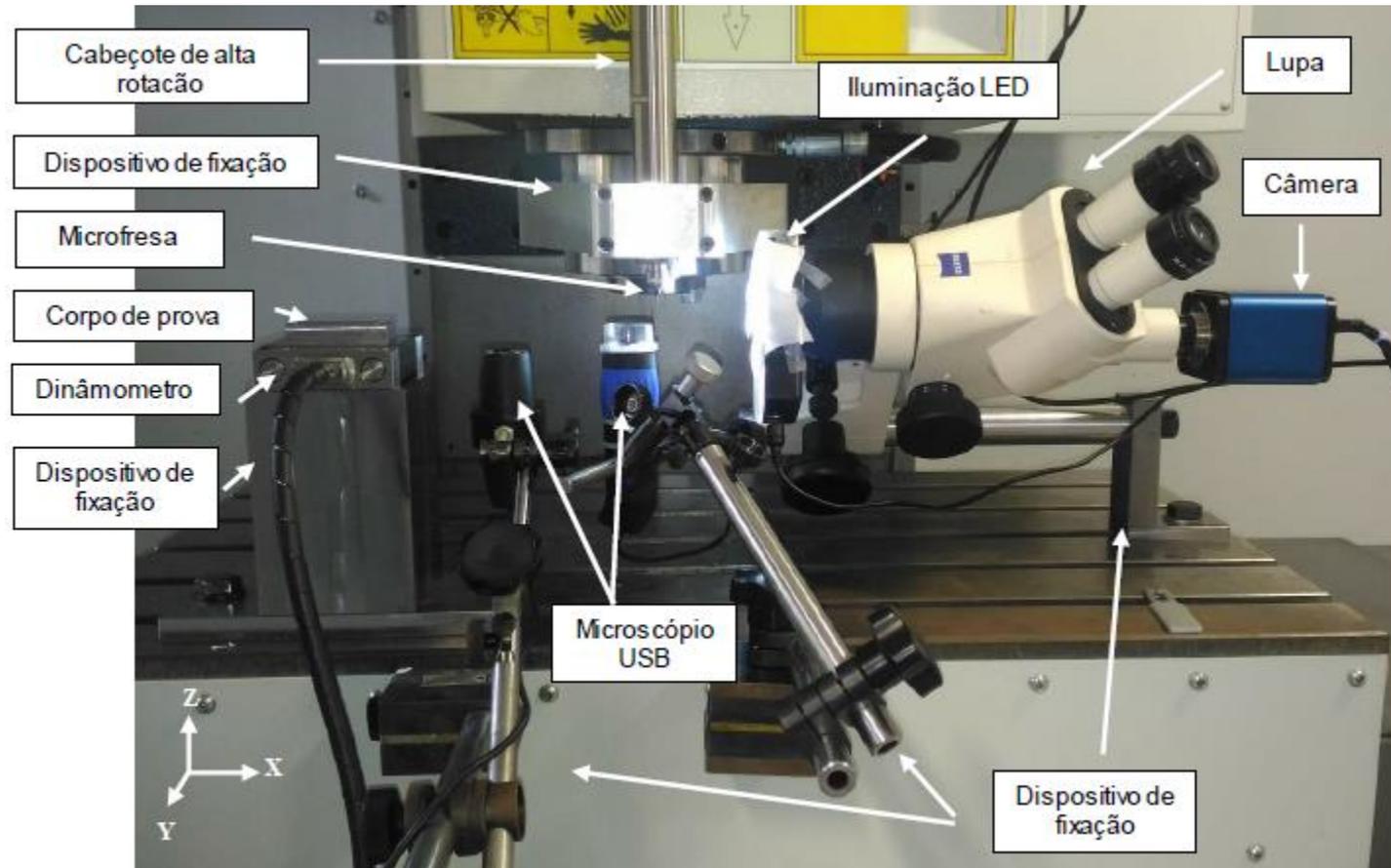
Microfresa $\varnothing 0,5\ \text{mm}$, aço H13 50 HRC
(Aramcharoen, 2009)

DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS



Norcino (2017)

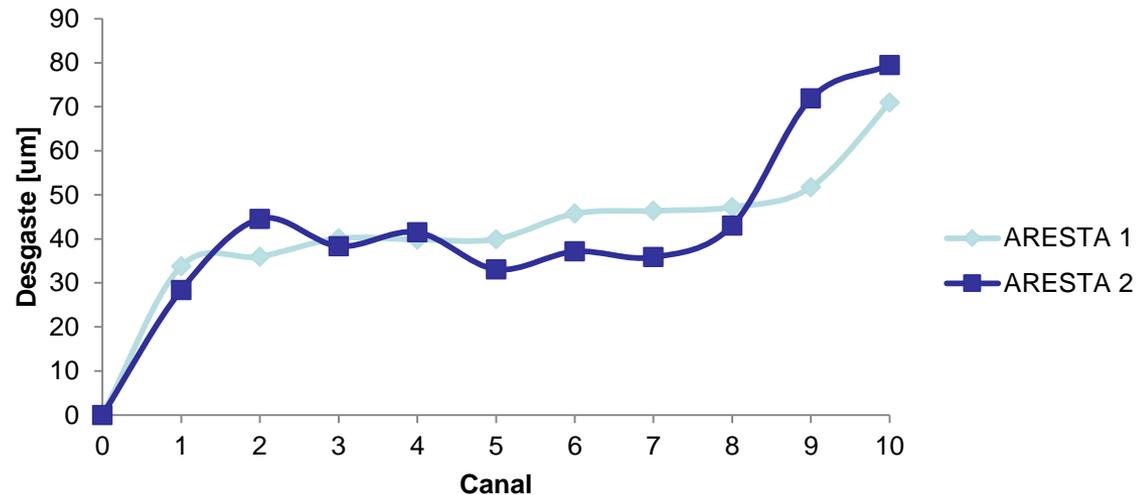
DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS



Norcino (2017)

DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

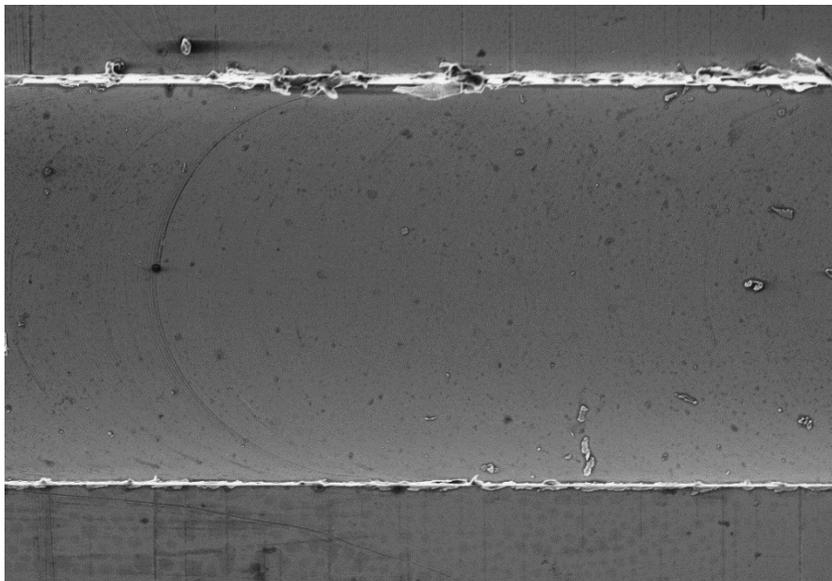
Flanco Secundário



Microfresa \varnothing 0,8 mm, TiAlN, peça GUF, $f_z = 3 \mu\text{m}$, corte em cheio
 $re = 2,74 \mu\text{m}$, $h_{\text{min}} = 0,82 \mu\text{m}$, $vc = 60 \text{ m/min}$. $L_c = 26 \text{ mm/canal}$

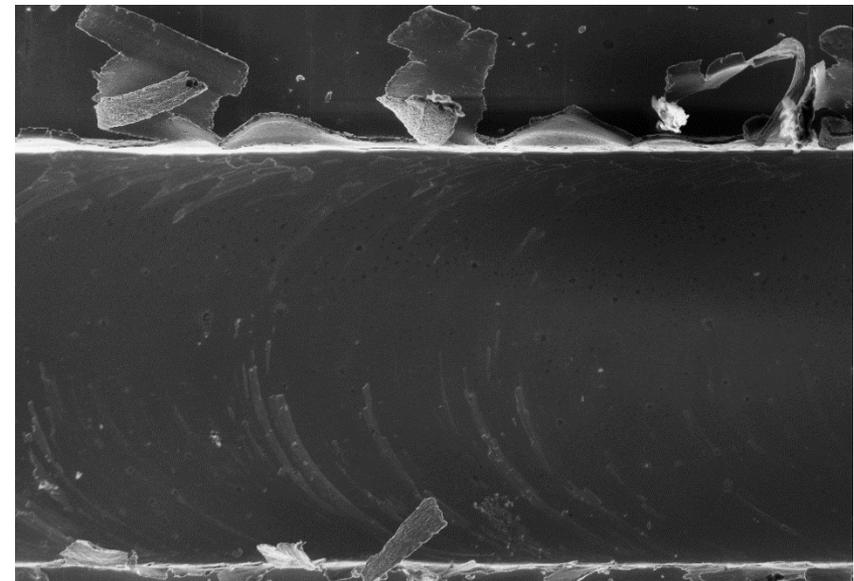
DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

Canais microfresados



IQSC EHT=20.00 kV WD= 15 mm Mag= 250 X Detector= SE1
30µm H Photo No.=112 2-Feb-2016

Ferramenta nova

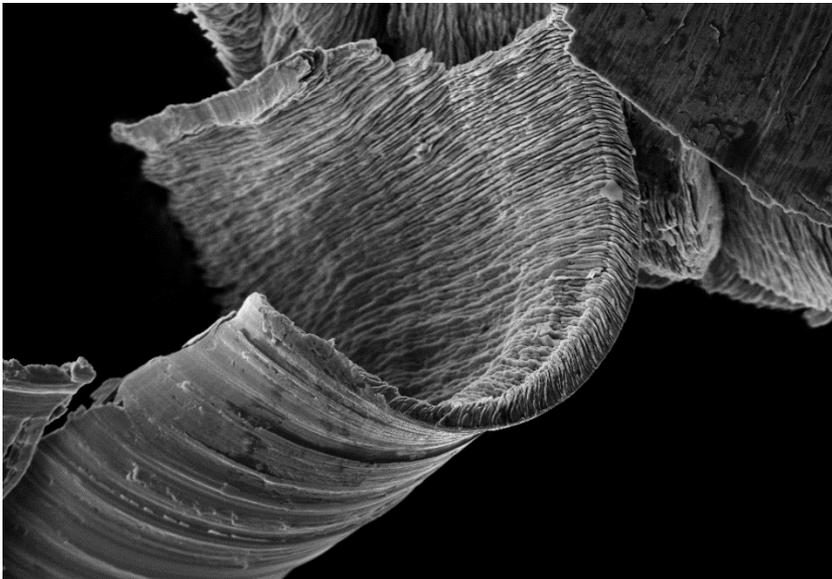


IQSC EHT=20.00 kV WD= 16 mm Mag= 250 X Detector= SE1
30µm H Photo No.=131 2-Feb-2016

Ferramenta desgastada

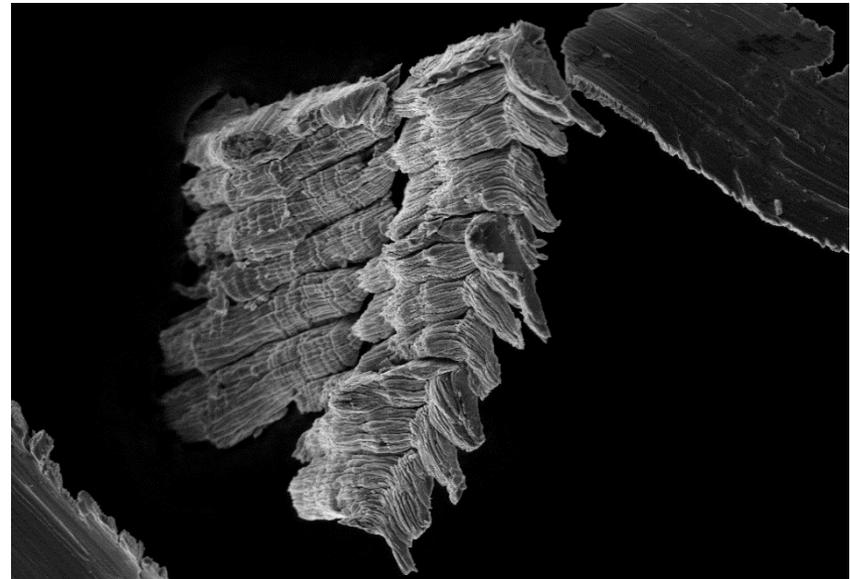
DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

Cavacos produzidos



IQSC EHT=20.00 kV WD= 10 mm Mag= 1.50 K X Detector= SE1
10µm | Photo No.=148 2-Feb-2016

Ferramenta nova

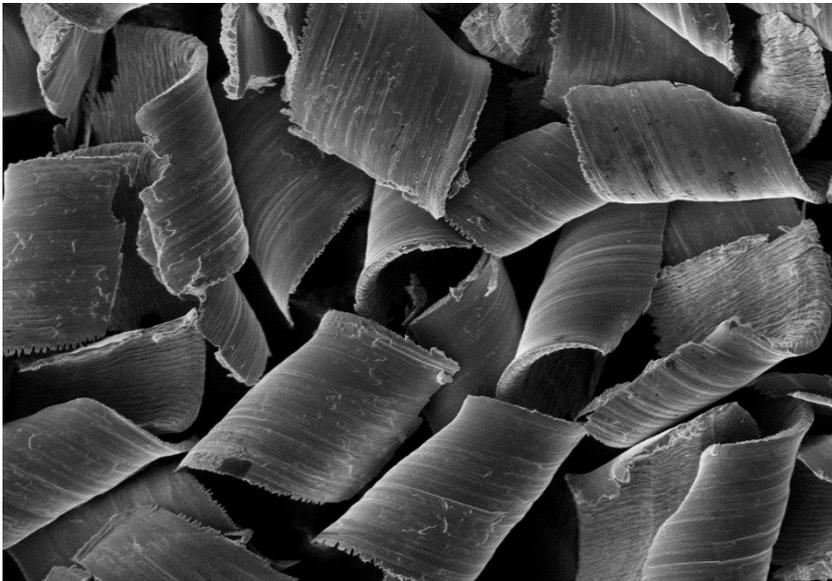


IQSC EHT=20.00 kV WD= 10 mm Mag= 1.30 K X Detector= SE1
10µm | Photo No.=372 23-Feb-2016

Ferramenta desgastada

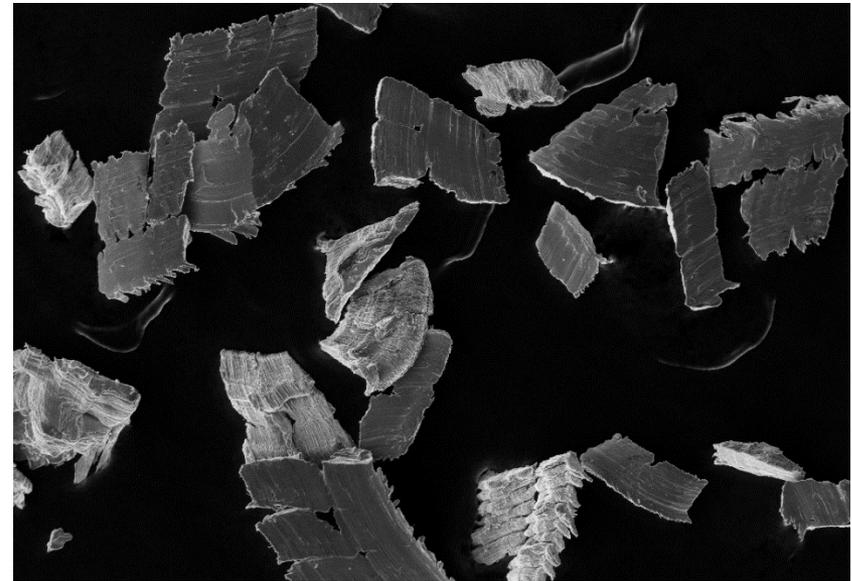
DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

Cavacos produzidos



IQSC EHT=20.00 kV WD= 10 mm Mag= 500 X Detector= SE1
30µm Photo No.=145 2-Feb-2016

Ferramenta nova

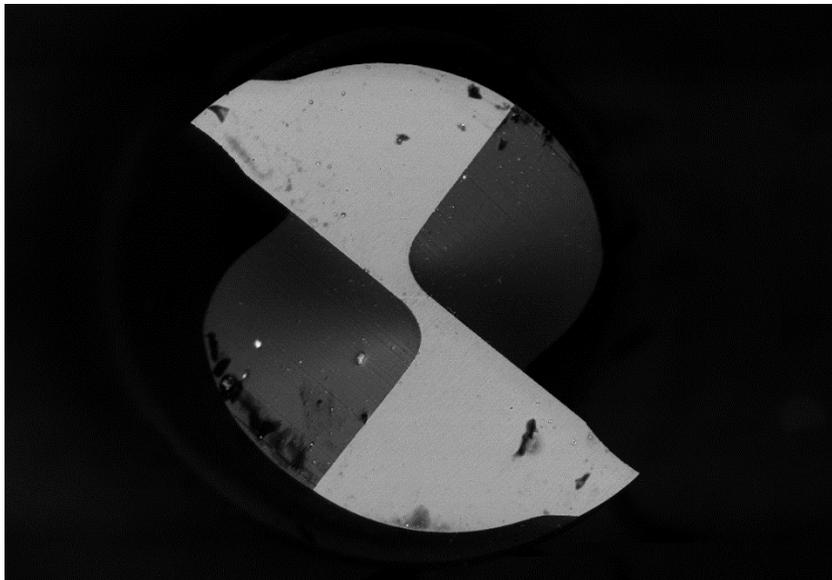


IQSC EHT=20.00 kV WD= 10 mm Mag= 350 X Detector= SE1
20µm Photo No.=373 23-Feb-2016

Ferramenta desgastada

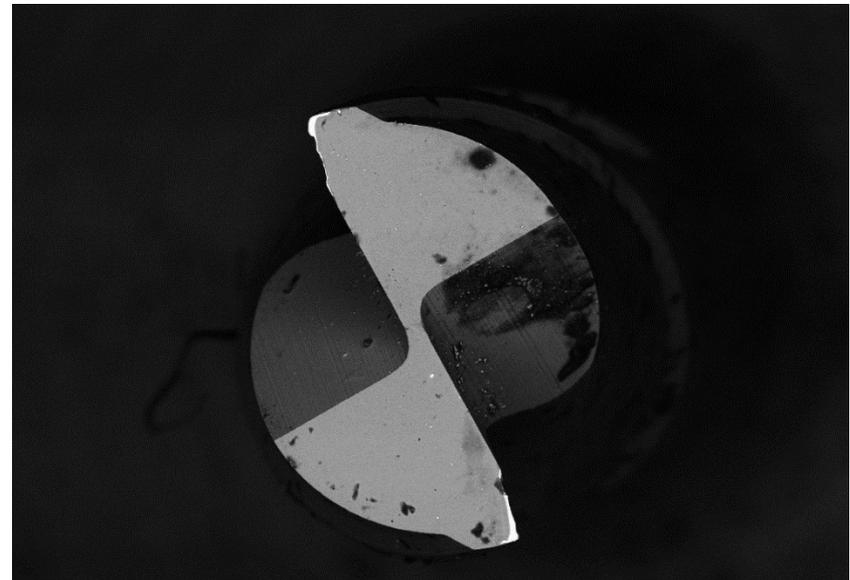
DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

Superfície de folga secundária



IQSC EHT=20.00 kV WD= 17 mm Mag= 350 X Detector= QBSD
20µm Photo No.=86 9-Sep-2016

Ferramenta nova

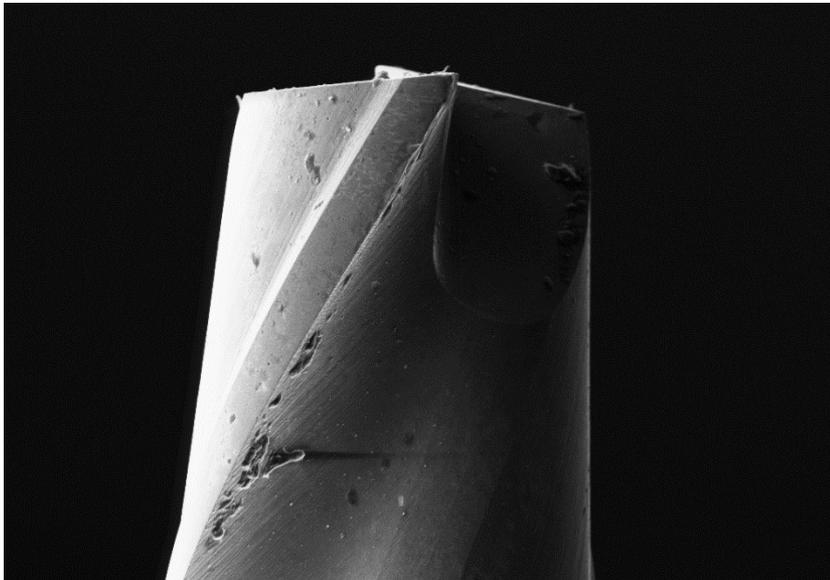


IQSC EHT=20.00 kV WD= 19 mm Mag= 300 X Detector= QBSD
20µm Photo No.=581 25-May-2016

Ferramenta desgastada

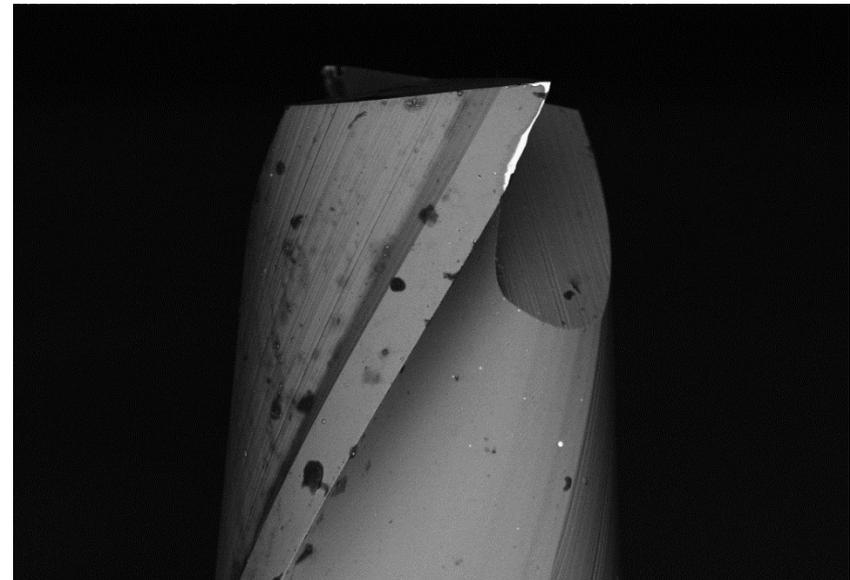
DESGASTE EM MICROFERRAMENTAS

Superfície de folga primária



IQSC EHT=20.00 kV WD= 18 mm Mag= 300 X Detector= SE1
30µm Photo No.=558 25-May-2016

Ferramenta nova



IQSC EHT=20.00 kV WD= 33 mm Mag= 300 X Detector= QBSD
20µm Photo No.=576 25-May-2016

Ferramenta desgastada

MICROFERRAMENTAS INTELIGENTES

Desafio em microcorte: predição do desgaste e da força de corte (quebra e desgaste prematuros)

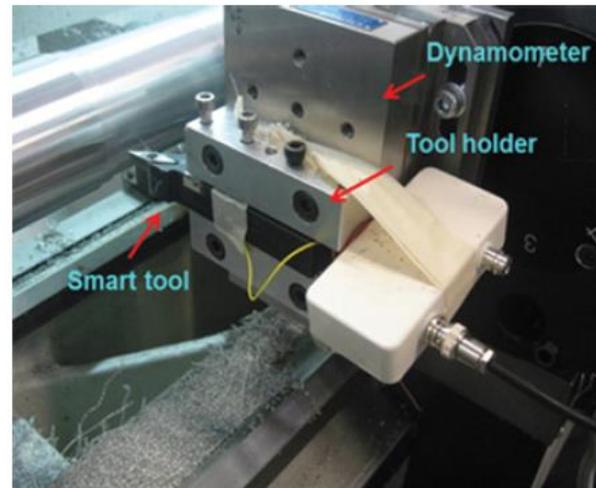
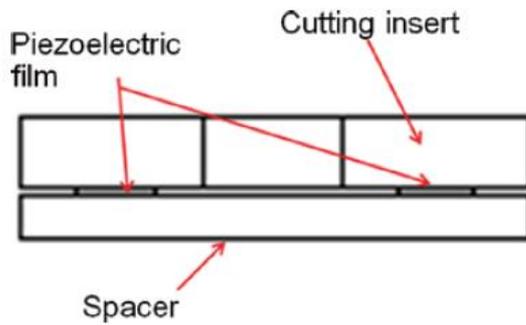
Custo: microferramenta > macroferramenta

Dinamometria: impraticável na indústria (custo, rigidez, frequência e ambiente)

Ferramentas inteligentes: sensores menos invasivos na peça ou ferramenta

MICROFERRAMENTAS INTELIGENTES

Single-layer piezoelectric film



Surface acoustic wave (SAW)

